

文部科学省 令和7年度科学技術調査資料作成委託事業

# 研究開発戦略立案に資する最先端研究の潮流に関する 調査業務

業務成果報告書

---

**MRI** 三菱総合研究所

2026年3月

フロンティア政策本部

防災・レジリエンス政策本部

創薬・健康エコシステム本部

安全保障政策本部

本報告書は、文部科学省の令和 7 年度科学技術調査資料作成委託事業による委託業務として、株式会社三菱総合研究所が実施した令和 7 年度「研究開発戦略立案に資する最先端研究の潮流に関する調査業務」の成果を取りまとめたものです。



---

## 目次

---

|  |     |
|--|-----|
| 1. 調査の概要 .....   | 1   |
| 1.1 背景・目的.....   | 1   |
| 1.2 調査内容 .....   | 1   |
| 1.3 調査フロー .....  | 1   |
| 1.4 本報告書の構成.....   | 2   |
| 2. 特定分野における俯瞰及び最先端研究開発の潮流の分析 .....   | 3   |
| 2.1 調査方法 .....   | 3   |
| 2.1.1 調査の手順.....   | 3   |
| 2.1.2 潮流の抽出.....   | 3   |
| 2.1.3 潮流に関する調査・中核研究者の検討.....   | 10  |
| 2.1.4 インタビュー調査項目の検討・インタビューの実施 .....  | 12  |
| 2.2 健康・医療・食料／バイオ分野 .....   | 13  |
| 2.2.1 潮流 A1:低・中分子創薬「モダリティ多様化とデリバリー・製造基盤の高度化」. 13                                   |     |
| 2.2.2 潮流 A2:AI 創薬「AI 駆動型創薬パイプラインの構築」.....  | 20  |
| 2.2.3 潮流 A3:遺伝子治療「遺伝子デリバリー×ゲノム編集による in vivo / ex vivo<br>遺伝子治療の高度化」.....           | 29  |
| 2.2.4 潮流 A4:ゲノム医療「個別化・精密医療インフラの構築」.....  | 36  |
| 2.2.5 潮流 A5:AI 診断・予防「AI による診断支援と予測・予防への展開」.....                                    | 45  |
| 2.2.6 潮流 A6:臓器連関「臓器間ネットワーク解析と介入標的探索」.....  | 54  |
| 2.2.7 潮流 A7:微生物ものづくり「微生物細胞工場による持続可能なバイオ生産」... 61                                   |     |
| 2.2.8 潮流 A8:細胞オミクス・空間オミクス「単細胞解析、空間情報及び時間軸による分<br>析への展開」.....                       | 69  |
| 2.3 環境・エネルギー分野 .....   | 79  |
| 2.3.1 潮流 B1:原子力発電「フュージョンエネルギー原型炉開発に向けた研究加速」.79                                     |     |
| 2.3.2 潮流 B2:CO2 回収・貯留「革新的 CO2 回収・貯留・利用技術」.....                                     | 86  |
| 2.3.3 潮流 B3:蓄エネルギー技術「革新的蓄電技術の発展」.....  | 92  |
| 2.3.4 潮流 B4:水素・アンモニア「水素・アンモニアの大量製造・輸送・利用技術確立」.97                                   |     |
| 2.3.5 潮流 B5:CO2 利用「CO2 を原料とした化学品・燃料合成プロセス」.....                                    | 103 |
| 2.3.6 潮流 B6:気候変動観測、気候変動予測「全球のモデリング、予測の高度化」... 110                                  |     |
| 2.3.7 潮流 B7:水循環(水資源・防災)「水循環観測技術と災害予測の連携」.....                                      | 116 |
| 2.3.8 潮流 B8:リサイクル「資源循環技術」.....   | 124 |
| 2.4 システム・情報科学技術分野.....   | 132 |
| 2.4.1 潮流 C1/C2:知覚・運動系の AI 技術「基盤モデル的なアプローチの画像分野への<br>適用/拡散モデル等による画像生成モデルの高精度化」..... | 132 |
| 2.4.2 潮流 C3:言語・知識系の AI 技術「大規模言語モデルの汎用性発見と急速な実用                                     |     |

|  |     |
|--|-----|
| 化の進展」  | 137 |
| 2.4.3 潮流 C4:人・AI 協働と意思決定支援「対話型 AI と協力した問題解決方法論の研究の進展」      | 144 |
| 2.4.4 潮流 C5:AI・データ駆動型問題解決「個別分野の問題を解く AI の成功から汎用的な科学者 AI へ」 | 151 |
| 2.4.5 潮流 C6:認知発達ロボティクス「トランスフォーマーに続く学習基本原理の探索」              | 159 |
| 2.4.6 潮流 C7:サービスロボット「実生活の無数のバリエーションに基盤モデル的なアプローチで対処」       | 168 |
| 2.4.7 潮流 C8:IoT セキュリティ「将来の情報通信基盤に対するセキュリティの確保」             | 173 |
| 2.5 ナノテクノロジー・材料分野  | 179 |
| 2.5.1 潮流 D1:分子技術「触媒反応による有機合成の進展」                           | 179 |
| 2.5.2 潮流 D2:分子技術「高分子配列の制御技術の進展」                            | 189 |
| 2.5.3 潮流 D3:次世代元素戦略「新機能獲得に向けた広域な材料探索」                      | 199 |
| 2.5.4 潮流 D4:次世代元素戦略「循環型材料の開発」                              | 208 |
| 2.5.5 潮流 D5:データ駆動型物質・材料開発「プロセス・インフォマティクスの進展」               | 218 |
| 2.5.6 潮流 D6:フォノンエンジニアリング「熱電変換・熱伝導制御技術の進展」                  | 224 |
| 2.5.7 潮流 D7:量子マテリアル「量子性発現技術の進展」                            | 230 |
| 2.5.8 潮流 D8:有機無機ハイブリッド「有機無機ハイブリッドペロブスカイトの特性理解」             | 238 |
| 3. 今後の潮流となりうる研究の方向性  | 245 |
| 3.1.1 健康・医療・食料/バイオ分野                                       | 245 |
| 3.1.2 環境・エネルギー分野   | 247 |
| 3.1.3 システム・情報科学技術分野  | 248 |
| 3.1.4 ナノテクノロジー・材料分野  | 250 |
| 4. 最先端研究の潮流と戦略的創造研究推進事業等の対応                                | 252 |
| 4.1 調査方法   | 252 |
| 4.2 調査結果   | 252 |
| 5. まとめ   | 256 |
| 5.1 「政府が把握・推進すべき最先端研究」の要件                                  | 256 |
| 5.2 最先端研究の潮流の把握方法  | 258 |
| 5.2.1 共通言語(俯瞰資料)の整備  | 258 |
| 5.2.2 中核研究者による協力   | 258 |
| 5.2.3 俯瞰資料の更新と継続的把握の仕組みづくり                                 | 259 |
| 5.3 政府が把握・推進すべき最先端研究」の推進方策                                 | 260 |

|  |     |
|--|-----|
| 5.3.1 研究育成段階における制度的支援.....             | 260 |
| 5.3.2 次フェーズへの制度設計 .....                | 261 |
| 5.3.3 複数制度を組み合わせたポートフォリオ設計 .....       | 262 |
| 5.4 残された課題と今後の対応方策 .....               | 263 |
| 5.4.1 技術トレンドや今後の研究の潮流の方向性に関する詳細調査..... | 263 |
| 5.4.2 俯瞰資料の更新と継続的把握の方法の具体化 .....       | 263 |
| 5.4.3 把握した潮流を研究領域設定につなぐプロセスの構築.....    | 264 |

---

## 目次

---

|   |     |
|---|-----|
| 図 1-1 本調査の調査フロー   | 2   |
| 図 2-1 本調査の調査フロー(うち潮流の検討部分)  | 3   |
| 図 2-2 技術的進歩と方向性の概要図「モダリティ多様化とデリバリー・製造基盤の高度化」  | 13  |
| 図 2-3 技術的進歩と方向性の概要図「AI 駆動型創薬パイプラインの構築 AI 駆動型創薬パイプラインの構築」  | 20  |
| 図 2-4 技術的進歩と方向性の概要図「遺伝子デリバリー×ゲノム編集による in vivo / ex vivo 遺伝子治療の高度化遺伝子デリバリー×ゲノム編集による in vivo / ex vivo 遺伝子治療の高度化」 | 29  |
| 図 2-5 技術的進歩と方向性の概要図「個別化・精密医療インフラの構築」  | 36  |
| 図 2-6 技術的進歩と方向性の概要図「AI による診断支援と予測・予防への展開」   | 45  |
| 図 2-7 技術的進歩と方向性の概要図「臓器間ネットワーク解析と介入標的探索」   | 54  |
| 図 2-8 技術的進歩と方向性の概要図「微生物細胞工場による持続可能なバイオ生産」   | 61  |
| 図 2-9 技術的進歩と方向性の概要図「単細胞解析、空間情報及び時間軸による分析への展開」   | 69  |
| 図 2-10 技術的進歩と方向性の概要図「フュージョンエネルギー原型炉開発に向けた研究加速」  | 79  |
| 図 2-11 技術的進歩と方向性の概要図「革新的 CO2 回収・貯留・利用技術」  | 86  |
| 図 2-12 技術的進歩と方向性の概要図「革新的蓄電技術の発展」  | 92  |
| 図 2-13 技術的進歩と方向性の概要図「水素・アンモニアの大量製造・輸送・利用技術確立」   | 97  |
| 図 2-14 技術的進歩と方向性の概要図「CO2 を原料とした化学品・燃料合成プロセス」  | 103 |
| 図 2-15 技術的進歩と方向性の概要図「全球のモデリング、予測の高度化」   | 110 |
| 図 2-16 技術的進歩と方向性の概要図「水循環観測技術と災害予測の連携」   | 116 |
| 図 2-17 技術的進歩と方向性の概要図「資源循環技術」  | 124 |
| 図 2-18 技術的進歩と方向性の概要図「基盤モデル的なアプローチの画像分野への適用/拡散モデル等による画像生成モデルの高精度化」   | 132 |
| 図 2-19 技術的進歩と方向性の概要図「大規模言語モデルの汎用性発見と急速な実用化の進展」  | 137 |
| 図 2-20 技術的進歩と方向性の概要図「対話型 AI と協力した問題解決方法論の研究の進展」   | 144 |
| 図 2-21 技術的進歩と方向性の概要図「個別分野の問題を解く AI の成功から汎用的な科学者 AI へ」   | 151 |
| 図 2-22 技術的進歩と方向性の概要図「トランスフォーマーに続く学習基本原理の探索」   | 159 |
| 図 2-23 技術的進歩と方向性の概要図「実生活の無数のバリエーションに基盤モデル的なアプローチで対処」  | 168 |
| 図 2-24 技術的進歩と方向性の概要図「将来の情報通信基盤に対するセキュリティの確保」  | 173 |
| 図 2-25 技術的進歩と方向性の概要図「触媒反応による有機合成の進展」  | 179 |
| 図 2-26 技術的進歩と方向性の概要図「高分子配列の制御技術の進展」   | 189 |
| 図 2-27 技術的進歩と方向性の概要図「新機能獲得に向けた広域な材料探索」  | 199 |
| 図 2-28 技術的進歩と方向性の概要図「循環型材料の開発」  | 208 |
| 図 2-29 技術的進歩と方向性の概要図「プロセス・インフォマティクスの進展」   | 218 |
| 図 2-30 技術的進歩と方向性の概要図「熱電変換・熱伝導制御技術の進展」   | 225 |

|   |     |
|---|-----|
| 図 2-31 技術的進歩と方向性の概要図「量子性発現技術の進展」.....             | 230 |
| 図 2-32 技術的進歩と方向性の概要図「有機無機ハイブリッドペロブスカイトの特性理解」..... | 238 |

---

## 表 目次

---

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 表 2-1  | 潮流の抽出条件・抽出手順等(健康・医療・食料／バイオ分野及び環境・エネルギー分野)                    | 1  |
| 表 2-2  | 潮流の抽出条件・抽出手順等(システム・情報科学技術分野及びナノテクノロジー・材料分野)                  | 2  |
| 表 2-3  | 調査対象とした潮流(健康・医療・食料／バイオ分野)                                    | 1  |
| 表 2-4  | 調査対象とした潮流(健康・医療・食料／バイオ分野)                                    | 2  |
| 表 2-5  | 調査対象とした潮流(環境・エネルギー分野)  | 3  |
| 表 2-6  | 調査対象とした潮流(環境・エネルギー分野)  | 4  |
| 表 2-7  | 調査対象とした潮流()  | 5  |
| 表 2-8  | 調査対象とした潮流(システム・情報科学技術分野)                                     | 6  |
| 表 2-9  | 調査対象とした潮流(ナノテクノロジー・材料分野)                                     | 8  |
| 表 2-10 | 情報収集項目・収集内容  | 10 |
| 表 2-11 | 調査に用いた生成 AI プロンプト  | 10 |
| 表 2-12 | インタビュー調査項目   | 12 |
| 表 2-13 | 技術的進歩と方向性(概要)「モダリティ多様化とデリバリー・製造基盤の高度化」                       | 14 |
| 表 2-14 | タイムライン「モダリティ多様化とデリバリー・製造基盤の高度化」                              | 15 |
| 表 2-15 | キーテクノロジー「モダリティ多様化とデリバリー・製造基盤の高度化」                            | 16 |
| 表 2-16 | 実用化可能性「モダリティ多様化とデリバリー・製造基盤の高度化」                              | 17 |
| 表 2-17 | 今後の潮流および研究の方向性「モダリティ多様化とデリバリー・製造基盤の高度化」                      | 18 |
| 表 2-18 | 技術的進歩と方向性(概要)「AI 駆動型創薬パイプラインの構築」                             | 21 |
| 表 2-19 | タイムライン「AI 駆動型創薬パイプラインの構築」                                    | 21 |
| 表 2-20 | キーテクノロジー「AI 駆動型創薬パイプラインの構築」                                  | 23 |
| 表 2-21 | 実用化可能性「AI 駆動型創薬パイプラインの構築」                                    | 24 |
| 表 2-22 | 今後の潮流および研究の方向性「AI 駆動型創薬パイプラインの構築 AI 駆動型創薬パイプラインの構築」          | 26 |
| 表 2-23 | 技術的進歩と方向性(概要)「遺伝子デリバリー×ゲノム編集による in vivo / ex vivo 遺伝子治療の高度化」 | 30 |
| 表 2-24 | タイムライン「遺伝子デリバリー×ゲノム編集による in vivo / ex vivo 遺伝子治療の高度化」        | 31 |
| 表 2-25 | キーテクノロジー「遺伝子デリバリー×ゲノム編集による in vivo / ex vivo 遺伝子治療の高度化」      | 31 |
| 表 2-26 | 実用化可能性「遺伝子デリバリー×ゲノム編集による in vivo / ex vivo 遺伝子治療の高度化」        | 32 |
| 表 2-27 | 技術的進歩と方向性(概要)「個別化・精密医療インフラの構築」                               | 37 |
| 表 2-28 | タイムライン「個別化・精密医療インフラの構築」                                      | 38 |
| 表 2-29 | キーテクノロジー「個別化・精密医療インフラの構築」                                    | 39 |
| 表 2-30 | 実用化可能性「個別化・精密医療インフラの構築」                                      | 41 |
| 表 2-22 | 今後の潮流および研究の方向性「個別化・精密医療インフラの構築」                              | 42 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 表 2-31 | 技術的進歩と方向性(概要)「個別化・精密医療インフラの構築」           | 45  |
| 表 2-32 | タイムライン「個別化・精密医療インフラの構築」                  | 47  |
| 表 2-33 | キーテクノロジー「個別化・精密医療インフラの構築」                | 48  |
| 表 2-34 | 実用化可能性「個別化・精密医療インフラの構築」                  | 50  |
| 表 2-35 | 技術的進歩と方向性(概要)「臓器間ネットワーク解析と介入標的探索」        | 55  |
| 表 2-36 | タイムライン「臓器間ネットワーク解析と介入標的探索」               | 55  |
| 表 2-37 | キーテクノロジー「臓器間ネットワーク解析と介入標的探索」             | 56  |
| 表 2-38 | 実用化可能性「臓器間ネットワーク解析と介入標的探索」               | 58  |
| 表 2-39 | 技術的進歩と方向性(概要)「微生物細胞工場による持続可能なバイオ生産」      | 62  |
| 表 2-40 | タイムライン「微生物細胞工場による持続可能なバイオ生産」             | 63  |
| 表 2-41 | キーテクノロジー「微生物細胞工場による持続可能なバイオ生産」           | 64  |
| 表 2-42 | 実用化可能性「微生物細胞工場による持続可能なバイオ生産」             | 66  |
| 表 2-43 | 今後の潮流および研究の方向性「微生物細胞工場による持続可能なバイオ生産」     | 66  |
| 表 2-44 | 技術的進歩と方向性(概要)「単細胞解析、空間情報及び時間軸による分析への展開」  | 69  |
| 表 2-45 | タイムライン「単細胞解析、空間情報及び時間軸による分析への展開」         | 71  |
| 表 2-46 | キーテクノロジー「単細胞解析、空間情報及び時間軸による分析への展開」       | 72  |
| 表 2-47 | 実用化可能性「単細胞解析、空間情報及び時間軸による分析への展開」         | 74  |
| 表 2-48 | 今後の潮流および研究の方向性「単細胞解析、空間情報及び時間軸による分析への展開」 | 75  |
| 表 2-49 | 技術的進歩と方向性(概要)「フュージョンエネルギー原型炉開発に向けた研究加速」  | 79  |
| 表 2-50 | タイムライン「フュージョンエネルギー原型炉開発に向けた研究加速」         | 81  |
| 表 2-51 | キーテクノロジー「フュージョンエネルギー原型炉開発に向けた研究加速」       | 82  |
| 表 2-52 | 実用化可能性「フュージョンエネルギー原型炉開発に向けた研究加速」         | 83  |
| 表 2-53 | 今後の潮流および研究の方向性「フュージョンエネルギー原型炉開発に向けた研究加速」 | 83  |
| 表 2-54 | 技術的進歩と方向性(概要)「革新的 CO2 回収・貯留・利用技術」        | 86  |
| 表 2-55 | タイムライン「革新的 CO2 回収・貯留・利用技術」               | 87  |
| 表 2-56 | キーテクノロジー「革新的 CO2 回収・貯留・利用技術」             | 88  |
| 表 2-57 | 実用化可能性「革新的 CO2 回収・貯留・利用技術」               | 89  |
| 表 2-58 | 今後の潮流および研究の方向性「革新的 CO2 回収・貯留・利用技術」       | 89  |
| 表 2-59 | 技術的進歩と方向性(概要)「革新的蓄電技術の発展」                | 92  |
| 表 2-60 | タイムライン「革新的蓄電技術の発展」                       | 93  |
| 表 2-61 | キーテクノロジー「革新的蓄電技術の発展」                     | 93  |
| 表 2-62 | 実用化可能性「革新的蓄電技術の発展」                       | 94  |
| 表 2-63 | 今後の潮流および研究の方向性「革新的蓄電技術の発展」               | 95  |
| 表 2-64 | 技術的進歩と方向性(概要)「水素・アンモニアの大量製造・輸送・利用技術確立」   | 97  |
| 表 2-65 | タイムライン「水素・アンモニアの大量製造・輸送・利用技術確立」          | 98  |
| 表 2-66 | キーテクノロジー「水素・アンモニアの大量製造・輸送・利用技術確立」        | 99  |
| 表 2-67 | 実用化可能性「水素・アンモニアの大量製造・輸送・利用技術確立」          | 100 |
| 表 2-68 | 今後の潮流および研究の方向性「水素・アンモニアの大量製造・輸送・利用技術確立」  | 101 |
| 表 2-69 | 技術的進歩と方向性(概要)「CO2 を原料とした化学品・燃料合成プロセス」    | 104 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 表 2-70  | タイムライン「CO <sub>2</sub> を原料とした化学品・燃料合成プロセス」                 | 105 |
| 表 2-71  | キーテクノロジー「CO <sub>2</sub> を原料とした化学品・燃料合成プロセス」               | 106 |
| 表 2-72  | 実用化可能性「CO <sub>2</sub> を原料とした化学品・燃料合成プロセス」                 | 107 |
| 表 2-73  | 今後の潮流および研究の方向性「CO <sub>2</sub> を原料とした化学品・燃料合成プロセス」         | 108 |
| 表 2-74  | 技術的進歩と方向性(概要)「全球のモデリング、予測の高度化」                             | 111 |
| 表 2-75  | タイムライン「全球のモデリング、予測の高度化」                                    | 111 |
| 表 2-76  | キーテクノロジー「全球のモデリング、予測の高度化」                                  | 112 |
| 表 2-77  | 実用化可能性「全球のモデリング、予測の高度化」                                    | 113 |
| 表 2-78  | 今後の潮流および研究の方向性「全球のモデリング、予測の高度化」                            | 114 |
| 表 2-79  | 技術的進歩と方向性(概要)「水循環観測技術と災害予測の連携」                             | 117 |
| 表 2-80  | タイムライン「水循環観測技術と災害予測の連携」                                    | 118 |
| 表 2-81  | キーテクノロジー「水循環観測技術と災害予測の連携」                                  | 119 |
| 表 2-82  | 実用化可能性「水循環観測技術と災害予測の連携」                                    | 120 |
| 表 2-83  | 今後の潮流および研究の方向性「水循環観測技術と災害予測の連携」                            | 121 |
| 表 2-84  | 技術的進歩と方向性(概要)「資源循環技術」                                      | 124 |
| 表 2-85  | タイムライン「資源循環技術」   | 126 |
| 表 2-86  | キーテクノロジー「資源循環技術」   | 127 |
| 表 2-87  | 実用化可能性「資源循環技術」   | 128 |
| 表 2-88  | 今後の潮流および研究の方向性「資源循環技術」                                     | 129 |
| 表 2-89  | 技術的進歩と方向性(概要)「基盤モデル的なアプローチの画像分野への適用/拡散モデル等による画像生成モデルの高精度化」 | 133 |
| 表 2-90  | タイムライン「基盤モデル的なアプローチの画像分野への適用/拡散モデル等による画像生成モデルの高精度化」        | 133 |
| 表 2-91  | キーテクノロジー「基盤モデル的なアプローチの画像分野への適用/拡散モデル等による画像生成モデルの高精度化」      | 134 |
| 表 2-92  | 実用化可能性「基盤モデル的なアプローチの画像分野への適用/拡散モデル等による画像生成モデルの高精度化」        | 136 |
| 表 2-93  | 技術的進歩と方向性(概要)「大規模言語モデルの汎用性発見と急速な実用化の進展」                    | 138 |
| 表 2-94  | タイムライン「大規模言語モデルの汎用性発見と急速な実用化の進展」                           | 138 |
| 表 2-95  | キーテクノロジー「大規模言語モデルの汎用性発見と急速な実用化の進展」                         | 139 |
| 表 2-96  | 実用化可能性「大規模言語モデルの汎用性発見と急速な実用化の進展」                           | 141 |
| 表 2-97  | 今後の潮流および研究の方向性「大規模言語モデルの汎用性発見と急速な実用化の進展」                   | 142 |
| 表 2-98  | 技術的進歩と方向性(概要)「対話型 AI と協力した問題解決方法論の研究の進展」                   | 145 |
| 表 2-99  | タイムライン「対話型 AI と協力した問題解決方法論の研究の進展」                          | 145 |
| 表 2-100 | キーテクノロジー「対話型 AI と協力した問題解決方法論の研究の進展」                        | 147 |
| 表 2-101 | 実用化可能性「対話型 AI と協力した問題解決方法論の研究の進展」                          | 148 |
| 表 2-102 | 今後の潮流および研究の方向性「対話型 AI と協力した問題解決方法論の研究の進展」                  | 149 |
| 表 2-103 | 技術的進歩と方向性(概要)「対話型 AI と協力した問題解決方法論の研究の進展」                   | 152 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 表 2-104 | タイムライン「対話型 AI と協力した問題解決方法論の研究の進展」               | 152 |
| 表 2-105 | キーテクノロジー「対話型 AI と協力した問題解決方法論の研究の進展」             | 154 |
| 表 2-106 | 実用化可能性「対話型 AI と協力した問題解決方法論の研究の進展」               | 156 |
| 表 2-107 | 今後の潮流および研究の方向性「個別分野の問題を解く AI の成功から汎用的な科学者 AI へ」 | 156 |
| 表 2-108 | 技術的進歩と方向性(概要)「トランスフォーマーに続く学習基本原理の探索」            | 160 |
| 表 2-109 | タイムライン「基盤モデル的なアプローチの画像分野への適用」(機械学習アーキテクチャ)      | 160 |
| 表 2-110 | タイムライン「基盤モデル的なアプローチの画像分野への適用」(脳科学・認知科学)         | 161 |
| 表 2-111 | タイムライン「基盤モデル的なアプローチの画像分野への適用」(量子機械学習)           | 162 |
| 表 2-112 | キーテクノロジー「トランスフォーマーに続く学習基本原理の探索」                 | 162 |
| 表 2-113 | 実用化可能性「トランスフォーマーに続く学習基本原理の探索」                   | 164 |
| 表 2-114 | 今後の潮流および研究の方向性「トランスフォーマーに続く学習基本原理の探索」(1/2)      | 165 |
| 表 2-115 | 今後の潮流および研究の方向性「トランスフォーマーに続く学習基本原理の探索」(2/2)      | 166 |
| 表 2-116 | 技術的進歩と方向性(概要)「実生活の無数のバリエーションに基盤モデル的なアプローチで対処」   | 169 |
| 表 2-117 | タイムライン「実生活の無数のバリエーションに基盤モデル的なアプローチで対処」          | 169 |
| 表 2-118 | キーテクノロジー「実生活の無数のバリエーションに基盤モデル的なアプローチで対処」        | 170 |
| 表 2-119 | 実用化可能性「実生活の無数のバリエーションに基盤モデル的なアプローチで対処」          | 171 |
| 表 2-120 | 技術的進歩と方向性(概要)「将来の情報通信基盤に対するセキュリティの確保」           | 174 |
| 表 2-121 | タイムライン「将来の情報通信基盤に対するセキュリティの確保」                  | 175 |
| 表 2-122 | キーテクノロジー「将来の情報通信基盤に対するセキュリティの確保」                | 176 |
| 表 2-123 | 実用化可能性「将来の情報通信基盤に対するセキュリティの確保」                  | 178 |
| 表 2-124 | 技術的進歩と方向性(概要)「触媒反応による有機合成の進展」                   | 180 |
| 表 2-125 | タイムライン「触媒反応による有機合成の進展」                          | 181 |
| 表 2-126 | キーテクノロジー「触媒反応による有機合成の進展」                        | 182 |
| 表 2-127 | 実用化可能性「触媒反応による有機合成の進展」                          | 184 |
| 表 2-128 | 今後の潮流および研究の方向性「触媒反応による有機合成の進展」                  | 185 |
| 表 2-129 | 技術的進歩と方向性(概要)「高分子配列の制御技術の進展」                    | 190 |
| 表 2-130 | タイムライン「高分子配列の制御技術の進展」                           | 190 |
| 表 2-131 | キーテクノロジー「高分子配列の制御技術の進展」                         | 191 |
| 表 2-132 | 実用化可能性「高分子配列の制御技術の進展」                           | 194 |
| 表 2-133 | 今後の潮流および研究の方向性「高分子配列の制御技術の進展」                   | 195 |
| 表 2-134 | 技術的進歩と方向性(概要)「新機能獲得に向けた広域な材料探索」                 | 200 |
| 表 2-135 | タイムライン「新機能獲得に向けた広域な材料探索」                        | 201 |
| 表 2-136 | キーテクノロジー「新機能獲得に向けた広域な材料探索」                      | 201 |
| 表 2-137 | 実用化可能性「新機能獲得に向けた広域な材料探索」                        | 204 |
| 表 2-138 | 技術的進歩と方向性(概要)「循環型材料の開発」                         | 209 |
| 表 2-139 | タイムライン「循環型材料の開発」                                | 210 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 表 2-140 | キーテクノロジー「循環型材料の開発」                                | 211 |
| 表 2-141 | 実用化可能性「循環型材料の開発」                                  | 213 |
| 表 2-142 | 今後の潮流および研究の方向性「循環型材料の開発」                          | 215 |
| 表 2-143 | 技術的進歩と方向性(概要)「プロセス・インフォマティクスの進展」                  | 219 |
| 表 2-144 | タイムライン「プロセス・インフォマティクスの進展」                         | 220 |
| 表 2-145 | キーテクノロジー「プロセス・インフォマティクスの進展」                       | 220 |
| 表 2-146 | 実用化可能性「プロセス・インフォマティクスの進展」                         | 222 |
| 表 2-147 | 技術的進歩と方向性(概要)「熱電変換・熱伝導制御技術の進展」                    | 225 |
| 表 2-148 | タイムライン「熱電変換・熱伝導制御技術の進展」                           | 225 |
| 表 2-149 | キーテクノロジー「熱電変換・熱伝導制御技術の進展」                         | 226 |
| 表 2-150 | 実用化可能性「熱電変換・熱伝導制御技術の進展」                           | 228 |
| 表 2-151 | 技術的進歩と方向性(概要)「量子性発現技術の進展」                         | 231 |
| 表 2-152 | タイムライン「量子性発現技術の進展」                                | 231 |
| 表 2-153 | キーテクノロジー「量子性発現技術の進展」                              | 232 |
| 表 2-154 | 実用化可能性「量子性発現技術の進展」                                | 234 |
| 表 2-155 | 今後の潮流および研究の方向性「量子性発現技術の進展」                        | 235 |
| 表 2-156 | 技術的進歩と方向性(概要)「有機無機ハイブリッドペロブスカイトの特性理解」             | 239 |
| 表 2-157 | タイムライン「有機無機ハイブリッドペロブスカイトの特性理解」                    | 239 |
| 表 2-158 | キーテクノロジー「有機無機ハイブリッドペロブスカイトの特性理解」                  | 240 |
| 表 2-159 | 実用化可能性「有機無機ハイブリッドペロブスカイトの特性理解」                    | 242 |
| 表 4-1   | 潮流に該当する研究領域数(研究分野・潮流別)                            | 253 |
| 表 4-2   | 潮流以外の戦略目標及び研究領域・研究開発領域(2010 年以降、健康・医療・食料／バイオ生産分野) | 254 |

## 単位・略称の一覧

本報告書では、以下のとおり単位、及び略称の統一を図る。

### 単位

| 本報告書での表記 | 意味  |
|----------|---|
| 研究分野     | 本調査では「健康・医療・食料/バイオ生産分野」「環境・エネルギー分野」「システム・情報科学技術分野」「ナノテクノロジー・材料分野」の4分野を対象として研究分野と呼ぶ。   |
| 潮流       | 本調査における「潮流」とは、研究開発動向を把握するための分析上の単位である。JST 研究開発戦略センターが毎年度作成する各分野の研究開発の俯瞰報告書における「研究開発領域」(節レベル)相当の粒度を目安に、便宜的に設定している。<br>なお、ここでの「潮流」は、必ずしも特定の研究開発領域に1対1で対応するものではなく、分野横断的な基盤技術、当該分野特有の応用技術、及びそれらの融合を含みつつ、時間の経過とともにその構成が変化し得るものとして整理している。 |
| 中核研究者    | 本調査では、潮流・キーテクノロジーを牽引し、かつ現在も研究現場の一線で研究している国内外の研究者と定義している。  |

### 略称

| 本報告書での表記 | 正式名称・意味など                  |
|----------|----------------------------|
| AMED     | 国立研究開発法人日本医療研究開発機構         |
| JST      | 国立研究開発法人科学技術振興機構           |
| CRDS     | 国立研究開発法人科学技術振興機構研究開発戦略センター |
| AI       | 人工知能                       |
| LLM      | 大規模言語モデル                   |

# 1. 調査の概要

---

## 1.1 背景・目的

科学技術・イノベーション行政においては、今後重点的に取り組むべき研究領域を正しく把握したうえで研究開発戦略を立案することが重要である。そのためには、研究開発動向の継続的な調査分析が必要である。

文部科学省科学技術・学術政策局 研究開発戦略課戦略研究推進室では、研究開発戦略の立案に向けて、特に、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の戦略的創造研究推進事業の戦略目標及び、国立研究開発法人日本医療研究開発機構(AMED)の革新的先端研究開発支援事業の研究開発目標の検討における基礎情報として、研究開発動向の調査分析を継続的に実施している。

本調査では、我が国として今後重点的に取り組むべき研究領域の把握に資するため、世界の研究開発動向を俯瞰し特定の分野における潮流を整理するとともに、当該潮流の中核を担う研究者へのインタビュー調査等を実施することにより、研究開発動向の調査分析を実施することを目的とする。

## 1.2 調査内容

本調査ではまず、健康・医療・食料/バイオ生産分野、環境・エネルギー分野、システム・情報科学技術分野、ナノテクノロジー・材料分野の 4 つの研究分野について、文献調査及びJST研究開発戦略センターフェローへのインタビューを実施し、8 つの潮流を抽出した。

各潮流は、技術の概要やキーテクノロジー、タイムライン、実用化の可能性について公表情報に基づき整理すると共に、中核研究者へのインタビュー、考察を実施した。

## 1.3 調査フロー

本調査のフローを図 1-1 に示す。

本調査では、公表資料・CRDS へのインタビューに基づく俯瞰整理と潮流候補の抽出、各潮流に関する公表情報に基づく調査および中核研究者へのインタビューを通じた潮流の整理、既存のJST/AMED の戦略的創造研究推進事業等との対応関係の整理、上記を踏まえたまとめと今後課題・対応方策の整理を実施している。

また、3 月 26 日に、本成果の概要について、報告会を開催する予定である。

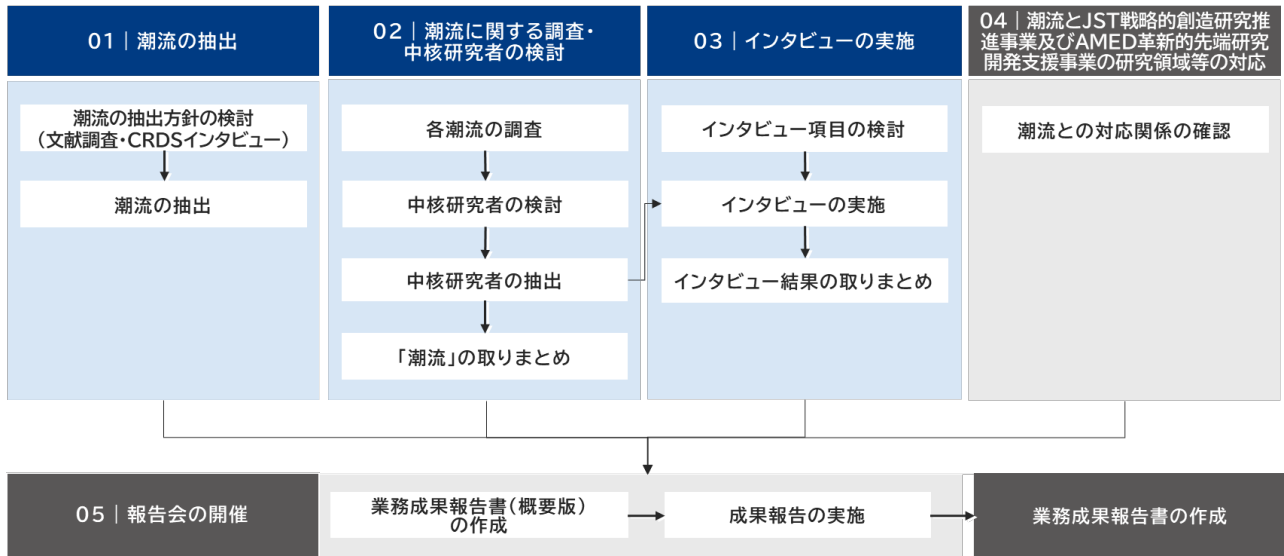


図 1-1 本調査の調査フロー

## 1.4 本報告書の構成

本調査では、4 つの研究分野における 8 つの潮流の抽出、文献調査及び中核研究者へのインタビューを実施し、それらの調査結果に基づく考察までをまとめている。

まず第 2 章では、本調査で対象とする 4 つの研究分野(健康・医療・食料/バイオ生産分野、環境・エネルギー分野、システム・情報科学技術分野、ナノテクノロジー・材料分野)における各 8 つの潮流の抽出方法を検討の上、潮流を抽出した。加えて、各潮流における技術の概要、タイムライン、キーテクノロジー、実用化等の調査方法に加え、国際的に活躍する「中核研究者」候補の検討方法やインタビュー項目について記載している。

第 3 章では、各潮流の文献調査結果を踏まえ、当該潮流に関連する今後 5～10 年程度の技術動向や、潮流の中で観察される研究開発の展開について、中核研究者へのインタビューを実施した。

第 4 章では、本調査で整理した潮流と、2010 年度以降の JST 戦略的創造研究推進事業の CREST・さきがけの研究領域/当該領域に関連する戦略目標、および、AMED 革新的先端研究開発支援事業の CREST・PRIME の研究開発領域/当該領域に関連する研究開発目標を比較し、分析を行った。

第 5 章では、上記の内容を踏まえて、研究の潮流の把握方法及び推進方策について考察を行った。

## 2. 特定分野における俯瞰及び最先端研究開発の潮流の分析

### 2.1 調査方法

#### 2.1.1 調査の手順

以下の調査フロー(図 2-1)の 01、02、03にあたる部分が本章にあたる部分である。

まず、4 つの研究分野(健康・医療・食料／バイオ生産分野、環境・エネルギー分野、システム・情報科学技術分野、ナノテクノロジー・材料分野)について、JST 研究開発戦略センター(CRDS)が作成する研究開発の俯瞰報告書、ならびに戦略プロポーザル等の公表資料を確認し、技術的ブレークスルーの有無、分野横断的な研究開発の展開状況、社会課題との関連性といった観点から潮流の候補を抽出した。続いて、CRDS フェローとの意見交換を通じて妥当性の検討・精査を行い、文部科学省とも相談の上、分野ごとに 8 件の潮流を抽出した。

潮流毎、生成 AI(ChatGPT Enterprise)を活用して技術の概要、キーテクノロジー、タイムライン、実用化可能性等の整理を行った。その後、当該潮流を牽引し、国際的に活躍する中核研究者を選定し、インタビュー調査を実施した。

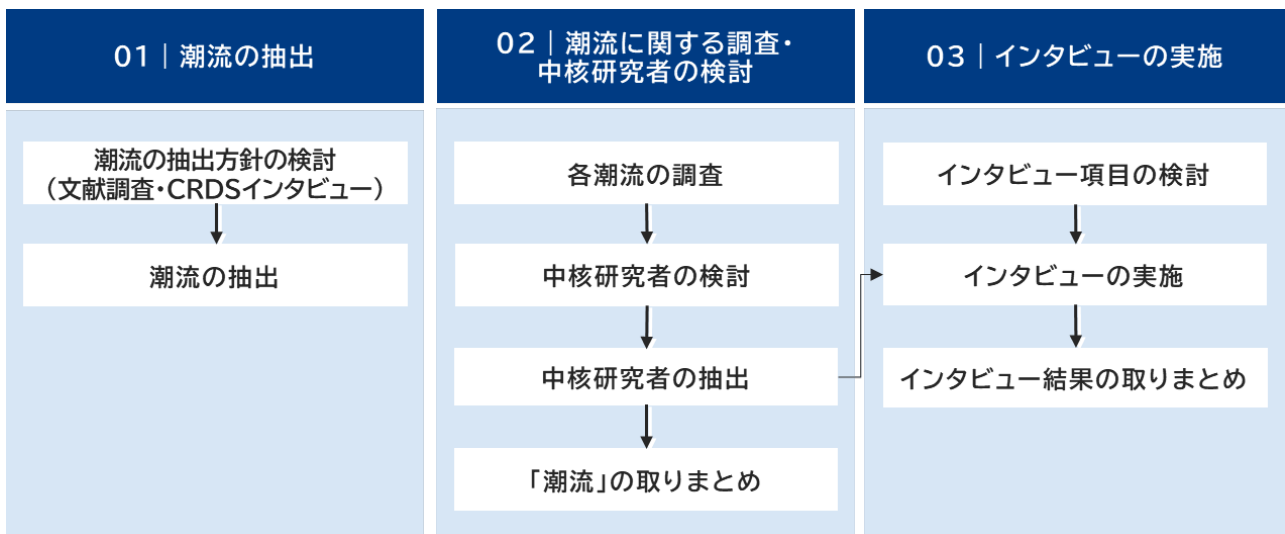


図 2-1 本調査の調査フロー(うち潮流の検討部分)

#### 2.1.2 潮流の抽出

##### (1) 検討の出発点とした文献

潮流の抽出は、俯瞰的、網羅的に整理されているCRDSの以下調査報告書を対象として行った。

- JST/CRDS、研究開発の俯瞰報告書(2024 年)
- CRDS、論文・特許データから見る研究開発動向(2024 年)

- CRDSの戦略プロポーザル等、上記以外の資料

## (2) JST 研究開発戦略センター(CRDS)との意見交換

潮流の抽出を行うため、各俯瞰報告書を作成している各分野のCRDSのフェロー等と以下の内容について意見交換を行った。

### 1) 注目すべき技術領域選定の考え方

- 最新の2024 研究開発俯瞰報告書における「研究開発領域」の検討において、重要と考えた基準・優先順位
- 例:システム・情報科学技術分野:基盤レイヤーと戦略レイヤーの2層と、戦略レイヤーにおける「エマージング性」「社会の要請・ビジョン」「社会インパクト」の3基準に加え、経済安全保障の観点を考慮
- 報告書第1章の「わが国として重要な研究開発」に載る/載らないの判断基準

### 2) 日本・他国の現状・トレンド

- 日本・他国の現状・トレンドにおける、「現状」「トレンド」の設定の考え方・前提
- 定量的観点の考慮の範囲(論文、特許)

### 3) 各領域における注目すべき技術領域の妥当性

- (当社作成資料に基づく)日本・他国の現状・トレンドに基づく、注目すべき技術領域案の妥当性
- 定量的視点(論文・特許)において把握が困難だった領域(例:基盤技術等)

## (3) 潮流の抽出条件

本調査における「潮流」とは、研究開発動向を把握するための分析上の単位である。CRDSが毎年度作成する各分野の研究開発の俯瞰報告書における「研究開発領域」(節レベル)相当の粒度を目安に、便宜的に設定している。

(1)(2)の内容及び、各分野の研究開発の俯瞰報告書をベースとして、以下の条件に該当するものを「潮流」候補として検討した。潮流の抽出プロセスは分野毎に異なる部分があるため、分野毎に記載している。なお、潮流を抽出条件は、各分野に共通する原則的な判断軸を示したものである。実際の潮流抽出に当たっては、分野によって研究開発サイクル、主要な成果の現れ方(論文・特許等)、産業・制度との結び付きの強さ、国際連携の構造、ならびにデータによる把握可能性が異なる。このため、各分野の特性を踏まえつつ、上記条件の適用の仕方を調整したうえで、潮流候補を抽出している。

#### 【潮流を抽出する際の条件】

- 論文・特許動向等から技術的ブレイクスルーが見られること
  - 俯瞰報告書における論文数あるいは特許出願数等の記載から、研究開発活動が活発化している、または研究の方向性に質的な変化が見られる動向であること。
- 分野横断的な展開の可能性があること
  - 特定の学術分野や技術領域に閉じるものではなく、複数分野にまたがる基盤技術、または異分野融合的に展開し得る研究開発動向であること。
- 社会的要請との関係性を有すること
  - 将来的に社会的ニーズや政策的関心と結び付く可能性を有する研究開発動向であること。

ここでの「潮流」は、必ずしも特定の研究開発領域に1対1で対応するものではなく、分野横断的な基盤技術、当該分野特有の応用技術、及びそれらの融合を含みつつ、時間の経過とともにその構成が変化し得るものとして整理している。

分野毎の抽出条件や手順について示す。

表 2-1 潮流の抽出条件・抽出手順等(健康・医療・食料／バイオ分野及び環境・エネルギー分野)

|                         | 健康・医療・食料／バイオ分野   | 環境・エネルギー分野  |
|-------------------------|--|---|
| 対象文献                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>CRDS、研究開発の俯瞰報告書 ライフサイエンス・臨床医学分野(2024年)</li> <li>CRDS、論文・特許データから見る研究開発動向(2024年)</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>CRDS、研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野(2024年)</li> <li>CRDS、論文・特許マップで見る環境・エネルギー分野の俯瞰とマテリアル関連研究の波及・展開(2024年)</li> </ul>   |
| 本調査において注目すべき潮流の抽出基準/考え方 | <ul style="list-style-type: none"> <li>俯瞰報告書では、(1)社会に直接的にインパクトをもたらさう領域、(2)中長期的に基幹的な領域、(3)エマージングなサイエンス・テクノロジー領域、(4)AI・デジタル技術の活用と深く関係する領域に着目し、30の領域を抽出している。</li> <li>一方、本調査において重視する視点として技術的ブレイクスルー、融合領域、社会的要請(社会的ニーズ)と一対一で対応付けることが難しい状況であったため、俯瞰報告書の記載内容に基づき、以下の視点で抽出した。 <ul style="list-style-type: none"> <li>技術的ブレイクスルーについては、上記から論文・特許等動向及び基礎/応用・開発のトレンドを抽出。次ステップとして、基本的には日本の現状・トレンドが基礎/応用・開発とも→が上向き、または基礎/応用・開発とも◎である研究開発領域に着目して抽出候補とする。</li> <li>融合領域について、30の領域に該当することを確認した。</li> <li>社会的要請(社会的ニーズ)については、本調査の趣旨に照らして、出口起点(特定の産業領域や特定の疾患のための研究)が明確な研究については本調査における優先順位から落とすうえで、注目する技術が社会的なニーズにつながることを確認した。</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>俯瞰報告書においては、領域の抽出基準として①社会の要請・ビジョン、②社会的・産業的インパクト、③横断的基盤研究の3つの視点を明示する一方、各研究開発領域をどれか1つにラベル付けておらず、客観的な抽出は難しい。</li> <li>そこで、抽出基準と各領域とが紐づけられている視点、すなわち、①トランジション促進、②トランジションの進捗状況把握・予測・評価、③トランジションの停滞や負の側面への備えの3つの柱を参考に、技術領域を確認した。すると、3つの柱に該当する特定の研究開発領域が抽出されているわけではなく、環境・エネルギー分野の35の研究開発領域が、上述の3つの柱のいずれかに分類できることが確認されている状況であることがわかった。</li> </ul>   |
| 注目すべき潮流の抽出手順            | <ul style="list-style-type: none"> <li>俯瞰報告書では、論文・特許マップでは、エマージングなサイエンス・テクノロジー領域の探索のために「キーフレーズ抽出」により、成長可能性判定が行われている。抽出されたキーフレーズは成長性が高い可能性があるものとして抽出候補とした。</li> <li>俯瞰報告書から、日本及び海外の現状・トレンドの情報を基に、日本の立ち位置について各領域をパターンA、Bの2つの視点から確認した。パターンAは「日本、海外とも、研究開発で顕著な活動が見られ、今後も研究開発水準が上昇傾向である領域(日本も海外も有望である領域)、パターンBは「日本で研究開発水準が現状維持もしくは下降傾向であるが、海外では上昇傾向である領域(日本が弱い領域)」で、両者ともに一定の注目が必要と判断し、抽出候補とした。</li> <li>バイオテクノロジー・医療・創薬領域においては、国際情勢や各国の制度政策の動向と不可分であることに鑑み、日本成長戦略会議で選定された17の戦略分野も確認した。健康・医療・食料/バイオ生産分野に関係する戦略分野は創薬・先端医療及び合成生物学・バイオ、フードテックであり、これら項目と関連性の高い領域を抽出候補とした。</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>俯瞰報告書において、日本の現状・トレンドが基礎/応用・開発とも→が上向き、または基礎/応用・開発とも◎である研究開発領域に着目して抽出候補とした。</li> <li>論文・特許マップでは、文献数が数十件程度のエマージング技術探索のために「キーフレーズ抽出」とロジスティック回帰により、成長可能性判定が行われており、抽出されたキーフレーズは成長性が高い可能性があるものとして抽出候補とした。</li> <li>俯瞰報告書から、日本及び海外の現状・トレンドの情報を基に、日本の立ち位置について各領域をパターンA、Bの2つの視点から確認した。パターンAは「日本、海外とも、研究開発で顕著な活動が見られ、今後も研究開発水準が上昇傾向である領域(日本も海外も有望である領域)、パターンBは「日本で研究開発水準が現状維持もしくは下降傾向であるが、海外では上昇傾向である領域(日本が弱い領域)」で、両者ともに一定の注目が必要と判断し、抽出候補とした。</li> <li>エネルギー分野は特に国際情勢や各国の制度政策の動向と不可分であることに鑑み、日本成長戦略会議で選定された17の戦略分野も確認した。環境・エネルギー分野に関係しそうな戦略分野は⑨資源・エネルギー安全保障・GX ⑩フュージョンエネルギーであり、これら項目の細部で言及されている技術要素を抽出候補として挙げた。</li> <li>さらに、2025年度中の決定が予定されている次期科学技術イノベーション基本計画で言及されるとみられる国家戦略技術領域についても参考にした。</li> </ul> |
| 備考                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>各プロセスで抽出した研究開発領域を星取表として整理し、点数が高いものから8つの潮流として選定した。なお、現時点においては、CRDS俯瞰報告書中に記載されているキーワードに加え、注目動向として記載されている技術も参考とし、後述の「潮流の説明」の部分に加えた。</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>CRDSへのインタビュー内容も考慮し、特に後述の「潮流の説明」の部分に加えた。</li> </ul>   |

表 2-2 潮流の抽出条件・抽出手順等(システム・情報科学技術分野及びナノテクノロジー・材料分野)

|                         | システム・情報科学技術分野   | ナノテクノロジー・材料分野  |
|-------------------------|---|--|
| 対象文献                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>CRDS、研究開発の俯瞰報告書 システム・情報科学技術分野(2024年)</li> <li>CRDS、論文・特許データから見る研究開発動向(2024年)</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>CRDSの「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野(2024年)」</li> </ul>   |
| 本調査において注目すべき潮流の抽出基準/考え方 | <ul style="list-style-type: none"> <li>システム・情報科学技術分野については、主要な技術領域ごとの研究動向を踏まえ、分野内のトレンドを研究の潮流として抽出した。具体的には、研究開発の俯瞰報告書における国内外の研究動向を基礎資料とし、一定の基準に基づき注目すべき技術領域を整理した。</li> <li>具体的には、研究開発の俯瞰報告書における国内外の研究動向を基礎資料とし、一定の基準に基づき注目すべき技術領域を整理した。 <ul style="list-style-type: none"> <li>国内の研究動向については、基礎研究から応用・開発までの各段階において、研究活動が上向き傾向にある技術領域を抽出対象とした。</li> <li>海外の研究動向については、3か国以上において、基礎・応用・開発の各段階で研究活動が上向きに推移している技術領域を抽出した。</li> </ul> </li> <li>また、研究活動の規模が一定以上であることを重視し、全世界における論文数が概ね4,000件以上の技術領域を対象として選定を行った。</li> <li>これらの条件に必ずしも合致しない場合であっても、政府のAI戦略や量子技術イノベーション戦略等において政策的に重要と位置づけられている技術領域については、調査対象に含めた。</li> <li>量子コンピューティングの位置づけ <ul style="list-style-type: none"> <li>量子分野については、システム・情報科学技術分野の一サブ分野としてではなく、政府戦略レベルでより広範な技術領域として位置づけられている。具体的には、内閣府の量子技術イノベーション戦略やSIP量子関連施策等において、「量子技術」単体として政策的支援が行われている。</li> <li>一方で、量子技術全体を本調査において網羅的に取り扱うことは困難であることから、本調査では、人工知能・ビッグデータ分野において活用が進められている量子技術を中心に、調査対象に含める方針とした。</li> </ul> </li> <li>AI関連技術の補足的整理 <ul style="list-style-type: none"> <li>技術進展の速度が特に速いAI関連分野については、俯瞰報告書に加え、最新動向を把握する目的で、CRDSが実施した「プレプリントサーバarXivを活用したAI分野の研究動向俯瞰調査(2024年)」も参照し、潮流整理の補完を行った。</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野(2024年)」では、エマージング性、社会経済インパクト、定点観測(技術蓄積)の観点等を元に7つの区分・29の研究開発領域に整理している。区分は以下の通りである。 <ul style="list-style-type: none"> <li>環境・エネルギー応用</li> <li>バイオ・医療応用</li> <li>ICT・エレクトロニクス応用</li> <li>社会インフラ・モビリティ応用</li> <li>物質と機能の設計・制御</li> <li>共通基盤科学技術</li> <li>共通支援策</li> </ul> </li> <li>「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野(2024年)」では、エマージング性、社会経済インパクト、定点観測(技術蓄積)の観点等を元に7つの区分・29の研究開発領域に整理している。区分は以下の通りである。 <ul style="list-style-type: none"> <li>7つの区分・29の研究開発領域は極めて幅広いナノテクノロジー・材料分野から抽出されており、いずれも注目動向・新展開が存在するため、領域間の優劣はつけられないと判断した。そのため、区分・研究開発領域間の優劣ではなく、以下の考え方に基づいて、「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野(2024年)」で「物質と機能の設計・制御」に区分される研究開発領域に注目した。</li> <li>7つの区分・29の研究開発領域は極めて幅広いナノテクノロジー・材料分野から抽出されており、いずれも注目動向・新展開が存在するため、領域間の優劣はつけられないと判断した。そのため、区分・研究開発領域間の優劣ではなく、以下の考え方に基づいて、「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野(2024年)」で「物質と機能の設計・制御」に区分される研究開発領域に注目した。</li> </ul> </li> <li>「物質と機能の設計・制御」に区分される研究開発領域は、「分子技術」「次世代元素戦略」「データ駆動型物質・材料開発」「フォノンエンジニアリング」「量子マテリアル」「有機無機ハイブリッド」の6つである。これらそれぞれの研究開発領域の中にも、複数の潮流が存在しているが、今回は「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野(2024年)」にて記載される「注目動向(新展開・技術トピックス)」等の内容を参考に、特に注目度が高いと考えられる8つの潮流に整理した。</li> </ul> |

## (4) 抽出した潮流

### 1) 健康・医療・食料／バイオ分野

検討の結果、調査対象とした潮流は、以下のとおりである。

表 2-3 調査対象とした潮流(健康・医療・食料／バイオ分野)

| 潮流の名称   | 潮流の説明  |
|---|--|
| A1: モダリティ多様化とデリバリー・製造基盤の高度化                       | 低・中分子創薬では、標的タンパク質分解、共有結合薬、中分子、核酸医薬など新規モダリティが実用段階へ進み、DDS・製造・品質管理を含む統合基盤の高度化が研究開発の焦点となっている。<br>従来の低分子中心の創薬から、PROTAC、中分子、核酸医薬など多様なモダリティへと創薬手段が拡張している。   |
| A2: AI 駆動型創薬パイプラインの構築                             | AI の適用範囲は標的探索、分子設計、シミュレーション、実験計画、臨床開発へ拡張しており、創薬パイプライン全体をデータ駆動で再構成する動きが進んでいる。<br>機械学習・深層学習に加え、構造予測、生成モデル、連合学習、AI エージェントなどが創薬各段階に浸透しつつある。              |
| A3: 遺伝子デリバリー×ゲノム編集による in vivo / ex vivo 遺伝子治療の高度化 | AAV 等の送達技術と CRISPR 系編集技術の進展により、in vivo / ex vivo 遺伝子治療は希少疾患中心から血液疾患、がん、代謝・神経疾患へと適応拡大が進んでいる。<br>遺伝子デリバリーとゲノム編集の高度化により、体内直接投与型と細胞加工型の双方で治療の選択肢が拡大している。 |
| A4: 個別化・精密医療インフラの構築                               | 全ゲノム解析、ロングリード解析、バイオバンク、クラウド解析基盤の整備により、ゲノム医療は研究基盤から診断・治療・創薬を支える社会基盤へ移行しつつある。<br>がん・希少疾患を中心に、ゲノム情報に基づく診断、層別化、治療選択が臨床で定着し始めている。                         |
| A5: AI による診断支援と予測・予防への展開                          | AI 診断は画像判読支援から、病理・内視鏡・放射線・ウェアラブル・非侵襲検体を統合した予測・予防型医療へと展開している。<br>医用画像 AI の成熟に加え、連続生体データや液体生検等の非侵襲データを用いた発症・重症化予測が新たな軸となっている。                          |
| A6: 臓器間ネットワーク解析と介入標的探索                            | 臓器を個別にみるのではなく、腸内細菌、代謝物、細胞外小胞、神経回路、免疫を介した臓器間ネットワークとして疾患を理解し、介入標的を探索する研究が加速している。<br>多臓器生物としての恒常性の破綻を、液性・神経・免疫の相互作用から捉える視点もみられる。                        |
| A7: 微生物細胞工場による持続可能なバイオ生産                          | 微生物ものづくりは、発酵・代謝工学から、合成生物学、ゲノム編集、DBTL、自動化を備えたデータ駆動型バイオ製造へと進化している。<br>微生物細胞工場は、化学品・燃料・医薬・食品を対象とする持続可能な生産基盤として重要性を増している。                                |
| A8: 単細胞解析、空間情報及び時間軸による分析への展開                      | 単細胞解析は、空間情報と時間軸を取り込むことで、細胞状態の静的把握から、組織内相互作用・発生・疾患進展の動的な理解へと展開している。<br>scRNA-seq、空間トランスクリプトーム、マルチオミクス、系譜追跡の進展により、細胞集団の多様性と時空間変化を統合的に捉える基盤が整いつつある。     |

また、これらの潮流は、CRDS 俯瞰報告書では以下の位置づけになっている。

表 2-4 調査対象とした潮流(健康・医療・食料／バイオ分野)

| 研究開発の俯瞰報告書(健康・医療・食料／バイオ分野)<br>2024 目次項目  | 抽出対象とした潮流 |
|--|-----------|
| 2.1 健康・医療                                |           |
| 2.1.1 低・中分子創薬                            | ○         |
| 2.1.2 高分子創薬(抗体)                          |           |
| 2.1.3 AI 創薬                              | ○         |
| 2.1.4 幹細胞治療(再生医療)                        |           |
| 2.1.5 遺伝子治療(in vivo 遺伝子治療/ex vivo 遺伝子治療) | ○         |
| 2.1.6 ゲノム医療                              | ○         |
| 2.1.7 バイオマーカー・リキッドバイオプシー                 |           |
| 2.1.8 AI 診断・予防                           | ○         |
| 2.1.9 感染症(治療薬・ワクチン)                      |           |
| 2.1.10 がん                                |           |
| 2.1.11 脳・神経                              |           |
| 2.1.12 免疫・炎症                             |           |
| 2.1.13 生体時計・睡眠                           |           |
| 2.1.14 老化                                |           |
| 2.1.15 臓器関連                              | ○         |
| 2.2 農業・生物生産                              |           |
| 2.2.1 微生物ものづくり                           | ○         |
| 2.2.2 植物ものづくり                            |           |
| 2.2.3 農業エンジニアリング                         |           |
| 2.2.4 植物生殖                               |           |
| 2.2.5 植物栄養                               |           |
| 2.3 基礎基盤                                 |           |
| 2.3.1 遺伝子発現機構                            |           |
| 2.3.2 細胞外微粒子・細胞外小胞                       |           |
| 2.3.3 マイクロバイオーム                          |           |
| 2.3.4 構造解析(生体高分子・代謝産物)                   |           |
| 2.3.5 光学イメージング                           |           |
| 2.3.6 一細胞オミクス・空間オミクス                     | ○         |
| 2.3.7 ゲノム編集・エピゲノム編集                      |           |
| 2.3.8 オプトバイオロジー                          |           |
| 2.3.9 ケミカルバイオロジー                         |           |
| 2.3.10 タンパク質設計                           |           |

## 2) 環境・エネルギー分野

検討の結果、調査対象とした潮流は、以下のとおりである。

表 2-5 調査対象とした潮流(環境・エネルギー分野)

| 潮流の名称                        | 潮流の説明   |
|------------------------------|---|
| B1: フュージョンエネルギー原型炉開発に向けた研究加速 | 日本成長戦略会議でも重点領域として取り上げられている技術。核融合発電はゲームチェンジャーになり得るが、実用化までには時間を要する。(CRDS インタビュー)<br>日本の技術の強みはプラズマよりも資機材や燃料・熱サイクルシステムであり、この部分にフォーカスした研究開発支援が有効。  |
| B2:革新的 CO2 回収・貯留・利用技術        | カーボンニュートラルの実現とエネルギーの安定供給、産業維持を両立する上で不可欠の技術であり、DACCS、BECCS も含め革新的技術開発のニーズ、余地ともに高い。<br>CO2 分離・回収技術で日本の技術が先行。(CRDS インタビュー)   |
| B3:革新的蓄電技術の発展                | 再エネを主力電源とするカーボンニュートラルなエネルギー社会の構築のためには蓄エネ技術は不可欠。自然災害に対する電力システムのレジリエンス向上、運輸部門との連携などにも資する。エネルギー安全保障上の重要性も高い。<br>すでに ALCA-Next、GteX でも取り扱っている領域である。   |
| B4:水素・アンモニアの大量製造・輸送・利用技術確立   | カーボンニュートラル実現に向けた水素エネルギーシステム構築が必要も、つくる・はこぶ・ためる・つかう各プロセスでのコストダウンが課題。製造のコストダウンを目指した、廃棄物利用製造、光触媒による製造などの先進的技術開発も日米等で進行。大量輸送・貯蔵技術の開発も進む<br>コストダウンの課題は大きく、水素関連プロジェクトが各国で停滞する状況。                     |
| B5:CO2 を原料とした化学品・燃料合成プロセス    | CO2 変換にかかる触媒材料が多様化しているが、今後の進展の鍵はプロセス設計。CO2 電解においても反応器設計が性能向上の鍵。<br>反応機構の解明では基礎的研究の進展が着実に進んでおり、DFT 計算に基づく候補材料の電子状態データを蓄積し、インフォマティクスにより予測または指針が示せれば、理論先導型の触媒設計も可能に。<br>CO2 直接電解合成も今後駅用拡大が期待される。 |
| B6:全球のモデリング、予測の高度化           | 地球環境・生態系の観測においては衛星観測、地上観測、海洋観測などを戦略的に構築・運用する必要。   |
| B7:全球のモデリング、予測の高度化           | 特に衛星観測では日欧共同の地球観測衛星「アースケア」打ち上げ(2024年)など、国際連携も活発であり、観測データ統合による気候変動予測の不確実性の低減が進むことが期待。<br>予測領域では、日本は全球雲解像モデルなど世界に先駆けて開発。極端気象現象の気候変動との関係性解明(イベント・アトリビューション)などでも特筆すべき成果を挙げている。                    |
| B8:水循環観測技術と災害予測の連携           | 人工衛星を用いた水循環観測も活発化しており、全球衛星降水マップなどへと進化を続けている。水循環数値計算関連研究分野では地下水を含めた地球規模水循環水資源モデル開発も進む。これら技術を利用した洪水災害防止・軽減への応用研究で日本が世界をリード。   |

また、これらの潮流は、CRDS 俯瞰報告書では以下の位置づけになっている。

表 2-6 調査対象とした潮流(環境・エネルギー分野)

| 研究開発の俯瞰報告書(環境・エネルギー分野)<br>2024 目次項目 | 抽出対象とした潮流 |
|-------------------------------------|-----------|
| 2.1 電力のゼロエミ化・安定化                    |           |
| 2.1.1 火力発電                          |           |
| 2.1.2 原子力発電                         | ○         |
| 2.1.3 太陽光発電                         |           |
| 2.1.4 風力発電                          |           |
| 2.1.5 バイオマス発電・利用                    |           |
| 2.1.6 水力発電・海洋発電                     |           |
| 2.1.7 地熱発電・利用                       |           |
| 2.1.8 太陽熱発電・利用                      |           |
| 2.1.9 CO2 回収・貯留(CCS)                | ○         |
| 2.2 産業・運輸部門のゼロエミ化・炭素循環利用            |           |
| 2.2.1 蓄エネルギー技術                      | ○         |
| 2.2.2 水素・アンモニア                      | ○         |
| 2.2.3 CO2 利用                        | ○         |
| 2.2.4 産業熱利用                         |           |
| 2.3 業務・家庭部門のゼロエミ化・低温熱利用             |           |
| 2.3.1 地域・建物エネルギー利用                  |           |
| 2.4 大気中 CO2 除去                      |           |
| 2.4.1 ネガティブエミッション技術                 |           |
| 2.5 エネルギーシステム統合化                    |           |
| 2.5.1 エネルギーマネジメントシステム               |           |
| 2.5.2 エネルギーシステム・技術評価                |           |
| 2.6 地球システム観測・予測                     |           |
| 2.6.1 気候変動観測                        | ○         |
| 2.6.2 気候変動予測                        | ○         |
| 2.6.3 水循環(水資源・水防災)                  | ○         |
| 2.6.4 生態系・生物多様性の観測・評価・予測            |           |
| 2.7 人と自然の調和                         |           |
| 2.7.1 社会－生態システムの評価・予測               |           |
| 2.7.2 農林水産業における気候変動影響評価・適応          |           |
| 2.7.3 都市環境サステナビリティ                  |           |
| 2.7.4 環境リスク学的感染症防御                  |           |
| 2.8 持続可能な資源利用                       |           |
| 2.8.1 水利用・水処理                       |           |
| 2.8.2 持続可能な大気環境                     |           |
| 2.8.3 持続可能な土壌環境                     |           |
| 2.8.4 リサイクル                         | ○         |
| 2.8.5 ライフサイクル管理(設計・評価・運用)           |           |
| 2.8.6 環境分析・化学物質リスク評価                |           |

### 3) システム・情報科学分野

検討の結果、調査対象とした潮流は、以下のとおりである。

表 2-7 調査対象とした潮流()

| 潮流の名称  | 潮流の説明  |
|--|--|
| C1: 知覚・運動系の AI 技術「基盤モデル的なアプローチの画像分野への適用」           | ・大規模言語モデル(LLM)の成功を契機として、トランスフォーマー型の画像・ロボット分野への適用が開始(Vision Transformer 等)。   |
| C2: 知覚・運動系の AI 技術「拡散モデル等による画像生成モデルの高精度化」           | ・画像生成モデルの主流は、敵対生成ネットワーク(GAN)から拡散モデル(StableDiffusion 等)に移行し精度が劇的に向上。<br>・強化学習技術をベースとしたロボット制御は、モデルベース強化学習を進展させ、大規模データ・対応可能な汎用性の向上を志向したロボット基盤モデル、世界モデルの研究開発が進行。                             |
| C3: 言語・知識系の AI 技術「大規模言語モデルの汎用性発見と急速な実用化の進展」        | ・トランスフォーマー型ニューラルネットワークの成功、言語分野の複数タスクへの汎用性(質問応答、翻訳、要約、文書生成等)の発見を契機として、大規模言語モデル(LLM)が急速に研究開発・実用化。  |
| C4: 人・AI 協働と意思決定支援「対話型 AI と協力した問題解決方法論の研究の進展」      | ・AI による情報操作や虚偽情報への対応、AI と人間がいかに協力して問題を解決するか、といった問題について、研究分野自体は従来から存在するものの、AI 技術の急速な普及に対処する方法が研究されている。  |
| C5: AI・データ駆動型問題解決「個別分野の問題を解く AI の成功から汎用的な科学者 AI へ」 | ・機械学習技術(必ずしも大規模言語モデルに限らない)によって先端科学の新発見に寄与。グラフニューラルネットワークを使ったタンパク質構造予測、製薬、マテリアル、宇宙科学、気象予報等。<br>・これらを一般化する方向として“科学的発見が可能な AI(AI サイエンティスト)”が長期的かつ大きなインパクトを持ち得る研究プロジェクトとして日本を含む各国で開始されている。   |
| C6: 認知発達ロボティクス「トランスフォーマーに続く学習基本原理の探索」              | ・脳科学や認知科学の研究成果を活用して、新たな機械学習原理の研究(自由エネルギー原理等)が進行している。<br>・トランスフォーマー型では汎用人工知能は開発できないと考えられており、能力的な限界を克服するための、効率的かつ高度な知能を備えた新たな AI の開発が試行されている。<br>・量子コンピュータの特性を活用した学習原理や機械学習アルゴリズムも提案されている。 |
| C7: サービスロボット「実生活の無数のバリエーションに基盤モデル的なアプローチで対処」       | ・様々な例外が発生し得る実生活(非構造化環境)で適切に動作するロボットを研究開発するため、基盤モデル的なアプローチでの研究が進展している。  |
| C8: IoT セキュリティ「将来の情報通信基盤に対するセキュリティの確保」             | ・社会の基盤となりつつある IoT システムの脆弱性を狙った攻撃(Mirai 等)に対応、ソフトウェア/ハードウェア両面からのセキュリティ担保技術の開発が進展している。   |

また、これらの潮流は、CRDS 俯瞰報告書では以下の位置づけになっている。

表 2-8 調査対象とした潮流(システム・情報科学技術分野)

| 研究開発の俯瞰報告書(環システム・情報科学技術分野)<br>2024 目次項目 | 抽出対象とした潮流 |
|---|-----------|
| 2.1 人工知能・ビッグデータ                         |           |
| 2.1.1 知覚・運動系の AI 技術                     | ○         |
| 2.1.2 言語・知識系の AI 技術                     | ○         |
| 2.1.3 エージェント技術                          |           |
| 2.1.4 AI ソフトウェア工学                       | ○         |
| 2.1.5 人・AI 協働と意思決定支援                    | ○         |
| 2.1.6 AI・データ駆動型問題解決                     | ○         |
| 2.1.7 計算脳科学                             |           |
| 2.1.8 認知発達ロボティクス                        | ○         |
| 2.1.9 社会における AI                         |           |
| 2.2 ロボティクス                              |           |
| 2.2.1 制御                                |           |
| 2.2.2 生物規範型ロボティクス                       |           |
| 2.2.3 マニピュレーション                         |           |
| 2.2.4 移動(地上)                            |           |
| 2.2.5 Human Robot Interaction           |           |
| 2.2.6 自律分散システム                          |           |
| 2.2.7 産業用ロボット                           |           |
| 2.2.8 サービスロボット                          | ○         |
| 2.2.9 災害対応ロボット                          |           |
| 2.2.10 インフラ保守ロボット                       |           |
| 2.2.11 農林水産ロボット                         |           |
| 2.3 社会システム科学                            |           |
| 2.3.1 デジタル変革                            |           |
| 2.3.2 サービスサイエンス                         |           |
| 2.3.3 社会システムアーキテクチャー                    |           |
| 2.3.4 メカニズムデザイン                         |           |
| 2.3.5 計算社会科学                            |           |
| 2.4 セキュリティー・トラスト                        |           |
| 2.4.1 IoT システムのセキュリティー                  | ○         |
| 2.4.2 サイバーセキュリティー                       |           |
| 2.4.3 データ・コンテンツのセキュリティー                 |           |
| 2.4.4 人・社会とセキュリティー                      |           |
| 2.4.5 システムのデジタルトラスト                     |           |
| 2.4.6 データ・コンテンツのデジタルトラスト                |           |
| 2.4.7 社会におけるトラスト                        |           |
| 2.5 コンピューティングアーキテクチャー                   |           |
| 2.5.1 計算方式                              |           |
| 2.5.2 プロセッサアーキテクチャー                     |           |
| 2.5.3 量子コンピューティング                       |           |
| 2.5.4 データ処理基盤                           |           |
| 2.5.5 IoT アーキテクチャー                      |           |
| 2.5.6 デジタル社会基盤                          |           |
| 2.6 通信・ネットワーク                           |           |
| 2.6.1 光通信                               |           |
| 2.6.2 無線・モバイル通信                         |           |
| 2.6.3 量子通信                              |           |
| 2.6.4 ネットワーク運用                          |           |
| 2.6.5 ネットワークコンピューティング                   |           |
| 2.6.6 将来ネットワークアーキテクチャー                  |           |
| 2.6.7 ネットワークサービス実現技術                    |           |
| 2.6.8 ネットワーク科学                          |           |

| 研究開発の俯瞰報告書(環システム・情報科学技術分野)<br>2024 目次項目 | 抽出対象とした潮流 |
|---|-----------|
| 2.7 数理科学                                |           |
| 2.7.1 数理モデリング                           |           |
| 2.7.2 数値解析・データ解析                        |           |
| 2.7.3 因果推論                              |           |
| 2.7.4 意思決定と最適化の数理                       |           |
| 2.7.5 計算理論                              |           |
| 2.7.6 システム設計の数理                         |           |

#### 4) ナノテクノロジー・材料分野

検討の結果、調査対象とした潮流は、以下のとおりである。

表 2-9 調査対象とした潮流(ナノテクノロジー・材料分野)

| 潮流の名称                      | 潮流の説明  |
|----------------------------|--|
| D1: 触媒反応による有機合成の進展         | 光酸化還元触媒を利用した反応開発がきわめて盛ん。量子化学計算や人工知能の活用によって新反応を予測ベースで開発する手法が確立されつつある。(新しい有機合成)<br>タンパク質の特定の位置で有機合成反応を行わせる手法も大きく進展。(精密な有機合成)<br>貴金属触媒を安価な第一遷移金属触媒で代替する手法も着実に進展。また、量子化学計算や人工知能の活用によって新触媒を予測ベースで開発する手法が確立されつつある。(触媒の代替・改良)               |
| D2: 高分子配列の制御技術の進展          | リビング重合による新たな高分子機能の発現を目指す研究がある。ケミカルリサイクル可能な循環型高分子への関心も高まっており、開環重合触媒の研究が活発化。開環重合と付加重合を融合した共重合も発展。ハイドロゲルの設計・制御による医療用材料の創製の研究も注目すべき分野。   |
| D3: 新機能獲得に向けた広域な材料探索       | 単純な元素構成、実現容易な安定相(結晶構造)の利用などの従来の材料探索範囲での新材料開発は困難。未知の可能性を秘めている複雑な組成や未利用安定相の活用など、未開拓の材料群へ対象を拡げていく(無機物質、有機物質を問わず、物質探索空間を複合化・多元素化・準安定相等の未踏の領域に拡大する)ことが求められている。  |
| D4: 循環型材料の開発               | 近年の有機化学における安定結合活性化技術、高分子化学における分解性材料の設計、材料科学における複合材料の界面制御などの進展を受け、分解の科学の体系的理解と循環型材料開発の取り組みが活発化。   |
| D5: プロセス・インフォマティクスの進展      | マテリアルズ・インフォマティクスによって物性予測や新材料設計は可能となりつつある。<br>データ科学を活用して 効率的に材料合成プロセスを探索する技術(プロセス・インフォマティクス)の研究が、近年活発に進められている。プロセスデータを効率的に蓄積するための技術として、実験機器の IoT 化や、文献からテキストマイニングを活用してプロセス情報を抽出する技術、データ科学とロボティクス活用することによる実験の自動化・自律化に関する研究が活発に進められている。 |
| D6: 熱電変換・熱伝導制御技術の進展        | 熱電材料の高性能化(ゼーバック係数の増強)のためのバンド構造の縮重度の活用や、異種界面における低エネルギー電荷キャリアの遮蔽、欠陥の制御・活用などが動向として挙げられる。また、“比較的高温の常磁性状態において有効な電荷と磁性イオン間の磁気相互作用の活用”といった、磁性活用の潮流の勢いが増している。<br>化学結合の精密制御による格子熱伝導率を低減する研究が大きく加速している。  |
| D7: 量子性発現技術の進展             | 結晶構造や元素組合せ等による量子性発現技術として、例えば、トポロジカル反強磁性金属による磁場応答性の向上、ワイル半金属状態による異常ネルンスト効果の増強、2次元材料のねじれ積層による超伝導状態の発現などが注目されている。   |
| D8: 有機無機ハイブリッドペロブスカイトの特性理解 | 様々な種類の量子井戸構造が得られ、紫外から赤外まで幅広い範囲の発光が得られる。また、低閾値のレーザー発振を示すことが知られている。(→光学材料としての応用検討)<br>強誘電性を維持したまま、バンドギャップやキャリア移動度等を比較的自由に設計することができる。(→情報デバイスへの応用検討)<br>単層ペロブスカイトは他の二次元材料とヘテロ構造を作ることによって、種々の物性が実現できると考えられている。                           |

また、抽出した潮流は、CRDS 俯瞰報告書 2024 では、「物質と機能の設計・制御」に位置づけられている。

| 環境・エネルギー応用 |       |     |      |      |      |            |      |         |      | バイオ・医療応用 |       |          |      |                  |      |      |      |          |      | ICT・エレクトロニクス応用 |       |        |      |           |      |                 |      |                   |      |              |      |    |      |             |   |          |   |   |   |   |   |
|------------|-------|-----|------|------|------|------------|------|---------|------|----------|-------|----------|------|------------------|------|------|------|----------|------|----------------|-------|--------|------|-----------|------|-----------------|------|-------------------|------|--------------|------|----|------|-------------|---|----------|---|---|---|---|---|
| 研究開発領域     |       | 蓄電池 |      | 分離技術 |      | 次世代大電力電池材料 |      | 電解・燃料電池 |      | 研究開発領域   |       | 機能性バイオ材料 |      | 人工生体組織、ナノ/分子システム |      | 生体製造 |      | バイオセンシング |      | 生体イメージング       |       | 研究開発領域 |      | 革新半導体デバイス |      | 量子コンピュータチップデバイス |      | フォトニクス材料、デバイス集積技術 |      | IoTセンシングデバイス |      | 通信 |      | 量子コンピュータチップ |   | フレットロニクス |   |   |   |   |   |
| 国          | フェーズ  | 現状  | トレンド | 現状   | トレンド | 現状         | トレンド | 現状      | トレンド | 国        | フェーズ  | 現状       | トレンド | 現状               | トレンド | 現状   | トレンド | 現状       | トレンド | 国              | フェーズ  | 現状     | トレンド | 現状        | トレンド | 現状              | トレンド | 現状                | トレンド | 現状           | トレンド | 現状 | トレンド |             |   |          |   |   |   |   |   |
| 日本         | 基礎    | ◎   | △    | ○    | →    | ◎          | →    | ◎       | →    | 日本       | 基礎    | ○        | →    | ○                | →    | ○    | △    | ○        | →    | 日本             | 基礎    | ○      | →    | ○         | →    | ○               | →    | ○                 | →    | ○            | →    | ○  | →    | ○           | → |          |   |   |   |   |   |
|            | 応用・開発 | ○   | △    | ○    | →    | ○          | →    | ○       | →    |          | 応用・開発 | ○        | △    | ○                | →    | ○    | △    | ○        | →    |                | 応用・開発 | ○      | △    | ○         | →    | ○               | △    | ○                 | →    | ○            | △    | ○  | →    | ○           | △ | ○        | → |   |   |   |   |
| 米国         | 基礎    | ◎   | △    | ○    | →    | ◎          | →    | ◎       | →    | 米国       | 基礎    | ◎        | △    | ○                | →    | ◎    | →    | ◎        | →    | 米国             | 基礎    | ◎      | △    | ○         | →    | ◎               | →    | ◎                 | →    | ◎            | →    | ◎  | →    | ◎           | → | ◎        | → | ◎ | → |   |   |
|            | 応用・開発 | ○   | △    | ○    | →    | ○          | →    | ○       | →    |          | 応用・開発 | ○        | △    | ○                | →    | ○    | △    | ○        | →    |                | 応用・開発 | ○      | △    | ○         | →    | ○               | △    | ○                 | →    | ○            | △    | ○  | →    | ○           | △ | ○        | → |   |   |   |   |
| 欧州         | 基礎    | ◎   | △    | ○    | →    | ◎          | →    | ◎       | →    | 欧州       | 基礎    | ◎        | △    | ○                | →    | ◎    | →    | ◎        | →    | 欧州             | 基礎    | ◎      | △    | ○         | →    | ◎               | →    | ◎                 | →    | ◎            | →    | ◎  | →    | ◎           | → | ◎        | → | ◎ | → |   |   |
|            | 応用・開発 | ○   | △    | ○    | →    | ○          | →    | ○       | →    |          | 応用・開発 | ○        | △    | ○                | →    | ○    | △    | ○        | →    |                | 応用・開発 | ○      | △    | ○         | →    | ○               | △    | ○                 | →    | ○            | △    | ○  | →    | ○           | △ | ○        | → |   |   |   |   |
| 中国         | 基礎    | ◎   | △    | ○    | →    | ◎          | →    | ◎       | →    | 中国       | 基礎    | ◎        | △    | ○                | →    | ◎    | →    | ◎        | →    | 中国             | 基礎    | ◎      | △    | ○         | →    | ◎               | →    | ◎                 | →    | ◎            | →    | ◎  | →    | ◎           | → | ◎        | → | ◎ | → |   |   |
|            | 応用・開発 | ○   | △    | ○    | →    | ○          | →    | ○       | →    |          | 応用・開発 | ○        | △    | ○                | →    | ○    | △    | ○        | →    |                | 応用・開発 | ○      | △    | ○         | →    | ○               | △    | ○                 | →    | ○            | △    | ○  | →    | ○           | △ | ○        | → |   |   |   |   |
| 韓国         | 基礎    | ○   | △    | ○    | →    | ○          | →    | ○       | →    | 韓国       | 基礎    | ○        | △    | ○                | →    | ○    | △    | ○        | →    | 韓国             | 基礎    | ○      | △    | ○         | →    | ○               | △    | ○                 | →    | ○            | △    | ○  | →    | ○           | △ | ○        | → | ○ | △ | ○ | → |
|            | 応用・開発 | △   | →    | △    | →    | △          | →    | △       | →    |          | 応用・開発 | △        | →    | △                | →    | △    | →    | △        | →    |                | 応用・開発 | △      | →    | △         | →    | △               | →    | △                 | →    | △            | →    | △  | →    | △           | → | △        | → |   |   |   |   |

| 社会インフラ・モビリティ分野 |       |         |      |      |      |          |      |           |      | 物質と機能の設計・制御 |       |        |      |      |      |         |      |         |      | 共通基盤科学技術 |       |              |      |        |      |              |      |        |      | 共通支援策     |       |          |      |      |      |        |   |      |   |                  |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |   |   |   |   |   |   |   |
|----------------|-------|---------|------|------|------|----------|------|-----------|------|-------------|-------|--------|------|------|------|---------|------|---------|------|----------|-------|--------------|------|--------|------|--------------|------|--------|------|-----------|-------|----------|------|------|------|--------|---|------|---|------------------|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 研究開発領域         |       | 金属系構造材料 |      | 複合材料 |      | ナノ力学制御技術 |      | デバイス半導体材料 |      | 炭素・磁性材料     |       | 研究開発領域 |      | 分子技術 |      | 次世代元素戦略 |      | 物質・材料開発 |      | デバイス駆動型  |       | フチンセンシングデバイス |      | 量子ナノ材料 |      | 有機無機ハイブリッド材料 |      | 研究開発領域 |      | 電絶加工三次元集積 |       | ナノオランダ計測 |      | 物質材料 |      | 研究開発領域 |   | 国際標準 |   | ナノテク/新エネルギーの国際標準 |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 国              | フェーズ  | 現状      | トレンド | 現状   | トレンド | 現状       | トレンド | 現状        | トレンド | 国           | フェーズ  | 現状     | トレンド | 現状   | トレンド | 現状      | トレンド | 現状      | トレンド | 国        | フェーズ  | 現状           | トレンド | 現状     | トレンド | 現状           | トレンド | 現状     | トレンド | 現状        | トレンド  | 現状       | トレンド | 現状   | トレンド |        |   |      |   |                  |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 日本             | 基礎    | ○       | →    | ○    | →    | ○        | →    | ◎         | →    | 日本          | 基礎    | ◎      | →    | ◎    | △    | ○       | △    | ○       | →    | 日本       | 基礎    | ○            | △    | ○      | →    | ○            | △    | ○      | →    | 日本        | 基礎    | ○        | △    | ○    | →    | ○      | △ | ○    | → | 日本               | 基礎    | △ | → | △ | → | △ | → |   |   |    |    |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                | 応用・開発 | ○       | △    | ○    | →    | ○        | →    | ○         | →    |             | 応用・開発 | ○      | △    | ○    | →    | ○       | △    | ○       | →    |          | 応用・開発 | ○            | △    | ○      | →    | ○            | △    | ○      | →    |           | 応用・開発 | ○        | △    | ○    | →    | ○      | △ | ○    | → |                  | 応用・開発 | ○ | △ | ○ | → |   |   |   |   |    |    |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 米国             | 基礎    | ◎       | →    | ◎    | →    | ◎        | →    | ◎         | →    | 米国          | 基礎    | ◎      | →    | ◎    | △    | ○       | △    | ○       | →    | 米国       | 基礎    | ◎            | →    | ◎      | △    | ○            | △    | ○      | →    | 米国        | 基礎    | ◎        | →    | ◎    | △    | ○      | △ | ○    | → | 米国               | 基礎    | ◎ | → | ◎ | △ | ○ | △ | ○ | → | 米国 | 基礎 | ◎ | → | ◎ | △ | ○ | △ | ○ | → |
|                | 応用・開発 | ○       | △    | ○    | →    | ○        | →    | ○         | →    |             | 応用・開発 | ○      | △    | ○    | →    | ○       | △    | ○       | →    |          | 応用・開発 | ○            | △    | ○      | →    | ○            | △    | ○      | →    |           | 応用・開発 | ○        | △    | ○    | →    | ○      | △ | ○    | → |                  | 応用・開発 | ○ | △ | ○ | → |   |   |   |   |    |    |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 欧州             | 基礎    | ◎       | →    | ◎    | →    | ◎        | →    | ◎         | →    | 欧州          | 基礎    | ◎      | →    | ◎    | △    | ○       | △    | ○       | →    | 欧州       | 基礎    | ◎            | →    | ◎      | △    | ○            | △    | ○      | →    | 欧州        | 基礎    | ◎        | →    | ◎    | △    | ○      | △ | ○    | → | 欧州               | 基礎    | ◎ | → | ◎ | △ | ○ | △ | ○ | → | 欧州 | 基礎 | ◎ | → | ◎ | △ | ○ | △ | ○ | → |
|                | 応用・開発 | ○       | △    | ○    | →    | ○        | →    | ○         | →    |             | 応用・開発 | ○      | △    | ○    | →    | ○       | △    | ○       | →    |          | 応用・開発 | ○            | △    | ○      | →    | ○            | △    | ○      | →    |           | 応用・開発 | ○        | △    | ○    | →    | ○      | △ | ○    | → |                  | 応用・開発 | ○ | △ | ○ | → |   |   |   |   |    |    |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 中国             | 基礎    | ◎       | △    | ○    | →    | ◎        | △    | ○         | →    | 中国          | 基礎    | ◎      | △    | ○    | →    | ◎       | △    | ○       | →    | 中国       | 基礎    | ◎            | △    | ○      | →    | ◎            | △    | ○      | →    | 中国        | 基礎    | ◎        | △    | ○    | →    | ◎      | △ | ○    | → | 中国               | 基礎    | ◎ | △ | ○ | → | ◎ | △ | ○ | → | 中国 | 基礎 | ◎ | △ | ○ | → | ◎ | △ | ○ | → |
|                | 応用・開発 | ○       | △    | ○    | →    | ○        | →    | ○         | →    |             | 応用・開発 | ○      | △    | ○    | →    | ○       | △    | ○       | →    |          | 応用・開発 | ○            | △    | ○      | →    | ○            | △    | ○      | →    |           | 応用・開発 | ○        | △    | ○    | →    | ○      | △ | ○    | → |                  | 応用・開発 | ○ | △ | ○ | → |   |   |   |   |    |    |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 韓国             | 基礎    | ○       | →    | ○    | →    | ○        | →    | ○         | →    | 韓国          | 基礎    | △      | →    | △    | →    | △       | →    | △       | →    | 韓国       | 基礎    | △            | →    | △      | →    | △            | →    | △      | →    | 韓国        | 基礎    | △        | →    | △    | →    | △      | → | △    | → | 韓国               | 基礎    | △ | → | △ | → | △ | → | △ | → |    |    |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                | 応用・開発 | △       | →    | △    | →    | △        | →    | △         | →    |             | 応用・開発 | △      | →    | △    | →    | △       | →    | △       | →    |          | 応用・開発 | △            | →    | △      | →    | △            | →    | △      | →    |           | 応用・開発 | △        | →    | △    | →    | △      | → | △    | → |                  |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |   |   |   |   |   |   |   |

(注1) フェーズ  
基礎：大学・国研などでの基礎研究の範囲  
応用・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(注2) 現状  
◎ 特に顕著な活動・成果が見えている  
○ 顕著な活動・成果が見えている  
△ 顕著な活動・成果が見えていない  
× 特筆すべき活動・成果が見えていない

(注3) トレンド  
↑：上昇傾向  
→：現状維持  
↓：下降傾向

出所) JST/CRDS、研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野(2024年)「図 1.3.2-1 国際比較表まとめ」  
<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-04.pdf>、2026年3月18日アクセス

## 2.1.3 潮流に関する調査・中核研究者の検討

### (1) 各潮流の調査

潮流を決定した後、潮流毎、各潮流で注目する技術の概要、キーテクノロジー、タイムライン、実用化可能性について検討を行った。潮流の作成にあたっては、生成 AI(ChatGPT Enterprise)により得られた結果を用いて、当社担当者による抽出・修正及び確認を行っている。

表 2-10 情報収集項目・収集内容

| 調査項目          | 詳細   |
|---------------|--|
| 技術的進歩と方向性(概要) | 主要技術と、その発展の方向性を概要図及びサマリー(A41枚弱)として整理               |
| タイムライン        | 潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理                              |
| キーテクノロジー      | 潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて、出現時期・背景と共に整理      |
| 実用化可能性        | 本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理 |
| 出所            | 作成に使用した出所を整理                                       |

生成 AI において用いた入力プロンプトは以下の通りである。

表 2-11 調査に用いた生成 AI プロンプト

|   |
|---|
| <p>健康・医療・食料／バイオ生産分野の潮流「AI 駆動型創薬パイプラインの構築」に用いたプロンプト例</p> <p>あなたは、健康・医療・食料／バイオ生産分野の専門家です。<br/>以下の視点で専門家向けのレポートを作成してください。<br/>以下の#注目する技術及び#注目する潮流について、箇条書き及び表形式で整理してください。<br/>5 ページ程度を想定しています。</p> <p>#注目する技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- AI 駆動型創薬パイプラインの構築</li> <li>- AI 駆動型創薬パイプラインの構築の定義:創薬研究の各段階(例えば、標的探索や医薬品候補分子の最適化など)の効率化を目的として、広義の AI(機械学習のみでなく、従来人間が行っていた高度な判断をコンピュータによって代替する広範な技術や研究分野)を適用する技術の確立、またそれら要素技術の統合を通して、創薬研究のあり方そのものを変革する試みまでを指す領域である。</li> <li>- キーワード:人工知能、機械学習、深層学習、バイオインフォマティクス、ケモインフォマティクス、シミュレーション、数理モデリング、分子動力学計算(Molecular Dynamics: MD)、データベース、ドッキングシミュレーション、大規模データ解析、分子設計</li> <li>- 記載した技術にとらわれず、最近の動向で拾うべき技術があれば、広く収集してください。</li> </ul> <p>#注目する潮流</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 技術的進歩と方向性(概要):各潮流で注目する技術の概要及び、当該技術の発展の経緯を箇条書きで整理、いつの年代のことを述べているのが明示すること。</li> <li>- 2000 年頃から現在に至るまでの潮流のタイムラインでの整理:表形式</li> <li>- キーテクノロジーとその定義の概要:表形式。出現時期(年)、現在の技術的課題、その解決にかかる時間とキーになる研究テーマを含めて記載すること。</li> <li>- 実用化可能性:ユースケースや波及が期待される産業領域</li> </ul> <p>また、#情報源には、以下を含めてください。JST の研究開発の俯瞰報告書等、特定の文献のみに偏らないよう、指示した情報源について、多様なソースから引用してください。</p> <p>#情報源</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- JST 研究開発戦略センターが出しているレポート、特に「研究開発の俯瞰報告書(XX 分野)」あるいは戦略レポート</li> </ul> |
|---|

- 他の国内外政府・公的研究機関あるいは公的研究機関からの委託で行っている調査
- 国際機関、国内外の大学、研究機関、財団(例:ノーベル財団)、主要なシンクタンクの分析
- 学術出版社・学術論文
- 上記レポートの中でさらに参照している文献、学術論文

情報源は、専門書の出典表記に近い形で、資料名称の直後に URL(文字列)を付して再リスト化してください。URL はそのままコピー可能な形で示してください。後で正しいかを検証するため、注目する潮流のそれぞれのパートの文章で、どの出所を引用したのかがわかるようにしてください。

## (2) 中核研究者の検討

インタビュー対象となる中核研究者については、各潮流において、以下に挙げる観点(複数)において俯瞰性を有し、潮流をカバーできる有識者を抽出した。候補者は各分野 8 名以上とした。

- 専門分野が、より汎用的に活用できる技術をカバーしているか。個別の技術領域に特化している場合は優先度を下げる
- 領域の代表的な学会の会長、理事などを務めているか、あるいは学術誌の編集委員・エディター、レビューワーをしているか。
- 国内だけでなく、国際的なコミュニティ・学術誌での要職であるか。
- 複数の学会に所属しているか(要職である場合に考慮)
- 独立行政法人の研究所など、他の機関でもポジションを併任しているか。
- 大型の国家プロジェクトなどの代表者・PI 等の経験があるか。
- 40 代～50 代の研究者か。(他に適切な研究者いない場合は前後の年代も含める)

## (3) 中核研究者の抽出

(2)に示した方法で、潮流毎に調査対象の候補者を抽出した上で、専門領域が偏らないようにインタビュー対象者を選定し、計 24 名の有識者にインタビューを実施した。

## 2.1.4 インタビュー調査項目の検討・インタビューの実施

各中核研究者に対しては、以下の項目についてインタビューを行った。各潮流における技術の方向性を含むドラフト一式を用いて、ドラフトの内容に関する過不足に加え、今後 5～10 年の技術トレンド、今後の研究の潮流の方向性について助言を得た。

表 2-12 インタビュー調査項目

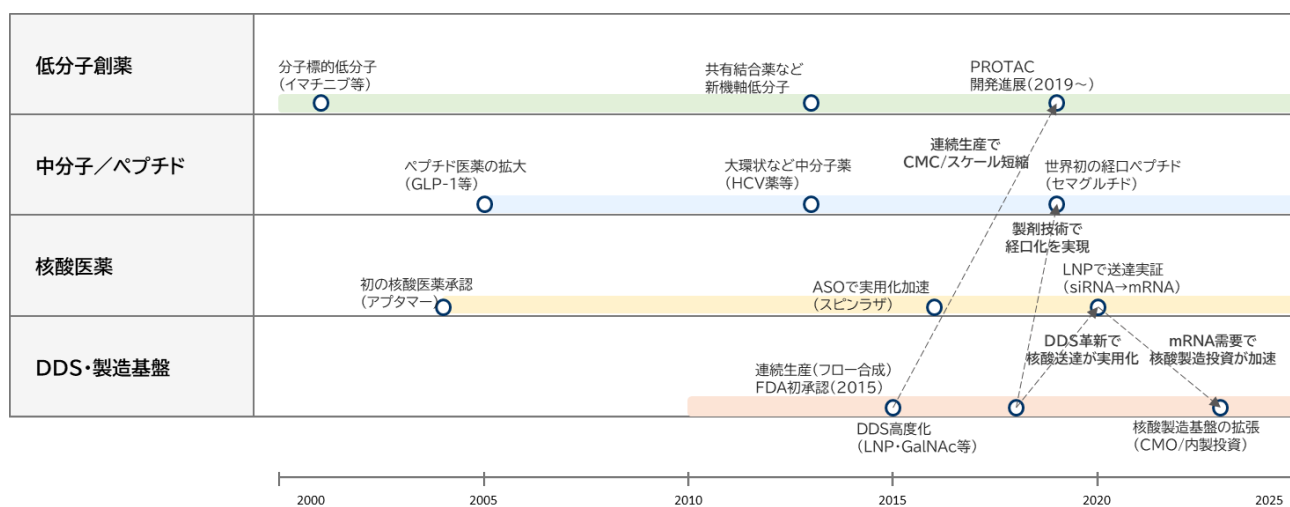
| 調査項目                                   | 詳細   |
|--|--|
| 1. 各潮流に関する国内外の最先端研究の潮流、時系列整理、キーテクノロジー等 | ドラフト版として作成した「潮流」「時系列整理」「キーテクノロジー」等のアウトプットの過不足  |
| 2. 今後の技術トレンド                           | <ul style="list-style-type: none"><li>● 新たに浮上している、または今後 5 年から 10 年の間に浮上すると考えられる技術トレンド、技術的ブレークスルーの可能性、技術面の障壁、規制・倫理も含む非技術面の障壁</li><li>● 他分野研究連携の必要性</li><li>● わが国のアセット(人材・インフラ等)と国外プレイヤー・チームとの比較</li></ul> |
| 3. 今後の研究の潮流の方向性                        | <ul style="list-style-type: none"><li>● 今後5年から10年の間において潮流となり得る研究の方向性</li><li>● 今後の当該分野において優先すべき研究課題・支援形態</li></ul>   |

## 2.2 健康・医療・食料／バイオ分野

### 2.2.1 潮流 A1: 低・中分子創薬「モダリティ多様化とデリバリー・製造基盤の高度化」

#### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



※バーは「顕著に発展・活用が進んだ時期」の目安である。

出所) 点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。

矢印の向き: 影響が及ぶ方向 (起点から波及先) を示す。

矢印上のラベル: 影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-2 技術的進歩と方向性の概要図「モダリティ多様化とデリバリー・製造基盤の高度化」

表 2-13 技術的進歩と方向性(概要)「モダリティ多様化とデリバリー・製造基盤の高度化」

| 概要   |
|--|
| <p>【低・中分子モダリティの新展開】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>モダリティの多様化</b><br/>20世紀には低分子医薬が主流であったが、1980年代以降の遺伝子組換え技術の進展を受け、21世紀には抗体医薬が飛躍的に成長した。近年さらに核酸医薬・遺伝子治療・細胞治療など多彩なモダリティが次々登場し、創薬手段の多様化が進んでいる。製薬企業各社はアンメットニーズに応えるため新たなモダリティの研究開発を加速しており、その成果が COVID-19 ワクチンの迅速な実用化などで顕在化した。</li> <li>● <b>低分子創薬の進化</b><br/>従来の低分子医薬品(典型的な分子量 500 以下)は経口投与や細胞膜透過性に優れ、医薬の中心的役割を担ってきた。<br/>近年は創薬標的が枯渇する一方、標的タンパク質分解誘導剤(PROTAC)や共有結合薬など新手法が台頭している。米 FDA 新薬承認数(2019~23 年)は低・中分子医薬 173 品に対し抗体等生物製剤 68 品であり、医薬の根幹は合成低分子が占める。</li> <li>● <b>中分子(ペプチド・天然物)の再興</b><br/>低分子と高分子の長所を併せ持つ中分子医薬への期待が高まっている。ペプチドや中分子化合物は、標的への高い特異性と低分子並みの投与経路多様性を両立できる可能性がある。細胞外のタンパク質間相互作用(PPI)標的には抗体医薬が有効であるが、高コスト・細胞内標的不可・経口投与ができないなど課題も多い。中分子医薬はその課題を克服すべく、例えば環状ペプチドや合成天然物類縁体により抗体並みの高い特異性と細胞膜透過性の両立が追求されている。近年は経口ペプチド製剤の登場(2019 年セマグルチド承認)など製剤技術の進歩でペプチド医薬の適応領域が拡大し、創薬モダリティとして再注目されている。</li> <li>● <b>核酸医薬の台頭</b><br/>アンチセンス核酸や siRNA 等の核酸医薬は、遺伝子発現そのものを調節できる新モダリティとしてこの 10 年で実用化段階に入った。初の核酸医薬品は 2004 年承認の抗 VEGF アプタマーだが開発に長年を要した。その後化学修飾技術やデリバリー技術の進展により、2016 年に致死性遺伝病 SMA 治療のアンチセンス薬スピルラザが承認されるなど成果が相次ぎ、核酸医薬品承認数は 2016 年以降急増している。低・中分子創薬の領域で核酸医薬はデジタル医療等と並びトレンドの一つと位置付けられている。</li> </ul> |
| <p>【DDS(デリバリー)技術・製造基盤の進化】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>ドラッグデリバリー技術の高度化</b><br/>新モダリティの実用化には DDS(Drug Delivery System)におけるイノベーション創出が不可欠である。低分子は自然に細胞膜透過するものも多いが、分子量 1000 を超える中分子や核酸では細胞内送達が大きな課題となる。近年、脂質ナノ粒子や高分子ミセル、各種分子コンジュゲート(例:GalNAc-糖鎖による肝指向化)等の技術で標的臓器への配送効率が向上しつつある。<br/>2018 年には初の LNP 製剤 siRNA 薬(オンパットロ)が登場し、2020 年には LNP を用いた mRNA ワクチンが実証された。今後は肝臓以外の臓器へ核酸を届ける技術やエンドソーム脱出効率の向上など、DDS 分野のさらなる技術融合が求められている。</li> <li>● <b>製造技術と生産体制の革新</b><br/>モダリティ多様化に対応する製造基盤の強化も重要である。低分子合成では近年連続生産(フロー合成)手法が台頭し、2015 年には米 FDA が初めて医薬品への連続生産の適用を承認、以降少なくとも 7 品目で導入されている。<br/>核酸医薬の製造では、多品種少量合成(研究初期)と少品種大量合成(後期)という二段階の要求に応える必要があり、後者に向け日本発の液相合成法の開発やフロー合成適用など新手法の研究が進む。世界的にも核酸医薬製造受託企業は限られ、平均 9~12 か月のリードタイムが開発のボトルネックとなっている。<br/>Alnylam 社が内製化を進める動きもあるが、日本ではまず核酸医薬 CMO の育成が急務と指摘されている。製造コスト低減と供給体制強化は、新モダリティ創薬の持続的発展に欠かせない課題である。</li> </ul>   |

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-14 タイムライン「モダリティ多様化とデリバリー・製造基盤の高度化」

| 年    | 主な進展やイベント   |
|------|---|
| 2001 | 慢性骨髄性白血病治療薬イマチニブ(グリバック)承認。低分子による分子標的治療薬の成功例となる。   |
| 2004 | 初の核酸医薬品として RNA アプタマー製剤マクジュエン承認(加齢黄斑変性症)。核酸を創薬モダリティとする先駆けとなる。  |
| 2005 | インクレチン模倣ペプチド(GLP-1 アナログ)エキセナチド承認。ペプチド医薬が 2 型糖尿病治療に本格応用された。  |
| 2013 | 新機軸の低分子医薬が相次ぎ承認された。不可逆的共有結合型 BTK 阻害薬イブルチニブ(血液がん)や、大環状マクロライド系 HCV プロテアーゼ阻害薬シメプレビル(ソプリアード)など。前者は共有結合薬、後者は分子量 750 の中分子医薬品。   |
| 2015 | FDA が初めて医薬品への連続生産プロセス適用を承認(米 Vertex 社 Orkambi)。従来のバッチ式に代わる革新的製造法が実用化された。日本でも同年、創薬技術イノベーションの重要性が政府提言「日本最高戦略」にて強調された。   |
| 2016 | 脊髄性筋萎縮症(SMA)治療のアンチセンス核酸医薬スピナラザが承認される(米 EU 日)。致命的遺伝疾患への核酸医薬初適応で年間 2,000 億円規模の売上を記録した。同年、欧米で初の遺伝子治療薬も承認され、核酸・遺伝子を標的とする治療法が実用化された。   |
| 2018 | 世界初の siRNA 医薬(オンパットロ)が承認された。トランスサイレチンアミロイドーシスに対する核酸治療薬で、LNP ナノ粒子による体内デリバリー技術の実用例となった。また米国では初の CAR-T 細胞療法(キムリア)も承認され、細胞・遺伝子・核酸と多様なモダリティの新薬が登場。                                 |
| 2019 | PROTAC(標的タンパク質分解誘導薬)の初の臨床試験が米 Arvinas 社により開始(前立腺がん対象の ARV-110)。低分子と誘導分解の融合コンセプトが実臨床段階になる。同年、Novo Nordisk 社の経口ペプチド薬リベルサス(セマグルチド)が承認される。世界初の経口ペプチド治療薬であり、ペプチド医薬の投与経路拡大に画期をもたらす。 |
| 2020 | 新型コロナウイルス感染症が世界的に流行する。従来数年以上を要するワクチン開発が mRNA ワクチン技術により 1 年足らずで実現し、人類史上例のないスピードで全世界への供給が達成された。<br>核酸を用いたワクチンの有効性が初めて大規模に示され、核酸医薬への期待を押し上げる契機となった。                              |
| 2021 | 米 FDA が N-of-1 治療(極めて患者数の少ない疾患向けオーダーメイド医薬)の開発指針を初公表した。<br>超希少疾患患者に対しアンチセンス核酸を個別設計する試みが活発化した。日本でも厚生労働省「医薬品産業ビジョン 2021」において、多様化・複雑化するモダリティ研究開発の重要性がうたわれた。                       |
| 2023 | 標的タンパク質分解薬 ARV-471(乳がん対象、経口剤)が米国で Phase III 試験が開始され、FDA ファストトラックとして指定された。PROTAC 創薬が最終治験段階に入る。日本では、核酸医薬創生イニシアチブなど国家プロジェクトが進展している。  |

### (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-15 キーテクノロジー「モダリティ多様化とデリバリー・製造基盤の高度化」

| 技術                     | 出現時期・背景  | 主な課題  | 解決の見通し・研究テーマ  |
|------------------------|--|---|---|
| 標的タンパク質分解技術 (PROTAC等)  | 2001年に概念が提唱された。2010年代後半に実用分子創製が加速。2019年に初の臨床入り。低分子で狙えない標的蛋白の分解を誘導する新手法。                                  | 利用可能なユビキチンE3リガーゼの種類が限られ、標的や疾患に適合する分解経路構築が課題である。また分子量が大きく細胞膜透過性や経口性の確保、オフターゲット分解抑制、安全性確保も重視されている。                              | 新規E3リガーゼリガンドの開発や分解メカニズムの基礎研究が進行中。各疾患・標的に最適なE3を選択・設計するプラットフォーム構築や、分子グルー型誘導剤などPROTAC以外の手法研究も活発。複数社で臨床開発が進み、近年中に初の承認例も期待される。   |
| ペプチド医薬・中分子             | 20世紀後半からホルモンなどペプチド医薬が実用化。2000年代に合成技術や特殊アミノ酸導入が進み「中分子創薬」概念が確立。近年は経口ペプチドも実現している。                           | 標的に対する高い親和性・特異性を示す一方、酵素分解による代謝安定性の低さや細胞内移行性の不足が課題。また大規模合成コストや製剤の物性(注射剤が主で経口剤が困難)も克服すべき点。                                      | ペプチド環化・D-アミノ酸導入等による安定化やドラッグデリバリー技術との組み合わせで課題改善を図る。実際、脂肪酸修飾で半減期延長したインスリンや経口投与を可能にしたGLP-1アナログなど成功例が登場。細胞貫通ペプチドを利用した送達や標的指向性を持つペプチド薬(ペプチド薬物複合体=PDC)の研究も進んでいる。                      |
| 核酸医薬(アンチセンス核酸/siRNAなど) | 1970-80年代に概念出現。1998年初の承認(アンチセンス核酸、フォミビルセン)後停滞するも、化学修飾や送達技術革新により2010年代後半から複数の核酸医薬が承認。遺伝子発現を直接制御する新規モダリティ。 | 標的特異性が高く副作用が少ないと期待されたが、実際には一部候補品で毒性懸念が判明し開発中止例もあるなど安全性検証が課題になっている。また静脈投与では肝臓以外への送達効率が低く、筋・中枢など他組織へのデリバリー開発も重要である。生産コストも高価である。 | 毒性発現メカニズム解明や免疫応答回避の研究が進行中。化学修飾の改良や標的組織指向性の付与(例:GalNAc-糖鎖で肝臓以外へ送達)により安全性・有効性が向上しつつある。さらに脂質ナノ粒子(LNP)やエクソソーム等で中枢送達を可能にする研究も活発。製造面では酵素合成法等による大幅なコスト低減や高速大量生産も将来の鍵となる。               |
| ドラッグデリバリーシステム(DDS技術全般) | 1960-70年代に概念誕生。リボソーム製剤やPEG化技術など経て、近年はLNP(脂質ナノ粒子)やウイルス様粒子、細胞外小胞など多様なベクターが登場。核酸やペプチド等の体内送達を飛躍的に向上させる基盤技術。  | 標的組織への指向性と送達効率の最適化が課題。全身投与では肝臓蓄積が優勢なため他臓器送達には工夫が必要である。また送達担体そのものの免疫原性・安全性確保や、大量製造技術の確立もボトルネックとなる。                             | 高機能ナノキャリア(pH応答性脂質、新規ポリマーキャリア等)の開発や、抗体やリガンドを用いたアクティブターゲティングの導入で指向性を向上。エンドソーム脱出を促進する分子の併用も研究中。核酸デリバリーではLNP改良型や細胞毎に最適化したデリバリー素材の探索が続く。さらに遺伝子ベクターと無細胞送達技術のハイブリッドなど新たなDDS戦略も模索されている。 |

| 技術                    | 出現時期・背景  | 主な課題  | 解決の見通し・研究テーマ   |
|-----------------------|--|---|--|
| 次世代製造技術(フロー合成・自動化等)   | 製薬分野で本格化したのは2010年代(他産業では普及済)。2015年にFDAが初のContinuous Manufacturing(連続生産)を承認。以降、連続生産やプロセス自動化が品質向上と開発迅速化の切り札として注目。医薬品の安定供給とコスト削減にも資する基盤技術。      | 規制当局による承認実績が少なく標準化が途上。初期設備投資や人材育成のハードルも高い。また核酸原料の大量合成では従来の固相合成に代わる新手法が必要。受託製造側の供給能力不足も課題で、核酸CMOのリードタイムが長いことが、開発の制約となっている。 | 規制面ではFDA・EMAがガイドライン策定や対話を進め、徐々に承認事例が蓄積。技術面では装置小型化モジュール化により導入障壁が低下しつつある。日本発の液相合成法等、新しい核酸合成技術も開発中。将来的にはオンデマンド医薬品合成やAI制御による品質モニタリングなど、スマートファクトリー化が見込まれる。官民連携での人材育成・設備投資支援策も鍵。                         |
| 天然物創薬の合成生物学(天然物誘導体創製) | 古くは微生物培養から抗生物質発見(20世紀中葉)。現在、ゲノム編集等の合成生物学技術で天然物骨格を人為的に改変する手法が登場。産総研などによる巨大遺伝子クラスターの精密改変技術で、従来不可能だった天然物誘導体の創製が可能に。多様な構造を持つ新規化合物ライブラリーを創出できる技術。 | 生合成経路の遺伝子操作が高度に専門的で、目的物質の産生までに試行錯誤を要する。また生成物の精製や評価にも手間がかかる。改変した微生物株の安定性や収率の向上も課題である。産学連携で大規模プラットフォームを維持する体制整備も必要。         | モジュール型酵素(ポリケチド合成酵素PKSやNRPS)遺伝子の編集技術が確立。CRISPR/Cas9とDNAアッセムブリを駆使し、誤り無く巨大遺伝子を組み替える技術が開発された。Rapamycinでの実証に成功し、環構造数の増減や立体配置の変更まで実現。今後はこの技術を応用し、膨大な「仮想天然物」ライブラリーを創出する研究が進む。創薬シーズ分子の多様性拡大に大きく寄与すると期待される。 |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-16 実用化可能性「モダリティ多様化とデリバリー・製造基盤の高度化」

| 名称              | 解説   |
|-----------------|--|
| 希少疾患・オーダーメイド医療: | 患者数がごく少ない難病に対し、核酸医薬を用いて N-of-1 レベルの個別治療薬を開発する動きが現実味を帯びている。2021年にFDAが N-of-1 創薬指針を公表し、米国では n-Lorem 財団が患者毎にアンチセンス薬を無償提供する取組みを開始。低・中分子技術、とりわけ核酸医薬の迅速設計・少量製造が、個別化医療での命綱となっている。   |
| がん治療の新展開:       | 分子標的薬や免疫療法で進歩したがん領域で、「狙えなかった標的」を狙う新技術への期待が大きい。例えば従来阻害が難しかった転写因子や変異タンパク質に対し、PROTAC 技術で分解を誘導するアプローチが進行中である。実際、男性ホルモン受容体を標的とした PROTAC 経口薬が前立腺がん臨床試験中であり、有望な中間結果が報告されている。また中分子薬で細胞内抗原を狙う研究や、核酸医薬で“がんの運命遺伝子”を沈黙させる試みも行われている。これらは難治性がんや再発がんへの新たな治療選択肢を提供し得る。 |
| 感染症・ワクチン開発:     | mRNA ワクチンの成功により、パンデミック対策や難治性感染症ワクチンに核酸技術を応用する道が拓けた。今後、新興ウイルスへの迅速ワクチン開発のみならず、がん治療ワクチンや難治菌感染症に対する核酸ワクチンも期待される。また短鎖 RNA による局所投与型抗ウイルス薬、抗菌ペプチドを応用した新機序の抗生物質など、感染症領域での低・中分子技術の波及応用も進みつつある。  |

| 名称            | 解説  |
|---------------|---|
| 慢性疾患(代謝・中枢など) | 糖尿病・肥満症治療でペプチド医薬(GLP-1アナログ等)がゲームチェンジャーとなりつつあるように、慢性疾患領域でも低・中分子技術が新たな治療コンセプトをもたらしている。中枢神経疾患では従来創薬標的が限られていたが、脳内投与のアンチセンスや血液脳関門透過性 PROTAC の開発によりアルツハイマー病や筋萎縮性側索硬化症(ALS)への挑戦が進んでいる。今後、慢性疾患の根治や進行抑制を目指した低・中分子医薬の役割は一層拡大すると考えられる。 |

## (5) インタビュー結果を踏まえた今後の潮流および研究の方向性

中核研究者へのインタビュー結果に基づき、今後 5 年から 10 年の潮流および研究の方向性を整理した。

表 2-17 今後の潮流および研究の方向性「モダリティ多様化とデリバリー・製造基盤の高度化」

| 項目  | 概要   |
|---|--|
| 新たに浮上している、または今後 5 年から 10 年の間に浮上すると考えられる技術トレンド、技術的ブレークスルーの可能性、技術面の障壁、規制・倫理も含む非技術面の障壁 | <p>■キーワードは「サステナビリティ」</p> <p>社会的サステナビリティ(高薬価・製造コストや流通負荷の低減)と地球環境サステナビリティ(CO2 削減・資源循環等)を同時にいたす研究が主な潮流になる。例えば生物医薬の常温輸送を可能にするハイドロゲルや微生物ものづくりによる持続可能な合成など、「モノづくり・物流」起点のブレークスルーが示唆されている。</p> <p>自己集合医薬やスープラモレキュラーポリマー等の概念が提示される一方、薬価制度・規制・倫理・サプライチェーン・冷蔵/低温輸送などの「非技術的な障壁」を技術設計段階から織り込む必要がある。</p> |
| 他分野研究連携の必要性   | <p>例えば医薬×サステナビリティなど、共通目標が明確であれば分野連携は自発的に進む。課題起点で旗を立てることがカギとなる。</p> <p>日本の強みとしては材料分野が挙げられ、医薬×材料の連携が重要とされている。</p> <p>具体的な接点候補としては自己集合材料やスープラモレキュラーポリマー等の応用可能性がある。</p>  |
| わが国のアセット(人材・インフラ等)と国外プレイヤー・チームとの比較  | <p>■強み<br/>材料分野。サステナビリティの視点でモダリティ横断的に「材料・設計・製造基盤」を活かす方向が有効。</p> <p>■弱み<br/>人材面の課題として 40 代の層が薄い。国外との競争力を考えるうえで弱点となる。</p>  |
| 今後5年から10年の間において潮流となり得る研究の方向性  | <p>社会的・環境的課題の双方に資する研究として、サステナビリティなどを軸にしたテーマ設定があり得る。例えば「医薬×サステナビリティ」が潮流の例である。</p> <p>大学が担うべき潮流は「新モダリティのコンセプト創出」。自己集合医薬、スープラモレキュラーポリマー等の新概念の提示が重要。</p> <p>バイオメディカル技術を研究課題へ、環境材料を医療へ、という双方向の技術転用が重要な方向性である。</p>   |
| 今後の当該分野において優先すべき研究課題・支援形態   | <p>分野視点よりも「問題設定ベース」で設計することが重要。</p> <p>大学とスタートアップとの役割分担を前提として制度設計を行う。大学は新概念を提示し、スタートアップは製品化に向けた最適化を行う、という形を想定する。</p> <p>AI、データサイエンス連携は進めつつも、分野を限定せず、他分野が参画可能な公募や目標の設定が望ましい。</p>   |

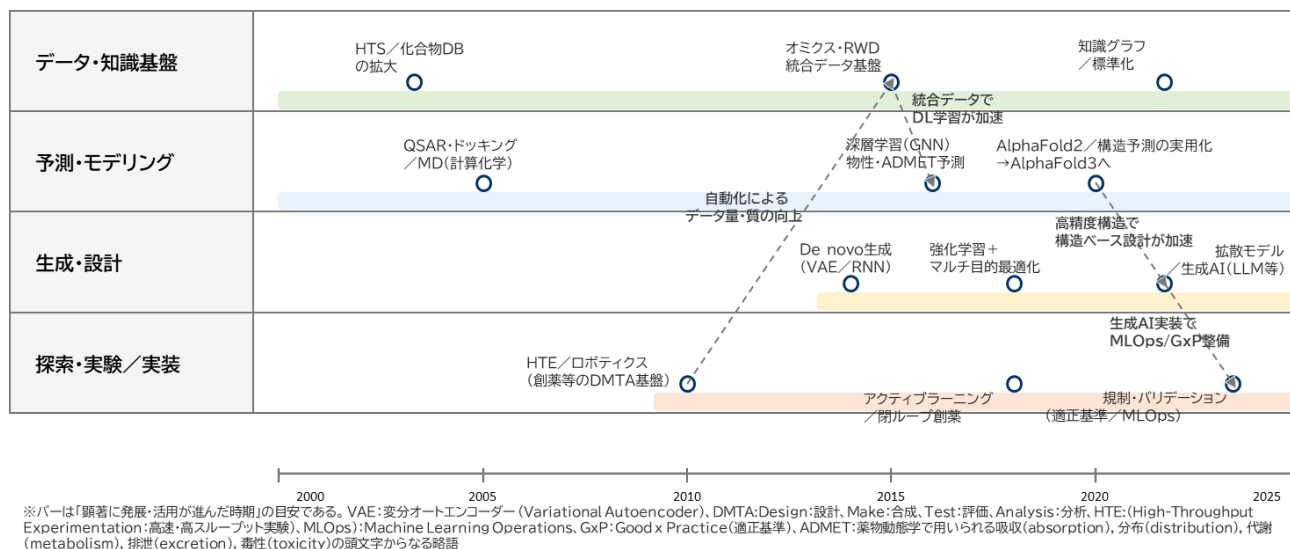
## (6) 出所

- JST CRDS「研究開発の俯瞰報告書 ライフサイエンス・臨床医学分野(2024年)」  
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2024-FR-05.html>
- Nat Rev Drug Discov (2004) Fragment-based lead discovery  
<https://www.nature.com/articles/nrd1467>
- Nat Rev Drug Discov (2007) A decade of fragment-based drug design  
<https://www.nature.com/articles/nrd2220>
- Nat Rev Drug Discov (2011) The resurgence of covalent drugs  
<https://www.nature.com/articles/nrd3410>
- Nat Rev Drug Discov (2017) DNA-encoded chemistry: enabling the deeper sampling of chemical space  
<https://www.nature.com/articles/nrd.2016.213>
- Nat Rev Drug Discov (2018) Principles for targeting RNA with drug-like small molecules  
<https://www.nature.com/articles/nrd.2018.93>
- Nat Rev Drug Discov (2022) Targeting RNA structures with small molecules  
<https://www.nature.com/articles/s41573-022-00521-4>
- Nat Rev Drug Discov (2019) Targeted protein degradation: expanding the toolbox  
<https://www.nature.com/articles/s41573-019-0047-y>
- PubMed (2025) Preclinical Evaluation of Bavdegalutamide (ARV-110), a Novel PROteolysis TArgeting Chimera Androgen Receptor Degradar (NCT03888612 言及あり)  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39670468/>
- FDA(Onpattro/patisiran 承認ニュース:FDA 提供の配信面)  
<https://www.prnewswire.com/news-releases/fda-approves-first-of-its-kind-targeted-rna-based-therapy-to-treat-a-rare-disease-300695514.html>
- Onpattro(patisiran)FDA ラベル(accessdata)  
[https://www.accessdata.fda.gov/drugsatfda\\_docs/label/2019/210922s004lbl.pdf](https://www.accessdata.fda.gov/drugsatfda_docs/label/2019/210922s004lbl.pdf)
- FDA(givosiran/GIVLAARI 承認解説:Resources for Approved Drugs)  
<https://www.fda.gov/drugs/resources-information-approved-drugs/fda-approves-givosiran-acute-hepatic-porphyrin>
- GIVLAARI(givosiran)FDA ラベル(accessdata)  
[https://www.accessdata.fda.gov/drugsatfda\\_docs/label/2019/0212194s000lbl.pdf](https://www.accessdata.fda.gov/drugsatfda_docs/label/2019/0212194s000lbl.pdf)
- FDA(Rybelsus 承認ニュース:FDA 提供の配信面)  
<https://www.prnewswire.com/news-releases/fda-approves-first-oral-glp-1-treatment-for-type-2-diabetes-300922431.html>
- RYBELSUS(semaglutide)FDA ラベル(accessdata:最新版ラベル束の一例)  
[https://www.accessdata.fda.gov/drugsatfda\\_docs/label/2025/213051s024%2Cs028s029lbl.pdf](https://www.accessdata.fda.gov/drugsatfda_docs/label/2025/213051s024%2Cs028s029lbl.pdf)
- Nature (2021) Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold  
<https://www.nature.com/articles/s41586-021-03819-2>
- J Pharm Sci (2017) Regulatory Perspectives on Continuous Pharmaceutical Manufacturing  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022354917304847>
- FDA Guidance (2023) Q13 Continuous Manufacturing of Drug Substances and Drug Products  
<https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/q13-continuous-manufacturing-drug-substances-and-drug-products>
- ICH Q13 Step4 Guideline PDF(リンク元ページ)  
<https://www.gmp-compliance.org/guidelines/gmp-guideline/ich-q13-continuous-manufacturing-of-drug-substances-and-drug-products>
- Epilepsy Foundation  
<https://www.epilepsy.com/stories/first-fda-approved-drug-made-3d-printer-levetiracetam>

## 2.2.2 潮流 A2: AI 創薬「AI 駆動型創薬パイプラインの構築」

### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



出所)点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き:影響が及ぶ方向(起点から波及先)を示す。  
 矢印上のラベル:影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-3 技術的進歩と方向性の概要図「AI 駆動型創薬パイプラインの構築 AI 駆動型創薬パイプラインの構築」

表 2-18 技術的進歩と方向性(概要)「AI 駆動型創薬パイプラインの構築」

| 概要 |  |
|----|--|
| ●  | (2010 年代後半～)創薬 DX への期待と AI 導入の背景<br>製薬業界では新薬 1 品目の開発に約 20 億ドル・10 年以上を要し、従来手法の限界が顕在化している。AI は巨大データから有用なパターンを抽出し、標的分子の発見やリード設計を効率化できる手段として注目されている。成功率低下や研究開発費用増加を背景に、創薬プロセス全体で DX 導入の機運が高まっている。  |
| ●  | (1970 年代～)計算創薬の黎明期から機械学習へ<br>1970 年代から CADD(Computer-Aided Drug Design; 計算機支援創薬)が導入され、2000 年代には QSAR(Quantitative Structure-Activity Relationships; 定量的構造活性相関)やドッキングなど構造ベース手法が定着。2010 年代以降、ディープラーニングの進展により、規則ベースからデータ駆動型へ転換。AI により、結合予測や新規骨格提案といった高度な化合物設計が可能となっている。 |
| ●  | (2010 年代後半～)近年の成果とスタートアップの台頭<br>AI 創薬スタートアップが台頭し、製薬大手との連携が進展した。2010 年代後半には Exscientia 社と住友ファーマが AI 設計による医薬品候補の開発事例が見られた。Insilico Medicine など独自設計薬を実用段階へ。国内では Elix、エクサウィズ等が共同研究を展開し、AI 創薬の現実性が高まっている。   |
| ●  | (2010 年代後半～)大規模データ活用と標的探索の革新<br>ゲノム・カルテ・ウェアラブルなど多層的データを統合解析することで、AI が新規標的を発見する動きが拡大。ヒト疾患データから動物実験では得られない知見を抽出可能で、炎症性腸疾患や ALS での応用が進行。PRISM では肺疾患に関する標的候補を公表する等、応用範囲が広がった。  |
| ●  | (2015 年頃～)分子設計 AI とデータ共有<br>AI はリード化合物の活性や ADME(吸収・分布・代謝・排泄)の特性を高精度に予測し、設計工程を効率化。モデル精度向上には高品質な学習データが鍵であり、企業間連携が進む。日本では AMED プロジェクトで製薬企業 7 社が試験データを共有した。連合学習の導入により、機密性を保ちつつ大規模モデル開発が進んでいる。  |
| ●  | (2020 年頃～)物理シミュレーションとの融合<br>AI と MD(分子動力学; Molecular Dynamics)などの物理シミュレーションの融合が進展。AI は高コストな MD 計算の代替や高速化を実現し、量子計算の近似や力場推定にも応用。AlphaFold2 の登場により構造予測精度が飛躍的に向上し、構造ベース創薬の基盤が大きく変化している。  |
| ●  | (2020 年代～)創薬プロセス全体への拡張<br>AI の適用は創薬初期から臨床段階へ広がり、被験者選定や試験設計、成功率予測などで実証が進行。生成モデルによる治験進行予測や仮想対照群設計も事例化。一方、ブラックボックス性やモデルの妥当性確保、実験との連携、人材育成が今後の課題とされている。  |

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-19 タイムライン「AI 駆動型創薬パイプラインの構築」

| 年         | 主な進展やイベント   |
|-----------|---|
| 1990 年代以前 | 分子モデリング、QSAR、ドッキングなど計算化学的手法が創薬支援に導入開始。1970-80 年代にはタンパク質動力学シミュレーションの適用例も。1979 年 Tripos 社設立など、ケモインフォマティクス先駆企業が登場。   |
| 2000 年代   | 構造ベース創薬が定着し、Schrödinger 社等の CADD ツールが普及。一方 AI 技術はルールベースの専門システムや SVM (Support Vector Machine) など機械学習が徐々に試行される段階。大規模創薬データ(ハイスループットスクリーニング結果等)の蓄積が進み、データ駆動型解析の素地が形成される。  |
| 2010 年代前半 | ディープラーニングの台頭に伴い製薬分野でも AI 活用が本格化。特に 2012 年前後から画像認識など他分野での DL 成功を受け、化合物活性予測に NN を適用する研究が活発化。2014 年には Atomwise 社(米)が深層学習を用いた創薬を標榜し設立、Ebola ウイルス治療化合物探索で成果を報告。BenevolentAI 社(英、2013 年設立)など AI 創薬スタートアップが出現し始める。 |

| 年         | 主な進展やイベント   |
|-----------|---|
| 2010 年代後半 | 製薬大手と AI 企業の連携が増加。2017 年には Exscientia 社が GSK 社と提携 (AI で新たな抗炎症薬探索)、翌 2018 年には製薬各社が相次ぎ内部に AI 専任部署を新設。2018 年ごろからディープラーニングによるデノボ分子設計 (GAN や強化学習の応用) が研究開発で注目。2019 年、DeepMind 社の AlphaFold (初代) がタンパク質構造予測コンテスト CASP13 で従来手法を大きく凌ぐ結果を達成し、生命科学分野で AI の有用性が認知される。また同 2019 年、欧州で創薬連合学習プロジェクト MELLODDY 開始 (10 社以上参加)。日本では AMED 創薬インフォマティクス事業に続き、内閣府が PRISM「新薬創出を加速する AI 開発」開始 (IPF 等の標的発見に着手)。 |
| 2020      | AI 創薬のブレイクスルー年。1 月、Exscientia 社と住友ファーマが AI 創出薬 DSP-1181 の臨床試験開始を発表 (世界初の事例)。2 月、MIT 等の研究で AI が新規抗生物質候補「Halicin」を発見したと報告。DeepMind 社は AlphaFold2 を開発し CASP14 にてタンパク質構造予測の問題を事実上解決。創薬 AI スタートアップへの投資額も急拡大し、この年コロナ禍での AI 創薬 (例: 既存薬バリシチニブの AI によるコロナ治療薬転用提案) が話題となる。  |
| 2021      | AlphaFold2 の手法と成果が「Nature」誌で発表され、同年 7 月には AlphaFold が人類が解明したすべてのタンパク質構造予測データベースを公開。研究者は実験せずに多数のタンパク質 3D 構造を利用可能となり創薬研究が加速。Insilico 社が設計した線維症治療候補が中国当局から治験許可を取得 (世界初の AI 創薬による IND 承認)。米国でも NIH が「Bridge2AI」計画でバイオ医療データと AI の統合研究を推進開始。  |
| 2022      | AI 創薬企業による製薬大手との大型提携が相次ぐ。Exscientia 社がサノフィ社と最大 5 品目の AI 創薬共同研究契約 (総額数億ドル規模) を締結。米国 FDA が AI 創薬で設計された新規分子の IND 申請を複数承認し、AI デザイン創薬候補が臨床段階で増加。生成的深層学習モデル (拡散モデルなど) の化学応用が広がり、創薬パイプラインに組み込む製薬企業も現れる。  |
| 2023      | 生成 AI ブームが創薬領域にも波及。大規模言語モデル (LLM) をベースに化合物のテキスト記述や文献知識を活用する試みが増える。創薬スタートアップは相次ぎ大規模資金調達に成功し、特に米 Insilico 社はシリーズ D で 2 億ドル超を調達。国内では第一三共が米ヌメラテ社や英ベネボラント AI 社と提携発表。学術的にも ChatGPT 登場以降、創薬への生成 AI 活用に関する研究発表が急増 (学会 CBI2023 など)。一方、同年ノーベル賞でタンパク質構造予測が間接的に脚光を浴び、科学界で AI の存在感が改めて認識される。   |
| 2024      | AI 創薬は実装段階へ移行。複数の AI 設計創薬候補がフェーズ II 試験に進行中と報じられる。欧州医薬品庁 (EMA) や FDA は AI 活用ガイダンスの素案策定を開始し、規制当局も受け入れ体制を整備。JST の俯瞰報告書で AI 創薬が重要研究領域として位置づけられ、日本の研究力強化が提言される。また、新モダリティ創薬 (細胞医薬、核酸医薬など) への AI 応用も拡大し、機械学習と分子シミュレーションを組み合わせた設計手法が試行される。産学官の連携も深化し、大学発ベンチャーの AI 創薬技術が大手にライセンスされる動きも見られた。  |
| 2025      | グローバルで AI 創薬関連論文数・特許件数は急増を続け、特許面では中国企業の台頭が顕著。米国発の AI 創薬スタートアップだけでなく中国・欧州でも独自プラットフォーム企業が成長し、Tencent や華為など異業種も参入。日本でも製薬各社が内製 AI 開発や外部提携を拡大し、人材育成やデータ基盤整備に投資。今後は創薬段階での AI と実験のシームレスな融合、AI モデルの規制当局との対話、そして異分野との協働 (農業・食品領域への展開など) にも注目が集まる。  |

### (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-20 キーテクノロジー「AI 駆動型創薬パイプラインの構築」

| 名称   | 出現時期・背景  | 解説  |
|--|--|---|
| 機械学習・深層学習<br>(Machine Learning / Deep Learning)    | 出現時期(創薬文脈): 2010 年代半ばから本格導入、2020 年代にプラットフォーム化・規制議論が進展。<br>背景: 生物医学ビッグデータと GPU の普及、表現学習・生成 AI の進展により、標的特定～ADMET 予測まで幅広く精度向上。  | 大量の既存データからパターンを学習し予測モデルを構築する AI 手法。創薬では化合物構造と活性や薬効の関係を学習して候補分子の活性予測に用いる。ディープラーニングにより複雑な非線形関係も表現可能となり、仮説構築や最適化を自動化する。  |
| バーチャルスクリーニング<br>(Virtual Screening, ドッキングシミュレーション) | 出現時期: 1990 年代から発展し 2000 年代にハイスループット VS が一般化。2020 年代は AI スコアリングや AlphaFold 構造活用で精度再向上。<br>背景: HTS コスト削減の要請、構造ゲノミクス/クライオ EM 等で構造データが増加、計算資源の向上で in silico 探索が標準ツール化した。 | 化合物ライブラリを計算機上で評価し、標的タンパク質に結合しうる候補を絞り込む手法。従来はドッキング(剛体近似での結合モデリング)やファーマコフォアマッチングが主流だったが、近年は機械学習によりリガンド-標的間の相互作用を柔軟に予測し、精度向上が図られている。膨大な化合物空間から有望なヒット化合物を発見する初期段階で活用される。                                      |
| 分子生成 AI<br>(Generative Models for Molecules)       | 出現時期: 2016–2018 に VAE/GAN/RNN で化学構造生成が登場、2021–2024 に拡散モデルが主流化。2025 年に AI 設計分子の PoC(レントセルチブ等)報告。<br>背景: 膨大な化学空間の探索と多目的最適化、合成可能性評価の統合ニーズが高まり、自動設計が台頭。                  | 新しい化合物構造を自動生成する AI 技術。変分オートエンコーダー (VAE) や生成的敵対ネットワーク (GAN)、強化学習などによりデノボデザインを実現する。標的に合わせた理想的な分子の特徴を学習し、全く新規な構造提案が可能。これにより化学者の発想にない斬新な候補を創出し、リード化合物シリーズを多様化する。近年は拡散モデルや大規模言語モデルを用いた分子生成も登場。                 |
| タンパク質構造予測 AI<br>(Protein Structure Prediction AI)  | 出現時期: 2018 年の AlphaFold (CASP13) でブレイク、2021 年 AlphaFold2 で高精度化、2024 年 AlphaFold3 で複合体/相互作用予測へ拡張。<br>背景: 深層学習と進化情報・物理的制約の統合により、構造未知標的の補完や VS/設計の高精度化が可能になった。          | アミノ酸配列からタンパク質の立体構造を予測する AI 技術。DeepMind 社の AlphaFold3 が著名で、深層学習モデルにより原子座標を高精度に推定。創薬標的となるタンパク質の 3D 構造情報を提供し、構造に基づく創薬 (Structure-Based Drug Design) の精度を飛躍的に高めた。実験困難な膜タンパク質なども計算予測が可能となり、新規標的や作用メカニズム解明を支える。 |
| 連合学習<br>(Federated Learning)                       | 出現時期: 2016 年に Google が FedAvg を提案、2019 年以降に医療分野の実証が拡大し、2020 年代に実装とガバナンス整備が進展。<br>背景: 個人情報保護規制やデータ分散(病院・企業間)下で学習を可能にするニーズ。信頼性・セキュリティ確保の枠組み整備が不可欠。                     | データを各所に保持したまま共同で AI モデルを訓練する分散型学習手法。創薬では企業間で機密データを共有せずに機械学習モデルを構築するのに応用。各社の化合物データを中央に集めずモデルのパラメータだけ共有・更新することで、プライバシーや競争上の問題を回避しつつ大規模データの利点を享受できる。欧州 MELLODDY プロジェクトなどで実証中。                                |

| 名称   | 出現時期・背景  | 解説  |
|--|--|---|
| 数理モデリングとシミュレーション<br>(Mathematical Modeling & Simulation) | 出現時期: PK/PD、PBPK、QSP 等は 1990–2000 年代に拡大し、2010 年代後半から MIDD として規制・実務で定着。<br>背景: 開発コスト・時間短縮の要請に対し、用量設定、試験設計、外挿の定量化を通じ意思決定を支援。<br>備考: PK/PD 等の起源年に関する一次情報は本回答の出所群では未確認。  | 生体内の分子ネットワークや薬物動態を数理モデルで記述しシミュレーションする手法。細胞内シグナル伝達経路を微分方程式等でモデル化し、薬剤効果を予測する。AI 創薬では機械学習モデルと組み合わせて活用され、物理モデルのパラメータ調整や予測結果の高速化に貢献。例として、MD シミュレーションで得たビッグデータを AI が学習して近似モデルを構築することで、長時間の生体反応を短時間で予測する、といった応用が進む。  |
| データ統合・知識グラフ<br>(Data Integration & Knowledge Graphs)     | 出現時期: 2010 年代にバイオメディカル知識グラフが普及、2020 年代にマルチオミクス・臨床・文献データ統合の基盤として定着。<br>背景: データサイロ解消と機械可読な連結性 (KG) により、標的発見、薬剤再用途、リスク予測の推論 (リンク予測等) を加速。<br>備考: 初出年の一次情報は本回答の出所群では未確認。 | 創薬に関する多種多様なデータ (論文知見、オミクス情報、化合物特性、患者データ等) を統合し、関係性をグラフ構造で表現する技術。AI がこの知識グラフから**隠れた関連 (例: 疾患と分子経路のリンク)** を見出し、新規標的やドラッグリポジショニング先を提案する。BenevolentAI 社は文献・データから疾病関連ネットワークを AI 解析し、たとえば既存関節リウマチ薬バリシチニブを COVID-19 治療に応用するアイデアを導出した。知識統合により発見の網羅性と速度を向上させる。 |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-21 実用化可能性「AI 駆動型創薬パイプラインの構築」

| 項目               | 実用化可能性、波及が期待される産業領域   |
|------------------|---|
| 開発リードタイム短縮とコスト削減 | AI 創薬の最大のメリットは新薬開発の時間・費用圧縮である。実証例として、AI 設計薬 DSP-1181 は従来 5 年規模の前臨床プロセスを 1 年足らずで完了し臨床入りした。このように開発初期のスクリーニングやリード最適化が高速化すれば、開発コスト低減と特許期間の有効活用につながる。Deloitte の分析では創薬スタートアップの 40% が AI で化合物スクリーニング、28% が標的発見、17% がデノボ創薬に活用しており、広範な工程での効率化によって製薬 R&D 全体の生産性向上が期待される。  |
| 画期的新薬・創薬標的の創出    | AI は従来人間の勘や経験では見出しにくかった画期的な薬剤を提案できる可能性がある。例として、MIT の研究チームは AI を用いた仮想スクリーニングから新規構造を持つ抗生物質候補「Halicin」を発見した。Halicin は既存抗生物質と全く異なる構造で多剤耐性菌に有効性を示し、AI による創薬が新たな薬理クラス創出につながることを示した。また AI のデータ解析力により、ALS や線維症など難治疾患で新規創薬標的が提案され、従来治療法のない領域でプロジェクトが立ち上がっている。これらは将来的にアンメットメディカルニーズの充足や画期的医薬の登場につながる可能性があり、患者や医療現場への貢献が期待される。 |

| 項目                   | 実用化可能性、波及が期待される産業領域  |
|----------------------|--|
| 創薬パイプライン拡大とスタートアップ参入 | AI プラットフォームの活用により、大手製薬のみならずバイオベンチャーや異業種企業も創薬に参入しやすくなっている。実験設備や化合物ライブラリに限られる企業でも、AI を駆使して候補物質を設計・評価できるためだ。実際、AI 創薬スタートアップが候補薬を創出し製薬大手にライセンスアウトする動きや、IT 企業が創薬コンソーシアムに参加する例も見られる。これにより創薬エコシステムが活性化し、新興プレイヤーからのイノベーション創出やパイプライン数増加が期待される。政府も研究費助成やデータ基盤整備を通じ新規参入を後押ししており、国内外でスタートアップとアカデミア・大企業の連携が広がっている。          |
| 臨床開発・医療への波及          | AI 創薬で得られた知見は臨床段階にも波及しうる。例えば AI で発見された薬剤は分子標的が明確な場合が多く、適切なバイオマーカーに基づく患者選別が容易になるため臨床試験の成功率向上につながる。また AI によるシミュレーションで投与量設定や併用効果を事前予測し、臨床試験デザインを最適化する取り組みも始まっている。さらに長期的には、患者の遺伝情報や電子カルテデータを統合解析することで個別化医療に適した創薬が進み、適材適所で最適な薬剤を提供できるようになる。AI 創薬は新薬創出のみならず、医療全体の高度化に貢献するポテンシャルを秘めている。                               |
| 関連領域への応用             | AI を用いた分子探索技術は医薬品以外の領域にも応用が期待される。例えば農薬や動物薬の開発、産業バイオ分野での酵素設計、食品分野での機能性分子発見など、ヘルスケア・バイオ生産全般で AI による新規分子創出が波及効果を持ちうる。実際、創薬 AI で培われたケモインフォマティクス技術は農業化学品の候補物質探索にも応用が検討されている。医薬品ほどデータが豊富でない分野でも、機械学習による予測モデルや生成モデルを活用することで開発効率を高められる可能性がある。こうした技術横展開により、食料生産や環境保全(新規除草剤や環境負荷低減材料の開発等)の分野でも AI の活用によるイノベーションが期待されている。 |

## (5) インタビュー結果を踏まえた今後の潮流および研究の方向性

中核研究者へのインタビュー結果に基づき、今後 5 年から 10 年の潮流および研究の方向性を整理した。

表 2-22 今後の潮流および研究の方向性「AI 駆動型創薬パイプラインの構築 AI 駆動型創薬パイプラインの構築」

| 項目   | 概要   |
|--|--|
| <p>新たに浮上している、または今後5年から10年の間に浮上すると考えられる技術トレンド、技術的ブレークスルーの可能性、技術面の障壁、規制・倫理も含む非技術面の障壁</p> | <p>■トレンド候補</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● LLM・トランスフォーマー型の基盤モデルを、AI 創薬の基盤技術として明示的に位置付ける必要がある。</li> <li>● タンパク質言語モデル、単一細胞・ゲノムの基盤モデル活用が、標的探索や疾患メカニズム理解の上流を変える可能性が高い。</li> <li>● 専門 DB や解析ツールを API 連携する AI エージェントが、検索・解析・設計を一体化する方向で進展すると考えられる。</li> <li>● 抗体設計では、親和性向上、ヒト化、安定性・物性最適化における AI 活用の重要性が高い。</li> </ul> <p>■技術的ブレークスルー候補</p> <p>分子動力学と AI の融合による動的構造・新規ポケット予測。<br/>設計－実験－学習を反復する閉ループ自動化</p> <p>■技術面の障壁</p> <p>RNA・核酸・中分子・細胞治療等の新モダリティでは、構造・物性データが不足している。また、メタデータ標準化や API 連携可能な公開 DB の整備が不十分である。</p> <p>■非技術面の障壁</p> <p>研究者によるデータ囲い込みが共有を阻害している。<br/>患者データの所有・提供・同意、病院間連携、個人情報・倫理・制度面の整備が、人データ連携の大きな制約となる。</p> |
| <p>他分野研究連携の必要性</p>   | <p>ウェット(発現系構築・検証)とドライ(設計・解析)の緊密な往復が不可欠である。<br/>また、臨床情報(カルテ・バイオマーカー)との接続が重要である。<br/>データベースの開発・運用を担うセンターとの標準化連携を進め、データの再利用性を高める必要がある。<br/>ロボティクス、高速計測、実験計画法を含む実験系と設計アルゴリズムを統合し、設計－実験の閉ループを構築することが鍵となる。</p>   |
| <p>わが国のアセット(人材・インフラ等)と国外プレイヤー・チームとの比較</p>  | <p>日本の強みは、低分子創薬に関する企業データ資産を有している点にある。<br/>一方、欧米メガファーマは抗体設計等の内製力を持ち、スタートアップも新技術の実装を牽引している。<br/>日本は人データの共有・接続に関して制度・倫理面の制約が大きく、この点を改善しないと標的探索や臨床設計で海外との差が広がる可能性がある。</p>  |
| <p>今後5年から10年の間において潮流となり得る研究の方向性</p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 単一細胞・オミックスと患者縦断データを安全に接続し、標的探索と疾患メカニズム理解を再強化する方向が重要となる。</li> <li>● MD と AI を融合し、動的コンフォメーションや新規ポケットを予測する研究が進展すると考えられる。</li> <li>● RNA・核酸・中分子・細胞治療等の新モダリティについて、構造・物性データを整備し、予測モデルの土台を構築する研究が重要となる。</li> <li>● ロボティクス、高速計測、AI 最適化を統合した設計－実験の閉ループ自動化が潮流化すると考えられる。</li> <li>● データベース・解析ツール・シミュレーションを統合する AI エージェントを創薬パイプラインへ組み込む方向が進む。</li> </ul>  |

| 項目                        | 概要   |
|---------------------------|--|
| 今後の当該分野において優先すべき研究課題・支援形態 | <ul style="list-style-type: none"> <li>● データ共有のインセンティブ設計が重要である。中央ハブへの提供量に応じて提供者にも価値が還元される仕組み(解析結果のフィードバック、共同著者性、補助金配分等)を整備するとともに、機械可読なアノテーション支援や即時公開を前提とした運用設計を行うこと。</li> <li>● 結晶化失敗条件等のネガティブデータも含めて記録・共有し、再現性向上と学習データ拡充につなげること。</li> <li>● 患者データの所有・提供・同意、病院間連携、連合学習等を含む個人情報・倫理・制度面の整備を進め、臨床データと研究データの安全な接続を可能にすること。</li> <li>● 高品質データ生成のため、実験自動化・ロボティクス、MD データベース、メタデータ標準化への投資を重点化すること。</li> <li>● ウェット/ドライ/臨床/DB センターをつなぐ分野横断コンソーシアムを形成し、若手育成(JST ACT-X、さきがけ等)やタンパク質・核酸の分子レベル研究領域の強化と組み合わせた支援を行うこと。構造決定のプロセスも含め、国家プロジェクトとしてデータ収集・標準化を進める支援は有効ではないか。</li> </ul> |

## (6) 出所

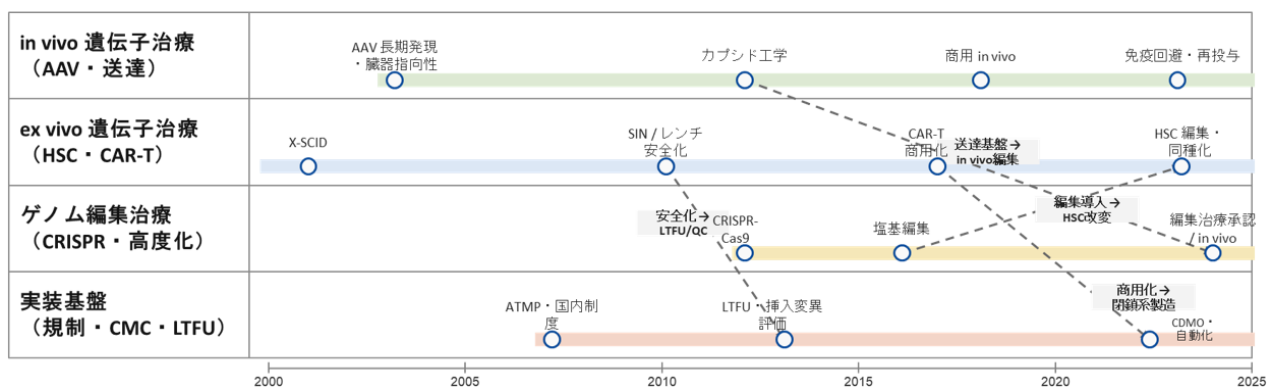
|  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● JST 研究開発戦略センター 研究開発の俯瞰報告書 2024 年版(ライフサイエンス・臨床医学分野:AI 創薬関連)・2025 年版、<a href="https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-05/CRDS-FY2024-FR-05_20103.pdf">https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-05/CRDS-FY2024-FR-05_20103.pdf</a></li> <li>● NLM, A new paradigm for drug development, <a href="https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7194950/">https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7194950/</a></li> <li>● Artificial Intelligence (AI) Applications in Drug Discovery and Drug Delivery: Revolutionizing Personalized Medicine, <a href="https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11510778/">https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11510778/</a></li> <li>● 日本製薬工業協会、臨床開発におけるデジタルトランスフォーメーション(DX)の現状と可能性、<a href="https://www.jpma.or.jp/information/evaluation/results/allotment/tcjmdm000001ecw-att/CL_202405_TF1_DX.pdf">https://www.jpma.or.jp/information/evaluation/results/allotment/tcjmdm000001ecw-att/CL_202405_TF1_DX.pdf</a></li> <li>● OECD, AI in drug discovery(Artificial Intelligence in Science レポート内セクション)、<a href="https://www.oecd.org/en/publications/artificial-intelligence-in-science_a8d820bd-en/full-report/ai-in-drug-discovery_f328d265.html">https://www.oecd.org/en/publications/artificial-intelligence-in-science_a8d820bd-en/full-report/ai-in-drug-discovery_f328d265.html</a></li> <li>● Chen Fu, Qiuchen Chen, The future of pharmaceuticals: Artificial intelligence in drug discovery and development, <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095177925000656">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095177925000656</a></li> <li>● Nature Medicine (2025): Artificial intelligence in drug development, <a href="https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39833407/">https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39833407/</a></li> <li>● Nature (2024): AlphaFold 3 predicts the structure and interactions of all life's molecules, <a href="https://blog.google/innovation-and-ai/products/google-deepmind-isomorphic-alphafold-3-ai-model/">https://blog.google/innovation-and-ai/products/google-deepmind-isomorphic-alphafold-3-ai-model/</a></li> <li>● Biorxiv (2025): AlphaFold 3 impact on drug discovery validation, <a href="https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2025.04.07.647682v1.full.pdf">https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2025.04.07.647682v1.full.pdf</a></li> <li>● Nature Medicine (2025): Phase IIa trial of ISM001-055 in Idiopathic Pulmonary Fibrosis Based on Press Release: <a href="https://insilico.com/news/tnrecuxsc1-insilico-announces-nature-medicine-publi">https://insilico.com/news/tnrecuxsc1-insilico-announces-nature-medicine-publi</a></li> <li>● Insilico Medicine Press Release (June 2025): Positive Phase IIa Results for Rentosertib, <a href="https://www.prnewswire.com/news-releases/insilico-medicine-announces-nature-medicine-publication-of-phase-ii-a-results-evaluating-rentosertib-the-novel-tnik-inhibitor-for-idiopathic-pulmonary-fibrosis-ipf-discovered-and-designed-with-a-pioneering-ai-approach-302472070.html">https://www.prnewswire.com/news-releases/insilico-medicine-announces-nature-medicine-publication-of-phase-ii-a-results-evaluating-rentosertib-the-novel-tnik-inhibitor-for-idiopathic-pulmonary-fibrosis-ipf-discovered-and-designed-with-a-pioneering-ai-approach-302472070.html</a></li> <li>● FDA Draft Guidance (Jan 2025): Considerations for the Use of AI to Support Regulatory Decision-Making, <a href="https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/considerations-use-artificial-">https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/considerations-use-artificial-</a></li> </ul> |
|--|

- intelligence-support-regulatory-decision-making-drug-and-biological  
FDA Announcement (Jan 2025): FDA Proposes Framework to Advance  
Credibility of AI Models, <https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-proposes-framework-advance-credibility-ai-models-used-drug-and-biological-product-submissions>

## 2.2.3 潮流 A3: 遺伝子治療「遺伝子デリバリー×ゲノム編集による in vivo / ex vivo 遺伝子治療の高度化」

### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



出所) 点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き: 影響が及ぶ方向 (起点から波及先) を示す。  
 矢印上のラベル: 影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-4 技術的進歩と方向性の概要図「遺伝子デリバリー×ゲノム編集による in vivo / ex vivo 遺伝子治療の高度化」

表 2-23 技術的進歩と方向性(概要)「遺伝子デリバリー×ゲノム編集による in vivo / ex vivo 遺伝子治療の高度化」

| 概要   |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li> <p>• <b>ベクター技術の成熟(2000年代以降、2017年以降に商業化が本格化)</b><br/>in vivo 遺伝子治療では AAV ベクター(アデノ随伴ウイルスベクター)が主流となり、神経・肝・筋などの終末分化細胞で年単位の発現持続が期待できることから、Luxturna や Zolgensma などの製品化につながった。一方で、AAV には搭載サイズの制約、高用量投与時の免疫毒性・肝毒性・TMA、既存中和抗体や再投与の難しさといった限界もあり、近年はカプシド工学、組織選択性の向上、免疫回避戦略、投与経路最適化が主要な開発方向になっている。</p> </li> <li> <p>• <b>ex vivo 遺伝子治療・細胞療法の安全化と拡張(2000年代前半～、2010年代後半～)</b><br/>造血幹細胞を用いる ex vivo 遺伝子治療は、X-SCID(X連鎖重症複合免疫不全症)などで高い有効性を示した一方、初期には挿入変異による白血病化が大きな課題となった。その後、自己不活性化設計やレンチウイルスベクターの採用で安全性が改善し、Strimvelis、Zynteglo、Libmeldy などが実用化されたほか、CAR-T は血液がんの高い治療成績を示して商業化が進み、現在は同種化(universal化)や iPS 由来細胞、TCR-T/TIL への展開が次の焦点になっている。</p> </li> <li> <p>• <b>適応疾患の広がり(単一遺伝子疾患中心から血液疾患・がん・代謝疾患へ)</b><br/>初期の商業化は眼科、SMA、先天代謝異常、血友病などの希少単一遺伝子疾患が中心だったが、現在は鎌状赤血球症やβサラセミアのような血液疾患、さらに CAR-T を中心とするがん領域へと適応が広がっている。加えて、in vivo ゲノム編集ではトランスサイレチンアミロイドーシス、遺伝性血管性浮腫、家族性高コレステロール血症などに対する開発も進んでおり、今後は「希少疾患専用技術」からより広い疾患群へ波及する可能性がある。</p> </li> <li> <p>• <b>規制・品質評価・倫理ガバナンスの高度化(2010年代後半～2020年代)</b><br/>技術の進歩に伴い、規制も「新しいモダリティに合わせて設計する段階」に入っている。EU では ATMP 規則の下で遺伝子治療・細胞治療を一体的に管理し、日本の PMDA は治験前から品質特性と安全性の十分な把握を求め、FDA も 2024 年に体細胞ゲノム編集を組み込む遺伝子治療の指針を公表した。加えて、WHO は 2021 年にヒトゲノム編集の勧告を出しており、体細胞編集の臨床実装が進む一方で、倫理・社会的信頼を担保するガバナンスが普及の前提条件になっている。</p> </li> <li> <p>• <b>製造・CMC・供給体制の競争軸化</b><br/>遺伝子治療は「効くかどうか」だけでなく、「安定して作れるか、比較可能な品質で届けられるか」が事業化の成否を左右する段階に入った。AAV では製造複雑性や組織特異性、品質評価が大きな論点であり、日本でも AMED がウイルスベクター製造、遺伝子改変細胞製造、品質分析、人材育成を含む製造基盤整備を重点化していることから、今後は CDMO、分析、自動化、閉鎖系製造、サプライチェーンが技術競争力そのものになる。</p> </li> <li> <p>• <b>国際競争と日本の方向性</b><br/>論文数と特許ファミリー件数では米国が世界を先導し、中国がそれを追う構図が続いており、日本は独創的な CAR-T 設計や iPS 由来他家細胞などの技術シーズを持ちながらも、臨床開発数や産業規模では欧米に後れをとっている。したがって今後の方向性は、基礎研究の強化だけでなく、薬事、製造、病院実装、企業導出、知財・事業化戦略までを一気通貫でつなぐエコシステムを構築することにある。</p> </li> <li> <p>• <b>価格・償還・社会実装の再設計(2020年代～)</b><br/>遺伝子治療は数千万円から数億円規模の価格帯になりやすく、技術が成立してもアクセスの仕組みが成立しなければ市場は広がらない。CRDS はコスト低減と経済性評価の必要性を指摘しており、ICER/NEWDIGS も、長期有効性の不確実性を踏まえた公正価格、分割払い、アウトカム連動などの支払い設計を主要論点としているため、今後は「効くこと」に加えて「長く効くことを実証できること」が技術価値の中心になる。</p> </li> </ul> |

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-24 タイムライン「遺伝子デリバリー×ゲノム編集による in vivo / ex vivo 遺伝子治療の高度化」

| 年         | 主な進展やイベント   |
|-----------|---|
| 2000 年代前半 | X-SCID で ex vivo 遺伝子治療の高い有効性が示され、遺伝子治療が臨床で成立し得ることが明確になった。一方で、レトロウイルスベクターの挿入変異に伴う白血病化が問題化し、安全設計が以後の最重要課題となった                             |
| 2003-2007 | 2003 年に中国で Gendicine が承認され、世界初の商業化遺伝子治療となった。2007 年には EU で ATMP 規則が整備され、遺伝子治療・細胞治療を制度的に扱う基盤が形成された。                                       |
| 2012-2015 | 2012 年の Glybera で西側市場における商用遺伝子治療の道が開き、2016 年の Strimvelis で造血幹細胞を用いる ex vivo 遺伝子治療が承認段階に到達した。同時期に、自己不活性化設計やレンチウイルス化が進み、安全性が改善した。         |
| 2012-2019 | 2012 年の CRISPR-Cas9、2016 年の塩基編集、2019 年のプライム編集により、遺伝子治療は「遺伝子を入れる」段階から「狙った配列を精密に直す」段階へ進んだ。編集の高精度化は、次世代治療の設計自由度を大きく拡張した。                   |
| 2017-2019 | 2017 年の Luxturna、2019 年の Zolgensma により、AAV を用いる in vivo 遺伝子治療が本格商業化した。CAR-T の上市も進み、遺伝子治療は希少疾患と血液がんを中心に実装段階へ移行した。                        |
| 2022-2024 | 2022 年の Hemgenix など血友病領域の AAV 治療が拡大し、2023 年には Casgevy が初の CRISPR ベース治療として承認された。2024 年には FDA がゲノム編集遺伝子治療の指針を公表し、品質・安全性・長期追跡の要求が一段と明確化した。 |

## (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-25 キーテクノロジー「遺伝子デリバリー×ゲノム編集による in vivo / ex vivo 遺伝子治療の高度化」

| 名称         | 出現時期・背景  | 定義  |
|------------|--|---|
| 希少単一遺伝子疾患  | 出現時期: 2010 年代に実装が加速。2012 年に EU で Glybera(LPL 欠損症)が世界初の遺伝子治療として承認、2017 年に米国で Luxturna(RPE65 変異)、2019 年に Zolgensma(SMA)が相次いで承認。<br>背景: 次世代シーケンスに基づく原因遺伝子同定、オーファンドラッグ制度、AAV ベクターと製造技術の成熟が後押し。                             | 一回投与で自然歴を変える価値が明確。眼科・SMA・血友病・造血系で、オーファン価格と専門センター集約モデルが成立しやすい。 |
| がん免疫細胞療法   | 出現時期: 実用化の転換点は 2017 年の CAR-T 初承認 (Kymriah、続いて Yescarta)。その後適応拡大が進展。<br>背景: 自家 T 細胞の遺伝子改変・製造プロセスの確立と初期臨床での高奏効率(CD19 標的)が実装を牽引。  | CAR-T は既に実装済み市場。次の成長余地は固形がん、同種化、外来オペレーション最適化。                 |
| 肝・筋・中枢への拡張 | 出現時期: 肝—2022 年に Hemgenix(血友病 B)、2023 年に Roctavian(血友病 A)承認。筋—2023 年に Elevidys (DMD)初承認、2024 年に適用拡大。中枢—AAV9 の血液脳関門通過性報告(2009)と SMA 治療(2019)で実装が進展。<br>背景: AAV 血清型/キャプシド工学、プロモータ設計、静注・髄腔内など投与経路最適化により臓器指向性と発現が向上。<br>出所: | 代謝・筋・神経疾患に拡張余地が大きい。送達効率と安全域の改善が前提。                            |

| 名称        | 出現時期・背景   | 定義  |
|-----------|---|---|
| ベクター安全性   | 出現時期: 安全性課題の顕在化は 1999 年のアデノウイルス全身炎症致死事例、2000 年代前半のレトロウイルス挿入変異による白血病発症を契機。2010～2020 年代に自己不活化型ベクター、挿入サイト解析、用量設定・長期追跡の標準化が進展。<br>背景: 臓器毒性(肝、DRG)や挿入変異リスクへの対策設計、規制当局による長期フォローアップ要件が整備。                | 高用量 AAV では肝毒性、TMA、神経毒性/DRG 毒性が課題。統合型ベクターでは挿入変異評価が不可欠。 |
| 再投与・送達効率  | 出現時期: AAV の再投与困難性(前存在・誘導中和抗体)は 2000 年代から認識。2010 年代後半～2020 年代に IgG 分解酵素併用、カプシド切替、非ウイルス送達等のアプローチが加速。<br>背景: 免疫干渉と組織到達性の課題に対し、血漿交換/IgG プロテアーゼ(IdeS/imlifidase)、投与経路最適化、カプシド工学や LNP ベース送達の研究・初期臨床が進行。 | 既存抗 AAV 抗体、免疫応答、組織選択性、搭載サイズ制約が再投与と適応拡大のボトルネック。        |
| CMC・供給・償還 | 出現時期: 商用化本格化(2017～)に伴い、2020 年に FDA が遺伝子治療の CMC/製造ガイダンスを最終化。高額な一回投与と製品の登場とともに成果連動・分割払い等の償還モデルが 2018 年前後から導入。<br>背景: ベクター製造のスケールアップと一貫性確保、同等性評価・力価評価の標準化、支払者の財政影響管理と実世界アウトカム連動契約の試行。                | ベクター/細胞製造能力、力価・活性試験、価格、長期効果の不確実性がアクセスを左右。             |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-26 実用化可能性「遺伝子デリバリー×ゲノム編集による in vivo / ex vivo 遺伝子治療の高度化」

| セクター       | ユースケースや波及が期待される産業領域  |
|------------|--|
| 希少単一遺伝子疾患  | 一回の投与で自然歴を変える価値が明確である。眼科・SMA(脊髄性筋萎縮症)・血友病・造血系で、オーファン価格と専門センター集約モデルが成立しやすい。 |
| がん免疫細胞療法   | CAR-T は既に実装されており、次の成長余地は固形がん、同種化、外来オペレーション最適化。                             |
| 肝・筋・中枢への拡張 | 代謝・筋・神経疾患に拡張余地が大きい、送達効率と安全域の改善が前提である。                                      |
| ベクター安全性    | 高用量 AAV では肝毒性、TMA、神経毒性/DRG 毒性が課題。統合型ベクターでは挿入変異評価が不可欠である。                   |
| 再投与・送達効率   | 既存抗 AAV 抗体、免疫応答、組織選択性、搭載サイズ制約が再投与と適応拡大のボトルネック。                             |
| CMC・供給・償還  | ベクター/細胞製造能力、力価・活性試験、価格、長期効果の不確実性がアクセスを左右。                                  |

#### (5) 出所

- JST 研究開発戦略センター(CRDS)『研究開発の俯瞰報告書 ライフサイエンス・臨床医学分野(2024年)』(CRDS-FY2024-FR-05)、<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2024-FR-05.html>
- JST-CRDS『研究開発の俯瞰報告書(2024年)』2.1.5「遺伝子治療(in vivo 遺伝子治療/ex vivo 遺伝子治療)」(PDF)、[https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-05/CRDS-FY2024-FR-05\\_20105.pdf](https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-05/CRDS-FY2024-FR-05_20105.pdf)
- JST-CRDS 戦略プロポーザル『デザイナー細胞 ～再生・細胞医療・遺伝子治療の挑戦～』(CRDS-

FY2020-SP-01, PDF), <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2020/SP/CRDS-FY2020-SP-01.pdf>

- FDA “Approved Cellular and Gene Therapy Products” (OTP, Content current as of 12/09/2025), <https://www.fda.gov/vaccines-blood-biologics/cellular-gene-therapy-products/approved-cellular-and-gene-therapy-products>
- FDA Press Announcement “FDA approves novel gene therapy to treat patients with a rare form of inherited vision loss (Luxturna)” (2017-12-19), <https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-approves-novel-gene-therapy-treat-patients-rare-form-inherited-vision-loss>
- FDA Press Announcement “FDA approves innovative gene therapy to treat pediatric patients with spinal muscular atrophy (Zolgensma)” (2019-05-24), <https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-approves-innovative-gene-therapy-treat-pediatric-patients-spinal-muscular-atrophy-rare-disease>
- FDA Press Announcement “FDA Approves First Gene Therapy to Treat Adults with Hemophilia B (Hemgenix)” (2022-11-22), <https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-approves-first-gene-therapy-treat-adults-hemophilia-b>
- FDA Press Announcement “FDA Approves First Gene Therapy for Adults with Severe Hemophilia A (Roctavian)” (2023-06-29), <https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-approves-first-gene-therapy-adults-severe-hemophilia/>
- FDA Press Announcement “FDA Approves First Topical Gene Therapy (Vyjuvek)” (2023-05-19), <https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-approves-first-topical-gene-therapy-treatment-wounds-patients-dystrophic-epidermolysis-bullosa>
- FDA Press Announcement “FDA Approves First Gene Therapy for Treatment of Certain Patients with Duchenne Muscular Dystrophy (Elevidys)” (2023-06-22), <https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-approves-first-gene-therapy-treatment-certain-patients-duchenne-muscular-dystrophy/>
- FDA Press Announcement “FDA Expands Approval of Elevidys …” (2024-06-20), <https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-expands-approval-gene-therapy-patients-duchenne-muscular-dystrophy>
- FDA Press Announcement “FDA Approves New Safety Warning and Revised Indication … ELEVIDYS … Fatal Liver Injury” (2025-11-14), <https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-approves-new-safety-warning-and-revised-indication-limits-use-elevidys-following-reports-fatal>
- FDA Press Announcement “FDA Requests Sarepta Therapeutics Suspend Distribution of ELEVIDYS …” (2025-07-18), <https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-requests-sarepta-therapeutics-suspend-distribution-elevidys-and-places-clinical-trials-hold>
- FDA Press Announcement “FDA Approves First Gene Therapies to Treat Patients with Sickle Cell Disease (Casgevy / Lyfgenia)” (2023-12-08), <https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-approves-first-gene-therapies-treat-patients-sickle-cell-disease>
- FDA Press Announcement “FDA approves first cellular therapy … melanoma (Amtagvi)” (2024-02-16), <https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-approves-first-cellular-therapy-treat-patients-unresectable-or-metastatic-melanoma>
- FDA Press Announcement “FDA approves first gene therapy … metastatic synovial sarcoma (Tecelra)” (2024-08-02), <https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-approves-first-gene-therapy-treat-adults-metastatic-synovial-sarcoma>
- FDA Safety “FDA Requires Boxed Warning for T cell Malignancies … CAR T …” (2024-04-18), <https://www.fda.gov/vaccines-blood-biologics/safety-availability-biologics/fda-requires-boxed-warning-t-cell-malignancies-following-treatment-bcma-directed-or-cd19-directed>

- FDA Guidance “Chemistry, Manufacturing, and Control (CMC) Information for Human Gene Therapy IND Applications” (2018)、  
<https://www.fda.gov/media/113760/download>
- FDA Guidance “Long Term Follow-Up After Administration of Human Gene Therapy Products” (2020-01-28)、  
<https://www.fda.gov/media/113768/download>
- FDA Press Announcement “FDA Increases Flexibility on Requirements for Cell and Gene Therapies …” (2026-01)、<https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-increases-flexibility-requirements-cell-and-gene-therapies-advance-innovation>
- FDA News Release: Kymriah(2017-08-30)、<https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-approves-first-gene-therapy-cancer>
- FDA News Release: Yescarta(2017-10-18)、<https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-approves-second-car-t-cell-therapy>
- EMA “Advanced therapy medicinal products: Overview”、  
<https://www.ema.europa.eu/en/human-regulatory-overview/advanced-therapy-medicinal-products-overview>
- EMA Public statement on Glybera expiry (2017-10-28, PDF)、  
[https://www.ema.europa.eu/en/documents/public-statement/public-statement-glybera-expiry-marketing-authorisation-european-union\\_en.pdf](https://www.ema.europa.eu/en/documents/public-statement/public-statement-glybera-expiry-marketing-authorisation-european-union_en.pdf)
- PMDA 科学委員会報告書『標的の特異性を有する in vivo 遺伝子治療用製品の開発における留意事項 -- in vivo CAR-T の開発など』(2024-07-04, PDF)、  
<https://www.pmda.go.jp/files/000269351.pdf>
- PMDA 専門部会ページ「標的の特異性を有する in vivo 遺伝子治療用製品のベクターに関する評価の考え方専門部会」、<https://www.pmda.go.jp/rs-std-jp/subcommittees/0031.html>
- AMED「再生・細胞医療・遺伝子治療実現加速化プログラム」、  
<https://www.amed.go.jp/program/list/13/01/013.html>
- WHO “Human genome editing: recommendations” (2021)、  
<https://www.who.int/publications/i/item/9789240030381>
- WHO “Cell, Tissue and Gene Therapy Products”(ECBS 2023 採択)、  
<https://www.who.int/teams/health-product-policy-and-standards/standards-and-specifications/norms-and-standards/cell--tissue-and-gene-therapy-products>
- Nobel Foundation “Press release: The Nobel Prize in Chemistry 2020”  
<https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2020/press-release/>
- Jinek et al. “A Programmable Dual-RNA-Guided DNA Endonuclease …” (Science, 2012, PDF)、<https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.1225829>
- Komor et al. “Programmable editing of a target base … (Base editing)” (Nature, 2016, PDF)、<https://www.nature.com/articles/nature17946.pdf>
- Anzalone et al. “Search-and-replace genome editing … (Prime editing)” (Nature, 2019, PDF)、<https://www.nature.com/articles/s41586-019-1711-4.pdf>
- Gillmore et al. “CRISPR-Cas9 In Vivo Gene Editing for Transthyretin Amyloidosis” (NEJM, 2021, PDF)  
<https://www.nejm.org/doi/pdf/10.1056/NEJMoa2107454>
- Molecular Therapy “Lethal immunotoxicity in high-dose systemic AAV therapy” (2023)、[https://www.cell.com/molecular-therapy-family/molecular-therapy/fulltext/S1525-0016\(23\)00556-7](https://www.cell.com/molecular-therapy-family/molecular-therapy/fulltext/S1525-0016(23)00556-7)
- Nature Methods Review “Single-cell immune repertoire analysis” (2024, PDF)  
<https://www.nature.com/articles/s41592-024-02243-4.pdf>
- ClinicalTrials.gov “NCT06539338 INT2104 (in vivo CAR)”(最終更新 2026-02-04)、<https://clinicaltrials.gov/study/NCT06539338>
- The Lancet EBioMedicine Review “Advancements and challenges in developing in vivo CAR T cell therapy” (2024)、  
[https://www.thelancet.com/journals/ebiom/article/PIIS2352-3964\(24\)00302-5/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/ebiom/article/PIIS2352-3964(24)00302-5/fulltext)
- Cell and Gene Therapy Catapult “Manufacturing surveys”、  
<https://ct.catapult.org.uk/resources/manufacturing-surveys>
- ICER Press Release “Final Evidence Report … Gene Therapies for Hemophilia A

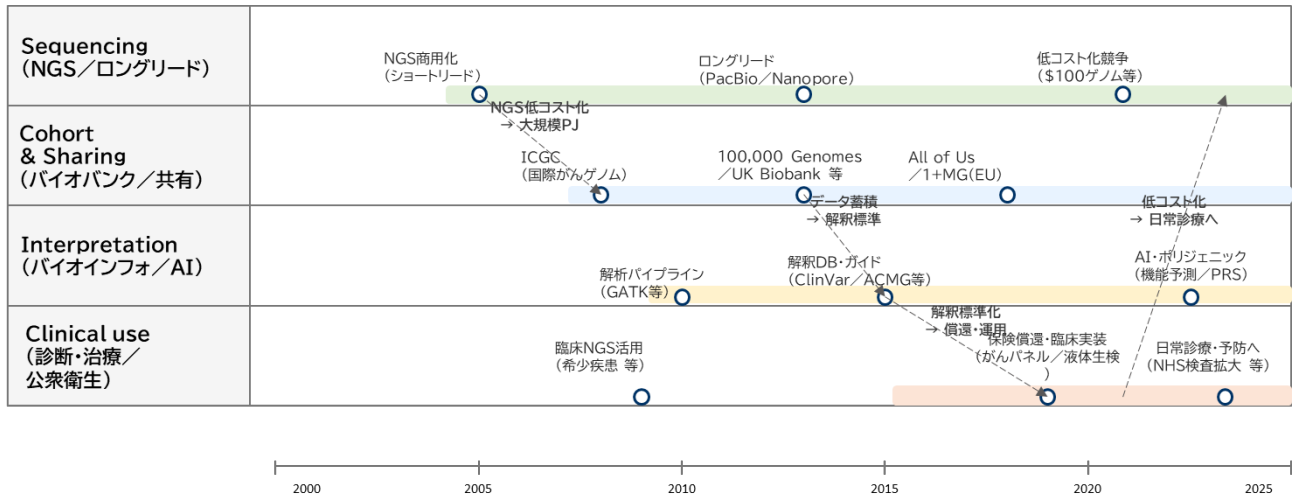
and B” (2022-11-02)、<https://icer.org/news-insights/press-releases/icer-publishes-final-evidence-report-on-gene-therapies-for-hemophilia-a-and-b/>

- ICER & NEWDIGS White Paper “Managing the Challenges of Paying for Gene Therapy” (2024, PDF)、[https://icer.org/wp-content/uploads/2024/04/Managing-the-Challenges-of-Paying-for-Gene-Therapy--ICER-NEWDIGS-White-Paper-2024\\_final.pdf](https://icer.org/wp-content/uploads/2024/04/Managing-the-Challenges-of-Paying-for-Gene-Therapy--ICER-NEWDIGS-White-Paper-2024_final.pdf)
- NICE Highly Specialised Technologies Guidance “Atidarsagene autotemcel (Libmeldy) …” (HST18)、<https://www.nice.org.uk/guidance/hst18>
- Japanese Law Translation “Act on Securing Quality, Efficacy and Safety of Products Including Pharmaceuticals and Medical Devices (PMD Act)”(英訳)、<https://www.japaneselawtranslation.go.jp/en/laws/view/3213/en>
- EMA EPAR: Glybera(2012)  
<https://www.ema.europa.eu/en/medicines/human/EPAR/glybera>
- FDA News Release: Luxturna(2017-12-19)<https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-approves-luxturna>
- FDA News Release: Zolgensma(2019-05-24)<https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-approves-innovative-gene-therapy-treat-pediatric-patients-spinal-muscular-atrophy>
- FDA News Release: Hemgenix(2022-11-22)<https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-approves-first-gene-therapy-hemophilia-b>
- FDA News Release: Roctavian(2023-06-29)<https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-approves-first-gene-therapy-treat-adults-hemophilia>
- FDA News Release: Elevidys(初回 2023-06-22/適用拡大 2024-06-20)  
<https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-approves-first-gene-therapy-duchenne-muscular-dystrophy> および <https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-expands-approval-first-gene-therapy-treatment-certain-patients-duchenne-muscular-dystrophy>
- Foust et al., Nat Biotechnol 27, 59–65(2009)AAV9 が血液脳関門を通過(マウス)  
<https://www.nature.com/articles/nbt.1515>
- Raper et al., Mol Genet Metab 80, 148–158(2003)OTC 欠損症に対するアデノウイルス投与の致死例報告
- Hacein-Bey-Abina et al., N Engl J Med 348, 255–256(2003)X 連鎖 SCID 遺伝子治療後の挿入変異性白血病
- FDA Guidance: Long Term Follow-Up After Administration of Human Gene Therapy Products(最終版 2020-01)<https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/long-term-follow-after-administration-human-gene-therapy-products>
- Calcedo et al., J Infect Dis 199, 381–390(2009)AAV 中和抗体の世界疫学  
<https://academic.oup.com/jid/article/199/3/381/868099>
- Leborgne et al., Sci Transl Med 12:eabc7386(2020)IgG 分解酵素により AAV 再投与を可能化(前臨床)<https://www.science.org/doi/10.1126/scitranslmed.abc7386>
- FDA Guidance: CMC Information for Human Gene Therapy INDs(最終版 2020-01)  
<https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/chemistry-manufacturing-and-control-cmc-information-human-gene-therapy-investigational-new-drug>
- FDA Guidance: Manufacturing Considerations for Viral Vectors and Gene Therapy Products(最終版 2020-01)<https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/manufacturing-considerations-viral-vectors-and-gene-therapy-products>
- Spark Therapeutics Press Release(2018-01-03)LUXTURNA 成果連動/分割払い等の支払いモデル <https://sparktx.com/news-releases/>
- NHS England Press Release(2021-03-08)Zolgensma の NHS 償還  
<https://www.england.nhs.uk/2021/03/life-changing-sma-gene-therapy-available-on-nhs/>

## 2.2.4 潮流 A4:ゲノム医療「個別化・精密医療インフラの構築」

### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



※バーは「顕著に発展・活用が進んだ時期」の目安である。NGS: next-generation sequencing、ICGC: International Cancer Genome Consortium、GA4GH: Global Alliance for Genomics and Health、PRS: polygenic risk score

出所)点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き:影響が及ぶ方向(起点から波及先)を示す。  
 矢印上のラベル:影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-5 技術的進歩と方向性の概要図「個別化・精密医療インフラの構築」

表 2-27 技術的進歩と方向性(概要)「個別化・精密医療インフラの構築」

| 概要  |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● シーケンサー技術の飛躍的進歩<br/>2000 年代初頭のヒトゲノム解読完了後、2000 年代半ばに次世代シーケンサー(NGS)が登場し、DNA/RNA の解読コストと時間が飛躍的に削減された。これにより、大規模なゲノムデータの蓄積と解析が可能となり、生命科学研究はオミクスの時代へと突入した。タンパク質・代謝物まで含めた網羅的データが生み出され、それらビッグデータを解析して意味付けする技術も大きく進展している。こうした技術革新の波及により、多様な疾患で遺伝要因の解明が加速し、希少疾患の原因遺伝子同定や多因子疾患におけるリスク遺伝子の発見が相次いだ。</li> <li>● 希少疾患ゲノム解析とロングリードの登場<br/>ゲノム医療は希少疾患領域で成果を上げている。2009 年前後から短鎖読み取り型(ショートリード) NGS による遺伝子変異同定が可能となり、一塩基レベルの変異(SNV)の発見が進んだ。続いてコピー数変異(CNV)など構造変異も解析可能となり、多様なタイプの変異が診断に組み込まれた。さらに 2015 年頃からは長鎖読み取り型(ロングリード)シーケンサーが台頭し、2018 年頃にはヒト全ゲノムを解析できる性能に達したことで、従来検出困難だった反復配列や構造異常を原因とする疾患解明にも道が開かれつつある。</li> <li>● 精密医療コンセプトの浸透<br/>2015 年 1 月、オバマ米大統領(当時)が提唱した Precision Medicine Initiative(精密医療イニシアチブ)は、個人の遺伝情報・環境・生活習慣を考慮して最適な予防・治療を行う次世代医療のビジョンとして世界に広がった。続く 2016 年には、がん研究加速の「Cancer Moonshot」が発表され、がん免疫療法の推進や全米のがんセンターデータ共有ネットワーク構築など、新たな切り口でのブレークスルーが目指された。こうした政策的後押しにより、個別化医療の考え方が研究から臨床現場に浸透した。</li> <li>● がんゲノム医療の臨床実装<br/>がん領域では、分子標的薬を適切な患者に投与するためのゲノムプロファイリング検査が実用段階に入った。米国では数百遺伝子を網羅する腫瘍パネル検査(OncoPrint Dx、MSK-IMPACT、FoundationOne CDx など)が FDA により承認され、2020 年には血中遊離 DNA を用いるリキッドバイオプシー検査も承認されている。多数のがん種を対象に、患者の遺伝子変異ごとに最適薬を投与するバスケット試験(例:NCI-MATCH 試験)も進行し、ゲノムに基づく治療マッチングが標準治療の選択肢となり始めた。日本でも 2018 年にがんゲノム医療中核拠点病院の指定、2019 年には国産の OncoGuide NCC オンコパネルおよび米国発 FoundationOne CDx が保険収載され、遺伝子パネル検査に基づく治療提案が保険診療として開始された。現在では我が国においてもがんゲノム医療の中核拠点病院・拠点病院・連携病院の体制が整備され、患者の遺伝子プロファイルに応じた治験・臨床試験への組入れや新規治療の選択が行われている。</li> <li>● 各国の国家ゲノム計画<br/>2010 年代後半より、各国で大規模なゲノム医療プロジェクトが開始された。英国では 10 万ゲノム計画(Genomics England)によって 2013~2018 年にかけ 10 万人分の全ゲノム解析が行われ、NHS にゲノム医療サービスが組み込まれた。米国でも All of Us が 100 万人の参加者登録を目指して 2018 年に本格始動し、中国も「中国精準医療計画」として 100 万人ゲノムを掲げた国家プロジェクトを進めている。EU も加盟国連携で「1+ Million Genomes」イニシアチブを発足させている。2020 年代には世界中で「100 万人規模でのゲノム解析」が現実のものとなりつつあり、各国の医療システムにゲノム情報を統合する動きがある。</li> <li>● 新規技術の波及<br/>大規模プロジェクトの進展と膨大なデータ蓄積に伴い、関連する基盤技術も飛躍的に拡充された。実験面では Illumina 社・BGI 社による高速シーケンサー、10x Genomics 社や Fluidigm 社による単一細胞ゲノム/トランスクリプトーム解析装置、Oxford Nanopore 社や PacBio 社のロングリード sequencer などが続々と登場した。計算解析面では、バイオインフォマティクスと AI の融合が進み、ゲノムデータを含む生物学ビッグデータを効率的に扱うアルゴリズムや、クラウド上で安全にデータ解析を行う仕組みが開発された。例えば米 NCI は Cancer Genomics Cloud 計画でクラウド上にがんゲノムデータ共有・解析基盤(Genomic Data Commons など)を構築し、大手 IT 企業もゲノム解析プラットフォームを提供し始めている。これにより研究者個々が生データを抱えて解析する従来モデルから、共有クラウド上で巨大データを解析する新モデルへの転換が進みつつある。今後はマルチオミクス解析(ゲノム・転写・プロテオーム・メタボローム等の統合解析)により、高精度なバイオマーカー同定や疾患予測アルゴリズム開発へと展開すると期待されており、各国の医療研究はゲノム情報を中核に据えた総合的アプローチへとシフトしている。</li> </ul> |  |

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-28 タイムライン「個別化・精密医療インフラの構築」

| 年     | 技術・研究のマイルストーン例  |
|-------|---|
| 2003年 | ヒトゲノム計画完了。ヒト全遺伝情報(約 30 億塩基対)の解読が達成され、ゲノム研究の新時代が始まる。その後、ゲノム解析コストは 20 年で 100 万分の 1 以下に劇的低減した <a href="https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12081226/">https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12081226/</a> 。                                      |
| 2005年 | 次世代シーケンサー(NGS)の商業化。従来のサンガー法に代わる高速シーケンス技術(454 社のシステム等)が登場し、大量並列読み出しによりゲノム解析の高速化・低コスト化が進む。この技術革新により大規模ゲノムプロジェクトが可能となった。   |
| 2008年 | 国際がんゲノムコンソーシアム(ICGC)設立。米・欧・日・中など主要国が参加し、25,000 以上のがん検体の全ゲノム解析を分担する世界最大級のがんゲノム研究共同体が発足。各国でがん種ごとの遺伝子異常カタログ作成が進み、後の Pan-Cancer 解析へ繋がる。   |
| 2009年 | 臨床現場での NGS 活用開始。希少疾患領域でショートリード型 NGS を用いた遺伝子変異同定が実施され、一塩基多型の網羅的検出に成功。続いて構造変異(欠失・重複など)解析も可能となり、遺伝性疾患診断への応用が加速。  |
| 2011年 | NHGRI(米国・国立ヒトゲノム研究所)戦略転換 - ヒトゲノム計画後の新戦略としてゲノム医療実現への投資を本格化。また同年、国際希少疾患研究コンソーシアム(IRDiRC) 発足。各国研究資源を結集し「2020 年までに 200 種の新規治療法開発とほとんど全ての希少疾患での診断実現」を目標に掲げる(※治療 200 種は 2017 年に前倒し達成)。  |
| 2013年 | 英国 100,000 ゲノム計画開始。英国政府が Genomics England を設立し、NHS 患者(希少疾患・がん)10 万人のゲノム解析を開始。同年、デンプク質反復配列の切断酵素を用いた CRISPR-Cas9 ゲノム編集技術が論文化され、以降生命科学研究で爆発的に普及(2020 年にノーベル化学賞受賞)。また世界的データ共有を推進する Global Alliance for Genomics and Health (GA4GH)も発足し、国際的なゲノムデータ標準化が始まる。 |
| 2015年 | 精密医療イニシアチブ(PMI)の発足。米国でオバマ政権が Precision Medicine Initiative を提唱し、大規模コホート研究など個別化医療基盤の構築に着手。同年、中国が国家重点プロジェクト「精准医療計画」を開始し、東アジアでもゲノム医療が国家戦略に位置付けられる。   |
| 2016年 | Cancer Moonshot(米)がんムーンショット計画始動。米国にて膨大な予算を投じ、免疫療法の全がん種への展開や主要がんセンター間データ共有ネットワーク構築を推進。また、日本では AMED が難病・未診断疾患の全ゲノム解析プロジェクト(IRUD など)を本格化し、複数の難病で原因遺伝子同定と診断への応用が報告され始める。  |
| 2017年 | 国際目標の前倒し達成と新展開。IRDiRC は当初目標の「治療法 200 種開発」をこの年までに達成し、新たに「全希少疾患患者の診断までの待ち時間を 1 年以内に短縮する」等の 2030 年目標を策定。また米国で個人向け消費者 DNA 検査(DTC 遺伝子検査)が広がりを見せ、23andMe 社が FDA 承認を取得するなど一般消費者へのゲノム情報提供が話題に。  |
| 2018年 | 大規模コホートと臨床実装。米国で All of Us 研究プログラムが本格的参加者登録を開始(目標 100 万人)し、初期データ提供を開始。欧州連合は「1+ミリオンゲノム」宣言に加盟国が署名し、100 万人のゲノムを集積・共有する計画を開始。英国では 10 万ゲノム計画が完了し、NHS ゲノム医療サービスが正式に発足。日本でもがんゲノム医療が整備され、中核拠点病院の指定と患者受入れ開始。   |
| 2019年 | ゲノム医療の保険収載・商業化。日本で「がん遺伝子パネル検査」が 2 種(OncoGuide・F1CDx)保険適用となり、ゲノム解析に基づく治療が臨床検査として定着。米国 FDA はこの年までに固形がん向け遺伝子パネル 3 種に加え、Guardant360 等の液体生検も承認し、ゲノム診断が標準医療の一部に。また Oxford Nanopore 社の携帯型シーケンサーなど新規参入が目立つ中、シーケンサー市場は依然 Illumina 社が大勢を占め、新規参入の困難さも浮き彫りに。      |
| 2020年 | COVID-19 時代とゲノム技術。新型コロナウイルス流行下でウイルスゲノム監視が公衆衛生に貢献し、ゲノム解析の迅速性が注目される。欧州では 1+MG 計画の下で各国のゲノムデータ共有基盤構築が進展。10 月、CRISPR-Cas9 開発者 2 名にノーベル化学賞が授与され、ゲノム編集技術の医学応用への期待が高まる。「ゲノム情報が創る未来医療」への社会的関心が一段と強まった年となった。  |

| 年     | 技術・研究のマイルストーン例  |
|-------|---|
| 2021年 | 超高速シーケンス技術の競争。米 Ultima Genomics 社が極低コスト(\$100 ゲノム)シーケンス技術を発表し話題に。中国 BGI 社も新型機 (DNBSEQ など) で Illumina に対抗。Illumina 社は NovaSeq X を投入し年間 2 万ゲノム解析規模へ性能向上。シーケンスのスループットとコストはさらに改善。一方、日本勢による国産シーケンサー開発は停滞が続き、グローバル企業が市場を牽引。                               |
| 2023年 | AI とポリジェニックリスクの台頭。DeepMind 社の AlphaFold2 によるタンパク質構造予測 (2021) に続き、生成 AI を活用したバリエーション機能予測など計算手法が飛躍。FDA 新薬承認の 1/3 以上が個別化医療 (バイオマーカーに基づく治療薬) となり 4 年連続でその傾向が継続。世界では 50 以上の国・地域で国家ゲノム計画やゲノム医療サービスが展開中と報告される。日本は未診断疾患イニシアチブ (IRUD) で成果を上げ、数百例の難病で診断確定を達成。 |
| 2024年 | ゲノム医療の本格実装。英国 NHS では年間 81 万件以上の遺伝学的検査を提供し、ゲノム医療が日常診療に組み込まれている。NHS の検査メニューは 7,000 以上の遺伝性疾患と 200 のがん疾患を網羅し、新薬の登場に応じて更新され続けている。シンガポールやフランスなど各国も英国と提携し、ゲノム医療の知見共有を加速。今後は世界的にゲノム情報を活用した予防・精密医療がさらなる拡大期に入ると見込まれている。                                       |

### (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-29 キーテクノロジー「個別化・精密医療インフラの構築」

| 名称                           | 出現時期・背景   | 定義  |
|------------------------------|---|---|
| 次世代シーケンサー (NGS) (ショートリード)    | 出現時期: 2005 年に 454 シーケンスで実用化し (pyrosequencing)、2006-2008 年にイルミナ方式が主流化して大規模ゲノム解析が普及。<br>背景: 並列化によるスループット向上と急速なコスト低下が、全ゲノム/エクソーム/トランスクリプトーム解析の普及を後押し。  | 数百万~数十億の短い断片 DNA を並行して読み取り、ゲノム全体を高速解読する技術。従来の Sanger 法に代わり、一人の全ゲノムを数日・数千ドルで解析可能にした。ヒト以外に植物・微生物など幅広いゲノム解析にも適用。   |
| ロングリード・シーケンス (長鎖 DNA シーケンサー) | 出現時期: 2009 年に PacBio の SMRT が登場し、2010 年代前半に Oxford Nanopore 技術が現れ、2010 年代後半に超長リードによるヒトゲノム組立などで実用が拡大。<br>背景: 繰り返し配列・構造変異の高精度検出、ハプロタイプ位相決定、参照ゲノムの高品質化のニーズに対応。   | 1 万~数十万塩基という長い DNA フラグメントを読み取る次世代シーケンス技術。PacBio 社の SMRT シーケンス (蛍光標識) と Oxford Nanopore 社のナノポアシーケンス (電流変化検出) の 2 系統が代表的。長いリードでゲノムの構造異常や複雑な領域の解析が可能となり、ショートリードの弱点を補完する。               |
| バイオバンク & データ共有基盤             | 出現時期: 2010 年代に国家規模バイオバンク/データコモンズが相次いで整備 (例: Genomics England (2013)、NCI Genomic Data Commons、NHS Genomic Medicine Service、All of Us Research Program)。<br>背景: プレシジョンメディシン実装に向け、標準化された臨床・ゲノムデータ収集、セキュアな共有と二次利用、同意・倫理・ガバナンスの枠組みが整備。 | 大規模なヒト生体試料コレクションとそれに紐づくゲノム・臨床データベース。英国 UK Biobank や米国 All of Us、国内の東北メディカル・メガバンク計画などに代表される。多数の参加者からゲノムや医療情報を集め、疾患関連遺伝子の統計解析やコホート研究に供する。またクラウド上でデータを管理・解析し、研究者間で安全に共有できるプラットフォームも含む。 |

| 名称                                 | 出現時期・背景   | 定義  |
|------------------------------------|---|---|
| バイオインフォマティクス(大規模データ解析)             | 出現時期: 2000 年代後半～2010 年代に NGS 普及とともに、クラウド/HPC を活用した大規模解析パイプラインと解釈基準が確立。<br>背景: バリアント検出・注釈・非コード領域の機能推定・多層データ統合の高度化が求められ、データコモンズ(GDC/CRDC)や臨床変異解釈枠組み(ClinGen など)が整備。     | ゲノム医療を支える情報解析技術全般。シーケンサーから出力される大量のリード配列をアラインしバリエーション(変異)を検出するアルゴリズム、病的変異か否かを評価するバリエーションアノテーション、さらにゲノム・エピゲノム・トランスクリプトーム等を統合して疾患との関連を解析する統計手法などが含まれる。オープンソースの解析ソフトウェア(GATK、ANNOVAR 等)やデータベース(dbSNP、ClinVar など)が広く利用されている。   |
| 人工知能(AI)活用(機械学習・深層学習)              | 出現時期: 2010 年代中盤からディープラーニングがゲノミクスに本格適用され、2021 年には AlphaFold がタンパク質構造予測で大きな飛躍を示す。<br>背景: 大規模オミクスの特徴抽出、自動変異解釈、配列から機能の予測、創薬探索などで従来手法を補完・高度化。                              | 膨大なゲノム・医療データから有用なパターンや知見を引き出すために AI 技術を適用する動き。画像・音声・言語で実績を上げたディープラーニングがゲノム領域にも応用され始めた。具体的には、患者のゲノム検査結果に基づいて症状や体質に合わせた治療法を提案するシステム(文献から関連知見を自動抽出する AI)や、未知の変異の病的影響を予測するモデル(例:病的変異予測 AI)などが開発中。創薬では新規標的分子の発見やドラッグリポジショニングにも機械学習が利用されている。                                    |
| ゲノム情報に基づく診断・治療(Precision Medicine) | 出現時期: 2010 年代に臨床実装が加速(米国 PMI(2015)、包括的がん遺伝子パネルの FDA 承認(2017-2020)、英国 NHS の全国ゲノミクスサービス、日本のがんゲノム医療体制など)。<br>背景: シーケンスコスト低下とデータ基盤整備を背景に、腫瘍変異に基づく治療選択、遺伝性疾患診断、伴奏診断の普及が進展。 | 患者の遺伝子プロファイルに合わせて最適な治療法や薬剤を選択する医療アプローチの総称。コンパニオン診断(遺伝子変異の有無に応じた治療薬選択テスト)やファーマコゲノミクス(薬物療法の効果・副作用予測に遺伝子情報を活用)が含まれる。代表例として HER2 陽性乳がんに対するハーセプチン(抗 HER2 抗体)の適応、EGFR 変異肺がんに対するゲフィチニブなど、遺伝子バイオマーカーに連動した治療がある。また遺伝性疾患では原因遺伝子変異に基づき根本治療薬(例:スピルラザや遺伝子治療薬ゾルゲンスマ)が開発・投与されるケースも増えている。 |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-30 実用化可能性「個別化・精密医療インフラの構築」

| 名称                 | 解説  |
|--------------------|---|
| がん治療の高度化           | ゲノム医療により、がん患者ごとに最適な治療薬を選択する時代が現実になりつつある。遺伝子パネル検査で腫瘍のドライバー変異を特定し、それに対応する分子標的薬や免疫療法を投与することで高い治療効果が期待できる。例えば米国の NCI-MATCH 試験では、数十種のがん種・何百人もの患者を対象に、遺伝子変異プロファイルに応じて治療薬を振り分ける臨床試験が行われ、奏効例が報告されている。日本においても保険適用下でのがんゲノムプロファイリングが始まり、希少がんなどで治療法選択肢が拡大するなど、患者の生存率・QOL 向上に繋がる成果が出始めている。がん領域はゲノム医療の最先端ユースケースであり、今後ますます主要ながん種で標準診療に組み込まれる見込みである。  |
| 希少疾患の診断            | 従来、原因不明の難病患者は診断確定までに長年を要する「診断の旅」を強いられることが多かった。ゲノム医療、とりわけ全エクソーム/全ゲノム解析の導入はこの状況を一変させている。原因遺伝子が不明な希少疾患患者に対し網羅的ゲノム解析を行うことで、約 25～50%のケースで分子的診断が可能との報告もある(※疾患領域による)。国際的には「全ての希少疾患患者に1年以内に診断を届ける」ことが目標に掲げられ、各国で未診断疾患プログラムが進行中である。実際、日本の IRUD や英国の 100,000 Genomes Project では、今まで原因不明だった疾患の遺伝子変異を数多く特定し、患者と家族に確定診断を提供している。診断が付くことで適切な管理・治療に繋がるだけでなく、遺伝カウンセリングによる再発リスク管理など予防的支援も可能になる。ゲノム医療は希少疾患領域で特に高い付加価値を発揮しつつあり、今後診断困難疾患のデフォルト手段として定着する可能性が高い。   |
| 創薬・製薬産業への波及        | ゲノムから得られる知見は新たな医薬品開発にも直結している。例えば遺伝性コレステロール血症の原因遺伝子 PCSK9 の変異研究から、PCSK9 阻害薬というまったく新しい高コレステロール血症治療薬が開発され、希少疾患発の知見が一般疾患治療に応用された。同様に SGLT2 阻害薬(糖尿病治療薬)や RANKL 阻害薬(骨粗鬆症治療薬)は、まれな遺伝疾患の分子基盤解明がきっかけで生まれたものだ。このように「Rare to Common」(希少疾患から一般疾患へ)の戦略で画期的新薬が創出されており、ゲノム研究が製薬パイプラインの重要な源泉となっている。また製薬企業は治験段階でバイオマーカー選別試験を組み込むようになり、効果が高い患者層を絞り込む開発手法が一般化してきた。実際、米 FDA で近年承認される新薬の約 35%は遺伝子バイオマーカーに対応した個別化医薬であり、年々その割合が増加している。ゲノム医療の発展は創薬効率を高め、新たな市場を生み出す原動力となっている。  |
| 医療提供体制・関連産業へのインパクト | ゲノム医療の普及に伴い、医療提供体制や関連産業も大きく変貌しつつある。臨床現場では遺伝カウンセラーや臨床遺伝専門医の需要が増し、専門人材育成が急務となっている。また全国・地域レベルでゲノム医療拠点病院や検査ラボネットワークが構築され、遠隔地の患者もゲノム解析による恩恵を受けられる仕組みが整備されている。検査産業の面では、遺伝子パネル検査や全ゲノム検査サービスが新たな市場を形成し、国内外の検査会社・ベンチャーが参入している。英国 NHS では 2024 年に年間 81 万件以上の遺伝学的検査が公的医療内で実施されており、こうした需要増大に対応するため高度に自動化された検査システムや AI による結果報告が開発されている。さらに IT 企業との連携も進み、クラウド上でのゲノムデータ解析サービスや電子カルテとの連動によるオーダーメイド医療提案など、新たなヘルステック領域が拡大している。ゲノム医療は医療・バイオ領域のみならず、情報産業やサービス産業とも結びついたエコシステムを形成しつつあり、その経済波及効果も大きい。各種市場予測ではグローバルゲノミクス関連市場が 2030 年前後まで年率二桁成長を続けるとされ、政策的な支援次第で我が国の産業競争力強化にも寄与し得る。 |

| 名称            | 解説  |
|---------------|---|
| 予防医療・公共衛生への応用 | ゲノム情報は個人の疾病リスク評価にも用いられ始めている。例えば遺伝性乳がん卵巣がん症候群(BRCA1/2 変異)保有者に対するサーベイランス強化や予防切除、家族性高コレステロール血症のスクリーニングなど、ハイリスク者の早期発見にゲノム検査を活用する動きがある。また、新生児期に遺伝子スクリーニングを行い重篤な先天代謝異常等を早期診断・治療する研究(新生児ゲノムスクリーニング試験)も欧米で試行段階にある。さらに一部の国では心疾患による若年突然死の遺伝原因を調べ、遺族を検査する「遺伝子カスケード検査」が制度化されつつある。英国では心臓性突然死した遺族 489 名に対し遺伝学的検査を行い、271 名に予防的ケアを提供できたとの報告があり、“ゲノムファースト”アプローチが家族単位の公衆衛生にも寄与している。このようにゲノム医療は予防医学・集団保健にも応用範囲を広げており、将来的には個人のライフステージ全般にわたってゲノム情報に基づく健康管理を行う社会も展望される。 |

### (5) インタビュー結果を踏まえた今後の潮流および研究の方向性

中核研究者へのインタビュー結果に基づき、今後 5 年から 10 年の潮流および研究の方向性を整理した。

表 2-31 今後の潮流および研究の方向性「個別化・精密医療インフラの構築」

| 項目  | 概要   |
|---|--|
| 新たに浮上している、または今後 5 年から 10 年の間に浮上すると考えられる技術トレンド、技術的ブレークスルーの可能性、技術面の障壁、規制・倫理も含む非技術面の障壁 | <ul style="list-style-type: none"> <li>最大の焦点は、電子カルテ(EMR)からの「診療情報の抽出・統合ツール」の実用化である。薬剤名や治療効果など、特定のコア項目を安定して抽出できるツールの開発が期待されている。</li> <li>初期の抽出精度が 90%程度であっても完全性に固執せず、データ量と公開性によって技術を進歩・改善させるアプローチが今後のトレンドとなる(ゲノムのロングリード解析の歴史に類似しているとの指摘)</li> <li>技術的には、EMR 内の非構造データ(自由記載、画像、PDF 等)、用語のゆれ、施設やベンダー間の差異が大きな課題である。解決には、自然言語処理(NLP)による情報抽出、用語の標準化(コード体系)、時系列統合アルゴリズム、欠測補完(インプューション)の導入が必須となる。</li> <li>非技術面では、個人情報や経済安全保障を理由としたデータ公開制限、倫理審査(IRB)の負担、データ共有に対するインセンティブの不足が挙げられる。さらに、特定企業(Flatiron、Tempus 等)が収集したデータは外部に公開されにくく、アカデミアによる自由な解析が阻害されている点も構造的な障壁である</li> </ul> |
| 他分野研究連携の必要性   | <ul style="list-style-type: none"> <li>診療情報の抽出・解析ツールを開発するため、量子計算、AI、情報科学の専門家を巻き込み、医療機関と共同で取り組む枠組みが不可欠である</li> <li>大規模な連携は身動きが取りづらいため、医療現場の協力を得つつ、小規模な課題を多数並行して走らせる方が新たな発想を創出しやすい</li> <li>開発された抽出ツールは GitHub 等で公開し、分野を超えて再利用および改良されるエコシステム(循環)を構築すべきである</li> </ul>   |
| わが国のアセット(人材・インフラ等)と国外プレイヤー・チームとの比較  | <ul style="list-style-type: none"> <li>日本の弱点(国外との比較):英国(NHS)のような、国全体での統一規格や診療情報の統合基盤が欠如している点である。</li> <li>日本ではゲノム起点の研究が先行しており、診療情報の収集は「各研究班の努力」に依存しているため、国全体の基盤として脆弱である。</li> <li>日本のアセット(強み):医療機関の高い臨床力と豊富な症例数、ゲノム解析の技術基盤、そして研究者の質の高さである。</li> <li>海外企業主導のデータ収集とのギャップを広げないためにも、これらの強みを活かした診療情報抽出の共通ツールと公開基盤の構築、および産学官連携による公開可能領域の拡大が急務である。</li> </ul>   |

| 項目                           | 概要  |
|------------------------------|---|
| 今後5年から10年の間において潮流となり得る研究の方向性 | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 診療情報の抽出・解析ツールを開発するため、量子計算、AI、情報科学の専門家を巻き込み、医療機関と共同で取り組む枠組みが不可欠である。</li> <li>● 大規模な連携は身動きが取りづらいため、医療現場の協力を得つつ、小規模な課題を多数並行して走らせる方が新たな発想を創出しやすい。</li> <li>● 開発された抽出ツールは GitHub 等で公開し、分野を超えて再利用および改良されるエコシステム(循環)を構築すべきである。</li> </ul> |

## (6) 出所

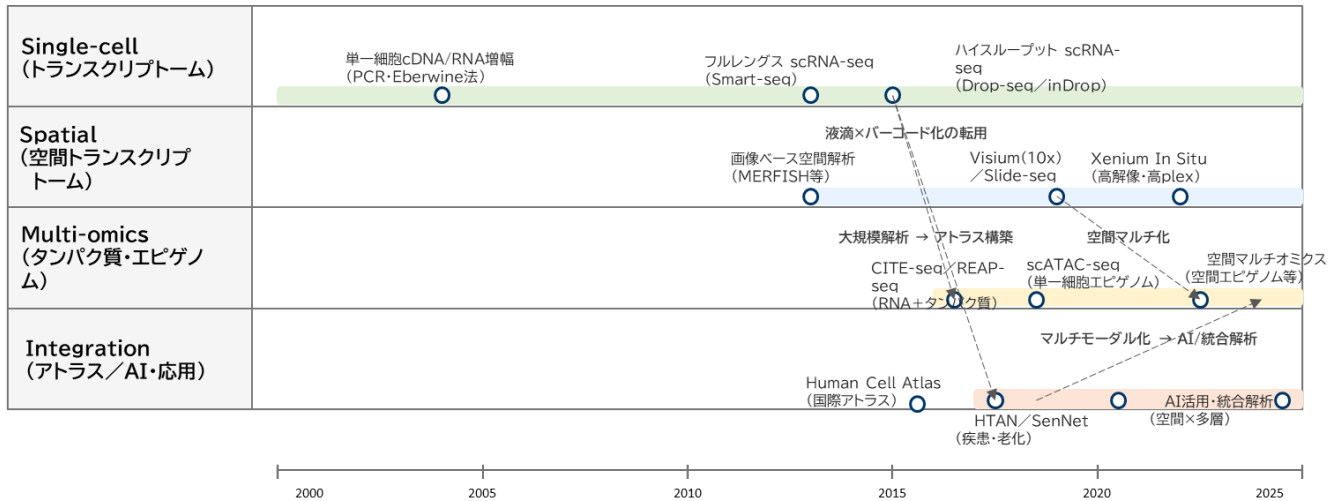
|   |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● National Human Genome Research Institute (NHGRI). Genomics and Medicine. <a href="https://www.genome.gov/health/Genomics-and-Medicine">https://www.genome.gov/health/Genomics-and-Medicine</a></li> <li>● National Cancer Institute (NCI). Somatic Mutation – NCI Dictionary of Cancer Terms. <a href="https://www.cancer.gov/publications/dictionaries/cancer-terms/def/somatic-mutation">https://www.cancer.gov/publications/dictionaries/cancer-terms/def/somatic-mutation</a></li> <li>● 内閣官房. 健康・医療データ利活用基盤協議会(ゲノム医療関連資料). <a href="https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kenkouiryou/genome/genome_dai13/siryou5.pdf">https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kenkouiryou/genome/genome_dai13/siryou5.pdf</a></li> <li>● Margulies M, et al. Genome sequencing in microfabricated high-density picolitre reactors. Nature (2005). <a href="https://www.nature.com/articles/nature03959">https://www.nature.com/articles/nature03959</a></li> <li>● NHGRI. DNA Sequencing Costs: Data. <a href="https://www.genome.gov/about-genomics/fact-sheets/DNA-Sequencing-Costs-Data">https://www.genome.gov/about-genomics/fact-sheets/DNA-Sequencing-Costs-Data</a></li> <li>● The White House (Archive). Fact Sheet: President Obama’s Precision Medicine Initiative (2015). <a href="https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2015/01/30/fact-sheet-president-obama-s-precision-medicine-initiative">https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2015/01/30/fact-sheet-president-obama-s-precision-medicine-initiative</a></li> <li>● National Cancer Institute. Cancer Moonshot<sup>SM</sup>. <a href="https://www.cancer.gov/research/progress/moonshot-cancer-initiative">https://www.cancer.gov/research/progress/moonshot-cancer-initiative</a></li> <li>● U.S. Food and Drug Administration (FDA). FoundationOne CDx (PMA P170019). <a href="https://www.accessdata.fda.gov/cdrh_docs/pdf17/P170019S014B.pdf">https://www.accessdata.fda.gov/cdrh_docs/pdf17/P170019S014B.pdf</a></li> <li>● U.S. Food and Drug Administration (FDA). FoundationOne Liquid CDx (PMA P190032). <a href="https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfpma/pma.cfm?id=P190032">https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfpma/pma.cfm?id=P190032</a></li> <li>● 厚生労働省. がんゲノム医療中核拠点病院等の指定について. <a href="https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryou/kenkou/gan/gan_byoin.html">https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryou/kenkou/gan/gan_byoin.html</a></li> <li>● 国立がん研究センター C-CAT. がんゲノム医療提供体制(病院一覧). <a href="https://for-patients.c-cat.ncc.go.jp/hospital_list/">https://for-patients.c-cat.ncc.go.jp/hospital_list/</a></li> <li>● NHS England. NHS Genomic Medicine Service. <a href="https://www.england.nhs.uk/genomics/nhs-genomic-med-service/">https://www.england.nhs.uk/genomics/nhs-genomic-med-service/</a></li> <li>● National Institutes of Health (NIH). All of Us Research Program. <a href="https://allofus.nih.gov">https://allofus.nih.gov</a></li> <li>● National Cancer Institute. Genomic Data Commons (GDC). <a href="https://gdc.cancer.gov">https://gdc.cancer.gov</a></li> <li>● National Cancer Institute. GDC Data Portal. <a href="https://portal.gdc.cancer.gov">https://portal.gdc.cancer.gov</a></li> <li>● National Cancer Institute. Cancer Research Data Commons (CRDC). <a href="https://datascience.cancer.gov/data-commons">https://datascience.cancer.gov/data-commons</a></li> <li>● Clinical Genome Resource (ClinGen). Variant Classification Guidance. <a href="https://clinicalgenome.org/tools/clingen-variant-classification-guidance/">https://clinicalgenome.org/tools/clingen-variant-classification-guidance/</a></li> <li>● Ward LD, Kellis M. Interpreting noncoding genetic variation in complex traits and human disease. Nature Biotechnology (2013). <a href="https://www.nature.com/articles/nbt.2422">https://www.nature.com/articles/nbt.2422</a></li> <li>● Genomics England. About Genomics England. <a href="https://www.genomicsengland.co.uk">https://www.genomicsengland.co.uk</a></li> <li>● NHS England. Genomics. <a href="https://www.england.nhs.uk/genomics/">https://www.england.nhs.uk/genomics/</a></li> </ul> |
|---|

- Australian Government Department of Health. Genomics Australia. <https://www.health.gov.au/our-work/genomics-australia>
- Genome Canada. About Genome Canada. <https://genomecanada.ca>
- 国立がん研究センター C-CAT. C-CAT の役割. [https://www.ncc.go.jp/jp/c\\_cat/kaisetsu/yakuwari/index.html](https://www.ncc.go.jp/jp/c_cat/kaisetsu/yakuwari/index.html)
- All of Us Research Hub. <https://www.researchallofus.org>
- Rehm HL, et al. ClinGen Variant Curation Interface. Genome Medicine (2021). <https://genomemedicine.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13073-021-01004-8>
- International Rare Diseases Research Consortium (IRDiRC). Vision & Goals. <https://irdirc.org/vision-goals/>
- The Nobel Prize. The Nobel Prize in Chemistry 2020 – CRISPR/Cas9. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2020/popular-information/>
- NHS England. Genomic Medicine Service achievements. <https://www.england.nhs.uk/genomics/>
- U.S. Federal Trade Commission. Illumina/GRAIL Decision and Order(競争状況関連資料). [https://www.ftc.gov/system/files/ftc\\_gov/pdf/d09401commissionfinalopinon.pdf](https://www.ftc.gov/system/files/ftc_gov/pdf/d09401commissionfinalopinon.pdf)
- U.S. Food and Drug Administration (FDA). New Molecular Entity (NME) Drug and New Biologic Approvals. <https://www.fda.gov/drugs/drug-approvals-and-databases/compilation-cder-new-molecular-entity-nme-drug-and-new-biologic-approvals>
- NHS England. Genomics. <https://www.england.nhs.uk/genomics/>
- NHS England. NHS Genomic Medicine Service. <https://www.england.nhs.uk/genomics/nhs-genomic-med-service/>
- NHS England. Genomic Test Directory. <https://www.england.nhs.uk/publication/national-genomic-test-directories/>
- NHGRI. DNA Sequencing Costs Data. <https://www.genome.gov/about-genomics/fact-sheets/DNA-Sequencing-Costs-Data>
- Margulies M, et al. Nature (2005).(同上) <https://www.nature.com/articles/nature03959>
- FDA. FoundationOne CDx.(同上) [https://www.accessdata.fda.gov/cdrh\\_docs/pdf17/P170019S014B.pdf](https://www.accessdata.fda.gov/cdrh_docs/pdf17/P170019S014B.pdf)
- 厚生労働省. がんゲノム医療体制. [https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou\\_iryou/kenkou/gan/gan\\_byoin.html](https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryou/kenkou/gan/gan_byoin.html)
- Eraslan G, et al. Deep learning in genomics. Nature Reviews Genetics (2019). <https://www.nature.com/articles/s41576-019-0122-6>
- Jumper J, et al. Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold. Nature (2021). <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03819-2>
- Landmesser U, et al. PCSK9 inhibition. Nature Reviews Cardiology (2021). <https://www.nature.com/articles/s41569-021-00634-0>
- NHS England. Genomics. <https://www.england.nhs.uk/genomics/>
- ClinGen. Variant Classification Resources. <https://clinicalgenome.org>
- 内閣官房. ゲノム医療およびデータ利活用の推進における論点と対応案. [https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kenkouiryou/genome/genome\\_dai13/siryou5.pdf](https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kenkouiryou/genome/genome_dai13/siryou5.pdf)

## 2.2.5 潮流 A5: AI 診断・予防「AI による診断支援と予測・予防への展開」

### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



※バーは「顕著に発展・活用が進んだ時期」の目安である。scRNA-seq: single-cell RNA sequencing, HCA: Human Cell Atlas, HTAN: Human Tumor Atlas Network, SenNet: Senescence Network

出所)点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き:影響が及ぶ方向(起点から波及先)を示す。  
 矢印上のラベル:影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-6 技術的進歩と方向性の概要図「AI による診断支援と予測・予防への展開」

表 2-32 技術的進歩と方向性(概要)「個別化・精密医療インフラの構築」

| 概要  |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● シングルセル RNA シーケンスの普及<br/>2009年に最初の1細胞転写産物解析(scRNA-seq)が報告されて以降、単一細胞レベルで遺伝子発現を解析する技術は急速に発展した。特に2015年前後に Drop-seq や inDrop といったマイクロ流体デバイスを用いた手法が登場し、一度に数万個規模の細胞から転写産物を解析可能となり、この分野の基盤技術が飛躍的に拡大した。現在では 10x Genomics 社の Chromium システムに代表される商用装置が研究現場に浸透し、生物学・医学研究に欠かせない手法となっている。</li> <li>● マルチオミクスと包括的解析<br/>近年は、単一細胞で複数の分子層を同時に測定するマルチオミクス解析へと発展している。例えば2017年に報告された CITE-seq や REAP-seq では、DNA バーコード付き抗体を用いて細胞表面タンパク質発現量と mRNA 発現量を同時定量する技術が実現した。さらに、オープンクロマチン領域(ATAC-seq)とトランスクリプトームを同時解析する SNARE-seq(2019年)、表面タンパク質・転写産物・染色質アクセスビリティの三者を同時計測する ASAP-seq(2021年)など、新規手法が相次いで開発されている。これらにより、一細胞内の遺伝子発現制御ネットワークを多層的に把握することが可能となりつつある。また、取得した大規模データを統合解析する計算手法も進展し、分子層間の関係性を統合的に解明するアプローチが確立されつつある。</li> <li>● 空間情報の付加<br/>空間オミクス(空間的トランスクリプトーム解析)の登場も大きな潮流である。組織切片上で細胞を破壊せずに位置情報と遺伝子発現を同時取得する技術であり、2020年の Nature Methods「Method of the Year」に選出されるなど注目を集めた。手法は大きく網羅型(全細胞の大まかな発現地図)と局所高解像度型(関心領域での高感度解析)に二分類され、前者の代表として 10x Genomics 社が2019年発売した Visium システムがある。Visium ではガラススライド上の約 5,000 箇所位置識別バーコード付きオリゴヌクレオチドを配置し、組織切片由来の mRNA をその場で捕捉・シーケンスする</li> </ul> |

## 概要

ことで、組織中の遺伝子発現地図を作成する。一方、局所型の例として京都大学・九州大学グループの PIC 法(2021 年発表)があり、光反応性試薬を用いてサブミクロン解像度で組織内の特定領域のみ転写産物を解析することに成功している。このように、空間的な分解能と網羅性のトレードオフを工夫で補いながら、細胞間相互作用をその場で捉える技術が進展している。さらに 2022 年末には 10x Genomics 社の Xenium In Situ プラットフォームが発売され、細胞内の 100 種類以上の RNA 分子をナノスケール解像度で可視化できるようになり、日本でも導入が始まった。

- エピゲノム・分子階層への拡張

トランスクリプトーム以外の 1 細胞オミクス解析も飛躍している。一細胞エピゲノム解析では、2015 年頃から一細胞 ATAC-seq(クロマチン開状態の解析)が登場し広く利用されている。2018 年には 10x Genomics 社から一細胞 ATAC-seq 試薬キットが市販化され、個々の細胞核からゲノムのクロマチンアクセスビリティを網羅解析することが容易になった。最近ではトランスクリプトーム+エピゲノム同時解析(シングルセル・マルチオーム)の商用キットも登場し、同一細胞内で遺伝子発現とクロマチン状態を同時観測することが可能である。これにより、例えばゲノムワイド関連解析で同定された非コード変異の機能を、その細胞種におけるエピゲノム変化と発現変動から直接明らかにするといった研究が始まっている。さらに、2022 年には空間的エピゲノム解析として、一細胞レベルの空間 ATAC-seq や空間的ヒストン修飾解析手法も報告された。組織切片上で転写因子結合領域やオープンクロマチン領域をタグ付けし、その場でバーコード化してシーケンスすることで空間情報とエピゲノム情報を紐付ける新技術で、他の分子標的(転写因子や調節因子)の空間解析への応用も期待されている。

- 細胞系譜トレーシングの発展

静的な単細胞解析に加え、細胞の発生系譜を追跡する技術も注目されている。Nature Methods 誌が選ぶ「2022 年注目すべき手法」に「Tracing cell relationships」が挙げられたように、ゲノム編集やバーコード技術を駆使した系譜追跡(Lineage tracing)が急速に発展している。手法は大きく、後から体細胞変異のパターンを単一細胞ゲノム解析で解析して系譜を推定するレトロスペクティブ(遡及的)解析と、あらかじめ DNA バーコードで細胞にタグを付けて追跡するプロスペクティブ(予測的)解析に二分される。前者ではヒトの発達や疾患で特徴的なクローン系譜を体細胞変異から同定する研究が現れ、後者では培養系や移植モデルでバーコード付き細胞を追跡することで、例えば癌における薬剤耐性クローンの出現タイミングや転移の動態を解明する成果が報告されている。こうした系譜追跡技術は胚発生研究からがん研究まで応用が広がり、静的解析では得られなかった発生・疾患進展の動的理解をもたらしている。

- 大型プロジェクトによるデータ蓄積

一細胞オミクス技術の成熟に伴い、世界各国で大規模プロジェクトが立ち上がっている。2017 年開始の Human Cell Atlas (HCA)は国際共同でヒト全身の全細胞タイプを分子プロファイル化する壮大な試みであり、10x Genomics 社の技術を駆使して膨大なデータが蓄積されている。米 NIH の HubMAP 計画(2018 年～)も HCA や Human Protein Atlas と連携し、健常組織の細胞マップ構築を進めている。さらにかん細胞アトラス計画 (HTAN)(2020 年～)では様々ながん種・病期の患者検体を一細胞解析し、腫瘍の細胞地図構築が進行中である。老化細胞に着目した SenNet 計画(2021 年～)や、欧州における LifeTime イニシアチブ(2018 年～2020 年 FS)では健康から病気への移行を 1 細胞マルチオミクスと AI で解析し新たな治療法を探ることを目指している。日本国内でも JST 戦略的創造研究推進事業にて、多細胞システムの時空間相互作用解明を目指す研究領域(さきがけ/CREST「多細胞」「細胞内ダイナミクス」「生命力」領域など)が相次ぎ発足し、国家的な研究基盤形成が図られている。

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-33 タイムライン「個別化・精密医療インフラの構築」

| 年         | 技術・研究のマイルストーン例   |
|-----------|--|
| 2000 年代前半 | シングルセル解析の黎明期: PCR 増幅による単一細胞 cDNA 解析 (Iscove らにより 1990 年代後半に実証) や、RNA 増幅法 (Eberwine 法, 2004 年) など初期技術が開発され、単一細胞の遺伝子発現解析の概念が確立。  |
| 2009 年    | 最初のシングルセル RNA シーケンス: マウス初期胚の単一細胞から全転写産物を網羅的にシーケンスする手法を Tang らが報告し、1 細胞トランスクリプトーム解析時代が開幕。   |
| 2011 年    | 単一細胞ゲノム解析への応用: Navin らが単一がん細胞のゲノムを解析し、腫瘍内の遺伝的異質性を初めて明らかにする。以後、全ゲノム増幅 (WGA) 手法の改良により、個々の細胞の変異プロファイル解明が進展。(※Navin 2011)  |
| 2013 年    | フルレングス転写産物解析: Smart-seq 法(後に Smart-seq2 へ発展)により、1 細胞あたり全長 mRNA を高感度に増幅・シーケンスする技術が登場。スプライシングバリエーション解析など定量精度が向上し、主に低スループット用途で普及。   |
| 2015 年    | ハイスループット scRNA-seq の実現: Drop-seq および inDrop 法が相次いで報告され、マイクロ流体デバイス上の液滴内で 1 細胞単位の cDNA ライブラリ調製が可能に。数万規模の細胞を同時解析できる画期的手法で、単細胞解析のスケールが飛躍的に拡大。同年、10x Genomics 社も設立され、商用ハイスループット装置開発が加速。   |
| 2017 年    | 国際プロジェクト開始: Human Cell Atlas (HCA) プロジェクトが本格始動し、世界中の研究者が協働してヒト全身の細胞カタログ化に着手。<br>マルチモーダル解析の登場: CITE-seq および REAP-seq 手法が報告され、単一細胞から mRNA と数十種類のタンパク質を同時測定することに成功 (DNA バーコード付き抗体を利用)。単細胞レベルで複数分子を同時に読む新コンセプトが確立。   |
| 2018 年    | 単一細胞エピゲノム解析の普及: クロマチン構造解析の手法 scATAC-seq が整備され、10x Genomics 社からキット発売。免疫細胞の新規サブセット発見など、エピゲノムから細胞機能を理解する研究が活発化。また、中国・浙江大グループがマウス全臓器の細胞アトラスを報告するなど、国際的に大規模データ産出が進む。  |
| 2019 年    | 空間トランスクリプトミクスの社会実装: 10x Genomics 社が組織切片上で遺伝子発現を網羅解析できる Visium キットを発売。同年、マサチューセッツ工科大学からはビーズ上バーコードを用いた Slide-seq 法が発表され、単一細胞レベルの空間解像度で転写地図を取得可能になった。これにより、組織中の空間的遺伝子発現解析が広範な研究者に利用可能となった。  |
| 2020 年    | 技術の認知度向上: 空間トランスクリプトミクスが Nature Methods 誌の“Method of the Year 2020”に選出され、空間オミクス解析への関心が飛躍的に高まる。同年、米 NCI 主導でヒト腫瘍アトラスネットワーク (HTAN) プロジェクトが始動し、がん組織の単細胞解析データ構築がスタート。   |
| 2021 年    | 加速する多領域応用: NIH の老化細胞ネットワーク SenNet 発足。また、単細胞解析と空間解析を組み合わせた研究が盛んになり、臓器発生過程の細胞間クロストークや疾患時の組織変化を統合的に理解する試みが進展。シングルセルマルチオミクス解析も本格化し、プレプリント段階ながら多数の研究が登場。  |
| 2022 年    | 空間オミクスの多様化: 空間的エピゲノム解析の初報告 (Yale 大学による空間ヒストン修飾マッピング、UW による空間 ATAC-seq など)。これらは転写因子結合領域やオープンクロマチン領域を in situ でラベル・切り出しし、位置情報ごとシーケンスする革新的手法で、今後の発展と実用化が期待される。<br>次世代プラットフォーム: 10x Genomics 社が Xenium In Situ システムを発売 (世界初公開は 2022 年 12 月)。1 細胞内の数百遺伝子を 30nm 以下の高い位置分解能で可視化する装置で、日本でも 2023 年に東京大学などが導入。空間分子プロファイリングがより高精度・高 multiplex 化の段階へ進んだ。 |

| 年     | 技術・研究のマイルストーン例  |
|-------|---|
| 2023年 | 技術の高度化と統合: シングルセル長鎖シーケンス(ロングリード技術)の導入が進み、1細胞レベルで転写アイソフォーム(スプライシングバリエーションや融合遺伝子)の解析が可能に。また、AIを活用した大規模シングルセルデータ解析や、空間情報と系譜情報を組み合わせた統合解析など、新たな計算手法・実験手法の開拓が加速している。企業ベースでもより高速・高スループットな装置(例: 10x社 Chromium X)の開発競争が起こり、単細胞解析の産業基盤が一層整備されつつある。 |

### (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-34 キーテクノロジー「個別化・精密医療インフラの構築」

| 名称                                       | 出現時期・背景  | 解説  |
|--|--|---|
| シングルセルトランスクリプトーム解析<br>(単一細胞 RNA シーケンス)   | 出現時期: 2009年に単一細胞 mRNA-Seq が初報。2015年にドロップレット法(Drop-seq/inDrop)で高スループット化、2017年に 10x Genomics の商用化で普及。<br>背景: バルク解析では見えない細胞間不均一性の解明ニーズ、NGS コスト低下・バーコーディング/マイクロフルイディクスの発展、解析法(t-SNE/UMAP や統合法)の整備、細胞アトラス計画の牽引                        | 個々の細胞から転写産物(mRNA)を抽出・増幅し、遺伝子発現プロファイルを取得する技術。細胞集団内の未知または稀少なサブタイプの同定、細胞状態や分化過程の解明に威力を発揮。現在、数万細胞規模の高スループット scRNA-seq が一般化。   |
| シングルセルエピゲノム解析<br>(単一細胞クロマチン・エピジェネティクス解析) | 出現時期: 2013年に ATAC-seq(バルク)、2015年に scATAC-seq、同年に single-cell ChIP-seq、2013年に single-cell Hi-C。2017年以降に商用化(10x Single Cell ATAC, Multiome)。<br>背景: 発現だけでなく転写制御・クロマチン状態の細胞間差異を直接捉える必要性、少量入力を可能にしたトランスポセース法・マイクロフルイディクスの進展、疾患応用の拡大。 | 単一細胞ごとにゲノム上のエピジェネティックな修飾状態(DNA メチル化、ヒストン修飾)やクロマチン構造の解析を行う技術群。例: 一細胞 ATAC-seq で全ゲノムの開染色質領域を測定、また一細胞 ChIP-seq でヒストン修飾を検出、一細胞 Hi-C で立体構造を解析、など。遺伝子発現制御の多様性を細胞毎に明らかにし、細胞機能の制御機構を理解するのが目的。 |
| シングルセルマルチオミクス解析                          | 出現時期: 2017年に転写産物+タンパク同時測定(CITE-seq/REAP-seq)、2019年に同一細胞で転写+クロマチン(SNARE-seq)、2021年に ATAC+タンパク(ASAP-seq)、商用 Multiome が普及。2019年に統合解析フレームワーク(Seurat v3)が一般化。<br>背景: 同一細胞で発現・制御・表現型を接続する必要性、化学・バーコーディング設計の改良と装置化、データ統合/バッチ補正の方法論整備    | 単一の細胞から複数種の分子データを同時取得する解析。典型例は転写産物+タンパク質(二重解析)や、転写産物+クロマチン開閉状態(二重解析)、さらには三重(RNA+タンパク質+エピゲノム)解析まで含む。複数の「オミクス」を統合することで、同一細胞内で遺伝子発現の原因と結果を直接対応付けられる点が強み。                                 |

| 名称                                  | 出現時期・背景  | 解説  |
|-------------------------------------|--|---|
| 空間トランスクリプトミクス解析<br>(空間的単一細胞遺伝子発現解析) | 出現時期: 2016年にスライド上アレイによる空間トランスクリプトミクスが初報、2019年にSlide-seqで高解像度化。2021年Method of the Yearに選定、レビュー。プラットフォーム(Visium, Xenium等)やPIC法などが2020年代に展開。<br>背景: 組織内位置情報と発現を両立させるニーズ、in situ キャプチャ/ハイブリダイゼーション技術の成熟、ヒト組織アトラス計画の推進。 | 生体組織内の各細胞の位置座標と遺伝子発現情報を同時に取得する技術。組織を酵素解離せず切片上で解析するため、細胞間の空間的関係性を保ったまま網羅的転写解析が可能。シーケンスベースの方法(例:Visium)と顕微鏡イメージングベースの方法(例:MERFISHなど)の2系統がある。前者は多数の遺伝子を一度に測れるが空間解像度はスポットサイズ(数細胞~細胞径)程度、後者はサブ細胞解像度まで高められるが一度に測定できる遺伝子数に限りがある。                             |
| 空間マルチオミクス解析<br>(例:空間エピゲノム解析など)      | 出現時期: 2022年に空間CUT&Tag(ヒストン修飾)、2023年にspatial ATACなど空間エピゲノムが登場。レビューで総括。<br>背景: 発現マップに加え制御地図(クロマチン/ヒストン修飾)を空間的に重ねる要請、in situ タグメンテーションや抗体酵素複合体の技術革新により実現  | 空間トランスクリプトミクスをさらに発展させ、遺伝子発現以外の分子情報も位置情報とともに取得する新領域。組織内のクロマチン状態をエピゲノムマーカーごとに可視化できる。手法としては、標的分子(抗体で検出可能な修飾や転写因子結合DNA断片など)にトランスポゾンでバーコードタグを付加し、その場でライブラリ化してシーケンスすることで空間解像度を付与する。   |
| 細胞系譜追跡<br>(Lineage tracing, 系譜樹解析)  | 出現時期: 2010年代半ばにCRISPRバーコーディング系譜追跡が確立(総説)、2019年にヒトでミトコンドリア変異を利用した系譜推定が報告、2024年にがん克服への応用レビュー。<br>背景: 発生や腫瘍内クローン動態の解明ニーズ、ゲノム編集・自然変異・バーコードと単一細胞オミクスの統合解析の進展により高分解能の系譜樹再構成が可能に  | 個々の細胞がどのような祖先細胞に由来し、どの分化経路を辿ったかを系譜樹状に再構成する技術。従来はタイムラプス観察や標識実験が主であったが、近年はゲノム変異や人工バーコードを細胞ごとの「系譜タグ」として利用する。レトロスペクティブ手法では体細胞変異の比較から親子関係を推定し、プロスペクティブ手法ではCRISPR/Casなどでバーコードに刻まれる変異をリアルタイム記録していく。いずれもシングルセル増幅・シーケンス技術と組み合わせ、系譜情報と細胞の分子状態を同時に解析できる点が画期的である。 |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-35 実用化可能性「個別化・精密医療インフラの構築」

| 名称           | 解説   |
|--------------|--|
| 医療・ヘルスケア分野   | 患者由来試料の単一細胞解析が、従来は捉えきれなかった疾患の微細な実態解明につながっている。例えば腫瘍組織を空間トランスクリプトミクスとシングルセル RNA-seq で解析することで、腫瘍内の異種細胞集団やがん微小環境を可視化し、新たな診断バイオマーカー候補や治療標的分子の発見につながる。心疾患や神経変性疾患などでも、発症に関与するごく一部の細胞集団の特性を単細胞レベルで突き止める研究が進んでいる。将来的には、患者検体を単一細胞解析する精密医療(プレジジョン・メディシン)が実現し、個々の腫瘍や難病に合わせた治療法選択や予後予測が可能になると期待される。   |
| 創薬・製薬産業      | 単一細胞解析は創薬プロセスにも革新をもたらしている。製薬企業では、疾患組織やモデル動物から取得した膨大な単細胞データを機械学習で解析し、新規の分子標的や疾患ドライバーを発見する取り組みが進んでいる。特に腫瘍における薬剤耐性の機序について、バーコード系譜追跡とシングルセル RNA-seq を組み合わせた研究により、耐性クローンが治療前から存在する場合と治療後に新生する場合があることが実証された。この知見は薬剤耐性を克服する新たな治療戦略の立案につながる。また創薬標的のオフターゲット効果や安全性評価にも、単一細胞レベルでの副作用標的細胞検出が役立つ可能性がある。さらに製薬企業は 10x Genomics 等の解析プラットフォームと提携し、大規模スクリーニングへの単細胞技術導入を進めており、創薬研究の高速化・高精度化に寄与している。 |
| バイオ生産・食品産業   | バイオ医薬品の細胞培養プロセスや発酵食品の醸造プロセスにおいても、単細胞解析が品質向上に貢献し得る。培養タンク中の細胞集団を一細胞レベルでモニタリングすることで、生産性能のばらつきをもたらすサブクローンの検出や培養条件の最適化フィードバックが可能となる。実際、抗体医薬品生産では高産生クローンを単一細胞で選抜・評価する技術が使われ始めている(単一細胞 PCR で遺伝子挿入状態を確認するなど)。今後、酵母や細菌など発酵微生物についてもシングルセルゲノミクスで有用変異株をスクリーニングしたり、スターター培養中の不均一性を検知したりするなど、食品・醸造分野への波及も期待される。   |
| データ駆動型産業への展開 | 単一細胞オミクスの普及は、バイオインフォマティクス産業やクラウドデータサービスの需要も生み出している。国際プロジェクトで得られた膨大な細胞データは、国際データベース(HCA Data Portal など)で共有され、AI 企業や IT 企業もこれらオープンデータの解析に参入し始めている。今後、解析ソフトウェアや可視化ツールの開発、あるいは医療機関向けのシングルセル解析受託サービスなど、新たなビジネス領域が拡大すると予想される。各国政府・研究機関のレポートもこの潮流を支える政策立案を進めており、日本においても研究投資と人材育成による競争力強化が課題となっている。  |

## (5) 出所

- JST 俯瞰報告書、
- Tang et al. mRNA-Seq whole-transcriptome analysis of a single cell. *Nature Methods* (2009). <https://www.nature.com/articles/nmeth.1315.pdf>
- Macosko et al. Highly Parallel Genome-wide Expression Profiling of Individual Cells Using Nanoliter Droplets (Drop-seq). *Cell* (2015). / Klein et al. Droplet Barcoding for Single-Cell Transcriptomics Applied to Embryonic Stem Cells (inDrop). *Cell* (2015). Drop-seq: [https://www.cell.com/cell/pdf/S0092-8674\(15\)00549-8.pdf](https://www.cell.com/cell/pdf/S0092-8674(15)00549-8.pdf) / inDrop: [https://www.cell.com/cell/pdf/S0092-8674\(15\)00444-4.pdf](https://www.cell.com/cell/pdf/S0092-8674(15)00444-4.pdf)
- Zheng et al. Massively parallel digital transcriptional profiling of single cells. *Nature Communications* (2017). <https://www.nature.com/articles/ncomms14049.pdf>
- Vandereyken et al. Methods and applications for single-cell and spatial multi-omics. *Nature Reviews Genetics* (2023). <https://www.nature.com/articles/s41576-023-00628-7.pdf>
- Stoeckius et al. Simultaneous epitope and transcriptome measurement in single cells (CITE-seq). *Nature Methods* (2017). / Peterson et al. Multiplexed quantification of proteins and transcripts in single cells (REAP-seq). *Nature Biotechnology* (2017). CITE-seq: <https://www.nature.com/articles/nmeth.4380.pdf> / REAP-seq: <https://www.nature.com/articles/nbt.3973.pdf>
- Chen et al. High-throughput sequencing of the transcriptome and chromatin accessibility in the same cell (SNARE-seq). *Nature Biotechnology* (2019). <https://www.nature.com/articles/s41587-019-0290-0.pdf>
- Mimitou et al. Scalable, multimodal profiling of chromatin accessibility, gene expression and protein levels in single cells (ASAP-seq). *Nature Biotechnology* (2021). DOI: 10.1038/s41587-021-00927-2. <https://www.natureasia.com/ja-jp/nbt/39/10/s41587-021-00927-2>
- Stuart et al. Comprehensive Integration of Single-Cell Data. *Cell* (2019). [https://www.cell.com/cell/fulltext/S0092-8674\(19\)30559-8](https://www.cell.com/cell/fulltext/S0092-8674(19)30559-8)
- Larsson et al. Spatially resolved transcriptomics adds a new dimension to genomics. *Nature Methods* (2021). <https://www.nature.com/articles/s41592-020-01038-7.pdf>
- Nature Methods editorial. Method of the Year: spatially resolved transcriptomics. *Nature Methods* (2021). <https://europemc.org/article/MED/33408395>
- 10x Genomics. Visium Spatial Gene Expression. <https://www.10xgenomics.com/products/spatial-gene-expression>
- Kudo et al. High-depth spatial transcriptome analysis by photo-isolation chemistry (PIC). *Nature Communications* (2021). <https://www.nature.com/articles/s41467-021-24691-8.pdf>
- 10x Genomics. Xenium In Situ. <https://www.10xgenomics.com/products/xenium-in-situ>
- Buenrostro et al. Transposition of native chromatin for fast and sensitive epigenomic profiling of open chromatin (ATAC-seq). *Nature Methods* (2013). / Buenrostro et al. Single-cell chromatin accessibility reveals principles of regulatory variation. *Nature* (2015). ATAC-seq: <https://www.nature.com/articles/nmeth.2688.pdf> / scATAC: DOI 10.1038/nature14590
- 10x Genomics. Chromium Single Cell ATAC.
- 10x Genomics. Chromium Next GEM Single Cell Multiome ATAC + Gene Expression.
- Corces et al. Single-cell epigenomic analyses implicate candidate causal variants at inherited risk loci for Alzheimer's and Parkinson's diseases. *Nature Genetics* (2020). <https://www.nature.com/articles/s41588-020-00721-x.pdf>
- Neumeyer et al. Linking regulatory variants to target genes by integrating single-

cell multimodal data and distance. *Nature Genetics* (2025).

<https://www.nature.com/articles/s41588-025-02276-8>

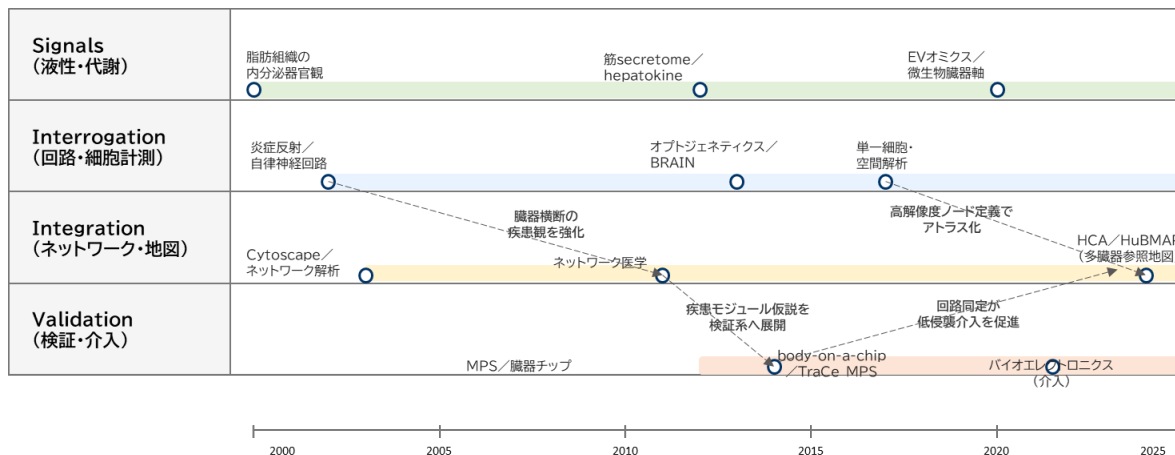
- Deng et al. Spatial-CUT&Tag: Spatially resolved epigenomic profiling of histone modifications in individual cells in tissues. *Science* (2022). / Chen et al. Solid-phase capture and profiling of open chromatin by sequencing (spatial ATAC). *Nature Biotechnology* (2023). Spatial-CUT&Tag: <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.abn5058> / spatial ATAC: <https://www.nature.com/articles/s41587-023-01759-3.pdf>
- Wagner & Klein. Lineage tracing meets single-cell omics: opportunities and challenges. *Nature Reviews Genetics* (2020).
- Lareau et al. Lineage Tracing in Humans Enabled by Mitochondrial Mutations. *Cell* (2019).
- Zhang et al. Single-cell lineage tracing reveals clonal dynamics and new perspectives on cancer therapy. *Genome Medicine* (2024). / Oligo-CALL: Developing an optimized clonal tracking tool in cancer. *Science Advances* (2025). *Genome Medicine*: <https://genomemedicine.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13073-024-01377-8> / *Sci Adv*: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adn9127>
- HuBMAP Consortium. The human body at cellular resolution: the NIH Human Biomolecular Atlas Program. *Nature* (2019). <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1629-x.pdf>
- National Cancer Institute (NCI). Human Tumor Atlas Network (HTAN). <https://www.cancer.gov/research/participate/htan>
- NIH Common Fund. SenNet (Cellular Senescence Network). <https://commonfund.nih.gov/sennet>
- LifeTime Community. LifeTime: toward cell-based interceptive medicine in Europe. *Nature* (2020). <https://www.nature.com/articles/s41586-020-2715-9.pdf>
- JST 戦略的創造研究推進事業(CREST/さきがけ)研究領域情報。CREST 研究領域: [https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research\\_area/index.html](https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/index.html) / さきがけ: <https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/> / (例)細胞内ダイナミクス: [https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research\\_area/ongoing/bunya2020-1.html](https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunya2020-1.html)
- Nature Methods. Development and applications of single-cell transcriptome analysis. (2010). <https://www.nature.com/articles/nmeth.1442.pdf>
- Navin et al. Tumour evolution inferred by single-cell sequencing. *Nature* (2011). <https://www.nature.com/articles/nature09807.pdf>
- Han et al. Mapping the Mouse Cell Atlas by Microwell-Seq. *Cell* (2018).
- Rodriques et al. Slide-seq: A scalable technology for measuring genome-wide expression at high spatial resolution. *Science* (2019). <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.aaw1219>
- Advances in single-cell long-read sequencing technologies. *NAR Genomics and Bioinformatics* (2024). <https://academic.oup.com/nargab/article/6/3/lqae082/7735281>
- 10x Genomics. Chromium X instrument. <https://www.10xgenomics.com/instruments/chromium-x>
- Hwang et al. Single-cell RNA sequencing technologies and bioinformatics pipelines. *Experimental & Molecular Medicine* (2018). <https://www.nature.com/articles/s12276-018-0074-7.pdf>
- van der Maaten & Hinton. Visualizing Data using t-SNE. *Journal of Machine Learning Research* (2008). <https://www.jmlr.org/papers/volume9/vandermaaten08a/vandermaaten08a.pdf>
- McInnes, Healy & Melville. UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension Reduction. *Journal of Open Source Software* (2018). <https://joss.theoj.org/papers/10.21105/joss.00861>
- Rotem et al. Single-cell ChIP-seq reveals cell subpopulations defined by chromatin state. *Nature Biotechnology* (2015). <https://www.nature.com/articles/nbt.3383.pdf>
- Nagano et al. Single-cell Hi-C reveals cell-to-cell variability in chromosome

- structure. *Nature* (2013). <https://www.nature.com/articles/nature12593.pdf>
- Harada et al. Chromatin integration labeling (ChIL-seq). *Nature Cell Biology* (2019). <https://www.nature.com/articles/s41556-019-0445-7.pdf>
  - Ståhl et al. Visualization and analysis of gene expression in tissue sections by spatial transcriptomics. *Science* (2016).  
<https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.aaf2403>
  - 10x Genomics(プレスリリース)Visium HD(High Definition)関連情報(2024).
  - DNA microscopy: Optics-free spatio-genetic imaging by a stand-alone chemical reaction. *Cell* (2019). [https://www.cell.com/cell/fulltext/S0092-8674\(19\)30547-1](https://www.cell.com/cell/fulltext/S0092-8674(19)30547-1)
  - Exploring the untapped potential of single-cell and spatial omics in plant and microbial sciences. *New Phytologist* (2024).  
<https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/nph.19593>
  - scTrends: A living review of commercial single-cell and spatial 'omic technologies. *ScienceDirect* (2024).  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167779924001762>

## 2.2.6 潮流 A6:臓器連関「臓器間ネットワーク解析と介入標的探索」

### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



出所) 点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。※バーは「顕著に発展・活用が進んだ時期」の目安である。

矢印の向き: 影響が及ぶ方向(起点から波及先)を示す。

矢印上のラベル: 影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-7 技術的進歩と方向性の概要図「臓器間ネットワーク解析と介入標的探索」

表 2-36 技術的進歩と方向性(概要)「臓器間ネットワーク解析と介入標的探索」

| 概要 |   |
|----|---|
| ●  | 2000 年代前半:ネットワーク生物学/臨床・疾患ネットワークの萌芽<br>分子相互作用ネットワークと高スループット状態量を統合可視化するツール(2003:Cytoscape)が整備され、ネットワーク生物学への実装基盤が形成された。<br>同時期、神経-免疫連関では炎症反射など「神経による免疫制御」の枠組みが提示され、臓器間協調を神経回路として扱う発想が強化された(2002:炎症反射)。   |
| ●  | 2000 年代後半:回路操作技術の登場と、臓器間制御の実験可能性の拡大<br>2005 年のチャンネルロドプシン 2 を用いた光遺伝学(オプトジェネティクス)は、特定神経集団の時間精度の高い操作を可能にし、臓器-脳回路の機能同定に道を開いた。<br>CRDS は、近年のオプトジェネティクス/in vivo 神経イメージング/逆行性トレーシング等が、迷走神経など求心路の細胞タイプ地図化や回路理解を押し上げている点を整理している。   |
| ●  | 2010 年代前半:ネットワーク医学の枠組み確立と「臓器・組織系をつなぐネットワーク摂動」としての疾患観<br>2011 年のネットワーク医学は、疾患を単一遺伝子ではなく、細胞内外ネットワークの摂動として捉え、疾患モジュール同定・標的探索・疾患分類への応用可能性を整理した。<br>2010 年代後半:単一細胞・空間技術とアトラス構築による「ノード解像度」の飛躍<br>2009 年の単一細胞 mRNA-seq の登場は、単一細胞レベルの高感度トランスクリプトーム解析ニーズに応えた初期里程標である。  |
| ●  | 2016 年の空間トランスクリプトミクスは、組織切片内で空間分解能を保ったトランスクリプトーム解析を可能にする戦略として提示され、診断・研究への価値が明示された。   |
| ●  | 2017 年の Human Cell Atlas 構想は、健康ヒト組織の細胞状態参照地図が生理状態・発生・細胞間相互作用・疾患理解を推進するという方向性を明確化し、以後の多臓器統合解析の基盤構想となった。  |
| ●  | 2020 年代前半:<br>臓器連関の「液性・神経・免疫」統合と、臓器間通信担体(EV、微生物等)の多重化<br>CRDS は、臓器連関を液性・神経・免疫の三位一体として再定義し、液性(臓器由来ホルモン、栄養素・代謝産物、腸内細菌、EV)と神経回路(求心・遠心、自律神経)の双方が急速に深化している点を整理している。<br>併せて、自然免疫記憶(trained immunity)が臓器連関機構に寄与し得る点や、慢性疾患に関わる可能性が議論されている。  |
| ●  | 2020 年代前半~中盤:<br>多臓器検証系(body-on-a-chip)と規制・標準化課題の顕在化<br>GAO(米国会計検査院)は、organ-on-a-chip がヒト細胞を用いて臓器機能を模倣し、次世代として複数 Organ-on-a-Chip(臓器チップ)を連結する body-on-a-chip が臓器間相互作用の評価に向かう一方、ヒト細胞入手、ベンチマーク・検証不足、データ共有、規制不確実性などが普及制約になる点を整理した。<br>MPS(臓器チップ等)は、三次元構造、組織間インターフェース、流体環境、免疫細胞トラフィック、他臓器接続等を統合的に取り込む方向で発展しており、複数の臓器が相互に影響し合う生体内の反応の理解や、薬物動態・薬力学(PK/PD)予測への展開が志向されている。 |

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-37 タイムライン「臓器間ネットワーク解析と介入標的探索」

| 年    | 主な進展やイベント   |
|------|---|
| 2000 | 脂肪組織を endocrine organ とみなすレビューが登場し、「貯蔵器官」から「情報発信器官」への転換点になった。       |
| 2004 | 脂肪組織の内分泌機能が、adipocyte のみならず免疫・間質・神経を含む単位として整理され、組織環境込みで解釈する流れが定着した。 |

| 年    | 主な進展やイベント   |
|------|---|
| 2008 | muscle as an endocrine organ / IL-6 myokine の整理により、運動を全身性 perturbation とみなす枠組みが強まった。  |
| 2012 | skeletal muscle secretome の概念が成熟し、同時に NIH 系では tissue chip program が本格化して human-relevant モデル開発が始動した。   |
| 2013 | BRAIN Initiative 発足。高分解能 recording / modulation の国家的投資が brain-body circuit 研究の追い風となった。  |
| 2014 | FGF21 が hepatokine / adipokine / myokine をまたぐ多機能因子として整理され、単一臓器起源で完結しない signaling の理解が進んだ。   |
| 2016 | spatial transcriptomics 論文と Human Cell Atlas 発足。細胞状態と位置情報を統合する現在の基盤がここで揃った。   |
| 2018 | Tabula Muris が 20 organs の単一細胞比較を提示し、臓器横断の cell state 解析が標準研究課題になった。  |
| 2019 | neuroimmune circuits in inter-organ communication が、神経-免疫相互作用を臓器連関の中核概念として定着させた。  |
| 2020 | Clinical Trials on a Chip が開始され、MPS は疾患再現から患者応答予測・臨床試験設計支援へ踏み込んだ。   |
| 2021 | COVID-19 の systemic / organ-specific manifestations の整理が進み、multi-organ disease を network failure とみる視点が臨床側でも強化された。  |
| 2024 | T2D を inter-organ crosstalk の失調として捉える総説と、MoTrPAC による 19 tissues multi-omics が登場し、因果仮説生成の基盤データが厚くなった。<br>HCA first draft が公開され、multi-organ atlas が「構想」から「利用可能な参照資源」へ移行した。<br>TraCe MPS が立ち上がり、MPS の qualification / context-of-use を前提にした規制接続が明確になった。  |
| 2025 | HuBMAP 3D HRA v2.0 が、解剖学構造・細胞型・バイオマーカーを結ぶ共通座標系として提示された。<br>neuroimmune connectome と gut-brain neuroepithelial signalling が、barrier organ・microbiota・神経回路を同一モデル内で扱う潮流を加速させた。<br>Nicheformer が、100 million cell 級の単一細胞/空間 omics を学習した foundation model として登場し、spatial context 予測を実装した。<br>FDA が animal testing requirement の段階的縮小方針を示し、MPS / organoid / AI toxicology の実用化期待が上昇した。<br>brain-body circuits 向け multifunctional bioelectronics が整理され、長期閉ループ介入の研究テーマが具体化した。 |

### (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-38 キーテクノロジー「臓器間ネットワーク解析と介入標的探索」

| 名称      | 定義・出現時期・背景  | 主要な技術ギャップ   |
|---------|---|---|
| EV オミクス | 体液中の細胞外小胞(EV)を分離・同定し、cargo(RNA/タンパク/脂質等)を網羅解析して臓器間通信(液性シグナルの複合パッケージ)をネットワーク化。バイオマーカー/標的/搬送体を同一枠組みで扱う。2014/2018:MISEVで最小報告要件を整備、2023:MISEV2023で分離・特性解析・報告が厳格化された | 分離・定量・命名が揺れると多施設で再現性が崩れ、診断性能の外部検証や治療用EVのCMC(品質保証)に直結して失敗する。Cargoについては機能の因果性が弱いと、標的探索が相関止まりとなり介入設計に落ちない。 |

| 名称                 | 定義・出現時期・背景  | 主要な技術ギャップ  |
|--------------------|---|--|
| MPS/body-on-a-chip | ヒト細胞で臓器機能を模倣する microphysiological systems (Organ-on-a-Chip)。multi-organ 連結 (body-on-a-chip) で代謝・二次毒性・免疫循環など臓器間効果を in vitro で再現し、薬効・安全性・機序推定に接続。<br>2010: Huh ら lung-on-a-chip が転換点 / 2025: GAO が利点・課題・政策オプションを技術評価した。 | 用途定義 (context of use) と validation が不足すると、複雑化ほど再現性・QC が崩れ、規制・顧客監査・社内 Go/No-Go 判断に使えない。細胞ソース品質と多臓器連結の基準化が実装の律速。       |
| 空間トランスクリプトミクス      | 組織内座標を保持して転写物を計測し、細胞配置・ニッチ・細胞間通信を空間ネットワークとして復元 (病理×分子の橋渡し)。臓器間ネットワークのノード (細胞状態) に“局在文脈”を付与する。<br>2016: Ståhl らが Spatial Transcriptomics を提示 (Science) / 2021: 空間解析が “Method of the Year 2020” として成熟段階に                | 前処理差 (固定・切片等) と解析差 (セグメンテーション・deconvolution 等) が大きいと、多施設で再現性が崩れ臨床性能が不安定になる。解像度×感度×コストのトレードオフ下で、標的同一を検証可能仮説に落とす設計が課題。 |
| オプトジェネティクス         | 光感受性タンパク質 (ChR2 等) を導入し、特定細胞の活動をミリ秒精度で操作。臓器—脳—臓器の回路ノードを因果同定でき、介入標的 (回路) 探索の実験基盤となる。<br>2005: Boyden らが ChR2 で神経活動の高速光操作を実証 (Nature Neurosci)  | ヒト実装は遺伝子導入と光デリバリの侵襲・安全性が障壁。産業的価値は“回路同定知見を低侵襲介入 (電気刺激等) へ翻訳できるか”に移り、翻訳不能だと発見が治療に接続しない。                                |
| 炎症反射/バイオエレクトロニクス   | 迷走神経などの自律神経回路を介して免疫・炎症を調律する概念 (炎症反射) と、それを電気刺激等で介入する医療 (bioelectronic medicine)。薬剤と異なる “回路型介入” として位置づく。<br>2002: Tracey が炎症反射を整理 / 2022: bioelectronic medicine の前臨床～臨床翻訳を体系整理  | 効果が刺激条件 (部位・線維・パラメータ) と個体差に依存しやすく、最適化が弱いと再現性が崩れ償還・適応拡大が進まない。長期介入では神経可塑性・免疫再配線が起こり得て、短期有効性だけでは不十分。                    |
| ネットワーク医学           | 疾患を単一因子でなくネットワーク摂動として捉え、疾患モジュール同定・併存症構造・ネットワーク近接性等から標的・バイオマーカー・リポジショニングを導く解析枠組み (臓器間ネットワークの理論)。<br>2011: Barabási らがネットワーク医学を体系化 (Nat Rev Genet)  | interactome の欠損・偏りやデータ統合バイアスにより再現性が崩れると、産業の標的優先順位付けに使えない。説明可能性と検証ループ (MR/MPS/介入試験) が弱いと“机上の相関”で止まる。                  |
| 単一細胞トランスクリプトーム     | 単一細胞の RNA を網羅測定し、細胞種・状態・遷移・相互作用を推定。臓器間ネットワークのノード (免疫・神経・内分泌の細胞状態) を高解像度化し、標的粒度を最適化する。<br>2009: Tang らが single-cell mRNA-seq を提示 (Nat Methods)   | バッチ効果・試料偏りが残ると結論が揺れ、標的選定や製造 QC に使えない。単一時点データのみでは原因/結果の切り分けが難しく、候補が“絞れない”問題が生じる。                                      |
| マイクロバイーム×臓器軸       | 腸内細菌叢が代謝産物・免疫・迷走神経等を介して脳/肝/免疫などと双方向に連関する“臓器軸”をネットワーク化し、介入点 (食・菌叢・代謝物) を抽出する枠組み。<br>2020 (online): Nat Rev Microbiol が腸内細菌—脳軸の多系統連関を統合レビュー   | 相関研究が先行すると再現性が揺れ、介入 (食品/治療) の成功確率が下がる。機序 (代謝物・受容体・免疫経路) とレスポンス層別化が弱いと臨床試験が不安定になりスケールしない。                             |

| 名称                       | 定義・出現時期・背景  | 主要な技術ギャップ   |
|--------------------------|---|---|
| 因果推論/MR (drug-target MR) | 遺伝変異を自然実験として用い、標的介入の因果性・適応集団・副作用方向を推定する cis-MR (drug-target MR)。ネットワーク解析由来候補の“事前ふるい分け”で開発失敗を減らす。<br>2020: Schmidt らが drug-target MR の数理枠組みと頑健性/限界を整理 (Nat Commun) | 多面発現・LD・組織特異性 (eQTL/pQTL 差) で誤推論が起こると投資判断を誤る。統計的因果を介入設計へ翻訳するには、反証可能性 (別データ整合・機能検証) 確保が必須。 |
| 統合シミュレーション               | 細胞内反応 (代謝・シグナル・遺伝子制御) を統合モデル化し、化学的/遺伝的介入に対する細胞機能応答を計算予測。条件探索を高速化し、試行錯誤を削減して介入設計へ接続する。<br>2026年2月に、JST/CRDS が「細胞内反応の計算予測」を提案。                                      | マルチスケール接続と不確かさ (適用範囲) が未整理だと誤予測コストが許容されず現場導入されない。摂動データ不足はモデル検証を阻害し、再現性・監査可能性が弱い。          |
| 食・栄養の動的ネットワーク            | 食・栄養入力 that 代謝恒常性・疾患リスクを動的に変える機序を分子～個体～社会で統合し、科学的介入 (予防・先制) を設計する枠組み (臓器連関を“可変入力”で制御)<br>2025-03: JST CRDS が「次世代型食・栄養研究」を戦略提案 (動的ネットワーク、RWD 等の柱立て)                | 摂取量評価・遵守・背景食の揺れで効果推定が不安定になり、表示・償還・医療連携に必要なエビデンス強度を満たしにくい。層別化が弱いと平均効果が小さく見える。              |
| ヒト細胞アトラス                 | 多臓器の細胞タイプ・状態・相互作用を参照地図化し、正常の“座標系”を提供。疾患を細胞エコシステムの偏位として捉え、標的細胞同定・層別化・バイオマーカー設計へ接続する。<br>2016: HCA コンソーシアム設立 / 2024-11: first draft atlas に向けた成果コレクション公表            | 集団多様性・採取条件の偏り、注釈 (cell type) 揺れがあると一般化が損なわれ、臨床層別化や企業の標的探索で誤差が増える。二次利用ガバナンス不備は産学連携を阻害。     |
| 公的統合データ基盤                | 異種データ (分子・細胞・回路・表現型等) を共通メタデータ・API で連結し、横断検索・再解析・AI 解析・監査可能性を担保する“知識ベース/データコモンズ”。<br>2025-11: NIH BRAIN Roadmap が「BRAIN Knowledgebase (統合・連合型システム)」を明示            | 標準不統一とサイロ化は統合コストを増大させ、再現性・共同研究・規制提出を阻害する。持続運用 (資金・責任分界) とプライバシー/主権ガバナンスが弱いと基盤が定着しない。      |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-39 実用化可能性「臓器間ネットワーク解析と介入標的探索」

| セクター                     | ユースケースや波及が期待される産業領域  |
|--------------------------|--|
| 臨床層別化バイオマーカー             | 採血ベースで network state を推定し、治験組入れ、薬剤・運動・栄養介入の responder 判定、再発・進行リスク管理へ展開する。初期事業モデルは LDT/IVD、CDx、解析サービス。              |
| MPS / organ-on-chip 受託評価 | 有効性・毒性・患者群差の human-relevant 評価。全面的な動物代替より、候補順位付け、de-risking、bridge study、規制対話用データで導入しやすい。CRO、装置、材料、データパッケージが初期収益源。 |

| セクター                        | ユースケースや波及が期待される産業領域  |
|-----------------------------|--|
| 機能性食品 / precision nutrition | 運動・食事・microbiome 応答差を multi-omics で捉え、probiotic / postbiotic と食事介入を層別化するアプローチ。バイオマーカーと継続モニタリングを組み合わせたサービスへの展開が想定される。 |
| 精密 neuromodulation          | 炎症・消化管運動・代謝調節・リハビリ等で、線維選択的刺激と 閉ループ制御を実装する。装置単体より、responder 判定マーカーとソフトウェアを束ねたソリューションが想定される。                           |
| network medicine 設計基盤       | 薬剤・機器・栄養・行動介入を横断し、患者ごとに介入の順序・組合せを最適化する。単品より、R&D 支援、試験設計、意思決定支援、コンパニオン解析のプラットフォーム化サービスへの展開が想定されている。                   |

## (5) 出所

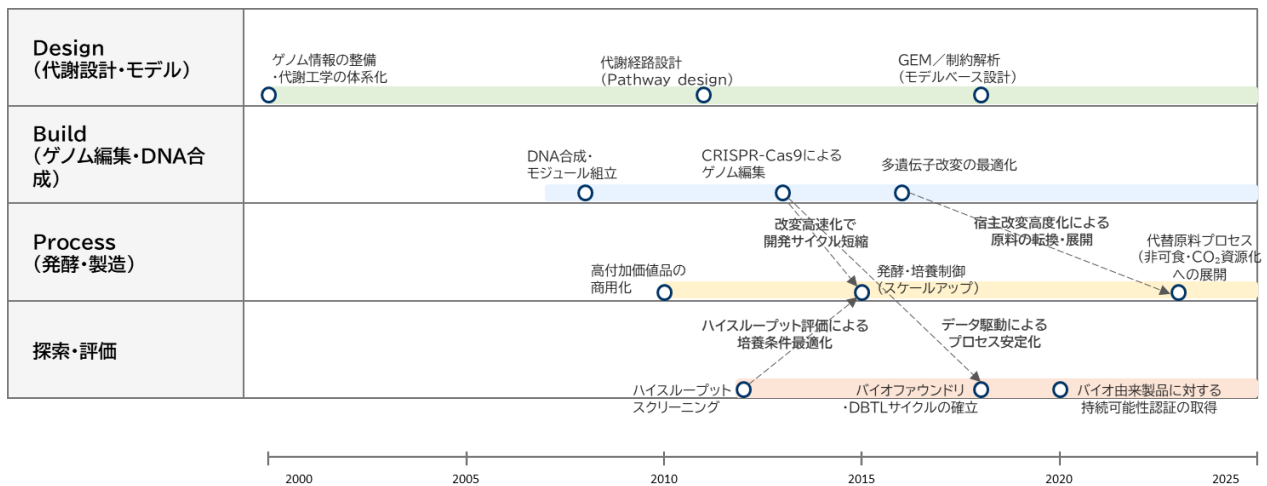
- JST 研究開発戦略センター(CRDS)「ライフサイエンス・臨床医学分野～領域別動向編～ L1.12 臓器連関(CRDS-FR-L112-202512)」(2025年12月更新)  
<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/CRDS-FR-L/CRDS-FR-L112-202512.pdf>
- JST 研究開発戦略センター(CRDS)「研究開発の俯瞰報告書 ライフサイエンス・臨床医学分野(2026年)(CRDS-FY2025-FR-07)」(2026年1月)  
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2025-FR-07.html>
- JST 研究開発戦略センター(CRDS)「戦略プロポーザル:細胞内反応の計算予測(CRDS-FY2025-SP-05)」(2026年2月) <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2025-SP-05.html>
- JST 研究開発戦略センター(CRDS)「戦略プロポーザル:次世代型食・栄養研究(CRDS-FY2024-SP-03)」(March 2025/PDF) <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/SP/CRDS-FY2024-SP-03.pdf>
- Barabási A-L, Gulbahce N, Loscalzo J. “Network medicine: a network-based approach to human disease.” *Nature Reviews Genetics* (2011)  
<https://www.nature.com/articles/nrg2918>
- Shannon P, Markiel A, Ozier O, et al. “Cytoscape: A Software Environment for Integrated Models of Biomolecular Interaction Networks.” *Genome Research* (2003) <https://genome.cshlp.org/content/13/11/2498.full.pdf>
- Boyden ES, Zhang F, Bamberg E, Nagel G, Deisseroth K. “Millisecond-timescale, genetically targeted optical control of neural activity.” *Nature Neuroscience* (2005) <https://www.nature.com/articles/nn1525>
- Tang F, Barbacioru C, Wang Y, et al. “mRNA-Seq whole-transcriptome analysis of a single cell.” *Nature Methods* (2009)  
<https://www.nature.com/articles/nmeth.1315>
- Ståhl PL, Salmén F, Vickovic S, et al. “Visualization and analysis of gene expression in tissue sections by spatial transcriptomics.” *Science* (2016)(書誌・抄録)  
<https://portal.research.lu.se/en/publications/visualization-and-analysis-of-gene-expression-in-tissue-sections/>
- Regev A, Teichmann SA, et al. “The Human Cell Atlas” (bioRxiv preprint, 2017)  
<https://cbdm.hms.harvard.edu/assets/Publications/2017pub/121202.full.pdf>
- NIH BRAIN Initiative. “BRAIN Initiative Report: Research Roadmap” (PDF, 2025-11) [https://braininitiative.nih.gov/sites/default/files/2025-11/BRAIN%20Initiative%20Report\\_508c.pdf](https://braininitiative.nih.gov/sites/default/files/2025-11/BRAIN%20Initiative%20Report_508c.pdf)
- U.S. Government Accountability Office (GAO). “Human Organ-on-a-Chip: Technologies Offer Benefits Over Animal Testing but Challenges Limit Wider Adoption” (GAO-25-107335, May 2025)  
<https://www.gao.gov/assets/880/878256.pdf>
- Roth A, MPS-WS Berlin 2019. “Human microphysiological systems for drug development.” *Science* (2021)(FDA サイト配布 PDF)  
<https://www.fda.gov/media/152314/download>
- Tracey KJ. “The inflammatory reflex.” *Nature* (2002)  
<https://www.nature.com/articles/nature01321>

- Nature Reviews Rheumatology. “Rheumatoid arthritis: Vagus nerve stimulation reduces RA severity in patients.” (PDF, 2016)  
<https://www.nature.com/articles/nrrheum.2016.126.pdf>
- (関連一次論文:Koopman FA, et al. PNAS 2016. doi:10.1073/pnas.1605635113)
- Journals of Physiology (Physiological Reviews). “The Microbiota-Gut-Brain Axis” (PDF) <https://journals.physiology.org/doi/pdf/10.1152/physrev.00018.2018>
- Science. Netea MG, et al. “Trained immunity: A program of innate immune memory in health and disease.” (PDF)  
<https://www.science.org/doi/epdf/10.1126/science.aaf1098>
- Nature Reviews Immunology. “Defining trained immunity and its role in health and disease.” (PDF) <https://www.nature.com/articles/s41577-020-0285-6.pdf>
- Science. “The biology, function, and biomedical applications of exosomes.” (PDF) <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.aau6977>
- American Journal of Human Genetics (AJHG). “Using genetic association data to guide drug discovery and development: Mendelian randomization …” (2022)  
<https://www.cell.com/ajhg/fulltext/S0002-9297%2822%2900551-1>

## 2.2.7 潮流 A7:微生物ものづくり「微生物細胞工場による持続可能なバイオ生産」

### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



※バーは「顕著に発展・活用が進んだ時期」の目安である。C1:大気中CO<sub>2</sub>の資源化、GEM:Genetically Engineered Machine(遺伝子工学的に設計された機械)

出所)点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き:影響が及ぶ方向(起点から波及先)を示す。  
 矢印上のラベル:影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-8 技術的進歩と方向性の概要図「微生物細胞工場による持続可能なバイオ生産」

表 2-40 技術的進歩と方向性(概要)「微生物細胞工場による持続可能なバイオ生産」

| 概要 |   |
|----|---|
| ●  | <p><b>微生物生産の再定義(伝統的活用から石油代替へ)</b><br/>微生物は発酵食品や抗生物質の生産で活用されてきたが、近年は石油化学製品を微生物で生産する研究開発が世界的競争になっている。常温常圧で進むプロセスはエネルギー消費が小さく、有害化学薬品の削減にもつながるため、環境負荷低減の観点からも重要性が増している。</p>   |
| ●  | <p><b>バイオエコノミーの台頭</b><br/>国連 SDGs 採択やパリ協定を受け、各国はバイオエコノミー戦略を通じて気候変動・食料課題と経済成長の両立を狙っている。OECD は 2030 年にバイオ産業が加盟国 GDP の 2.7%(1.6 兆ドル)規模に達し、そのうち 39%を微生物等によるインダストリアルバイオが占めると見込んだ。米国では 2022 年に国家イニシアチブが発足し、バイオ製造能力や人材育成を含む官民投資が国家戦略として進展している。</p>   |
| ●  | <p><b>ゲノム解読と合成技術の発展(2000 年代以降、2010~)</b><br/>2000 年代以降、次世代シーケンサーの登場でゲノム解析コストが大きく下がり、遺伝情報や発現・代謝データが蓄積された。DNA 合成技術も進み、長鎖 DNA の人工合成が可能となった結果、2010 年には世界初の合成ゲノム細菌の創出が報告され、合成生物学の基盤が整備された。これにより、代謝経路を再設計して従来は作れなかった物質や人工分子を微生物に生産させる道が開かれた。</p>  |
| ●  | <p><b>遺伝子工学ツールの高度化(2018~)</b><br/>従来のランダム変異と選抜中心の育種から、分子生物学的手法による精密な遺伝子操作へと移行した。とりわけゲノム編集の普及は決定的であり、2020 年ノーベル化学賞の対象となった技術群に象徴されるように、高速・高精度の改変が可能になった。さらにプロモーター等の遺伝子パーツの整備や発現制御ツールの拡充が進み、細胞内に新規経路や回路を実装できるようになった。加えて、酵素分子は指向性進化(2018 年ノーベル化学賞)により高性能化が進み、難反応の生触媒化が加速している。</p>   |
| ●  | <p><b>DBTL によるデジタル融合と自動化の開発加速(2016~)</b><br/>バイオインフォマティクスや機械学習の導入により、オミクス解析や経路設計・予測が高度化し、データ駆動で育種を回す DBTL(Design-Build-Test-Learn)が体系化された。米国企業は自動化プラットフォームで大量の改変試行を行い事業化を進めている。日本でも 2016~の NEDO プロジェクトで DBTL 基盤構築が進み、2020 年にはアジア初の統合型バイオファウンドリ企業が創出された。ラボオートメーションは世界的潮流となり、実験スループットと再現性の向上に寄与している。</p>  |
| ●  | <p><b>発酵プロセスのスケールアップと資源循環(2020~)</b><br/>発酵プロセスはセンシングや制御の進展により最適化が進み、AI のフィードバック制御なども試みられている。原料面では食料由来糖質から非可食バイオマスや CO<sub>2</sub>等へ転換が進む一方、セルロース系エタノールでは課題も残り、例えばクラリアント社のプラントは酵素生産面の課題を背景に 2023 年に閉鎖された。ガス発酵では、製鉄所排ガス中の CO/CO<sub>2</sub>を利用し年間 31 万トン規模のエタノール生産を実現する例も示されている。さらに精密発酵による代替タンパク質・油脂など新領域が立ち上がり、2022 年には動物非由来ミルク製品の発売例も現れ、微生物ものづくりは化学・エネルギー・医療・食料へ波及しつつある。</p> |
| ●  | <p><b>社会受容性と規制への対応</b><br/>遺伝子組換え技術やゲノム編集技術を利用した生産プロセスに対する社会の受容性と規制の整備が重要課題となっている。遺伝子組換え作物やゲノム編集食品の事例ではその安全性や倫理面への社会的関心が高い。また環境面では、バイオ由来製品に対する持続可能性認証の取得が市場での付加価値に直結しつつある。</p>  |

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-41 タイムライン「微生物細胞工場による持続可能なバイオ生産」

| 年        | 技術・研究のマイルストーン例   |
|----------|--|
| 1990年代以前 | 微生物によるアミノ酸・抗生物質など発酵生産が確立した。変異誘発と選抜による育種が中心である。遺伝子組換え技術が1980年代から実用化した(インスリン生産など)。   |
| 2000     | ヒトゲノムが解読完了しゲノム解析技術が飛躍的に発展する。微生物ゲノム解析も加速し、膨大な生物データが蓄積される。   |
| 2003     | 米エイミス社と UC バークレーの研究により、マラリア治療薬アルテミシニン前駆体を酵母で生産する合成生物学プロジェクトが開始される(2013年に商用化された)。   |
| 2005     | 次世代シーケンサーが実用化された。DNA 配列を読むコストが急速に低下し、微生物代謝経路の網羅的解析(システム生物学)が可能になる。   |
| 2008     | MIT などが iGEM(Genetically Engineered Machine)コンテストを開始(2004年)して以降、標準化遺伝子パーツを用いた回路設計が普及したタイミングで、J.クレイグ・ベンターらが最小ゲノム合成に成功したと発表。                     |
| 2010     | J.クレイグ・ベンター研究所が合成ゲノムを持つ細菌(マイコプラズマ)の創製を発表した。以降、ゲノム合成・改変の大規模化が進展する。  |
| 2012     | CRISPR-Cas9によるゲノム編集技術が発見される。翌年には真核生物や微生物への適用が報告され、狙った遺伝子改変が飛躍的に容易になる。以降、微生物株の開発に迅速導入されるようになる。  |
| 2013     | サノフィ社が遺伝子組換え酵母由来の半合成アルテミシニン量産を開始。合成生物学による医薬品生産の初の商業化成功例となり、従来からの植物由来原料の供給不安解消に貢献した。  |
| 2016     | 日本で NEDO「スマートセルプロジェクト」が始動(~2020年)。計算科学と実験の融合による微生物高機能化プラットフォーム構築に着手。米エネルギー省は Agile BioFoundry を発足(2016年)し、自動化菌株開発基盤を整備した。                      |
| 2018     | 酵素工学の指向性進化を開発した F.アーノルド博士にノーベル化学賞(酵素の進化的改良が産業生産にもたらす革新性が評価)。産業界ではバイオ燃料からバイオ化学品への展開が進む。   |
| 2019     | 日本政府が「バイオ戦略 2019」策定。2030年までに世界最先端のバイオエコノミー社会実現を目標とし、バイオものづくり分野(バイオ由来製造技術)を重点領域に位置付け。欧州委もバイオエコノミー戦略を強化し、研究資金を投入。                                |
| 2020     | 新型コロナウイルス流行に伴い mRNA ワクチンが実用化され、バイオ生産技術の社会的重要性が認知される。日本ではバツカス社(神戸大発ベンチャー)がアジア初の統合バイオファウンドリ事業を開始。  |
| 2022     | 米国でバイデン大統領がバイオ製造イニシアチブを発足し、バイオ生産技術の国内回帰と投資を推進。同年、微生物発酵で作った乳タンパク質を用いる世界初の動物フリー牛乳が市場に出た(Perfect Day 社)。さらに排ガス発酵プラントが中国・欧州で稼働を開始。                 |
| 2023     | 中国でセルロース系エタノール商業プラントが稼働(Clariant 社、ルーマニア)も、酵素の効率の課題から停止している。一方、フィンランド発の CO <sub>2</sub> 由来シングルセルプロテイン食品が各国で認可を取得。欧米中によるバイオものづくり関連スタートアップ投資が過熱。 |
| 2024     | 合成生物学と AI の融合深化により、分子設計の自動化・高性能化が加速すると予想されている。日本は「バイオエコノミー戦略」(2024 改訂)に基づき産官学で大型プロジェクトが推進中である。2050年カーボンニュートラル実現に向け、微生物ものづくりが基盤技術として位置づけられている。  |

### (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-42 キーテクノロジー「微生物細胞工場による持続可能なバイオ生産」

| 名称               | 出現時期・背景   | 解説   |
|------------------|---|--|
| 次世代シーケンサー        | 出現時期: 2005~2008 年に実用化 (454→Solexa/Illumina)。2010 年代にコストが桁違いに低下し普及。<br>背景: サンガー法から大規模並列化へ。コスト低下がゲノミクス・臨床・産業応用を加速。                              | 大量の DNA 塩基配列を高速・低コストに読み取る装置。<br>ゲノム解析の飛躍的加速をもたらし、2000 年比で解析コストを 100 万分の 1 以下に低減。現在も読み取り長の延伸やさらなるコスト低下が課題だが、個々の微生物や環境サンプルの全ゲノム解読を日常化させ、データ駆動型の株改良に不可欠な基盤となっている。                         |
| DNA 合成(遺伝子合成)    | 出現時期: 化学的オリゴ合成は 1970 年代、遺伝子合成の産業化は 2000 年代。Gibson アセンブリ(2009)と合成ゲノム(2010)が画期。<br>背景: 長鎖化・低コスト化とアセンブリ法の進歩で de novo 設計・合成が現実化。合成生物学やゲノム書換えの基盤に。 | 人工的に DNA 配列を化学合成・組み立てる技術。<br>遺伝子の合成コストは 2000 年比で 1/1000 に低下し、現在では数万塩基の合成 DNA を入手可能となっている。現在はエラー率低減や全ゲノム合成規模への拡大が課題。将来はオンデマンドで任意の遺伝子回路や最適化遺伝子を設計・合成し、改変微生物へ組み込む体制(バイオプリンティング)の確立が期待される。 |
| 合成生物学            | 出現時期: 2000 年に遺伝回路(トグルスイッチ/リプレッシレータ)が示され学術分野が形成、2004 年以降にコミュニティ拡大。<br>背景: 設計・構築・試験・学習(DBTL)の工学原則・標準化・DNA 合成・自動化の発展で学術・産業応用が進展。                 | 生物システムを工学の設計・構築の対象とする学際分野。<br>標準化部品の利用や計算機設計を特徴とする。課題は、複雑系での予測困難性や安全性・倫理面の検討。今後、生物をプログラミング可能な「バイオ回路」とみなし、細胞をソフトウェア同様に設計・改造する技術基盤の確立が重要であるとの指摘がある。                                      |
| ゲノム編集 (CRISPR 等) | 出現時期: 2012 年に CRISPR-Cas9 による汎用ゲノム編集が実証、2013 年に哺乳類細胞で確立。2020 年にノーベル化学賞。<br>背景: シンプルで高効率・高汎用な編集法として ZFN/TALEN から急速に置換、医療・農業・産業で広範に採用。          | ゲノム DNA 上の標的配列を切断・改変する技術。<br>課題はオフターゲット編集など安全性と、真核での送達効率。今後、高精度な塩基編集・エピゲノム編集への発展や、より多様な酵素(Cas12, Cas13 など)の活用で、微生物から植物・動物細胞まで自在に遺伝情報を書き換える技術基盤になることが想定される。                             |
| 代謝工学             | 出現時期: 1990 年代初頭に分野名が提唱(1991)。2000 年代にゲノムスケール化、2010 年代に産業応用拡大。<br>背景: 細胞の代謝経路を系統的に再設計し化学品・素材・燃料を生産。バイオエコノミー・脱炭素の潮流が追い風。                        | 微生物の代謝経路を改造して有用物質を生産させる技術分野。<br>古くからアミノ酸発酵等に活用されたが、合成生物学の台頭で再興。現在はゲノムスケールで経路を導入・最適化できるが、副産物抑制や代謝バランス維持が課題。今後はシステム生物学的解析で全体最適化し、動的制御回路を組み込むことでリアルタイムで代謝フラックスを調節する「スマート代謝経路」の実現が期待される。   |
| 指向性進化            | 出現時期: 1990 年代に方法論が確立 (DNA シャッフリング等)、2018 年にノーベル化学賞で確立性が再確認。<br>背景: 変異導入と選択の反復で酵素・タンパク質機能を進化。グリーンケミストリーや産業酵素開発の基盤技術。                           | 試験管内で酵素や微生物に突然変異を蓄積し、有用な変異体を選抜することで機能を向上させる技術。酵素の基質範囲拡大や耐熱化などに威力を発揮。現在はハイスループットスクリーニング技術との組み合わせが課題。将来はマイクロ流体デバイス上で自動進化と選別を繰り返すプラットフォームが構築され、新規酵素開発のスピードが飛躍的に上がる展望である。                  |

| 名称              | 出現時期・背景  | 解説   |
|-----------------|--|--|
| バイオファウン<br>ドリ   | 出現時期: 2010 年代半ばに研究・公共<br>ファウンドリが相次ぎ設立、2019 年に<br>国際連携(Global Biofoundries<br>Alliance)が可視化。<br>背景: ロボティクスと情報基盤で DBTL<br>を自動化・高スループット化し、設計か<br>ら試作までのスピードと再現性を向上。 | 微生物株開発の設計・実験を一括して高速実行<br>する自動化施設。合成 DNA 投入からクローニ<br>ング、培養、解析までロボットと情報システムが担<br>う。課題は、初期投資と運用コストに加え、熟練者<br>による実験との成果に差があることである。<br>今後は、要素技術の安価化とクラウド化により、<br>中小企業や大学でも利用可能なサービス化が進<br>むこと。半導体産業の Fab のように、広範なニ<br>ーズに応えるバイオ開発受託インフラへ成長すると<br>期待される。 |
| AI による設計<br>支援  | 出現時期: 2010 年代後半に機械学習が<br>実用域に到達、2021 年に AlphaFold2<br>が構造予測を大幅に前進。代謝経路設<br>計への深層学習応用も 2020 年代に拡<br>大。<br>背景: タンパク質構造予測・酵素/経路<br>設計・設計空間探索などで DBTL の設<br>計・学習を加速。 | 人工知能を用いて酵素や経路の設計を行う新潮<br>流。AlphaFold2 の登場でタンパク質構造予測が<br>精密化し、酵素活性予測や創薬標的探索が行え<br>るようになった。データ不足やブラックボックス<br>性が課題であるが、将来は実験データを継続的<br>に学習する自己改良型 AI が実現し、新物質生産<br>経路の提案から最適株の設計まで AI が担う自律<br>型バイオエンジニアリングが可能になることが期<br>待されている。                      |
| Xeno バイオロ<br>ジー | 出現時期: 2012 年に XNA(非天然型核<br>酸)で遺伝情報の継承・進化が実証、<br>2014 年に非天然塩基対を保持する半<br>合成生物が確立。<br>背景: 生命の化学的多様性を拡張し、<br>遺伝的隔離・新機能創出・バイオセーフ<br>ティ観点で研究が進展。                       | 自然界に存在しない生化学を組み込む先端分<br>野。非天然型塩基対や拡張遺伝暗号を生物に導<br>入し、新規アミノ酸やポリマーを生産させる。現<br>状では基礎研究段階であり、生存競争力や安全<br>性に課題がある。<br>今後、標準生物とは交配しない隔離された遺伝<br>系として実用化されれば、漏出リスク低減と未知<br>材料生産の両立が期待できる。  |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-43 実用化可能性「微生物細胞工場による持続可能なバイオ生産」

| 名称         | 解説  |
|------------|---|
| 基幹化学品・燃料分野 | エタノール、有機酸、プラスチック原料などのバルク化学品を微生物発酵で生産する商用化が進み、石油代替の選択肢となっている。ランザテック社は製鉄所由来 CO 等の排ガスから年間数十万トン規模のエタノール量産を達成し、燃料・溶剤のカーボンニュートラル化を支える技術として期待される。乳酸由来のポリ乳酸(PLA)や PHA 等の生分解性プラスチックも実用化が進み、温和条件での製造と CO <sub>2</sub> 排出削減効果から化学産業への波及が大きい。 |
| 医薬・バイオ医療分野 | 微生物ものづくりは医薬品製造の基盤であり、微生物は抗生物質に加え、インスリン等のタンパク質医薬品の大量生産基盤として定着している。合成生物学により、抗マラリア薬アルテミシニン前駆体を酵母発酵で生産し、植物栽培依存を低減し供給安定化を実現した例もある。今後は新規抗生物質や治療用プロバイオティクスの開発が見込まれ、原料サプライチェーン強靱化の観点から各国の支援も強まっている。                                       |
| 食品・農業分野    | 伝統発酵に加え、精密発酵で乳タンパク質など動物性タンパクを微生物が産生する技術や、単細胞タンパク食品が拡大している。米国では微生物由来乳タンパク質を用いた製品が市場に出始め、培養肉向け増殖因子の供給にも活用される。農業では窒素固定菌製剤や共生菌を用いたバイオ肥料・バイオ農薬が進展し、持続可能性と食料安全保障の観点から新市場を形成しつつある。   |
| 環境・エネルギー分野 | バイオ燃料は既に市場があり、第二世代では廃棄バイオマスや藻類、工業排ガス由来 CO <sub>2</sub> の利用まで対象が広がっている。CO <sub>2</sub> 資源化(C1 バイオ)や油・プラスチック分解に関わる微生物・酵素の応用も進み、循環経済への貢献が期待される。微生物燃料電池や水素生成菌など先端技術も模索され、環境保全と GX の基盤技術として実装が進む見通しである。                                |

#### (5) インタビュー結果を踏まえた今後の潮流および研究の方向性

中核研究者へのインタビュー結果に基づき、今後 5 年から 10 年の潮流および研究の方向性を整理した。

表 2-44 今後の潮流および研究の方向性「微生物細胞工場による持続可能なバイオ生産」

| 項目  | 概要   |
|---|--|
| 新たに浮上している、または今後 5 年から 10 年の間に浮上すると考えられる技術トレンド、技術的ブレークスルーの可能性、技術面の障壁、規制・倫理も含む非技術面の障壁 | <p>■AI for Science と DBTL の本格導入</p> <p>技術的ブレークスルーの方向として、AI と新規ゲノム編集酵素の創出、デジタル育種(ゲノム情報と AI で標的選定・育種)が示唆された。</p> <p>技術的障壁として、国内は自動化設備・運用体制・品質モニタリングの不足で DBTL が回りにくい状況である。</p> <p>非技術的な障壁としては、職人芸マインドによる自動化・標準化の遅れ、オーケストレーション人材の不足、ゲノム編集食品の安全性・倫理、環境漏出といった社会受容や規制の整備の不足がある。</p> |
| 他分野研究連携の必要性   | <p>AI・工学・情報との融合を進めるためには、単なる連携にとどまらず、融合を駆動させるための「仕組み」の設計が必要である。また、用語・文化の壁があり、真の融合には強い動機が必要。</p> <p>目利きによる適切なマッチングと、具体的な共通のゴールの明示が重要。</p>  |

| 項目                                 | 概要   |
|------------------------------------|--|
| わが国のアセット(人材・インフラ等)と国外プレイヤー・チームとの比較 | <p>■強み<br/>さきがけ/CREST の研究者に代表される基礎研究力の高さ。</p> <p>■弱み<br/>自動化・DBTL 運用、オーケストレーション人材、教育基盤、知財・産業化志向の不足。<br/>基礎の強さと実装力にギャップがあり、成功事例が少ないため若手に学習ループが根付きにくい。</p> <p>■海外の動向<br/>米国は DBTL を回す企業群(バイオフアウンドリ)、中国は数・速度・データで急伸しており、実装・加速の体制面で日本との差がみられる。</p> |
| 今後5年から10年の間において潮流となり得る研究の方向性       | <p>・化学合成が困難な高機能物質を狙い、社会受容性の確保のため、価値の高い用途の明確化が重要。</p> <p>・研究文化として、「数と速度」を重視し、データ駆動の開発へ舵を切る(高スループット・自動化・AI の組み合わせ)ことが潮流形成の前提になる。</p>   |
| 今後の当該分野において優先すべき研究課題・支援形態          | DBTL/自動化/AI を中核にした高スループット評価の標準化<br>産業微生物で迅速に編集基盤を構築できる体制・技術の構築   |

## (6) 出所

|   |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● JST 研究開発戦略センター「研究開発の俯瞰報告書 ライフサイエンス・臨床医学分野(2024 年)」<br/><a href="https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2024-FR-05.html">https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2024-FR-05.html</a></li> <li>● 我が国におけるバイオものづくりの産業化に向けて～関西の「次の産業の核」とするために～<br/><a href="https://www.dbj.jp/upload/investigate/docs/0a50c7c869c2bb6be490300804a3d5fe.pdf">https://www.dbj.jp/upload/investigate/docs/0a50c7c869c2bb6be490300804a3d5fe.pdf</a></li> <li>● Microbial Fermentation vs Chemical Synthesis: Key Differences<br/><a href="https://synapse.patsnap.com/article/microbial-fermentation-vs-chemical-synthesis-key-differences">https://synapse.patsnap.com/article/microbial-fermentation-vs-chemical-synthesis-key-differences</a></li> <li>● The bioeconomy's global expansion<br/><a href="https://www.rural21.com/english/dossier/detail/article/the-bioeconomy-global-expansion.html">https://www.rural21.com/english/dossier/detail/article/the-bioeconomy-global-expansion.html</a></li> <li>● Industrial biotech to boom?   Nature Biotechnology<br/><a href="https://www.nature.com/articles/nbt0710-635c?error=cookies_not_supported&amp;code=8f769631-6b1c-4e89-ade1-ddc236ccfd5a">https://www.nature.com/articles/nbt0710-635c?error=cookies_not_supported&amp;code=8f769631-6b1c-4e89-ade1-ddc236ccfd5a</a></li> <li>● FACT SHEET: The United States Announces New Investments and Resources to Advance President Biden's National Biotechnology and Biomanufacturing Initiative   The American Presidency Project<br/><a href="https://www.presidency.ucsb.edu/documents/fact-sheet-the-united-states-announces-new-investments-and-resources-advance-president">https://www.presidency.ucsb.edu/documents/fact-sheet-the-united-states-announces-new-investments-and-resources-advance-president</a></li> <li>● National Biotechnology and Biomanufacturing Initiative briefing   BIA<br/><a href="https://www.bioindustry.org/resource/national-biotechnology-and-biomanufacturing-initiative-briefing.html">https://www.bioindustry.org/resource/national-biotechnology-and-biomanufacturing-initiative-briefing.html</a></li> <li>● Decreasing DNA sequencing costs over the past decade has been mirrored by a huge increase Fig1<br/><a href="https://www.researchgate.net/figure/Decreasing-DNA-sequencing-costs-over-the-past-decade-has-been-mirrored-by-a-huge-increase_fig1_286552756">https://www.researchgate.net/figure/Decreasing-DNA-sequencing-costs-over-the-past-decade-has-been-mirrored-by-a-huge-increase_fig1_286552756</a></li> <li>● Craig Venter creates synthetic life form   Craig Venter   The Guardian<br/><a href="https://www.theguardian.com/science/2010/may/20/craig-venter-synthetic-life-form">https://www.theguardian.com/science/2010/may/20/craig-venter-synthetic-life-form</a></li> <li>● Engineering microbes for isoprene production - ScienceDirect.com<br/><a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1096717616300581">https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1096717616300581</a></li> <li>● Press release: The Nobel Prize in Chemistry 2020 - NobelPrize.org<br/><a href="https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2020/press-release/">https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2020/press-release/</a></li> <li>● Frontiers   Genetic circuits in synthetic biology: broadening the toolbox of</li> </ul> |
|---|

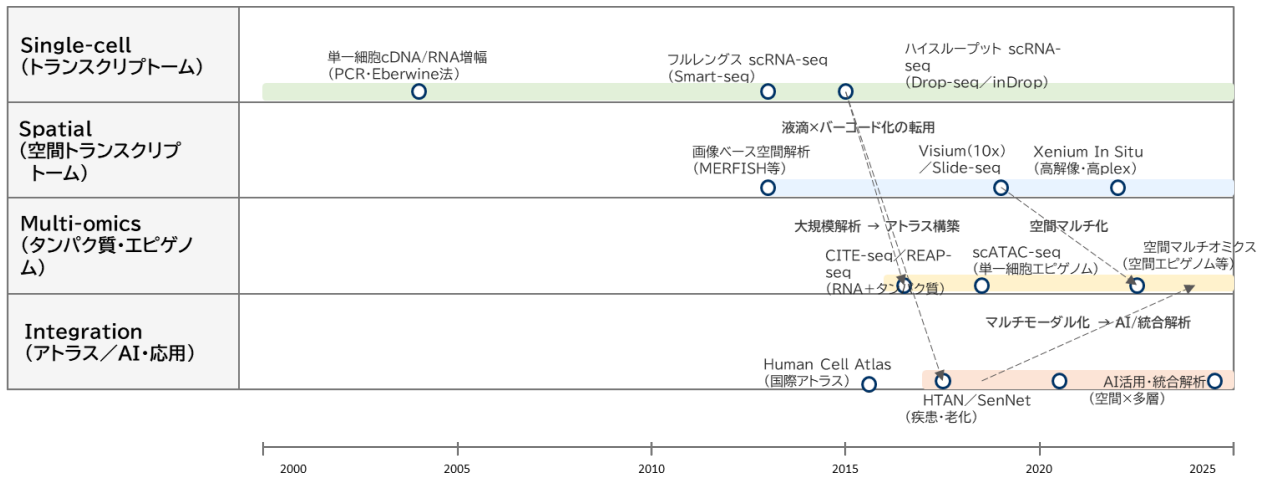
regulatory devices <https://www.frontiersin.org/journals/synthetic-biology/articles/10.3389/fpsybi.2025.1548572/full>

- Nobel Prize in Chemistry 2018 for Evolution of Enzymes <https://www.clariant.com/en/Corporate/Blog/2018-Blog-Posts/10/Nobel-Prize-in-Chemistry-2018-for-Evolution-of-Enzymes>
- Deep learning for metabolic pathway design - ScienceDirect.com <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1096717623001386>
- engineering biology approach to automated workflow and biodesign <https://academic.oup.com/synbio/article/9/1/ysae009/7693903>
- Ginkgo Bioworks: Engineering Biology for a Bio-Based Future <https://eureka.patsnap.com/blog/ginkgo-bioworks-overview/>
- バイオものづくりの鍵となる微生物開発のポイントとは？ | バッカス・バイオイノベーション開発者インタビュー | サステナビリティ ハブ <https://www.sustainability-hub.jp/column/interview2-bio-manufacturing/>
- Lab Automation & Robotics in Microbiology QC [https://www.sigmaaldrich.com/US/en/campaigns/lab-automation-robotics-microbiology-quality-control?srsId=AfmBOor98hhsQJCiihCQbDowWrAFcvbwQf7s6WS5XeM3VUvR\\_0BMhb5m](https://www.sigmaaldrich.com/US/en/campaigns/lab-automation-robotics-microbiology-quality-control?srsId=AfmBOor98hhsQJCiihCQbDowWrAFcvbwQf7s6WS5XeM3VUvR_0BMhb5m)
- How AI is Revolutionizing the Fermentation Industry <https://www.linkedin.com/pulse/how-ai-revolutionizing-fermentation-industry-amergingtech-1dsec>
- カーボンリサイクル実現を加速するバイオ由来製品生産技術の開発 <https://www.jba.or.jp/b-production/overview.php>
- Clariant is latest firm to pull out of cellulosic ethanol <https://cen.acs.org/business/biobased-chemicals/Clariant-latest-firm-pull-cellulosic/101/web/2023/12>
- October 20, 2024 Government of the Netherlands Ministry of Infrastructure and Waterworks, Ministry of Climate and Green Growth <https://www.internetconsultatie.nl/p2xfuels/reactie/251743/bestand>
- It's a Perfect Day. Cellular ag brings us animal-free ice cream. - The Good Food Institute <https://gfi.org/blog/perfect-day-ice-cream-launch/>
- Pivot Bio is using microbial nitrogen to make agriculture more sustainable - MIT News <https://news.mit.edu/2025/pivot-bio-uses-microbial-nitrogen-sustainable-agriculture-0213>
- Plastic-eating Enzyme Could Eliminate Billions of Tons of Landfill Waste - UT Austin News - The University of Texas at Austin <https://news.utexas.edu/2022/04/27/plastic-eating-enzyme-could-eliminate-billions-of-tons-of-landfill-waste/>

## 2.2.8 潮流 A8:細胞オミクス・空間オミクス「単細胞解析、空間情報及び時間軸による分析への展開」

### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



※バーは「顕著に発展・活用が進んだ時期」の目安である。scRNA-seq: single-cell RNA sequencing, HCA: Human Cell Atlas, HTAN: Human Tumor Atlas Network, SenNet: Senescence Network

出所) 点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き: 影響が及ぶ方向(起点から波及先)を示す。  
 矢印上のラベル: 影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-9 技術的進歩と方向性の概要図「単細胞解析、空間情報及び時間軸による分析への展開」

表 2-45 技術的進歩と方向性(概要)「単細胞解析、空間情報及び時間軸による分析への展開」

| 概要 |  |
|----|--|
| ●  | <p>シングルセル RNA シーケンスの普及<br/>                     2009 年に最初の 1 細胞転写産物解析(scRNA-seq)が報告されて以降、単一細胞レベルで遺伝子発現を解析する技術は急速に発展した。特に 2015 年前後に Drop-seq や inDrop といったマイクロ流体デバイスを用いた手法が登場し、一度に数万個規模の細胞から転写産物を解析可能となり、この分野の基盤技術が飛躍的に拡大した。現在では 10x Genomics 社の Chromium システムに代表される商用装置が研究現場に浸透し、生物学・医学研究に欠かせない手法となっている。</p>   |
| ●  | <p>マルチオミクスと包括的解析<br/>                     近年は、単一細胞で複数の分子層を同時に測定するマルチオミクス解析へと発展している。例えば 2017 年に報告された CITE-seq や REAP-seq では、DNA バーコード付き抗体を用いて細胞表面タンパク質発現量と mRNA 発現量を同時定量する技術が実現した。さらに、オープンクロマチン領域(ATAC-seq)とトランスクリプトームを同時解析する SNARE-seq(2019 年)、表面タンパク質・転写産物・染色質アクセシビリティの三者を同時計測する ASAP-seq(2021 年)など、新規手法が相次いで開発されている。これらにより、一細胞内の遺伝子発現制御ネットワークを多層的に把握することが可能となりつつある。また、取得した大規模データを統合解析する計算手法も進展し、分子層間の関係性を統合的に解明するアプローチが確立されつつある。</p> |
| ●  | <p>空間情報の付加<br/>                     空間オミクス(空間的トランスクリプトーム解析)の登場も大きな潮流である。組織切片上で細胞を破壊せずに位置情報と遺伝子発現を同時取得する技術であり、2020 年の Nature Methods「Method of the Year」に選出されるなど注目を集めた。手法は大きく網羅型(全細胞の大まかな発現地図)と局所高解像度型(関心領域での高感度解析)に二分類され、前者の代表として 10x Genomics 社が 2019 年発売した Visium システムがある。Visium ではガラススライド上の約 5,000 箇所に位置識</p>   |

## 概要

別バーコード付きオリゴヌクレオチドを配置し、組織切片由来の mRNA をその場で捕捉・シーケンスすることで、組織中の遺伝子発現地図を作成する。一方、局所型の例として京都大学・九州大学グループの PIC 法(2021 年発表)があり、光反応性試薬を用いてサブミクロン解像度で組織内の特定領域のみ転写産物を解析することに成功している。このように、空間的な分解能と網羅性のトレードオフを工夫で補いながら、細胞間相互作用をその場で捉える技術が進展している。さらに 2022 年末には 10x Genomics 社の Xenium In Situ プラットフォームが発売され、細胞内の 100 種類以上の RNA 分子をナノスケール解像度で可視化できるようになり、日本でも導入が始まった。

- エピゲノム・分子階層への拡張

トランスクリプトーム以外の 1 細胞オミクス解析も飛躍している。一細胞エピゲノム解析では、2015 年頃から一細胞 ATAC-seq(クロマチン開状態の解析)が登場し広く利用されている。2018 年には 10x Genomics 社から一細胞 ATAC-seq 試薬キットが市販化され、個々の細胞核からゲノムのクロマチンアクセスビリティを網羅解析することが容易になった。最近ではトランスクリプトーム+エピゲノム同時解析(シングルセル・マルチオーム)の商用キットも登場し、同一細胞内で遺伝子発現とクロマチン状態を同時観測することが可能である。これにより、例えばゲノムワイド関連解析で同定された非コード変異の機能を、その細胞種におけるエピゲノム変化と発現変動から直接明らかにするといった研究が始まっている。さらに、2022 年には空間的エピゲノム解析として、一細胞レベルの空間 ATAC-seq や空間的ヒストン修飾解析手法も報告された。組織切片上で転写因子結合領域やオープンクロマチン領域をタグ付けし、その場でバーコード化してシーケンスすることで空間情報とエピゲノム情報を紐付ける新技術で、他の分子標的(転写因子や調節因子)の空間解析への応用も期待されている。

- 細胞系譜トレーシングの発展

静的な単細胞解析に加え、細胞の発生系譜を追跡する技術も注目されている。Nature Methods 誌が選ぶ「2022 年注目すべき手法」に“Tracing cell relationships”が挙げられたように、ゲノム編集やバーコード技術を駆使した系譜追跡(Lineage tracing)が急速に発展している。手法は大きく、後から体細胞変異のパターンを単一細胞ゲノム解析で解析して系譜を推定するレトロスペクティブ(遡及的)解析と、あらかじめ DNA バーコードで細胞にタグを付けて追跡するプロスペクティブ(予測的)解析に二分される。前者ではヒトの発達や疾患で特徴的なクローン系譜を体細胞変異から同定する研究が現れ、後者では培養系や移植モデルでバーコード付き細胞を追跡することで、例えば癌における薬剤耐性クローンの出現タイミングや転移の動態を解明する成果が報告されている。こうした系譜追跡技術は胚発生研究からがん研究まで応用が広がり、静的解析では得られなかった発生・疾患進展の動的理解をもたらしている。

- 大型プロジェクトによるデータ蓄積

一細胞オミクス技術の成熟に伴い、世界各国で大規模プロジェクトが立ち上がっている。2017 年開始の Human Cell Atlas (HCA)は国際共同でヒト全身の全細胞タイプを分子プロファイル化する壮大な試みであり、10x Genomics 社の技術を駆使して膨大なデータが蓄積されている。米 NIH の HubMAP 計画(2018 年～)も HCA や Human Protein Atlas と連携し、健常組織の細胞マップ構築を進めている。さらにかん細胞アトラス計画 (HTAN)(2020 年～)では様々ながん種・病期の患者検体を一細胞解析し、腫瘍の細胞地図構築が進行中である。老化細胞に着目した SenNet 計画(2021 年～)や、欧州における LifeTime イニシアチブ(2018 年～2020 年 FS)では健康から病気への移行を 1 細胞マルチオミクスと AI で解析し新たな治療法を探ることを目指している。日本国内でも JST 戦略的創造研究推進事業にて、多細胞システムの時空間相互作用解明を目指す研究領域(さきがけ/CREST「多細胞」「細胞内ダイナミクス」「生命力」領域など)が相次ぎ発足し、国家的な研究基盤形成が図られている。

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-46 タイムライン「単細胞解析、空間情報及び時間軸による分析への展開」

| 年         | 技術・研究のマイルストーン例   |
|-----------|--|
| 2000 年代前半 | シングルセル解析の黎明期。<br>PCR 増幅による単一細胞 cDNA 解析 (Iscove らにより 1990 年代後半に実証) や、RNA 増幅法 (Eberwine 法, 2004 年) など初期技術が開発され、単一細胞の遺伝子発現解析の概念が確立。   |
| 2009 年    | 最初のシングルセル RNA シーケンス: マウス初期胚の単一細胞から全転写産物を網羅的にシーケンスする手法を Tang らが報告し、1 細胞トランスクリプトーム解析時代が開幕。   |
| 2011 年    | 単一細胞ゲノム解析への応用: Navin らが単一がん細胞のゲノムを解析し、腫瘍内の遺伝的異質性を初めて明らかにする。以後、全ゲノム増幅 (WGA) 手法の改良により、個々の細胞の変異プロファイル解明が進展。(※Navin 2011)  |
| 2013 年    | フルレンジ転写産物解析: Smart-seq 法(後に Smart-seq2 へ発展)により、1 細胞あたり全長 mRNA を高感度に増幅・シーケンスする技術が登場。スプライシングバリエーション解析など定量精度が向上し、主に低スループット用途で普及。  |
| 2015 年    | ハイスループット scRNA-seq の実現: Drop-seq および inDrop 法が相次いで報告され、マイクロ流体デバイス上の液滴内で 1 細胞単位の cDNA ライブラリ調製が可能に。数万規模の細胞を同時解析できる画期的手法で、単細胞解析のスケールが飛躍的に拡大。同年、10x Genomics 社も設立され、商用ハイスループット装置開発が加速。   |
| 2017 年    | 国際プロジェクト開始: Human Cell Atlas (HCA) プロジェクトが本格始動し、世界中の研究者が協働してヒト全身の細胞カタログ化に着手。<br>マルチモーダル解析の登場: CITE-seq および REAP-seq 手法が報告され、単一細胞から mRNA と数十種類のタンパク質を同時測定することに成功 (DNA バーコード付き抗体を利用)。単細胞レベルで複数分子を同時に読む新コンセプトが確立。   |
| 2018 年    | 単一細胞エピゲノム解析の普及: クロマチン構造解析の手法 scATAC-seq が整備され、10x Genomics 社からキット発売。免疫細胞の新規サブセット発見など、エピゲノムから細胞機能を理解する研究が活発化。また、中国・浙江大グループがマウス全臓器の細胞アトラスを報告するなど、国際的に大規模データ産出が進む。  |
| 2019 年    | 空間トランスクリプトミクスの社会実装: 10x Genomics 社が組織切片上で遺伝子発現を網羅解析できる Visium キットを発売。同年、マサチューセッツ工科大学からはビーズ上バーコードを用いた Slide-seq 法が発表され、単一細胞レベルの空間解像度で転写地図を取得可能になった。これにより、組織中の空間的遺伝子発現解析が広範な研究者に利用可能となった。  |
| 2020 年    | 技術の認知度向上: 空間トランスクリプトミクスが Nature Methods 誌の“Method of the Year 2020”に選出され、空間オミクス解析への関心が飛躍的に高まる。同年、米 NCI 主導でヒト腫瘍アトラスネットワーク (HTAN) プロジェクトが始動し、がん組織の単細胞解析データ構築がスタート。   |
| 2021 年    | 加速する多領域応用: NIH の老化細胞ネットワーク SenNet 発足。また、単細胞解析と空間解析を組み合わせた研究が盛んになり、臓器発生過程の細胞間クロストークや疾患時の組織変化を統合的に理解する試みが進展。シングルセルマルチオミクス解析も本格化し、プレプリント段階ながら多数の研究が登場。  |
| 2022 年    | 空間オミクスの多様化: 空間的エピゲノム解析の初報告 (Yale 大学による空間ヒストン修飾マッピング、UW による空間 ATAC-seq など)。これらは転写因子結合領域やオープンクロマチン領域を in situ でラベル・切り出しし、位置情報ごとシーケンスする革新的手法で、今後の発展と実用化が期待される。<br>次世代プラットフォーム: 10x Genomics 社が Xenium In Situ システムを発売 (世界初公開は 2022 年 12 月)。1 細胞内の数百遺伝子を 30nm 以下の高い位置分解能で可視化する装置で、日本でも 2023 年に東京大学などが導入。空間分子プロファイリングがより高精度・高 multiplex 化の段階へ進んだ。 |

| 年     | 技術・研究のマイルストーン例   |
|-------|--|
| 2023年 | 技術の高度化と統合: シングルセル長鎖シーケンス(ロングリード技術)の導入が進み、1細胞レベルで転写アイソフォーム(スプライシングバリエーションや融合遺伝子)の解析が可能に。また、AIを活用した大規模シングルセルデータ解析や、空間情報と系譜情報を組み合わせた統合解析など、新たな計算手法・実験手法の開拓が加速している。企業ベースでもより高速・高スループットな装置(例:10x社 Chromium X)の開発競争が起こり、単細胞解析の産業基盤が一層整備されつつある。 |

### (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-47 キーテクノロジー「単細胞解析、空間情報及び時間軸による分析への展開」

| 名称                                   | 出現時期・背景   | 解説  |
|--------------------------------------|---|---|
| シングルセルトランスクリプトーム解析(単一細胞RNAシーケンス)     | 出現時期:2009年に単一細胞の全転写産物をNGSで解析する初報。2015年にドロップレット法(Drop-seq/inDrop)で高スループット化、2017年に商用プラットフォーム(10x)で大規模化。<br>背景:バルクRNA-seqでは平均化される細胞間不均一性を解明するため、微量RNAの増幅とマイクロ流体バーコード化の革新が推進力に。   | 個々の細胞から転写産物(mRNA)を抽出・増幅し、遺伝子発現プロファイルを取得する技術。細胞集団内の未知または稀少なサブタイプの同定、細胞状態や分化過程の解明に威力を発揮。現在、数万細胞規模の高スループットscRNA-seqが一般化。   |
| シングルセルエピゲノム解析(単一細胞クロマチン・エピジェネティクス解析) | 出現時期:2013年にATAC-seq、同年にsingle-cell Hi-C。2015年にscATAC-seqとscChIP-seqが登場。以後、商用scATACで普及。<br>背景:細胞ごとの遺伝子調節差を捉えるため、Tn5ベースの迅速測定と単細胞分離・バーコード化の統合が鍵。   | 単一細胞ごとにゲノム上のエピジェネティックな修飾状態(DNAメチル化、ヒストン修飾)やクロマチン構造の解析を行う技術群。例:一細胞ATAC-seqで全ゲノムの開染色質領域を測定、また一細胞ChIP-seqでヒストン修飾を検出、一細胞Hi-Cで立体構造を解析、など。遺伝子発現制御の多様性を細胞毎に明らかにし、細胞機能の制御機構を理解するのが目的。   |
| シングルセルマルチオミクス解析                      | 出現時期:2017年にRNA+タンパク同時測定(CITE-seq/REAP-seq)、2019年にRNA+ATAC(SNARE-seq)、2021年にRNA+ATAC+タンパク(ASAP-seq)へ拡張。2020-2021年に商用Multiomeが登場。<br>背景:同一細胞で複数層(転写・クロマチン・タンパク)を測定し、調節機構と表現型の対応付けを行うニーズ。統合解析法(例:Seurat v3)も普及。            | 単一の細胞から複数種の分子データを同時取得する解析。典型例は転写産物+タンパク質(二重解析)や、転写産物+クロマチン開閉状態(二重解析)、さらには三重(RNA+タンパク質+エピゲノム)解析まで含む。複数の「オミクス」を統合することで、同一細胞内で遺伝子発現の原因と結果を直接対応付けられる点が強み。   |
| 空間トランスクリプトミクス解析(空間的単一細胞遺伝子発現解析)      | 出現時期:2016年にスポットバーコード法(Spatial Transcriptomics)を初報、2019年にSlide-seqなどで高解像度化。2021年に「Method of the Year」。商用としてVisiumやXeniumなどが展開。<br>背景:組織内の細胞配置と遺伝子発現を同時取得し、微小環境や細胞間相互作用を解析する需要の高まり。in situ ハイブリダイゼーション・バーコード捕捉と画像化の融合が進展。 | 生体組織内の各細胞の位置座標と遺伝子発現情報を同時に取得する技術。組織を酵素解離せず切片上で解析するため、細胞間の空間的関係性を保ったまま網羅的転写解析が可能。シーケンスベースの方法(例:Visium)と顕微鏡イメージングベースの方法(例:MERFISHなど)の2系統がある。前者は多数の遺伝子を一度に測れるが空間解像度はスポットサイズ(数細胞~細胞径)程度、後者はサブ細胞解像度まで高められるが一度に測定できる遺伝子数に限りがある。 |

| 名称                                 | 出現時期・背景  | 解説  |
|------------------------------------|--|---|
| 空間マルチオミクス解析<br>(例:空間エピゲノム解析など)     | 出現時期:2022年に Spatial-CUT&Tag(ヒストン修飾)などの空間エピゲノムが登場、2023年に spatial ATAC が報告。以後、空間トランスクリプトームと多層計測の統合が進展。<br>背景:遺伝子発現の空間パターンと、その基盤となる調節状態やタンパク発現を同一切片で対応付ける要求。固相捕捉・タグ付け化学・局所励起の技術成熟が推進。   | 空間トランスクリプトミクスをさらに発展させ、遺伝子発現以外の分子情報も位置情報とともに取得する新領域。組織内のクロマチン状態をエピゲノムマーカーストに可視化できる。手法としては、標的分子(抗体で検出可能な修飾や転写因子結合 DNA 断片など)にトランスポゾンでバーコードタグを付加し、その場でライブラリ化してシーケンスすることで空間解像度を付与する。   |
| 細胞系譜追跡<br>(Lineage tracing, 系譜樹解析) | 出現時期:古典的運命マッピングに加え、2016年に CRISPR ベースのバーコーディングで全身系譜記録が登場。2019年にミトコンドリア変異を用いたヒト系譜推定、2020年代に単一細胞オミクスと統合して発生・がんで広く応用。2024-2025年に新しいクローントラッキング法も報告。<br>背景:発生・再生・がん進化のクローンダイナミクス解明のため、持続的・高スループット・高解像な系譜記録が必要となり、ゲノム編集・内因性変異・オリゴ設計など多様なラベリング戦略が発展。 | 個々の細胞がどのような祖先細胞に由来し、どの分化経路を辿ったかを系譜樹状に再構成する技術。従来はタイムラプス観察や標識実験が主であったが、近年はゲノム変異や人工バーコードを細胞ごとの「系譜タグ」として利用する。レトロスペクティブ手法では体細胞変異の比較から親子関係を推定し、プロスペクティブ手法では CRISPR/Cas などでバーコードに刻まれる変異をリアルタイム記録していく。いずれもシングルセル増幅・シーケンス技術と組み合わせ、系譜情報と細胞の分子状態を同時に解析できる点が画期的である。 |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-48 実用化可能性「単細胞解析、空間情報及び時間軸による分析への展開」

| 名称           | 解説   |
|--------------|--|
| 医療・ヘルスケア分野   | 患者由来試料の単細胞解析が、従来は捉えきれなかった疾患の微細な実態解明につながっている。例えば腫瘍組織を空間トランスクリプトミクスとシングルセル RNA-seq で解析することで、腫瘍内の異種細胞集団やがん微小環境を可視化し、新たな診断バイオマーカー候補や治療標的分子の発見につながる。心疾患や神経変性疾患などでも、発症に関与するごく一部の細胞集団の特性を単細胞レベルで突き止める研究が進んでいる。将来的には、患者検体を単細胞解析する精密医療(プレジジョン・メディシン)が実現し、個々の腫瘍や難病に合わせた治療法選択や予後予測が可能になると期待される。   |
| 創薬・製薬産業      | 単細胞解析は創薬プロセスにも革新をもたらしている。製薬企業では、疾患組織やモデル動物から取得した膨大な単細胞データを機械学習で解析し、新規の分子標的や疾患ドライバーを発見する取り組みが進んでいる。特に腫瘍における薬剤耐性の機序について、バーコード系譜追跡とシングルセル RNA-seq を組み合わせた研究により、耐性クローンが治療前から存在する場合と治療後に新生する場合があることが実証された。この知見は薬剤耐性を克服する新たな治療戦略の立案につながる。また創薬標的のオフターゲット効果や安全性評価にも、単細胞レベルでの副作用標的細胞検出が役立つ可能性がある。さらに製薬企業は 10x Genomics 等の解析プラットフォームと提携し、大規模スクリーニングへの単細胞技術導入を進めており、創薬研究の高速化・高精度化に寄与している。 |
| バイオ生産・食品産業   | バイオ医薬品の細胞培養プロセスや発酵食品の醸造プロセスにおいても、単細胞解析が品質向上に貢献し得る。培養タンク中の細胞集団を一細胞レベルでモニタリングすることで、生産性能のばらつきをもたらすサブクローンの検出や培養条件の最適化フィードバックが可能となる。実際、抗体医薬品生産では高産生クローンを単細胞で選抜・評価する技術が使われ始めている(単細胞 PCR で遺伝子挿入状態を確認するなど)。今後、酵母や細菌など発酵微生物についてもシングルセルゲノミクスで有用変異株をスクリーニングしたり、スターター培養中の不均一性を検知するなど、食品・醸造分野への波及も期待される。  |
| データ駆動型産業への展開 | 単細胞オミクスの普及は、バイオインフォマティクス産業やクラウドデータサービスの需要も生み出している。国際プロジェクトで得られた膨大な細胞データは、国際データベース(HCA Data Portal など)で共有され、AI 企業や IT 企業もこれらオープンデータの解析に参入し始めている。今後、解析ソフトウェアや可視化ツールの開発、あるいは医療機関向けのシングルセル解析受託サービスなど、新たなビジネス領域が拡大すると予想される。各国政府・研究機関のレポートもこの潮流を支える政策立案を進めており、日本においても研究投資と人材育成による競争力強化が課題となっている。   |

## (5) インタビュー結果を踏まえた今後の潮流および研究の方向性

中核研究者へのインタビュー結果に基づき、今後 5 年から 10 年の潮流および研究の方向性を整理した。

表 2-49 今後の潮流および研究の方向性「単細胞解析、空間情報及び時間軸による分析への展開」

| 項目  | 概要  |
|---|---|
| 新たに浮上している、または今後 5 年から 10 年の間に浮上すると考えられる技術トレンド、技術的ブレークスルーの可能性、技術面の障壁、規制・倫理も含む非技術面の障壁 | 今後の潮流は、単一細胞解析から空間オミクス、さらに時間軸を含む動的オミクスへの展開。<br>具体的には、単一細胞エピゲノム・プロテオーム動態のリアルタイム計測、長期臨床データを用いた経時変化のシミュレーション、量子機械学習を含む高度解析の活用が有望。<br>測定ロット差、標準化不足、再現性確保、長期・反復サンプリングに伴う倫理・運用負荷、費用対効果評価の不足、量子計算における誤り訂正未確立が主要な障壁となる。結果評価の不足、量子計算における誤り訂正未確立が障壁。   |
| 他分野研究連携の必要性   | AI・量子・物理・生物・臨床を横断する連携が不可欠である。特に、病院臨床との密接な共同の下で、ステージ III～IV を含む動的病態の検体を経時的・反復的に取得し、解析につなげる体制が重要となる。また、データ基盤はデータレイク型ではなく、臨床課題や研究目的を明確化した目的指向型で構築する必要がある。  |
| わが国のアセット(人材・インフラ等)と国外プレイヤー・チームとの比較  | 我が国は、空間オミクス分野で一定の研究力を有し、加えて物理・数学の基盤的人材層の厚みを有している点が強みである。他方で、主要計測プラットフォームは海外製への依存が大きく、GPU 計算基盤でも国外勢に遅れを取っている。このため、日本としては量子応用を含む次世代計算基盤に戦略的に投資し、量子対応のデータプラットフォームとアルゴリズム資産を早期に整備することが重要である。  |
| 今後5年から10年の間において潮流となり得る研究の方向性  | ■ヘテロジェネイティ(多様性)と経時変化<br>今後の研究潮流は、ヘテロジェネイティ(多様性)と経時変化を中核概念とし、非線形生物学、動的オミクス、量子×AI の生命データ科学を組み合わせる方向へ進むと考えられる。<br>あわせて、疾患を臓器別に固定的に捉えるのではなく、ドライバー変異、微小環境、転移、時間変化を含めて再編し、基礎研究から臨床応用までを一気通貫で接続する目的志向の橋渡し設計が重要になる。   |
| 今後の当該分野において優先すべき研究課題・支援形態   | 優先すべき研究課題は以下<br>・ヘテロジェネイティの定量化と標準化<br>・経時変化のシミュレーションと検証<br>・単一細胞エピゲノム・プロテオーム動態のリアルタイム計測<br>・量子対応データ基盤・アルゴリズムの整備<br>・疾患分類の再設計<br>支援形態としては、疾患・ステージ・サンプリング計画を明確化したうえで、基礎～臨床の橋渡しを内包するプロジェクトを組成し、段階的 KPI に標準化・再現性・費用対効果を必須評価項目として組み込むことが望ましい。加えて、臨床現場との共同や反復サンプリングを可能にする制度設計、CREST から AMED-LEAP 等への橋渡し枠の拡充を通じて、基盤研究と出口の接続を強化する必要がある。 |

## (6) 出所

- JST 研究開発の俯瞰報告書、<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2024-FR-05.html>
- Tang et al. mRNA-Seq whole-transcriptome analysis of a single cell. Nature Methods (2009). <https://www.nature.com/articles/nmeth.1315.pdf>
- Tang et al. mRNA-Seq whole-transcriptome analysis of a single cell. Nature

- Methods (2009). <https://www.nature.com/articles/nmeth.1315.pdf>
- Macosko et al. Highly Parallel Genome-wide Expression Profiling of Individual Cells Using Nanoliter Droplets (Drop-seq). *Cell* (2015). / Klein et al. Droplet Barcoding for Single-Cell Transcriptomics Applied to Embryonic Stem Cells (inDrop). *Cell* (2015). Drop-seq: [https://www.cell.com/cell/pdf/S0092-8674\(15\)00549-8.pdf](https://www.cell.com/cell/pdf/S0092-8674(15)00549-8.pdf) / inDrop: [https://www.cell.com/cell/pdf/S0092-8674\(15\)00444-4.pdf](https://www.cell.com/cell/pdf/S0092-8674(15)00444-4.pdf)
  - Zheng et al. Massively parallel digital transcriptional profiling of single cells. *Nature Communications* (2017). <https://www.nature.com/articles/ncomms14049.pdf>
  - Vandereyken et al. Methods and applications for single-cell and spatial multi-omics. *Nature Reviews Genetics* (2023). <https://www.nature.com/articles/s41576-023-00628-7.pdf>
  - Stoeckius et al. Simultaneous epitope and transcriptome measurement in single cells (CITE-seq). *Nature Methods* (2017). / Peterson et al. Multiplexed quantification of proteins and transcripts in single cells (REAP-seq). *Nature Biotechnology* (2017). CITE-seq: <https://www.nature.com/articles/nmeth.4380.pdf> / REAP-seq: <https://www.nature.com/articles/nbt.3973.pdf>
  - Chen et al. High-throughput sequencing of the transcriptome and chromatin accessibility in the same cell (SNARE-seq). *Nature Biotechnology* (2019). <https://www.nature.com/articles/s41587-019-0290-0.pdf>
  - Mimitou et al. Scalable, multimodal profiling of chromatin accessibility, gene expression and protein levels in single cells (ASAP-seq). *Nature Biotechnology* (2021). DOI: 10.1038/s41587-021-00927-2. <https://www.natureasia.com/ja-jp/nbt/39/10/s41587-021-00927-2>
  - Stuart et al. Comprehensive Integration of Single-Cell Data. *Cell* (2019). [https://www.cell.com/cell/fulltext/S0092-8674\(19\)30559-8](https://www.cell.com/cell/fulltext/S0092-8674(19)30559-8)
  - Larsson et al. Spatially resolved transcriptomics adds a new dimension to genomics. *Nature Methods* (2021). <https://www.nature.com/articles/s41592-020-01038-7.pdf>
  - Nature Methods editorial. Method of the Year: spatially resolved transcriptomics. *Nature Methods* (2021). <https://europepmc.org/article/MED/33408395>
  - 10x Genomics. Visium Spatial Gene Expression. <https://www.10xgenomics.com/products/spatial-gene-expression>
  - Kudo et al. High-depth spatial transcriptome analysis by photo-isolation chemistry (PIC). *Nature Communications* (2021). <https://www.nature.com/articles/s41467-021-24691-8.pdf>
  - 10x Genomics. Xenium In Situ. <https://www.10xgenomics.com/products/xenium-in-situ>
  - Buenrostro et al. Transposition of native chromatin for fast and sensitive epigenomic profiling of open chromatin (ATAC-seq). *Nature Methods* (2013). / Buenrostro et al. Single-cell chromatin accessibility reveals principles of regulatory variation. *Nature* (2015). ATAC-seq: <https://www.nature.com/articles/nmeth.2688.pdf> / scATAC: DOI 10.1038/nature14590
  - 10x Genomics. Chromium Single Cell ATAC.
  - 10x Genomics. Chromium Next GEM Single Cell Multiome ATAC + Gene Expression.
  - Corces et al. Single-cell epigenomic analyses implicate candidate causal variants at inherited risk loci for Alzheimer's and Parkinson's diseases. *Nature Genetics* (2020). <https://www.nature.com/articles/s41588-020-00721-x.pdf>
  - Neumeyer et al. Linking regulatory variants to target genes by integrating single-cell multimodal data and distance. *Nature Genetics* (2025). <https://www.nature.com/articles/s41588-025-02276-8>
  - Deng et al. Spatial-CUT&Tag: Spatially resolved epigenomic profiling of histone modifications in individual cells in tissues. *Science* (2022). / Chen et al. Solid-

phase capture and profiling of open chromatin by sequencing (spatial ATAC). Nature Biotechnology (2023). Spatial-CUT&Tag:

<https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.abn5058> / spatial ATAC:

<https://www.nature.com/articles/s41587-023-01759-3.pdf>

- Wagner & Klein. Lineage tracing meets single-cell omics: opportunities and challenges. Nature Reviews Genetics (2020).
- Lareau et al. Lineage Tracing in Humans Enabled by Mitochondrial Mutations. Cell (2019).
- Zhang et al. Single-cell lineage tracing reveals clonal dynamics and new perspectives on cancer therapy. Genome Medicine (2024). / Oligo-CALL: Developing an optimized clonal tracking tool in cancer. Science Advances (2025). Genome Medicine: <https://genomemedicine.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13073-024-01377-8> / Sci Adv: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adn9127>
- HuBMAP Consortium. The human body at cellular resolution: the NIH Human Biomolecular Atlas Program. Nature (2019). <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1629-x.pdf>
- National Cancer Institute (NCI). Human Tumor Atlas Network (HTAN). <https://www.cancer.gov/research/participate/htan>
- NIH Common Fund. SenNet (Cellular Senescence Network). <https://commonfund.nih.gov/sennet>
- LifeTime Community. LifeTime: toward cell-based interceptive medicine in Europe. Nature (2020). <https://www.nature.com/articles/s41586-020-2715-9.pdf>
- JST 戦略的創造研究推進事業(CREST/さきがけ)研究領域情報。CREST 研究領域: [https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research\\_area/index.html](https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/index.html) / さきがけ: <https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/> / (例)細胞内ダイナミクス: [https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research\\_area/ongoing/bunya2020-1.html](https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunya2020-1.html)
- Nature Methods. Development and applications of single-cell transcriptome analysis. (2010). <https://www.nature.com/articles/nmeth.1442.pdf>
- Navin et al. Tumour evolution inferred by single-cell sequencing. Nature (2011). <https://www.nature.com/articles/nature09807.pdf>
- Han et al. Mapping the Mouse Cell Atlas by Microwell-Seq. Cell (2018).
- Rodriques et al. Slide-seq: A scalable technology for measuring genome-wide expression at high spatial resolution. Science (2019). <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.aaw1219>
- Advances in single-cell long-read sequencing technologies. NAR Genomics and Bioinformatics (2024). <https://academic.oup.com/nargab/article/6/3/lqae082/7735281>
- 10x Genomics. Chromium X instrument. <https://www.10xgenomics.com/instruments/chromium-x>
- Hwang et al. Single-cell RNA sequencing technologies and bioinformatics pipelines. Experimental & Molecular Medicine (2018). <https://www.nature.com/articles/s12276-018-0074-7.pdf>
- van der Maaten & Hinton. Visualizing Data using t-SNE. Journal of Machine Learning Research (2008). <https://www.jmlr.org/papers/volume9/vandermaaten08a/vandermaaten08a.pdf>
- McInnes, Healy & Melville. UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension Reduction. Journal of Open Source Software (2018). <https://joss.theoj.org/papers/10.21105/joss.00861>
- Rotem et al. Single-cell ChIP-seq reveals cell subpopulations defined by chromatin state. Nature Biotechnology (2015). <https://www.nature.com/articles/nbt.3383.pdf>
- Nagano et al. Single-cell Hi-C reveals cell-to-cell variability in chromosome structure. Nature (2013). <https://www.nature.com/articles/nature12593.pdf>
- Harada et al. Chromatin integration labeling (ChIL-seq). Nature Cell Biology (2019). <https://www.nature.com/articles/s41556-019-0445-7.pdf>
- Ståhl et al. Visualization and analysis of gene expression in tissue sections by

spatial transcriptomics. *Science* (2016).

<https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.aaf2403>

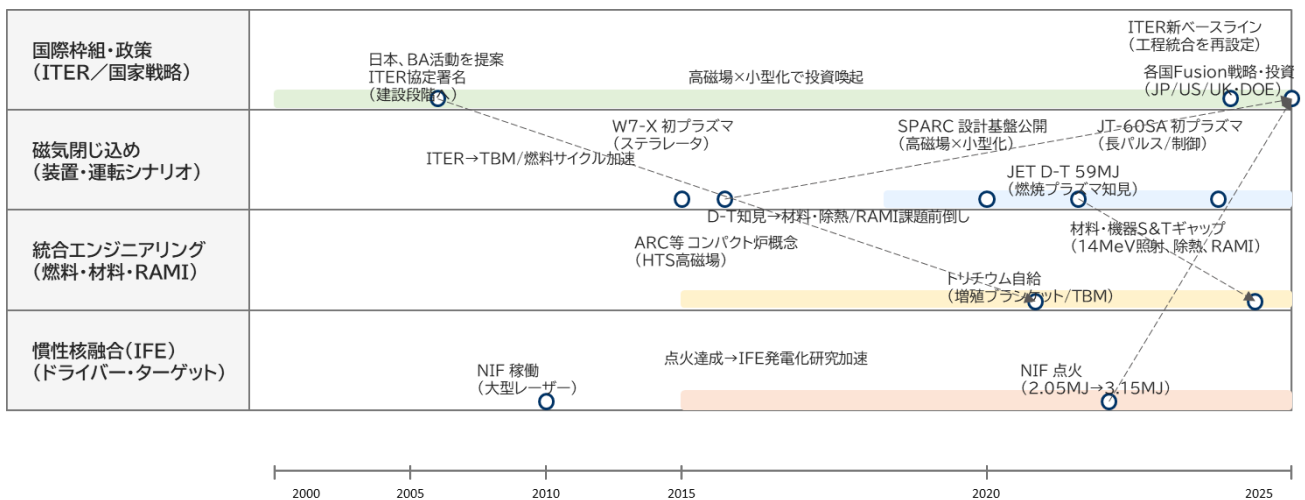
- 10x Genomics(プレスリリース)Visium HD(High Definition)関連情報(2024).
- DNA microscopy: Optics-free spatio-genetic imaging by a stand-alone chemical reaction. *Cell* (2019). [https://www.cell.com/cell/fulltext/S0092-8674\(19\)30547-1](https://www.cell.com/cell/fulltext/S0092-8674(19)30547-1)
- Exploring the untapped potential of single-cell and spatial omics in plant and microbial sciences. *New Phytologist* (2024). <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/nph.19593>
- scTrends: A living review of commercial single-cell and spatial 'omic technologies. *ScienceDirect* (2024). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167779924001762>

## 2.3 環境・エネルギー分野

### 2.3.1 潮流 B1:原子力発電「フュージョンエネルギー原型炉開発に向けた研究加速」

#### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



※バーは「顕著に発展・活用が進んだ時期」の目安である。

出所)点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。

矢印の向き:影響が及ぶ方向(起点から波及先)を示す。

矢印上のラベル:影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-10 技術的進歩と方向性の概要図「フュージョンエネルギー原型炉開発に向けた研究加速」

表 2-50 技術的進歩と方向性(概要)「フュージョンエネルギー原型炉開発に向けた研究加速」

| 概要  |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● 原型炉(DEMO/Pilot Plant)を見据え、研究の主軸が「プラズマ物理の実証」から「統合エンジニアリング(燃料サイクル・材料・保守・発電系)」へ移行している。政策面でも、米 DOE の商用化志向の戦略(Bold Decadal Vision)を支える3本柱や、我が国の「フュージョンエネルギー・イノベーション戦略」が、実装・産業化を明確に位置付ける。</li> <li>● 装置側では、高温超伝導(HTS)を含む高磁場化・小型化(コンパクトトカマク)が「建設期間とコストの圧縮」を狙う主要レバーとして注目され、SPARC/ARC等の設計研究が牽引している。</li> <li>● 運転シナリオの高度化(高閉じ込め・定常化)と長パルス運転の知見が積み上がり、JETのD-T実験(59MJ, 69.26MJ)や、W7-Xの運転開始などがマイルストーンとして位置付く。</li> <li>● 燃料面では、トリチウム自給(増殖ブランケット+回収・精製・在庫管理)が原型炉の成立条件であり、ITERのTBM(Test Blanket Module)計画が「実機条件での初の体系試験」として重要。</li> <li>● 最大の技術ギャップは、(i) 14MeV中性子による材料損傷と寿命予測、(ii) 高熱負荷除熱(ダイバータ/第一壁)、(iii) 高稼働率を前提とした遠隔保守・交換性(RAMI)であり、材料照射施設(IFMIF-DONES等)や実機スケール統合試験がボトルネックとなる。</li> <li>● 慣性核融合(IFE)では、NIFが点火(投入2.05MJに対し出力3.15MJ)を達成し、科学的節目を越えた一方、繰返しドライバー、ターゲット製造、熱回収・放射線環境など「発電システム化」のギャップが依然大きい。</li> <li>● 含意として、今後の勝ち筋は「国家プログラム(ITER/BA/DEMO)」と「民間主導のパイロット志向(高磁場・短サイクル開発)」の二層を、共通のS&amp;Tギャップ(材料、燃料サイクル、RAMI)で接続し、サプライチェーンと規格・試験体系を先行整備できるかに集約される。</li> </ul> |



## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-51 タイムライン「フュージョンエネルギー原型炉開発に向けた研究加速」

| 年         | 主な進展やイベント   | 原型炉開発への含意   |
|-----------|---|---|
| 2000-2005 | 【国際枠組】ITER 協定準備、概念設計・工学設計の成熟。<br>【国内動向】ITER 誘致断念、BA 活動の提案。                                      | 大型国際 PJ が「燃焼プラズマ実証」の中心に。以降、QA/調達/統合工学が成功条件として顕在化。                 |
| 2006      | 【国際枠組】ITER 協定が署名され、建設段階へ移行。   | 長期の工程・調達リスクが明確化し、代替/補完パス(小型化・民間主導)の議論が後年強化。                       |
| 2007      | 【国際枠組】ITER 機構 (ITER Organization) 正式設立。   | 多国間での設計凍結・変更管理が重要課題に。   |
| 2010      | 【慣性】NIF が稼働段階へ(高エネルギーレーザー核融合研究の基盤)。   | IFE の物理実証に向けた大型ドライバー研究が本格化。                                       |
| 2015      | 【ステラレータ】W7-X が初プラズマ。  | 長パルス・定常炉に向くステラレータの成立性評価が進展。                                       |
| 2015      | 【磁気/設計】高磁場 HTS を前提としたコンパクト炉概念(ARC 等)の提案。  | 「高磁場×小型化」が開発サイクル短縮の中核オプションとして定着。                                  |
| 2020      | 【磁気/設計】SPARC の設計基盤が学術公開。  | 民間主導の短サイクル実証を支える設計・統合の透明性が向上。                                     |
| 2021-2022 | 【磁気】JET の D-T 実験で 59MJ(2021 年実施、2022 年発表)。  | 燃焼プラズマに近い運転の知見が増加。先進シナリオ/制御が重要レバーに。                               |
| 2022      | 【慣性】NIF が点火(投入 2.05MJ に対し出力 3.15MJ)。  | IFE は物理的節目を通過。ただし発電システム化(繰返し、効率、ターゲット供給)が主戦場に移行。                  |
| 2023      | 【磁気】JT-60SA が初プラズマ(10/23)。<br>【政策】日本の国家戦略(イノベーション戦略)を策定。  | ITER 後を見据えた運転シナリオ・制御知見の獲得が加速。国家として産業化・人材・サプライチェーンを明示。             |
| 2024      | 【国際枠組】ITER が新ベースラインを提示。<br>【政策】DOE が Fusion Energy Strategy 2024 を公表。<br>【磁気】JET が 69.26MJ を報告。 | 工程統合で「実質研究運転の早期化」を狙う一方、DT 運転までの時間軸が延伸。公的戦略はパイロット炉の S&T ギャップ解消に集中。 |
| 2024      | 【材料】DONES プログラムが多国籍協力として具体化。  | 14MeV 中性子材料データ獲得が原型炉のクリティカルパスであることが再確認。                           |
| 2025      | 【政策/実装】英国がプロトタイプ炉(STEP 等)を含む大型投資を表明。<br>【政策】DOE が FIRE Collaboratives を選定。                      | 「研究-実証-産業化」の接続が進展。共通基盤(材料、燃料、RAMI、規格)への投資が勝負所。                    |

## (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-52 キーテクノロジー「フュージョンエネルギー原型炉開発に向けた研究加速」

| 名称                                     | 出現時期・背景  | 定義   | 主要な技術ギャップ   |
|--|--|--|---|
| 高磁場 HTS マグネット(REBCO 等)                 | 出現時期: 2010 年代半ばに REBCO ベース高磁場トカマク設計が具体化(ARC, 2015)。2020 年代前半に SPARC 設計の公表で実機化へ向けた開発が加速。政策・ロードマップ上でも HTS 高磁場が重点技術として位置づけられる(2024)。背景: 高磁場により装置小型化・高性能化が可能で、REBCO テープの臨界電流密度や接合・巻線技術の進展が実用化を後押し。   | 高温超伝導線材を用い、従来 LTS (NbTi/Nb3Sn) より高磁場・高温動作域でトロイダル磁場コイル等を実装。装置小型化・分割保守 (demountable) 設計を可能にする。 | 大電流導体・接続 (ジョイント) 損失、機械応力・クエンチ保護、線材供給と製造品質、炉環境下(放射線/温度)の信頼性。     |
| 高性能・定常運転シナリオ/高精度プラズマ制御                 | 出現時期: 2000 年代から先進シナリオ・定常運転研究が本格化。2010 年代~2020 年代に長パルス・高性能の実証と高精度制御の高度化が進展(W7-X 初プラズマ 2015、JET の D-T 記録更新 2022/2024、JT-60SA 初プラズマ 2023)。国際ロードマップで定常運転・リアルタイム制御が DEMO 必須要件として明確化(2024)。背景: 商用化に向け、連続運転と出力安定化・保護のための縁・不安定性制御、デジタル/AI 活用を含む統合制御の確立が必要であった。 | 高閉じ込め・安定性・定常電流駆動を両立し、長時間運転に必要なプラズマ状態を実現する運転方式と制御技術(リアルタイム診断、予兆検知、AI 活用を含む)。                  | ELM/ディスラプションの回避、定常運転での不純物・放射損失制御、制御モデルの一般化(機種横断)、診断機器の放射線耐性。    |
| トリチウム増殖ブランケット (TBM/DEMO ブランケット)と燃料サイクル | 出現時期: ITER 協定(2006)で TBM 計画が制度化。2010 年代に候補材・概念の設計成熟と試験が進み(ITER TBM 活動レビュー 2020)、2020 年代に ITER での TBM 統合準備と DEMO ブランケット設計が進展。背景: トリチウム自給と閉ループ燃料サイクルは商用炉成立の前提で、ITER での TBM 実証により DEMO/商用炉の設計基盤を確立する狙いがあった。世界的なトリチウム供給制約も動機になった。                          | Li 含有ブランケットでトリチウムを増殖し、抽出・回収・精製・在庫管理まで含めて「燃料自給」を成立させるシステム。ITER の TBM で実機条件の統合試験を行う。           | 増殖比(TBR)確保、抽出・透過抑制、在庫量と損失の低減、化学形態管理、計測・計量管理(核物質管理に準じる要求)。       |
| 高熱流束除熱(第一壁・ダイバータ)とプラズマ縁制御              | 出現時期: 2000 年代~2010 年代に高熱流束受熱体・ダイバータ概念の開発が加速し、2010 年代後半~2020 年代に DEMO 要件 (>10 MW/m <sup>2</sup> 級)を見据えた統合 R&D が進行。長パルス機(W7-X)や大型トカマク(JT-60SA)等が縁・除熱制御検証の主要プラットフォームとして稼働開始した。背景: 熱負荷・不純物制御・デタッチメント維持を両立するため、タングステン系 PFC、先進ダイバータ幾何、リアルタイム縁制御の確立が必須であった。   | 定常・過渡の極端な熱負荷を受ける第一壁/ダイバータを、材料・冷却・縁プラズマ制御(デタッチメント等)で成立させる技術群。                                 | 材料損耗(侵食/溶融)と寿命予測、熱疲労・接合信頼性、冷却材選定と安全、運転窓の拡大(高密度・放射冷却の安定化)。       |
| 14MeV 中性子対応材料・照射データ基盤(DONES 等)         | 出現時期: 2000 年代に IFMIF 構想、2010 年代後半~2020 年代に DONES 計画が具体化し、2024 年に欧州で実施体制構築が進展。DEMO 設計と並行して材料データベース整備が国際アジェンダに。背景: 14 MeV 中性子照射下での構造材・ブランケット材・PFC の信頼性・寿命評価が DEMO のクリティカルパスで、専用核融合中性子源による照射データ取得と標準化が必要。   | 核融合中性子環境での材料損傷(dpa、He 生成等)を評価し、設計許容値・寿命予測モデルを確立するための照射試験・データベース。                             | 照射施設整備とデータ取得のスピード、中性子スペクトル差の補正、設計コードへの反映、規格・認証に耐えるデータ品質(QA/QC)。 |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-53 実用化可能性「フュージョンエネルギー原型炉開発に向けた研究加速」

| セクター                | ユースケースや波及が期待される産業領域  |
|---------------------|--|
| 電力(系統電源)            | ベースロード/ディスパッチャブル電源としてのゼロエミッション電力供給。再エネの変動を補完し、系統安定化(慣性・無効電力等)に寄与。原型炉段階では可用率・保守性の実証が中心。             |
| 産業用高温熱・蒸気           | 化学、精製、紙パ、食品等のプロセス熱の脱炭素化。温度レンジに応じて蒸気供給・直接熱供給・熱電併給の選択肢。  |
| 水素・合成燃料(Power-to-X) | 高温熱+電力を活用した水素製造(高温水電解等)や、合成燃料・化学品(アンモニア、メタノール等)への波及。電力価格と設備稼働率が成立条件。                               |
| 淡水化・地域熱供給           | 海水淡水化や地域熱供給(地域冷暖房)への熱利用。電力と熱の同時需要がある地域での適用可能性。   |
| 高信頼需要地(データセンター等)    | 大規模需要地へのオンサイト/近接立地により、電力の安定供給と送電制約緩和を狙う。放射線安全・立地許認可・冷却水条件が前提。                                      |
| 周辺産業へのスピルオーバー       | HTS サプライチェーン、極低温・真空、遠隔ロボティクス、耐放射線計測、先端材料(タングステン、低放射化鋼)など、他産業へ波及する基盤技術の高度化。材料照射施設(DONES 等)は派生価値も示唆。 |

#### (5) インタビュー結果を踏まえた今後の潮流および研究の方向性

中核研究者へのインタビュー結果に基づき、今後 5 年から 10 年の潮流および研究の方向性を整理した。

表 2-54 今後の潮流および研究の方向性「フュージョンエネルギー原型炉開発に向けた研究加速」

| 項目  | 概要  |
|---|---|
| 新たに浮上している、または今後 5 年から 10 年の間に浮上すると考えられる技術トレンド、技術的ブレークスルーの可能性、技術面の障壁、規制・倫理も含む非技術面の障壁 | <p>ブレークスルー技術例</p> <p>極限環境材料(高中性子、高熱流束、プラス真相互作用に耐える構造・機能材料)</p> <p>高温超電導(HTS)を核融合スケールで安定運用する技術</p> <p>革新的冷却・熱管理、燃料サイクル(トリチウムの取扱い・増殖・同位体分離)</p> <p>デジタルツインによる閉じ込め・運転最適化や、照射施設を代替する材料健全性の予測・診断、炉全体システムの AI による安全検知、運転制御、フィジカル AI による遠隔保守など(ただし一部はすでにムーンショット課題)</p> <p>非技術障壁</p> <p>液体 He の供給制約、材料となるレアアースなどのサプライチェーン上の課題</p> |
| 他分野研究連携の必要性   | <p>社会・経済との連携が不可欠。LCA や LCC を併走させ、何を「発電実証成功」と定義するか研究側と政策側で共有する必要</p> <p>材料・情報科学・ロボティクスの連携による保守・沿革作業の自動化、強放射線区域対応技術の開発は1F廃炉研究とも接続可能。</p>  |
| わが国のアセット(人材・インフラ等)と国外プレイヤー・チームとの比較  | (1F 事故以降の大学の高度人材、インフラへの支援の縮退に対する課題意識は後述)  |

| 項目  | 概要   |
|---|--|
| 今後5年から10年の間において潮流となり得る研究の方向性                  | フュージョン・エンジニアリングのギャップ解消。上述の 1~3 やフィジカル AI を含むロボティクスのほか、プラズマ周辺壁相互作用のマネジメント等を含むデジタルツインはムーンショット課題との重複を避けつつ、材料・炉工学に軸足を置くのが効果的。高強度の新構造材料、タングステン代替の高温材料、HTS を核融合スケールで運用するためのクライオ(液体 He 確保含む)技術など  |
| 今後の当該分野において優先すべき研究課題・支援形態                     | ALCA-Next 等、エネルギー・カーボンニュートラル系プログラムでもフュージョン関連テーマ可能。<br>1F事故以降、大学の原子力・核融合関連インフラは大きく縮退。公的支援が乏しく高度研究人材の育成機能が衰退。特に材料・燃料分野の人材は極端に少ない。研究費はQST、JAEAに集中、METI 補助金もスタートアップ育成に軸足。大学工学系が支援空白地帯であり手当が急務。<br>PD/PO の人選が成果を左右する。核融合・炉工学を俯瞰できる統括候補として、室賀健雄先生。 |
| ドラフト版として作成した「潮流」「時系列整理」「キーテクノロジー」等のアウトプットの過不足 | 原型炉(プロトタイプ)を国策として定義しているのは日本・欧州・中国・韓国であり米は異なる。<br>「最大の技術ギャップ」はおおむね妥当だが、閉じ込め様式(磁場閉じ込め等)に依存する課題<br>日本の ITER 誘致断念、その後の BA 活動(2005 年~)を追記。  |

## (6) 出所

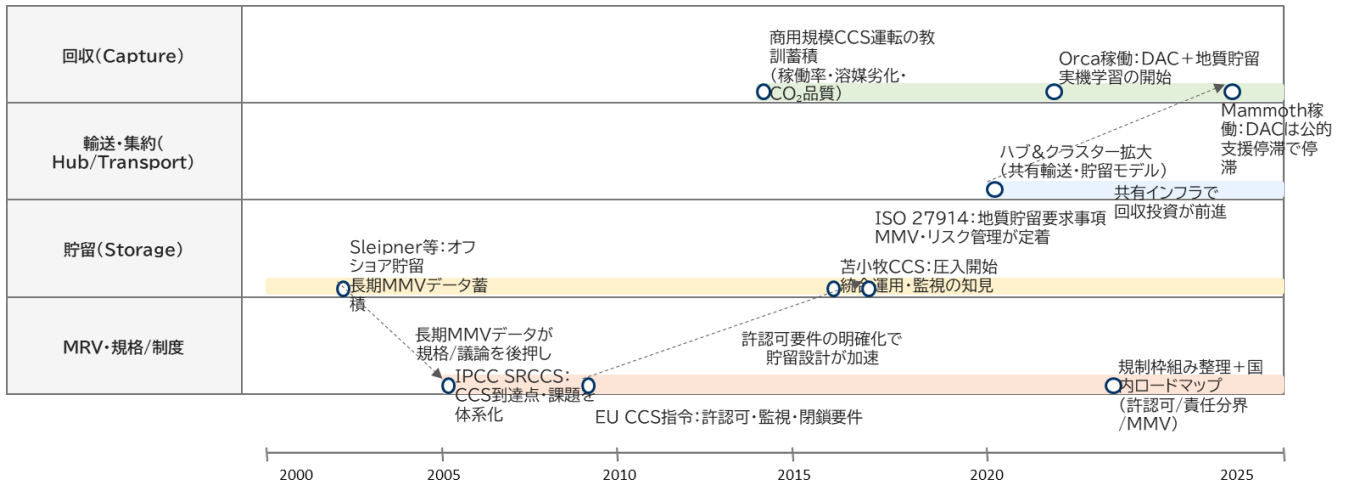
|   |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● JST-CRDS, 研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野(2024 年), CRDS-FY2024-FR-02, 2024-2025. <a href="https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2024-FR-02.html">https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2024-FR-02.html</a>, 2025 年 12 月 19 日アクセス</li> <li>● 内閣府(CSTI), フュージョンエネルギー・イノベーション戦略, 2023-04-14. <a href="https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/fusion_senryaku.pdf">https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/fusion_senryaku.pdf</a>, 2025 年 12 月 19 日アクセス</li> <li>● U.S. Department of Energy, Fusion Energy Strategy 2024, 2024-06. <a href="https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-06/fusion-energy-strategy-2024.pdf">https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-06/fusion-energy-strategy-2024.pdf</a>, 2025 年 12 月 19 日アクセス</li> <li>● ITER Organization, Updated baseline presented, 2024-06-20. <a href="https://www.iter.org/node/20687/updated-baseline-presented">https://www.iter.org/node/20687/updated-baseline-presented</a>, 2025 年 12 月 19 日アクセス</li> <li>● Max Planck Institute for Plasma Physics (IPP), The implications of the new ITER schedule, 2024-07-03. <a href="https://www.ipp.mpg.de/5434926/ITER_baseline_2024">https://www.ipp.mpg.de/5434926/ITER_baseline_2024</a>, 2025 年 12 月 19 日アクセス</li> <li>● U.S. Department of Energy, DOE National Laboratory Makes History by Achieving Fusion Ignition, 2022-12-13. <a href="https://www.energy.gov/articles/doe-national-laboratory-makes-history-achieving-fusion-ignition">https://www.energy.gov/articles/doe-national-laboratory-makes-history-achieving-fusion-ignition</a>, 2025 年 12 月 19 日アクセス</li> <li>● EUROfusion, The EUROfusion Roadmap, <a href="https://eurofusion.org/eurofusion/roadmap/">https://eurofusion.org/eurofusion/roadmap/</a>, 2025 年 12 月 19 日アクセス</li> <li>● EUROfusion, DEMONSTRATION POWER PLANT DEMO, <a href="https://eurofusion.org/programme/demo/">https://eurofusion.org/programme/demo/</a>, 2025 年 12 月 19 日アクセス</li> <li>● Creely, A.J. et al., 'Overview of the SPARC tokamak', Journal of Plasma Physics, 86(5), 2020. <a href="https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-plasma-physics/article/overview-of-the-sparc-tokamak/DD3C44ECD26F5EACC554811764EF9FF0">https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-plasma-physics/article/overview-of-the-sparc-tokamak/DD3C44ECD26F5EACC554811764EF9FF0</a>, 2025 年 12 月 19 日アクセス</li> <li>● Sorbom, B.N. et al., 'ARC: A compact, high-field, fusion nuclear science facility and demonstration power plant with demountable magnets', Fusion Engineering and Design, 100, 2015. <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920379615302337">https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920379615302337</a>, 2025 年 12 月 19 日アクセス</li> <li>● ITER Organization, Tritium breeding, <a href="https://www.iter.org/machine/supporting-systems/tritium-breeding">https://www.iter.org/machine/supporting-systems/tritium-breeding</a>, 2025 年 12 月 19 日アクセス</li> </ul> |
|---|

- ITER Organization, Perfecting tritium breeding for DEMO and beyond, 2020-05-18. <https://www.iter.org/node/20687/perfecting-tritium-breeding-demo-and-beyond>, 2025年12月19日アクセス
- Fusion for Energy (F4E), First tokamak plasma for JT-60SA, 2023-10-24. <https://fusionforenergy.europa.eu/news/first-tokamak-plasma-for-jt-60sa/>, 2025年12月19日アクセス
- QST, JT-60SA has been certified by GUINNESS WORLD RECORDS™ as the world's largest tokamak, achieving a plasma volume of 160 cubic meters, 2024-10-04. <https://www.qst.go.jp/site/news/20241004.html>, 2025年12月19日アクセス
- Max Planck Society, JET fusion facility sets a new world energy record, 2022-02-10. <https://www.mpg.de/18250857/jet-fusion-facility-new-world-energy-record>, 2025年12月19日アクセス
- ITER Organization, JET beats its own record, 2024-02-12. <https://www.iter.org/node/20687/jet-beats-its-own-record>, 2025年12月19日アクセス
- ITER Organization, First plasma for Wendelstein 7-X fusion device, 2015-12-10. <https://www.iter.org/actualites-iter/first-plasma-wendelstein-7-x-fusion-device>, 2025年12月19日アクセス
- Fusion for Energy (F4E), DONES Programme collaboration takes shape, 2024-04-11. <https://fusionforenergy.europa.eu/news/dones-programme-collaboration-takes-shape/>, 2025年12月19日アクセス
- Major funding milestone for world-first prototype fusion plant, 2025-06-12. <https://www.gov.uk/government/news/25-billion-for-world-first-prototype-fusion-energy-plant>, 2025年12月19日アクセス
- U.S. Department of Energy Announces Selectees for \$107M Fusion Innovative Research Engine Collaboratives, and Progress in Milestone Program Inspired by NASA, 2025-01-16. <https://www.energy.gov/articles/us-department-energy-announces-selectees-107-million-fusion-innovation-research-engine>, 2025年12月19日アクセス
- Alejaldre, C., IFMIF-DONES: Current status of the facility (slides), CDTI, 2022-2023. [https://www.cdti.es/sites/default/files/2023-12/bsbf2022\\_presentations\\_plenaryi\\_3\\_ifmif\\_dones\\_carlos\\_alejaldre\\_v2.pdf](https://www.cdti.es/sites/default/files/2023-12/bsbf2022_presentations_plenaryi_3_ifmif_dones_carlos_alejaldre_v2.pdf), 2025年12月19日アクセス
- ITER Organization, Agreement on the Establishment of the ITER International Fusion Energy Organization for the Joint Implementation of the ITER Project. <https://www.iter.org/sites/default/files/ITERAgreement.pdf>, 2025年12月19日アクセス
- ITER Organization, The ITER Organization (established on 24 October 2007), <https://www.iter.org/about/iter-organization>, 2025年12月19日アクセス
- IAEA, World Fusion Outlook 2024, 2024-11. [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/p15777-24-02766E\\_WFO\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/p15777-24-02766E_WFO_web.pdf), 2025年12月19日アクセス
- IAEA, Annual Report for 2023: In Focus - Fusion Energy, 2023. <https://www.iaea.org/publications/reports/annual-report/2023/in-focus/fusion-energy>, 2025年12月19日アクセス
- Fusion Industry Association, The global fusion industry in 2024, 2024-07. <https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/2024/07/2024-annual-global-fusion-industry-report.pdf>, 2025年12月19日アクセス
- Giancarli, L.M. et al., 'Overview of recent ITER TBM Program activities', Fusion Engineering and Design, 2020. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920379620302222>, 2025年12月19日アクセス

## 2.3.2 潮流 B2:CO2 回収・貯留「革新的 CO2 回収・貯留・利用技術」

### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



※バーは「顕著に発展・活用が進んだ時期」の目安である。

出所) 点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き: 影響が及ぶ方向 (起点から波及先) を示す。  
 矢印上のラベル: 影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-11 技術的進歩と方向性の概要図「革新的 CO2 回収・貯留・利用技術」

表 2-55 技術的進歩と方向性(概要)「革新的 CO2 回収・貯留・利用技術」

| 概要  |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● CCUS は「単一設備の実証」から「産業クラスター・ハブによるネットワーク型インフラ」へ移行しつつある。輸送(パイプライン・CO<sub>2</sub> 船)と大規模貯留(特に塩水帯水層・オフショア)がボトルネックから成長領域へ転じている。</li> <li>● 回収技術は、燃焼後アミン吸収の高度化に加え、固体吸着材・膜分離・電気化学的分離など「低エネルギー化/電化・モジュール化/低濃度源対応」が主軸となっている。</li> <li>● 大気直接回収(DAC)は、研究アジェンダから実装・スケール学習の段階へ入り、モジュール化設備の稼働(例: Orca 2021, Mammmoth 2024)が技術学習を加速させている。ただしトランプ政権後米国の政策変更等により公的支援が弱まり、コスト高・削減量の限界が露呈。(インタビュー)</li> <li>● 貯留では、サイト評価・地層シミュレーション、MMV(測定・監視・検証)の高度化、責任分界(site stewardship)と規格化(例: ISO 27914)により、長期安全性の実証と社会受容性の担保を技術的に補強する動きが強い。鉱物化が近年の驚き。数か月で急速に進む例もある。(インタビュー)</li> <li>● 利用(CCU)は二極化が進む。①長寿命固定化(鉱物化・建材化、反応性岩石への鉱物化貯留)と、②再エネ電力・水素を前提とした CO<sub>2</sub> 還元(メタノール、合成燃料、CO<sub>2</sub> 電解還元等)。前者は「永続性」の観点で注目度が高い一方、後者は電力・水素コストと装置耐久性が支配的ギャップである。</li> <li>● 横断的な技術ギャップ: ①回収のエネルギー・廃熱統合、②材料劣化(酸化・不純物・水分)と保全、③スケールアップ(接触器・モジュール製造、圧縮・乾燥)、④貯留の圧力管理と MMV のコスト低減、⑤CCU の LCA・純削減性(副反応・電力由来)評価の標準化。</li> </ul> |

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-56 タイムライン「革新的 CO2 回収・貯留・利用技術」

| 年         | 主な進展やイベント  | 技術的な含意  |
|-----------|--|---|
| 2000-2004 | 【貯留】北海等でのオフショア貯留・MMV の知見蓄積が進む(Sleipner 等の長期データ)。                     | 【横断】「貯留の挙動を測って説明できる」という前提(MMV)が、以降の規格化・社会受容の基盤になる。                  |
| 2005      | 【横断】IPCC SRCCS が CCS 技術の到達点・課題を体系化。                                  | 【横断】R&D の論点(回収エネルギー、輸送・貯留のリスク管理、制度・責任分界)が明確化し、各国の実証投資の参照枠となる。       |
| 2009      | 【貯留】EU CCS 指令(2009/31/EC)が地質貯留の許認可・監視・閉鎖要件を提示。                       | 【横断】「技術」としての貯留要件が規制で具体化し、プロジェクト設計で MMV と責任分界が必須要素となる。               |
| 2014      | 【回収/貯留】商用規模 CCS プロジェクトの運転・教訓が蓄積(発電・産業含む、世界のプロジェクト増)。                 | 【横断】エンジニアリングと O&M(溶媒劣化、稼働率、CO2 品質、圧縮等)の課題が顕在化し、「コストの学習」フェーズへ。       |
| 2016      | 【貯留】苫小牧 CCS 実証で圧入開始(統合運用・監視の知見が蓄積)。                                  | 【貯留】国内でも「運用しながら監視し説明する」実務が具体化。将来の大規模展開に向け、港湾・沿岸立地との整合が論点化。          |
| 2017      | 【貯留】ISO 27914 が地質貯留の要求事項を国際規格として提示/Sleipner の長期監視知見が整理。              | 【横断】規格と実測データが連動し、MMV・モデル同定・リスク管理がプロジェクトの設計要件として定着。                  |
| 2019      | 【回収】負の排出(CDR)技術の研究アジェンダが整理(National Academies 報告)。                   | 【横断】DAC 等の「低濃度源」回収が、研究テーマから政策・実装議論の中核へ移行する基盤が形成。                    |
| 2020      | 【横断】CCUS ハブ&クラスター(共有輸送・貯留)の事業モデルが拡大し、プロジェクトパイプラインが急増。                | 【横断】単体コスト最適より「ネットワーク最適(集約・稼働率・容量確保)」が支配因子に。輸送・貯留容量がボトルネック化。         |
| 2021      | 【回収/貯留】Orca(DAC+地質貯留)が稼働し、実機データに基づく学習が開始。                            | 【回収】材料寿命・圧損・熱源統合など、ラボでは見えにくい設計制約が顕在化。モジュール化と製造スケールが重要に。             |
| 2022      | 【横断】CCUS の法規・規制枠組み整理(IEA ハンドブック等)/日本でも CCS 長期ロードマップ検討が進む。            | 【横断】許認可、責任分界、CO2 品質、MMV 要求が事業性に直結。技術成熟と同時に「規制適合設計」が必須化。             |
| 2023      | 【回収】CDR の位置づけ・技術課題の整理が進展(DOE 等)。                                     | 【横断】DAC/BECCS 等のスケール戦略(熱源・用地・水・インフラ)を含む「システム工学」が中核課題として前面化。         |
| 2024      | 【回収/貯留】Mammoth(DAC+貯留)が稼働/CCS の最新動向が Global Status of CCS 2024 等で更新。 | 【横断】商用化の律速が「装置・材料の供給能力」「運用の標準化」「貯留容量の確保」へ移る。実装フェーズの学習曲線が加速。         |
| 2024      | 【利用】電解 CO2 還元や鉱物化のポテンシャル・課題が学術面で具体化(長期安定、資源制約、LCA 等)。                | 【利用】CCU は「永続固定化」と「Power-to-X」で要件が異なる。前者は材料・物流、後者は電力・水素コストと装置耐久性が支配。 |

### (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-57 キーテクノロジー「革新的 CO2 回収・貯留・利用技術」

| 名称                                      | 出現時期・背景  | 定義  | 主要な技術ギャップ   |
|---|--|---|---|
| 次世代溶媒吸収+プロセス強化(燃焼後回収)                   | 出現時期: 2000 年代にアミン吸収が CCS の主流として確立(IPCC SRCCS, 2005)。2010 年代に水分低減・相分離・高安定アミンなど次世代溶媒と、熱統合・高度充填材等のプロセス強化研究が加速。2020 年代にパイロット~実証が拡充。<br>背景: 従来 MEA の高い再生熱・劣化・腐食・酸素共存ガス対応の課題を解消し、コストとエネルギー負荷を低減するため。   | 排ガス中 CO2 を化学吸収(アミン等)で分離し、熱統合・プロセス強化(高性能溶媒、吸収塔/再生器設計、廃熱利用)でエネルギーを最小化する。                      | 再生エネルギー(蒸気)削減、溶媒劣化(酸化・不純物)と腐食、運転柔軟性、スケールアップ時の吸収塔・熱交換器の設計最適化。                                |
| DAC(大気直接回収) — モジュール式固体吸着/液体系            | 出現時期: 2010 年代に固体吸着モジュール型・液体溶媒型の開発が加速。固体吸着では Climeworks が 2021 年に世界初の商用プラント Orca 稼働、2024 年に Mammoth 稼働。液体系では Carbon Engineering 技術を用いた米テキサスの大規模プラント建設が 2022 年開始。<br>背景: 分散排出への対応とネットゼロ達成に向けたネガティブエミッションの必要性。モジュール化によるスケール拡大と学習効果、地質貯留との統合が進展。                     | 大気(~420 ppm)から CO2 を回収し、貯留または利用へ接続する。固体吸着(TVSA 等)やアルカリ吸収+Ca ループ等が代表。                        | 吸着材/溶液の寿命、空気側圧損と送風動力、低炭素熱源の確保、回収 CO2 の乾燥・圧縮、製造・設置の量産体制(BOP 含む)。                             |
| 電気化学的 CO2 分離(pH スイング/レドックス媒介)           | 出現時期: 2010 年代後半に概念実証が進み、2022 年に電気化学 pH スイング法やレドックス媒介法の低エネルギー・連続運転の実験報告が相次ぐ。<br>背景: 熱再生を要する溶媒吸収のエネルギー負荷・システム制約を回避し、再エネ電力と親和的な分離手段を確立する狙い。   | 電気化学反応で溶液の pH や結合状態を変化させ、CO2 の吸収・放出を制御する。熱駆動から電力駆動へシフトし、再エネ電力との親和性が高い。                      | 電極/レドックス分子の耐久性、連続流運転でのスケール・汚染、電力消費(セル電圧)低減、ガス処理(湿度・不純物)への頑健性。                               |
| 大規模地質貯留の確実化(サイト評価+MMV 統合+規格)            | 出現時期: 1996 年北海 Sleipner での貯留開始以降、20 年超の MMV 知見が蓄積。2009 年 EU 指令で法制度化、2017 年 ISO 27914 で規格化。2010 年代~2020 年代に統合 MMV・サイト評価・運用の実証(苫小牧ほか)が整備・拡充。2024 年は世界の案件数・規模が拡大。<br>背景: 漏洩リスク管理と環境・安全性の担保、投資可能性確保のための制度・標準・長期モニタリングの確立。  | 塩水帯水層・枯渇油ガス田等に CO2 を圧入し、長期封じ込めを実証・保証する。モデル(地層シミュレーション)と MMV(地震探査、井戸内計測等)を統合し、規格・規制要件に適合させる。 | 不確実性の定量化(データ同化)、圧力管理・誘発地震リスク、MMV コストの低減と標準化、閉鎖後責任のための技術要件整理。                                |
| CO2 利用(CCU): 鉱物化固定化 + Power-to-X(電解還元等) | 出現時期: 鉱物化は 2010 年代前半から現地実証(アイスランド CarbFix 等)とスケールアップ(CarbFix2、2020 前後)の成果報告。2020 年代にはコンクリート等で商用展開が拡大。Power-to-X は 2010 年代に CO2 電解還元・水電解 H2 利用が進展し、2024 年に多炭素化合物の高選択・高安定化の成果報告。各種合成燃料実証も進行。<br>背景: 鉱物化は長期・安全な固定化と建材性能向上、PtX は再エネ由来電力・水素を化学品・燃料に変換して産業・輸送の脱炭素化を狙う。 | 回収 CO2 を長期固定(鉱物化・建材化) / 反応性岩石への鉱物化)する、または再エネ電力・水素を用いて化学品・燃料へ変換する。                           | 鉱物化: 反応速度・原料供給・物流、製品規格と品質保証、潜在量と LCA。Power-to-X: 触媒/電極の長期安定、選択率・電解効率、電力/水素コスト、スケールアップと下流分離。 |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-58 実用化可能性「革新的 CO2 回収・貯留・利用技術」

| セクター                 | ユースケースや波及が期待される産業領域   |
|----------------------|---|
| セメント・コンクリート          | キルン排ガスの回収 + 貯留、コンクリート養生・副産物への鉱物化固定(長寿命固定化)。                     |
| 鉄鋼・化学(プロセス排ガス)       | 高濃度/高圧源での回収・圧縮の優位性を活かし、クラスター型輸送・貯留へ接続(沿岸工業地帯との親和性)。             |
| 精製・石油化学クラスター         | 複数設備からの CO2 を集約し、共通インフラ(圧縮・乾燥・輸送・貯留)で稼働率を確保するハブ&クラスターが適用しやすい。   |
| CO2 除去(CDR)          | DAC + 地質貯留(Orca/Mammoth 等)により「供給制約の少ない除去」を実装。エネルギー源と用地・物流が立地要件。 |
| 建材・鉱物資源産業            | 反応性資源(スラグ等)の供給がある地域で、鉱物化(カーボネーション)による固定化・製品化がスケールしやすい。          |
| 合成燃料・化学品(Power-to-X) | CO2 電解還元や触媒変換により CO/ギ酸/炭化水素等を製造。再エネ電力・水素の低コスト化と長期安定運転が成立条件。     |
| オフショア貯留を核とする港湾インフラ   | CO2 船・中継基地と組み合わせ、国内外の排出源を受け入れる「貯留サービス」化の余地(規格・許認可が鍵)。           |

#### (5) インタビュー結果を踏まえた今後の潮流および研究の方向性

中核研究者へのインタビュー結果に基づき、今後 5 年から 10 年の潮流および研究の方向性を整理した。

表 2-59 今後の潮流および研究の方向性「革新的 CO2 回収・貯留・利用技術」

| 項目  | 概要   |
|---|--|
| 新たに浮上している、または今後 5 年から 10 年の間に浮上すると考えられる技術トレンド、技術的ブレークスルーの可能性、技術面の障壁、規制・倫理も含む非技術面の障壁 | <p>トレンド候補</p> <p>低純度 CO2 のまま扱う前提での貯留・輸送・材料健全性設計(配管腐食、地下反応、社会受容性)</p> <p>AI×MMV(自動検出・識別・予測)によるモニタリングの高度化、小型センサー群 + 小型震源による頻繁・沿岸向け計測</p> <p>地下鉱物化(かんらん岩・玄武岩等)の条件出し、空隙率制約下での注入・反応制御設計・容量評価</p> <p>マイクロ/ナノバブルによる溶存注入・浮力抑制・反応促進の装置・計測・理論分子動力学・第一原理計算に AI を統合した多スケール反応・劣材料劣化予測障壁</p> <p>CCS ではキャプチャーコストが全体の過半を占める。回収のブレークスルー技術が未確立。</p> <p>社会受容では地下水影響への感度が高く、純度管理・リスクミが必須</p> |
| 他分野研究連携の必要性   | <p>センサー製造・小型震源設計とデータ解析(AI・信号処理)を統合する学際プロジェクトを想定</p> <p>センサー製造とセンサーを使った解析の統合による設計最適化</p>  |
| わが国のアセット(人材・インフラ等)と国外プレイヤー・チームとの比較  | <p>強み: 大企業によるキャプチャープラント技術、センサー技術、地震学のデータ基盤</p> <p>弱み: 装置試作・製造人材・国内部材の不足</p> <p>比肩: 鉱物化は世界的に探索段階であり横並び。</p>   |

| 項目                           | 概要   |
|------------------------------|--|
| 今後5年から10年の間において潮流となり得る研究の方向性 | 上述トレンド候補に同じ。   |
| 今後の当該分野において優先すべき研究課題・支援形態    | 上述トレンド候補に加え、キャプチャーコスト低減(アミン系改良、膜・物理吸着の高スループット化)に関する基礎学際連携のためのテーマ設定(理学と工学の橋渡し、AI・HPC を共通言語とする)が有効 |

## (6) 出所

- JST 研究開発戦略センター(CRDS)「研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野(2024年)」CRDS-FY2024-FR-02(2024), <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2024-FR-02.html>
- NEDO, TSC Foresight, 「カーボンリサイクル分野(CO2 分離回収技術)の技術戦略策定に向けて」(2024), <https://www.nedo.go.jp/content/100972281.pdf>
- IPCC, Carbon Dioxide Capture and Storage, 2005, <https://www.ipcc.ch/report/carbon-dioxide-capture-and-storage/>
- IPCC, IPCC Sixth Assessment Report, Working Group III: Mitigation of Climate Change, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
- IEA, Carbon Capture Utilisation and Storage, <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage>
- IEA, Legal and Regulatory Frameworks for CCUS: An IEA CCUS Handbook, 2022, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/bda8c2b2-2b9c-4010-ab56-b941dc8d0635/LegalandRegulatoryFrameworksforCCUS-AnIEACCUSHandbook.pdf>
- Global CCS Institute, Global Status of CCS 2024, Collaborating for a New-Zero Future, <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2024/10/Global-Status-Report-6-November.pdf>
- 資源エネルギー庁(経済産業省)「CO2 を回収して埋める「CCS」—実証試験を経て、いよいよ実現も間近に(前編),2020, [https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/ccs\\_tomakomai.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/ccs_tomakomai.html)
- 経済産業省, CCS 長期ロードマップ検討会, [https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/ccs\\_choki\\_roadmap/index.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/ccs_choki_roadmap/index.html)
- ISO, ISO 27914:2017 Carbon dioxide capture, transportation and geological storage — Geological storage, <https://www.iso.org/standard/64148.html>
- Clark, D. E. et al. “CarbFix2: CO2 and H2S mineralization during 3.5 years of continuous injection into basaltic rocks at more than 250 °C”, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016703720302106>
- Furre, A. K. et al. “20 Years of Monitoring CO2-injection at Sleipner”, Energy Procedia, 2017, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217317174>
- Climeworks, Orca: the first large-scale plant, <https://climeworks.com/plant-orca>
- Climeworks, Climeworks switches on world’s largest direct air capture plant, <https://climeworks.com/press-release/climeworks-switches-on-worlds-largest-direct-air-capture-plant-mammoth>
- Jin, S. et al. “Low energy carbon capture via electrochemically induced pH swing cycles” Nature Communications, 2022, <https://www.nature.com/articles/s41467-022-29791-7>
- Diederichsen, K. M. et al. “Toward solvent-free continuous-flow electrochemically mediated carbon capture with high-concentration liquid

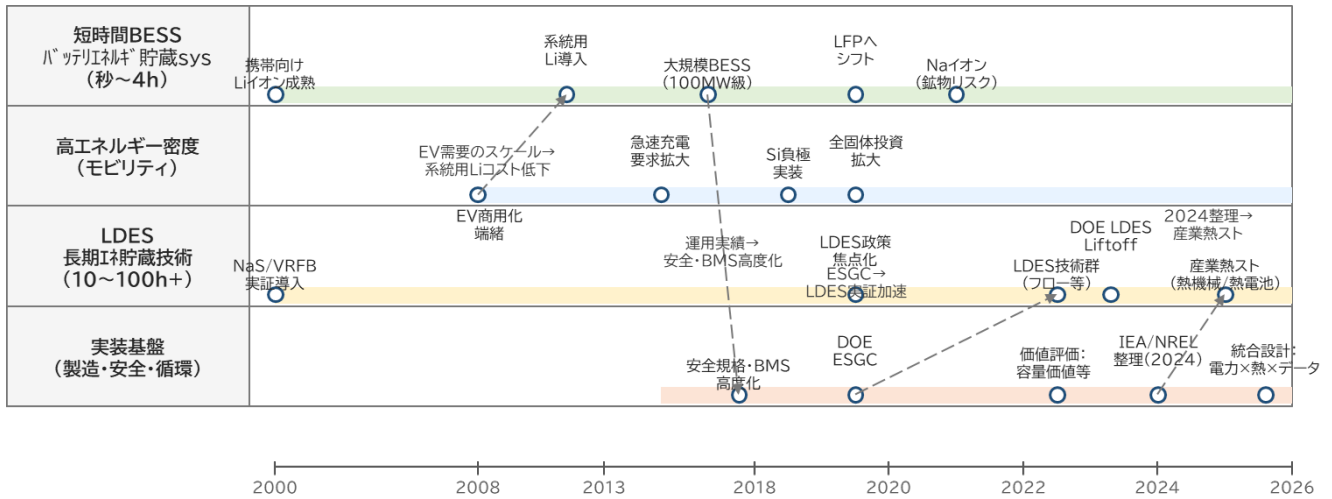
quinone chemistry” Joule, 2022, <https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351%2821%2900541-9>

- Gkotsis, P. et al. “Membrane-Based Technologies for Post-Combustion CO<sub>2</sub> Capture from Flue Gases: Recent Progress in Commonly Employed Membrane” Membranes, 2023, <https://www.mdpi.com/2077-0375/13/12/898>
- Hu, L. et al. “Mixed matrix membranes for post-combustion carbon capture: From materials design to membrane engineering” Chemical Engineering Journal, 2022, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0376738821010802>
- She, X. et al. “Pure-water-fed, electrocatalytic CO<sub>2</sub> reduction to ethylene beyond 1,0000 h stability at 10 A”, Nature Energy, 2024, <https://www.nature.com/articles/s41560-023-01415-4>
- Driver, J. G. et al. “Global decarbonization potential of CO<sub>2</sub> mineralization in concrete materials” PNAS, 2024, <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2313475121>
- De la Varga, I. et al. “CO<sub>2</sub> mineralization in the production of sustainable concrete” 2024, <https://www.carboncure.com/wp-content/uploads/2025/04/84618-Article-Text-268374-1-10-20241230.pdf>
- Energy Transitions Commission, “Carbon Capture, Utilisation & Storage in the Energy Transition”, 2022, <https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2022/08/ETC-CCUS-Report-V1.9.pdf>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, “Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda 2019”, 2019, <https://nap.nationalacademies.org/catalog/25259/negative-emissions-technologies-and-reliable-sequestration-a-research-agenda>
- European Union, “Directive 2009/31/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the geological storage of carbon dioxide and amending Council Directive 85/337/EEC, European Parliament and Council Directives 2000/60/EC, 2001/80/EC, 2004/35/EC, 2006/12/EC, 2008/1/EC and Regulation (EC) No 1013/2006 (Text with EEA relevance), <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2009/31/oj/eng>

### 2.3.3 潮流 B3:蓄エネルギー技術「革新的蓄電技術の発展」

#### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



※バーは「顕著に発展・活用が進んだ時期」の目安である。

出所) 点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き: 影響が及ぶ方向(起点から波及先)を示す。  
 矢印上のラベル: 影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-12 技術的進歩と方向性の概要図「革新的蓄電技術の発展」

表 2-60 技術的進歩と方向性(概要)「革新的蓄電技術の発展」

| 概要  |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● Liイオンの量産成熟(2010年代~)によりコストが低下し、系統用バッテリーエネルギー貯蔵システム(BESS)が急拡大。近年は安全性・供給制約・リサイクル性を織り込んだ化学系(LFP、Naイオン等)へのシフトが進む。</li> <li>● 同時にモビリティ(自動車)領域では高エネルギー密度・急速充電要求が強く、Li金属負極や固体電解質による全固体系、Si系負極の実装など“材料起点のブレークスルー”探索から、工学的には実装を視野に入れることのできる段階へ移行。</li> <li>● 再生電源比率の上昇に伴い、BESSに加えて、より長時間にわたって電力を供給できる Long Duration Energy Storage(LDES)を担う技術(レドックスフロー電池、金属空気電池のほか、液化空気貯蔵システム(LAES)等)の実証が活発化。価値は「ピークシフト」に加え、「リソースアデカシー」「季節変動への橋渡し」「停電時レジリエンス」へ拡張。</li> <li>● 技術選択は“単一最適”から“ポートフォリオ最適”へ。時間軸(秒~月)、出力密度、設置制約、温度レベル(電力/熱)に応じて、複数技術をハイブリッド統合する設計思想が強まる。</li> <li>● 社会実装のボトルネックは材料性能だけでなく、量産プロセス(歩留まり・スループット)、安全規格適合、寿命予測・診断(BMS/デジタルツイン)、資源循環(リサイクル・リユース)へと拡張。</li> </ul> |

#### (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-61 タイムライン「革新的蓄電技術の発展」

| 年         | 主な進展やイベント  | 技術的な含意  |
|-----------|--|---|
| 2000 前後   | Li イオンが携帯機器で成熟。NaS、VRFB 等の定置向け電池が実証段階で導入。                                  | モビリティ以前に定置長時間の“非 Li 系”が先行。安全性と O&M 設計が初期課題。       |
| 2008      | EV 商用化の端緒(高性能 Li イオンの車載適用が加速)。   | 車載需要がスケール要因となり、材料・製造の学習曲線が本格化。                    |
| 2010-2013 | 各国でグリッド蓄電の実証・導入が進展。Li イオンが系統用途へ波及。   | コスト低下とともに“4 時間級 BESS”の基本アーキテクチャが定着。               |
| 2015-2018 | 大規模 BESS が周波数調整・系統安定化で実績(100MW 級の事例が顕在化)。                                  | 安全規格、運用ノウハウ、BMS 高度化が市場拡大の前提条件に。                   |
| 2019-2020 | 全固体電池の開発投資が拡大。DOE が Energy Storage Grand Challenge 等を推進。                   | 次世代電池は“材料ブレークスルー”から“製造・信頼性”課題が中心に。LDES を政策研究が明確化。 |
| 2021      | Na イオンの量産・適用に向けた動きが加速(既存 Li イオン製造との親和性が注目)。                                | 重要鉱物リスクのヘッジとして、化学系の多様化が現実的選択肢に。                   |
| 2022-2023 | 再エネ拡大に伴い LDES の必要性が顕在化。DOE が LDES の“Commercial Liftoff”を整理。フロー電池等の戦略評価も進む。 | 価値評価(容量価値・レジリエンス)を踏まえた実証設計が重要に。                   |
| 2024      | IEA がバッテリー・エコシステムのボトルネックを包括整理。NREL が産業向けエネルギー(熱を含む)ストレージの整理を提示。            | 電力だけでなく“熱”を含む蓄エネルギーが産業脱炭素・系統柔軟性で重要度増。             |
| 現在        | 短時間(秒~4h)は Li イオン中心、長時間(8h~マルチデイ)はレドックスフロー電池/金属空気電池等が併走。用途別最適化とハイブリッド化が進む。 | 技術は用途・時間軸で棲み分け。統合設計(電力×熱×運用データ)が差別化要因。            |

### (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-62 キーテクノロジー「革新的蓄電技術の発展」

| 名称          | 出現時期・背景   | 定義   | 主要な技術ギャップ   |
|-------------|---|--|---|
| 全固体 Li 金属電池 | 出現時期: 1970 年代に固体電解質(高分子・無機)が提案され、2010 年代に Li 金属負極×高導電度硫化物/酸化物で研究が再加速。2020 年代はパイロット・実証段階。<br>背景: EV 向けに高エネルギー密度と安全性の両立ニーズが高まり、界面安定化・デンドライト抑制・量産プロセスが主課題。 | 固体電解質を用い、Li 金属負極を許容することで高エネルギー密度と安全性を狙う次世代電池。  | 固体-電極界面の抵抗・反応、Li デンドライト抑制、厚電極/高面積容量での量産プロセス(積層・加圧・乾燥)と歩留まり。 |
| ナトリウムイオン電池  | 出現時期: 2010 年代に研究・試作が拡大し、2020 年代前半に定置用やコスト重視モビリティ向けで初期商用導入が進行。<br>背景: Li 資源・コストのポラリティに対するサプライチェーン多元化、低コスト材料(硬炭素等)の成熟。一方でエネルギー密度は Li イオン電池より低く用途選別が進む。    | Na+ をキャリアとする二次電池。資源制約が小さく、Li イオン製造設備の転用可能性が高い。 | エネルギー密度(特に負極容量)と低温特性、長寿命化、電解液・SEI 安定化、コスト最適(材料・集電体等)の設計フロア。 |

| 名称                 | 出現時期・背景   | 定義  | 主要な技術ギャップ  |
|--------------------|---|---|--|
| レドックスフロー電池(鉄系・有機等) | 出現時期: 1970~80年代に流電池の基盤技術(Fe/Cr、V系など)が確立。2010年代以降、長時間定置用として再注目し、鉄系・有機系など低コスト化指向の系が開発加速。<br>背景: 出力(kW)と容量(kWh)の独立設計、長寿命・安全性を活かし系統用長時間貯蔵に適合。課題は初期 CAPEX、電解液の安定性・クロスオーバー、有機系の長期耐久。  | 電解液に溶けた活物質の酸化還元で電力を貯蔵。タンクで容量、セルスタックで出力を独立設計できる。 | 電解液の化学安定性/分解、イオン交換膜のコスト・クロスオーバー抑制、システム(ポンプ等)の効率・保守性、低温運転と凍結対策。   |
| 金属空気(鉄空気等)         | 出現時期: 概念自体は古くから知られるが、2010年代後半~2020年代に系統の長時間貯蔵(10~100時間級)用途で再注目・実証が拡大。<br>背景: 可変再エネの大規模導入で長時間貯蔵需要が顕在化。鉄など安価・豊富な材料を用いた低コストポテンシャルが期待される一方、往復効率や寿命の最適化が課題。  | 金属の酸化還元と空気極反応を用いるマルチデイ蓄電。反応物が安価・高容量化が期待。        | 空気極の反応速度・触媒劣化、水管理・封止、反応生成物の形態制御、サイクル寿命とラウンドトリップ効率の両立。            |
| 高温熱エネルギー貯蔵(産業熱電池)  | 出現時期: 熔融塩 TES は CSP で 2010 年代に商用化。2020 年代に産業プロセス熱向けとして熔融塩/固体粒子(砂)/セラミック/炭素ブロック等の「熱電池」実証が各所で進展(例: NREL ENDURING の熱砂コンセプト)。<br>背景: 産業部門の脱炭素と電化、余剰再エネの有効活用、燃料代替のための長時間・高温(しばしば>400~1000°C)貯蔵ニーズ。課題は熱損失・熱交換設計・システム統合と経済性。 | 電力を高温熱として貯蔵し、産業プロセス熱へ直接供給(必要に応じて発電に戻す)。         | 高温材料の耐熱衝撃・腐食、断熱による熱損失低減、熱交換器設計、熱-電力変換を行う場合の効率/コスト、現場設置(安全・保守)要件。 |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-63 実用化可能性「革新的蓄電技術の発展」

| セクター                    | ユースケースや波及が期待される産業領域   |
|-------------------------|---|
| 電力系統(送配電・市場運用)          | 周波数調整、需給調整、混雑緩和、系統増強代替。短時間は Li イオン、長時間はフロー/金属空気/熱機械等の組合せが有効。    |
| 再エネ発電(太陽光・風力)           | 出力平準化、カーテイルメント抑制、ファーム化(時間シフト)。4~12 時間中心に、立地制約が小さい技術の採用余地が拡大。    |
| モビリティ(EV・商用車・鉄道・船舶)     | 高エネルギー密度(全固体、Si 負極)と低コスト(Na イオン等)の二極化。安全性・急速充電・低温性能が実装条件。       |
| 産業(高温プロセス熱)             | 電化+熱貯蔵により、500~1,500°C 級の連続熱需要を再エネ由来電力で賄う。熱電池がピーク電力抑制と系統柔軟性にも寄与。 |
| 重要インフラ(データセンター・病院・防災拠点) | 長時間バックアップとマイクログリッド。安全性・保守性・長寿命を重視し、フローやマルチデイ系の適用余地。             |
| 地域エネルギー(地域熱供給・建物)       | 季節間の熱貯蔵(大型熱貯蔵、地下熱貯蔵)や、ヒートポンプと蓄熱の組合せで電力ピークを平準化。                  |

## (5) インタビュー結果を踏まえた今後の潮流および研究の方向性

中核研究者へのインタビュー結果に基づき、今後 5 年から 10 年の潮流および研究の方向性を整理した。

表 2-64 今後の潮流および研究の方向性「革新的蓄電技術の発展」

| 項目  | 概要   |
|---|--|
| 新たに浮上している、または今後 5 年から 10 年の間に浮上すると考えられる技術トレンド、技術的ブレークスルーの可能性、技術面の障壁、規制・倫理も含む非技術面の障壁 | 研究方向性・研究テーマについては後述のとおり。<br>技術的ブレークスルー実現の障壁<br>特にモビリティ分野では EV 需要動向により新電池の社会実装は遅延しうる<br>技術選択は単一最適ではなく、用途・時間スケール・設置制約・温度環境に応じたポートフォリオ最適化が前提   |
| 他分野研究連携の必要性   | 材料データベース探索などに機械学習・生成 AI は有効だが、蓄電池研究開発は、論文には記載されないノウハウが成否を左右するため、必ず人間の知見と組み合わせる必要がある<br>データサイエンス、プロセス工学、バッテリーマネジメントシステム、熱マネジメント、安全・規制分野との連携が重要。   |
| わが国のアセット(人材・インフラ等)と国外プレイヤー・チームとの比較  | 日本は蓄電池分野での研究ノウハウ・人材の蓄積はなお優位であるが、社会実装・量産局面では中国・韓国の攻勢が強い。経済安保上も国内生産能力の確保は重要<br>欧州は資源循環(リユース・リサイクル)・規制の先行事例が多いが、蓄電池リユースには安全・保障・責任分担に難しさがあり、制度設計を伴う技術開発が必要。  |
| 今後5年から10年の間において潮流となり得る研究の方向性  | インターカレーション反応によるホスト・ゲスト反応を成立させる新たな対象イオンの探索(Li/Na/K に加え、Mg/Ca/Zn/Al、さらにはハロゲン化物イオン等も候補になり得る)<br>安全性研究(製造設備安全性、毒性・環境影響、熱暴走抑制、BMS/熱マネジメント)<br>寿命予測・診断(デジタルツイン等のモデル化とデータ同化、実機データ収集基盤)<br>資源循環(リユース・リサイクルの安全・保障・責任分担の枠組と前処理・回収技術) |
| 今後の当該分野において優先すべき研究課題・支援形態   | 基礎研究の底上げ。30~40 代の若手 PI が基礎研究を継続できるベースファンド拡充(地方大学も含む運営交付金等)<br>大型プログラム(GteX 等)の継続性確保とステージゲートにける学術的価値の評価<br>人材育成(国際学会参加、異分野連携、データサイエンスとの協働)  |

## (6) 出所

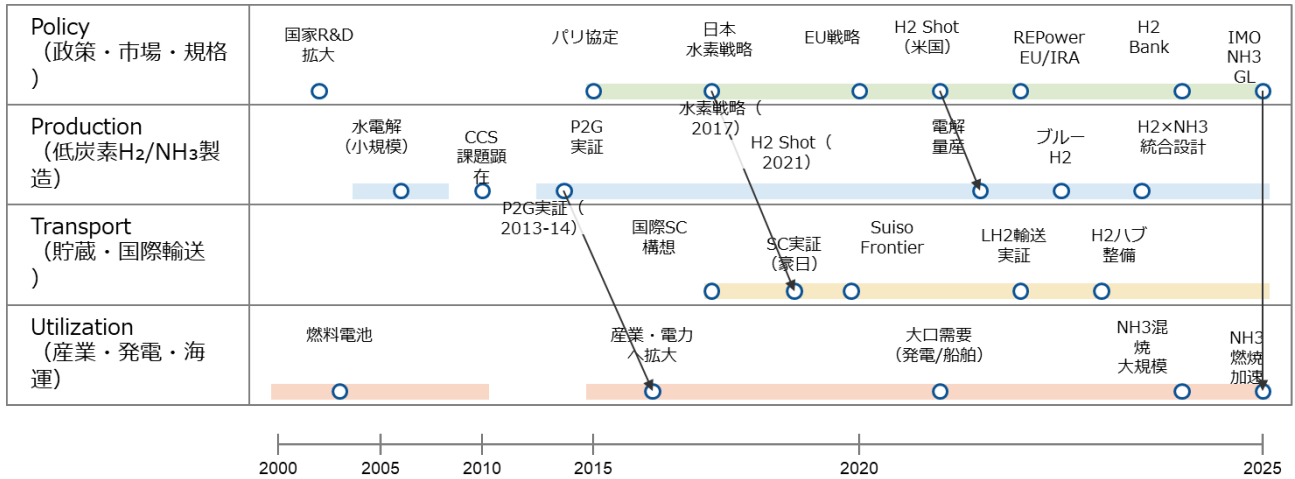
- JST 研究開発戦略センター(CRDS)「研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野(2024 年)」CRDS-FY2024-FR-02, 2024. <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-02.pdf>
- International Energy Agency (IEA), Batteries and Secure Energy Transitions World Energy Outlook Special Report, 25, April 2024, <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions>
- U.S. Department of Energy, Pathways to Commercial Liftoff: Long Duration Energy Storage Opportunities, 2023, [https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-09/Pathways%20to%20Commercial%20Liftoff%20Long%20Duration%20Energy%20Storage%20Opportunities\\_508.pdf](https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-09/Pathways%20to%20Commercial%20Liftoff%20Long%20Duration%20Energy%20Storage%20Opportunities_508.pdf)

- U.S. DOE, Technology Strategy Assessment, Findings From Storage Innovations 2030: Flow Batteries, 2023, <https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-09/4.Technology%20Strategy%20Assessment%20-%20%234%20Flow%20Batteries.508.pdf>
- National Renewable Energy Laboratory, Industrial Energy Storage Review, 2024. <https://docs.nrel.gov/docs/fy25osti/85634.pdf>
- Yao, A. et al., Critically assessing sodium-ion technology roadmaps and scenarios for techno-economic competitiveness against lithium-ion batteries, Nature Energy, 2025. <https://www.nature.com/articles/s41560-024-01701-9>
- He, P. et al., Solid-state batteries encounter challenges regarding the interface involving lithium metal, Nano Energy, 2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211285524002507>
- IEA Energy Storage TCP, Annual Report 2023, [https://iea-es.org/wp-content/uploads/public/ES\\_TCP\\_Annual\\_Report\\_2023.pdf](https://iea-es.org/wp-content/uploads/public/ES_TCP_Annual_Report_2023.pdf)
- Cai, K. et al., Gravity Energy Storage: A Review on System Types, Techno-Economic Assessment and Integration With Renewable Energy, WIREs Energy and Environment, 2024, <https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wene.543>
- NREL, Results Support Cheap Long Duration Energy Storage in Hot Sand, <https://www.solarpaces.org/nrel-results-support-cheap-long-duration-energy-storage-in-hot-sand/>
- 経済産業省, 蓄電池産業戦略の関連施策の進捗状況及び蓄電池を取り巻く主な環境変化について, 2024年11月19日, [https://www.meti.go.jp/policy/mono\\_info\\_service/joho/conference/battery\\_strategy2/shiryo2-3.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/battery_strategy2/shiryo2-3.pdf)

## 2.3.4 潮流 B4:水素・アンモニア「水素・アンモニアの大量製造・輸送・利用技術確立」

### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



※バーは「顕著に発展・活用が進んだ時期」の目安である。

出所)点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き:影響が及ぶ方向(起点から波及先)を示す。  
 矢印上のラベル:影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-13 技術的進歩と方向性の概要図「水素・アンモニアの大量製造・輸送・利用技術確立」

表 2-65 技術的進歩と方向性(概要)「水素・アンモニアの大量製造・輸送・利用技術確立」

| 概要  |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● 2000年代:いわゆる「水素社会」構想が先行し、燃料電池・水素インフラの研究開発が活発化。一方で、再エネコストが高く、低炭素水素の供給(製造)手段が限定的で、実装は限定的にとどまった。</li> <li>● 2000年代後半~2010年代前半:風力・太陽光のコスト低下と系統制約の顕在化により、Power-to-Gas/Power-to-Xが注目。欧州を中心に余剰再エネを水素に変換する実証が進展。</li> <li>● 2015年以降:パリ協定を背景にネットゼロ政策が拡大。水素は「輸送用燃料」だけでなく「産業・電力・化学の脱炭素原料/エネルギー」として位置づけが再定義された。</li> <li>● 2017~2020年:各国戦略の整備(例:日本の水素基本戦略、EU水素戦略等)により、輸入を含むサプライチェーン構想(液化水素・アンモニア等)が政策の中心テーマに。</li> <li>● 2020年代:大型投資を前提に、(1)電解装置の量産、(2)CCSを伴うブルー水素、(3)国際輸送(LH2/アンモニア)、(4)発電・船舶などの大口需要創出が並行して進む“統合プロジェクト”が主流化。</li> <li>● 技術融合:電解(H2)とアンモニア合成(NH3)、さらにクラッキング/燃焼/燃料品質管理が、単一最適ではなく“システム最適(損失・安全・コスト・規制)”として設計されるようになった。</li> <li>● 陳腐化・研究の停止/縮小の例:乗用車向け水素インフラの急拡大シナリオは、電池EVの急伸により相対的に優先度が低下。一方、産業・海運・長期貯蔵など「代替困難領域」へ重点が移った。</li> <li>● エマージング技術の淘汰軸:①LCAでの優位性(メタン漏えい/電源構成/CO2貯留の確からしさ)、②資源制約(Ir等)、③安全規制の成立、④運用柔軟性(変動電源適合)が、実装可否を左右。</li> <li>● 2023~2025年:アンモニア燃料の安全ガイドライン整備や、発電分野での大型実証が進み、アンモニアは「水素キャリア」から「燃料」へもユースケースが拡張。一方でNOx/N2O、アンモニアスリップの管理が重要課題として顕在化。</li> </ul> |

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-66 タイムライン「水素・アンモニアの大量製造・輸送・利用技術確立」

| 年             | 主な進展やイベント  | 技術的な含意   |
|---------------|--|--|
| 2000～<br>2003 | 主要国で水素・燃料電池の国家 R&D が拡大(“水素経済”概念の浸透)。   | 需要側(燃料電池)中心の技術開発が先行し、供給・輸送(サプライチェーン)は長期課題として残存。          |
| 2004～<br>2008 | 再エネ導入は拡大するが、変動電源の吸収策としての Power-to-Gas はまだ実証段階。水電解は主に小規模用途。   | 大量製造の中心は化石由来(グレー水素)で、低炭素化の経済性が課題。                        |
| 2009～<br>2011 | CCS の技術開発が進む一方、社会受容性・貯留サイト確保がボトルネック。2011 年の東日本大震災以降、エネルギー安全保障と低炭素化の議論が加速。  | “低炭素供給”の実装には、技術に加えて制度・インフラ整備が不可欠であることが顕在化。               |
| 2013～<br>2014 | 欧州で Power-to-Gas 実証(例:独 Falkenhagen 等)が進展。   | 再エネの余剰吸収・長期貯蔵として水素が再評価され、システム統合(電力×化学)が主要論点に。            |
| 2015          | パリ協定採択。  | 水素・アンモニアは“脱炭素の実装手段”として政策の対象になり、需要は産業・電力・燃料へ拡張。           |
| 2017          | 日本が水素基本戦略を策定。  | 輸入も含むサプライチェーン(液化水素・アンモニア等)構想が具体化し、実証・商用化ロードマップが整備。       |
| 2018          | 国際サプライチェーン実証・商用検討(豪州-日本等)が進む。  | 長距離輸送におけるキャリア選択(LH2/アンモニア等)と、受入基地・需要側設備の同時立ち上げが課題に。      |
| 2019          | IEA が「The Future of Hydrogen」を公表。液化水素運搬船「Suiso Frontier」が就航。   | 国際機関の分析により“産業中心の需要創出”が主流となり、輸送インフラ実証が現実段階へ。              |
| 2020          | EU が水素戦略(COM(2020)301)を公表。   | 規模目標(電解容量等)と市場設計(規制、支援)が整い、欧州の案件形成が加速。                   |
| 2021          | 米国 DOE が Hydrogen Shot(“1-1-1”目標)を開始。IEA が「Ammonia Technology Roadmap」を公表。   | コスト目標が技術ロードマップを規定し、アンモニアは肥料用途に加え低炭素エネルギーキャリア/燃料として注目が拡大。 |
| 2022          | Suiso Frontier が日豪間で世界初の国際液化水素輸送実証航海を完了。ロシア・ウクライナ戦争によるエネルギー市場混乱。EU が REPowerEU で 2030 年に再エネ水素 20Mt(域内 10Mt+輸入 10Mt)の目標を提示。米国 IRA 成立。 | 脱炭素に加えてエネルギー安全保障が投資を押し上げ、供給確度の高いハブ・インフラ・輸入契約が重視される。      |
| 2023          | 日本が水素基本戦略を改定。米国 DOE が Regional Clean Hydrogen Hubs を選定(交渉開始)。IMO で代替燃料(アンモニア等)の安全ガイドライン整備が進展。  | “大規模需要の確保”と“制度・安全規格”が同時進行し、サプライチェーン形成が実装フェーズへ移行。         |
| 2024          | EU Hydrogen Bank の初回オークションでプロジェクト選定。日本で大型石炭火力でのアンモニア 20%混焼の大規模実証が開始。   | 補助制度が価格差(グリーンプレミアム)を埋め、発電分野での需要創出が現実化。                   |
| 2025          | IMO がアンモニア燃料船の暫定安全ガイドライン(MSC.1/Circ.1687)を発行。IHI と GE Vernova が大規模アンモニア燃焼技術の開発を加速(試験設備の整備等)。IEA が Global Hydrogen Review 2025 を公表。   | 国際ルール整備が進み、アンモニア燃料の商用化が“技術”から“規制・運用・保険・港湾インフラ”を含む総合課題へ。  |

### (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-67 キーテクノロジー「水素・アンモニアの大量製造・輸送・利用技術確立」

| 名称   | 出現時期・背景   | 定義   | 主要な技術ギャップ   |
|--|---|--|---|
| AEM 水電解 (Anion Exchange Membrane Electrolysis) | 出現時期: 2010 年代に膜・電極材料の性能/耐久性が向上し、2018～2022 年に kW～数百 kW 級の実証と初期商用が出現。2020 年代前半は MW 級のパイロットが一部で計画・進行。<br>背景: PEM/AEL の長所を併せ持ちつつ、貴金属低減・高電流密度・柔軟運転を狙う新興方式。再エネ電力の拡大と水素コスト低減政策が後押し。  | 陰イオン交換膜を用いた水電解。アルカリ環境で非貴金属触媒を活用しつつ、膜により“ゼロギャップ”構造を実現して高電流密度・動的運転を狙う次世代電解方式。                                | 技術ギャップ: 膜/イオノマーの化学安定性(数万時間)、CO <sub>2</sub> 由来炭酸塩による性能低下、スタックシール・耐圧、量産品質管理。<br>必要時間(目安): 4～7 年。<br>理由: 材料系の長期耐久検証と、MW～100MW 級の実運用データ蓄積が銀行融資可能性(bankability)に直結するため。                             |
| SOEC 高温水蒸気電解 (Solid Oxide Electrolysis)        | 出現時期: 1970 年代から学術研究、2000 年代に材料・耐久性が進展。2010 年代後半～2020 年代前半に数百 kW～MW 級の実証・初期商用案件が進行。<br>背景: 高温熱(工場余熱・原子力等)との熱統合で電力原単位を低減できる高効率方式。合成燃料/化学原料連携(CO <sub>2</sub> 利用等)の需要と政策が追い風。  | 700～850℃ 程度の高温で水蒸気を電解し水素を製造する方式。高温熱源との統合により高効率化が期待され、CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O 共電解による合成ガス製造にも展開可能。 | 技術ギャップ: 熱サイクル耐性(起動停止・負荷追従)、電極/電解質界面劣化、シール材、スタック量産と歩留まり、BOP の高温対応。<br>必要時間(目安): 5～10 年。<br>理由: セラミックス系の劣化メカニズム解明と製造スケールアップに時間を要し、系統追従運転の実証が不可欠。  |
| 柔軟運転型 電化 Haber-Bosch(グリーンアンモニア)                | 出現時期: 2018～2023 年に再エネ由来水素+HB のパイロット(数 MW～数十 MW)が始動。2020 年代前半は可変運転・部分負荷対応や動的制御の研究・実証が進展。<br>背景: 変動再エネの出力変動に追随するため、合成ループの柔軟化・モジュール化・デジタル制御が求められる。肥料の脱炭素とエネルギーキャリア/燃料需要が牽引。  | 再エネ電力で得た水素(電解)と空気分離由来の窒素からアンモニアを合成。変動再エネに適合するため、反応ループのターダウン・迅速応答、バッファ(H <sub>2</sub> /電力/熱)を組み込む設計が中核。     | 技術ギャップ: 低負荷運転時の触媒活性維持、圧縮・循環系の効率、熱統合、制御(予測・最適化)、電解・合成の運用協調。<br>必要時間(目安): 3～8 年。<br>理由: 既存 HB 技術を基盤にしつつ、柔軟運転の設備設計・制御の最適化が残課題。複数の実証/初商用が 2020 年代後半に集中する見込み。  |
| 液化水素 (LH <sub>2</sub> )国際輸送サプライチェーン            | 出現時期: 航空宇宙等での LH <sub>2</sub> 取扱は歴史的に存在。世界初の国際海上輸送実証は 2021～2022 年に豪州-日本間で実施(HySTRA/川崎重工「Suiso Frontier」)。2020 年代に大型化へ向けたプロジェクトが計画・検討段階。<br>背景: 各国の水素導入目標と輸入需要(例: REPowerEU)により、長距離・大規模輸送手段の確立が必要。安全規格・設備標準化とコスト低減が課題。 | 水素を-253℃で液化し、極低温タンク・配管・大型運搬船で輸送、受入基地で貯蔵・再ガス化して供給するサプライチェーン。  | 技術ギャップ: 液化効率(kWh/kg-H <sub>2</sub> )改善、BOG 抑制・再液化、極低温材料/断熱の信頼性、港湾・安全コードの国際整合、スケールメリットを前提とした CAPEX 低減。<br>必要時間(目安): 5～10 年。<br>理由: 実証は進むが、商用大型船・複数ターミナルの同時立上げが必要で、規格・保険・運用標準の整備が技術と同程度に時間を要するため。 |

| 名称                             | 出現時期・背景  | 定義  | 主要な技術ギャップ  |
|--------------------------------|--|---|--|
| アンモニア燃料<br>(発電・海運)と<br>排出/安全統合 | 出現時期: 2020 年代に発電向け混焼・専焼の大規模実証が進行(例: JERA 碧南 20%混焼実証、2024 年公表)。海運ではエンジン・燃料システムの実証準備と安全指針の策定が進展。<br>背景: 発電・海運の脱炭素手段として CO2 フリー燃料候補。<br>NOx/N2O/NH3 スリップ等の排出対策(SCR 等)と安全設計・運用ガイドランスの統合が鍵。 | アンモニアを燃料として混焼～専焼で利用(石炭火力、ガスタービン、船舶エンジン等)。燃焼特性(着火性、NOx)と毒性・漏えいリスクに対応したシステム設計が必須。 | 技術ギャップ: 燃焼安定化(クラッキング/水素添加、段燃焼等)、NOx/N2O・アンモニアスリップ低減(燃焼器+後処理)、材料腐食・センサー、港湾バンカリング手順、国際安全規則。<br>必要時間(目安): 混焼の主流化は 3~6 年、専焼・海運での本格普及は 5~10 年。<br>理由: 実証が進む一方、規制・運用・供給(燃料品質/物流)まで含む“総合実装”が必要。 |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-68 実用化可能性「水素・アンモニアの大量製造・輸送・利用技術確立」

| セクター                    | ユースケースや波及が期待される産業領域  |
|-------------------------|--|
| 電力(系統電源)                | ベースロード/ディスパッチャブル電源としてのゼロエミッション電力供給。再エネの変動を補完し、系統安定化(慣性・無効電力等)に寄与。原型炉段階では可用率・保守性の実証が中心。             |
| 産業用高温熱・蒸気               | 化学、精製、紙パ、食品等のプロセス熱の脱炭素化。温度レンジに応じて蒸気供給・直接熱供給・熱電併給の選択肢。  |
| 水素・合成燃料<br>(Power-to-X) | 高温熱+電力を活用した水素製造(高温水電解等)や、合成燃料・化学品(アンモニア、メタノール等)への波及。電力価格と設備稼働率が成立条件。                               |
| 淡水化・地域熱供給               | 海水淡水化や地域熱供給(地域冷暖房)への熱利用。電力と熱の同時需要がある地域での適用可能性。   |
| 高信頼需要地(データセンター等)        | 大規模需要地へのオンサイト/近接立地により、電力の安定供給と送電制約緩和を狙う。放射線安全・立地許認可・冷却水条件が前提。                                      |
| 周辺産業へのスピルオーバー           | HTS サプライチェーン、極低温・真空、遠隔ロボティクス、耐放射線計測、先端材料(タングステン、低放射化鋼)など、他産業へ波及する基盤技術の高度化。材料照射施設(DONES 等)は派生価値も示唆。 |

## (5) インタビュー結果を踏まえた今後の潮流および研究の方向性

中核研究者へのインタビュー結果に基づき、今後 5 年から 10 年の潮流および研究の方向性を整理した。

表 2-69 今後の潮流および研究の方向性「水素・アンモニアの大量製造・輸送・利用技術確立」

| 項目  | 概要   |
|---|--|
| 新たに浮上している、または今後 5 年から 10 年の間に浮上すると考えられる技術トレンド、技術的ブレークスルーの可能性、技術面の障壁、規制・倫理も含む非技術面の障壁 | すでに余地の小さい領域<br>大規模水素製造(水電解)はコスト勝負であり技術的ブレークスルー余地は小<br>トレンド候補<br>水・窒素・酸素の地上確保は未踏。材料・プロセスの基礎研究への投資価値は大<br>植物+水を起点とする水素生成は熱力学的には可能で、バイオ炭によるカーボンキャプチャとの組合せによりネガエミ水素が実現しうる。現在 TRL1~2<br>大気中水分捕集(Water Capture、材料の親疎水性・拡散制御を活用)は Science 誌でも萌芽<br>地産地消型資源循環を前提とした次世代反応技術研究(稲わらからバイオ燃料) |
| 他分野研究連携の必要性   | 材料科学(親疎水性制御のヘテロ界面、電気化学(共電解、電解合成)、燃焼工学(隼酸素燃焼+EGR)、農学(バイオ炭・土壌炭素管理、機械。プロセス(小型ハーバー・ボッシュ)を横断で束ねるような考え方  |
| わが国のアセット(人材・インフラ等)と国外プレイヤー・チームとの比較  | 電気化学の人材層は厚いが、FT・バイオディーゼルの商用技術は脆弱<br>淡水確保技術の研究の動機に薄い(水資源に恵まれていることが背景も、世界全体の淡水確保ニーズは極めて高い)   |
| 今後5年から10年の間において潮流となり得る研究の方向性  | 研究方向性: 上述トレンド候補に加えて以下など<br>CO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> Oの共電解(高温水蒸気電解含む)による「水素ガスを介さない水素利用」ルート拡大<br>地域オンデマンドの小型アンモニア合成(肥料用途・エネキャリア用途の二面性)  |
| 今後の当該分野において優先すべき研究課題・支援形態   | TRL1~3の基礎・橋渡し領域に、さきがけ・CRESTで重点投資し、SIP・GI・GXで実証・スケールアップを接続するプログラム設計が望ましい<br>農水・経産・文科の省庁横断で「地域資源循環×次世代反応」を束ね、バイオ炭・肥料(アンモニア)・水素の統合モデルを全国100拠点規模で展開してはどうか<br>す出に回収プロセスのある残渣(稲わらなど)を分散拠点資源循環の優先対象に選定する  |

## (6) 出所

- JST 研究開発戦略センター(CRDS),「研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野(2024年)」, <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-02.pdf>
- JST-CRDS 戦略プロポーザル「再生可能エネルギーの輸送・貯蔵・利用に向けたエネルギーキャリアの基盤技術」, 2013年3月, <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2012/SP/CRDS-FY2012-SP-08.pdf>
- 資源エネルギー庁,「水素基本戦略の概要」, 令和5年6月, [https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene/shinene/suiso/seisaku/pdf/20230606\\_3.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene/shinene/suiso/seisaku/pdf/20230606_3.pdf)
- European Commission, A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe, COM(2020) 301, 08/07/2020, <https://www.europeansources.info/record/a-hydrogen-strategy-for-a-climate-neutral-europe/>
- European Commission, REPowerEU, <https://commission.europa.eu/topics/energy/repower.eu.en>
- Department of Energy, Hydrogen Shot: An Introduction, 2021,

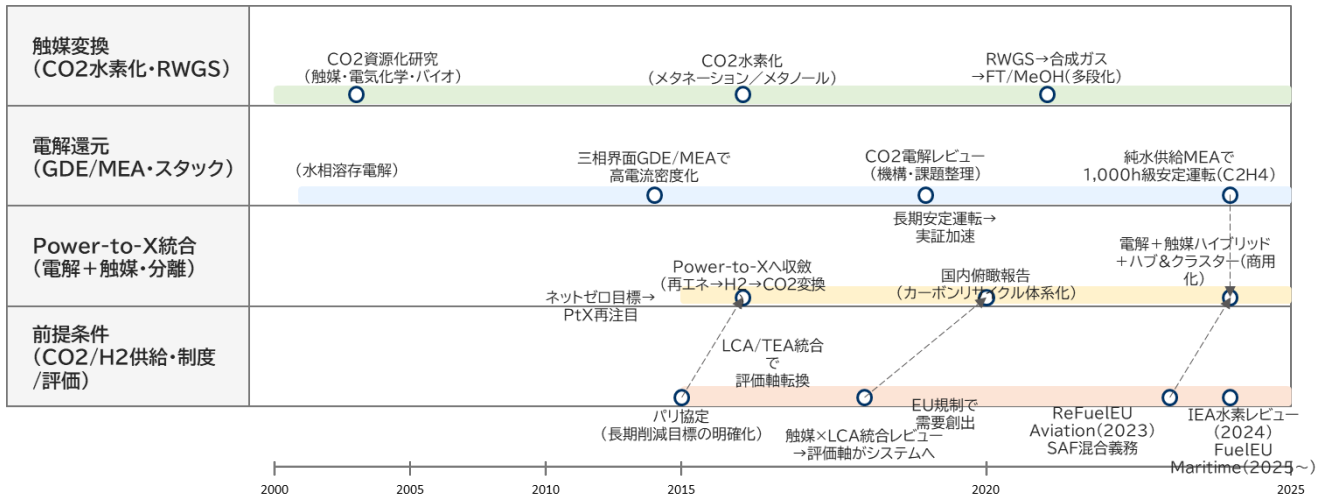
<https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-06/factsheet-hydrogen-shot-introduction.pdf>

- Department of Energy, Regional Clean Hydrogen Hubs, <https://www.energy.gov/cmei/oced/regional-clean-hydrogen-hubs-0>
- 財務研究会、「米国財務アップデート：内国歳入法第 45V 条クリーン水素税額控除に関する最終規則について」, 2025 年 4 月 8 日, <https://www.zeiken.co.jp/kokusaizeimu/article/202504/KZ2025040180101.php>
- IEA, Global Hydrogen Review 2024, <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>
- IEA Global Hydrogen Review 2025, <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025>
- IEA, Ammonia Technology Roadmap: Towards more sustainable nitrogen fertiliser production, 11 October 2021, <https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap>
- IMO, INTERIM GUIDELINES FOR THE SAFETY OF SHIPS USING AMMONIA AS FUEL, MSC.1/Circ.1687, 26 Feb, 2025, <https://www.ukpandi.com/fileadmin/uploads/ukpandi/Documents/uk-p-i-club/articles/2025/msc1-circ1687-interim-guidelines-for-the-safety-of-ships-using-ammonia-as-fuel-secretariat.pdf>
- Bruegel, Lessons from the European Union’s inaugural Hydrogen Bank Auction, 23 May, 2024, <https://www.bruegel.org/analysis/lessons-european-unions-inaugural-hydrogen-bank-auction>
- HySTRA, 世界初、液化水素の大量かつ長距離海上輸送実証試験を開始, 2021.12.24, <https://www.hystra.or.jp/news/article.html#news12>
- JERA: JERA 碧南火力発電所における燃料アンモニア転換実証試験を開始—世界初となる大型の商用石炭火力発電機でのアンモニア 20% 転換の実証, 2024/04/01, [https://www.jera.co.jp/news/information/20240401\\_1863](https://www.jera.co.jp/news/information/20240401_1863)
- K. Trangwachirachai et al., “Recent progress on ammonia cracking technologies for hydrogen production”, Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, October 2024, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S245222362400066X>
- H. Liu et al., “High Temperature Solid Oxide Electrolysis for Green Hydrogen Production”, Chemical Reviews, 2024, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.3c00795>
- S. R. Patlolla et al., “A review of methane pyrolysis technologies for hydrogen production”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403212300179X>
- K. Télessy et al., “Repurposing natural gas pipelines for hydrogen: Limits and options from a case study in Germany”, International Journal of Hydrogen Energy, 2024, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319924027812>
- K. Topolski et al., “Hydrogen Blending into Natural Gas Pipeline Infrastructure: Review of the State of Technology”, NREL report, 2022, <https://docs.nrel.gov/docs/fy23osti/81704.pdf>
- N. Salmon & R. Bañares-Alcántara, “Impact of process flexibility and imperfect forecasting on the operation of Haber–Bosch green ammonia”, RSC Sustainability, 21 April, 2023, <https://www.sciencedirect.com/org/science/article/pii/S2753812523001076>
- C. Smith et al., “The importance of dynamic operation and renewable energy source on the economic feasibility of green ammonia”, Joule, 2023, [https://www.researchgate.net/publication/376969253\\_The\\_importance\\_of\\_dynamic\\_operation\\_and\\_renewable\\_energy\\_source\\_on\\_the\\_economic\\_feasibility\\_of\\_green\\_ammonia](https://www.researchgate.net/publication/376969253_The_importance_of_dynamic_operation_and_renewable_energy_source_on_the_economic_feasibility_of_green_ammonia)

## 2.3.5 潮流 B5:CO2 利用「CO2 を原料とした化学品・燃料合成プロセス」

### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



※バーは「顕著に発展・活用が進んだ時期」の目安である。

出所) 点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き: 影響が及ぶ方向(起点から波及先)を示す。  
 矢印上のラベル: 影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-14 技術的進歩と方向性の概要図「CO2 を原料とした化学品・燃料合成プロセス」

表 2-70 技術的進歩と方向性(概要)「CO<sub>2</sub> を原料とした化学品・燃料合成プロセス」

| 概要  |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● CCU(Carbon Capture and Utilisation)は、回収した CO<sub>2</sub> を直接利用(化学変換なし)または変換利用(化学品・燃料・材料へ変換)する幅広いアプリケーションの総称である。現状の CO<sub>2</sub> 利用は肥料(尿素)用途等の“直接利用”が大宗で、合成燃料・化学品への転換利用はパイプライン拡大途上にある。</li> <li>● CO<sub>2</sub> を炭素源として化学品・燃料を合成する場合、CO<sub>2</sub> は熱力学的に安定であるため、還元剤(主に H<sub>2</sub>)とエネルギー投入が不可欠である。よって、脱炭素効果は(i)電力・水素の低炭素性、(ii)製品中の炭素の滞留時間(燃料は短い)、(iii)システム境界に依存し、触媒性能だけでなく LCA/TEA を統合した評価が主流化している。</li> <li>● 技術潮流は“Power-to-X(再エネ電力→H<sub>2</sub>→CO<sub>2</sub> 変換→燃料・化学品)”に収斂しつつある。特に航空・海運など電化が困難な領域で、低排出 e-fuels(合成燃料)が選択肢として位置付けられ、バイオ起源 CO<sub>2</sub> 活用とのシナジーも指摘される。</li> <li>● CO<sub>2</sub> 水素化(例:メタネーション、メタノール合成)は、既存の化学工業プロセス(触媒反応+分離)を活用しやすい一方で、グリーン H<sub>2</sub> の供給制約・コストと、CO<sub>2</sub> 原料の不純物(硫黄分・酸素・水分など)耐性、触媒寿命、熱管理が実装上のボトルネックとなる。</li> <li>● RWGS(Reverse Water-Gas Shift)等で CO を経由して合成ガス(CO/H<sub>2</sub>)へ変換し、FT 合成やメタノール経由で液体燃料(PtL)・化学品に展開する“間接ルート”は、既存インフラ・燃料仕様への適合性が高い。一方、工程数増によるエネルギー効率低下、CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> 比最適化、装置規模(スケールメリット)確保が課題である。</li> <li>● 低温 CO<sub>2</sub> 電解(GDE/MEA ベース)は、2000 年代の基礎研究から、2010 年代後半以降は高電流密度化・セル設計の進歩により実証志向へとフェーズが移った。現在の焦点は、炭酸塩生成、フラッディング、電極・膜劣化など“長期安定運転を阻害する失敗モード”の解消にある。</li> <li>● 多炭素生成物(C<sub>2</sub>+)の電解合成は依然として難度が高いが、炭酸塩生成抑制や塩析回避を狙った“純水供給(アルカリ金属カチオンフリー)MEA”など、スタックレベルの運転安定性を狙う設計が進展し、1,000 時間級の運転報告も出てきた。</li> <li>● 電解で CO(または合成ガス)を製造し、下流で触媒合成(メタノール、FT 等)を行う“電解+触媒ハイブリッド”は、技術成熟度とモジュール化の観点で現実解になりやすい。CO 製造は C<sub>2</sub>+より選択性制御が比較的容易と整理されることが多い。</li> <li>● CO<sub>2</sub> 利用の実装条件は H<sub>2</sub> に強く制約される。2023 年の世界水素製造は大部分が化石由来で、製造に伴う排出も大きい。従って、CO<sub>2</sub> 由来燃料・化学品の拡大は、低排水素の供給拡大(電解、CCUS 併用等)と同時進行で進む。</li> <li>● 政策・規制は需要創出の主要ドライバーである。EU では ReFuelEU Aviation(SAF 混合義務)や FuelEU Maritime(船舶エネルギーの GHG 強度規制)が段階的に適用され、RFNBO を含む合成燃料の市場形成を促進する設計となっている。</li> <li>● 日本でもカーボンニュートラル文脈でメタネーション等の社会実装検討が進み、合成メタン(e-methane)を含むカーボンリサイクル燃料の位置付けが議論されている。</li> <li>● “CO<sub>2</sub> 供給”は転換技術の前提条件であり、ポイントソースに加え、DAC やバイオ起源 CO<sub>2</sub> の活用が、追加性(additionality)や規制適合の観点で注目される。CO<sub>2</sub> 回収・精製・圧縮・輸送を含むバリューチェーン最適化(ハブ&amp;クラスター化)が、実証から商用化フェーズにおける重要テーマとなっている。</li> </ul> |

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-71 タイムライン「CO<sub>2</sub> を原料とした化学品・燃料合成プロセス」

| 年        | 主な進展やイベント  | 含意  |
|----------|--|---|
| 2000年代前半 | CO <sub>2</sub> を炭素資源として捉える“CO <sub>2</sub> 資源化/利用”の研究が、触媒・電気化学・バイオの各分野で並行的に進展。                            | 反応経路探索が中心。後年の実装議論(LCA/TEA、プロセス統合)の基盤となる知見が蓄積。                                   |
| 2015     | パリ協定の採択(温室効果ガス削減の長期目標が国際的に明確化)。  | ネットゼロに整合する“分子エネルギー”の位置付けが強まり、CO <sub>2</sub> 由来燃料・化学品への関心が再上昇。                  |
| 2018     | 触媒研究と LCA を統合して CO <sub>2</sub> 転換を俯瞰する大規模レビューが公開され、評価軸が“反応選択性”から“システム全体の環境性/経済性”へ拡張。                      | CCU の評価が“製品の種類・用途・電力/水素の由来”に依存することが共有され、研究開発の優先順位付けが進む。                         |
| 2019     | CO <sub>2</sub> 電解還元(特に Cu 系の C <sub>2</sub> + 生成)に関する包括的レビューが公開され、メカニズム理解と課題(選択性・安定性・競争反応)が整理。            | 電解合成の基礎理解が体系化され、GDE/MEA 等の反応器開発と並走する研究が加速。                                      |
| 2020     | CO <sub>2</sub> 資源化に関する国内調査報告が公開され、CO <sub>2</sub> 由来化学品・燃料の技術俯瞰と国内外動向が整理。                                 | 国内の研究開発・実証テーマが“カーボンリサイクル”として体系化され、重点領域の明確化に寄与。                                  |
| 2022     | 低温 CO <sub>2</sub> 電解(GDE ベース)の反応器設計・失敗モード・評価指標を整理した Nature Energy レビューが公開。                                | スケールアップの主要ボトルネック(炭酸塩生成、フラッディング、劣化)を共有し、長期安定性の研究へ焦点が移行。                          |
| 2023     | IEA が e-fuels の役割を整理し、航空・海運での位置付けや、再エネ拡大と電解装置コスト低下の重要性を指摘。   | “CO <sub>2</sub> 利用”は単独技術ではなく、再エネ・水素・CO <sub>2</sub> 供給を束ねたシステム投資として議論される傾向が強化。 |
| 2023     | EU において ReFuelEU Aviation (Regulation (EU) 2023/2405) および FuelEU Maritime (Regulation (EU) 2023/1805) が制定。 | 合成燃料を含む持続可能燃料の需要シグナルが制度として組み込まれ、実証から商用投資へのレバーが増大。                               |
| 2024     | JST-CRDS が環境・エネルギー分野の俯瞰報告書で CO <sub>2</sub> 利用領域を整理し、主要経路(メタネーション、RWGS、FT、メタノール等)を明示。                      | 国内 R&D の位置付けが更新され、CO <sub>2</sub> 利用が“CO <sub>2</sub> 回収・水素・再エネ”と不可分な領域として再確認。  |
| 2024     | 純水供給 MEA による CO <sub>2</sub> → エチレンで 1,000 時間級の安定運転を報告(学術成果)。  | 電解のボトルネックである炭酸塩生成/塩析に対し、スタック設計での解決可能性が示唆され、実証研究の論点が明確化。                         |
| 2024     | IEA が Global Hydrogen Review 2024 を公表し、低排水素の供給が依然限定的であることを報告。  | CO <sub>2</sub> 由来燃料・化学品の拡大には、低排水素のスケールアップが必須であることが定量的に裏付けられる。                  |
| 2025     | FuelEU Maritime は原則 2025 年 1 月 1 日から適用。ReFuelEU Aviation も一部条項は 2025 年から適用され、SAF の最低混合率が段階的に開始。            | 規制対応として e-fuels/SAF の調達・供給網整備が進み、CO <sub>2</sub> 利用技術は“政策起点の市場”で商用化機会が拡大。       |

### (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-72 キーテクノロジー「CO<sub>2</sub> を原料とした化学品・燃料合成プロセス」

| 名称   | 出現時期・背景  | 定義   | 主要な技術ギャップ   |
|--|--|--|---|
| CO <sub>2</sub> 水素化(メタノール合成)                       | 出現時期: 1960 年代に Cu/Zn 系触媒による低圧メタノール合成が確立(CO/CO <sub>2</sub> 混合原料)。CO <sub>2</sub> 由来メタノールは CCU と再エネ水素の普及を背景に 2010 年代に実証・初商用化が進展。<br>背景: 既存メタノールインフラの活用、温室効果ガス削減、再エネ電力の吸収・貯蔵、合成燃料や化学原料需要。                                | CO <sub>2</sub> と H <sub>2</sub> から触媒反応によりメタノールを合成する(CO <sub>2</sub> →CO を経由する場合を含む)。メタノールは燃料・化学品のプラットフォームとして下流展開(MTO/MTA 等)が可能。 | 技術ギャップ:①グリーン H <sub>2</sub> コスト、②CO <sub>2</sub> 原料の不純物耐性と触媒寿命、③熱統合・大型化による CAPEX 低減、④全体 LCA での低炭素性担保。想定時間:5~10 年(安価な再エネ電力・水素供給の拡大と、プラント統合設計の成熟が前提)。 |
| CO <sub>2</sub> メタネーション(Sabatier)／合成メタン(e-methane) | 出現時期: 1902 年に Sabatier 反応として発見。パワートゥガス文脈で 2010 年代に欧州・日本で実証が加速し、2020 年代にガス網適合燃料としての導入が拡大。<br>背景: 既存ガスインフラの脱炭素化、季節間貯蔵・系統調整、再エネ余剰の化学エネルギー化、政策支援。  | CO <sub>2</sub> と H <sub>2</sub> からメタン(CH <sub>4</sub> )を合成し、都市ガス・発電・産業熱等の既存インフラで利用する Power-to-Gas 経路。                           | 技術ギャップ:①系統(ガス網)と連動した運用(需給・貯蔵)、②触媒/反応器の耐久性と部分負荷運転、③合成メタンの“カーボン中立性”の制度設計(CO <sub>2</sub> 源・電力源の認証)。想定時間:3~7 年(技術自体は成熟寄りだが、供給網・制度・コストが支配的)。            |
| RWGS+FT (PtL)／メタノール-to-jet 等(SAF)                  | 出現時期: FT は 1920 年代に確立。CO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> を原料とする PtL (RWGS+FT)および ATJ/MTJ 系は 2010 年代にパイロットが進み、2020 年代に初期商用・供給が開始。ReFuelEU Aviation 等の政策で加速。<br>背景: 航空・海運の脱炭素ニーズ、バイオ資源制約、ドロップイン燃料の必要性、再エネ水素のコスト低下見通しと規制義務化。 | CO <sub>2</sub> を RWGS 等で CO に変換し、H <sub>2</sub> と混合して合成ガス化した上で FT 合成やメタノール経由で液体燃料(ジェット燃料等)を製造する。                                | 技術ギャップ:①多段工程による効率・CAPEX、②合成ガス組成制御と触媒選択性、③大規模化と再エネ/H <sub>2</sub> 供給の同時立地、④燃料規格・認証(SAF)と MRV。想定時間:10~15 年(大規模プロジェクトの建設・運転実績とサプライチェーン確立が必要)。          |
| 低温 CO <sub>2</sub> 電解(CO 製造: GDE/MEA)              | 出現時期: CO <sub>2</sub> 電解自体は 1980 年代から研究。ガス拡散電極(GDE)/MEA 型セルの台頭で 2010 年代半ば以降に高電流密度化が進み、2020 年代に kW 級・パイロット段階へ。<br>背景: 合成ガス/CO 供給の脱炭素、Au/Ag 系触媒や GDE/MEA 設計の進歩、再エネ電力の拡大と CCU 潮流。   | 低温電解セル(GDE/MEA)で CO <sub>2</sub> を主に CO へ変換し、化学品・燃料合成用の CO 源/合成ガス源として用いる。  | 技術ギャップ:①スタック耐久性(万時間級)、②炭酸塩生成と水管理(フラッシング/ドライアウト)、③システム BOP とガス精製、④電力変動への追従。想定時間:3~7 年(産業電解のスケールアップ知見が転用可能で、C <sub>2</sub> +より短期での実証が見込まれる)。          |

| 名称                              | 出現時期・背景   | 定義  | 主要な技術ギャップ   |
|---------------------------------|---|---|---|
| CO2 電解<br>(C2+:エチレン/<br>エタノール等) | 出現時期: Cu 電極での多炭素生成は 1980 年代に基礎知見、2010 年代に GDE/MEA 化で高電流密度化。2024 年にはエチレンで長時間安定運転の報告など性能指標が更新。商用化はなお初期段階。<br>背景: 大規模化学品の電化・脱炭素需要、Cu 系触媒設計・電解セル工学の進展、政策ドライバー。                      | CO2 を電解で多炭素生成物へ直接変換する(Cu 系触媒など)。生成物が燃料・化学品に直接つながる一方、反応網が複雑。             | 技術ギャップ:①高選択性・高エネルギー効率の両立、②長期安定性(炭酸塩/塩析/触媒再配列)、③生成物分離(希薄・多成分)、④スタック設計とスケールアップ。<br>想定時間:8~15 年(最近の進展は大きい、産業要件とのギャップが依然大きい)。 |
| ガス発酵・バイオ変換<br>(CO/CO2/H2)       | 出現時期: アセトゲン代謝(Wood-Ljungdahl 経路)は 1980 年代に確立。CO/合成ガス発酵の工業実証は 2010 年代から進展し、2020 年代に商用化が本格化。CO2+H2 基質の系も 2020 年代に開発加速。<br>背景: 産業排ガス・CO2 の資源化、バイオ触媒の高選択性・温和条件、再エネ水素との親和性、CCU 促進政策。 | 微生物(例:アセトogen 等)により CO/CO2/H2 を炭素源としてエタノールや有機酸などへ変換する。排ガスや合成ガスとの親和性がある。 | 技術ギャップ:①ガス-液相の物質移動(スケールアップ)、②不純物耐性と微生物安定性、③下流分離の省エネ化、④LCA 上の追加性(CO2 源・エネルギー源)。想定時間:5~10 年(商用例はあるが、対象ガス・製品の拡大と経済性改善に時間)。   |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-73 実用化可能性「CO2 を原料とした化学品・燃料合成プロセス」

| セクター                 | ユースケースや波及が期待される産業領域   |
|----------------------|---|
| 基礎化学(メタノール/合成ガス)     | CO2 由来メタノール(燃料・化学品原料)および CO(合成ガス)を起点に、オレフィン/芳香族、溶剤、樹脂原料へ展開。既存化学プラントへの統合や、化学コンビナートでのカーボン循環設計が論点。 |
| 航空(SAF:PtL/合成燃料)     | RWGS+FT、メタノール-to-jet 等で合成ジェット燃料を供給。燃料規格適合(drop-in)、認証・MRV、コスト低減が鍵。EU の混合義務等が必要シグナル。             |
| 海運(e-methanol 等)     | エネルギー密度と貯蔵性の観点から、e-methanol 等の合成燃料が選択肢。FuelEU Maritime 等の制度下で GHG 強度低減の手段として検討が進む。              |
| 都市ガス・電力(合成メタン/季節間貯蔵) | 合成メタンを既存ガスインフラへ注入し、需要変動の吸収や長期貯蔵(季節間)に活用。電力系統とガス網のセクターカップリングとして位置付く。                             |
| 肥料(尿素)               | 現時点で最大の CO2 利用用途。回収 CO2 を尿素製造に使用(直接利用)しつつ、低排出アンモニアと組み合わせた“低炭素肥料”へ展開。                            |
| 重工業(鉄鋼・セメント等)        | 排ガス由来 CO2 を化学品・燃料合成へ供給する“産業クラスター型 CCU”。CO2 回収・精製・圧縮・輸送と転換プロセスを一体で最適化する必要。                       |

## (5) インタビュー結果を踏まえた今後の潮流および研究の方向性

中核研究者へのインタビュー結果に基づき、今後 5 年から 10 年の潮流および研究の方向性を整理した。

表 2-74 今後の潮流および研究の方向性「CO<sub>2</sub> を原料とした化学品・燃料合成プロセス」

| 項目  | 概要   |
|---|--|
| 新たに浮上している、または今後 5 年から 10 年の間に浮上すると考えられる技術トレンド、技術的ブレークスルーの可能性、技術面の障壁、規制・倫理も含む非技術面の障壁 | <p>技術トレンド</p> <p>1. 電解還元(CO<sub>2</sub>⇒C<sub>2</sub>系)<br/>MEAの純水運転はブレークスルー候補。C<sub>2</sub>選択性向上、H<sub>2</sub>、CO等の副生成物抑制、長期安定の両立は未解決。純水で高効率にエチレン(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)生成を実現する触媒・セル設計がフロンティア。エタノール選択的触媒の実現は産業的に意義が大きい。</p> <p>2. エタノール合成<br/>e-メタンはすでに技術的に成熟しており、課題はすでに安価なグリーン水素供給と貯蔵・輸送。一方、エタノール・有機酸等のCO<sub>2</sub>電解合成→バイオ触媒による高選択付加価値物質への転換が潮流。需要先は、高付加価値プレミアム化学品・食品・培養肉の培地等</p> <p>非技術的障壁<br/>グリーン水素コスト、LCA前提の厳密なカーボンフットプリント、食品・医療用途での規制対応</p> |
| 他分野研究連携の必要性   | 無機(電解)とバイオ(発酵・合成生物学)の接続。後工程である発酵で発生するCO <sub>2</sub> のリサイクル設計も含め、プロセス集積の発想が必要<br>LCAとプロセス工学の専門人材が不足。要素からシステム・シナリオへの橋渡がボトルネック。  |
| わが国のアセット(人材・インフラ等)と国外プレイヤー・チームとの比較  | 強み:学術的蓄積と人材ポテンシャル(CO <sub>2</sub> 電解還元分野での先駆的貢献多数)<br>弱み:型資金投入では中国・欧州・豪州にも劣後。1000時間試験などの量で格差顕在化。   |
| 今後5年から10年の間において潮流となり得る研究の方向性  | CO <sub>2</sub> ⇒C <sub>2</sub> 直接合成(エチレン/エタノール)の高効率化・長期安定運転:純水MEAでの高選択・長寿命CO <sub>2</sub> 電解(触媒・電極・膜・セル統合設計)、三相界面設計、塩析・炭素塩析抑制、副生成物抑制の統合的解決<br>エタノール選択触媒・プロセス:エタノール高選択系が確立すれば電解→バイオが産業連鎖<br>既存の高TRL技術の高効率運用:メタネーション、CO <sub>2</sub> ⇒メタノールの最適化と社会システム内での最適配置(H <sub>2</sub> インフラ/e-メタン導入の使い分け等)  |
| 今後の当該分野において優先すべき研究課題・支援形態   | ミッション指向に基づく、異分野を連携・束ねた仮想研究所(電解×触媒・バイオ×LCA×シナリオ)組成と共通KPI(CO <sub>2</sub> フットプリント、選択率、耐久性、コスト)の設定(CRESTで組成、SIPへ橋渡し、も可能ではないか)<br>上による、シナリオ・LCA人材の計画的育成と技術チームへの常駐参加が望ましい   |

## (6) 出所

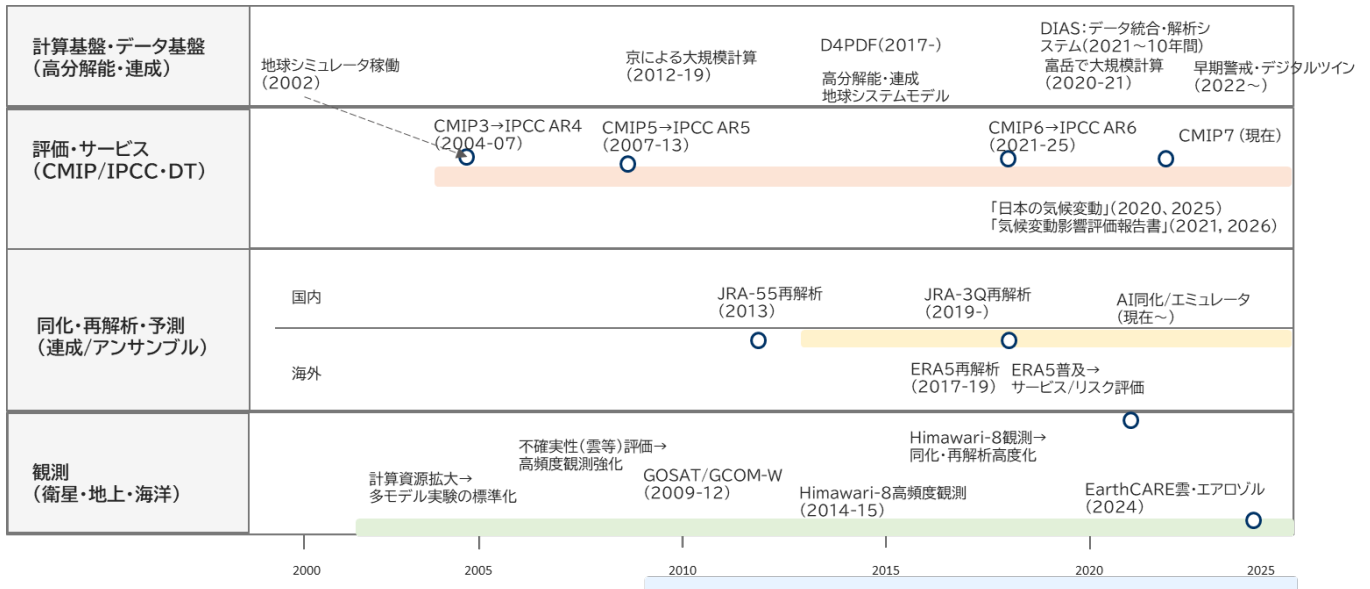
- JST 研究開発戦略センター(CRDS), 「研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野(2024年), CRDS-FY2024-FR-02, 2024年. <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-02.pdf>, 2025年12月30日アクセス
- JST 研究開発戦略センター(CRDS), 「二酸化炭素資源化に関する調査報告」, <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2019/RR/CRDS-FY2019-RR-05.pdf>, 2025年12月30日アクセス
- IEA, “CO<sub>2</sub> Capture and Utilisation, Tracking CO<sub>2</sub> Capture and Utilisation”, <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/co2-capture-and-utilisation>、2025年12月30日アクセス

- IEA, “Renewable fuels”, <https://www.iea.org/reports/renewables-2024/renewable-fuels>、2025年12月30日アクセス
- IEA, “The Role of E-fuels in Decarbonising Transport”, 22 Dec 2023, <https://www.iea.org/reports/the-role-of-e-fuels-in-decarbonising-transport>、2025年12月30日アクセス
- IEA, “GHG emissions of hydrogen and its derivatives – Global Hydrogen Review 2024”, <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024/ghg-emissions-of-hydrogen-and-its-derivatives>, 2025年12月30日アクセス
- IEA, “Global Hydrogen Review 2024”, <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>, 2025年12月30日アクセス
- IPCC, “Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change –IPCC Sixth Assessment report”, 2022, [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGIII\\_TechnicalSummary.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_TechnicalSummary.pdf), 2025年12月30日アクセス
- European Union, Regulation (EU) 2023/2405 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 on ensuring a level playing field for sustainable air transport (ReFuelEU Aviation), <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/2405/oj/eng>, 2025年12月30日アクセス
- European Union, REGULATION (EU) 2023/1805 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 September 2023 on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1805>, 2025年12月30日アクセス
- UNFCCC, The Paris Agreement, <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>, 2025年12月30日アクセス
- Artz, J., Müller, T.E., Thenert, K., et al., “Sustainable Conversion of Carbon Dioxide: An Integrated Review of Catalysis and Life Cycle Assessment”, *Chemical Reviews*, 118(2), 2017, [https://www.researchgate.net/publication/321694408\\_Sustainable\\_Conversion\\_of\\_Carbon\\_Dioxide\\_An\\_Integrated\\_Review\\_of\\_Catalysis\\_and\\_Life\\_Cycle\\_Assessment](https://www.researchgate.net/publication/321694408_Sustainable_Conversion_of_Carbon_Dioxide_An_Integrated_Review_of_Catalysis_and_Life_Cycle_Assessment), 2025年12月30日アクセス
- Nitopi, S., Bertheussen, E., Scott, S.B., et al., “Progress and Perspectives of Electrochemical CO<sub>2</sub> Reduction on Copper in Aqueous Electrolyte”, *Chemical Reviews*, 119(12), 2019, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.8b00705>, 2025年12月30日アクセス
- Wakerley, D., Wang, X., Corral, D., et al., “Gas diffusion electrodes, reactor designs and key metrics of low-temperature CO<sub>2</sub> electrolyzers”, *Nature Energy*, 7, 130–143 (2022), <https://www.nature.com/articles/s41560-021-00973-9>, 2025年12月30日アクセス
- She, X., Zhai, L., Wang, Y., et al., “Pure-water-fed, electrocatalytic CO<sub>2</sub> reduction to ethylene beyond 1,000 h stability at 10 A”, *Nature Energy*, 9, 81–91(2024), <https://www.nature.com/articles/s41560-023-01415-4>, 2025年12月30日アクセス
- 資源エネルギー庁, 「今後のメタネーションの社会実装に向けた検討の方向性(案)」, 令和4年1月, [https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/methanation\\_suishin/pdf/004\\_04\\_04.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/004_04_04.pdf), 2025年12月30日アクセス
- European Commission Joint Research Centre “Carbon Capture Utilisation and Storage in the European Union - 2025 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets” 25 November 2025, [https://setis.ec.europa.eu/carbon-capture-utilisation-and-storage-european-union-2025-status-report-technology-development\\_en](https://setis.ec.europa.eu/carbon-capture-utilisation-and-storage-european-union-2025-status-report-technology-development_en), 2025年12月30日アクセス

## 2.3.6 潮流 B6:気候変動観測、気候変動予測「全球のモデリング、予測の高度化」

### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



※バーは「顕著に発展・活用が進んだ時期」の目安である。

出所) 点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き: 影響が及ぶ方向 (起点から波及先) を示す。  
 矢印上のラベル: 影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-15 技術的進歩と方向性の概要図「全球のモデリング、予測の高度化」

表 2-75 技術的進歩と方向性(概要)「全球のモデリング、予測の高度化」

| 概要  |  |
|---|--|
| 【これまでの流れ】   |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● 地球システム観測・予測は「高分解能化(雲・対流・海洋渦)」「連成化(大気-海洋-陸面-雪氷-化学/生物)」「統合運用(観測-同化-再解析-予測-評価)」の同時進行で進展している。</li> <li>● 観測は“システム・オブ・システムズ”化が進み、静止/極軌道衛星、地上(レーダ/ライダー/フラックス)、海洋(Argo/Deep/BGC)を組み合わせたギャップ補完が主戦場となっている。</li> <li>● 不確実性の支配項は依然として雲・エアロゾル相互作用、極端降水・台風強度、海洋熱吸収・海氷/氷床、陸域水循環であり、観測・同化・モデル物理の三位一体の改善が必要である(IPCC AR6)。</li> <li>● 日本は、全球雲解像(cloud/storm-resolving)級のモデル開発・実証(例:NICAM)と、HPC(地球シミュレータ、京、富岳)を背景に、高解像度の予測・プロセス理解で国際的に先行領域を持つ。</li> <li>● 極端現象のイベントアトリビューション(人為起源温暖化の寄与推定)は発展期に入り、政策・適応・防災の意思決定に近い時間軸での分析(迅速化、反復可能性、透明性)が重要課題となっている。</li> </ul> |  |
| 【今後の課題・方向性・潮流】  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● 高分解能化:雲・対流、地形性降水、海洋渦など“サブ格子現象”の直接表現を増やし、極端現象の再現性と物理妥当性を改善。</li> <li>● 統合化:観測(衛星/地上/海洋)→同化→再解析→予測→検証の一体運用を前提に、連成データ同化と品質管理・不確実性推定(アンサンブル)が中核技術に。</li> <li>● サービス化:防災・適応・産業利用に直結する形で、短期(0-10日)からS2S(2週-2か月)、季節~数年、長期(数十年)までの“シームレス予測”を志向。</li> <li>● デジタルツイン化:高解像度・高頻度の観測と再解析に基づく地球のデジタル表現を構築し、極端リスクや適応策の評価・反復を可能にする動きが顕在化(欧州 DestinE 等)。</li> <li>● 重点課題:雲・エアロゾル相互作用、極端降水と熱波の同時発生、台風強度、海洋熱吸収と海面上昇、雪氷圏不安定性、氷床・熱塩循環・アマゾン等の低頻度高影響のリスク評価に重要なティッピングポイントの研究。</li> </ul>   |  |

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-76 タイムライン「全球のモデリング、予測の高度化」

| 年         | 主な進展やイベント                                       | 含意   |
|-----------|---|--|
| 2002      | 【横断】地球シミュレータが稼働(日本の地球環境計算の基盤形成)                 | 超高性能計算を梃子に、全球高解像度モデルと同化・再解析の開発が加速。                             |
| 2004-2006 | 【横断】CMIP3 のマルチモデルデータセット整備(IPCC AR4 に貢献)         | モデル間比較が標準化し、将来予測の不確実性要因(雲等)の可視化が進展。                            |
| 2007      | 【横断】IPCC AR4 公表、気候モデルと観測の統合評価が国際標準に             | 観測網・再解析・モデル評価のトレーサビリティ要求が強まる。                                  |
| 2009      | 【衛星】温室効果ガス観測衛星GOSAT(いぶき)打上げ                     | CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> の全球観測が強化され、化学輸送モデル・同化との統合が進む。 |
| 2012      | 【衛星】GCOM-W(しずく)打上げ、降水・水蒸気・海面水温等を観測              | 水循環観測が強化され、気象~気候の結合(極端降水、干ばつ)研究が前進。                            |
| 2013      | 【再解析/予測】JRA-55(日本の再解析)公開、S2S プロジェクトが本格化         | 長期の一貫データで極端現象トレンド解析が可能に。週~季節予測の実装研究が拡大。                        |
| 2014-2015 | 【衛星】Himawari-8 の高頻度・多波長観測(AHI)/運用開始             | 対流発達・雲物理の観測制約が強化され、同化・短時間予報・評価が高度化。                            |
| 2016      | 【横断】CMIP6 実験設計の体系化(DECK 等)                      | 予測可能性・内部変動・シナリオ不確実性の整理が進み、サービス設計に接続。                           |
| 2017-2019 | 【再解析】ERA5 が段階公開~全面公開                            | 高時間分解能・アンサンブル不確実性付き再解析が普及し、産業利用が拡大。                            |
| 2020-2021 | 【HPC/モデル】富岳での大規模気候・気象シミュレーション実証、IPCC AR6 WG1 公表 | 高解像度化と大規模アンサンブルが研究から実装へ。極端現象と人為影響の理解が深化。                       |

| 年    | 主な進展やイベント   | 含意  |
|------|---|---|
| 2022 | 【社会実装】WMO/国連の Early Warnings for All が加速                | 観測・予測の成果を多災害早期警戒へ接続する要求(運用性、即時性、説明責任)が強化。 |
| 2023 | 【予測】Google が GraphCast、Huawei が Pangu Weather Model を発表 | 「物理中心」から「物理×AI 融合」への気象予測パラダイム転換           |
| 2024 | 【衛星】ESA-JAXA EarthCARE 打上げ(雲・エアロゾル・放射の同時観測)             | 雲放射・エアロゾル相互作用の拘束が進み、主要不確実性の縮減に寄与。         |
| 2024 | 【国内】JST-CRDS「研究開発の俯瞰報告書(環境・エネルギー分野)2024」公表              | 研究開発領域の俯瞰に基づく投資・人材・データ基盤の優先付けが明確化。        |
| 現在～  | 【横断】デジタルツイン、AI 同化/エミュレーター、観測コンステレーションの拡大                | 計算資源・観測・データ共有を前提とした継続運用が競争軸へ。             |

### (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-77 キーテクノロジー「全球のモデリング、予測の高度化」

| 名称                  | 出現時期・背景   | 定義   | 主要な技術ギャップ   |
|---------------------|---|--|---|
| 全球雲解像(GCRM)/対流許容モデル | 出現時期: 2000 年代中葉に全球雲解像の試験計算が登場(2007 年に NICAM の全球雲解像の基盤的手法を公表); 2010 年代に km 級全球実験が HPC で進展; 2020 年に富岳で世界最大規模の全球雲解像実験。IPCC AR6 で対流許容が極端現象再現の改善に資する点が整理。<br>背景: 積雲パラメタリゼーションの限界、極端現象の予測・リスク評価ニーズ、HPC の飛躍とデジタルツイン構想の加速                                 | 全球スケールで km 級(あるいはサブ km)解像度を用い、深い対流・メソ対流系をパラメタ化に頼らずに表現する気候・気象モデル(例: NICAM)。 | 計算コスト(長期・アンサンブル)、雲微物理・乱流の表現、観測での検証可能性、連成(海洋・雪氷・化学)時の安定運用。 |
| 連成データ同化(Coupled DA) | 出現時期: 2010 年代に大気・海洋を統合した(弱連成)DA が再解析・予報系で広範に進展(ERA5 は地球システム観測の統合同化基盤); 2010 年代後半～2020 年代に強連成 DA の研究・試験運用が加速し、デジタルツイン(DestinE 等)で実運用化が進む。S2S(サブシーズン～季節)予測プロジェクトがシームレス連成予測の枠組みを普及。<br>背景: 天気～季節～気候のシームレス化、海水・波浪・陸面・生物地球化学など多圏統合の必要性、観測網の多様化と計算資源の拡大 | 大気・海洋・陸面・雪氷・化学/生物を同一枠組みで同化し、整合した初期値と不確実性を推定する技術(ハイブリッド EnKF/4D-Var 等)。     | 観測誤差・代表性誤差の扱い、跨領域のバイアス補正、観測ギャップ領域(海水下等)、計算負荷と運用性。         |

| 名称                              | 出現時期・背景   | 定義   | 主要な技術ギャップ   |
|---------------------------------|---|--|---|
| 高頻度・多波長衛星観測(静止×極軌道、Lidar/Radar) | 出現時期: 静止高頻度マルチバンド観測は2014のHimawari-8打上(2015運用開始)で本格化。極軌道の水循環観測(マイクロ波放射):GCOM-W1「しずく」2012打上。温室効果ガス分光観測:GOSAT(いぶき)2009打上。宇宙搭載ライダー/レーダーによる雲・エアロゾル垂直プロファイルは2006のCALIPSO/CloudSatで本格開始、2024のEarthCAREで雲-放射-エアロゾル相互作用の同時高精度計測が実現。背景: 静止(高頻度・広域)と極軌道(多波長・高精度)の相補統合、雲・降水・エアロゾル・温室効果ガスの観測ニーズ拡大、同化・検証・早期警報の高度化 | 静止衛星による高頻度雲・対流監視と、極軌道衛星の高精度スペクトル/能動センサー(雲・エアロゾル・放射)の補完による同時制約。         | 長期一貫性(キャリブレーション/継続性)、同化可能な形への変換(放射伝達/観測演算子)、雲・降水の観測誤差モデル。 |
| 海洋統合観測ネットワーク(Argo/Deep/BGC)     | 出現時期: Argoは1999-2000開始、2010年前後に約3000基で全球網を達成。Deep Argoは2010年代に試験展開を開始し、2020年代に本格配備段階へ拡大。BGC-Argoは2010年代に国際計画化し、酸素・硝酸塩・pH等の多変量観測を実装。背景: 海洋熱・炭素収支の不確実性縮減、気候監視とデータ同化の基盤強化、深層・極域など観測ギャップ解消  | 全球に展開する自律フロート等により、上層～深層の物理量と生物地球化学量を継続観測し、再解析・予測に投入する基盤。               | 深層・極域・沿岸の観測密度、センサーの長期ドリフト管理、データ遅延と品質管理、同化によるバイアス増幅の抑制。    |
| 極端現象のイベントアトリビューション(EA)/ストーリーライン | 出現時期: 2010年代にEAの方法論が確立・普及(2016の米国アカデミー報告がマイルストーン)。World Weather Attributionにより2015年以降、迅速な運用型EAが進展。IPCC AR6で手法・確信度・適用分野が体系化。背景: 観測・再解析・多モデルアンサンブル(CMIP3/6等)の充実、政策・適応・訴訟に資する因果評価需要、早期警報とリスクコミュニケーションの高度化。   | 観測とモデル(大規模アンサンブル等)から、特定事象の確率・強度が人為起源温暖化でどの程度変化したかを推定し、因果メカニズムを説明する枠組み。 | 迅速性と厳密性の両立、事象定義の標準化、モデル適格性評価、複合災害(熱-干ばつ-火災等)への拡張。         |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-78 実用化可能性「全球のモデリング、予測の高度化」

| セクター           | ユースケースや波及が期待される産業領域  |
|----------------|--|
| 防災/減災(行政/インフラ) | マルチハザード早期警戒(豪雨・洪水・高潮・熱波)、避難判断支援、治水・砂防・港湾運用の高度化。            |
| 保険/金融(リスク評価)   | 自然災害リスクの定量化、ポートフォリオの気候ストレステスト、再保険のモデリング、企業の事業継続計画(BCP)高度化。 |
| 農業/水資源         | 渇水・洪水リスクの季節予測、灌漑計画、作物モデルとの連携(収量予測)、病害虫リスクの気候シグナル評価。        |
| エネルギー/電力(系統運用) | 風力・太陽光の短期～季節予測、需要(冷暖房)変動予測、水力流入予測、極端気象に対するレジリエンス計画。        |

| セクター               | ユースケースや波及が期待される産業領域                                      |
|--------------------|--|
| 物流/モビリティ(航空・海運・陸運) | 気象海象予測に基づく運航最適化、欠航・遅延リスク低減、港湾・航路の安全運用、サプライチェーン寸断リスク評価。   |
| 都市/建設/不動産          | 都市気候(暑熱)対策設計、設計外力(風・雨・高潮)の見直し、適応投資の費用対効果評価、建設工程の気象リスク管理。 |

## (5) インタビュー結果を踏まえた今後の潮流および研究の方向性

中核研究者へのインタビュー結果に基づき、今後 5 年から 10 年の潮流および研究の方向性を整理した。

表 2-79 今後の潮流および研究の方向性「全球のモデリング、予測の高度化」

| 項目  | 概要  |
|---|---|
| 新たに浮上している、または今後 5 年から 10 年の間に浮上すると考えられる技術トレンド、技術的ブレークスルーの可能性、技術面の障壁、規制・倫理も含む非技術面の障壁 | <p>過去 20 年の技術的ブレークスルー<br/>         上述に加え、ビッグテック(Google、Huawei、MS)による AI 天気予想モデルの開発。<br/>         今後のブレークスルー可能性<br/>         機械学習による物理過程の代替(雲対流、海洋渦等のサブグリッド表現)や AI を使った既存ビッグデータのデータキュレーション<br/>         S2S 予測から S2D(Seasonal2Decade)近未来予測への対象拡張<br/>         イベントアトリビューション(特定事象に対する気候変動の寄与の定量化)はまだ発展期<br/>         ティッピングポイント(不可逆的な変化の臨界点)研究は低頻度好影響のリスク評価として重要<br/>         非技術障壁<br/>         R・O 間のギャップ(予報は気象庁の専任業務で研究・民間の関与が構造的に制約される)<br/>         計算資源・GPU やデータセンター等のインフラコスト</p> |
| 他分野研究連携の必要性   | <p>S2D は同化技術(天気予報側)と気候モデル(気候側)の結合つまり R2O の適切な連携が不可欠<br/>         社会・経済モデルと地球システムモデルを結合する統合モデリングが必須。気候変化が経済・政策を変え、それが再び地球システムにフィードバックする相互作用を取り込む研究は日本ではほぼ未着手。<br/>         これら分野横断連携を促進する仕組みすなわちさがけ等の既採択者と、応募前予備軍とのマッチング機会、オープンな場を FA と大学・研究機関が協働で企画する必要</p>   |
| わが国のアセット(人材・インフラ等)と国外プレイヤー・チームとの比較  | <p>強み<br/>         潮流にて整理した HPC、DIAS、d4PDF、IPCC/CMIP への継続参加とモデル開発力<br/>         海外<br/>         ERAS 等の再解析(欧州)、近未来予測(英国)、AI 天気予報モデルの先行。日本は S2D や AI 気候モデリングでの追随・強化が必要</p>   |
| 今後5年から10年の間において潮流となり得る研究の方向性  | <p>上述技術トレンドのほか、地球システムモデルと社会・経済モデルの相互作用を取り込む新しい統合枠組の試行。</p>  |
| 今後の当該分野において優先すべき研究課題・支援形態   | <p>フルスケールの AI 気候モデル開発は計算資源・人材の観点から大規模枠組(AI4Science)が必要であり、CREST/さがけでは、個別要素技術にフォーカスするのが現実的</p>   |

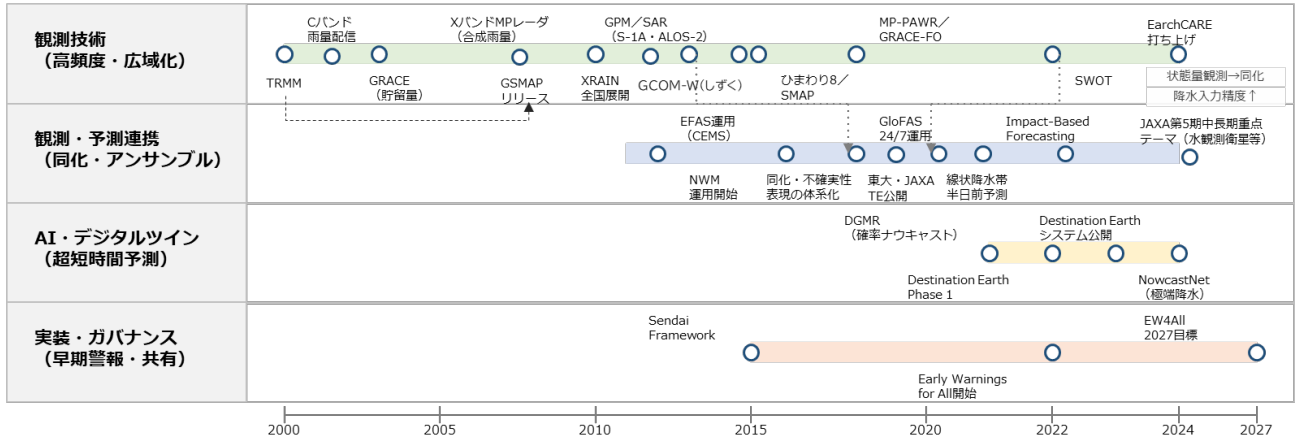
## (6) 出所

- 1.JST 研究開発戦略センター(CRDS)「研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野(2024年)」, <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-02.pdf>
- IPCC, Sixth Assessment AReport, Climate Change 2021: The Physical Science Basis, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Eyring, V. et al. (2016) 'Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organisation', <https://gmd.copernicus.org/articles/9/1937/2016/>
- Hersbach, H. et al. (2020) 'The ERA5 global reanalysis', QJRMS. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- 気象庁 JRA-55- the Japanese 55-year Reanalysis, [https://www.data.jma.go.jp/jra/html/JRA-55/index\\_en.html](https://www.data.jma.go.jp/jra/html/JRA-55/index_en.html)
- NOAA AOML Argo program , <https://www.aoml.noaa.gov/argo/>
- Biogeochemical-Argo, <https://biogeochemical-argo.org/>
- JAXA, Greenhouse gases Observing SATellite "IBUKI" (GOSAT) <https://global.jaxa.jp/projects/sat/gosat/>
- JAXA, Global Change Observation Mission - Water "SHIZUKU" (GCOM-W) [https://global.jaxa.jp/projects/sat/gcom\\_w/](https://global.jaxa.jp/projects/sat/gcom_w/)
- eoPortal, Himawari-8/9, <https://www.eoportal.org/satellite-missions/himawari-8-9>
- eoPortal, EarthCARE, <https://www.eoportal.org/satellite-missions/earthcare>
- Satoh, M. et al. (2007) 'Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) for global cloud resolving simulations', J. Comput. Phys. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021999107000654>
- Fujitsu, 'Japanese Research Group Performs Largest Ever Meteorological Calculation on Supercomputer Fugaku ' <https://www.fujitsu.com/global/about/resources/news/press-releases/2020/1120-01.html>
- National Academies (2016) 'Attribution of Extreme Weather Events in the Context of Climate Change' <https://nap.nationalacademies.org/catalog/21852/attribution-of-extreme-weather-events-in-the-context-of-climate-change>
- World Weather Attribution, Methods, <https://www.worldweatherattribution.org/methods/>
- WMO 'Early Warnings for All' <https://wmo.int/activities/early-warnings-all>
- European Commission 'Destination Earth (DestinE)' <https://destination-earth.eu>
- Vitart, F. et al. (2017) 'The Subseasonal to Seasonal (S2S) Prediction Project Project Database', Bull. Amer. Meteor. Soc. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0017.1>
- About the WCRP CMIP3 Multi-Model Dataset Archive at PCMDI' <https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip3/>

## 2.3.7 潮流 B7:水循環(水資源・防災)「水循環観測技術と災害予測の連携」

### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



出所) 点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き: 影響が及ぶ方向 (起点から波及先) を示す。  
 矢印上のラベル: 影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-16 技術的進歩と方向性の概要図「水循環観測技術と災害予測の連携」

表 2-80 技術的進歩と方向性(概要)「水循環観測技術と災害予測の連携」

| 概要  |
|---|
| <p><b>概観</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 「水循環観測技術と災害予測の連携技術」は、(1)水循環に関する観測データ(降水・蒸発散・土壌水分・河川水位・貯留量・浸水域等)を、(2)品質管理・同化・統合(データ同化、マルチセンサ融合、誤差推定、標準化)を介して、(3)災害予測(洪水・氾濫、土砂、濁水、被害・影響)へ連結し、(4)意思決定(避難、ダム操作、インフラ運用、保険等)に資する情報へ変換する技術群である。</li> <li>● 近年は、衛星(GPM、GRACE/GRACE-FO、SMAP、SWOT等)と地上レーダ(XRAIN、MP-PAWR等)の高頻度・高解像度化により、観測側の情報量が飛躍的に増大した。</li> <li>● 同時に、アンサンブル気象予報の普及と水文モデルの大規模化(全国～全球)により、洪水予測は「確率+影響」へと重心が移っている。欧州の GloFAS/EFAS や米国の National Water Model は、その代表例である。</li> </ul> <p><b>技術的進歩と方向性</b></p> <p>(A)観測技術:高頻度・広域化とマルチプラットフォーム化</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 高頻度降水観測の高度化:XRAIN等の高分解能レーダ網、MP-PAWRの超高速3次元観測、静止衛星(ひまわり)による連続監視が、局地豪雨の把握と0-数時間予測の入力精度を押し上げた。</li> <li>● 衛星による水循環状態の観測多様化:GPMの多衛星降水、SWOTの表面水高度、GRACE/GRACE-FOの貯留量、SMAPの土壌水分が、洪水・濁水の「状態推定」や同化/検証データの裾野を拡大。</li> <li>● 継続性・冗長性の重要性の顕在化:SMAP搭載レーダ不具合や Sentinel-1 運用終了等は、ミッション途絶が研究・運用に直撃することを示し、代替系(複数衛星/複数帯域、国内 SAR 等)確保が政策課題。</li> </ul> <p>(B)観測-予測連携:データ同化・アンサンブル化・モデル連成</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 全国～全球の水予測の運用化:NWM(米)、EFAS/GloFAS(欧/全球)等が、アンサンブル気象予報を入力に確率洪水予測を提供し、研究から24/7運用サービスへの移行が進展。</li> <li>● 同化・不確実性表現の体系化:水位・流量等のリアルタイム同化、陸面/水文同化の研究アジェンダ整備により、モデル誤差・観測誤差を前提に「確率情報として出す」設計が標準化の方向。</li> <li>● 「ハザード→影響」と運用意思決定への接続:Impact-Based Forecastingが主流化し、ダム操作支援等も初期AIの単独最適化から、予報・同化・アンサンブルを前提とした統合運用へ再設計(旧パラダイムの陳腐化/再編)。</li> </ul> <p>(C)AI・デジタルツイン:超短時間予測と統合意思決定支援</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● AIナウキャストの実用性向上:深層生成モデル等により、レーダ画像から確率的ナウキャストを生成し、強雨・リード延伸時の精度課題を改善。高頻度3次元観測の整備が性能の上限を規定。</li> <li>● デジタルツインの制度化:Destination Earth等により、観測・モデル・計算基盤を統合する枠組みが進行。再現可能なワークフロー、共通ベンチマーク、運用移行(ModelOps)をR&amp;Dの要件に組み込む方向。</li> </ul> <p>(D)実装・ガバナンス:早期警報の国際目標とデータ共有</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 国際枠組みがR&amp;Dの成果要件を規定:Early Warnings for All(2027)やSendai Framework(2015-2030)が、観測-予測-伝達の一体整備を政策目標として明確化。</li> <li>● 相互運用と情報流通の基盤化:WHOSの水文データ交換枠組みや国内SIP4Dのような共通状況認識基盤が、「複数機関のデータ/モデルをつなぐ」制度設計の参照点。</li> <li>● 投資効果(ROI)と評価設計:多ハザード早期警報の費用対効果の知見が蓄積し、研究成果の評価を「精度」から「被害軽減・行動改善」へ拡張する根拠となる。</li> </ul> |

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-81 タイムライン「水循環観測技術と災害予測の連携」

| 年         | 主な進展やイベント  | 技術的な含意  |
|-----------|--|---|
| 2000      | Cバンドレーダ雨量情報の配信開始(全国観測網の整備が進展)。   | 全国的な降雨監視の基盤が形成され、洪水予測の入力データの標準化が進む。             |
| 2002      | GRACE 衛星打上げ(重力変化から貯留量変化を推定)。/Cバンドレーダ雨量のオンライン補正情報の配信。   | 地下水・貯留変化の広域把握が可能に。観測誤差補正の重要性(QC/同化)が顕在化。        |
| 2007      | JAXA、衛星全球降水マップ GSMaP リリース。   | GPM 主衛星搭載の DPR を中心に、複数衛星を組み合わせて開発された            |
| 2010      | Xバンド MP レーダ合成雨量の試行運用開始。  | 局地豪雨の観測精度が向上し、都市型水害(内水含む)への適用余地が拡大。             |
| 2011-2012 | 欧州 EFAS が CEMS の枠組みに位置づけられ、2012 年に運用化。   | 国境を越える広域洪水に対し、上位視点の確率予測サービスが制度化。                |
| 2011-2018 | GloFAS: 日次洪水予測を 2011 年から実施し、2018 年に 24/7 の運用サービス化。   | 確率洪水予測の運用実績が蓄積。「準運用→運用」の移行設計(検証・責任分界)が重要に。      |
| 2013      | XRAIN 配信エリア拡大(観測網の全国展開)。   | 観測の均てん化と利活用の拡大。自治体・住民向け情報提供の高度化が可能に。            |
| 2014      | GPM 主衛星(降水)打上げ。/ Sentinel-1A(SAR)打上げ。/ ALOS-2(Lバンド SAR)打上げ。/ ひまわり 8 号打上げ。                          | 衛星観測が降水・浸水域・地表変化の監視に本格的に組み込まれ、マルチセンサ融合の必要性が増大。  |
| 2015      | ひまわり 8 号の運用開始。/ SMAP (土壌水分) 打上げ。/ Sendai Framework 採択。   | 高頻度観測と防災枠組みが揃い、観測-予測-伝達の一体整備が国際標準の方向へ。          |
| 2016      | NOAA が National Water Model (全国水予測モデル) を運用開始。  | 全国規模の水予測の運用化が進み、モデル運用(ModelOps)の重要性が増す。         |
| 2017-2018 | MP-PAWR の実運用に向けた評価試験(2017)と本格運用(2018)。/ GRACE-FO 打上げ(2018)。  | 超短時間予測の精度向上と、地下水・貯留の継続監視が両輪に。観測冗長性・運用継続性の設計が重要。 |
| 2021      | 深層生成モデルによる降水ナウキャスト(DGMR)が報告(Nature)。   | AI が短時間予測の中核候補に。説明可能性・不確実性付与・運用(MLOps)が研究課題化。   |
| 2022      | SWOT 打上げ。/ Early Warnings for All 開始。/ Destination Earth Phase1 開始(EU)。/ 線状降水帯の半日前予測の提供開始(気象庁の取組)。 | 表面水観測と国際目標が連動。極端現象に対する「統合予測+影響+行動」の実装が加速。       |
| 2023      | 極端降水の AI ナウキャスト(NowcastNet)が報告(Nature)。/ UNDRR が MHEWS の整備状況を整理。                                   | 極端事象への AI 適用と、早期警報の進捗評価が進む。研究評価指標(効果・公平性)が重要に。  |
| 2024      | CRDS 俯瞰報告書(環境・エネルギー分野)で水循環・水防災の研究動向を整理。/ Destination Earth のシステム公開(EU)。                            | 国内の研究開発課題が俯瞰され、デジタルツイン等の統合基盤整備が国際競争軸として明確化。     |

### (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-82 キーテクノロジー「水循環観測技術と災害予測の連携」

| 名称                               | 出現時期・背景   | 定義  | 主要な技術ギャップ   |
|----------------------------------|---|---|---|
| マルチセンサ降水推定・品質管理(衛星×地上レーダ×雨量計)    | 出現時期: 2010年代前半～現在にかけて実運用が拡大(例: GPM/IMERGの提供開始 2014、米NWSのMRMS運用入り 2014、日本のXRAIN配信エリア拡大 2013・2016)。<br>背景: 極端降水の監視・即時性の向上ニーズ、衛星の高頻度化(静止/極軌道)と地上レーダ網の高密度化、雨量計との偏差補正・品質管理の重要性増大。災害対応・同化利用に耐える一貫性あるQPEが必要に。                    | GPM等の衛星降水、地上レーダ(XRAIN/MP-PAWR等)、雨量計を統合し、観測誤差を推定しつつ高頻度・高解像度の降水プロダクトを生成する技術。        | 技術ギャップ: ①Xバンド減衰・地形遮蔽・雪/雲等の誤差特性の統一モデル化、②衛星/レーダ間のクロスキャリブレーション、③全国一貫のQC指標と不確実性メタデータ。必要時間: 2-3年(アルゴリズム・ベンチマーク整備)、3-5年(運用実装・全国展開)。理由: 観測網・地形・降水形態の多様性に対し、継続検証と運用要件調整が必要。     |
| リアルタイム水文データ同化とアンサンブル洪水・氾濫予測      | 出現時期: 2010年代半ば～(米NOAA National Water Model稼働 2016、GloFAS 日次予報開始 2011・運用高度化 2018、EFASの広域運用)。2020年代にデータ同化・確率予測が標準化へ。<br>背景: 数値天気予報のアンサンブル化とHPC/クラウドの普及、観測同化の水文分野への水平展開、広域データ共有枠組(WHOS)整備、オープンな氾濫モデル群の普及によりリアルタイム確率予測の実装が進展。 | 河川水位・流量、土壌水分、浸水域等を同化し、気象アンサンブルと結合した水文・氾濫モデルで確率洪水予測(信頼区間/発生確率)を提供する技術。             | 技術ギャップ: ①水位・浸水域(SAR等)の同化手法の実用化、②流域外挿(無観測流域)での不確実性表現、③計算コストとリアルタイム性(HPC/クラウド)の両立。必要時間: 3-5年(重点流域での同化・検証)、5年程度(複数流域・全国運用への拡張)。理由: 同化の検証データ確保と、運用責任(誤報/見逃し)を踏まえた制度設計が不可欠。  |
| 3D高速レーダ×AIによる0-3時間超短時間予測(ナウキャスト) | 出現時期: 2010年代後半～(MP-PAWRの実運用に向けた評価試験 2017、3D観測の研究活用 2019)。AIナウキャストは2021～2023に性能向上が大きく報告され実運用連携の試行が進展。<br>背景: フェーズドアレイ化で体積走査の高速化と3D微物理情報の利用可能性が拡大。線状降水帯等の突発現象に対し、レーダ反射因子の時空間学習を行う深層生成モデル等が短時間予測の精度・安定性を改善。                  | MP-PAWR等の高頻度3次元レーダ観測と深層学習を組み合わせ、対流の発生・急発達を捉えた確率ナウキャストを生成し、都市内水・土砂等の短時間リスクを推定する技術。 | 技術ギャップ: ①極端事例の学習データ不足とドメイン適応、②物理整合(降水量保存、鉛直構造)と不確実性推定、③現業システムとの統合(MLOps、監視、モデル更新)。必要時間: 1-2年(研究プロトタイプ)、2-4年(現業統合・運用試験)。理由: アルゴリズム自体は成熟が速い一方、運用要求(信頼性・説明責任・更新管理)がボトルネック。 |

| 名称   | 出現時期・背景  | 定義   | 主要な技術ギャップ  |
|--|--|--|--|
| 衛星水循環<br>(貯留・土壌<br>水分・表面<br>水)同化による<br>渇水/洪水<br>ポテンシャル<br>評価 | 出現時期: 2010年代後半~2020年代に本格化(SMAP 2015、GRACE-FO 2018、Sentinel-1/ALOS-2 2014、SWOT 2022 打上げ後に表面水高度観測が加速)。背景: 流域スケールでの貯留量・土壌水分・表面水位の観測が衛星で定常的に提供され、陸面/水文モデルへの同化で渇水・洪水のポテンシャル評価が高精度化。センサ継続性の課題(例: S1B 不具合、SMAP レーダ停止)を踏まえたマルチセンサ同化の重要性も増大。  | GRACE/GRACE-FO の貯留量変化、SMAP 土壌水分、SWOT 表面水等を用い、乾燥・飽和状態や貯留容量の変化を推定して渇水・洪水の「起こりやすさ」を事前評価する技術。      | 技術ギャップ: ①GRACE の粗解像度のダウンスケールと不確実性、②貯留成分(地下水/表流水/雪等)の分離、③意思決定指標(利水制限・農業・地盤リスク等)への変換。必要時間: 3-5年(同化手法と指標化の確立)。理由: 衛星の時空間分解能制約と、現地観測との整合検証が必要。 |
| インパクト<br>ベース早期<br>警報・意思決<br>定支援(デジ<br>タルツイン/<br>情報流通)        | 出現時期: 政策枠組みは 2015 年の仙台枠組で方向性確立。2020 年代に Impact-based Forecasting と「Early Warnings for All」イニシアティブ(2022~)が加速、欧州のデジタルツイン(Destination Earth)は 2022 に Phase1 開始・2024 に初版公開。背景: 極端現象の増加と被害軽減効果に関する実証、オープンデータと相互運用(WHOS 等)、統合プラットフォーム(SIP4D 等)整備、ハザード→影響→行動の一貫フロー設計の必要性。高解像度モデリングとデジタルツインが意思決定支援の新たな基盤に。 | ハザード(降水・水位・浸水)予測を、曝露・脆弱性・社会システム情報と統合し、「いつ・どこで・何が起こり、何をすべきか」を支援する情報へ変換する技術。デジタルツイン基盤や情報流通基盤を含む。 | 技術ギャップ: ①被害関数・サービス停止モデルの一般化、②データ共有(個人情報/企業機密/責任)と標準化、③効果検証(避難行動・被害低減)指標。必要時間: 3-5年(重点領域での実証)、5年以上(全国・多主体運用)。理由: 技術よりも制度・運用・行動科学との統合が支配的。   |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-83 実用化可能性「水循環観測技術と災害予測の連携」

| セクター                       | ユースケースや波及が期待される産業領域   |
|----------------------------|---|
| 河川管理・ダム運用(国/自治体/事業者)       | 洪水予測に基づく事前放流・操作最適化、越水/氾濫リスクの確率評価、河川工事の施工計画(降雨リスク回避)。        |
| 都市インフラ(下水道・内水氾濫対策/スマートシティ) | 0-3 時間の局地豪雨ナウキャストに連動したポンプ場・雨水貯留施設の運用、浸水想定 of 動的更新、交通規制の自動化。 |
| 防災行政・危機管理(自治体・消防・警察)       | インパクトベース警報による避難判断支援、避難所運営の先読み、広域災害時の情報共有(共通状況図)と資源配分最適化。    |
| 建設・不動産・インフラメンテナンス          | 工事中止判断、斜面・盛土の降雨起因リスク監視、インフラ被害推定と優先復旧、レジリエンス設計(設計外力の更新)。     |
| 保険・金融(気候リスク)               | 洪水・渇水リスクの確率評価、パラメトリック保険設計、企業の水リスク開示支援、投資ポートフォリオの気候ストレステスト。  |
| 農業・水資源(利水調整)               | 土壌水分・貯留量の監視に基づく灌漑計画、渇水早期警戒、作付け判断支援、流域スケールの水配分最適化。           |

## (5) インタビュー結果を踏まえた今後の潮流および研究の方向性

中核研究者へのインタビュー結果に基づき、今後 5 年から 10 年の潮流および研究の方向性を整理した。

表 2-84 今後の潮流および研究の方向性「水循環観測技術と災害予測の連携」

| 項目  | 概要   |
|---|--|
| 新たに浮上している、または今後 5 年から 10 年の間に浮上すると考えられる技術トレンド、技術的ブレークスルーの可能性、技術面の障壁、規制・倫理も含む非技術面の障壁 | AI 活用<br>デジタルツインのエンジン(AI 気象モデル)として高性能なデータ生成を実現する層<br>生成されたデータから政策・意思決定に資する情報抽出・解釈を行うユーザー側 AI 層<br>小型衛星コンステレーション<br>小型衛星は打ち上げコスト、基数、観測頻度の確保に優位。大型衛星との役割分担・補完の視点<br>地表計測 SAR(合成開口レーダー):国内外で開発が活発化<br>大気情報の小型衛星<br>海外で Tomorrow.io などが活発。国内 IHI が検討中も、センサーは海外技術。<br>欧州 Destination Earth(DestinE)イニシアチブ<br>EU の DG CONNECT の下、衛星データ×モデル×ユーザーサービス統合のデジタルツイン開発が進行 |
| 他分野研究連携の必要性   | (AI 活用はすでに大前提であり、特段の指摘なし)  |
| わが国のアセット(人材・インフラ等)と国外プレイヤー・チームとの比較  | 強み<br>TRMM の PR(世界初)、GPM の DPR(世界初)、EarthCARE のドップラー雲レーダー(世界初)、次期ドップラー降水レーダー衛星(世界初を目指す)など、レーダー技術は強い<br>弱み<br>AI 気象モデルの大規模推進では欧米が先行。日本は個別 AI 利用やレーダー・SAR 等のハード系技術が強い。   |
| 今後5年から10年の間において潮流となり得る研究の方向性  | AI×地球観測・数値モデルの二層最適化<br>モデル AI 化(エンジン)で高性能データ生成を進め、ユーザー側 AI で政策・防災の意思決定に橋渡し   |
| 今後の当該分野において優先すべき研究課題・支援形態   | 衛星データ・モデル・ユーザーサービスまで一貫通貫の体制・予算が世界の潮流。日本でも JAXA・東大の TE を核に学研・官・産の連携を強化すべき<br>エンジン(AI 気象モデル)側は小規模でも確実な成果が見込めるため<br>CREST/さきがけに適する<br>(ユーザー側はテーマを絞り、政策・防災への具体的接続まで設計された案件に重点配分すべき)  |

## (6) 出所

- JST 研究開発戦略センター(CRDS)「研究開発の俯瞰報告書(環境・エネルギー分野)2024」 URL: <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-02.pdf>
- 国土交通省「国総研で開発した技術により「XRAIN」の配信エリアが拡大」, 平成 28 年 6 月 29 日), <https://www.nilim.go.jp/lab/bcg/kisya/journal/kisya20160629.pdf>
- 国土交通省「XRAIN(エックスレイン)(X バンド MP レーダネットワーク)配信エリア拡大!」, 201 平成 25 年 9 月 3 日), [https://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03\\_hh\\_000685.html](https://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03_hh_000685.html)
- NOAA, NOAA launches America's first national water forecast model, August 16, 2016, <https://www.noaa.gov/media-release/noaa-launches-america-s-first-national-water-forecast-model>
- Copernicus Emergency Management Service (CEMS), GloFAS Medium-range

flood forecasts, <https://global-flood.emergency.copernicus.eu/technical-information/glofas-30day/>

- Copernicus Emergency Management Service , European Flood Awareness System (EFAS), <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/portals/european-flood-awareness-system-efas>
- WMO, WMO and the Early Warnings for All Initiative, <https://wmo.int/activities/early-warnings-all/wmo-and-early-warnings-all-initiative>
- United Nations, Early Warnings for All, <https://www.un.org/en/climatechange/early-warnings-for-all>
- WMO, WMO Hydrological Observing System (WHOS), <https://wmo.int/activities/wmo-hydrological-observing-system-whos>
- NASA, Jet Propulsion Laboratory, Surface Water and Ocean Topography, <https://www.jpl.nasa.gov/missions/surface-water-and-ocean-topography-swot>
- NASA, Jet Propulsion Laboratory, GRACE Tellus, <https://grace.jpl.nasa.gov/mission/grace/>
- NASA, Jet Propulsion Laboratory , GRACE Tellus, GRACE-FO, <https://grace.jpl.nasa.gov/mission/grace-fo/>
- NASA, The Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission, <https://earth.gsfc.nasa.gov/hydro/missions/soil-moisture-active-passive-smap-mission>
- European Space Agency, Mission, Sentinel-1A, <https://esoc.esa.int/content/sentinel-1a>
- Copernicus, S1 Mission Overview of Sentinel-1 Mission, <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s1-mission>
- 気象庁, Himawari-8 operation initiated, 7 July, 2015, [https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/satellite/news/himawari89/20150707\\_himawari-8\\_operation\\_initiated.pdf](https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/satellite/news/himawari89/20150707_himawari-8_operation_initiated.pdf)
- NICT, 世界初の実用型「マルチパラメータ・フェーズドアレイ気象レーダ(MP-PAWR)」を開発・設置, 2017年11月29日, <https://www.nict.go.jp/press/2017/11/29-1.html>
- Takahashi, N. et al. (2019) “Analysis of a Precipitation System that Exists above Freezing Level Using a Multi-Parameter Phased Array Weather Radar” <https://www.mdpi.com/2073-4433/10/12/755>
- Ravuri, S. et al. (2021) 'Skilful precipitation nowcasting using deep generative models of radar' Nature, <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03854-z>
- Zhang, Y. et al. (2023) 'Skilful nowcasting of extreme precipitation with NowcastNet' Nature, <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06184-4>
- Kumar, S. et al. (2022) 'An Agenda for Land Data Assimilation Priorities: Realizing the Promise of Terrestrial Water, Energy, and Vegetation Observations From Space, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2022MS003259>
- Rasmussen, J. et al. (2016) 'Data assimilation in integrated hydrological modelling in the presence of observation bias', Hydrology and Earth System Sciences, <https://hess.copernicus.org/articles/20/2103/2016/>
- ESA, Destination Earth, [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Destination\\_Earth](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Destination_Earth)
- IPCC Sixth Assessment Report, WG1: The Physical Science Basis, Summary for Policymakers, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/summary-for-policymakers/>
- UNDRR, What is the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction?, <https://www.undrr.org/implementing-sendai-framework/what-sendai-framework>
- UNDRR, Global Status of Multi-Hazard Early Warning Systems 2023, <https://www.undrr.org/media/91954/download>
- Hallegatte, S. (2012) 'A Cost Effective Solution to Reduce Disaster Losses in Developing Countries: Hydro-Meteorological Services, Early Warning, and Evacuation' WPS6058, <https://documents1.worldbank.org/curated/en/190261468181486694/pdf/WP>

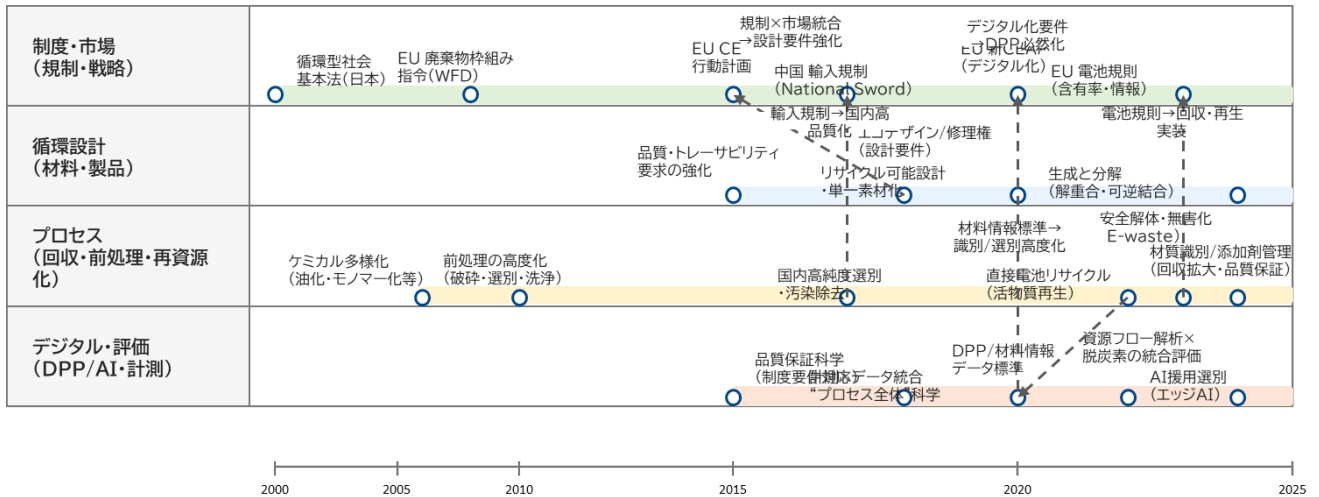
S6058.pdf

- OECD, Financial Management of Flood Risk, [https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2016/07/financial-management-of-flood-risk\\_g1g6865f/9789264257689-en.pdf](https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2016/07/financial-management-of-flood-risk_g1g6865f/9789264257689-en.pdf)
- Van Houtven, G. et al. (2024) 'Economic Value of Flood Forecasts and Early Warning Systems: A Review', Natural Hazards Review, [https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/66527/noaa\\_66527\\_DS1.pdf](https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/66527/noaa_66527_DS1.pdf)
- JAXA, ALOS-2 Overview, [https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/alos-2/a2\\_about\\_e.htm](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/alos-2/a2_about_e.htm)
- SIP4D, SIP4D の概要, <https://www.sip4d.jp/>
- 安田珠幾「線状降水帯の予測精度向上に向けた気象庁の取り組み」  
[https://metsoc.jp/tenki/pdf/2023/2023\\_10\\_0024.pdf](https://metsoc.jp/tenki/pdf/2023/2023_10_0024.pdf)
- CEMS, About GloFAS, <https://global-flood.emergency.copernicus.eu/general-information/about-glofas/>
- WMO Magazine, Regional trends in extreme events in the IPCC 2021 report, <https://wmo.int/media/magazine-article/regional-trends-extreme-events-ipcc-2021-report>
- Mittermaier, M. et al. (2021) 'The Benefits and Challenges of Implementing Impact-Based Severe Weather Warning Systems: Perspectives of Weather, Flood, and Emergency Management Personnel, Climate, and Society, <https://journals.ametsoc.org/downloadpdf/journals/wcas/13/2/WCAS-D-20-0110.1.pdf>
- iRIC, iRIC Software, <https://i-ric.org/en/>
- ICHARM/PWRI, Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) model, [https://www.pwri.go.jp/icharm/research/pdf/research\\_topics/2\\_rri.pdf](https://www.pwri.go.jp/icharm/research/pdf/research_topics/2_rri.pdf)
- Yamazaki Lab, CaMa-Flood: Global Hydrodynamic Model, 12 March 2026, <https://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/cama-flood/>
- MIROC, About d4PDF, database for Policy Decision making for Future climate change, [https://www.miroc-gcm.jp/d4PDF/about\\_en.html](https://www.miroc-gcm.jp/d4PDF/about_en.html)

## 2.3.8 潮流 B8:リサイクル「資源循環技術」

### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



※バーは「顕著に発展・活用が進んだ時期」の目安である。

出所) 点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き: 影響が及ぶ方向(起点から波及先)を示す。  
 矢印上のラベル: 影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-17 技術的進歩と方向性の概要図「資源循環技術」

表 2-85 技術的進歩と方向性(概要)「資源循環技術」

| 概要                                       |  |
|--|--|
| 潮流 A: サークュラーエコノミーの制度化(環境政策→産業競争力・経済安全保障) | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 欧州ではサーキュラーエコノミー行動計画(2015、2020)等を通じ、製品政策・資源効率・循環市場形成を一体で推進し、規制と市場をセットで設計する方向が明確化した。</li> <li>● 日本でも、資源循環政策の再構築、国内資源循環システムの自律化・強靱化、国際市場獲得を掲げる戦略が策定され、動静脈連携の制度整備や官民連携の枠組みが進められている。</li> <li>● 重要鉱物の安定供給(経済安全保障)と資源循環が接続し、リサイクルが「供給確保策の一つ」として位置づけられつつある。</li> <li>● 含意: 基礎研究段階から、(i)制度要件(回収率、再生材含有率、情報開示)に耐える品質保証科学、(ii)リスク・レジリエンスを定量化する資源フロー解析、を組み込む必要がある。</li> </ul>  |
| 潮流 B: プラスチック循環—マテリアルの限界とケミカル/前処理の再評価     | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 世界のプラスチック生産量は長期的に増加しており、廃プラスチックを「貴重な炭素源」として循環させる要請が強まっている。</li> <li>● 日本ではオイルショック期に熱分解油化が試行されたが、石油価格の安定等で1975年以降に多くが下火となった。その後、容器包装リサイクル制度を契機に関心が再燃し、コークス炉原料化・高炉還元・油化・モノマー化・ガス化など多様化した。</li> <li>● 一方で、材料リサイクル比率の伸びには2006年以降に限界が見られ、組成の多様化(樹脂種類・添加剤)も相まって、ケミカルリサイクルへの期待が増大している。</li> <li>● 技術開発の重心は、回収後の破碎・選別・洗浄等の前処理にシフトしている(特許動向でも前処理が増加)。高純度化が再生材価値を左右するためである。</li> <li>● 含意: 触媒・溶媒・反応工学だけでなく、前処理(固体操作)・計測・データを統合した“プロセス全体の科学”が基礎研究として重要。</li> </ul> |

| 概要                                     |  |
|--|--|
| 潮流 C: 越境移動規制・輸入規制強化—「国内循環・高品質化」への転換    | <ul style="list-style-type: none"> <li>● バゼル条約は、海洋プラスチック問題等を背景にプラスチック廃棄物に関する改正が施行され、廃プラの越境移動管理が強化された。</li> <li>● 中国の廃棄物輸入規制強化(National Sword 等)により、世界のプラスチック廃棄物貿易は再編され、輸出依存の処理はリスクが高まった。</li> <li>● 含意: 国内での高純度選別、汚染除去、品質保証、用途開拓(高付加価値用途)を同時に進める必要がある。輸出先の規制・品質要件を見越した材料設計と計測が重要。</li> </ul>   |
| 潮流 D: 電池・重要鉱物—規制が牽引する循環サプライチェーンと「直接再生」 | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 欧州の電池規則は、回収・リサイクル・再生材含有率・情報提供を含む包括的枠組みを制度化し、循環サプライチェーンを「規制で立ち上げる」設計となっている。</li> <li>● 重要鉱物の需要増と供給リスクを背景に、国際機関はリサイクルを供給安定の柱として位置づけている。</li> <li>● 技術潮流として、従来主流の乾式・湿式に加え、電極活物質を再生して利用する直接リサイクル(direct recycling)が、環境負荷低減とコスト低減の観点から注目されている。</li> <li>● 含意: 基礎研究では、(i)再生反応の機構解明(再リチウム化、欠陥・相変化)、(ii)混在系からの選択分離(LFP/NMC 等混在)、(iii)電解液・バインダーの無害化と回収、を重点化すべき。</li> </ul> |
| 潮流 E: 都市鉱山・E-waste—量増加と有害性、そして高選択回収    | <ul style="list-style-type: none"> <li>● E-waste は世界的に増加し、健康・環境リスクが国際的課題となっている。資源価値の高い金属が含まれる一方、有害物質管理が不可欠である。</li> <li>● 含意: 基礎研究では、(i)安全な解体・無害化、(ii)低環境負荷な選択抽出(溶媒・電気化学・生物)、(iii)微量元素の高感度計測と工程制御、を統合した技術体系が必要。</li> </ul>   |
| 潮流 F: 循環性を前提とした材料設計—「生成と分解」の科学         | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 材料の高機能化・複合化は循環を難しくするため、使用時性能と、使用後の分解・分離容易性を同時に設計する方向が強まっている。</li> <li>● 複合構造の生成・分解を自在に制御するという観点から、材料創製(動脈)と分離・リサイクル(静脈)を横断する基礎研究の推進が提案されている。</li> <li>● ポリマーの解重合・再重合の設計論は、モノマー回収型リサイクルの鍵であり、触媒や反応場設計の進展が学術的にも加速している。</li> <li>● 含意: 基礎研究では、可逆結合、選択切断、非平衡プロセスの計測・シミュレーション、ハイスループット実験など、材料化学とプロセス科学の融合が重要。</li> </ul>   |
| 潮流 G: デジタル化(DPP/AI)—循環市場の可視化と動静脈連携     | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 解体・選別等における AI 援用は技術進歩の大きな部分を担い、資源調達から製品利用までデータ活用を前提にする動き(DPP 等)が進んでいる。</li> <li>● SIP では、循環市場の可視化・ビジネス拡大を支えるデジタル化や共通化、動静脈連携、循環性向上と可視化のためのプラットフォーム整備が研究開発テーマとして提示されている。</li> <li>● 含意: データ標準、機械可読な材料情報、プライバシー・機密保持を担保した共有、そして選別現場で使える頑健な計測・推論(エッジ AI)まで、社会実装に耐える“データ循環基盤”を基礎研究から設計する必要がある。</li> </ul>  |

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-86 タイムライン「資源循環技術」

| 年    | 主な進展やイベント   | 含意  |
|------|---|---|
| 2000 | 日本:循環型社会形成推進基本法 (Act No.110 of 2000)制定。                   | 3R を中核とする制度基盤の確立。資源循環を“環境政策”として体系化し、技術開発・実装の政策連動が始まる。 |
| 2004 | G8 サミット(米国)で日本が 3R インシアティブを提案、国際議題化。                      | 国際連携(標準化・技術協力)を通じた循環技術の外延化。                           |
| 2008 | EU:廃棄物枠組み指令(Waste Framework Directive 2008/98/EC)。        | 廃棄物ヒエラルキー、定義・目標の整備。政策が技術の方向性(リデュース/再使用/リサイクル優先)を規定。   |
| 2015 | EU:サーキュラーエコノミー行動計画 (COM(2015) 614)。                       | 製品・市場・廃棄物政策を統合。再生材市場・設計要件が強化され、品質保証とトレーサビリティ需要が増大。    |
| 2016 | G7 富山環境大臣会合:Toyama Framework on Material Cycles。          | 資源効率・3R の国際コミットメントが強化。指標整備・情報共有が進む。                   |
| 2017 | 中国:廃棄物輸入規制強化(National Sword 等)で国際資源循環が再編。                 | 輸出依存の処理が不安定化。国内での高品質選別・高付加価値化が必須に。                    |
| 2018 | EU:プラスチック戦略(COM(2018) 28)。                                | 再生材需要の創出と、リサイクル可能設計の要請が強化。ケミカルリサイクル・単一素材化の研究が加速。      |
| 2019 | EU:使い捨てプラスチック指令 (Directive (EU) 2019/904)。                | 製品規制・回収責任が強化。代替素材・回収技術・設計変更が同時に進む。                    |
| 2019 | バーゼル条約:プラスチック廃棄物に関する改正採択(後に施行)。                           | 越境移動管理の強化。国内処理能力と品質保証の重要性が増大。                         |
| 2020 | EU:新サーキュラーエコノミー行動計画(COM(2020) 98)。                        | 製品政策(エコデザイン、デジタル化、権利修理等)を強化。DPP 等のデータ基盤の必然性が高まる。      |
| 2020 | 日本:循環経済ビジョン 2020 を踏まえ、資源循環政策の再構築が進展。                      | 動静脈連携・循環ビジネスの制度設計が前面化。技術と制度の同時設計が必要。                  |
| 2021 | バーゼル条約のプラスチック改正が施行(管理強化)。                                 | 輸出入の手續厳格化。国内循環と高品質化を前提とした技術・データ整備が求められる。              |
| 2022 | 日本:プラスチック資源循環促進法が施行(焼却偏重からの転換)。                           | 回収・再生利用の拡大。材質識別、異物・添加剤管理、再生材の品質保証が焦点に。                |
| 2022 | UNEA:プラスチック汚染終結に向けた条約交渉(INC)開始(UNEA 5/14)。                | グローバルな規制枠組みが見込まれ、設計・回収・リサイクルの国際整合が重要に。                |
| 2023 | EU:電池規則(Regulation (EU) 2023/1542)採択。                     | 回収・再生材含有率・情報提供が制度化。電池リサイクル技術の社会実装が加速。                 |
| 2023 | 日本:成長志向型の資源自律経済戦略を策定。                                     | 資源循環を成長戦略と位置づけ。研究開発は経済安全保障・市場獲得を見据えた設計が必要。            |
| 2024 | JST-CRDS:研究開発の俯瞰報告書(環境・エネルギー分野)2024、リサイクル章を公表。            | 技術ギャップと研究開発課題の体系整理。基礎研究テーマの選定根拠を提供。                   |
| 2024 | UNEP/IRP:Global Resources Outlook 2024 等で資源消費と環境影響の関係を提示。 | 資源循環を“環境影響の主要レバー”として再確認。資源循環×脱炭素の統合評価が重要。             |
| 2024 | UNITAR/ITU:Global E-waste Monitor 2024。                   | 電子廃棄物の増加と回収率課題が顕在化。都市鉱山技術の高度化・制度連携が急務。                |

### (3) キーテクノロジー

表 2-87 キーテクノロジー「資源循環技術」

| 名称                                      | 出現時期・背景  | 定義  | 主要な技術ギャップ   |
|---|--|---|---|
| 次世代選別・自動解体(複合センシング×AI×ロボット)             | 出現時期: 2010年代後半から研究・実証が加速し、2020年代にスマート選別・ロボット解体の導入が拡大。<br>背景: 中国の廃プラ輸入規制(2018)等で高品位選別の必要性が増大、NIR/XRF/3D/ハイパスペクトル等の複合センシングとAI(画像認識・最適化)の進歩、労働力不足と安全性確保、循環型経済政策(EU 廃棄物枠組・CE アクションプラン、国内の資源循環法制)による後押し。                          | 廃製品・廃材から、材質・汚染・劣化状態を高精度に推定し、解体・ピッキング等を自動化して高純度のリサイクル原料(再資源化前段)を安定供給する技術群。 | ギャップ: ①多様な廃材(汚れ・破損・混在)への頑健な材質識別、②処理速度と精度の両立、③安全化(電池放電、火災・爆発リスク低減)、④現場導入コスト。<br>目安: 3-5年で主要品目(容器包装・家電・一部電池)の自動化拡大、5-8年でマルチマテリアル製品へ展開。<br>理由: センシング・AIは急速に進展する一方、現場データ蓄積と標準化、機械・工程インタフェース整備に時間を要する。 |
| 選択的解重合によるモノマー回収(ケミカルリサイクル高度化)           | 出現時期: PET等の解重合は既存だが、選択性の高い触媒・酵素・温和条件の開発により高度化が2010年代後半~2020年代に進展、実証・商用化の動きが拡大。<br>背景: 高純度再生材ニーズと難混合プラ対応、GHG削減と資源循環要請、EUプラスチック戦略など政策誘導、触媒科学・反応工学・プロセス設計の飛躍。   | PET等の特定ポリマーを選択的に化学分解し、モノマーまたは高純度中間体として回収して再重合に戻す“閉ループ”化学循環。               | ギャップ: ①混合・添加剤・着色等の影響下での高選択性、②低温・低エネルギー化、③触媒寿命・耐毒性、④回収モノマーの品質保証。<br>目安: 3-5年で限定ストリーム(高純度PET等)の高効率化、5-10年で混合プラへの適用拡大。<br>理由: 基礎触媒化学の進展は速いが、廃材の実系は複雑で、前処理・計測・システム統合がボトルネック。                          |
| 電池の直接リサイクル(cathode-to-cathode)と低環境負荷前処理 | 出現時期: 2010年代前半に概念が現れ、2018年以降に手法確立が進み、2020年代にパイロット・実証事例が増加。<br>背景: EV普及でLIB需要が急増しNi/Co/Li等の重要鉱物の供給リスクが顕在化、従来の乾式/湿式法の環境負荷や材料劣化の課題に対し、カソード特性を保持した直接再生と低エネルギー前処理(溶媒抽出・水系バインダ剥離・自動解体等)への期待、EU電池規則(回収率・再生材含有・パスポート)や各国資源安全保障の政策要請。 | 使用済みLiBの電極材料(正極・負極)を、元素抽出ではなく材料として再生し、新電池材料として再利用する循環。前段で安全化・解体・分離を含む。    | ギャップ: ①劣化状態の診断と再生条件最適化(再リチウム化等)、②化学系混在(NMC/LFP等)への対応、③電解液・バインダの無害化と回収、④品質規格・評価手法。<br>目安: 3-5年で特定化学系・単一ストリームのパイロット実装、5-8年で混在系への拡張。<br>理由: 規制・市場の追い風は強い一方、品質保証と混在系分離が難題。                            |

| 名称                                       | 出現時期・背景   | 定義  | 主要な技術ギャップ   |
|--|---|---|---|
| 複合材・マルチマテリアルの可逆接合／分解プロセス ( solvolysis 等) | 出現時期: 2000 年代からの CFRP リサイクル研究を基盤に、2010 年代後半～2020 年代に溶媒分解(solvolysis)や可逆結合化学(例: Diels-Alder)を活用した分解・再接合技術が進展。<br>背景: 航空・自動車分野で増える CFRP 廃材に対し高品位繊維回収・再利用のニーズ、解体容易化 (Design for Disassembly) を前提とした設計・接合への転換、循環設計を促す政策・戦略の後押し。 | CFRP 等の熱硬化性複合材や多層構造製品について、接合部・樹脂・界面を選択的に分解・剥離し、繊維や基材を高性能のまま回収する技術群。 | ギャップ: ①回収繊維の性能保持と品質評価、②樹脂側の再利用(モノマー・オリゴマー回収)、③溶媒・反応条件の安全性・環境負荷、④コストとスケールアップ。<br>目安: 5-10 年。<br>理由: 材料・界面の複雑性が高く、プロセス最適化に加えて“生成と分解”の設計科学が必要。                               |
| トレーサビリティ基盤 (材料情報の機械可読化・標準・データ連携)         | 出現時期: 2020 年代に EU を中心にデジタル・プロダクト・パスポート(DPP)構想が政策化、EU 電池規則でバッテリーパスポートが制度化。日本でも 2020 年代に資源自律経済戦略や SIP でデータ連携基盤の実証が進展。<br>背景: 高品質リサイクル・サーキュラー設計に必要な材料・構成・使用履歴の機械可読化、サプライチェーンの責任ある資源管理・環境報告・炭素管理要請の高まり、規制により製品データ提出・共有が求められる潮流。 | 材料組成・添加剤・製造ロット・修理履歴等を、回収・選別・再資源化で利用できる形で記録・共有するデータ基盤(DPP 等を含む)。     | ギャップ: ①データ項目・粒度の標準化、②機密性/プライバシーと共有の両立、③現場計測との整合(タグ情報と実測の差異)、④データを価値に変えるアプリ(選別制御、品質保証、制度報告)。<br>目安: 2-4 年で標準・実証、5 年程度で主要サプライチェーンに横展開。<br>理由: 技術よりも合意形成と実証が鍵。SIP 等で基盤整備が進む。 |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-88 実用化可能性「資源循環技術」

| セクター                    | ユースケースや波及が期待される産業領域  |
|-------------------------|--|
| 自動車・蓄電池                 | EV/HEV 用電池のリサイクル(ブラックマス回収～材料再生)、電池材料の国内循環、電池パスポート対応、再生材含有率対応。リユース(セカンドライフ)との組合せ。 |
| 化学・素材(プラスチック/高分子)       | モノマー回収型リサイクル(PET 等)、混合プラ原料化、再生材の高付加価値用途(高機能材、化学品原料)、製品設計変更(単一素材化・可逆接合)。          |
| エレクトロニクス・半導体            | 電子廃棄物からの貴金属・レアメタル回収、磁石・モーター由来希土類回収、半導体材料の回収・再精製、国内サプライチェーン強靱化。                   |
| 建設・インフラ                 | コンクリート・アスファルト・鋼材等の高品質リサイクル、解体材のトレーサビリティ、建材中有害物質の分離・無害化、都市更新と連動した資源回収。            |
| 繊維・アパレル                 | ポリエステル/ナイロン等の繊維 to 繊維リサイクル、混紡・染料・仕上げ剤の分離、リサイクル適合設計、回収スキーム(回収ボックス等)と品質保証。         |
| 自治体・静脈産業(廃棄物処理・リサイクル事業) | AI/ロボット選別による人手不足対応、汚染・混在物の高精度管理、広域連携によるスケール確保、災害廃棄物対応を含むレジリエンス強化。                |

## (5) インタビュー結果を踏まえた今後の潮流および研究の方向性

中核研究者へのインタビュー結果に基づき、今後 5 年から 10 年の潮流および研究の方向性を整理した。

表 2-89 今後の潮流および研究の方向性「資源循環技術」

| 項目  | 概要  |
|---|---|
| 新たに浮上している、または今後 5 年から 10 年の間に浮上すると考えられる技術トレンド、技術的ブレークスルーの可能性、技術面の障壁、規制・倫理も含む非技術面の障壁 | ケミカルリサイクルの商用再進展<br>油化(熱分解/触媒分解/超臨界水油化)や溶解法の商用プラントが国内で稼働・計画<br>ガス化リサイクルとガス化後の多用途利用<br>合成ガス化した後、アンモニア原料や水素として利用。プラ→プラ回帰志向とは異なるが、水素社会の進展で再評価の余地がある<br>前処理・選別の高度化<br>近赤外線(NIR)工学選別による樹脂種判別、樹脂波形のライブラリ化による選別、ケミリサイクルの前処理として「高純度化」より「入っては困るものの徹底除去」がより現実的方向性<br>計測・トレーサビリティ<br>デジタルパスポート(DPP)や認証と連動する再生由来プラの真正性証明のための追跡可能データ基盤整備等。<br>非技術的障壁<br>制度・認証の不確実性、コスト負担配分、国内外サプライチェーン連携、消費者分別・回収の社会実装など、社会設計と計測・データ・機械の三位一体アプローチが不可欠 |
| 他分野研究連携の必要性   | AI 画像認識・ロボティクス・流体/粒子光学・光学計測・材料劣化診断等の連携<br>プラスチックの経済価値は低いため、処理スループット・コストの両立が前提条件   |
| わが国のアセット(人材・インフラ等)と国外プレイヤー・チームとの比較  | 廃棄物収集社会システムの違いにより、欧州では広域・大型ソーティングセンターを設置し、データ取得・採算確保がしやすいのに対し、日本は地域分散・中小事業者中心でスケールメリットが出にくい。このため選別機でも欧州勢が優位(Tomra, Pellenc ST が寡占)  |
| 今後5年から10年の間において潮流となり得る研究の方向性  | 上述技術トレンドに同じ。特に「計測・トレーサビリティ」に関してデータ駆動の資源循環(産業廃プラの種類・量・形状の推定・検証プラットフォーム(産廃事業者の計測ゲート設置・匿名化データ集約・地域別ヒートマップ化))   |
| 今後の当該分野において優先すべき研究課題・支援形態   | 優先課題は上述のとおり。支援形態としては、制度整備と一体の実証、前処理・調達・品質保証の仕組みがキーとなる   |

## (6) 出所

- JST 研究開発戦略センター(CRDS)「研究開発の俯瞰報告書(環境・エネルギー分野)2024」, <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2024-FR-02.html>
- JST 研究開発戦略センター(CRDS)戦略プロポーザル「物質循環を目指した複合構造の生成・分解制御」, <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2020/SP/CRDS-FY2020-SP-05.pdf>
- JST 研究開発戦略センター(CRDS)戦略プロポーザル「環境調和型プラスチック戦略」, <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2019/SP/CRDS-FY2019-SP-07.pdf>
- 経済産業省, 「「成長志向型の資源自律経済戦略」を策定しました」2023年3月31日, <https://www.meti.go.jp/press/2022/03/20230331010/20230331010.html>
- 独立行政法人 環境再生保全機構(ERCA), SIP 第3期課題「サーキュラーエコノミーシステムの構築」, <https://www.erca.go.jp/sip/ce.html>
- Japanese Law Translation, Basic Act for Establishing a Sound Material-Cycle Society, Act No.110 of June 2, 2000, <https://www.japaneselawtranslation.go.jp/en/laws/view/3799/en>

- 環境省, 3R Initiative, <https://www.env.go.jp/recycle/3r/initiative/en/index.html>
- European Union, COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A52015DC0614>
- European Commission, COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098>
- European Commission, COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS A European Strategy for Plastics in a Circular Economy, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52018DC0028>
- Directive (EU) 2019/904 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment, <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/904/oj>
- Basel Convention, Plastic Waste Amendments, <https://www.basel.int/Implementation/Plasticwaste/Amendments/Overview/tabid/8426/Default.aspx>
- United Nations Environment Programme (UNEP), Intergovernmental Negotiating Committee on Plastic Pollution, <https://www.unep.org/inc-plastic-pollution>
- Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC, <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj/eng>
- International Energy Agency (IEA), Global Critical Minerals Outlook 2024, <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024>
- OECD, Monitoring progress towards a resource efficient and circular economy in the OECD area, <https://smart2circular.com/2025/10/04/monitoring-progress-towards-a-resource-efficient-and-circular-economy/#:~:text=OECD%E2%80%99s%20report%20offers%20a%20framework%20and%20indicators%20to,material%20footprint%2C%20circularity%20rate%2C%20and%20product%20lifetime%20metrics>
- UNEP/International Resource Panel, Global Resources Outlook 2024, <https://www.resourcepanel.org/reports/global-resources-outlook-2024>
- UNITAR/ITU, The Global E-waste Monitor 2024, <https://www.resourcepanel.org/reports/global-resources-outlook-2024>
- World Health Organization, Electronic waste(e-waste) Fact sheet, 1 October 2024, <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/e-waste>
- Cao, Y. et al., "A review of direct recycling methods for spent lithium-ion batteries", Energy Storage Materials, 2024, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2405829724003027>
- Clark, R. A.; Shaver, M. P., Depolymerization within a Circular Plastics System, Chemical Reviews, 2024, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.3c00739>
- Fang, B. et al., Artificial intelligence for waste management in smart cities, a review, 2023, PMC, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10169138/>
- Tembo, P. M. et al., Lithium-ion battery recycling—a review of the material supply and policy infrastructure, 2024, Nature, <https://www.nature.com/articles/s41427-024-00562-8>
- Brooks, A. L.; Wang, S.; Jambeck, J. R., The Chinese import ban and its impact on global plastic waste trade, Science Advances, 2018, <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aat0131>
- Ateeq, M. et al., A state of art review on recycling and remanufacturing of the carbon fiber from carbon fiber polymer composite, 2023, ScienceDirect,

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666682023000683>

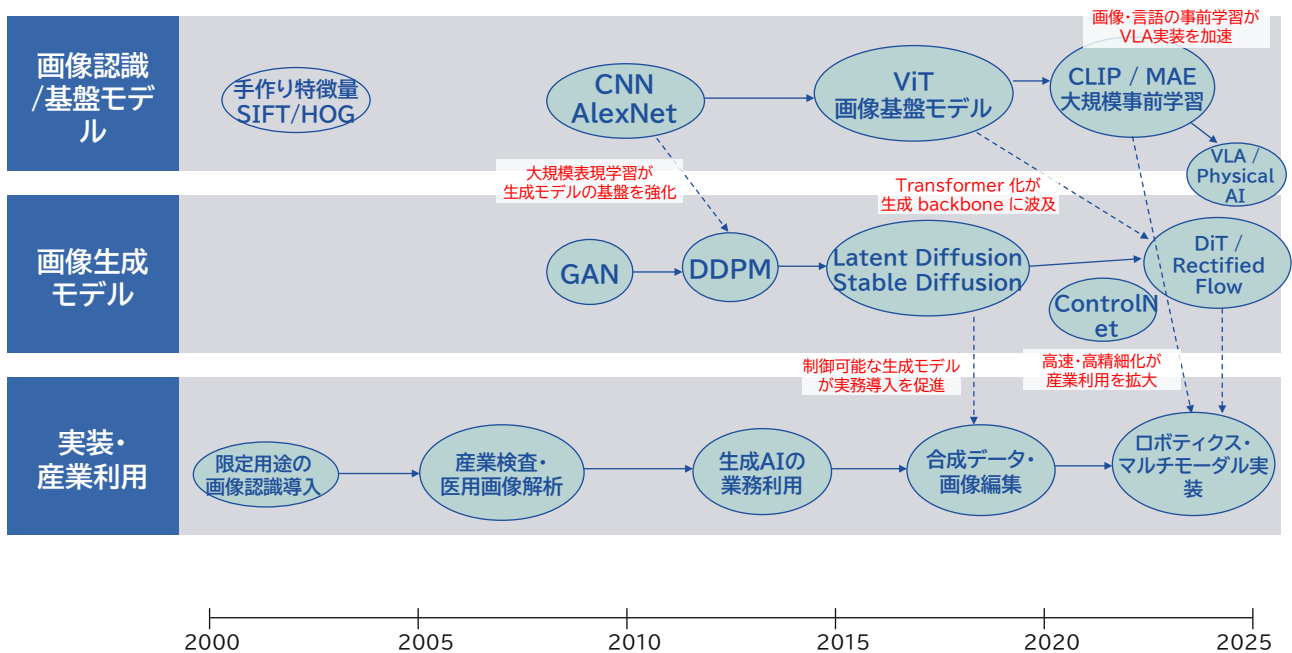
- European Commission, Waste Framework Directive, [https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive_en)
- Japan Waste Network, Waste management in Japan: Rules and Figures, July 2023, [https://www.jwnet.or.jp/en/assets/files/Waste\\_management\\_in\\_Japan\\_Rules\\_and\\_Figures\\_July2023.pdf](https://www.jwnet.or.jp/en/assets/files/Waste_management_in_Japan_Rules_and_Figures_July2023.pdf)
- G7 Toyama Environment Ministers, “Toyama Framework on Material Cycles”, <https://www.mofa.go.jp/files/000159928.pdf>
- 経済産業省「第1章 重要鉱物の安定供給確保のための取組の基本的な方向に関する事項」, [https://www.meti.go.jp/policy/economy/economic\\_security/metal/torikumihoshin.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/economy/economic_security/metal/torikumihoshin.pdf)

## 2.4 システム・情報科学技術分野

### 2.4.1 潮流 C1/C2:知覚・運動系の AI 技術「基盤モデル的なアプローチの画像分野への適用/拡散モデル等による画像生成モデルの高精度化」

#### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



出所) 点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き: 影響が及ぶ方向(起点から波及先)を示す。  
 矢印上のラベル: 影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-18 技術的進歩と方向性の概要図「基盤モデル的なアプローチの画像分野への適用/拡散モデル等による画像生成モデルの高精度化」

表 2-90 技術的進歩と方向性(概要)「基盤モデル的なアプローチの画像分野への適用/拡散モデル等による画像生成モデルの高精度化」

| 概要   |  |
|--|--|
| <b>基盤モデル的なアプローチの画像分野への適用</b>   |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● 2012 年の AlexNet により、大規模データ+ GPU + end-to-end 深層特徴学習が視覚 AI の実用上の標準となった</li> <li>● 2020 年の Vision Transformer (ViT) は、画像をパッチ列として扱う pure transformer で高性能を示し、視覚モデルにも「大規模事前学習+転移」のスケーリング則が成立することを明かにした</li> <li>● 2021 年の CLIP は、4 億組の画像・テキスト対から学習し、自然言語による zero-shot transfer を実証した。これにより、画像認識は固定ラベル空間から言語条件のオープンな概念空間へ広がった</li> <li>● 2023 年以降は、RT-2 や各種 VLA によって、インターネット規模で事前学習した VLM をロボット制御へ接続する方向が本格化した。VLA は vision/language/action を一体処理し、物理世界での行動生成まで担う</li> </ul>   |  |
| <b>拡散モデル等による画像生成モデルの高精度化</b>   |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● 2014 年の GAN は、generator と discriminator を adversarial に学習させる枠組みを導入し、深層画像生成手法を大きく前進させた</li> <li>● 2020 年の DDPM は、拡散確率モデルで高品質の画像生成性能を示し、これが画像生成の主流を GAN から拡散モデルへ動かす転機になった</li> <li>● 2022 年の Stable Diffusion は、latent text-to-image diffusion の代表的オープン実装系であり、オープンな微調整・派生モデルの爆発的拡張を通じて、画像生成の産業利用を一気に広げた</li> <li>● 2023 年以降は、ControlNet によりエッジ・深度・セグメンテーション・人体姿勢などでの空間条件制御が強化され、DiT により diffusion backbone の transformer 化とスケーリングが進行</li> <li>● 2024 年以降は、rectified flow transformers も高解像度 text-to-image で有力な選択肢であり、品質だけでなく高速サンプリングと大規模学習の予測可能性が競争軸となっている</li> </ul> |  |

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-91 タイムライン「基盤モデル的なアプローチの画像分野への適用/拡散モデル等による画像生成モデルの高精度化」

| 年代            | 主要なイベント                                      | コンピュータビジョン分野へのインパクト  |
|---------------|--|--|
| 2000<br>-2009 | SIFT 等の手作り特徴量が主流                             | 画像理解はタスク別・特徴量別の個別最適段階  |
| 2012          | AlexNet / ImageNet による画像認識のブレイクスルー           | 大規模データを用いた end-to-end 表現学習が主流化   |
| 2014          | GAN  | 画像生成が深層学習の独立した研究トピックとなる  |
| 2020<br>-2021 | ViT, CLIP, DDPM                              | Transformer 化と image-text 事前学習でコンピュータビジョン分野の基盤モデルの原型が成立<br>Diffusion モデルが高品質生成の中核候補として浮上 |
| 2022          | MAE, CFG, Latent Diffusion, Stable Diffusion | 自己教師あり・大規模事前学習が強化<br>品質・制御性・計算効率が同時進化し、オープン実装が普及   |
| 2023          | RT-2/VLA, ControlNet, DiT                    | 知覚→言語→行動の統合が顕在化<br>条件制御と transformer backbone 化が進む                                       |
| 2024<br>-2026 | Rectified Flow, Physical AI                  | 画像基盤モデルがフィジカル AI/ロボティクスへ拡張<br>高解像度・高速生成と安全性が焦点   |

### (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-92 キーテクノロジー「基盤モデル的なアプローチの画像分野への適用/拡散モデル等による画像生成モデルの高精度化」

| 名称                       | 出現時期・背景   | 定義   | 代表研究・モデル    | 主な特徴                           |
|--------------------------|---|--|-------------|--------------------------------|
| 知覚・運動系 AI(VLA)           | 出現時期: 2022-2023(特に RT-2: 2023)<br>背景: 大規模視覚・言語モデルの知識をロボット行動へ転移。Web 画像+テキストとロボットデータの統合で、1モデルが知覚→行動までを扱う流れが確立。  | 視覚・言語・行動を統合し、物理世界でロボット行動を生成する                  | RT-2、各種 VLA | 実世界の一般化、言語指示による柔軟な制御           |
| Vision Transformer (ViT) | 出現時期: 2020(arXiv, ICLR 2021)<br>背景: 画像をパッチ列として Transformer で処理し、大規模事前学習(JFT-300M 等)で CNN に匹敵/上回る性能を示すパラダイム転換。   | 画像をパッチ列としトークン化し、transformer で処理する基盤モデル         | ViT         | スケーラブル、事前学習・転移に適合、マルチモーダル接続が容易 |
| 画像基盤モデル(CLIP / MAE 系)    | ・ CLIP<br>出現時期: 2021<br>背景: インターネット規模のテキスト-画像対でコントラスト学習し、ゼロショット認識を実現。視覚と言語の結合表現が標準化。<br>・ MAE<br>出現時期: 2021/2022<br>背景: 画像パッチのマスク再構成による自己教師学習で汎用視覚表現を獲得し、下流タスクの強力な初期化に。             | 画像-言語対比学習や masked image modeling で汎用視覚表現を学ぶ    | CLIP、MAE    | zero-shot / 転移学習、ラベル依存低減       |
| GAN                      | 出現時期: 2014<br>背景: 生成器と識別器の対立学習で高品質画像生成を実現し、その後の StyleGAN 等へ発展。拡散モデル台頭前の主流生成法。   | generator と discriminator の minimax 学習による生成モデル | GAN、cGAN    | 画像生成モデルの初期マイルストーン              |
| 拡散モデル (DDPM + CFG)       | ・ DDPM<br>出現時期: 2020<br>背景: ノイズ付加/除去の確率過程で高忠実度サンプルを生成し、GAN で課題だったモード崩壊を抑制。<br>・ Classifier-Free Guidance (CFG)<br>出現時期: 2021/2022<br>背景: 分類器を使わずに条件付き生成の強度を調整し、テキスト条件の制御性・忠実度を大幅強化。 | 逐次ノイズ除去の逆過程を学習し、条件制御で画質と多様性を調整                 | DDPM、CFG    | 高画質、条件付き生成の安定性                 |

| 名称                                | 出現時期・背景  | 定義  | 代表研究・モデル                                   | 主な特徴                           |
|-----------------------------------|--|---|--|--------------------------------|
| Stable Diffusion                  | 出現時期: 2022<br>背景: 潜在拡散(LDM)でピクセル空間を潜在空間に圧縮し、高速・省メモリなテキストから画像生成を実現し、オープンモデルとして普及した。   | latent diffusion を用いる text-to-image モデル。CLIP ViT-L/14 をテキストエンコーダとして利用 | Stable Diffusion 系                         | オープン実装、微調整容易、エコシステムが大きい        |
| ControlNet / DiT / Rectified Flow | <ul style="list-style-type: none"> <li>ControlNet<br/>出現時期: 2023<br/>背景: 事前学習済み拡散モデルに条件分岐を付与し、エッジ・ポーズ・深度などの追加条件を高忠実に反映して制御性を向上。<br/>出所: Zhang et al., “Adding Conditional Control to Text-to-Image Diffusion Models” (2023)</li> <li>DiT(Diffusion Transformer)<br/>出現時期: 2023<br/>背景: UNet を Transformer 系アーキテクチャに置換し、スケーリング効率と性能を向上。大規模生成での SOTA を牽引。</li> <li>Rectified Flow<br/>出現時期: 2024(大規模化の実証)<br/>背景: 拡散の確率過程ではなく整流化されたフロー(常微分方程式)を直接学習し、少ステップで高品質生成とスケーリング耐性を両立。</li> </ul> | 拡散生成の制御性・スケーリング・高速性を高める拡張群  | ControlNet、DiT、Rectified Flow Transformers | 空間制御、transformer scaling、高解像度化 |

## (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-93 実用化可能性「基盤モデル的なアプローチの画像分野への適用/拡散モデル等による画像生成モデルの高精度化」

| 技術                            | 代表的なユースケース                                 | 適用分野産業領域                | 実装上の留意点                 |
|-------------------------------|--|-------------------------|-------------------------|
| ViT / 画像基盤モデル                 | 外観検査、医用画像解析支援、リモートセンシング、映像解析               | 製造、医療、農業、物流、インフラ、衛星     | ドメイン適応、説明性、データ品質        |
| Stable Diffusion / ControlNet | クリエイティブ支援、広告・コンテンツ制作、設計初期案生成、画像編集、構造条件付き生成 | クリエイティブ産業、広告、製造設計、建築、教育 | 権利処理、バイアス、安全フィルタ        |
| Diffusion 系生成モデル(合成データ用途)     | 希少ケース生成、学習データ拡張、シミュレーション補完、匿名化補助           | 医療、製造、自動運転、保険、公共安全      | 真正性評価、分布ずれ、規制準拠         |
| 知覚・運動系 AI / VLA               | ピッキング、組立支援、巡回点検、サービスロボット、マルチタスク作業          | 製造、物流、小売、介護・医療支援、インフラ保守 | 実機学習コスト、安全性、テストベッド、責任分界 |
| AI for Science / ロボット駆動科学     | 科学画像解析、自動実験、仮説生成とロボット検証                    | 材料・化学・バイオ、研究開発、公共研究機関   | 研究データ基盤、計算資源、再現性、       |

## (5) 出所

- Krizhevsky et al. “ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks” (2012)
- Goodfellow et al. “Generative Adversarial Nets” (2014)
- Dosovitskiy et al. “An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale” (2020)
- Radford et al. “Learning Transferable Visual Models From Natural Language Supervision” (2021)
- He et al. “Masked Autoencoders Are Scalable Vision Learners” (2021/2022)
- Ho & Salimans “Classifier-Free Diffusion Guidance” (2022)
- Rombach et al. “High-Resolution Image Synthesis with Latent Diffusion Models” (2022)
- Zhang et al. “Adding Conditional Control to Text-to-Image Diffusion Models” (2023)
- Peebles & Xie “Scalable Diffusion Models with Transformers” (2023)
- Brohan et al. “RT-2: Vision-Language-Action Models Transfer Web Knowledge to Robotic Control” (2023)
- Ma et al. (2024) “A Survey on Vision-Language-Action Models for Embodied AI”
- Esser et al. (2024) “Scaling Rectified Flow Transformers for High-Resolution Image Synthesis”

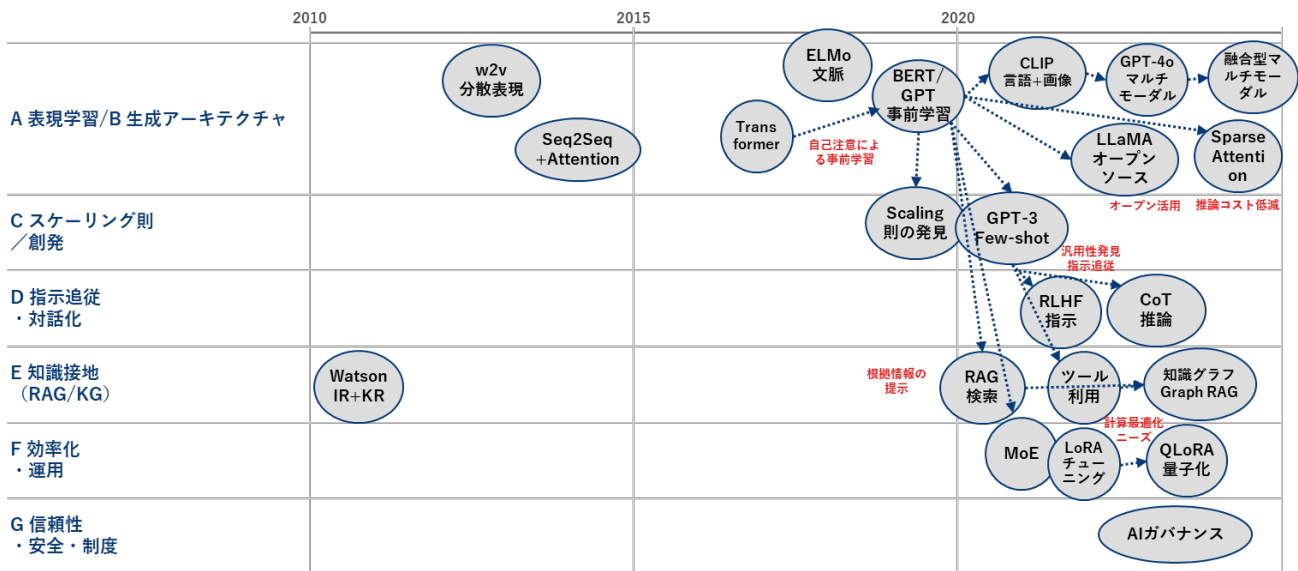
## 2.4.2 潮流 C3: 言語・知識系の AI 技術「大規模言語モデルの汎用性発見と急速な実用化の進展」

### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。

スケーリング則の発見、大規模化、多様なタスクへの汎用性の発見、人間によるフィードバック等のマイルストーンを経て、言語ベースの基盤モデルが実用化された。

現状の課題である効率性、信頼性、説明可能性等に対応するため、継続的に研究開発が行われている。



出所)点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き:影響が及ぶ方向(起点から波及先)を示す。  
 矢印上のラベル:影響関係の内容を簡潔に示す。

図

2-19 技術的進歩と方向性の概要図「大規模言語モデルの汎用性発見と急速な実用化の進展」

表 2-94 技術的進歩と方向性(概要)「大規模言語モデルの汎用性発見と急速な実用化の進展」

| 概要  |  |
|---|--|
| (A)分散表現 → 文脈化表現 → 基盤モデル(表現学習の連続進化)              | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 単語埋め込み(分散表現)→文脈依存埋め込み(ELMo 等)→Transformer 事前学習(BERT/GPT)へ。</li> <li>● 表現の汎用性から行為(ツール利用)を含む汎用性へ拡張。</li> </ul>                            |
| (B)Seq2Seq + Attention → Transformer(生成タスクの基盤化) | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 機械翻訳を中心に、Seq2Seq と Attention が確立し、Transformer が主流化。</li> <li>● 長文脈化・効率化(Mixture of Experts、KV キャッシュ、量子化等)と結びつき、推論コストが実用レベルに。</li> </ul> |
| (C)スケーリング則+創発(汎用性の発見を理論・経験則で支える)                | <ul style="list-style-type: none"> <li>● スケーリング則(scaling laws)と、スケールで現れる現象(創発/emergent)議論。</li> <li>● ただ大きくする方向から、外部知識・ツール統合や信頼性設計で性能を上げる方向に。</li> </ul>                         |
| (D)指示追従・対話化(Instruction tuning / RLHF / CoT)    | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 指示データでの微調整、RLHF、プロンプトで推論過程を引き出す Chain of thoughts により実用性が向上。</li> <li>● 人手依存を下げる整合(例:原則ベースの自己改善)や、評価・監査可能性の強化。</li> </ul>               |
| (E)知識接地(Grounding)—RAG/大規模検索/知識グラフ              | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 生成 AI の弱点(最新性・根拠・社内固有知識)を、検索・DB・知識グラフ(KG)で補完。</li> <li>● エンタープライズでは RAG+アクセス制御+監査ログにより実用化に目途。</li> </ul>                                |
| (F)効率化・運用技術(MoE、PEFT、量子化)                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 学習・推論コストが普及のボトルネック化し、効率化が中核テーマに。</li> <li>● 2021～:LoRA/QLoRA 等で、大規模モデルの調整ハードルを大きく低下</li> </ul>  |
| (G)信頼性・安全・制度(Trusted AI / ガバナンス)                | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 技術面:安全学習、監査、評価、レッドチーミング、データガバナンス</li> <li>● 制度面:リスク管理枠組み・規制・国家計画</li> </ul>   |

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-95 タイムライン「大規模言語モデルの汎用性発見と急速な実用化の進展」

| 年代        | 進展(言語・知識系)                 | 文献名                      | 技術の位置づけ                         |
|-----------|----------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| 2001-2003 | 確率的トピックモデル(LDA)            | Blei et al., 2003        | 文書集合から“潜在構造(話題)”を抽出=知識処理の基盤     |
| 2006-2011 | オープンドメイン QA の統合(IR+NLP+KR) | IBM Watson (Jeopardy!)   | “言語理解+検索+推論”を統合する大規模アーキテクチャの先行例 |
| 2008      | ニューラル NLP の統合的設計(多タスク学習)   | Collobert & Weston, 2008 | 特徴設計中心から表現学習へ                   |
| 2013      | 分散表現(word2vec)             | Mikolov et al., 2013     | 言語表現の学習が一般化                     |
| 2014      | Seq2Seq(系列変換の一般形)          | Sutskever et al., 2014   | 翻訳・要約など生成系タスクの標準骨格              |
|           | Attention 機構(アライメント)       | Bahdanau et al., 2014    | 長文・構造対応が改善し、後の Transformer へ    |
| 2017      | Transformer                | Vaswani et al., 2017     | LLM の基盤アーキテクチャ確立                |
| 2018      | 文脈化表現(ELMo)                | Peters et al., 2018      | 同じ単語でも文脈で意味が変わる仕組み              |
|           | 事前学習 Transformer (BERT)    | Devlin et al., 2018      | 下流タスク転移が標準化                     |
|           | 生成事前学習(GPT-2)              | Radford et al., 2018     | 生成モデルを汎用基盤とする方向性を明確化            |

| 年代   | 進展(言語・知識系)                                       | 文献名                      | 技術の位置づけ                    |
|------|--|--------------------------|----------------------------|
| 2020 | スケーリング則  | Kaplan et al., 2020      | 研究→産業投資の設計指針に              |
|      | “Few shot learners”ペーパー(GPT-3)                   | Brown et al., 2020       | プロンプトを用いた汎用性の発見            |
|      | RAG(検索拡張生成)                                      | Lewis et al., 2020       | 業務の正確性・根拠要求に接続             |
| 2021 | MoE(Switch Transformer)                          | Fedus et al.             | 容量増と計算量の分離、効率化             |
|      | マルチモーダル基盤(CLIP)                                  | Radford et al., 2021     | 言語中心からマルチモーダルへ             |
| 2022 | RLHF(指示追従)                                       | Ouyang et al., 2022      | 実用 UX(対話 AI)を形成            |
|      | CoT プロンプト  | Wei et al., 2022         | 推論系タスクの実用性を押し上げ            |
| 2023 | オープン基盤モデル(LLaMA)                                 | Touvron et al., 2023     | 研究・産業の再利用性が拡大              |
|      | ツール利用(Toolformer)                                | Schick et al., 2023      | 生成→作業(実行)へ                 |
|      | 量子化微調整(QLoRA)                                    | Dettmers et al., 2023    | 導入コストを下げ普及を後押し             |
| 2024 | マルチモーダルによるリアルタイム対話(音声/画像/動画)(GPT-4o System Card) | Hurst et al., 2024       | 音声を含むリアルタイム・マルチモーダルの対話/補助へ |
|      | オープン基盤モデルの高性能化(多言語・コーディング・推論・ツール利用)(Llama3)      | Grattafiori et al., 2024 | オープン活用の選択肢が拡大              |
| 2025 | 効率的な長文脈のための疎注意(Sparse Attention)の実装・学習の両立(NSA)   | Yuan et al., 2025        | コスト面の効率化                   |

### (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-96 キーテクノロジー「大規模言語モデルの汎用性発見と急速な実用化の進展」

| 名称                       | 出現時期・背景  | 定義                                    | LLM 汎用性／実用化での役割 |
|--------------------------|--|---------------------------------------|-----------------|
| 基盤モデル (Foundation model) | 出現時期: 2021 年ごろ(用語の定義・普及)。2023 年以降、一般公開モデルにより実務で定着。<br>背景: Transformer+ 自己教師ありの大規模事前学習で汎用表現を獲得し、多タスク転移が可能に。 | 広範なデータを自己教師ありで学習し、多様な下流タスクへ適用可能な汎用モデル | 1 モデル多用途の前提     |
| 大規模言語モデル (LLM)           | 出現時期: 2018-2020(BERT, GPT-2, GPT-3 で広く認知)。<br>背景: Transformer と自己教師あり事前学習のスケールアップにより、汎用 NLP 能力が顕在化。        | 大規模コーパスで学習した言語生成モデル(多用途タスクへ適用)        | 言語タスクの汎用エンジン    |
| Transformer              | 出現時期: 2017。<br>背景: 自己注意により長距離依存と並列化の課題を解決、スケーラブルな事前学習を可能化。   | Self-Attention 中心の系列モデル               | 大規模並列学習を可能にし主流化 |

| 名称                       | 出現時期・背景   | 定義                           | LLM 汎用性／<br>実用化での役割 |
|--------------------------|---|------------------------------|---------------------|
| 自己教師あり学習                 | 出現時期: NLP で 2013-2019 に定着 (word2vec→BERT/GPT 系)。ビジョン・テキスト統合は 2021 年前後 (CLIP)。背景: ラベル不要の大規模コーパス/画像-テキストから表現を学習し、下流タスクへ転移。    | ラベルなしから予測課題を作って学習 (次トークン予測等) | データ制約を緩和しスケールを可能に   |
| スケーリング則                  | 出現時期: 2020 (言語モデルの損失がパラメータ数・データ・計算で冪乗則に従うと定量化)。背景: スケールが性能を規定する設計指針を確立。2022 年に計算最適 (Chinchilla) で実務指針が更新。                   | モデル/データ/計算量と性能の経験則           | スケール拡大への投資を誘引       |
| In-context learning      | 出現時期: 2020 (GPT-3 で Few-shot/Zero-shot 適応が顕在化)。背景: 大規模 Transformer がプロンプト内の例示だけでタスク適応する挙動が観測。                               | プロンプト内の例示・指示で振る舞いを変える        | 学習なし適応による汎用性の獲得     |
| Instruction tuning       | 出現時期: 2021-2022。背景: 人手作成/集約した指示データで SFT し「指示に従う」挙動を獲得 (RLHF の前段/代替)。  | 指示文形式のデータで微調整                | 指示追従性・汎化の改善         |
| RLHF                     | 出現時期: 2017 (人間の嗜好学習) → 2022 (InstructGPT で LLM に本格適用)。背景: 人間の比較評価から報酬モデルを学習し、強化学習で出力を人間基準に整合。                               | 人間評価を報酬にした強化学習で整合            | 有用性・安全性・対話品質の向上     |
| CoT プロンプト                | 出現時期: 2022。背景: 「思考の連鎖」を明示するプロンプトで算数・推論系タスクの性能が大幅向上。   | 推論過程 (中間ステップ) を誘導する提示法       | 複雑推論で性能改善           |
| RAG                      | 出現時期: 2020。背景: 外部検索・ベクタ DB で最新/長尾知識を参照し、幻覚と陳腐化を緩和。  | 生成時に検索結果を参照し、知識を外部から供給       | 最新性・根拠・社内知識の統合      |
| ツール利用 (Tool use)         | 出現時期: 2021-2023 (ブラウザ/検索/計算器/API の呼び出しが一般化)。背景: 外部ツールを計画的に利用して知識・計算・行動範囲を拡張、エージェント化の基盤に。                                    | API 呼び出し・計算・検索等をモデルが選択実行     | 生成→業務実行の橋渡し         |
| MoE (Mixture of Experts) | 出現時期: 2017 (疎活性 MoE の確立)。実用大規模化は 2021-2022 (Switch/GLaM)。背景: 複数エキスパートの一部のみを動作させ、計算効率と性能を両立。                                 | 入力ごとに一部サブモデルだけ活性化する疎モデル      | 計算量を抑え容量を増やす        |
| PEFT (LoRA 等)            | 出現時期: 2021 年 (LoRA の提案)。背景: 大規模 LM のフル微調整は計算・メモリコストが高騰。低ランクの追加パラメータのみ学習する LoRA などの PEFT でコストを大幅削減し、指示追従・領域適応に限られた GPU で実用化。 | 一部パラメータのみ学習する効率的微調整          | 組織別カスタムの低コスト化       |
| 量子化微調整 (QLoRA)           | 出現時期: 2023 年 (QLoRA の提案)。背景: 単一～少数 GPU で大規模基盤モデルを微調整する需要に対し、4bit 量子化 (NF4) + LoRA でメモリを大幅削減しつつ精度を維持。LLaMA などの公開基盤モデル普及が追い風。 | 低ビット量子化 + アダプタ学習             | 限られた GPU で大規模調整     |

| 名称                | 出現時期・背景   | 定義               | LLM 汎用性／<br>実用化での役割 |
|-------------------|---|------------------|---------------------|
| マルチモーダル基盤モデル      | 出現時期: 2021年(CLIPによる画像-テキストの大規模事前学習)。2023-2024年に音声・画像・テキストを統合した汎用アシスタント(例:GPT-4o)が普及段階へ。<br>背景: ウェブ規模の画像-テキスト対データとTransformerの汎用性により、ゼロ/少ショットでの視覚と言語の汎化が可能に。統合マルチモーダル化で入出力の一貫処理・対話運用が進展。       | テキスト+画像等の統合理解・生成 | 業務入力(図表・画像)へ拡張      |
| 長文脈(Long context) | 出現時期: 2020年ごろから長文処理向けの効率化注意機構が登場(Longformer/BigBird等)。2023-2024年に商用LLMで十万トークン級の長文脈が実用化へ。<br>背景: ドキュメントQA・コード/ログ解析・RAG等の需要増により、 $O(n^2)$ 注意の計算/メモリ制約を回避する疎/分割注意や高速化(例:FlashAttention)などの工夫が進展。 | 極長コンテキストで文書群を保持  | 文書業務・調査・監査で重要       |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-97 実用化可能性「大規模言語モデルの汎用性発見と急速な実用化の進展」

| ユースケース           | 期待される効果            | 技術的アプローチ                 | 波及が大きい産業領域                  |
|------------------|--------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 社内ナレッジ検索／FAQ 高度化 | 問合せ削減、一次解決率、検索時間短縮 | RAG+アクセス制御+ログ監査          | 全業種(特に製造・IT・金融・公共)          |
| 文書生成(稟議・契約・報告)   | 作成時間短縮、品質平準化       | 指示追従+テンプレ制約+根拠付与         | 法務、監査、コンサル、官公庁              |
| コンタクトセンター／営業支援   | 対応品質・応答時間・CS 向上    | 対話 LLM+CRM 連携+ガードレール     | 通信、金融、小売、公共窓口               |
| ソフトウェア開発支援       | 生産性、欠陥率低下、レビュー効率   | ツール利用(CI/CD, Issue)+PEFT | IT、製造(組込み含む)                |
| 調査・分析(リサーチ支援)    | 調査時間短縮、網羅性向上       | 長文脈+検索+引用管理              | 製薬、金融、政策、研究機関               |
| 医療文書・診療支援(要注意)   | 記録負担軽減、照会効率        | 医療版 LLM+RWD 基盤+厳格評価      | 医療・介護(CRDS も医療版 LLM を戦略提案)  |
| 教育(個別最適・教材生成)    | 学習到達度、教員数削減        | 指示追従+安全設計+利用ログ           | 教育産業、企業研修、学校                |
| 行政サービス・業務効率      | 申請処理・文書作成効率、応答品質   | ガバナンス+セキュア運用+評価          | 公共(OECD は政府機能での AI 活用事例を整理) |

## (5) インタビュー結果を踏まえた今後の潮流および研究の方向性

表 2-98 今後の潮流および研究の方向性「大規模言語モデルの汎用性発見と急速な実用化の進展」

| 項目  | 概要   |
|---|--|
| 新たに浮上している、または今後 5 年から 10 年の間に浮上すると考えられる技術トレンド、技術的ブレークスルーの可能性、技術面の障壁、規制・倫理も含む非技術面の障壁 | <p>トレンド候補</p> <p>MoE(Mixture-of-Experts):スパース化・モジュール化により機能分担が進み、汎化や新タスク適応、インタープリタビリティの向上にも資する</p> <p>解釈可能性(インタープリタビリティ)・原理解明</p> <p>不確実性の扱い(モデル自身が自己の判断の不確実性を評価し提示)</p> <p>世界モデル(世界の状態遷移や因果を内包するアーキテクチャを志向)</p> <p>ドメイン理論の統合(物理法則や分子モデル等、各分野に蓄積された理論・モデルの組み込み)</p> |
| 他分野研究連携の必要性   | <p>Science of Human との連携が重要。計算論的心理学、計算論的認知科学、計算論的神経科学の研究者と協働し、人間の知識整理・推論・不確実性処理の仕方を AI 設計に反映させるべき。</p>   |
| わが国のアセット(人材・インフラ等)と国外プレイヤー・チームとの比較  | <p>人材プールの量は小さいが、原理解明・解釈可能性・設計原理・信頼性の研究で光る人材は多い。</p> <p>理研 AIP(AI for Science)、国立情報学研究所(NII) 大規模言語モデル研究開発センター</p> <p>量で競う「力業のスケールアップ」は難しいが、設計原理に基づく堅牢な AI の創出が有望</p>  |
| 今後5年から10年の間において潮流となり得る研究の方向性  | <p>統合型マルチモーダル基盤モデル:言語・音声・画像・動画・ロボティクスを統合し、単一基盤で多様タスクに対応する流れが定着する。</p> <p>世界モデルの構築:世界の状態遷移・因果を内包し、予測・シミュレーション・計画立案に寄与するモデル設計への転換が進む。</p> <p>設計原理の転換:インタープリタビリティ、不確実性の内在化(メタ認知)、ドメイン理論の事前組み込みを設計段階から実装する方向。</p> <p>MoE 等のスパース・モジュール化の高度化:機能分担と半汎化の両立、解釈可能性の向上。</p>   |
| 今後の当該分野において優先すべき研究課題・支援形態   | <p>AI for Science/Science of AI/Science of Human を統合的に推進する大型・長期の公的支援。産学官・学際連携コンソーシアムの形成(AIP、NII、大学、医療・産業界の接続)。</p> <p>評価指標・データ基盤の整備(後述のデータ戦略と連動)</p>   |

## (6) 出所

- Blei et al., Latent Dirichlet Allocation (LDA), 2003
- Ferrucci et al., Building Watson: An Overview of the DeepQA Project, 2010
- Mikolov et al., Distributed Representations of Words and Phrases and their Compositionality(word2vec), 2013
- Sutskever et al., Sequence to Sequence Learning with Neural Networks, 2014
- Bahdanau et al., Neural Machine Translation by Jointly Learning to Align and Translate(Attention), 2014
- Vaswani et al., Attention Is All You Need(Transformer), 2017
- Peters et al., Deep contextualized word representations(ELMo), 2018
- Devlin et al., BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding, 2018
- Radford et al., Language Models are Unsupervised Multitask Learners(GPT-2), 2019
- Kaplan et al., Scaling Laws for Neural Language Models, 2020
- Brown et al., Language Models are Few-Shot Learners(GPT-3), 2020
- Lewis et al., Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks(RAG), 2020

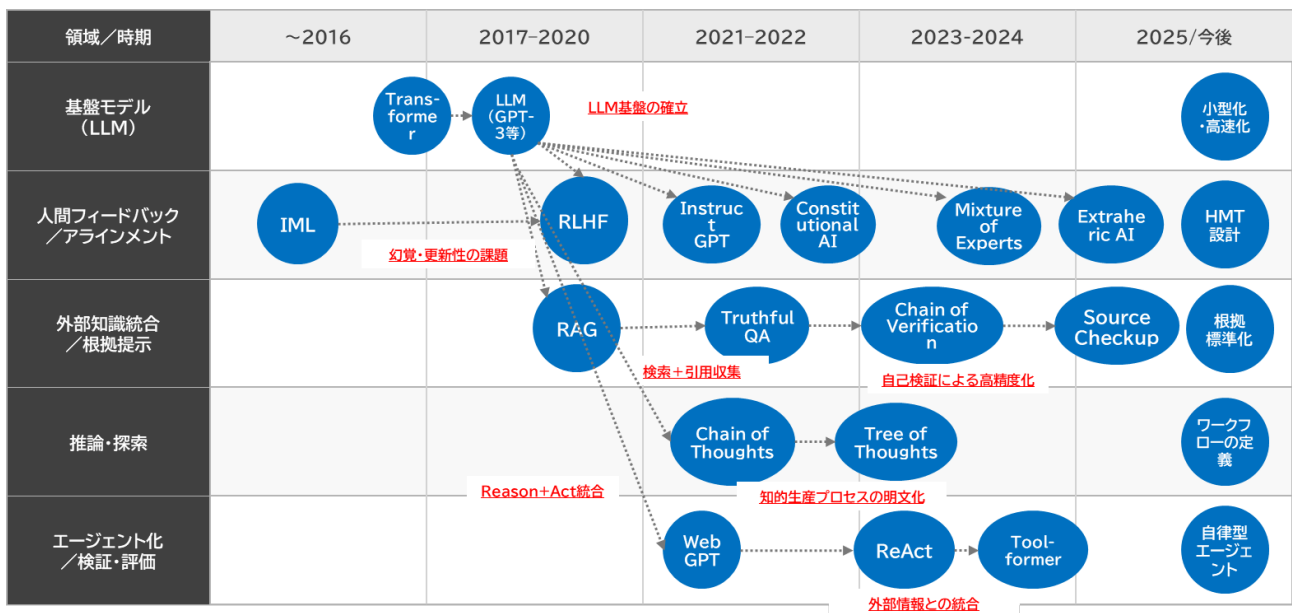
- Fedus et al., Switch Transformers(MoE), 2021
- Hu et al., LoRA: Low-Rank Adaptation of Large Language Models, 2021
- Radford et al., Learning Transferable Visual Models From Natural Language Supervision(CLIP), 2021
- Ouyang et al., Training language models to follow instructions with human feedback(InstructGPT/RLHF), 2022
- Wei et al., Chain-of-Thought Prompting Elicits Reasoning in Large Language Models, 2022
- Touvron et al., LLaMA: Open and Efficient Foundation Language Models, 2023
- Dettmers et al., QLoRA, 2023
- Dubey et al.(Meta), The Llama 3 Herd of Models, 2024
- OpenAI, GPT-4o System Card, 2024
- Edge et al., GraphRAG: From Local to Global, 2024
- Jimenez et al., SWE-bench(ICLR 2024), 2024
- Bi et al., Forest-of-Thought, 2025
- Geiping et al., Scaling up Test-Time Compute with Latent Reasoning: A Recurrent Depth Approach, 2025
- Wang et al., MTU-Bench(ICLR 2025), 2025

### 2.4.3 潮流 C4:人・AI 協働と意思決定支援「対話型 AI と協力した問題解決方法論の研究の進展」

#### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。

機械学習と人間のフィードバックを組み合わせた枠組みは 2000 年代初頭から研究されてきたが、近年では大規模言語モデルを活用することで問題解決能力が劇的に向上している。



出所) 点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き: 影響が及ぶ方向(起点から波及先)を示す。  
 矢印上のラベル: 影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-20 技術的進歩と方向性の概要図「対話型 AI と協力した問題解決方法論の研究の進展」

表 2-99 技術的進歩と方向性(概要)「対話型 AI と協力した問題解決方法論の研究の進展」

| 概要  |  |
|---|--|
| <p>対話型 AI と協力した「問題解決方法論」: 研究の進展(技術要素別)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 協働の基本単位: 対話 = 計画・分解・合意形成のインタフェース化<br/>目的・制約・評価軸を対話で明示化し、問題定義→分解→解候補→検証→合意を回す「対話 = ワークフロー定義」</li> <li>● 会話するだけから行動する仕組みへ: ツール利用・エージェント化<br/>外部ツール(検索、計算、DB、業務システム)を呼び出しながらタスクを進める枠組みが、協働問題解決の中核に<br/>ReAct は、推論(Reasoning)と行為(Acting)を統合してタスクを進める枠組みとして提示され、対話型 AI の「手順化された問題解決」の理論的な土台</li> <li>● 外部知識統合: RAG(検索拡張生成)と根拠提示<br/>RAG は、パラメトリック知識に依存せず、検索結果等を条件に生成する枠組みとして定式化され、更新性・検証可能性を高める方向で普及</li> <li>● 協働の品質管理: 自己批評・自己改善、アラインメント<br/>RLHF を含む「人の評価を用いた最適化」により指示追従性や安全性を高める(InstructGPT 等)<br/>Constitutional AI は、人手ラベル最小化の方向として「原則(constitution)に基づく自己改善」を提案し振る舞いの一貫性を狙う</li> </ul> |  |
| <p>Human in the Loop(HITL)/Human-Machine Teaming(HMT) 研究の進展</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 対話的にユーザが教示/修正しながら学習する枠組み(IML)<br/>インタラクティブに分類器を修正しながら学習する概念として提案(IUI 2003)</li> <li>● 「誰が最終責任を持つか」を含む役割パターン化<br/>Human Supervisor/User → Human Mentor → Peer → Machine Mentor → Machine Supervisor の 5 パターンで上下関係を整理</li> <li>● フェイク生成・情報操作リスクへの対処として重要性が増大<br/>情報氾濫やフェイク生成による意思決定ミスリスク増大を背景に、意思決定支援への活用に期待</li> </ul>  |  |
| <p>虚偽情報(mis/disinformation/ハルシネーション)対策研究の進展</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 誤りのタイプ分解が進展<br/>事実誤認(factual hallucination)、根拠のない断言、出典捏造、文脈の取り違え、誘導(jailbreak)による逸脱などを分類し、評価・対策を組織的に行う取り組みが進展(測定→誤り低減→監査)</li> <li>● 検出・自己点検の研究が拡大<br/>SelfCheckGPT は、生成のばらつき等を用いたハルシネーション検出を提案し、運用時モニタリングでの活用が進む。</li> </ul>  |  |

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-100 タイムライン「対話型 AI と協力した問題解決方法論の研究の進展」

| 年    | キーワード         | 代表論文(識別子)   | 研究的な概要                           | 注目技術と関連性           |
|------|---------------|---|----------------------------------|--------------------|
| 2003 | IML(対話的学習)    | Interactive Machine Learning(IUI 2003)                                | ユーザが学習→可視化→修正を回す「人が教師の一部になる」設計原型 | HITLの原点(修正ループ)     |
| 2004 | IRL(デモから目的推定) | Apprenticeship learning via inverse reinforcement learning(ICML 2004) | 報酬が明示できない課題で、デモから目的(報酬)を推定       | HITL(デモ)/課題解決の目的定義 |
| 2009 | 人の評価で方策形成     | Interactively shaping agents via human reinforcement (TAMER)          | 人の「良い/悪い」評価を学習信号として使う(人の報酬モデル化)  | HITL(評価)→後の嗜好学習へ   |

| 年    | キーワード          | 代表論文(識別子)  | 研究的な概要  | 注目技術と関連性               |
|------|----------------|--|---|------------------------|
| 2011 | 分布ずれ対策(模倣学習)   | A Reduction of Imitation Learning… (AISTATS 2011)                          | 逐次意思決定で起きるデモ分布と実行分布のズレを、反復データ収集で抑える(DAgger)           | HITL(修正・追加デモ)／実運用に近い学習 |
| 2014 | IMLの体系化        | Power to the People: The Role of Humans in Interactive ML(AI Magazine, 13) | 人が関与する学習(IML)の設計観点・課題を体系化                             | HITLのレビュー              |
| 2017 | 嗜好に基づくRL       | Deep RL from Human Preferences   | 人の比較判断から報酬モデルを学び、RLで最適化                               | RLHFの基本原理提案            |
| 2017 | Transformer    | Attention Is All You Need  | 大規模言語モデルの基盤   | 対話型AIの性能跳躍の土台          |
| 2019 | LM×嗜好学習        | Fine-Tuning Language Models from Human Preferences                         | 言語モデルを人の選好で最適化する方向性を明確化                               | 言語モデルに対するHF            |
| 2020 | RAG(根拠・更新性)    | Retrieval-Augmented Generation (arXiv:2005.11401)                          | パラメトリック知識＋外部検索を融合(根拠／更新の課題意識を明示)                      | 真実性・虚偽情報対策の中核          |
|      | RLHF(要約で実証)    | Learning to Summarize from Human Feedback (NeurIPS 2020)                   | 人手評価→報酬モデル→RL最適化の実証                                   | HITL(評価)をLLM系へ接続       |
| 2021 | ブラウジング+HITL    | WebGPT (arXiv:2112.09332)  | Web探索環境で、引用収集＋人手評価で品質を向上                              | 対話×根拠提示×HITLの合流点       |
|      | 真実性ベンチ         | TruthfulQA (arXiv:2109.07958)  | 人間が陥りやすい誤りを誘発する設計で真実性を測る                              | 虚偽情報の評価軸を提供            |
| 2022 | CoT(推論外部化)     | Chain-of-Thought Prompting (arXiv:2201.11903)                              | 推論過程をテキスト化し、多段問題で性能向上                                 | 対話型AIの課題解決手順の原型        |
|      | RLHFによるアラインメント | InstructGPT (arXiv:2203.02155)   | SFT(Supervised Fine-tuning)→人手順位付け→RLHFでユーザ意図にアラインメント | HITLが「対話AIの精度向上」へ      |
|      | RLAIF(人手削減)    | Constitutional AI (arXiv:2212.08073)                                       | 規範(ルール)＋AIによるフィードバックでアラインメント                          | HITL代替(人手削減)＋安全性       |
| 2023 | Reason+Act 統合  | ReAct (arXiv:2210.03629, ICLR 2023)  | 推論と行動を交互に生成し、外部情報で誤りを抑制                               | 対話×課題解決×真実性(相互作用)      |
|      | ツール自己学習        | Toolformer (arXiv:2302.04761)  | API呼び出しを「いつ／何を」で学習し能力拡張                               | 課題解決(計算・検索)を外部的        |
|      | 木探索的推論         | Tree of Thoughts (arXiv:2305.10601)  | 複数の思考経路を探索・自己評価し解探索に寄せる                               | 複雑課題解決(探索・計画)          |
|      | 検証質問で抑制        | Chain-of-Verification (arXiv:2309.11495)                                   | まず答え→検証質問→最終回答の手順                                     | 虚偽情報対策(自己検証プロトコル)      |

| 年    | キーワード     | 代表論文(識別子)                                  | 研究的な概要                 | 注目技術と関連性 |
|------|-----------|--|------------------------|----------|
| 2025 | 引用の自動チェック | SourceCheckup (Nature Communications 2025) | 生成回答の引用が主張を支えているかを自動評価 | 虚偽情報対策   |

### (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-101 キーテクノロジー「対話型 AI と協力した問題解決方法論の研究の進展」

| 名称                  | 出現時期・背景  | 定義                    | 協働問題解決での役割                  | 虚偽情報・HITLとの関係               |
|---------------------|--|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Transformer         | 出現時期: 2017<br>背景: RNN/LSTM の並列化困難と長距離依存の学習限界を克服するため、自己注意を中核とするアーキテクチャが提案され、機械翻訳で SOTA を達成し以後の NLP 基盤に。 | 注意機構のみで系列変換を行うアーキテクチャ | 基盤モデルのスケール化を可能にし、対話能力を押し上げた | 大規模化に伴い安全性・評価の必要性が増大        |
| 事前学習(BERT等)         | 出現時期: 2018<br>背景: 大規模未ラベルコーパスでの事前学習(MLM等)と少量データでの微調整というパラダイムが確立し、多様な下流タスクで性能を飛躍。                       | 大規模テキストで事前学習し下流で適応    | 言語理解の土台を形成                  | バイアス・誤情報の温床にもなりうるため監査が重要    |
| LLM(GPT-3等)         | 出現時期: 2020(GPT-3)<br>背景: Transformer の大規模化により few-shot/zero-shot 能力が顕在化。スケールが設計指針となり、汎用性が拡大。           | 大規模自己回帰モデルによる汎用言語生成   | “自然言語での手続き設計”を可能にし協働が加速     | もっともらしい誤り(幻覚)を生みやすい         |
| RAG                 | 出現時期: 2020<br>背景: モデルの知識鮮度・幻覚課題への対処として、外部検索で得た文書を条件付けして生成する枠組みが登場。                                     | 検索等で取得した文脈を条件に生成      | 外部根拠に基づく回答・更新性の確保           | 誤情報低減に有効だが、検索汚染・出典品質がボトルネック |
| WebGPT(根拠収集)        | 出現時期: 2021<br>背景: ブラウザで検索・閲覧し、引用を伴う回答を生成。人間の比較評価に基づく RLHF で根拠の質と回答の信頼性を最適化。                            | ブラウジングで参照を集めながら回答     | “調査→要約→根拠提示”の協働を手続き化        | 事実性評価を容易にする設計方針を明示          |
| ReAct               | 出現時期: 2023<br>背景: 推論(Chain-of-Thought)と環境行動(ツール使用)を交互に行う枠組みで、タスク解決力・透明性・デバッグ容易性を向上。                    | 推論と行為を反復しタスクを進める      | ツール連携・逐次実行の基本型              | 誤りの早期検知(途中検証)を組み込みやすい       |
| RLHF (InstructGPT等) | 出現時期: 2017~2022<br>背景: 人間の好みで学習した報酬モデルを用いて強化学習で言語モデルを微調整し、指示追従性や安全性を改善。                                | 人のフィードバックで方策を最適化      | 指示追従・安全性の改善                 | HITL(学習時)の代表例。              |
| Constitutional AI   | 出現時期: 2022<br>背景: 人手評価への依存を抑え、AI の自己批評と「憲法」ガイドラインで安全性・有害性低減を図るアプローチ。                                   | 原則集合に基づく自己批評・自己改善     | 協働時の“ふるまい一貫性”を狙う            | 人手依存低減の方向。ただし原則設計・評価が課題     |

| 名称  | 出現時期・背景  | 定義                        | 協働問題解決での役割              | 虚偽情報・HITLとの関係                       |
|---|--|---------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| SelfCheckGPT  | 出現時期: 2023<br>背景: モデル自身が複数サンプルの自己照合・再生成で出力の幻覚を検出するゼロリソース手法。  | 生成の自己整合性等でハルシネーションを検出     | 出力品質のモニタリング             | 虚偽情報対策の運用コンポーネント(監視・アラート)になり得る      |
| HMT / HITL<br>Human machine teaming/<br>Human in the Loop | 出現時期: 2000 年代初頭(概念は以前から)、2010 年代に一般化<br>背景: 学習・評価・運用ループに人間を組み込み、ラベリング、デモ、修正を通じてモデル性能・安全性を継続改善。IL や RLHF の基盤概念。 | 人と AI の協働枠組み (HITL はその一部) | 役割分担 (監督・助言・対等等) を設計可能に | 高リスク領域ほど Human Supervisor 型が要求されやすい |
| C2PA(来歴・認証)   | 出現時期: 2021(連合発足)、2022(仕様 v1.0)<br>背景: 生成コンテンツ時代の真偽・来歴検証のため、デジタル資産に改ざん耐性のある来歴(Content Credentials)を付与・検証する標準化。  | コンテンツ来歴を暗号学的に紐づけ検証        | 直接の問題解決より“成果物の信頼”を担保    | 合成コンテンツ対策の基盤。真偽判定ではなく“来歴検証”         |
| NIST AI RMF   | 出現時期: 2023(v1.0)<br>背景: AI リスクの特定・測定・管理を組織が実装するための包括枠組 (Govern/Map/Measure/Manage)。                            | AI リスク管理の任意枠組み            | 組織導入の手順化(測定・管理・統治)      | HITL・監査・評価を制度対応に落とし込む際の参考情報         |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

人間向けにアラインされた対話型 AI は急速に普及しており、様々な分野で実用化が進んでいるが、急激な変化に伴って課題(誤判断や事故等)も生じている。

ナレッジワーク支援: 調査、要約、比較表作成、企画草案(RAG+根拠提示が重要)

ソフトウェア開発: 仕様整理、テスト生成、レビュー補助(HITL で品質保証)

意思決定支援: 多基準評価、合意形成支援(HMT の枠組みが重要)

コンタクトセンター/業務オペレーション: FAQ、手順案内、記録自動化(誤回答時のエスカレーション設計が必須)

コンテンツ制作: 下書き・翻案(来歴・認証/透かし等とセットでの実装が拡大)

表 2-102 実用化可能性「対話型 AI と協力した問題解決方法論の研究の進展」

| 産業領域     | 期待される効果         | 代表的なユースケース   | 実装上の課題(虚偽情報/HITL 観点)                    |
|----------|-----------------|--------------|---|
| 製造・保安    | 手順標準化、熟練知の形式知化  | 故障診断支援、手順書生成 | 現場データ統制、誤誘導時の停止・承認フロー(Human Supervisor) |
| 医療・ヘルスケア | 文書負荷低減、臨床意思決定補助 | サマリー作成、患者説明文 | 高リスク用途: 人の監督、根拠提示、監査ログ                  |
| 金融・保険    | 申請・審査補助、規程照会    | 稟議支援、規制文書 QA | 説明責任、誤情報低減(RAG)、モデルリスク管理(AI RMF)        |

| 産業領域    | 期待される効果         | 代表的なユースケース | 実装上の課題(虚偽情報/HITL 観点)      |
|---------|-----------------|------------|---------------------------|
| 法務・コンプラ | リサーチ高速化、文書レビュー  | 判例・契約条項比較  | 出典の厳密性、捏造対策、二重レビュー(HITL)  |
| 行政・公共   | 住民対応の効率化、文書作成支援 | 申請案内、議事録整理 | 人間中心原則・政策整合、誤回答時のエスカレーション |

## (5) インタビュー結果を踏まえた今後の潮流および研究の方向性

表 2-103 今後の潮流および研究の方向性「対話型 AI と協力した問題解決方法論の研究の進展」

| 項目  | 概要  |
|---|---|
| 新たに浮上している、または今後 5 年から 10 年の間に浮上すると考えられる技術トレンド、技術的ブレークスルーの可能性、技術面の障壁、規制・倫理も含む非技術面の障壁 | <p>トレンド候補</p> <p>心理的・社会的サポート用途(傾聴・伴走・関係形成)での LLM への過度の依存や服従のリスクへの対処(技術側、人側の二重のガードレール) AI 企業が自主的に対応するインセンティブが低い</p> <p>ユーザーと AI の心理的距離を状況に応じ動的に調整する機構(過度な迎合・おべっかの抑制、関与の節制)</p> <p>AI エージェントのみのコミュニティで振る舞いを観測し、実スケールでの実験や仮説検証を補助する研究が台頭(用途限定での活用が現実的)</p> <p>オルターエゴ AI(デジタルツインのような完全複製ではなく、自分と少し異なる分身)によるハルシネーションの創造的活用</p> <p>医療・メンタルヘルス分野での患者-医師間のコミュニケーション補助(AI は心理的ハードルを感じず助言を得られる)</p> |
| 他分野研究連携の必要性   | <p>JST 支援により「メンタルウェルビーイング・インテリジェンス」領域の複合研究(臨床心理×HCI×AI)を推進している</p> <p>技術検証で定式化した枠組みを、人と AI の対話に応用する研究が必要</p>  |
| わが国のアセット(人材・インフラ等)と国外プレイヤー・チームとの比較  | <p>コンピュータサイエンスの個々の能力は国際比較で見劣りしない。一方、分野融合研究は評価・支援面で不利になりやすく、研究者の居場所を失わせやすいことが課題</p>  |
| 今後5年から10年の間において潮流となり得る研究の方向性  | <p>具体テーマは上記トレンド候補と同様</p> <p>我が国は「不完全さの受容」や規範に整合した実装設計に強みがあり、AI と上手に付き合える国づくり(AI との付き合い方ナンバーワン)を目指すべき</p> <p>分野融合研究者のキャリアを制度的に評価する仕組みが必要。</p>  |
| 今後の当該分野において優先すべき研究課題・支援形態   | <p>公的資金スキームで共同研究者への柔軟な資金配分を可能に(総額の一部を分野横断協働に充当できるようにする等)。</p> <p>実社会実装・長期追跡を可能にするデータ収集・倫理基盤(IRB、データガバナンス、人材)を整備。</p>  |

## (6) 出所

|  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● Interactive Machine Learning(2003)</li> <li>● Apprenticeship learning via inverse reinforcement learning(2004)</li> <li>● Interactively shaping agents via human reinforcement: the TAMER framework (2009)</li> <li>● A Reduction of Imitation Learning and Structured Prediction to No-Regret Online Learning (2011)</li> <li>● Power to the People: The Role of Humans in Interactive ML(2014)</li> <li>● Deep RL from Human Preferences(2017)</li> <li>● Attention Is All You Need(2017)</li> <li>● Fine-Tuning Language Models from Human Preferences(2019)</li> <li>● Retrieval-Augmented Generation(2020)</li> <li>● Learning to Summarize from Human Feedback(2020)</li> </ul> |
|--|

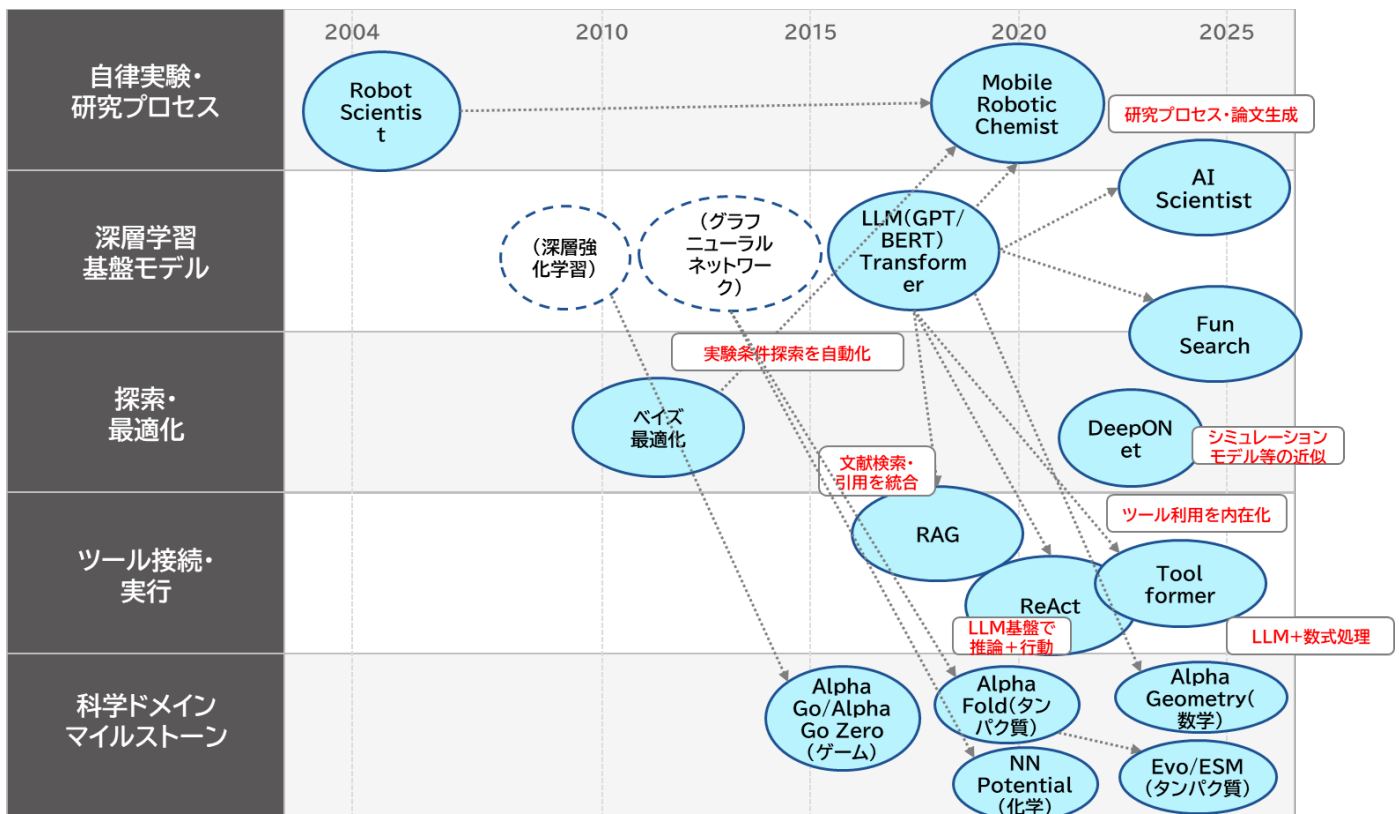
- WebGPT(2021)
- TruthfulQA(2021)
- Chain-of-Thought Prompting Elicits Reasoning in Large Language Models
- Training language models to follow instructions with human feedback(2022)
- Teaching language models to support answers with verified quotes(2022)
- Constitutional AI: Harmlessness from AI Feedback(2022)
- ReAct(ICLR 2023)
- Toolformer(2023)
- Tree of Thoughts(2023)
- Reflexion(2023)
- SelfCheckGPT(2023)
- Chain-of-Verification(2023)
- Voyager(2023)
- AutoGen(2023)
- AgentBench(2023)
- SWE-agent(2024)
- SourceCheckup(2025)

## 2.4.4 潮流 C5: AI・データ駆動型問題解決「個別分野の問題を解く AI の成功から汎用的な科学者 AI へ」

### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。

汎用的な科学者 AI を構築するためには、現行の大規模言語モデル/基盤モデルとは質的に異なる技術的枠組みが必要と認識されている。必要とされる要素を列挙し、個々に解決するための研究が進められている。



出所)点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き:影響が及ぶ方向(起点から波及先)を示す。  
 矢印上のラベル:影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-21 技術的進歩と方向性の概要図「個別分野の問題を解く AI の成功から汎用的な科学者 AI へ」

表 2-104 技術的進歩と方向性(概要)「対話型 AI と協力した問題解決方法論の研究の進展」

| 概要   |  |
|--|--|
| <p>「科学者 AI」の定義と現状</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 「科学者 AI」は、仮説生成→実験/計算計画→実行→解析→知識化(論文・レポート化)までの研究サイクルを、高い自律性で実行する AI(もしくは AI+実験基盤の複合システム)として定義できる。科学研究の自動化に向け、仮説生成・評価・人間中心統合の 3 課題が認識されている。</li> <li>● 近年の実現方法として、基盤モデル(LLM 等)+ツール利用(コード/検索/シミュレーション/実験装置)+評価器(自動検証)によって、ハルシネーションや誤りを抑えつつ探索を進める方向が試みられている。(例:FunSearch、ReAct フレームワーク)。</li> </ul>   |  |
| <p>「科学者 AI」の実現に向けた技術的/非技術的課題</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 正確性・過剰一般化(科学コミュニケーションの品質)<br/>LLM は科学要約で過剰一般化しやすいことが実証されており、研究知識化の工程では重大リスク対応の方向性:評価器、根拠引用の強制、温度/デコード制御、再現可能な根拠ログ</li> <li>● 研究公正・再現可能性・透明性<br/>AI が科学的方法や研究実務を変える一方で、透明性・再現性・研究倫理/安全の課題</li> <li>● 長期計画(Long-horizon)とクレジット割当問題<br/>「研究」は数十～数百の意思決定の連鎖。短いベンチマークで精度が高くても、長期反復で破綻しやすい対応の方向性:長期記憶を持つモデル(SSM:状態空間モデル等)の活用</li> <li>● 身体性(実世界操作)と安全<br/>実験装置や化学・生物などはデュアルユースも絡むため、ガードレール設計が必須</li> </ul> |  |

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-105 タイムライン「対話型 AI と協力した問題解決方法論の研究の進展」

| 年    | 技術的トピック                          | 論文                      | 汎用科学者 AI への寄与                             |
|------|----------------------------------|-------------------------|---|
| 2004 | 自律実験(Robot Scientist)            | King et al. (2004)      | 仮説生成→実験→記録の自動循環(閉ループ研究)の原型を提示             |
| 2006 | 研究プロセスの形式化(実験オントロジ)              | Soldatova & King (2006) | 実験を機械可読に記述し、追跡・再利用・自動化                    |
|      | Robot Scientist 向け知識表現           | Soldatova et al. (2006) | Robot Scientist のデータ/メタデータ/手順を体系化し自律実験を補強 |
|      | 研究ワークフロー基盤                       | Oinn et al. (2006)      | 研究手順をワークフロー化し、実行・共有・再現の基盤を形成              |
| 2007 | プロヴェナンス(再現性ログ)                   | Davidson et al. (2007)  | 科学者 AI に必須の「監査可能な実行ログ」の考え方を確立             |
| 2009 | 自動科学の実証(Robot Scientist Adam)    | King et al. (2009)      | 仮説を立て、実験で検証し、結論を出す一連の流れを自律実行              |
| 2012 | バイズ最適化(実験の最適化)                   | Snoek et al. (2012)     | 高コスト実験を少回数で進める探索戦略(自律実験の中核部品)             |
| 2015 | 自律科学×創薬(Robot Scientist Eve)     | Williams et al. (2015)  | 自律ループを現実の創薬プロセスへ近づけた実証例                   |
| 2016 | Alpha Go 探索+評価(RL×木探索)           | Silver et al. (2016)    | 「探索(提案)+評価(勝率/価値)」の枠組みが後の発見型 AI に波及       |
| 2017 | Alpha Go Zero 自己生成データ(Self-play) | Silver et al. (2017)    | 人間データ依存を減らし、自律的に学習・改善する方向性を強化             |
|      | 汎用表現の基盤(Transformer)             | Vaswani et al. (2017)   | 科学者 AI の「言語・コード・推論」を支える基盤アーキテクチャの確立       |

| 年    | 技術的トピック                                  | 論文                           | 汎用科学者 AI への寄与                          |
|------|--|------------------------------|--|
| 2018 | BERT 自己教師あり事前学習(言語理解の汎用化)                | Devlin et al. (2018)         | 大規模事前学習→分野適応の流れが、科学文献理解・知識化に波及         |
| 2019 | 物理制約統合 (Physics-informed Neural Network) | Raissi et al. (2019)         | 法則を守る学習により、データが少ない科学領域での汎用性を補強         |
| 2020 | 外部知識接続(RAG)                              | Lewis et al. (2020)          | 文献・DB に接続し、根拠付き生成へ(科学者 AI の“文献読解”を強化)  |
|      | Mobile Robotic Chemist 自律実験 (移動ロボ×化学)    | Burger et al. (2020)         | 実験環境での閉ループを、より一般的な形で提示(自律ラボの実体)        |
| 2021 | 科学計算の汎用近似 (DeepONet)                     | Lu et al. (2021)             | 反復探索の評価関数(シミュレーション)を高速化しうる“計算の部品”      |
|      | AlphaFold 特化型科学 AI の象徴的成果                | Jumper et al. (2021)         | 特化型の成功が、汎用科学者 AI の投資・期待・設計思想を加速        |
|      | グランドチャレンジ(自律科学の目標定義)                     | Kitano (2021)                | 「トップ科学を行う自律 AI」という研究開発目標を明確化           |
| 2022 | ReAct 推論+行動 (ツール利用の原型)                   | Yao et al. (2022)            | 科学者 AI の基本形:考える→調べる/計算する→更新を反復         |
|      | プログラム生成による精度担保(PAL)                      | Gao et al. (2022)            | “文章の正しさ”を、コード実行で担保しやすい形へ(科学計算に親和)      |
| 2023 | ツール利用を学習 (Toolformer)                    | Schick et al. (2023)         | どのツールをいつ呼ぶかをモデル能力として内在化する方向性           |
|      | 試行錯誤の効率化 (Reflexion)                     | Shinn et al. (2023)          | 失敗から学ぶ仕組み(反省ログ)が、研究サイクルの反復に効く          |
|      | アルゴリズム発見(RL 探索)                          | Mankowitz et al. (2023)      | “発見”を 探索問題として定式化し、評価でふるいにかける           |
| 2024 | 化学実験の自律ラボの体系化(レビュー)                      | Tom et al. (2024)            | SDL の構造(DMTA 等)を整理し、汎用科学者 AI の実装要件を明確化 |
|      | AlphaGeometry 形式推論(合成データ+証明探索)           | Trinh et al. (2024)          | 検証可能な推論(証明)へ接続し、科学者 AI の“正しさ”を強化       |
|      | FunSearch 生成+評価器(LLM× Evaluator)         | Romera-Paredes et al. (2024) | 汎用科学者 AI の中核パターン:生成→自動検証→進化探索          |
|      | AI Scientist エンドツーエンド自律研究(論文生成まで)        | Lu et al. (2024)             | アイデア→実験→図表→論文までを統合し、「研究者に近い I/O」を実装    |
| 2025 | SDL の技術俯瞰(レビュー)                          | Tobias et al. (2025)         | 自律ラボの構成要素(自動化と自律の違い含む)を整理し実装指針に        |
|      | AI Scientist-v2 エンドツーエンド自律研究(改良版)        | Yamada et al. (2025)         | 自律研究を「エージェント探索+実験管理」で強化(より汎用に寄せる)      |
|      | AlphaGeometry2 形式推論(幾何学の性能向上)            | Chervonyi et al. (2025)      | “高難度推論”を強化し、自然言語から形式化へ近づける方向性を提示       |
|      | AlphaProof 形式数学×RL(検証可能推論の実現)            | Hubert et al. (2025)         | 推論を形式検証可能な形で成立させ、科学者 AI の信頼性を改善        |

### (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-106 キーテクノロジー「対話型 AI と協力した問題解決方法論の研究の進展」

| 名称                                  | 出現時期・背景  | 科学者 AI への寄与<br>(どの能力/工程を強化するか)                               | モデル名・論文等  |
|-------------------------------------|--|--|---|
| 検索拡張生成<br>(RAG:外部知識メモリ)             | 出現時期: 2020 頃(RAG 提案)。<br>背景: 大規模言語モデル(LLM)のパラメトリック記憶の限界と最新知識の反映ニーズから、外部コーパス検索と生成を統合する枠組みが確立。   | 文献・DB を都度参照して根拠に接続(更新性・出典付与)、ハルシネーション低減。研究の「調査・関連付け」を強化      | Lewis et al., “Retrieval-Augmented Generation…” (2020)  |
| エージェント化<br>(推論+行動/ツール利用学習)          | 出現時期: 2022 以降(ReAct で行動と推論の統合)、2023~2025 にツール利用学習・探索強化が加速。<br>背景: LLM の思考過程を外部ツール/API・環境操作と組み合わせ、長期推論・計画・実世界の操作を可能にするニーズが拡大。科学発見など複合タスクでの有効性が示される。                 | 「考える→調べる/計算する→更新」を反復し、研究サイクル(計画・実行・反省)を実行。外部ツール(検索・計算・環境)と統合 | ReAct (2022)/ Toolformer (2023) /The AI Scientist (2024)  |
| プログラム実行型推論(PAL)                     | 出現時期: 2022(PAL 提案)。<br>背景: 自然言語だけでの多段推論の誤りを減らすため、モデルが生成したコード(例: Python)を実行して厳密計算・論理分岐を行う手法が登場。   | 数式・統計・アルゴリズムなどを「実行して検証」でき、推論の正確性と再現性を向上(研究の定量評価品質に直結)        | Gao et al., “PAL: Program-aided Language Models” (2022)   |
| 生成+評価器<br>(Verifier/Evaluator)による探索 | 出現時期: 2016-2017 に深層探索(AlphaGo/Zero)で確立、2024-2025 に LLM 生成物の検証・評価器と組み合わせた探索が一般化。<br>背景: 生成候補を価値関数・検証器で評価し探索を導く「生成→評価→反復」により、正確性・最適性・新規性を確保(アルゴリズム発見、数理・幾何・科学探索で有効)。 | 仮説・アルゴリズム・実験条件などを大量生成し、評価器でふるいにかけて探索を進める(「発見」の側面をアルゴリズム化)    | Romera-Paredes et al., “Mathematical discoveries from program search …” (FunSearch, Nature 2024)                    |
| 形式推論・形式検証(定理証明・証明チェッカ)              | 出現時期: 1980-1990 年代に主要証明支援系(Isabelle/HOL, Coq, HOL Light 等)が成熟、2024-2025 に LLM/RL との統合で飛躍。<br>背景: 機械可読な論理基盤で厳密性を担保し、LLM の創発的推論を証明チェッカで検証・強化する流れが加速(数学・プログラム検証)。     | 科学者 AI のボトルネックである「正しさ」を、形式検証で担保(推論の監査性・反証可能性を強化)             | Hubert et al., “Olympiad-level formal mathematical reasoning with reinforcement learning” (AlphaProof, Nature 2025) |
| 実験計画・最適化(バイズ最適化/アクティブラーニング)         | 出現時期: 2010 年代に機械学習・材料/創薬で本格普及(BO の実用化、能動学習の体系化)。<br>背景: 実験や評価のコスト削減・サンプル効率化需要から、獲得関数に基づく効率探索と不確実性駆動のサンプリングが定着。   | 次に何を試すべきか(高コスト実験/計算の回数削減)を評価する枠組み。自律ラボの意思決定のために活用            | Snoek et al., “Practical Bayesian Optimization…” (2012)   |

| 名称                                     | 出現時期・背景  | 科学者 AI への寄与<br>(どの能力/工程を強化するか)                         | モデル名・論文等   |
|--|--|--|--|
| Scientific ML (物理制約学習+微分方程式/演算子学習)     | 出現時期: 2019 以降に PINNs・演算子学習で確立、2021 に拡張応用が加速。<br>背景: 物理法則・保存則・PDE を学習へ組み込み、データ不足や外挿に強いモデルを構築。科学計算・設計最適化の高速化に寄与。                                 | データが少ない領域や外挿が必要な領域で、物理整合を保ちつつ予測・同定。シミュレーションの代替/加速にも活用。 | PINNs: Raissi et al., J. Comput. Phys. (2019) / DeepONet: Lu et al., Nature Machine Intelligence (2021)  |
| 自律実験・Self-driving Labs (ロボット+AI の閉ループ) | 出現時期: 2004 (Robot Scientist) に原型、2010 年代後半～2020 年代にロボット・最適化・LLM/Agent の統合で実用化が進展。<br>背景: 実験ロボット+計測+最適化/能動学習を閉ループ化し、仮説生成→実験→学習→次実験の自動化で探索速度を向上。 | 仮説→実験→解析→次の計画を自律反復し、科学者 AI を“物理世界”へ接続(実証・検証能力の核)       | Robot Scientist: King et al., Nature (2004) / King et al., Science (2009) / Burger et al., “A mobile robotic chemist” (Nature 2020) / A-Lab: Szymanski et al., Nature (2023) |

#### (4) 実用化可能性

個別 AI を用いた科学的発見については多数の成功事例があるが、より汎用的な科学的活動を支援する AI は、一部のプロセスに限って導入されている段階。

創薬・バイオ: 構造自予測・相互作用・候補生成→実験検証の高速化 (AlphaFold 系の成功)

材料・化学プロセス: 探索空間が巨大な設計問題 (触媒・電池材料・高分子など) に、生成+最適化+代理モデルが有効

エネルギー・気候: DOE 等が AI 活用の体系化を推進 (科学・エネルギー・安全保障)

ソフトウェア/HPC/半導体: AlphaDev や FunSearch 等により、基盤アルゴリズム・設計最適化が波及

ロボティクス・研究設備: 設備リモート化・スマート化と一体で律化が進む

表 2-107 実用化可能性「対話型 AI と協力した問題解決方法論の研究の進展」

| タスクの種類       | 代表的なユースケース               | 波及が大きい研究/分野       | 実装成熟度(目安)           |
|--------------|--------------------------|-------------------|---------------------|
| 文献・知識収集      | 文献俯瞰、関連研究の構造化、研究ギャップ抽出   | 全 R&D 産業、大学・研究機関  | 高(ただし検証要)           |
| 仮説生成         | メカニズム仮説、候補分子/材料提案、探索方針生成 | 製薬、材料、化学、農業、エネルギー | 中(評価基準のエンジニアリングが必要) |
| 実験/計算計画      | 条件探索、最適化、実験設計、シミュレーション計画 | 製造、半導体、電池、プロセス工学  | 中(装置の統合に課題)         |
| 実行(シミュレーション) | HPC 連携、代理モデルで高速反復        | 気象・気候、エネルギー、材料    | 中(代替モデルの精度に課題)      |
| 実行(実験)       | ロボット実験、遠隔設備、ハイスループット検証   | バイオ、化学、材料、創薬      | 中(安全・規制に課題)         |
| 解析・検証        | 統計解析、因果推論補助、再現性チェック      | 医療、金融、製造、科学全般     | 中(評価基準整備)           |
| 知識化・公表       | 図表生成、論文草稿、レビュー補助         | 学術出版、企業研究所        | 中～高(研究公正の要件強)       |
| アルゴリズム自体の発見  | 新規アルゴリズム探索、標準ライブラリ改善     | ソフトウェア、HPC、半導体設計  | 中(成功例は増加)           |

## (5) インタビュー結果を踏まえた今後の潮流および研究の方向性

表 2-108 今後の潮流および研究の方向性「個別分野の問題を解く AI の成功から汎用的な科学者 AI へ」

| 項目  | 概要  |
|---|---|
| 新たに浮上している、または今後 5 年から 10 年の間に浮上すると考えられる技術トレンド、技術的ブレークスルーの可能性、技術面の障壁、規制・倫理も含む非技術面の障壁 | <p>トレンド候補</p> <p>ドメイン特化の基盤モデル(分子・材料・ゲノム)の高度化と応用の進展<br/>                     計算効率化(学習コストの低減、DeepSeek などの省コスト学習)<br/>                     長文・長期依存処理のブレークスルー(SSM 系、混合型、記憶機構の外付け/内蔵)<br/>                     ランタイム学習・継続学習(運用時のデータ反映)<br/>                     LLM とベリファイア(定理証明器、コンパイラ、デバッグ)との統合</p> <p>障壁</p> <p>計算資源・電力コストの急騰<br/>                     長期ホライズンでのクレジット割当の未解決<br/>                     実験安全性・ラボ統合の難しさ<br/>                     医療・バイオでの検証コストと倫理・規制<br/>                     トランスフォーマーの構造的限界(全てのコンテキストを扱えない)</p> |
| 他分野研究連携の必要性   | <p>AI for Science には材料・化学・医療のドメイン専門家と機械学習専門家の協働が必須<br/>                     完全自動化を目指すのでは無く、Human-in-the-loop(人間参加型)で専門家が候補を目利きし、限られた実験リソースを最適配分する設計が現実的</p>   |
| わが国のアセット(人材・インフラ等)と国外プレイヤー・チームとの比較  | <p>日本は材料・化学などの独自技術が強く、良質な実験系と再現性の高いデータ取得設計が競争力<br/>                     基盤モデルは電力・計算コストの観点で BigTech 優位。国研の計算資源整備、データ標準化、オープンな再現プロトコルが不可欠</p>   |
| 今後5年から10年の間において潮流となり得る研究の方向性  | <p>上記トレンド候補と同様</p>  |
| 今後の当該分野において優先すべき研究課題・支援形態   | <p>実験自動化の再現性向上(スループットではなくばらつき抑制)<br/>                     機械学習プロパー人材の育成・確保(共同研究拠点整備)<br/>                     アジャイルな資金スキーム(定期的・迅速配分、テーマ転換の柔軟性)</p>  |

## (6) 出所

- King et al., “Functional genomic hypothesis generation and experimentation by a robot scientist”, *Nature* 427, 247–252 (2004).
- Soldatova & King, “An ontology of scientific experiments”, *J. R. Soc. Interface* 3(11):795–803 (2006)
- Soldatova et al., “An ontology for a Robot Scientist”, *Bioinformatics* 22(14):e464–e471 (2006).
- Oinn et al., “Taverna: Lessons in creating a workflow environment for the life sciences”, *Concurrency and Computation: Practice and Experience* 18(10):1067–1100 (2006)
- Davidson et al., “Provenance in scientific workflow systems”, *IEEE Data Engineering Bulletin* 30(4) (2007).
- King et al., “The automation of science”, *Science* 324(5923):85–89 (2009).
- Settles, “Active Learning Literature Survey”, Univ. of Wisconsin–Madison TR (2010, updated).
- Snoek et al., “Practical Bayesian Optimization of Machine Learning Algorithms”, *NeurIPS* (2012).
- Williams et al., “Cheaper faster drug development validated by the repositioning of drugs against neglected tropical diseases”, *J. R. Soc. Interface* 12(104):20141289 (2015).
- Silver et al., “Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search”, *Nature* 529, 484–489 (2016).
- Silver et al., “Mastering the game of Go without human knowledge”, *Nature* 550, 354–359 (2017).
- Vaswani et al., “Attention Is All You Need”, *NeurIPS* (2017).
- Devlin et al., “BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding” (arXiv:1810.04805, 2018).
- Raissi et al., “Physics-informed neural networks...”, *J. Comput. Physics* 378, 686–707 (2019).
- Brown et al., “Language Models are Few-Shot Learners” (GPT-3), *NeurIPS* (2020). (arXiv:2005.14165)
- Lewis et al., “Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks”, *NeurIPS* (2020).
- Burger et al., “A mobile robotic chemist”, *Nature* 583, 237–241 (2020).
- Lu et al., “Learning nonlinear operators via DeepONet...”, *Nature Machine Intelligence* 3, 218–229 (2021).
- Jumper et al., “Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold”, *Nature* 596, 583–589 (2021).
- Kitano, “Nobel Turing Challenge: creating the engine for scientific discovery”, *npj Systems Biology and Applications* (2021).
- Yao et al., “ReAct: Synergizing Reasoning and Acting in Language Models” (2022).
- Gao et al., “PAL: Program-aided Language Models” (2022).
- Schick et al., “Toolformer: Language Models Can Teach Themselves to Use Tools” (2023).
- Shinn et al., “Reflexion: Language Agents with Verbal Reinforcement Learning” (2023).
- Mankowitz et al., “Faster sorting algorithms discovered using deep reinforcement learning”, *Nature* (2023).
- Tom et al., “Self-driving laboratories for chemistry and materials science”, *Chemical Reviews* (2024).
- Trinh et al., “Solving olympiad geometry without human demonstrations”, *Nature* (2024).
- Romera-Paredes et al., “Mathematical discoveries from program search with large language models” (FunSearch), *Nature* (2024).
- Lu et al., “The AI Scientist: Towards Fully Automated Open-Ended Scientific Discovery” (2024).

- Tobias et al., “Autonomous ‘self-driving’ laboratories: a review …”, Royal Society Open Science (2025).
- Yamada et al., “The AI Scientist-v2: … via Agentic Tree Search” (2025).
- Chervonyi et al., “Gold-medalist Performance … AlphaGeometry2” (2025).
- Hubert et al., “Olympiad-level formal mathematical reasoning with reinforcement learning” (AlphaProof), Nature (2025).

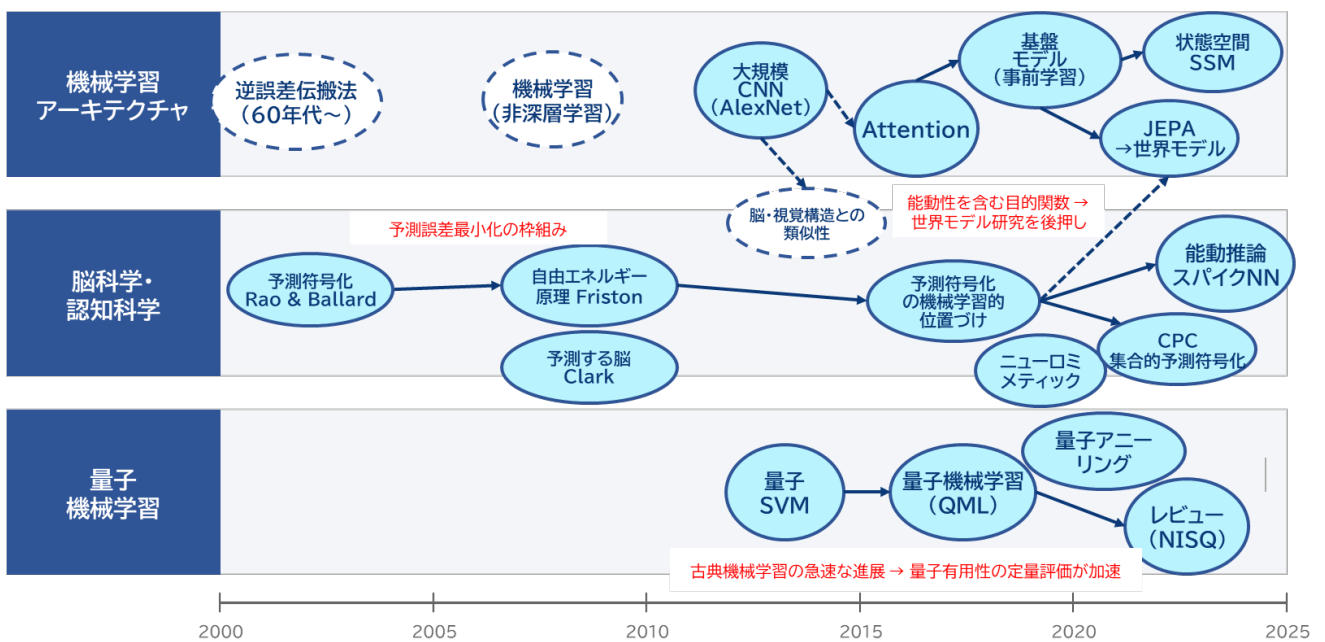
## 2.4.5 潮流 C6: 認知発達ロボティクス「トランスフォーマーに続く学習基本原理の探索」

### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。

現状の基盤モデルが持つ課題を解決することを目指して、様々なモデル構造・学習方法が提案されている。

同時に、脳科学・認知科学の側面、将来的な量子計算活用の側面から問題の再定義がされている。



出所) 点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き: 影響が及ぶ方向(起点から波及先)を示す。  
 矢印上のラベル: 影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-22 技術的進歩と方向性の概要図「トランスフォーマーに続く学習基本原理の探索」

表 2-109 技術的進歩と方向性(概要)「トランスフォーマーに続く学習基本原理の探索」

| 概要  |  |
|---|--|
| 注目する技術の概要(何が“基本原理”として更新されているか)  |  |
| (1) 系列演算の基本原理の刷新(ポスト Attention)   |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● Transformer が持つ「表現力」は維持しつつ、長文脈・低コスト推論を満たすために、系列演算子の候補が多様化</li> <li>● Attention の高速化(実装原理):FlashAttention 等(演算子を変えず、メモリ律速を解消)</li> <li>● Attention の代替(演算子の置換):状態空間モデル(SSM: S4→Mamba)、長距離畳み込み(Hyena)、リテンション(RetNet)、RNN×並列学習折衷(RWKV)など</li> </ul> |  |
| (2) 学習の目的関数・自己教師信号の刷新(“何を予測するか”の再設計)  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● 生成(復元)中心から、表現(embedding/latent)空間での予測へ寄せる設計が前面化</li> <li>● JEP A系(I-JEP A/V-JEP A/V-JEP A 2):データ空間の再構成ではなく、抽象表現の予測を学習の中核に置く</li> <li>● 拡散・復元型(拡散モデル等):生成原理の多様化(自己回帰一択ではない)</li> </ul>  |  |
| (3) 世界モデル・計画(planning)への拡張(受動→能動)   |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● 現状理解だけでなく、将来予測・行動計画まで含むモデルの役割の拡張</li> <li>● JEP Aの階層化構想(H-JEP A)や、動画+少量行動データを取り込む設計がこの方向性を強化</li> </ul>  |  |
| (4) 脳科学・認知科学由来の“別ルーツ”投入(目的関数/学習則/計算様式)  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● 自由エネルギー原理(FEP)/能動推論:知覚・推論・行動を統一的に捉える枠組み(目的関数の再定義)</li> <li>● 予測符号化:局所計算・誤差伝播の形で学習を説明し、バックプロパゲーションとの関係整理が進む(学習則の再探索)</li> <li>● SNN/ニューロモーフィック:イベント駆動・省電力・時間ダイナミクスを計算原理として取り込む(計算様式の再定義)</li> </ul>   |  |
| (5) 量子計算活用(QML/量子最適化)   |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● 量子計算に完全に置き換えるというより、当面は量子カーネル、変分量子回路(VQC)、量子SVM等、量子アニーリング(組合せ最適化)のように、適用条件が合う部分問題の探索が中心</li> </ul>  |  |

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-110 タイムライン「基盤モデル的なアプローチの画像分野への適用」(機械学習アーキテクチャ)

| 年         | 技術的な進展(基本原理・アーキテクチャ)                                  | 「ポスト Transformer 原理探索」との関連性   | 代表文献(例)  |
|-----------|---|---|--|
| 2000-2005 | 統計的学習・確率モデル・最適化が主軸(深層学習の出現前)                          | 「学習・推論の手順」「目的関数設計」の基本枠組み  | (一般背景)   |
| 2012      | 大規模 CNN のブレイクスルー(AlexNet)                             | 「データ×計算×アーキテクチャ」で性能が飛躍的に向上する時代へ   | Krizhevsky et al. 2012 (AlexNet)   |
| 2017      | Transformer (Attentionのみで系列変換)                        | Attention が系列演算の支配的原理に。ただし計算量(長文脈で $O(n^2)$ )が「次の原理探索」の要請につながる  | Vaswani et al. 2017  |
| 2018-2019 | 自己教師あり事前学習の標準化(BERT 等)                                | “学習信号(目的関数)”の勝ち筋が明確化 → 基盤モデル時代へ   | Devlin et al. 2018(BERT)   |
| 2020      | 言語モデルの性能向上(GPT-3)+ スケーリング則の定式化 + 拡散モデル + 線形 Attention | <ul style="list-style-type: none"> <li>・「なぜスケーリング則で性能向上できるか」が基礎問題へ</li> <li>・生成原理が自己回帰以外に拡張</li> <li>・長文脈を支える“サブ 2 乗演算”が提案</li> </ul> | Brown et al. 2020(GPT-3) / Kaplan et al. 2020(Scaling laws) / Ho et al. 2020(DDPM) / Katharopoulos et al. 2020(Linear Attention) |

| 年         | 技術的な進展(基本原理・アーキテクチャ)  | 「ポスト Transformer 原理探索」との関連性  | 代表文献(例)  |
|-----------|---|--|--|
| 2021-2022 | 長系列の原理探索が本格化(SSM系)<br>Attentionの高速化(FlashAttention)<br>計算最適学習(Chinchilla)                                   | ・Attention代替・補完の候補が体系化(SSM)<br>・Attentionを捨てずに実装で対応(IO最適化)<br>・「モデル・データ・計算配分」の組み合わせによる工夫 | Gu et al. 2021(S4)/ Dao et al. 2022(FlashAttention)/ Hoffmann et al. 2022 (Chinchilla/compute-optimal) |
| 2023      | JEPA(Joint Embedding Predictive Architecture)/<br>表現(embedding)空間で欠落情報を予測する、非生成の自己教師学習・世界モデル枠組み(階層化がH-JEPA) | 「データ空間で再構成する生成」ではなく、抽象表現を直接予測する目的関数へ(“何を予測するか”の変更)<br>「世界モデル」への潮流                        | LeCun “A Path…”(JEPA)<br>Dawid & LeCun(H-JEPAをエネルギーベース+潜在変数の文脈で位置づけ)                                   |
| 2023-2024 | ポスト Transformer 候補の探索:Mamba(SSM)、Hyena(長畳み込み)、RetNet(retention)、RWKV(RNN×Transformer折衷)                     | 「次の系列演算原理」競争が明確に。特に線形(～準線形)長文脈と低コスト推論が中心KPIに   | Mamba Hyena / RetNet/ RWKV   |

表 2-111 タイムライン「基盤モデル的なアプローチの画像分野への適用」(脳科学・認知科学)

| 年         | 技術的な進展(基本原理・アーキテクチャ)   | 「ポスト Transformer 原理探索」との関連性                    | 代表文献(例)  |
|-----------|--|--|--|
| 1999      | 予測符号化(PC, Predictive Coding)の原理の発見   | 視覚野の階層構造が、トップダウン予測を組み込むことで学習の結果として自発的に現れることを提示 | Rao & Ballard 1999 (Predictive Coding)                                       |
| 2006-2011 | 自由エネルギー原理(FEP):<br>行動・知覚・学習を統一的最適化として位置づけ                                  | LLMの”受動的予測”を超え、目的関数の再設計(能動性含む)を考える土台           | Friston 2010(FEP)<br>Clark 2023(Predictive Brain)                            |
| 2021-2022 | 予測符号化(PC, Predictive Coding)とバックプロパゲーションの関係を数理的に整理(生物学的な plausibility の候補) | 「局所更新・近似BP」という学習アルゴリズム原理の探索軸が明確化               | Rosenbaum 2022(PCとバックプロパゲーションの関係)  |
| 2024      | 能動推論(Active Inference)のレビューが拡充/深いSNN(スパイクニューラルネットワーク)の高性能化(省スパイクで高精度)      | “行動を含む推論”を学習原理に<br>イベント駆動・省電力計算を次の計算様式へ        | Pezzulo et al. 2024(Active Inferenceレビュー)/<br>Stanojevic et al. 2024(高性能SNN) |
| 2025      | 予測符号化に基づく「ニューロメティックDL」レビューなどが体系化   | “Transformer後”を目的関数+学習則+計算様式で再設計する研究が活性化       | Salvatori et al. 2025(PC由来DLレビュー)  |

表 2-112 タイムライン「基盤モデル的なアプローチの画像分野への適用」(量子機械学習)

| 年         | 技術的な進展(基本原理・アーキテクチャ)                               | 「ポスト Transformer 原理探索」との関連性                | 代表文献(例)   |
|-----------|--|--|---|
| 2013-2014 | 量子 SVM(QSVM)など、古典 ML の量子実装(高速化)提案                  | “量子による学習サブルーチン”という発想が明確化                   | Rebentrost et al. 2013/2014 (QSVM)                                      |
| 2017      | Quantum machine learning の俯瞰(Nature レビュー)で分野の輪郭が確立 | QML の主要類型(量子特徴写像、量子最適化等)を整理し、期待と制約を共有      | Biamonte et al. 2017(Nature)  |
| 2018      | 近未来量子デバイスも見据えた QML の体系化                            | QML をから「設計空間(データ符号化・回路・学習)」として扱う           | Schuld & Petruccione (Springer)   |
| 2022-2024 | 体系的レビュー/SLR が増加:2017-2023 文献を分類し、NISQ 制約を明示        | 「何ができそうで、何が不可能か」を定量・類型で見極める段階へ             | Peral-García et al.(SLR/レビュー) / Gujju et al. 2023(近未来量子デバイス上の QML サーベイ) |
| 2024-2025 | 量子アニーリング(D-Wave)のベンチマーク・適用限界の整理が進む                 | “どのクラスの最適化(例:二次・整数)に強い”を踏まえ、機械学習工程の一部として評価 | 量子アニーリングの比較・適用整理(Quinton et al. 2024)                                   |

### (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

Transformer ベースの基盤モデルが持つ計算コストの重さ(2 次計算量問題)、長文でのコンテキスト保持の難しさ等の課題を解消するため、複数のモデル構造が提案されている。

表 2-113 キーテクノロジー「トランスフォーマーに続く学習基本原理の探索」

| 名称                                  | 出現時期・背景  | 定義(要点)   | “学習基本原理”として何を考えるか  | 代表情報源                       |
|-------------------------------------|--|--|--|-----------------------------|
| Linear Attention (線形アテンション)         | 出現時期: 2020(主要提案)。背景: Transformer の $O(N^2)$ 計算・メモリボトルネックを回避するため、カーネル/特徴写像で softmax 注意を線形時間に近似・再表現。 | Attention をカーネル特徴写像などで線形化し、計算量を $O(n^2) \rightarrow O(n)$ へ寄せる系列演算 | 「自己注意 = 基本演算」の前提を緩め、長文脈の計算原理を再設計                           | Katharopoulos et al. (2020) |
| FlashAttention (IO-aware Attention) | 出現時期: 2022(主要提案)。背景: 注意計算のボトルネックが演算ではなく GPU メモリ IO にあることに着目し、タイル化とオンチップ SRAM 活用で正確な注意を高速・省メモリ化。    | 近似ではなく“正確な Attention”を IO(HBM $\leftrightarrow$ SRAM)最適化で高速化する実装原理 | 演算子は同じでも、メモリアクセスが律速という現実に合わせて「Attention を使い続ける」原理(実装原理)を確立 | Dao et al. (2022)           |

| 名称   | 出現時期・背景   | 定義(要点)  | “学習基本原理”として何を变えるか                                  | 代表情報源              |
|--|---|---|--|--------------------|
| S4 (Structured State Space)                            | 出現時期: 2021(arXiv 初出, ICLR 2022 採択)。<br>背景: 長系列を安定に扱うため、連続時間の状態空間モデル (SSM)を構造化・対角化し、長距離依存を線形計算で学習可能に。  | 連続時間 SSM を安定・効率に計算できるように再パラメータ化し、長距離依存を扱う系列モデル                  | Attention 以外の系列基本演算として 状態空間 (SSM) を主役化             | Gu et al. (2022)   |
| Mamba (Selective SSM)                                  | 出現時期: 2023(主要提案)。<br>背景: SSM の長距離記憶と入力依存の選択性(gating)を統合し、線形時間で Transformer 級性能を狙う次世代 SSM。   | SSM パラメータを入力依存にして、離散・情報密度が高い系列(言語等)でも性能を上げる                     | 「SSM は推論が弱い」弱点に手を入れ、Attention なしで内容ベース選択”を可能にする原理  | Gu et al. (2024)   |
| Hyena (Implicit long convolution + gating)             | 出現時期: 2023(主要提案)。<br>背景: 暗黙的長距離畳み込みと階層的ゲーティングで長距離依存を表現し、注意の二乗コストを回避する畳み込み系代替案。  | 長い畳み込みを暗黙パラメータ化し、ゲーティングと組み合わせる Attention の代替演算子にする              | Attention の代わりに「長畳み込み」を基本演算に置く=系列処理の物理(畳み込み)寄り原理   | Poli et al. (2024) |
| RetNet (Retention)                                     | 出現時期: 2023(主要提案)。<br>背景: 注意の表現力と RNN 的逐次性を兼ねる“retention”機構を導入し、双方向/単方向でストリーミング推論と長コンテキストを両立。  | 再帰と Attention の関係を導出し、保持 (retention)機構で 並列学習 + 低コスト推論 + 長文脈 を両立 | デコーディングの O(1)推論 等、運用制約から逆算して系列演算を定義                | Sun et al. (2023)  |
| RWKV(RNN × Transformer 折衷)                             | 出現時期: 2021 頃に公開実装が登場、2023 に論文化。<br>背景: 時間方向の再帰(RNN)とチャネル方向の並列 (Transformer 風)を組み合わせ、学習時の並列性と推論時の逐次性・省メモリを両立。  | Transformer 並列学習と RNN 推論効率を統合する設計(線形 Attention の系譜)             | 「訓練 = 並列、推論 = 再帰」を原理として採用し、推論コスト主導の設計を前面化          | Peng et al.(2023)  |
| JEPA(Joint Embedding Predictive Architecture) / H-JEPA | 出現時期: 概念としては 2022、画像での実装(I-JEPA)は 2023。H-JEPA は階層型拡張の構想として提案。<br>背景: 生成密度推定ではなく、コンテキスト→ターゲット表現を予測する自己教師型学習枠組み。予測符号化的発想と整合し、表現学習の頑健性を狙う。H-JEPA は階層的な世界モデル化を志向。 | 表現 (embedding) 空間で欠落情報を予測する、非生成の自己教師学習・世界モデル枠組み (階層化が H-JEPA)   | 「データ空間で再構成する生成」ではなく、抽象表現を直接予測する目的関数へ(“何を予測するか”の変更) | LeCun (2023)       |

## (4) 実用化可能性

現状の大規模言語モデルも様々な産業において急速に普及しているが、「次世代基盤モデル」が実用化されれば、より長いコンテキストや専門知識を正確に扱える、あるいは予測だけでなく新たな可能性の探索に活用できる、等の特徴を生かして、現在は難しいと考えられている知的作業を代替できる可能性がある。

長文脈・長系列の分析：法務・医療文書、設計レビュー、研究ノート、運用ログ解析

推論コストが支配的：高頻度問い合わせ、エッジ推論、リアルタイム制御

正確性・説明責任が必須：規制産業（医療・金融・公共）、高い安全性が必要な分野（モビリティ・インフラ）

環境と相互作用：ロボット、実験自動化、製造プロセス最適化（AI for Science 含む）

表 2-114 実用化可能性「トランスフォーマーに続く学習基本原理の探索」

| 産業                   | 代表ユースケース                | 「次世代学習原理」側の主要レバー   | 主要な実装課題（技術・制度）     |
|----------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|
| 製造業                  | 設計知識検索、工程最適化、外観検査の高度化   | 長文脈処理、知識統合、低コスト推論  | 品質保証・監査、機密データ統制    |
| 医療・ヘルスケア             | 診療文書要約、研究支援、医用画像＋テキスト統合 | 正確性強化（知識・制約）、信頼性評価 | 規制対応、説明責任、データガバナンス |
| 金融・保険                | 審査支援、不正検知、規程準拠チェック      | 監査可能性、バイアス低減、長文脈   | モデルリスク管理、透明性要求     |
| 法務・コンプラ              | 契約レビュー、判例探索、規制要件追跡      | 長文脈＋検索、幻覚低減、出典管理   | 誤りの責任分界、著作権・秘匿     |
| 公共・行政                | 申請対応、政策立案支援、住民サービス      | ガイドライン準拠、説明可能性     | 公平性、説明責任、調達要件      |
| 教育                   | 個別最適化学習、教材生成、評価支援       | 低コスト推論、学習ログ活用      | 学習者保護、偏り、著作権       |
| 研究開発（AI for Science） | 仮説生成→実験→解析の自動化          | 閉ループ学習、ロボット統合      | データ基盤、再現性、責任ある自動化  |
| モビリティ                | 運行最適化、運転支援、異常予兆         | 長系列センサ統合、リアルタイム推論  | 安全規格、検証・妥当性証明      |
| 通信・IT 運用             | 障害解析、セキュリティ運用自動化        | 長ログ系列、低遅延推論        | 誤検知/見逃し、攻撃耐性       |

## (5) インタビュー結果を踏まえた今後の潮流および研究の方向性

表 2-115 今後の潮流および研究の方向性「トランスフォーマーに続く学習基本原理の探索」(1/2)

| 項目  | 概要   |
|---|--|
| 新たに浮上している、または今後 5 年から 10 年の間に浮上すると考えられる技術トレンド、技術的ブレークスルーの可能性、技術面の障壁、規制・倫理も含む非技術面の障壁 | <p>トレンド候補</p> <p>カリキュラム学習を身体の発達(可動域・筋力・感覚分解能の向上)により探索空間と入力分布が自然に複雑化する設計が望ましい</p> <p>予測誤差を減らしやすいタスクを選好する単純な設計で、能動的な学習順序が自発的に生まれる(学習可能領域→より難しい領域へ順次移行、ランダム・自明タスクは回避)</p> <p>性能最適化(誤差最小化)一辺倒では創造性は生まれにくい。神経多様性(Neurodiversity)に学び、多様な表現・解法が自然に出る設計と評価軸を取り込むべき</p> <p>自律神経・循環・呼吸等の内受容感覚(Interoception)は情動・意志決定に深く関与する。AI/ロボットの身体性として外界センサだけでなく内受容系のモデリング・制御も将来重要</p> <p>主流法(誤差逆伝播)の効率に対し、予測情報処理系の実装効率(学習時間、安定性)が課題である。実ロボット適用にはオンライン学習、局所更新、ハードウェア親和性(SNN/ニューロモルフィック)等の工夫が鍵</p> <p>評価軸の転換(多様性・創造性・安全性)、人材確保、長期安定資金、実機ハードウェアへの継続投資が必要</p> |
| 他分野研究連携の必要性   | <p>計算神経科学／機械学習／哲学(認知哲学)の三系譜が Predictive Processing を支えてきた</p> <p>ハードウェア(成長する身体)、発達心理(学習順序・社会性)、臨床(神経多様性)との連携が不可欠</p>   |
| わが国のアセット(人材・インフラ等)と国外プレイヤー・チームとの比較  | <p>日本の強みは基礎研究とロボットの緊密な連携(身体と知能の相互設計)</p> <p>EUは 2000 年代初頭は発達ロボティクス予算が潤沢だったが、2010 年代以降応用志向が強い</p>   |
| 今後5年から10年の間において潮流となり得る研究の方向性  | <p>既存ロボットに知能を「後乗せ」するのではなく、知能が成立する身体の状態(形態・可動域・感覚)と知能アーキテクチャ(PP 等)を一体設計する研究を進めるべき</p>   |
| 今後の当該分野において優先すべき研究課題・支援形態   | <p>成長する身体の状態・製作と段階的に複雑になるセンサリーモータ経験のメカニズムの確立</p> <p>予測情報処理に基づく能動学習(好奇心・内発的動機づけ)のロボット実装と安定性向上</p>   |

表 2-116 今後の潮流および研究の方向性「トランスフォーマーに続く学習基本原理の探索」(2/2)

| 項目   | 概要   |
|--|--|
| <p>新たに浮上している、または今後 5 年から 10 年の間に浮上すると考えられる技術トレンド、技術的ブレークスルーの可能性、技術面の障壁、規制・倫理も含む非技術面の障壁</p> | <p>トレンド候補<br/>                     トレンドの中心は「コンテキスト／エージェント・レイヤー」へのシフトである。LLM のコンテキストウィンドウ(LLM が一度に扱えるトークン長)が拡大し、外部ファイル群に分散保持された長期記憶を参照・更新できることで、モデル外側の知能(自己更新・計画・対話協調)が立ち上がっている<br/>                     「バイブコーディング(Vibe Coding)」は、自然言語・軽量コード・設定を介して人間と AI が相互に成果物を更新し続ける開発様式として位置づけられ、研究・産業で成果を生むためのボトルネックが「パラメータ更新」から「相互作用の設計・評価・運用」に移る<br/>                     フィジカルな次元(システム 0: 身体・素材・ダイナミクス)、認知(システム 1/2)、社会・規範(システム 3)を貫く統合が不可欠である。自由エネルギー原理・予測符号化を社会・言語・規範形成まで拡張した CPC(Collective Predictive Coding: 集合的予測符号化)という概念を提案している<br/>                     障壁<br/>                     技術障壁としては外部記憶の一貫性管理と長期的自己更新の信頼性、目的(ゴール)記述の限界と「目的の創発」への移行、人間-AI の双方向アライメント設計、ロボット等のフィジカル側と知識側の時間スケール整合等が挙げられる<br/>                     非技術障壁としては、研究の資金配分が旧パラダイムに拘束されている点、舶来主義、デジタル赤字・フィジカル赤字の構造、トップ人材・資本の不足が挙げられる。</p> |
| <p>他分野研究連携の必要性</p>   | <p>システム 0-3 の一貫通貫での実現を目指すには、ロボティクス、認知科学、神経科学、材料・機械、社会科学・哲学、AI セーフティ／アライメントの横断連携が不可欠</p>  |
| <p>わが国のアセット(人材・インフラ等)と国外プレイヤー・チームとの比較</p>  | <p>人材・資本規模では米中及びビッグテックに劣後する一方、集合的アライメントや多元的価値観(非一神教的世界観)に基づく協調設計は日本・台湾等に文化的優位があり得る。</p>  |
| <p>今後5年から10年の間において潮流となり得る研究の方向性</p>  | <p>上記の方向性の他には、人間-AI の双方向アライメント(Bi-directional Alignment)の理論・制度・実装。ASI(Artificial Superintelligence: 超知能)時代を見据えた協働の基盤設計。</p>  |
| <p>今後の当該分野において優先すべき研究課題・支援形態</p>   | <p>旧パラダイム延長の大型案件ではなく、相互作用・外部記憶・評価基盤に資源を集中。JST・AMED の枠を超える規模・機動性のある横断プログラム(省庁横断)が必要である。</p>   |

## (6) 出所

|  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● Friston, “The free-energy principle: a unified brain theory?”, 2010</li> <li>● Rebutrost et al., “Quantum Support Vector Machine …” (PRL), 2014</li> <li>● Biamonte et al., “Quantum machine learning” (Nature), 2017</li> <li>● Gu et al., “Efficiently Modeling Long Sequences with Structured State Spaces (S4)”, 2021</li> <li>● LeCun, “A Path Towards Autonomous Machine Intelligence”, 2022</li> <li>● Dao et al., “FlashAttention: Fast and Memory-Efficient Exact Attention with IO-Awareness”, 2022</li> <li>● Millidge et al., “Predictive Coding: Towards a Future of Deep Learning beyond Backpropagation?”, 2022</li> <li>● Rosenbaum, “On the relationship between predictive coding and backpropagation”, 2022</li> <li>● Poli et al., “Hyena Hierarchy: Towards Larger Convolutional Language Models”, 2023</li> <li>● Gu &amp; Dao, “Mamba: Linear-Time Sequence Modeling with Selective State</li> </ul> |
|--|

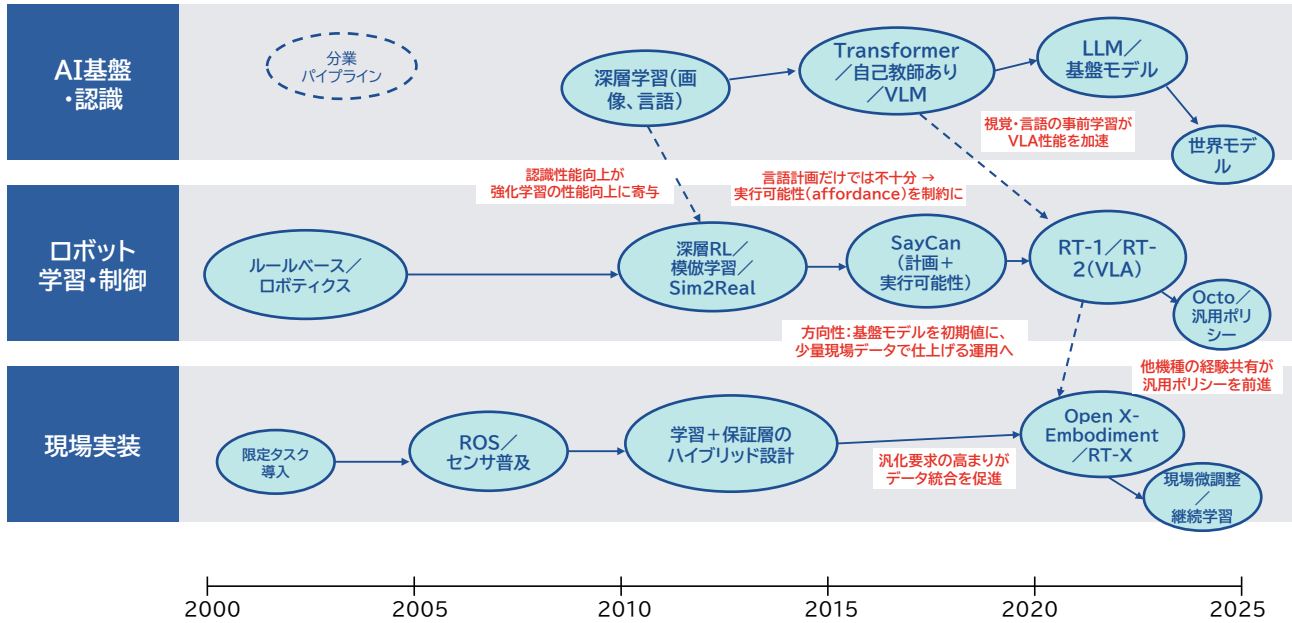
Spaces” , 2023

- Sun et al., “Retentive Network (RetNet): A Successor to Transformer for Large Language Models” , 2023
- Pezzulo, Parr, Friston, “Active inference as a theory of sentient behavior” , 2024
- Zhou et al., “Direct Training High-Performance Deep Spiking Neural Networks: A Review …” , 2024
- Peral-García et al., “Systematic literature review: QML … (2017-2023)” , 2024

## 2.4.6 潮流 C7:サービスロボット「実生活の無数のバリエーションに基盤モデル的なアプローチで対処」

### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



出所) 点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き: 影響が及ぶ方向(起点から波及先)を示す。  
 矢印上のラベル: 影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-23 技術的進歩と方向性の概要図「実生活の無数のバリエーションに基盤モデル的なアプローチで対処」

表 2-117 技術的進歩と方向性(概要)「実生活の無数のバリエーションに基盤モデル的なアプローチで対処」

| 概要   |   |
|--|---|
| サービスロボットは一種の「フィジカル AI」と考えられ、その枠組みの中で以下の技術的進歩が確認されている |   |
| 1.   | ルールベース／幾何＋確率ロボティクス → 学習ベースへの転換  |
| ●  | 2000年代は SLAM・経路計画・物体幾何を中心とするパイプラインが主流(環境が変わると破綻しやすい)                        |
| ●  | 「学習可能な不確実性」を増やしつつ、安全・保証が必要な層は規則/形式手法で残すハイブリッド手法が現実解                         |
| 2.   | ロボット動作生成と深層学習の主流化(模倣学習・生成モデル)   |
| ●  | 動作生成が深層学習の対象となり、手動での設計コストを削減  |
| ●  | 深層強化学習(試行錯誤)から模倣学習(デモから学ぶ)、生成モデル(拡散など)へ多様化                                  |
| 3.   | マルチモーダル化(視覚・言語・状態)と指示可能なロボット  |
| ●  | 言語指示をタスク仕様として扱い、タスク追加をコードではなく指示で行う方向へ                                       |
| ●  | LLM の計画能力を活かす一方、実行可能性が担保できない問題が顕在化 → 実行可能性(affordance)を制約条件とする設計(SayCan)が提案 |
| 4.   | VLA/ロボット基盤モデル(RT-1 → RT-2)  |
| ●  | 視覚・言語の大規模事前学習を、観測→行動に直結させて汎化を狙う(VLA)  |
| ●  | RT-1 がスケールする Transformer ポリシーを提示、RT-2 で Web 規模知識の転写と意味的推論を志向。               |
| 5.   | クロスエンボディメント・データ連合(Open X-Embodiment, RT-X)                                  |
| ●  | 「ロボットごとに別学習から」、「汎用ポリシー→少量データでの個別タスク適応」へ                                     |
| ●  | 多機関・多ロボットのデータ統合が進み、経験の共有で転移学習を狙う RT-X が提示                                   |
| 6.   | オープン・汎用ポリシー(Octo 等)と「初期値としての基盤モデル」  |
| ●  | 汎用ポリシーを初期値として、現場データで効率よく仕上げる考え方(fine-tune 前提)                               |
| ●  | 複数ロボットでの汎用性を示す研究が増え、Octo は多プラットフォームでの初期化・微調整の有効性を示す                         |

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-118 タイムライン「実生活の無数のバリエーションに基盤モデル的なアプローチで対処」

| 期間            | 技術アプローチ                | 代表的進展                             | サービスロボットへのインパクト          |
|---------------|------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| 2000<br>～2006 | 強化学習、制御工学(最適化)、ルールベース等 | 実環境導入は環境を整える前提                    | 限定タスク(清掃・搬送)に集中、環境の変化に弱い |
| 2007<br>～2011 | ミドルウェア・センサ普及           | 開発基盤整備、データ取得が容易に                  | 開発速度向上、ただしロングテール問題は未解決   |
| 2012<br>～2015 | 深層学習(主に画像・言語認識)        | 認識性能が飛躍的に向上、ロボットは分業パイプライン維持       | 認識の頑健性↑、操作は依然難しい         |
| 2016<br>～2019 | 深層強化学習／模倣学習／Sim2Real   | 操作学習が活発化、現場への移行は安全面が障壁            | 実運用は学習以外の設計が重要に          |
| 2020<br>～2021 | Transformer／自己教師あり／VLM | オープン語彙・表現学習がロボへ波及                 | 自然言語の指示で動くための前提が整備       |
| 2022          | LLM+ロボット(計画+実行可能性)     | SayCan(言語モデルによる計画+スキル制約)          | SOP の言語化・例外処理が焦点に        |
| 2022<br>～2023 | ロボット Transformer/VLA   | RT-1(スケールするポリシー)／RT-2(Web 上の知識活用) | 汎化が前進、ただし安全保証が課題         |
| 2023<br>～2024 | クロスエンボディメント・データ統合      | Open X-Embodiment /RT-X/Octo      | 共通基盤+現場適応が現実味            |

### (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-119 キーテクノロジー「実生活の無数のバリエーションに基盤モデル的なアプローチで対処」

| 名称                                | 出現時期・背景  | 定義(要約)                      | サービスロボットにおける役割            | 代表例(モデル・枠組み)           |
|-----------------------------------|--|-----------------------------|---------------------------|------------------------|
| 基盤モデル (Foundation Model)          | 出現時期: 2018-2021 年に大規模事前学習の基盤が整備 (BERT 2018, GPT-3 2020)、用語としての定義は 2021 年ごろ。<br>背景: 自己教師ありでウェブ規模データをスケールし汎用表現を獲得、1 モデル多用途化の潮流。ロボティクス応用が近年加速。                      | 大量・多様データで事前学習し、多用途に適応可能なモデル | 汎用的な挙動を実現する土台             | 言語基盤モデル(LLM)等          |
| VLM (Vision Language Model)       | 出現時期: 2021 年に画像-テキスト事前学習 (CLIP/ALIGN) が実用化、2022 年にフューショット対応 VLM (Flamingo) などが登場。<br>背景: 大規模画像-説明文ペアで視覚と言語の共通表現を獲得しゼロショット・指示理解が可能に。ロボティクスでは知識移転の基盤として活用。         | 画像+言語の対応を学習したモデル            | オープンエンドの語彙認識、意味理解         | PaLM-E                 |
| VLA (Vision Language Action)      | 出現時期: 2022-2023 年に台頭 (SayCan 2022, RT-1 2022, PaLM-E 2023, RT-2 2023)。<br>背景: 視覚・言語表現と行動ポリシーを結合し、ウェブ知識や言語指示をロボット操作へ直接写像。トークン化された行動表現や LLM 連携で汎用化を促進。             | 視覚・言語・行動を統合し観測から行動を予測       | 指示-行動ループの中核               | RT-1/RT-2              |
| クロスエンボディメント学習                     | 出現時期: 2023-2024 年に実データを横断統合する大規模共同研究が本格化。<br>背景: 機体や制御系の異なるロボット横断データを共通表現・正規化で統合し、汎用ポリシーの転移性とカバレッジを向上 (RT-X/Octo 等)。   | 複数ロボットの経験を統合し転移学習           | 機種による差の吸収、展開性             | Open X-Embodiment/RT-X |
| 模倣学習 (IL: Imitation Learning)     | 出現時期: 1989 年の行動クローニング (ALVINN) に端緒、2011 年の DAgger で理論的整理、深層 IL が 2010 年代後半から普及。<br>背景: 専門家デモから教師ありでポリシーを学習しデータ効率を確保。大規模デモ+トランスフォーマ/拡散によるロバストな視覚運動ポリシーが主流化。       | デモとなる行動を教師として学習             | 安全に学習、現場 SOP を反映          | Open X-Embodiment      |
| 強化学習 (RL: Reinforcement Learning) | 出現時期: 1980-90 年代に基礎が確立 (Sutton & Barto)、2015 年の Deep Q-Network や 2016 年 AlphaGo で再興。<br>背景: 試行錯誤で報酬最大化を学習。ロボティクスでは自律獲得や接触制御に有効だが実機サンプル効率が課題で、モデル化や模倣とのハイブリッドが進展。 | 報酬最大化に従って試行錯誤に行動を学習         | 移動手段での適用実績があるが、現場での活用には課題 | DQN, PPO               |

| 名称                        | 出現時期・背景   | 定義(要約)                | サービスロボットにおける役割  | 代表例(モデル・枠組み)     |
|---------------------------|---|-----------------------|-----------------|------------------|
| 世界モデル                     | 出現時期: 2018年に概念と実証(World Models)、2018-2020年に学習型動力学によるプランニング(PlaNet, Dreamer)が発展。<br>背景: 環境の潜在ダイナミクスを学習し、モデル内ロールアウトで計画・学習を効率化。実機での試行回数削減のためロボティクスで再注目。              | 環境ダイナミクス・因果を学習した内部モデル | 計画・予測・安全検証の基盤   | Genie, Cosmos    |
| 生成モデル行動(Diffusion Model等) | 出現時期: 2020年に拡散生成モデルが確立、2023年に行動・軌道生成へ本格適用(Diffusion Policy)。<br>背景: 多峰性を持つ行動分布を高忠実にモデリングし、視覚入力からの頑健な把持・組立を実現。計画化やILと融合する派生も登場。                                    | 行動分布を生成モデルとして表現       | 多峰性・柔軟性、長期手順の一部 | Diffusion Policy |
| スキルライブラリ                  | 出現時期: 1999年のOptionsで階層的スキルの形式化、その後ビヘイビア集合として蓄積・呼び出しする実用が定着。近年はLLM/VLMと統合。<br>背景: 汎用タスクを原子的スキルに分解し再利用・構成してスケール。言語でスキルを選択・プランする枠組み(SayCan)や汎用ポリシー(Octo/RoboCat)で活用。 | 低レベル技能を部品化して呼び出す枠組み   | 安全・再利用・検証容易性    | PaLM-SayCan      |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-120 実用化可能性「実生活の無数のバリエーションに基盤モデル的なアプローチで対処」

| 業種       | ユースケース         | 期待される効果       | 技術的アプローチ               |
|----------|----------------|---------------|------------------------|
| 物流・倉庫    | 搬送、ピッキング補助、仕分け | 省人化、生産性向上     | 例外(混雑・欠品・棚替え)対応、自然言語UI |
| 小売       | 棚監査、品出し補助、案内   | 欠品削減、接客補助     | 多品種の商品の認識、対話           |
| 飲食・宿泊    | 配膳、館内物資輸送      | 省人化、夜間対応      | “指示→行動”で運用柔軟化          |
| 病院       | 検体・薬剤・リネン搬送、消毒 | 感染症対策、スタッフ負担減 | ルート変更、優先度変更、例外処理       |
| 介護・福祉    | 見守り、移乗補助       | ケア負担軽減        | マルチモーダル理解(音声・姿勢)       |
| ビルメンテ・清掃 | 清掃、巡回点検        | 定常業務の自動化      | 環境変化(レイアウト変更等)の吸収      |
| インフラ点検   | プラント・橋梁・設備巡視   | 安全性向上・最適化     | 異常検知、自然言語レポート          |
| 製造       | 構内搬送、段取り補助     | 稼働率改善         | 工程変更への対応、作業指示          |

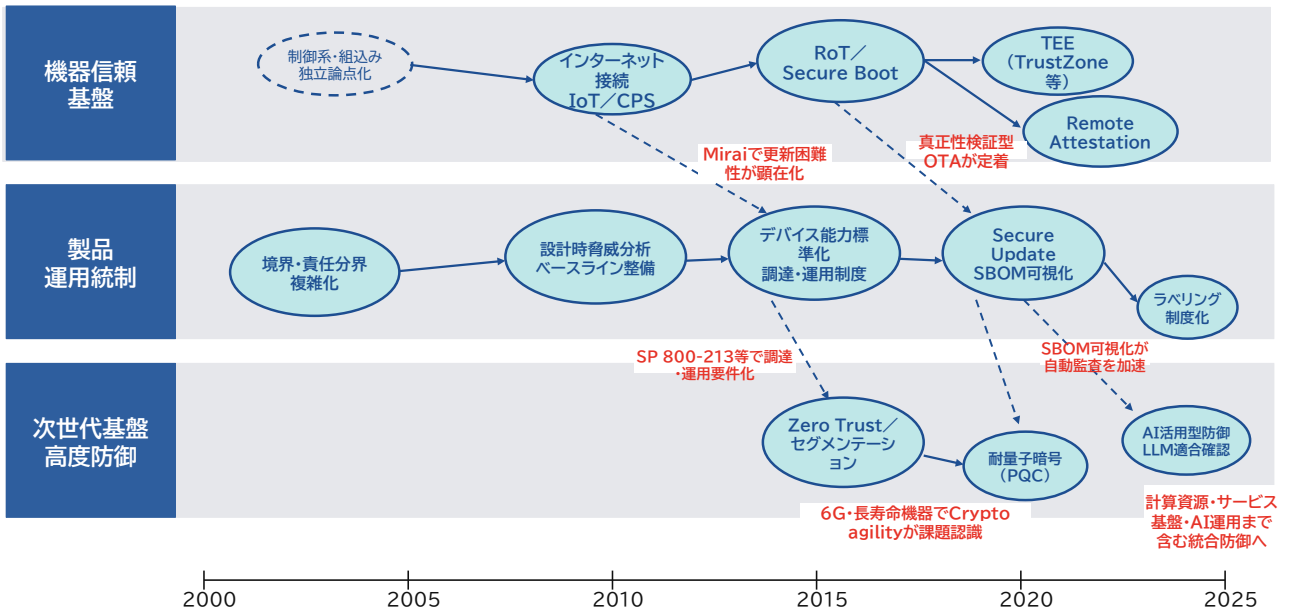
## (5) 出所

- Brohan et al., RT-1: Robotics Transformer for Real-World Control at Scale, 2022
- Brohan et al., RT-2: Vision-Language-Action Models Transfer Web Knowledge to Robotic Control, 2023
- Ahn et al., Do As I Can, Not As I Say: Grounding Language in Robotic Affordances, 2022
- Driess et al., PaLM-E: An Embodied Multimodal Language Model, 2023
- Open X-Embodiment Collaboration et al., Open X-Embodiment: Robotic Learning Datasets and RT-X Models, 2024
- Octo Model Team et al., Octo: An Open-Source Generalist Robot Policy, 2024
- Bousmalis et al., RoboCat: A Self-Improving Generalist Agent for Robotic Manipulation, 2023
- Chi et al., Diffusion Policy: Visuomotor Policy Learning via Action Diffusion, 2023
- Kawaharazuka et al., Real-World Robot Applications of Foundation Models: A Review, 2024
- Firoozi et al., Foundation Models in Robotics: Applications, Challenges, and the Future, 2023

## 2.4.7 潮流 C8:IoTセキュリティ「将来の情報通信基盤に対するセキュリティの確保」

### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



出所) 点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き: 影響が及ぶ方向(起点から波及先)を示す。  
 矢印上のラベル: 影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-24 技術的進歩と方向性の概要図「将来の情報通信基盤に対するセキュリティの確保」

表 2-121 技術的進歩と方向性(概要)「将来の情報通信基盤に対するセキュリティの確保」

| 概要   |
|--|
| <p><b>IoTセキュリティ分野の進展</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 2000年代は、制御系・組込み系のセキュリティが独立した課題と認識 <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ ISA99 委員会は 2002 年に産業オートメーション・制御系の保護を目的に発足</li> <li>➢ 日本でも IPA が 2006 年から組込み機器の脅威・対策調査を開始</li> </ul> </li> <li>● 2010 年代前半には、スタンドアロン前提から、ネットワーク接続・クラウド連携・ソフトウェア制御を前提とする IoT 機器へ移行し、境界と責任分界点が複雑化</li> <li>● 2016 年の Mirai によって、推測容易な認証情報、更新困難性、脆弱な初期設定が大規模 DDoS の土台になることが示され、IoT セキュリティを「研究課題」から「社会的防御基盤」に押し上げられた。これを受け、IPA の開発手引きや ENISA のベースライン勧告など、設計段階の脅威分析とベースライン整備が進む</li> <li>● 2019 年以降は、デバイス能力の標準化と調達・運用側の要求定義が進行 <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ NIST IR 8259A は IoT デバイスのコア能力ベースラインを示し、SP 800-213 は機器取得を組織・システムリスク管理の文脈で扱う</li> <li>➢ 米国の IoT Cybersecurity Improvement Act は連邦調達の最低基準を法制化</li> </ul> </li> <li>● 2022 年以降は、製品全体・ライフサイクル全体へ視点が移り、ラベリングと制度化が加速 <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ NIST IR 8425 はコンシューマ IoT 製品全体の成果を定義</li> <li>➢ ETSI EN 303 645 は Secure Update とサポート期間透明化を明示</li> <li>➢ FCC は QR コード付きの Cyber Trust Mark、EU CRA は設計・更新・保守を通じた義務化</li> <li>➢ JC-STAR は日本の IoT ラベリング制度を運用開始</li> </ul> </li> </ul> <p><b>IoTセキュリティの将来</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 5G/Beyond 5G、クラウド成熟、エッジコンピューティング、分散機械学習の台頭を背景に、ネットワークが「通信と計算処理を融合する計算基盤」へ向かう大きな潮流にある</li> <li>● 将来基盤のセキュリティは通信網単体ではなく、計算資源・サービス基盤・AI 運用を含む問題</li> <li>● DX の進展に加え、量子・6G・サプライチェーン複雑化を研究開発テーマ設定の背景に置いており、6G については、盗聴、ジャミング、体内センサ起点の人命リスク、極限環境での異常動作など、サイバーフィジカルな被害を前提とした論点となっている</li> <li>● 生成 AI が真偽判定困難な情報を大量生成・拡散できることを背景に、人間の認知的脆弱性を狙う脅威への対処の必要性が認識されている</li> </ul> |

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

S

表 2-122 タイムライン「将来の情報通信基盤に対するセキュリティの確保」

| 期間            | 潮流   | 代表的なイベント   | 研究開発トレンドへの寄与                                 |
|---------------|--|--|--|
| 2000<br>-2005 | 制御系・組込み系のセキュリティが独立論点化。通信基盤側ではインターネット・光通信が社会基盤化 | ISA99 委員会発足(2002)<br>2000 年代に光通信網・大規模データセンターが普及  | 「閉じた制御」前提から「接続される制御」前提へ移行する土台が形成             |
| 2006<br>-2015 | 非接続機器のネット接続化、クラウド化、スマホ連携が進み、IoT/CPS/エッジの原型が形成  | 組込み機器セキュリティ<br>IoT/CPS、エッジ、スマホ+クラウドの拡大   | ネットワーク境界と責任分界点の複雑化により、設計段階からの見直しが必要に         |
| 2016<br>-2018 | Mirai によって IoT 脅威を社会問題化。ベースライン・設計ガイド整備が加速。     | IPA「IoT 開発におけるセキュリティ設計の手引き」<br>ENISA ベースライン勧告  | 既定パスワード、更新不能性、設計不備が「個別不具合」ではなく「基盤リスク」と認識     |
| 2019<br>-2021 | デバイス能力の標準化と、調達・運用視点の制度化                        | NIST IR 8259/8259A/8259B、<br>SP 800-213<br>IoT Cybersecurity Improvement Act of 2020               | 単なる実装対策から、製造者活動・取得要件・運用統制を含む枠組みへ拡張           |
| 2022<br>-2024 | 「デバイス」から「製品全体」「ライフサイクル全体」へ視点が進化                | NIST IR 8425、ETSI EN 303 645 改訂<br>FCC Cyber Trust Mark 最終規則、<br>EU CRA、NOTICE 拡張<br>Mirai 亜種の継続観測 | Secure Update、可視化ラベル、脆弱性管理、製品全体成果、調達判断支援が中核化 |
| 2025<br>-2026 | ラベリングの運用段階入りと、将来通信基盤・AI 社会を見据えた研究課題の前景化        | JC-STAR 運用開始、政府調達連携  | 「守る」だけでなく、「証明できる・更新できる・評価できる・人も守る」基盤が競争力に    |

### (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-123 キーテクノロジー「将来の情報通信基盤に対するセキュリティの確保」

| 名称  | 出現時期・背景   | 概要  | 要素技術                                 | 主な波及分野                                  |
|---|---|---|--------------------------------------|---|
| ルート・オブ・トラスト (RoT)/ Secure Boot / Trusted Boot | 出現時期: 2003 年ごろに TPM 1.2 (RoT/測定の基盤)が公表。2011-2012 年に UEFI Secure Boot/Measured Boot が PC で本格普及、2010 年代に組み込み/IoT へ拡大。<br>背景: ブートキット/ファームウェア改ざん対策として、ハードウェアに根差した信頼の連鎖(RoT)と起動測定 (Trusted/Measured Boot)を標準化し、更新・復旧も含むプラットフォーム回復力の確立が求められた。 | 機器内で暗黙に信頼される最小機能を起点に、起動時の真正性・完全性を確立する仕組み                        | 署名検証、秘密鍵保護、アンチロールバック、ブートチェーン確立       | ルータ、ゲートウェイ、産業コントローラ、医療機器                |
| TEE (TrustZone 等)                             | 出現時期: 2000 年代中盤に Arm TrustZone がアーキテクチャとして登場 (2009 年に詳細ホワイトペーパー)。2010 年代にスマートフォン等で広く実装。x86 では Intel SGX(2015 年)など。<br>背景: 機密キーや決済/DRM 等の安全実行領域の分離需要が高まり、通常世界 (REE)から隔離された安全世界(TEE)で最小限の信頼基盤を提供する方式が普及。                                  | Secure World と Normal World を分離し、高価値コード・鍵・認証処理を隔離実行するハードウェア強制分離 | セキュアモニタ、鍵管理、分離メモリ、最小特権化              | AIoT 端末、モバイル、医療、産業 IoT、車載エッジ端末          |
| Remote Attestation                            | 出現時期: 2000 年代初頭に TPM を用いたプラットフォーム測定/証明が提案・実装。2020 年代に IETF RATS でアーキテクチャ標準化(2023 年)。IoT 向けの方式は 2010 年代後半に研究・実装が拡大。<br>背景: 機器の起動状態・構成の信頼性を第三者へ証明し、ゼロトラストや IoT の大規模管理に活用。Mirai 等の IoT ボットネット被害が整合性検証の必要性を後押し。                             | 測定値を取得し、期待値と照合して、機器やプラットフォームが受容可能な状態で起動・稼働しているかを遠隔検証する仕組み       | 測定値生成、署名付きアステーション、基準値管理、検証サーバ運用      | ゼロタッチ導入、IoT オンボーディング、OT/クラウド接続、運用時健全性確認 |
| Secure Update / 脆弱性対応                         | 出現時期: 一般 OS では 2000 年代から継続。IoT では IETF SUIT の成果が 2020-2021 年に公開され標準化。脆弱性開示・取扱いが ISO/IEC 29147 (2018)、30111(2019)で国際標準化。<br>背景: ファームウェア改ざんや大量感染 (例: Mirai)を踏まえ、署名付き安全更新、ロールバック防止、SBOM 連携、開示から修正までのプロセス標準化が必須に。                           | 機器を安全に更新可能にし、更新の真正性・完全性を保証し、脆弱性に継続対処する仕組み                       | 署名付き OTA、真正性検証、自動更新、失敗時リカバリ、サポート期間開示 | コンシューマ IoT、医療、産業 IoT、スマートメータ            |
| SBOM / ソフトウェアサプライチェーン可視化                      | 出現時期: 2010 年代に SPDX 等の取り組みが開始。2021 年に SPDX が ISO 規格化、米国 EO 14028(2021)で SBOM 普及が加速。<br>背景: OSS 依存とサプライチェーン攻撃の増加を受け、コンポーネント構成の機械可読な可視化とリスク管理(脆弱性照合、ライセンス/依存関係管理)が必須に。  | ソフトウェア構成要素と供給関係を記録する正式な台帳                                       | 部品表管理、来歴把握、脆弱性照合、開発プロセス証跡            | 調達、医療、OT、通信、クラウド連携製品                    |

| 名称                     | 出現時期・背景  | 概要  | 要素技術                                    | 主な波及分野                                 |
|------------------------|--|---|---|--|
| Zero Trust / セグメンテーション | 出現時期: 2010 年前後にコンセプトが浸透し、Google BeyondCorp(2014)で具体化。NIST SP 800-207(2020)が標準的アーキテクチャに。<br>背景: 境界防御の限界とリモート/クラウド化により、アイデンティティ/コンテキストに基づく継続的検証とマイクロセグメンテーションが必要に。   | ネットワーク位置や所有形態による暗黙の信頼を置かず、都度認証・認可する設計             | デバイス認証、最小権限、マイクロセグメンテーション、隔離            | 病院、工場、庁内ネットワーク、スマートビル、IoT 集約ゲートウェイ     |
| 耐量子計算機暗号 (PQC)         | 出現時期: NIST が 2016 年に標準化プロセス開始、2022 年に第 1 陣アルゴリズム選定、2024 年に最初の PQC 標準 (FIPS 203/204/205) が公表。<br>背景: 量子計算の発達を見据え、現行公開鍵暗号の安全期限(Y2Q)に備えるため、鍵交換/署名の代替方式を早期に標準化・移行計画化。  | 将来の量子計算による既存公開鍵暗号の破綻を見越した暗号方式群                    | Crypto agility、鍵長/処理量増への設計、長寿命機器からの段階移行 | 通信基盤、エネルギー、公共インフラ、長期運用 OT、政府システム       |
| AI 活用型防御 / LLM 活用適合確認  | 出現時期: セキュリティ分析/EDR での機械学習活用は 2010 年代に一般化。LLM の業務適用と対策ガイドは 2023 年以降に整備が進展。<br>背景: アラート相関/振る舞い分析、自動化生成(SOAR)等に AI を適用する一方、LLM の安全利用・評価・ガバナンスの枠組み(リスク管理、脆弱性分類、運用統制)が求められる。  | AI を用いて脅威を動的に緩和し、LLM やリバースエンジニアリングで標準適合や監査を支援する技術 | 異常検知、プロトコル解析、ファジング、適合性比較、自動監査補助         | 通信基盤、MSSP、認証・評価、AIoT プラットフォーム          |
| セキュアな帯域管理              | 出現時期: QoS の基盤技術は RSVP (1997)、DiffServ(1998)で確立。暗号化通信の普及(IPsec 2005、QUIC 2021)や産業系の DetNet(2019)でポリシー/識別に基づく帯域・フロー制御とセキュリティの両立が課題化。<br>背景: 全トラフィック暗号化やクラウド/モバイル化の中で、サービス品質保証とセグメンテーション、暗号化下でのメタデータ指向制御(ID/タグ/セキュリティポスチャ連動)が必要に。 | ジャミング、スプーフィング、不正送信などから無線資源の可用性と完全性を守る技術           | RF 観測、異常検知、妨害検出、試験基盤、耐妨害設計              | Beyond 5G/6G、スマートモビリティ、無線 IoT、スマートグリッド |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-124 実用化可能性「将来の情報通信基盤に対するセキュリティの確保」

| 産業分野                        | ユースケース                                      | 関連する要素技術                                      | 適用の論点   |
|-----------------------------|---|---|---|
| コンシューマ IoT / スマートホーム        | ルータ、カメラ、スマートロック、家電の安全な選定と更新                 | Secure Update、ラベリング、製品ベースライン、デバイス ID          | ETSI、NIST IR 8425、FCC、JC-STAR が揃い、購買・調達の意味決定に活用されている。 |
| 産業 OT / 製造 / IIoT           | PLC・ゲートウェイ・センサの安定軌道、OT/IT 接続点保護、ベンダ開発プロセス評価 | RoT、Attestation、Zero Trust、SBOM、ISA/IEC 62443 | ISA/IEC 62443 はライフサイクル・認証・IT/OT 橋渡しまで含むため、実務への適用が容易。  |
| 医療機器                        | プレマーケット審査、ポストマーケット脆弱性対応、病院ネットワーク内の機器管理      | Secure Update、SBOM、セグメンテーション、設計時文書化           | 米国 FDA から申請文書が明示され、ライフサイクルでの脆弱性管理を要求している              |
| エネルギー / スマートグリッド / ビル       | 長寿命機器の安全導入、遠隔保守、将来暗号移行、無線妨害対策               | Attestation、PQC、Secure Spectrum               | 6G/スマートグリッド文脈で需要が拡大。特に長寿命機器では PQC と更新設計が重要            |
| 通信 / Beyond 5G・6G / エッジクラウド | 仮想化ネットワーク、O-RAN 系基盤、AMF/UPF 検証、AI 運用自動化     | AI 活用型防御、ファジング、PQC、SBOM、Secure Spectrum       | 研究～実証～先行導入段階。安全なプロトコル、安全なインフラソフト、帯域防御が主要論点            |
| モビリティ / スマートシティ             | 自律走行周辺、デジタルツイン、道路・都市 IoT、監視系機器保護            | Attestation、Zero Trust、Secure Spectrum        | 6G 用途として自動運転・デジタルツインが想定され、都市 IoT の侵害は物理被害に近づく         |
| 公共調達 / 政府機関                 | セキュア製品選定、最低基準化、ラベル活用                        | ラベリング、ベースライン要求、SBOM、Zero Trust                | 日本では JC-STAR ラベルが政府調達で要求され、米国でも連邦 IoT 調達の最低基準が制度化     |

#### (5) 出所

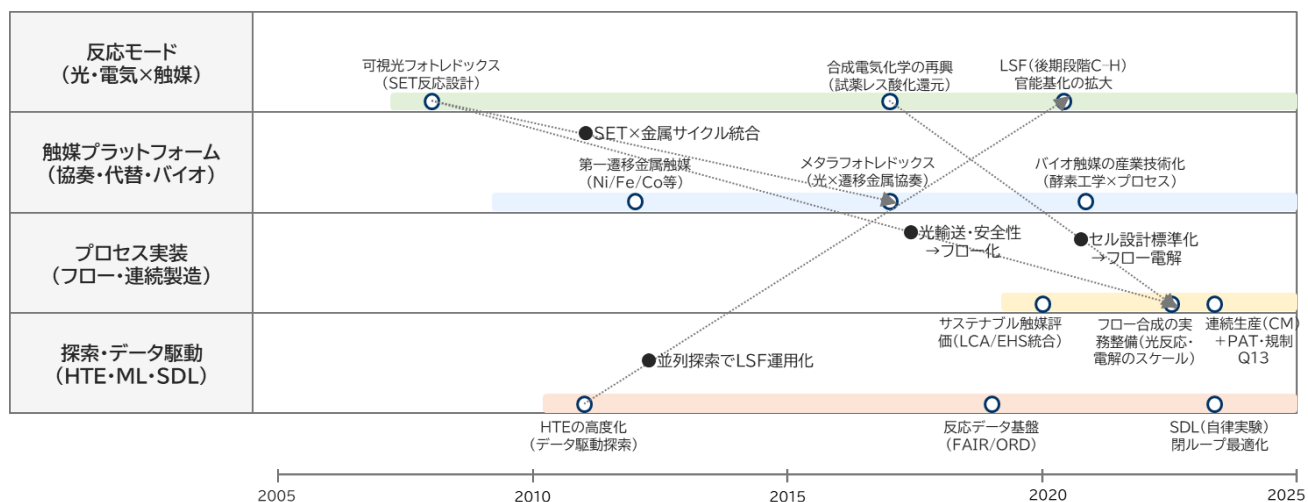
- Antonakakis et al. “Understanding the Mirai Botnet,” 2017.
- Kuang et al. “A Survey of Remote Attestation in Internet of Things: Attacks, Countermeasures, and Prospects,” 2022.
- Ling et al. “Secure boot, trusted boot and remote attestation for ARM TrustZone-based IoT Nodes,” 2021.
- Ambrosin et al. “Collective Remote Attestation at the Internet of Things Scale: State-of-the-Art and Future Challenges,” 2020.
- Ankergrård et al. “State-of-the-Art Software-Based Remote Attestation: Opportunities and Open Issues for Internet of Things,” 2021.
- Marzano et al. “The Evolution of Bashlite and Mirai IoT Botnets,” 2018.

## 2.5 ナノテクノロジー・材料分野

### 2.5.1 潮流 D1:分子技術「触媒反応による有機合成の進展」

#### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



出所)点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き:影響が及ぶ方向(起点から波及先)を示す。  
 矢印上のラベル:影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-25 技術的進歩と方向性の概要図「触媒反応による有機合成の進展」

表 2-125 技術的進歩と方向性(概要)「触媒反応による有機合成の進展」

| 概要   |
|--|
| <p>● フォトレドックスと協奏触媒の定着<br/>光酸化還元触媒(可視光フォトレドックス)と遷移金属触媒の協奏(メタラフォトレドックス等)が、有機合成の反応設計空間を「一電子(SET(単電子移動))×金属触媒サイクル」へ拡張し、熱的条件では進みにくい反応(例: CO<sub>2</sub>の固定的変換)や、従来困難だった結合形成を方法論として定着させた。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 2000年代: 可視光を使う有機反応は散発的だったが、光エネルギーを化学変換に使う手法が再構成され始めた。</li> <li>✓ 2010年代: 可視光フォトレドックスが“合成の標準的ツール”として拡大し、金属触媒との統合(メタラフォトレドックス)が方法論を押し上げた。</li> <li>✓ 2020年代: Ir 代替を含む有機光触媒設計・データ駆動最適化が進み、スケール移行(フロー光反応等)が重点化。</li> </ul> <p>● 位置選択(C-H)とLSF(後期段階官能基化)の“設計思想”化<br/>位置選択的合成は、C-H活性化・官能基化、遠隔位(meta/para等)制御、late-stage C-H functionalization(LSF(後期段階C-H官能基化))の実用域拡大により、「候補分子の最終段階で多様体を作る」設計思想に重心が移った。これは医薬品探索・プロセス双方の時間短縮に直結しう一方、汎用性・スケール・原料適合性の三立(特に触媒寿命と副反応制御)が課題である。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 2000年代: 指向基を用いたC-H活性化が拡大し、結合形成の考え方が変化。</li> <li>✓ 2010年代: 遠隔位やヘテロ環への展開が進み、医薬・天然物等の複雑基質への適用が増加。</li> <li>✓ 2020年代: HTE(ハイスループット実験)や自動化を組み込み、後期段階での迅速誘導体化を“運用”として成立させる試みが増える。</li> </ul> <p>● 希少金属代替と“持続可能性の定量評価”の同時進行<br/>希少触媒代替は「貴金属→第一遷移金属(Ni/Fe/Co等)」へと加速しているが、この代替を単純に“グリーン化”と見なすのは不十分であり、反応条件・溶媒・分離・金属精製・廃棄物まで含んだ評価(LCA(ライフサイクル評価)や実務的EHS(環境・安全衛生))を組み込む設計が潮流化している。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 2000年代: Pdを中心とする貴金属触媒の産業利用が成熟。</li> <li>✓ 2010年代: Niなど第一遷移金属でのクロスカップリングが急伸し、代替が研究テーマとして顕在化。</li> <li>✓ 2020年代: 代替触媒の環境優位性を工程全体で再検証する議論(“Niだからグリーン”の再考)が強まり、サステナブル化学の基準化が進む。</li> </ul> <p>● 電気化学合成の再興と電力起点プロセス<br/>電気化学有機合成は2000年以降の方法論の進展を背景に、再エネ電力と組み合わせた酸化還元操作、試薬レス化、対反応(paired electrosynthesis(対反応電解))等を軸に「持続可能な酸化還元の実装技術」として復権している。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 2000年代: 合成電解の方法論が積み上がり、再評価の土台が形成。</li> <li>✓ 2010年代: 総説・装置・反応例が体系化し、“持続可能な酸化還元”として注目が加速。</li> <li>✓ 2020年代: 再エネ電力との組合せや環境負荷低減の観点が明確化し、産業実装を見据えた議論が増える。</li> </ul> <p>● バイオ触媒の“成熟産業技術”化(酵素工学×プロセス)<br/>バイオ触媒は、酵素工学・探索・データ基盤の成熟により、グラム～キログラムスケールでの実装を含む産業技術として確立度が上がった。特に、非天然反応や高難度立体選択の獲得が“酵素設計×プロセス工学”のテーマとして強まっている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 2000年代: 酵素の選択性を活かした合成が拡大する一方、適用範囲は個別最適に依存。</li> <li>✓ 2010年代: 進化工学が産業的インパクトとして顕在化し、基盤技術として評価(2018年ノーベル賞)。</li> <li>✓ 2020年代: ルート設計・探索・酵素工学・データ基盤が整備され、グラム～キログラム実装を含む“標準選択肢”として定着。</li> </ul> |

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-126 タイムライン「触媒反応による有機合成の進展」

| 年         | 主な進展やイベント   |
|-----------|---|
| 2000      | 非対称有機触媒(有機分子触媒)が確立し、以後急速に普及(2021年ノーベル化学賞の対象)。                             |
| 2008      | 可視光フォトレドックスの“再興(ルネサンス)”が加速し、以後の方法論拡大の起点に。                                 |
| 2011      | MGI(マテリアルズ・ゲノム・イニシアティブ)がデータ駆動・HTE(ハイスループット実験)・計算の統合を政策的に推進する潮流の象徴に。       |
| 2013      | フォトレドックス触媒の反応設計と応用がレビューとして整備され、導入障壁が低下。                                   |
| 2016      | FAIR(Findable/Accessible/Interoperable/Reusable)原則が提案され、反応・触媒データ基盤の議論が加速。 |
| 2017      | メタラフォトレドックス(光×遷移金属)の総説が提示され、協奏触媒が“主流手法”として定着。                             |
| 2017      | 2000年以降の合成電気化学の進展がレビューされ、“再興領域”として体系化。                                    |
| 2017      | DOEが触媒科学の基礎研究課題(データ科学×理論×実験の結合等)を優先研究方向として整理。                             |
| 2018      | Frances H. Arnoldらの酵素指向進化がノーベル化学賞となり、バイオ触媒の産業的意義が再確認。                     |
| 2018      | 反応条件推薦(触媒・溶媒・試薬・温度)を階層 NN(ニューラルネット)で行う研究が提示され、条件探索のML化が進展。                |
| 2019      | ORD(オープン反応データベース)が立ち上がり、反応データ共有の実装が進む。                                    |
| 2021      | バイオ触媒の方法論・産業実装(探索・酵素工学・ルート設計)をまとめた総説が整備。                                  |
| 2021      | 閉ループ型 HTE(ハイスループット実験)／実験自動化と ML の融合が、反応探索の研究運用として拡大。                      |
| 2022      | 一般反応条件の閉ループ最適化(ロボ実験+不確実性最小化学習)が提示され、SDL(自律実験)の方法論が前進。                     |
| 2023      | フロー合成の実務ガイドが整備され、装置設計と有機合成の“工学的接続”が一般化。                                   |
| 2023      | FDAが Q13(連続生産)ガイダンスを公表し、連続製造の規制枠組みが明確化。                                   |
| 2024      | SDL(自律実験・自動運転ラボ)の化学・材料分野での総説が提示され、“自動化研究”が主流テーマ化。                         |
| 2024-2025 | 有機光触媒(Ir 代替等)のデータ駆動設計(バイズ最適化等)や生成モデルによる触媒設計が具体例として増加。                     |

### (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-127 キーテクノロジー「触媒反応による有機合成の進展」

| 名称                 | 出現時期・背景  | 解説  |
|--------------------|--|---|
| 可視光フォトレドックス        | 出現時期: 2008-2010 年に Ru/Ir 錯体を用いる現代的手法が確立、2010 年代に急速普及。<br>背景: 可視光 LED の普及と長寿命励起状態をもつ金属錯体により、一電子移動で温和にラジカル生成・新反応設計が可能に。                                | 説明: 可視光で触媒を励起し SET(単電子移動)でラジカル等を生成し反応を駆動。<br>課題: 光吸収・励起寿命・失活、スケールでの光輸送、選択性制御。<br>課題解決の推定時間: 装置標準化と反応一般化は進行中(3-7 年)。<br>キーになる研究テーマ: 光源・反応器設計、量子収率の向上、フロー光反応、金属代替光触媒。     |
| メタラフォトレドックス        | 出現時期: 2014-2016 年に Ni/光触媒の協奏が確立、2016 年以降に sp <sup>3</sup> カップリング等へ拡張。<br>背景: 光生成ラジカルと第一遷移金属の一電子経路を融合し、従来困難な C(sp <sup>3</sup> )-C 結合形成・脱炭酸カップリングを実現。 | 説明: 光触媒と遷移金属触媒の協奏で新規結合を形成。<br>課題: 触媒サイクル間の整合、金属残渣、スケール・再現性、配位子/溶媒依存。<br>課題解決の推定時間: 高付加価値領域で実装が拡大(3-5 年)。<br>キーになる研究テーマ: Ni 等の反応機構解明、連続フロー化、PAT 連携。                      |
| 有機光触媒(Ir 代替を含む)    | 出現時期: 2012 年のアクリジニウム系を嚆矢に、2016-2022 年にドナー-アクセプター型シアノアレン等が台頭。<br>背景: 貴金属(Ir/Ru)削減と赤色移動・還元/酸化力の微調整を両立し、持続可能性・コストと機能性を両立。                               | 説明: 有機色素系触媒でフォトレドックスを実現し、希少金属への依存を低減。<br>課題: 光安定性、酸化還元窓、汎用性、合成容易性、精製・不純物の影響。<br>課題解決の推定時間: 主要反応クラスでの“実用触媒セット”の整備は短期~中期(3-7 年)。<br>キーになる研究テーマ: バイズ最適化、分子設計指標、実験データの体系収集。 |
| LSF(後期段階 C-H 官能基化) | 出現時期: 2010 年代前半から薬化で急伸、2020 年代に複雑分子・医薬候補で一般化。<br>背景: 複雑分子末端で迅速に SAR 評価する需要、金属触媒/ラジカル/HAT・一時的指向性基の発展が推進。  | 説明: 最終段階で C-H 結合を直接変換し誘導体展開を高速化。<br>課題: 位置選択の汎用化、官能基許容性、反応再現性、スケール時の副反応。<br>課題解決の推定時間: 医薬探索での標準化は進むが、製造適用の一般化は中期(5-10 年)。<br>キーになる研究テーマ: 指向基不要化、触媒寿命、HTE 連携による条件探索。     |
| 遠隔位 C-H 位置選択制御     | 出現時期: 2015 年頃から HAT・テンプレート・一時的指向性基による遠隔選択が進展、2020 年代に高選択手法が確立。<br>背景: 1,n-HAT や遷移状態設計、光/電気化学の協奏で特定遠隔 C-H を選択的に官能基化。                                  | 説明: テンプレート/指向基/触媒設計で meta/para 等の遠隔位を制御。<br>課題: テンプレート設計の一般則、基質依存性、工程簡略化。<br>課題解決の推定時間: 適用基質の広域化に中期(5-10 年)。<br>キーになる研究テーマ: 触媒-基質相互作用設計、データ駆動テンプレート探索。                  |
| 第一遷移金属触媒クロスカップリング  | 出現時期: 2000 年代に Ni/Fe 系が確立、2010 年代に機構理解と基質範囲が拡大(光/電気化学との協奏で加速)。<br>背景: Pd 代替としての資源・コスト面の利点、単電子経路の活用により C(sp <sup>3</sup> )-C 結合や官能基許容性を向上。            | 説明: Ni/Fe/Co 等で C-C/C-X 結合形成を実現し貴金属依存を低減。<br>課題: 反応一貫性、金属の反応性制御、スケール時の不純物、持続可能性の実証。<br>課題解決の推定時間: 特定反応で実装が拡大(3-7 年)。<br>キーになる研究テーマ: 触媒前駆体設計、LCA、金属回収・精製。                |

| 名称                | 出現時期・背景  | 解説   |
|-------------------|--|--|
| 合成電気化学(有機電解)      | 出現時期: 古典は 20 世紀中葉から、実用志向の「再興」は 2010 年代以降。2020 年代に電極・装置・手順の標準化が前進。<br>背景: 酸化剤/還元剤使用の削減によるグリーン化、独自ラジカル経路、ペアード/フロー電解の成熟。                | 説明: 電子を試薬として酸化還元を実施し、試薬レス化・再エネ親和性。<br>課題: 電極材料、電解セル設計、選択性・スケール、電力-反応の統合。<br>課題解決の推定時間: 装置標準化・フロー電解の普及に中期(5-10 年)。<br>キーになる研究テーマ: 対反応電解、フロー電解、電極界面設計。   |
| HTE(ハイスループット実験)   | 出現時期: 2000 年代に萌芽、2010 年代後半に自動化/マイクロプレートで汎用化。2020 年代は ML 統合が進行。<br>背景: 反応空間の迅速探索・スケールダウンにより、最適条件探索・新反応発見の効率を大幅に向上。                    | 説明: 並列・微量実験で条件最適化と触媒探索を加速。<br>課題: 分析ボトルネック、データ標準、スケール外挿。<br>課題解決の推定時間: 製薬中心に普及継続。他分野拡大に短期~中期(3-7 年)。<br>キーになる研究テーマ: 自動分析、実験計画(DoE(実験計画法))、データ同化。   |
| 反応条件推薦 ML         | 出現時期: 2018-2021 年に公開反応データ<br>×GNN/Transformer 等で条件予測が登場、2023-2024 年に汎用性・精度が向上。<br>背景: 条件最適化コスト削減ニーズ、HTE/ORD によるデータ基盤、バイズ最適化・深層学習の成熟。 | 説明: 触媒・溶媒・試薬・温度を学習し、候補条件を推薦。<br>課題: データ偏り、負例不足、再現性、機構知識の取り込み。<br>課題解決の推定時間: 研究支援ツールとして定着、製造適用は中期(5-10 年)。<br>キーになる研究テーマ: データ品質管理、化学表現学習、実験閉ループ統合。<br><a href="https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acscentsci.8b00357">https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acscentsci.8b00357</a> |
| ORD(オープン反応データベース) | 出現時期: 2021 年に $\beta$ 公開・論文化、以後スキーマ整備とコミュニティが拡大。<br>背景: 機械可読な反応データ標準で再現性と共有を促進、HTE/ML/SDL と相互補完。                                     | 説明: 反応データを構造化し共有するオープン基盤。<br>課題: データ量・多様性、メタデータ完全性、企業データ連携。<br>課題解決の推定時間: 共同研究・出版要件と連動し拡大に短期~中期(3-7 年)。<br>キーになる研究テーマ: スキーマ拡張、ETL(抽出・変換・ロード)、標準化。  |
| SDL(自律実験・自動運転ラボ)  | 出現時期: 2019-2021 年に材料・合成で閉ループ自動化を実証、2023-2024 年に遠隔・分散 SDL が進展。<br>背景: ロボティクス、HTE、ML(バイズ最適化/強化学習)の統合で、探索・最適化を自律化し研究周期を短縮。              | 説明: ロボ実験 + 分析 + ML で探索を自律化。<br>課題: 装置統合コスト、プロトコル標準化、停止条件、データガバナンス。<br>課題解決の推定時間: 限定ドメインでの実装拡大に短期~中期(3-7 年)、汎用化は中長期(7-15 年)。<br>キーになる研究テーマ: 閉ループ設計、実験オントロジー、FAIR データ運用。   |
| フロー合成/CM(連続生産)    | 出現時期: 2010 年代に実生産適用が拡大、2023 年 ICH Q13 採択で規制整備が本格化。<br>背景: 安全性・品質均質・スケール自由度の利点、PAT/制御高度化、規制ガイダンス整備が産業実装を後押し。                          | 説明: 連続流で反応・精製を統合し、熱/物質移動と安全性を改善。<br>課題: 詰まり・固体ハンドリング、制御戦略、PAT、装置投資。<br>課題解決の推定時間: 医薬中心での採用拡大に短期~中期(3-7 年)。<br>キーになる研究テーマ: 反応-結晶化連結、モデル予測制御、規制対応。   |

| 名称          | 出現時期・背景   | 解説  |
|-------------|---|---|
| バイオ触媒(酵素工学) | 出現時期: 2000年代に酵素工学・指向性進化が産業応用で本格化、2018年ノーベル化学賞で転機として広く認知。<br>背景: 高選択性・温和条件・グリーン化の要請、指向性進化・計算設計により基質多様性と性能が飛躍。                    | 説明: 酵素探索・工学により高選択合成を実現。<br>課題: 溶媒・温度耐性、基質範囲、供給(発現・精製)、反応工学。<br>課題解決の推定時間: 適用範囲の拡張に中期(5-10年)。<br>キーになる研究テーマ: 計算設計、酵素-フロー統合、カスケード反応。          |
| サステナブル触媒評価  | 出現時期: 2010年代にグリーン指標(E-factor/PMI等)が定着、2020年代にLCA・資源リスク・エネルギー/装置要素を含む多基準評価へ拡張。<br>背景: ESG/規制対応のための定量評価の必要性、産学での指標標準化とデータ基盤整備の進展。 | 説明: 定義・基準(サステナブル化学)と定量評価(LCA等)を触媒設計へ統合。<br>課題: 指標選定、データ不足、比較可能性、規制との整合。<br>課題解決の推定時間: 業界標準化は中期(5-10年)。<br>キーになる研究テーマ: 指標の実装、データ駆動でのプロセス最適化。 |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-128 実用化可能性「触媒反応による有機合成の進展」

| 名称              | 解説   |
|-----------------|--|
| 医薬(探索)          | ユースケース: LSF(後期段階 C-H 官能基化)やフォトドックスで迅速な誘導体展開、バイオ触媒で高立体選択合成。<br>課題: 基質汎用性、再現性、分析・データ整備。<br>展望: HTE(ハイスループット実験)+条件推薦 ML+閉ループ最適化で探索時間を短縮。              |
| 医薬(製造)          | ユースケース: フロー合成/CM(連続生産)で安全性・品質一貫性を高め、PAT(プロセス分析技術)でリアルタイム管理。<br>課題: 固体処理、制御戦略、初期投資、規制対応。<br>展望: Q13(連続生産)ガイダンスにより開発・運転・ライフサイクル管理の枠組みが明確化し、採用が進みやすい。 |
| ファインケミカル        | ユースケース: 希少金属代替(Ni/Fe/Co等)でコストと供給リスクを緩和、電気化学合成で酸化還元工程を簡略化。<br>課題: 副反応・金属不純物、工程全体のEHS、電解装置最適化。<br>展望: 代替触媒のLCA評価や、電極/触媒材料設計(界面制御)が企業の競争力の源泉となりうる。    |
| 電子材料・有機エレクトロニクス | ユースケース: $\pi$ 共役分子・高分子の精密合成・配向制御、機能性分子の探索をデータ駆動で高速化。<br>課題: 分子設計-物性-プロセス条件の相互依存が強い、データ不足。<br>展望: プロセス・インフォマティクスとHTEがデータ生成を補い、設計指針の更新サイクルを短縮。       |
| ポリマー合成・循環材料     | ユースケース: 開環重合触媒等による循環型高分子、ケミカルリサイクルに資する触媒設計。<br>課題: 高分子特有の反応-物性結合、分解・再重合の収率と選択性、スケールとコスト。<br>展望: 分子技術の枠組みで“設計-合成-分解”を統合し、実験×計算×データの融合で最適化。          |
| エネルギー・電力起点化学    | ユースケース: 電気化学合成・電極界面での選択的変換、CO <sub>2</sub> 等の資源化反応。<br>課題: 触媒活性点の同定、耐久性、電極/反応器設計、系統電力との統合。<br>展望: 触媒の動的変化(operando(その場))計測とデータ科学の結合が鍵。             |

| 名称               | 解説  |
|------------------|---|
| 化学品サプライチェーン・規制対応 | ユースケース:連続生産でレジリエンス強化、品質一貫性、迅速なスケール移行。<br>課題:設備投資、標準化、データ整備、社内スキルギャップ。<br>展望:規制(Q13等)とデータ原則(FAIR)を前提に、装置・データ・人材の同時整備が必要。 |

## (5) インタビュー結果を踏まえた今後の潮流および研究の方向性

中核研究者へのインタビュー結果に基づき、今後5年から10年の潮流および研究の方向性を整理した。

表 2-129 今後の潮流および研究の方向性「触媒反応による有機合成の進展」

| 項目  | 概要   |
|---|--|
| 新たに浮上している、または今後5年から10年の間に浮上すると考えられる技術トレンド、技術的ブレークスルーの可能性、技術面の障壁、規制・倫理も含む非技術面の障壁 | <p>■ラジカル中間体の制御技術の継続的な進展<br/>ラジカル中間体の制御技術はまだ調べつくされていない印象であり、これ以降5~10年も継続的に伸長が見込まれる。</p> <p>■計算科学を活用した新しい反応経路の探索<br/>化学計算の精度が2010年以降、飛躍的に上がっている。あり合わせの反応手法の組合せのため大回りとなっていた合成反応経路をショートカットした経路、触媒反応を探索できるとよい。</p>  |
| 他分野研究連携の必要性   | 異分野連携は重要であるが、隣接領域2~3を束ねるのが適切と考える。例えば有機化学と計算化学は古くから協調があり、有機化学とケミカルバイオロジーも隣接している。これに計測分野を加える等が考えられる。遠すぎる組合せ(例:有機化学×半導体プロセス)は言語が不一致で非効率である。   |
| わが国のアセット(人材・インフラ等)と国外プレイヤー・チームとの比較  | 量子化学計算は日本が伝統的に強く、現時点では中国に全面的に飲み込まれていない領域である。   |
| 今後5年から10年の間において潮流となり得る研究の方向性  | <p>■化学プロセス全体の改善<br/>例えばフォトレドックスは大量の有機溶媒と光が必要であり、エネルギー効率が悪く、経済合理性の観点から実用化しにくい。反応開発の先の、経済合理性のあるプロセス改善が方向性として考えられる。</p> <p>■有機合成技術の医薬品用途以外の出口の探索<br/>有機合成技術は「ツール過剰・出口不足」であり、例えば、後期段階C-H活性化は医薬品用途で価値が高いが、小分子薬のニーズが減少傾向である。ポリマー改質やバイオコンジュゲーションなどターゲット拡大が必要かもしれない。</p> <p>■ケミカルバイオロジー分野への適用<br/>ケミカルバイオロジーの分野で有機化学が寄与できる部分が多くあると考える。</p> |
| 今後の当該分野において優先すべき研究課題・支援形態   | <p>例えばC-H活性化による精密なポリマー改質や、バイオコンジュゲーションによるタンパク質や細胞の改質など、有機合成技術のターゲット拡大に係るものが考えられる。</p> <p>例えば、細胞内で触媒反応を起こして不要な物質を除去するような、高度なケミカルバイオロジーの研究が期待される。</p> <p>JST「先駆け」「CREST」等の共同研究を促進する仕組みは、研究者の育成の面でも非常によい。</p>   |

## (6) 出所

- JST 研究開発戦略センター(CRDS). 研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野(2024年). <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2024-FR-04.html>
- JST 研究開発戦略センター(CRDS). 研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野(2024年)

/ 2.5.1 分子技術. [https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-04/CRDS-FY2024-FR-04\\_20501.pdf](https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-04/CRDS-FY2024-FR-04_20501.pdf)

- Celena M. Josephitis. et al. Late-Stage C–H Functionalization of Azines. *Chem. Rev.* 2023, 123, 12, 7655–7691.  
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.2c00881>
- Yan, M., et al. Synthetic Organic Electrochemical Methods Since 2000: On the Verge of a Renaissance. *Chem. Rev.* 2017, 117, 21, 13230–13319.  
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.7b00397>
- Bell, E.L., Finnigan, W., France, S.P. et al. Biocatalysis. *Nat Rev Methods Primers* 1, 46 (2021). <https://doi.org/10.1038/s43586-021-00044-z>
- JST 研究開発戦略センター(CRDS). 研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野(2024年) / 2.5.3 データ駆動型物質・材料開発. [https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-04/CRDS-FY2024-FR-04\\_20503.pdf](https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-04/CRDS-FY2024-FR-04_20503.pdf)
- Capaldo, L. et al. A field guide to flow chemistry for synthetic organic chemists. *Chem. Sci.*, 2023,14, 4230-4247.  
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2023/sc/d3sc00992k>
- Jagan M. R. Narayanama., Corey R. J. Stephenson. Visible light photoredox catalysis: applications in organic synthesis. *Chem. Soc. Rev.*, 2011,40, 102-113.  
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2011/cs/b913880n>
- Twilton, J., Le, C., Zhang, P. et al. The merger of transition metal and photocatalysis. *Nat Rev Chem* 1, 0052 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41570-017-0052>
- S. A. Biyani, Y. W. Moriuchi, D. H. Thompson, Advancement in Organic Synthesis Through High Throughput Experimentation. *Chemistry – Methods* 2021, 1, 323.  
<https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cmt.202100023>
- Gao, H. et al. Using Machine Learning To Predict Suitable Conditions for Organic Reactions. *ACS Cent. Sci.* 2018, 4, 11, 1465–1476.  
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acscentsci.8b00357>
- Tom, G. et al. Self-Driving Laboratories for Chemistry and Materials Science. *Chem. Rev.* 2024, 124, 16, 9633–9732.  
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.4c00055>
- Cannon, A. et al. An actionable definition and criteria for “sustainable chemistry” based on literature review and a global multisectoral stakeholder working group. *RSC Sustainability*, 2023, 1, 2092-2106.  
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2023/su/d3su00217a>
- Rodolfo I. Teixeira. et al. Scale-Up of Continuous Metallaphotoredox Catalyzed C–O Coupling to a 10 kg-Scale Using Small Footprint Photochemical Taylor Vortex Flow Reactors. *Org. Process Res. Dev.* 2025, 29, 1, 34–47.  
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.oprd.4c00262>
- Clapson, M. et al. Base metal chemistry and catalysis. *Cell Reports Physical Science* 4, 101548, September 20, 2023. <https://www.cell.com/cell-reports-physical-science/fulltext/S2666-3864%2823%2900345-4>
- Steven M. Kearnes. et al. The Open Reaction Database. *J. Am. Chem. Soc.* 2021, 143, 45, 18820–18826. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jacs.1c09820>
- Megan H. Shaw. et al. Photoredox Catalysis in Organic Chemistry. *J. Org. Chem.* 2016, 81, 16, 6898–6926. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.joc.6b01449>
- Li, X., Che, Y., Chen, L. et al. Sequential closed-loop Bayesian optimization as a guide for organic molecular metallophotocatalyst formulation discovery. *Nat. Chem.* 16, 1286–1294 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41557-024-01546-5>
- Ali, W. et al. Recent development in transition metal-catalysed C–H olefination. *Chem. Sci.*, 2021, 12, 2735-2759.  
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/sc/d0sc05555g>
- Zhao B, Prabagar B, Shi Z. Modern strategies for C–H functionalization of heteroarenes with alternative coupling partners. *Chem*, 2021; 7, 2585-2634.  
<https://www.cell.com/chem/fulltext/S2451-9294%2821%2900374-0>
- Guillemard, L. et al. Late-stage meta-C–H alkylation of pharmaceuticals to modulate biological properties and expedite molecular optimisation in a single step. *Nat Commun* 15, 3349 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024->

46697-8

- Cruz-Navarro, J.A. et al. Advances in Cross-Coupling Reactions Catalyzed by Aromatic Pincer Complexes Based on Earth-Abundant 3d Metals (Mn, Fe, Co, Ni, Cu). *Catalysts* 2024, 14, 69. <https://doi.org/10.3390/catal14010069>
- Michael U. Luescher. et al. The impact of earth-abundant metals as a replacement for Pd in cross coupling reactions. *Chem. Sci.*, 2024, 15, 9016-9025. <https://doi.org/10.1039/D4SC00482E>
- Wiebe, A. et al. *Chem. Int. Ed.* 2018, 57, 5594. <https://doi.org/10.1002/anie.201711060>
- Homma, H. et al. Convergent Paired Electrosynthesis of  $\beta$ -Nitroalcohols Combining Anodic Generation of Benzaldehydes and Cathodic Formation of Nitromethyl Anion via an Electrogenerated Base. *Electrochemistry*, 2023, Volume 91, Issue 11, 112008. <https://doi.org/10.5796/electrochemistry.23-67083>
- Hanefeld, U. et al. Biocatalysis making waves in organic chemistry. *Chem. Soc. Rev.*, 2022, 51, 594-627. <https://doi.org/10.1039/D1CS00100K>
- The Nobel Prize organisation. Nobel Prize in Chemistry 2018. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2018/summary/>
- The Nobel Prize organisation. Nobel Prize in Chemistry 2021. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2021/summary/>
- Corey R. J. Stephenson. et al. Visible Light Photocatalysis in Organic Chemistry. Wiley-VCH. [https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9783527674176\\_A35222132/preview-9783527674176\\_A35222132.pdf](https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9783527674176_A35222132/preview-9783527674176_A35222132.pdf)
- Christopher K. Prier. et al. Visible Light Photoredox Catalysis with Transition Metal Complexes: Applications in Organic Synthesis. *Chem. Rev.* 2013, 113, 7, 5322-5363. <https://doi.org/10.1021/cr300503r>
- Wilkinson, M. et al. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Sci Data* 3, 160018 (2016). <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>
- DOE. Basic Research Needs for Catalysis Science. [https://science.osti.gov/-/media/bes/pdf/brochures/2017/Catalysis\\_Science\\_brochure.pdf](https://science.osti.gov/-/media/bes/pdf/brochures/2017/Catalysis_Science_brochure.pdf)
- Open Reaction Database Project Authors. Open Reaction Database. <https://docs.open-reaction-database.org/>
- Natalie S. Eyke. et al. Toward Machine Learning-Enhanced High-Throughput Experimentation, *Trends in Chemistry*, Volume 3, Issue 2, 2021, 120-132. <https://doi.org/10.1016/j.trechm.2020.12.001>
- Nicholas H. Angello. et al. Closed-loop optimization of general reaction conditions for heteroaryl Suzuki-Miyaura coupling. *Science* 378, 399-405 (2022). <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adc8743>
- U.S. Department of Health and Human Services Food and Drug Administration. Q13 Continuous Manufacturing of Drug Substances and Drug Products Guidance for Industry. <https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/q13-continuous-manufacturing-drug-substances-and-drug-products>
- 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 第12期ナノテクノロジー・材料科学技術委員会. 第12期ナノテクノロジー・材料科学技術委員会(第8回)/ナノテクノロジー・材料科学技術分野の推進方策について(案). [https://www.mext.go.jp/content/20241001-mxt\\_nanozai-000038004\\_1.pdf](https://www.mext.go.jp/content/20241001-mxt_nanozai-000038004_1.pdf)
- World Health Organization. WHO Points to consider in continuous manufacturing of pharmaceutical products (DRAFT WORKING DOCUMENT FOR COMMENTS). [https://cdn.who.int/media/docs/default-source/medicines/norms-and-standards/current-projects/qas24.957\\_continuous\\_manufacturing.pdf?sfvrsn=babd612a\\_1](https://cdn.who.int/media/docs/default-source/medicines/norms-and-standards/current-projects/qas24.957_continuous_manufacturing.pdf?sfvrsn=babd612a_1)
- Wu, S. et al. Biocatalysis: Enzymatic Synthesis for Industrial Applications. *Chem. Int. Ed.* 2021, 60, 88. <https://doi.org/10.1002/anie.202006648>
- Buller, R. et al. From nature to industry: Harnessing enzymes for biocatalysis. *Science* 382, eadh8615 (2023).

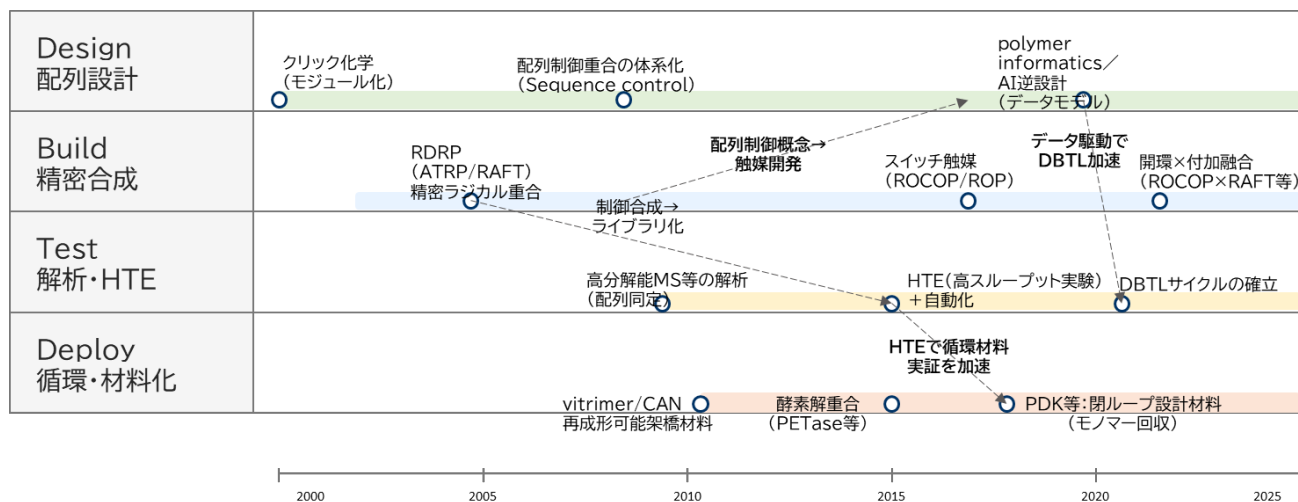
<https://www.science.org/doi/10.1126/science.adh8615>

- <https://open-reaction-database.org/>
- Meta/Carnegie Mellon University. Open Catalyst Project.  
<https://opencatalystproject.org/>

## 2.5.2 潮流 D2: 分子技術「高分子配列の制御技術の進展」

### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



※バーは「顕著に発展・活用が進んだ時期」の目安である。

出所) 点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き: 影響が及ぶ方向(起点から波及先)を示す。  
 矢印上のラベル: 影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-26 技術的進歩と方向性の概要図「高分子配列の制御技術の進展」

表 2-130 技術的進歩と方向性(概要)「高分子配列の制御技術の進展」

| 概要 |   |
|----|---|
| ●  | 2000 年代前半:RDRP(reversible deactivation radical polymerization:可逆失活型ラジカル重合)の普及。<br>ATRP(atom transfer radical polymerization:原子移動ラジカル重合)、RAFT(reversible addition-fragmentation chain transfer:可逆付加-開裂連鎖移動)等により、鎖末端を“再活性化可能”に保持し、分子量分布(dispersity)の狭いブロック/グラフト等の一次構造(配列)設計が現実的になった。加えて、後工程の官能基導入(post-polymerization modification)と組み合わせた機能発現が加速し、「配列=反応設計で作る」という枠組みが固まった。 |
| ●  | 2000 年代後半~2010 年代前半:配列制御の体系化。<br>「配列制御重合」が体系化された。また、「異種モノマー単位が秩序立って配置された高分子」(例えば、交互共重合体(Alternating Copolymer)や、規則的共重合体(Periodic Copolymer))が提示された。以後、合成(逐次付加・テンプレート効果等)、解析(高分解能 MS(mass spectrometry:質量分析)等)、機能(自己組織化、情報担体、触媒足場)をつなぐ研究が進展した。   |
| ●  | 2010 年代:開環重合触媒と“スイッチ”触媒によるブロック配列の拡張。<br>ROCOP(ring-opening copolymerization:開環共重合)や ROP(ring-opening polymerization:開環重合)を同一触媒で切替える設計が進み、混合モノマーから多段ブロックを一工程で作る実証が進展(2018-2022 年に多ブロック化の報告が増加)。さらに、開環重合と付加重合(例:ラジカル重合)を組み合わせる“ハイブリッド共重合”や、CO <sub>2</sub> 利用系でのブロック/勾配配列制御が潮流化した。  |
| ●  | 2016 年以降:循環経済の要請と共に“分解できる一次構造”を牽引。<br>PET 分解酵素の発見(2016 年)や、モノマー回収を前提に結合を設計した高分子(例:PDK。ポリジケトエナミン(Polydiketoenamine))の提案(2019 年)を契機に、解重合(depolymerization)・アップサイクルを“材料設計の要件”として組み込む研究が増えた。  |
| ●  | 2020 年代:精密設計の“デジタル化”と医療材料への接続。<br>高分子の構造表現・データ基盤整備(例:ポリマーのデータモデル)、高分子インフォマティクス(polymer informatics)や AI による逆設計が進む。米国エネルギー省(DOE)等はプラスチック循環を研究戦略として可視化し、設計-合成-評価の高速ループ(DBTL(design-build-test-learn:設計-構築-試験-学習))化を促している。並行して、クリック/クリップ化学を含む選択的結合・切断反応の体系化(2021 年前後)や、動的共有結合を用いた注成型・自己修復ハイドロゲル設計が深化し、DDS(drug delivery system:ドラッグデリバリー)や 3D バイオプリンティング用バイオインク等に展開している。     |

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-131 タイムライン「高分子配列の制御技術の進展」

| 年           | 主な進展やイベント   |
|-------------|---|
| 2000        | クリック化学の概念が提唱され、後の材料・高分子のモジュール化に波及。                              |
| 2002        | CuAAC(銅触媒アジド-アルキン環化付加)が独立に開発され、クリック化学の代表反応として確立。                |
| 2008        | RDRP(可逆失活型ラジカル重合)関連用語が整理される。                                    |
| 2009        | 配列制御が体系化される。  |
| 2010        | JST-CRDS が戦略プロポーザル「分子技術」を公表し、横断的基盤技術として研究投資の枠組みを提案。             |
| 2011        | Vitriimer(動的共有結合ネットワーク)を含む“再成形可能な架橋材料”が整理され、熱硬化性材料の循環化が強く意識される。 |
| 2014 - 2018 | JST-SICORP(日仏共同研究「分子技術」)が実施されたことが俯瞰報告書に整理される。                   |

| 年    | 主な進展やイベント   |
|------|---|
| 2016 | 酵素解重合が研究フロンティア化。PET 分解菌・酵素(PETase 等)が報告される。                                     |
| 2017 | rROP(ラジカル開環重合)のスコープ・限界が Chem. Rev.で提示され、“分解できるビニル系”の設計論が統合される。                  |
| 2018 | RDRP に基づく配列制御(sequence-controlled polymers via RDRP)の方法論が整理・体系化される。             |
| 2019 | スイッチ触媒でブロックポリマーを混合モノマーから作る実証(Nat. Commun.)が広く参照される。                             |
| 2019 | PDK(Polydiketoenamine)により、添加剤を含む系でもモノマー回収を目指す“閉ループ設計”が提示される。                    |
| 2020 | CRDS 戦略プロポーザル「環境調和型プラスチック戦略」が、安全管理と循環を結ぶ研究戦略を提示。                                |
| 2020 | DOE が Plastics Innovation Challenge(PIC)のロードマップを提示(国内処理、材料設計、エネルギー効率等)。         |
| 2021 | Clip chemistry が体系化され、結合“形成だけでなく、切断”を含む材料機能設計が明確化。                              |
| 2022 | 日本のプラスチック資源循環法が施行。  |
| 2022 | クリック化学とバイオオーソゴナル化学がノーベル化学賞(2022)を背景として整理され、材料・医療への波及が再注目される。                    |
| 2023 | EU の化学リサイクルに関する調査報告(公的プラットフォーム掲載)などで、化学リサイクルの位置づけ・限界・制度論が整理される。                 |
| 2024 | JST-CRDS 俯瞰報告書(ナノテク・材料)で、「配列制御」「開環重合触媒」「開環×付加の融合」「クリップ化学」「ハイドロゲル」が注目動向として提示される。 |
| 2024 | Depolymerization(解重合)を循環型プラスチックシステムの中で整理する論文が増え、技術課題が“全体系”で議論される。               |
| 2025 | precision polymers(精密高分子)のレビューにて、スケール・化学多様性・解析の課題が明確化。また、配列定義された高分子の“量産性”が焦点化。  |

### (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-132 キーテクノロジー「高分子配列の制御技術の進展」

| 名称   | 出現時期・背景   | 解説   |
|--|---|--|
| RDRP (Reversible-Deactivation Radical Polymerization:可逆的失活ラジカル重合、精密ラジカル重合) | 出現時期: 1990 年代 (NMP:1993、ATRP:1995、RAFT:1998)。IUPAC が 2009-2010 年頃に RDRP 用語を整備。<br>背景: ラジカル重合に可逆失活機構を導入し、分子量・分散・構造の精密制御を容易化。 | 定義:ラジカル成長種を可逆的に失活させ、活性/不活性平衡で鎖末端を保持し精密合成する重合。<br>課題:モノマー多様性下での再現性、スケール、残渣管理。<br>解決スパン(見立て):3-7 年(標準化・プロセス化)。<br>キー研究:酸素許容、低触媒量、オンライン計測・品質保証。 |
| ATRP (Atom Transfer Radical Polymerization:原子移動ラジカル重合)                     | 出現時期: 1995 年(独立に報告)。<br>背景: 遷移金属触媒によるハロゲン移動でラジカルを可逆的に制御し、ブロック・グラフトなど精密構造を合成。  | 定義:遷移金属錯体で活性/休眠を切替え、鎖末端を保持する制御重合。<br>課題:金属残渣・触媒回収、医療用途での規制適合。<br>解決スパン(見立て):2-5 年(用途別最適化)。<br>キー研究:ppm 触媒化、触媒固定化、フロー化。                       |

| 名称   | 出現時期・背景  | 解説   |
|--|--|--|
| RAFT(reversible addition-fragmentation chain transfer:可逆付加-開裂連鎖移動)   | 出現時期: 1998年(CSIROグループによる初報)。<br>背景: チオカルボニルチオ化合物を用いる連鎖移動でラジカル重合を精密制御、多様なモノマー・条件に適合。  | 定義:連鎖移動剤(CTA(chain transfer agent:連鎖移動剤))による可逆交換で制御するRDRP。<br>課題:端基残留、試薬コスト、安全(臭気・安定性等)。<br>解決スパン(見立て):3-7年。<br>キー研究:低毒性CTA、ワンポット精製、工業条件での再現性。                               |
| 配列定義高分子  | 出現時期: 2010年代に研究領域として確立(2015-2016に総説がエポック)。<br>背景: 生体高分子の機能・情報性を模倣し、合成高分子における厳密な一次構造(配列)制御を実現するため。                            | 定義:モノマー単位配列を高精度で規定した高分子(precision polymers)。<br>課題:合成スループット、解析標準化、量産コスト。<br>解決スパン(見立て):5-15年。<br>キー研究:自動合成、ライブラリ化、MS/NMR/クロマト標準。   |
| テンプレート効果を用いる配列制御(ビニル系)   | 出現時期: 2010年前後(メタルテンプレート等を用いた逐次導入が報告)。<br>背景: モノマーの配置順序をテンプレート相互作用で制御し、ビニル系で配列規則性を高める試み。                                      | 定義:テンプレートや選択的付加を利用して、ビニル系でも配列制御に迫る概念。<br>課題:汎用性(モノマー範囲)、エラー率、長鎖化。解決スパン(見立て):10年以上。<br>キー研究:自己補正機構、反応選択性の高次設計、反応場(溶媒・界面)設計。   |
| スイッチ可能重合(switch catalysis)   | 出現時期: 2016-2019年に概念と実証が進展。<br>背景: 単一触媒/系内で条件変更により機構やモノマー選択性を切替え、ワンポットで配列・ブロック制御を達成。  | 定義:同一触媒がROCOP/ROP等のサイクルを選択的に切替え、ブロック配列を作る。<br>課題:選択性・副反応、プロセス制御、モノマー供給。<br>解決スパン(見立て):5-10年。<br>キー研究:機構解析、in situ計測、触媒寿命・回収。   |
| ROCOP(Ring-Opening Copolymerization:開環共重合)(CO <sub>2</sub> /エポキシド等)  | 出現時期: 初報は1969年(CO <sub>2</sub> /エポキシド共重合);高活性触媒の開発で2000-2010年代に再興。<br>背景: CO <sub>2</sub> 資源化と機能性ポリカーボネート合成、サステナブルポリマー化学の牽引。 | 定義:CO <sub>2</sub> と環状モノマー(エポキシド等)を交互に組み込む開環共重合。<br>課題:活性/選択性、CO <sub>2</sub> 供給、物性・加工性の両立。<br>解決スパン(見立て):5-10年。<br>キー研究:二核触媒、第三モノマー導入、LCA(life cycle assessment:ライフサイクル評価)。 |
| 開環×付加重合の融合(ROCOP×RAFT等)  | 出現時期: 2016-2020年代に、機構切替や直列化によるワンポット合成が多数報告。<br>背景: 互いに直交/切替可能な機構を組合せ、ブロック順序・組成・分解性を一体設計するため。                                 | 定義:ROCOP/ROPとラジカル付加重合を組み合わせ、配列(ブロック/勾配)と機能を拡張。<br>課題:複数サイクルの整合、選択性、工程複雑化。<br>解決スパン(見立て):5-12年。<br>キー研究:触媒・開始剤の直交化、反応経路のモデル化、工程短縮。  |
| rROP(Radical Ring-Opening Polymerization:ラジカル開環重合)(CKA(環状ケテンアセタール)等) | 出現時期: 1970年代に概念が成立、2010年代にCKA等で再興。<br>背景: ビニル系鎖中にエステル結合等を導入して分解性を付与、環境調和型材料設計に資する。   | 定義:ラジカル重合に開環を組み込み、主鎖ヘエステル等を導入する。<br>課題:開環率制御、モノマー合成、物性低下回避。<br>解決スパン(見立て):5-12年。<br>キー研究:新規環状モノマー、共重合則、解重合評価・標準試験。   |

| 名称                                       | 出現時期・背景   | 解説  |
|--|---|---|
| クリップ化学(clip chemistry)                   | 出現時期: 用語は複義的(1)鋳型上で鎖を“クリップ”して環状/超分子構造を形成する剪断・環化概念、(2)バイオ正交“クリックで切断(click-to-release)”の俗称としても用例あり。<br>背景: 前者はテンプレート/超分子化学、後者はドラッグデリバリー等の切断型バイオ正交化学の文脈。 | 定義: 材料機能のために“選択的に切る”共有結合切断反応群の枠組み。<br>課題: トリガ直交性、速度、繰返し耐久。<br>解決スパン(見立て): 5-10年。<br>キー研究: 光・力学・触媒トリガ、切断選択性の設計。              |
| PDK (Polydiketoenamine) 等の解重合設計(閉ループ)材料  | 出現時期: 2019年にPDKの酸触媒解重合によるモノマー完全回収が報告。<br>背景: 高耐久と完全ケミカルリサイクルの両立により循環型プラスチックを実現する設計化学。   | 定義: モノマー回収を前提に結合平衡を設計する高分子。<br>課題: 原料コスト、性能、混合廃棄物対応。<br>解決スパン(見立て): 8-15年。<br>キー研究: 工程統合、選択分解、回収インフラ設計。                     |
| 酵素系 PET 解重合 (PETase 等)                   | 出現時期: 2016年にPETaseの同定報告、2020年に高性能化酵素が相次ぎ報告。<br>背景: 低温・選択的分解による省エネ・高純度モノマー回収、ケミカルリサイクルの有力手段として注目。  | 定義: 酵素でPETを加水分解しモノマー回収する。<br>課題: 高結晶PET、速度、酵素安定性、前処理。<br>解決スパン(見立て): 3-8年。<br>キー研究: 酵素工学、反応器設計、前処理最適化。                      |
| vitramer/CAN                             | 出現時期: 2011年に“Vitramer”が初報。<br>背景: 共有結合の可逆的/交換反応により熱可塑性な再成形・修復・リサイクル性を付与。  | 定義: 結合交換でネットワーク位相を変え、再成形可能な架橋材料。<br>課題: 高性能化と交換速度の両立、複合材リサイクル。<br>解決スパン(見立て): 5-12年。<br>キー研究: 交換反応設計、複合材分離、低温プロセス。          |
| polymer informatics / 構造データモデル (CRIPT 等) | 出現時期: 2020年代(2022-2023)にNIST等が標準データモデルを提案。<br>背景: 高分子の階層的・多様性を機械可読化して、データ駆動研究・AI活用を加速。  | 定義: データと機械学習で構造-物性を予測・探索し、設計を加速。<br>課題: 構造表現(分布・分岐・配列)、データ品質・共有。<br>解決スパン(見立て): 3-10年。<br>キー研究: 標準測定、メタデータ、ロボット合成連携。        |
| クリック/バイオオーソゴナル化学                         | 出現時期: クリック化学は2001年前後、バイオオーソゴナル化学は2000年代半ばに確立; 2022年ノーベル化学賞。<br>背景: 高選択・温和条件での結合形成/切断により、材料機能化・生体内標識・ドラッグデリバリーに広範適用。                                   | 定義: 高効率・直交性の結合反応と、生体内でも進む反応(bioorthogonal)。<br>課題: 金属毒性やin vivo応用、スケール。<br>解決スパン(見立て): 3-8年。<br>キー研究: 金属フリー反応、ゲル化制御、標準反応条件。 |
| 動的共有結合ハイドロゲル                             | 出現時期: 2000年代に基盤概念、2010年代に各種結合(イミン、ホウ酸エステル、DA等)で展開。<br>背景: 自己修復・応答・インジェクタブル性などソフトマテリアル特性の付与、バイオマテリアル応用。  | 定義: 可逆的に結合・解離する「動的共有結合」を架橋点に持つ含水高分子材料<br>課題: 設計指標の標準化、長期安定、滅菌。<br>解決スパン(見立て): 3-10年。<br>キー研究: 粘弾性設計則、in vivo分解、品質保証。        |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-133 実用化可能性「高分子配列の制御技術の進展」

| 名称                      | 解説  |
|-------------------------|---|
| 医療分野(再生医療・創傷治癒)         | ユースケース:注入型・自己修復ハイドロゲルによる創傷被覆、細胞足場、局所 DDS (drug delivery system:ドラッグデリバリー)、粘弾性を調整した細胞応答制御。<br>課題:滅菌や長期保存での物性変動、組成の再現性、in vivo 分解・代謝の安全性、医療規制対応。<br>展望:クリック反応を用いた in situ ゲル化、動的共有結合での応力緩和(stress relaxation:応力緩和)設計、標準的レオロジー指標の整備が鍵。 |
| ライフサイエンス・製薬(DDS・機能性担体)  | ユースケース:配列制御ポリマーで“結合部位・機能基密度・疎水/親水バランス”を明示的に設計し、薬物放出や標的化を高精度化。<br>課題:体内動態の予測(多因子)、合成ロット差、規制上の分析要件。<br>展望:配列定義高分子+polymer informatics で設計空間を体系化し、“学習ループ”を作る。  |
| 包装・消費財(循環型プラスチック)       | ユースケース:解重合前提ポリマーや酵素・触媒によるモノマー回収で“バージン同等”材料循環を目指す。<br>課題:混合・汚染・添加剤、回収インフラ、エネルギー収支、リサイクル材市場形成(経済性)。<br>展望:設計段階からの Design for Recycling(リサイクル適合設計)と、選択的解重合(polymer-specific depolymerization)の共進が必要。                                   |
| 化学産業(ケミカルリサイクル・アップサイクル) | ユースケース:解重合(溶媒分解、触媒分解、光駆動等)と再重合を統合し、廃プラ→モノマー/中間体→再材料のループを構築。<br>課題:原料変動(フィードストック品質)、触媒劣化、精製・分離コスト、スケール時の安全。<br>展望:オンライン分析、プロセス制御、標準化された原料仕様(品質規格)を整備し、技術一制度を同時に設計する。   |
| 機械製造分野(接着・複合材・構造材料)     | ユースケース:高性能接着剤・複合材・エラストマーの修理性/再成形性を vitrimers 等で付与し、保守・更新コストを下げる。<br>課題:耐熱・耐疲労などの高性能と、結合交換速度(加工性)のトレードオフ。複合材(例:CFRP(carbon fiber reinforced plastic:炭素繊維強化プラスチック))の分離・再資源化。<br>展望:交換反応の局在化、低温化、複合材の分離プロセス統合が鍵。                       |
| 半導体・エレクトロニクス(ナノ構造制御)    | ユースケース:ブロック共重合体の自己組織化によりナノパターンニングや機能膜を形成し、材料プロセスを統合。<br>課題:欠陥密度、量産工程、熱履歴・溶媒履歴耐性。<br>展望:配列制御(ブロック/勾配)と in-line 計測・フィードバックで欠陥抑制を進める。  |
| エネルギー分野(電池・膜・触媒担体)      | ユースケース:イオン伝導、選択透過、耐熱などを、配列(官能基位置・密度)で設計した高分子で最適化。<br>課題:耐久性、界面劣化、再現性。<br>展望:材料データ基盤+HTE(high-throughput experimentation:ハイスループット実験)で“構造-物性-劣化”を定量化し、設計指針を作る。  |
| 建設・インフラ分野(耐久・自己修復)      | ユースケース:動的結合ネットワークで自己修復・損傷検知を組み込み、長寿命化と保守低減を狙う。<br>課題:長期環境下での反応維持、コスト、施工性。<br>展望:劣化・破壊機構の定量化と、トリガ応答の設計(光・熱・力学)を統合する。   |
| 宇宙開発分野(極限環境材料)          | ユースケース:軽量高強度材料、極限環境での修復可能材料、アウトガス制御材料。<br>課題:熱サイクル寿命、アウトガス、認証・信頼性データ。<br>展望:加速試験とデータ駆動評価(データモデル整備)を組み合わせ、材料認証の“データ要件”から逆算して配列設計する。  |

## (5) インタビュー結果を踏まえた今後の潮流および研究の方向性

中核研究者へのインタビュー結果に基づき、今後 5 年から 10 年の潮流および研究の方向性を整理した。

表 2-134 今後の潮流および研究の方向性「高分子配列の制御技術の進展」

| 項目  | 概要  |
|---|---|
| 新たに浮上している、または今後 5 年から 10 年の間に浮上すると考えられる技術トレンド、技術的ブレークスルーの可能性、技術面の障壁、規制・倫理も含む非技術面の障壁 | <p>■重合法の統合・スイッチング<br/>ラジカル／カチオン／開環などの重合を同時・選択的に進行／切替し、従来つながらなかったブロックの統合や新規主鎖構築を実現することが考えられる。</p> <p>■骨格変換(スケルトン編集)技術<br/>主鎖の部分的変換(例:炭素→窒素導入)で物性・分解挙動を高度制御し、アップサイクルや新機能化に資すると考えられる。</p> <p>■超分子ポリマー(非共有結合(キエール結合))<br/>可逆な結合を精密制御し、強靱性と分解性を両立できる。</p>  |
| 他分野研究連携の必要性   | <p>■バイオ分野×高分子化学分野の融合<br/>自然環境下では化学分解と酵素分解が連携して無害化に至るため、連携が期待される。</p>  |
| わが国のアセット(人材・インフラ等)と国外プレイヤー・チームとの比較  | <p>ゲル分野、精密重合分野で世界を牽引。動的共有結合の応用展開でも存在感がある。</p>   |
| 今後5年から10年の間において潮流となり得る研究の方向性  | <p>■化学分野・バイオ分野両面からの高分子の分解研究<br/>化学分解によって分子量を低下させ、酵素により生分解するといった高分子設計が考えられる。また、バイオ分野から、酵素分解しやすい分子構造の情報を得て、それを活用して分子設計することも考えられる。</p> <p>■AIを活用した分子設計<br/>ポリマー配列設計や物性予測に AI 活用が増加している。人工的に作ったデータを併用するなど、データを拡張することで予測感度を高められると伺っている。</p> <p>■医療・ライフサイエンス・エンジニアリング用途を出口とした研究<br/>医療・ライフサイエンス分野では、ゲル、DDS(ドラッグデリバリーシステム)等で配列・結合設計と AI による最適化が有望である。微量の物質で機能を実現できる点でも、高分子配列制御技術の一つの出口である。極限環境材料(宇宙・半導体製造等)の高機能化も、高分子配列制御技術の研究の出口として重要である。</p> |
| 今後の当該分野において優先すべき研究課題・支援形態   | <p>AI/MI 活用のためのデータの標準化・DB 整備が未発達であり、国主導での整備等が期待される。<br/>精密重合やゲルなど、日本の強みがある分野のサポートが期待される。</p>  |

## (6) 出所

- Chen, L. et al. Polymer informatics: Current status and critical next steps. Materials Science and Engineering: R: Reports, Volume 144, 2021, 100595. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100595>
- JST 研究開発戦略センター(CRDS). 研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野(2024 年) / 2.5.1 分子技術. [https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-04/CRDS-FY2024-FR-04\\_20501.pdf](https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-04/CRDS-FY2024-FR-04_20501.pdf)
- The Nobel Committee for Chemistry, The Royal Swedish Academy of Sciences. Scientific Background on the Nobel Prize in Chemistry 2022: Click Chemistry and Bioorthogonal Chemistry. 2022. <https://www.nobelprize.org/uploads/2022/10/advanced-chemistryprize2022-2.pdf>

- OECD. Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options. OECD Publishing, Paris(2022). <https://doi.org/10.1787/de747aef-en>
- Badi, N., Lutz, J.-F. Sequence control in polymer synthesis. *Chemical Society reviews*, 38(12), 3383–3390. <https://doi.org/10.1039/b806413j>
- United Nations Environment Programme, Press release. Historic day in the campaign to beat plastic pollution: Nations commit to develop a legally binding agreement. <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/historic-day-campaign-beat-plastic-pollution-nations-commit-develop>
- Winne, J. M. et al. Dynamic covalent chemistry in polymer networks: a mechanistic perspective. *Polym. Chem.*, 2019, 10, 6091-6108. <https://doi.org/10.1039/C9PY01260E>
- 環境省. The Plastic Resource Circulation Act (Act No. 60 of 2021). [https://www.env.go.jp/en/focus/jeq/issue/vol29/The%20Plastic%20Resource%20Circulation%20Act\\_0128%20final.pdf](https://www.env.go.jp/en/focus/jeq/issue/vol29/The%20Plastic%20Resource%20Circulation%20Act_0128%20final.pdf)
- U.S. Department of Energy. Plastics Innovation Challenge Draft Roadmap. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2021/01/f82/Plastics%20Innovation%20Challenge%20Draft%20Roadmap.pdf>
- IUPAC Gold Book. reversible-deactivation radical polymerization. *Compendium of Chemical Terminology*. <https://goldbook.iupac.org/terms/view/08916>
- Deacy, A. C. et al. Sequence Control from Mixtures: Switchable Polymerization Catalysis and Future Materials Applications. *J. Am. Chem. Soc.* 2021, 143, 27, 10021–10040. <https://doi.org/10.1021/jacs.1c03250>
- Nakaoka, K., Ema, T. Terpolymerization reactions of epoxides, CO<sub>2</sub>, and the third monomers toward sustainable CO<sub>2</sub>-based polymers with controllable chemical and physical properties. *Chem. Commun.*, 2025,61, 46-60. <https://doi.org/10.1039/D4CC04615C>
- Tardy, A. et al. Radical Ring-Opening Polymerization: Scope, Limitations, and Application to (Bio)Degradable Materials. *Chem. Rev.* 2017, 117, 3, 1319–1406. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00319>
- Gan, Z. et al. Precision polymers: advances in synthesis, structural engineering, and functional optimization. *Progress in Polymer Science*, Volume 170, 2025, 102030. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2025.102030>
- Nobel Prize Outreach. K. Barry Sharpless – Facts – 2022. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2022/sharpless/facts/>
- Shieh, P. et al. Clip Chemistry: Diverse (Bio)(Macro)molecular and Material Function through Breaking Covalent Bonds. *Chem. Rev.* 2021, 121, 12, 7059–7121. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c01282>
- Christensen, P. R. et al. Closed-loop recycling of plastics enabled by dynamic covalent diketoenamine bonds. *Nat. Chem.* 11, 442–448 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41557-019-0249-2>
- Yoshida, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science* 351, 1196–1199 (2016).
- A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science*, 351, 1196–1199 (2016). <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aad6359>
- Stöber, T. et al. Easy access to oxygenated block polymers via switchable catalysis. *Nat Commun* 10, 2668 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10481-w>
- Narciso, N. de P., Navarro, R. S., Gilchrist, A. et al. Design parameters for injectable biopolymeric hydrogels with dynamic covalent chemistry crosslinks. *Adv Healthc Mater.* 2023 Jul 11;12(27):e2301265. <https://doi.org/10.1002/adhm.202301265>
- Stöber, T. et al. ‘Switch’ catalysis: from monomer mixtures to sequence-controlled block copolymers. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci* 13 January 2018; 376 (2110): 20170066. <https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0066>
- Nobel Prize Outreach. The Nobel Prize in Chemistry 2022 - Popular information. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2022/popular->

information/

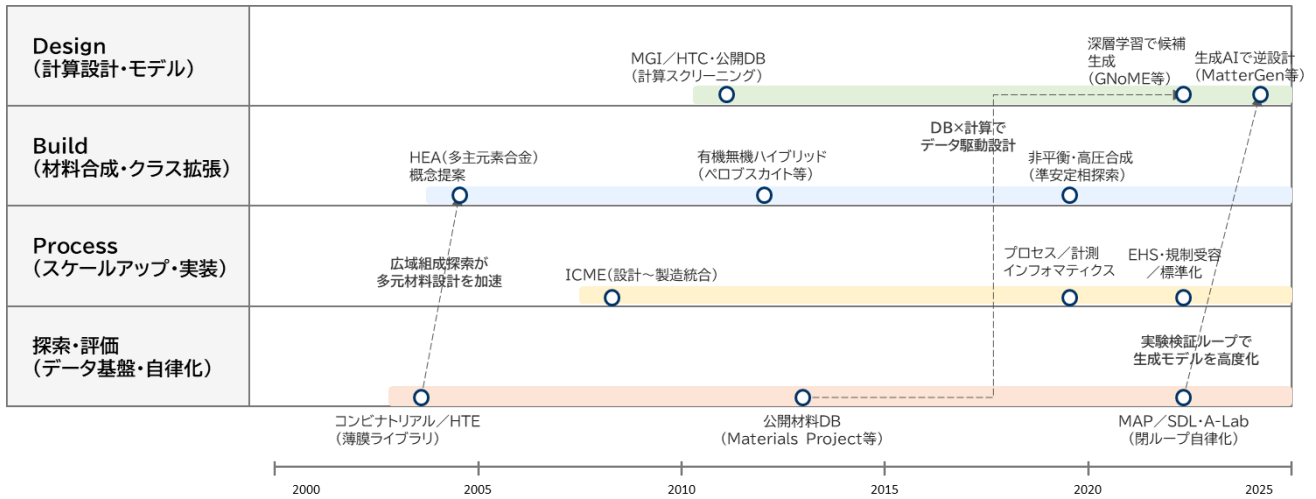
- Jenkins, A. D. et al. Terminology for reversible-deactivation radical polymerization previously called "controlled" radical or "living" radical polymerization (IUPAC Recommendations 2010). *Pure and Applied Chemistry*, vol. 82, no. 2, 2009, pp. 483-491. <https://doi.org/10.1351/PAC-REP-08-04-03>
- JST 研究開発戦略センター(CRDS). 戦略イニシアティブ 分子技術「分子レベルからの新機能創出」～異分野融合による持続可能社会への貢献～. <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2009/SP/CRDS-FY2009-SP-06.pdf>
- Lutz, J.-F. et al. Sequence-Controlled Polymers. *Science* 341, 1238149 (2013). <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1238149>
- Ouchi, M., Sawamoto, M. Sequence-controlled polymers via reversible-deactivation radical polymerization. *Polym J* 50, 83-94 (2018). <https://doi.org/10.1038/pj.2017.66>
- JST 研究開発戦略センター(CRDS). 戦略プロポーザル 環境調和型プラスチック戦略 ～化学物質としてのプラスチックの安全な管理・活用を推進するための戦略的研究～. <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2019/SP/CRDS-FY2019-SP-07.pdf>
- Rizos, V., Urban, P., Righetti, E., Kassab, A. Chemical Recycling of Plastics: Technologies, trends and policy implications. CEPS In-Depth Analysis, June, 2023-11. [https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/2023-07/Chemical%20recycling%20of%20plastics\\_0.pdf](https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/2023-07/Chemical%20recycling%20of%20plastics_0.pdf)
- Clark, R. A., Shaver, M. P. Depolymerization within a Circular Plastics System. *Chem. Rev.* 2024, 124, 5, 2617-2650. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.3c00739>
- Corrigan, N. et al. Reversible-deactivation radical polymerization (Controlled/living radical polymerization): From discovery to materials design and applications. *Progress in Polymer Science*, Volume 111, 2020, 101311. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2020.101311>
- Kreuzer, J., Yagci, Y. Metal Free Reversible-Deactivation Radical Polymerizations: Advances, Challenges, and Opportunities. *Polymers* 2018, 10(1), 35. <https://doi.org/10.3390/polym10010035>
- Wu, Y. et al. A review on catalytic copolymerization of carbon dioxide and epoxides. *Materials Today Sustainability*, Volume 31, 2025, 101148. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2025.101148>
- Liang, X. et al. Recent Developments in Ring-Opening Copolymerization of Epoxides With CO<sub>2</sub> and Cyclic Anhydrides for Biomedical Applications. *Front. Chem.* 9:647245 (2021). <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.647245>
- [66]
- Agarwal, S. Chemistry, chances and limitations of the radical ring-opening polymerization of cyclic ketene acetals for the synthesis of degradable polyesters. *Polym. Chem.*, 2010,1, 953-964. <https://doi.org/10.1039/C0PY00040J>
- Elling, B. R., Dichtel, W. R. Reprocessable Cross-Linked Polymer Networks: Are Associative Exchange Mechanisms Desirable?. *ACS Cent. Sci.* 2020, 6, 9, 1488-1496. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.0c00567>
- Walsh, D. J. et al. Community Resource for Innovation in Polymer Technology (CRIPT): A Scalable Polymer Material Data Structure. *ACS Cent. Sci.* 2023, 9, 3, 330-338. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.3c00011>
- Sojdeh, S. et al. Click Chemistry-Based Hydrogels for Tissue Engineering. *Gels* 2025, 11, 724. <https://doi.org/10.3390/gels11090724>
- Highmoore, J. F. et al. Design of depolymerizable polymers toward a circular economy. *Green Chem.*, 2024, 26, 2384-2420. <https://doi.org/10.1039/D3GC04215D>
- Epps, T. H. III. O'Reilly, R. K. Block copolymers: controlling nanostructure to generate functional materials - synthesis, characterization, and engineering. *Chem. Sci.*, 2016, 7, 1674-1689. <https://doi.org/10.1039/c5sc03505h>
- JST 研究開発戦略センター(CRDS). 戦略プロポーザル 物質循環を目指した複合構造の生成・分解制御 ～サステイナブル元素戦略～. <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2020/SP/CRDS-FY2020-SP-05.pdf>



## 2.5.3 潮流 D3:次世代元素戦略「新機能獲得に向けた広域な材料探索」

### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



※バーは「顕著に発展・活用が進んだ時期」の目安である。

出所) 点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き: 影響が及ぶ方向(起点から波及先)を示す。  
 矢印上のラベル: 影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-27 技術的進歩と方向性の概要図「新機能獲得に向けた広域な材料探索」

表 2-135 技術的進歩と方向性(概要)「新機能獲得に向けた広域な材料探索」

● 概要

- 近年の特徴は「材料クラスの拡張(多元・複合・ハイブリッド化)」と「探索プロセスの加速(データ駆動・自律化)」が同時に進行している点にある。とりわけ日本では、データ駆動型研究開発基盤整備や DX/AI/ロボティクスの進展を踏まえ、マテリアル革新力の強化(迅速な社会実装、データ駆動型研究開発、国際競争力強化)が政府戦略として明示されている。
- 国際的には、先端材料(AdMa: Advanced Materials)を「合理的に設計された新規/強化特性・構造特徴によって特定機能を実現する材料」と整理し、EHS(環境・健康・安全)や規制受容を含むライフサイクル視点での枠組み整備が進む。欧州は先端材料を産業競争力・レジリエンス・標準化・資金動員と一体で位置付け、研究から市場導入までのエコシステム構築を政策化している。
- 技術基盤側では、米国 MGI(マテリアルズ・ゲノム・イニシアチブ)以降、HTC(ハイスループット計算)・データ基盤・標準化を核とする加速探索が定着し、公開 DB と相互運用(例:OPTIMADE)が材料探索の「共通土台」になりつつある。
- 2023 年以降は、SDL(自律実験ラボ)や大規模深層学習(例:GNoME)により「候補生成→選別→実験検証」の結合度が上がり、さらに 2025 年には拡散モデル等の生成 AI が結晶構造の逆設計(条件付き生成)を研究フロンティアとして押し上げている。
- 実用化観点では、材料群の拡張(多元・複合・準安定)そのものよりも、「合成可能性(synthesizability)」「再現性」「スケールアップ」「環境規制・安全性」「供給網制約」を同時に扱う探索・評価設計がボトルネックになりやすい。
  - ✓ 2000 年代前半:コンビナトリアル材料科学が薄膜組成勾配ライブラリ(単一の基板上に、成分(組成)が連続的または段階的に変化する薄膜を形成する手法)等として確立し、HTE(ハイスループット実験)と迅速評価が産業・アカデミアへ波及。多元系の相図・物性地図を「面」で捉える発想が普及し、探索の主戦場が単一組成点から組成空間へ移行した。メタマテリアルでは負の屈折率の実証など、“構造が物性をつくる”設計概念が可視化された。
  - ✓ 2000 年代後半:COF(共有結合性有機フレームワーク)など結晶性有機多孔体が登場し、有機系でも「構造設計→機能」の探索が加速。ナノ構造化・界面制御(薄膜/ナノ粒子等)を組成探索と同格に扱う流れが強まり、材料“群”を探索する姿勢が一般化した。さらに ICME(統合計算材料工学)が提唱され、計算・実験・製造を接続する“バリューチェーン指向”が研究開発マネジメントに組み込まれた。
  - ✓ 2010 年代前半:米国 MGI(マテリアルズ・ゲノム・イニシアチブ)がデータ共有・計算・標準化を柱に加速戦略を提示し、HTC(ハイスループット計算)と公開 DB(データベース)が材料探索の基盤へ。材料探索は「第一原理計算→候補提示→実験検証」の分業から、データ循環で学習する統合プロセスへ移行し始めた。太陽電池では有機金属ハライドペロブスカイトが高効率の端緒を示し、混晶・欠陥・界面制御を含む広域探索が爆発的に拡大した。
  - ✓ 2010 年代後半:HEA(高エントロピー合金)/高エントロピー酸化物・セラミックス等が「多元素化×秩序/無秩序」の設計領域を開拓し、相安定・欠陥・輸送・耐環境性など多目的指標の同時最適化が課題として顕在化。CALPHAD(相図計算法)や機械学習を繋いだ加速探索が実証され、同時に FAIR(Findable, Accessible, Interoperable, Reusable:発見可能・アクセス可能・相互運用可能・再利用可能)指針や NOMAD 等のメタデータ標準化が“再利用可能な材料データ”を研究要件に押し上げた。
  - ✓ 2020 年代前半:MAP(マテリアル加速プラットフォーム)/SDL(Self-driving laboratory 自律実験ラボ)の潮流が、ロボティクス+アクティブラーニング(能動学習)+データ基盤を閉ループ化し、「探索→合成→評価→学習」を高速で周回するようになった。A-Lab(自律固相合成ラボ)が実証され、GNoME 等の大規模深層学習が「候補生成・選別」のボトルネックを緩和した。材料データ基盤(例:NIMS DICE)が研究現場の計測データからの機械可読化を志向し、実験 DX(デジタルトランスフォーメーション)が実装段階に入った。
  - ✓ 2024 年以降:広域材料探索(多元素化・複合化・準安定相)の急拡大に対し、JST/CRDS はデータ科学・MI(マテリアルズ・インフォマティクス)・プロセス/計測インフォマティクスと実験 DX を統合する必要性を明確化。国内ではマテリアル DX(データ基盤×AI×ロボティクス)を政策柱に据え、EU も先端材料の産業競争力・標準化・資金動員を戦略化。OECD は先端材料(AdMa: Advanced Materials)を“合理的設計により新規/強化特性や構造特徴を狙う材料”として整理し、EHS(環境・健康・安全)と規制受容を並走させる枠組み整備を促す。研究最前線では生成 AI が逆設計を押し進め、次段階は「合成可能性・スケールアップ・安全/持続可能性・供給網制約」を含む多目的最適化へ移る。

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-136 タイムライン「新機能獲得に向けた広域な材料探索」

| 年    | 主な進展やイベント  |
|------|--|
| 2001 | メタマテリアルで負の屈折率(negative index)の実験検証が報告され、構造設計による物性創成の象徴的成果となる。          |
| 2003 | コンビナトリアル/HTE(ハイスループット実験)が材料・化学産業の実装技術として整理される。                         |
| 2004 | HEA(高エントロピー合金)設計概念が提案され、多元合金設計が研究フロントへ。                                |
| 2005 | COF(共有結合性有機フレームワーク)が報告され、結晶性多孔有機材料の設計探索が本格化。                           |
| 2008 | ICME(統合計算材料工学)が全米アカデミーズ報告で体系化され、設計～製造まで統合する思想が普及。                      |
| 2011 | MGI(マテリアルズ・ゲノム・イニシアチブ)が材料開発加速の国家インフラ構想として提示される。                        |
| 2013 | Materials Project(Materials Project:無機材料 DB)が MGI の中核的公開基盤の一つとして整備される。 |
| 2014 | MGI 戦略計画で「文化変革・統合・データアクセス・人材」を四本柱として明示。                                |
| 2015 | エントロピー安定化酸化物が報告され、多元酸化物の新規相・新機能探索が加速。                                  |
| 2015 | 多主元素合金の加速探索(CALPHAD 等を用いた多数候補の高速評価)が示される。                              |
| 2015 | OQMD(Open Quantum Materials Database)が大規模 DFT 計算 DB として公開される。          |
| 2016 | FAIR 原則が提示され、データの機械可読・再利用性が研究インフラ要件として普及。                              |
| 2017 | メタデータ/データ形式の標準化(NOMAD 等)が議論され、相互運用の技術課題が明確化。                           |
| 2018 | MAP(マテリアル加速プラットフォーム)が「20 年→1~2 年」級の開発短縮を掲げて提案され、SDL 概念が一般化。            |
| 2019 | 自動化・自律化ワークフローによる材料科学加速のレビューが提示される。                                     |
| 2021 | OPTIMADE(材料 DB 相互運用 API)が提案され、分散 DB 横断検索の標準化が進む。                       |
| 2023 | A-Lab が固相合成の自律実験で成果を示し、計算候補と実験実現のギャップ縮小が具体化。                           |
| 2023 | GNoME が大規模深層学習で安定結晶候補探索を拡張し、探索母集団を桁で拡大。                                |
| 2024 | JST 俯瞰報告が「多元素化・複合化・準安定相」等で探索空間が急拡大し、データ駆動が必須と整理。                       |
| 2024 | EU が先端材料の産業戦略(研究・標準・資金・市場導入)をコミュニケーションとして公表。                           |
| 2025 | 生成 AI(拡散モデル)による無機結晶の逆設計(MatterGen)が報告され、候補提案の自動化が一段進む。                 |

## (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-137 キーテクノロジー「新機能獲得に向けた広域な材料探索」

| 名称              | 出現時期・背景  | 定義   |
|-----------------|--|--|
| HTE(ハイスループット実験) | 出現時期: 1990 年代後半～2000 年代初頭に化学・材料分野へ本格導入。<br>背景: 自動化・ロボット化と並列合成/評価により材料探索を加速する産業ニーズ(化学・触媒・材料)。 | 説明: 多数条件の合成・評価を並列/高速化し、組成空間を面で探索。<br>課題: 測定の標準化、試料品質ばらつき、解析の自動化。<br>課題解決の目安: 3-7 年。<br>キーになる研究テーマ: 自動サンプル前処理、in-line 品質管理、データモデル化。 |

| 名称                                  | 出現時期・背景   | 定義   |
|-------------------------------------|---|--|
| コンビナトリアル材料ライブラリ                     | 出現時期: 1990年代後半に手法が確立し、2000年代初頭に体系化。<br>背景: 多元素・多組成を一枚のライブラリ上で並列合成・表面解析し、迅速に相・特性マップを得るアプローチ。     | 説明: 組成勾配薄膜・ライブラリで相図/物性地図を生成。<br>課題: バルク・プロセスへのスケール変換、組成/厚みの精密同定。<br>課題解決の目安: 3-5年。キーになる研究テーマ: 標準試料、計測校正、デジタルツイン化。                          |
| HTC(ハイスループット計算)/DFT(密度汎関数理論)スクリーニング | 出現時期: 2010年前後~2010年代前半に高スループットDFTが普及。<br>背景: HPCの進展とMGI/ICMEの潮流を背景に、第一原理計算を自動化し大規模物性スクリーニングを実施。 | 説明: 第一原理計算を大量に回し、安定性・物性を粗スクリーニング。<br>課題: 近似誤差、欠陥/界面/有限温度、計算コスト。<br>課題解決の目安: 5-10年。<br>キーになる研究テーマ: 高精度汎用ポテンシャル、誤差校正、マルチフィデリティ。              |
| 公開材料DB( Materials Project等)         | 出現時期: 2010年代前半に大規模公開DBが立ち上がり。<br>背景: 高スループットDFTの成果をオープンに公開し、再利用とデータ駆動型研究を促進。                    | 説明: 計算/実験データを公開し、探索再利用を可能化。<br>課題: データ偏り、合成可能性情報の不足、更新ガバナンス。<br>課題解決の目安: 3-7年。<br>キーになる研究テーマ: 合成メタデータ拡充、負例共有、品質指標。                         |
| AFLOW/OQMD等の高スループット基盤               | 出現時期: AFLOW(2012)、OQMD(2015)により標準化・自動化が進展。<br>背景: DFTバッチ実行、ワークフロー、データスキーマの標準化でスケラブルな材料探索が可能に。   | 説明: 自動計算フレームワークと大規模DBで探索母集団を拡張。<br>課題: 計算条件の整合性、相互運用、サロゲート連携。<br>課題解決の目安: 3-6年。<br>キーになる研究テーマ: API統一、監査可能な計算記録。                            |
| FAIR(発見可能・アクセス可能・相互運用可能・再利用可能)      | 出現時期: 2016年にFAIR原則が提示。<br>背景: 研究データ管理の国際的合意形成と再利用性向上の要請。  | 説明: データ/ワークフローを機械可読・再利用可能にする原則。<br>課題: 実験条件・プロセス条件の記述粒度、研究現場の負担、インセンティブ設計。<br>課題解決の目安: 5-10年。<br>キーになる研究テーマ: 自動メタデータ抽出、評価指標、研究評価制度との接続。    |
| NOMADメタデータ・データ形式                    | 出現時期: 2010年代後半(2017年にメタデータ/形式の提案整備)。<br>背景: 計算材料データの大規模共有・交換を可能にする記述法/スキーマの標準化。                 | 説明: 計算材料科学でのメタデータ/データ形式を整備し共有を容易にする。<br>課題: 実験データ側の異種性、オントロジー整合。<br>課題解決の目安: 5-10年。<br>キーになる研究テーマ: 実験ELN統合、ドメインオントロジー。                     |
| OPTIMADE(材料データ交換API)                | 出現時期: 2021年にAPI仕様が国際協調で公開。<br>背景: 異なる材料DB間でのクエリ互換性を確保し、横断検索・再利用を容易化。                            | 説明: 分散材料DBを横断する共通API仕様。<br>課題: 材料クラス拡張(ポリマー/複合/欠陥)、スキーマ進化管理。<br>課題解決の目安: 3-6年。<br>キーになる研究テーマ: 拡張仕様、互換性テスト、参照実装。                            |
| MAP(マテリアル加速プラットフォーム)                | 出現時期: 2018~2020年に概念が広まり、実装・レビューが相次ぐ。<br>背景: 自動化実験、シミュレーション、DB、機械学習を閉ループで統合し、探索効率を桁違いに向上。        | 説明: AI+ロボット+計算+データ基盤で材料開発を閉ループ化し高速化。<br>課題: 装置・データのモジュール化、エラー/失敗の学習、実験安全。<br>課題解決の目安: 5-10年。<br>キーになる研究テーマ: 研究オーケストレーション、失敗データの形式化、コスト最適化。 |

| 名称                    | 出現時期・背景   | 定義   |
|-----------------------|---|--|
| SDL(自律実験ラボ)           | 出現時期: 2019年頃からプロトタイプが普及、2020年代に本格化(2025年に包括レビュー)。背景: ロボティクスと最適化/アクティブラーニングにより、計画→実験→解析を自律運転。                      | 説明: 実験計画・実行・解析・次実験提案を自律ループで回す。課題: 実験再現性・保守、データ同化、説明可能性。課題解決の目安: 5-10年。キーになる研究テーマ: 自律度評価指標、監査ログ、ヒューマン・イン・ザ・ループ設計。       |
| A-Lab(自律固相合成ラボ)       | 出現時期: 2023年にNatureで実証報告。背景: 固相合成プロセスの自動化とAI制御により、新規無機材料の探索・合成条件学習を高速化。  | 説明: 固相合成をロボットで回し、ML/能動学習でレンピを改善。課題: 粉体系のハンドリング、相同定の自動化、未知相の扱い。課題解決の目安: 3-7年。キーになる研究テーマ: in-line 回折解析、粉体搬送標準、合成オントロジー。  |
| GNoME(大規模深層学習による候補生成) | 出現時期: 2023年にNatureで大規模候補生成の成果を報告。背景: 何百万規模の結晶候補を深層学習で生成・安定性予測し、DFTで検証するスケールを実現。                                   | 説明: グラフネットワークで安定結晶候補探索を拡張。課題: 候補の合成可能性、用途(アプリ)割当、データ偏り。課題解決の目安: 3-8年。キーになる研究テーマ: 合成経路推定、物性多目的最適化、外挿評価。                 |
| 生成 AI(拡散モデル等)による結晶逆設計 | 出現時期: 2023年頃から多様な生成モデルが登場し、2025年に汎用モデルと総説が報告。背景: 対称性・組成制約を組み込んだ拡散/自己回帰/フロー系モデルで格子・サイト配置を同時生成。                     | 説明: 構造そのものを生成し、条件付きで目的物性を満たす候補を提案。課題: 物理拘束(対称性・安定性)と多目的制約、検証コスト。課題解決の目安: 5-10年。キーになる研究テーマ: 物理拘束生成、迅速検証(HTC/実験)、不確実性推定。 |
| 非平衡合成(超高速加熱/急冷等)      | 出現時期: 手法自体は古典的だが、メタスタブル相や高エントロピー材料狙いで2010年代以降に再注目; 2020年代に体系化が進展。背景: 平衡相では得られない機能相の創製、固溶度拡大、ナノ構造制御の需要増大。          | 説明: 平衡相図外の準安定相・高エントロピー相を作る合成群。課題: 相保持、スケールアップ、プロセス窓の狭さ。課題解決の目安: 5-12年。キーになる研究テーマ: プロセス計測、モデル同化、連続プロセス化。                |
| 高圧探索(高圧相の予測・創製)       | 出現時期: 高圧合成は従来からあるが、計算予測と連動した系統探索が2010年代後半以降に加速。背景: 高圧下でのみ安定な新相・超硬/超伝導材料の探索と、第一原理計算による相安定性予測の高度化。                  | 説明: 高圧で現れる相転移・新相を探索し、回収可能な準安定相を狙う。課題: 回収条件、評価標準、合成手段の限定。課題解決の目安: 7-15年。キーになる研究テーマ: 相転移予測、回収プロトコル、非平衡固定化。               |
| EHS/規制受容の先行評価(先端材料)   | 出現時期: 2020年代に“先端材料”概念の整備とともに早期評価枠組が強化。背景: “Safe and Sustainable by Design”の国際潮流を受け、研究初期段階から安全性・環境影響・規制適合性を組み込む要請。 | 説明: 材料機能と同時に安全性・持続可能性を設計に織り込む。課題: 試験法の空白、データ不足、標準化・合意形成。課題解決の目安: 5-10年。キーになる研究テーマ: 標準試験、ライフサイクルデータ、規制サンドボックス。          |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-138 実用化可能性「新機能獲得に向けた広域な材料探索」

| セクター              | ユースケースや波及が期待される産業領域   |
|-------------------|---|
| エネルギー貯蔵(電池・固体電解質) | ユースケース:高エントロピー酸化物/セラミックス、混晶・欠陥設計でイオン伝導・界面安定を最適化。<br>波及:蓄電池の安全・寿命・高エネルギー密度。<br>課題:界面反応、加工(緻密化・膜化)、評価標準。<br>展望:プロセス/計測インフォマティクスと Closed-Loop 最適化で材料×プロセス同時探索が重要。      |
| 太陽電池・光電子          | ユースケース:有機無機ハイブリッド(ペロブスカイト等)の混晶・欠陥・界面探索。<br>波及:低温プロセス・高効率の魅力。<br>課題:再現性、劣化機構、封止/スケール。<br>展望:自律実験でプロセス窓探索、劣化データを含む学習が鍵(SDL 思想)。                                       |
| 触媒・化学プロセス         | ユースケース:多元酸化物・HEA 触媒、準安定相触媒探索。<br>波及:資源代替・省エネ・脱炭素。<br>課題:反応条件下の相変化(準安定→安定)、担体/形状の工学要因。<br>展望:operando 計測と材料データ基盤統合、探索結果のスケールアップ指標化。                                  |
| 分離・吸着(CCUS、水処理)   | ユースケース:MOF/COF の細孔設計で CO2 回収・ガス分離・水処理。<br>波及:環境規制対応・資源循環。<br>課題:成形・膜化、耐湿/耐汚染、コスト。<br>展望:材料探索と同時に加工・寿命評価のデータ化が必須。  |
| 半導体・量子・先端電子       | ユースケース:混晶・ドーパント/欠陥設計、2D 積層、先端材料の標準化とサプライチェーン。<br>波及:微細化限界後の新材料(Beyond 2nm 等)と量子技術。<br>課題:欠陥制御の再現性、プロセス統合、材料規格。<br>展望:EU は Chips 文脈でも先端材料重要性を明記;標準化・規制受容を前倒しで設計。     |
| 構造材料(航空宇宙・極限環境)   | ユースケース:HEA/高エントロピーセラミックスで耐熱・耐酸化・耐照射。<br>波及:高温機器、宇宙・防衛。<br>課題:相安定(長期)、加工性、接合、コスト。<br>展望:CALPHAD+ML で候補を絞り込み、工程・熱処理窓を含めて探索する実装指向が有効。                                  |
| 製造プロセス・AM(付加製造)   | ユースケース:材料×プロセスの同時最適化(粉末・レーザー条件・後処理)。<br>波及:小ロット高付加価値部材の迅速供給。<br>課題:品質保証、欠陥検出、規格。<br>展望:ICME 視点でプロセス統合、データ基盤と連動した QA が重要。  |
| 高分子・ソフトマター        | ユースケース:ブレンド・共重合体・複合で誘電/膜/電解質等を探索。<br>波及:軽量化、資源循環、医療。課題:データ表現(構造+合成+加工)、負例不足。<br>展望:ポリマー・インフォマティクスの成熟と、製造条件データの FAIR 化が鍵。  |
| 規制・標準・社会実装横断      | ユースケース:先端材料を市場投入する際の規制適合・試験法・標準化。<br>波及:投資判断・調達・サプライチェーン整備。<br>課題:評価法の空白、国際整合、EHS データ不足。<br>展望:EU は標準化・調達(公共調達等)を含むエコシステムを提案、OECD は WPMN(工業ナノ材料作業部会)文脈で先端材料の枠組みを提示。 |

## (5) 出所

- JST 研究開発戦略センター(CRDS). 研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野(2024年). <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2024-FR-04.html>
- JST 研究開発戦略センター(CRDS). 研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野(2024年) / 2.5.3 データ駆動型物質・材料開発. [https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-04/CRDS-FY2024-FR-04\\_20503.pdf](https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-04/CRDS-FY2024-FR-04_20503.pdf)
- 内閣府/統合イノベーション戦略推進会議. マテリアル革新力強化戦略(令和7年/2025). [https://www8.cao.go.jp/cstp/material/material\\_2025\\_honbun.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/material/material_2025_honbun.pdf)
- European Commission. Advanced Materials for Industrial Leadership(2024). <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-7172-2024-INIT/en/pdf>
- Organisation for Economic Co-operation and Development(OECD). Advanced Materials: Working Description. OECD Environment, Health and Safety Publications Series on the Safety of Manufactured Nanomaterials No. 104. [https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2023/01/advanced-materials-working-description\\_6ce97c6b/4b5ba38d-en.pdf](https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2023/01/advanced-materials-working-description_6ce97c6b/4b5ba38d-en.pdf)
- 物質・材料研究機構(NIMS). DICE. <https://dice.nims.go.jp/en/>
- 物質・材料研究機構(NIMS). ニュース/ NIMS releases DICE, a materials data platform - Providing solutions to materials development problems using materials informatics -. <https://www.nims.go.jp/MaDIS/en/news/i2666n0000001rhg.html>
- 谷藤幹子ほか. 材料データプラットフォームシステム DICE における研究データフローの構築—実践と課題. 情報処理学会論文誌 デジタルプラクティス Vol.2 No.2 57-63 (Apr. 2021). <https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/record/210646/files/IPSJ-TDP0202006.pdf>
- U.S. NSTC/OSTP. Materials Genome Initiative for Global Competitiveness(2011). [https://www.mgi.gov/sites/mgi/files/materials\\_genome\\_initiative-final.pdf](https://www.mgi.gov/sites/mgi/files/materials_genome_initiative-final.pdf)
- U.S. NSTC/OSTP. Materials Genome Initiative Strategic Plan(2014). [https://www.mgi.gov/sites/mgi/files/mgi\\_strategic\\_plan\\_-\\_dec\\_2014.pdf](https://www.mgi.gov/sites/mgi/files/mgi_strategic_plan_-_dec_2014.pdf)
- National Research Council. Integrated Computational Materials Engineering: A Transformational Discipline for Improved Competitiveness and National Security(2008). <https://www.nationalacademies.org/publications/12199>
- Dar, Y.L. High-Throughput Experimentation: A Powerful Enabling Technology for the Chemicals and Materials Industry. *Macromol. Rapid Commun.*, 25: 34-47. <https://doi.org/10.1002/marc.200300166>
- Jain, A. et al. Commentary: The Materials Project: A materials genome approach to accelerating materials innovation. *APL Mater.* 1, 011002 (2013). <https://doi.org/10.1063/1.4812323>
- Curtarolo, S. et al. AFLOW: An automatic framework for high-throughput materials discovery. *Computational Materials Science*, Volume 58, 2012, 218-226. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.02.005>
- Kirklin, S. et al. The Open Quantum Materials Database (OQMD): assessing the accuracy of DFT formation energies. *npj Comput Mater* 1, 15010 (2015). <https://doi.org/10.1038/npjcompumats.2015.10>
- Ghiringhelli, L.M. et al. Towards efficient data exchange and sharing for big-data driven materials science: metadata and data formats. *npj Comput Mater* 3, 46 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41524-017-0048-5>
- Wilkinson, M.D. et al. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Sci Data* 3, 160018 (2016). <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>
- Andersen, C.W. et al. OPTIMADE, an API for exchanging materials data. *Sci Data* 8, 217 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00974-z>
- Yeh, J.-W. et al. Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes. *Adv. Eng. Mater.*, 6: 299-303. <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>
- Cantor, B. et al. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys, *Materials Science and Engineering: A*, Volumes 375-377, 2004, 213-218, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
- Rost, C.M. et al. Entropy-stabilized oxides. *Nat Commun* 6, 8485 (2015). <https://doi.org/10.1038/ncomms9485>

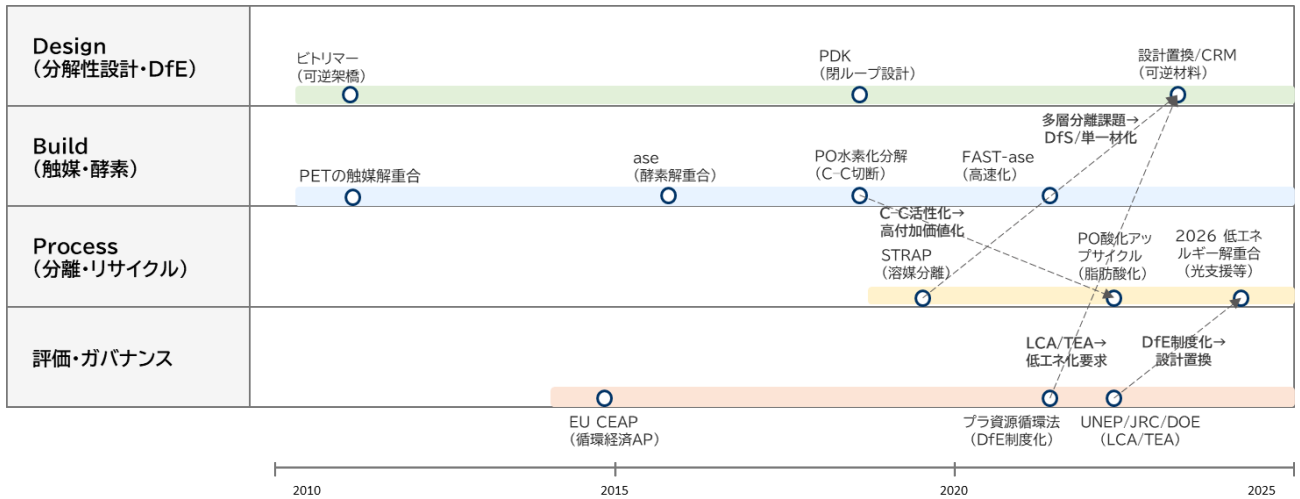
- Oses, C. et al. High-entropy ceramics. *Nat Rev Mater* 5, 295–309 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0170-8>
- Senkov, O.N. et al. Accelerated exploration of multi-principal element alloys with solid solution phases. *Nat Commun* 6, 6529 (2015). <https://doi.org/10.1038/ncomms7529>
- Hart, G.L.W. et al. Machine learning for alloys. *Nat Rev Mater* 6, 730–755 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00340-w>
- Liu, S. et al. Non-Equilibrium Synthesis Methods to Create Metastable and High-Entropy Nanomaterials. *Advanced Science* 13, no. 11 (2026): e21953. <https://doi.org/10.1002/advs.202521953>
- Chen, C.-C. et al. Discovery of new high-pressure phases – integrating high-throughput DFT simulations, graph neural networks, and active learning. *npj Comput Mater* 11, 191 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41524-025-01682-7>
- Walsh, J.P.S. et al. High-Pressure Synthesis: A New Frontier in the Search for Next-Generation Intermetallic Compounds. *Acc. Chem. Res.* 2018, 51, 6, 1315–1323. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.8b00143>
- Côté, A.P. et al. Porous, Crystalline, Covalent Organic Frameworks. *Science* 310, 1166 (2005). <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1120411>
- Lee, M.M. et al. Efficient Hybrid Solar Cells Based on Meso-Superstructured Organometal Halide Perovskites. *Science* 338, 643–647(2012). <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1228604>
- Li, H. et al. Porous metal-organic frameworks for gas storage and separation: Status and challenges. *EnergyChem*, Volume 1, Issue 1, 2019, 100006. <https://doi.org/10.1016/j.enchem.2019.100006>
- Chen, L. et al. Polymer informatics: Current status and critical next steps. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Volume 144, 2021, 100595. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100595>
- Shelby, R.A. et al. Experimental Verification of a Negative Index of Refraction. *Science* 292, 77–79(2001). <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1058847>
- Advancement of Science. Integration of AI and robotics with materials sciences will lead to new clean energy technology. *EurekaAlert! News Release* 25-Jan-2018. <https://www.eurekaalert.org/news-releases/769078>
- Stein, H.S., Gregoire, J.M. Progress and prospects for accelerating materials science with automated and autonomous workflows. *Chem. Sci.*, 2019,10, 9640–9649. <https://doi.org/10.1039/C9SC03766G>
- Flores-Leonar, M.M. et al. Materials Acceleration Platforms: On the way to autonomous experimentation. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, Volume 25, 2020, 100370. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.100370>
- Canty, R.B. et al. Science acceleration and accessibility with self-driving labs. *Nat Commun* 16, 3856 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-59231-1>
- Szymanski, N.J. et al. An autonomous laboratory for the accelerated synthesis of inorganic materials. *Nature* 624, 86–91 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06734-w>
- Merchant, A. et al. Scaling deep learning for materials discovery. *Nature* 624, 80–85 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06735-9>
- Zeni, C. et al. A generative model for inorganic materials design. *Nature* 639, 624–632 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08628-5>
- De Breuck, P.P. et al. Generative AI for crystal structures: a review. *npj Comput Mater* 11, 370 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41524-025-01881-2>
- OECD. Artificial Intelligence in Science: Challenges, Opportunities and the Future of Research. OECD Publishing, Paris(2023). <https://doi.org/10.1787/a8d820bd-en>
- Abe, Y. DEVELOPMENT AND USE OF HIGH-ENTROPY MATERIALS — ENTERING AN ERA OF NEW FUNCTIONAL MATERIALS COMPOSED OF MULTIPLE ELEMENTS —. Mitsui & Co. Global Strategic Studies Institute Monthly Report, April 2024. [https://www.mitsui.com/mgssi/en/report/detail/\\_icsFiles/afieldfile/2024/05/17](https://www.mitsui.com/mgssi/en/report/detail/_icsFiles/afieldfile/2024/05/17)



## 2.5.4 潮流 D4:次世代元素戦略「循環型材料の開発」

### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



出所) 点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き: 影響が及ぶ方向 (起点から波及先) を示す。  
 矢印上のラベル: 影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-28 技術的進歩と方向性の概要図「循環型材料の開発」

表 2-139 技術的進歩と方向性(概要)「循環型材料の開発」

| 概要  |
|---|
| <p>● 潮流 A: 安定結合活性化による“汎用高分子の選択変換”<br/>                     例えば、ポリオレフィン(ポリエチレンやポリプロピレン)の総称)等の C-C/C-H 結合を選択的に切断・変換する触媒化学が、燃料化(downcycling)から高付加価値化学品(upcycling)へ重心を移しつつ進展している。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 2010 年代後半～: ポリオレフィンの触媒変換が本格化し、C-C 切断(水素化分解等)で液体炭化水素へ選択変換する研究が拡大。</li> <li>✓ 2023: PE/PP 等を脂肪酸へ変換するアップサイクル(高付加価値品側へのシフト)が Science で報告され、酸化・官能基導入系の重要性が増大。</li> <li>✓ 2024: C-C 活性化・機構設計を“精密切断”として整理する視点が現れ、触媒サイト設計・反応ネットワーク・選択性制御が研究主戦場へ。</li> </ul>  |
| <p>● 潮流 B: 分解性高分子設計の主戦場化(化学リサイクル前提の分子設計)<br/>                     使用後にモノマーへ戻せる“化学リサイクル前提設計(chemically recyclable / depolymerizable design)”の考え方が進展している。代表例として、結合交換性動的共有結合を持つ架橋樹脂で、熱硬化性樹脂の強度と熱可塑性樹脂の再加工性を両立するビトリマー(vitriimer)が 2011 年に出現し、難再資源化であった熱硬化性材料・複合材料のリプロセスに道を開いた。また、PDK(ポリジケトエナミン)は添加剤を含む系でもモノマー回収しやすい動的共有結合をもつ材料として 2019 年に出現し、分子設計が回収・分離の困難性を解決する方向性が強化された。現在は、PVC 様材料の可逆共重合など、従来の難リサイクル樹脂を“設計置換”する提案が増加している。</p>  |
| <p>● 潮流 C: 多材料化(複合・多層)に対する分解の考え方<br/>                     現実の廃棄物系は「混合・多層・複合」であり、かつ「汚れ・添加剤・劣化」を含んでいることが、分解・循環において課題である。複合・多層材料の分解に係る技術開発が進展する一方で、欧州委員会共同研究センター(JRC)の技術報告(2023)は、機械リサイクル・物理(溶媒分離/溶解)リサイクル・化学リサイクルを比較し、選択肢は①回収量最大化と処理影響(特にエネルギー消費)最小化、②廃棄物の技術適合性、③経済性の三基準で評価すべきと結論している。「材料設計(design)と回収・処理(infrastructure)と評価(LCA/TEA)の統合」が望まれる。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 2020: 多層包装を溶媒選択で樹脂分離する STRAP(Solvent-Targeted Recovery and Precipitation)が提示され、“分離可能性”をプロセス側で回復する潮流が形成される。</li> <li>✓ 2023: 炭素繊維複合材で、繊維表面とマトリクス界面を動的共有結合化し、界面強度とリサイクル性の両立を狙う報告が提示される。</li> <li>✓ 2023: 欧州の LCA/経済比較では、機械・物理・化学リサイクルを“廃棄物流の特性に応じて使い分けるべき”との実務的結論が明確化される。</li> </ul>   |
| <p>● 潮流 D: ガバナンス・評価が材料設計を規定する段階へ<br/>                     UNEP がプラスチック汚染終結に向けた“システム転換”を提案し、削減・再使用・リサイクルの三つのシフトを通じて循環化を進める枠組みを提示している。また、OECD はプラスチックの生産・使用・廃棄をライフサイクルで捉えた政策分析を行い、循環化に向けた政策パッケージ・シナリオを示している。国内では、プラスチック資源循環法が 2022 年 4 月施行となり、設計(Design for the Environment)から回収・再資源化まで全ライフサイクルを対象化している。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 2015/2020: 欧州は循環経済アクションプランを段階的に更新し、設計—廃棄物管理—市場整備を一体化。</li> <li>✓ 2022: 日本のプラスチック資源循環法が施行され、設計指針(DfE)や回収・再資源化を含む“全ライフサイクル”を制度化。</li> <li>✓ 2023: U.S. Department of Energy は SPI 戦略で Deconstruction/Upcycling/Recyclable-by-Design/Scale&amp;Deploy を明確化し、LCA/TEA を横串要件としている。</li> <li>✓ 2024: JST 俯瞰報告書は「資源循環と炭素循環の両立」を材料分野の重要研究開発に明示し、材料設計と社会実装を統合する方向性を示す。</li> </ul> |

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-140 タイムライン「循環型材料の開発」

| 年    | 主な進展やイベント  |
|------|--|
| 2000 | 日本: 容器包装リサイクル制度が段階施行を経て拡充・定着(容器包装リサイクル法の完全施行を含む)。  |
| 2009 | プラスチックリサイクルの課題(分別・品質・経済性)を整理した学術レビューが普及し、機械リサイクル中心の整理が進む。  |
| 2011 | ビトリマー樹脂(熱硬化性樹脂の強度と熱可塑性樹脂の再加工性を両立した樹脂)が Science で提示。  |
| 2015 | 欧州で循環経済アクションプラン(Closing the loop)が採択され、上流設計と下流廃棄物政策の接続が強化。   |
| 2016 | プラスチック循環に関する国際イニシアチブ(New Plastics Economy)が報告書として可視化され、設計・再使用・再資源化を統合した“システム転換”が議題化。                 |
| 2016 | PET を分解・同化する細菌( <i>Ideonella sakaiensis</i> )と酵素の報告が Science で提示。                                    |
| 2017 | “人類が生産したプラスチックの行方”を定量化(2015 時点で約 9%がリサイクル等)し、循環化の必要性を強い根拠で提示。  |
| 2019 | 動的共有結合をもつ PDK(ポリジケトエナミン)による、添加剤を含む系でもモノマー回収・再重合可能な閉ループ設計が Nature Chemistry で提示。                      |
| 2020 | 欧州: 新循環経済アクションプラン(CEAP 2020)を採択。   |
| 2020 | 多層包装を溶媒選択で分離する STRAP (Solvent-Targeted Recovery and Precipitation)が Science Advances で提示(多材料分離の代表例)。 |
| 2021 | バーゼル条約のプラスチック廃棄物改正が 2021 年 1 月 1 日発効(越境移動管理が強化)。   |
| 2021 | cyclic acetal 可逆重合により、実用強度と CRM(化学リサイクル to モノマー)を両立する設計を Science で提示。                                |
| 2022 | 日本: プラスチック資源循環法が 2022 年 4 月 1 日施行(設計～回収までの全体最適へ)。  |
| 2022 | PET 分解酵素として FAST-PETase が Nature にて報告。   |
| 2023 | UNEP が“Turning off the Tap”で、削減・再使用・リサイクルの三シフトを核にシステム転換を提案。  |
| 2023 | 欧州委員会 JRC が機械/物理/化学リサイクルと、エネルギー回収・環境・経済比較を提示(評価枠組みの標準化が前進)。  |
| 2024 | ポリオレフィンの触媒アップサイクルを体系化する総説(Chemical Reviews)により、技術課題として実廃棄物への適用と触媒寿命が提示。                              |
| 2024 | JST 俯瞰報告書で「資源循環と炭素循環を両立する材料技術」が重要テーマとして明示。   |
| 2026 | PMMA の低温領域でのモノマー回収(光を併用)など、従来高温必須だった樹脂の“低エネルギー解重合”研究が進展。   |

### (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-141 キーテクノロジー「循環型材料の開発」

| 名称                                | 出現時期・背景  | 解説   |
|-----------------------------------|--|--|
| ビトリマー(Vitrimer)                   | 出現時期: 2011年にLeiblerらが「Vitrimer」の概念を初報(動的共有結合交換により熱可塑的流動を示す熱硬化性ネットワーク)。以降2010年代後半～2020年代に各種交換反応系へ拡張。<br>背景: 熱硬化性樹脂のリワーク/修復/再成形と耐熱性の両立、循環性向上への要請から動的共有結合網(associative型)の設計が進展。 | 定義: 結合交換性動的共有結合を持つ架橋樹脂で、熱硬化性樹脂の強度と熱可塑性樹脂の再加工性を両立する材料。<br>課題: 交換反応速度とクリープ、触媒の安定性、複合材での界面設計。<br>課題解決時間推定: 中～長(5～10年)。<br>キー研究: 交換反応機構設計、触媒/触媒レス化、繊維界面官能化、成形・溶着プロセス最適化。 |
| CAN(Covalent Adaptable Network)   | 出現時期: 2000年代後半～2010年前後に「共有結合可変ネットワーク(CAN)」の概念が提案・体系化(解離型/交換型の両系列)。2010年代～に材料群が拡大。<br>背景: 熱硬化ネットワークの修復・再加工・刺激応答を可能にする可逆/交換型共有結合の導入ニーズ。  | 定義: 切断・交換可能な共有結合をネットワークに埋め込み、刺激で再編成可能な架橋材料。<br>課題: 物性と交換性のトレードオフ。<br>課題解決時間推定: 中(3～7年)。<br>キー研究: 反応経路(associative/dissociative)の選択、分子運動性の制御、評価指標の標準化。                |
| PDK(ポリジケトエナミン, Polydiketoenamine) | 出現時期: 2019年に酸条件でモノマー完全回収可能なPDKの閉ループリサイクルを初報(Nature Chemistry)。その後、組成最適化・プロセス検討が進展。<br>背景: 高性能・添加剤許容性と同時に“モノマーへ戻す”CRMの実証例として注目。   | 定義: diketoenamine結合により、酸条件等でモノマーへ戻しやすい“閉ループ型”高分子。<br>課題: モノマー供給網・コスト、解重合条件の最適化、添加剤・混合系での選択回収。<br>課題解決時間推定: 中～長(5～10年)。<br>キー研究: 解重合速度制御、添加剤分離、工業的プロセス設計(溶媒/酸回収等)。    |
| CRM設計(化学リサイクル to モノマー)            | 出現時期: 2010年代に「設計段階からモノマー回収を前提にする」コンセプトが普及し、2019年以降PDK等で実証、2020年代に設計指針のレビュー・政策連動が加速。<br>背景: 循環経済・資源制約・政策要請(EU/各国)を背景に、加水分解/交換/開環等で低エネルギーにモノマー化できる骨格設計が重視。                     | 定義: 使用後に高純度モノマーへ戻せる設計(可逆重合・熱力学制御・触媒設計)。<br>課題: 低温化、混合廃棄物中での選択性、工程短縮。<br>課題解決時間推定: 中(3～7年)。<br>キー研究: 天井温度/床温度設計、触媒の分離再使用、混合系での選択的解重合。                                 |
| RD-CROP系ポリアセタール                   | 出現時期: 2023～2024年にRD-CROPを活かした高分子量ポリアセタールの合成と温和条件での脱重合(モノマー回収)報告が相次ぐ。<br>背景: ホルミル/アセタール結合の可逆性を利用し、安定使用と脱重合の両立によるCRM実装の一系統として注目。   | 定義: cyclic acetalを可逆的に重合・解重合させ、強度とモノマー回収を両立した樹脂。<br>課題: 実廃棄物汚染物耐性、触媒/開始剤残渣管理。<br>課題解決時間推定: 中(3～7年)。<br>キー研究: 触媒回収・毒性/規制対応、反応条件の低エネルギー化。                              |

| 名称                           | 出現時期・背景   | 解説   |
|------------------------------|---|--|
| ポリオレフィン水素化分解(Hydrogenolysis) | 出現時期: 2019~2021年にRu系など触媒でPE/PPを200-300°C級でアルカン/ワックスへ高選択的に転換する報告が集積。<br>背景: 最大ポリウムのPE/PPを高品質炭化水素に還元し、資源循環・価値化(燃料/潤滑油/ワックス)を図る触媒変換の柱。                           | 定義: 金属触媒でC-Cを切断し、液体炭化水素・ワックス等へ変換する技術。<br>課題: 触媒被毒、メタン化抑制、選択性を“製品設計”に合わせる。<br>課題解決時間推定: 中~長(5~10年)。<br>キー研究: 触媒サイト設計、反応器/水素供給設計、実廃棄物での寿命評価。                   |
| ポリオレフィン酸化アップサイクル(脂肪酸/ジカルボン酸) | 出現時期: 2021年前後から酸化(autoxidation/金属触媒等)によりPE等を長鎖脂肪酸・ジカルボン酸・界面活性剤前駆体へ機能化する例が台頭、2023-2024年にレビューが整理。<br>背景: 低付加価値の熱分解油ではなく官能基導入で高付加価値化学品に変換するアップサイクル指向。            | 定義: 酸化反応で官能基導入し、潤滑・コーティング・ポリアミド前駆体等高付加価値化する技術。<br>課題: 過酸化・過分解(CO/CO <sub>2</sub> 化)、炭素収率、スケール安全。<br>課題解決時間推定: 中(3~7年)。<br>キー研究: 反応ネットワーク制御、酸素供給/熱管理、連続プロセス化。 |
| ポリオレフィン→軽質オレフィン(メタセシス連結等)    | 出現時期: 2021年にPEをプロピレンへと選択的に転換する逐次脱水素化/アイソメリ化/エテノリシス(メタセシス)プロセスがScienceで報告。<br>背景: 既存クラッキング由来のプロピレン不足とカーボンフットプリント低減の観点から、既存PE資源の軽質オレフィン化が注目。                    | 定義: アルカン脱水素+メタセシス等を組み合わせ、ポリオレフィンを軽質炭化水素へ分解する技術。<br>課題: 触媒系の複雑性、分離・精製、プロセス統合。<br>課題解決時間推定: 長(7~15年)。<br>キー研究: 触媒階層設計、反応/分離統合(プロセス強化)。                         |
| 物理リサイクル(溶媒分離/溶解、STRAP等)      | 出現時期: 2017年に多層プラ等を溶媒選択で個別樹脂へ回収するSTRAP系プロセスが報告。その後、LCA/TEA/政策報告で位置づけが整理。<br>背景: 混合・多層材の高品質リユースを狙い、溶媒選択・沈殿制御でポリマーを劣化させずに分別回収。                                   | 定義: 多材料を溶媒の選択溶解で分離し、樹脂ごとに回収する手法。<br>課題: 溶媒回収、エネルギー、印刷・添加剤の影響。<br>課題解決時間推定: 中(3~7年)。<br>キー研究: 溶媒循環設計、低温分離、汚染耐性、LCA/TEA最適化。                                    |
| PET酵素解重合(FAST-PETase等)       | 出現時期: 2016年にPET分解菌のPETaseがScienceで報告。2022年に低温・広pHで高活性なFAST-PETaseがNatureで報告、2020年代にスケール実証・変異設計が進展。<br>背景: エネルギー効率・選択性に優れた生分解/酵素触媒によるPETのモノマー(TPA/EG)回収の実用化期待。 | 定義: 酵素でPETをモノマーへ分解する技術。<br>課題: 高結晶PET・高固形分・不純物耐性、酵素回収。<br>課題解決時間推定: 中(3~7年)。<br>キー研究: 酵素工学(耐熱/速度)、前処理(結晶制御)、反応器設計。   |
| 化学的リサイクル可能PVC様材料             | 出現時期: 「PVC同等物性かつ化学的モノマー回収」を満たす明確な代表系は限定的。2010年代後半~2020年代に“循環設計のビニル系”概念検討・個別報告はあるが、PVC同等の大規模代表例は確認困難。<br>背景: 塩素含有・安定C-Cl結合ゆえの処理課題を回避しつつ、物性とリサイクル性を両立する設計探索が続く。 | 定義: PVCの低リサイクル性を踏まえた、可逆共重合で“PVC様機能×解重合性”を持つ代替材料。<br>課題: 実用途物性、規格・安全性、既存PVC用途の置換。<br>課題解決時間推定: 長(7~15年)。<br>キー研究: 代替材料の毒性・規制適合、長期耐久と解重合の両立。                   |

| 名称                             | 出現時期・背景  | 解説  |
|--------------------------------|--|---|
| 低温モノマー回収(例: PMMA の光支援技術等)      | 出現時期: 2024 年に光支援や末端設計を用い、温和条件で PMMA 等からモノマーを高選択で回収する報告が登場。<br>背景: ラジカル末端・可逆反応・光/触媒支援により脱重合温度を大幅低減し、省エネなマテリアル循環を狙う。   | 定義: 従来高温が必須の解重合を、光などで低温化しエネルギーを削減する技術。<br>課題: 光照射・酸素管理、スケール均一性。<br>課題解決時間推定: 中～長(5～10 年)。<br>キー研究: 反応器(光/熱)設計、連続化、エネルギー収支最適化。 |
| CO2 由来ポリカーボネート/ポリウレタン等(炭素循環統合) | 出現時期: 2000 年代後半～2010 年代に CO2/エポキシド共重合 PC が技術確立・商業化。<br>2020 年前後から CO2 由来ポリオール→PU 等の展開と LCA 整理が進展。<br>背景: カーボンリサイクルの実装として CO2 を原料化し、化石依存低減とカーボンインデックス改善を図る動き。 | 定義: CO2 を原料化した機能性ポリマー。<br>課題: 価格競争力、CO2 供給・純度、LCA での優位性確保。<br>課題解決時間推定: 長(7～15 年)。<br>キー研究: 触媒・プロセススケール、電化熱源、CO2 供給網統合。       |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-142 実用化可能性「循環型材料の開発」

| 名称                       | 解説   |
|--------------------------|--|
| 飲料・食品容器(PET 中心)          | ユースケース: ボトル to ボトル、トレイ/シート回収。<br>波及: 包装、繊維(ポリエステル)、化学。<br>鍵技術: 酵素解重合(FAST-PETase 等)や溶媒/加水分解ルート。<br>課題: 結晶性・添加剤・着色、ラベル/接着剤の影響、反応の高固形分化。<br>展望: 触媒/酵素の高速化と前処理統合により、閉ループの範囲拡大が見込まれるが、回収・分別インフラと品質規格が同時に必要。  |
| 多層フィルム・軟包装               | ユースケース: 多層(PE/PA/PET 等)包装の樹脂別回収、または化学リサイクル原料化。<br>波及: 食品包装、日用品、物流。<br>鍵技術: STRAP 等の溶媒分離(物理リサイクル)+残渣の化学・熱分解統合。<br>課題: 溶媒回収率、インク・添加剤の影響、エネルギー消費と LCA 整合。<br>展望: JRC 評価が示す通り、廃棄物流特性に応じて機械/物理/化学を“競合ではなく役割分担”させる設計が合理的。  |
| 自動車(内装 PP/PE、エンブラ、接着・複合) | ユースケース: バンパー・内装材再生、複合部材の分離解体、軽量化と循環の両立。<br>波及: 自動車、化学、リサイクル産業。<br>鍵技術: ポリオレフィンのアップサイクル触媒、混合材 compatibilizer(相容化剤)設計、分解容易接着。<br>課題: 多材料・難分解接着、難燃・添加剤による被毒/品質低下。<br>展望: DOE は“Deconstruction/Upcycling/Recyclable-by-Design”とスケール展開を戦略化しており、材料設計と回収・選別技術の同時投資が前提となる。 |

| 名称                                   | 解説   |
|--------------------------------------|--|
| 航空・風力・スポーツ<br>(CFRP/GFRP 等の<br>複合材料) | <p>ユースケース: CFRP の修復・再成形、繊維回収と再複合化。<br/> 波及: 航空、エネルギー(風車)、モビリティ。<br/> 鍵技術: ビトリマー/動的架橋マトリクス、界面官能化で“強度×可逆”を設計。<br/> 課題: 高温耐久と交換反応性のトレードオフ、厚肉材での均一反応、繊維・樹脂の品質保証。<br/> 展望: 近年の CFR ビトリマー複合材研究は界面接着と閉ループ性を同時に狙う方向で進むが、量産成形条件と規格認証が長期課題。</p>  |
| 化学産業(原料転換・<br>クラッカー、炭素循環<br>統合)      | <p>ユースケース: 廃プラ→基礎化学品、CO<sub>2</sub>→機能性化学品(PC/PU 等)、脱炭素熱源クラッカー。<br/> 波及: 石化、素材、エネルギー。<br/> 鍵技術: CCU(CO<sub>2</sub> 回収・利用)、熱源電化/水素・アンモニア熱源、廃プラのガス化/熱分解。<br/> 課題: CAPEX(設備投資)負担、CO<sub>2</sub> 供給・純度、LCA での実質削減、生成物精製。<br/> 展望: NEDO プロジェクトは 2030 年代に向けたデモ規模(千~万トン/年等)目標を提示しており、技術成熟は“装置・供給網・評価(LCA)”の統合スピードに依存。</p> |
| 難リサイクル樹脂<br>(PVC、熱硬化性、混<br>合材)       | <p>ユースケース: “材料置換(design substitution)”による循環化、または分解容易化。<br/> 波及: 建材、医療、電材。<br/> 鍵技術: PVC 様可逆材料、低温解重合、動的結合材料。<br/> 課題: 規格置換、性能・耐久、毒性/化学物質管理。<br/> 展望: 新材料設計は長期だが、成功すれば回収・分離工程の負担を根本から軽減し得る一方、既存用途の移行コストが支配的となる。</p>  |

## (5) インタビュー結果を踏まえた今後の潮流および研究の方向性

中核研究者へのインタビュー結果に基づき、今後 5 年から 10 年の潮流および研究の方向性を整理した。

表 2-143 今後の潮流および研究の方向性「循環型材料の開発」

| 項目  | 概要   |
|---|--|
| 新たに浮上している、または今後 5 年から 10 年の間に浮上すると考えられる技術トレンド、技術的ブレークスルーの可能性、技術面の障壁、規制・倫理も含む非技術面の障壁 | <p>■難リサイクル材の循環技術<br/>多層、マルチマテリアル、極限環境(宇宙・極地)や特殊用途に用いられる極めて安定な高機能樹脂等に対するリサイクル技術の開発が期待される。安定的な状態が求められる特殊用途のプラスチック材料等は、これまで物質循環の考え方がされてなかったが、これらに対しても循環型材料の研究が最近進んできた。例えば、動的共有結合(ビトリマー等)の活用が期待される。ポリロタキサン構造(環状分子が鎖上を可動する構造)を用いたタフ化と分解性制御の研究や、ナイロンの海洋生分解性に関する ImPACT/ムーンショットの研究が進められている。</p> <p>■自然由来の材料の活用<br/>木質バイオマス(セルロース、リグニン等)を有効活用した材料開発は過去から継続して行われており、近年も技術進歩がある。</p> |
| 他分野研究連携の必要性   | 高分子は秩序を持たない構造であることや、さまざまな機能が発現することから、無機物や結晶に比べて計算コストも高く、MI(マテリアルインフォマティクス)の活用が他の分野よりも遅れている。  |
| わが国のアセット(人材・インフラ等)と国外プレイヤー・チームとの比較  | サーキュラエコノミーの方針や動向はヨーロッパを中心に動いており、循環型材料開発のトレンドも影響を受けてしまう印象である。   |
| 今後5年から10年の間において潮流となり得る研究の方向性  | <p>■アップサイクルのターゲット起点での分子構造・分解設計<br/>アップサイクルとしての用途(ターゲット)起点で、分子構造や分解・変換プロセスを設計する、ということが新たな潮流となり得るかもしれない。</p> <p>■社会的要請による企業との連携<br/>法規制側の要求(リサイクル材料の使用率等)で、企業からの循環型材料に係る研究者への相談は増えている。企業ニーズとしては、実験室サイズのプロセスをスケールアップさせるところまで取り組む必要があるが、研究者がどこまで取り組むのがよいのかは現時点では分からない。</p>   |
| 今後の当該分野において優先すべき研究課題・支援形態   | 経済合理性の点から、低コスト・低エネルギーの循環技術が期待される。バイオマス利用や、空気資源(CO <sub>2</sub> ・N <sub>2</sub> 等)の素材化、微生物・発酵を含むバイオプロセスの開発は、資源の少ない日本で重要と考える。バイオものづくりの経済性の改善が期待される。触媒研究者へポリマーの分解への参画を促すためには、論文になる、研究費が得られる、というモチベーションが必要。  |

## (6) 出所

- JST 研究開発戦略センター(CRDS). 研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野(2024年). <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2024-FR-04.html>
- Sun, J. et al. Catalytic Upcycling of Polyolefins. Chem. Rev. 2024, 124, 16, 9457-9579. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.3c00943>
- Montarnal, D. et al. Silica-Like Malleable Materials from Permanent Organic Networks. Science 334, 965-968 (2011). <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1212648>
- Christensen, P. R. et al. Closed-loop recycling of plastics enabled by dynamic covalent diketoenamine bonds. Nat. Chem. 11, 442-448 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41557-019-0249-2>
- NEDO. Development of Technology for Producing Raw Materials for Plastics

Using CO2 and Other Sources. <https://green-innovation.nedo.go.jp/en/project/development-plastic-raw-material-manufacturing/>

- Garcia-Gutierrez, P. et al. Environmental and economic assessment of plastic waste recycling: A comparison of mechanical, physical, chemical recycling and energy recovery of plastic waste. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/bb91bc32-b19f-11ed-8912-01aa75ed71a1/language-en>
- United Nations Environment Programme. Turning off the Tap: How the world can end plastic pollution and create a circular economy. 2023. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/42277>
- Yoshida, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science* 351, 1196-1199 (2016). <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aad6359>
- OECD. Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options. 2022. <https://doi.org/10.1787/de747aef-en>
- 環境省. The Plastic Resource Circulation Act (Act No. 60 of 2021). [https://www.env.go.jp/en/focus/jeq/issue/vol29/The%20Plastic%20Resource%20Circulation%20Act\\_0128%20final.pdf](https://www.env.go.jp/en/focus/jeq/issue/vol29/The%20Plastic%20Resource%20Circulation%20Act_0128%20final.pdf)
- Ellis, L. D. et al. Chemical and biological catalysis for plastics recycling and upcycling. *Nat Catal* 4, 539–556 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41929-021-00648-4>
- Highmoore, J. F. et al. Design of depolymerizable polymers toward a circular economy. *Green Chem.*, 2024,26, 2384-2420. <https://doi.org/10.1039/D3GC04215D>
- Rahman, M. A. et al. Tough and recyclable carbon-fiber composites with exceptional interfacial adhesion via a tailored vitrimer-fiber interface. *Cell Reports Physical Science*, Volume 4, Issue 12, 2023, 101695. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2023.101695>
- Walker, T. W. et al. Recycling of multilayer plastic packaging materials by solvent-targeted recovery and precipitation. *Sci. Adv.* 6, eaba7599 (2020). <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aba7599>
- Abel, B. et al. Chemically recyclable thermoplastics from reversible-deactivation polymerization of cyclic acetals. *Science* 373, 783-789 (2021). <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abh0626>
- Xu, Z. et al. Chemical upcycling of polyethylene, polypropylene, and mixtures to high-value surfactants. *Science* 381, 666-671 (2023). <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adh0993>
- Ran, H. et al. Precise activation of C–C bonds for recycling and upcycling of plastics. *Chem. Sci.*, 2024,15, 795-831. <https://doi.org/10.1039/D3SC05701A>
- Zhang, X. et al. Chemically recyclable polyvinyl chloride-like plastics. *Nat Commun* 15, 8536 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-52852-y>
- European Commission. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS: Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy. 2015. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52015DC0614>
- U.S. Department of Energy. Strategy for Plastics Innovation Report. 2023. [https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-01/DOE-strat-for-plastics-innova\\_1-19-23.pdf](https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-01/DOE-strat-for-plastics-innova_1-19-23.pdf)
- 公益財団法人 日本容器包装リサイクル協会. Profile. <https://www.jcpra.or.jp/english/profile.html>
- Hopewell, J. et al. Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 27 July 2009; 364 (1526): 2115–2126. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>
- World Economic Forum, Ellen MacArthur Foundation and McKinsey & Company. The New Plastics Economy: Rethinking the Future of Plastics. 2016. <https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/1775fbba280fa21/original/Th>

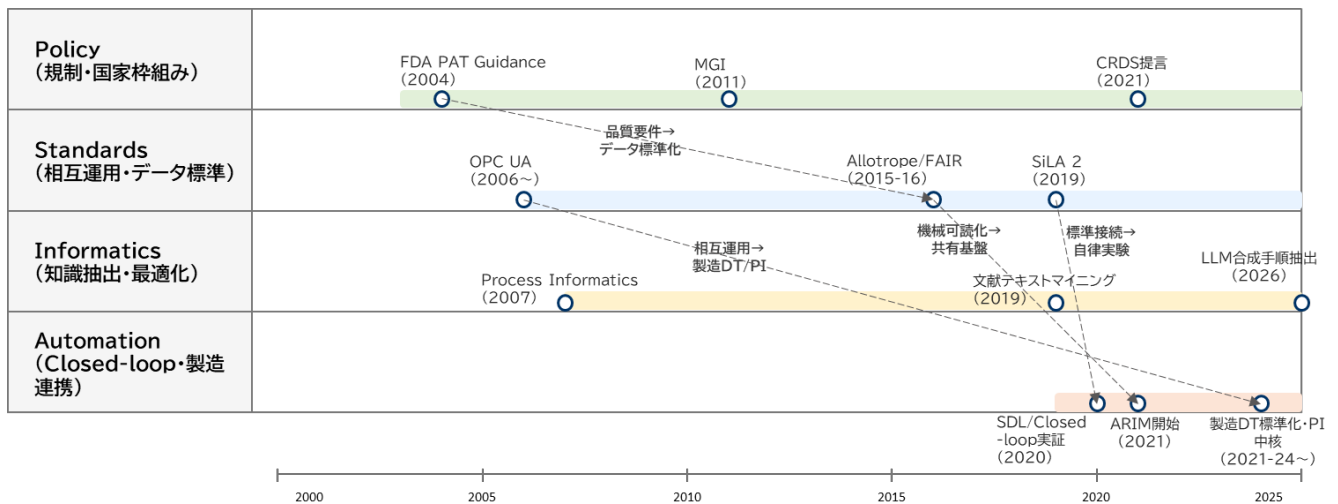
e-New-Plastics-Economy-Rethinking-the-future-of-plastics.pdf

- Geyer, R. et al. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* 3, e1700782 (2017). <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1700782>
- European Commission. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS: A new Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe. 2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX%3A52020DC0098>
- Secretariat of the Basel Convention. Plastic Waste Amendments: FAQs. <https://www.basel.int/implementation/plasticwaste/plasticwasteamendments/faqs/tabid/8427/default.aspx>
- United Nations Environment Programme. Intergovernmental Negotiating Committee on Plastic Pollution. <https://www.unep.org/inc-plastic-pollution>
- Lu, H. et al. Machine learning-aided engineering of hydrolases for PET depolymerization. *Nature* 604, 662–667 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04599-z>
- Husband, J. et al. Photo-initiated solvent-mediated depolymerization of consumer poly(methyl methacrylate) without chlorinated reagents. *Nat Commun* 17, 1235 (2026). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-67997-7>
- Elling, B. R., Dichtel, W. R. Reprocessable Cross-Linked Polymer Networks: Are Associative Exchange Mechanisms Desirable?. *ACS Cent. Sci.* 2020, 6, 9, 1488–1496. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.0c00567>
- Conk, R. J. et al. Polyolefin waste to light olefins with ethylene and base-metal heterogeneous catalysts. *Science* 385, 1322–1327 (2024). <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adq7316>

## 2.5.5 潮流 D5: データ駆動型物質・材料開発「プロセス・インフォマティクスの進展」

### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



※バーは「顕著に発展・活用が進んだ時期」の目安である。

出所) 点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。

矢印の向き: 影響が及ぶ方向(起点から波及先)を示す。

矢印上のラベル: 影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-29 技術的進歩と方向性の概要図「プロセス・インフォマティクスの進展」

表 2-144 技術的進歩と方向性(概要)「プロセス・インフォマティクスの進展」

| 概要   |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● 2000 年代前半:品質保証とリアルタイム計測の制度化が先行。医薬分野では米国食品医薬品局(FDA)の PAT 枠組み(2004)が、オンライン計測・解析・制御の導入を後押しし、後の「プロセスデータを前提にした最適化」の規範を形成した(FDA PAT Guidance)。</li> <li>● 2000 年代後半:産業オートメーション側で相互運用標準が整備。OPC UA(2006~)は装置・センサーと上位系のデータ連携を標準化し、ラボ~製造をつなぐ土台となった(OPC UA specification history)。</li> <li>● 2011 年以降:材料設計側(MI)を起点にデータ駆動が加速。MGI(2011)により、材料データ基盤・計算・実験の統合という国家的枠組みが普及し、「設計→合成→評価」の一体化が課題として顕在化した(MGI Fact Sheet; CRDS 俯瞰)。</li> <li>● 2015~2016 年:データの機械可読化・再利用性が国際標準へ。Allotrope(分析データ標準化)や FAIR 原則(2016)が、データ交換・メタデータ・語彙整合の重要性を明示し、プロセスデータ共有の前提条件を整理した(Wilkinson et al., 2016; ADF 版履歴)。</li> <li>● 2019 年:ラボ自動化の「標準的接続」が具体化。SiLA 2 安定版(2019)はラボ機器制御・データ交換の標準化を進め、デジタルラボ移行コスト低減を狙った(SiLA2 release; 実装例)。</li> <li>● 2019 年:文献知識のデータ化が現実的な手段に。材料文献から潜在知識を抽出する教師なし NLP (Nature 2019)は、プロセス条件の「文献マイニングによる補完」(データ不足対策)を後押しした(Tshitoyan et al., 2019)。</li> <li>● 2020 年:自律実験が実証フェーズへ。薄膜材料での自己駆動型実験室(Science Advances 2020)などが、ベイズ最適化×ロボティクス×計測の閉ループ統合を示した(MacLeod 2020; Flores-Leonar 2020)。</li> <li>● 2021 年:日本では「プロセス探索」を明示した戦略化が進展。CRDS 提言(2021)は、プロセス変数の膨大さ・多段工程の相互影響・データ収集標準化を研究課題として提示し、拠点/共通基盤の必要性を明確化した(CRDS 2021)。</li> <li>● 2021 年~:データ創出と共用の国家基盤が整備。ARIM(2021 開始)では、リモート・自動化・HTE 対応設備の導入と、データ構造化・提供が事業目的として明記された(ARIM 事業概要; 文科省発表)。</li> <li>● 2021~2024:製造連携に向けたデジタルツインの標準化が進む。米国国立標準技術研究所(NIST)は ISO 23247 に基づく製造デジタルツインの定義を整理し、相互運用性・セキュリティ等の非機能面が既存実装で弱いことを課題として報告した(NIST 2024)。</li> <li>● 2024~現在:PI は「実験 DX」の中核要素として位置づけ。CRDS 俯瞰(2024)は、PI が MI/計測インフォマティクスと連携すべきであること、プロセスデータ不足・失敗データ欠落・IoT 化/テキストマイニング/自動化・自律化が鍵であることを明示した(CRDS 2.5.3)。</li> <li>● 2026 年:合成手順の大規模抽出が高精度化。LLM を用いた材料合成ルート抽出で高い精度指標が報告され、文献からのプロセス知識獲得が「補助」から「基盤データ生成」へ拡大しつつある(Communications Materials 2026)。</li> </ul> |

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-145 タイムライン「プロセス・インフォマティクスの進展」

| 年    | 主な進展やイベント   |
|------|---|
| 2003 | FDA が PAT の Draft Guidance を公表(制度議論開始)。                 |
| 2004 | FDA が PAT Guidance を公開。                                 |
| 2006 | OPC UA 仕様の初期リリース。                                       |
| 2007 | Process Informatics 概念が学術文献で提示(用語の初期例)。                 |
| 2011 | Materials Genome Initiative(MGI)発表(データ駆動材料開発の国家枠組み)。    |
| 2014 | MGI Strategic Plan 公開。                                  |
| 2015 | Allotrope Data Format(ADF)1.0 公開。                       |
| 2016 | FAIR 原則が Scientific Data で提案。                           |
| 2018 | FDA が PAT Guidance を公式サイトで再掲(参照枠組みとして定着)。               |
| 2019 | SiLA 2 安定版リリース。   |
| 2019 | Chemputer(化学プログラミングによるモジュラー合成ロボット)が Science で報告。        |
| 2019 | 材料文献の教師なし埋め込み(mat2vec)が Nature で報告。                     |
| 2020 | 自己駆動型実験室(薄膜材料)が Science Advances で実証。                   |
| 2020 | Materials Acceleration Platform(MAP)の体系化。               |
| 2021 | CRDS が PI 戦略提言を公表(共通基盤・拠点構想)。                           |
| 2021 | ARIM 開始(装置共用+データ構造化)。                                   |
| 2024 | CRDS 俯瞰で PI・IoT 化・テキストマイニング・Closed-loop が実験 DX 要素として明記。 |
| 2025 | 文科省/内閣府資料でマテリアル DX・MPI の進捗指標が公表。                        |

## (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-146 キーテクノロジー「プロセス・インフォマティクスの進展」

| 名称          | 出現時期・背景  | 定義   |
|-------------|--|--|
| PI 基盤手法     | 出現時期: 2003~2007 頃に医薬品製造の PAT とともに定着。<br>背景: 製造プロセスのオンライン計測と統計・機械学習により知識化し、QbD/リアルタイム品質保証を実現する流れ。                                   | 定義: 合成プロセスを統合科学+データ科学で効率探索。<br>課題: 多変数・多段工程・失敗データ欠落。<br>推定時間: 5-10 年。<br>キーになる研究テーマ: プロセス表現、失敗データ整備、標準化。 |
| プロセス記述子設計   | 出現時期: 2010 年代に材料/プロセス情報学の普及とともに進展、2014 年以降は Allotrope 等のデータ標準で加速。<br>背景: 機械学習や知識統合のためにプロセス条件・操作を機械可読な記述子として定義する必要性(FAIR/セマンティック化)。 | 定義: 条件履歴・装置依存性を機械学習入力へ表現。<br>課題: 多段工程表現。<br>推定時間: 3-7 年。<br>キーになる研究テーマ: 時系列・階層表現、因果制約。                   |
| バイズ最適化/能動学習 | 出現時期: 2010 年代半ばに実験設計へ本格適用、2018~2020 年に材料・化学で普及。<br>背景: 実験コストの高い探索における試行回数削減・サンプル効率化の要請。SDL/HTE の中核手法として採用。                         | 定義: 代理モデル+獲得関数で次実験を選ぶ。<br>課題: 多目的・制約・バッチ。<br>推定時間: 3-5 年。<br>キーになる研究テーマ: 制約付き BO、頑健最適化、ベンチマーク。           |

| 名称                   | 出現時期・背景  | 定義   |
|----------------------|--|--|
| Closed-loop 実験運用     | 出現時期: 2010年代後半に概念実証、2020年頃から薄膜・触媒等で実用的デモが拡大。<br>背景: 計測—学習—計画—実行を自動連携し、連続的に仮説検証・最適化する需要の高まり。                        | 定義: 計画→実行→学習→次条件を一体運用。<br>課題: 例外処理、安全、監査ログ。<br>推定時間: 3-7年。<br>キーになる研究テーマ: 運用標準、監視・回復、自律化。  |
| SDL(自己駆動型実験室)        | 出現時期: 2017年前後に概念が広まり、2020年に代表例、2024-2025年に包括的レビュー・ロードマップが整備。<br>背景: ロボティクス、HTE、計測、自動計画、BO/ALの統合により探索速度の飛躍的向上を狙う流れ。 | 定義: ロボット・計測・最適化を統合した自律ラボ。<br>課題: 汎用性、コスト、標準化。<br>推定時間: 5-10年。<br>キーになる研究テーマ: モジュール化、再利用設計、低コスト化。                                 |
| HTE+計測インフォマティクス      | 出現時期: 1990年代から高スループット合成・スクリーニングが進展、2010年代にMGI/PATで加速。<br>背景: 多因子探索を高速化し、同時にオンライン/オフライン計測を情報学で統合・解析。                | 定義: 大量計測をMLで高速解釈。<br>課題: 教師データ不足、ドメインシフト。<br>推定時間: 3-7年。<br>キーになる研究テーマ: 自己教師あり、多モーダル融合、UQ(Uncertainty Quantification: 不確かさの定量化)。 |
| 装置通信標準(SiLA 2)       | 出現時期: 2018年前後にSiLA 2策定・実装が進み、2020年に普及促進。<br>背景: ラボ装置のプラグ&プレイ化・自動化連携を実現するための共通API/プロトコル整備。                          | 定義: 装置制御/データ交換標準。<br>課題: レガシー対応、ベンダー差。<br>推定時間: 2-5年。<br>キーになる研究テーマ: 相互運用試験、標準API、セキュリティ。  |
| 製造側相互運用(OPC UA)      | 出現時期: 2006年にOPC UA公開、2010年代に産業用相互運用基盤として広範に採用。<br>背景: 産業機器のセキュアで拡張可能なデータモデル/通信基盤により工場のデジタル統合を推進。                   | 定義: 産業装置の通信/情報モデル標準。<br>課題: ラボ標準との橋渡し。<br>推定時間: 2-5年。<br>キーになる研究テーマ: 統合設計、認証、リアルタイム性。  |
| セマンティック標準(Allotrope) | 出現時期: 2014年以降、Allotrope Data Format/Frameworkの整備が進展。<br>背景: 規制産業を含むラボデータの機械可読化・メタデータ/語彙一貫性確保と長期再利用の要請。             | 定義: 分析データ標準(ADF 1.0:2015)+語彙(AFO)で意味整合。<br>課題: 導入コスト、カバレッジ。<br>推定時間: 3-7年。<br>キーになる研究テーマ: 変換ツール、最小語彙セット。                         |
| FAIR+プロベナンス自動化       | 出現時期: FAIR原則は2016年に提示、2018-2024年に計測・ワークフローと連携した自動記録が普及。<br>背景: 再現性・再利用性を担保するため、実験手順・計測・解析履歴(PROV/ADF等)の自動取得・連携が重視。 | 定義: FAIR(2016)+系譜管理で再利用性を最大化。<br>課題: 入力コスト、語彙整備。<br>推定時間: 3-5年。<br>キーになる研究テーマ: 自動メタデータ、PID、監査証跡。                                 |
| 文献テキストマイニング          | 出現時期: 2010年代後半に深層学習の進展で材料・化学分野へ本格展開、2019年に代表的成果。<br>背景: 文献から材料特性・関係・暗黙知を抽出し、探索や設計へ活用。                              | 定義: 文献から条件・結果を抽出。<br>課題: 表記揺れ、単位統一、ライセンス。<br>推定時間: 2-5年。<br>キーになる研究テーマ: 評価データセット、抽出ベンチマーク。                                       |
| 合成レシピ抽出              | 出現時期: 2018-2021年に実験記述から操作列(アクション)を自動抽出する研究が進展。<br>背景: SDL/自動合成の前段として、自然言語の手順を機械実行可能な表現へ変換する需要。                     | 定義: 合成手順をグラフ化。<br>課題: 暗黙条件、装置依存性。<br>推定時間: 5-10年。<br>キーになる研究テーマ: 手順表現、実行可能性推定、ロボット接続。  |

| 名称            | 出現時期・背景  | 定義  |
|---------------|--|---|
| 材料・プロセス知識グラフ  | 出現時期: 2018 年以降に分野別 KG の構築が拡大、2020 年代に統合知識基盤化が進行。<br>背景: 異種データ(文献・実験・製造)の関係表現と推論を通じた発見支援・設計支援の要求。                     | 定義: 多源データを KG で統合。<br>課題: 品質、版管理、因果推論。<br>推定時間: 5-10 年。<br>キーになる研究テーマ: オントロジー整合、推論、ガバナンス。           |
| デジタルツイン(製造連携) | 出現時期: 2010 年代に概念普及、2018 年以降に製造 DX と結合し実装が拡大。<br>背景: 製造プロセスのサイバー・フィジカル統合とモデル連携(OPC UA 等)により設計-製造-品質を循環させる狙い。          | 定義: 製造要素と同期する目的適なデジタル表現。<br>課題: 同化・検証、標準適合。<br>推定時間: 5-10 年。<br>キーになる研究テーマ: 同化、モデル階層、標準拡張。          |
| データガバナンス+秘匿学習 | 出現時期: 2016 年頃から連合学習/プライバシー保護学習の応用が検討され、2020 年代に産学で関心拡大。<br>背景: 複数機関間でのデータ共有制約下での学習・共同研究を可能にするための枠組み(ガバナンス、匿名化、FL 等)。 | 定義: オープン&クローズ戦略と分散学習で機密を守りつつ知識統合。<br>課題: 契約・運用、攻撃耐性。<br>推定時間: 3-7 年。<br>キーになる研究テーマ: 標準契約、PPML 評価指標。 |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-147 実用化可能性「プロセス・インフォマティクスの進展」

| セクター                 | ユースケースや波及が期待される産業領域  |
|----------------------|--|
| 医療・医薬品(創薬・製剤・バイオ)    | ユースケース例: 結晶多形制御、製剤プロセス最適化、PAT 連動の連続製造、培養条件の逐次最適化。<br>課題: 規制/品質要求により、PAT 計測・モデル・変更管理(モデル更新ルール)・監査証跡が必須。       |
| 化学・素材(触媒・高分子・セラミックス) | ユースケース例: 触媒合成条件探索、焼成/成膜条件の最適化、反応器条件の多目的最適化。<br>課題: 粉体・多相系の自動化が難所。プロセス変数が多く、失敗データ蓄積が鍵。                        |
| 電池・エネルギー材料           | ユースケース例: 電極スラリー配合~乾燥等の工程最適化、固体電解質合成条件探索。<br>課題: 工程履歴(時系列)が支配しやすく、履歴表現と不確かさ付き探索(安全制約)が重要。                     |
| 半導体・電子材料             | ユースケース例: 薄膜成膜条件(スパッタ等)探索、欠陥・界面制御、プロセスウィンドウ最大化。<br>課題: 装置依存性が強く、装置ログ標準化とドメイン適応が焦点(ラボ標準と製造標準の橋渡しが必要)。          |
| 機械製造(合金・熱処理・表面改質)    | ユースケース例: 熱処理条件最適化、接合条件探索、表面処理の均一化。<br>課題: 既存生産ラインとの接続は OPC UA 等の標準に寄るため、デジタルツインでの同化・検証と標準適合が重要。              |
| 金属 AM(積層造形)・複合加工     | ユースケース例: レーザー条件・走査戦略最適化、欠陥低減、粉末特性×造形条件探索。<br>課題: マルチフィジックスが支配的で、物理インフォームド ML やハイブリッドモデルの価値が相対的に高い。           |
| 宇宙開発・航空宇宙            | ユースケース例: 耐熱・耐放射線材料のプロセス最適化、軽量複合材の製造条件探索、信頼性データ長期蓄積。<br>課題: 試行コストが高くデータが希少なため、多忠実度(シミュレーション×少数実験)で探索を成立させる必要。 |

| セクター                              | ユースケースや波及が期待される産業領域   |
|-----------------------------------|---|
| 社会インフラ(建設材料等)                     | ユースケース例: 配合と養生プロセス最適化、耐久性予測、現場環境データ連動の品質管理。<br>課題: 現場データのノイズ・欠測が大きく、IoT 化とデータガバナンス(共有範囲・責任)が前提。         |
| 資源循環・環境(リサイクル、CO <sub>2</sub> 利用) | ユースケース例: 分離・回収プロセス探索、触媒/電解材料のプロセス最適化、品質ばらつき抑制。<br>課題: 原料変動が大きく、頑健最適化とオンライン適応、そして多目的最適化(性能×コスト×環境負荷)が必要。 |

## (5) 出所

- JST 研究開発戦略センター(CRDS). 研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野 (2024 年) / 2.5.3 データ駆動型物質・材料開発.  
[https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-04/CRDS-FY2024-FR-04\\_20503.pdf](https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-04/CRDS-FY2024-FR-04_20503.pdf)
- 国立研究開発法人物質・材料研究機構. マテリアル先端リサーチインフラ(ARIM) / 本事業について. <https://www.nims.go.jp/arim/about/arim.html>
- JST 研究開発戦略センター(CRDS). 戦略プロポーザル 材料創製技術を革新するプロセス科学基盤 - プロセス・インフォマティクス -. 2021.  
<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2021/SP/CRDS-FY2021-SP-01.pdf>
- Shao, G. Manufacturing Digital Twin Standards. In Proceedings of the ACM/IEEE 27th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS Companion '24). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 370–377. 2024.  
<https://doi.org/10.1145/3652620.3688250>
- 文部科学省. マテリアル革新力強化戦略の改定について. 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 第13期ナノテクノロジー・材料科学技術委員会(第1回). 令和7年5月28日. [https://www.mext.go.jp/content/20250605-mxt\\_nanozai-000042606\\_09.pdf](https://www.mext.go.jp/content/20250605-mxt_nanozai-000042606_09.pdf)
- Wilkinson, M. D. et al. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Sci Data* 3, 160018 (2016).  
<https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>
- Tshitoyan, V. et al. Unsupervised word embeddings capture latent knowledge from materials science literature. *Nature* 571, 95–98 (2019).  
<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1335-8>
- Tom, G. et al. Self-Driving Laboratories for Chemistry and Materials Science. *Chem. Rev.* 2024, 124, 16, 9633–9732.  
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.4c00055>
- 内閣府 統合イノベーション戦略推進会議. マテリアル革新力強化戦略 - 知のバリューチェーンの構築を通じて -. 令和7年6月4日.  
[https://www8.cao.go.jp/cstp/material/material\\_2025\\_honbun.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/material/material_2025_honbun.pdf)
- OPC Foundation. OPC Unified Architecture.  
<https://www.opcconnect.com/ua.php>
- Executive Office of the President. Fact Sheet: Progress on Materials Genome Initiative. May 14, 2012.  
[https://www.mgi.gov/sites/mgi/files/mgi\\_fact\\_sheet\\_05\\_14\\_2012\\_final.pdf](https://www.mgi.gov/sites/mgi/files/mgi_fact_sheet_05_14_2012_final.pdf)
- SiLA Consortium. The SiLA Connection Newsletter, April 2020.  
[https://sila-standard.com/wp-content/uploads/2020/04/SiLA\\_Connection\\_Newsletter\\_Apr\\_2020.pdf](https://sila-standard.com/wp-content/uploads/2020/04/SiLA_Connection_Newsletter_Apr_2020.pdf)
- MacLeod, B. P. et al. Self-driving laboratory for accelerated discovery of thin-film materials. *Sci. Adv.* 6, eaaz8867 (2020).  
<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aaz8867>
- Li, S. et al. Extracting and reconstructing knowledge in materials science literature using large language models. *Commun. Mater.* 7, 31

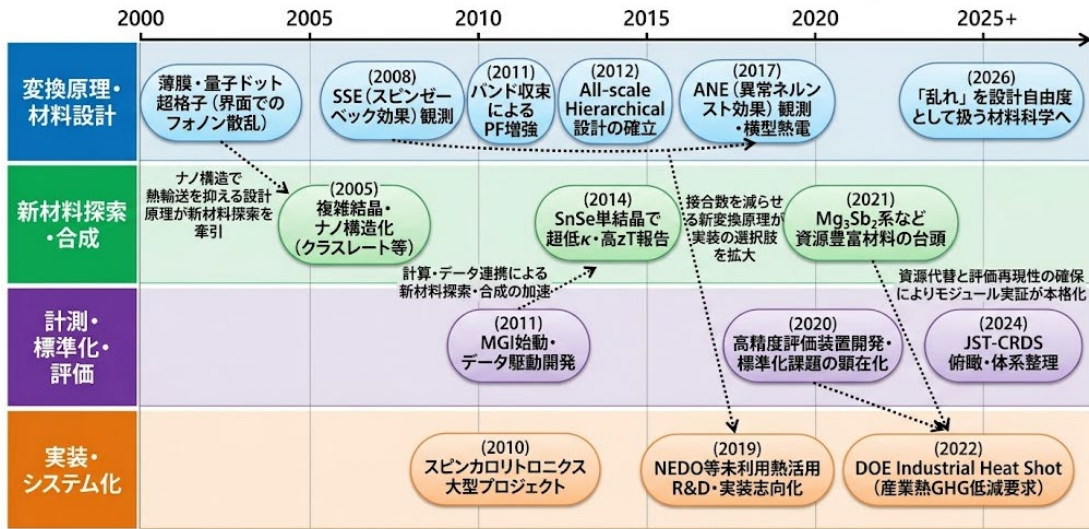
(2026). <https://doi.org/10.1038/s43246-025-01043-3>

- U.S. Food and Drug Administration. Draft Guidance for Industry: Process Analytical Technology - A Framework for Innovative Pharmaceutical Development, Manufacturing, and Quality Assurance; Availability. Federal Register. 2004. <https://www.federalregister.gov/documents/2004/10/04/04-22203/guidance-for-industry-process-analytical-technology-a-framework-for-innovative-pharmaceutical>
- Frenklach, M. Transforming data into knowledge - Process Informatics for combustion chemistry. Proceedings of the Combustion Institute, Volume 31, Issue 1, 2007, 125-140. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2006.08.121>
- Science and Technology Policy Office. Materials Genome Initiative Strategic Plan. Federal Register. 2014. <https://www.federalregister.gov/documents/2014/06/20/2014-14392/materials-genome-initiative-strategic-plan>
- Allotrope Foundation. Allotrope Data Format v1.5.3 RF. <https://docs.allotrope.org/Allotrope%20Data%20Format.html>
- U.S. Food and Drug Administration. PAT - A Framework for Innovative Pharmaceutical Development, Manufacturing, and Quality Assurance. Guidance for Industry. October 2004. <https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/pat-framework-innovative-pharmaceutical-development-manufacturing-and-quality-assurance>
- Porr, M. et al. Implementing a digital infrastructure for the lab using a central laboratory server and the SiLA2 communication standard. Eng Life Sci. 2021;21:208-219. <https://doi.org/10.1002/elsc.202000053>
- Steiner, S. et al. Organic synthesis in a modular robotic system driven by a chemical programming language. Science 363, eaav2211 (2019). <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aav2211>
- Flores-Leonar, M. M. et al. Materials Acceleration Platforms: On the way to autonomous experimentation. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, Volume 25, 2020, 100370. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.100370>
- Venugopal, V., Olivetti, E. MatKG: An autonomously generated knowledge graph in Material Science. Sci Data 11, 217 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03039-z>
- Raissi, M. et al. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations, Journal of Computational Physics, Volume 378, 2019, 686-707. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>

## 2.5.6 潮流 D6:フォノンエンジニアリング「熱電変換・熱伝導制御技術の進展」

### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



出所)点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き:影響が及ぶ方向(起点から波及先)を示す。  
 矢印上のラベル:影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-30 技術的進歩と方向性の概要図「熱電変換・熱伝導制御技術の進展」

表 2-148 技術的進歩と方向性(概要)「熱電変換・熱伝導制御技術の進展」

| 概要   |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● 界面設計が高性能化の出発点となった<br/>2000年代前半は、薄膜超格子や量子ドット超格子によって、電子は通しつつフォノンは散乱させる界面設計が実証された。これにより、熱電材料の高性能化は「新材料を探す」だけでなく、「ナノ構造で熱輸送を抑える」設計へと重心が移り、室温付近の性能向上を狙う主戦略として定着した。</li> <li>● 複雑結晶とラトリングで<math>\kappa</math>低減の設計原理が広がった<br/>2000年代後半には、PGEC概念の浸透を背景に、クラスレートやスクッテルダイトのような複雑結晶で格子熱伝導率を下げる考え方が強まった。とくにラトリングは、単なる微細化とは異なり、結晶構造そのものを使って熱を流しにくくする設計原理として材料探索を牽引した。</li> <li>● バンド工学とスピン熱電で変換原理の選択肢が増えた<br/>2010年代前半には、PbTe系のバンド収束が象徴するように、谷縮重を増やしてSeebeck係数を落とさずに電気伝導を稼ぐ設計が一般戦略になった。同時に、SSEやANEを含むスピнкаロリトロニクスが広がり、縦型Seebeck変換だけでなく、横型熱電という実装上の新しい選択肢も生まれた。</li> <li>● ナノ構造化と化学結合設計が二本柱になった<br/>2012年以降は、all-scale hierarchical設計により原子からメソまで多階層にフォノンを散乱させる戦略が成果を上げた。さらにSnSeでは、強い非調和性や結合異方性そのもので超低<math>\kappa</math>を実現できることが示され、「散乱源を作る設計」と「材料固有の低<math>\kappa</math>を引き出す設計」が並行して進む構図になった。</li> <li>● 2020年代は資源代替・標準化・AI探索が競争軸になった<br/>2015年以降は、Pb/Te依存を下げる観点から<math>Mg_3(Sb, Bi)_2</math>などの資源制約の小さい系が台頭し、競争は材料単体のzTから熱マネージメントやモジュール実証へ広がった。2020年代には、欠陥や不均一性を設計自由度として扱う潮流、ラウンドロビンによる標準化、Industrial Heat Shotに代表される実装要請が重なり、研究開発の焦点は「高性能材料」から「再現性のある実装技術」へ移りつつある。</li> </ul> |

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-149 タイムライン「熱電変換・熱伝導制御技術の進展」

| 年    | 主な進展やイベント   |
|------|---|
| 2000 | 薄膜／超格子・量子ドット超格子の研究が本格化し、界面で熱を散乱させて性能を上げるという方向性が明確になった。  |
| 2001 | Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> 薄膜超格子で室温付近の高 zT が示され、ナノ構造化が主戦略として定着し始めた。 |
| 2002 | PbSeTe 系 QDSL が提案され、量子構造と熱電を組み合わせる研究の裾野が広がった。   |
| 2005 | “Complex thermoelectric materials”などのレビューが影響力を持ち、複雑結晶・ナノ構造化を軸にした設計原理が共有された。                               |
| 2008 | SSE が観測され、熱流をスピン電圧へ変換するという新しい変換原理が実証された。  |
| 2010 | スピнкаロリトロニクスの大規模プロジェクトを契機に、熱流とスピンを結ぶ研究が急拡大した。   |
| 2011 | PbTe 系でバンド収束による高 zT が示され、谷縮重を使った PF 増強が一般戦略になった。  |
| 2011 | MGI が始動し、計算・データ・実験を連携させるデータ駆動型材料開発が政策的にも加速した。   |
| 2012 | all-scale hierarchical 設計が確立し、フォノン散乱を全長スケールで最適化する考え方が定着した。  |
| 2014 | SnSe 単結晶で超低 κ・高 zT が報告され、化学結合と非調和性を核にした探索が一段と加速した。  |
| 2017 | SNE が観測され、横型熱電とスピン流生成を結びつける研究がさらに広がった。  |
| 2019 | NEDO 等で未利用熱活用を熱電・排熱発電・断熱・遮熱・蓄熱まで一体で扱う R&D が進み、実装志向が強まった。  |
| 2020 | 熱電デバイス効率の高精度評価装置開発などが進み、計測誤差と標準化が主要課題として顕在化した。  |
| 2021 | Mg <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub> 系など資源豊富材料のモジュール実証が増え、Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> 代替が現実味を帯び始めた。        |
| 2022 | DOE が Industrial Heat Shot を開始し、2035 年までに産業熱 GHG を 85%低減するという実装側の要求仕様を提示した。                               |
| 2024 | Mg <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub> 系で構造乱れ抑制と微細組織制御により性能が向上し、欠陥・組織設計の重要性が再確認された。                              |
| 2024 | JST-CRDS 俯瞰で、熱制御・熱電・スピンを含む領域が体系整理され、材料から実装までの視点が明確化された。   |
| 2025 | CRDS「フォノンエンジニアリング」領域別動向編が更新され、Mg-Sb 代替や実装研究の加速が明示された。   |
| 2026 | CRDS 戦略プロポーザルで、「乱れ」を設計自由度として扱う材料科学への転換が提言された。   |

### (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-150 キーテクノロジー「熱電変換・熱伝導制御技術の進展」

| 名称                             | 出現時期・背景 | 定義   |
|--------------------------------|---------|--|
| バンド収束(Band Convergence: バンド縮重) |         | 複数のバンド(谷)を近づけて谷縮重を増やし、Seebeck 係数を落とさずに電気伝導を稼ぐ設計である。2011 年頃に象徴例が確立したが、高温域でもバンド配置を安定させ、散乱機構まで同時に最適化できるかが次の課題である。[37] |
| エネルギーフィルタリング(Energy Filtering) |         | 界面障壁で低エネルギーキャリアを選択的に遮り、Seebeck 係数を高めると同時に、界面でフォノンも散乱させて熱伝導率を下げる考え方である。実装では、界面障壁のばらつき、界面反応、機械信頼性をどう抑えるかが鍵になる。[6]    |

| 名称                             | 出現時期・背景 | 定義  |
|--------------------------------|---------|---|
| 欠陥工学(Defect Engineering)       |         | 空孔・置換・間隙・積層欠陥を制御し、キャリア濃度、移動度、格子熱伝導率を同時に調整する設計である。GeTe や $Mg_3Sb_2$ で再加速しているが、欠陥の熱力学と非平衡プロセスを理解し、長期安定性まで担保できるかが重要である。[38]      |
| パラマグノンドラッグ (Paramagnon Drag)   |         | 高温の常磁性域で生じるスピン揺動がキャリアを引きずり、Seebeck 係数を押し上げる現象である。高温域の新しい熱電機構として注目される一方、寄与分離と材料探索指針の確立はこれからである。[39]                            |
| スピンゼーベック効果 (SSE)               |         | 温度勾配でスピン流を生み、それを逆スピンホール効果などで電圧に変える技術である。2008 年以降に研究が広がったが、変換効率を上げるには界面スピン変換と熱設計を一体で詰める必要がある。[40]                              |
| 異常ネルンスト効果 (ANE)による横型熱電         |         | 温度勾配と磁化に直交する方向に電圧を出すため、従来の縦型 Seebeck 素子より接合数を減らしやすい。実装簡素化に利点がある一方、高 ANE と低 $\kappa$ ・高 $\sigma$ を同時に満たす材料設計と大面積薄膜化が課題である。[41] |
| 階層ナノ構造(All-scale Hierarchical) |         | 原子～メソまで異なる長さスケールの散乱源を重ね、広い波長域のフォノンを抑える設計である。2012 年頃に象徴的成果が出たが、量産性、再現性、機械信頼性をどう両立させるかが実装上の論点である。[42]                           |
| 籠状結晶ラトリング (Rattling)           |         | クラスレートやスクッテルダイトで、ゲスト原子の揺らぎを使って音響フォノンを散乱し、格子熱伝導率を下げる考え方である。高温安定性や最適充填の制御が難しく、動的構造をどう精密に捉えるかが研究の焦点である。[8]                       |
| 混合アニオン／結合不均一性設計                |         | 局所歪みや結合の不均一性を意図的に導入し、結晶性を保ったままフォノン散乱を強める設計である。2020 年代に原理解像が進んだが、合成難易度と電子輸送との両立が課題である。[43]                                     |
| $Mg_3(Sb,Bi)_2$ 系の欠陥化学・微細組織制御  |         | $Bi_2Te_3$ 代替の有力候補で、資源面の制約が比較的小さいことから急速に存在感が高まった。今後は、n/p 両脚最適化、低接触抵抗電極、熱応力設計を詰めてモジュール信頼性を上げる段階に入っている。[44]                     |
| GeTe 系の空孔・相転移活用                |         | Ge 空孔と相転移を制御し、中温域での性能を引き上げる設計である。性能向上の余地は大きいですが、空孔形成の制御と相転移挙動を輸送特性と整合させる必要がある。[45]  |
| フォノンニック結晶 (Phononic Crystal)   |         | 人工周期でフォノンのバンド構造を設計し、熱輸送そのものを制御しようとする技術である。概念的な魅力は大きいですが、室温で効く微細周期の実装とスケールアップにはなお時間がかかる。[46]                                   |
| TDTR/FDTR によるナノ熱計測             |         | 薄膜や界面の熱物性を定量し、平均自由行程分布や界面熱抵抗を評価する計測基盤である。近年は 2D 材料や複合系へ適用が広がっており、モデル依存性と標準化をどう扱うかが実務上の焦点である。[47]                              |

| 名称                      | 出現時期・背景 | 定義   |
|-------------------------|---------|--|
| モジュールメトロロジ<br>ー/ラウンドロビン |         | ラボ間ばらつきを可視化し、熱流計測、接触圧、TIM 条件をそろえて評価の再現性を高める取り組みである。2020年代は、材料性能よりも試験条件の違いが結果を左右する局面が増え、標準化が競争力そのものになりつつある。[48] |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-151 実用化可能性「熱電変換・熱伝導制御技術の進展」

| セクター                | ユースケースや波及が期待される産業領域  |
|---------------------|--|
| 産業(鉄鋼・セメント・化学・食品など) | 高温～中温の排熱を電力回収や温度可視化センサへ変える用途が有望である。成否は、熱源との熱抵抗低減、耐熱・耐酸化、長期劣化、投資回収に見合うコストを同時に満たせるかにかかると見込める。課題は、振動・熱サイクルに耐える接合信頼性と、限られた温度差で出力密度を確保するモジュール設計である。 |
| 自動車・モビリティ           | 排気・冷却系の廃熱回収に加え、電動車ではパワー半導体や電池の熱マネジメント用途も見込める。課題は、振動・熱サイクルに耐える接合信頼性と、限られた温度差で出力密度を確保するモジュール設計である。   |
| エレクトロニクス・データセンター    | 半導体ホットスポットの局所冷却や 3D 集積の界面熱抵抗低減が主な用途である。ここでは材料性能だけでなく、界面熱抵抗を正しく測り、製造プロセスと両立できるかが実用化の前提になる。  |
| 建築・民生(空調・断熱・遮熱)     | 断熱・遮熱・蓄熱と低品位廃熱の回収を組み合わせることで、省エネ効果を広く取りにいける。課題は、耐久性・安全性・施工性・コストを長期運用の中で成立させることである。  |
| ウェアラブル/ヘルスケア        | 体温差を利用した微小発電は、生体センサの電池レス化に直結する。室温付近で高 PF を示す材料、柔軟な電極・界面、皮膚適合性、屈曲や洗濯への耐久性を同時に満たす必要がある。  |
| 宇宙・極限環境             | 可動部のない高信頼電源・温度制御として魅力が大きい。実用化には、長期安定性と熱サイクル耐性に加え、評価の再現性を確保するメトロロジが欠かせない。   |
| IIoT(産業用 IoT) 状態監視  | 配管や炉壁の温度差から自立電源を得られれば、配線や電池交換を減らせる。低温度差で発電する材料・デバイス設計と、限られた設置空間でも成立する標準評価が課題である。   |

#### (5) 出所

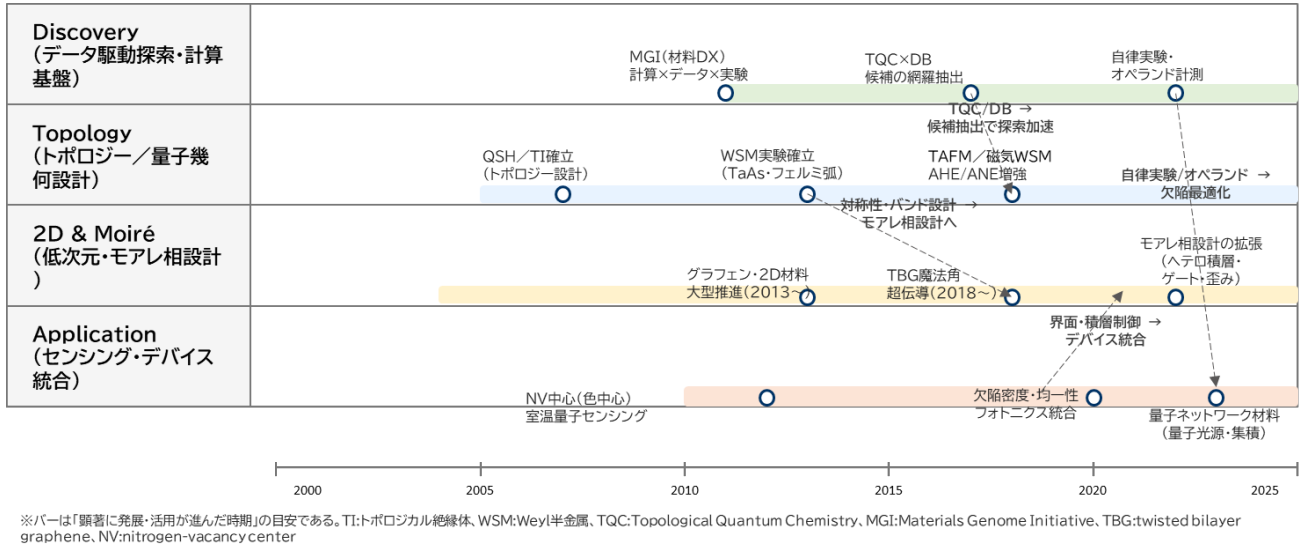
- [1] [3] [4] [6] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [16] [34] [39] [41] [51] [52]  
[https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-04/CRDS-FY2024-FR-04\\_20504.pdf](https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-04/CRDS-FY2024-FR-04_20504.pdf)
- [https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-04/CRDS-FY2024-FR-04\\_20504.pdf](https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-04/CRDS-FY2024-FR-04_20504.pdf)
- [2] [25] <https://www.nature.com/articles/nmat2090.pdf>
- <https://www.nature.com/articles/nmat2090.pdf>
- [5] [27] [37] <https://www.nature.com/articles/nature09996.pdf>
- <https://www.nature.com/articles/nature09996.pdf>
- [7] [20] [28] [42] <https://www.nature.com/articles/nature11439.pdf>
- <https://www.nature.com/articles/nature11439.pdf>
- [8] [18]

- [https://hiroshima.repo.nii.ac.jp/record/2008766/files/RevModPhys\\_86\\_669.pdf](https://hiroshima.repo.nii.ac.jp/record/2008766/files/RevModPhys_86_669.pdf)
- [https://hiroshima.repo.nii.ac.jp/record/2008766/files/RevModPhys\\_86\\_669.pdf](https://hiroshima.repo.nii.ac.jp/record/2008766/files/RevModPhys_86_669.pdf)
- [15] [48] [50]
- <https://elib.dlr.de/193433/1/Ziolkowski%20-%20International%20Round%20Robin%20Test%20of%20Thermoelectric%20Generator%20Modules.pdf>
- <https://elib.dlr.de/193433/1/Ziolkowski%20-%20International%20Round%20Robin%20Test%20of%20Thermoelectric%20Generator%20Modules.pdf>
- [17] [23] <https://www.nature.com/articles/35098012.pdf>
- <https://www.nature.com/articles/35098012.pdf>
- [19] [26] [40] <https://www.nature.com/articles/nature07321.pdf>
- <https://www.nature.com/articles/nature07321.pdf>
- [21] [35] [44] <https://www.nature.com/articles/s41467-024-51120-3.pdf>
- <https://www.nature.com/articles/s41467-024-51120-3.pdf>
- [22] <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2025/SP/CRDS-FY2025-SP-04.pdf>
- <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2025/SP/CRDS-FY2025-SP-04.pdf>
- [24] <https://colab.ws/articles/10.1126%2Fscience.1072886>
- <https://colab.ws/articles/10.1126%2Fscience.1072886>
- [29] <https://www.nature.com/articles/nature13184.pdf>
- <https://www.nature.com/articles/nature13184.pdf>
- [30] <https://www.nature.com/articles/nmat4964.pdf>
- <https://www.nature.com/articles/nmat4964.pdf>
- [31] [https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP\\_100097.html](https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100097.html)
- [https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP\\_100097.html](https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100097.html)
- [32]
- [https://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2023/pr20230913/pr20230913.html](https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2023/pr20230913/pr20230913.html)
- [https://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2023/pr20230913/pr20230913.html](https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2023/pr20230913/pr20230913.html)
- [33] [49] <https://www.energy.gov/articles/doe-launches-new-energy-earthshot-cut-industrial-heating-emissions-85-percent>
- <https://www.energy.gov/articles/doe-launches-new-energy-earthshot-cut-industrial-heating-emissions-85-percent>
- [36] [https://www.mgi.gov/sites/mgi/files/materials\\_genome\\_initiative-final.pdf](https://www.mgi.gov/sites/mgi/files/materials_genome_initiative-final.pdf)
- [https://www.mgi.gov/sites/mgi/files/materials\\_genome\\_initiative-final.pdf](https://www.mgi.gov/sites/mgi/files/materials_genome_initiative-final.pdf)
- [38] [45] <https://www.nature.com/articles/s41427-020-00247-y.pdf>
- <https://www.nature.com/articles/s41427-020-00247-y.pdf>
- [43] <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/ta/d1ta04958e>
- <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/ta/d1ta04958e>
- [46] [47] <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/CRDS-FR-N/CRDS-FR-N507-202512.pdf>
- <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/CRDS-FR-N/CRDS-FR-N507-202512.pdf>
- [53] <https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/project/LIFE16-ENV-ES-000344/waste-heat-valorization-by-modular-thermoelectric-recovery-system-for-resource-efficiency-in-energy-intensive-industries>
- <https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/project/LIFE16-ENV-ES-000344/waste-heat-valorization-by-modular-thermoelectric-recovery-system-for-resource-efficiency-in-energy-intensive-industries>
- [54] <https://heatroadmap.eu/>
- <https://heatroadmap.eu/>

## 2.5.7 潮流 D7:量子マテリアル「量子性発現技術の進展」

### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



出所)点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き:影響が及ぶ方向(起点から波及先)を示す。  
 矢印上のラベル:影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-31 技術的進歩と方向性の概要図「量子性発現技術の進展」

表 2-152 技術的進歩と方向性(概要)「量子性発現技術の進展」

| 概要 |  |
|----|--|
| ●  | トポロジー設計とゼロ(微小)磁化磁性体の台頭 <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 2000年代後半に量子スピンホール系やトポジカル絶縁体の概念が定着し、材料設計の中心は「どの元素を使うか」だけでなく、「どの対称性を保ち、どのようにバンド反転を実現するか」へ移った。2015年以降はMn<sub>3</sub>Snなどの非共線反強磁性体で大きな異常ホール効果・異常ネルンスト効果が観測され、磁化がほぼゼロでも大きな信号を取り出せることが示された。これにより、漏れ磁場を抑えつつ高速動作を狙うスピントロニクス材料として、トポジカル反強磁性体の重要性が高まった。</li> <li>✓ 2015年～:Mn<sub>3</sub>Sn等でAHE/ANEが観測され、反強磁性でも大信号を得るトポジカル反強磁性がスピデバイス候補に。</li> </ul> |
| ●  | WSMとBerry曲率で熱電・光熱電を増強 <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 2010年代前半にWeyl半金属の理論像が整備され、2015年のTaAsで実験的確認が得られたことで、Berry曲率と輸送・光学応答を結びつける研究が急速に進んだ。2018年以降はCo<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub>S<sub>2</sub>などの磁気Weyl半金属で巨大な異常ネルンスト効果が示され、外部磁石に大きく依存しない横型熱電デバイスへの展開が具体化し始めている。</li> </ul>  |
| ●  | 2D材料×ねじれ(twist)×モアレで量子相を角度設計 <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ グラフェンの登場で2次元材料研究が広がり、2010年代前半までに大型研究基盤も整った。</li> <li>✓ 2018年には魔法角ねじれ二層グラフェンで超伝導が観測され、モアレ超格子を通じて強相関や超伝導を「角度」で設計できることが示された。これにより、ねじれ角・ひずみ・界面を設計変数とするtwistronicsが、新しい量子材料設計の軸の一つになった。</li> </ul>  |
| ●  | 量子欠陥(色中心)による室温量子センシングと量子ネットワーク材料 <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 2010年代以降、ダイヤモンドNV中心に代表される色中心は、室温で動作する量子センサの有効基盤として発展した。近年は単なる原理実証から、感度向上、欠陥密度の均一化、フォトニクスとの統合といった材料-デバイス一体の最適化へと研究課題が移っている。量子ネットワーク材料としての応用も見据え、材料工学の重要性が一段と増している。</li> </ul>   |
| ●  | マテリアルDXとトポロジー計算基盤の制度化 <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 2011年のMGI以降、材料探索は計算・データ・実験を結びデータ駆動型へと転換した。2017年以降はTQCと各種データベースによってトポジカル候補を網羅的に抽出できるようになり、量子材料探索は個別の勘や経験に依存する段階から、探索インフラを活用する段階へ移っている。</li> </ul>  |

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-153 タイムライン「量子性発現技術の進展」

| 年    | 技術・研究のマイルストーン例   |
|------|--|
| 2004 | グラフェンの単離により、原子層材料を実際に作製・計測できることが示され、2次元量子材料研究の出発点が築かれた。                          |
| 2005 | グラフェンにおける量子スピンホール効果が理論的に提案された。対称性とバンド反転を使って端状態を設計するというトポロジー材料の着想が出てくる段階である。      |
| 2007 | HgTe量子井戸で量子スピンホール絶縁体状態が実験的に観測され、理論概念だったトポジカル相が実材料で確認された。                         |
| 2010 | グラフェン研究がノーベル物理学賞受賞につながり、2次元材料が基礎研究にとどまらない材料科学の基盤プラットフォームとして認識された。                |
| 2011 | 米国で政府支援の下MGI(Materials Genome Initiative)が始動し、材料探索を計算・データ・実験の連携で加速するアプローチが本格化した。 |
| 2013 | 磁性トポジカル絶縁体薄膜で量子異常ホール効果が観測され、磁性とトポロジーを組み合わせた量子機能設計の実証が進んだ。                        |

| 年    | 技術・研究のマイルストーン例   |
|------|--|
| 2013 | 欧州で Graphene Flagship が始まり、2 次元材料の基礎研究から集積・応用開発までをつなぐ大型推進体制が整えられた。                     |
| 2015 | TaAs で Weyl 半金属が実験的に確立され、Weyl 点やフェルミ弧をもつ材料を実際に探索・評価する研究が加速した。                          |
| 2015 | 硫化水素系 H <sub>3</sub> S で 203 K 級の高圧超伝導が確認され、高圧水素化物を起点とする高 T <sub>c</sub> 探索が再び大きく前進した。 |
| 2016 | DOE-BRN は、量子材料をエネルギー関連技術へつなぐには、合成・計測・理論を一体で強化する必要があると整理し、研究開発の重点を明確にした。                |
| 2016 | トポロジカル相転移・トポロジカル相に対するノーベル物理学賞により、トポロジが現代材料科学の中核概念として広く浸透した。                            |
| 2017 | トポロジカル量子化学の提案により、結晶対称性から候補材料を体系的に抽出する探索基盤が整い始めた。                                       |
| 2017 | Mn <sub>3</sub> Sn で室温近傍の大きな異常ネルンスト効果が報告され、反強磁性体でも実用的な熱電・スピントロニクス信号が得られる可能性が示された。      |
| 2018 | 魔法角ねじれ二層グラフェンで超伝導が観測され、ねじれ角そのものを設計変数とする twistronics が独立した研究潮流として立ち上がった。                |
| 2018 | EU Quantum Flagship の開始により、量子材料を含む量子技術全体を長期投資で育成する政策基盤が整った。                            |
| 2019 | 高品質なトポロジカル材料カタログの整備が進み、候補材料探索が個別発見からデータベース主導へと移行し始めた。                                  |
| 2019 | LaH <sub>10</sub> で約 250 K の高圧超伝導が報告され、高温超伝導の到達点がさらに押し上げられた。                           |
| 2020 | LaH <sub>10</sub> の研究では、結晶構造と安定性を理解するうえで量子原子揺らぎが重要であることが示され、高圧超伝導の設計論が精緻化した。           |
| 2022 | 非磁性化合物のトポロジカルバンドを網羅する大規模解析が公表され、探索データベースの網羅性と実用性が一段と高まった。                              |
| 2024 | JST-CRDS の俯瞰報告は、「量子特有の性質の操作・制御・活用」を重点に位置づけ、マテリアル DX とオペランド計測を支える基盤技術として明示した。           |
| 2025 | JST/CRDS の戦略プロポーザルで、量子マテリアルを社会課題解決へつなぐには、目的基礎研究、計測・制御基盤、評価デバイスを並行して進める必要があると提案された。     |

### (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

表 2-154 キーテクノロジー「量子性発現技術の進展」

| 名称   | 出現時期・背景  | 解説  |
|--|--|---|
| トポロジカル量子化学(TQC: Topological Quantum Chemistry) | 出現時期: 2017 年(TQC の枠組み提案)<br>背景: トポロジカル絶縁体・半金属の多様化を受け、空間群対称性と軌道起源に基づくバンド位相の系統判別を可能にする枠組みが必要に。分野の機運(2016 年ノーベル物理学賞)も追い風。 | TQC は、結晶の対称性表現と局所結合の情報から、材料のトポロジカルバンドを系統的に分類する理論枠組みである。<br>磁性系や強相関係系への拡張、欠陥や非晶質への適用、実験検証との接続はなお重要な課題である。                        |
| トポロジカル材料 DB(高品質候補カタログ)                         | 2019 年頃から高品質候補のカタログ化が進み、探索効率を大きく押し上げた。   | トポロジカル材料 DB は、実在結晶データベースを TQC などでスクリーニングし、トポロジカル絶縁体や半金属の候補を体系的に提示する基盤である。<br>ただし、薄膜成長のしやすさやフェルミ準位制御など、デバイス実装に必要な条件は別途見極める必要がある。 |

| 名称                           | 出現時期・背景  | 解説  |
|------------------------------|--|---|
| ARPES(角度分解光電子分光)+輸送の同定パイプライン | 出現時期: 2015 年前後から、理論(TQC/DB)→ARPES(位相的バンド特徴の可視化)→輸送(Berry 曲率起源応答の検証)という実証フローが定着。<br>背景: 候補材料の位相的特徴(例: Fermi アーク)を ARPES で確認し、異常ホール/ネルンスト等の輸送で整合性を取る統合的同定が必要に。 | ARPES は、バンドトポロジ(Weyl 点・フェルミ弧等)を実結晶で確認する標準手法群である。課題: 薄膜/界面、動作中(operando)での同定。<br>解決時間: 5~10 年。<br>キー研究: 高輝度光源、空間分解 ARPES、オペランド化。                                     |
| 非共線反強磁性の Berry 曲率設計          | 出現時期: 2015 年(Mn <sub>3</sub> Sn で室温巨大 AHE の実証)、2018 年(設計論の体系化)<br>背景: 非共線 AFM の対称性破れにより大きな Berry 曲率が発現し得ることが示され、クラスター多極子等を手掛かりに電気磁気応答の設計が進展。                 | 非共線反強磁性の Berry 曲率設計は、磁化が小さくても大きな異常ホール効果や異常ネルンスト効果を引き出す考え方である。Mn <sub>3</sub> Sn はその代表例で、反強磁性体を実用的な信号源として扱えることを示した。今後は、薄膜化、ドメイン制御、信号の安定化を進め、デバイス実装へつなげることが課題になる。     |
| 磁気 WSM 熱電 (ANE/ゼロ磁場ネルンスト)    | 2018 年以降、巨大な ANE やゼロ磁場ネルンストの報告が相次ぎ、横型熱電デバイスの候補として存在感が高まった。   | 磁気 Weyl 半金属の熱電は、Weyl 点近傍の大きな Berry 曲率を利用して熱電の横応答を増強し、外部磁石への依存を下げようとする技術である。実用化には、薄膜性能、熱マネジメント、極性制御、信頼性の確立が必要である。  |
| モアレ超格子制御 (twistronics)       | 2018 年の魔法角ねじれ二層グラフェンが転機となり、角度そのものが材料設計の新しい自由度になった。   | twistronics は、ねじれ角でフラットバンドを形成し、強相関絶縁体や超伝導などの量子相を誘起する設計手法である。今後の焦点は、角度とひずみのばらつきを抑え、再現性とスケールアップを両立させることである。   |
| 量子欠陥(NV 中心)材料工学              | 2010 年代に研究が加速し、センシング応用の有力基盤となった。   | 量子欠陥材料工学は、NV 中心などの欠陥スピンの生成位置、密度、電荷状態を制御し、室温量子センシングを成立させるための材料技術である。今後は、感度向上、欠陥の均一化、光取り出し効率の改善をどう量産プロセスに組み込むかが鍵になる。  |
| マテリアル DX(材料 DX)基盤            | 出現時期: 2011 年(Materials Genome Initiative 発足)、2021 年(MGI 戦略改訂)<br>背景: 計算・自動実験・データ/モデルを統合し、設計→合成→評価のループを高速化。各国で制度化・投資が進む。                                      | マテリアル DX 基盤は、データ、計算、実験を一体で回し、材料の探索から製造までのリードタイムを短縮する仕組みである。MGI 以降、この考え方は国際的な標準となりつつある。量子材料分野では、データ品質の確保、標準化、産業データとの連携を進められるかが競争力を左右する。                              |
| オペランド・マルチモーダル計測              | 出現時期: 2010 年代に in situ/operando 計測と分光・散乱・顕微の同時連成が普及、量子マテリアルでも基盤技術として重視。<br>背景: 実動作環境下で相転移・ダイナミクスを多角的に捉え、データ駆動設計と接続するための要素技術群。                                | オペランド・マルチモーダル計測は、動作環境下で量子状態、構造、輸送特性を同時に捉え、状態変化の因果を見極めるための基盤技術である。量子材料では、物性の変化が微小な条件差に強く依存するため、単一計測だけでは十分でないことが多い。今後は、計測同士の干渉を抑えつつ、データ融合と AI 解析を実用レベルに引き上げることが重要となる。 |
| 高圧合成・DAC 計測(超伝導探索)           | 2015 年以降、水素化物超伝導の進展によって再び大きな注目を集めた。  | 高圧合成・DAC 計測は、超高圧下で新しい結晶相を探索し、高温超伝導などの極限物性を引き出すための技術である。長期的には、常圧で安定な準安定相をいかに固定するか、そして製造スケールへどう移行するかが最大の課題である。  |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-155 実用化可能性「量子性発現技術の進展」

| 名称             | 解説  |
|----------------|---|
| ICT・量子計算／量子通信  | 量子材料は、低損失配線、トポロジカル素子、欠陥量子ビットなどを通じて、量子計算・量子通信のハードウェア基盤になり得る。特に、材料段階でコヒーレンスや散乱、界面状態を制御できれば、デバイス性能を根本から引き上げられる。今後は、膜品質と界面品質の再現性、標準評価、量産適合性を早期に確立できるかが実装の分水嶺となる。        |
| エネルギー(熱電・電力)   | 異常ネルンスト効果を用いる横型熱電は、従来の Seebeck 型とは異なる設計自由度を持ち、配線や熱流設計の面で新しい選択肢になり得る。磁気 Weyl 半金属では外部磁石への依存を減らせる可能性があり、未利用熱回収や分散型センサへの応用が期待される。一方で、薄膜での性能再現、熱設計、長期信頼性の確保が事業化の前提となる。   |
| 半導体・デバイス製造     | トポロジー材料、2次元材料、量子欠陥材料のいずれも、最終的な競争力は物性そのものよりもプロセス適合性で決まる。結晶欠陥、界面汚染、ひずみをどこまで抑え、計測結果を製造条件へフィードバックできるかが鍵である。そのため、マテリアル DX とオペランド計測を組み合わせた開発基盤の整備が重要になる。                  |
| 医療・ヘルスケア       | NV 中心ナノダイヤなどを用いた量子センシングは、局所磁場や温度の高感度計測を通じて、将来的に診断、創薬、生体計測へ波及する可能性がある。強みは室温動作と微小領域計測にあるが、生体適合性、表面化学、光学読み出し系の小型化、信号校正にはなお課題が残る。研究段階から医療機器・バイオ用途に必要な評価指標を織り込むことが重要である。 |
| モビリティ・機械製造     | 反強磁性スピントロニクスが実装段階に進めば、高速、高密度、低漏れ磁場のメモリやセンサとして、車載機器や産業機械への波及が期待できる。特に、磁場干渉を抑えたい環境では反強磁性体の優位性が大きい。ただし、薄膜化、ドメイン制御、温度安定性、CMOS 統合をクリアしなければ量産にはつながらない。                    |
| 宇宙・防衛・安全保障     | 量子センサは、GNSS の代替・補完や高感度な位置・磁場計測の文脈で、宇宙・防衛・安全保障分野からの関心が高い。とくに NV 系は小型化と常温動作の点で有望だが、耐環境性、校正、量産性を確保しなければ実任務での採用は難しい。したがって、材料開発と並行して、信頼性評価やサプライチェーン確保を進める必要がある。          |
| 研究開発プラットフォーム産業 | マテリアル DX、TQC、オペランド計測の整備は、個別の量子材料製品以上に、研究開発基盤産業として大きな波及効果を持つ。候補抽出から試作、評価までの時間を短縮できれば、多様な分野の材料開発を底上げできるためである。今後は、データ品質、相互運用性、知財管理、オープン化の線引きをどう設計するかが競争力を左右する。         |

## (5) インタビュー結果を踏まえた今後の潮流および研究の方向性

中核研究者へのインタビュー結果に基づき、今後 5 年から 10 年の潮流および研究の方向性を整理した。

表 2-156 今後の潮流および研究の方向性「量子性発現技術の進展」

| 項目  | 概要  |
|---|---|
| 新たに浮上している、または今後 5 年から 10 年の間に浮上すると考えられる技術トレンド、技術的ブレークスルーの可能性、技術面の障壁、規制・倫理も含む非技術面の障壁 | 量子マテリアルは、個別の新たな物性探索にとどまらず、半導体・量子計算・高速通信を支える情報インフラ素材として見直されつつある。今後 5～10 年では、反強磁性体スピントロニクス、ベリー曲率設計、新熱電、非エルミート光学、NV センター量子センシング、モアレ系の機能化が有望であり、長期的にはトポロジカル超伝導・マヨラナ準粒子も重要である。主な障壁は、基礎研究とデバイス化・製造基盤の分断、大型試作・評価インフラの不足、知財戦略の弱さであり、非技術面では実装を見据えた制度設計と信頼ベースの情報連携の仕組みが課題となる。 |
| 他分野研究連携の必要性   | 本分野では、材料、計測、制御、デバイス、製造を一体で回す分野横断連携が不可欠である。初期段階から出口とロードマップを共有し、材料研究者に加えてデバイス設計者、計測研究者、製造技術者、企業側の実装担当者が参加する体制が求められる。スタートアップ、企業、大学、研究所をつなぐ循環型エコシステムの構築も重要である。  |
| わが国のアセット(人材・インフラ等)と国外プレイヤー・チームとの比較  | 我が国の強みは、材料産業の裾野の広さ、素材企業群の技術蓄積、大学—企業連携の潜在力にある。一方で、二次元物質分野の立ち遅れ、大型試作・評価拠点の不足、博士人材の産業界での処遇の弱さは課題である。海外では、量子情報と量子物質を束ねた大規模拠点がデバイス化を加速しており、日本でも国際連携を活用しつつ、人材と拠点への戦略的投資が必要である。  |
| 今後5年から10年の間において潮流となり得る研究の方向性  | 今後の中心的潮流は、量子マテリアルを独立した物性研究としてではなく、情報インフラ素材として戦略的に位置付け、量子情報と接続しながら機能実証へ進める方向にある。重点領域としては、反強磁性体・オルターマグネティズム、ベリー曲率設計、新熱電、非エルミート光学、NV センター量子センシング、モアレ・平坦バンド系が挙げられる。   |
| 今後の当該分野において優先すべき研究課題・支援形態   | 優先課題は、材料—計測—デバイス—製造のアジャイル統合、ベンチマークデバイスの実証、データ基盤整備、知財戦略の強化である。支援形態としては、対象を広げ過ぎず、将来市場の大きい情報インフラ素材に重点化したフラグシップ型支援が望ましい。文部科学省と経済産業省との連携の下、大学、国研、企業、スタートアップを一気通貫でつなぐ枠組みと、人材育成・国際共同拠点化を組み合わせて進めることが有効である。   |

## (6) 出所

- 科学技術振興機構 研究開発戦略センター(CRDS)『研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野(2024年)』2024年9月。 <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2024-FR-04.html>
- 同上『エグゼクティブサマリー(PDF)』CRDS-FY2024-FR-04\_00201。 [https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-04/CRDS-FY2024-FR-04\\_00201.pdf](https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-04/CRDS-FY2024-FR-04_00201.pdf)
- 科学技術振興機構 研究開発戦略センター(CRDS)『社会課題解決に向けた量子マテリアルの活用戦略(戦略プロポーザル)』2025年3月。 <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2024-SP-05.html>
- 文部科学省『非連続な技術革新を目指す量子マテリアル研究』2025年(公開PDF)。 [https://www.mext.go.jp/content/20250228-mxt\\_chousei01-000040506\\_3.pdf](https://www.mext.go.jp/content/20250228-mxt_chousei01-000040506_3.pdf)
- U.S. DOE Office of Science, Basic Energy Sciences『Basic Research Needs

Workshop on Quantum Materials for Energy-relevant Technology』Report, 2016-02 (PDF). [https://science.osti.gov/-/media/bes/pdf/reports/2016/BRN\\_Quantum\\_Materials\\_for-Energy\\_Relevant\\_Technology.pdf](https://science.osti.gov/-/media/bes/pdf/reports/2016/BRN_Quantum_Materials_for-Energy_Relevant_Technology.pdf)

- The Nobel Prize in Physics 2010 – Summary(graphene). <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2010/summary/>
- Kane, C. L.; Mele, E. J. Quantum Spin Hall Effect in Graphene Phys. Rev. Lett. 95, 226801 (2005). <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.95.226801>
- König, M. et al. Quantum Spin Hall Insulator State in HgTe Quantum Wells Science 318, 766 (2007) (PDF). <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.1148047>
- Bradlyn, B. et al. Topological quantum chemistry Nature 547, 298–305 (2017) (PDF). <https://www.nature.com/articles/nature23268.pdf>
- Vergniory, M. G. et al. A complete catalogue of high-quality topological materials Nature 566, 480–485 (2019) (PDF). <https://www.nature.com/articles/s41586-019-0954-4.pdf>
- Zhang, Z. et al. All topological bands of all nonmagnetic stoichiometric materials Science 376, eabg9094 (2022) (PDF). <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.abg9094?download=true>
- Xu, S.-Y. et al. Discovery of a Weyl fermion semimetal and topological Fermi arcs Science 349, 613 (2015) (PDF). <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.aaa9297>
- Nakatsuji, S.; Kiyohara, N.; Higo, T. Large anomalous Hall effect in a non-collinear antiferromagnet at room temperature Nature 527, 212–215 (2015) (PDF). <https://www.nature.com/articles/nature19416.pdf>
- Tomita, T. et al. Large anomalous Nernst effect at room temperature in a chiral antiferromagnet Nat. Phys. 13, 221–225 (2017) (PDF). <https://www.nature.com/articles/nphys4181.pdf>
- Baltz, V. et al. Topological antiferromagnetic spintronics Nat. Phys. 14, 481–486 (2018) (PDF). <https://www.nature.com/articles/s41567-018-0064-5.pdf>
- Cao, Y. et al. Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices Nature 556, 43–50 (2018) (PDF). <https://www.nature.com/articles/nature26160.pdf>
- Yang, H. et al. Giant anomalous Nernst effect in the magnetic Weyl semimetal Co<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub>S<sub>2</sub> Phys. Rev. Materials 4, 024202 (2020). <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevMaterials.4.024202>
- Guo, E.-J. et al. Zero-Field Nernst Effect in a Ferromagnetic Kagome-Lattice Weyl-Semimetal Co<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub>S<sub>2</sub> Adv. Mater. 30, 1806622 (2018) (PDF). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/adma.201806622>
- NIST『Diamond NV Center Magnetometry』(プログラムページ). <https://www.nist.gov/programs-projects/diamond-nv-center-magnetometry>
- Barry, J. F. et al. Sensitivity optimization for NV-diamond magnetometry Rev. Mod. Phys. 92, 015004 (2020). <https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.92.015004>
- The White House (Obama archive)『Materials Genome Initiative』(2011). <https://obamawhitehouse.archives.gov/mgi>
- Materials Genome Initiative『MGI Strategic Plan 2021』(PDF). <https://www.mgi.gov/sites/mgi/files/MGI-2021-Strategic-Plan.pdf>
- EPO-OECD『Mapping the global quantum ecosystem』(PDF, 2026). <https://link.epo.org/web/publications/studies/en-mapping-the-global-quantum-ecosystem.pdf>
- European Commission『Quantum Technologies Flagship』. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/quantum-technologies-flagship>
- European Commission (Publications Office)『GRAPHENE Flagship 10 years assessment』(Publication metadata, 2024). <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/897e63ca-a172->

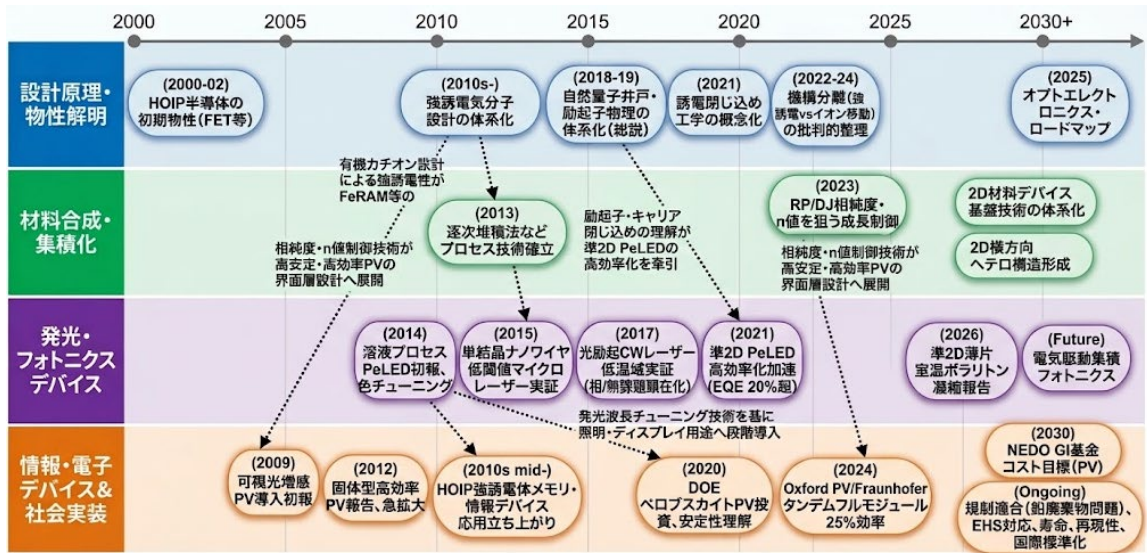
11ef-85f0-01aa75ed71a1/language-en

- Drozdov, A. P. et al. Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system Nature 525, 73–76 (2015) (PDF). <https://www.nature.com/articles/nature14964.pdf>
- Drozdov, A. P. et al. Superconductivity at 250 K in lanthanum hydride under high pressures Nature 569, 528–531 (2019) (PDF). <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1201-8.pdf>
- Errea, I. et al. Quantum crystal structure in the 250-kelvin superconducting lanthanum hydride Nature 578, 66–69 (2020) (PDF). <https://www.nature.com/articles/s41586-020-1955-z.pdf>
- Press release: The Nobel Prize in Physics 2016(topological phases of matter). <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2016/press-release/>
- University of Tokyo『New technology using magnet to generate electricity from heat』(Mn3Sn の ANE 解説; 2017). [https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/en/articles/a\\_00584.html](https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/en/articles/a_00584.html)
- <https://www.nature.com/articles/s41567-018-0064-5.pdf>
- [https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-04/CRDS-FY2024-FR-04\\_00201.pdf](https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-04/CRDS-FY2024-FR-04_00201.pdf)
- <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2024-SP-05.html>
- [https://science.osti.gov/-/media/bes/pdf/reports/2016/BRN\\_Quantum\\_Materials\\_for-Energy\\_Relevant\\_Technology.pdf](https://science.osti.gov/-/media/bes/pdf/reports/2016/BRN_Quantum_Materials_for-Energy_Relevant_Technology.pdf)
- <https://www.nature.com/articles/nature19416.pdf>
- <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.aaa9297>
- <https://www.nature.com/articles/nphys4181.pdf>
- <https://www.nature.com/articles/nature26160.pdf>
- <https://www.nist.gov/programs-projects/diamond-nv-center-magnetometry>
- <https://www.nature.com/articles/nature14964.pdf>
- <https://www.nature.com/articles/nature23268.pdf>
- <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevMaterials.4.024202>
- <https://graphene-flagship.eu/>
- <https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.92.015004>
- <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.95.226801>
- <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2010/summary/>
- <https://obamawhitehouse.archives.gov/mgi>
- <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.1148047>
- <https://www.science.org/cms/asset/b013fee2-a290-42ab-b064-c3ed28185006/pap.pdf>
- <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/897e63ca-a172-11ef-85f0-01aa75ed71a1/language-en>
- <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2016/press-release/>
- <https://qt.eu/about-quantum-flagship/>
- <https://www.nature.com/articles/s41586-019-0954-4.pdf>
- <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1201-8.pdf>
- <https://www.nature.com/articles/s41586-020-1955-z.pdf>
- <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.abg9094?download=true>
- <https://link.epo.org/web/publications/studies/en-mapping-the-global-quantum-ecosystem.pdf>
- <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/adma.201806622>
- <https://www.mgi.gov/sites/mgi/files/MGI-2021-Strategic-Plan.pdf>
-

## 2.5.8 潮流 D8:有機無機ハイブリッド「有機無機ハイブリッドペロブスカイトの特性理解」

### (1) 技術的進歩と方向性(概要)

本潮流における研究開発の進展を支えてきた主要技術と、その発展の方向性を概要図及び概要として整理した。



出所)点線矢印は、ある技術の進展が別レーンの技術の開発・実装を加速した代表例を示す。  
 矢印の向き:影響が及ぶ方向(起点から波及先)を示す。  
 矢印上のラベル:影響関係の内容を簡潔に示す。

図 2-32 技術的進歩と方向性の概要図「有機無機ハイブリッドペロブスカイトの特性理解」

表 2-157 技術的進歩と方向性(概要)「有機無機ハイブリッドペロブスカイトの特性理解」

| 概要 |  |
|----|--|
| ●  | 低次元化(2000 年代後半～現在)<br>層状/準 2D HOIP を「自然量子井戸」として捉える理解が進み、励起子束縛の増大や誘電閉じ込めを設計変数として扱う流れが強まった(2019 年総説で“自然量子井戸・高励起子束縛”が明確化、2021 年には誘電閉じ込めを設計概念として整理)。その上で、n 値・スペーサー設計により分光特性を制御し、PeLED やレーザー利得媒体へ展開する方向性が定着している。  |
| ●  | 発光・レーザーの高機能化(2014 年～現在)<br>2014 年に溶液プロセス HOIP による PeLED が示され、以後、材料次元性(3D/準 2D/ナノ結晶)と欠陥/界面制御を軸に高効率化が加速した(総説では PeLED の起点を 2014 年と整理)。レーザーでは 2015 年に単結晶ナノワイヤで低閾値・高 Q が示され、2017 年には低温域での光励起 CW 発振が実証されるなど、利得・熱・相転移の“物理課題”が明確化し、フォトニクス材料としての位置づけが強化された。 |
| ●  | 強誘電・情報デバイス化(2010 年代中盤～現在)<br>HOIP の分子設計自由度を活かし、強誘電性を維持したままバンドギャップやキャリア移動度を設計し得るという見方が公的俯瞰でも明示され、メモリ等の情報デバイス応用が研究潮流として立ち上がった。他方で、金属ハロゲン化ペロブスカイト一般における“強誘電/強弾性”解釈は一枚岩ではなく、室温ではイオン移動・ポーラロン等が競合するため、デバイスでは機構分離・計測標準化が重要課題として浮上している。                    |
| ●  | ヘテロ構造・集積化(2019 年～現在)<br>単層～数層 HOIP の取得(機械剥離等)と 2D 材料とのヘテロ構造化が、物性創発とデバイス集積の両面で注目される。2023 年以降は相純度と n 値の成長制御が進み、2025 年には 2D ペロブスカイトの横方向ヘテロ構造形成、2026 年には準 2D 薄片で室温ポラリトン凝縮が報告され、vdW 材料としての集積フォトニクス(将来の室温ポラリトンレーザー等)へ接続する“デバイス駆動型”の研究が立ち上がっている。          |

## (2) タイムライン

潮流に関連する研究開発の進展を時系列で整理した。

表 2-158 タイムライン「有機無機ハイブリッドペロブスカイトの特性理解」

| 年         | 主な進展やイベント  |
|-----------|--|
| 2000-2002 | HOIP を半導体として捉えた初期研究が電子デバイスへ波及(FET (field-effect transistor: 電界効果トランジスタ)は 1999 年に初報と総説で整理)。                   |
| 2009      | 有機金属ハロゲン化ペロブスカイトが可視光増感材として PV (photovoltaics: 太陽電池) に導入され、変換効率や分光感度の実証が行われた(研究者公開情報にて 3.8% 等の記載)。            |
| 2012      | 固体型の高効率ペロブスカイト太陽電池が報告され、以後“ペロブスカイト太陽電池”として急拡大。   |
| 2013      | 逐次堆積(sequential deposition)法などプロセス技術が確立し、再現性・高性能化が進む。  |
| 2014      | 溶液プロセス HOIP による PeLED が報告され、色チューニング(ハロゲン組成で NIR/緑/赤)も示される。   |
| 2015      | 単結晶ペロブスカイトナノワイヤで低閾値・高 Q のレーザー発振(室温・波長可変)が実証。   |
| 2017      | 有機無機ペロブスカイトで光励起 CW レーザー(低温域)を実証し、相転移・利得・熱の課題を顕在化。  |
| 2018-2019 | 2D/準 2D HOIP の励起子物理(自然量子井戸、励起子-格子相互作用、ポーラロン等)が総説で体系化。  |
| 2019      | 欧州で HYPERION (HYbrid PERovskites for Next GeneratION Solar Cells and Lighting) 等、PV・照明/LED を同時に狙う研究プログラムが進行。 |
| 2020      | 米 DOE がペロブスカイト PV の研究投資を進め(2020 年の資金発表等)、安定性理解を政策課題化。  |

| 年    | 主な進展やイベント  |
|------|--|
| 2021 | DOE が 22 件のペロブスカイト R&D プロジェクトに約 4,000 万ドルを拠出と明示。                       |
| 2021 | 準 2D PeLED の物性・分光チューニング・デバイス課題(青/赤、寿命、安全性等)を総説が体系化。                    |
| 2022 | DJ 型 2D 層の設計で輸送障壁を下げ、高効率・高安定 PV へつなく“低次元界面層工学”が Science で提案。           |
| 2023 | RP/DJ 2D ペロブスカイトの相純度・n 値を狙う成長(空間閉じ込め・相図構築)が Nature Synthesis で提示。      |
| 2024 | JST CRDS が有機無機ハイブリッド材料として、PeLED/レーザー/強誘電/ヘテロ構造化等の注目動向と課題(安定性・鉛規制等)を整理。 |
| 2024 | Fraunhofer ISE と Oxford PV がペロブスカイト/Si タンデムのフルサイズモジュールで 25%効率を公表。      |
| 2025 | perovskite(オプト)エレクトロニクスのロードマップが、商用化課題(毒性・寿命・再現性等)を総括。                  |
| 2025 | 2D ペロブスカイトの横方向ヘテロ構造(モザイク状)形成など、2D 集積に向けた加工学が Nature で報告。               |

### (3) キーテクノロジー

潮流を構成し、その進展を支えている主要なキーテクノロジーについて整理した。

右列は「簡単説明 → 出現時期(年) → 現在の技術的課題 → 解決にかかる時間(見立て)とキー研究テーマ」の順で記載する(※時間見立ては、公開文献に基づく論点に対する技術成熟度からの推定)。

表 2-159 キーテクノロジー「有機無機ハイブリッドペロブスカイトの特性理解」

| 名称                     | 出現時期・背景   | 定義   |
|------------------------|---|--|
| n 値(量子井戸厚)工学           | 出現:2010 年代後半に“準 2D”として急拡大、相純度制御は 2023 年に成長法が明確化。    | 準 2D/2D HOIP の無機層厚(n)を制御し、励起子・バンドギャップ・輸送を同時最適化する。<br>課題:相混在・局所相分離、放射/非放射過程の統合設計。<br>見立て:材料相図と in situ 計測で 3-5 年。<br>キー研究:相図/成長ダイナミクス、欠陥生成制御。 |
| 誘電閉じ込め設計(スペーサー誘電率工学)   | 出現:2021 年に誘電閉じ込めを設計概念として整理。                         | 有機スペーサーの誘電特性を利用し、励起子束縛・発光強度・スペクトルを設計する。<br>課題:スペーサーの分極応答・動的格子との連成評価。<br>見立て:理論-実験の接続で 5 年。<br>キー研究:多スケール計算、時間分解分光。                           |
| 準 2D PeLED の高効率・長寿命化   | 出現:2014 年。課題:青色の効率・スペクトル安定性、EQE ロールオフ、動作寿命、環境安全性。   | 溶液プロセスで発光層を形成し、高 PLQY とキャリア閉じ込めで高効率 LED を実現する。<br>見立て:用途限定の先行実装は 3-5 年、フル用途は 5-10 年。<br>キー研究:青色発光相の安定化、熱/イオン移動管理、封止。                         |
| 欠陥寛容性を活かす欠陥/界面パッシベーション | 出現:PV/LED の高効率化と同時に 2010 年代。課題:動作中の欠陥生成/移動、界面反応の追跡。 | ペロブスカイトの欠陥準位・界面準位を化学的に抑え、非放射再結合と劣化を抑制。<br>見立て:オペランド計測と材料設計の統合で 3-7 年。<br>キー研究:オペランド分光、界面化学。  |

| 名称                                   | 出現時期・背景  | 定義   |
|--------------------------------------|--|--|
| 低閾値マイクロレーザー(光励起)                     | 出現時期: 2014-2015(ペロブスカイト微小構造での低しきい光励起レーザーの初実証)<br>背景: 鉛ハロゲン化ペロブスカイトの高利得・低非放射再結合と高Qマイクロ共振器(ナノワイヤ/マイクロプレート)の形成容易性が低しきい化を実現。                           | 単結晶/高品質微細構造で利得と共振器を最適化し低閾値レーザーを実現。<br>課題: 室温CW化、熱劣化、電気注入。<br>見立て: 光励起の実用(センサー等)は3-5年、電気注入は10年級。<br>キー研究: 熱設計、Auger抑制、電極/注入構造。        |
| CWレーザー(連続波)への材料・相設計                  | 出現時期: 2017(ペロブスカイト半導体でのCW発振の初実証)~現在<br>背景: CW化には熱・オージェ・トラップ・イオン移動の抑制が必須。高結晶性・表面/界面パッシベーション、準2D化や誘電閉じ込め(量子井戸設計)等の材料・相設計が進展。                         | 相転移や混相を利得設計に活用し、CW利得を成立させる。<br>見立て: 室温での原理実証に5-10年。<br>キー研究: 相制御・熱抵抗低減・キャリア再結合制御。  |
| ポラリトニクス(室温ポラリトン凝縮/レーザー)              | 出現: 2018-2019に室温相互作用、2026に室温凝縮報告。  | 強い励起子振動子強度を利用し、低消費のコヒーレント状態(凝縮)を作る。<br>課題: 散乱損失、均一薄片・キャビティ集積、電気制御/注入。<br>見立て: 光励起デバイス3-7年、電気駆動10年級。<br>キー研究: 低損失キャビティ、電荷チューニング、波導集積。 |
| HOIP強誘電体の分子設計                        | 出現時期: 2010年代後半~2020年代前半に設計指針が体系化<br>背景: 極性有機カチオン導入、双極子配向制御、H結合ネットワーク、層状(Dion-Jacobson/Ruddlesden-Popper)構造設計により自発分極・キュリー温度・保持特性を最適化。               | 有機双極子と無機骨格歪みの協奏で分極反転を実現。<br>課題: 疲労・漏れ電流・高速駆動、デバイス集積プロセス。<br>見立て: 機能実証は進行中、実装は5-10年。<br>キー研究: ドメイン制御、薄膜化・界面。                          |
| 強誘電とイオン移動”の機構分離                      | 出現時期: 2010年代後半から議論が本格化し、2022-2024にイオン移動起因を支持する報告が主流化<br>背景: 太陽電池やメモリのヒステリシスの起源を、周波数・温度依存測定や走査プローブで切り分け、多くの系でイオン移動/界面電荷が支配的と整理。                     | ヒステリシス等の起源が強誘電なのかイオン移動なのかを計測・解析で切り分ける。<br>課題: 計測条件依存、可逆劣化との混同。<br>見立て: 標準化と多モーダル計測で3-5年。<br>キー研究: 周波数依存、温度依存、オペランド観察。                |
| vdW(van der Waals: ファンデルワールス)ヘテロ構造集積 | 出現時期: 2010年代中盤(2D半導体一般)~2020年代に実装・集積の議論が加速; 2025に2Dペロブスカイトの側方ヘテロ構造にも進展<br>背景: 原子層接合の低欠陥界面で新機能(バンドエンジニアリング、界面励起子など)を創出。大面積成膜、アライメント、低温プロセスによる集積化が鍵。 | 2D HOIP薄片を他2D材料と積層し、界面電荷移動・界面励起子等を設計する。<br>課題: 界面清浄度、再現性、スケール。<br>見立て: 研究用デバイスは3-5年、製造技術は5-10年。<br>キー研究: ドライ転写、界面解析、パターニング。          |
| 2D材料デバイス基盤技術(成膜・界面評価・集積)             | 出現時期: 2010年代(CVD等)~2022-2023に2Dペロブスカイトの層厚制御・新相(DJ)合成が進展<br>背景: 量子井戸厚み/井戸数の精密制御、欠陥・界面の原子スケール解析、低温・後工程適合の積層プロセス確立が安定動作とスケール化の要。                      | 次世代半導体に向けた2D材料導入の基盤(界面評価、成膜、集積化、共用設備)を整備。<br>課題: 大面積・低欠陥、プロセス損傷、コンタクト抵抗。<br>見立て: 10年スパン。<br>キー研究: 低損傷成膜/加工、ナノ界面計測。                   |

| 名称                      | 出現時期・背景  | 定義   |
|-------------------------|--|--|
| 規制・EHS 適合(鉛・ハロゲン・リサイクル) | 出現時期: 2020 年代、商用化接近とともに国際プログラムで EHS 要件が前面化<br>背景: 鉛含有の封止・溶出抑制・回収、ハロゲン化物の取扱い、モジュール設計段階からのリサイクル性確保が要件化。各国資金プログラムや規制が指針を提示。 | 鉛規制や廃棄物低減に対応する材料代替・回収技術。<br>課題: 回収プロセスのコスト、非鉛系の性能/安定性。<br>見立て: 用途別に段階導入(5-10 年)。<br>キー研究: 封止 + 回収設計、非鉛系探索。 |

#### (4) 実用化可能性

本潮流における技術の実用化可能性について、想定されるユースケースや波及が期待される分野の観点から整理した。

表 2-160 実用化可能性「有機無機ハイブリッドペロブスカイトの特性理解」

| セクター              | ユースケースや波及が期待される産業領域   |
|-------------------|---|
| ディスプレイ・AR/VR      | ユースケース: 高色純度・狭線幅発光を活かすマイクロディスプレイ、AR/VR 用高輝度光源。準 2D PeLED は分光チューニング(紫~NIR)と材料設計が体系化されており、将来的に用途優先での導入が想定される。<br>課題: 動作寿命、特に青色の効率・安定性、EQE ロールオフ、封止・熱管理。<br>展望: 材料相設計(n 値/スペーサー)とデバイス工学の統合で寿命課題を詰め、まずは限定条件のディスプレイ用途から段階導入。 |
| 照明・可視光通信          | ユースケース: 低コスト・印刷プロセスでの照明、可視光通信(Li-Fi(Light Fidelity: 可視光通信))光源。2014 年に PeLED が実証され、色チューニングも示された。<br>課題: 高電流密度下の劣化、環境耐性、規制対応。<br>展望: 封止と材料回収設計を含む EHS 対応が必須で、屋内・短寿命用途から検討。  |
| 集積フォトニクス          | ユースケース: マイクロレーザー、オンチップ光源、光センシング。単結晶ナノワイヤで低閾値・高 Q レーザーが実証され、フォトニクス材料としての可能性が明確。<br>課題: 室温 CW 化、電気注入、熱設計、製造ばらつき。<br>展望: 当面は光励起型のセンサー/分析用途で実装経験を積み、注入構造・熱拡散設計を詰めて電気駆動へ。  |
| 低消費コヒーレント光源・ポラリトン | ユースケース: 室温ポラリトンレーザー、超低消費スイッチ/回路。2026 年に準 2D で室温ポラリトン凝縮が報告され、vdW 材料とのヘテロ集積も視野。<br>課題: 低損失キャビティ集積、均一薄片作製、電気制御・電気注入。<br>展望: 短期は光励起デモ、並行して 2D 材料デバイス基盤(界面評価/集積)を整備。   |
| メモリ・ニューロモルフィック    | ユースケース: 強誘電メモリ(FeRAM)、メモリスタ、ニューロモルフィック回路。HOIP 強誘電体は構造-物性相関と応用可能性が整理されている一方、MHP 一般では“強誘電”と“イオン移動”の機構分離が重要。<br>課題: 漏れ電流・疲労・ばらつき、イオン移動起因のヒステリシス、計測標準化。<br>展望: HOIPF では分子設計とドメイン制御、MHP 系ではイオン移動を“制御機能化”する設計により、用途選別しながら実装。  |
| 放射線検出・イメージング      | ユースケース: X 線検出・画像化(医療/非破壊検査)。2D ハイブリッドペロブスカイト単結晶シンチレータによる高空間分解能 X 線イメージング例が報告されている。<br>課題: 長期安定性、厚膜/大面積化、環境耐性と封止。<br>展望: 単結晶成長・封止のスケール技術が鍵で、限定環境の産業検査から導入が現実的。   |
| エネルギー(PV・BIPV)    | ユースケース: 軽量・柔軟を活かした BIPV(building-integrated photovoltaics: 建材一体型太陽電池)等。NEDO GI 基金は 2030 年までにコスト目標や製造プロセス確立を掲げ、DOE も安定性理解に資金投入。<br>課題: 耐久性、標準化、鉛規制対応。<br>展望: 政策プロジェクトを梃子に、材料・プロセス・評価標準の同時整備が進む。                          |

| セクター          | ユースケースや波及が期待される産業領域  |
|---------------|--|
| 製造装置・材料産業     | ユースケース: 塗布、電極形成、封止、評価・解析装置の市場形成。NEDO GI 基金は塗布・電極・封止等の要素技術確立を明示。<br>課題: 歩留まり、再現性、量産スループット、品質保証。<br>展望: 材料・プロセス・評価の“セット開発”が不可欠で、共用評価基盤の整備が競争力を左右。                                |
| 政策・標準化・経済安全保障 | ユースケース: 重要材料(例: ヨウ素)やサプライチェーン、鉛廃棄物問題への対応。CRDS は鉛規制対応や資源観点(ヨウ素等)を指摘。2D 材料導入戦略提案は、界面評価・共用設備・長期戦略の必要性を提示。<br>課題: 規制適合、標準化、国際競争下の研究開発体制。<br>展望: 技術成熟と同時に、評価標準・回収スキーム・研究開発体制の構築が必須。 |

## (5) 出所

- JST 研究開発戦略センター(CRDS),「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野(2024 年) 2.5.6 有機無機ハイブリッド材料(抜粋 PDF)」  
[https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-04/CRDS-FY2024-FR-04\\_20506.pdf](https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2024/FR/CRDS-FY2024-FR-04/CRDS-FY2024-FR-04_20506.pdf)
- JST CRDS, 戦略プロポーザル「半導体デバイス革新に向けた材料開発戦略 ~2次元半導体材料の新規導入~(CRDS-FY2022-SP-06)」  
<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2022/SP/CRDS-FY2022-SP-06.pdf>
- NEDO グリーンイノベーション基金「次世代型太陽電池の開発(ペロブスカイト太陽電池)」  
<https://green-innovation.nedo.go.jp/project/next-generation-solar-cells/>
- U.S. Department of Energy (DOE), Solar Energy Technologies Office “Fiscal Year 2020 Perovskite Funding Program”  
<https://www.energy.gov/eere/solar/solar-energy-technologies-office-fiscal-year-2020-perovskite-funding-program>
- European Commission CORDIS, “HYbrid PERovskites for Next GeneratION Solar Cells and Lighting (HYPERION), Project ID 756962”  
<https://cordis.europa.eu/project/id/756962>
- Tan, Z.-K. et al., “Bright light-emitting diodes based on organometal halide perovskite” (Nature Nanotechnology, 2014)  
<https://www.nature.com/articles/nnano.2014.149.pdf>
- Zhang et al., “High-performance quasi-2D perovskite light-emitting diodes: from materials to devices” (Light: Science & Applications, 2021)  
<https://www.nature.com/articles/s41377-021-00501-0.pdf>
- Zhu, H. et al., “Lead halide perovskite nanowire lasers with low lasing thresholds and high quality factors” (Nature Materials, 2015)  
<https://www.nature.com/articles/nmat4271.pdf>
- Jia, Y. et al., “Continuous-wave lasing in an organic-inorganic lead halide perovskite semiconductor” (Nature Photonics, 2017)  
<https://www.nature.com/articles/s41566-017-0047-6.pdf>
- Mauck, C. M. & Tisdale, W. A., “Excitons in 2D Organic-Inorganic Halide Perovskites” (Trends in Chemistry, 2019 – ScienceDirect)  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589597419300942>
- RSC, “Dielectric confinement for designing compositions and optoelectronic properties of 2D layered hybrid perovskites” (Physical Chemistry Chemical Physics, 2021)  
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/cp/d0cp04682e>
- “Synthesis of 2D perovskite crystals via progressive transformation of quantum well thickness” (Nature Synthesis, 2023)  
<https://www.nature.com/articles/s44160-023-00422-3.pdf>
- “Metastable Dion-Jacobson 2D structure enables efficient and stable perovskite solar cells” (Science, 2022)  
<https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.abj2637>
- RSC, “Mixed ionic-electronic conduction in Ruddlesden-Popper and Dion-

Jacobson 2D perovskites ...” (Journal of Materials Chemistry C, 2024)

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2024/tc/d4tc01010h>

- “Ferroelectric hybrid organic–inorganic perovskites and their applications” (National Science Review, 2023)  
<https://academic.oup.com/nsr/article/10/2/nwac240/6794282>
- “The Ferroelectric Ferroelastic Debate about Metal Halide Perovskites” (J. Phys. Chem. Lett., 2022)  
[https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.jpcllett.2c01945?ref=article\\_openPDF](https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.jpcllett.2c01945?ref=article_openPDF)
- “Hysteresis related to ion migration rather than ferroelectric ...” (Applied Physics Letters, 2024)  
<https://pubs.aip.org/aip/apl/article/125/8/082901/3308419/Hysteresis-related-to-ion-migration-rather-than>
- “Roadmap on metal-halide perovskite semiconductors and devices” (Materials Today Electronics, 2025 – Open access)  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S277294942500004X>
- “Mosaic lateral heterostructures in two-dimensional perovskite” (Nature, 2025)  
<https://www.nature.com/articles/s41586-025-09949-1.pdf>
- “Room-temperature polariton condensate in a quasi-2D hybrid perovskite” (Nature Communications, 2026) <https://www.nature.com/articles/s41467-026-68723-7.pdf>
- “Two-dimensional hybrid perovskites sustaining strong polariton interactions at room temperature” (Science Advances)  
<https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/sciadv.aav9967>
- RSC, “Organic–inorganic hybrid perovskite materials and their application in transistors” (Materials Chemistry Frontiers, 2023)  
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2023/qm/d3qm00697b>
- Fraunhofer ISE Press Release, “Oxford PV and Fraunhofer ISE Develop Full-sized Tandem PV Module with Record Efficiency of 25 Percent” (2024)  
<https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2024/oxford-pv-and-fraunhofer-ise-develop-full-sized-tandem-pv-module-with-record-efficiency-of-25-percent.html>
- Oxford PV Press Release, “Oxford PV sets new solar panel efficiency world record” (2024) <https://www.oxfordpv.com/press-releases/oxford-pv-solar-energy-innovation>
- Researchmap(宮坂力), “Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells (2009)”掲載情報  
[https://researchmap.jp/read0196799/published\\_papers/15523196](https://researchmap.jp/read0196799/published_papers/15523196)

## 3. 今後の潮流となりうる研究の方向性

---

インタビューから得られた今後の技術トレンドおよび潮流について、分野毎に整理を行った。

### 3.1.1 健康・医療・食料/バイオ分野

健康・医療・食料/バイオ分野において、複数の技術・潮流をまたぐより大きな研究の方向性としては以下が挙げられる。

#### (1) 方向性 1: AI と DBTL の本格導入によるテーマ設定と実用化推進

AI・データサイエンスの活用は、創薬にとどまらず、微生物ものづくり、デジタル育種、高機能性物質探索など、健康・食料・バイオ生産全体に波及する基盤になりつつある。今後は、バイオ分野(微生物ものづくり)では AI と DBTL(Design(設計)-Build(自動合成/組換え)-Test(高スループット試験)-Learn(機械学習))の本格導入が潮流の中心であるが、国内では自動化設備・運用体制・品質モニタリングが不足し、DBTLの実行が困難である。バイオ分野のみならず AI、工学、情報科学との実効的な融合を進める仕組みの設計が必要である。

有識者インタビューでは、以下の意見が挙げられている。

- 大量データ取得と自動化のサイクルを早期に確立すること、AI/定向進化で新規ゲノム編集酵素を創出すること、デジタル育種(ゲノム情報と AI で標的選定・育種を行う手法)を実装することが重要である。
- 自動化・DBTL 運用、研究フローを設計・統合・加速する人材(オーケストレーション人材)、これらの教育基盤、知財・産業化志向が不足している。国内で成功事例が少なく若手に学習ループが根付いていない。

#### (2) 方向性 2: 医薬×サステナビリティを軸とした異分野融合と新モダリティの創出

社会的サステナビリティ(製造コスト・流通負荷の低減)と地球環境のサステナビリティ(CO2 削減・資源循環等)を同時に満たす研究が今後の主潮流となり得る。日本の強みである材料科学と、医薬の連携を推進し、環境材料を医療へ、バイオメディカル技術を環境課題へと活用する視点の潮流があり得る。

有識者インタビューでは、以下の意見が挙げられている。

- 明確な共通目標(例:創薬×サステナビリティ)を設定し、日本が強みを持つ材料分野と創薬創薬との連携を推進すべきではないか。
- 生物医薬の常温輸送を可能にするハイドロゲル素材(低温輸送の電力負荷削減)や環境材料の活用のほか、合成が容易でコスト面でもサステナブルな自己集合医薬やスープラモレキュラーポリマーなど、新モダリティのコンセプト創出がアカデミアの役割として重要になってくるのではないか。

#### (3) 方向性 3: 診療情報・高次オミクス統合による個別化・精密医療基盤の高度化

ゲノム、単一細胞解析、空間オミクス、臨床マルチオミクス等の高次データを、診療情報や患者縦断データと安全に接続し、病態理解、創薬標的探索、患者層別化へ結び付ける研究が今後の大きな潮流となり得る。とりわけ、ゲノム等の取得技術が高度化しても、診療情報の抽出・統合が不十分なままでは研究と実装の双方でボトルネックとなるため、データ取得、標準化、解析、共有を一体で進める基盤整備が重要である。

また、空間トランスクリプトームや臨床マルチオミクスの進展により、疾患のヘテロジェネイティや経時変化を把握し、病態をより精緻に再定義する方向性が強まると考えられる。この際には、計測感度・コスト・標準化に加え、個人情報保護、倫理、データ共有インセンティブ等を含む制度設計が重要となる。

有識者インタビューでは、以下の意見が挙げられている。

- ゲノム情報の取得・公開は米国 The Cancer Genome Atlas Program (TCGA)を始めとして進みつつあるが、診療情報については欠落している。薬剤名・投与日・治療効果等の一部情報を半自動で抽出・統合できるツールができるとブレイクスルーになる。
- 単一細胞・オミクスと患者の縦断データを安全に接続し、創薬標的を同定する方向が重要である。あわせて、データ共有のインセンティブ設計、ネガティブデータを含む共有基盤、個人情報・倫理・制度整備が必要である。
- 空間トランスクリプトームの高感度化や臨床マルチオミクスと臨床情報の統合は、今後 5～10 年で重要性を増す。日本としては、海外製nキット依存ではなく、高感度空間オミクス等の独自基盤技術を核に競争優位を築く視点が必要である。
- ヘテロジェネイティと経時変化を軸とし、動的オミクス、基礎から臨床までを見通した橋渡し設計を進めることが重要である。

### 3.1.2 環境・エネルギー分野

環境・エネルギー分野において、複数の技術・潮流をまたぐより大きな研究の方向性としては以下が挙げられる。

#### (1) 方向性 1:基礎・応用研究段階からの適切な KPI 設定および検証基盤の前倒し整備

環境・エネルギー分野では研究開発への投資トレンドは、常に市場・制度の状況に左右される。したがって、この分野では、研究段階から将来の実証・制度・市場要件に耐える形で、評価指標(KPI)・データ・手順を整備し、基礎～応用の成果を実証へ橋渡しできる共通の土台を作ることが重要である。

有識者インタビューでは、以下の意見が挙げられている。

- LCA やカーボンフットプリント等の共通 KPI を早期に定義し、研究側と政策側で「実証成功」の判断軸を共有すべき。
- 認証・トレーサビリティや安全・環境影響評価のための計測・データ要件を、要素技術研究の段階から織り込む必要がある。

#### (2) 方向性2:AI×計測を活用した予測・運用・保全までをカバーしたバリューチェーン構築

AI、スパコン、センシング、衛星観測を統合し、モデル構築→観測→データ同化→意思決定を循環させる研究開発バリューチェーンが特に環境分野で波及している。CCS のモニタリング、気候・水循環の予測、防災、資源循環の選別・品質保証など、対象は異なっても“データで回す”設計思想が共通している。

有識者インタビューでは、以下の意見が挙げられている。

- データ生成側の高度化に加え、利用者側で意思決定に資する情報へ変換する「解釈・抽出」層の整備が重要で、両者連携が肝。
- 安全・劣化・寿命を扱う診断技術(デジタルツイン等)を、現場データ収集とセットで強化すべき。

#### (3) 方向性3:要素技術の統合とスケールアップ障壁の克服

研究のフロンティアは「新材料・新反応の発見」だけでなく、それらを実際の条件下で使える形にまとめ上げ、試作・実証へと持ち上げる段階に移っている。要素技術を段階的に統合しながら性能・安全・コストを同時に検証し、スケールアップで顕在化する障壁(耐久性、劣化、ばらつき、供給制約等)を解く研究が重要。

有識者インタビューでは、以下の意見が挙げられている。

- 極限環境(例:高熱・強放射線等)や長期運転で顕在化する劣化・信頼性を、早い段階から試験・モデル化し、設計へ戻すべき。

### 3.1.3 システム・情報科学技術分野

システム・情報科学技術分野において、複数の技術・潮流をまたぐより大きな研究の方向性としては以下が挙げられる。

#### (1) 方向性1: LLM が記憶を持たないことで生じた「コンテキスト問題」への対処

現状の LLM(トランスフォーマー)は記憶を持っておらず、AI サービスが適切な会話を実現するため、過去の会話履歴、専門知識等をアドホックに inputs する「コンテキストエンジニアリング」により対処しているが限界がある。この問題を解消することは AI の信頼性向上や長期整合性を実現する上で根本的に重要である。

有識者インタビューでは、以下の意見が挙げられている。

- 機械学習分野では「記憶」を明示的に持つモデル(SSM:状態空間モデル等)により対処できる可能性がある。(瀧川教授)
- パラメータ学習のパラダイムから、LLM を核に「コンテキストエンジニアリング」と「外部長期記憶」を組み合わせる問題解決するパラダイムにシフトしている。

#### (2) 方向性2: LLM の言語空間から物理空間や認知空間への拡張

LLM 及び初期の VLM(視覚言語モデル)では「言語表現の空間」という狭い空間にとらわれており、実世界の空間や物理法則を理解していない。この課題を解決するため、認知科学的アプローチ、世界モデル等が重要な方向性である。

有識者インタビューでは、以下の意見が挙げられている。

- 成長する身体とセンサー・知能の統合設計や、好奇心や内発的動機付けのための設計が重要であり、予測符号化(Predictive Coding/Processing)は一つの実現手段である。
- 言語・音声・画像・ロボティクスを統合したマルチモーダル基盤モデルから、世界の状態遷移や因果関係をシミュレーションする世界モデルへの転換も重要なトレンドである。

#### (3) 方向性3: 性能の追求から、AI を活用する社会構築への転換

ハイパースケーラーの投資競争の時代から、AI を社会で機能させるための技術や制度を構築することが次のトレンドとなると考えられる。AI の依存性や知能低下への対応は民間のみでは進みづらく、安全性・ルール順守を重視する日本の文化的背景とも合致している。

有識者インタビューでは、以下の意見が挙げられている。

- モデルの精度を高める既存パラダイムから脱却し、人間-AI の双方向アラインメントの理論化・制度化・実装が重要である。
- 技術的ガードレール(文脈適応・広告/誘導抑止・安全制御)と人側ガードレール(リテラシー・自

己点検)を統合的に設計することが重要。AIとの距離調整(依存性の低減)が重要である。(矢谷教授)

### 3.1.4 ナノテクノロジー・材料分野

ナノテクノロジー・材料分野において、複数の技術・潮流をまたぐより大きな研究の方向性としては以下が挙げられる。

#### (1) 方向性1:精密合成・配列制御の深化と機能ターゲットの拡張

ナノテクノロジー・材料分野では、分子・高分子の精密設計そのものが新たな出口を規定する段階に入りつつある。触媒反応による有機合成では、ラジカル中間体の精密制御や量子化学計算を活用した反応経路探索が今後も重要であり、高分子分野では、重合法の統合・スイッチング、動的共有結合、骨格変換等を通じて、配列・結合・主鎖構造を精密に制御する方向が強まると考えられる。あわせて、医薬用途に限らず、精密なポリマー改質、バイオコンジュゲーション、ゲルやDDS、極限環境材料等へと機能ターゲットを拡張する研究が、今後5～10年の主流となり得る。

有識者インタビューでは、以下の意見が挙げられている。

- 有機合成技術の出口は医薬分野に限られず、C-H活性化による精密なポリマー改質や、バイオコンジュゲーションによるタンパク質・細胞改質などへの展開が重要である。
- 動的共有結合、重合法の統合・スイッチング、骨格変換等は、自己修復・再加工・長寿命化に加え、医療・ライフサイエンスや極限環境材料への展開が期待される。

#### (2) 方向性2:循環性を前提とした材料設計とアップサイクル志向への転換

循環性を前提とした材料設計への転換が大きな方向性である。従来の「高性能・高安定」一辺倒の材料開発から、分解、再重合、再加工、アップサイクルまでを見通して、分子構造、結合様式、接着・界面、回収プロセスを一体で設計する研究へと重心が移っている。ポリオレフィンとポリエステルを双方を視野に入れた分解・変換技術、化学分解と酵素分解を連動させた高分子設計、難リサイクル材や極限環境材料の循環化、さらには用途起点のアップサイクル設計が今後の重要テーマになる。その際、低コスト・低エネルギーで実装可能な循環プロセスであることが重要条件となる。

有識者インタビューでは、以下の意見が挙げられている。

- 化学分解によって分子量を低下させ、酵素により生分解するといったように、化学分野・バイオ分野の両面から高分子の分解性を設計する研究が潮流となり得る。
- 多層・マルチマテリアル・特殊用途の安定高機能樹脂など難リサイクル材の循環技術や、アップサイクルのターゲット起点で分子構造と分解・変換プロセスを設計する発想が重要である。

#### (3) 方向性3:計算・データ駆動と計測・製造を接続した実装加速型研究への移行

計算・データ駆動型研究と計測・デバイス・製造を接続した実装加速型の研究体制が重要になる。有機合成分野では量子化学計算による反応経路探索、高分子分野ではAI/MIを活用した配列・物性設

計が進む一方、データの標準化や共有基盤は未成熟である。加えて、量子マテリアルでは、反強磁性体スピントロニクス、ネルンスト型新熱電、NV センター量子センシング等を含む、半導体・量子・光を横断する「情報インフラ素材」を戦略ターゲットとし、材料合成段階から計測・制御・デバイス・製造条件を織り込んだアジャイルな分野横断連携が求められている。日本の強みである量子化学計算、精密重合・ゲル、素材企業群を生かしつつ、データ基盤整備と大型の連携拠点形成を進めることが、今後 5～10 年の競争力を左右すると考えられる。

有識者インタビューでは、以下の意見が挙げられている。

- 量子化学計算は日本の強みであり、新規反応経路の創出には AI だけでなく計算科学が必要である。あわせて、プロセス・インフォマティクスを進めるにはデータ品質の改善が前提となる。
- ポリマーでは AI/MI 活用のためのデータ標準化と共有 DB 整備が重要であり、国主導の基盤整備が期待される。
- 半導体・量子・光を横断する情報インフラ素材を戦略ターゲットとし、基礎—計測・制御—デバイス—製造を短サイクルで往復する分野横断チームと一気通貫支援が必要である。

## 4. 最先端研究の潮流と戦略的創造研究推進事業等の対応

---

### 4.1 調査方法

本調査で抽出した研究分野ごとの研究開発の潮流が、JST 戦略的創造研究推進事業の CREST・さがけの研究領域及び当該領域に関連する戦略目標、並びに AMED 革新的先端研究開発支援事業の CREST・PRIME の研究開発領域・研究開発目標(以下「研究領域」とする。)に対応しているか、試行的に整理・分析を行った。

調査対象事業は、1997 年以降に実施された JST 戦略的創造研究推進事業(CREST・さがけ等)および AMED 革新的先端研究開発支援事業(CREST・PRIME)である。調査対象となる研究領域が潮流に該当するか否かについては、各事業の公式ウェブサイトに掲載されている研究領域の概要および採択課題の名称・概要に基づき判定を行った。

なお本整理は、戦略目標等及び研究領域等の記載に基づく概括的な整理であり、JSTやAMEDの個別の採択課題毎の成果論文や成果報告書等までを網羅的に分析したものではない。このため、実際には潮流と関係する研究領域であっても、該当するものとして拾えていない可能性がある。

### 4.2 調査結果

各研究分野における、潮流別の該当研究領域数について、表 4-1 および以下の通り示す。研究分野別の結果は以下のとおりである。

- 健康・医療・食料／バイオ生産分野では、A8「単細胞解析、空間情報及び時間軸による分析への展開」、A7「微生物細胞工場による持続可能なバイオ生産」、A1「モダリティ多様化とデリバリー・製造基盤の高度化」、A6「臓器間ネットワーク解析と介入標的探索」等において該当事業数が多く、特にA8に集中する傾向がみられる。A8、A7は 2011 年以降現在に至るまで、連続して支援が行われている状況であった。
- システム・情報科学技術分野についてみると、C6「トランスフォーマーに続く学習基本原理の探索」において、1997 年から支援が実施されていた。
- 環境・エネルギー分野については、該当領域数自体は他分野と比較して多くはないものの、B5「CO<sub>2</sub> を原料とした化学品・燃料合成プロセス」や B8「水循環観測技術と災害予測の連携」などにおいて、支援が行われていた。
- ナノテクノロジー・材料分野についてみると、D7「量子性発現技術の進展」、D1「触媒反応による有機合成の進展」、D3「新機能獲得に向けた広域な材料探索」、D5「プロセス・インフォマティクスの進展」において 1997 年以降支援が行われていた。

一方、健康・医療・食料／バイオ生産分野では特に、潮流には直接該当しないものの、同分野に該当すると考えられる領域が多く確認された(表 4-2)。また、他の分野においても、同様の例が見られた。

そこで、今回整理した潮流と JST・AMED が支援してきた研究領域の間には、どのような違いがあるかを比較した。その結果が以下である。

- 健康・医療・食料／バイオ生産分野、環境・エネルギー分野では、今回の潮流は、一部を除き、社会実装や具体的な応用の方向性が比較的明確に示されている。
- 本調査で整理した潮流は、結果として、技術の進展や社会的要請が比較的明確に現れつつあるものが抽出されている一方、CREST・さきがけ及びAMED 革新的先端研究開発支援事業では、将来の展開が定まり切っていない萌芽的研究・基盤研究も幅広く対象となっていた。

表 4-1 潮流に該当する研究領域数(研究分野・潮流別)

|                           | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 |    |
|---------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 健康・医療・食料／バイオ生産分野(CREST)   | 4  | 1  | 1  | 2  | 0  | 3  | 7  | 10 |    |
| 健康・医療・食料／バイオ生産分野(さきがけ)    | 3  | 0  | 2  | 1  | 0  | 3  | 5  | 8  |    |
| 健康・医療・食料／バイオ生産分野(PRIME)   | 1  | 0  | 0  | 0  | 2  | 1  | 2  | 2  |    |
| 健康・医療・食料／バイオ生産分野(A-CREST) | 3  | 0  | 1  | 0  | 2  | 3  | 2  | 4  |    |
| 健康・医療・食料／バイオ生産分野(ACT-X)   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 3  |    |
|                           | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | B8 | B9 |
| 環境・エネルギー分野(CREST)         | 0  | 1  | 1  | 1  | 3  | 0  | 0  | 2  | 0  |
| 環境・エネルギー分野(さきがけ)          | 0  | 0  | 0  | 1  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  |
|                           | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 |    |
| システム・情報科学技術(CREST)        | 0  | 0  | 2  | 3  | 4  | 10 | 2  | 0  |    |
| システム・情報科学技術(さきがけ)         | 0  | 0  | 2  | 3  | 2  | 6  | 2  | 1  |    |
| システム・情報科学技術(ACT-X, ACT-I) | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 2  | 0  | 0  |    |
|                           | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | D7 | D8 |    |
| ナノテク・材料分野(CREST)          | 9  | 3  | 10 | 4  | 7  | 1  | 11 | 2  |    |
| ナノテク・材料分野(さきがけ)           | 7  | 1  | 6  | 2  | 3  | 1  | 5  | 0  |    |
| ナノテク・材料分野((ACT-X)         | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0  |    |

注) A1 から D8はそれぞれ以下の潮流に該当する。

- A1:モダリティ多様化とデリバリー・製造基盤の高度化
- A2:AI 駆動型創薬パイプラインの構築
- A3:遺伝子デリバリー×ゲノム編集による in vivo / ex vivo 遺伝子治療の高度化
- A4:個別化・精密医療インフラの構築
- A5:AI による診断支援と予測・予防への展開
- A6:臓器間ネットワーク解析と介入標的探索
- A7:微生物細胞工場による持続可能なバイオ生産
- A8:単細胞解析、空間情報及び時間軸による分析への展開
- B1:フュージョンエネルギー原型炉開発に向けた研究加速
- B2:革新的 CO2 回収・貯留・利用技術
- B3:革新的蓄電技術の発展
- B4:水素・アンモニアの大量製造・輸送・利用技術確立
- B5:CO2 を原料とした化学品・燃料合成プロセス
- B6:全球のモデリング、予測の高度化
- B7:水循環観測技術と災害予測の連携
- B8:資源循環技術
- C1:基盤モデル的なアプローチの画像分野への適用
- C2:拡散モデル等による画像生成モデルの高精度化
- C3:大規模言語モデルの汎用性発見と急速な実用化の進展
- C4:将来の情報通信基盤に対するセキュリティの確保
- C5:対話型 AI と協力した問題解決方法論の研究の進展
- C6:個別分野の問題を解く AI の成功から汎用的な科学者 AI へ
- C7:トランスフォーマーに続く学習基本原理の探索
- C8:実生活の無数のバリエーションに基盤モデル的なアプローチで対処
- D1:触媒反応による有機合成の進展
- D2:高分子配列の制御技術の進展
- D3:新機能獲得に向けた広域な材料探索

D4:次世代元素戦略「循環型材料の開発  
D5:プロセス・インフォマティクスの進展  
D6:熱電変換・熱伝導制御技術の進展  
D7:量子性発現技術の進展  
D8:有機無機ハイブリッドペロブスカイトの特性理解

表 4-2 潮流以外の戦略目標及び研究領域・研究開発領域(2010 年以降、健康・医療・食料／バイオ生産分野)

| 年    | 戦略目標  | 研究領域・研究開発領域                                     | 研究総括   | 事業タイプ   |
|------|---|---|--------|---------|
| 2010 | 炎症の慢性化機構の解明に基づく、がん・動脈硬化性疾患・自己免疫疾患等の予防・診断・治療等の医療基盤技術の創出                        | 炎症の慢性化機構の解明と制御に向けた基盤技術の創出                       | 宮坂 昌之  | CREST   |
| 2010 | 炎症の慢性化機構の解明に基づく、がん・動脈硬化性疾患・自己免疫疾患等の予防・診断・治療等の医療基盤技術の創出                        | 炎症の慢性化機構の解明と制御                                  | 高津 聖志  | さきがけ    |
| 2010 | 炎症の慢性化機構の解明に基づく、がん・動脈硬化性疾患・自己免疫疾患等の予防・診断・治療等の医療基盤技術の創出                        | 炎症の慢性化機構の解明と制御に向けた基盤技術の創出(JST-CREST→AMED-CREST) | 宮坂 昌之  | A-CREST |
| 2012 | 多様な疾病の新治療・予防法開発、食品安全性向上、環境改善等の産業利用に資する次世代構造生命科学による生命反応・相互作用分子機構の解明と予測をする技術の創出 | ライフサイエンスの革新を目指した構造生命科学と先端的基盤技術                  | 田中 啓二  | CREST   |
| 2012 | 多様な疾病の新治療・予防法開発、食品安全性向上、環境改善等の産業利用に資する次世代構造生命科学による生命反応・相互作用分子機構の解明と予測をする技術の創出 | ライフサイエンスの革新を目指した構造生命科学と先端的基盤技術                  | 若槻 壮市  | さきがけ    |
| 2015 | 革新的医療機器及び医療技術の創出につながるメカノバイオロジー機構の解明   | メカノバイオロジー機構の解明による革新的医療機器及び医療技術の創出               | 曾我部 正博 | A-CREST |
| 2015 | 革新的医療機器及び医療技術の創出につながるメカノバイオロジー機構の解明   | メカノバイオロジー機構の解明による革新的医療機器及び医療技術の創出               | 曾我部 正博 | PRIME   |
| 2016 | 生命科学分野における光操作技術の開発とそれをを用いた生命機能メカニズムの解明  | 光の特性を活用した生命機能の時空間制御技術の開発と応用                     | 影山 龍一郎 | CREST   |
| 2016 | 生命科学分野における光操作技術の開発とそれをを用いた生命機能メカニズムの解明  | 生命機能メカニズム解明のための光操作技術                            | 七田 芳則  | さきがけ    |
| 2017 | 細胞外微粒子により惹起される生体応答の機序解明と制御  | 細胞外微粒子に起因する生命現象の解明とその制御に向けた基盤技術の創出              | 馬場 嘉信  | CREST   |
| 2017 | 細胞外微粒子により惹起される生体応答の機序解明と制御  | 生体における微粒子の機能と制御                                 | 中野 明彦  | さきがけ    |
| 2017 | ネットワークにつながれた環境全体とのインタラクションの高度化  | 人とインタラクションの未来                                   | 暦本 純一  | さきがけ    |
| 2017 | 全ライフコースを対象とした個体の機能低下メカニズムの解明  | 全ライフコースを対象とした個体の機能低下機構の解明                       | 西田 栄介  | A-CREST |
| 2017 | 全ライフコースを対象とした個体の機能低下メカニズムの解明  | 全ライフコースを対象とした個体の機能低下機構の解明                       | 西田 栄介  | PRIME   |
| 2018 | ゲノムスケールの DNA 合成及びその機能発現技術の確立と物質生産や医療の技術シーズの創出                                 | 異分野融合による新型コロナウイルスをはじめとした感染症との共生に資する技術           | 岩本 愛吉  | CREST   |

| 年    | 戦略目標   | 研究領域・研究開発領域                      | 研究総括       | 事業タイプ   |
|------|--|----------------------------------|------------|---------|
|      |  | 基盤の創生(R2 コロナ特例追加設定)              |            |         |
| 2019 | 健康・医療の向上に向けた早期ライフステージにおける生命現象の解明               | 健康・医療の向上に向けた早期ライフステージにおける生命現象の解明 | 佐々木 裕之     | A-CREST |
| 2019 | 健康・医療の向上に向けた早期ライフステージにおける生命現象の解明               | 健康・医療の向上に向けた早期ライフステージにおける生命現象の解明 | 佐々木 裕之     | PRIME   |
| 2020 | 細胞内構成因子の動態と機能                                  | 細胞の動的高次構造体                       | 野地 博行      | さきがけ    |
| 2020 | プロテオスタシスの理解と医療応用                               | プロテオスタシスの理解と革新的医療の創出             | 永田 和宏      | A-CREST |
| 2020 | プロテオスタシスの理解と医療応用                               | プロテオスタシスの理解と革新的医療の創出             | 永田 和宏      | PRIME   |
| 2021 | 「総合知」で築くポストコロナ社会の技術基盤                          | パンデミックに対してレジリエントな社会・技術基盤の構築      | 押谷 仁       | さきがけ    |
| 2021 | 「総合知」で築くポストコロナ社会の技術基盤                          | リアル空間を強靱にするハードウェアの未来             | 田中 秀治      | ACT-X   |
| 2022 | 社会課題解決を志向した計測・解析プロセスの革新                        | 社会課題解決を志向した革新的計測・解析システムの創出       | 鷲尾 隆       | CREST   |
| 2022 | 老化に伴う生体ロバストネスの変容と加齢性疾患の制御に係る機序等の解明             | 加齢による生体変容の基盤的な理解                 | 三浦 正幸      | さきがけ    |
| 2022 | 老化に伴う生体ロバストネスの変容と加齢性疾患の制御に係る機序等の解明             | 生命現象と機能性物質                       | 豊島 陽子      | ACT-X   |
| 2022 | 老化に伴う生体ロバストネスの変容と加齢性疾患の制御に係る機序等の解明             | 根本的な老化メカニズムの理解と破綻に伴う疾患機序解明       | 望月 直樹      | A-CREST |
| 2022 | 老化に伴う生体ロバストネスの変容と加齢性疾患の制御に係る機序等の解明             | 根本的な老化メカニズムの理解と破綻に伴う疾患機序解明       | 望月 直樹      | PRIME   |
| 2022 | 免疫細胞に宿る記憶の理解とその制御に資する医療シーズの創出                  | 免疫記憶の理解とその制御に資する医療シーズの創出         | 竹田 潔、中山 俊憲 | A-CREST |
| 2023 | 海洋と CO <sub>2</sub> の関係性解明と機能利用                | 海洋バイオスフィア・気候の相互作用解明と炭素循環操舵       | 神田 穰太      | さきがけ    |
| 2024 | 性差・個人差・個人内の変化の解明と予測への挑戦～ヒトを平均でとらえる医療からの脱却に向けて～ | 性差・個人差の機構解明と予測技術の創出              | 岡田 眞里子     | A-CREST |
| 2024 | 性差・個人差・個人内の変化の解明と予測への挑戦～ヒトを平均でとらえる医療からの脱却に向けて～ | 性差・個人差の機構解明と予測技術の創出              | 岡田 眞里子     | PRIME   |

## 5. まとめ

---

本調査は、政府の研究開発戦略の立案に資することを目的として、世界の研究開発動向を俯瞰し、将来的に重要性を増すと考えられる最先端研究の潮流を把握・整理することを目的として実施したものである。

政策的観点からは、どのような研究を政府が最先端研究として把握すべきか、その把握をどのような方法で行うべきか、さらに把握した研究の潮流をどのように支援・推進していくべきかといった点を、体系的に整理することが重要となる。

本章では、以上の観点から、本調査を通じて得られた知見を踏まえ、今後、政府として研究開発戦略の立案に当たり整理・検討すべき事項を3点に分けて示す。

- 研究の動的性質を前提とした場合に、政府が把握すべき最先端研究の要件とは何か
- 最先端研究の潮流を、どのような方法で継続的に把握していくべきか
- 把握した研究の潮流を踏まえ、研究開発をどのような考え方で推進していくべきか

### 5.1 「政府が把握・推進すべき最先端研究」の要件

本報告書では、研究の形成過程や将来的な発展可能性、分野横断的な広がり、社会的意義といった観点を含め、一定の方向性を持って形成・発展しつつある研究を潮流の抽出条件として捉え調査を行った。

本報告書では、こうした視点を踏まえつつ、政府が把握・推進すべき最先端研究の要件について、以下のとおり整理する。

#### (1) 要件1: 顕在化に至る前段階の研究であること

政府が把握・推進すべき最先端研究は、研究成果や応用可能性が既に顕在化した段階の研究に限られるものではない。研究者コミュニティの中では一定の注目や問題意識の共有が進みつつある一方で、研究の方向性や将来的な展開については評価が定まっていない段階にある研究も、重要な対象として捉える必要がある。

このような研究は、学会発表等を通じて認知され始めているものの、今後どのような研究のまとめりと発展するかは未確定であり、研究の進展次第で新たな研究の潮流として形成される可能性がある。政府が最先端研究を把握・推進するにあたっては、こうした「顕在化に至る前段階」の研究動向を注視する視点が求められる。

#### (2) 要件2: 分野横断的な広がりがある研究であること

最先端研究の中には、単一の学術分野の内部で完結するのではなく、異なる分野に属する研究者同士の問題意識の共有や共同研究を通じて、新たな研究のまとめりが形成されつつあるものが多く存在する。

このような研究は、既存の分野区分に基づく整理では把握しにくい一方で、研究者コミュニティ内で

は、研究会やワークショップ、分野横断的な学会セッション等を通じて、共通の論点や研究方向が意識され始めている場合がある。

政府が把握・推進すべき最先端研究においては、研究成果がどの分野に属するかという形式的な区分にとらわれるのではなく、研究者間の相互作用を通じて形成されつつある研究や、その構造的な特徴に着目することが重要となる。

### **(3) 要件 3: 将来的な社会的意義が見込まれる研究であること**

政府が把握・推進すべき最先端研究には、現時点で具体的な応用や実装の姿が明確でない段階にあっても、将来的に社会課題の解決や新たな価値創出につながる可能性について、研究者コミュニティ内で議論が始まっているものが含まれる。

こうした研究は、研究成果の成熟度のみを基準とした評価では見過ごされやすい一方で、中長期的には社会や政策に対して重要な示唆を与える可能性を有している。

このため、最先端研究の把握にあたっては、現時点での成果の有無にとられず、将来的な社会的意義や波及可能性がどのように認識され始めているかという点を、一つの判断軸として位置づける視点が求められる。

## 5.2 最先端研究の潮流の把握方法

先行調査<sup>1</sup>では、新興・融合領域の把握と推進において、トップダウン型とボトムアップ型の研究開発支援のバランス、および研究の各段階における適切な支援の重要性が指摘されていた。本節では、この考え方を踏まえつつ、最先端研究の把握方法を、共通言語(俯瞰資料)の整備、国際的に活躍する研究者の協力、俯瞰資料の更新と継続的把握の実施、という観点から整理する。

### 5.2.1 共通言語(俯瞰資料)の整備

最先端研究の潮流を把握し、政策立案や研究資金配分の基礎とするためには、政策担当者、資金配分機関、研究者が同じ前提で議論できる「共通言語」としての俯瞰資料の整備が不可欠である。

分野ごとに異なる用語や評価軸を用いている現状では、分野横断的な比較や優先順位の検討が困難である。俯瞰資料は、技術の概要、進展のタイムライン、キーテクノロジー、実用化可能性などを体系的に整理し、異なる分野の研究を同一の枠組みで整理し比較可能とすることが重要である。

本調査で作成した俯瞰資料は、各研究潮流について以下の要素を含めた。

- 技術的進歩と方向性: 当該研究領域がどのように進展してきたか、今後どの方向に発展する可能性があるかを記述
- タイムライン: 主要な技術的マイルストーン、政策的転換点、実用化事例などを時系列で整理
- キーテクノロジー: 当該潮流を構成する中核的な技術要素とその役割を明示
- 実用化可能性: 産業領域別の応用可能性、社会実装に向けた課題、実用化の時間軸を提示。実用化や社会実装に向けて解決すべき技術的・制度的課題を整理

最先端研究は、技術進展、分野融合、社会的要請の変化に応じて形成・再編を繰り返す動的な性質を持つ。したがって、俯瞰資料の作成を一過性のものとせず、研究の変化や分野横断的構造の変化を継続的に反映し、定期的に更新する必要がある。

本調査では、文献レビュー、論文・特許データ、専門家インタビュー、政策文書分析などを組み合わせて俯瞰資料を作成した。この手法は有効であると考えられるが、情報の網羅性や深度、動的な変化への対応(定期的なアップデートや新興分野の迅速な把握)が今後の課題である。

### 5.2.2 中核研究者による協力

今後5～10年の研究潮流を見通すにあたっては、国際的に活躍する研究者の協力が不可欠であり、本調査においてもその観点を重視した。

論文や特許などの公表情報は過去の研究成果を示すものであり、学会や研究コミュニティ内で現在進行中の議論や、まだ論文化されていない萌芽的研究の動向を把握するためには、国際的にも活躍し、

---

・<sup>1</sup> 文部科学省委託「新興・融合領域の研究開発に関する調査分析業務」<https://www.mext.go.jp/content/20210420-mext-chosei1-100000404.pdf>、2026年3月10日アクセス

研究の最前線にいる中核研究者からの情報収集が重要である。その際の中核研究者の候補としては以下が考えられる。本調査においても、その妥当性が確認された。

- 分野の代表的学会の会長・理事、または学術誌の編集委員・レビューワーとしての活動実績
- 国際的な研究コミュニティにおける活動実績(国際会議での基調講演、国際共同研究プロジェクトへの参画など)
- 国家プロジェクトの研究代表者(PI)としての経験
- 複数機関でのポジション保持、大型プロジェクト経験など、研究マネジメントの実績
- 40-50代の研究者

また、本調査を通じて、潮流やキーテクノロジーの整理・限定については中核研究者の専門的知見に基づいて精査し、その上で生成 AI を補助的に活用することで、情報整理の効率化が可能となることが明らかになった。

### 5.2.3 俯瞰資料の更新と継続的把握の仕組みづくり

科学技術の進展は速く、特に最先端研究においては、数年で研究の方向性が大きく変化する可能性がある。したがって、潮流把握は単発で終わらせず、定期的・継続的な運用が必要である。

継続的な把握体制を確立することで、新興研究領域の早期発見と既存の支援制度への組み込み、研究の方向性の変化や技術的ブレークスルーの迅速な把握、国際的な研究動向の変化への対応、政策立案や研究資金配分の適時な見直しが可能となる。

俯瞰資料の更新においては、インタビュー結果や外部環境の変化(政策動向、産業ニーズ、国際競争環境など)を反映し、潮流やキーテクノロジーの位置づけを定期的に見直すことが求められる。具体的には、以下のような情報源を組み合わせて更新を行うことが考えられる。

- 研究者コミュニティ・ネットワークからの情報
- 学術論文・特許データの定量分析
- 国際政策動向のモニタリング(主要国の研究開発政策、研究資金配分動向など)
- 産業界の技術ロードマップや実用化動向

加えて、文部科学省、資金配分機関(JST、AMED 等)、研究機関・大学間のネットワークを維持・拡張し、継続的な把握体制を整備することが重要である。近年ではデータベース、AI 分析、トレンドマイニングなどの技術を活用し、大規模な文献データから新興研究テーマを自動的に抽出する試みも進展しており、データ駆動型アプローチの導入により、客観的かつ効率的な潮流把握を目指すことも有効と考えられる。

## 5.3 政府が把握・推進すべき最先端研究」の推進方策

5.1 で示した要件を満たす最先端研究を、5.2 の方法により把握した後、それを具体的にどのように推進するかが課題となる。

本節ではこれを踏まえ、研究の形成段階から発展段階に至るまでを見据えた研究開発プログラムの推進の考え方について整理する。

### 5.3.1 研究育成段階における制度的支援

本調査の有識者インタビューにおいて、最先端研究の潮流は、必ずしも既存の学術分野のみから形成されるものに限らず、異分野にまたがる研究や、探索的な問題設定の過程を通じて形成される場合があることが指摘された。

一方で、例えば JST の戦略的創造研究推進事業(CREST・さきがけ等)において分野横断的な戦略目標を設定し公募したとしても、その目標に沿った研究テーマが自動的に集まるわけではない。特に、異なる専門分野に属する研究者が共同で研究を進める場合、戦略目標の決定から応募までの限られた期間の中で、研究者間の十分な検討を経た上で形成された研究テーマや適切なチーム組成が、必ずしも十分に集まるとは限らないからである。

こうした点を踏まえると、政府としては、日頃から異なる分野の研究者同士が、分野横断的な視点から問題意識をすり合わせ、新たな研究テーマの萌芽を見出す契機を提供することが重要である。その一つの方策として、異分野の研究者が一定期間集中的に議論を行い、相互理解の形成と研究テーマの探索を並行して進める、いわゆるサマーキャンプ型／課題起点型のワークショップや、少人数・反復型のテーマ別ラウンドテーブル、研究者のクロスアサイン(短期相互滞在)等も有効であると考えられる。

例えば、サマーキャンプ型／課題起点型のワークショップについては、英国の資金配分機関である UK Research and Innovation(UKRI)傘下の Engineering and Physical Sciences Research Council(EPSRC)が、Sandpit(IDEAS Factory)と呼ばれる合宿型ワークショップを長年にわたり制度化している。この取組は、解くべき課題や社会的ミッションを起点として、研究者を数日間集中的に集め、研究構想そのものを共同で形成する内容である。参加者は事前に選抜され、専門分野・キャリア段階・セクター(学術・非学術)が意図的に混在するよう構成され、ワークショップの過程で課題の定義や共通言語の形成、研究構想の創出までが一体的に行われる。<sup>2</sup>

インタビューでは、以下のような意見が挙げられている。

- 異分野融合には用語や文化の大きな壁があるため、単なる名目上の融合に終わらせないためには、目利きによる適切なマッチングと具体的な共同ゴールの明示など、研究者同士をつなぐ仕掛けが必要不可欠である。
- 今後の研究支援形態は既存の分野指定ではなく問題設定ベースで広く募集すべきである。研究者間で明確な共通目標が設定されることで分野連携は自発的に進んでいく。

<sup>2</sup> UKRI, Sandpits – Transformative Research  
<https://www.ukri.org/councils/epsrc/guidance-for-applicants/types-of-funding-we-offer/transformative-research/sandpits/>、2026年3月13日アクセス

### 5.3.2 次フェーズへの制度設計

複数の分野における有識者インタビューを通じて共通して指摘されたのは、最先端研究において、科学的発見と応用・事業化との距離が縮小しているという点である。

これまで、JST 戦略的創造研究推進事業等や科研費等の競争的研究費においては、研究者の独自性やオリジナリティに基づく着想を重視し、探索的な研究を支援することで、科学的に重要な知見や新たな研究シーズを数多く創出してきた。これらの制度は、研究の潮流が明確化する以前の段階における知の創出という点で、重要な役割を果たしてきている。

一方インタビューでは、我が国において科学的に重要な発見がなされた場合であっても、その成果をデバイス、センサー、システム等の具体的な製品・サービスに迅速に展開し、事業化につなげる段階においては、米中等の海外プレーヤーが優位に立つケースが多いとの指摘が示された。

このような状況を踏まえると、優れた研究シーズがどのように応用されるかを見極め、次のフェーズ（社会実装や事業化）へどう接続し得るのかを、成果が見えたできるだけ早期の段階で、集中的に検討・支援する段階的な取組を明確に位置付けることが重要である。

ここでいう「橋渡し」とは、単に基礎研究と応用研究の間を埋めることを指すのではなく、研究成果が生まれたタイミングで、異分野の知見や産業的視点を導入し、展開の選択肢を迅速に広げるための機能として捉える必要がある。このような橋渡し機能を、既存の基礎研究支援と適切に組み合わせて設計することで、分野を問わず、我が国における最先端研究の成果を、より機動的に次のフェーズへと接続していくことが可能になると考えられる。

海外の事例として、英国の研究助成機関である UKRI では、Prove your concept と呼ばれる支援スキームを設け、研究成果が完全に確定する前の段階から、次フェーズへの展開可能性を検討する取組を制度的に支援している。同制度では、基礎研究そのものが対象になるのではなく、研究の進展を踏まえつつ、試作や実証、ユースケースの検討、将来的な事業化や社会実装の方向性の整理などに資する活動が支援対象とされている<sup>3</sup>。

インタビューでは、以下のような意見が挙がっている。

- トップレベルの基礎研究力に加えて、効率化・スケールアップ・社会実装の視点を加えられる研究者を育成すべきである。また、大学内の自動化導入は進んでおらず、企業連携や工学的アプローチの取り込みが必要である。
- 無機（電解）とバイオ（発酵・合成生物学）の接続が重要である。上流の電解で CO<sub>2</sub> を反応中間体に変換し、下流のバイオで多様かつ選択的な分子群へ展開する。発酵で発生する CO<sub>2</sub> のリサイクル設計も含め、プロセス集積の発想が要る。
- LCA とプロセス工学の専門人材が著しく不足しており、要素からシステムへの橋渡しがボトルネックとなっている。
- 大学が取り組むべきは新原理や新概念といったコンセプトレベルのブレークスルー創出であり、実用化に向けた最終段階の最適化やスピードはスタートアップが担う、という明確な役割分担

<sup>3</sup> UKRI「Prove your concept」<https://www.ukri.org/what-we-do/commercialisation/prove-your-concept/>、2026年3月10日アクセス

を前提に支援を設計するべきである

- 米国では小規模事業者や投資家がリスクテイクして商用化への道筋を描きやすいが、日本ではスタートアップが自ら最終事業まで担う現実性は低く、国や大手企業に引き取られる前提が強いいため、社会実装に向けた体制やインセンティブ設計が鍵となる。

### 5.3.3 複数制度を組み合わせたポートフォリオ設計

最先端研究は、単一の制度やプログラムのみで形成・発展するものではなく、研究の進展段階や技術的特性に応じて、複数の支援手段が相互に補完的に機能することによって支えられる。このため、研究開発の推進にあたっては、個々の制度を独立して設計・運用するのではなく、全体を俯瞰したポートフォリオとして捉えることが重要である。

具体的には、要素技術の探索や原理解明、新規手法の検討といった段階については、探索的かつ小回りの利く研究支援制度により推進しつつ、計算資源やデータ基盤の整備、標準化や制度との接続といった、単独の研究課題では対応が困難な要素については、大型・長期の枠組みや基盤整備型の施策によって補完する、といった役割分担が考えられる。

本調査のインタビュー調査においても、研究の探索段階から発展段階までを見据え、複数の施策を組み合わせて設計・運用することの重要性が指摘されている。ポートフォリオ設計においては、例えば、研究領域間のバランス(基礎科学と応用技術、特定領域への集中と多様性の確保)、研究開発フェーズ間のバランス(萌芽的研究と大型プロジェクト)、支援方式のバランス(トップダウン型とボトムアップ型)、時間軸のバランス(短期的成果と長期的視点)といった複数の観点を考慮することが考えられる。

また、研究の潮流は固定的なものではなく、研究の進展や技術融合、社会的要請の変化に応じて都度更新していくことが重要である。このため、ポートフォリオも一度設計すれば完結するものではなく、研究の進捗や潮流の変化を踏まえ、支援の重点や位置付けを適宜見直していくことが重要である。こうした視点に立つことで、動的に変化する最先端研究の潮流に対して、柔軟かつ持続的な研究開発支援を行うことが可能となると考えられる。

インタビューでは、以下のような点が指摘されている。

- 理学(地震学等)と工学の橋渡し、センサ開発と解析の融合を促すテーマ設定が望ましい。省庁連携により基礎から実用化までの役割分担を明確化すべきである。(東京大学 辻教授)
- 日本の強みである基礎研究への継続支援と、バイオフィナンドリ設備と運用体制等への戦略的集中投資の二本立てが必要である。
- 計算神経科学／機械学習／哲学(認知哲学)の三系譜が Predictive Processing を支えてきた。さらにハードウェア(成長する身体)、発達心理(学習順序・社会性)、臨床(神経多様性)との連携が不可欠である。
- 有効な AI for Science には材料・化学・医療のドメイン専門家と機械学習専門家の協働が必須である。国内では機械学習人材が量的に不足し、ドメイン側の「ツール利用のみに留まる」研究が散見される。

## 5.4 残された課題と今後の対応方策

本調査では「潮流」に着目し、現在注目されている研究テーマのみならず、そこに至る技術的蓄積やキーテクノロジーの成立過程を含む研究開発の流れを整理した。本調査結果は、今後の戦略目標及び研究領域の検討に資する補助資料として活用される予定であるが、本調査の実施を踏まえて、当面取り組む課題として3点整理した。

### 5.4.1 技術トレンドや今後の研究の潮流の方向性に関する詳細調査

本調査で抽出した有望な技術トレンド及び研究潮流については、今後の施策化の要否や重点化の方向性を判断するため、対象を絞った詳細調査を継続的に実施することが考えられる。

技術トレンド及び研究潮流の方向性それぞれについて、以下のような調査が考えられる。

#### (1) 今後5～10年の技術トレンドに関する詳細調査

今後5～10年の技術トレンドに関する詳細調査では、個別の最先端技術に着目し、国内外の政策動向、主要プレーヤー(大学、国立研究開発法人、スタートアップを含む企業等)の研究開発状況、我が国の強み・弱み、実装上のボトルネック等を整理することにより、重点的に支援すべき技術と政策的課題を明らかにすることが考えられる。

#### (2) 今後5～10年の研究潮流の方向性に関する詳細調査

今後5～10年の研究潮流の方向性に関する詳細調査では、新たな研究潮流に対して、我が国としてどのような支援・推進の形が適切かを検討することが考えられる。この場合、諸外国における政策・戦略動向、研究テーマ設定の考え方、推進方法、実施体制、技術面・非技術面の取組等をベンチマークし、我が国に適した施策の方向性を導出することも一案である。

### 5.4.2 俯瞰資料の更新と継続的把握の方法の具体化

本調査で整備した俯瞰資料及び関連する知見を一過性の成果にとどめず、継続的に更新し、政策立案に活用していくための仕組みを構築することが望ましい。

本調査で作成した資料は、JSTの戦略目標や研究領域、AMEDの研究開発目標や研究開発領域を検討する際の基礎資料として有効であると考えられる一方、単年度調査で広範な分野・潮流を継続的に追跡することには限界がある。

今後は、文部科学省、資金配分機関、研究実施主体(大学、国立研究開発法人、企業、スタートアップ等)の間で、特定分野に絞って定期的な情報共有と論点整理を行う運用体制を整える必要がある。例えば、フォーカスを当てる特定分野(融合分野を含む)を定めて、潮流の作成・追加・統合・見直し、キーテクノロジーの更新を行うこと、中核的な研究者候補や、関連する政策との対応状況の更新等を行うことも考えられる。

また、報告書本文に加えて、潮流、キーテクノロジー、関連制度等の関係を整理した内部運用資料を整備し、分野横断的な検索や比較ができる形で更新することも有効である。こうした仕組みは、文部科

学省が分野担当課・研究コミュニティから上がる提案を束ね、分野横断・融合領域を含めた議論を行う際の共通言語としても活用することが期待される。さらに、国内のみでは把握が難しい新興分野については、海外の政府機関、資金配分機関、トップ研究者等との継続的な対話・情報交換の枠組みを構築し、国際的な視点からの補強を図ることが重要である。

### 5.4.3 把握した潮流を研究領域設定につなぐプロセスの構築

本調査で把握した研究潮流を、今後の戦略目標等の検討に活用していくプロセスに含めることが重要である。

文部科学省における戦略目標等の検討においては、基礎研究を始めとした研究動向の俯瞰、最新動向に知見を有する組織・研究者への意見聴取による注目すべき研究動向の特定が重要となる。本調査で整理した潮流、キーテクノロジー、タイムライン、今後 5～10 年程度の方向性及び中核研究者へのインタビュー結果は、主としてこれらに資する基礎資料として活用することが考えられる。

また、本調査における「潮流」は研究開発動向を把握するための分析上の単位であり、必ずしも特定の研究領域に一对一で対応するものではない。したがって、把握した潮流を直ちに CREST・さきがけ等の研究領域に対応付けるというよりは、科学的な新規性・発展可能性に加え、社会的・経済的インパクト、政策的要請、分野横断性、将来像の具体性等の観点の検討に資する一資料として位置づけることが考えられる。

具体的には、俯瞰資料等に基づく潮流候補の資料としての活用や、文部科学省と資金配分機関（JST/AMED）・有識者との意見交換時の参考資料としての活用が考えられる。