

デジタル時空間拡張

趣旨

- デジタルツイン※は、従来の設計・運用最適化ツールとしてのみならず、近年ではフィジカルAIやAI for Science等の潮流の下、高精度シミュレーションや仮想実験を可能とする基盤としての重要性を増しており、基礎研究から産業技術まで幅広い領域で競争力を左右する技術となりつつある。
※ 現実世界を仮想空間上で表現し、物理空間との相互接続によって様々な付加価値を提供するシステム
- 一方、仮想と物理間の相互作用を通じた意思決定支援に足るだけの忠実度は、計算が実行可能なスケールでは未だ十分に実現されていない。この根本的かつ共通的な問題は、仮想表現が扱わなければならない空間及び時間スケールの膨大な範囲やその複雑性にある。
- 仮想表現の時空間的拡張等を通じた次世代のデジタルツインの開発及び社会実装に向けた研究開発を推進し、新たな知の創出や科学・産業領域における生産性向上、国土強靱化や持続可能な社会の実現、フロンティア開拓等に貢献する。

達成目標

1 仮想表現の拡張と即応性の向上

- 力学モデルとデータ駆動の融合による現実の記述



- ミクロからマクロを横断する階層の接続・統合による空間スケールの拡張

- 過去から未来を含んだ長期的変化の推定による時間スケールの拡張

デジタルツイン

2 現実世界との相互作用と信頼性の向上

- デジタルツインの社会受容と実装
意思決定支援
AI for Science等

- 現実への介入や探索によるデジタルツインの自己最適化

3 データモデルやインターフェース等の共通化

- 縦割りでの開発のみならず、ドメイン間の接続や将来的な社会需要・技術進展に応じた機能拡張に柔軟に対応可能な基盤を構築



共通規格化の推進

縦串と横串を意識した領域運営



将来像

- 潜在構造のモデリング
- 実社会への介入と定着（視覚的な最適化ツールからの脱却）
- 共通基盤の標準化と次世代の育成

令和8年度戦略目標

1. 目標名

デジタル時空間拡張

2. 概要

現実世界を仮想空間上で表現し、物理空間との相互接続によって様々な付加価値を提供する「デジタルツイン」は、従来の設計・運用最適化ツールとしてのみならず、近年のフィジカルAIやAI for Science等の潮流の下、高精度シミュレーションや仮想実験を可能とする基盤としての重要性を増しており、基礎研究から産業技術までの幅広い領域で競争力を左右する技術となりつつある。一方、仮想と物理間の相互作用を通じた意思決定支援に足るだけの忠実度は未だ十分に実現されておらず、この根本的かつ共通的な問題は、仮想表現が扱わなければならない空間及び時間スケールの膨大な範囲やその複雑性にある。そこで本目標では、仮想表現の時空間的拡張等を通じた次世代のデジタルツインの開発及び社会実装に向けた研究開発を推進する。

3. 趣旨

現実世界をデジタル空間上で表現し、物理空間との相互接続によって様々な付加価値を提供するシステムである「デジタルツイン」は、主に産業・工業分野の設計・運用最適化ツールとして発展してきたが、近年では、「フィジカルAI」や「AI for Science」「AI for Engineering」等の潮流の中で、高精度なマルチスケールシミュレーションや現実では取得困難なデータの大量生成といったAIを支える仮想実験基盤としての役割も拡大しており、デジタルツインの機能もまた、AIとの融合や計算能力向上により飛躍的な進化を遂げつつある。

こうした中、デジタルツインに関連する全世界での学術投稿数や特許出願数は近年急増しており、国際市場においても急速な成長が予想されている。これらの研究開発成果の適用範囲も、ロボットや医療、都市開発や防災・減災、宇宙開発や海洋・地球科学、細胞生物学や材料科学といったあらゆる分野へと波及しており、産業用途から学術用途に至るまで、国家の競争力を支える次世代の基盤技術となることが期待されている。

一方で、物理的ツインからのデータによる動的な更新や、予測能力を通じた現実での意思決定支援といった「仮想と物理の双方向の相互作用」こそがデジタルツインの中核であると見なされているにもかかわらず、現実には多くのシステムが、計算が実行可能なスケールでは未だ主要な現象を十分に解明できず、意思決定の支援に足るだけの忠実度を達成できていない。

デジタルツインの実装・普及に向けた課題は、想定される実装先の需要に照らして様々であるものの、根本的かつ共通的な問題は、仮想表現が扱わなければならない空間及び時間的スケールの膨大な範囲やその複雑性にある。この共通的問題の克服に向けては、デジタル空間での表現やシミュレーションのマルチスケール・マルチモーダル・マルチフィジックス化や、膨大

な計算の効率化・高速化、加えて、仮想から現実への探索・介入と相互のフィードバックによる自己最適化といった既存システムの限界を突破する技術課題への挑戦が必要となる。

そこで本戦略目標では、デジタルツインを我が国の産業競争力の源泉とするとともに、最先端科学研究の基盤として発展させることを目指して、仮想表現の時空間的拡張による次世代のデジタルツインの開発及び社会実装を志向した、目的基礎型の研究開発を戦略的に推進する。

4. 達成目標

本戦略目標では、目的・用途別のデジタルツインの社会実装の加速に向けて、これに必要な仮想表現の拡張と即応性の向上、現実世界への接続と信頼性の向上を目指すとともに、これらの研究開発を通じてドメイン間の接続性と再利用性を高める共通基盤の底上げを目指す。具体的には、以下（1）～（3）の達成を目指す。

（1）仮想表現の拡張と即応性の向上

- 細胞から生体、原子から材料、陸域から海域、住環境から地球環境といったマイクロからマクロを横断する空間階層の連続的な接続・統合による空間スケールの拡張
- 過去から未来を含んだ長期的変化の推定による時間スケールの拡張
- 意味的互換性を確保した上での多様なモデルの組み合わせによる現実の記述
- 膨大な計算の効率化・高速化を通じたリアルタイム・ニアリアルタイムでの表現

等を実現する。

空間スケールや時間スケールの拡張には、用途やスケールに応じた異種のデータやモデル同士の統合に向けた、異なる忠実度のデータやモデルの複数のサブシステムに渡る使用、異なる仮定の調整、複数のソースから得られるマルチモーダルデータを同期させる手法が必要となる。また、多様なモデルの組み合わせには、シミュレーションに係るデータ駆動的手法（十分なデータが存在し、意思決定への支援が主として内挿的領域に収まる場合等）と力学モデル的手法（データが乏しく、外挿的領域で予測を行う必要がある場合等）を、双方の利点が失われずに組み合わせる手法（物理とAIのハイブリッドモデリング）が重要となる。加えて、膨大な計算の効率化・高速化には、複雑なシミュレーションを簡略化し、計算時間を短縮する手法（サロゲートモデリング等）が必要となる。これらの手法や技術を獲得する上で、現実世界をデジタル空間にどのように表現するかといった対象表現の手法自体の革新がもたらされることも期待される。

（2）現実世界との相互作用と信頼性の向上

- 物理空間と仮想空間における相互のフィードバック
- 現実への介入や探索によるデジタルツインの自己最適化
- 透明性の確保やリスク判定を通じたデジタルツインの社会受容

等を実現する。

仮想と物理の相互作用を実現するにあたり、特に、人手介入や高頻度計測が困難な極端環境（エッジコンピューティング条件下、宇宙・海洋、原子力施設、複合災害環境、生体内や微細環境等）や、明確な支配方程式やルールで記述できない不確実性・非定常性・人間要因が混在する現実世界との接続には多くの課題が存在する。物理から仮想へのフィードバックでは、意思決定に活用可能な時間スケールでの較正・更新に対応する逆問題手法やデータ同化に基礎的ギャップがあり、シミュレーションで学習・訓練したモデルの現実世界への適用（Sim2Real 転移）に必要なシミュレーションデータ量や収集頻度の判断に加え、解像度やサンプル不足を考慮したデータ取得及び予測・出力手法の最適化が求められる。仮想から物理へのフィードバックでは、予測結果やその不確実性にに基づき、限られた計測手段や時間の下での観測対象・観測頻度の最適化が必要となる。これら双方向の伝達が適切に循環し、自己最適化に至るためには、特に、仮想から物理への指示が真に情報量や推定精度の向上に寄与したかを評価する学習ループの構築が重要となる。加えて、デジタルツインの社会受容に向けては、デジタルツインを構成する複数の動的システムのリスクを横断的に集約して不確実性を定量化する手法や、無意味な外れ値を無視しつつ重要な稀な事象を正確に表現する損失関数や性能指標、デジタルツイン自体を財産と見なしたセキュリティ対策等も必要となる。

(3) データモデルやインターフェース等の共通化

(1) 及び (2) に掲げる要素は、様々な利用環境（ドメイン）におけるデジタルツインの社会実装に向けた研究開発の過程で取り組まれることを想定した共通基盤的な目標である。これらの共通基盤的目標への取組にあたっては、ドメインごとの縦割りでの開発にとどまらず、データの様式や時間・空間表現を含むデータモデルやインターフェース・プロトコルの共通規格化を通じたツール群やモジュール群の共有化を進めることで、ドメイン間の接続や将来的な社会需要や技術進展に応じた機能拡張に柔軟に対応可能な基盤を構築する。これにより、多様なドメインにおける研究開発および社会実装を我が国全体として加速し、新規参入の促進や国際的なデファクトスタンダードをはじめ、多様な形態での標準の形成につなげることを目指す。

5. 見据えるべき将来の社会像

4. 「達成目標」の実現を通じ、以下 (1) ～ (3) といった様々な分野における科学的・社会的インパクトがもたらされることが期待される。

(1) 潜在構造のモデリング

拡張されたデジタル時空間を基盤とし、これまで認識されていない事象間の隠された因果的構造や背景要因を発掘可能とする。視覚的・表層的事象のモデル化のみならず、人間には知覚・単純化困難な複雑事象（いわゆる「汚い世界」）を再現することで、デジタルツインの性能を抜本的に高めるとともに、新たな知の創出に向けたコア技術とする。

(2) 実社会への介入と定着

未だ「視覚的な最適化ツール」のイメージが拭えないデジタルツインについて、現実への介入を通じた自己最適化や、社会受容に向けたラストマイルを埋める技術を得ることで真の意味での社会実装と定着を加速し、都市管理や防災・減災に資する国土強靱化や、健康医療や環境保全を通じた持続可能な社会の実現、ライフ・マテリアル・エネルギー・ロボット等の科学及び産業領域における生産性向上、宇宙開発・海洋利用等のフロンティア開拓等に貢献する。

(3) 共通基盤の標準化と次世代の育成

マルチスケール・マルチモーダル統合技術やメタデータの表現手法、巨大なマルチシミュレーションデータについて、意味的互換性を保証しつつ扱うための仕様・フォーマットや、モデル更新・AI アルゴリズムの進化を受容可能な設計の開発といった「地味だが良い仕事」を共通基盤的に推進し、これらの標準化を通じた持続的な競争力の確保や国際プレゼンスの向上、次世代の育成と新規参入の加速を実現する。

6. 参考

6-1. 国内外の研究動向

気候・海洋・社会経済など複数スケールを統合する国際プロジェクトが活発化している。我が国でも都市政策や災害対応といった課題解決型の社会実装研究が進められており、製造業や医療等の分野では民間での技術開発や商用化が進んでいる。

(国内の動向)

国内では、例えば、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第3期における複数の課題の中で、それぞれ、医療や防災、インフラ管理に係るデジタルツインの開発や、サイバー空間とフィジカル空間を接続するインターバースに注力した取組が進捗している。また、国土交通省が主導する日本全国の3D都市モデルの整備・オープンデータ化プロジェクトである「PLATEAU」が2020年から進められているほか、海洋研究開発機構（JAMSTEC）や宇宙航空研究開発機構（JAXA）からは、海洋/地球デジタルツイン、宇宙デジタルツインといったコンセプトが提示されている。戦略的創造研究推進事業においては、ライフサイエンスやマテリアルといった分野毎の領域内の一部の課題として、シミュレーションの高度化やデジタルツインの構築といった取組が進められてきた。本目標に関連する技術開発は、社会実装に近い一部の領域を除き、分野別に閉じた取組として進められてきており、広範な分野の共通課題である時空間スケールの拡張や先端AIとの融合自体に重点を置いた横断的取組や、「AI for Science」等の新たな潮流への対応に必要となる基盤的研究開発といった基礎研究への立ち返りを志向した戦略的な施策はほとんど展開されていない。

（国外の動向）

欧州では Horizon Europe を主軸とした数々のプロジェクトが進められており、Destination Earth（地球デジタルツインの構築を目指す大規模イニシアティブ）や、European DTO（複数プロジェクトの統合により構成・発展される海洋デジタルツイン基盤）、DTRIP4H（健康・医療研究インフラ向けの分散型デジタルツインシステムの開発と AI・連合学習等との統合）、DT-GEO（地震・火山噴火・津波等の地球物理的極端現象のデジタルツイン開発）、interTwin（学際的デジタルツイン基盤エンジン開発）等に見られるように、多用途・複数ドメインで利用可能な共通デジタルツインインフラの構築を強かに推進している。

米国では、米国商務省による CHIPS for America プログラムの一部として、デジタルツイン技術にフォーカスした半導体製造研究所が立ち上げ予定であるほか、基礎研究領域においては、例えば、アメリカ国立科学財団（NSF）による MATH-DT（デジタルツインに関する基礎的な数学的・統計的研究）や、FDT-BioTech（生物医学の革新を触媒するデジタルツイン基盤の開発）等での支援が予定されている。他にも、アメリカ航空宇宙局（NASA）による Earth System Digital Twin の開発や、米国コモンウェルス・フュージョン・システムズ（CFS）社による核融合研究用の AI 融合型デジタルツインの開発など、産学官における研究開発が盛んに行われている。

6-2. 検討の経緯

「戦略目標の策定の指針」（令和元年7月科学技術・学術審議会基礎研究振興部会決定）に基づき、以下のとおり検討を行った。

1. 我が国あるいは世界の基礎研究を始めとした研究動向について、科学計量学的手法を用いた論文分析や特許出願数や市場動向の分析、科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）の有する知見、JST の有する過去の研究領域の評価結果等の知見を収集し、研究動向を俯瞰した。
2. 他の施策の実施状況等にも勘案しつつ、上記情報収集の結果及び国内外の有識者等へのヒアリング並びに各国の政策動向を参考に分析を進めた結果、フィジカル AI や AI for Science 等の潮流において、仮想表現のマルチスケール・マルチモーダル・マルチフィジックス化やハイパフォーマンス・コンピューティング（HPC）等を駆使したシミュレーションと AI との融合研究が重要であるとの認識を得て、「デジタル時空間拡張」を注目すべき研究動向として特定した。
3. 令和7年12月に、文部科学省と JST は共催で、注目すべき研究動向「デジタル時空間拡張」に関係する産学の有識者が一堂に会するワークショップを開催し、我が国の研究者層や巻き込むべき研究分野、目標として目指すべき姿や戦略等について議論を行い、ワークショ

ップにおける議論や更なる政府内での検討を踏まえ、本戦略目標を作成した。

6-3. 閣議決定文書等における関係記載

「第6期科学技術・イノベーション基本計画」（令和3年3月26日閣議決定）

第2章 1. (1) (b)

- ・ Society 5.0 の実現に向け、サイバー空間とフィジカル空間を融合し、新たな価値を創出することが可能となるよう、質の高い多種多様なデータによるデジタルツインをサイバー空間に構築し、それを基に AI を積極的に用いながらフィジカル空間を変化させ、その結果をサイバー空間へ再現するという、常に変化し続けるダイナミックな好循環を生み出す社会へと変革することを目指す。

「デジタル社会の実現に向けた重点計画」（令和7年6月13日閣議決定）

第1 4. (2)

- ・ 産官学による将来予測、デジタルツイン、AI 活用等の技術研究開発を促進し、未来に向けた構想を推進していくとともに、官民の各分野における災害対応業務の高度化・効率化を図っていくため、デジタル技術の積極的導入に取り組む。併せて、我が国の優れた防災 DX 技術・産業の海外展開を推進する。

「宇宙基本計画」（令和5年6月13日閣議決定）

2. (2) ii (b)

- ・ 小型衛星コンステレーションの構築の進展や新たなセンサの開発等により、地球観測衛星の時間・空間・波長分解能が高まると同時に、ビッグデータ処理及び人工知能といったソリューション技術が発展する中、地球観測衛星のデータとドローンのデータ、IoT データ、気象データ、海洋データ、その他の地上で得られるデータ等を組み合わせることにより、幅広いアプリケーション・サービスを実現し、防災・減災、国土強靱化及び地球規模課題への貢献や民間市場分野におけるイノベーションの創出を図っていく。

「海洋基本計画」（令和5年4月28日閣議決定）

第1部 3-3. (3)

- ・ DX を課題解決につなげるとの観点から、様々な気候変動対策の実効性、海洋由来の自然災害に対する防災・減災の政策の有効性、持続可能な利用に資する水産資源政策の効果等の適切な評価に活用する。そのため、海洋のデジタルツインの構築を念頭に、観測データの解析技術並びに海洋環境、気候変動及び地震予測等に関するシミュレーション技術の高度化に取り組む。

「マテリアル革新力強化戦略」（令和7年6月4日閣議決定）

4. (2)

- ・「マテリアル革新力強化戦略」に沿って進めてきたマテリアル DX を更に発展させる。この際、AI をはじめとする DX 技術の進展は目覚ましく、新たな手法に絶えず対応すること、また今後は、研究・製造において、AI、ロボティクス、量子コンピュータ等の活用を前提とした発想の転換が不可欠であることに留意しつつ、以下を推進する。

(略)

上質なシミュレーションデータの創出と活用

- ・ 第一原理計算からのマルチスケールシミュレーション技術を高度化させるとともに、AI とシミュレーションの融合を更に推進し、シミュレーションにより物性を正確に予測するシステムの構築。

「健康・医療戦略」(令和7年2月18日閣議決定)

2. 3-4 創薬・医療機器創出エコシステムの構築、イノベーション人材力の強化

- ・ 創薬や医療機器創出のイノベーションにおいて、データの利活用、DX は重要な要素である。AI 創薬・ゲノム創薬、SaMD の開発で必要となる、医療情報の基盤構築・利活用促進や、データ処理能力・品質の向上、AI・DX・RWD を活用した異分野融合による創薬・医療機器創出の環境整備、社会実装を推進する。

7. その他

(1) 国内外の関連施策・学会等との連携への期待・可能性

本目標において行われる研究開発に必要な計算資源については、文部科学省において「革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ(HPCI)」を通じた計算資源への円滑なアクセスと利用に向けた方策を検討し、JST による公募開始までにその方向性を示すこととする。

また、デジタルツインに係る国内の研究者層に限られている中であって、本目標の成果は科学基盤モデルの構築や自動実験等といった AI for Science の取組やスマートシティをはじめとする Society 5.0 に係る取組との関連が深いことから、これらにまつわる政府の関連施策との連携による分野横断的なコミュニティの形成・拡大や、国内外の関連学会等での積極的な広報や成果の普及が図られることを期待する。

(2) 期待される研究開発の戦略及び JST の領域設定にあたっての留意事項

本目標での各研究課題の推進にあっては、目的型基礎研究としての社会実装・出口志向が重要となる。特に「CREST」においては、デジタルツインの構築や関連要素技術の研究開発それ自体が自己目的化することのないよう、社会実装に向けた解像度の高さ(例えば用途に応じた出口戦略や性能・精度・実装効果等の達成目標の設定)を重視するとともに、ユースケースに応じたステークホルダーの意見や評価が段階的に組み込まれていく形での研究開発が

行われることが望ましい。こうした取組を通じた社会実装に向けた課題の見極めがなされた上で、従来型の取組の単純延長線上にはない、先端 AI と計算科学の融合や目的や課題に応じた異分野連携による革新的なアプローチを積極的に取り入れていくことが期待される。

「さきがけ」においては、デジタルツインの社会実装や高度化に向けた革新的アイデアや最先端の研究動向を踏まえた個別課題（数理学や計算科学、情報科学やデータ科学等における新たな手法の提案や適用研究等）が幅広く推進されることが期待される。

領域全体では、データモデルやインターフェース・プロトコルの共通規格化を通じたツール群やモジュール群の共有化等による共通基盤の構築と底上げが求められる。これにはドメイン志向の縦串と共通基盤志向の横串との連携を促す領域設計と運用が重要であり、例えば「CREST」において、各ドメインでの社会実装を志向した研究課題に取り組みつつも、標準化に向けて、領域内での分野横断的な体系化や共通化の取組にも積極的に協力・尽力することを前提とするような申請を促す工夫や、「CREST」課題で見出された新たなボトルネックへの「さきがけ」課題の突合、又は「さきがけ」課題同士の連携等による段階的かつ新たなチーム編成といった柔軟な領域運営が期待される。