

ロードマップ検討グループ

4 研究・技術領域の「重点推進戦略 検討のまとめ」について（報告）

平成 30 年 1 月 31 日

1 背景・趣旨

- 近年の技術体系の進展により、超スマート社会（Society 5.0）実現のための「重要コア技術」として、量子科学技術（光・量子技術）が注目を集めている。欧米等においても、大規模な研究投資が政府・民間レベルで相次いで開始されている。
- 科学技術・学術審議会量子科学技術委員会では、平成 29 年 8 月に「量子科学技術（光・量子技術）の新たな推進方策」を取りまとめた。同推進方策では、世界的に、産業界を含む投資の拡大と産業応用の模索の動きが早く、ここ数年が、我が国の研究・技術の優位性をイノベーションに結び付け、将来の成長に転換できるかの岐路であり、府省横断で政策や政策資源の投入を検討すべき重要な時期、と指摘している。また、同推進方策では、中長期にわたるインパクトが相当程度期待されるとともに、5～10 年で国民の目に見える進展が期待される研究・技術領域として、1）量子情報処理（主に量子シミュレータ、量子コンピュータ）、2）量子計測・センシング、3）極短パルスレーザー、4）次世代レーザー加工、の 4 領域を示した上で、時間軸とともに研究・技術がどう進展して何が実現されるのか等を示すロードマップを策定している。
- このため、量子科学技術は、現在の社会・産業上の重要課題を非連続的に突破し、生産性の飛躍的向上をもたらす可能性が高い技術として、簡単にコモディティ化、汎用化できない知識集約度の高い技術体系（システム）の構築を適確なベンチマークのもと重点的に進めていくべきである。これを実現するための重点推進戦略の具体化が我が国産学官の関係者に求められている。
- 以上の認識を踏まえて、量子科学技術委員会が策定したロードマップをさらに深掘りする観点から、ロードマップ検討グループにて、上述の重点推進戦略の検討を行い、これまでの検討状況を取りまとめたので報告する
- なお、この取りまとめは今後の国内外の研究動向や技術進展等を踏まえ、定期的に見直していく必要がある。

2 検討方法

- 1）量子情報処理（主に量子シミュレータ、量子コンピュータ）、2）量子計測・センシング、3）極短パルスレーザー、4）次世代レーザー加工、の 4 つの研究・技術領域ごとに、ロードマップ検討グループを開催し検討を行った。
- ロードマップ検討グループの委員については「参考」のとおり。

3 検討事項

- 4 研究・技術領域ごとに、以下の項目について検討を行った。
 - 1）国内外の研究開発動向（技術的ベンチマーク、日本が強みを有すコアコンピタンス 等）
 - 2）出口志向型トップダウン研究の方向性
 - 3）2）と相補的に連携・推進すべき、基礎基盤研究の方向性

- 4) 2) の出口志向型トップダウン研究の目標（社会・産業上の貢献（社会実装、企業動向、市場規模等）、定性・定量的な技術目標（5年後／10年後）等）
- 5) 研究マネジメント（産学連携（企業参画、コンソーシアム等）、協調研究・競争研究等）

4 重点推進戦略 検討のまとめ

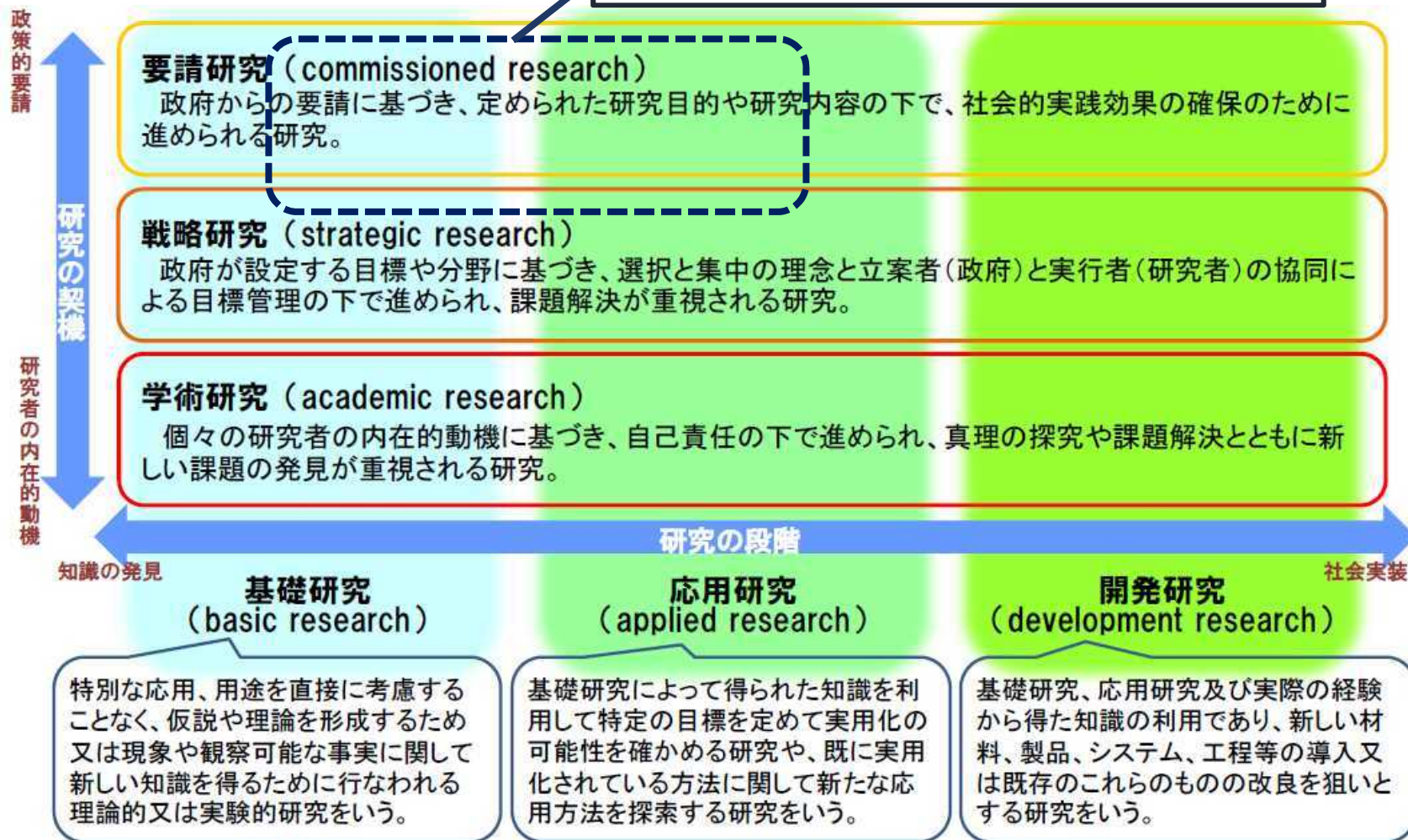
○別紙1～4のとおり。

| | |
|-------------|----------------------------------|
| 別紙 1 | 重点推進戦略(量子情報処理) 検討のまとめ |
| 別紙 2 | 重点推進戦略(量子計測・センシング) 検討のまとめ |
| 別紙 3 | 重点推進戦略(極短パルスレーザー) 検討のまとめ |
| 別紙 4 | 重点推進戦略(次世代レーザー加工) 検討のまとめ |
| 参考 | ロードマップ検討グループ 委員 |

ロードマップ検討グループにおける「重点推進戦略」の検討範囲①

ロードマップ検討グループでは、策定したロードマップを深掘りする観点から、社会・産業上の重要課題の解決に大きく貢献するものとして政策的要請が高く、かつ基礎・応用研究として重点投資すべき研究を検討するため、これに係るベンチマークを明らかにする。

今回のロードマップ検討グループで検討する範囲



※「東日本大震災を踏まえた今後の科学技術・学術政策の在り方について(建議)」(平成25年1月17日 科学技術・学術審議会)をもとに作成。

※基礎研究、応用研究、開発研究の定義は、科学技術研究調査(総務省)から引用。

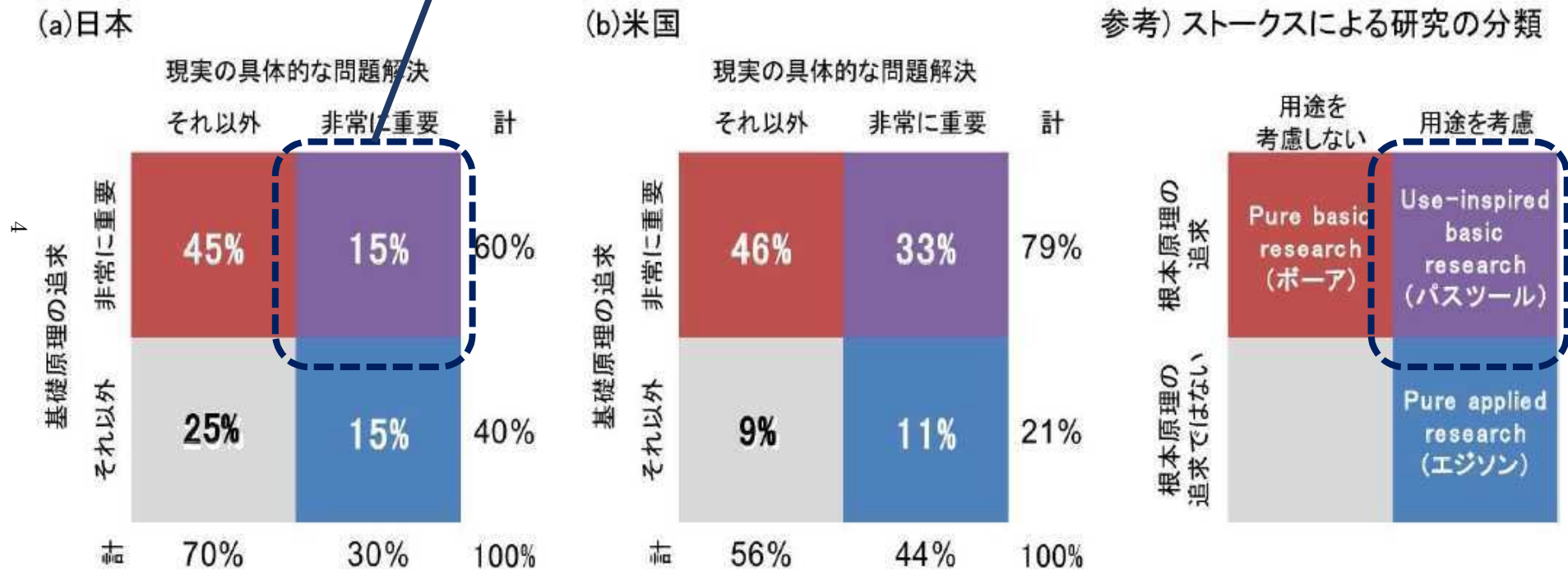
※OECDのフラスカティ・マニュアルでは、応用研究を「基礎研究と同様に新たな知識を獲得するために行う独創的研究であるが、具体的な実用上の目的ないしは目標を志向する研究」と定義している。(日本語訳は日本学術会議の文書等を参考にした。)

ロードマップ検討グループにおける「重点推進戦略」の検討範囲②

「ストックスの4象限に従った研究プロジェクトの分類」で言い換えると、パスツール型の研究として重点投資すべき研究を検討するため、各技術領域のベンチマークを明らかにする。

ストックスの4象限に従った研究プロジェクトの分類 (高被引用度論文算出群)

今回のロードマップ検討グループで検討する範囲



出典: 文部科学省科学技術・学術政策研究所・一橋大学イノベーション研究センター、ジョージア工科大学「科学における知識生産プロセス: 日米

の科学者に対する大規模調査からの主要な発見事実」(調査資料-203)

(注) 高被引用度論文産出群: 各分野において被引用数上位 1% の高被引用度論文を生み出した研究プロジェクト

重点推進戦略(量子情報処理) 検討のまとめ

平成 30 年 1 月 31 日

ロードマップ検討グループ

(量子情報処理)

近年、IBM（米）による小規模ゲート型量子コンピュータのクラウドサービスや、D-Wave システムズ（加）による量子アニーリングマシンの商用機開発など、量子コンピュータに関連する研究開発が急速に進展している。本ロードマップ検討グループでは、基礎基盤的な研究課題が未だ多く存在するが、将来実用化されれば社会・経済に大きなインパクトを与え得る汎用量子コンピュータの開発を念頭に、国内外の研究開発動向や日本の強み等について分析を行い、日本の採るべき中長期的な重点推進戦略の検討を行った。

1 国内外の研究開発動向

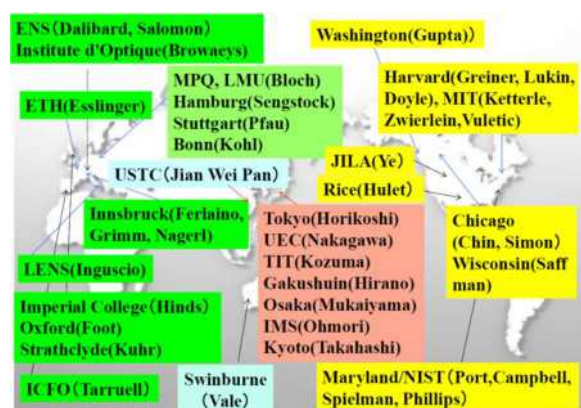
汎用量子コンピュータ実現には多くの解決すべき技術的課題があるものの官民の大規模な投資による研究開発が進行中。中期的な出口目標や社会実装を明確に定めたハードウェアとソフトウェアの一体的な推進が重要。

- 量子コンピュータに関連する市場規模の予測は約 1.2 兆円（Research And Markets 調べ）。材料科学や創薬、AI、最適化問題などへの適用を視野に、海外 IT 大手を中心に大規模な投資による研究開発が進行中。
- 様々な量子ビット技術での研究開発（及び製品化）が同時並行的に進行している。
- 汎用量子コンピュータの実現には誤り耐性の実装、量子ビットの高密度集積化等が課題であり、実現時期は未だ不透明。
- 研究進捗の過程で可能となる社会実装を随時実現することにより、デファクトスタンダードを確立し市場ニーズを喚起していくことが重要。古典計算機に比べ圧倒的な性能向上が見込まれるキラー・アプリケーションの開発も鍵となる。
- 国内では、JST や NEDO など量子コンピュータ関連技術に関する事業が進行中。

○冷却原子・分子系

冷却原子を実現する汎用装置は既に製品化。国内外のグループが各々の強みを武器に研究開発を推進。

- （国外）Greiner グループ（米）は量子気体顕微鏡の技術に基づく量子シミュレーション（反強磁性秩序の実現など）を実現。Browaeys グループ（仏）は光ピンセットによる単一原子トラップと動的制御に強みを持ち、横磁場イジングモデルや反強磁性秩序の実現に成功している。
- （国内）大森グループ（分子研）は超高速光技術



冷却原子・分子に関する世界の主要研究拠点
(提供：京大・高橋教授)

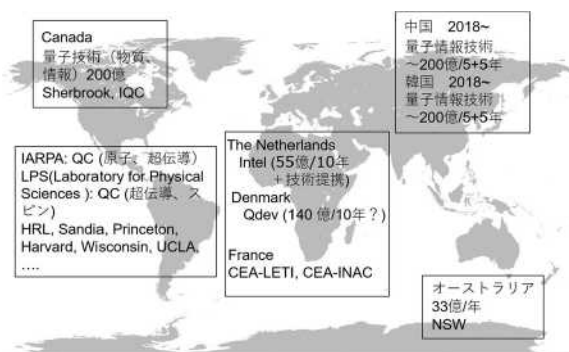
と極低温原子集団を組み合わせた独自手法による超高速量子シミュレータを実現。高橋グループ（京大）は2電子系原子の量子シミュレーション技術と制御性の高い非標準光格子技術に強みを持ち、分子生成や強相関状態の実現に成功している。

- （民間）ColdQuanta（米）は冷却原子装置の商用機を開発。日本には基盤となる光学関連の技術に関して高い技術レベルを有する企業が多く存在し、分子研と浜松ホトニクスでは独自技術を用いた量子シミュレータの共同開発が進行中である。

○半導体量子ドット

IT 大手も参画し大規模な研究開発が進行中。日本は量子ビットの高忠実度に強み。

- （国外）主にカナダ、米国、オランダ、デンマーク、フランス、中国、韓国、オーストラリアにて多くの投資、研究開発が進行中。Delft 大（蘭）と Intel（米）は連携し研究開発を推進している（50 億円/10 年）。
- （国内）主に理研（+東大）、慶大、東工大、産総研を中心に 50 量子ビットを目標とした研究開発が行われおり、Si の同位体制御や高速ビット操作・忠実度に強み。忠実度は世界最高となる 99.93% を実現している。
- （民間）理研－産総研間、理研－東芝間の研究協力が進行中であり、1 K を超える高温でのビット操作に成功している。



半導体量子ドットに関する世界の主要研究拠点と予算規模（提供：理研・樽茶教授）

○イオントラップ

量子コンピュータのプロトタイプが既に完成。日本は独自の手法に強み。

- （国外）Monroe グループ（米）は 5 量子ビットの汎用量子コンピュータや 53 個のイオンを用いた磁性シミュレータ（イジング模型）を製作。Lucas グループ（英）は、高い忠実度を持つ量子ビットゲートの開発に特徴をもつ（英国の NQIT に参加）。

※NQIT(Network Quantum Information Technology):2015 年より 5 年間のプロジェクト（総額約 58 億円）。20 個のイオントラップ（各々にイオン 20 個）を光子により接続した Q20 マシンの開発を目指す。

- （国内）豊田・田中グループ（阪大）はフォノン制御に強みを持ち、光子を用いた量子シミュレータよりも信頼度が高いとされるフォノンベースの量子シミュレータを研究開発中。表面電極を用いた複数列 2 次元トラップを実現している。
- （民間）Monroe グループ（上述）の出身者による IonQ がイオントラップベースの汎用量子コンピュータを開発中。32 量子ビットの量子コンピュータプロトタイプが完成しており、2018 年末までに商用化予定との発表あり。



イオントラップに関する世界の主要研究拠点（提供：阪大・豊田助教）

○超伝導量子ビット

IT 大手が中心となり集積化が急速に進展。日本は量子ビット集積回路技術の独自アプローチに強み。

- (国外) 米国の IT 大手 (IBM、Google 等) 及び大学等との連携 (Intel、TU Delft、ETH Zurich 等) により、高集積化が急速に進行中 (IBM は 20 量子ビット量子コンピュータのクラウドサービスを開始し 50 量子ビットのプロトタイプも製作)。中国でも USTC を中心に Alibaba Group や NVIDIA と連携し研究開発が進行中。
- (国内) 中村グループ (東大・理研) では 2 次元集積回路におけるボトルネック解消のための研究開発を重点的に実施 (高精度・スケラブルな要素技術の開発)。
- (民間) 大手 IT 企業のほか、ハードウェアからソフトウェアまでを全て自前で開発する垂直統合ビジネスモデルで推進する Rigetti (米) に代表されるベンチャーが複数起業。日本の企業は超伝導素材や技術に強みを持ち、産総研は超伝導集積回路技術に強みを持つ。

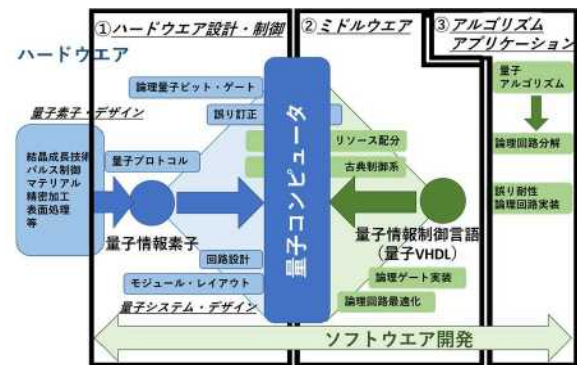
| | 技術 | 体制 | 予算 | 連携 | 備考 |
|---------------|--|----------------------------|---|---|----------------------------------|
| Yale | 高Q値3D并層超伝導-独自の誤り訂正符号で誤り訂正-2ビット動作 | 4PI 実験2+理論2 40名 | AirForce, ARG, NSF 他 | スタートアップ Quantum Circuits 20億調達 | 基礎研究力高い・人材多数輩出 |
| USTC | 10ビット動作 | - | - | Alibaba/NVIDIA | 1兆円センター計画 (2020)・中国には他にも5チームほどあり |
| ETH Zurich | 8ビット回路動作-マイクロ波量子光學に強み | 1PI+30名 | ERC Advanced, IARPA LogIQ, SNSF | IBM Zurich/TU Delft, Zurich Instruments | |
| QuTech /Intel | 2次元実装-超伝導ヒア配線-3次元配線-5ビット実装-周辺エレクトロニクス開発-Intelファブ/実装技術に強み | 実験1PI+10名・他エレクトロニクスファブ人員多数 | IARPA LogIQ FOM 170億 (QuTech全体) Intel 65億 (量子スピントラップ) | ETH Zurich | Intelで回路作製 |
| IBM | IBM Q Network 20 (50) ビット有利クラウド-忠実度に関する2次元実装実用-ハード/ソフト両面に強み-強力な理論チーム | 30名(?) | IBM本体3300億 IARPA LogIQ | IBM Q Network Hubs/Partners/Membersで大学・企業間い込み | Yale出身者多し |
| Google | 22ビット実装中-49ビット計画-2次元実装計画-忠実度に強み-ソフト両面に強み-強力な理論チーム-アニーリングにも取り組み | 実験20名・理論10名 | Google本体 | NASA フォルクスワーゲン | UCSB出身者多し UCSBクリーンルーム使用 |
| UTokyo /RIKEN | 基礎技術開発-集積化取組中 | 1PI+15名 | 12億/5年 | AIST/NICT/Kyoto /NEC/Tohhiba 他 | |

超伝導量子ビットに関する世界の主要な研究拠点 (提供: 東大・中村教授)

○ソフトウェア

ハードウェアに関わる部分からアプリケーションまでソフトウェアが関わる領域は広い。ハードウェアとの一体的な開発が重要。

- 量子コンピュータにおけるソフトウェアの役割は①ハードウェア設計・制御、②ミドルウェア、③アルゴリズム・アプリケーションと広い領域に跨る。
- ハードウェアの設計においては、スケラビリティの観点から、誤り訂正やアーキテクチャなどを含むシステム設計・制御理論との一体的な研究開発が必須。
- 小規模量子コンピュータでの量子優位性実現に向けた量子アルゴリズム・アプリケーションの開発 (キラー・アプリケーションの創出) が世界的に大きな関心を集めている。
- 限られたリソースで計算ステップ数を確保する理論的な発展が課題。
- 将来的な汎用量子コンピュータの実現に向けては、物理ゲート実装から誤り耐性実装へのスムーズな移行が可能なハードウェアとソフトウェアの設計・実装が重要。
- 海外 IT 大手 (IBM、Microsoft 等) により各階層のソフトウェア開発や開発環境の提供が進行中。量子コンピュータ用のアプリケーション開発に特化したベンチャーも多数起業している。



量子コンピュータにおけるソフトウェアの役割 (提供: NII・根本教授)

2 出口志向型トップダウン研究の方向性

複数の要素技術による研究開発が進行中であり、今後の社会要請や研究開発の進捗を注視すべき。

- 汎用量子コンピュータの実現に向けた複数の要素技術による研究開発が進行中であり、それぞれの特性を活かした着実な推進が重要。中期的な目標としては量子シミュレータ（アナログ型、ゲート型）の開発が挙げられる。
- アナログ型、ゲート型はそれぞれ得意とする領域（物質系）が異なるため^{*}、重点的に推進する型式については、具体的な出口目標（社会実装）と今後の研究開発の進捗を踏まえ判断すべき。
*一般的に、アナログ型は多体系と呼ばれる多数の原子を含む系が得意であり、ゲート型は分子などの量子化学計算が得意とされる。
- 特に、アナログ型に関しては、国内に独自の方式を有し、量子多体系の量子シミュレーションに強みを持つ冷却原子・分子方式、ゲート型に関しては、国内に高精度な量子ビットの開発や集積化、素材等に強みを持ち、研究者人材も多く存在する超伝導量子ビットによる研究開発が期待される。

3 相補的に連携・推進すべき基礎基盤研究の方向性

各々の研究を着実に進めつつ、トップダウン研究との相補的・相乗的効果を期待。複数要素技術によるハイブリッド化など、研究進捗に応じた柔軟な対応が重要。

○ソフトウェア

（方向性）社会実装に際し、量子優位性を示すキラー・アプリケーションとなる目標を明確に定め、開発を推進することが重要。また、誤り訂正などハードウェアとの関わりが深い部分はハードウェアの研究開発と連携し一体的に進めることが必要。

（相補的・相乗的効果）ハードウェアの長所・短所を適切に取り込み、量子計算機全体またはアプリケーションとして最も高い能力を実現するようハードウェアとの相補的な研究開発が期待される。

○半導体量子ドット

（方向性）現状では、集積化とビット操作の両立などに課題があるが、半導体集積化技術を応用した大規模集積化の実現に期待。半導体集積化技術を有する民間企業との連携が必須であり、10年後に50量子ビットを実装した量子計算機の実現が目標。

（相補的・相乗的効果）量子ビット操作等において他の要素技術と共通する部分があり、互いの研究成果を共有することによる相乗的な効果が期待。また、量子メモリとしての利用等、他の要素技術との相補的なハイブリッド利用も期待される。

○イオントラップ

（方向性）独自方式の特徴を活かした出口を明確にしつつ、高い忠実度及び高集積化に向けた光コネクタによるモジュール方式の開発が課題。10年後に量子計算モジュールを光により相互接続した量子シミュレータプロトタイプの実現が目標。

（相補的・相乗的効果）レーザー関連技術など他の要素技術の基盤技術と共通する部分が多くあり、互いの研究成果を共有することによる相乗的な効果が期待。

○その他

光ゲート方式による量子コンピュータ開発は日本独自の技術であり重要。また、光格子時計による高精度な量子制御技術は将来的に量子情報処理への応用の可能性がある。その他、トポロジーに基づく研究など関連分野の研究開発状況を注視し、異なる要素技術や古典計算機とのハイブリッド化を検討するなど、状況に応じて柔軟に対応することが重要である。

4 出口志向型トップダウン研究の目標（例）

○冷却原子・分子系

【5年後】多体電子ダイナミクスシミュレータのプロトタイプの開発

- ・技術目標：光格子中原子温度 ($T/T_F < 0.01$)、1,000 個以上の原子のサイト分解観測と制御。
- ・期待される成果：欠陥や乱れの影響も取り入れた高温超伝導体のシミュレーションの実現。高温超伝導の原理解明や新物質探索に応用が期待。クラウドサービスによる利用者への提供を目指す。

【10年後】コヒーレント量子アニーラーや量子化学計算機のプロトタイプ開発

- ・技術目標：長距離相互作用する原子系での 50 サイトの個別操作。
- ・期待される成果：真に量子性を活かした量子アニーラーの組合せ最適化問題への適用や量子化学計算による機能性材料・創薬関連物質探索などへの応用が期待。クラウドサービスによる利用者への提供を目指す。

○超伝導量子ビット

【5年後】近似型量子計算機での量子優位性の実証

- ・技術目標：50 量子ビットの実装及び量子ビットの高精度化（忠実度 > 99.9%）。
- ・期待される成果：古典計算機の限界を超える量子多体系シミュレーションを実現。マテリアルインフォマティクス技術との融合による新たな材料開発などへの応用が期待。クラウドサービスによる利用者への提供を目指す。

【10年後】近似型量子計算機の高度化

- ・技術目標：100 量子ビットの実装および量子ビットの高精度化（忠実度 > 99.95%）。
- ・期待される成果：化学・創薬メーカーなどのニーズに基づき、量子化学計算による触媒作用の原理解明や創薬関連物質開発へ向けた応用利用が期待。

※上記は現時点で考えられる目標であり、研究進捗や社会的な要請等に応じて、例えば 2, 3 年単位で細かく見直すべきである。

5 研究マネジメント

社会的ニーズと研究開発を直結させ、出口戦略を見据えた推進が可能となる体制の構築が重要。産官学の効果的な連携・マネジメントによるスムーズな社会実装を目指しつつ持続的な研究開発の基盤を構築。

【1】産学連携・出口戦略について

- 研究開発初期の協調領域では、コンソーシアムを形成し共通するニーズを把握しつつプロトタイプ機を開発。出口側利用者との緊密な連携が必須。
- プロトタイプ機の実現後は、クラウドサービスなどによる利用提供を行い、利用者からのフィード

バックを取り入れつつ装置の改善に取り組むとともに、利用者需要の拡大や出口戦略の具体化、投資の喚起を図る。

- 競争領域においては、利用者個別のニーズに対応する研究開発を実施。企業との共同研究はマッチングファンドを前提に実施する。
- 最終的な社会実装を見据え、開発に携わると予想される民間企業（光学機器メーカー、マイクロ波制御エレクトロニクス機器メーカーなど）との、早い段階からの連携が重要。
- 当該分野の急速な発展状況や社会的要請の変化に柔軟に対応するため、ベンチャーの立ち上げも含めた多様な出口戦略の検討が重要。
- 具体的な推進にあたっては社会的ニーズの調査と研究開発の方向性の調整を専門に行う研究マネジメント人材の活躍が不可欠。

【2】国内外の研究開発との連携について

- 国内の関連事業（ERATO、CREST、NEDO プロなど）との成果の共有や技術交流を通じ研究開発の効率化や加速を模索。特に量子コンピュータの適用領域の探索やソフトウェアの開発に関しては広く全般に跨る課題であり、情報共有は必須である。
- 国内外の研究情勢を的確に分析し、状況に応じ適切に国内／国際的な共同研究を実施し世界に伍する研究開発力を維持。特に、根幹となる誤り訂正などの量子情報処理理論に係る進展に関しては、最先端の成果を迅速に取り入れることが可能な体制の構築が重要である。

【3】人材育成

- 将来にわたり世界に伍する持続的な研究開発を推進するため、当該分野の大学院生およびポストドク研究者の支援や、官学のみならず民間企業も含めたポストの拡大や若手研究者の積極的登用など人材育成に資する取組も積極的に進める必要がある。

重点推進戦略(量子計測・センシング) 検討のまとめ

平成 30 年 1 月 31 日
 ロードマップ検討グループ
 (量子計測・センシング)

1 国内外の研究開発動向

センサの市場は拡大中。次世代技術である量子計測・センシングに欧米政府が着目し投資を拡大。

- センサの世界市場は現在約 5 兆円（2015 年）であり、小型化・低価格化を背景に今後も市場の拡大継続が予想（富士キメラ総研 2017）。
- 近年、計測・センシングに量子力学的な効果を利用することで、従来技術を凌駕する感度や空間分解能を得る量子計測・センシングが発展。量子計測・センシングの計測対象は、磁場、電場、温度、光、慣性力（加速度・角速度等）など多岐にわたり、その計測方法も多様。
- 欧米政府は量子計測・センシングを幅広い用途でブレークスルーをもたらす技術分野として投資を拡大。
- 以下、量子計測・センシングの主要技術について、国内外の研究開発動向についてまとめる。

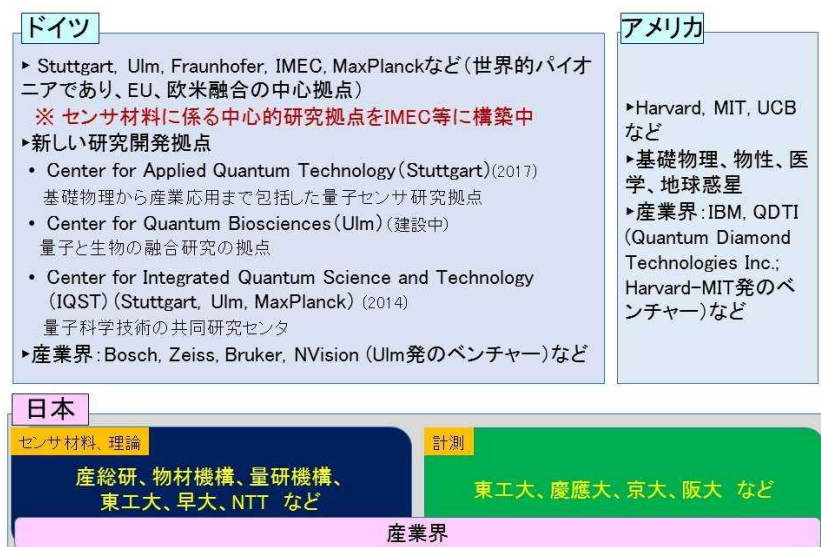
○固体量子センサ（ダイヤモンドセンサ）

日本の強みはセンサ作製技術。産業への応用の動きが、ドイツや日本で開始。

- ダイヤモンドセンサは、ダイヤモンドの固体中にトラップされた電子スピンのコヒーレンス時間が長いことを利用して nm～mm スケールの対象を計測。室温・大気中で磁場、電場、温度を同時に超高感度計測できる特徴がある。

- 海外では、当該技術のパイオニアであるドイツ Stuttgart, Ulm 大学の他、米国 Harvard 大学、MIT の研究グループがバイオ・医療計測の応用を見据えた研究を実施。

- 国内では、センサ材料に関する研究開発が産総研、物材機構、量研機構、東工大を中心に行われ、計測に関する研究が東工大、慶應大、京都大を中心に実施。特に、日本の高品質な材料技術は、世界のトップデータを支えており強みを有している。



ダイヤモンドセンサに関する海外と日本の状況

(提供：東工大・波多野教授)

また、産業への応用に関する模索も、パワーデバイスや電池等を対象にした取組から生体（脳・心臓等）を対象にしたものまで幅広く開始されている。

○量子もつれ光センサ

応用を見据えた研究が各国で行われる中、日本は、世界に先駆けもつれ光子を顕微鏡に応用。

- 量子もつれ光センサは、光子のもつれ状態を計測・センシングに活用し、ショットノイズ限界を超える感度や分解能で検出する技術。
- 海外では、米国 Boston 大の研究グループが量子 OCT（光干渉断層計）、英国 Bristol 大の研究グループが微量化学計測への応用を見据えた研究を進めている。



量子もつれ光センサに関する世界の主要研究拠点

(京都大・竹内教授提供の情報を基に文部科学省が作成)

- 国内においても、量子もつれ光を研究しているグループは東大、学習院大、NICT などいくつか存在するが、量子計測・センシングへの応用を目指したグループは京都大の量子 OCT 等を目指した研究グループに限られている。他方、もつれ光子を世界で初めて顕微鏡に応用し、通常の光の限界を超えた S/N 比（信号対雑音比）を持つ微分干渉顕微鏡を実現するなど、強みを有している。
- また、日本は、生物顕微鏡の世界シェアを 50%以上持つなど、産業面でも光学機器の強みを有している。

○量子スピントロニクスセンサ

企業を主体とした製品化に向けた研究開発が進行。新たな展開は他の量子センサとの融合が鍵。

- 量子スピントロニクスセンサは、外界からの刺激によって生じる物質中のスピンの変化を、量子力学的効果によって検出する技術。
- 量子スピントロニクスセンサは、MRAM 等の製品開発で蓄積された技術をもとに企業が参入しつつある。海外では、米・中・独を中心にスタートアップ企業が磁気センサを上市。日本は、平成 23 年度より JST 戦略的イノベーション創出推進プログラム等で産学連携の研究開発を実施。TMR アレイを用いた脳磁計・心磁計の小型化等に向けた開発が進んでいる。
- また、量子スピントロニクスセンサは、固体量子センサ(特にダイヤモンドセンサ)や量子メカニカルセンサの基盤技術としても重要。スピン流やスピン変換等の基礎研究を通じ、これらの分野との融合により新たな展開が切り拓かれる可能性が指摘されている。

○量子慣性センサ

重力加速度・角速度に関する研究が先行。重力勾配計は新たな理論提案がされており、実証研究次第では、大きな研究進展が見込まれる。

- 量子慣性センサは、「加速度」「角速度」に関して、量子効果を用いて高精度に検出する技術。想定される主な社会実装先は、慣性航法の性能向上や資源探索の効率化。

- 海外では、米国 Stanford 大やフランスパリ天文台 SYRTE 研究所等の研究グループが可搬の重力加速度計を商用化。国内では、量子効果を用いた角速度計に関する研究が、平成 29 年度より JST 未来社会創造事業（大規模プロジェクト型）で開始された。
- 重力が場所ごとに異なるために慣性航法で生じる誤差を計測・解消する重力勾配計については、可搬かつ小型を目指した研究が国内ではじまりつつある。また、東大のグループが、光格子時計開発に係る技術を重力勾配計開発に転用可能な理論を提案。その実証研究の進展次第では、可搬で小型の重力勾配計開発を大きく進展できる可能性があり、光格子時計という我が国発の技術の産業応用として注目。

○量子メカニカルセンサ

極低温物性研究や量子情報処理の交換器（transducer）に関する基礎研究が進行。

- 極低温の極限環境において振動が量子化する振る舞いの検出・制御を目指したサイエンス志向から始まった研究。古典的動作原理に基づく手法は、走査プローブ顕微鏡などに取り入れられており実用化の段階。一方で、量子構造を用いた手法については、量子構造が極低温においてのみ動作可能であることから、社会実装へはクリアすべき課題が多い。
- 海外では、米国 UCSB の研究グループが GHz の振動子と超伝導量子ビットを組み合わせた例を報告するなど、量子ビットとメカニカル振動子の組み合わせを用いた例が報告されており、量子情報処理の交換器としての基礎研究が進められている。
- 日本では、NTT で極低温物性研究、東大で量子情報処理の交換器としての基礎実験が進められている状況。

2 出口志向型トップダウン研究の方向性

具体的な社会実装を適切に見据え、基礎研究から応用研究まで一貫して行う研究開発を実施。

- 量子計測・センシングの研究開発動向は 1 で挙げたように、産業界が中心となって研究を行っているものから、サイエンス志向の研究まで、研究フェーズが様々。
- 出口志向型トップダウン研究は、社会への具体的な応用を見据えつつ、基礎研究から応用研究まで一貫して行う必要のある研究に重点化すべき。これらに該当する技術は、現時点では量子固体センサや量子もつれ光センサであり、例えば、以下のような研究が挙げられる。

※量子計測・センシングに係る他の技術についても、その技術進展等を踏まえ、適時適切に、出口志向型トップダウン研究の実施を検討すべき。

○固体量子センサ（ダイヤモンドセンサ）

- (1) 磁場のベクトルイメージングが可能という特徴を活かした、高い感度と高い空間分解能を持つ脳磁計測システムの開発
- (2) 蓄電池、パワーエレクトロニクス等、エネルギーデバイス内部の磁場・電場・電流・温度を非接触でモニタリングするシステムの開発

○量子もつれ光センサ

- (1) 生体組織やデバイスにおける超精密観察に資する、群速度分散の影響を回避し深さ方向分解能を極

限まで高めた量子 OCT や量子相関を用いた高感度吸収計測の開発

3 相補的に連携・推進すべき基礎基盤研究の方向性

○重力センサ

- 輸送車両・船へ搭載可能な、小型で従来の精度を上回る重力勾配計を目指した研究開発（例えば、現行 $10E^*$ の精度を、 $0.1E$ まで高める等）
 E (eötvös)…重力勾配の単位、 $1E=10^{-9}s^{-2}$
- 光・量子の高度な制御技術の進展が期待され、量子計測・センシング全体の技術基盤の向上に寄与

○量子スピントロニクスセンサ

- スピントロニクスを次世代量子センサで活用するために、スピン流と物質中の各種ダイナミクス（単一スピン、スピン量子もつれ、固体中のフォノン、電流、熱）との相互変換の研究を行う。特に電流との変換効率であるスピホール角が実装レベルで 0.5 を超えれば、広範囲の量子測定に応用できる。
- ナノスケールのスピン測定、回転運動の測定・制御において、スピン流の利用は不可欠。量子スピントロニクスは他の量子計測・センサ技術に共通した横糸となる技術であり、特に固体量子センサや量子メカニカルセンサの駆動・読み取り、及び集積化を実現する。

○量子メカニカルセンサ

- 量子物理の研究において開拓された極低温超高感度センシングに係る技術を、各実用技術で要求される通常環境技術へと水平展開させることを目指した研究（オプトメカニクスによる溶液中原子・分子検出や高感度プローブ顕微鏡応用）
- オプトメカニクス、スピンメカニクス、など、他の物理系とのハイブリッド化による量子計測・センサ技術のパフォーマンス向上ならびに多機能化に寄与

○その他

- 固体量子センサ、量子もつれ光センサの高度な量子制御やデバイス化に資する基礎基盤研究
- 革新的機能性材料（トポロジカル量子材料など）や新たな量子制御、計測手法を用いた新しい量子計測・センシングの手法に関する研究開発

4 出口志向型トップダウン研究の目標

○固体量子センサ（ダイヤモンドセンサ）

【5年目】

- (1) 小動物の神経電流と行動との対応を検証可能とする、ダイヤモンドセンサを用いた小動物の脳磁のベクトルイメージングの POC (Proof of Concept) を達成
- (2) 安全安心なデバイスやパワーエレクトロニクスの設計に反映可能な、パワーデバイス内部の電場・電流・温度を局所的に検出する技術の実証

【10年目】

- (1) 上記(1)技術を発展させ、運転者の意識レベルモニタリングや未病検出などのヘルスケアシステム

への適用を見据えた、人間の脳磁のベクトル磁場イメージング情報を非侵襲で計測するプロトタイプモジュールの開発・実証

- (2) 上記(2)技術を発展させ、パワーエレクトロニクス、蓄電池の故障などのダイナミカルな状態を、リアルタイムでモニタリングできるシステムのプロトタイプ機の開発・実証

○量子もつれ光センサ

【5年目】

- (1) 1 μ m以下の分解能を持つ量子OCTと市販OCTとのハイブリッド型のプロトタイプ機の実証
- (2) 周波数量子もつれにより、可視光の光源・検出器を用いた、高感度長波長赤外分光装置のプロトタイプ機の実証

【10年目】

- (1) 量子OCT技術を発展させ、さらなる高分解能化を達成するとともに、細胞内組織観察や眼科疾患の早期検出などを見据えた、3次元超高分解能量子OCT装置の開発
- (2) 高感度長波長赤外分光装置のさらなる高感度化やまたテラヘルツ等を含む波長域の拡大、プロトタイプ機の小型化

5 研究マネジメント

2で挙げた出口志向型トップダウン研究の成果を最大化し社会に還元するためには、下記のような研究マネジメントを行う必要がある。

【1】産学連携・出口戦略について

社会ニーズとセンサの共通基盤的な開発が常に接点を持って研究開発を行う体制の構築が重要。企業共通のニーズと個別のニーズで協調・競争領域を区別し、スムーズな社会実装を目指す。

○固体量子センサ（ダイヤモンドセンサ）

- ダイヤモンドセンサの材料・デバイス開発やセンサを用いた製品システム開発に関心の高い企業によるコンソーシアムを形成。協調領域では、原理実証やセンサデバイスの高性能化、プロトタイプ機の実証を含む基盤的な研究を実施。
- 一方、競争領域では、固有のアプリケーションを念頭にしたシステム開発に関し、共同研究を実施し製品化を加速。また、センサ材料・デバイスの工業的製造技術開発についても、各企業との個別の共同研究開発を実施し、産業化に結び付けていく。
- 協調領域のコア技術を発展させたベンチャーを立ち上げることも想定。

○量子もつれ光センサ

- 量子もつれ光センサの応用に関心のある企業を集めたコンソーシアムを形成。協調領域では、コンソーシアム参加各社と、開発されたプロトタイプ機を用いた量子もつれ光センサの具体的な応用を模索する研究開発を実施。
- 一方、競争領域では、固有のアプリケーションを念頭にしたシステム開発に関し、共同研究を実施し製品化を目指す。

- 量子もつれ光センサのコア技術については、光源技術などパッケージ化できる部分を製品とし、ベンチャーを立ち上げることも想定。

他の計測・センサ技術の動向を把握し、研究開発目標・計画を柔軟に見直す。

- 他の計測・センサ技術の動向を把握し、自らの研究開発目標・計画を常に最新の世界動向を踏まえたものにする必要がある。
- また、動向把握・研究開発目標の検証には、URA 等の研究開発マネジメントの専門家の参画もさせ、多角的に実施することも重要。

【2】国内外の研究開発との連携について

- 量子計測・センシングに関連する事業（例えば、JST 戦略的創造研究推進事業 CREST「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」や JST 未来社会創造事業（大規模プロジェクト型）「自己位置推定機器の革新的な高精度化及び小型化につながる量子慣性センサー技術」、等）と連携し、研究開発を実施する必要がある。また、国内外の研究動向を的確に把握・分析し、戦略的に国内／国際的な共同研究を実施することも重要。

【3】人材育成

産学が連携し、量子計測・センシングにおける日本の競争力を高めるための人材育成の場の構築が重要。

- 拡大するセンサ市場において、量子計測・センシングに対する企業の関心を惹きつけ、製品開発・市場獲得につなげるため、大学等の研究者と企業関係者との間で「量子技術」に関する最新動向を共有することが重要。また、量子計測・センシングの研究開発は、センサそのものに関する知識の他、それを取り巻く材料科学、生命科学等の幅広い知識の習得や、理論からシステム開発まで見渡せる力が必要。
- そのため、企業研究者や大学等の若手研究者・学生の知識を共有する場を設け、専門外の知識の習得や人的ネットワークの構築を、研究開発と並行して実施する必要がある。

重点推進戦略(極短パルスレーザー) 検討のまとめ

平成 30 年 1 月 31 日
 ロードマップ検討グループ
 (極短パルスレーザー)

1 国内外の研究開発動向

極短パルスレーザーはフェムト (10⁻¹⁵) 秒からアト (10⁻¹⁸) 秒へ

現在、パルス幅が 10~100 フェムト秒のパルスレーザーが市販されており、学術研究や産業において利用が進んでいる。学術研究では、フェムト秒が分子の化学結合の切断・生成・変化の時間スケールであることから、例えば、フェムト秒パルスレーザーで分子の運動を追跡し、なぜ特定の化学反応が起こりやすいかなどを明らかにする研究等に利用されている。また産業では、フェムト秒パルスレーザーは瞬間的な出力が大きい反面、照射時間が極めて短く、周囲への熱の伝わりを抑えながらレーザー照射ができることから、例えば、眼科のレーシック治療、スマートフォン用ガラスの切断等に利用されている。

このような超高速の現象を対象とする研究は、現在、更に短い時間スケールであるアト秒の科学へと進展をみせている。アト秒は原子や分子の中の電子が動く時間スケールであることから、例えば、これにより化学反応や材料の電子の運動をアト秒スケールで計測することで、電子レベルでの化学反応のメカニズムの解明や材料物性の発現機構の解明に貢献することが期待されている。またその先にある産業利用においては、上記解明により、高性能な光触媒・太陽電池や超高速高密度な磁気デバイス等の開発につながると期待されている。

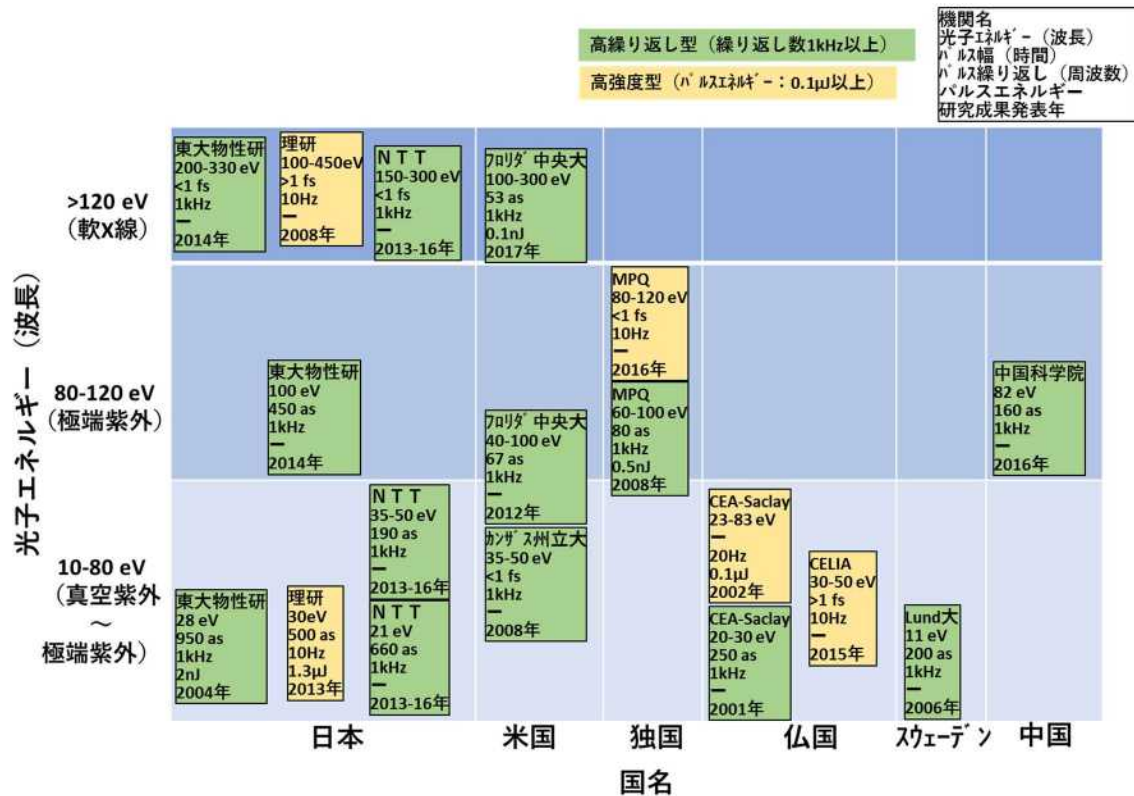


アト秒プラットフォームの構築; 産学(大学、共同利用施設)との連携、
 人材育成による新産業育成への貢献(量子物質R&Dベンチャー等)

東京大学物性研 板谷准教授、東北大学 岩井教授、理化学研究所 緑川領域長、
 東京大学 山内教授、東京工業大学 腰原教授 提供

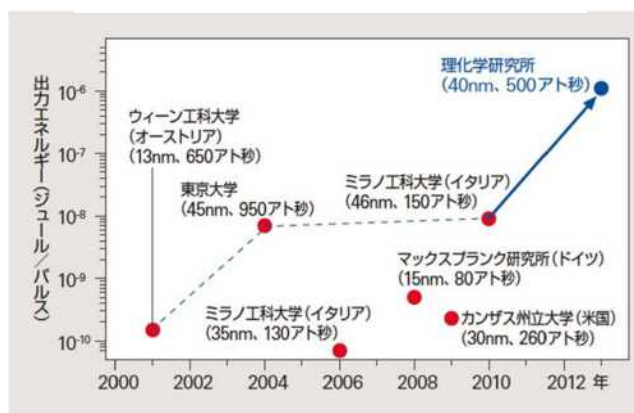
アト秒パルスレーザーの光源には、単位時間当たり多くのパルスを生じさせる高繰り返し型（現在の研究動向を踏まえると、概ね 1kHz 以上のものと整理）と、高いパルスエネルギーを生じさせる高強度型（現在の研究動向を踏まえると、概ね 0.1μJ 以上のものと整理）がある。

高繰り返し型は再現性のある現象（例えば光触媒の初期反応過程等）を繰り返し計測することにより精密なデータ取得が可能である。一方、高強度型は再現性のない単発現象（例えば磁性材料の磁気ドメインの変化等）を一回の照射でデータ取得することが可能である。それぞれ異なった現象を計測することが可能である。



※一部不明な数値（“—”で表記）があるが、関連情報をもとに高繰り返し型又は高強度型に整理した。

アト秒レーザー国内外の研究開発
 東京大学物性研 板谷准教授 提供



アト秒パルスレーザー出力
 理化学研究所 緑川領域長 提供

○高繰り返し型

- 研究開発は主に米国、独国、仏国、スウェーデン、中国、日本で実施。
- 研究開始当初は、アト秒パルスレーザー光源の発生原理及びアト秒パルスの計測手法等を研究。波長は、真空紫外から極端紫外領域。また、光源の利用可能性を示す観点から、光源開発の研究グループによって原子、分子の電子状態の計測が実施されている。
- 近年、アト秒パルスレーザーを発生させるための励起光源から開発をしていた研究グループに加え、市販のフェムト秒レーザーを使ってアト秒を発生させ計測手法の開発を行う研究グループが出現。後者の研究グループの波長は、真空紫外から極端紫外領域。
- 波長が真空紫外から極端紫外領域の場合、原子等の最外殻の電子を見ることにより、化学反応の過程を追うことができる。しかし、分子の構造変化を見るためには内殻電子の情報が必要であるが、既存の波長域では光子エネルギーが小さいため、内殻電子の計測を行えない。そのため光子エネルギーが大きい軟X線領域を発生できるアト秒パルスレーザーの開発が近年行われてきている。
- アト秒パルスレーザーを発生させるための励起光源から開発し、軟X線領域のアト秒パルスレーザーを発生できるのは日本と米国のみ。日本は、最初に軟X線アト秒パルスレーザーの発生手法を開発。米国は日本と同じ手法を使用していることから、日本は真空紫外から軟X線領域まで広い範囲でアト秒パルスレーザーを発生する光源技術に強みを持っている。
- これまではアト秒パルスレーザー光源の開発が主眼であり、アト秒パルスレーザーを用いた計測手法の研究開発は限定的。しかしながら、高繰り返し型アト秒パルスレーザーは材料開発等で、今後産業利用も考えられることから、計測手法の開発を促進していくべき。
- そのためには波長領域を拡大しつつ、計測時間の短縮に寄与できる繰り返し数についても同時に大きくしていく必要。

○高強度型

- 研究開発は主に独国、仏国、日本で実施。
- 研究開発当初は、アト秒パルスレーザー光源の発生原理及びアト秒パルスの計測手法等を実施。波長は、真空紫外から極端紫外領域。
- 日本は、真空紫外から極端紫外領域において高強度のパルスを発生させる光源技術が強み。さらに、日本は新たな手法により軟X線領域でアト秒パルスを高効率で発生させる手法を開発しており、アト秒パルスレーザーを発生できる波長領域の幅広さにも強みを持っている。
- これまでは高強度型のアト秒パルスレーザーでは、その光源の開発に主眼が置かれており、計測手法の開発は未だ行われていない。しかしながら、高強度型アト秒パルスレーザーは磁気記憶デバイス開発等で、今後産業利用も考えられることから、計測手法の開発を促進していくべき。
- そのためには、波長領域を拡大しつつ、ピークパワーの増加が必要。

2 出口志向型トップダウン研究の方向性

○高繰り返し型

アト秒パルスレーザーの産業利用を見据えつつ、学術研究での利用を促進するため、小型で安定的に使用できる光源の研究開発を実施。波長は真空紫外から軟X線領域までとし、計測時間短縮等を達成す

るため繰り返し数を現状より増加させる。計測装置については、産業応用まで見据えられる計測分野を対象とし、外部の研究者も利用可能なプロトタイプ機の開発を実施する。光源開発と計測装置開発は緊密な連携体制の中で実施する。

○高強度型

アト秒パルスレーザーの産業利用も見据えつつ、学術研究での利用を促進するため、小型で安定的に使用できる光源の研究開発を実施。波長は真空紫外から軟X線領域までとし、軟X線領域における2光子過程等の非線形光学現象の観測等を達成するためピークパワーを現状より増加させる。計測装置については、産業応用まで見据えられる計測分野を対象とし、外部の研究者も利用可能なプロトタイプ機の開発を実施する。光源開発と計測装置開発は緊密な連携体制の中で実施する。

3 相補的に連携・推進すべき基礎基盤研究の方向性

➤ アト秒パルスレーザーへの適用を見据えたフェムト秒レーザーを用いた新規性のある計測技術等
※国内外の研究動向や技術進展等を踏まえ、適時適切に出口志向型トップダウン研究への適否を検討すべき。

※光源利用については、出口志向型トップダウン研究と連携し、効率的な研究開発を実施すべき。

4 出口志向型トップダウン研究の目標

高繰り返し型及び高強度型それぞれについて以下に示す。なお、下記目標は、現時点で考え得る目標であり、国内外の研究動向や技術進展等を踏まえ、例えば2～3年単位で定期的に見直していくべきである。

○高繰り返し型

【光源】

繰り返し数の目標は、5年後については、直前のパルスによる電子励起の蓄積効果なく対象を高速で計測できる繰り返し数として、10-100kHz、10年後、直前のパルスによる影響が残らない物質に対応し計測時間を大幅に短縮する繰り返し数として、1-10MHzとする。産業利用も見据えつつ、学術研究での利用を促進するため、波長は真空紫外から軟X線領域とし、外部の研究者も利用可能な小型で安定的に動作する光源を開発する。

【計測装置】

アト秒パルスレーザー光源を用いた産業応用を見据えられる計測装置、例えば光触媒・太陽電池の飛躍的な高効率化に資する、光触媒・太陽電池材料の電子状態の計測装置。

○高強度型

【光源】

ピークパワーの目標値は、軟X線領域で2光子過程等の非線形光学現象等の観測に利用できるピークパワーが1～10GWなため、5年後の目標として1GW、10年後の目標として10GWとする。産業利用も見据えつつ、学術研究での利用を促進するため、波長は真空紫外から軟X線領域とし、外部の研究者も利用可能な小型で安定的に動作する光源を開発する。

【計測装置】

アト秒パルスレーザー光源を用いた産業応用を見据えられる計測装置、例えば超高速高密度な磁気記憶デバイスの開発に貢献する、磁気記憶材料の電子スピン状態の計測装置。

5 研究開発マネジメント

2で挙げられた出口志向型トップダウン研究の成果を最大化し社会に還元するためには、下記のような研究開発マネジメントを行う必要がある。

- 協調領域では、アト秒パルスレーザー光源と計測装置を共通プラットフォームとして外部の研究者が安定的に使用できるプロトタイプ機の開発を実施。アト秒パルスレーザーに関心のある企業（ベンチャー企業を含む）が参加するコンソーシアムを形成し、光源と計測装置の開発状況を共有するとともに、コンソーシアム参加各社に対し、プロトタイプ機を用いた基本物質（高繰り返し型：半導体等、高強度型：磁性体等）におけるデモンストレーションを実施し、有用性・有効性を示すとともに、各社への導入を呼びかけ、競争領域での開発参画を促す。
- 競争領域では各企業（ベンチャー企業含む）の目的に適した計測装置開発を実施。
- アト秒パルスレーザー（光源・計測装置）に関するベンチャー企業の立ち上げも検討。
- 「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想ロードマップの策定（平成 29 年 7 月 28 日、学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会）」において挙げられているアト秒レーザー科学研究施設に関する計画等とも今後連携し、研究者・技術者の交流等も含め人材育成の観点も重視した研究開発を推進する必要がある。

重点推進戦略(次世代レーザー加工) 検討のまとめ

平成 30 年 1 月 31 日

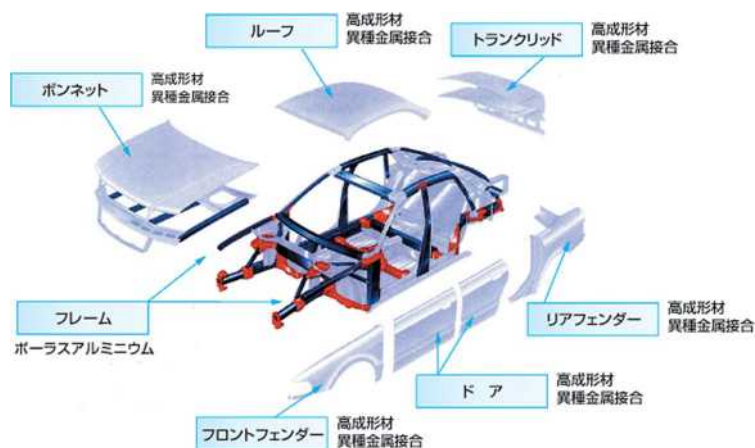
ロードマップ検討グループ

(次世代レーザー加工)

1 国内外の研究開発動向

レーザー加工市場は 1.5 兆円。年率 10% 程度の成長を予測。自動車や半導体でレーザーの利用が進展

- 現在のレーザー加工機の世界市場規模は 1.46 兆円（2016 年）であり、年率 5-10% 程度の成長が見込まれている（Optech Consulting 調べ）。特に、成長市場である半導体産業、電子部品産業、自動車産業（特に電気自動車）へのレーザー加工機の導入が進展。
- 例えば、電気自動車産業では、車体のマルチ材料化による軽量化が課題。異材接合等のレーザー加工技術への期待が高まっている。
- 半導体産業においても、EUV リソグラフィの導入が始まり、短波長光源による微細加工の新たなフェーズに入りつつある。

(出展) http://www.nedo.go.jp/activities/ZZ_00226.html

ものづくりの分野では、「サイバーフィジカルシステム (CPS)」による生産性向上の取り組みが加速

- ドイツでは、Fraunhofer IPT（生産技術研究所）が、デジタルツイン技術として、工作機（フィジカル空間）のシミュレーションをサイバー空間で行い製品モデル（設計と検証）の最適化を行うシステム開発を実施中。このシステムの構築をいち早く行ったところが、プラットフォームとなることが見込まれ、日本においても早急に取り組むことが必要。



Fraunhofer IPT Digital Twin

(出展) <https://3dprintingindustry.com/>

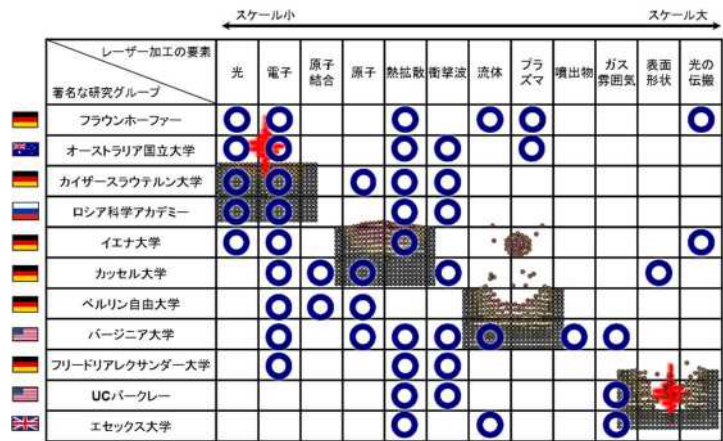
- さらに、ドイツはレーザー加工に特化した同様の取り組みもすでに開始（Fraunhofer ILT（レーザー研究所）の Digital Photonic Production）。ILT 内に企業を誘致してリサーチキャンパスを作り研究開発を行っている。
- 日本では、NEDO「高輝度高効率次世代レーザー技術開発プロジェクト（平成 28 年度～平成 32 年度）」において、プロジェクトで整備したレーザーや測定装置を配したレーザー加工プラットフォーム

ーム (TACMI) を構築中。様々なパラメータのレーザーを用いた試作加工を行うことにより、加工パラメータのデータベース化を図り、サイバー空間側にデータを集約することで効率よく加工レシピを得ることを目指している。

レーザーの長所を加工に最大限活かすためには、レーザー加工の学理の解明がコア技術となる可能性

- 現在、レーザーでなぜ切断・接合・表面加工等ができるかは未解明。そのため、現状では職人の経験に基づき、加工パラメータ (波長、パルス幅、パワー等) を決定しており、効率の面においても、品質の面においても、レーザーの長所を 100%活かせていない。
- これらの状況を打破するためには、レーザー加工の学理に関する深い理解と、それを踏まえた加工パラメータの決定が必要。
- 諸外国では、ドイツ Fraunhofer IOF (応用光学・精密機械研究所) をはじめ、多くの研究グループがレーザー加工の学理の研究開発を実施。しかしながら、レーザー加工の全要素を一気通貫に研究を行っているグループはいない。
- レーザー加工の学理の解明には、マルチスケールの現象を包括的に理解することが重要。いかに、国際協調を戦略的に活用して包括的に学理を解明するチームを組み、それぞれの物理 (第一原理計算、熱力学、流体力学等) を繋げるかが鍵となる。

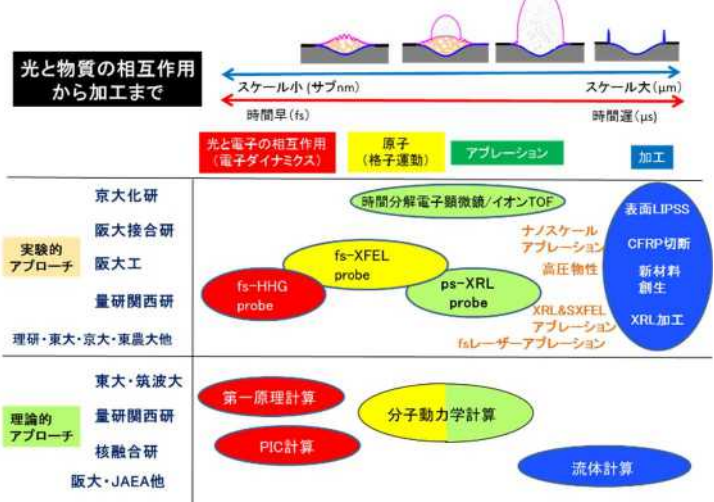
レーザー加工の学理の現状



レーザー加工の学理の現状 (海外)

東京大学 小林准教授 提供

fs~nsレーザー加工の学理の現状 (日本)



レーザー加工の学理の現状 (国内)

京都大学 阪部教授 提供

加工品質を検証し、加工パラメータ設定にフィードバックし学習をしていくシステムが必要

- CPS 型レーザー加工機が、高品質な加工のパラメータを提案できるようにするためには、加工品質を自ら検証し、加工パラメータ設定へフィードバック (学習) していくシステムの構築も欠かせない。
- そのためには、加工品質を図る尺度の特定 (感覚の数値化)、システムが加工品質を評価・分析・最適化するために必要なデータベースの構築やそれを用いた機械学習のシステム、自動で加工データを取得しデータベースを強化するシステムの開発も必要となる。

加工学理の解明や機械学習を活用した CPS 型レーザー加工機をいち早く実現し生産性革命につなげる

- これらの状況を踏まえ、レーザー加工の学理解明や機械学習からの加工結果の予測を活用し、ワンストップで最適な最終形状に仕上げが可能な高精度・低コストの CPS（サイバーフィジカルシステム）型次世代レーザー加工技術を開発し、ものづくり分野における生産性革命を実現する。

2 出口志向型トップダウン研究の方向性

加工データベースを用いた深層学習・強化学習を活用した「AI CPS レーザー加工」の開発や、加工素過程の実時間観測等による加工学理の解明によりサイバー空間のみで加工シミュレーションが可能な「学理 CPS レーザー加工」の開発を行い、自動車車体のマルチマテリアル化や半導体の高精度加工など、生産現場でのスマート生産体制構築を目指す

3 相補的に連携・推進すべき基礎基盤研究の方向性

○高輝度・高温状態の in-situ（オペランド）計測技術

- レーザー加工中の温度状態や材料の除去、プラズマといった加工プロセスの in-situ 観測技術や加工後の品質評価システムの構築
- AI CPS レーザー加工の開発に必要なデータの効率的な取得や学理 CPS レーザー加工の開発時の実データとの比較の効率的な推進、CPS レーザーの産業応用時の安定稼働等で相乗効果を期待。

○プラズマ、Warm-Dense Matter の物理

- レーザー加工初期過程に相当するプラズマ状態の計測・制御や、固体-プラズマ中間領域の物質状態 (Warm Dense Matter) 及び物性の解明など
- CPS レーザー加工のキーパラメータであるプラズマ状態に関する体系的理解を通じ、学理 CPS レーザー加工の開発で相乗効果を期待。

○極限状態(例えば、アト・フェムト秒領域、超高温、超高压等の状態)での光と物質の相互作用

- アト・フェムト秒領域、高輝度、超高温、あるいは超高压状態での光と物質の相互作用の学術的解明と、新材料・新プロセスへの展開
- 時間領域：アト・フェムト秒から秒、ピークパワー：ギガ (10^9) W/cm² からゼタ (10^{21}) W/cm²、電子温度：室温から数億 K にわたるマルチスケールでの物理を解明し、物理空間側から CPS レーザー加工の開発に貢献

4 出口志向型トップダウン研究の目標

【5年後】

- 機械学習・強化学習を用い、レーザー加工の代表的な対象材料である金属・半導体・ガラスに対して対応可能な、「AI CPS レーザー加工」の POC を達成し、CPS レーザー加工の優位性を示す。

【6~8年後】

- AI CPS レーザー加工機のプロトタイプ機を開発し、市場への投入を目指す。

【10年後】

- 新規の加工材料に対する最適な加工パラメータを提案できる、加工学理の解明に基づいた「学理CPSレーザー加工」のPOCを達成する。

【出口戦略】

- CPSレーザー加工機のコア技術であるレーザー加工のシミュレータ技術を核としたベンチャーを立ち上げ、レーザー加工機への搭載を目指す。
- 年率5-10%程度の成長1.46兆円のレーザー加工機市場（2016年）において、日本発のCPSレーザー加工機をいち早く投入することで、デファクトスタンダードを目指す。また、スマート生産体制を構築し、製造現場における生産性の飛躍的向上を実現する。

5 研究マネジメント

2で挙げられた出口志向型トップダウン研究の成果を最大化し社会に還元するためには、下記のような研究マネジメントを行う必要がある。

【1】産学連携、出口戦略について

協調領域は、コンソーシアム等を活用し企業の意見を反映しつつ、代表的な材料を対象としたプロトタイプ機を開発。競争領域では、各社のニーズを踏まえたシステム化を実施し社会実装につなげる。

- 協調領域では、レーザー加工の代表的な対象材料である金属・半導体・ガラスに対する開発を実施。CPSレーザー加工に関心のある企業が参加しているコンソーシアム等を形成または活用し、CPSレーザー加工の開発状況を共有するとともに、各社のニーズについて意見交換を実施し開発に反映する。この段階では、例えばAI CPSレーザー加工に必要なデータベースへの各社からのデータ供与はボランティアベースとする。また、コンソーシアム参加各社に対し、CPSレーザー加工のプロトタイプ機を用いたデモンストレーションを実施し、有用性・有効性を示すとともに、各社のレーザー加工機への導入を呼びかけ、競争領域での開発参画を促す。
- 一方、競争領域では各社が持っている独自のデータの提供を受けつつシステム開発を個別に実施し、各社が念頭とする材料（ガラス、金属、半導体など）・加工方法（切断、接合、機能性付加等）に適したCPSレーザー加工機の開発を実施し、実用化に結び付ける。このフェーズでの企業との共同研究は、マッチングファンドを前提に実施することとする。

他のCPS生産システムの動向を把握し、研究開発目標・計画を柔軟に見直す

- デジタルツインに関する国内外の研究開発、製品サービスの動向や、ドイツのFraunhoferレーザー研究所のDigital Photonic Production等の動向を把握し、自らの研究開発目標・計画を常に最新の世界動向を踏まえたものにする必要がある。
- また、動向把握・研究開発目標の検証には、URA等の研究開発マネジメントの専門家の参画もさせ、多角的に実施することも重要。

【2】国内外の研究開発との連携について

NEDOプロ等と連携し、AI CPSレーザー加工の開発に必要なデータベースの効率的な構築を実現

- NEDO「高輝度高効率次世代レーザー技術開発プロジェクト」等と密に連携をして研究開発を実施。特に、機械学習のためのデータベースについては、NEDO で整備をしているレーザー加工プラットフォーム（TACMI）と連携し、効率的なデータベースの構築を実現する。

加工学理に関する戦略的な国内外の連携体制を構築。学理 CPS レーザー加工の効率的な開発につなげる

- 学理 CPS レーザー加工の実現のためには、マルチスケールな現象であるレーザー加工を包括的に理解する必要がある。そのため、学理の解明に関して、国内の連携で足りない部分については、戦略的にドイツやアメリカ等と国際的な共同研究を行い、包括的に加工学理を解明する体制を作る必要がある。

【3】人材育成

- 成長分野であるレーザー加工産業において日本の産業基盤と競争力をさらに強固にするため、学生はもとより、社会人の受け入れも含め、人材育成の観点も重視した研究開発を推進する必要がある。

量子情報処理(主に量子シミュレータ・量子コンピュータ)に係る

ロードマップ検討グループ

(主査)

| | | |
|-------|----------------|----------|
| 伊藤 公平 | 慶應義塾大学 理工学部 教授 | 半導体量子ビット |
|-------|----------------|----------|

(専門有識者)

| | | |
|-------|--|-----------|
| 井元 信之 | 大阪大学大学院 基礎工学研究科 教授 | 光方式 |
| 川島 直輝 | 東京大学 物性研究所 教授 | 計算物理 |
| 寒川 哲臣 | NTT 物性科学基礎研究所 所長 | 固体/光量子ビット |
| 高橋 義朗 | 京都大学大学院 理学研究科 教授 | 冷却原子・分子 |
| 樽茶 清悟 | 理化学研究所 創発物性科学研究センター グループディレクター | 半導体量子ビット |
| 豊田 健二 | 大阪大学大学院 基礎工学研究科 助教 | イオントラップ |
| 永長 直人 | 理化学研究所 創発物性科学研究センター 副センター長 | 材料・物性物理 |
| 中村 泰信 | 東京大学 先端科学技術研究センター 教授 | 超伝導量子ビット |
| 西森 秀稔 | 東京工業大学 理学院 教授 | 量子アニーリング |
| 野村 拓司 | 量子科学技術研究開発機構 上席研究員 | 計算物理 |
| 宮下 哲 | 科学技術振興機構 研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー | |
| 村尾 美緒 | 東京大学理学系研究科 教授 | 量子情報処理 |

(リエゾン)

| | | |
|-------|-----------------------------|---------|
| 大森 賢治 | 委員(自然科学研究機構 分子科学研究所 教授) | 冷却原子・分子 |
| 根本 香絵 | 委員(国立情報学研究所 情報プリンシプル研究系 教授) | 量子情報処理 |

(敬称略、五十音順)

※ 必要に応じ、更に外部有識者の知見を得て検討を行う。

量子計測・センシングに係る
ロードマップ検討グループ

(主査)

荒川 泰彦 東京大学 生産技術研究所 教授 量子ナノデバイス

(専門有識者)

石内 秀美 (株)先端ナノプロセス基盤開発センター 代表取締役社長 半導体デバイス

大島 武 量子科学技術研究開発機構 プロジェクトリーダー 固体量子センサ

上妻 幹旺 東京工業大学 理学院 教授 量子慣性センサ

齊藤 英治 東北大学 金属材料研究所 教授 スピントロクスセンサ

竹内 繁樹 京都大学大学院 工学研究科 教授 量子もつれセンサ

波多野睦子 東京工業大学 工学院 教授 固体量子センサ

宮下 哲 科学技術振興機構 研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー

山口 浩司 NTT 物性科学基礎研究所 上席特別研究員 量子カニクスセンサ

山田 真治 日立製作所 基礎研究センタ長 材料科学

(リエゾン)

上田 正仁 委員 (東京大学大学院 理学研究科 教授) 理論物理

早瀬 潤子 委員 (慶応義塾大学 理工学部 准教授) 量子エレクトロニクス

(敬称略、五十音順)

※ 必要に応じ、更に外部有識者の知見を得て検討を行う。

極短パルスレーザーに係る
ロードマップ検討グループ

(主査)

緑川 克美 理化学研究所 光量子工学研究領域 領域長 光源開発

(専門有識者)

石川 顕一 東京大学大学院 工学系研究科 教授 光・物質相互作用
板倉 隆二 量子科学技術研究開発機構 グループリーダー 電子・イオン分光
板谷 治郎 東京大学 物性研究所 准教授 光源開発
岡田 穰治 スペクトロニクス(株) 代表取締役社長 レーザー機器
腰原 伸也 東京工業大学 理工学研究科 教授 強相関電子系
末元 徹 (公財)豊田理化学研究所 フェロー 超高速分光
豊田 晴義 浜松ホトニクス 中央研究所 室長 レーザー・光検出器
菱川 明栄 名古屋大学 物質科学国際研究センター 教授 化学反応
藤 貴夫 自然科学研究機構 分子科学研究所 准教授 光源開発
宮下 哲 科学技術振興機構 研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
山内 薫 東京大学大学院 理学系研究科 教授 化学反応

(リエゾン)

岩井 伸一郎 委員(東北大学大学院 理学研究科 教授) 強相関電子系
(敬称略、五十音順)

※ 必要に応じ、更に外部有識者の知見を得て検討を行う。

次世代レーザー加工に係る
ロードマップ検討グループ

(主査)

安井 公治 三菱電機株式会社
産業メカトロニクス事業部 技師長 レーザー加工

(専門有識者)

尾崎 典雅 大阪大学 工学研究科 准教授 極限環境における物質・物性
小林 洋平 東京大学 物性研究所 准教授 光源開発、加工学理
阪部 周二 京都大学 化学研究所 教授 レーザーと物質との相互作用
塚本 雅裕 大阪大学 接合科学研究所 教授 レーザー加工プロセス研究
錦野 将元 量子科学技術研究開発機構 グループリーダー レーザー励起プラズマ
比田井洋史 千葉大学大学院 工学研究院 教授 レーザー加工、微細加工
宮下 哲 科学技術振興機構 研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー

(リエゾン)

湯本 潤司 委員 (東京大学大学院 理学系研究科 教授) 光物性、量子エレクトロニクス
(敬称略、五十音順)

※ 必要に応じ、更に外部有識者の知見を得て検討を行う。