

調査報告書

デジタルツインに関する国内外の 研究開発動向

エグゼクティブサマリー

デジタルツインとは、高度な計測・観測により収集されたデータを基に、大規模データ処理と現象のモデリングを通じて、フィジカル空間内の現象や人工物をサイバー空間内で仮想的に再現・複製するシミュレーション技術である。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（JST-CRDS）は2018年に戦略プロポーザル「革新的デジタルツイン ～ものづくりの未来を担う複合現象モデリングとその先進設計・製造基盤技術確立～」(2018年3月)を発刊したが、当時と比べて現在はデジタルツインという用語を目にする機会は格段に増加した。製品・サービスとしての利用も見られるようになり、特に製造業におけるデジタルツインの活用はもっとも大きな潮流の一つである。さらに産業や社会のデジタルトランスフォーメーション(DX化)が一層進む中、デジタルツインの活用範囲は製造分野のみならずエネルギー、都市、気象などに拡大しつつある。

こうした状況変化を受け、JST-CRDSではデジタルツインを取り巻く最新動向の調査を行った。具体的には日本および主要国を対象として、各国の関連政策動向および研究開発プログラム・プロジェクトの事例収集を中心とした研究開発動向調査を行った。研究開発動向は主として大学や公的研究機関に関わるものに焦点を当てた。分野は「製造分野」、「エネルギー・都市分野」、「気象・気候分野」を対象とした。

デジタルツイン関連の研究は、工学分野や計算科学分野を中心として、過去5年で急増(研究論文数で約30倍)している。米国、ドイツ、英国、中国などでの研究開発が活発であり、各国で大学、公的研究機関、民間企業が連携した研究プロジェクトが推進されている。

製造分野では、製造プロセスの効率化や産業競争力強化や製造業のDX化に向け研究開発が行われている。その中でデジタルツインはスマートマニュファクチャリングを推進する中核的な技術と位置付けられている。相互運用性の実現が課題となっており、製造プロセスのモデリングに資する研究開発や共通プラットフォーム構築・標準化に各国が注力している。

エネルギー・都市分野では、デジタルツインは都市計画のためのシナリオ構築をサポートする技術と位置付けられている。建築物のデジタルツインやエネルギーマネジメント・モビリティマネジメントのためのデジタルツイン構築に向け、都市システムの構成要素のモデリングに資する研究開発が推進されている。

気象・気候分野では、全球規模の高解像度デジタルツイン構築を目指した研究開発が精力的に進められている。現在は自然災害、気候変動、海洋、生態系等の個別テーマごとのモデリングに注力しているが、将来的にはそれらを共通のプラットフォーム上で統合させる方向で研究開発が進められている。

複雑な現象のモデル化、そしてその検証やデジタルツインから得られた洞察をフィジカル空間へフィードバックすることはデジタルツインの根幹である。今回の調査ではこれらに資する技術領域の研究開発が各国で推進され、3分野に共通してモデリングに注力されていることが明らかとなった。また、個別の分野を横断する共通基盤としては、中長期的な時間軸でプラットフォーム構築、AIの活用、セキュリティの確保などに係る研究開発が推進されている。

以上を踏まえて本調査ではデジタルツイン構築・活用のフェーズを①(デジタルツイン構築に向けた)デジタル化、②局所的デジタルツイン、③包括的デジタルツイン、④自律的デジタルツインの4段階に整理した。包括的・自律的なデジタルツイン開発が目指すべき方向性であり、米国のCESMIIやドイツのBasysやTeDZ等の製造分野のプロジェクトがデジタルツインの研究開発を牽引している。また欧米ではCPS(サイバーフィジカルシステム)技術を基盤技術として位置付け、NSFやHorizon 2020等において長期的なファンディングプログラムが形成されている。デジタルツインはその重要構成要素の1つであるものの、より大きなビジョン

を持ち推進している。

各国の推進体制を見ると、政府や公的研究機関がデジタルツインの実現に向けた研究戦略など目指すべき方向性を示し、それに基づき研究費配分機関が基盤研究から技術開発までの包括的な支援を実施していた。またその上で公的研究機関が実現に向けたコーディネーター的役割を果たすという形も見られた。我が国ではデジタルツインおよびCPS技術はSociety5.0の実現に資する中心的な技術と位置付けられている。その推進にあたって本調査を通じて見えてきた各国・各分野の取り組みは参考になる。関連するステークホルダーを巻き込んで研究開発エコシステムを構築し、我が国としてのデジタルツイン研究開発を強力に推進していくことが望まれる。

目次

1	背景と目的	1
2	調査方法	3
2.1	対象分野・技術領域	3
2.2	対象国	4
2.3	具体的な調査方法	4
3	海外の政策・研究動向	5
3.1	論文から見るデジタルツインに関する研究動向	5
3.2	各国の政策概要と主要な研究プロジェクト	8
3.2.1	EU（欧州連合）	8
3.2.2	ドイツ	13
3.2.3	英国	15
3.2.4	米国	19
3.2.5	中国	21
4	国内の政策・研究動向	24
4.1	政策概要およびこれまでの取り組み	24
4.2	分野別の研究開発動向	25
5	分野別の研究動向と注力技術領域	28
5.1	製造分野	28
5.2	エネルギー・都市分野	29
5.3	気象・気候分野	31
5.4	分野別注力技術領域のまとめ	32
5.5	共通基盤に関する技術領域	34

6	まとめ	37
6.1	デジタルツイン構築・活用のフェーズ	37
6.2	今後の研究開発に向けて	39
付録	海外・国内の研究開発拠点の取り組みやプロジェクトの事例	41
1.	日本	41
2.	欧州	44
3.	ドイツ	48
4.	英国	50
5.	欧州その他の国（オランダ、デンマーク、スウェーデン）	54
6.	米国	55
7.	中国	59
8.	シンガポール	61
9.	豪州	62
10.	アフリカ	63

1 | 背景と目的

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（JST-CRDS）では国内外の科学技術イノベーションに関する動向を俯瞰的に調査、分析する活動を行っている。またその俯瞰活動を基にして、国として取り組むべき重要な研究開発課題を抽出し、戦略プロポーザル等として取りまとめ、関連府省に提案している。この一環としてJST-CRDSでは、日本の産業競争力の中長期的な維持・強化、Society 5.0の実現、カーボンニュートラル社会の実現等に資する中核的な基盤技術としてデジタルツインを取り上げ、2018年3月に戦略プロポーザル「革新的デジタルツイン～ものづくりの未来を担う複合現象モデリングとその先進設計・製造基盤技術確立～」¹をとりまとめ発刊した。

デジタルツインは、サイバーフィジカルシステム（CPS：Cyber Physical System）の一つの形態であり、高度な計測・観測により現実世界の中から収集されたデジタルデータを基に物理的な製品やサービスをサイバー空間上で仮想的に複製し、将来起こり得る様々な事象を予測可能にするシミュレーション技術である。この戦略プロポーザルでは、デジタルツインの根幹は、製造、材料、構造・強度、機械、燃焼、伝熱、流体、振動、化学、電気などの技術分野を横断する複合現象モデルの開発と検証であり、それゆえ複合現象の解明を進め、モデルへ組み込み、更にそのモデルの統合化を進めていくことがデジタルツインに関する研究開発の今後の重要な方向性の一つであると提言した（図1-1）。

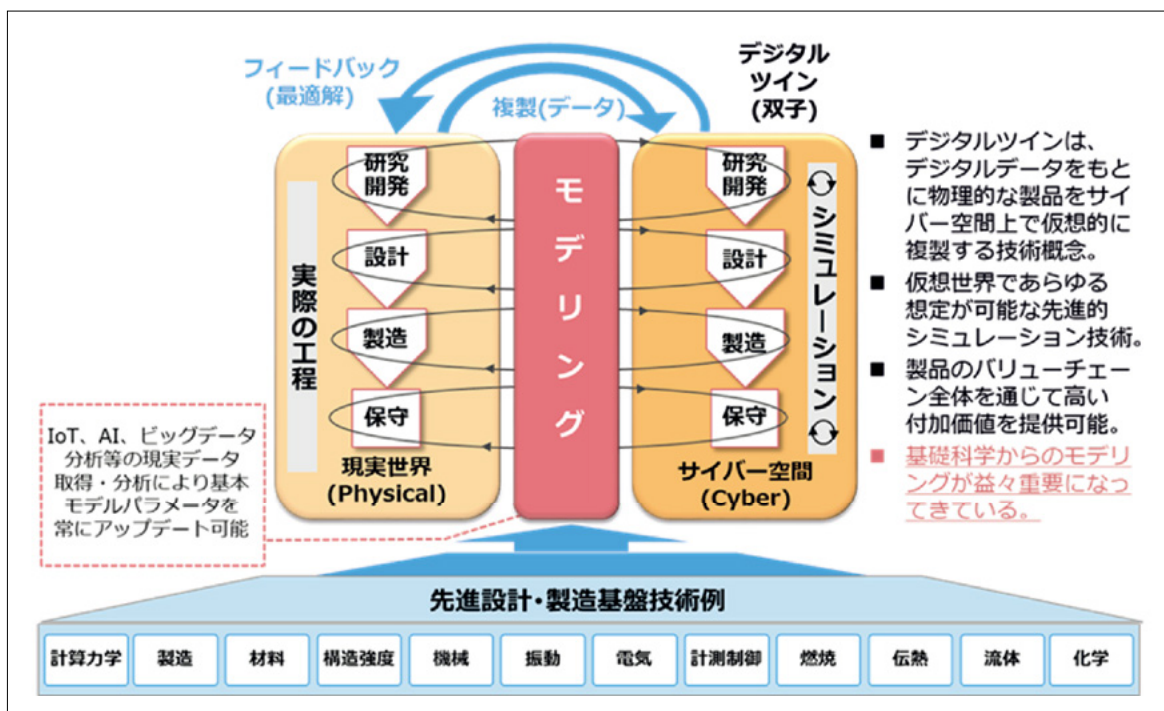


図1-1 デジタルツインとは
(戦略プロポーザル「革新的デジタルツイン」より)

1 科学技術振興機構研究開発戦略センター「戦略プロポーザル 革新的デジタルツイン ～ものづくりの未来を担う複合現象モデリングとその先進設計・製造基盤技術確立～」(CRDS-FY2017-SP-01)(2018年3月)

戦略プロポーザル発刊から約3年が経過し、デジタルツインは産業界でさらなる拡がりを見せている。その背景には産業および社会のデジタルトランスフォーメーション（DX化）の機運の高まりがある。特に製造業におけるデジタルツインの活用はもっとも大きな潮流の一つである。製造業のみならず、都市、モビリティ、エネルギー、気象、健康、教育など、デジタルツインの対象領域は拡大している（図1-2）。

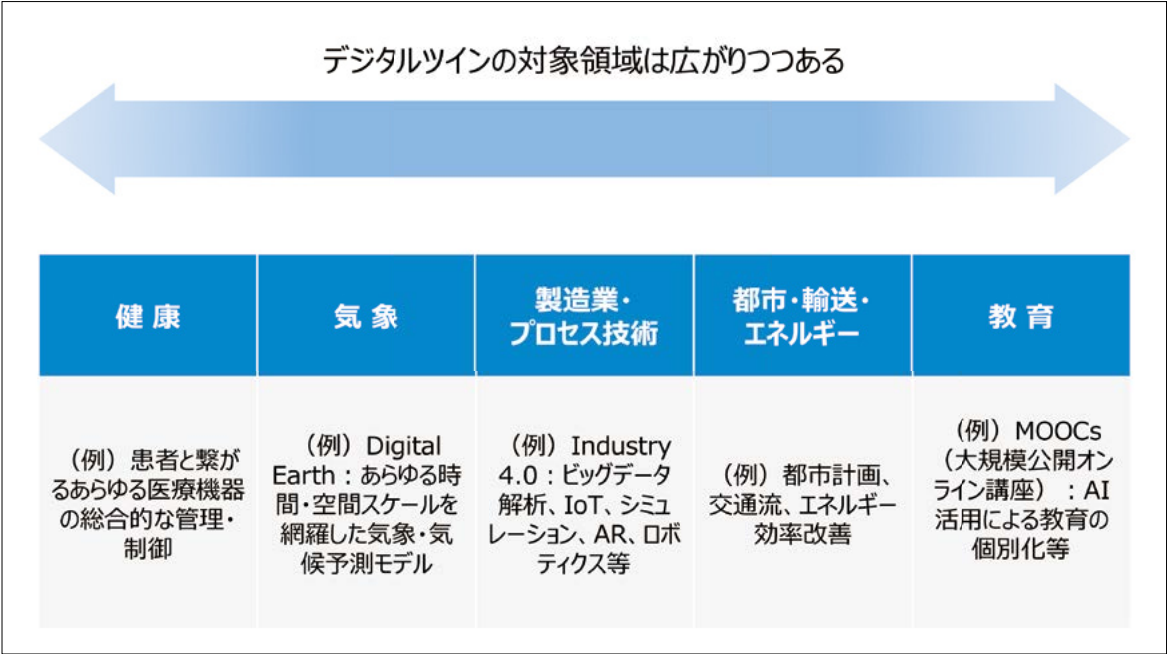


図1-2 デジタルツインの対象領域²

デジタルツインをテーマに掲げた研究プロジェクトも増えており、関連する研究拠点の設立や関連学会誌での特集など、大学や公的研究機関においてもデジタルツインを掲げた取り組みが活発化している。しかしながらこれらの多くは産業界主導の動きであり、大学や公的研究機関の動きは必ずしもまとまった形で整理されておらず、見えにくい状況にある。現在のデジタルツインが抱える中長期的観点からの科学技術上の課題や将来の技術トレンドを把握するためには、大学や公的研究機関、研究費配分機関における研究開発動向を把握することが必要である。

以上の背景を踏まえて、JST-CRDSではデジタルツインに関連する国内外の政策動向、および大学や公的研究機関、研究費配分機関における研究開発動向の把握を目的とした調査を実施することとした。

2 Adil Rasheed et. al, IEEE Access, Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective, 2020 を基にJST-CRDSが図作成

2 | 調査方法

2.1 対象分野・技術領域

最近のデジタルツインに関する動向は製造業に留まらず自然現象（気象、地震など）や社会生活（スマート社会、人や車の移動など）等にまで対象範囲を広げている¹。そこで本調査では比較的動きが活発で環境・エネルギー分野に関連が深い3分野を対象とした（表2-1-1）。また、技術領域として以下の7領域を設定した。

表2-1-1 対象分野・技術領域

分野	(A) 製造分野 (B) エネルギー・都市分野 (C) 気象・気候分野
技術領域	・データ収集（センシング、データ基盤の構築を含む） ・モデリング（データ分析、予測、シミュレーションを含む） ・システム自動化（ソリューション、デジタルツイン自体の運用の自動化） ・インターフェース（人間と機械の相互作用を含む） ・セキュリティ ・プラットフォーム（標準化に向けた動きを含む） ・計算機インフラ

本調査では「デジタルツイン」を対象とし、より広範囲な概念であるCPS技術に関してはデジタルツインとの関連が明らかであるものを中心に可能な範囲で調査対象に含める方針とした。

1 藤井 孝藏, 計算工学の視点でみる「ものづくり」デジタルツイン構築への道, 計算工学, 2021, Vol.26, No.2

2.2 対象国

調査対象国は、主に日本、EU、ドイツ、英国、米国、中国とした。欧州各国に関してはEU全体の研究開発プログラムとの関連性も含めて調査した。

2.3 具体的な調査方法

①代表的なプロジェクトの調査

各国の代表的なプロジェクト・研究開発拠点をとり上げ、プロジェクトのスキーム（大学・公的研究機関、産業界、研究資金配分機関の役割を含む）とキーテクノロジー、今後の課題について取りまとめた。また、調査対象分野毎に、各プロジェクト・研究開発拠点の関連性や調査対象分野に共通する課題について調査した。

②各国が注力する技術領域の調査

①を基に、デジタルツインの高度化や実装化、産業競争力強化に向けて、各国の大学や公的研究機関はどのような分野・技術領域に注力しているかを分析した。その上で注力する技術領域を、分野（製造分野、都市・エネルギー分野、気象・気候分野）と共通基盤に分け、更に短期的（～5年程度）と中長期的（10年程度）に分けて整理した。

③今後の研究開発の方向性

①②を踏まえ、デジタルツインそのもの、またはデジタルツインを用いた国際的な研究開発競争の中で、デジタルツイン研究分野の発展や社会実装に向けた課題を取りまとめた。また、政府やファンディング機関等の果たす役割についても調査し、今後の研究開発の方向性について取りまとめた。

3 | 海外の政策・研究動向

3.1 論文から見るデジタルツインに関する研究動向

図3-1にデジタルツインに関する論文数の動向を示す。デジタルツインに言及する論文数が2017年以降、急増しており、研究課題としてもデジタルツインの重要性が増していることが明らかであった（図3-1-1左）。またその内訳を研究分野別で見ると（図3-1-1右）、工学、計算科学を中心とし、材料科学、オペレーションズ・リサーチ、化学、通信などの分野で研究が実施されていることが分かった。国別では、中国、米国、ドイツ、英国が上位を占め、日本は16位だった。中国やドイツではオートメーション制御システム分野での取り組みが特徴的と思われた（図3-1-2）。

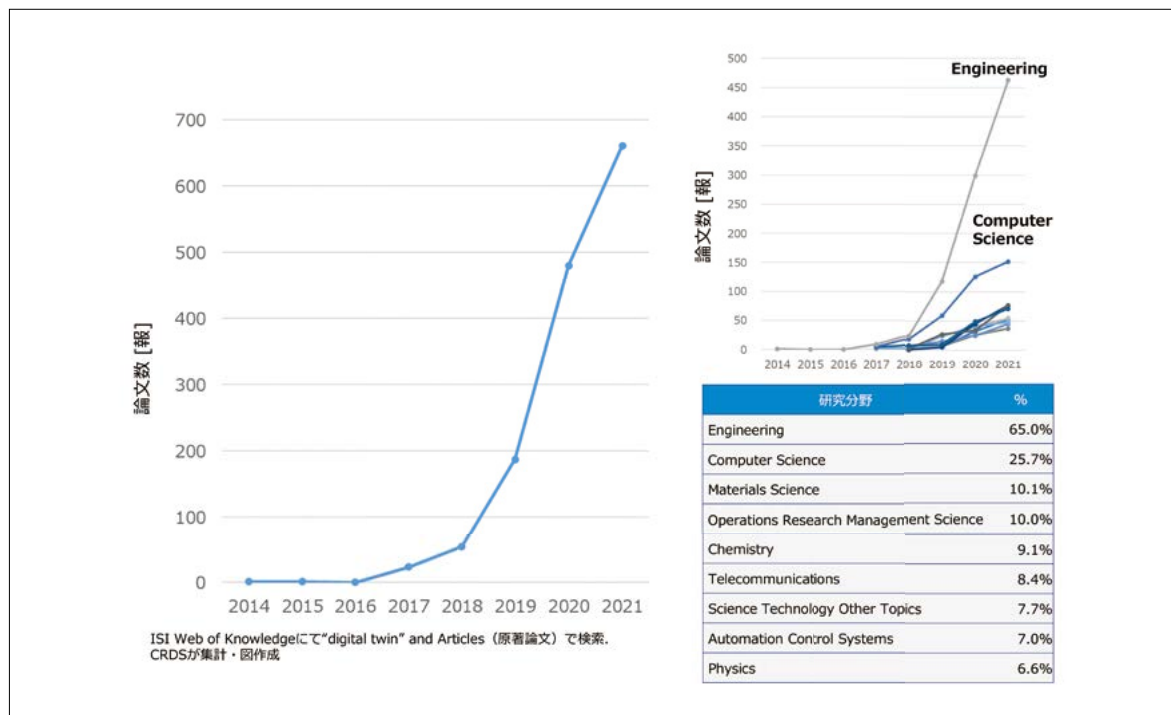


図3-1-1 デジタルツインに関する論文動向

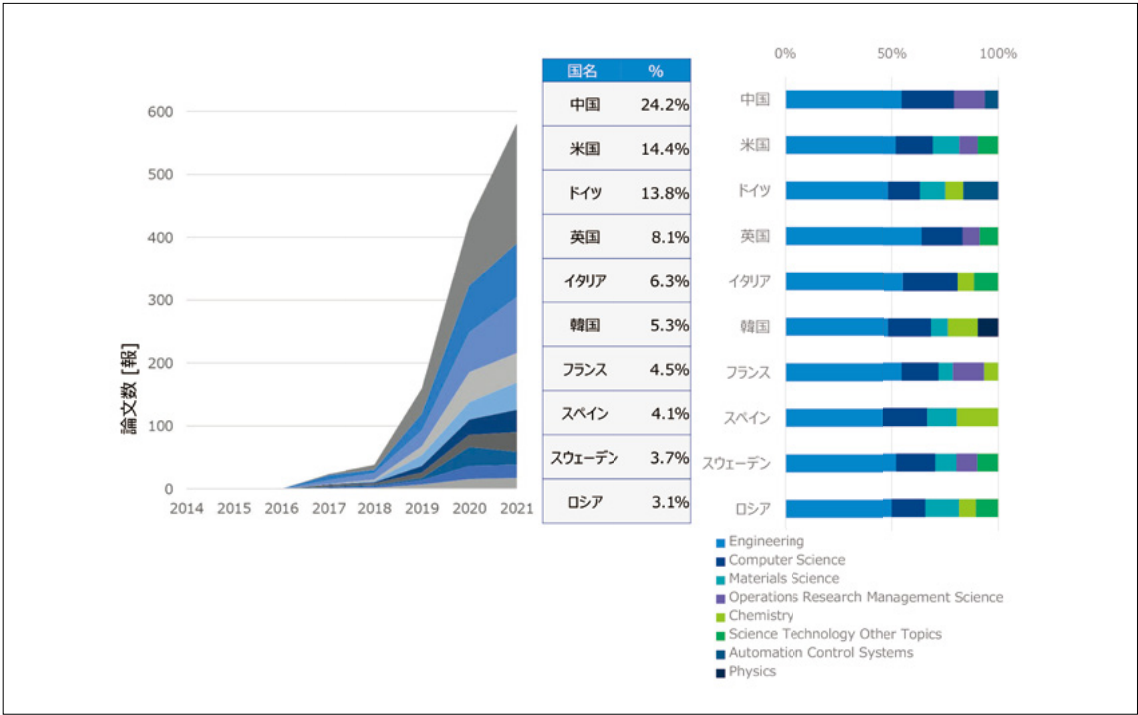


図3-1-2 デジタルツインに関する国別論文数と国別の研究分野内訳

3

海外の政策・研究動向

これらの論文の主な助成金提供機関を図3-1-3に示す。欧州では欧州委員会（EC）および欧州委員会の下部組織である共同研究センター（JRC）からの研究費が主である。ドイツではドイツ研究振興協会（DFG：German Research Foundation）や連邦教育・研究省（BMBF：Federal Ministry of Education Research）、英国ではUK Research Innovation（UKRI）や工学・物理科学研究評議会（EPSRC：Engineering Physical Sciences Research Council）から研究費が配分されている。米国ではアメリカ国立科学財団（NSF：National Science Foundation）やエネルギー省（DOE：Department of Energy）からの研究費配分が多い。中国では中国国家自然科学基金委員会（NSFC：National Natural Science Foundation of China）を始め、複数の研究費配分機関やプログラムが設けられていることが分かる。

また論文動向から主要な研究機関の抽出を試み、主な研究機関と研究費配分機関を図3-1-4にまとめた。

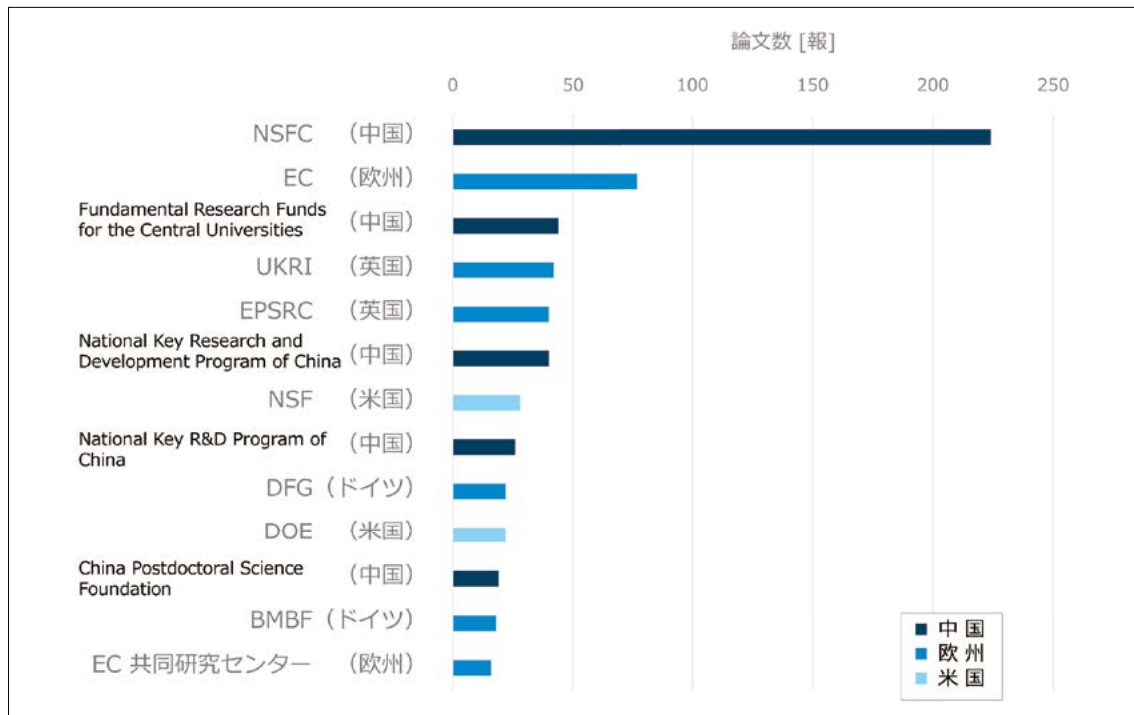


図3-1-3 助成金提供機関別のデジタルツイン関連論文数

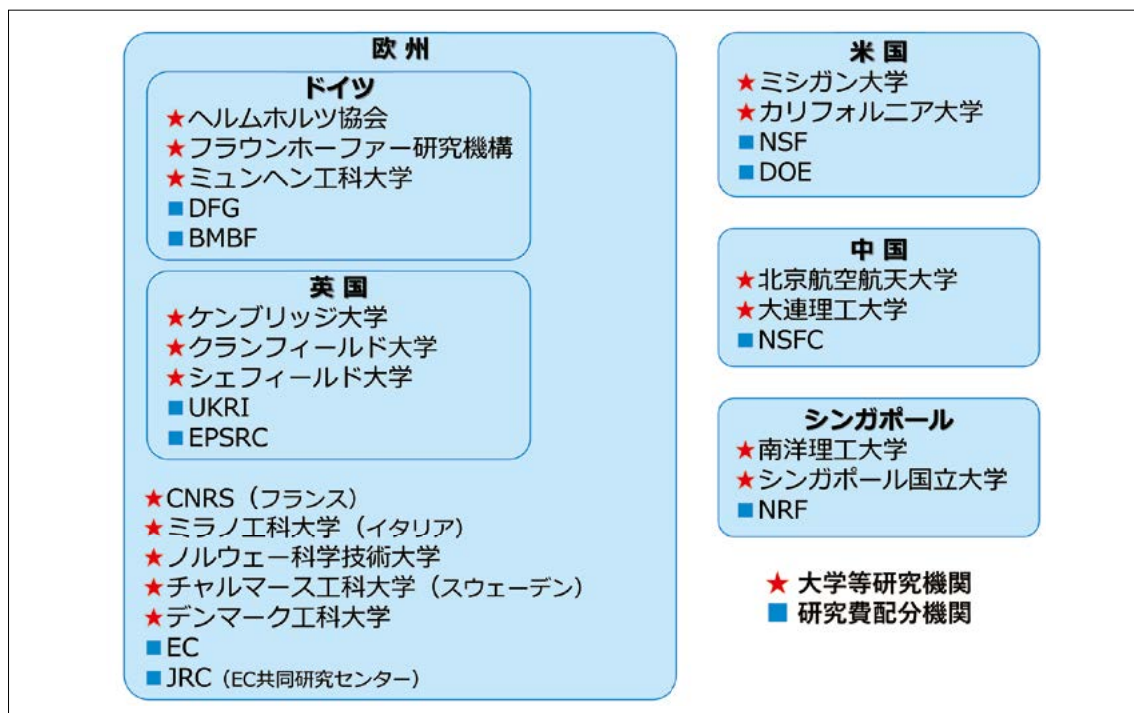


図3-1-4 論文動向から見るデジタルツイン関連の主な研究機関と研究費配分機関

3.2 各国の政策概要と主要な研究プロジェクト

3.2.1 EU（欧州連合）

EUでは、デジタル・イノベーションと産業界全体の競争力強化を目的とした枠組みとして、2016年4月に欧州委員会（European Commission）から「欧州の産業デジタル化イニシアチブ（Digitising European Industry Initiative）」¹が発表された。1）製品、2）プロセス、3）ビジネスモデルにおけるデジタル化を推進し、IoTの推進や生産性・資源効率、さらには収益性を向上させることが目的である。欧州全域にデジタル・イノベーション・ハブ（DIH：Digital Innovation Hubs）を整備することが示されている。欧州のあらゆる産業が最新技術にアクセスできるようになり、セクターを超えたボトムアップのイノベーションを促進させることが目的である。EUでは、研究・イノベーション枠組みプログラムとして、2014～2020年までの7年間を対象とする第8次フレームワークプログラム（FP：Framework Program）であるHorizon 2020が実施されているが、そのHorizon 2020からDIHには約5億ユーロが投資されている。

Horizon 2020によるDIHの整備は3フェーズに分けて推進されている（図3-2-1）。フェーズ1で機能的なエコシステムを構築し、フェーズ2でエコシステムを欧州規模に成長させ、フェーズ3で汎欧州的なネットワークとして拡大させている。

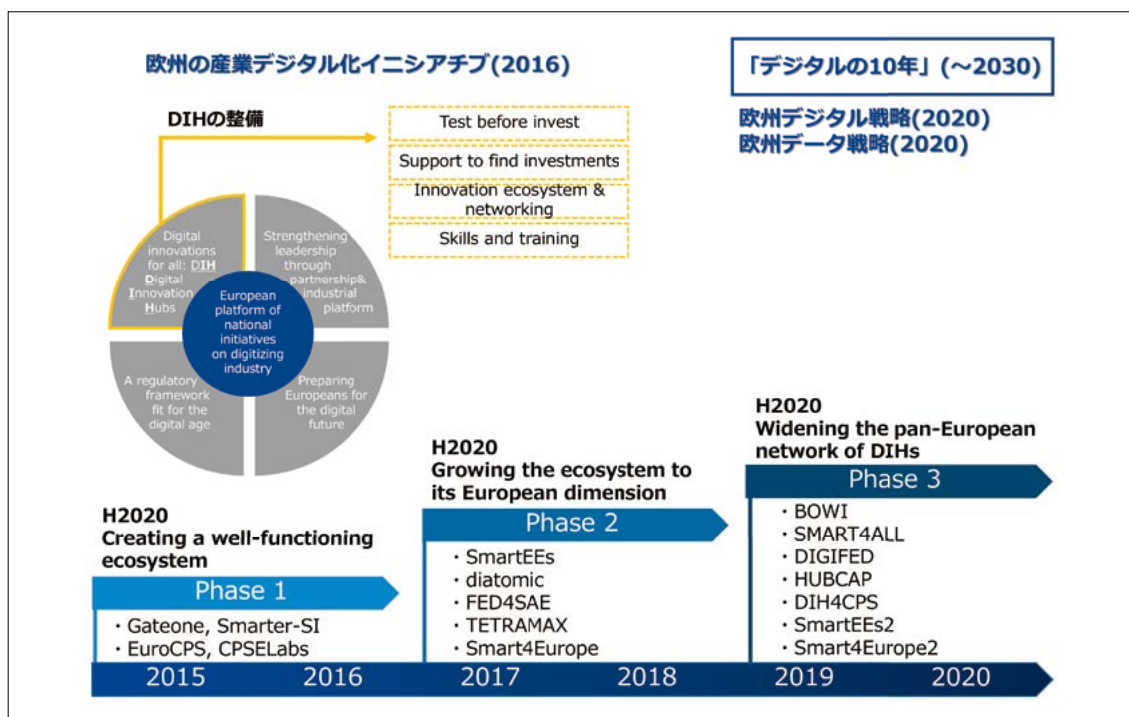


図3-2-1 欧州のデジタル化戦略と Horizon 2020 による DIH の整備

1 European Commission, “Digitising European Industry Reaping the full benefits of a Digital Single Market”, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52016DC0180&from=EN>（2022年1月31日アクセス）

2019年12月に発足した欧州委員会の現体制では、2019～2024年の5年間で取り組む優先事項として、「欧州グリーン・ディール」、「欧州市民のための経済」、「デジタル時代に適合した欧州」、「欧州の生活様式の保護」、「世界におけるより強い欧州」、「欧州の民主主義のさらなる推進」の6つを示している。6つの優先事項の中で特に重要視されているのが気候変動対策とデジタル化である。

気候変動対策については、2019年12月に「欧州グリーン・ディール」を発表し、2050年までの気候中立を目標とし、気候変動対策と経済成長の実現を目指している。

デジタル化については、2020年2月に「欧州デジタル戦略²」と「欧州データ戦略³」を発表した。「欧州デジタル戦略」は、欧州の人々がデジタルトランスフォーメーション（DX）による恩恵を受けられるよう、今後5年間に注力する3つの柱（人々の役に立つ技術、公平かつ競争力のあるデジタル経済、民主的かつ持続可能で開かれた社会）と主要施策を示したものである。2つめの柱で、欧州データ戦略を位置付けるとともに、クリーン・サーキュラー・デジタル・SMEs（中小企業, Small and Medium Enterprises）を含んだ競争力ある産業への転換を目指した産業戦略パッケージを提案することが示されている。「欧州データ戦略」は、部門の垣根を越えてEU域内で自由にデータを移転できるよう、「欧州データ空間（European Data Space）」の構築を目指すものである。具体的な戦略として、データ流通に係るルール作り、大規模プロジェクトへの資金投資、重点9分野別の欧州データ空間設立などを掲げている（図3-2-2）。「欧州データ空間」のひとつであるグリーン・ディールデータ空間は、「GreenData4All」と「Destination Earth (DestinE)」の2つのイニシアチブによって実現されることが示されている。

これらの背景には、デジタル分野でEUの技術主権（Technology Sovereignty）を確保し、EUを信頼できるグローバルリーダーとして位置づける狙いがある。

2 European Commission, “Shaping Europe’s Digital Future”,
https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/communication-shaping-europes-digital-future-feb2020_en_4.pdf
(2022年1月31日アクセス)

3 European Commission, “A European strategy for data”,
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1593073685620&uri=CELEX:52020DC0066> (2022年1月31日アクセス)

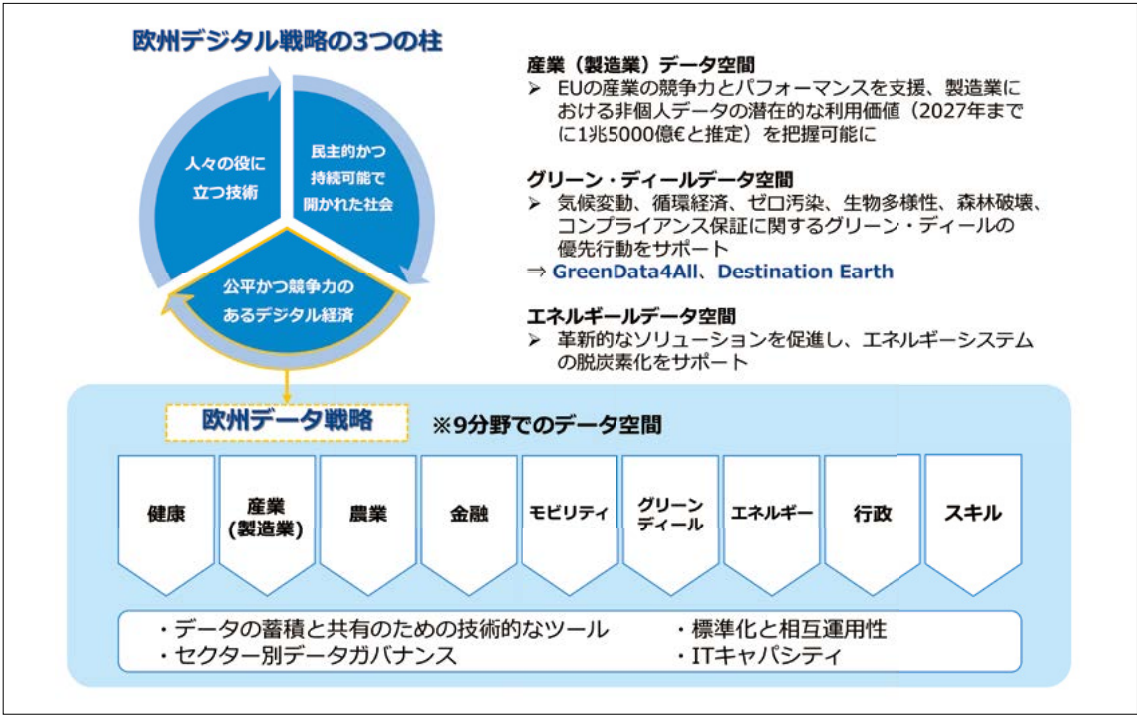


図3-2-2 欧州デジタル戦略の3つの柱と欧州データ空間の対象9分野

EUにおけるデジタルツインに関する研究開発動向の概要を分野毎にまとめる。

表3-2-1 EUにおけるデジタルツインに関する対象分野毎の研究開発動向概要

対象分野	概要
(A) 製造	- Horizon2020の下でのデジタルツインに関する代表的な研究開発プログラムとして「Smart Cyber-Physical Systems (2015-2019年)」「Computing technologies and engineering methods for cyber-physical systems of systems (2019年-)」が実施されている。 - いずれのプログラムもCPSの構築が目的となっており、CPS構築の一端として、デジタルツインの構築に向けた研究開発が実施されている。
(B) エネルギー・都市	- Horizon2020の下でのデジタルツインに関する代表的な研究開発プログラムとして、エネルギー分野では「Toward a Digital TwinE CS and thermal management architecture models (2020-2023年)」、都市分野では「Digital Building Twins (2020-2024年)」が実施されている。 - 原子力エネルギー関連では、Euratomとして「Cyber physical Equipment for unmanned Nuclear Decommissioning Measurements」が実施されている。
(C) 気象・気候	- 地球の高精度デジタルツインモデルを開発し、自然現象や関連する人間の活動を観測、モデル化、シミュレーションすることを目的としたイニシアティブ「Destination Earth」が、2021年より開始された。 2024年までにオープンコアのデジタルプラットフォームと「Extreme Natural Disasters Digital Twin (極端な自然災害デジタルツイン)」「The Climate Change Adaptation Digital Twin (気候変動適応デジタルツイン)」の構築が目指されている。

(A) 製造分野

Horizon 2020 の下のデジタルツインに関する代表的なプログラムとして「Smart Cyber Physical Systems (2015–2019 年)」や「Computing technologies and engineering methods for cyber-physical systems of systems (2019–2023 年)」が挙げられる。いずれも Horizon 2020 の第二の柱「産業技術開発でのリーダーシップ」にて取り組まれており、CPS 構築の一環としてデジタルツインの構築に向けた研究開発が実施されている。

「Smart Cyber Physical Systems」プログラムでは、製造業、都市・社会インフラ、輸送機器、情報端末を始めとする様々なアプリケーションでの基盤となる CPS やライブラリなどのツールボックスの開発を目指し、15 プロジェクト（総額約 22 億円）が実施された。中小企業、主要な CPS プラットフォーム、CPS コンピテンシー・プロバイダー間のシナジー効果を促進する「EuroCPS」プロジェクトや CPS ベースの製品・サービスの実現に向けた CPS エンジニアリングインフラ、知識、ツールの提供を目指した「CPSELabs」プロジェクトは、先述した DIH 整備のフェーズ 1 に相当する。

「Computing technologies and engineering methods for cyber-physical systems of systems」プログラムでは、CPS のためのコンピューティングシステム構築を目指し、16 プロジェクト（総額約 50 億円）が実施されている。Flexible & Wearable Electronics (FWE) に特化した DIH の構築を目指した「SmartEEs」プロジェクトは DIH 整備のフェーズ 2 に相当する。DIH を統合・連携し、SMEs が DIH サービスをより広く利用できることを目指した「Smart4Europe2」プロジェクトを含む 6 プロジェクトが DIH 整備のフェーズ 3 に相当する。なお、DIH 整備のフェーズ 2 には「EuroCPS」等での主要成果に基づいた「FED4SAE」プロジェクトも含まれる。DIH の汎欧州ネットワーク構築を目的に、革新的な CPS ソリューションの開発を加速し、欧州圏内の産業のデジタル化を後押ししている。

(B) エネルギー・都市分野

Horizon 2020 の下のデジタルツインに関する代表的な研究開発プログラムとして、エネルギー分野では「Toward a Digital Twin E CS and thermal management architecture models (2020–2023 年)」が実施されている。原子力エネルギーに関しては、欧州原子力共同体 (Euratom) にて「Cyber physical Equipment for unattended Nuclear Decommissioning Measurements (CLEANDEM)⁴」が実施されている。原子力施設の解体・廃止措置作業において、革新的な放射線検出プローブを搭載した無人地上車両 (UGV) プラットフォームを使用した技術的なブレイクスルーを目指している。

都市分野では「Digital Building Twins (2020–2024 年)」が実施されている。建物やインフラのリアルタイムデジタル表現であるデジタルビルディングツインの開発が目的であり、TRL4（実験室レベルの実証）から開始し、プロジェクト終了時に TRL6（システムとしてのプロトタイプ検証）の達成を目指している。

(C) 気象・気候分野

地球の超高解像精度デジタルツインモデルを開発し、自然現象や関連する人間の活動を観測、モデル化、シミュレーションすることを目的としたイニシアチブ「Destination Earth⁵」が、2021 年より開始された。欧州宇宙機関 (ESA)、欧州中距離気象予報センター (ECMWF)、欧州気象衛星利用機関 (EUMETSAT)

4 EC Horizon 2020,
<https://cordis.europa.eu/project/id/945335> (2022 年 1 月 31 日アクセス)

5 Destination Earth,
https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13170-GreenData4All-updated-rules-on-geospatial-environmental-data-and-access-to-environmental-information_en (2022 年 1 月 31 日アクセス)

の3機関が共同で実施している。クラウドベースのデジタルモデリングとオープンシミュレーションプラットフォームを中核とし、デジタルツインの実装はECMWFが担当している。自然災害、気候変動適応、海洋、生物多様性など様々な領域のテーマ別に構築されたデジタルツインを統合し、地球システム全体の包括的なデジタルツインを構築することが目的である。自然災害とそれに伴う社会経済危機を予測し、大規模な経済不況を回避することや、より持続可能な開発のためのシナリオを開発し、検証することが可能となり、デジタルツインによる効果的な意思決定の実現を目指している。2021年からの10年間で、以下のタイムラインに沿って実施される。

2024年まで：オープンコアのデジタルプラットフォームと最初の2つのデジタルツイン「Extreme Natural Disasters Digital Twin（極端な自然災害デジタルツイン）」「The Climate Change Adaptation Digital Twin（気候変動適応デジタルツイン）」を開発する。

2027年まで：海洋、生物多様性、スマートシティなど、分野別のユースケースに対応する追加のデジタルツインをプラットフォームに統合する。

2030年まで：プラットフォームを通じてデジタルツインを統合し、地球の「完全な」デジタルレプリカを作成する。

また「GreenData4All」では、環境地理空間データと環境情報へのパブリックアクセスに関するEUの規則を更新し、欧州のグリーンおよびデジタルトランスフォーメーションの実現を目的としている。具体的には、公的・民間・一般の人々とのより大きなデータ共有を可能にすることで、データドリブンのイノベーションとエビデンスベースの意思決定に最大限活用することである。現在、実現に向けたロードマップが検討されている。

Horizon 2020は3つの柱（卓越した科学、産業リーダーシップ、社会的課題への取り組み）を基本構造としている。デジタルツイン関連のプロジェクトは第二の柱「産業リーダーシップ」にて主に実施されている。2021～2027年までの7年間を対象とする第9次FPのHorizon Europeも発表されており、デジタルツイン関連のプロジェクトは、第二の柱「グローバルチャレンジ・欧州の産業競争力」の6つの社会的課題群の「デジタル、産業、宇宙⁶」や「気候、エネルギー、モビリティ⁷」を中心に公募が行われている。社会的課題群のいくつかの目的地（Destination）にてデジタルツインに言及しているプロジェクトがある。エネルギーフレキシブルな産業プロセスの構築、エネルギーマネジメントやモビリティマネジメント、そしてシナリオ構築などにデジタルツインが技術のひとつとして活用されている。より包括的で自律的なデジタルツインの開発を目指していることが特徴である。

6 Horizon Europe Work Programme 2021–2022 7. Digital, Industry and Space, https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/horizon/wp-call/2021-2022/wp-7-digital-industry-and-space_horizon-2021-2022_en.pdf（2022年1月31日アクセス）

7 Horizon Europe Work Programme 2021–2022 8. Climate, Energy and Mobility, https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/horizon/wp-call/2021-2022/wp-8-climate-energy-and-mobility_horizon-2021-2022_en.pdf（2022年1月31日アクセス）

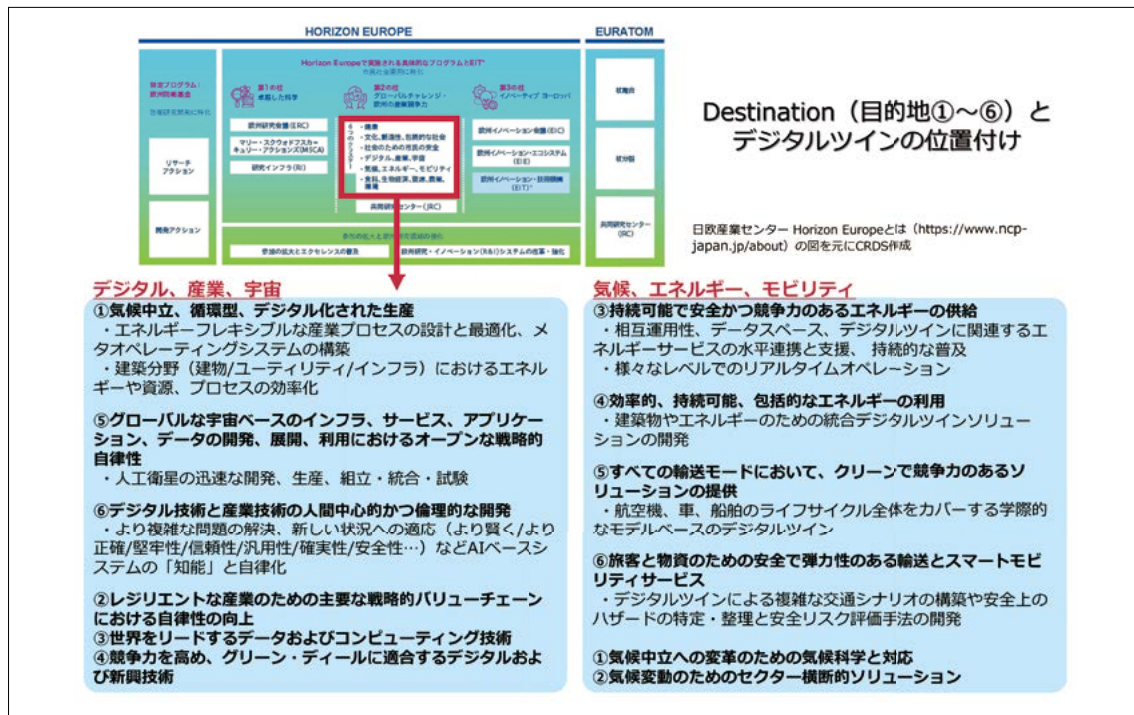


図3-2-3 Horizon Europe 第二の柱におけるデジタルツインの位置付け

3.2.2 ドイツ

ドイツでは、産業全体のデジタル化を目指す「Industrie4.0」が継続して実施されている。「Industrie4.0」はICTを活用した第4次産業革命と位置付けられており、デジタルツインはその中核となるコンセプトとして位置付けられている。「Industrie4.0」の実現に向けて「Industrie4.0プラットフォーム」が2013年に構築され、連邦経済エネルギー省（BMWFi）とBMBFが管理している。シミュレーション基盤技術の高度化やデータベースの基盤整備だけではなく、アカデミアと産業界と標準・規格化団体とが協力して、標準化と規格化の推進にも取り組んでいる。「Industrie4.0」の実装に向けて、自律性、相互運用性、持続可能性という3つの戦略的行動分野を設定し、今後10年間のスケールアップの指針として取り組んでいる。

また、「ハイテク戦略2025」では、6つの社会的課題分野が掲げられるとともに、全ての課題に共通な問題としてデジタル化が位置付けられている。

ドイツにおけるデジタルツインに関する研究開発動向の概要を分野毎にまとめる（表3-2-2）。

表3-2-2 ドイツにおけるデジタルツインに関する対象分野毎の研究開発動向概要

対象分野	概要
(A) 製造	「Industrie4.0」はICTを活用した第4次産業革命と位置付けられるコンセプトであり、製造プロセスのエンド・ツー・エンドのデジタル化が目指すものである。その中で、デジタルツインは様々な工程・レイヤー間をつなぐキーコンセプトに位置づけられ、製造プロセスにおける関連資産（材料、製品、作業、デバイス等）を記述管理することを可能とする重要技術とされる。 - 代表的な研究開発プロジェクトとしては、フラウンホーファー研究機構（IESE）が主導する「Basys 4.0 / 4.2」やフラウンホーファー研究機構（IOSB-INA）が主導する「Technical Infrastructure for Digital Twins（TeDZ）」などが挙げられる。 - ヘルムホルツ協会では、比較的中長期的な観点で、材料に関するデジタルツインの基礎研究開発が行われている。
(B) エネルギー・都市	- フラウンホーファー研究機構（IOSB-INA）が主導する「Technical Infrastructure for Digital Twins」ではライフサイクル全体をカバーする統合システム「PLANET」を構築し、エネルギー消費の最適化を目的としたパイロットプロジェクト「Digital Energetic Twin（DeZ）」を実施している。 - 都市分野では、2017年にBBSRが「Smart City Charter（スマートシティ憲章）」を発表し、国を挙げて都市のデジタル化に取り組んでいる。 - フラウンホーファー研究機構（IESE）では、2021年にホワイトペーパー「Digitale Zwillinge Smart City」を発表した。デジタルツインを将来的にスマートシティに大きな付加価値を創出できる技術と位置付けた。現在は特定のアプリケーションでデジタル技術を活用している段階であり、今後2～3年でデジタルツインの概念実証や実証試験が必要であるとしている。 - ミュンヘン工科大学を中心に、建設分野での生産性向上を主眼とした研究開発が行われている。

3

海外の政策・研究動向

(A) 製造分野

「Industrie4.0」はICTを活用した第4次産業革命と位置付けられており、製造プロセスのエンド・ツー・エンドのデジタル化が目指している。硬直したバリューチェーンを柔軟性の高いバリューネットワークに変革させるため、サイバーフィジカルシステム（CPS）の活用とその緊密な相互接続を実現させることが重要としている。その中で、デジタルツインは様々な工程・レイヤー間をつなぐキーコンセプトに位置づけられ、製造プロセスにおける関連資産（材料、製品、作業、デバイス等）の記述管理を可能とする重要技術とされている。

Industrial Internet Consortium®（IIC™）とPlattform Industrie 4.0は共同で、2020年9月にホワイトペーパー「デジタルツインおよび資産管理シェル概念とアプリケーション⁸」を発表した。IIC™のLin氏は、「多くの組織がほぼ独自仕様に基づくデジタルツイン技術を導入し、デジタルツイン技術とソリューションの共有・再利用が困難という好ましくない状況となっており、幅広く適用されるデジタルツイン技術の相互運用性を実現する上で、概念、情報、相互作用モデルに関する共通の理解を促すことが必要」との見解を示している⁹。ここでは相互運用性を実現する中心概念として、資産管理シェル（AAS: Asset Administration Shell）が説明されている。

8 Federal Ministry of Education and Research, Industrial Internet Consortium and Plattform Industrie 4.0 Explore the Application of Digital Twin and Asset Administration Shell Concepts, <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/News/Actual/2020/2020-16-09-2020-joint-whitepaper-iic-pi40.htm>（2022年1月31日アクセス）

9 JETRO インダストリアル・インターネット・コンソーシアム（IIC）の活動状況（2021年2-3月），https://www.jetro.go.jp/ext_images/_Reports/02/2021/ed2b5f3d1764dc9d/nyrp202103.pdf（2022年1月31日アクセス）

代表的な研究開発プロジェクトとしては、フラウンホーファー研究機構 実験ソフトウェアエンジニアリング研究所（以降、「フラウンホーファー研究機構 IESE」と記載）が主導する「Basys 4.0 / 4.2」やフラウンホーファー研究機構 オプトエレクトロニクス・システム技術・画像処理研究所 産業オートメーション研究センター（以降、「フラウンホーファー研究機構 IOSB-INA」と記載）が主導する「Technical Infrastructure for Digital Twins (TeDZ)」などが挙げられる。前者では、製造プロセスにおける異なるシステム・装置・アプリケーションの統合を目的としたミドルウェアの開発を主眼としている。後者では、材料研究と生産プロセスのデジタル化を主眼としたプロジェクトで、主に積層造形や金型製作の製造プロセスにおけるデジタルツインの活用が研究されている。ライフサイクル全体をカバーする統合システム「PLANET」を構築し、ITシステムの相互運用性の実現を目指している。統合システムは、イーサリアム（ブロックチェーン）、ブロック記憶（IPFS：Inter Planetary File System）による分散システムモデルと、git（バージョン管理）で構成され、スケーラビリティ・可用性・守秘義務を担保している。また、ヘルムホルツ協会では、比較的中長期的な観点で、材料に関するデジタルツインの基礎研究開発が行われている。

（B）エネルギー・都市分野

エネルギー分野ではフラウンホーファー研究機構 IOSB-INAにおいて、エネルギー消費の最適化を目的としたパイロットプロジェクト「Digital Energetic Twin (DeZ)」が実施されている。

都市分野では、2017年に連邦建設地域計画局（BBSR：Bundesinstitut für Bau-, Stadt-und Raumforschung）が「Smart City Charter（スマートシティ憲章）¹⁰」を発表し、国を挙げて都市のデジタル化に取り組んでいる。また、フラウンホーファー研究機構 IESEは、2021年にホワイトペーパー「Digitale Zwillinge Smart City¹¹」を発表し、デジタルツインを将来的にスマートシティに大きな付加価値を創出できる技術と位置付けた。現在は特定のアプリケーションでデジタル技術を活用している段階であり、今後2～3年でデジタルツインの概念実証や実証試験が必要であるとしている。建築分野では、ミュンヘン工科大学が中心となり、建設現場における材料とエネルギー消費の削減と生産性向上を目指したプロジェクトを実施している。

3.2.3 英国

英国では、ビジネス・エネルギー・産業戦略省（BEIS）から科学技術イノベーション政策も包含する形で「産業戦略：将来に適応する英国の建設」が示されている。AIとデータ、高齢化社会、クリーン成長、将来のモビリティの4つの「グランド・チャレンジ」を特定し、具体的な目標として「ミッション」を設定している。また、Innovate UKが主体となり英国研究・イノベーション機構（UKRI）とも連携しながら、産業戦略チャレンジ基金（ISCF：Industrial Strategy Challenge Fund）¹²にて産学共同研究開発が推進されている。ISCFの下、「Made Smarter Innovation Challenge」という投資パッケージにて、研究開発・イノベーションハブやネットワークの構築・標準化などを推進している。4年間で1億4,700万£の予算が措置されており、産業界からも同額のマッチングファンド方式で実施されている。デジタル・イノベーションによる製造プロセスの

10 BBSR, Smart City Charter Making digital transformation at the local level sustainable, https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/EN/themen/building-housing/city-housing/smart-city-charter-short.pdf?__blob=publicationFile&v=1（2022年1月31日アクセス）

11 Fraunhofer IESE, Digitale Zwillinge Smart City, <https://www.iese.fraunhofer.de/content/dam/iese/de/dokumente/Whitepaper-DigitaleZwillinge-SmartCity-FraunhoferIESE.pdf>（2022年1月31日アクセス）

12 UKRI, Industrial Strategy Challenge Fund, <https://www.ukri.org/innovation/industrial-strategy-challenge-fund/>（2022年1月31日アクセス）

持続可能性を向上させるために、デジタルツインが技術のひとつとして位置付けられており¹³、現在、第3回目のプロジェクト公募が実施されている。

2021年7月にはBEISから「国家イノベーション戦略¹⁴」が発表された。その中で、相互運用可能な共通のデジタルツールやプラットフォーム、物理的なテストスペースやイノベーションスペースを組み合わせたデジタルおよび物理的な共有インフラ形成が重点分野の1つとされ、その1つとしてデジタルツインが位置付けられた。

国の産学連携強化策の一環として、Innovate UK が設立した産学協同の研究センター「カタパルト (Catapult)」プログラムがある(図3-2-4)。特定の技術分野において英国が世界をリードする技術・イノベーションを生み出す拠点構築を目指したプログラムである。「デジタルカタパルト」にてデジタルツイン全般を、「高付加価値製造カタパルト」にて製造業に関するデジタルツインを、「コネクテッドプレイスカタパルト」にて都市・エネルギーに関するデジタルツインを取り扱っている。

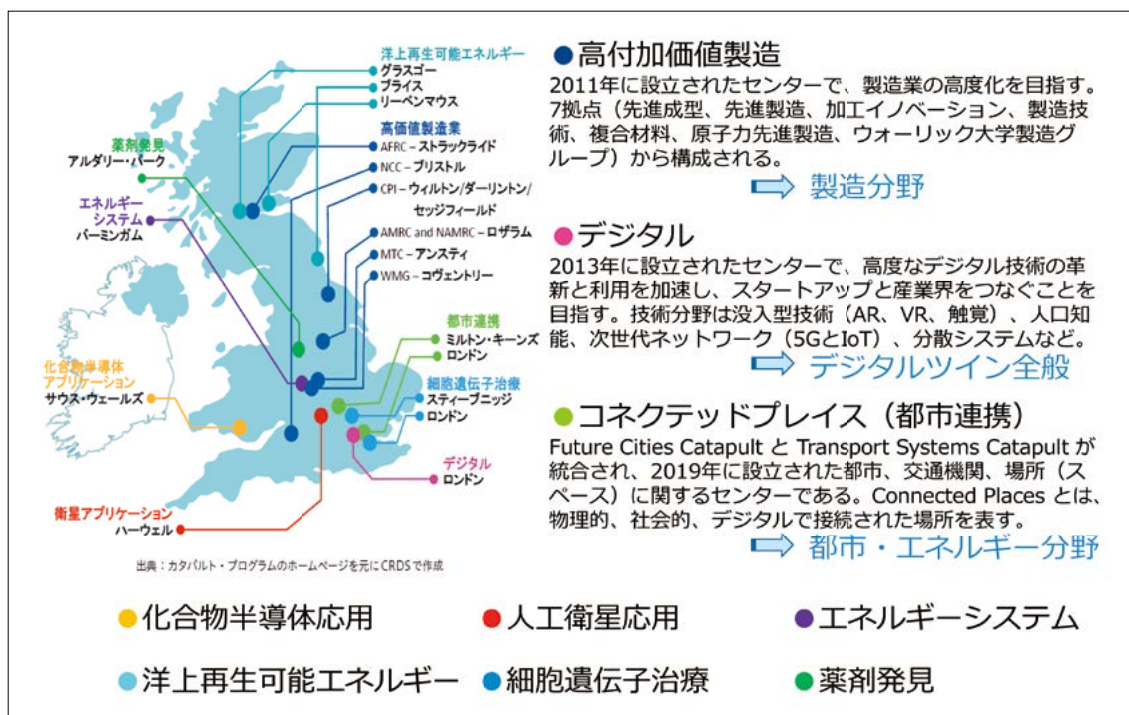


図3-2-4 Catapultとデジタルツインの関係

英国におけるデジタルツインに関する研究開発動向の概要を分野毎にまとめる(表3-2-3)。

- 13 Made Smarter Innovation: Sustainable Smart Factory, <https://apply-for-innovation-funding.service.gov.uk/competition/1063/overview#summary> (2022年1月31日アクセス)
- 14 BEIS, UK Innovation Strategy: leading the future by creating it, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1009577/uk-innovation-strategy.pdf (2022年1月31日アクセス)

表 3-2-3 英国におけるデジタルツインに関する対象分野毎の研究開発動向概要

対象分野	概要
(A) 製造	・高付加価値製造カタパルトにて産学官による取り組みが行われている。7拠点（先進成型、先進製造、加工イノベーション、製造技術、複合材料、原子力先進製造、ウォーリック大学製造グループ）で構成されている。 ・そのうちの先進製造および原子力先進製造はシェフィールド大学先端製造研究センター（AMRC）が中核機関を担っている。AMRCは2001年にヨーロッパ地域開発基金の支援を受けて、シェフィールド大学とボーイング社との共同で設立され、現在のパートナー企業は125社以上ある。 ・シェフィールド大学機械工学科ではEPSRCによる「DigiTwin」プロジェクトが実施されている。 ・デジタルカタパルトではデジタルツインの潜在的な価値と展開可能性の調査・検討が行われている。デジタルカタパルトはHorizon 2020「FED4SAE」プロジェクトにおける英国のハブになっている。
(B) エネルギー・都市	・コネクテッドブレイスカタパルトでは都市、インフラ、モビリティに関する研究開発を推進している「Synergy Prime」プログラムでは、人口予想と道路交通シミュレーションを組合せたデジタルツインを用いて、将来のインテリジェント道路交通システムの開発を支援する研究開発を実施している。また、Digital Twins hub pageというウェブサイトを設け、情報発信、関係者のネットワーキング、議論・検討を行っている。 ・BEISとの共同でケンブリッジ大学にCentre for Digital Built Britain（CDBB）が設置され、建設向けデジタル技術の研究を行っている。また「National Digital Twin Program」を実施しており、デジタルツイン同士を接続したエコシステムの構築を目指している。

(A) 製造分野

最初のカタパルトネットワークとして2011年10月に「高付加価値製造カタパルト（High Value Manufacturing Catapult）」が設立された。2013年には「デジタルカタパルト（Digital Catapult）」が創設され、2017年3月に中小企業に対し、The Digital Engineering and Test Centreとの共同研究によるデジタルツインを活用した先進製造技術テーマの公募を行なった。また、国家イノベーション戦略を受けて、BEISと共同で「UK Digital Twins and Cyber Physical Infrastructure National Engagement」プロジェクトとして、デジタルツインやより広範なCPSインフラについての潜在的な価値と展開可能性について、調査やフォーラム開催などを実施している。「デジタルカタパルト」はHorizon 2020「FED4SAE」プロジェクトにおける英国のハブにもなっている。

UKRI傘下のファンディング機関のひとつである工学・物理科学研究会議（EPSRC）において、デジタルツインに関する基礎研究の支援が行われている。例えば、「Digital twins for improved dynamic design（DigiTwin）¹⁵」プロジェクト（2017～2021年、シェフィールド大学）に約500万£、「Strategic Partnership in Computational Science for Advanced Simulation and Modelling of Engineering Systems（ASiMoV：先進的なガスタービンエンジンのシミュレーションとモデリング）¹⁶」プロジェクト（2018～2024年、エディンバラ大学）に約600万£が投資されている。さらに、2021年にはデジタルツイン開発と関連性が高い4つのプロジェクトに、EPSRCから1,120万£以上と民間投資による2,000万£が投資された。

15 EPSRC, Details of Grant: Digital twins for improved dynamic design, <https://gow.epsrc.ukri.org/NGBOVViewGrant.aspx?GrantRef=EP/R006768/1>（2022年1月31日アクセス）

16 EPSRC, Details of Grant: ASiMoV, <https://gow.epsrc.ukri.org/NGBOVViewGrant.aspx?GrantRef=EP/S005072/1>（2022年1月31日アクセス）

EPSRCにはデジタルツイン担当官が配置されており¹⁷、デジタルツインに特化したプロジェクトだけでなく、様々な分野でデジタルツインを含むプロジェクトが実施され、人材育成（博士課程トレーニングセンター）も同時に行われている。

（B）エネルギー・都市分野

2019年にFuture Cities CatapultとTransport Systems Catapultが統合された「コネクテッドプレイスカタパルト（Connected Places Catapult）」にて都市、インフラ、モビリティに関するプロジェクトが実施されている。「Synergy Prime」プログラムでは、人口予想と道路交通シミュレーションを統合し、将来のインテリジェント道路交通システムの開発を行っている。人口予想、エージェントベースモデリング、インタラクティブシミュレーションを交通設計システムに統合し、道路交通のデジタルツインを開発することが目的である。また、Digital Twin Hubというウェブサイト进行、情報発信や関係者のネットワーキング、議論・検討を行っている。

また、BEISとの共同でケンブリッジ大学にCentre for Digital Built Britain（CDBB）が設置されている。CDBBでは建設向けデジタル技術の研究を行い、Building Information Modelling（BIM）等の開発を行っている。CDBBでは「National Digital Twin Program」を実施しており、デジタルツイン同士を接続したエコシステムの構築を目指している。

英国のインフラ、建築関連のデジタルツイン開発のタイムラインを図3-2-5に示す。現在は情報管理のためのフレームワーク開発の段階である。

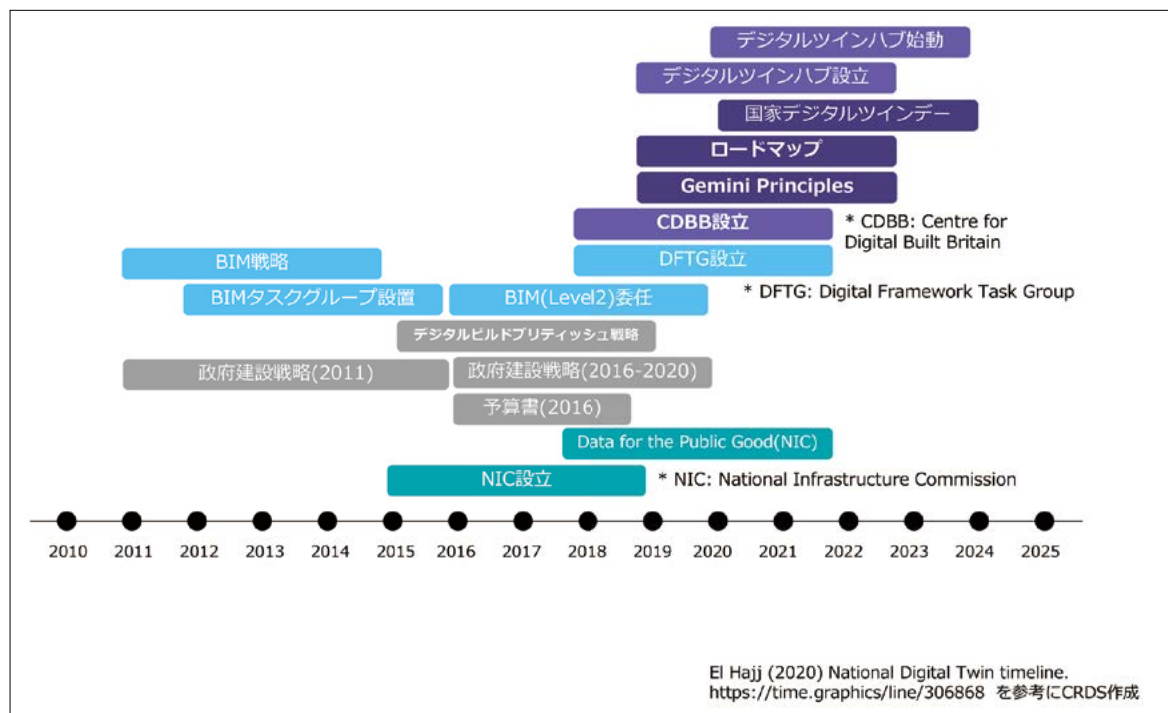


図3-2-5 英国国家デジタルツインのタイムライン

17 UKRI and Digital Twins, <http://dafni.ac.uk/wp-content/uploads/2021/07/Mark-GaskartUKRI-and-Digital-Twins-slides-for-DAFNI-5th-July-final-version.pdf> (2022年1月31日アクセス)

3.2.4 米国

米国では、2011年以降「国家先進製造戦略計画（National Strategic Plan for Advanced Manufacturing）」や省庁横断的かつ産学官が連携する取り組みである大統領イニシアチブ「先進製造パートナーシップ（AMP：Advanced Manufacturing Partnership）」などにに基づき先進製造のためのデータ基盤を整備してきている。2012年には製造技術の高度化を目指した研究機関ネットワークとして「全米製造イノベーション・ネットワーク（NNMI：National Network for Manufacturing Innovation）」を立ち上げた。NNMIは2016年に「Manufacturing USA」と改名され、米国国立標準技術研究所（NIST：National Institute of Standards and Technology）に置かれた先進製造国家プログラム局（AMNPO）を事務局として、国防総省（DOD：Department of Defense）、エネルギー省（DOE：Department of Energy）、商務省（DOC：Department of Commerce）、NIST、NSF等の参画機関により運営されている。

2018年10月に国家科学技術会議（NSTC）の技術委員会より報告書「先進製造における米国リーダーシップ戦略」が発表されている。①新たな製造技術の開発、②製造業の人材の教育、訓練、ネットワークの構築、③国内の製造サプライチェーンの拡大、という3つの目標を掲げ、米国が先進製造において、国家安全保障と経済の観点からリーダーシップを確保することが示されている。スマート・デジタル製造技術だけでなく、低コストの分散製造や連続生産、COVID-19対応をサポートする生物医学分野のナノ・先端材料やプロセス技術なども重要な分野としている。

米国におけるデジタルツインに関する研究開発動向の概要を分野毎にまとめる（表3-2-4）。

表3-2-4 米国におけるデジタルツインに関する対象分野毎の研究開発動向概要

対象分野	概要
(A) 製造	・2011年に製造業の再生・革命イニシアチブとしてAdvanced Manufacturingを立ち上げ、2012年からNational Network for Manufacturing Innovation（NNMI）プログラムを開始した。 ・NNMIは2016年にManufacturing USAと改名された。DOD、DOE、DOC等から予算が拠出され、製造技術の高度化を目指した研究機関ネットワークである。16拠点のMMIが整備されている。デジタルツインは製造技術の高度化に寄与する技術としていくつかの拠点で技術開発が進められている。 ・NSFは2008年以降、CPSプログラム等にて基礎研究を進めている。2015年頃よりデジタルツインに関して、基盤技術や概念実証に関するテーマを中心にプロジェクトが開始された。2019年頃よりプロジェクト数が増加し、各分野での応用を見据えたテーマやデジタルツインの高度化に資するテーマへと広がりを見せている。
(B) エネルギー・都市	・エネルギー分野の技術開発は、DOEが中心となり実施されており、DOEエネルギー高等研究計画局（ARPA-E：Advanced Research Projects Agency-Energy）にて革新的なエネルギー技術の開発が行われている。 ・上記のプログラムのひとつとして、次世代原子力発電所の操作・保守システムの効率化に向けたデジタルツインの技術開発が進められている。

(A) 製造分野

「Manufacturing USA」では、産学セクターのための先進製造研究基盤として16拠点の製造イノベーション研究所（MII：Manufacturing USA Innovation Institute）が設置されている。うち9拠点がDOD、6拠点がDOE、1拠点がDOCによって設置され、電子工学、材料、バイオ、環境・エネルギー、デジタルなど様々な分野における先進製造技術の研究開発が進められている。デジタルツインは製造技術の高度化に寄与する技術として技術開発が進められ、16拠点の中でCESMII、LiFT、MxD、America Makes、ARMな

どがデジタルツインに関連するMIIである。特にCESMIIでは製造業におけるエネルギー効率向上や産業競争力強化を目的として、デジタルツインを含むスマートマニュファクチャリングに関する研究開発を進めている。

また、米国科学財団（NSF）は、2008年以来、計約300億円をCPS技術に対して投資している。具体的にはCPSプログラム、ERC（Engineering Research Centers）プログラム、Advanced Manufacturing（AM）プログラムなどが挙げられる。2015年頃よりデジタルツインの基盤技術や概念実証に関するテーマを中心にプロジェクトが開始された。2019年頃よりプロジェクト数が増加し、各分野での応用を見据えたテーマやデジタルツインの高度化に資するテーマへと広がりを見せている（図3-2-6）。NSFでは、Manufacturing USAの技術重点分野におけるイノベーションを可能にするような研究提案を支援¹⁸しており、先進製造業分野の基礎研究のニーズに対応する研究提案を採択し、基礎研究から社会実装までを着実に繋げる仕組みがある。

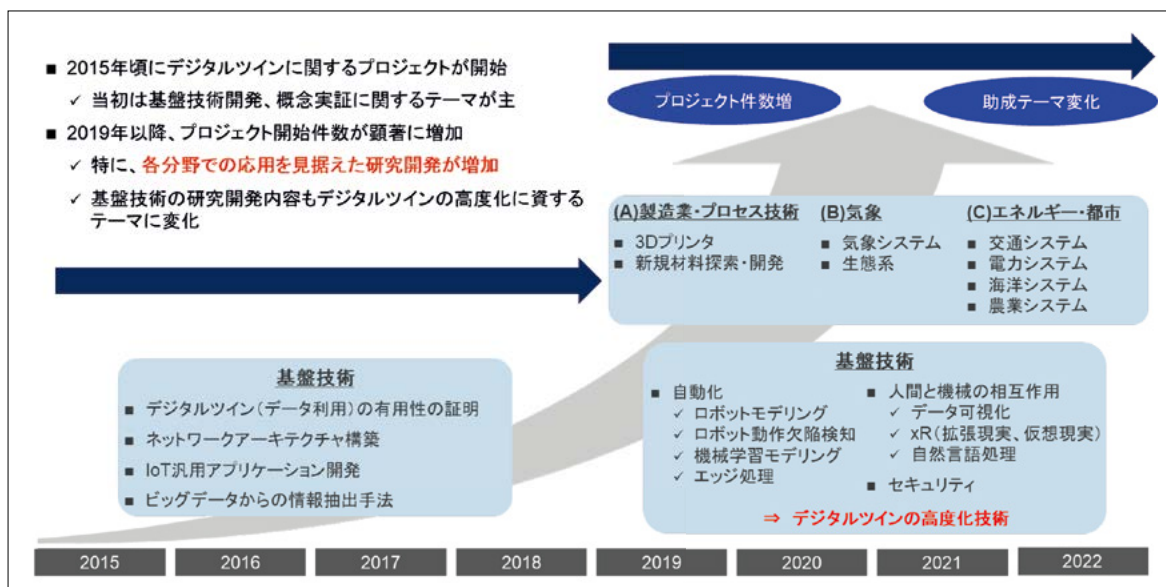


図3-2-6 NSFにおけるデジタルツイン関連の研究開発テーマの推移

(B) エネルギー・都市分野

エネルギー分野の技術開発は、DOEが中心となり実施されており、DOEエネルギー高等研究計画局（ARPA-E：Advanced Research Projects Agency-Energy）にて革新的なエネルギー技術の開発が行われている。そのプログラムのひとつにGEMINAがあり、次世代原子力発電所の操作・保守システムの効率化に向けたデジタルツインの技術開発が進められている（図3-2-7）。

18 NSF, Dear Colleague Letter: Supporting Fundamental Research to Enable Innovation in Advanced Manufacturing at Manufacturing USA Institutes（2017年5月26日），
<https://www.nsf.gov/pubs/2017/nsf17088/nsf17088.jsp?org=NSF>（2022年1月31日アクセス）

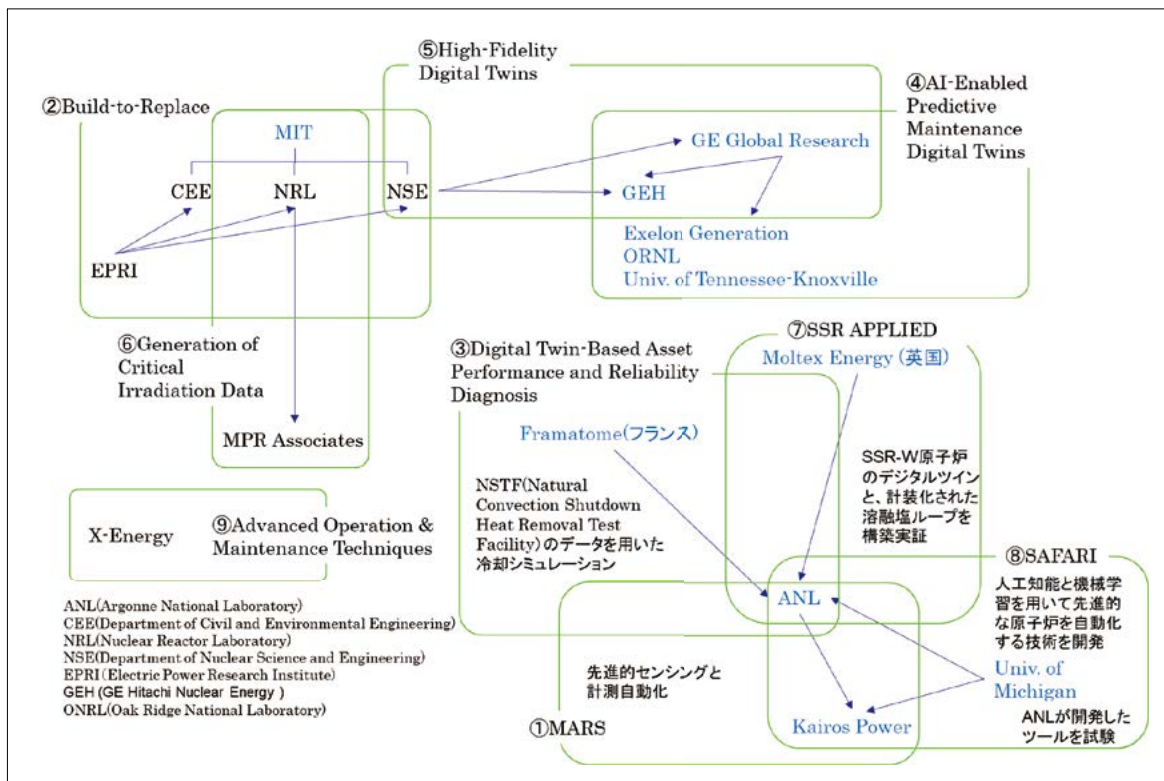


図3-2-7 GEMINAの研究開発スキーム

都市分野についてもDOEやNSFにてプロジェクトが実施されている。例えば、DOEの高効率エネルギーモビリティシステム（EEMS：Energy Efficient Mobility Systems）プログラムにおいて、スケーラブルな交通システムシミュレータMobiliti（都市全域の移動パターンをシミュレーションできる最先端のソフトウェア）の開発及び概念実証が行われている。国立エネルギー研究科学計算センター（NERSC：National Energy Research Scientific Computing Center）のスーパーコンピューティング資源を利用して、並列離散イベントシミュレーションを実装している。データ駆動型デジタルツインを基盤とする高度な交通管理システムは、交通渋滞のパターンを予測し、モビリティを分散させるための代替経路や制御メカニズムを見出し、シナリオ評価などに役立てることが可能である。

3.2.5 中国

中国では、中国国民経済・社会発展第14次五カ年計画¹⁹（2021～2025年）が2021年3月に発表された。それに付随するスマート製造発展計画（智能制造发展规划）では第13次五カ年計画では言及されていなかったデジタルツイン（数字孪生）が重要な技術として繰り返し言及されている。ビッグデータ、AI、VR/AR、5Gなど7つの技術に並び、製造業のスマート化を図る上で主要な技術として位置付けられている。

中国におけるデジタルツインに関する研究開発動向の概要を分野毎にまとめる（表3-2-5）。

19 中華人民共和国中央人民政府「中華人民共和国の国民経済・社会発展の第14次五カ年計画および2035年までの長期目標綱要（草案）」、
http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/05/content_5590610.htm（2022年1月31日アクセス）

表 3-2-5 中国におけるデジタルツインに関する対象分野毎の研究開発動向概要

対象分野	概要
(A) 製造	- 第14次五ヵ年計画ではデジタルツインが生産プロセスにおけるキーテクノロジーとして明言されており、国内標準開発推進も計画されている。スマートマニュファクチャリングの発展が急務とされており、デジタルツインはその根幹を成す技術の一つと考えられている。 - 研究開発におけるファンディングは主に国家製造イノベーションセンターの設置を通して行われており、各地方政府が大学等と連携して積極的に誘致・建設を行っている。プラットフォームの開発やシミュレーション技術の開発が多く見られる。
(B) エネルギー・都市	- デジタルツインシティは、製造分野におけるデジタルツインと同様に重要な技術領域として位置付けられている。 - 各省・各都市単位でデジタルツインシティ計画の策定・実装が進められているが、実装スケールや技術レベルは統一されておらず、中央政府も課題視している。

(A) 製造分野

製造分野では、スマートマニュファクチャリングの発展が急務とされており、デジタルツインはその根幹をなす技術の1つと考えられている。2025年までに約40か所の「国家製造イノベーションセンター（制造业创新中心）」が整備されることになっている。デジタルツインの研究開発は従来、大学や民間企業が中心であったが、今後は各イノベーションセンターが研究開発拠点のハブとなる可能性も考えられる。

また、デジタルツインの標準開発推進も計画されており、工業情報化部所管の中国電子技術標準化研究所が主導的な役割を果たしている。標準化のロードマップを示す「国家インテリジェント製造基準システム構築ガイドライン2021年版（国家智能制造标准体系建设指南）」では、2021年10月時点で2つの国家規格が起案中となっている。

(B) エネルギー・都市分野

エネルギー・都市分野では、デジタルツインシティ（数字孪生城市）として、製造分野におけるデジタルツインと同様に重要な技術領域として位置付けられている。2021年3月に発表された第14次五ヵ年計画でも、デジタル社会の構築を加速するためにデジタルツインシティの構築を模索することが掲げられた。デジタルツインシティは2017～2018年のコンセプト育成期、2019年の技術的ソリューション構築期を経て、建設・実施期に突入しており、国・地方の開発戦略にはCIM/BIM（Building Information Modeling/Construction Information Modeling, Management）に関する政策・プロジェクトが増加しつつある（図3-2-8）。デジタルツインシティの実現に向け、中国全土で取組が加速しつつある中、図3-2-9に示す4つの問題が指摘されている。行政面では明確な方向性の欠如、技術面ではデータ統合が未整備である点が大きな課題と認識されている。



図 3-2-8 中国国内の主要なデジタルツインシティ政策の動き

課題	今後の方向性
1. 目的・方向性が不明確 ■ 実際のビジネスニーズやシナリオから乖離したプロジェクトが乱立 ■ 都市ガバナンス・行政サービスに対応したアプリケーションの不足 ■ 未だ静的データが中心でシミュレーションや将来予測に不向き	⇒統一されたCIMプラットフォームの構築 ■ 都市の統治シナリオやビジネスニーズを現場へ適用させる ■ 視察のリーダーシップのもと、リード部門を設置する ■ 関係部門の共通ニーズを把握し、協調してCIM構築を推進する
2. 既存地理情報プラットフォーム統合の必要性 ■ 各行政機関の持つ地理情報プラットフォームが自己完結型で統合されていないため、膨大なデータの取捨選択や統合が困難 ■ 各プロジェクト・都市に明確なリード部門が不在な場合が多い	⇒小さな切り口から大きな突破口をつかむ ■ クローズドエリアから実装を開始し、徐々にカバー範囲を広げる ■ 精度の異なる様々なバージョンのデジタルツインを作成する ■ 統一プラットフォームの下、都市計画やガバナンスをサポートするアプリケーションを構築する
3. 統一されたCIM仕様・データ統合標準の欠如 ■ 統一されたデータフレームワーク標準の欠如 ■ 各プロジェクト・都市で組織やベンダーが統率なく活動 ■ 異なる種類のデータ・異なる標準データフォーマットの存在	⇒データ標準の確立・データ統合とアプリケーション開発の促進 ■ CIMフレームワーク標準を開発し、互換性のあるモデルを形成する ■ 複数の異なるデータを統合処理する規格・仕様の整備を加速する ■ 膨大なデータのリアルタイムなアクセスを可能とする標準に加え、動的データをサービスに活用するための標準を開発する
4. キーテクノロジーの行き詰まり ■ デジタルツインにおけるキーテクノロジー（マッピング、コラボレーティブコンピューティング、シミュレーション等）は、実際に使用するアプリケーションに活用するには発展が不十分 ■ 大規模データを扱うためのロード技術やクラウドコンピューティングの能力が不十分 ■ 設計ソフトウェアの多くが外国企業に支配され、独立性が不十分 ■ 国内のGPU・OS・ドライバー・ミドルウェアに海外とのギャップ ■ 国内センサー技術にコスト面の課題	⇒基礎研究と実践を並行して行い、産業エコロジー内の協力を推進 ■ 革新的な実践に加えて基礎研究を強化し、基礎理論の深化を狙う ■ デジタルツインは本質的に知的統合の巨大プロジェクトであるため、産業エコロジーを強化し、関係各所の緊密な連携を支援する ■ オープンデータや関連するリソースを都市レベルで利用できるようにし、政府も率先してデータのリリースを解放する ■ 建設ソリューションの継続的な成熟とアプリケーションの深化を促進する ■ 政府は既存の都市ガバナンスに関わる制度を変更し、デジタルツイン技術に適応した統治構造を確立する必要がある

図 3-2-9 中国におけるデジタルツインシティ実現の課題と今後の方向性

4 | 国内の政策・研究動向

4.1 政策概要およびこれまでの取り組み

国内では、第5期科学技術基本計画（2016～2020年度）において、サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させ、経済的発展と社会的課題の解決を両立する人間中心の社会を描いたビジョン「Society5.0」が打ち出された。続く2021年3月に閣議決定された第6期科学技術・イノベーション基本計画¹（2021～2025年度）では、Society 5.0 実現のための「サイバー空間とフィジカル空間の融合」の手段としてデジタルツインが位置付けられた（図4-1-1）。

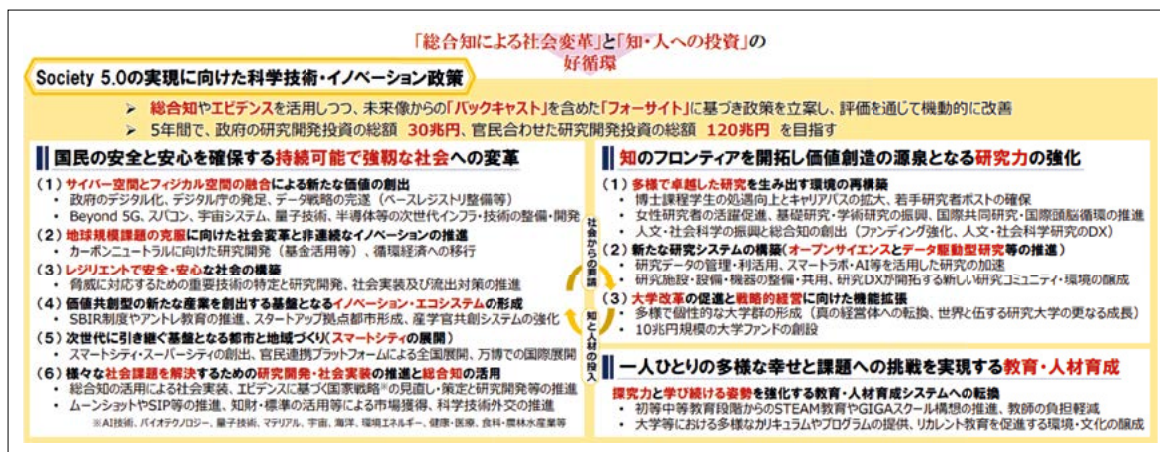


図4-1-1 第6期科学技術・イノベーション基本計画における
サイバー空間とフィジカル空間の融合

（参考）第6期科学技術・イノベーション基本計画におけるデジタルツインに関する記述

“Society 4.0（情報社会）から Society 5.0 への移行は、既存の政策の延長線上の政策では不可能である。移行のためには、新たな未来社会像を前提にして、バックキャスト的アプローチにより、社会全体の再設計（リデザイン）を行うことが不可欠である。

その際、鍵となるのが、Society5.0の前提となる「サイバー空間とフィジカル空間の融合」という手段と、「人間中心の社会」という価値観である。Society 5.0では、サイバー空間において、社会のあらゆる要素をデジタルツインとして構築し、制度やビジネスデザイン、都市や地域の整備などの面で再構成した上で、フィジカル空間に反映し、社会を変革していくこととなる。その際、高度な解析が可能となるような形で質の高いデータを収集・蓄積し、数理モデルやデータ解析技術によりサイバー空間内で高度な解析を行うという一連の基盤（社会基盤）が求められる。

このような新しいプロセスに、人間中心という価値観を組み込むことにより、一人ひとりの国民、世界の市

¹ 第6期科学技術・イノベーション基本計画 本文、
<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index6.html>

民を意思決定の舞台の中心人物として押し上げ、社会はより良い姿へと柔軟に機動的に変化していく。そして、国民一人ひとりに寄り添った利便性の高いサービスを提供するとともに、様々な社会課題を解決し、持続可能で強靱な社会を構築していく。さらには、新たな産業、新たな都市を開花させる道を開き、国際社会に対し、気候変動に代表されるグローバルな課題を克服する新たなモデルを提示することが可能となる。”

(第6期科学技術・イノベーション基本計画本文、p.13より抜粋)

こうして、従来、産業界を中心に普及しつつあったデジタルツインは、科学技術イノベーション政策の中にも取り込まれた。またこれを受けて関連府省や地方自治体、大学・公的研究機関においてもデジタルツインに取り組む動きが年々増えてきている。

4.2 分野別の研究開発動向

(A) 製造分野

製造分野では、CPSを前提としたデジタルツインの姿が盛んに模索されている。ものづくりに絡む諸現象、設備の設計、製造工程における生産分析などその対象領域は多岐にわたる²。

理化学研究所計算科学研究センターでは「富岳」等のHPCIを活用したシミュレーション技術の高度化が行われている。ものづくりの世界では、流体、熱、構造、音、化学反応等が連成する複雑・複合現象を対象としたシミュレーションが期待されている。統一的データ構造に基づく統合シミュレーションフレームワークCUBEを研究・開発し、産業界への展開を目指している。

戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第1期の「革新的燃焼技術」「革新的構造材料」「革新的設計」等では、流体・伝熱・燃焼・化学連成モデル構築や機械損傷プロセスモデル構築などが実施された。SIP第2期ではサイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させるサイバーフィジカルシステムの構築を目指した研究開発テーマが数多く選定されている。「フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」では、リアルタイム性、制御性、超低消費電力性等に重点を置いたハードウェア技術やシステム化によるCPS構築エッジに重点をおいたプラットフォーム開発・社会実装に取り組んでいる。「IoT社会に対応したサイバー・フィジカル・セキュリティ」ではIoTシステム／サービス及び中小企業を含む大規模サプライチェーン全体を守るCPSセキュリティ対策基盤を開発している。

(B) エネルギー・都市分野

エネルギー分野では、文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム（高性能汎用計算機高度利用事業費補助金）³において、「スーパーシミュレーションとAIを連携活用した実機クリーンエネルギーシステムのデジタルツインの構築と活用」が実施されている。マルチフィジクス・マルチスケール統合シミュレーションとAIを連携活用し、Society5.0を支える電力システムの主要クリーンエネルギーシステムとなるCCS技術の適用に適した次世代火力発電システムや洋上ウィンドファームのデジタルツインを構築し、実機エネルギーシステムの開発、設計、運用の最適化に活用することを目指している。

都市分野では、スマートシティをはじめとするまちづくりのDXを推進するため、2020年度より国土交通省

2 新井寛, ものづくりを取り巻く環境とデジタルツイン活用の議論, 日本機械学会誌 (2021) vol.124, No.1231, P.4-5

3 理化学研究所計算科学センター 成果創出加速プログラム,
<https://www.r-ccs.riken.jp/fugaku/org-relations/promoting-research/> (2022年1月31日アクセス)

「Project PLATEAU（プラトー）」として、現実の都市をサイバー空間に再現する3D都市モデルの整備・活用・オープンデータ化を推進している。今後、まちづくり、防災、カーボンニュートラルなどの社会課題の解決に向けて、効率的なデータ整備手法の確立、データ仕様の拡張、社会的要請の高いテーマや先進技術を取り込んだユースケースの開発等に取り組む。

プラットフォーム「PLATEAU」等を活用しながら、都市デジタルツインなど自治体レベルの検討も進み始めている。東京都では、2030年に東京都のデジタルツイン実現を目指す「デジタルツイン実現プロジェクト⁴」として、ロードマップ作成や実証事業などを推進している。実証事業では、地下空間も含めたリアルタイム人流可視化、地下埋設物の3D化による業務改善効果検証、スマートフォンを活用した3Dマップ更新検証などが検討されている。熊本市では、保険会社、気象予報会社、AI技術ベンチャー等と協力して、防災のための都市デジタルツインを構築する取り組みを始めたことが発表されている⁵。

（C）気象・気候分野

気象・気候分野では、EUのDestination Earth Initiativeと同様、観測、モデル化、シミュレーション、および生成・蓄積されるデータの利活用に係る研究開発が進められている。その一例として企業との共同研究で超高精細気象のデジタルツインプロジェクトが推進されている。人間を取り巻く自然環境に対するデジタルツインの実現に向けて、最先端の超高精細気象予測技術とデジタルツインコンピューティング技術の融合技術を開発している。

デジタルツインというキーワードは使っていないものの、科研費学術変革領域（B）「微気象制御学」では、現実気象とサイバー気象の融合の実現に向けた研究開発が実施されている。自律システム群への微気象予測情報の提供と自律システム群が取得する大量のセンサー情報の予測への活用という双方向性、独自の分散型マルチスケールデータ同化法等により予測の実現が目標されている。

この他には文部科学省の「統合的気候モデル高度化研究プログラム」や「『富岳』成果創出加速プログラム」の「防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測」、科研費学術変革領域（B）「DNA気候学への挑戦」等において気候モデルの高度化や同モデルを活用した予測研究が進められている。また文部科学省の「地球環境情報プラットフォーム構築推進プログラム」ではデータ利活用に係る研究開発が進められている。

3分野に共通する基礎基盤的研究もいくつか実施されている。

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）システムにおいて、計算資源の能力を最大限活用したプロジェクトが実施されている。例えば、理化学研究所計算科学研究センターでは、HPCIの本質となる情報技術の研究開発とHPCIを活用して科学や社会の課題解決と価値創造を支える研究開発が実施されている。デジタルツインを含めたシミュレーション技術の高度化に資する計算科学の先導的研究開発である。具体的には、データ同化の理論やアルゴリズム研究、学際的な取り組みなど、シミュレーションと実測データを効果的に融合させるデータ同化研究が行われている。

JST未来社会創造事業「次世代情報社会の実現」領域では、「Human centric デジタルツイン構築による新サービスの創出」が重点公募テーマに設定された。以下6課題が探索課題として採択され、2021年10月からプロジェクトが開始している。

- ・「360度映像技術による回遊・滞在するデジタルツイン空間の創出」

4 東京都、デジタルツイン実現プロジェクトウェブページ、
<https://info.tokyo-digitaltwin.metro.tokyo.lg.jp/>（2022年1月31日アクセス）

5 科学技術振興機構研究開発戦略センター「俯瞰報告書 環境・エネルギー分野（2021年）」（CRDS-FY2020-FR-01）（2021年3月）

- ・「高速ビジョンによる多次元デジタルツイン計測と再構築」
- ・「介護・医療分野における「ケア」天気予報サービスの創出」
- ・「物理的接触の遠隔化によるレジリエントな社会の実現」
- ・「ヒューマンデジタルツインを活用した身体モビリティデザイン」
- ・「多層的生体情報の統合による疾患予防システムの構築」

科学研究費助成事業では、デジタルツインに関する研究課題が年々増えてきており、特に2019年度以降、基盤研究SやAなどの大型研究が増えている。具体的には、材料開発におけるデジタルツインの活用、災害医療デジタルツイン、風洞実験デジタルツイン、建築エネルギーシステムの最適化のためのデジタルツインなどである。対象とするテーマが工学系、情報学系に加え、建築系、防災系、医療系などへの広がりを見せ、基礎研究への取り組みも少しずつ進展している。

産業総合技術研究所では、2020年にデジタルアーキテクチャ研究センターが設立された。データのオープン化とデータ連携により、サイバー空間とフィジカル空間の高度な融合を目指すなど、デジタルツインに関連する研究開発が実施されている。東京大学人工物工学研究センターや東京理科大学デジタルツインラボラトリなど、大学や国研など拠点型でのデジタルツイン研究開発もここ数年での展開が見られている。

以上を踏まえて、日本におけるデジタルツイン関連の研究開発課題を図4-2-1に示した。

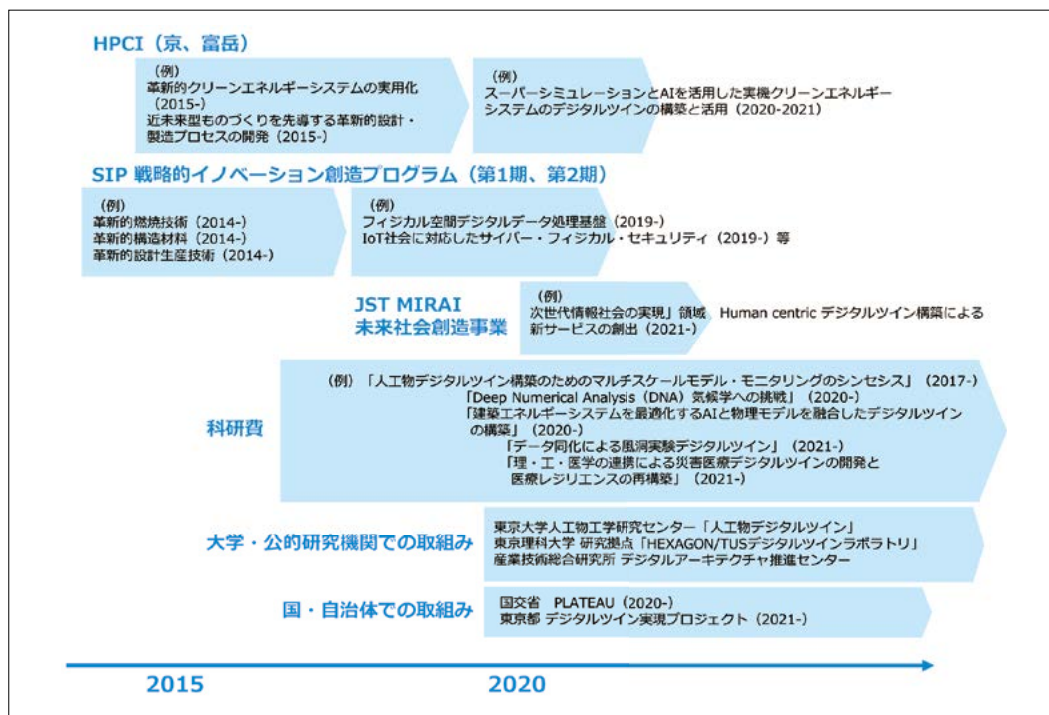


図4-2-1 日本におけるデジタルツイン関連の研究開発課題

5 | 分野別の研究動向と注力技術領域

5.1 製造分野

持続可能な社会や循環型社会の実現への貢献、国内産業の底上げや競争力強化を目的とした政策やイニシアチブが各国で示されている。また DX あるいはスマートマニュファクチャリングの実現が急務とされており、これらに関する研究開発が推進されている。

製造分野においてデジタルツインは、製造技術の高度化に寄与する CPS 技術のひとつとして位置付けられている。CPS 技術さらにシミュレーション基盤技術としてのデジタルツインの高度化に対し、製造分野での研究開発は大きな役割を果たしている。例えば、欧州の Horizon 2020（CPS 分野）、ドイツの Plattform Industrie 4.0、米国の Manufacturing USA と NSF（CPS 分野）などが挙げられる。政策として、サプライチェーンを含めた製造プロセスの効率化や LCA 的観点からのエネルギー消費量削減という目標が掲げられており、これらに貢献する CPS 技術開発が推進されている。

製造分野における各国の注力技術領域および課題を表 5-1-1 に示す。

表 5-1-1 製造分野における各国の注力技術領域と課題

国・地域	米国	欧州			中国
		EU	ドイツ	英国	
資金配分機関等	・ DOE ・ NSF	・ Horizon 2020 ・ Horizon Europe	・ BMBF ・ 各州政府	・ Innovate UK	・ 中央政府、各省庁、地方政府
注力技術分野	・ 相互運用が可能なプラットフォームの構築 ・ 積層造形、材料分野を中心とした製造プロセスのモデリング	・ 製造プロセスのモデリングによるエネルギー消費量削減	・ プラットフォーム構築、ミドルウェア等の開発 ・ 材料等の製造プロセスのモデリング	・ 製造プロセスのモデリング	・ データ収集、モデリング、プラットフォーム構築に必要な基盤技術
課題	・ 相互運用性の整備 ・ 既存のデジタルソリューションのスケールアップには、線形比例してコストがかかる	・ CPS 構築による生産性向上 ・ エネルギー消費量削減に向けたセキュリティ等のシステム技術開発	・ データの一元管理の実現、それによる機器間の相互運用性の整備	・ デジタルツインベースの機器制御手法の確立 ・ 特定の機器やユースケースに対しての実証	・ 標準化等による相互運用性の整備

共通する注力技術領域として、以下が挙げられる。

- ・ モデリング（データ分析、予測、シミュレーションを含む）
- ・ プラットフォーム（標準化に向けた動きを含む）
- ・ セキュリティ

モデリングの対象は、製造プロセス全般あるいは製品・部品・部素材（自動車、タービンブレード、積層造形のための3Dモデリング、材料など）など多岐にわたる。モデリングと共通プラットフォームの構築、標準化に注力されており、またセキュリティも重要な技術領域となっている。

共通する課題としては、相互運用性の整備が挙げられる。データ収集・分析、モデリング・シミュレーション、シミュレーション結果のフィードバックという一連の流れの中で、データの活用範囲を広げ、機械間やシステム間さらにはサプライチェーン全体での相互運用性の実現が求められている。

「Industrie4.0」の2030年社会実装に向けて、自律性、相互運用性、持続可能性という3つの戦略的行動分野が設定されており、これらは製造分野におけるデジタルツインの大きな方向性と考えられる。3.2.2で紹介したホワイトペーパー「デジタルツインおよび資産管理シェル概念とアプリケーション」では、資産管理シェル（AAS：Asset Administration Shell）が相互運用性を実現する中心概念とされている。さらに、分散型システムモデル、AI、標準化、デジタルツインの規制の枠組みが必要とされている。

5.2 エネルギー・都市分野

エネルギー分野では、カーボンニュートラル社会の実現に向けた取り組みが行われている。その動きの中で、エネルギー消費の可視化・最適化に寄与する技術としてデジタルツインが注目されている。また、エネルギー関連機器の開発や風力発電等の運用などエネルギー生産へデジタルツインを活用する研究事例もいくつかある。

都市分野では、スマートシティと呼ばれる都市運営をデジタル化する動きが世界的に広がっており、その一環として都市の3Dモデル（デジタルツイン）の構築が進んでいる。スマートシティ関連の取り組みは世界的に数多く存在するが、大半は都市の3Dモデルを構築する段階に留まっている。防災分野のシミュレーション・シナリオ構築、都市インフラの分析・計画立案、公共交通機関のリアルタイムモニタリング・最適化、環境モニタリングと環境対策など、都市デジタルツインに期待される役割は大きい。しかし、現時点では、交通システム、熱・電力・水供給システム等の特定のアプリケーションでデジタルツインの利用が始まった段階である。建設分野においてはBIM（Building Information Modeling）をはじめとする多様なデータをデジタルツインとして統合・構築し、建設プロセスの効率化を目指す研究開発が進められているが、アプリケーションの一つとも位置付けられる。

エネルギー・都市分野における各国の注力技術領域および課題を表5-2-1に示す。

表5-2-1 エネルギー・都市分野における各国の注力技術領域と課題

国・地域	米国	欧州			中国
		EU	ドイツ	英国	
資金配分機関等	・ ARPA-E ・ NSF	・ Horizon 2020 ・ Horizon Europe	・ 連邦政府 ・ 各州政府	・ Innovate UK ・ EPSRC ・ 財務省	・ 地方政府（省・市）等
注力技術分野	・ 都市（交通、建築物）、航空機、原子力発電を中心としたモデリング ・ AIのモデル組込、自動化への活用	・ セキュリティ ・ 都市（建築物）、建設プロセス、航空機、風力発電等のモデリング	・ デジタルスマートシティエコシステムの設計開発	・ 都市（インフラ）、航空機を中心としたモデリング	・ データ収集、モデリング、プラットフォーム構築に必要な基盤技術
課題	・ エネルギー消費量削減、次世代発電技術の確立に向けたモデリング技術の向上	・ エネルギー消費量削減に向けたモデリング技術の向上	・ 複雑なデジタルツインシステムに障害が起きた場合、都市生活に深刻な影響を与える可能性がある	・ デジタルツイン同士の接続 ・ デジタルツインを活用したビジネスモデル、コンセプトの探索	・ 目的・方向性の不明なプロジェクトが乱立 ・ 既存地理情報プラットフォームの統合が困難 ・ 基礎研究の深化と産業界の協力

共通する注力技術領域として、以下が挙げられる。

- ・ モデリング（データ分析、予測、シミュレーションを含む）
- ・ セキュリティ

モデリングの対象は、都市、交通、建築物、建築プロセス、航空機、風力発電等である。AIを活用したモデリングやエージェント・ベース・モデル（人や車が含まれる場合）なども開発されつつある。

共通する課題としては、エネルギー消費の削減に向けたモデリング技術の向上やデジタルツイン同士の接続が挙げられる。

フラウンホーファー研究機構 IESE より2021年にホワイトペーパー「スマートシティのためのデジタルツイン—期待と挑戦の狭間で—」が発行された。広い意味での都市計画のシナリオ構築をサポートする技術としてデジタルツインを位置付け、これからの10年で多くの都市がデジタルツインを活用するビジョンを描いた（図5-2-1）。インフラの予知・保全、資源効率の向上、リスクマネジメントの向上、意思決定の改善などデジタルツインを活用するメリットは幅広いとしながら、これから3年程度は概念実証や実証試験が必要な段階であることが示された。また、相互運用性をどのように実現させるのか、自動化された意思決定プロセスがもたらす影響の可能性など課題も多いとしている。デジタルツインの構想や運用に市民はどのように関わるべきか、自治体などにおける人材育成も含めた議論も必要であるとしている。

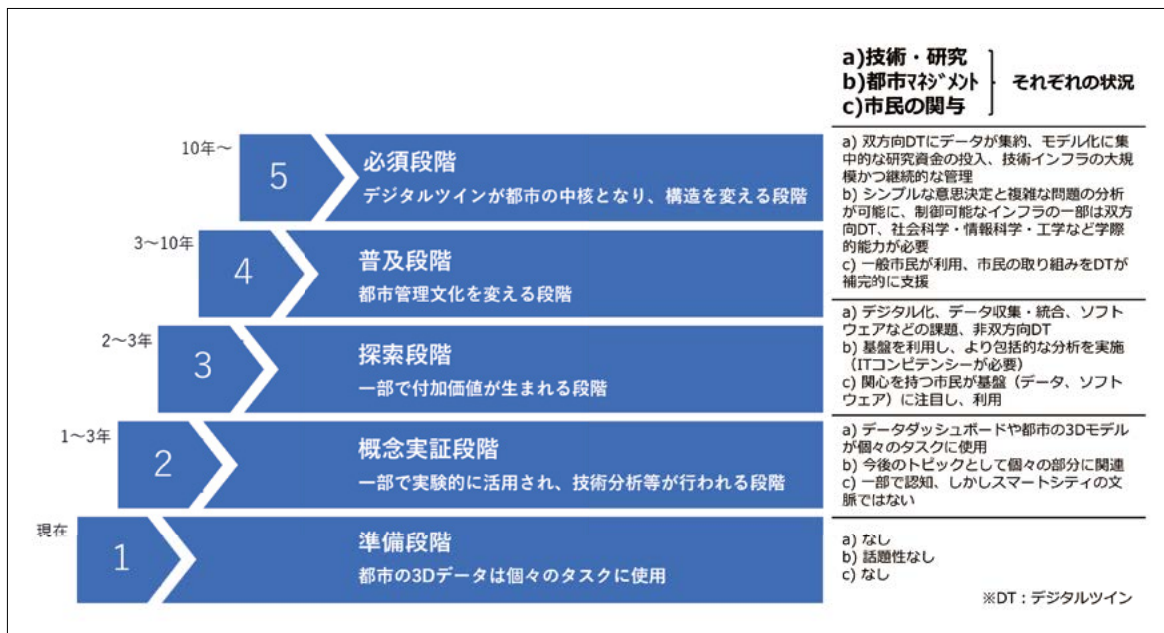


図5-2-1 都市デジタルツインの発展5段階

5.3 気象・気候分野

気象・気候分野では、気象予報や気候変動予測の高度化のためにシミュレーションに関する研究開発が長年行われている。1992年には米国副大統領（当時）のAl Goreが、気象やエネルギーなど社会利益分野へ貢献するため、地球全体のインタラクティブなデジタルレプリカの構築が必要として「Digital Earth」を提唱した。2005年には第3回地球観測サミットで地球観測に関する政府間会合（GEO：Group on Earth Observations）が設立された。地球観測システム（GEOSS：Global Earth Observation System of Systems）の構築に向けて、現在、100を超える政府および各種機関のパートナーシップの下、各国で研究開発が推進されている。また、1980年に設立された世界気候計画（WCRP）は、地球温暖化予測に関する国際的なプロジェクトであり、IOC-UNESCOやICSU（国際科学会議、International Council for Science）、WMO（世界気象機関、World Meteorological Organization）などから資金が拠出されている。WCRPの戦略計画（2019～2028年）には活動計画のひとつとして「Digital Earth」が掲げられている¹。そこでは、グローバル結合超高解像度モデリング、気候に関するデータ同化、地域デジタル地球システムに関する研究開発が課題とされている。

2021年から開始したEUの「Destination Earth」は、自然現象や関連する人間の活動の観測、モデル化、シミュレーションによって地球の超高解像度デジタルツインモデルを開発するイニシアチブである。そこでは、オープンなシミュレーションプラットフォーム、分散データベース、デジタルツインの3つが主要コンポーネントとして位置付けられている。自然災害、気候変動適応、海洋、生物多様性など様々な領域のテーマ別にデジタルツインが構築され、これらの統合による地球システム全体のデジタルツイン構築が目指されている。

¹ WCRPウェブページ、
<https://www.wcrp-climate.org/digital-earths>（2022年1月31日アクセス）

気象・気候における各国の注力技術領域および課題を表 5-3-1 に示す。

表 5-3-1 気象・気候分野における各国の注力技術領域と課題

国・地域	世界全体	欧州	豪州
資金配分 機関等	・ GEO ・ IOC-UNESCO ・ ICSU ・ WMO	・ Digital Europe Program ・ Horizon Europe ・ Recovery and Resilience Fund Plans	・ Geoscience Australia
注力技術分野	・ 地球観測システム（GEOSS）	・ 個別のモデリング（自然災害、気象変動、海洋、生態系等） ・ オープンシミュレーションプラットフォーム構築	・ データ収集（地球観測データ収集、オープンアクセスのためのデータ基盤構築） ・ 自然災害等のモデリング
課題	・ モデリングプログラムの更なる開発 ・ データ収集、データ標準化、データの質の向上 ・ データアクセスの向上、分析用ツールの開発・実装	・ 環境問題への対応、自然災害の予測に向けたモデリング技術の向上	—

共通する注力技術領域として、以下が挙げられる。

- ・ モデリング（データ分析、予測、シミュレーションを含む）
- ・ プラットフォーム

「Destination Earth」では、2021 年からの 10 年間で 3 つのフェーズに分け、2024 年までにオープンコアのデジタルプラットフォームと自然災害と気候変動適応のデジタルツインを構築、2027 年までに海洋、生物多様性、スマートシティなどのデジタルツインを構築、それらをプラットフォームに統合し、2030 年までに地球の「完全な」デジタルレプリカを作成することとしている。デジタルツインにより、自然災害とそれに伴う社会経済危機を予測し、大規模な経済不況を回避することや、より持続可能な開発のためのシナリオを開発し、検証することが可能とされている。フィジカル空間の観測データとサイバー空間の数値計算、予測・影響評価を行い、フィジカル空間にフィードバックし、デジタルツインによる効果的な意思決定の実現が目指されている。

5.4 分野別注力技術領域のまとめ

5.1～5.3 で述べた各分野の注力技術領域の結果を、2025 年頃までの短期的に取り組んでいる技術領域と 2030 年頃までの中長期的に取り組んでいる技術領域に分けて表 5-4-1 に整理した。また、分野に共通して見られた技術領域を共通基盤として別途整理した。

表5-4-1 各分野における短期的・中長期的に取り組んでいる技術領域

分野	短期的に取り組んでいる技術領域 (～2025年頃)	中長期的に取り組んでいる技術領域 (～2030年頃)
(A) 製造分野	■モデリング ✓ 積層造形(3Dプリンタ) ✓ 材料	■製造プロセス全体のモデリング(※コンセプト)
(B) エネルギー・都市分野	■都市3Dデータの構築 ■モデリング ✓ 都市全般(交通、建築物、電力、海洋、農業等) ✓ 建設プロセス ✓ 航空機 ✓ 発電	■各モデルの統合(※コンセプト) ■次世代エネルギーシステム開発 ✓ 原子力発電システムのモデリング・実験
(C) 気象・気候分野	■モデリング ✓ 自然災害 ✓ 気候変動 ✓ 生態系	■各モデルの統合(※コンセプト)
共通基盤	■プラットフォーム構築(データ連携) ✓ データ標準化 ✓ データー元管理 ✓ 相互運用性の実現 (※各分野共通のテーマ)	■自動化 ✓ ロボティクス ✓ 自己組織化モデル ■インタフェース ✓ xR(拡張現実、仮想現実) ✓ 遠隔操作ロボット ✓ 自然言語処理 ■AI ✓ 機械学習モデル ✓ 自己学習エッジ処理 ✓ データの意味理解 ■セキュリティ

2025年頃までを見据えて短期的に取り組んでいる技術領域としてはいずれの分野でもモデリングが共通して挙げられた。2030年頃までの中長期的技術領域としては、個々のモデルの統合化が共通して見られた。例えば、製造分野ではサプライチェーンを含めた製造プロセス全体のモデリングがコンセプトとして提示されている。エネルギー・都市分野では、都市の構成要素を統合したモデリング、気象・気候分野では、自然災害・気候変動・生態系などのデジタルツインを統合したデジタルアース構築がコンセプトとして提示されている。

共通基盤として各分野に共通して見られた注力技術領域には、以下があった。

- ・プラットフォーム(データ連携、データー元管理、データ標準化)
- ・システム自動化(ロボティクス、自己組織化モデル)
- ・インタフェース(xR(拡張現実、仮想現実)、遠隔操作ロボット、自然言語処理)
- ・AI(機械学習モデル、自己学習、エッジ処理、データの意味理解)
- ・セキュリティ

これらを踏まえたデジタルツイン開発のタイムラインを図5-4-1に示した。

製造分野では、2030年に向けて、自律性・持続可能性・相互接続性を有したデジタルツインを実現する研究戦略が示されている。都市分野では、2030年に向けて、都市デジタルツインの開発が普及段階から必須段階に移行するものとして位置付けられている。気象・気候分野では、2030年を目指した地球全体のデジタルツイン開発が目指されている。Horizon EuropeのWork Programでは、エネルギーフレキシブルな産

業プロセスの構築、エネルギーマネジメントやモビリティマネジメントなどのシナリオ構築に、デジタルツインがひとつの技術として活用されることが示されている。分野に共通して、より包括的で自律的なデジタルツインの開発が目指されている方向と示唆される。

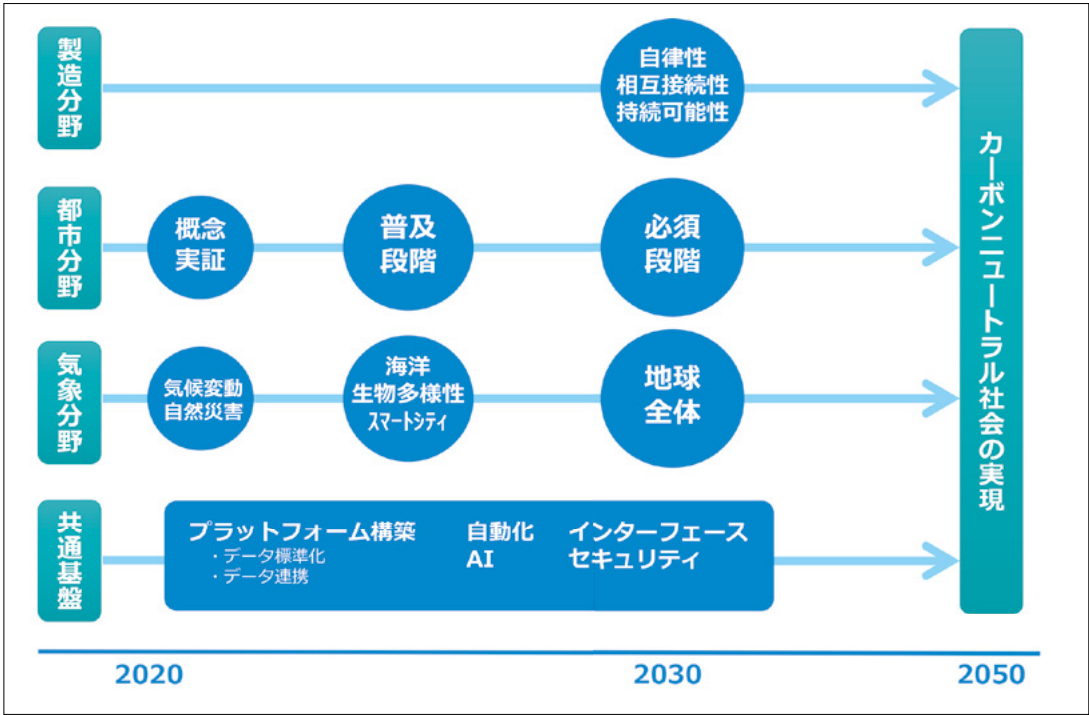


図 5-4-1 各分野におけるデジタルツイン開発のタイムライン

5.5 共通基盤に関する技術領域

各国はいずれの分野でもモデリングを中心とした研究開発に注力していることが分かった。しかしデジタルツイン全体を考えるとモデリングの高度化だけでは十分でなく、5.4で示したような共通基盤に係る研究開発も重要になる。そこで本節ではモデリングの高度化を支える共通基盤についての研究開発課題を概観する。具体的にはモデリング高度化の視点からデジタルツインの今後の課題を整理している総説よりその概要を紹介する (Adil *et al.*, 2020) ²。

なおデジタルツインの構成要素は、データ・モデル・インターフェースの3つである (図 5-5-1)。

2 Adil Rasheed et. al, IEEE Access, Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective, 2020

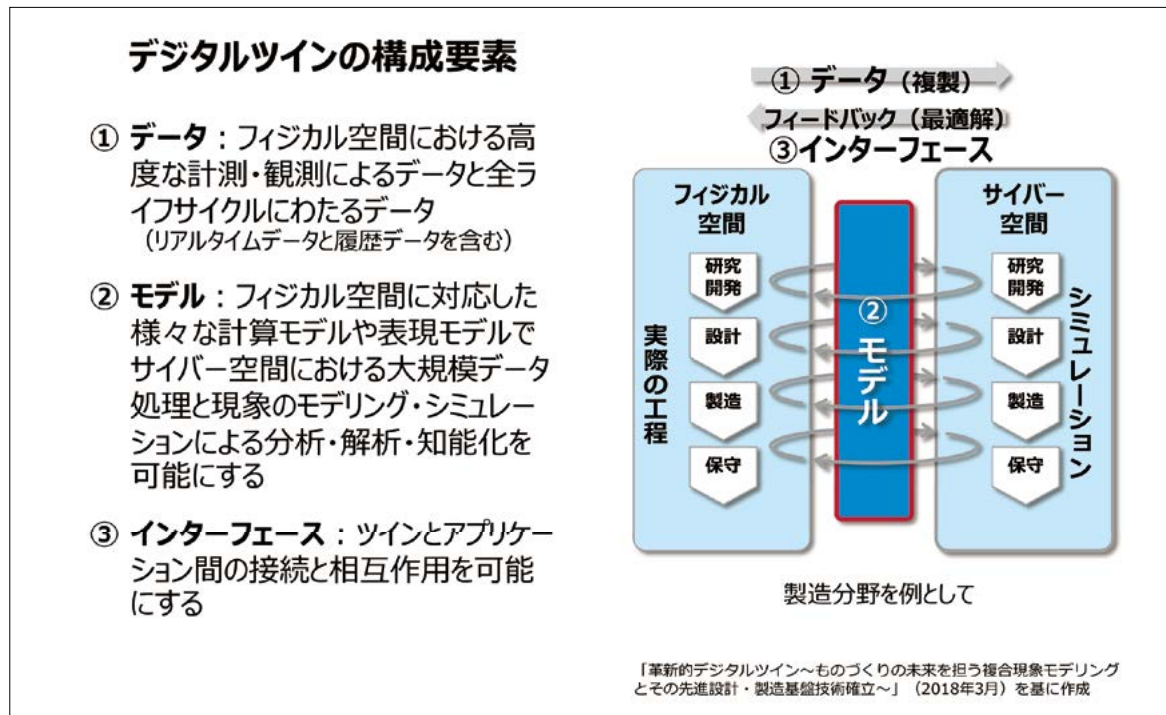


図 5-5-1 デジタルツインの構成要素

データとは、フィジカル空間における高度な計測・観測によるデータおよび全ライフサイクルにわたるデータを指し、例えば製造分野であれば、設計データ、製造データ、保守データ、取引データなどが含まれる。デジタルツイン構築にはこれらのデータの収集、処理、保存、管理など、マスターデータの概念をどのようにするか重要である。

モデルとは、フィジカル空間に対応した様々な計算モデルや表現モデルを指し、物理モデル、統計モデル、制御モデル、機械学習モデル、幾何学的・材料的モデル（CAD、CAEなどのCAxモデル）、可視化モデル（3Dシミュレーション、VR/AR/MR）などが含まれる。これらのモデルは、サイバー空間における大規模データ処理と現象のモデル化・シミュレーションによる分析・解析・知能化を可能とする。

インターフェースは、デジタルツインとアプリケーション間の接続と相互作用を可能にする。これらの構成要素によって、フィジカル空間における状態や動作をサイバー空間においてシミュレーション、予測することが可能となり、フィジカル空間に対して最適解を提供することができる。これら構成要素は製造分野、都市・エネルギー分野、気象・気候分野に共通する。

Adilらの論文³によると、デジタルツインの高度化のためには8つの課題がある。主にデータに関わる課題として、①データのリアルタイム通信とデータ管理、②データ品質データのプライバシー・セキュリティが挙げられる。主にモデルに関わる課題として、③リアルタイムモデリング、④継続的なモデル更新や未知部分のモデリング、⑤物理的なリアリティや将来予測が挙げられる。主にインターフェースに関わる課題として、⑥意思決定の透明性や解釈可能性、⑦物理資産とのインタラクションが挙げられる。また、これらを支える基盤技術として⑧大規模計算が挙げられる。

3 Adil Rasheed et. al, IEEE Access, Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective, 2020

モデルはデータやインタフェースを繋ぐ技術領域として、大きな役割を果たしており、それゆえ各国が重要な技術領域として注力している。モデルに関しては、以下の要素技術・研究テーマに着目する必要がある。

- ・ハイブリッド解析・モデリング（物理ベースモデリングとデータ駆動型モデリングの融合）
- ・高忠実度物理ベースモデリング
- ・低次元化モデリング
- ・データ同化

また、データ基盤であるプラットフォームやデータ収集におけるセキュリティ、さらには3つの分野を支える計算機インフラについても検討する必要性が示唆される。

以上を踏まえ、①～⑧の課題とその解決に資する要素技術・研究テーマについてデジタルツインの3つの構成要素との関係を図5-5-2に示した。

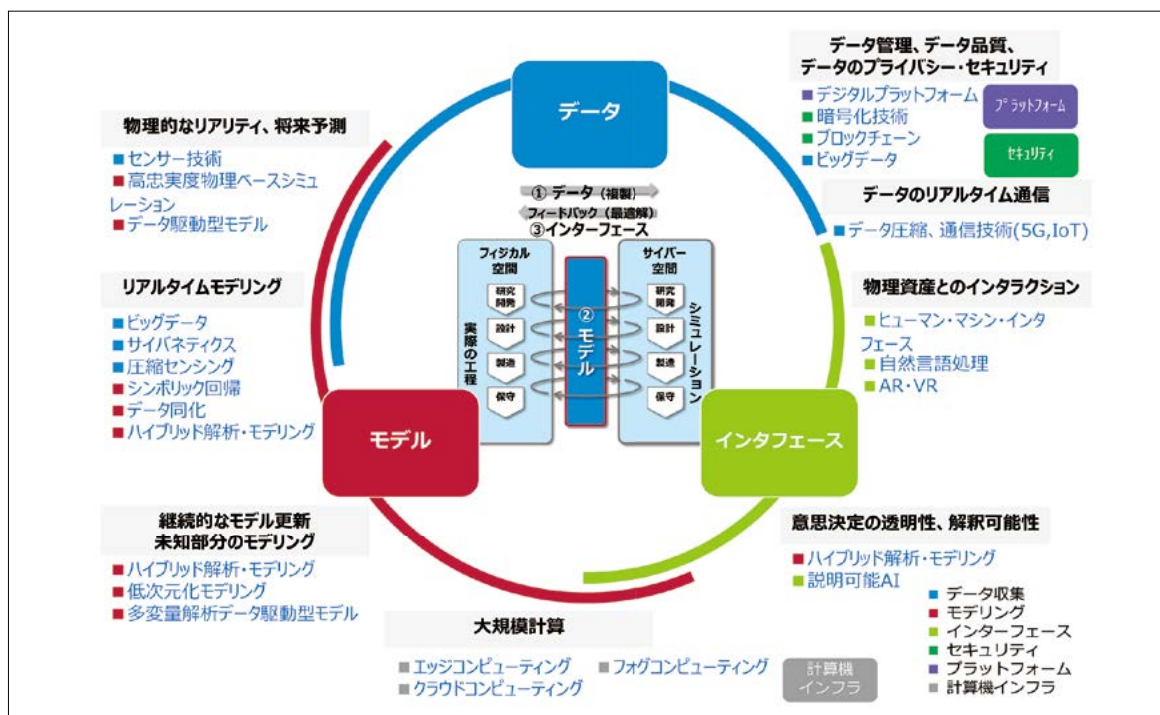


図5-5-2 デジタルツインの構成要素と8つの課題

6 | まとめ

6.1 デジタルツイン構築・活用のフェーズ

今回の調査から、デジタルツイン構築・活用のフェーズを4段階に整理した（図6-1-1）。

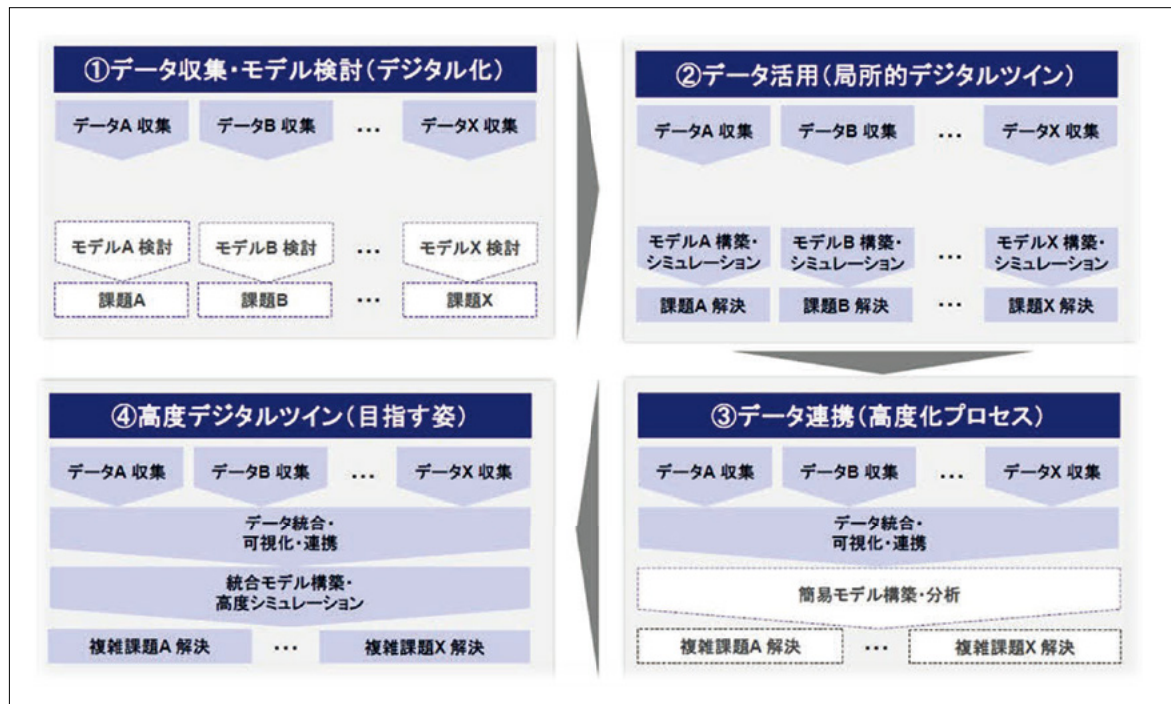


図6-1-1 デジタルツイン構築・活用のフェーズ

① データ収集 ⇒ デジタルツインには含めず、一般的にはデジタル化と捉える

課題解決に向けたモデル検討の初期段階で、データを収集し、デジタル化を進めている段階を指す。デジタルツインには含めず、一般的にはデジタル化と捉える。この段階から③を見据え、データを一元管理するケースもある。

② データ活用 ⇒ 局所的デジタルツイン

特定の小領域に限定されるが、データ活用が進み、予測まで可能なデジタルツインが構築された段階であり、局所的デジタルツインと呼ぶことができる。それぞれの課題に対して、収集するデータ、モデル、シミュレーション手法を個別に検討している。

③ データ統合 ⇒ 包括的デジタルツイン

データ統合が進み、膨大なデータを人間が理解できる形態で可視化し、それをモデル構築に反映している段階である。複雑事象を捉えることができるデジタルツインが構築された段階であり、包括的デジタルツインと呼ぶことができる。デジタルツインによって複雑課題の解決に資する意思決定の支援が可能となる。

④ モデル高度化 ⇒ 自律的デジタルツイン

モデル統合や高度化が進み、デジタルツインを活用して複数の複雑事象を捉え、複雑課題が解決できる段階である。意思決定の自動化によって、自律的に機能するデジタルツイン（自律的デジタルツイン）であり、デジタルツイン開発の目指すべき方向性として示されている。

デジタルツイン構築・活用のフェーズを進めるには、①の段階において、データ活用のコンセプトを明確にし、②の段階において、コンセプトに沿ったモデルの検討やモデリングの標準的なアプローチ方法確立することが必要である。③あるいは④の段階に向けては、相互運用の実現が一番大きな課題であり、各国・各分野において研究開発が多く実施されている。例えば、予測の高精度化とモデル解釈可能性の両立を目指す研究や、説明可能AIやAIを活用したモデル高度化に関する研究などが含まれる。また並行して、プラットフォーム構築やデータ標準化の推進も必要となる。

図6-1-2にデジタルツイン・構築のフェーズと各国における代表的なプロジェクトとの関係性を示した。製造分野では、米国のCESMIIやドイツのBasysやTeDZ等のプロジェクトで、製造プロセス全体における自律的なデジタルツイン構築を目指した取り組みが進んでいる。なお、特定の製品開発等限られた範囲では既に包括的なデジタルツイン開発に達していると言える。エネルギー分野では米国のGEMINA等においてデータ活用が進み、局所的なデジタルツインの構築が行われている。都市分野では、大半のスマートシティ関連の取り組みはデジタル化の段階にある。Virtual Singaporeでは局所的デジタルツインの段階、建築物レベルでは包括的デジタルツインの段階と言える。気象・気候分野では欧州のDestination Earth等において局所的なデジタルツイン構築が進んでいる。

日本において、製造分野では、SIP等にてレーザー加工システムやマテリアル開発のためのデジタルツイン構築に取り組んでいる。エッジに重点を置いたプラットフォーム開発やサプライチェーン全体を守るセキュリティ対策基盤など、Society5.0実現に向けたデジタルツインの社会実装にも取り組んでいる。エネルギー・都市分野では、PLATEAU等にて、3D都市データ整備、データ標準化、オープンデータ化が実施され、ユースケース開発にも着手されている。気象・気候分野では、高精度デジタルツインの構築に向けた取り組みは文科省の研究開発プログラムやスーパーコンピュータ「富岳」を活用した研究開発等を通じて進められている。

欧米ではデジタルツインを含むCPS技術分野をあらゆる産業を支える基盤技術として位置付けて、長期的な研究開発を支援している。例えば、欧州ではHorizon 2020やHorizon Europeにて、エネルギーフレキシブルな産業プロセスの構築、エネルギーマネジメント・モビリティマネジメントといったミッション実現に向けた技術のひとつとしてデジタルツインが位置付けられている。そしてCPS技術の高度化というコンテキストの中にデジタルツイン開発を位置付け、長期的な研究開発が実施されている。米国ではNSFにてCPS技術を基盤技術分野として位置付け、長期的なファンディングプログラムが形成されている。CESMII等のManufacturing USAとも連動し、あらゆる産業への応用が目指されている。一方、日本ではデジタルツインがSociety5.0実現に向けた社会基盤として位置付けられているが、現時点ではデジタル化を促進させるデータ基盤としての意味合いが強い。デジタルツインの構成要素であるモデルやインタフェースにも複合的に取り組むことで、サイバー空間とフィジカル空間を融合させ、新たな価値を創出していくことが今後のデジタルツインの開発に期待されている。

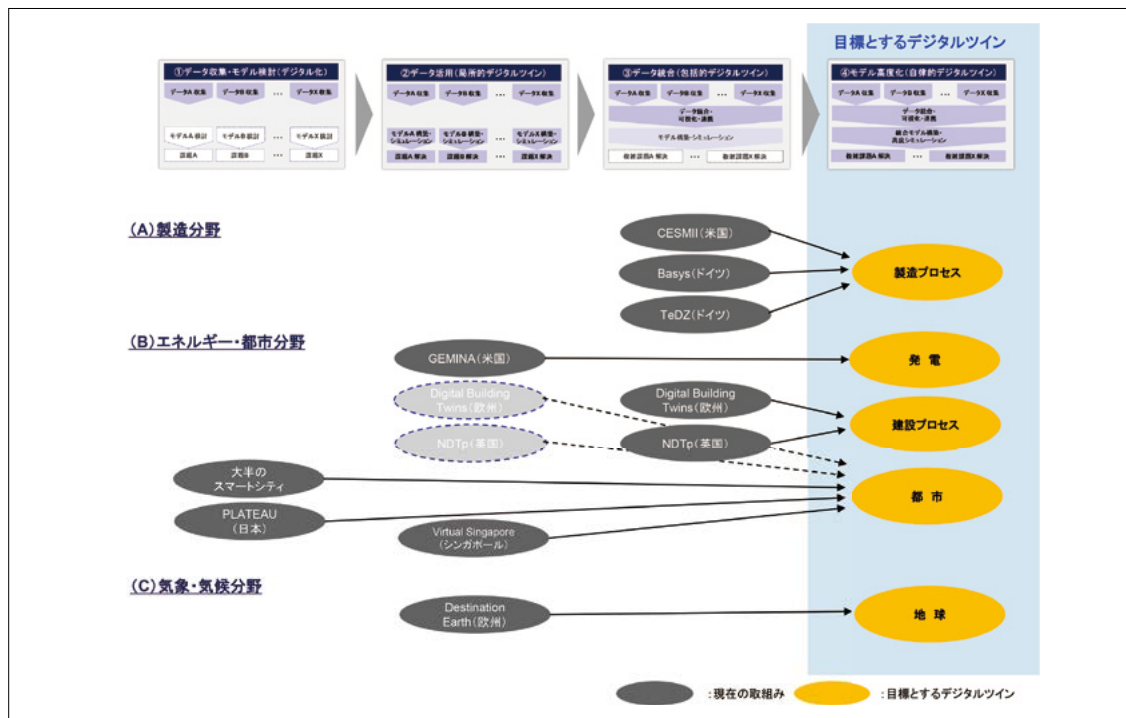


図6-1-2 デジタルツイン構築・活用のフェーズと代表的なプロジェクト

6.2 今後の研究開発に向けて

デジタルツインとは、フィジカル空間における高度な計測・観測によるデータを基に、大規模データ処理と現象のモデリングによってサイバー空間に仮想的に複製し、将来発生する事象の予測を可能とするシミュレーション技術である。複雑なシステムをあらゆる側面から包括的に表現し、将来起こり得る様々な事象を予測するというデジタルツインの本質は、製造分野、都市・エネルギー分野、気象・気候分野に共通する概念である。

カーボンニュートラル社会や循環型社会の実現に向けて、製造分野に限らず社会全体の本質的な転換が求められている現在、デジタルツインはSociety5.0実現に向けた社会基盤として位置付けられている。それは社会という複雑なシステムをシミュレーションし、フィジカル空間とサイバー空間を融合させながら、複雑な問題解決に必要とされる情報を適切に見いだすためである。複雑な現象のモデル化、そしてその検証やデジタルツインから得られた洞察をフィジカル空間へフィードバックすることはデジタルツインの根幹である。今回の調査では、これに資する技術領域、特にモデルに関する研究開発に各分野のプロジェクトが注力していることが分かった。また、米国のCESMIIやドイツのBasysやTeDZ等、製造分野のデジタルツイン研究開発が他分野に比べて進んでおり、全体を牽引している構図であると考えられた。そしてNSFやHorizon 2020におけるCPS技術分野の研究開発がこれらを下支えするより大きなテーマになっている可能性が考えられた。

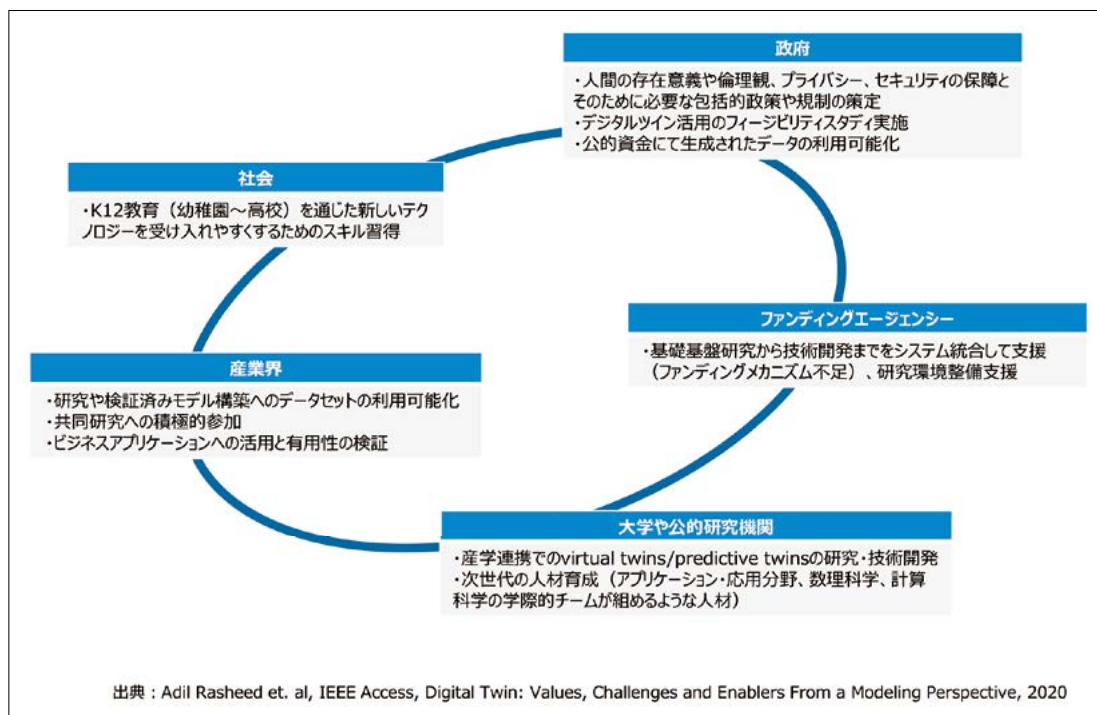


図6-2-1 デジタルツイン高度化に向けたステークホルダーの果たすべき役割

図6-2-1にデジタルツインのさらなる発展に向けた研究費配分機関、大学や公的研究機関等が果たすべき役割を示した。研究費配分機関としては、基盤研究から技術開発までの包括的な支援を行うことが重要であり、特にファンディングメカニズム構築が必要となる。例えば米国でのNSFとManufacturing USAとの連携や、英国でのEPSCRでの取り組み事例などが参考になる。また、ドイツのフラウンホーファー研究機構では、自律性・持続可能性・相互接続性を有したデジタルツインの実現に向けた研究戦略を示すなど、政府や公的研究機関が目指す方向を示し、公的研究機関がその実現に向けてコーディネーター的役割を果たしている。大学や公的研究機関では、産学連携での研究や技術開発とともに人材育成を行うことも重要であり、関連する取り組み事例が見られた。

本調査では主要国における研究開発プログラム・プロジェクトの事例収集・分析を中心に行った。これらを通じてデジタルツインに係る研究開発の最新動向を横断的に把握することができたが、個々の深掘りは必ずしも十分に行うことができていない。特に以下の点については、各分野におけるデジタルツインの高度化や社会実装を目指すにあたり今後必要となる課題であり、さらなる検討が必要と考えられる。

- ・ デジタルツイン構築・活用フェーズを進める上で必要となる課題の深掘り（例：各分野で進行中の国内デジタルツイン関連研究開発プロジェクトを基に、それらを一段上のデジタルツイン構築・活用フェーズに発展させる上で必要な課題の深掘り）
- ・ 個別モデル間の相互運用性を高めるために必要な研究開発テーマ・技術課題の深掘り（例：物理ベースモデリングとデータ駆動型モデリングの融合、低次元化モデリング）
- ・ Society5.0の実現に資するデジタルツインの構築・活用に向けた国内のステークホルダー間連携や、研究開発エコシステム構築に必要な課題・方策の深掘り（例：欧米の先行事例を参考にした分野ごとのロードマップ検討）。

付録 海外・国内の研究開発拠点の取り組みやプロジェクトの事例

1. 日本

■文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム（高性能汎用計算機高度利用事業費補助金）¹

「富岳」を用いた成果を早期に創出することを目的としたプログラムであり、領域3「産業競争力の強化」において、「スーパーシミュレーションとAIを連携活用した実機クリーンエネルギーシステムのデジタルツインの構築と活用」が実施されている。次世代火力発電システムおよび洋上ウィンドファームを対象とし、マルチフィジクス・マルチスケール統合シミュレーションとAIを連携活用したデジタルツイン構築を目指している。エネルギーシステムの開発、設計、運用の最適化に活用することを目的に、実機レベルでのデジタルツイン実証が進められている。また、気象・気候分野では領域2「国民の生命・財産を守る取組の強化」において、「防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測」が実施されている。

■理化学研究所計算科学研究センター²

理化学研究所計算科学研究センターでは「富岳」等のHPCIを活用したシミュレーション技術の高度化が行われている。ものづくり関連では、流体、熱、構造、音、化学反応等が連成する複雑・複合現象を対象としたシミュレーション技術の高度化が実施されている。統一的数据構造に基づく統合シミュレーションフレームワークCUBEを研究・開発し、産業界への展開を目指している。2021年4月に「富岳」Society 5.0推進拠点を設置し、「富岳」によるイノベーションの創出促進を強化している。

■戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）

実施期間	2018-2022年	予算	280億円（2020年度）
技術領域	データ収集、モデリング（製造プロセス、レーザー加工機、材料、物流、積層造形）等		

内閣府総合科学技術・イノベーション会議が創設したプロジェクトで、社会的に不可欠で、日本の経済・産業競争力にとって重要な課題を、基礎研究から実用化、事業化までを見据え、一気通貫で研究開発を推進している。2014年より第1期を開始し、第2期ではサイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させるサイバーフィジカルシステム（CPS）の構築を目指した研究開発テーマが多く実施されている。

例えば、「フィジカルデータ空間デジタルデータ処理基盤」では、Society 5.0の中核基盤技術として、従来と比較してIoTソリューションの開発期間または開発費用を1/10以下に削減するプラットフォーム開発を他国に先駆けて実施している。プラットフォーム開発において、クラウドベースシステムでは実現不可能なリアルタイム性を重視しており、エッジに関する技術開発が実施されている。データ収集技術としてセンサ近傍処理に必要な電力を1/5以下に削減するなど、従来設置できなかった環境での計測を可能にするための調停消費電力IoTチップと革新的なセンサの技術開発が行われている。2022年度にコンソーシアム設立し、プラットフォームの展開を目指している。

- 1 HPCI広報サイト富岳百景,「富岳」成果創出加速プログラム,
https://fugaku100kei.jp/fugaku/promoting_research.html（2022年1月31日アクセス）
- 2 理化学研究所計算科学研究センター ウェブページ,
<https://www.r-ccs.riken.jp/>（2022年1月31日アクセス）

代表的なプロジェクト

プロジェクト	実施期間	概要
フィジカル空間デジタルデータ処理基盤	2018-2022	■ リアルタイム性、制御性、超低消費電力性等に重点を置いたハードウェア技術やシステム化によるCPS構築 ■ エッジに重点をおいたプラットフォーム開発・社会実装
IoT社会に対応したサイバー・フィジカル・セキュリティ	2018-2022	■ IoTシステム／サービス及び中小企業を含む大規模サプライチェーン全体を守る『サイバー・フィジカル・セキュリティ対策基盤』を開発
光・量子を活用したSociety 5.0 実現化技術	2018-2022	■ スマート製造を実現するためのレーザー加工機システムの研究開発 ■ Society 5.0に資するアプリケーションプログラム全体を高速化・高度化する次世代アクセラレータ基盤の研究開発。スマート製造、物流、材料、エネルギー・環境産業等における、問題の定式化、最適解法を導く基盤の構築
統合型材料開発システムによるマテリアル革命	2018-2022	■ マテリアルズインテグレーション(MI)システムの実装による材料開発の加速、産業競争力強化 ■ MIシステムを利用して、3D積層造形用の新しい合金探索、積層造形プロセスを最適化

■ JST 未来社会創造事業³

未来社会創造事業では、社会・産業ニーズ（潜在的なニーズを含む）を踏まえ、経済・社会的にインパクトのあるターゲット（出口）を明確に見据えた技術的にチャレンジングな目標を設定し、戦略的創造研究推進事業や科学研究費助成事業等の有望な成果の活用を通じて、実用化が可能かどうか見極められる段階（概念実証：POC）を目指した研究開発を実施している。「次世代情報社会の実現」領域では「Human centric デジタルツイン構築による新サービスの創出」を重点公募テーマに設定し、以下6課題が採択されている。

探索研究として採択された研究プロジェクト（全て2021年10月開始）

- ・「360度映像技術による回遊・滞在するデジタルツイン空間の創出」
- ・「高速ビジョンによる多次元デジタルツイン計測と再構築」
- ・「介護・医療分野における「ケア」天気予報サービスの創出」
- ・「物理的接触の遠隔化によるレジリエントな社会の実現」
- ・「ヒューマンデジタルツインを活用した身体モビリティデザイン」
- ・「多層的生体情報の統合による疾患予防システムの構築」

■ 産業技術総合研究所

技術領域	モデリング（製造プロセス、都市、材料）、自動化、AI、インタフェース（AR/VR、自然言語処理）
------	--

2020年にデジタルアーキテクチャ研究センターが設立された。データのオープン化とデータ連携による利活用や促進、サイバー空間とフィジカル空間の高度な融合など、デジタルツインに関連する研究開発を数多く実施している。また、2020年にインダストリアルCPS研究センターが設立され、製造業を軸とした人と協調する人工知能、ロボット、センサ等を融合したCPS研究開発が行われている。

3 JST 未来社会創造事業, 「次世代情報社会の実現」領域, <https://www.jst.go.jp/mirai/jp/program/next-info/index.html>（2022年1月31日アクセス）

主な研究センター

研究開発拠点	実施期間	概要
デジタルアーキテクチャ研究センター	2020-	■ サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合して、全ての個人や組織に新たなサービスと価値を継続的に提供する豊かな社会の実現を目指す
人間拡張研究センター	2018-	■ 人間と機械の相互作用、インターフェース(拡張現実／仮想現実、自然言語処理等)に関する人間拡張技術の研究開発を行うセンター ■ 人間と都市の相互作用として、スマートシティに関するデジタルツインの取り組みも実施
インダストリアルCPS研究センター	2020-	■ 製造業等の現場における人、ロボット、機器、作業環境等から構成されるシステムに関して、モデリング、センシング、計画・制御、システム設計等の技術を高度化
機能材料コンピュータショナルデザイン研究センター	—	■ 新素材開発のスピードアップを目指すために、材料機能を計算から直接的に評価するシミュレーション技術の創出 ■ データ科学、機械学習等の人工知能技術を融合し、計算材料設計(コンピュータショナルデザイン)基盤技術を構築

■ 科学研究費助成事業

デジタルツインに関する研究課題は年々増えてきており、基盤研究S～C合わせて34課題が採択されている。特に2019年度以降、基盤研究SやAなどの大型研究が増えている。また、分野も工学系、情報学系に加え、建築系などへの広がりを見せている。

2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
基盤A（情報学）										
			基盤A（応用情報学およびその関連分野）							
				基盤A（人間情報学およびその関連分野）						
				基盤A（建築学およびその関連分野）						
					基盤A（社会経済学、農業工学およびその関連分野）					
					基盤A（航空宇宙工学、船舶海洋工学およびその関連分野）					
					基盤S（工学;大区分C）					
					基盤S（工学;大区分D）					

代表的な研究プロジェクト

- ・基盤研究(S)「デジタルツイン科学で拓く100万K/s・1000万K/m・1m/s超えの結晶成長」(2021-2026年)
- ・基盤研究(S)「理・工・医学の連携による災害医療デジタルツインの開発と医療レジリエンスの再構築」(2021-2026年)

■国土交通省「Project PLATEAU」

スマートシティをはじめとするまちづくりのDXを推進するため、2020年度より「Project PLATEAU（プラトール）」として、現実の都市をサイバー空間に再現する3D都市モデルの整備・活用・オープンデータ化を推進している。2021年3月より公募で選定した全国56都市全てのオープンデータ化が完了し、一般社団法人社会基盤情報流通推進協議会が運用する「G空間情報センター」においてダウンロード可能となった⁴。今後、

4 国土交通省プレスリリース（2021年8月6日），Project PLATEU 全国56都市の3D都市モデルのオープンデータ化を完了，<https://www.mlit.go.jp/common/001418346.pdf>（2022年1月31日アクセス）

まちづくり、防災、カーボンニュートラルなどの社会課題の解決に向けて、効率的なデータ整備手法の確立、データ仕様の拡張、社会的要請の高いテーマや先進技術を取り込んだユースケースの開発等に取り組む。

■東京都デジタルツイン実現プロジェクト⁵

東京都が抱える課題の解決と都民のQOL向上を目指し、産学官一体でサイバー空間とフィジカル空間の融合による2030年の東京都デジタルツイン実現を目指している。東京都における「都市のデジタルツイン」社会実装に向けた検討会を設置し、ロードマップの策定や実証事業が計画されている。

■東京大学人工物工学研究センター⁶

東京大学人工物工学研究センター価値創成部門では、デジタルツインの考え方を拡張したデジタルトリプレットによる生産システムの提案や人工物デジタルツインによる人工物の安全・高効率な運用を目指した研究開発が実施されている。

■東京理科大学デジタルツインラボラトリ⁷

製品開発における研究開発・設計・生産技術・製造・保守・リサイクルまでの各段階の一連のデジタルツインのフローをデジタル空間に再現するデジタルスレッドの開発や活用を目指し、デジタルツイン技術の研究開発が実施されている。

2. 欧州

■ Smart Cyber-Physical Systems⁸ (Horizon 2020)

実施期間	2015-2019年	予 算	60,922,954ユーロ
技術領域	CPS プラットフォーム構築、センシング、モデリング・シミュレーション、標準化		

製造業、都市・社会インフラ、輸送機器、情報端末を始めとする様々なアプリケーションでの基盤となるCPS及びツールボックス（ライブラリなど）の開発を目指すプログラムであり、15のプロジェクトが実施された。RIA（Research & Innovation Action）では、TRL1～4を対象とし、モデリングと統合フレームワークおよびスマートで協調的でオープンなCPS開発に焦点が当てられている。IA（Innovation Action）ではCPSプラットフォーム構築を目指し、研究機関などアカデミア以外にも、Sier（System Integration）、ソフトウェア企業、システム監査・認証機関、ユーザ企業などが参画している。

5 東京都デジタルツイン実現プロジェクトウェブページ，
<https://info.tokyo-digitaltwin.metro.tokyo.lg.jp/>（2022年1月31日アクセス）

6 東京大学人工物工学研究センター，
<http://race.t.u-tokyo.ac.jp/>（2022年1月31日アクセス）

7 東京理科大学デジタルツインラボラトリ，
<https://dtlab.it.tus.ac.jp/index.html>（2022年1月31日アクセス）

8 EC Horizon 2020 programme，
<https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/smart-cyber-physical-systems>（2022年1月31日アクセス）

代表的な研究開発プロジェクト

プロジェクト	実施期間	予算額	概要
INtegrated TOol chain for model-based design of CPSs (INTO-CPS/RIA)	2015-2017	€7,956,805	■ CPSの設計のための統合ツールチェーンの開発 ■ 要件から設計、ハードウェアとソフトウェアの実現に至るまでのモデリングを支援
Trusted Apps for open CPS (TAPPS/RIA)	2015-2017	€3,885,884	■ 検証ツールを含む、CPSで用いる信頼性の高いアプリケーション開発
SAFety and secURity by design for interconnected mixed-critical cyber-physical systems (SAFURE/RIA)	2015-2018	€5,702,631	■ サイバーフィジカルシステムの安全性とセキュリティ
European Network of competencies and platforms for Enabling SME from any sector building Innovative CPS prod (EuroCPS/IA)	2015-2018	€9,127,173	■ 中小企業、主要なCPSプラットフォーム、CPSコンピテンシープロバイダー間の相乗効果を高めるデザインセンター
Integrated Modelling, Fault Management, Verification and Reliable Design Environment for Cyber-Physical Systems (IMMORTAL/RIA)	2015-2018	€3,996,652	■ CPSの障害管理、検証、および信頼性の高い設計のための統合されたクロスレイヤーモデリングベースのツールフレームワークの開発
CPS Engineering Labs - expediting and accelerating the realization of cyber-physical systems (CPSELabs/IA)	2015-2018	€7,654,030	■ CPSベースの製品、サービスを設計するエンジニアが利用する設計インフラ・設計ツール、知識データベースの開発

■ Computing technologies and engineering methods for cyber-physical systems of systems (Horizon 2020)⁹

実施期間	2019-2023年	予算	90,959,637ユーロ
技術領域	CPSプラットフォーム構築、設計・モデリング、運用・管理、セキュリティ		

CPSのためのコンピューティングシステム構築を目的としたプログラムで、16のプロジェクトが実施されている。RIA（Research & Innovation Action）では、TRL2～5を対象とし、物理的に絡み合ったシステムのためのソフトウェアとシステムデザイン、信頼性・連続性を有したCPSoS（CPS of Systems）設計・運用のためのモデル・ツール開発に焦点が当てられている。CSA（Coordination and Support Action）では組み込みコンピューティングとCPSのイノベーションコミュニティ構築が目指されている。欧州の低電力マイクロプロセッサ技術イニシアチブやECSELプログラムを補完するものなども含まれる。

⁹ EC Horizon 2020 programme, https://cordis.europa.eu/programme/id/H2020_ICT-01-2019（2022年1月31日アクセス）

代表的な研究開発プロジェクト

プロジェクト	実施期間	予算額	概要
A computing toolkit for building efficient autonomous applications leveraging humanistic intelligence (TEACHING/RIA)	2020-2022	€3,990,778	■ 信頼性の高いAIにもとづき、自律的に安全性を確保するAI-Human-CPSoS総合作用型CPSoSの開発を支援するソフトウェアとシステムの開発を行うもの
Integrated development and operations management framework for cyber-physical systems of systems under the paradigm of swarm intelligence (1-SWARM/RIA)	2020-2022	€4,997,522	■ 群知能を特徴とする堅牢なCPSoSネットワークを設計・運用するためのモジュラーフレームワークの開発
Intelligent software-UPDATE technologies for safe and secure mixed-criticality and high performance cyber physical systems (UP2DATE/RIA)	2020-2022	€3,846,290	■ 自動車や鉄道で使用されるような高度な安全性が要求されるCPSで、システムの安全性と利便性を損なわないようなソフトウェア更新方法の開発
Towards Adaptively Morphing Embedded Systems (ADMORPH/RIA)	2020-2023	€4,499,468	■ CPSの安全性を脅かす潜在的な攻撃を検出・対処・防止するためのアプローチを検討・実装・検証するもの
A Model-driven development framework for highly Parallel and EnerGy-Efficient computation supporting multi-criteria optimization (AMPERE/RIA)	2020-2022	€4,999,427	■ 多数のコンポーネントから構成されるコンピューティング・プラットフォームにおいて、競合する要件を考慮してソフトウェア・アーキテクチャを効率的に設計するための方法論とツールの開発
Boosting Widening Digital Innovation Hubs (BOWI/RIA)	2020-2023	€8,000,043	■ DIH構築
Sustainable Ecosystem for the Adoption, Ramp-up and Transfer of Emerging Electronics Solutions (SmartEEs2/IA)	2020-2022	€8,466,153	■ DIH構築
Selfsustained Cross Border Customized Cyber-physical System Experiments for Capacity Building among European Stakeholders (SMART4ALL/IA)	2020-2023	€8,436,624	■ DIH構築

■ Energy-efficient manufacturing system management (Horizon 2020)¹⁰

実施期間	2020-2024年	予算	46,084,236ユーロ
技術領域	データ統合、生産管理システムマネジメント、認証・標準化		

ライフサイクルアセスメント（LCA）とライフサイクルコスト分析（LCCA）で工場のエネルギー効率の高効率化を目指したプログラムで、IA（Innovation Action）として4つのプロジェクトが実施されている。TRL5から開始しTRL7達成を目標とし、製造プロセスに係る個々の機器の環境負荷と装置履歴データ、リアルタイムデータ、リアルタイムエネルギー予測のデータを生産管理システムに統合することを目指している。

代表的な研究開発プロジェクト

プロジェクト(代表機関)	実施期間	予算額	概要
ECOFACT (FUNDACION CARTIF (スペイン))	2020-2024	€12,314,473	■ 生産制約(時間とリソース)と環境性を考慮して、製造工程のエネルギー性能を最適化する製造制御システムを開発。
ENERMAN (CENTRO RICERCHE FIAT SCPA (イタリア))	2021-2023	€12,202,500	■ 工場からデータを収集し、製造プロセス、設備、エネルギーコストモデルを使用してエネルギー消費を予測。 ■ 生産ラインの変更がデジタルツインに基づいた予測エンジンを用いて、エネルギー消費にどう影響するかを評価。
E2COMATION (CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE (イタリア))	2020-2024	€10,560,000	■ 製造工程の環境性を考慮したエネルギー最適化を飲食産業と木工産業に実装。
DENIM (MUNSTER TECHNOLOGICAL UNIVERSITY (アイルランド))	2020-2024	€11,007,262	■ 製造工程のエネルギー使用量を自動的に監視および最適化する機能を提供。 ■ 製造工程の各段階決定が環境および経済に与える影響についてユーザーに通知する。

10 EC Horizon 2020 programme, https://cordis.europa.eu/programme/id/H2020_DT-FOF-09-2020 (2022年1月31日アクセス)

■ Digital Building Twins (Horizon 2020)¹¹

実施期間	2020-2024年	予算	5,000,000-6,000,000ユーロ/プロジェクト
技術領域	デジタルビルディングツイン		

建物またはインフラのリアルタイムデジタル表現であるデジタルビルディングツイン開発を目的としたプログラムで、RIA (Research & Innovation Action) として4つのプロジェクトが実施されている。

代表的な研究開発プロジェクト

プロジェクト(代表機関)	実施期間	予算額	概要
Ashvin(ベルリン工科大学)(ドイツ)	2020-2023	€ 5 609 858,75	■ デジタルツイン標準向けにIoTと画像技術を統合するオープンソースのデジタルツインプラットフォーム。
BIMprove(SINTEF MANUFACTURING AS(ノルウェー))	2020-2023	€ 5 593 676,25	■ 建設時にBIMに加え人や建設プロセスを統合したデジタルツインを構築する。 ■ 構築したデジタルツインで建設時のリソース割り当て、人の流れを計画し建築作業の効率を向上しながら、作業員の安全性も確保する。
BIM2TWIN(Scientific and Technical Center for Building(フランス))	2020-2024	€ 5 999 985	■ 建設プロセスのリアルタイムトレースによるBIMの改善
COGITO(HYPERTECH(CHAIPEKTEK) ANONYMOS VIOMICHANIKI EMPORIKI ETAIREIA PLIROFORIKIS KAI NEON TECHNOLOGION(ギリシア)(中小企業))	2020-2023	€ 5 907 481	■ トヨタ生産方式を建設工事に応用したリーンコンストラクションのためのデジタルツインモデルの開発。 ■ 安全、建設品質、ワークフロー管理に役立てる。

■ Destination Earth (DestinE)

実施期間	2021-2027年	予算	-
技術領域	モデリング(自然災害、気候変動、海洋、生物多様性、スマートシティ)、プラットフォーム		

ECのグリーンディールとデジタル戦略の一環として、自然現象や関連する人間の活動を観測、モデル化、シミュレーションにより、地球の高解像度デジタルツインモデル開発を目的としたイニシアティブである。Digital Europe Program、Horizon Europe、Recovery and Resilience Fund Plansなどから資金提供され、欧州宇宙機関(ESA: European Space Agency)、ヨーロッパ中期予報センター(ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)、欧州気象衛星開発機構(EUMETSAT: European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites)が主要研究機関として実施している。ESAがシステムインテグレータやコアプラットフォームの実装、ECMWFがデジタルツインの実装、EUMETSATがデータ構造やデータインテグレーションを担当している。

¹¹ EC Horizon2020 programme,
https://cordis.europa.eu/programme/id/H2020_LC-EEB-08-2020 (2022年1月31日アクセス)

ロードマップ

フェーズ	実施期間	概要
Phase 1	2021-2023	■ クラウドプラットフォームの運用開始 ■ 2デジタルツイン「Extreme Natural Disasters Digital Twin」、「The Climate Change Adaptation Digital Twin」の構築
Phase 2	2023-2025	■ 海洋、生物多様性、スマートシティ等のその他のデジタルツインをサポート ■ 運用可能なデジタルツインをプラットフォームに統合 ■ 公共セクターにサービス提供を開始
Phase 3	2025-2027+	■ プラットフォーム上の複数のデジタルツインの統合を通じ、地球システムの完全なデジタルツイン構築に向けた取り組みを開始

3. ドイツ

■ BasicSystem Industry 4.0/4.2 (BaSys 4.0/4.2) (BMBF)

実施期間	2016-2019年 (4.0) 2019-2022年 (4.2)	予 算	12,000,000ユーロ (Basys 4.0) 11,300,000ユーロ (Basys 4.2)
技術領域	プラットフォーム		

製造プロセスにおける異なるシステム・装置・アプリケーションの統合を目的とした仮想ミドルウェア開発を主眼とするプロジェクトである。フラウンホーファー研究機構 IESEが主導し、フラウンホーファー研究機構 IOSB、アーヘン工科大学に加えて、産業技術分野の14のパートナー企業が参画している。2019年から実施されている BaSys 4.2 では、コアプロジェクトとして共通基盤的なプラットフォームの技術開発と、サテライトプロジェクトとしてプラットフォームを活用した特定領域における技術開発を進めている。現状の製造業における最重要課題は、様々な機械の製造プロトコルやデータモデルが異なり、相互にコミュニケーションが取れない点にあるとしている。現在の自動化アーキテクチャはピラミッド構造で、各レイヤーに PLC (Programmable Logic Controller) が存在しており、機械間や機械群間の直接的なコミュニケーションが不可能である。資産管理シェルという概念により、機械間や機械群間の P2P (ピアツーピア) コミュニケーションの実現を目指している。

■ Leistungszentrum (Smart Production and Materials)

実施期間	2017年-	予 算	2,500,000ユーロ/年
技術領域	モデリング (製造プロセス等)		

フラウンホーファー研究機構がドイツ国内に16か所に設置する Leistungszentren (センターオブエクセレンス) の1つである。材料研究と生産プロセスのデジタル化を目的とし、2017年にザクセン州ケムニッツに、2019年にドレスデンにコンソーシアム形式で設置された。フラウンホーファー研究機構 工作機械・成形技術研究所、セラミック技術・システム研究所、材料・ビーム技術研究所、エレクトロ・ナノシステム研究所 (IWU, IKTS, IWS, ENAS) およびケムニッツ工科大学とドレスデン工科大学が参画している。中小企業への知識や技術移転を積極的に進めており、地域イノベーションエコシステムを構築している。フェーズ1～3まで計画されており、現在はフェーズ3が進行中である。フェーズ1のサブプロジェクト「F1 Virtuelles Fabrikabbild」(仮想ファクトリーイメージ) では、製品、機械、工具のメタデータを記述するための Linked Data Base という概念が作成され、時系列データベースと組み合わせることで、機械やプロセスのデータの収集と評価が可能になった。フェーズ2のサブプロジェクト「Digitaler Zwilling für Presse, Werkzeug und Prozess」(プレス、ツール、プロセスのデジタルツイン) では、金型製作における成形シミュレーションをデジタルツインで表現することにより、成形プロセスのみならず、後続のプロセスモニタリング、品質管理、メンテナンスでも一連のデータが活用可能になった。

■ HTA2.0-Hochtemperaturanwendungen¹²

実施期間	2020-2022年	予算	9,200,000ユーロ
技術領域	モデリング（積層造形、タービンブレード）		

高効率ガス火力発電所のタービンブレードの開発・製造における、デジタルツインによる積層造形プロセスの改善が目的である。ヴェルナーフォンシーメンス産業科学センター（WvSC）が主導し、連邦材料試験研究所、フラウンホーファー研究機構、ベルリン工科大学やいくつかの産業パートナーが参画している。ヨーロッパ地域開発基金（ERDF）との共同出資によるプロジェクトである。

■ Technical Infrastructure for Digital Twins（TeDZ）

実施期間	2018-2021年	予算	2,600,000ユーロ
技術領域	データ統合システム（相互運用性）		

フラウンホーファー研究機構 IOSB-INAが主導しているプロジェクトであり、ライフサイクル全体をカバーする統合システム「PLANET」を構築し、ITシステムの相互運用性の実現を目指している。統合システムを適用するデモンストレーション先として、エネルギー消費の最適化を目的としたパイロットプロジェクト「Digital Energetic Twin（DeZ）」がある。統合システムは、イーサリアム（ブロックチェーン）、ブロック記憶（IPFS：InterPlanetary File System）による分散システムモデルと、git（バージョン管理）で構成され、スケーラビリティ・可用性・守秘義務を担保している。ノルトライン＝ヴェストファーレン州イノベーション・デジタル化・エネルギー省から資金配分されている。

■ TwinGuide Project（DFG）

実施期間	2018-2021年	予算	648,000ユーロ／3年
技術領域	モデリング（流動床スプレー造粒）		

フラウンホーファー研究機構 ファクトリーオペレーション・オートメーション研究所（IFF）とハンブルク工科大学による産学官連携プロジェクトで、流動床スプレー造粒プロセス条件の予測と制御のためのインテリジェントデジタルツインの開発を行っている。

■ ヘルムホルツセンター Hereon

技術領域	モデリング（材料、製造プロセス）		
------	------------------	--	--

Joint Lab Virtual Materials Design（仮想材料設計共同ラボ）プラットフォームにて、デジタルツインを用いた金属生体材料、ナノポーラス金属、水素貯蔵システムなどの材料開発が実施されている。

■ BIM2TWIN（Horizon2020）

実施期間	2020-2024年	予算	5,999,985ユーロ
技術領域	モデリング（建築プロセス）、プラットフォーム		

¹² Hochtemperatur-Anwendungen,
<https://wvsc.berlin/forschungsprojekt-hochtemperatur-anwendungen/>（2022年1月31日アクセス）

ミュンヘン工科大学が中心となり、建設現場における材料とエネルギー消費の削減と生産性向上を目指したプロジェクトである。現状では、現場管理者の視覚的評価、経験的評価に基づき建設プロジェクト管理が行われているが、現場の実際の状況をデジタルビルディングツインプラットフォームで提供し、データに基づいた意思決定に繋げることを目指している。スペイン、フィンランド、フランスの実際の建設現場で実証・検証予定である。

4. 英国

■高付加価値製造カタパルト（High Value Manufacturing Catapult）¹³

実施期間	2011年～	予算	－
技術領域	モデリング（製造プロセス、製剤、二軸スクリー押出機）、自動化（欠陥検知）		

最初のカタパルトネットワークとして設立され、ものづくり分野において、デジタル製造をはじめとする27のキーテクノロジーをベースに、企業の製品設計・開発・スケールアップを支援している。7つのセンター（技術者2,500名、構成員3,130名）を通じて、原材料から製品の組み立てプロセスに至るまでのものづくりの工程をカバーしている。現在、2,234の商用プロジェクト、443の共同研究プロジェクトなどを実施している。運営費として、Innovate UKなどの公的資金、競争的資金、商業収入がそれぞれ約1/3ずつとなっている。

研究センター	技術キーワード(Key Technical Capability)
① Advance Forming Research Center (AFRC)	材料のキャラクタリゼーション／デジタル化及びプロセス・サプライチェーンの計画策定／鍛造・熱プロセス／薄板加工技術
② Advanced Manufacturing Research Centre (AMRC)	設計・試作／デジタル製造／軽量化／製造装置／ニア・ネットシェイプ製造
③ CPI	バイオテクノロジー／バイオセラピー／プリンテッドエレクトロニクス／マテリアル／デジタル
④ Manufacturing Technology Centre (MTC)	ロボティクス・自動化／付加製造／デジタル製造／VR／計測
⑤ National Composite Centre (NCC)	先端コンポジット材料／設計・シミュレーション／デジタル製造・自動化／材料・プロセス／計測
⑥ Nuclear Advanced Manufacturing Research Centre (Nuclear AMRC)	製造装置／接合／計測／モデリング・シミュレーション／先端アセンブリ
⑦ WMG	自律システム／先進推進システム／蓄電・蓄エネルギーデバイス／軽量材料／デジタル製造

13 High Value Manufacturing Catapult Annual Review 2020/21, <https://hvm.catapult.org.uk/wp-content/uploads/2021/08/HVM-ANNUAL-REVIEW-2021-PRINT-DIGITAL.pdf> (2022年1月31日アクセス)

代表的な研究開発プロジェクト

プロジェクト(研究センター)	実施期間	予算額	概要
PROSPECT CP (CPI)	—	—	■ 二軸スクリー押出機に焦点を当てたデジタルツインの開発 ■ 経口固形製剤の小規模開発のための特注の連続湿式造粒製造施設を構築 ■ 製造設備に取り付けたインラインセンサからの情報をもとに、製品の品質を制御することを目指したもの ■ アストラゼネカやファイザー、P & G等の製薬企業と大学が参画
Models MPP (CPI)	—	—	■ 製剤プロセスにおいて、投入材料の分配から混合、凝集から後処理までの各工程をシミュレーションするモデルを開発 ■ PROSPECT CPプロジェクトに対して、シミュレーション・ソフトを提供 ■ エジンバラ大学とシェフィールド大学と連携
future of automated visual inspection (AMRC) ※カナダのロボティクス企業であるAV&Rとの共同研究	—	—	■ 航空宇宙や医療など用いる金属部品について欠陥の検出と分類を自動化を行う自動目視検査システムを開発 ■ オペレーターを支援し、予防保守のためのリモート支援を支援する「デジタルツイン」を作成

■デジタルカタパルト (Digital Catapult)

実施期間	2013年—	予算	—
技術領域	AI、インタフェース (VR/AR、触覚)		

スタートアップと産業界をつなぎ、デジタル技術によるイノベーションを加速することを目指している。現在、80以上プロジェクトを実施しており、関連する企業・組織は3,000以上である。運営費として、Innovate UKなどの公的資金が6割強、競争的資金と商業収入がそれぞれ約2割弱となっている。ビジネス・エネルギー・産業戦略省 (BEIS) と共同で「UK Digital Twins and Cyber Physical Infrastructure National Engagement」を実施しており、デジタルツインやより広範なサイバーフィジカルインフラストラクチャについて、調査やワークショップを実施し、潜在的な価値と展開可能性について検討を行っている。

■コネクテッドプレイスカタパルト (Connected Places Catapult)

実施期間	2019年—	予算	—
技術領域	モデリング (交通、人口、ドローン空輸)		

都市、輸送、場所などを対象として、デジタル技術によるイノベーションを加速することを目指している。住環境、インフラ、意思決定、モビリティ、公共スペース、Wellbeingの6分野を対象としている。先進建設、未来の空のモビリティ、インテリジェントモビリティなどのアクセラレータープログラムを実施している。

代表的な研究開発プロジェクト

プロジェクト等	実施期間	予算	概要
Airspace of the Future (Thales UK (lead partner), Blue Bear, Altitude Angel, Inmarsat, Ocado Group, Cranfield Airport Operations, Cranfield University, Satellite Applications Catapult, Connected Places Catapult)	2021-	£ 125,000,000	■ ドローンによる空輸 ■ BEISのUK Research and Innovation(UKRI)から資金提供。 ■ 前半では机上検討を行いレポートとホワイトペーパーをリリース予定、後半はシミュレーションと実証試験を実施。 ■ 調査対象のソフトウェア技術にシミュレーションとデジタルツインが例示されているが、詳細は不明。
Synergy Prime	—	—	■ 人口予想と道路交通シミュレーションを統合し、将来のインテリジェント道路交通システムの開発を支援する。 ■ 人口予想(2018-2041年)、エージェントベースモデリング、インタラクティブシミュレーションを交通設計システムに統合する。 ■ マクロな人口予想に対して、特定のエリアの人口予想データを生成し、そこから移動に関する予測データが生成されて、道路交通のデジタルツインが生成される。
Digital Twins hub page	—	—	■ デジタルツインの概念、デジタルツインとは何か、どのように使用されているか、何に使用すべきか、何に使用できるかを調査し、ブログ等で情報発信する。 ■ 建物のデジタルツインであるABIS(Advanced Building Information System)の作成に取り組んでいる。

■ EPSRCによる基礎研究

実施期間	2017年-	予算	—
技術領域	モデリング		

EPSRCではデジタルツインの基礎研究として、「DigiTwin」や「ASiMoV」といったプロジェクトが実施されている。さらに、2021年からデジタルツイン開発と関連性が高い4つのプロジェクトが開始した。EPSRCにはデジタルツイン担当官が配置されており、デジタルツインに特化したプロジェクトだけでなく、様々な分野でデジタルツインを含むプロジェクトが実施され、人材育成（博士課程トレーニングセンター）も同時に行われている。

代表的な研究開発プロジェクト

プロジェクト等	実施期間	予算額	概要
「Digital twins for improved dynamic design (DigiTwin) シェフィールド大学	2017-2021	500万£	■ 6大学、10企業と共同で動力学向けシミュレーションのモデルを開発。特に風力発電所、原子力発電所、自動車、航空機向けの開発が中心である。 ■ サブテーマは、設計、不確実性、立証・検証、モデルの結合、下部構造テストと全体構造テストの結合制御、ハイブリッドモデルである。
Strategic Partnership in Computational Science for Advanced Simulation and Modelling of Engineering Systems(ASiMoV)エディンバラ大学	2018-2024	—	■ 先進的なガスタービンエンジンのシミュレーションとモデリング
Synergistic utilisation of Informatics and Data centric Integrity engineering(SINDRI)	2021-	—	■ EDF Energy社が主導し、プリストル大学、マンチェスター大学、インペリアル・カレッジ・ロンドン、STFCと提携して、原子力発電所などのエネルギー発生装置の部品の状態評価を行う。
Digital roads: Towards a digitised, self-monitored, and proactive road network	2021-	—	■ Costain社、Highways England社、ケンブリッジ大学による共同研究で、デジタルツインとロボットシステムを用いた道路インフラの常時監視と補修を行う。
Advancing probabilistic machine learning to deliver safer, more efficient, and predictable air traffic control	2021-	—	■ NATSとアラン・チューリング研究所による共同研究で、空域の一区間を制御するAIシステムを実地試験で実現する。
Framework for responsible adoption of Artificial Intelligence in the financial services industry (FAIR)	2021-	—	■ HSBC、アクセンチュア、アラン・チューリング研究所による共同研究で、デジタルツインなどのデジタルツールを検証・テストし、金融サービス事業者による信頼性の高いデータ主導の意思決定を向上させる。

■ University of Cambridge/National Digital Twin Program (NDTp)¹⁴

実施期間	2018年～	予算	—
技術領域	モデリング（都市インフラ、建設プロセス）、プラットフォーム		

BEISとの共同でケンブリッジ大学にCentre for Digital Built Britain (cddb) が設置された。cddbは建設向けデジタル技術の研究を行い、Building Information Modelling (BIM) 等の開発を行っている。National Digital Twin Programではデジタルツイン同士を接続したエコシステムの構築を目指し、情報管理フレームワークの開発やDigital Twin Hubの提供を行っている。

■ University of Sheffield

技術領域	モデリング（風力発電所、原子力発電所、自動車、航空機等）
------	------------------------------

EPSRCによる「DigiTwin」プロジェクトの代表研究機関であり、動力学に関するデジタルツイン用モデル開発を行っている。「DigiTwin」プロジェクトでは大学、企業と共同で動力学向けシミュレーションのモデル（風力発電所、原子力発電所、自動車、航空機等）向けを開発している。

■ Cranfield University

技術領域	モデリング（製造プロセス、航空機、自動車）、自動化（ロボティクス、自動運転）、AI、インタフェース（VR）
------	---

大学院大学で、航空学部からスタートし、工科大学を経て現在に至っている。

製造分野、航空分野が強い大学院大学であり、デジタルツイン関連の複数のセンターで、製造におけるデジタル技術、航空機・自動車のモデリング等を研究している。航空宇宙・防衛分野のBabcock International GroupとAI、デジタルツイン、拡張現実などの分野で提携し、共同研究を実施している。

主な研究センター

センター名	研究テーマ概要
Centre for Digital Engineering and Manufacturing (CDEM)	■ 製造全体のデジタル化、デジタルツイン、AI、仮想現実の研究。 ■ マルチスケールモデリング、ライフサイクルシミュレーション、工場/プロセスシミュレーション、分子動力学法などをモデルの研究。
Digital Aviation Research and Technology Centre (DARTEC)	■ デジタル航空技術に関する技術の研究。 ■ Boeing, Saab, Thalesなどとデジタル航空に関するコンソーシアムを結成。 ■ EPSRCから航空機のライフサイクルのためのデジタルツインに関する調査を受託。
Integrated Vehicle Health Management (IVHM)	■ 無人ロボット、センサー、人工知能、デジタルツインなどの技術を使った車両の保守、修理オーバーホールに関する研究。
Intelligent Mobility Engineering Centre (IMEC)	■ 自動運転に関する研究。 ■ Innovate UKのHumanDriveに参加。

¹⁴ Center for Digital Built Britain, <https://www.cddb.cam.ac.uk/what-we-do/national-digital-twin-programme>（2022年1月31日アクセス）

5. 欧州その他の国（オランダ、デンマーク、スウェーデン）

■ DIGITAL TWIN Program（オランダ）

実施期間	2019-2023 年	予 算	4,000,000 ユーロ（NWO） 1,600,000 ユーロ（プログラム参画企業）
技術領域	モデリング（製造プロセス）、自動化、AI（モデル組込）		

DIGITAL TWIN Program（Integration of Data-driven and model-based engineering in future industrial technology with value chain optimization）は、設計・製造・保守システムのデジタルツイン構築を目指すプログラムである。オランダ研究評議会（NWO）の Perspective プログラムとして支援されており、6 大学と 12 の企業とで実施されている。5 つの主要プロジェクトと一般的な普及に向けた 1 つのプロジェクトで構成されている。

代表的な研究開発プロジェクト

プロジェクト	研究代表	関連企業	概要
Project 1: Taming the High Complexity of Digital Twins	University of Groningen	Philips, TATA Steel, DEMCON, ASM Pacific Technology	■ ローカルなデジタルツイン・モデルの相互作用によるシステム規模のデジタルツイン・モデルの大規模化による分析の困難化や複雑化に伴う予期せぬ挙動を軽減するためのモデル管理等について研究
Project 2: Automated Model Updating of Digital Twins	Leiden University	TATA Steel, ASM Pacific Technology	■ バリューチェーン全体の下流または上流工程からのデータを用いて、力学系モデルやマルチフィジックス系モデルを高度化、精度向上させる手法とツールを開発する
Project 3: Methodology and Tool Support for Effective Digital Twinning	Eindhoven University of Technology	Philips, Stamicarbon, Altran	■ デジタルツインを効率的に作成するための方法とツールを開発する
Project 4: Technology Health Management	Eindhoven University of Technology	ASM Pacific Technology, ASML, Canon Production Printing, VDL Groep, TNO	■ プロジェクト1、2、3で開発された改良型デジタルツインを用いて、製造プロセスやハイテクシステムのヘルス・モニタリングを積極的かつ自動的に行うための手法とツールの開発
Project 5: Autonomous Process & Control Reconfiguration and Optimisation	Delft University of Technology	TATA Steel, ASM Pacific Technology, Airborne, Stamicarbon, QING Group, TNO	■ 自律的な制御チューニング、再構成、性能最適化のための汎用フレームワーク、手法、ツールを開発する
Project 6: Digital Twin Demonstrator	University of Twente	QING Group, TNO	■ プロジェクト1～5で開発されたシステムを公開デモ機として開発する

■ InnoSHM Project（Innovative Structural Health Monitoring (SHM) and Risk-informed Structural Integrity Management）（デンマーク）

実施期間	2020-2024 年	予 算	DKK19M
技術領域	モデリング（インフラ）		

風力発電所や石油・ガスプラットフォームなどの海洋構造物の損傷予測などインフラ管理を目的としたデジタルツイン開発プロジェクトである。Innovation Fund Denmark（IFD）が資金配分機関であり、デンマーク工科大学（DTU）を拠点とする DHRTC（Danish Hydrocarbon Research and Technology Centre）で実施されている。

■ RELIABLADE Project (デンマークとドイツの共同研究プロジェクト)

実施期間	2018-2021年	予算	DKK83M
技術領域	モデリング (タービンブレード)、AI		

風力タービンブレードのデジタルツイン開発・実証を目指したプロジェクトで、デンマーク工科大学が中心となって実施している。デンマークの The Energy Technology Development and Demonstration Programme (EUDP) とドイツの連邦経済エネルギー省とが資金配分機関である。高精度スキャン、非破壊検査 (NDT) ツール、高度な画像処理技術、ブレードのマルチスケールモデリングを活用し、タービンブレードの設計、製造、運用のライフサイクル全体を通じた損傷予測により、ブレードの構造的信頼性の向上を目指している。

■ Digital Twin Cities Center (DTCC) (スウェーデン)

技術領域	モデリング (人流、風、微気候、汚染、騒音)、インタフェース (AR/VR)
------	--

チャルマース工科大学を拠点として2021年に設立されたセンターで、スウェーデン・イノベーション庁が資金提供する21のコンピテンスセンターのうちの1つである。DTCCではコンソーシアムを形成し、スウェーデン全土の都市計画、設計、建設、管理の基盤として、デジタルツインシティの概念確立とデジタルツイン開発に取り組んでいる。

代表的な研究開発プロジェクト

No.	プロジェクト名称	概要
①	CROWD MOVEMENT	■ 持続可能なモビリティ、地域市場の開発、社会統合など、都市の多くのプロセスの中心となる歩行者の動きを予測するシミュレーションモデルの開発を通じて、都市計画および設計プロセスの意思決定をサポートすることを目的としている。
②	DIGITAL TWINS FOR CIRCULARITY	■ デジタルツインシティ・プラットフォーム (DTCP) を積極的に活用し、資源効率を向上させる技術の開発
③	DATA MODELS FOR DIGITAL TWIN CITIES	■ 拡張可能でセマンティックなデジタルツインシティのリンクデータモデルを開発し、異なる知識ドメインのデータを統合して、データの潜在能力を引き出すための相互運用性を提供する
④	TWINABLE	■ 異なる分野、スケール、フェーズ間でのシームレスなコラボレーションを可能にする、適切なビジュアライゼーション、オーラル、インタラクションの方法、ツール、テクノロジーを提供する
⑤	URBAN ENVIRONMENTAL COMFORT DESIGN	■ 都市や公共の場の計画・設計プロセスにおいて、風、微気候、汚染、騒音に関する情報を評価し、シミュレーション結果と実世界のセンサーデータを比較できるようにする方法、アルゴリズム、ソフトウェアのデモ機を開発する
⑥	DIGITAL TWIN OF CONSTRUCTION SITE	■ 推測による作業、遅延、ミスを減らすことで、より良い作業環境を作ることが目的とした、建設現場のデジタルツインを開発し、促進する
⑦	DESIGN & DATA	■ 産業界のパートナーによるデジタル手法の開発。Chalmers ACE (Architecture and Civil Engineering) の研究者、DTCC におけるデジタルツインの形成の間の交流のためのフレームワークを提供する

6. 米国

■ CPS (Cyber-Physical Systems) プログラム¹⁵ (NSF)

実施期間	2008年-	予算	\$500,000-\$7,000,000 / 課題
技術領域	制御、データ分析、機械学習、自律性、設計、IoT など		

複雑なCPSを設計するために必要なコア技術の研究開発を目的としたプログラムである。プログラムの中核となるキーテクノロジーには、制御、データ分析、機械学習 (制御のためのリアルタイム学習を含む)、自律性、設計、IoT などがある。また、CPSのアプリケーションとして、農業、航空学、建物設計、インフラ、エ

15 NSF Cyber-Physical Program,
<https://www.nsf.gov/pubs/2021/nsf21551/nsf21551.htm> (2022年1月31日アクセス)

エネルギー、環境、医療、製造、輸送など多様な領域を想定している。プロジェクトは3種類に分かれており、現在時点（2021年10月）で326件のプロジェクトが実施されている。

- 小規模プロジェクト：CPS 分野に大きな影響を与える可能性のある、新しく革新的なアイデアに基づくプロジェクト（3年以内、予算総額50万ドルまで）
- 中規模プロジェクト：分野を超えた統合的な視点を必要とする学際的プロジェクト（3年以内、予算総額50～120万ドル）
- フロンティアプロジェクト：小規模なプロジェクトでは達成できないCPSの重要な課題に取り組むプロジェクト（4～5年、予算総額120～700万ドル）

代表的な研究開発プロジェクト

プロジェクト(代表機関)	実施期間	支援額(現在)	概要
Cyber-Physical Approaches to Advanced Manufacturing Security (Virginia Polytechnic Institute and State University)	2015-2019	\$765,247	■ 製品やプロセスの開発サイクルで発生するサイバーイベントと、製造中に生成される物理データの相関関係をモデル化し、理解することで、製造業のサイバーセキュリティの脆弱性を評価フレームワークを開発
Cyber-Physical Sensing, Modeling, and Control with Augmented Reality for Smart Manufacturing Workforce Training and Operations Management (University of Missouri-Columbia)	2017-2021	\$607,287	■ 製造業の従業員の学習と操作を感知、理解、特徴づけ、モデル化し、最適化するためのサイバーフィジカルシステムの手法とツールを統合して検討
Software Defined Control for Smart Manufacturing Systems (University of Michigan Ann Arbor, Kira Barton)	2016-2022	\$2,362,392	■ 製造業等の現場における人、ロボット、機器、作業環境等から構成されるシステムに関して、モデリング、センシング、計画・制御、システム設計等の技術を高度化
Software Defined Control for Smart Manufacturing Systems (University of Illinois at Urbana-Champaign Sabin Mohan)	2016-2021	\$1,125,000	■ 同上(同タイトルで両者にアワードとして支援)
Hybrid Twins for Urban Transportation: From Intersections to Citywide Management (Columbia University, Xuan Sharon Di)	2021-2024	\$1,200,000	■ 人工知能(AI)、エッジクラウドコンピューティング、次世代通信ネットワークを活用しながら、都市の交通管理システムをサポートする階層型・分散型ハイブリッドツインを開発 ■ ハイブリッドツインは、バーチャルツイン(既存の交通シミュレーション)とデジタルツインで構成され、物理ベースのモデルを統合し、インフラや車載センサーから取得したデータを同化することで、交通のモデリング、予測、管理を行う。
Bio-socially Adaptive Control of Robotics-Augmented Building-Human Systems for Infection Prevention by Cybernetic of Pathogen Transmission (University of Tennessee Knoxville)	2021-2023	\$1,199,129	■ 建物情報モデリング、プライバシー保護を目的としたモノのインターネットセンシング、時空間分子・メタゲノムシーケンス、機械学習を統合した新しいデジタルツイニング手法を開発し、建物と人間・病原体の相互作用をマッピングすることで、複数の時空間スケールでの汚染・感染リスクを予測する。

■先進製造（AM：Advanced Manufacturing）プログラム（NSF）

実施期間	2019年－	予算	\$500,000-\$7,000,000／課題
技術領域	製造システム、材料加工、製造機械、方法論、スケールを超えた製造		

米国の製造業を活性化し、戦略的産業を再形成するために必要な基礎研究をサポートするプログラムである。製造方法・手法・能力を根本的に変革する学際的な研究に重点を置いており、現在（2021年10月）時点で507件のプロジェクトが実施されている。

代表的な研究開発プロジェクト

プロジェクト(代表機関)	実施期間	支援額(現在)	概要
Convergent Physics-based Data-driven Bioprinting of Regenerative Tissues for Future Biomaterials (North Carolina Agricultural & Technical State University)	2021-2024	\$528,738	■ バイオマニファクチャリングの研究を進める上での主な障害は、幹細胞を用いたバイオプリンティング実験を行うために必要な莫大なリソースに加えて、正式な指針やリアルタイムのプロセスモニタリングが欠如している。これらの問題を解決するために、研究では、センサーデータと機械学習アルゴリズムを統合した物理ベースのモデルと実験を行い、バイオプリンティングプロセスのデジタルツインを作成するとしている。

■工学研究センター（ERC：Engineering Research Centers）¹⁶（NSF）

実施期間	1984年－	予算	最大\$6,000,000／年・拠点
技術領域	主な技術4分野（先進製造、エネルギー・持続可能性・インフラ、マイクロエレクトロニクス・センシング・IT、バイオテクノロジーと健康）		

1984年に設立された学際的なセンター群であり、産業界と大学を密接に連携することで、米国産業の競争力強化を目的としたプログラムである。今までに75のERCが設立され、現在は、先端製造分野で2センター、エネルギー・持続可能性・インフラ分野で8センター、マイクロエレクトロニクス・センシング・IT分野で3センター、バイオテクノロジーと健康分野で5センターと4分野において18のERCが運営されている。各ERCへは年間最大\$6,000,000、最長10年間の資金提供を行っている。ERCでは、①コンバージェンス研究、②エンジニアの人材育成、③多様性と包括的な文化、④イノベーションエコシステムを4つの基礎的要素として運営されている。

代表的な研究開発プロジェクト

プロジェクト(代表機関)	実施期間	支援額(現在)	概要
Nanosystems ERC for Nanomanufacturing Systems for Mobile Computing and Mobile Energy Technologies (NASCENT) (Advanced Manufacturing) (University of Texas at Austin)	2012-2022	\$35,600,089	■ 高スループットで信頼性が高く、汎用性の高いウェアスケーラブルおよびローラーツールのナノ製造システムの構築を目指す ■ 次世代のナノ対応モバイルコンピューティングやモバイルエネルギー機器を実現するナノ製造システムの製造に必要な機械、材料、モデルを開発する。
ERC for Power Optimization for Electro-Thermal Systems (POETS) (MICROELECTRONICS, SENSING, AND IT) (University of Illinois at Urbana-Champaign)	2015-2025	\$28,554,291	■ 製造業の従業員の学習と操作を感知、理解、特徴づけ、モデル化し、最適化するためのサイバーフィジカルシステムの手法とツールを統合して検討
Planning Grant: ・Engineering Research Center for Digital Twins in Engineering and Medicine ・Engineering Research Center for Exploring Human-Machine Integrated Systems in Digitally Intensive Manufacturing Environments 等	2019-2021	\$100,000	■ ERC内での公募プロジェクト デジタルツインに関するプロジェクトの事例 ・複雑なエンジニアリングシステムについても、大量のデータを使用して個々のスマートマシンを駆動するサイバーフィジカルシステムと動的データプロセスを開発し、データから意味のある情報を抽出して正しく解釈するための新しいテクノロジーを開発 ・機能的に設計された環境で人間が自律システムと情報を交換して解釈する方法と、その結果として生じる新たな行動について調査する

16 NSF Engineering Research Centers ,
<https://erc-assoc.org/> (2022年1月31日アクセス)

■ Manufacturing USA¹⁷

実施期間	2012年－	予 算	\$400,000,000－500,000,000／年
技術領域	スマートマニュファクチャリング、サイバーセキュリティ、材料、積層造形		

MIIの16拠点は以下の通りであり、2,000以上の機関が参画し、500以上の研究開発プロジェクトが進行している。デジタルツインと特に関連深い拠点は、CESMII、LIFT、MxD、America Makesの4拠点である。

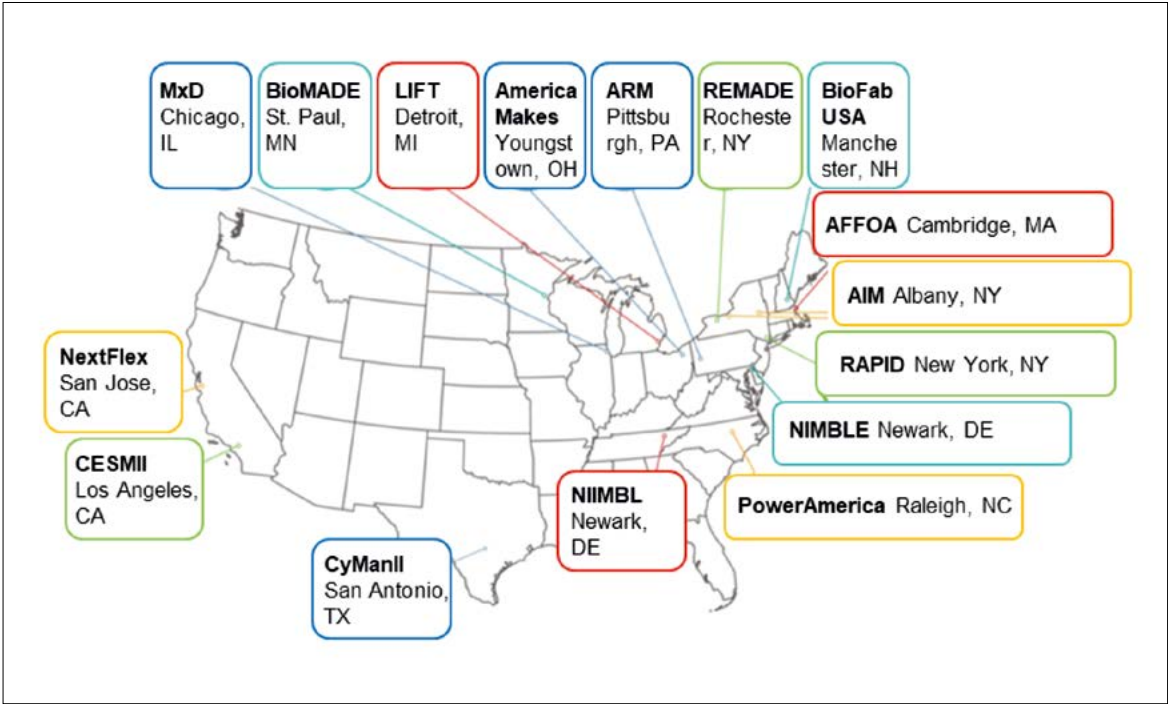


図 MII16拠点

2021年6月NISTは、米国の先進的製造業を成長させるために、Manufacturing USA技術ロードマップ(MfgTech)プログラム¹⁸公募を開始した。このプログラムでは、優先度の高い研究課題に取り組む技術ロードマップを策定し、将来のManufacturing USAの基本計画や生産的なコンソーシアムやイニシアチブの確立に役立てることとなっている。

■ GEMINA (Generating Electricity Managed by Intelligent Nuclear Assets)¹⁹

実施期間	2019－2021年	予 算	\$27,900,000/9課題
技術領域	AI、高度制御システム、予知保全、モデルベースの故障検出など		

17 Manufacturing USA,
<https://www.manufacturingusa.com/pages/manufacturing-usa-brand> (2022年1月31日アクセス)

18 Manufacturing USA technology roadmap grant competition,
<https://www.nist.gov/news-events/news/2021/06/nist-launches-new-manufacturing-usa-technology-roadmap-grant-competition> (2022年1月31日アクセス)

19 GEMINA,
<https://arpa-e.energy.gov/technologies/programs/gemina> (2022年1月31日アクセス)

次世代の原子力発電所における高度な原子炉および変換操作および保守（O&M）システム用のデジタルツイン技術開発を目的としたプログラムである。プログラムの目標は、先進的な原子炉発電所のO&Mコスト（O&Mは、原子炉の総発電コストの約80%を占めている）を10倍に削減し、経済的な競争力を高めることである。目標を達成するために、AI、高度な制御システム、予知保全、モデルベースの故障検出など、他の産業で効率化を推進している多様な技術を適用する。非原子力の実験施設（テストループやフローループなど）とソフトウェアを組み合わせ、先進的な原子炉の運転ダイナミクスをシミュレーションするCPSを開発する。

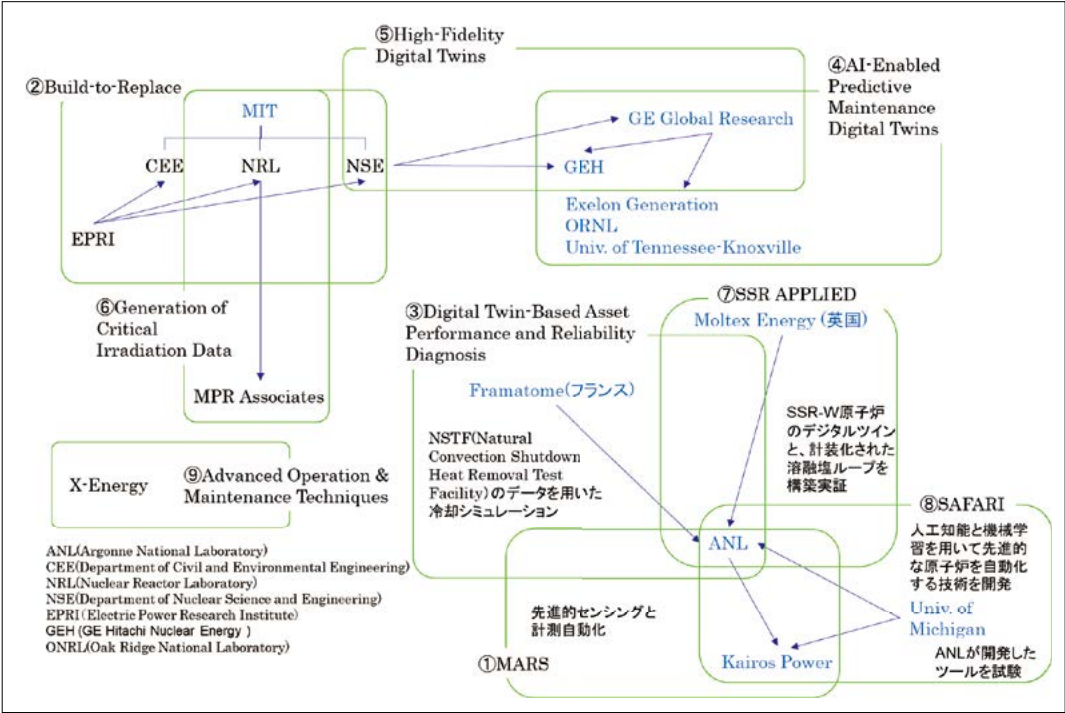


図 GEMINAプロジェクト間の関係性

7. 中国

■北京航空航天大学（Beihang University）

技術領域	AI（モデル組込、自動化活用）等
------	------------------

中国国内におけるデジタルツインの権威である陶飛（Tao Fei）教授が在籍しており、デジタルツインに関する基礎研究や、製造業に対する応用について研究が進められている。

デジタルツインでは、現実と仮想の同期が非常に重要であり、知覚、制御、インタラクションが必要となる。また、リアルタイムのモデル（パラメータ）調整による精度保証、情報セキュリティも重要となる。製造現場のデジタルツインでは、AIを組み合わせることで、現場全体の状況を正確に評価し、管理戦略を生成を強化することが可能としている。

■北京工業大学（Beijing University of Technology）

技術領域	モデリング（製造プロセス）
------	---------------

材料製造学科（材料与制造学部）の刘志峰（Zhifeng Liu）教授が率いる研究グループでは、先進製造、工作機械設備、ロボット等のデジタル技術全般を活用した製造に関する研究開発に取り組んでいる。過去5

年間で、20以上の主要な国家科学技術特別プロジェクト、中国国家自然科学基金の10以上のプロジェクト、30以上の企業との共同研究を実施している。データ収集、クラウドデータベースの整備、データの読み取りによるデジタルツイン機能を構築し、製造プロセス監視、生産データ管理、製造スケジューリングを実現している。

■ Digital Twin Research Center (DTRC、数字孪生体创新中心)²⁰

実施期間	2019年-	予 算	-
技術領域	スマート製造、インダストリアル・インターネット		

産官学によって運営されるインダストリー4.0研究院（China Academy of Industrie 4.0）によって設立されたオープンイノベーション機関である。DTRCAPPは、人工知能研究所、ビッグデータ研究所、MBSE標準グループ、オープンソース産業インターネット、産業APPイノベーション、インダストリー4.0大学などで構成され、スマート製造やインダストリアル・インターネットの技術革新の基礎を築くことが目指されている。

■ デジタルツインシティの実施都市

実施期間	2018年-	予 算	-
技術領域	BIM/CIM、マッピング、コラボレーティブコンピューティング、シミュレーション、大規模データのロード技術、クラウドコンピューティング		

各省・各都市単位でデジタルツインシティ計画の策定・実装が進められている。

20 China Academy of Industrie 4.0ウェブサイト,
<https://www.digitaltwincenter.com/>（2022年1月31日アクセス）

代表的な実施都市

地域	発表時期	政策の名称	概要
上海市	2020.2	《关于进一步加快智慧城市建设的若干意见》 スマートシティの建設をさらに加速するためのいくつかの意見	■ デジタルツインシティの建設を検討し、都市のあらゆる要素の生態資源をデジタルでシミュレートし、都市のインテリジェントな運営のためのデジタルベースを構築する
浙江省	2020.4	《浙江省未来社区建设试点工作方案》 未来コミュニティ建設パイロットプログラム	■ リアルとデジタルのツインコミュニティの建設を提案
吉林省	2020.4	《吉林省新基建“761”工程实施方案》 「761」新インフラプロジェクト実施計画	■ エッジコンピューティング、デジタルツイン、NB-IoT、人工知能、ブロックチェーンなどの技術を産業界に革新的に応用することを加速する
海南省	2020.8	《智慧海南总体方案(2020-2025年)》 スマート海南のためのマスタープラン2020-2025	■ 2025年末までに初の「デジタルツイン省」の構築を目指す
広東省	2020.10	《广东省推进新型基础设施建设三年实施方案(2020-2022年)》 広東省の新インフラ建設促進のための3か年実施計画	■ 「デジタルツインシティ」のリアルタイムモデルの構築を模索し、アプリケーションハブ等の各プラットフォームを統合した「デジタルツインシティ」を形成する
広東省 广州市	2019.12	《关于进一步加快推进我市建筑信息模型(BIM)技术应用的通知》 都市におけるBIM技術の適用をさらに加速するための通達	■ 計画、調査、設計、建設、運用・保守の全プロセスにおいて、BIM技術の統合的な適用をさらに加速する
河北省 雄安新区	2018.4	《河北雄安新区规划纲要》 河北省雄安新区の計画概要	■ デジタル都市とリアル都市の同時計画・建設を主導し、深層学習能力を備えた世界をリードするデジタル都市を構築する
南京江北 新区	2019.6	《南京江北新区智慧城市2025规划》 南京江北新区スマートシティ2025計画	■ 都市のインテリジェント化・先進化の推進に注力し、「中国初のデジタルツインシティ」の構築を進める
安徽省 合肥市	2019.8	《智慧社区三年行动规划》 スマートコミュニティ3か年アクションプラン	■ 2021年末までに、デジタルツインコミュニティモデルプラットフォームとコミュニティグリッドベースのコラボレーションガバナンスプラットフォームにより、コミュニティのすべての要素を細かく協調して管理することを実現する
貴州省 贵阳市	2020.1	《数博大道数字孪生城市顶层设计》 デジタルエキスポアベニューにおける デジタルツインシティのトップレベルデザイン	■ 2021年末までに、花果園の大規模コミュニティガバナンスとデジタルエキスポアベニューの小規模都市エコシステムから、デジタルツインシティを創出する
江蘇省 南京市	2020.4	《南京市数字经济发展三年行动计划》 南京のデジタル経済発展のための3年間の行動計画	■ デジタルツインシティの構築と、オープンデータのソースを活用したデジタル資源の配当を目指す
福建省 厦门市	2020.4	《厦门市推进BIM应用和CIM平台建设工作方案》 廈門市におけるBIM活用とCIMプラットフォーム構築推進のための 作業計画	■ BIMアプリケーションの試験的適用範囲を拡大し、建設プロジェクトの全ライフサイクルをカバーする
浙江省 寧波市	2020.6	《宁波市推进新型基础设施建设行动方案》 寧波における新しいインフラ建設を促進するためのアクションプラン	■ BIMやCIM技術の適用を促進することに重点を置き、将来のコミュニティの物理的な建設にデジタルツインの概念の適用を促進する
福建省 福州市	2020.6	《福州市推进新型基础设施建设行动方案(2020-2022年)》 福州市の新インフラ建設促進のための行動計画	■ GIS、CIM・BIM、IoT、経済・社会の関係やルール等に関するデータや情報を収集し、デジタルツインシティを秩序立てて構築するための重要なシナリオに焦点を当てる
四川省 成都市	2020.10	《成都市智慧城市建设行动方案(2020—2022)》 成都スマートシティ建設アクションプラン	■ 政府、企業、社会のデータを統合し、リアルタイムの知覚データを重ね合わせ、すべての要素で都市の運用状況をシミュレートする

8. シンガポール

■ Virtual Singapore（現在はGeospatial.SGに移管）

実施期間	2014-2018年	予算	S \$73,000,000
技術領域	プラットフォーム、モデリング（人流、交通、災害）		

2014年に発表されたイニシアチブ「Smart Nation」の下、3D都市モデルとその情報を提供する3Dデジタルプラットフォーム構築を目指したプロジェクトである。シンガポール国立研究財団（NRF, National Re-search Foundation）が資金提供とプロジェクトの主導を行い、シンガポール土地管理局（SLA, Singapore Land Authority）が蓄積していた地図データを提供、シンガポール政府技術庁（GovTech, Government Technology Agency）が技術支援を行い、また、Dassault Systemsのシステム「3DEXPERIENCE City」を使用している。

3D都市モデルには、既存の地理データや建物・道路の構成要素から成る静的／レガシーデータと、都市に設置されたIoTデバイスやセンサーのデータからなる動的／リアルタイムデータが含まれている。単に都市空間の形状を再現するだけでなく、都市の各オブジェクトに情報が付与されたセマンティック・モデルとなっている。

Virtual Singaporeの以下4つの機能があるとされる。

- 1. 仮想実験：実施予定の公共事業やサービスが影響を及ぼす範囲を視覚化できる。
- 2. 仮想テストベッド：提供予定のサービスを検証するためのテストベッド・プラットフォームとして使用でき、シミュレーションを実施することができる。
- 3. 計画と意思決定：分析アプリケーションの開発に利用することができる。（例として、車両や歩行者の移動パターンを分析するアプリの開発）
- 4. 研究開発：研究者や研究コミュニティがデータ環境にアクセスでき、新しい技術や機能を開発することができる。

2018年にプラットフォームが完成し、Virtual Singapore自体はSLAとGovtechが主導する「Geospatial.SG」プログラムに移管された。Virtual SingaporeはGeospatial.SGにおいて、都市計画とインフラを支え、市民や研究者がアクセス可能なプラットフォームとして引き続き役割を期待されている。

9. 豪州

■ Digital Earth Australia

実施期間	2018年－	予算	約\$13,000,000／年
技術領域	モデリング、ビッグデータ（地球モニタリング）、プラットフォーム		

オーストラリア政府の地球科学研究組織であるGeoscience Australiaが推進するプログラムで、地球観測データの収集、モデリング、分析、オープンデータアクセスのためのプラットフォーム、データの可視化、データ管理等に関する包括的なプロジェクトが実施されている。様々な地球観測データへのアクセスを容易にし、政府や民間企業の双方が情報に基づいた意思決定を行えることを目指している²¹。

代表的な研究開発プロジェクト

プロジェクト	代表機関	実施期間	規模	概要
ARD Code Upgrade	・ MDBA ・ DAWE	2020年時点で実施中	中	■ Analysis Ready Data (ARD)とは、地球観測データを最小限の要件で処理し、他のデータセットと相互運用性を持たせたもの ■ 本プロジェクトでは、Sentinel-2やLandsatの表面反射率等、新しく収集が可能となったデータをARDに統合することで、モデルと分析精度を高める
Open Data Cube 2.0	・ ODC Community	2020年時点で実施中	大	■ Open Data Cube(ODC)は衛星データ用のPythonライブラリとPostgreSQLデータベースのセット ■ 本プロジェクトでは、プログラムコードを単純化するためODCのアップデートを目指しており、Geoscience Australia、NASA、米国などの6機関にサポートされている
Algorithm Sharing	・ ODC Community	2020年時点で実施中	中	■ クラウドベースの計算プラットフォームであるDEA Sandbox上でできるだけ多くのアルゴリズムが実行できることを目指している

21 Digital Earth Australia – Program Roadmap（2020年5月），
https://www.ga.gov.au/_data/assets/pdf_file/0006/94056/DEA-Program-Roadmap-May-2020.pdf（2022年1月31日アクセス）

10. アフリカ

■ Digital Earth Af Earth Africa²²

実施期間	2019年～	予算	約A\$20,000,000（2019～2022年）
技術領域	ビッグデータ（地球モニタリング）、プラットフォーム（データ活用）		

地球観測情報を提供することで、アフリカの人々の生活改善を目指したプログラムである。2019～2022年は設立フェーズに位置付けられ、アフリカを拠点とした地球観測データ運営プラットフォームの設立が目指されている。現在、設立フェーズではあるが、サービス化を見据えたデータセットの準備、プラットフォームの構築等の技術開発も進みつつある。資金配分機関は、米国を拠点とした財団法人The Leona M. and Harry B. Helmsley Charitable Trustとオーストラリア政府から資金が提供され、DE Australiaが技術的および運用上の専門知識を提供する。プログラム・マネジメント・オフィスが設立されるまで、GEO信託基金が暫定的に資金調達ホストを担う。

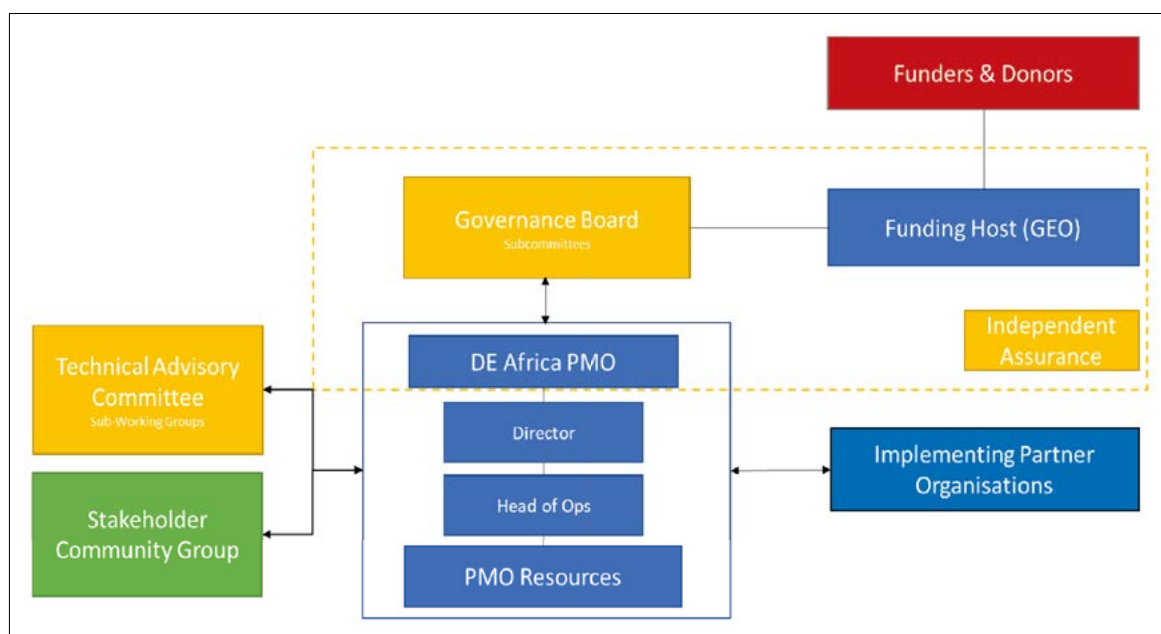


図 プログラムスキーム

- ・ African Regional Institute for Geospatial Information Science and Technology (AFRIGIST, ナイジェリア)
- ・ AGRHYMET (ニジェール)
- ・ Centre de Suivi Ecologique (CSE, セネガル)
- ・ Regional Centre for Mapping of Resources for Development (RCMRD, ケニア)
- ・ Sahara Sahel Observatory (OSS, チュニジア)
- ・ South African National Space Agency (SANSA, 南アフリカ)

²² Digital Earth Africa ウェブページ,
<https://www.digitalearthafrica.org/>（2022年1月31日アクセス）

作成メンバー

総括責任者	佐藤 順一	上席フェロー	(環境・エネルギーユニット)
	中村 亮二	フェロー／ユニットリーダー	(環境・エネルギーユニット)
	長谷川 景子	フェロー	(環境・エネルギーユニット)

調査報告書

CRDS-FY2021-RR-09

デジタルツインに関する国内外の研究開発動向

令和 4 年 3 月 March 2022

ISBN 978-4-88890-791-0

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

Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's 五番町

電話 03-5214-7481

E-mail crds@jst.go.jp

<https://www.jst.go.jp/crds/>

本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。

著作権法で認められた場合を除き、本書の全部又は一部を許可無く複写・複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

This publication is protected by copyright law and international treaties.

No part of this publication may be copied or reproduced in any form or by any means without permission of JST, except to the extent permitted by applicable law.

Any quotations must be appropriately acknowledged.

If you wish to copy, reproduce, display or otherwise use this publication, please contact crds@jst.go.jp.

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY



<https://www.jst.go.jp/crds/>