

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～

STRATEGIC PROPOSAL

Innovative Digital Twin

- Establishment of fundamental technologies for advanced design and manufacturing in future industries -



研究開発戦略センター（CRDS）は、国の科学技術イノベーション政策に関する調査、分析、提案を中立的な立場に立つて行う公的シンクタンクの一つで、文部科学省を主務省とする国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）に属しています。

CRDS は、科学技術分野全体像の把握（俯瞰）、社会的期待の分析、国内外の動向調査や国際比較を踏まえて、さまざまな分野の専門家や政策立案者との対話を通じて、「戦略プロポーザル」を作成します。

「戦略プロポーザル」は、今後国として重点的に取り組むべき研究開発の戦略や、科学技術イノベーション政策上の重要課題についての提案をまとめたものとして、政策立案者や関連研究者へ配布し、広く公表します。

公的な科学技術研究は、個々の研究領域の振興だけでなく、それらの統合によって社会的な期待に応えることが重要です。「戦略プロポーザル」が国の政策立案に活用され、科学技術イノベーションの実現や社会的な課題の解決に寄与することを期待しています。

さらに詳細は、下記ウェブサイトをご覧ください。

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

エグゼクティブサマリー

「革新的デジタルツイン」とは、基礎科学からの多様な基盤技術の統合化による複合現象モデルの開発、検証に基づく革新的なデジタルツイン技術の創出を目指すものであり、昨今目覚ましい進展を見せるものづくりのデジタル化、およびそれを支える基盤技術に関する研究開発戦略を提案するものである。

ものづくりのデジタル化を牽引する中核技術として近年注目されているデジタルツインは、デジタルデータを基に物理的な製品をサイバー空間上で仮想的に複製し、将来発生する事象をデジタルの仮想世界で予測することが可能な先進的なシミュレーション技術である(図 E-1)。製品・サービスのバリューチェーン全体を通じて高い付加価値が提供されると期待されている。デジタルツインの根幹は複合現象モデルの開発、検証にあり、これに係る技術およびそれを支える先進設計・製造に関する基盤技術の研究開発を産学官が一体となって戦略的に推進することが必要である。その上で、これら成果を日本のイノベーション競争力の中長期的な維持・強化、更には Society 5.0 で示されている新たなものづくりシステムや低炭素エネルギー未来社会の実現へ繋げてゆくことが求められている。

また、日本では製造、材料、構造・強度、機械、燃焼、伝熱、流体、振動、化学、電気などのものづくりの基盤技術を担う工学系専門人材が減少しつつあり、個々の研究力においても一部で他国の追い上げを許している。この状況を打破し、日本の多数の工学系分野が再び世界をリードしてゆく素地を整えるためにも、国として一体となった研究開発推進を実行することが求められる。

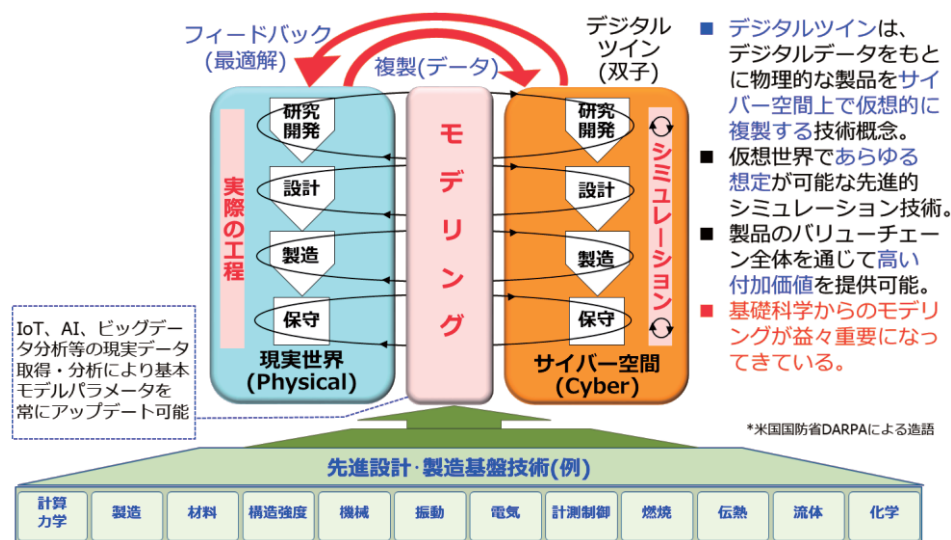


図 E-1 デジタルツインと先進設計・製造基盤技術

ものづくりの革新的デジタルツイン構築に必要な取り組みは多岐にわたるが、複合現象モデルの開発、検証の重要性を鑑み、本提案で取り組むべき具体方策を以下の3つとする。

① 多様な基盤技術の統合化による、基礎的理理解明からの複合現象モデルの開発・検証、および、モデル計算効率化技術開発、構築モデルの評価方法の開発・標準化

②①に資する基礎科学研究からの知識基盤構築

[物理・化学現象の把握・理解、基盤となる構成方程式の確立、評価データ取得、蓄積等]

③②を活用した、ものづくり産業を支える工学系の基礎的理理解を深めた人材、科学的合理性に基づき、ものづくりができる人材の育成

対象とする製品分野・領域は、ものづくり技術の難易度が高く、開発期間・コストが大きい環境・エネルギー・輸送に関する機器・サービス領域を選択するのが有効である(図 E-2)。これらは、デジタルツイン活用の効果が大きく、かつ今後の国際市場獲得や、低炭素社会の実現に向けた日本の貢献にも寄与すると期待される。例えば、風車、ガスタービン、蒸気タービン、自動車、工作機械、船舶海洋等の環境・エネルギー機器、輸送機器の設計・製造や保守(寿命予測)を行う際に必要となるデジタルツインが出口として想定される。

上記の①から③を一体的に推進するための研究開発課題構成を図 E-3 に示す。これらは異なる製品間で共通的なボトルネックと考えられる研究開発課題群である。これらに係る物理・化学的メカニズムの解明、モデル構成式の確立、複合現象モデルの開発と実験的検証、モデル評価方法の開発・標準化、およびそれらに基づく力学基盤を中心とするデジタルツイン技術確立を目指す。当然、共通課題への取組みの後には個別の上記製品例へ展開するための研究開発も課題となる。製品共通課題の主要項目を以下に示す。

a 機械損傷プロセスモデル構築と検証

- ・複合材料も含む機械要素の損傷メカニズムや亀裂進展プロセスの解明等

b トライボロジーモデル構築と検証

- ・回転機械の摺動面潤滑膜流れと表面変形などとの相互作用メカニズムの解明等

c 流体・構造・振動連成モデル構築と検証

- ・回転機械や輸送機械における流体、構造、音響の相互作用メカニズムなどの解明等

d 流体・伝熱・燃焼・化学連成モデル構築と検証

- ・急激な過渡現象対応の燃焼素反応と乱流、伝熱・熱伝達の相互作用メカニズム解明等

e a～d統合化モデル(デジタルツイン)構築と検証

- ・ターゲット製品例への展開と、機械要素の運動、構造変形、振動、潤滑、流体、伝熱、燃焼、化学、電磁気など複合現象支配方程式の高速連成解析モデルの開発と検証等

最後に、上記の①から③の取組み項目を効果的に推進し、デジタルツイン技術とそれを支える先進設計・製造基盤技術の研究開発で世界を凌駕していくための体制として、ネットワーク型の産学官連携推進体制(コンソーシアム)を中核とした体制構築を適切に進める必要がある。ここでは基礎研究から社会実装までを俯瞰した一貫通貫の研究開発が求められる。加えて、データ連携共通プラットフォーム創出、国際標準化戦略、規制緩和などの出口戦略や人材育成などにも着実に取り組むことが肝要である。

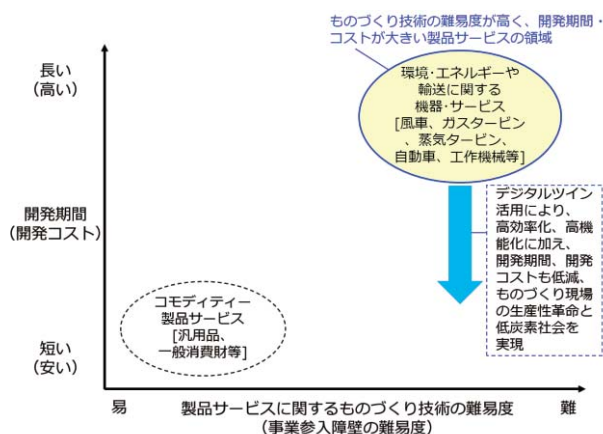


図 E-2 革新的デジタルツインに関する研究開発課題で対象とする製品分野・領域

研究開発課題	ターゲット製品(例)					
	風車	ガスタービン	蒸気タービン	自動車	工作機械	船舶海洋
a 機械損傷プロセスモデル構築と検証	○	○	○	○	○	○
b トライボロジーモデル構築と検証	○	○	○	○	○	○
c 流体・構造・振動連成モデル構築と検証	○	○	○	○	○	○
d 流体・伝熱・燃焼・化学連成モデル構築と検証	○			○	○	○
e a～d統合化モデル(デジタルツイン)構築と検証	○	○	○	○	○	○

図 E-3 具体的な研究開発課題

Executive Summary

“Innovative Digital Twin” aims the creation of digital twin technology based on developing and validating complex event models after clarifying their basic principles by integrating various fundamental technologies. This strategic proposal offers a strategy for conducting R&D on the digitization of manufacturing, which has shown remarkable progress of late, and the fundamental technologies that support this digitization.

Digital twins have been gaining attention in recent years as a core technology for driving the digitization of manufacturing. A digital twin is an innovative simulation technology that virtually replicates a physical product in cyberspace based on digital data and that predicts events that will occur in the future in this virtual, digital world (Figure E-1). This technology is expected to provide high added value throughout the entire value chain of a product or service. The essence of the digital twin is in the development and validation of complex event models. R&D on related technologies and fundamental technologies for advanced design and manufacturing supporting these technologies must be conducted strategically and with the cooperation of industry, academia, and government. Moreover, the outcomes of this research must be used to preserve and strengthen Japan’s mid- to long-term competitiveness in innovation, as well as to implement new manufacturing systems and to realize a future low-carbon energy society described as Society 5.0.

With the decreasing numbers of engineering specialists in Japan that are in charge of the fundamental technologies for manufacturing, including production, materials, structure and strength, machinery, combustion, heat transfer, fluids, vibrations, chemistry, and electricity, Japan has allowed other nations to close the gap in some of these areas in terms of individual research capabilities. In order to overcome this situation and lay the groundwork for Japan to once again lead the world in many engineering fields, Japan, as a nation, should implement R&D in a concerted manner.

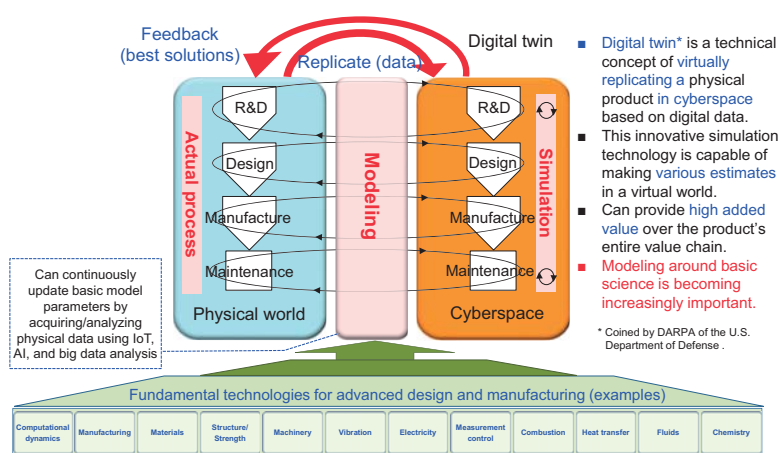


Figure E-1: Digital Twin and Fundamental Technologies for Advanced Design and Manufacturing

While efforts necessary for constructing an innovative digital twin for manufacturing are wide-ranging, the following are three specific measures considered necessary in this proposal in view of the importance of developing and validating complex event models.

- (1) Developing and validating complex event models after clarifying their basic principles by integrating various fundamental technologies, developing efficient techniques for model calculations, and developing and standardizing methods of assessing constructed models
- (2) Constructing a knowledge base from basic scientific research that is instrumental in (1) [identifying and understanding physical/chemical phenomena, establishing the underlying constitutive equations, acquiring and accumulating evaluation data, etc.]
- (3) Utilizing (2) to develop human resources that understand the basic principles of engineering, which supports the manufacturing industry, and human resources capable of manufacturing based on scientific rationale

The selection of equipment or service areas related to transportation, energy, and the environment as target product

categories or areas is effective, owing to their highly challenging manufacturing technologies, long development periods, and high costs (Figure E-2). The use of digital twins is expected to have a great effect in these areas and to play a role in future international market gains and Japan's contribution toward a low-carbon society. Digital twins are anticipated to be required output for the design and manufacture or maintenance (life prediction) of environment/energy equipment and transportation equipment such as wind, gas, and steam turbines; automobiles; machine tools; and shipping.

Figure E-3 shows an organization of R&D issues aimed at achieving a unified implementation of measures (1) through (3) described above. These R&D issues are thought to be bottlenecks common to products of different types. The objectives of addressing these issues are to elucidate the related physical and chemical mechanisms, establish constitutive model equations, develop and experimentally validate complex event models, develop and standardize methods of evaluating models, and establish digital twin technology through these efforts. Naturally, R&D for developing these technologies to be used with the individual products mentioned above will be necessary after addressing these common issues. The following are key elements in the issues common to many products.

- a) Construct and validate process models for mechanical damage
 - Elucidate damage mechanisms and crack propagation in mechanical elements including composite materials, etc.
- b) Construct and validate tribological models
 - Elucidate interaction mechanisms among lubricant film flow and surface deformation for sliding surfaces of rotating machinery, etc.
- c) Construct and validate coupled models for fluids, structures, and vibrations
 - Elucidate interaction mechanisms among fluids, structures, and acoustics in rotating machinery and transportation equipment, etc.
- d) Construct and validate coupled models for fluids, heat transfer, combustion, and chemistry
 - Elucidate interaction mechanisms among elementary combustion reactions and turbulence in rapid transient phenomena and heat transfer, etc.
- e) Construct and validate a model integrating elements a–d (digital twin)
 - Expand research to the target products mentioned above, develop and validate high-speed coupled analytical models for governing equations of complex events related to the motion, structural deformation, vibration, lubrication, fluids, heat transfer, combustion, chemistry, and electromagnetism of mechanical elements, etc.

Lastly, a system based on a network approach to promoting collaboration among industry, government, and academia (a consortium) must be appropriately constructed in order to effectively implement the three measures described above and to outshine the rest of the world in R&D on digital twin technology, and the fundamental technologies for advanced design and manufacturing that support this technology. This will require comprehensive R&D covering everything from basic research to social implementation. At the same time, it will be crucial to work steadily at creating a collaborative platform for data sharing, as well as human resources development and exit strategies for international standardization and deregulation, for example.

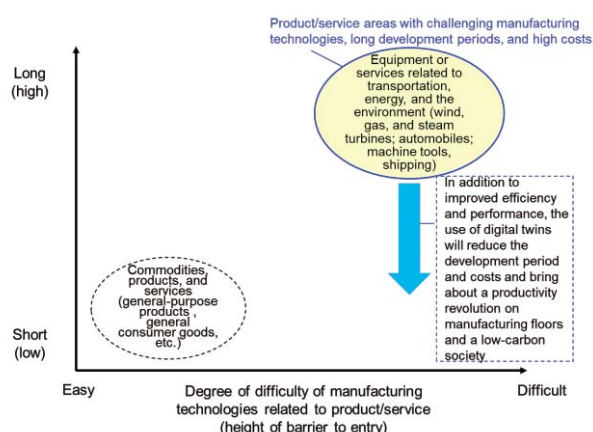


Figure E-2: Target Product Categories /Areas for R&D

R&D Issues	Target products for digital twins (examples)					
	Wind turbine	Gas turbine	Steam turbine	Automobile	Machine tool	Shipping
a) Construct and validate process models for mechanical damage	○	○	○	○	○	○
b) Construct and validate tribological models	○	○	○	○	○	○
c) Construct and validate coupled models for fluids, structures, and vibrations	○	○	○	○	○	○
d) Construct and validate coupled models for fluids, heat transfer, combustion, and chemistry		○		○	○	○
e) Construct and validate a model integrating elements a–d (digital twin)	○	○	○	○	○	○

Figure E-3: Specific R&D Issues

目 次

エグゼクティブサマリー	i
Executive Summary	iii
1 . 研究開発の内容	1
2 . 研究開発を実施する意義	5
2－1 . 現状認識および問題点	5
2－2 . 本提案の位置づけ	10
2－3 . 社会・経済的効果	12
2－4 . 科学技術上の効果	13
3 . 具体的な研究開発課題	14
4 . 研究開発の推進方法および時間軸	26
付録1 . 検討の経緯	34
付録2 . 国内外の状況	38
付録3 . 専門用語説明	48

1. 研究開発の内容

デジタルツインは、ものづくりのデジタル化技術として着目を浴びつつある。物理的な製品をサイバー空間上にデジタルデータを基に仮想的に複製する技術概念であると同時に、将来事象をデジタル世界で予測することが可能な先進的シミュレーション技術である。製品・サービスのバリューチェーン全体を通して高い付加価値が提供される。本分野では、基礎科学からの多様な基盤技術の統合化による複合現象モデルの開発、検証が益々重要になっているが、現在、これを支えるものづくりの基盤技術が、産学で弱くなってきている。Society 5.0の新たなものづくりシステムや低炭素エネルギー未来社会を実現すると同時に、中長期的に日本のイノベーション競争力を維持強化していくためには、世界をリードする革新的デジタルツイン技術やそれを支える先進設計・製造基盤技術の確立に加え、未来社会に対応する新しい視点での上記基盤技術の研究や開発、それらを支える施策が必要である。

本提案では、革新的デジタルツインに関する研究開発課題で対象とする製品分野・領域として、デジタルツイン活用の効果や低炭素社会への貢献が大きい製品・サービス領域、つまり、ものづくり技術の難易度が高く、開発期間・コストが大きい環境・エネルギー・輸送に関する機器・サービス領域を選択する(図 1-1)。例えば、風車、ガスタービン、蒸気タービン、自動車、工作機械、船舶海洋等の環境・エネルギー機器、輸送機器の設計・製造や保守(寿命予測)を行う際に必要となるデジタルツインを出口として想定し、その開発および活用を通じた日本の先進設計・製造基盤技術の強化およびものづくり産業における国際競争力強化を可能にする仕組みを構築する。これに向けて図 1-2 に示す具体的な研究開発課題に取り組む。これらの課題に対応して必要になる研究開発内容を以降に示す。

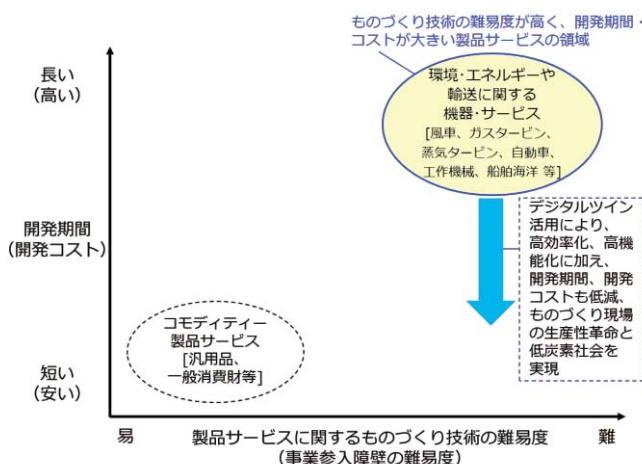


図 1-1 革新的デジタルツインに関する研究開発課題で対象とする製品分野・領域

研究開発課題 [下記メカニズムの解明、モデル構成式の確立、複合現象モデルの開発と実験的検証、評価方法の開発・標準化及びデジタルツイン]	ターゲット製品(例)					
	風車	ガスタービン	蒸気タービン	自動車	工作機械	船舶海洋
a 機械損傷プロセスモデル構築と検証	○	○	○	○	○	○
b トライボロジーモデル構築と検証	○	○	○	○	○	○
c 流体・構造・振動連成モデル構築と検証	○	○	○	○	○	○
d 流体・伝熱・燃焼・化学連成モデル構築と検証		○		○	○	○
e a~d統合化モデル(デジタルツイン)構築と検証	○	○	○	○	○	○

図 1-2 具体的な研究開発課題

<製品共通の研究開発課題とその内容>

a 機械損傷プロセスモデル構築と検証

本モデルでは、損傷・破壊過程や非線形変形過程は定式化されておらず、境界条件の取り扱いも未解明の部分が多く、複合材料も含む機械要素の損傷メカニズムや亀裂進展プロセス

の解明や、流体中の材料の破壊過程・耐久性・耐衝撃性などに関するメカニズムの解明および、モデル構成式の確立、それらに基づく寿命予測モデルの開発と実験的検証などが必要となる。

b トライボロジーモデル構築と検証

本モデルでは、回転機械の摺動面における低損傷化、低摩擦化等を目指した潤滑膜の流れと機械要素の運動や表面変形などとの相互作用メカニズムの解明、モデル構成式の確立、関連モデルの開発と実験的検証などが必要となる。

c 流体・構造・振動連成モデル構築と検証

本モデルでは、回転機械や輸送機械における流体、構造、音響の相互作用メカニズムや自励振動も含む複雑な流体関連振動メカニズムなどの解明、モデル構成式の確立、それに基づくモデルの開発と実験的検証などが必要となる。

d 流体・伝熱・燃焼・化学連成モデル構築と検証

本モデルでは、急激な過渡現象に対応する燃焼素反応と乱流、伝熱・熱伝達の相互作用メカニズムの解明、モデル構成式の確立、それに基づくモデルの開発と実験的検証などが重要となる。

e a～d 統合化モデル(デジタルツイン)構築と検証

ターゲット製品例への展開も視野に、機械要素の運動、構造変形、振動、潤滑、流体、伝熱、燃焼、化学、電磁気など複合現象を記述する複数の支配方程式の高速連成解析モデルの開発と実験的検証に加え、デジタルツイン基盤技術として、上記共通基盤モデルに関する計算アルゴリズム、離散化スキームや、精度を担保しながら計算負荷を減らす高速化モデリング技術開発などが必要である。

<デジタルツインターゲット製品例への展開における研究開発課題>

(1)風車を例とした研究開発イメージ

機械損傷プロセスモデル構築と検証では、風車動力伝達機器における主軸用大型軸受など転がり軸受けの機械要素損傷メカニズムモデル新規構築とそれによる故障検知や寿命予測技術の開発および性能検証などが必要である。

(2)ガスタービンを例とした研究開発イメージ

流体・構造・振動連成モデル構築と検証では、翼回転側と静止側(支持部、ケーシングなど)の連成振動解析技術の開発およびその検証などが、流体・伝熱・燃焼・化学連成モデル構築と検証では、負荷変動に対応した複雑な熱流体現象(翼周りの流れ、燃焼流れなど)の予測技術の開発、高度化、および性能の検証などが必要となる。

(3)蒸気タービンを例とした研究開発イメージ

トライボロジーモデル構築と検証では、高温環境下での直接潤滑スラスト、ジャーナル軸受や歯車における潤滑状態変化予測技術の開発、複合材料摺動面における損傷予測技術の開発、およびそれらの性能の検証などが重要となる。

(4)自動車を例とした研究開発イメージ

流体・構造・振動連成モデル構築と検証では、車体・タイヤ空力特性などの運動性能と走行時の安定・振動騒音予測モデルの開発などが、流体・伝熱・燃焼・化学連成モデル構築と

検証では、電動化システムのエネルギーマネジメント開発などが重要となる。

(5) 工作機械を例とした研究開発イメージ

トライボロジーモデル構築と検証では、軸受案内面の摩擦特性の把握や軸受案内面の高剛性化、転がり軸受の剛性予測手法の確立が、流体・伝熱・燃焼・化学連成モデル構築と検証では、加工熱、切削液、外気温や空調による機械周囲温度変化などによる材料の熱変形、治具の熱変形、機械構造の熱変形モデルの開発とその性能検証が重要となる。

(6) 船舶海洋を例とした研究開発イメージ

機械損傷プロセスモデル構築と検証では、船用エンジンのクランク軸受材料損傷メカニズムや燃焼室構成部品の損傷プロセスの解明と寿命予測モデルの構築が、流体・構造・振動連成モデル構築と検証では、機関室内の各種機器連成モデルを考慮した機関室トータル再現モデル構築とその性能検証が重要となる。

デジタルツインが、原理原則の理解に基づく複合要因の解析・予測を可能にすることで、上記製品・サービスの開発期間の大幅短縮のみならず、性能向上、保守サービス向上に係る研究開発にも新たな方向性を示すものとなりうると考えられる。

上記のような研究開発課題を推進し、デジタルツイン技術とそれを支える先進設計・製造基盤技術を確立、世界をリードしていくには、基礎研究から社会実装までを俯瞰した一貫通貫の研究開発が可能な、産学官のネットワーク型連携推進体制（コンソーシアム）を適切に構築し、産学官が連携して研究開発を進めるプロジェクトの推進が重要である。さらに、データ連携共通プラットフォーム創出、国際標準化戦略、規制緩和などの出口戦略や人材育成などにも着実に取り組むことも必要である。

【コラム 1】 デジタルツインの理想的な姿

デジタルツインは、現実世界のモノの代わりに様々な状況の把握や予測に利用可能なデジタルデータで、理想的な姿として、大きく以下の 3 条件がある。

①現実世界を忠実に再現

これは、設計段階で設定した形状や物性に基づいた再現ではなく、現実世界にある現時点での製品や設備を再現することである。生産段階で発生する様々なばらつき、使用段階での動作状況や経年劣化、保守・修理や改良に伴う変化なども含めてデジタルツインに反映させる必要がある。この結果、実態に合った分析や予測が可能になる。

②常に最新情報

設計データと現実世界のモノには違いがある。現実世界のモノは常に変化し続ける。ある時点で情報を収集してデジタルツインを作成しても、時が経つと正確ではなくなってしまう。常に情報をリニューアルし、デジタルツインを最新状態に保つ必要がある。

③1 対 1 対応

上記のように、現実世界のモノは常に変化し続け、2 つと同じモノはない。すなわち、大量生産品であっても、実際に市場で使われている製品は異なっている。工場で見ると、同じメーカーの同じ型式の工作機械であっても、1 台 1 台で状態は異なる。このような個別の違いを表現できることがデジタルツインには求められる。

現実には、上記条件を完全に満たすことは難しく、例えば、最新情報といってもデータを取得する間隔、データを収集してデジタルツインに反映させるまでの時間遅れをゼロにはしにくい。但し、様々な技術革新によって理想のデジタルツインに近づきつつある。IoT 技術の進化は市場後製品からの収集情報の種類を増やし、時間遅れも短くしている。AI やビッグデータ解析によって、従来未獲得情報を精度良く予測できるようになった。拡張現実感(AR)等技術は、デジタルツインによる検証結果を人間が理解しやすいように表示するのに役立つ。

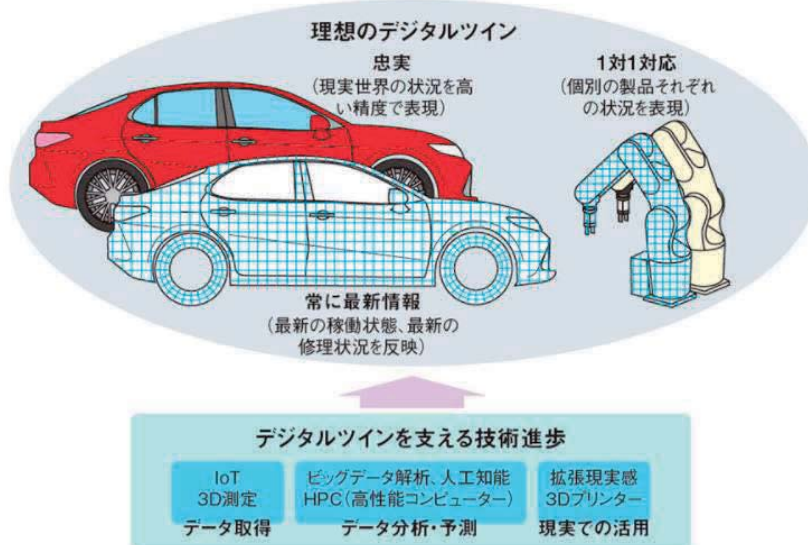


図 C1-1 理想的なデジタルツイン ¹⁾

【参考文献】

1) 日経ものづくり 2017 年 8 月号 <http://techon.nikkeibp.co.jp/atcl/mag/15/00161/00001/>

2．研究開発を実施する意義

2016 年度に開始した第 5 期科学技術基本計画では、世界に先駆けた超スマート社会 (Society 5.0) の実現が謳われ、「新たなものづくりシステム」や「エネルギーバリューチェーン」などのプラットフォーム構築が重要となっている。しかしながら、近年、製造、材料、構造・強度、機械、燃焼、伝熱、流体、振動、化学、電気などのものづくり基盤の脆弱化が懸念されている。本章では、ものづくりの現状認識および問題点を分析した上で、「新たなものづくりシステム」として近年注目されつつあるデジタルツインとそれを支える先進設計・製造基盤技術に関する本提案の位置づけ、社会・経済的効果および科学技術上の効果について述べる。

2-1．現状認識および問題点

＜デジタルツインとそれを支える先進設計・製造基盤技術の現状と課題＞

ものづくりのデジタル化技術および全体解析技術として近年注目されつつある「デジタルツイン^{*2.1}」は、将来発生する事象をデジタルの仮想世界で予測することが可能な先進的シミュレーション技術である。製品のバリューチェーン全体を通じて高い付加価値が提供される。表 2-1 は、世界におけるデジタルツインへの先駆的取り組み例を示す。製造業以外も含めた産業全体のデジタル化は確実に進行しており、今後、デジタルツインの普及によりバリューチェーン全体のプロセスは大きく変貌すると考えられる。本分野では、基礎科学からの多様な基盤技術の統合化による複合現象モデルの開発、検証が益々重要になっているが、表 2-2 のように、モデリングの基礎となる物理・化学現象の把握・理解が不十分な研究領域は多々あり、これら現象の把握・理解に基づいた複合現象モデルの開発、評価方法の開発・標準化、評価データの蓄積が喫緊の課題となっている。

日本のイノベーション競争力を中長期的に維持強化し、Society5.0 の新たなものづくりシステムや低炭素エネルギー未来社会を実現していくためには、世界を凌駕するデジタルツイン技術やそれを支える先進設計・製造基盤技術の確立に加え、未来社会に対応する新しい視点での上記基盤技術の研究や開発、それらを支える施策が必要である。さらに、これらの技術の活用によりものづくり基盤の強化を図る必要がある。

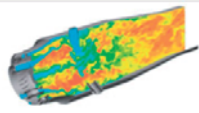
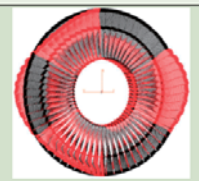
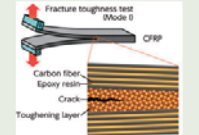
^{*2.1} 現実空間とサイバー空間の融合がデジタルツインの目指す姿であるが、これに加えて、産業の現場において、現場の知恵・ノウハウ（暗黙・形式知）を活用することにより、人のアクティビティ・判断や意思決定（例えば、技術者のラインの設計、改修や現場の作業者の改善活動）を含む「知的活動世界」を融合させて、人と計算機を協調させながら価値を創造するネットワークシステムを特にデジタルトリプレットと呼ぶ場合がある。デジタルツイン技術の根幹となる複合現象モデル構築やデジタルツインを活用した設計・製造などには、当然、産学の現場の知恵・ノウハウ（暗黙・形式知）・人知を考慮したモデリングや人の判断・意思決定が重要で、これらを考慮したモデル化、デジタルツイン活用が行われる。従って、本提案におけるデジタルツインの概念はト

リプレットの思想を含んでいるものとする。また、支えとなる多様な基盤技術を統合化する革新性から革新的デジタルツインと呼ぶ。

表 2-1 デジタルツインへの先駆的取り組み事例¹⁾

バリューチェーン	実施者	対象	内容	期待効果
開発・設計	ロッキード・マーチン社	航空機	・試作機をサイバー空間上に再現 ・様々な故障モードを想定して仮想飛行 ・初飛行前に不具合を事前に抽出	手戻り最小化、 開発期間短縮、 事故率低減
開発・設計	ダイムラー社	自動車	・トラックのバーチャルテストで認証受け(FP7) ・様々な故障モードを想定して仮想走行 ・初走行前に不具合を事前に抽出	手戻り最小化、 開発期間短縮、 開発コスト低減
製造	シーメンス	スマートファクトリー	・物理的な工場の製造設備・制御機器も含めた全ての情報をデジタル化 ・サイバー空間上で製造設備の配置、産業ロボットや製造技術者の動き等を事前にシミュレーション	高度で多様な検証が可能
保守	GE (右記以外は後述)	風力発電	・デジタルツインで発電機効率最大化シミュレーション ・気象条件考慮の風車翼制御パラメータ変更で出力制御 ・風車同士相互作用シミュレーションによる運用改善	風力発電所全体の出力増加、 個体差を考慮した出力制御サービス提供
保守	米CAD／PLMベンダー PTC	自転車	・自転車搭載センサーの計測データがデジタルツインに送信され、クラウド上で解析されてビジュアル化 ・実際の製品の使用状況を常に把握可能	故障予知や次期モデルへの改善に活用

表 2-2 モデリングの基礎となる現象の把握・理解が不十分な研究領域例

技術分野	未解明の物理・化学現象(例)	参考図
機械(機械要素・トライボロジー)／構造強度	・転がり軸受けなど機械要素の損傷メカニズムにおける亀裂進展プロセス ・潤滑膜の流れと構造体の運動、表面変形などの相互作用メカニズム 等	
燃焼／流体	・急激な過渡現象に対応するガス燃焼制御、空力制御に必要な素反応と乱流の相互作用メカニズム 等	
流体/構造/振動	・回転機械や輸送機器における流体、構造、音響の相互作用メカニズム ・複雑な流体関連振動現象における自励振動メカニズム 等	
構造強度／材料／流体	・流体中における炭素繊維複合材料(CFRP)の亀裂進展プロセス 等	

図出典：ジェイテクト、重工技報、龍谷大学理工学部、JST

＜ものづくり基盤技術に関する世界の取り組み＞

一方、世界を見ると、近年、デジタルツインやそれを支える先進設計・製造基盤技術において、時代の変化に対応した新しい視点での設計・製造・加工技術などのイノベーションが要求されている。ドイツでは、Industrie4.0 に代表されるように、シミュレーション基盤技術などのイノベーション振興施策が実施されている。EU は、Horizon2020 の下、2016 年「Smart Cyber Physical Systems」として、約 22 億円を製造の自動化に向けたサイバーフィジカルシステム技術(CPS、デジタルツインは CPS の一つの形態)への取り組みに投資した。英国では高付加価値製造カタパルトが既に始まっており、2017 年 3 月には、デジタルカタパルトとイノベート UK が、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開始した。

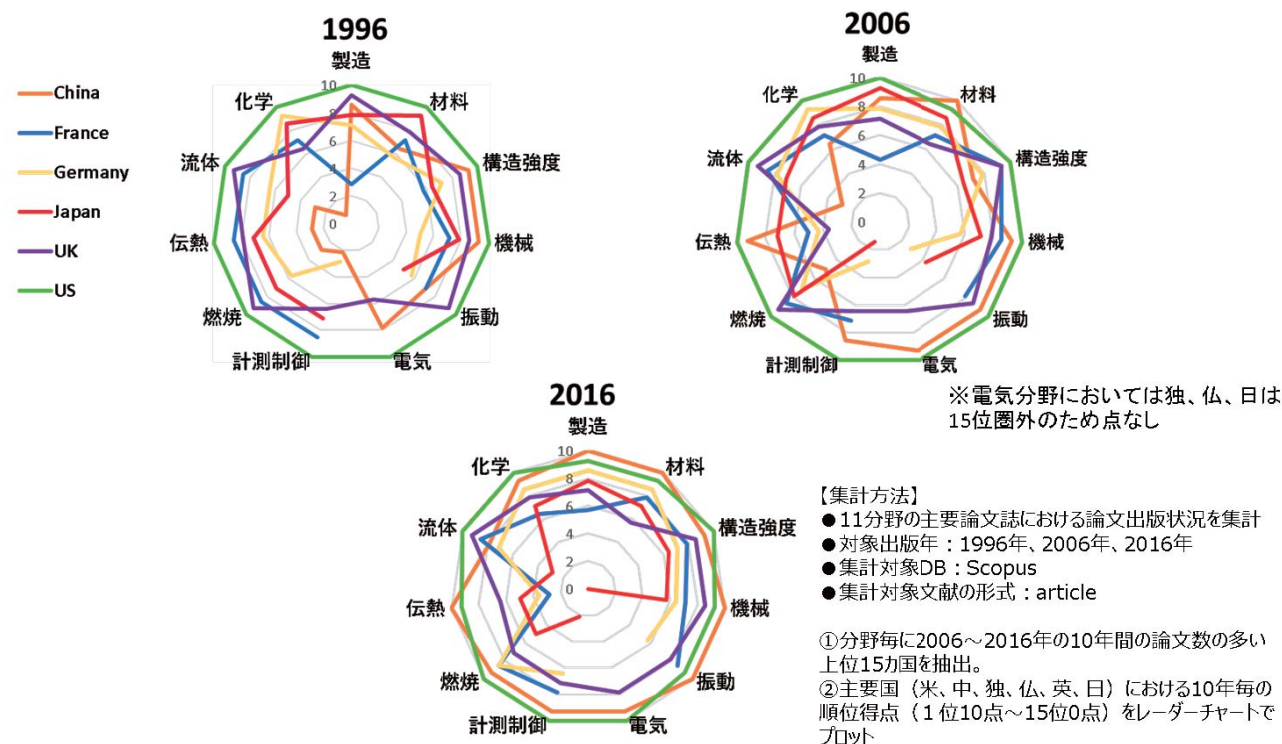
米国では、2011 年以降、国家先進製造戦略計画（National Strategic Plan for Advanced Manufacturing）や先進製造パートナーシップ（AMP: Advanced Manufacturing Partnership）などで、先進製造のためのデータ基盤を整備してきており、製造イノベーションの育成と商業化の促進に取り組む産学官パートナーシップ Manufacturing USA など推進している。また、米国科学財団 NSF が、2008 年以来、計約 300 億円を CPS 技術に対して投資してきている。ERC(Engineering Research Centers)プログラムでは、産学連携プロジェクトにて、基礎科学の知見獲得からの基盤技術に基づいてデジタルツインの社会実装まで着実に実施しているものもある。さらに、GE などの一部企業で、デジタルツイン技術の導入事例が幾つか出てきている。

＜産学のものづくり基盤の現状と課題＞

日本が、今後も、ものづくり国家として他国には真似のできない信頼性の高い製品・サービスづくりの強みを継続していくためには、設計・製造基盤技術の深耕と伝承が欠かせない。しかしながら、大学では、基盤技術分野の研究力も中国などに比べ弱化してきている（図 2-1）。この背景としては、ものづくりを支える先進設計・製造基盤技術を担う工学系専門人材の減少が深刻化していることなどが考えられる（図 2-2）。

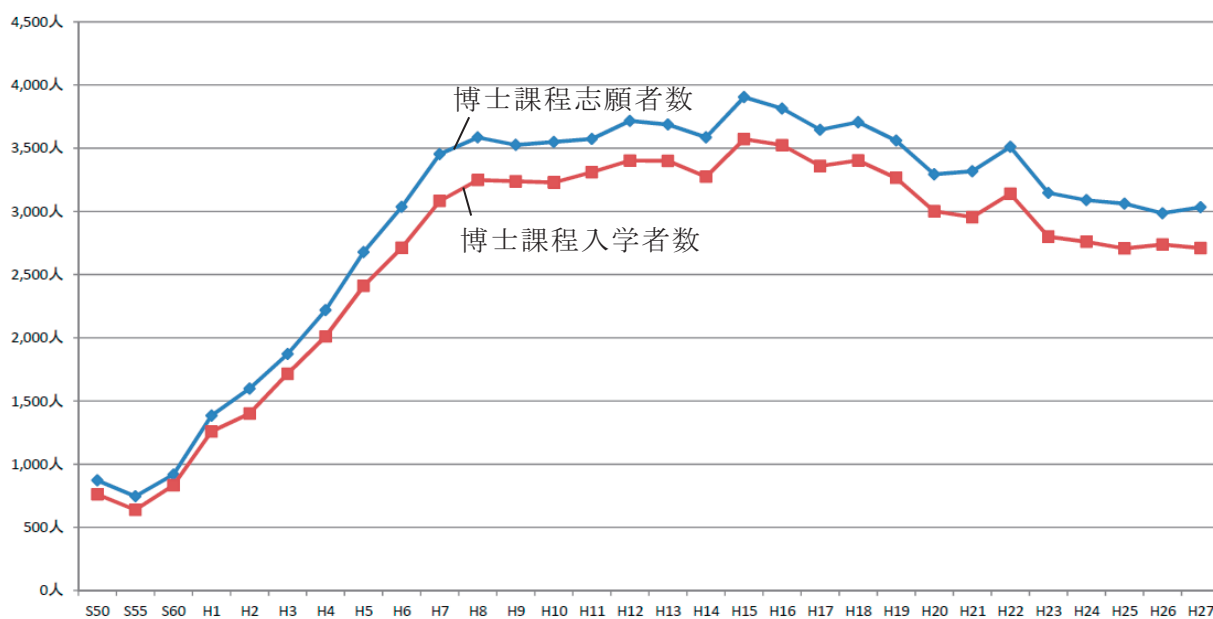
エネルギー基盤技術(工学)俯瞰ワークショップ(2016/11/25, 26 開催、付録 1 参照)によると、日本の産業界では、製品、要素技術の性能品質は総じて世界有数だが、ビジネスモデルが弱く、プラットフォーム戦略による優位性の確保などができていない。ものづくり産業の設計・製造現場で用いられる解析技術に関して、個別の要素解析技術で世界レベルにある分野がある一方、システム化や統合化は国際的に後塵を拝し、モデリング、シミュレーションの基礎となる物理・化学現象の把握・理解、評価方法の開発・標準化、評価データの蓄積が立ち後れている。全体解析技術〔ソフトウェア（表 2-3）、モデル構成式、検証データ取得〕では欧米に大幅なリードを許している。このため、環境・エネルギー機器や輸送機器・サービスの開発・製造・保守に際して、品質、納期、コスト面で産業競争力が発揮できていない。また、日本の企業が、オープンイノベーションで、上記のモデリングや検証データ取得などを欧米や中国の大学に委託する例が散見され、日本の大学の基礎研究が弱くなると同時に日本の企業にも研究基盤が蓄積されないという悪循環となっている。このように、ものづくり産業を支える工学系分野の研究基盤弱体化の懸念が強まっており、産業界ならびにアカデミアが直面する

上記問題の解決には産学官が連携して一体となって取り組む必要がある。



[日本は、全分野で弱体化。米国は全分野でトップレベルを維持。中国はここ10年間で飛躍。]

図 2-1 基盤技術分野における主要論文誌論文数の各国比較



[工学系博士課程志願者および入学者は、平成15年度をピークに減少傾向にある。]

図 2-2 工学系博士課程の志願者・入学者の推移¹⁾

表 2-3 代表的な汎用ソフトウェア例

[日本で利用されている代表的なソフトウェアは、欧米製のものが多い。]

項目	コード名	対象分野	開発元	国
熱流体解析 他	PHOENICS	熱流体、蒸発/凝縮、凝固/溶融等	CHAM社	英国
	ANSYS CFX/Fluent	乱流、伝熱、燃焼、空力音響、回転機 械、混相流等	ANSYS社	米国
	Star-CCM+	燃焼、熱流体等	CD-adapco社	英国
	AcuSolve	乱流、熱流体、伝熱等	アルデアエンジニアリング社	米国
	COMSOL	熱流体、構造強度、音響、電磁場、 化学等の連成現象	COMSOL社	スウェーデン
反応解析他	CHEMKIN	燃焼反応、化学反応等の連成現象	Reaction Design社 (Sandia National Lab.)	米国
構造解析 他	Nastran	構造強度、流体、電場等	MSCソフトウェア社	米国
	ANSYS	構造強度、流体、電気、電磁場等の 連成現象	ANSYS社	米国
	Abaqus	構造強度、振動、音響、衝突等の 連成現象	HKS社	米国
衝突・衝撃 解析他	LS-Dyna	衝突、衝撃、構造強度等	Livermore Software Technology社	米国
汎用量子 化学計算	Gaussian	化学(電子状態計算等)	Gaussian社 (カーネギーメロン大学)	米国

【参考資料】

1) 三井物産戦略研究所、「2017 年に注目すべき 4 つの技術・イノベーション」

https://www.mitsui.com/mgssi/ja/report/detail/1222444_10674.html2) 文部科学省高等教育局、「大学における工学系教育の在り方について（中間まとめ）」、
工学関連基礎資料http://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/_icsFiles/afieldfile/2017/06/27/1387312_04.pdf

2-2. 本提案の位置づけ

Society5.0 施策における新たなものづくりシステムの構築によるものづくり現場の生産性革命や、低炭素エネルギー未来社会を実現するには、製品・サービスの設計・製造・保守の高効率化、高機能化に加え、開発期間、開発コストを低減する必要がある。

元来、デジタル空間に物理世界を双子のように再現するデジタルツインの概念は、設備などのファシリティからコミュニティまでさまざまな業界・領域に応用が利く概念であるが、本提案の革新的デジタルツインは、開発、設計、製造、保守などのものづくりを対象とする。革新的デジタルツインに関する研究開発課題で対象とする製品分野・領域としては、デジタルツイン活用の効果や低炭素社会への貢献が大きい製品・サービス領域、すなわち、ものづくり技術の難易度が低く、開発期間・コストが小さいコモディティー製品・サービスではなく、ものづくり技術の難易度が高く、開発期間・コストが大きい環境・エネルギー・輸送に関する機器・サービス領域を選定する(図 2-3)。

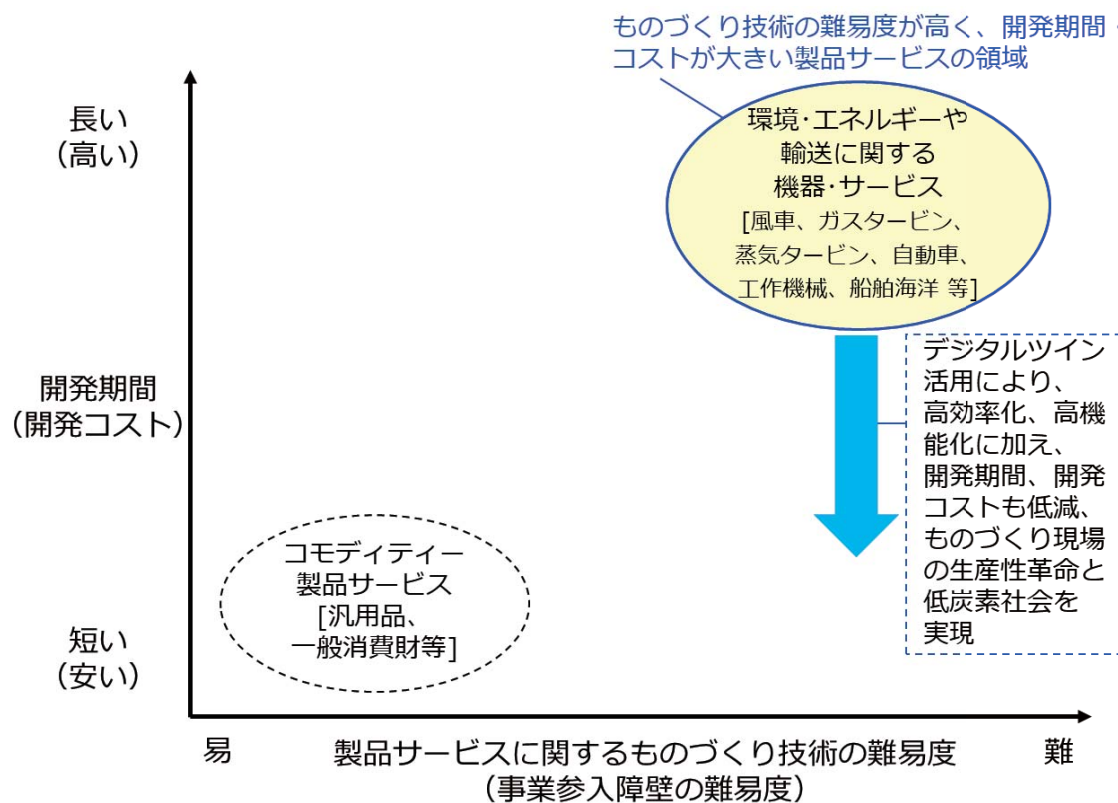


図 2-3 革新的デジタルツインに関する研究開発課題で対象とする製品分野・領域

ものづくりの革新的デジタルツイン構築に必要な取り組みも多岐にわたるが、前項の現状認識および問題点で述べたとおり、デジタルツインの根幹となる複合現象モデルの開発、検証が今後益々重要になるため、本提案では、以下の3つの方向性を重視する(図 2-4)。

- ① 多様な基盤技術の統合化による、基礎的原理解明からの複合現象モデルの開発・検証、および、モデル計算効率化技術開発、構築モデルの評価方法の開発・標準化
- ② ①に資する基礎科学研究からの知識基盤構築
[物理・化学現象の把握・理解、基盤となる構成方程式の確立、評価データ取得、蓄積等]

③ ②を活用した人材育成

[ものづくり産業を支える工学系の基礎的原理を理解した人材、科学的合理性に基づき、ものづくりができる人材の育成等]

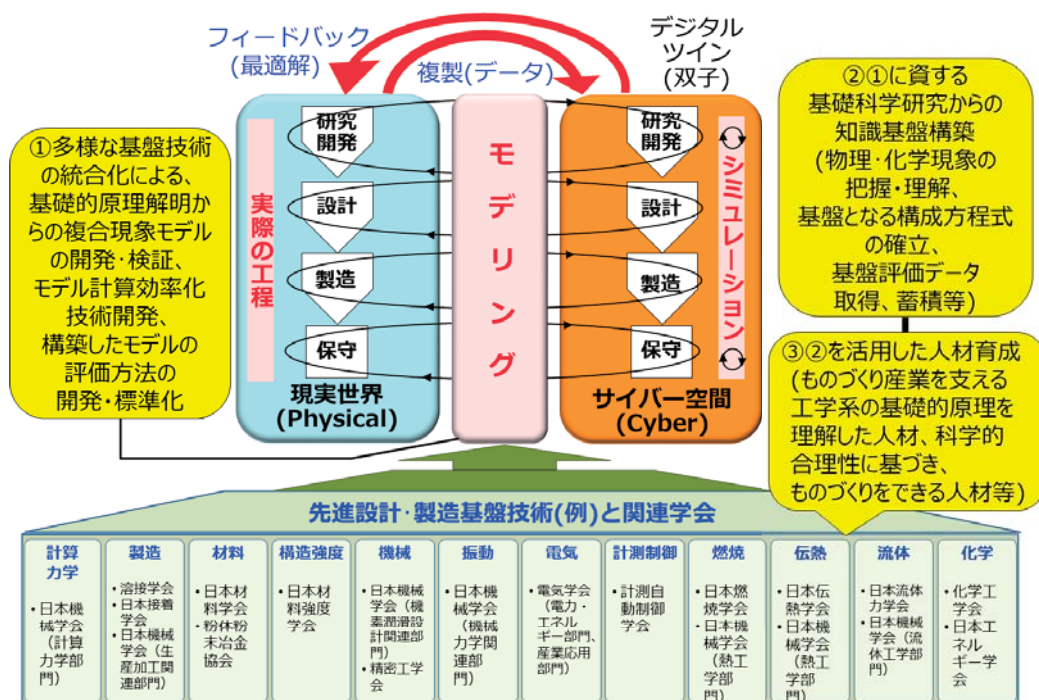


図 2-4 本戦略プロポーザル提案の方向性（基盤技術例に関連する学会も記載）

さらに、上記①、②のイメージを 3 層構造の研究戦略※2.2 の枠組みを用い、図 2-5 に示す。従来の研究開発プロジェクトでは、知識基盤が脆弱な幾つかの個別基盤技術のシステム化が中心であったが、本提案では、社会実装まで着実に見据え、基礎科学の知見獲得(緑の下方向矢印)とその知識基盤に基づく多様な基盤技術統合化(紫色の両矢印)による革新的デジタルツイン達成を目指す。基礎研究から事業化・実用化までを俯瞰した一気通貫の研究開発となる。

※2.2 Three-plane Strategic Diagram、米国科学財団 ERC(Engineering Research Centers)プログラムで用いられる研究戦略の枠組みで、最上層：技術統合(技術移転)、中間層：技術基盤、最下層：知識基盤。

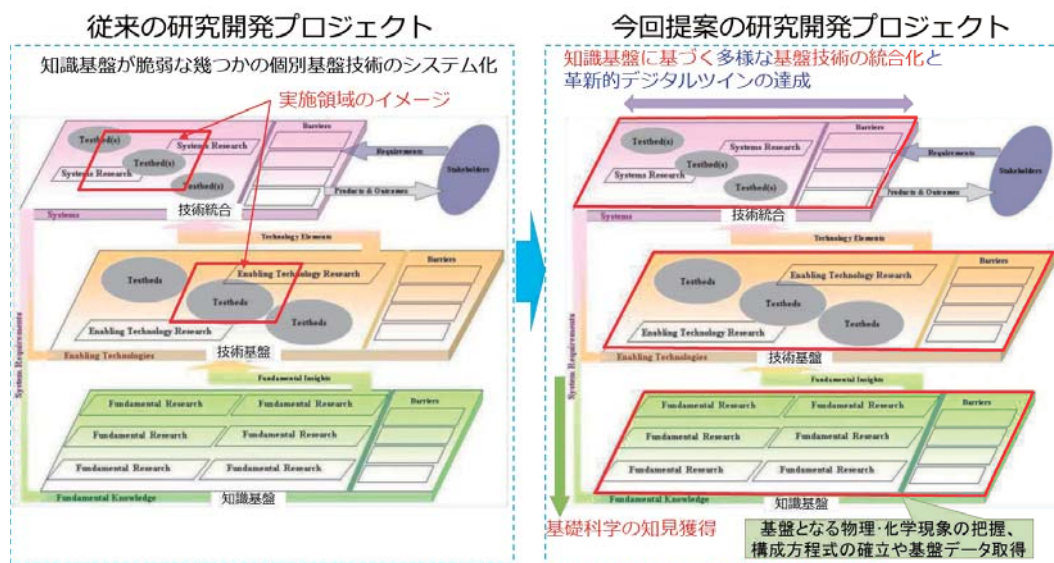
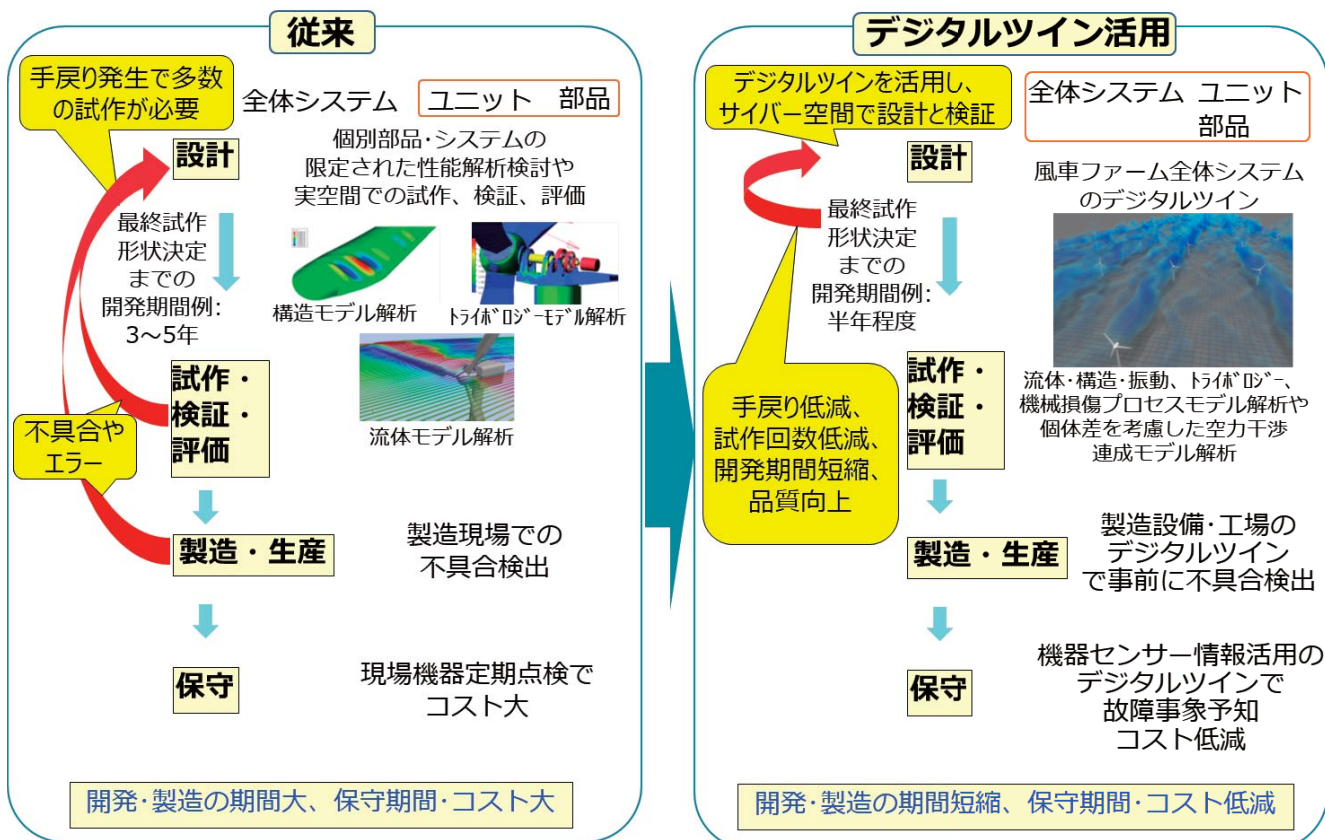


図 2-5 革新的デジタルツイン構築のための基礎学理確立と多様な基盤技術の統合化

2-3. 社会・経済的効果

革新的デジタルツインを産学官共同で開発、確立し、本提案の課題に対応した研究開発成果が社会実装されれば、日本発の次世代ものづくりの共通基盤となるシステムが構築される。製造業のバリューチェーン全体を通じて、製品・サービスの効率向上、故障予知などの品質向上、開発期間の短縮、開発コスト・保守コスト低減等により、ものづくり現場の生産性が劇的に向上し、ものづくり産業の生産性革命に貢献できる。さらに、今後、市場規模拡大を含めビジネスチャンスが拡大し、日本の国際市場獲得や雇用確保、CO₂削減にも貢献できる。

例えば、図 2-6 に示すように、風力発電の風車について、現状 3～5 年かかる開発期間をデジタルツインのモデル解析により、検証段階での手戻り、試作等を減らし、半年程度に低減できる可能性がある。同技術はタービン、自動車、工作機械等、幅広い環境・エネルギー機器、輸送機器分野へ展開が可能である。



図出典：MSC Software Cooperation, AIP Publishing, Bladen

図 2-6 デジタルツインによる開発、製造、保守の加速化・効率化～風車での例～

また、力学基盤を中心とするデジタルツインモデル構築の中で得られる、基礎的原理説明からの新たな材料強度評価規格の提案による国際標準化や、それに伴う日本国内の規制見直し促進も期待される。

上記のように、サイバー空間とフィジカル空間（現実世界）を融合させた技術の活用と、同時にそれを支えるものづくり基盤の強化によって、「新たな開発・ものづくりシステム」、ひいては「Society 5.0」の構築に寄与できる。

2-4. 科学技術上の効果

2-1 節の表 2-2 に示すように、モデリングの基礎となる物理・化学現象の把握・理解が不十分な研究領域はまだ多々ある。このような未解明現象に対し、基礎的理理解明からデジタルツインモデルを構築することで、日本の産業界やアカデミアのエンジニアリングにおける物理・化学現象の把握・理解が進む。多様な基盤技術の統合化による、基礎的理理解明からの複合現象モデルの開発・検証を通して、現象解明からの新しい視点でのものづくりの基盤技術構築が図れる(図 2-7)。

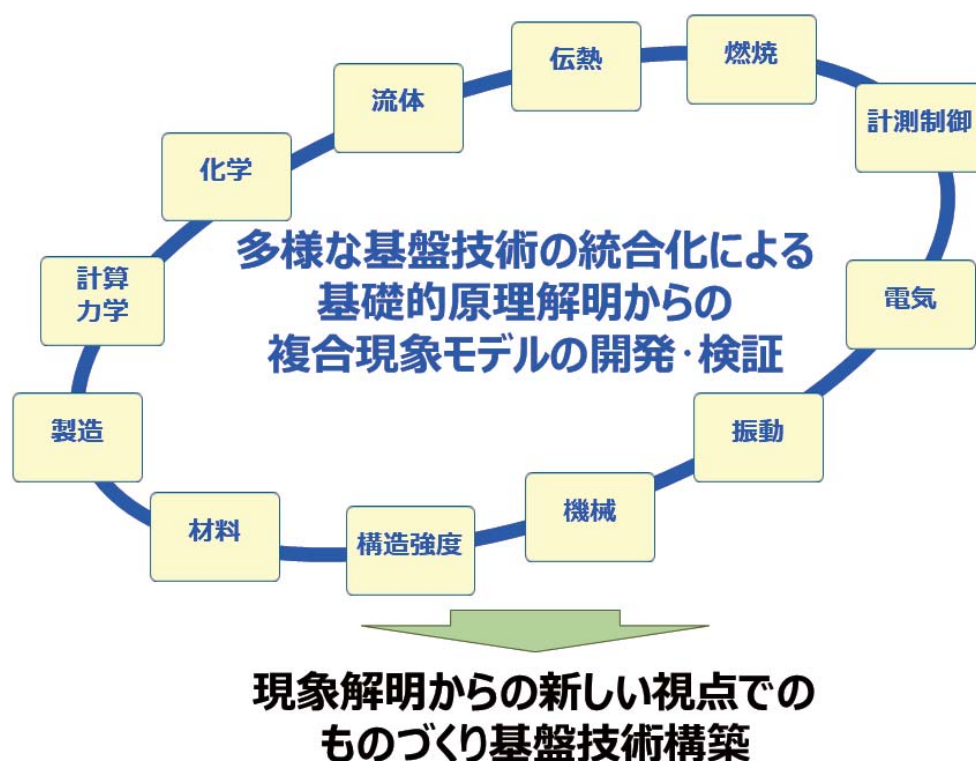


図 2-7 デジタルツインモデル創生による新しい視点でのものづくり基盤技術構築

また、デジタルツインを支える先進設計・製造基盤技術の発展、伝承と人材育成のための新たな産学官連携体制や産学官コンソーシアム構築により、工学系人材が実際にデジタルツインを活用して知見を蓄積できる。さらに、サイバー空間上に精緻なモデルを組み上げ高精度な実証、予測、最適化を可能とするデジタルツインを代表として、「バーチャル空間」と「リアル空間」の融合等を俯瞰的に把握できる人材(デジタルツイン人材)が継続的に育成できる³⁾。

【参考資料】

3) 文部科学省高等教育局、「大学における工学系教育の在り方について（中間まとめ）」、
http://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/_icsFiles/afieldfile/2017/06/27/1387312_01.pdf

3．具体的な研究開発課題

本提案では、2-2節で述べたように、革新的デジタルツインに関する研究開発課題で対象とする製品分野・領域として、デジタルツイン活用の効果や低炭素社会への貢献が大きい製品・サービス領域、つまり、ものづくり技術の難易度が高く、開発期間・コストが大きい環境・エネルギー・輸送に関する機器・サービス領域を選択する(図 2-3)。

例えば、風車、ガスタービン、蒸気タービン、自動車、工作機械、船舶海洋等の環境・エネルギー機器、輸送機器の設計・製造や保守(寿命予測)を行う際に必要となるデジタルツインを出口として想定し、その開発および活用を通じた日本の先進設計・製造基盤技術の強化およびものづくり産業における国際競争力強化を可能にする仕組み構築を目指す。この実現に向けて以下の具体的な研究開発課題に取り組む(図 3-1)。上記デジタルツインタラゲット製品例は、2030 年の世界市場規模や日本の製造業シェア、現在に対する CO₂ 削減量効果の寄与度などを考慮して絞り込んだ。各製品に展開可能な研究開発共通課題と製品毎の研究開発課題を順に示す。なお、これらの研究開発課題は、参画企業の共通基礎的な技術課題テーマを協調領域として切り出したものである。

研究開発課題 [下記メカニズムの解明、モデル構成式の確立、 複合現象モデルの開発と実験的検証、評価方法 の開発・標準化及びデジタルツイン]	ターゲット製品(例)					
	風車	ガスター ビン	蒸気 タービン	自動 車	工作 機械	船舶 海洋
a 機械損傷プロセスモデル構築と検証	○	○	○	○	○	○
b トライボロジーモデル構築と検証	○	○	○	○	○	○
c 流体・構造・振動連成モデル構築と検証	○	○	○	○	○	○
d 流体・伝熱・燃焼・化学連成モデル構築と検証		○		○	○	○
e a～d統合化モデル(デジタルツイン)構築と検証	○	○	○	○	○	○

図 3-1 革新的デジタルツインに関する具体的な研究開発課題

<研究開発共通課題の概要>

a 機械損傷プロセスモデル※^{3.1} 構築と検証

【設定目標】

亀裂進展・破壊損傷プロセスモデルや寿命予測モデルの確立とデジタルツインへの展開

【課題の詳細】

本モデルでは、損傷・破壊過程や非線形変形過程は定式化されておらず、境界条件の取り扱いも未解明の部分が多く(図 3-2、図 3-3)、複合材料も含む機械要素の損傷メカニズムや亀裂進展プロセスの解明や、流体中の材料の破壊過程・耐久性・耐衝撃性などに関するメ

カニズムの解明および、モデル構成式の確立、それらに基づく寿命予測モデルの開発と実験的検証などが課題となる。

基礎式に関する課題

- ・ 損傷・破壊過程の定式化が未解明
- ・ 材料定数が多岐にわたり、かつ、実験が困難

境界条件に関する課題

- ・ 現象によって損傷変数や破壊クライテリオンが大きく変化
未解明の部分が多い

シミュレーションや実験の実行方法

- ・ 高温・腐食環境・長時間・繰返し負荷等の正確な実験手法
- ・ 非線形・時間依存現象など大規模シミュレーションが必要

図 3-2 損傷・破壊に関するデジタルツインの具体的課題

(出典：CRDS-FY2017-WR-09 革新的デジタルツインワークショップ報告書、以下図 3-11 まで図は同出典参照)

基礎式に関する課題

- ・ 構成式の関数形(非線形の場合)が未解明
- ・ 構成式に含まれる材料定数を実験的に決定することが困難

境界条件に関する課題

- ・ 接触問題などの実際の境界条件を正確に判別しにくい条件

シミュレーションや実験の実行方法

- ・ 高温・腐食環境・長時間・繰返し負荷等の正確な実験手法
- ・ 大規模非線形問題等の効率的な解析方法

図 3-3 変形に関するデジタルツインの具体的課題

※3.1 物理(化学)モデルは、物理(化学)現象を数式として表現したもの。支配方程式や、支配方程式を完結させるために導入される代数式や輸送方程式等を指す。例えば、既存の流体现象では、支配方程式が Navier・Stokes 方程式、Maxwell 方程式などで、支配方程式を完結させるために導入される代数式や輸送方程式モデルが、乱流モデル、反応モデル、粒子モデル、気泡モデル、分裂モデル等になる。

b トライボロジーモデル構築と検証

【設定目標】

回転機械摺動面相互作用モデルの確立とデジタルツインへの展開

【課題の詳細】

本モデルでは、回転機械の摺動面における低損傷化、低摩擦化等を目指した潤滑膜の流れと機械要素の運動や表面変形などとの相互作用メカニズムの解明、モデル構成式の確立、関連モデルの開発と実験的検証などが課題となる。

c 流体・構造・振動連成モデル構築と検証

【設定目標】

流体、構造、音響相互作用メカニズムや流体関連振動メカニズムモデル確立とデジタルツインへの展開

【課題の詳細】

本モデルでは、回転機械や輸送機械における流体、構造、音響の相互作用メカニズムや自励振動も含む複雑な流体関連振動メカニズムなどの解明、モデル構成式の確立、それに基づくモデルの開発と実験的検証(図 3-4)などが課題となる。

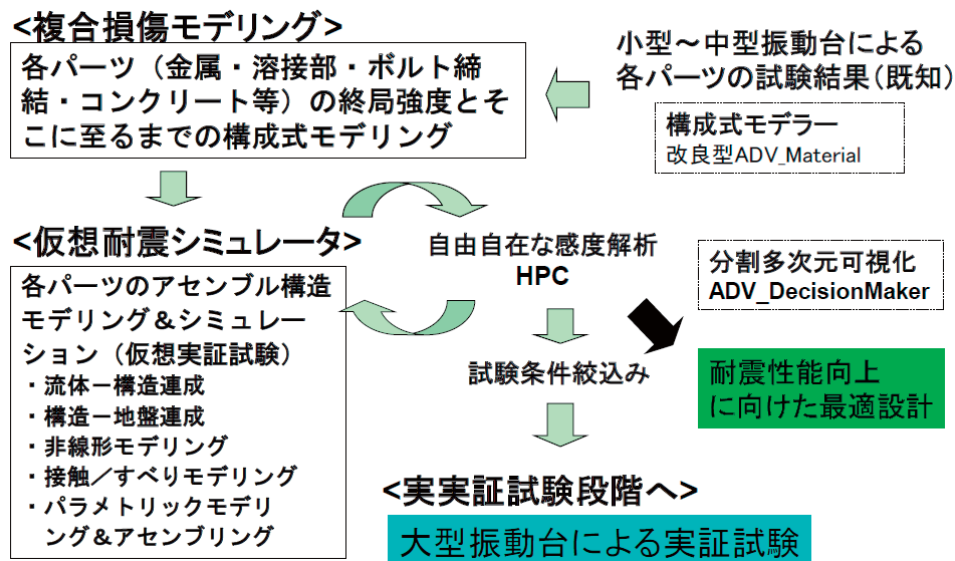


図 3-4 耐震シミュレータを例とした大規模構造連成解析と実証試験の関係

d 流体・伝熱・燃焼・化学連成モデル構築と検証

【設定目標】

急激過渡現象における燃焼素反応と乱流、伝熱の相互作用メカニズムモデル確立とデジタルツインへの展開

【課題の詳細】

本モデルでは、急激な過渡現象に対応する燃焼素反応と乱流(図 3-5)、伝熱・熱伝達(図 3-6)の相互作用メカニズムの解明、モデル構成式の確立、それに基づくモデルの開発と実験的検証などが課題となる。

e a～d 統合化モデル(デジタルツイン)構築と検証

【設定目標】

複合現象統合化モデルと高速化モデリング技術の確立およびターゲット製品課題への展開

【課題の詳細】

ターゲット製品例への展開も視野に、機械要素の運動、構造変形、振動、潤滑、流体、伝熱、燃焼、化学、電磁気など複合現象を記述する複数の支配方程式の高速連成解析モデルの開発と実験的検証が課題となる。デジタルツイン基盤技術としての課題は、上記共通基

盤モデルに関する計算アルゴリズム、離散化スキームや、精度を担保しながら計算負荷を減らす高速化モデリング技術などである。例えば、システム全体に生じる物理現象を扱う場合は、3次元でのシミュレーションの縮退物理モデルを1次元シミュレーションに組み込む形でデジタルツインに適用する。この際、現象のリアルデータが入手可能な場合、その統計モデルと物理モデルとのハイブリッドモデル構築なども重要な課題となる(図3-7)。

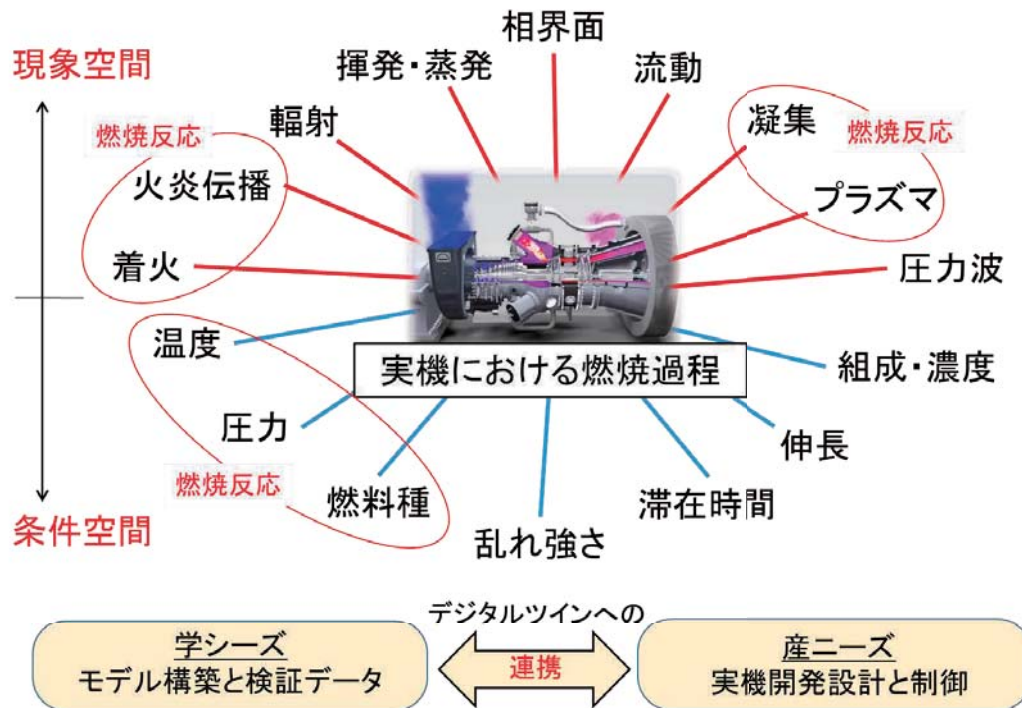


図 3-5 実際の機器燃焼場における物理現象と連成問題

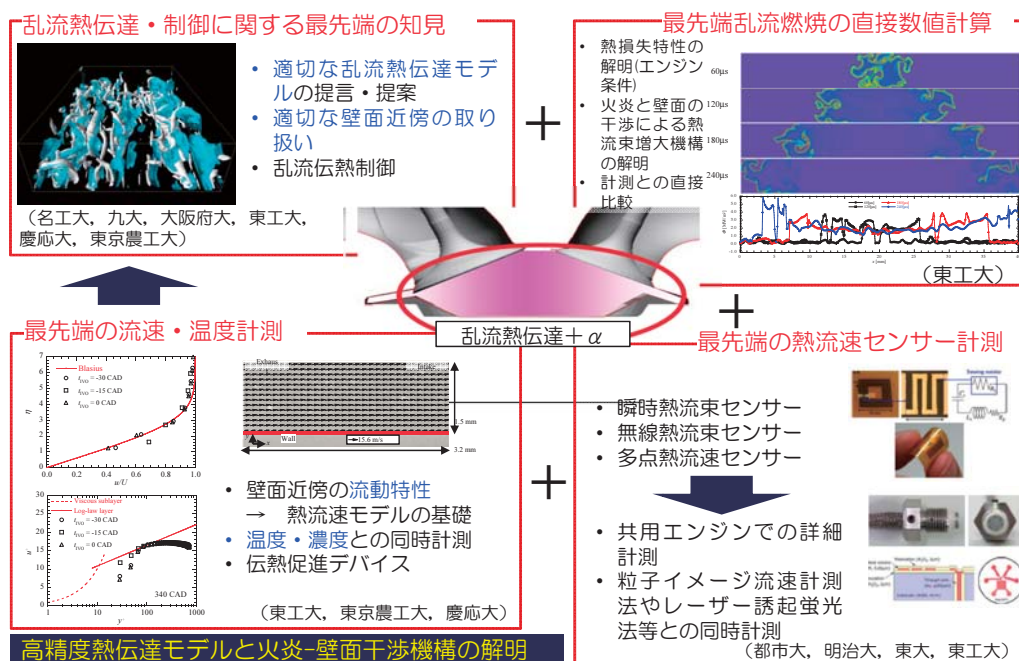


図 3-6 乱流熱伝達のモデリング

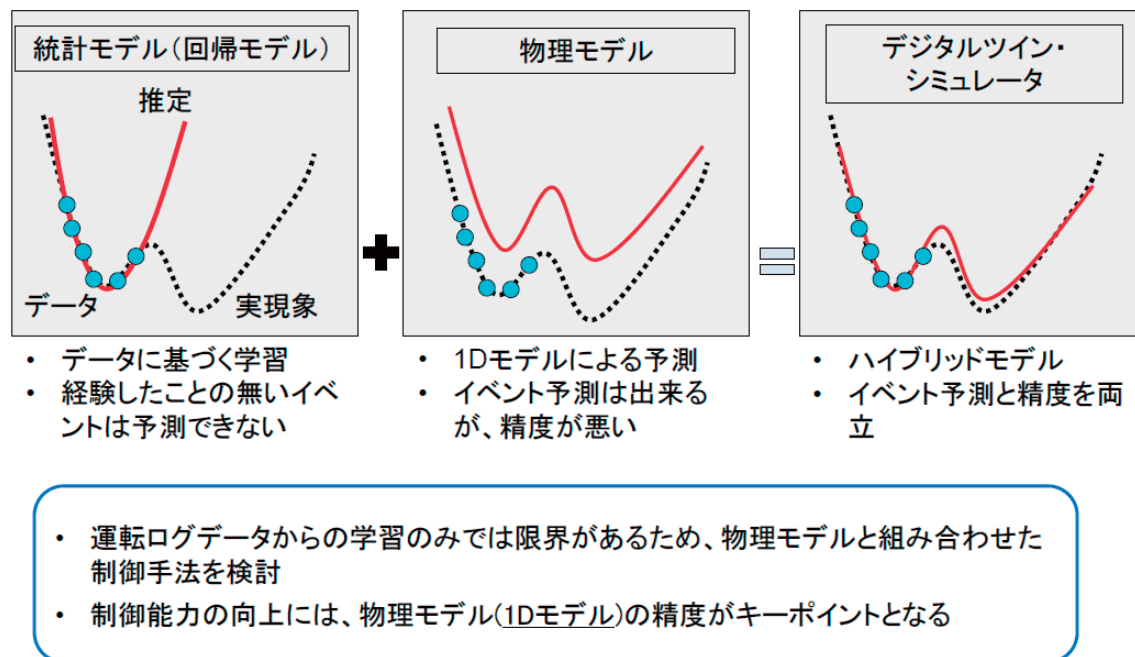


図 3-7 デジタルツインシミュレータの開発課題

＜デジタルツインターゲット製品例への展開における研究開発課題＞

(1)風車を例とした研究開発イメージ

現在稼働中の風車では、風車翼ブレード亀裂・破損・脱落やブレードの異常振動、ドライブトレイン故障、軸受けベアリング損傷などの故障が散見され、その低減が重要問題となっている。

＜風車の性能向上・保守サービス向上に係る主な研究開発テーマ例＞

- ・ 発電効率向上、大型化を実現するタワー、ドライブトレイン、翼、パワートレインに関するコスト低減、軽量化、高信頼性化技術の開発
- ・ 主軸用軸受け等大型部位の長期信頼性、耐久性向上負荷制御技術および翼構造素材開発
- ・ 個体差や気象条件を考慮した風車ファーム全体性発電出力&機器寿命予測シミュレーション技術開発

今後デジタルツイン構築とその利用が期待され、表 3-1 のような研究開発課題例が考えられる。機械損傷プロセスモデル構築と検証では、風車動力伝達機器における主軸用大型軸受など転がり軸受けの機械要素損傷メカニズムモデル新規構築とそれによる故障検知や寿命予測技術の開発および性能検証などが、トライボロジーモデル構築と検証では、増速機や回転体を支える軸受、それらを潤滑する油やグリースなどの潤滑膜の流れと機械要素の運動や表面変形などとの相互作用を考慮したトライボロジーモデルの構築と性能検証などが重要な課題となる。流体・構造・振動連成モデル構築と検証では、複数の風車機器の個体差を考慮した風車ファーム全体での空力干渉連成モデル[ウェイク(風車の後流)モデル]の構築と性能検証が大きな課題である。

図 3-8 は、上記モデルを活用したデジタルツインによる風車予防保全サービス向上のための研究開発課題例を示す。

デジタルツインが、原理原則の理解に基づく複合要因の解析・予測を可能にすることで、開発期間の大幅短縮のみならず、上記のような性能向上、保守サービス向上に係る研究開発にも新たな方向性を示すものとなりうると考えられる。以下の風車以外の製品展開についても同様である。

表 3-1 風車への展開における研究開発課題例

研究開発課題 [下記メカニズムの解明、構成方程式の確立、複合現象モデルの開発と実験的検証、評価方法の開発・標準化及びデジタルツイン]	風車での課題の例
a 機械損傷プロセスモデル構築と検証	SIP「革新的構造材料」で開発する金属材料での疲労寿命予測モデルや損傷モデルの知見等も活用した、風車動力伝達機器における主軸用大型軸受など転がり軸受けの機械要素損傷メカニズムモデル新規構築と、それによる故障検知や寿命予測技術の開発および性能検証。 複合材での疲労寿命予測モデル構築による複合材ブレード材料損傷進展予測技術の開発および性能検証。
b トライボロジーモデル構築と検証	風力発電機における増速機や回転体を支える軸受、それらを潤滑する油やグリースなどの潤滑膜の流れと機械要素の運動や表面変形などの相互作用を考慮したトライボロジーモデルの構築と性能検証。
c 流体・構造・振動連成モデル構築と検証	ポスト「京」重点課題で構築する洋上風力発電向け大規模数値解析基盤技術を活用した、風車翼ブレード後縁流れによる複合材ブレード連成振動解析技術の開発およびその検証、および、複数の風車機器の個体差を考慮した風車ファーム全体での空力干渉連成モデル[ウェイク(風車の後流)モデル]の構築と性能検証。
d 流体・伝熱・燃焼・化学連成モデル構築と検証	—
e a～d統合化モデル(デジタルツイン)構築と検証	課題a～dで開発されたサブモデルの統合化(部分統合および全体統合)及び性能検証。

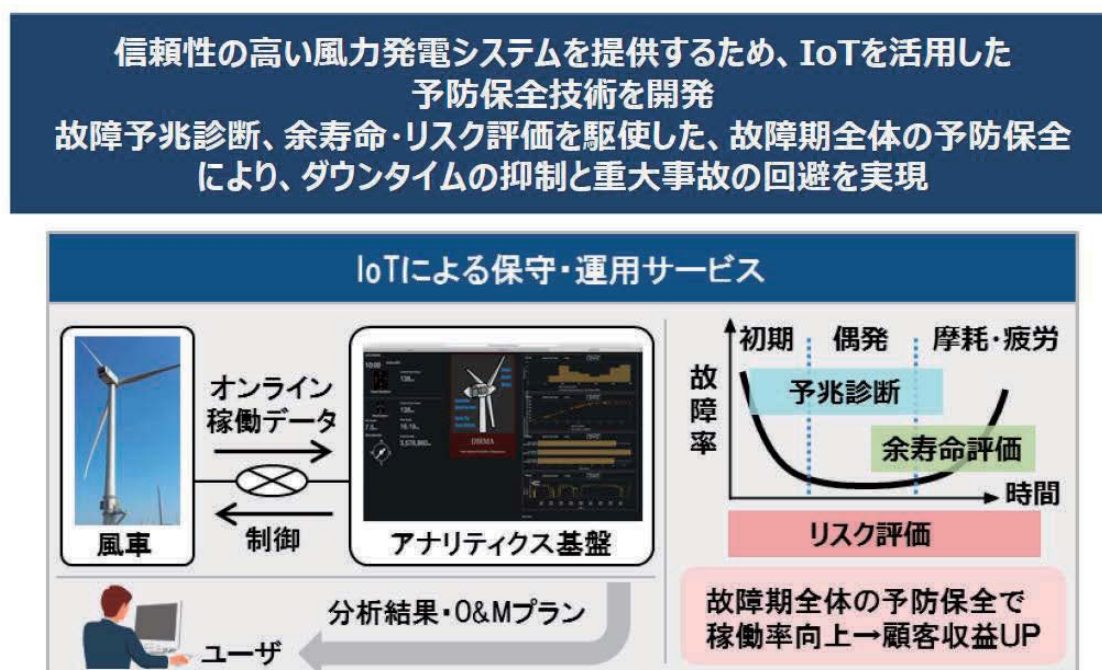


図 3-8 風車予防保全サービス向上のための研究開発課題

(2) ガスタービンを例とした研究開発イメージ

ガスタービンでは、ガス温度 1800℃以上の更なる高温対応化・高効率化および再生可能エネルギー大量導入への負荷変動対応がこれから問題となる。

＜ガスタービンの性能向上に係る主な研究開発テーマ例＞

- ・高効率化（高ガス温度 1,800℃級以上対応など）
- ・環境対応（軽構造型では軽量化等による省エネでの運用コスト削減・環境対策）
- ・火力発電の負荷変動対応（約 1 時間かかる起動時間の大幅短縮など）

ここでもデジタルツイン構築とその利用が期待されており、表 3-2 のような研究開発課題例がある。機械損傷プロセスモデル構築と検証では、材料特性を考慮したガスタービン高温部品の損傷進展予測技術の開発および性能検証などが、流体・構造・振動連成モデル構築と検証では、翼回転側と静止側(支持部、ケーシングなど)の連成振動解析技術の開発およびその検証などが、流体・伝熱・燃焼・化学連成モデル構築と検証では、負荷変動に対応した複雑な熱流体現象(翼周りの流れ、燃焼流れなど)の予測技術の開発、高度化、および性能の検証などが大きな課題となる。図 3-9 は、モデル技術に加え、先進センサー技術課題も含めたガスタービン先端技術の研究開発課題を示す。

表 3-2 ガスタービンへの展開における研究開発課題例

研究開発課題 [下記メカニズムの解明、構成方程式の確立、複合現象モデルの開発と実験的検証、評価方法の開発・標準化及びデジタルツイン]	ガスタービンでの課題の例
a 機械損傷プロセスモデル構築と検証	材料特性を考慮したガスタービン高温部品の損傷進展予測技術の開発および性能検証 SIP「革新的構造材料」の開発成果（マテリアルズインテグレーションシステム、溶接部性能保障のためのシミュレーション技術など）の活用
b トライボロジーモデル構築と検証	高温環境下での軸受や歯車における潤滑状態変化予測技術の開発、摺動面における損傷予測技術の開発、およびそれらの性能の検証
c 流体・構造・振動連成モデル構築と検証	翼回転側と静止側(支持部、ケーシングなど)の連成振動解析技術の開発およびその検証
d 流体・伝熱・燃焼・化学連成モデル構築と検証	複雑な熱流体現象（翼周りの流れ、燃焼流れなど）の予測技術の開発、高度化、および性能の検証 SIP「革新的燃焼技術」の開発成果（自動車エンジン3次元燃焼解析ソフトウェアHINOCAを構成する各種サブモデルなど）の活用
e a～e統合化モデル(デジタルツイン)構築と検証	課題a～dで開発されたサブモデルの統合化（部分統合および全体統合）および性能検証

(3) 蒸気タービンを例とした研究開発イメージ

蒸気タービンでは、蒸気温度 700℃以上の更なる高温対応化・高効率化や、特徴である長大翼の損傷低減が大きな問題となっている。

＜蒸気タービンの性能向上に係る主な研究開発テーマ例＞

- ・高効率化（700℃級以上）に資する Ni 基合金等耐熱材料の開発
- ・タービンの空力性能、振動抑制の改善を狙った翼枚数削減による高負荷翼の開発

今後、デジタルツイン構築とその利用が着目されており、表 3-3 のような研究開発課題例が考えられる。機械損傷プロセスモデル構築と検証では、Ni 基合金等材料特性を考慮した蒸気タービン高温部品の繰り返し応力による損傷進展予測技術、寿命予測技術の開発および性

能検証などが、トライボロジーモデル構築と検証では、高温環境下での直接潤滑スラスト、ジャーナル軸受や歯車における潤滑状態変化予測技術の開発、複合材料摺動面における損傷予測技術の開発、およびそれらの性能の検証などが課題となる。

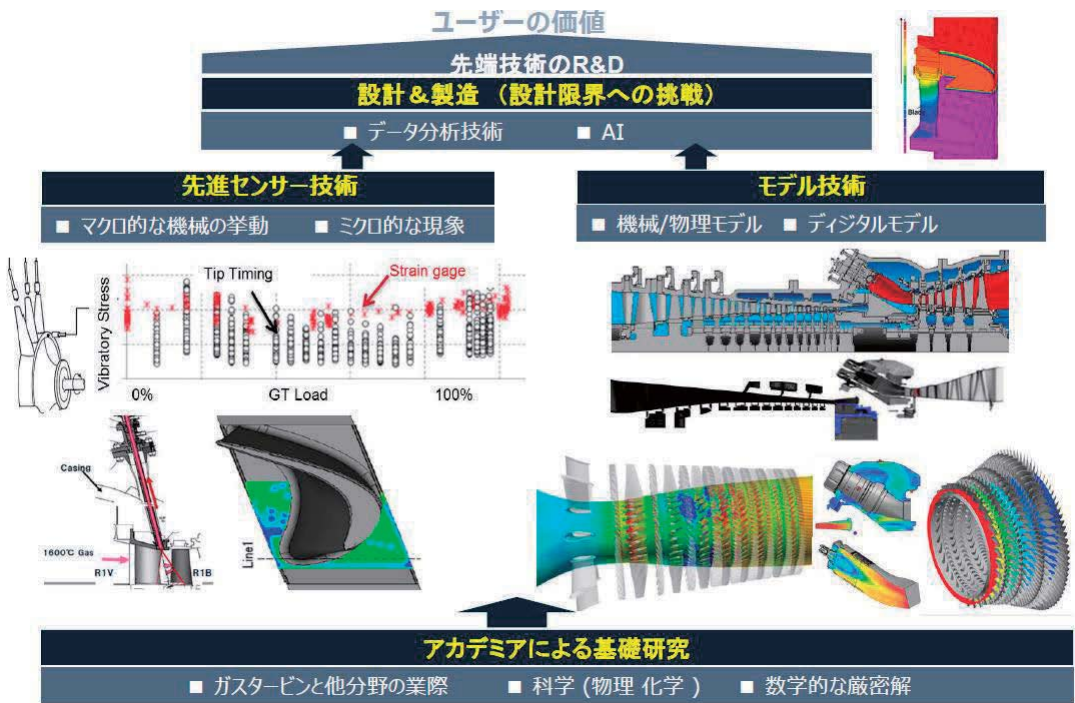


図 3-9 ガスタービン先端技術の研究開発課題

表 3-3 蒸気タービンへの展開における研究開発課題例

研究開発課題 [下記メカニズムの解明、構成方程式の確立、複合現象モデルの開発と実験的検証、評価方法の開発・標準化及びデジタルツイン]	蒸気タービンでの課題の例
a 機械損傷プロセスモデル構築と検証	Ni基合金等材料特性を考慮した蒸気タービン高温部品の繰り返し応力による損傷進展予測技術、寿命予測技術の開発および性能検証 SIP「革新的構造材料」の開発成果（マテリアルズインテグレーションシステム、溶接部性能保障のためのシミュレーション技術など）の活用
b トライボロジーモデル構築と検証	高温環境下での直接潤滑スラスト、ジャーナル軸受や歯車における潤滑状態変化予測技術の開発、複合材料摺動面における損傷予測技術の開発、およびそれらの性能の検証
c 流体・構造・振動連成モデル構築と検証	3次元翼回転側と静止側(支持部、ケーシングなど)の連成振動解析技術の開発およびその検証
d 流体・伝熱・燃焼・化学連成モデル構築と検証	—
e a～e統合化モデル(デジタルツイン)構築と検証	課題a～cで開発されたサブモデルの統合化（部分統合および全体統合）および性能検証

(4)自動車为例とした研究開発イメージ

現在、自動車では、快適性・安全性向上、再生可能エネルギー含めた炭素循環社会に対し、エンジン燃焼性能向上や電化等への対応が問題となってきた。

＜自動車の性能向上に係る主な研究開発テーマ例＞

- ・快適な乗り心地と車内・車外の事故衝突安全性を確保した車体重量の従来比約 2 割低減
- ・再生可能エネルギーによる CO₂ と水からの高効率低コスト燃料合成技術等、燃料革命への挑戦
- ・自動車用エンジン内潤滑面に関するマクロからナノまで統合した潤滑面焼付き&なじみモデルの構築と摩擦力低減
- ・表面テクスチャ付与によるピストンリング間の摩擦力低減
- ・電動化対応、モーター性能約 2 割向上や車載用電池性能約 5 倍向上

今後、車体周り、エンジン部品も含めたデジタルツインが期待されており、表 3-4 のような研究開発課題例が予測される。トライボロジーモデル構築と検証では、高負荷時に発生する焼付き&なじみ予測モデルの構築と制御法の提案や、固体潤滑材付与等による境界潤滑下での摩擦フリー技術の開発などが、流体・構造・振動連成モデル構築と検証では、車体・タイヤ空力特性などの運動性能と走行時の安定・振動騒音予測モデルの開発などが、流体・伝熱・燃焼・化学連成モデル構築と検証では、電動化システムのエネルギーマネジメントなどが重要課題となる。上記運動性能に関して、図 3-10 に解析事例を示す。

表 3-4 自動車への展開における研究開発課題例

研究開発課題 [下記メカニズムの解明、構成方程式の確立、複合現象モデルの開発と実験的検証、評価方法の開発・標準化及びデジタルツイン]	自動車での課題の例
a 機械損傷プロセスモデル構築と検証	SIP「革新的構造材料」で開発する金属材料での疲労寿命予測モデルや損傷モデルの知見等も活用した、車軸受け材料損傷メカニズムや亀裂進展プロセスの解明。
b トライボロジーモデル構築と検証	高負荷時に発生する焼付き&なじみ予測モデルの構築と制御法の提案。テクスチャ形状付与、DLCコーティングや、固体潤滑材付与等による境界潤滑下での摩擦フリー技術の開発。
c 流体・構造・振動連成モデル構築と検証	車体・タイヤ空力特性などの運動性能と走行時の安定・振動騒音予測モデルの開発。 ターボチャージャー翼列、液封マウント、騒音などに関する連成振動解析技術の開発およびその検証。
d 流体・伝熱・燃焼・化学連成モデル構築と検証	SIP「革新的燃焼技術」の開発成果（自動車エンジン3次元燃焼解析ソフトウェアHINOCAなど）を活用し、国産CAEソフトウェアとして高機能化。国産バーチャルビークルを構築し、デジタルツイン化。電動化システムのエネルギーマネジメント。LCAや油田から車へ(Well to Wheel)の観点でのゼロCO ₂ エンジン燃焼構築。
e a～c統合化モデル(デジタルツイン)構築と検証	課題a～dで開発されたサブモデルの統合化（部分統合および全体統合）および性能検証



図 3-10 自動車運動性能の解析事例 (VILS: Vehicle in the loop simulation)

(上図：実際の走行自動車の写真、下図：走行シミュレーション結果)

(5) 工作機械を例とした研究開発イメージ

工作機械(旋盤、切削盤等)は、金属、樹脂等材料に切断、穿孔、研削、研磨、圧延、鍛造、折り曲げ等の加工を施すための機械で、軸受けの高性能化・高耐久性、モーター、インバータの省エネ化などが問題となっている。

＜工作機械の性能向上に係る主な研究開発テーマ例＞

- ・ 滑り出し時を含む極低速域、境界潤滑下での摩擦特性に関する研究
- ・ 転がり軸受の接触面の剛性予測手法の確立
- ・ テクスチャ付与による境界潤滑摩擦特性制御
- ・ 電力消費が従来比約 2 割以上少ない高効率主軸モーターやインバータなど高効率機器の開発
- ・ 加工能率の革新的な向上（加工時間従来比約 2 割短縮、高効率な加工方法）
- ・ 工作機械における工具と材料の接触・減衰問題、加工性能への影響等

本分野でも、工作機械全体のデジタルツイン構築とその利用が期待されており、表 3-5 のような研究開発課題例が考えられる。トライボロジーモデル構築と検証では、軸受案内面の摩擦特性の把握や軸受案内面の高剛性化、転がり軸受の剛性予測手法の確立が、流体・構造・振動連成モデル構築と検証では、切削時の振動と構造減衰・機構連成モデルの開発とその性能検証が、流体・伝熱・燃焼・化学連成モデル構築と検証では、加工熱、切削液、外気温や空調による機械周囲温度変化などによる材料の熱変形、治具の熱変形、機械構造の熱変形モデルの開発とその性能検証が大きな課題となる。図 3-11 に示すように、工作機械の衝突防止

機能向上には機械(トライボロジー)モデル精度向上が鍵となる。

表 3-5 工作機械への展開における研究開発課題例

研究開発課題 [下記メカニズムの解明、構成方程式の確立、複合現象モデルの開発と実験的検証、評価方法の開発・標準化及びデジタルツイン]	工作機械での課題の例
a 機械損傷プロセスモデル構築と検証	SIP「革新的構造材料」で開発する金属材料での疲労寿命予測モデルや損傷モデルの知見等も活用した、転がり・すべり軸受け材料損傷メカニズムや亀裂進展プロセスの解明。
b トライボロジーモデル構築と検証	軸受案内面の摩擦特性の把握。軸受案内面の高剛性化。転がり軸受の剛性予測手法の確立。
c 流体・構造・振動連成モデル構築と検証	切削時の振動と構造減衰・機構連成モデルの開発とその性能検証。
d 流体・伝熱・燃焼・化学連成モデル構築と検証	加工熱、切削液、外気温や空調による機械周囲温度変化などによる材料の熱変形、治具の熱変形、機械構造の熱変形モデルの開発とその性能検証。
e a～e統合化モデル(デジタルツイン)構築と検証	課題a～dで開発されたサブモデルの統合化（部分統合および全体統合）および性能検証。

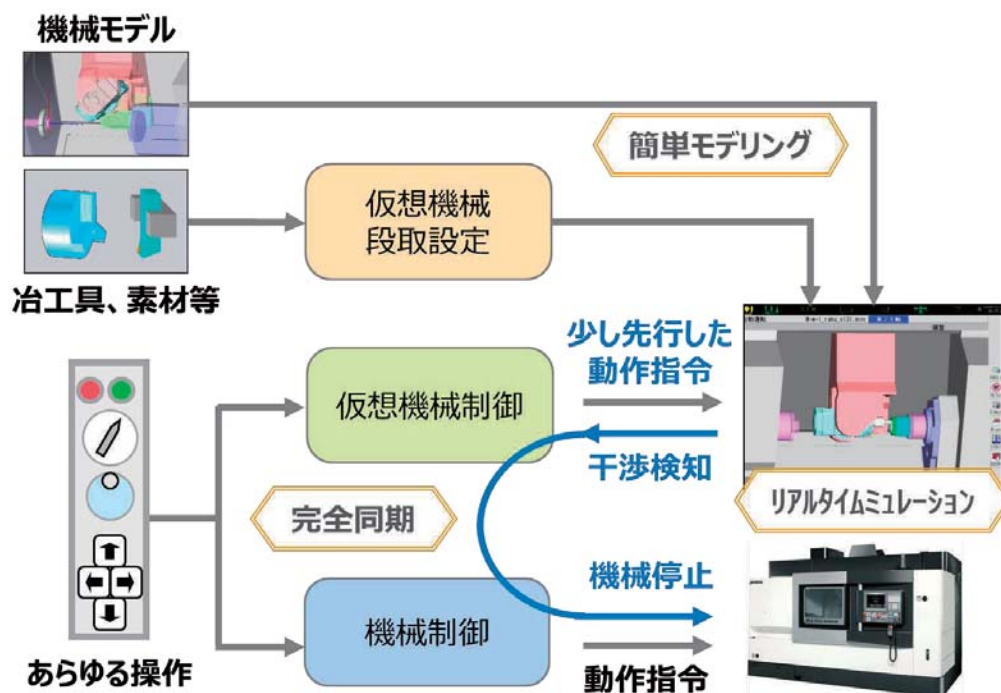


図 3-11 工作機械の衝突防止機能向上には機械(トライボロジー)モデル精度向上が鍵

(6)船舶海洋を例とした研究開発イメージ

船舶海洋では、中国・韓国との厳しい競争により更なる生産性向上が求められる中、船体設計や機関配置に関する作業効率の向上、建造技術の技能の伝承、厳しい環境規制への対応等が大きな問題となっている。

＜船舶海洋の安全性・性能向上に係る主な研究開発テーマ例＞

- ・ 流体設計と現場での加工ノウハウとの融合モデルの構築

- ・騒音低減と、船体設計や機関配置等を一体的に行う設計手法の構築
- ・溶接品質の定量化と建造トレーサビリティシステムの構築
- ・実海域における船舶推進プラントのリアルタイム保守管理・最適制御システムの開発
- ・浮体式洋上風力発電施設の健全性モニタリング
- ・配管（船上配管、海面下のケーブル、パイプライン等）のひずみ検出技術と状態把握モデルの構築等

本分野でも、船舶海洋機器全体のデジタルツイン構築とその利用が期待されており、表 3-6 のような研究開発課題例が考えられる。機械損傷プロセスモデル構築と検証では、船用エンジンのクランク軸受材料損傷メカニズムや燃焼室構成部品の損傷プロセスの解明と寿命予測モデルの構築が、トライボロジーモデル構築と検証では、多種の燃料と機関運転条件によるピストンリング・ライナーの潤滑・摩耗変化予測モデルの開発が、流体・構造・振動連成モデル構築と検証では、機関室内の各種機器連成モデルを考慮した機関室トータル再現モデル構築とその性能検証などが、大きな課題となる。

表 3-6 船舶海洋への展開における研究開発課題例

研究開発課題 [下記メカニズムの解明、構成方程式の確立、複合現象モデルの開発と実験的検証、評価方法の開発・標準化及びデジタルツイン]	船舶・海洋での課題の例
a 機械損傷プロセスモデル構築と検証	船用エンジンクランク軸受材料損傷メカニズムや燃焼室構成部品の損傷プロセスの解明と寿命予測モデルの構築、疲労被害度の蓄積による故障検知や寿命予測技術の開発。
b トライボロジーモデル構築と検証	多種の燃料（C重油、低硫黄燃料、ガス燃料）と機関運転条件によるピストンリング・ライナーの潤滑・摩耗変化予測モデルの開発。
c 流体・構造・振動連成モデル構築と検証	連成モデルを活用した最適な船体形状設計手法と現場の曲げ加工の工数を減らすノウハウ・知見の融合による最適化、騒音低減に資する一体的な構造部材・制振材配置の最適化、機関室内の各種機器の連成モデルを考慮した機関室トータル再現モデル構築、浮体式洋上発電施設の運動・構造応答連成モデルの解析技術の開発と検証。
d 流体・伝熱・燃焼・化学連成モデル構築と検証	入熱や溶接による鋼板・ブロックの変形のシミュレーション、高過給・高効率かつ大きさも様々な船用エンジン用の多種燃料対応高精度エンジン燃焼モデルの開発等。
e a～c統合化モデル(デジタルツイン)構築と検証	課題a～dで開発されたサブモデルの統合化（部分統合および全体統合）および性能検証。

なお、本章での述べた統合化モデル（課題 e）の骨格は、実際に利用する産業界がつくり、各分野モデリング（課題 a～d）は、現象論に近いアカデミアがつくるのがよいと考える。

また、複合現象モデルコンセプト確認のマクロデータは部品/実機レベルでの計測が必要であり、産業界が担当し、現象確認のミクロデータは、計測そのものが難しく、シンプルかつ厳密な実験装置で現象を捉える必要があるため、アカデミアが担当する。何れも、センシング技術の並行開発も必要となる。

4．研究開発の推進方法および時間軸

前章の具体的な研究開発を推進し、デジタルツイン技術とそれを支える先進設計・製造基盤技術を確立、世界をリードしていくには、基礎研究から社会実装までを俯瞰した一気通貫の研究開発が可能な、産学官ステークホルダーの連携推進体制（コンソーシアム）を適切に構築することが重要である。さらに、データ連携共通プラットフォーム創出、国際標準化戦略、規制緩和などの出口戦略や人材育成などにも着実に取り組むことも肝要である。これらの推進方法と時間軸を以下に示す。

＜推進体制＞

これまでの産学連携推進では、アカデミアのスケジュール管理やモチベーション維持、産学の知識基盤から社会実装までの俯瞰的な視点の不足などが課題であった。

本提案では、工学系学協会も含めた産学官が連携して研究開発を推進できるデジタルツインコンソーシアムをプロジェクト開始前から設立すること(図 4-1) ※4.1、プロジェクト終了後も連携体制を持続的に維持する枠組みを進行中に準備すること、本コンソーシアムがプロジェクト進行中および終了後もプロジェクトの成果物（コラム 2 参照）を一元的に管理運営すること、を提言する。成果物の帰属・管理は、開発者である産学官コンソーシアムが担い、継続的な精度・レベルの維持向上を図る。事務局は、第三者的立場の公的研究機関、或いは、人材や知の集積というアドバンテージを活かした学協会事務局などが適切と考える。

参画機関以外によるプロジェクト成果物の利用（オープン化）については、成果物を囲い込むことはせず、このコンソーシアムへの参画、あるいは秘密保持契約の上での利用を想定する。未解明の物理現象の解明に基づくモデルやそれを使った検証データを根拠とした日本製品を、欧米に販売する場合も、秘密保持契約の上で公開する。研究開発課題の協調領域と競争領域の切り分けについては、参画企業が、アカデミアも交えて十分議論して迅速に進めることとする。

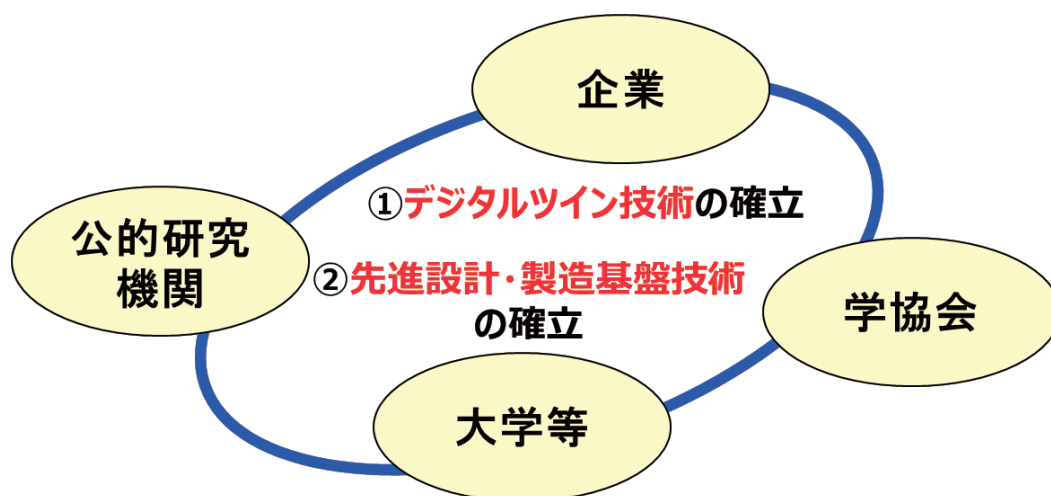


図 4-1 デジタルツインコンソーシアム

【コラム 2】 デジタルツインプロジェクト成果物のイメージ例

本提案のデジタルツインプロジェクトでは、多様な基盤技術の統合化による基礎的理理解明からの複合現象モデルの開発・検証や、それに資する基礎科学研究からの知識基盤構築、モデル評価方法の開発・標準化、評価データの蓄積などが主な取り組みとなるため、プロジェクト成果物として、以下の4つが想定される。これらの成果物は、プロジェクト進行中および終了後も、産学官コンソーシアムで一元的に管理されることを提言する。

1. 既存の包括的汎用ソフトウェアの入力データ条件・境界条件設定ノウハウ：従来、簡易な仮定を設定していた内容を、物理現象解明に基づく境界条件モデルやベースデータ*等を構築し精緻化する(図 C2-1 成果①)。例えば、燃焼解析の入力条件や境界条件である、液滴境界の取り扱いや燃焼素反応のベースデータ知識基盤を原理解明から構築する。

*共通的で基礎的な原理解明やモデル構築のデータ取得は、参画企業の協調領域テーマとして、産学で着実に実施してそれを共用していく。製品群に関連したデータでも、モデル構築に必要な共通基盤的データについては企業から拠出してもらうことを想定している。

2. 新規部分的汎用ソフトウェアの構築：異種複数の既存の包括的汎用ソフトウェアを用いて複合現象を取り扱う際に必要となる、複合現象モデル向けに構築する新規部分的ソフトウェアそのものが成果となる(図 C2-1 成果②)。

3. 既存の包括的汎用ソフトウェア間の連成手法・ノウハウ：異種複数の既存の包括的汎用ソフトウェアを用いて複合現象を取り扱う際に、従来力づくで連成していた手法を、物理現象解明に基づく新しい連成手法モデルやベースデータ等導入で精緻化する(図 C2-1 成果③)。例えば、構造解析と振動解析を、時間をかけて交互に計算していたところに、新たな連成モデルを導入する。

4. 知的財産権：上記で構築する共通モデルや取得データなどから創出される成果物に関する知的財産権(図 C2-1 成果④)。

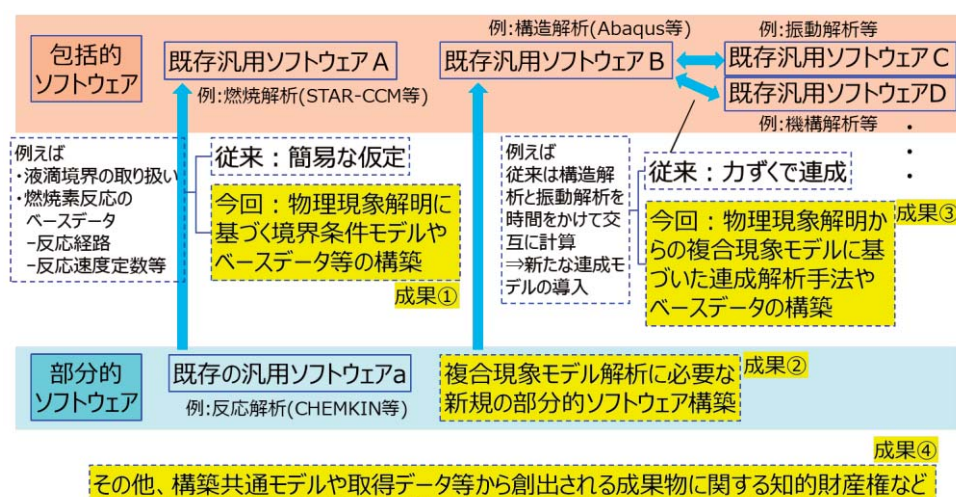


図 C2-1 プロジェクト成果物のイメージ例 ¹⁾

【参考文献】

1) 科学技術未来戦略ワークショップ報告書「革新的デジタルツイン」 CRDS-FY2017-WR-09

※4.1 持続的な産学連携体制を構築中の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「革新的燃焼技術」プロジェクト等を参考にする。2017年6月に、内燃機関産学官連携コンソーシアムが創設されている。SIP終了後の体制を持続的に維持する枠組みとして、総数100程度のアカデミア研究室の連合体を組織する。支援企業群として民間の技術研究組合が特別会員となり、運営費と業界ニーズを提供する。

次に、デジタルツイン技術とそれを支える先進設計・製造基盤技術開発に向けた具体的な推進体制を図4-2に示す。本提案では多様な基盤技術の統合化が重要であり、拠点形成とネットワーク構築が必要と考える。欧州だとトライボロジーはリヨン、燃焼はアーヘンのような明確な拠点の所在があり、日本でも本提案の研究開発課題および関連する基盤技術の拠点化が必要であると同時に、拠点間ネットワーク型連携(コラム3参照)も肝要となる。

拠点A-Dは、研究開発課題(a-d)の推進に向けて、企業、大学等、公的研究機関、学協会等の連携組織と協力して研究に取り組む中心的な役割と、そうした課題の研究遂行を支える「基盤技術」の推進の中心的な役割。拠点Eは、研究開発課題(a-d)の統合化モデルに取組み、全体をマネジメントする。各拠点は、ある特定の大学に設置するが、力のある多様な大学、中小企業とも連携した多様性を担保した体制とする。各拠点にはプロジェクトマネージャー(PM)を配置し、PMが基礎科学/社会実装/人材育成の同時達成を図り、研究開発課題の推進を統括する。本拠点を通して、1拠点年間10名程度のものづくり工学系若手人材を育成する。産業界からの社会人コースドクター育成も含め、産業やアカデミアの工学系基盤人材の底上げを図る。イノベーティブな研究要素を随時取り入れる柔軟な運用・連携の環境を整え、プロジェクト途中における中間レベルでの実用化率を増やすことが産学連携活性化に有効と考える。

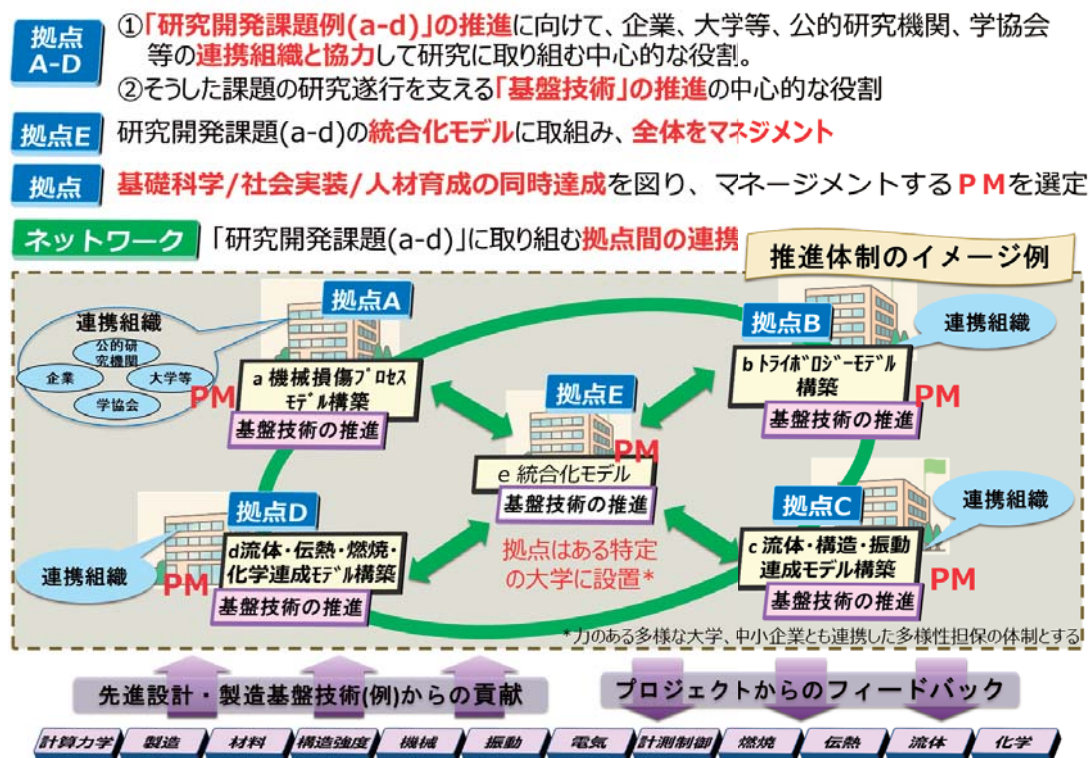


図4-2 革新的デジタルツインに向けた推進体制

【コラム 3】 プロジェクト推進体制の種類

イノベーションを指向したプロジェクトの推進にあたっては、研究開発課題の設定等も必要不可欠であるが、実用化・産業化に向けた研究開発課題やその段階に応じた最適な推進体制の整備が極めて重要である。そうしたプロジェクトに関わる幅広い分野の専門家や実務家のポテンシャルを発揮する体制構築が、イノベーションを指向したプロジェクトの目的達成に大きな影響を与えられと考える。

これまでのイノベーションを指向したプロジェクトでは、公的研究機関、大学、企業、学協会等の連携が重要であり、そうしたプロジェクトの推進体制をみれば、拠点またはネットワークを創設して進められているといえる。そうした状況を踏まえ、本コラムでは、推進体制について「拠点形成型」と「ネットワーク型」の二つに大別して紹介する。

拠点形成型では、人材・資金・インフラを集積することにより、研究プロジェクトを共同で実施する拠点を創設する。このメリットとしては、多様な分野の研究者が結集することで、学祭/融合分野の推進が進められるとともに、大学等の組織固有の強みの形成にも繋がる。しかしながら、こうした拠点創成には、多額の資金を要することなどからくる拠点創成の難しさがある。それに加えて、拠点運営の持続性に関する課題も顕在化している。一方、ネットワーク型では、多様な組織に所属する研究者等がネットワークに組み入れられ、研究プロジェクトを共同で実施する。そのため、物理的なインフラを必要とせず、体制構築が比較的容易であるといえる。しかしながら、緊密に協働するネットワークを継続させることは困難を要するといった課題もある。

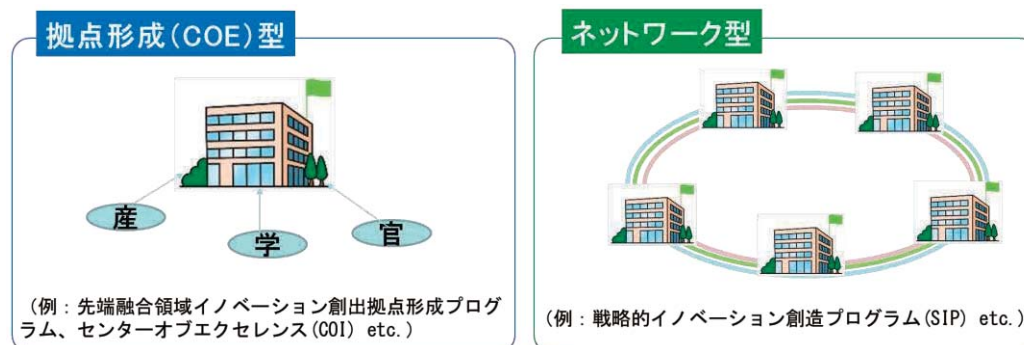


図 C3-1 プロジェクトの推進体制

なお、プロジェクトの推進体制を考えるにあたって、いずれの推進体制がより優れているというわけではない。また、上述した二つの推進体制が独立して進められる場合もあるが、これらを組み合わせて優れた研究成果創出に向けた推進体制が構築されているケースもある。こうしたプロジェクトの推進体制の多様性に留意しつつ、最適な推進体制の構築に向けた検討が重要である。

【参考文献】

- 1) 戦略プロポーザル「課題達成型イノベーションを実現するための研究開発ファンディング・システム～研究開発のネットワーク化・組織化～」CRDS-FY2012-SP-09
- 2) 戦略プロポーザル「我が国における拠点形成事業の最適展開に向けて～組織の持続的な強みの形成とイノベーションの実現に向けて～」CRDS-FY2016-SP-03
- 3) 科学技術未来戦略ワークショップ報告書「革新的デジタルツイン」CRDS-FY2017-WR-09

＜研究開発の推進方法と時間軸＞

上記体制構築、デジタルツイン技術とそれを支える先進設計・製造基盤技術開発を進める産学官プロジェクトの推進、並びに、データ連携共通プラットフォーム創出、国際標準化戦略、規制緩和、人材育成などのプロジェクト出口戦略の時間軸を図 4-3 に示す。早期に産学官がコンソーシアムを設立し、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)などの 5 年程度の産学官プロジェクトを推進すること、終了後もコンソーシアム事務局のもと産業界費用等で自立的に運営することが望ましい。

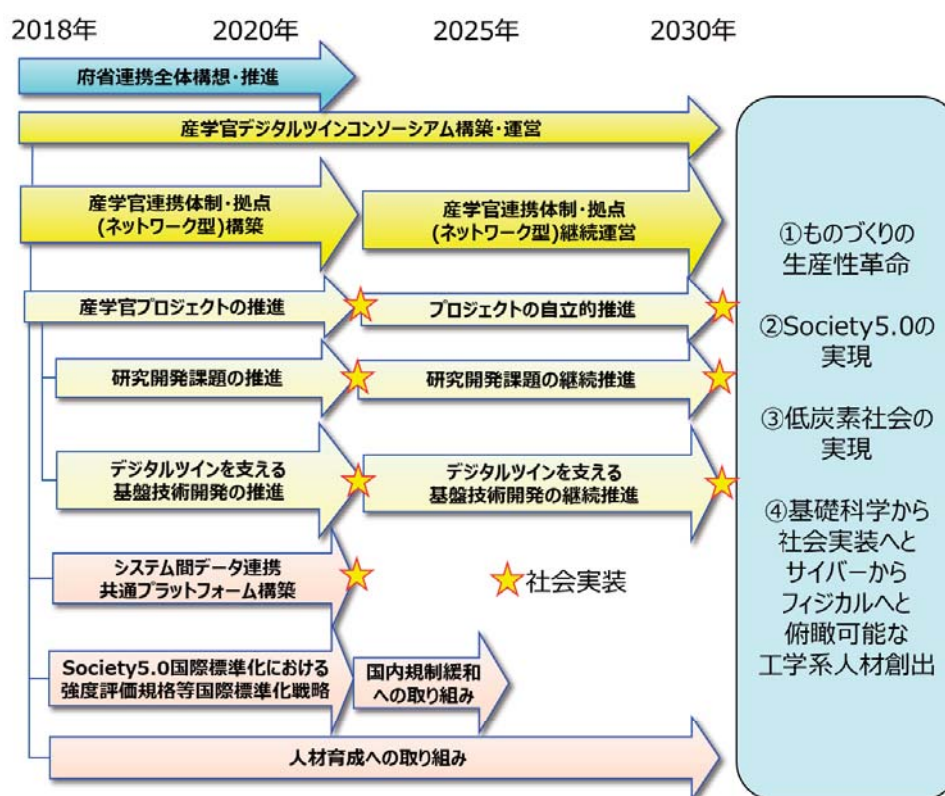


図 4-3 研究開発の推進方法と時間軸

特に、出口戦略については、以下のように推進する。

(1) システム間データ連携共通プラットフォームへの取り組み

本提案の研究開発課題例のひとつとして挙げた「統合化モデル(デジタルツイン)構築と検証」の中で、例えば、以下のような企業間協調領域プラットフォーム（コラム 4 参照）※4.2を実現する。

- ① 複合現象の統合化モデルや大規模ソフトウェアの連成、大量のデータなどを扱える高性能なプラットフォームを、ゼロからではなく、既存のデータ統合・処理システムなどを活用して構築する。その中にデータを集約・統合する。
- ② 顧客における製品・サービスの稼働状況データで、顧客と企業を直接につなぎ、顧客の利用状況やニーズから直ちに必要な製品の仕様が明確化可能なプラットフォームを構

築する。

- ③ ②のデータをもとに、部品の摩耗、製品全体寿命などをデジタルツインで予測し、部品交換時期や重大損傷事故などを推定する保守・監視プラットフォームを構築する。

※4.2 プラットフォームを流れるデータは、企業間競争領域となるため、強固なセキュリティ技術で守られるようにする。

(2) Society 5.0 の国際標準化における強度評価規格等の国際標準化戦略

本提案の研究開発課題例のひとつとして挙げた「機械損傷プロセスモデル構築と検証」の中で、多様な基盤技術の統合化による、基礎的理理解明からの複合現象モデルの開発により、より高度な材料疲労強度評価規格の国際標準化を目指す。本提案の複合現象モデル開発とデータ整備から、上記強度評価更新規格をプロジェクト開始後 3~4 年で準備し、ISO 関連専門委員会で提案、5 年後以降の国際標準化をねらう。

例えば、発電設備などでは、欧州統一規格(EN 規格)や米国機械学会規格(ASME 規格)、JIS 規格、日本機械学会規格(JSME 規格)などに関連した ISO(国際標準化機構)/TC11(ボイラおよび圧力容器、16528)や ISO/TC192 (ガスタービン)などがある※4.3。

※4.3 日本工業標準調査会 標準部会 産業機械技術専門委員会「産業機械技術分野」における標準化戦略

(3) 規制緩和への取り組み

上記(2)の強度評価更新規格の国際標準化確定後に、科学的合理性に沿う形で日本国内の規制を見直す(過剰な国内規制の緩和を目指す)。

現在、発電用設備に関する技術規格規制では、日本機械学会発電用設備規格委員会が策定する発電用設備の「設計・建設規格」「溶接規格」「維持規格」などの民間規格などが活用されている。これらは、経産省が設置する規制緩和に関する有識者検討会からの依頼を受けた日本機械学会の委員会が審議、確認を行っている。これを踏まえ、規制見直しの提案は日本機械学会の当該委員会に対して行う。

(4) 人材育成への取り組み

研究開発における若手人材育成では、産業界の課題をアカデミアの基礎原理で解くことができるかと理解することが特に重要となる。本提案の産業界ニーズとアカデミア技術シーズの対応を意識し、開発途上であっても使えるものを着実に実用化していくことで、刺激とモチベーション維持につなげる。

今後、ものづくり産業を支える工学系の基礎的原理を理解した人材、科学的合理性に基づきものづくりをできる人材、サイバー空間とフィジカル空間を俯瞰できる人材が必要で、デジタルツインに重要な複合現象モデルの開発・検証に資する基礎科学研究からの知識基盤構築を通して、産業界からの社会人コースドクター学生も含め上記人材を年間 50 人程度(1 拠点 10 人程度の 5 拠点)育成する。また、工学系 8 大学連合会とも連携し、上記知識基盤など

のプロジェクト成果を書籍^{※4.4}(教科書、便覧)に反映し^{※4.5}、継続した人材育成に生かす。

さらに、本産学官連携プロジェクトへの学部学生や若手大学院生の参画も促進することで、文科省の工学系教育改革の実現や学部・大学院連結教育プログラム構築とも連携した取り組みとしていく。

※4.4 機械工学系の4力（材料力学、機械力学、流体力学、熱力学）などの教科書や機械工学便覧など

※4.5 経産省研究開発プロジェクト「燃焼制御基盤技術の開発」の成果を「燃焼現象の基礎」という教科書にまとめた例がある。

【コラム 4】 デジタルツインの概念を含むプラットフォームツール代表例

モノのインターネット（Internet of Things: IoT）に関する取り組みの一環として、デジタルツインの活用による生産性向上や品質改善が注目されている。現在のところ、デジタルツイン機能の標準はまだ存在せず、多様なプラクティスを積み上げている状況である。

デジタルツインモデルの構築・活用・保守ツールを含む IoT プラットフォームは、最近数多く発表され、デジタルツイン利用による価値創造の機運は高まっている。以下に代表例を挙げる。

- **AWS IoT (Amazon Web Services)** ¹: IoT システムの一部として、データ蓄積・分析とデジタルツイン管理をクラウドサービスとして提供。パイプライン設備や掃除機などの機能モデルを「IoT デバイスシャドウ」というデジタルツインモデルとして管理できる。
- **Azure IoT Suite (Microsoft)** ²: 遠隔監視や保全のためのソリューションを提供しており、Azure Machine Learning や Azure Stream Analytics など他の Azure 上のクラウドサービスとの連携が魅力的である。
- **Lumada (日立製作所)** ³: 複数の事業分野のソリューションを単一プラットフォームで実現する IoT プラットフォーム。デジタルツインモデルに相当する「アセットアバター」を持つ。制御系技術（OT）と情報処理技術（IT）の結集を特徴とする。
- **MindSphere (Siemens)** ⁴: 製品、製造プロセス、運用状態のデジタルツインを開発し、性能予測、遠隔監視に役立てている。「SAP HANA Cloud Platform」、「Microsoft Azure」、「Amazon Web Services」上で利用可能。
- **Predix (General Electric)** ⁵: インダストリアル・インターネットのためのプラットフォームである Predix 上に、GE 社はエンジンやギアなどの工業製品のデジタルツインモデルを構築。遠隔監視、予測分析などが行える。
- **ThingWorx (PTC)** ⁶: デジタルツインモデル ThingModel がプラットフォーム内のデータリポジトリとして機能する。アプリの豊富さやワイヤレスプロトコルの整備が特徴的。また、拡張現実（AR）技術を取り入れる先進的な取り組みも進めている。

上記の他にも、Agile IoT Platform (Ayla Networks)、Control Center (Jasper Technologies (Cisco 傘下))、FUJITSU Manufacturing Industry Solution VPS (富士通)、Murano (Exosite)、Watson IoT Platform (IBM)、Xively (LogMeIn)、Zatar (Zebra Technologies)、ものづくり情報プラットフォーム Meister DigitalTwin (東芝) など注目されている。

【参考文献】

- 1) <https://aws.amazon.com/jp/iot/>
- 2) <https://www.microsoft.com/en-gb/internet-of-things/azure-iot-suite>
- 3) <http://www.hitachi.co.jp/products/it/lumada/>
- 4) <https://www.siemens.com/global/en/home/products/software/mindsphere.html>
- 5) <https://www.ge.com/digital/predix>
- 6) <https://www.ptc.com/en/products/iot>

付録1 ． 検討の経緯

- 本プロポーザル作成の前段階として、エネルギー分野製品・サービスのものづくり基盤技術における世界的な研究開発の流れを俯瞰し、日本のポジションを把握すること、さらには中長期のあるべき姿に向けた現在の研究開発や施策の課題および今後の研究開発戦略の方向性などを明確にするため、基盤技術に関連する学協会(部門)(本文図 2-4 参照)推薦の中堅・若手研究者 39 名(産業界、大学(国研含む)、各々1 名)を招いて、2016 年 11 月 25、26 日に、俯瞰ワークショップ「エネルギー基盤技術(工学)」を開催した。(俯瞰ワークショップ報告書：CRDS-FY2017-WR-04))
- これらの俯瞰調査活動結果および追加調査等を基に、研究開発戦略として本領域をさらに深く検討するために、2017 年 4 月より「革新的デジタルツイン～先進設計・製造基盤技術～」として調査チーム(先進製造基盤技術チーム)を立ち上げ、調査活動を開始した。調査活動では文献以外にも大学、企業等の有識者からのインタビューや関連講演会等の参加も含めて、幅広い情報収集を行った。
- さらに、これまでの検討結果を踏まえて、2017 年 11 月 24 日に科学技術未来戦略ワークショップ(詳細プログラムを下記に掲載)を開催した。このワークショップでは、日本のイノベーション競争力を中長期的に維持強化していくため、世界を凌駕するデジタルツイン技術やそれを支える先進設計・製造基盤技術の研究開発推進方法やそれらを支える体制、人材育成はどうあるべきか、産業界ニーズとアカデミア技術シーズがマッチングする研究開発課題は何かなどの議論をおこなった(科学技術未来戦略ワークショップ報告書「革新的デジタルツイン」CRDS-FY2017-WR-09)。
- 以上の調査・分析・検討の結果と、ワークショップにおける議論等を踏まえて、本戦略プロポーザルを発行するに至った。なお発行に至る間、産業界有識者 12 名、アカデミア有識者 13 名、計 25 名へのインタビュー、ワークショップ開催 1 回(計 10 名発表)、関連講演会への参加による情報収集 11 件を行った。

【科学技術未来戦略ワークショップの開催について】

2017年11月24日に開催した科学技術未来戦略ワークショップ「革新的デジタルツイン～デジタルツインを支える先進設計・製造基盤技術～」のスケジュールおよび参加者は以下の通り。

プログラム

開催日時：2017年11月24日（金）11：00～18：00

開催会場：JST 東京本部別館 2階会議室 A①

11:00～11:05 開会挨拶

佐藤 順一

11:05～11:20 ワークショップの趣旨説明

大平 竜也

11:20～13:30 産業界のデジタルツイン活用ビジョンと研究開発課題ニーズ I

11:20～11:40「HITACHI のデジタルツインへの取組みと学会をオープンイノベーションの場とする施策」

小豆畑 茂(日立製作所)

11:40～12:00「多くの技術分野を含むガスタービンの先進設計とデジタル活用」伊藤 栄作(三菱重工)

12:00～12:20「航空用ガスタービンなどの回転機械開発・設計における解析モデリングの紹介

と今後への期待」

藤森 俊郎 (IHI)

12:20～13:10 自由討議(昼食)

13:10～13:30「Virtual Engineering 時代に突入した自動車分野の“開発とものづくり”」

内田 孝尚(本田技研)

13:30～15:10 アカデミアのデジタルツインへの取組みと今後の技術シーズ展望

13:30～13:50「日本燃焼学会における燃焼解析プラットフォーム開発」

小林 秀昭(東北大学)

13:50～14:10「デジタルツインと流体・伝熱・燃焼・化学連成モデルの構築」 店橋 護(東京工業大学)

14:10～14:30「デジタルツインと機械システム相互作用・機械損傷モデルの構築」綿貫 啓一(埼玉大学)

14:30～14:50「デジタルツインと材料強度モデル」

北村 隆行(京都大学)

14:50～15:10「実機の汎用的な大規模構造解析と連成解析」

吉村 忍(東京大学)

15:10～15:25 休憩**15:25～15:45 産業界のデジタルツイン活用ビジョンと研究開発課題ニーズ II (講演 15 分+議論 5 分)**

15:25～15:45「工作機械分野でのスマートなものづくりと CPS (Cyber Physical Systems)」

家城 淳(オークマ)

15:45～16:05 研究開発プロジェクト推進方法・体制の事例紹介

松尾 敬子

16:05～17:55 総合討議 [研究開発課題テーマ、研究開発推進方法、推進体制、人材育成]

進行役:大平 竜也

論点 1. 研究開発課題の構成、構築すべきモデル、取得すべきデータ、データ取得方法

2. 協調領域と競争領域の課題テーマ切り分け
3. 統合化モデル構築
4. 運営体制、研究実施体制(研究センター、産学官コンソーシアム、学会)
5. プロジェクト成果物とその管理
6. 研究開発における人材育成

17:55～18:00 閉会挨拶

佐藤 順一

招聘識者 (敬称略・五十音順)**【産業界】**

小豆畑 茂 株式会社日立製作所 フェロー [産業競争力懇談会(COCN)実行委員]
 家城 淳 オークマ株式会社 専務取締役 技術本部 管掌 兼 FA システム本部本部長
 伊藤 栄作 三菱重工業株式会社 MI 本部 ビジネスインテリジェンス&イノベーション部
 部長
 内田 孝尚 株式会社本田技術研究所 四輪 R&D センター デジタル開発推進室
 シニアエキスパート
 藤森 俊郎 株式会社 IHI 技術開発本部 本部長補佐 産業システム・汎用機械事業領域
 事業開発部 部長

【アカデミア】

北村 隆行 京都大学大学院 工学研究科長 機械物理工学専攻 教授
 小林 秀昭 東北大学 流体科学研究所 教授
 店橋 護 東京工業大学 工学院 機械系 教授
 吉村 忍 東京大学 副学長 大学院工学系研究科 システム創成学専攻 教授
 綿貫 啓一 埼玉大学大学院 理工学研究科戦略的研究部門感性認知支援領域 領域長・教授
 先端産業国際ラボラトリー 所長

関係府省他

千嶋 博 内閣府 政策統括官(科学技術政策・イノベーション担当)付 総合科学技術・
 イノベーション会議事務局 産業技術・ナノテクノロジーグループ 政策企画調査官
 平山 雅章 内閣府 政策統括官(科学技術政策・イノベーション担当)付
 産業技術・ナノテクノロジーグループ 上席科学技術政策フェロー
 辻 直人 文部科学省 高等教育局専門教育課 課長補佐
 廣瀬 麻野 文部科学省 科学技術・学術政策局 研究開発基盤課 量子研究推進室 室長補佐
 丹羽 良太 文部科学省 研究振興局 参事官(ナノテクノロジー・材料担当)付 専門職
 藤吉 尚之 文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課 課長
 滝沢 翔平 文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課 専門官
 竹内 聡志 文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課 係長
 原市 聡 産業技術総合研究所 エレクトロニクス・製造領域研究戦略部 部長
 芦田 極 産業技術総合研究所 エレクトロニクス・製造領域研究戦略部 研究企画室室長

澤田 浩之	産業技術総合研究所 エレクトロニクス・製造領域 製造技術研究部門 総括研究主幹
丹羽 竜哉	産業技術総合研究所 イノベーション推進本部 イノベーション推進企画室主幹
山本 知幸	NEDO 技術戦略研究センター 新領域・融合ユニット 研究員
有馬 宏和	NEDO 技術戦略研究センター 電子・情報・機械システムユニット 研究員
砂口 洋毅	NEDO 技術戦略研究センター 電子・情報・機械システムユニット 研究員
森 則之	NEDO 技術戦略研究センター 再生可能エネルギーユニット 研究員
古賀 明嗣	JST 環境エネルギー研究開発推進部 部長
嶋林 ゆう子	JST 環境エネルギー研究開発推進部 副調査役

※本ワークショップの詳細は、以下の報告書に掲載。

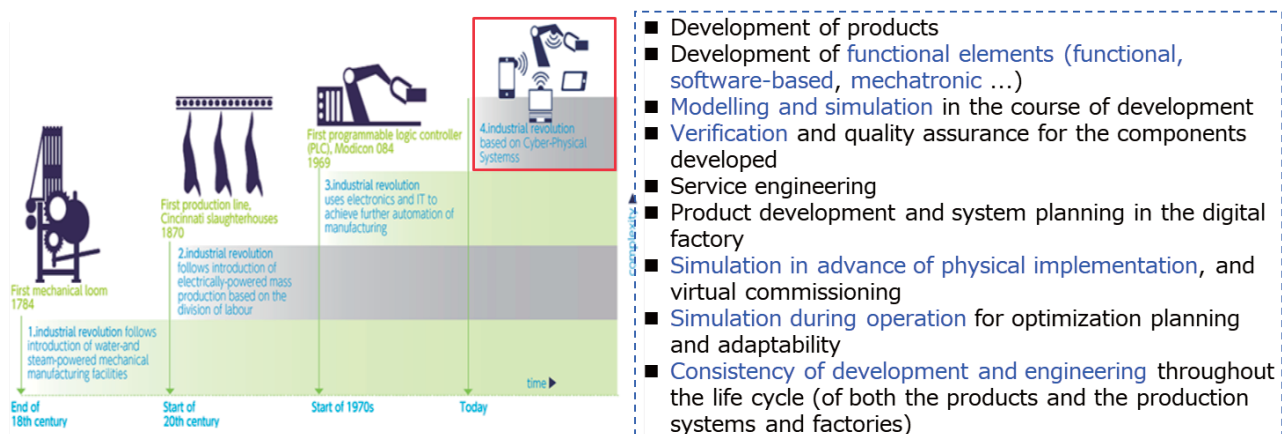
科学技術未来戦略ワークショップ報告書「革新的デジタルツイン」CRDS-FY2017-WR-09

付録2．国内外の状況

海外動向：デジタルツインと先進設計・製造基盤技術関連の研究開発状況

1. ドイツ Industrie4.0

ドイツは、「Industrie4.0」第4次産業革命として、ICTを活用した製造業のリフォーメーションによる新産業の創出に注力している。機械化、電力化、自動化に続く、リアルとサイバーの世界の融合、すなわち、デジタルツインによる第4次産業革命と位置付ける。2030年の実装を目指す。Industrie4.0では、標準化と規格化の重要性を認識し、研究・産業・標準化/規格化団体の間で協力を行い、12領域テーマで標準化と規格化を推進している。この内「Development and engineering」領域では、シミュレーション基盤技術やデータベースの基盤整備を行っている(付図2-1)。日本では、ICTとの組み合わせだけが注目されているが、実は、製造基盤技術の強化が含まれていることに留意する必要がある。ドイツ教育省の発表した「High-Tech Strategy2020 for Germany」の戦略イニシアチブと位置づけられており、産業界、大学・研究機関、業界団体等が参画している。



付図 2-1 ドイツ Industrie4.0 の位置づけ(左図)と

標準化領域「Development and engineering」の項目例(右図)

(出典：GERMAN STANDARDIZATION ROADMAP Industry 4.0 Version 2, Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0)

Industrie4.0の研究開発領域の産学連携組織で最も規模の大きいものが、it's OWL（イツ・オーダブリュ・エル）である。スマートファクトリ実現に向けた自動化と省エネ技術の研究開発を行っている。大学の基礎研究を横串の Cross-Sectional Projects、企業の開発を Innovation Projects と位置づけてコンソーシアムが構成されており、本提案の参考になる。

https://www.its-owl.com/fileadmin/PDF/Informationsmaterialien/2016-Making_machines_intelligent_Leading-Edge_Cluster_it_s_OWL_EN.pdf

<https://www.its-owl.com/projects/cross-sectional-projects/>

2. 米国

2.1 米国科学財団(NSF) ERC(Engineering Research Centers)プログラム

ERCプログラムは、研究、社会実装、人材育成の同時達成の実績が30年近く高く評価されてきた米国科学財団(NSF)の産学連携拠点創出事業である。NSFの工学部門が管轄している。

「Three-plane Strategic Diagram」が研究戦略の枠組みで、最上層：統合化技術(技術移転)、中間層：技術基盤、最下層：知識基盤となっている。

Advanced Manufacturing プログラムは、本スキームのもと、現在4つの分野[先進製造、バイオテクノロジー・ヘルスケア、エネルギー・持続可能性・インフラ、電子機器・センサー・情報技術]、18センターで実施されている。その内「先進製造分野」では、下記の中核大学を中心に、2センターが設置されている。

- ① 電源システムの電力最適化 ERC(イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校)
- ② ナノシステム ERC: モバイルコンピューティング・モバイルエネルギー技術のためのナノ製造システム(テキサス大学オースティン校)

サイバーフィジカルシステム(CPS)技術に対しては、NSFは、2008年以来、計約300億円を投資してきており、以下例のようなプログラムも推進している。

- ① Cyber-Physical Sensing, Modeling, and Control with Augmented Reality for Smart Manufacturing Workforce Training and Operations Management
- ② Cyber-Physical Approaches to Advanced Manufacturing Security

米国は、統合化技術を最終目標とする、基礎研究(基礎科学の知見獲得)からデジタルツイン実用化までを一貫して行う研究開発の手法を採用し成功している。

2.2 先進製造関連のプロジェクト

国家先進製造戦略計画(National Strategic Plan for Advanced Manufacturing)は、米国競争力法再授權法の規定により、2012年2月に国家科学技術会議(NSTC)下の技術委員会が作成した。先進製造研究開発を支援する連邦政府の活動を調整し、指針を与える戦略プランで、研究開発活動と、国内生産における技術イノベーションの実装との間のギャップを埋めるための「先進製造のためのイノベーション政策」を提言した。DARPAのオープン・マニュファクチャリング(製造プロセスの効率化)プロジェクトなどの先進製造プロセス、データ/デザイン基盤、製品技術プラットフォーム、先進材料などの分野で、プロジェクトを推進している。

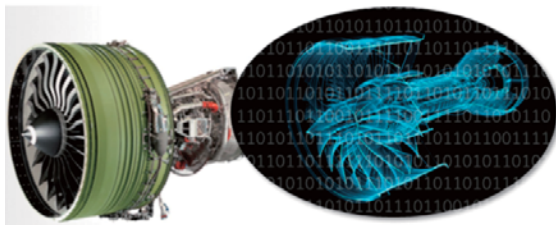
先進製造パートナーシップ(AMP: Advanced Manufacturing Partnership)は、2011年6月にカーネギーメロン大学で発表された。産学官の力を結集して、製造業における雇用を創出し、国際競争力を高める新興技術に投資する国家的取り組みであった。総予算は、5億ドル以上(既存プログラムとの重複分を含む)で、2021年までに、技術開発のブレークスルーのためのプラットフォームの提供、先進製造技術のためのロードマップの作成、中小製造業者が使用可能な施設設備の整備が行われる。

Manufacturing USAは、生産拠点および雇用を米国内に戻す流れを加速し、中小企業支援と雇用創出につなげるべく、オバマ政権が開始した、製造イノベーションの育成と商業化の促進に取り組む産学官パートナーシップである。当初の名称は「米国製造イノベーション・ネットワーク

ク（National Network for Manufacturing Innovation: NNMI）」、後に「Manufacturing USA」に改名した。例えば、デジタル製造と設計技術の重点分野では、Digital Manufacturing & Design Innovation Institute というテーマで、UI Labs(産学連携組織)が国防省（陸軍）をパートナーに、2014 年 2 月からイリノイ州シカゴにてプロジェクトを進めている。

2.3 GE

GE は、オープンイノベーションを用いて、各製品機器・構成物の現象解明と基礎科学の知見獲得を進め、独自のシミュレーションモデルを構築している。上記モデルに基づくデジタルツイン技術を、航空機エンジン、ガスタービンコンバインドサイクル発電、ディーゼル機関車などの性能向上に活用開始している(付図 2-3)。

	対象	製品	概要	効果
現実世界の機器 サイバー空間の機器 	オペレーションの最適化	機器単体 航空機エンジン GE90	フライトごとに更新される ブレード損傷モデル を活用し、メンテナンスコストを削減	サービスの生産性において何千万ドルもコスト削減を実現
	ビジネスモデル	機器全体のシステム 6FAガスタービンのコンバインドサイクル発電	ガスタービン燃焼モデル 等を活用し、手作業で調整していたコンバインドサイクル発電所の燃料削減を1時間ごとに調整するモデルに改善	自動最適化マイグレーション+デジタルツイン技術により、すべてのガスタービンにおいて1%の燃費改善が可能に
	カスタマーエクスペリエンス	機器全体のシステム Evolutionシリーズディーゼル機関車-運転最適化マイグレーション	ディーゼル機関燃焼モデル 等を活用し、燃料消費と運転毎の排出ガスを最小化	1機関車あたり年間32000ガロンおよび、174000トンの排出ガス削減が実現

(a) 航空機エンジンのデジタルツイン(イメージ) (b) GE のデジタルツイン導入事例とその効果

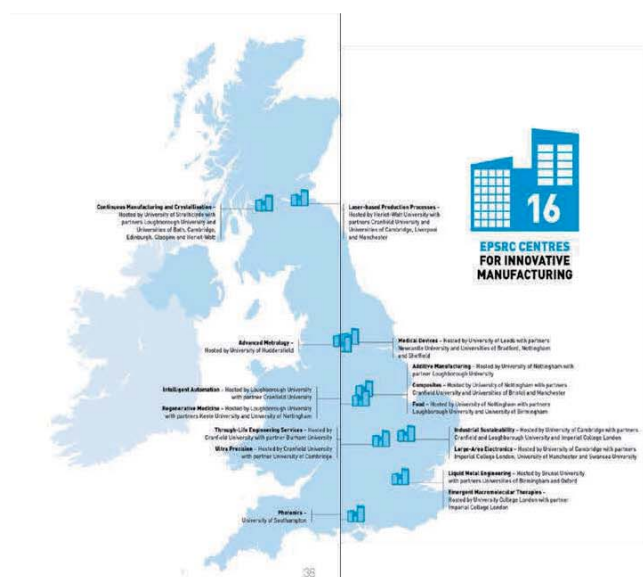
付図 2-3 米国 GE のデジタルツインへの取り組み

(出典：GE Global Research)

3. 英国

3.1 英国工学・物理科学研究会議(EPSRC) CIM (Centre for Innovative Manufacturing)

英国 CIM は、大学による工学関連の基礎概念を産業界のものづくりにつなげる、ユニークな役割をもつ。年間 8 千万 £ を英国のものづくり研究に投資し 230 のプログラムを推進している。同プログラムには、大学の 3.5 億 £ と 600 企業の 1.36 億 £ の投資があり、2000 の産業界や研究期間とのパートナーシップを有する。EPSRC のサポートのもと、産学は共に英国にとって開発すべき製品とその生産方法の最適解を決定する。16 の CIM と産学連携を行うカタパルトは 20 以上の科学、工学、ビジネス分野で協力している。1000 人のものづくり研究分野のポスドクを 115 の CDTs (Centres for Doctoral Training) でサポートしている。



16のCIMs

- Composites（軽量材料開発）：£ 5.9M
- Industrial Sustainability：£ 5.2M
- Emergent Macromolecular Therapies：£ 5.9M
- Medical Devices：£ 4.5M
- Photonics：£ 5.1M
- Large-Area Electronics：£ 5.6M
- Liquid Metal Engineering：£ 5.1M
- Intelligent Automation：£ 5.9M
- Additive Manufacturing：£ 5.9M
- Advanced Metrology：£ 4.7M
- Food：£ 4.5M
- Continuous Manufacturing and Crystallisation
- Laser-based Production Processes：£ 5.6M
- Regenerative Medicine：£ 5.8M
- Through-Life Engineering Services：£ 11.1M
- Ultra Precision：£ 5.9M

付図 2-4 英国の CIM16 拠点とテーマ

(出典：CIM, <https://www.epsrc.ac.uk/newsevents/pubs/cimbroadure/>)

3.2 カタパルト

カタパルトプログラムは、特定の技術分野において世界をリードする技術・イノベーションの拠点構築を目指したプログラムである。これらの拠点を産学連携の場として、企業や科学者、エンジニアが協力して最終段階に近い研究開発を行っている。最終的にはアイデアを新たな製品やサービスに転換することが期待されている。特定される分野は、英国が学術的かつ産業的に強みを有する技術か、或いは技術応用にフォーカスするものである。ビジネスや研究イノベーションのクリティカルマスを創出することが期待されている。

同プログラムの管理・運営は、Innovate UK（2014 年夏から用いられている通称、以前の名称は「技術戦略審議会」）によって行われている。

プログラムに基づき研究開発拠点となるセンターの設立が行われ、その最初の事例として高価値製造（High Value Manufacturing）のカタパルトセンターが 2011 年 10 月に開所している。

<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2014/CR/CRDS-FY2014-CR-02.pdf>

3.2.1 高価値製造カタパルト

高価値製造カタパルトには、6 年間で 1.4 億ポンドを超える政府投資がされ、既存の 7 つの製造関連の研究・技術センター（先進成型、先進製造、プロセスイノベーション、製造技術、複合材料、原子力先進製造、ウォーリック製造グループ）が統合し、個々の企業や大学だけでは投資できないような最新の研究設備が整備された。それにより、多様な製造業（医薬品・バイオテクノロジー、食物・飲料、ヘルスケア、航空機、自動車、エネルギー、化学、電子等）を幅広く支援し、研究成果の迅速な商業化が図られた。

<https://hvm.catapult.org.uk/>

3.2.2 デジタルカタパルトとイノベート UK

2017 年 3 月には、デジタルカタパルトとイノベート UK が、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開始した。デジタルカタパルトは、製造大企業と革新的な中小企業との連携を強化し、生産性向上のための新しいアイデアの醸成と新しいソリューションの創造を目指す。設計プロセス、生産手順、製品ライフサイクルを、デジタル変換の恩恵を受ける可能性のある主要分野として特定し、生産性向上の課題に役立てる。中小企業は、業界の特定の課題に取り組む企業スポンサーと協力して、デジタルツインやリモート状態監視などの特定の分野に取り組む。

<https://www.digitalcatapultcentre.org.uk/digital-catapult-innovate-uk-call-manufacturing-challenges/>

4. 中国

中国は、第 14 次五か年計画(2021～2025 年)を視野に入れ、製造業発展のための施策として、「中国製造 2025」を発表した。研究開発投資の対 GDP 比を現在の 1.5～2.0%程度から日米欧同等の 2.5～3.0%程度まで引き上げ、2025 年には先進工業国の一角入りを目指す野心的な内容となっている。新たに育成する産業として、輸入依存度が高いハイテク・素材、既に輸出攻勢を始めたインフラ、先進国でも研究開発が始まったばかりの新エネルギー車・バイオから 10 大産業を選出している。本施策では、製造工程のスマート化（「スマートマニュファクチャリング」および「環境配慮型製造工程」）やイノベーション強化に関する 5 つのモデルプロジェクトが選定されている。2025 年までに約 40 か所の製造業イノベーションセンターを建設する予定である。

国内動向：デジタルツインと先進設計・製造基盤技術に関するこれまでの研究開発状況

1. 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「革新的燃焼技術」[2014-2018]

最大熱効率 50%を実現する革新的技術の研究開発と持続的な産学連携体制構築に挑んでいる。世界トップクラスの内燃機関研究者の育成、省エネルギー、CO₂削減および産業競争力の強化の寄与を目指して、実施約 80 の大学・公的研究機関が以下の 4 つのチームとなり、更に国内の自動車メーカー9社と 2 団体で構成される自動車用内燃機関技術研究組合 (AICE) が各チームを支援する、強力な産学官連携の体制で研究開発を進めている。

- ① ガソリン燃焼チーム
- ② ディーゼル燃焼チーム
- ③ 制御チーム
- ④ 損失提言チーム

各チームに、リーダー大学、クラスター大学と企業を設置し、燃焼モデルの開発やシミュレーション技術の獲得も行っている。ここで構築される燃焼モデルやシミュレーション技術の一部は、本提案の流体・伝熱・燃焼・化学連成モデル構築に役立つ。

産学官の参画メンバーは、プロジェクト終了後を睨み、産業技術研究所を事務局として、2017 年 6 月に内燃機関産学官連携コンソーシアムを創設した。SIP 終了後の体制を持続的に維持する枠組みとして、総数 100 程度のアカデミア研究室の連合体を組織する。支援企業群として AICE が特別会員となり、運営費と業界ニーズを提供する。

<http://www.jst.go.jp/sip/k01.html>

2. 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「革新的構造材料」[2014-2018]

航空機のエンジンおよび機体に用いられる部材を主な対象に、以下の 4 つの領域で研究開発を推進している。金属材料での疲労寿命予測モデルや損傷モデルの開発も実施されており、本知見は本提案の複合材料も含めた機械損傷プロセスモデル構築と検証の参考になる。

- ⑤ 航空機用樹脂の開発と CFRP(炭素繊維複合材料)の開発
- ⑥ 耐熱合金・金属間化合物等の開発
- ⑦ セラミックス基複合材料の開発
- ⑧ マテリアルズインテグレーション

米欧が席卷する航空機産業の一角に食い込むための出口戦略を構築し、SIP 終了後もそれに沿った研究開発の継続および事業化への取り組みが不可欠なため、2017 年度からは、企業が実用化・事業化を見据えてより主導的に研究開発を率いていけるよう、各領域に企業を含む 2 名の長を置く、共同領域長制を導入した。実用化・事業化に向けた研究開発と拠点形成を同時並行で進めている。また、産業界の動向に対応し、セラミックス基複合材 (CMC) の技術開発のため新たな研究開発テーマも開始している。

<http://www.jst.go.jp/sip/k03.html>

3. 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「革新的設計」[2014-2018]

本プログラムでは、日本のものづくり産業競争力強化（グローバルトップを獲得）、新たなものづくりスタイルの幅広い普及展開（地域発のイノベーション実現）を目標に、日本のものづくりが今後強化すべき領域として、感性や潜在価値を含めたものづくりと、従来のものづくりの強みである性能・品質を更に向上させる複雑・迅速造形、高性能・新機能によって実現するデライトものづくりの研究開発に取り組んでいる。Additive Manufacturing を核とした新しいものづくりの創出の研究開発や高付加価値設計・製造を実現するレーザーコーティング技術の研究開発などの 24 テーマを推進している。

<http://www.sip-monzukuri.jp/>

4. シミュレーション技術プロジェクト

● JST CREST「シミュレーション技術の革新と実用化基盤」（2002－2009）

計算機科学と計算科学が連携することにより、シミュレーション技術を革新し、信頼性や使い易さも視野に入れて、実用化の基盤を築く研究領域を対象とした。具体的には、物質、材料、生体などのミクロからマクロに至るさまざまな現象をシームレスに扱える新たなシミュレーション技術、分散したデータベースやソフトウェアをシステム化する技術、また、計算手法の飛躍的な発展の源となる革新的なアルゴリズムの研究や、基本ソフト、情報資源を取り扱いやすくするためのプラットフォーム、あるいは分野を越えて共通に利用できる標準パッケージの開発などが含まれた。研究領域終了後の進展の一例としては、心臓シミュレーションで数千コアを用いた超並列計算のプログラムテストが行われている。

https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/evaluation/follow/h27/h27_03_CD_CREST.pdf

● JST CREST「マルチスケール・マルチフィジックス」（2005－2012）

マルチスケール・マルチフィジックス（超大規模・複雑）なシミュレーションを実現する効率的な計算手順を確立し、最適化設計問題・連成解析などの先端シミュレーション技術を日本の最先端のコンピューティング環境を駆使して開発することを目的として、本プロジェクトは実施された。研究領域は、世界最先端レベルの超高速・大容量計算機環境と精緻なモデル化・統合化によって、複数の現象が相互に影響しあうようなマルチスケール・マルチフィジックス現象の高精度かつ高分解能の解を求めることを研究の対象とした。具体的には、地球環境変動、異常気象、およびそれに起因する災害予測、人工物の安全性・健全性の評価、複雑な工業製品の設計・試作、ナノレベルの材料挙動、生体内たんぱく質構造と生体内薬物動態など、支配因子が未知あるいは不確定性を含む現象やスケールが極度に異なる現象等のモデル化の研究、そのようなモデルの統合数値解析手法の研究、モデルや入力データの妥当性・結果の信頼性の評価方法の研究などが含まれた。

http://www.jst.go.jp/pr/evaluation/problem/problem2/kisoken/h24/201307/sanko/shiryo_12.pdf

● 文部科学省「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）戦略プロ

グラム」(2011－2015)

HPCI では、「京」や東京大学等の全国の 9 つの大学が保有するベクトル型を含むスーパーコンピュータや大規模ストレージシステムがネットワークで結ばれ、これらのスーパーコンピュータ等が一つのユーザアカウントにより利用できるように新たなシステムが構築された。「京」とともに 2012 年 9 月から共用開始した。これにより、全国の利用者が当該ネットワークを通じて「京」やベクトル型を含むスーパーコンピュータ等を利用できるようになり、HPCI 上のスパコンで計算したデータを共有したり、共同で分析したりすることなどができるようになるなど、多様なニーズに応えられるものとなった。HPCI システムの整備・運用は、計算科学技術に関わる開かれた場である、「一般社団法人 HPCI コンソーシアム」が行っている。

「京」は 2012 年 11 月に世界に先駆けて演算性能 10 ペタフロップスを達成し、2012 年 6 月および 11 月において世界スーパーコンピュータ性能ランキングにおいて二期連続で 1 位となった。これにより、世界各国が激しい開発競争を展開している中で、我が国の技術力の高さを示すことができた。具体的には、10 ペタフロップスという高い演算性能に加え、高信頼性と高実行効率の特長を有し、多くのユーザーにとって利便性の高いスーパーコンピュータとなっている。

http://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/jouhou/hpci/1307375.htm

- 文部科学省フラッグシップ 2020 ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題に関するアプリケーション開発・研究開発

日本における科学技術の振興、産業競争力の強化、国際貢献、安全・安心の国づくり等を実現するため、スーパーコンピュータ「京」の後継機となるポスト「京」の開発に 2014 年度より着手している。ポスト「京」では、国家基幹技術として国家的に解決を目指す社会的・科学的課題に戦略的に取り組み、我が国の成長に寄与し世界を先導する成果を創出することが期待され、九つの重点課題が選定され、そのうち、「エネルギー問題」と「産業競争力の強化」のカテゴリでは、下記が課題となっている。

重点課題⑤ エネルギーの高効率な創出、変換・貯蔵、利用の新規基盤技術の開発

重点課題⑥ 革新的クリーンエネルギーシステムの実用化、

重点課題⑦ 次世代の産業を支える新機能デバイス・高性能材料の創成

重点課題⑧ 近未来型ものづくりを先導する革新的設計・製造プロセスの開発

http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/26/12/1354134.htm

5. サイバーフィジカルシステム技術プロジェクト

- 最先端研究開発支援プログラム(FIRST)「情報エネルギー生成基盤」(2009－2013)

超巨大データベース時代に向けた最高速データベースエンジンの開発と当該エンジンを核とする戦略的社会サービスの実証・評価が実施された。東京大学および大学共同利用機関法人情報・システム研究機構国立情報学研究所(NII)ならびにその他大学・研究所・企業が共同で研究開発を実施。本プロジェクトでは、中心研究者が創案した「非順序型実行原理」なる従来に無い新しい原理に基づく最高速データベースエンジンを開発、同時に当該データベースエンジンを核とし、巨大データ活用により可能となる次世代戦略的社会サービス(サイバーフィジカルサービス)

の実証システムを構築し、当該エンジンの有効性を明らかにした。

<http://www.tkl.iis.u-tokyo.ac.jp/FIRST/report.html>

● 文部科学省 社会システム・サービス最適化のためのサイバーフィジカル IT 統合基盤の研究
(2012－2016)

実世界（フィジカル）から得られる様々なデータを情報空間（サイバー）に集約して分析し、その結果を実世界に適切にフィードバックするサイバーフィジカルシステム（CPS）に関する研究が実施された。特に、エコ、防災、安心安全などに関わる様々な社会システムを IT との密な連携によって高度化し、課題解決に貢献する CPS を、ソーシャル・サイバーフィジカルシステムと名付け、実社会の効率化や新たな価値創造に資する IT 統合基盤として提案し、その研究開発が行われた。ソーシャル CPS は、実世界とサイバー世界を有機的に連携させることで社会の抽象化と社会資源の管理を合理的に行う手段を提供するものであり、今後の社会システムの基盤を支えるコンセプトである。本研究開発では、ソーシャル CPS に共通的な IT 基盤技術の検討を行い、個別技術の開発とそれらを統合するアーキテクチャを提案するとともに、実証システムを構築して評価し、実用化の端緒とすることを目的とした。国立情報学研究所、北海道大学、大阪大学、九州大学が共同で研究開発に取り組んだ。

http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/006/shiryo/_icsFiles/afiedfile/2014/06/19/1348765_3.pdf

6. ビッグデータ技術プロジェクト

● JST CREST・さががけ「ビッグデータ基盤」(2015－)

喜連川優（国立情報学研究所所長／東京大学生産技術研究所教授）研究総括のもと、ビッグデータ統合利活用のための次世代基盤技術の創出・体系化が実施されている。

ICT の社会浸透や、実世界から情報収集するセンサーや計測・観測機器の高度化と普及に伴い、様々な分野で得られるデータは指数関数的に増大し、多様化し続けている。これらのビッグデータの高度な統合利活用により、新しい科学的発見による知的価値の創造や、それらの知識の発展による社会的・経済的価値の創造やサービスの向上・最適化などにつながる科学技術イノベーションが期待されている。

本研究領域では、ビッグデータの複数ドメインに共通する本質的課題を解決し、様々な分野のビッグデータの統合解析を可能にする次世代基盤技術の創出・高度化・体系化を目指している。具体的には、大規模データを圧縮・転送・保管する大規模管理システムの安定的運用技術や、多種多様な情報を横断して検索・比較・可視化して真に必要な知識を効率的に取り出す技術、これらを可能にする数理的手法やアルゴリズムなどの開発を推進する。これらの研究の推進にあたり、ビッグデータから社会における価値創造に至るシステム全体の設計を視野に入れ、ICT 以外の分野との積極的な連携・融合によって社会受容性の高い次世代共通基盤技術の創出・高度化・体系化に取り組む。また、本研究領域では、以下のビッグデータ応用関連領域で得られる次世代アプリケーション技術やデータを共有・活用するなどの連携を推進する。

https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah25-6.html

● JST CREST「ビッグデータ応用」(2015ー)

北海道大学田中讓名誉教授研究総括のもと、科学的発見・社会的課題解決に向けた各分野のビッグデータ利活用推進のための次世代アプリケーション技術の創出・高度化が実施されている。

本研究領域では、情報科学・数理科学分野とビッグデータの利活用により大きな社会的インパクトを生むような様々な研究分野(アプリケーション分野)との協働により研究を進め、科学的発見および社会的・経済的な挑戦的課題の解決や革新的価値創造のために、個々の研究者や組織のみでは集積することが困難な大規模かつ多様な関連データを相互に関連付けて高度な統合的分析処理を行うことにより、これらのビッグデータに隠されている革新的知見や価値を抽出し創成することを実証的に研究開発する。そのために必要な次世代アプリケーション技術を実証的に創出・高度化することを目指している。

https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah25-5.html

付録3．専門用語説明

バリューチェーン

企業の中における価値の流れ、価値連鎖。事業活動を機能ごとに分類し、どの部分（機能）で付加価値が生み出されているか、競合と比較してどの部分に強み・弱みがあるかを分析し、事業戦略の有効性や改善の方向を探ること。

コモディティー製品

市場参入時に、高付加価値を持っていた商品の市場価値が低下し、一般的な商品になること。高付加価値は差別化戦略のひとつで、機能、品質、ブランド力などが挙げられるが、コモディティー化が起こると、これらの特徴が薄れ、消費者にとっての商品選択の基準が市場価格や量に絞られる。

1次元シミュレーション(1Dモデル)

製品の強度が十分か、使用中の温度がどうなるかなどのシミュレーションは2次元や3次元の形状に基づく計算になるが、1次元シミュレーションは形状によらない、2次元や3次元のシミュレーションよりも抽象化したモデルを用いる。1D-CAEとも呼ばれる。計算時にコンピュータに掛ける負荷は1次元シミュレーションの方が小さく、モデルを修正しながら何回も計算することで深い設計検討が可能になる。方程式を用いるため、電気、機械、流体、熱といったさまざまな分野に関わる現象を表現しやすいことも長所である。

■戦略プロポーザル作成メンバー■

佐藤 順一	上席フェロー・総括責任者	(環境・エネルギーユニット)
大平 竜也	フェロー・リーダー	(環境・エネルギーユニット)
伊藤 哲也	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
嶋田 義皓	フェロー	(システム・情報科学技術ユニット)
中村 亮二	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
高橋 玲子	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
松尾 敬子	フェロー	(科学技術イノベーション政策ユニット)

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2017-SP-01

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～

STRATEGIC PROPOSAL

Innovative Digital Twin

- Establishment of fundamental technologies for advanced design and manufacturing in future industries -

2018 年 3 月 March 2018

ISBN 978-4-88890-579-4

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
環境・エネルギーユニット

Environment and Energy Unit, Center for Research and Development Strategy,
Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町7番地

電 話 03-5214-7481 (代表)

ファックス 03-5214-7385

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

©2018 JST/CRDS

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。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.

Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

