CRDS-FY2017-WR-09

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

～デジタルツインを支える先進設計・製造基盤技術～

2017年11月24日（金）開催

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

エグゼクティブサマリー

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重要になるが、大学では、ものづくりを支える先進設計･製造基盤技術の知識、経験をもつ人材の減少が深刻化している。日本の産業界でも、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、全体解析技術（ソフトウェア、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。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」は仮想世界であらゆる想定が可能な革新的シミュレーション技術である。本分野では、基礎科学からの多様な基盤技術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おり、モデリングの基礎となる物理・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、それらを支える戦略が産学官で必要である。

そこで、産業界及びアカデミア有識者を本ワークショップに招聘し、デジタルツインに関する応用展開と今後の期待など産業界の具体的な研究開発課題ニーズや、デジタルツインへの取り組みと今後の展望など大学の技術シーズ、さらに今後必要となる研究開発課題や、研究開発を推進する上での課題、推進方法・体制、人材育成などについて議論した。

この結果、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、今後の国際市場獲得などの観点から、以下のような研究開発課題の提案があった。

＜研究開発共通課題項目＞
・機械損傷プロセスモデル構築と検証
・トライボロジーモデル構築と検証
・流体・構造・振動連成モデル構築と検証
・流体・伝熱・燃焼・化学連成モデル構築と検証
・上記モデルの統合化モデル（力学基盤に関するデジタルツイン）構築と検証

＜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

全体を通して、研究開発課題の構成や研究開発推進方法、体制などに関する主な意見は以下の通り。

①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や構築モデルに

ついて

・統合化モデルの骨格は、実際に利活用する産業界が担当し、各専門分野モデリングは現象論に強いアカデミアが担当してはどうか。
・参画企業の協調領域と競争領域の課題テーマ切り分けについては、課題を現象論まで遡り、現状レベルよりはるかに困難なレベルでのモデル化などに落とし込むことにより、参画企業が課題を共有しやすくなり、協調領域の共通の技術課題として切り分け可能である。日本が世界に勝てる領域で、基礎的なテーマを協調領域課題として設定するのがよいのではないか。基礎の理解が最終的に競争力につながる。
・コンセプト確認のためのマクロデータは実機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厳密な実験装置でアカデミアが担当してはどうか。

②研究開発推進方法、推進体制、人材育成について

・望ましい運営体制、研究実施体制としてネットワーク型拠点化は必要である。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重要だ。ただし、大学はかなり手一杯になってきているため人的リソース確保も重要である。
・プロジェクト成果物の帰属･管理は､開発者［産学官の有志組織（コンソーシアム等)］として、継続的な精度・レベルの維持向上を図ることが肝要である。
・研究開発における若手の人材育成では､アカデミアと産業界の連携は特に重要である。ニーズと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が、刺激とモチベーション維持につながる。

今回のワークショップで得られた結果を踏まえて、関連した研究開発領域、その研究開発推進方法・体制など、国として推進すべき研究開発課題を整理し、戦略提言につなげる予定である。

目　次

エグゼクティブサマリー…… i
1. ワークショップ開催概要 …… 1
2. 趣旨説明 …… 3
3. 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 …… 11
3.1　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
3.2　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）…… 21
3.3　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）…… 29
3.4　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）…… 37
3.5　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）…… 45
4. アカデミアのデジタルツインへの取り組みと今後の技術シーズ展望 …… 50
4.1　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）…… 50
4.2　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）　57
4.3　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）…… 65
4.4　デジタルツインと材料強度モデル　北村隆行（京都大学）…… 74
4.5　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）…… 82
5. 研究開発プロジェクト推進方法・体制の事例紹介 …… 88
6. 総合討議 …… 94
7. まとめ …… 98
付録…… 101

1. ワークショップ開催概要

はじめに

JST 研究開発戦略センター（CRDS）では、JST の研究開発戦略を立案するとともに、今後我が国が取り組むべき重要な研究開発領域、研究課題、研究開発システム等について広く提言を行っている。CRDS の提言は、JST 基礎研究事業における研究開発領域の設定などに活用されるとともに、政府の各種施策にも反映されている。

■ 背景

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、ものづくりを支える先進設計･製造基盤技術の知識、経験をもつ人材の減少が深刻化している。日本の産業界でも、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、全体解析技術（ソフトウェア、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。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取り組む必要がある。

一方、世界的にはこのような先進設計･製造基盤技術分野において、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おり、例えば、米国の製造パートナーシップや英国の高付加価値製造カタパルトなどの研究開発プログラムが先行して進められている。

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」は仮想世界であらゆる想定が可能な革新的シミュレーション技術である。本分野では、基礎科学からの多様な基盤技術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おり、モデリングの基礎となる物理・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。

* 設計･製造基盤技術とは、製造、材料、構造・強度、機械、燃焼、伝熱、流体、振動、化学、電気、計測制御などの基盤となる科学技術群を指す

■ 目的

産業界有識者からは、デジタルツインに関する応用展開と今後の期待など産業界の具体的な研究開発課題ニーズについて、そして、アカデミア有識者からは、デジタルツインへ

の取り組みと今後の展望など大学の技術シーズについて紹介してもらう。さらに今後の研究開発課題や、研究開発を推進する上での課題、推進方法・体制、人材育成などについて全体討議し、課題と対策を明確化することを目的とする。

■ 論点

以下を論点に発表、全体討議を行う。

①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について

【論点 1】研究開発課題の構成はどうあるべきか。

－構築すべきモデル、取得すべきデータは何か。データをどのように取得するか。

【論点 2】参画企業の協調領域と競争領域の課題テーマをどのように切り分けるか。

－産学が一体となった研究開発課題をどのように設定するか。

【論点 3】統合化モデルは誰がどのように構築するか。

②研究開発推進方法、推進体制、人材育成について

【論点 4】運営体制、研究実施体制はどのような形が望ましいか。

－ 産学官の役割を踏まえ、ネットワーク型の産学連携コンソーシアム創設をどのように進めるべきか。

－実装に向けた産学官連携の現状課題は何か。組織の壁を超えた連携に何が必要か。

－創設された産学連携組織の継続的な運営をどうすべきか。

【論点 5】プロジェクト成果物とその管理はどうあるべきか。

－成果物の帰属とその公開 / 利用はどうあるべきか。

【論点 6】研究開発における人材育成をどうすべきか。

－若手の研究人材育成はどうあるべきか。

－参画研究者のインセンティブをどのように保つべきか。

■ 概要

日時：2017 年 11 月 24 日（金） 11：00 ～ 18：00

場所：JST 東京本部別館　2 階会議室 A ①

2. 趣旨説明

大平　竜也（JST-CRDS）

CRDS では、国として中長期的にどのような研究開発をしていくべきかという戦略の立案と提言を戦略プロポーザルという形で取りまとめている。本ワークショップは、そのプロポーザル深掘り活動の一環として開催している。今年度のプロポーザルの一つとして、ものづくりの基盤技術をしっかりしていこうという趣旨の提案をしようとしている。ただ、それだけではなかなか施策化に結びつきにくいということで、デジタルツイン（サイバーフィジカルシステム）の根幹となるモデリングに貢献するものづくりの基盤技術をしっかりしていこうという趣旨の提案をする。

まず、デジタルツインと基盤技術の関係を図 2-1 に示す。デジタルツインは、デジタルデータをもとに物理的な製品をサイバー空間上で仮想的に複製する技術概念で、仮想世界であらゆる想定が可能な革新的なシミュレーション技術だ。製品のバリューチェーン全体を通じて、様々な付加価値を提供できる。ここで重要なのが図 2-1 中央のモデリングだ。これを基盤技術あるいは基礎科学からしっかりやっていくということが今後、益々、重要になってきている。図 2-1 には、これを支える基盤技術として、12 の技術分野例と、関連する学会を示している。

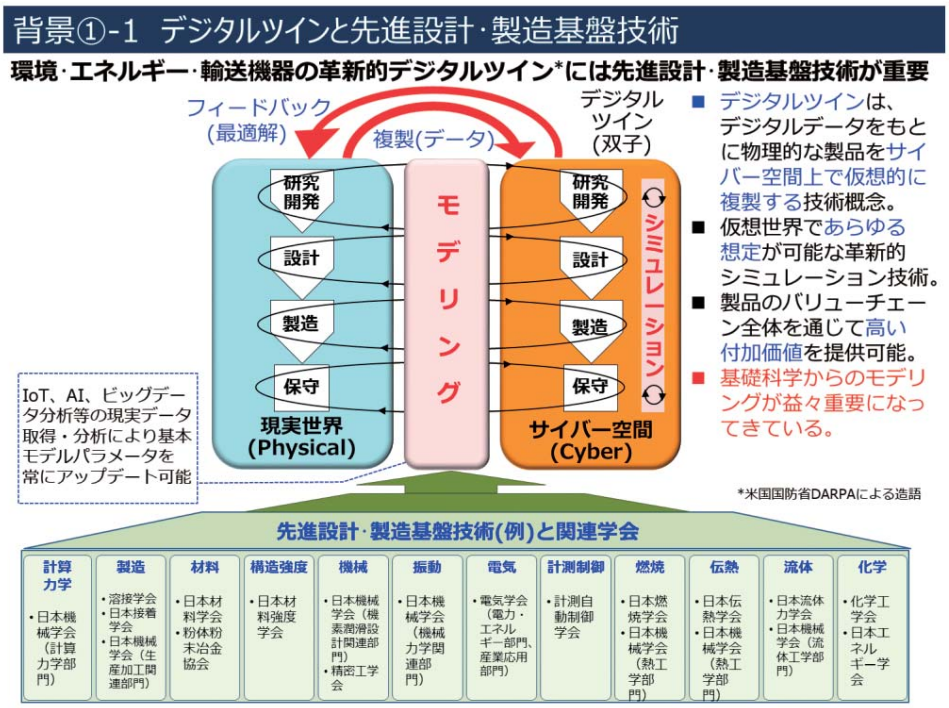


図 2-1

デジタルツインを支える基盤技術の日本の現状・課題については、昨秋、図 2-1 下に示す各学会から推薦してもらったアカデミア 1 名、産業界 1 名の中堅のエースの方々計 39 名が参加する俯瞰ワークショップで議論した。主に図 2-2 に示す 3 点の現状・課題を共有

した。1点目として、日本の基盤技術は、世界トップレベルの分野がある一方、システム化、統合化が遅れているという議論があった。それから、モデリングの基礎となる現象の把握･理解、評価方法の開発・標準化、さらに、データの蓄積が遅れている。例えば個別の解析技術は世界レベルにあっても、全体の解析技術は欧米が独占しているという状況にある。

背景②-1 デジタルツインを支える先進設計･製造基盤技術に関する日本の現状･課題

【エネルギー基盤技術(工学)俯瞰ワークショップ[2016/11/25、26]の結果】

- 日本の先進設計･製造基盤技術は、世界トップレベルの分野がある一方、システム化や統合化は国際的に立ち後れている。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。例えば、個別要素解析技術は世界レベルでも、全体解析技術（ソフトウェア、モデル構成式、検証データ取得）は欧米が独占。
- 大学では、基盤技術を知る人の減少が危惧され、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。製品設計の際、材料、流体、熱など各分野の連携が不十分で、製品設計･製造を支える解析設計ソフトを海外製に頼っている。
- 施策面では、デジタルツインを支える先進設計･製造基盤技術の様な地道な研究に科研費等予算がつきにくい傾向にあり、はやりの目立つ研究領域へ過度な資金・人員が集中。日本の多くの研究開発投資が出口(製品)志向で、デジタルツインを担うような先進設計･製造基盤技術が疎かになっている。

先進設計･製造基盤技術と関連学会

製造	材料	構造強度	機械	振動	電気	計測制御	燃焼	伝熱	流体	化学
・溶接学会 ・日本接着学会 ・機械学会（生産加工関連部門）	・日本材料学会 ・粉体粉末冶金協会	・日本材料強度学会	・機械学会（機素潤滑設計関連部門） ・精密工学会	・機械学会（機械力学関連部門）	・電気学会（電力・エネルギー部門、産業応用部門）	・計測自動制御学会	・日本燃焼学会 ・日本機械学会（熱工学部門）	・日本伝熱学会 ・日本機械学会（熱工学部門）	・日本流体力学会 ・日本機械学会（流体工学部門）	・化学工学会 ・日本エネルギー学会

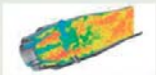
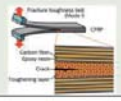
参加者78名。この内、討論出席者39名(各学会部門より産業界、大学(公的研究機関含む)各々1名ずつ)、傍聴者29名[内閣府2名、経産省製造産業局1名、文科省(高等教育局2名、研究振興局4名、科学技術・学術政策局2名、研究開発局1名)、NEDO1名、八大学工学系連合会など10名、JST理事他6名]

図 2-2

図 2-3 は、モデリングの基礎となる現象の把握・理解が十分にできていない研究領域例を示す。例えばトライボロジー、構造強度の分野では、転がり軸受けの機械要素損傷メカニズムにおける亀裂進展プロセスなどで、他にも、このようなよくわかっていない研究領域はたくさんある。

背景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

- モデリングの基礎となる物理･化学現象の把握･理解が不十分なサイエンスが多々ある。

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	

出典：ジェイテクト、重工技報、慶応大学理工学部、JST

図 2-3

こういう中で、図 2-4 に示すように、日本で用いられている代表的なソフトウェアは欧米にほぼ独占されている。ただ、図 2-3 で示したような未解明の物理・科学現象のモデリングは、欧米もこれから注力するところだ。ここを日本の産学官が一体となって推進していけば、まだ、世界をリードできる。今回の提案の背景のひとつである。

背景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、欧米製に独占されている。
- 一方、前述の未解明の物理･化学現象のモデリングは欧米もこれから注力するところ。

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	アルテ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

図 2-4

図 2-2 の現状・課題の 2 点目だが、特にアカデミアでは、基盤技術を知る人の減少が危惧される。産業界では、製品・サービスの性能・品質というのは総じて世界有数だが、ビジネスモデルが弱く、プラットフォームの優位性が確保されていない。利活用しているソフトウェアについては、上述した状況だ。3 点目の施策面では、基盤技術のような地道な研究に科研費等の予算はつきにくい傾向にあって、どちらかというと、はやりの領域に人、お金が集中しており、基盤技術がおろそかになっている可能性がある。このような現状・課題を産学官で共有した。これらも、今回の提案の背景のひとつだ。

参考までに、図 2-5 は、各基盤技術分野の主要論文誌の論文数の各国比較結果を示す。有識者に推薦もらった各分野主要論文誌の論文数全体の各国比較をしたものだ。外側にいくほど国別順位が高く技術分野の優位性を示す。日本は赤色で、1996 年、2006 年、2016 年と弱化してきているということ、一方、中国は橙色で、だんだんと力をつけてきているということがわかる。米国は全ての分野でトップレベルを維持している状況にある。

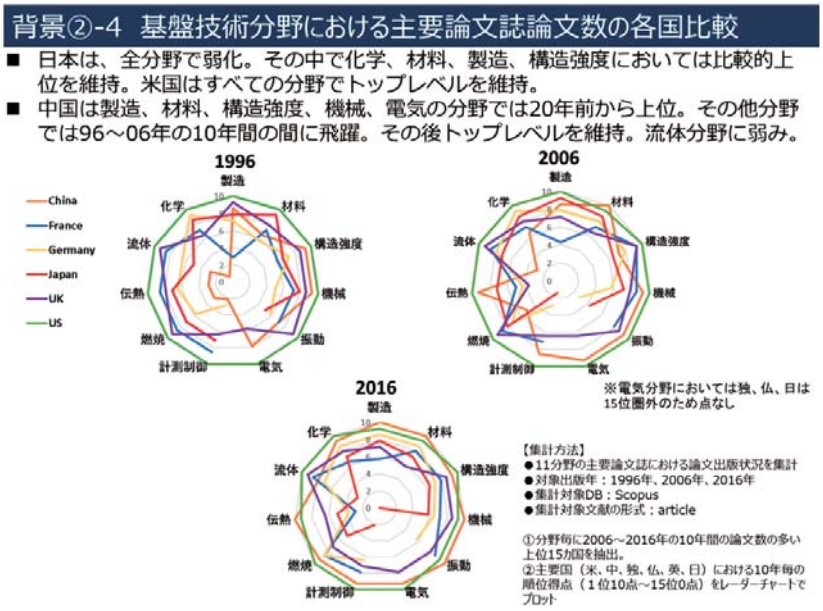


図 2-5

図 2-6 は、今回の提案の方向性で、大きくはこの 3 点になる。まず、1 点目は、モデリングに貢献する多様な基盤技術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、及びこのようなモデルの開発・標準化だ。2 点目は、1 点目に資する基礎科学研究からの知識基盤の構築ということで、先述したようなまだよくわかっていない現象の把握・理解、それに関連するデータの取得・蓄積だ。3 点目は、2 点目を活用して、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や、科学的合理性に基づきものづくりをできる人材の育成だ。この 3 点を大きな骨子とした提案をする。

今回のワークショップの論点は、図 2-7 に示すように 6 つある。まず、論点 1 から 3 は、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についてだ。論点 1 が研究開発課題の構成はどうあるべきか、それから、論点 2 として、参画企業の協調領域と競争領域の課題テーマをどう切り分けるか、そして、論点 3 は統合化モデルを誰がどのように構築するか、プラットフォームも含めて議論する。

論点 1、2、3 だが、例えば、図 2-8 のような研究開発課題の構成を考えている。こういう課題の構成について、もう少しこうしたほうがいいのではないか、こういうものも入れてはどうか等モデル構築を中心にした研究開発課題について議論したい。それから、図 2-9 は、協調領域としてどういう共通課題が想定されるかを示したものになる。論点 2 の協調領域と競争領域の切り分けのところで、ぜひ、議論したい。そして、論点 3 の統合化モデルをどういうふうに構築していくかの議論をする。

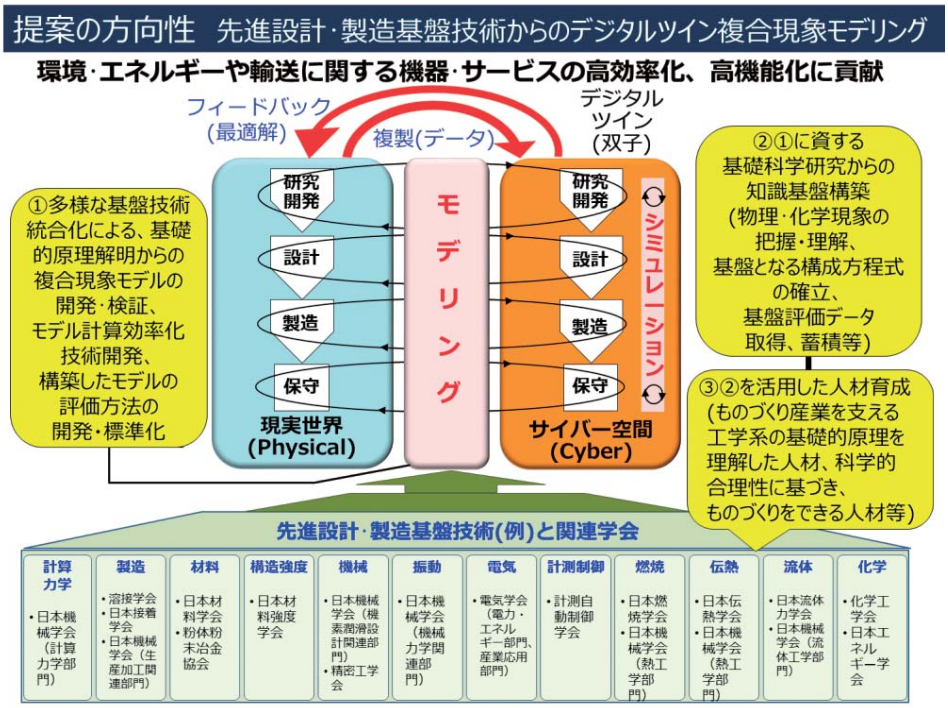


図 2-6

本ワークショップの論点

○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

【論点1】研究開発課題の構成はどうあるべきか。

-構築すべきモデル、取得すべきデータは何か。データをどのように取得するか。

【論点2】参画企業の協調領域と競争領域の課題テーマをどのように切り分けるか。

-産学が一体となった研究開発課題をどのように設定するか。

【論点3】統合化モデルは誰がどのように構築するか。

○研究開発推進方法、推進体制、人材育成

【論点4】運営体制、研究実施体制はどのような形が望ましいか。

-産学官の役割を踏まえ、ネットワーク型の産学連携コンソーシアム創設をどのように進めるべきか。
-実装に向けた産学官連携の現状課題は何か。組織の壁を超えた連携に何が必要か。
-創設された産学連携組織の継続的な運営をどうすべきか。

【論点5】プロジェクト成果物とその管理はどうあるべきか。

-成果物の帰属とその公開/利用はどうあるべきか。

【論点6】研究開発における人材育成をどうすべきか。

-若手の研究人材育成はどうあるべきか。
-参画研究者のインセンティブをどのように保つべきか。

図 2-7

【論点1,2,3】革新的デジタルツインに関する研究開発課題例

●環境･エネルギー機器、輸送機器及びサービス(ターゲット製品※)の設計、製造･生産、保守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及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研究開発項目に取り組む。

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]	デジタルツインターゲット製品(例)				
	風車	ｶﾞｽﾀｰﾋﾞﾝ	蒸気ﾀｰﾋﾞﾝ	自動車	工作機械
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	○	○	○	○	○

※研究開発課題、ターゲット製品、内容は、産業界、アカデミアと協議中で今後変更の可能性あり。

図 2-8

【論点1,2,3】研究開発共通課題の概要例

研究開発課題	設定目標	研究開発課題の詳細 [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]	スケジュール					デジタルツインターゲット製品(例)				
			2019	2020	2021	2022	2023	風車	ｶﾞｽﾀｰﾋﾞﾝ	蒸気ﾀｰﾋﾞﾝ	自動車	工作機械
a 機械損傷プロセスモデル構築と検証	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	･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、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、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	例えば、既存の構造材料ＰＪの合金亀裂、疲労寿命等関連成果一部反映					○	○	○	○	○
b トライボロジーモデル構築と検証	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	･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						○	○	○	○	○
c 流体･構造･振動連成モデル構築と検証	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	･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						○	○	○	○	○
d 流体･伝熱･燃焼･化学連成モデル構築と検証	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	･急激な過渡現象に対応する燃焼素反応と乱流、伝熱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	例えば、既存の燃焼ＰＪのエンジン燃焼モデル等成果一部反映						○		○	
e a～d統合化モデル(デジタルツイン)構築と検証	デジタルツイン活用によるターゲット製品開発期間1桁短縮と稼働後故障事象予知を実現	･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						◎	◎	◎	◎	◎

※研究開発課題、目標、詳細等は、産業界(COCN等)、アカデミアと協議中で今後変更の可能性あり。上記課題には、必要に応じてセンサーデータ取得やデータ同化に関する研究課題も含めていく。

図 2-9

論点４から６は、研究開発推進方法、推進体制、人材育成についてだ。論点４は、運営体制、実施体制はどういう形が望ましいかだ。例えば、図 2-10 のような産学官が連携するコンソーシアムを提案できないかということを考えている。デジタルツインとそれを支える基盤技術の確立には、こういう連携体制を適切に構築し、研究開発を推進することが重要だ。論点５は、プロジェクトの成果物とその管理をどうすべきかで、論点６は、研究開発における人材育成をどうするかだ。

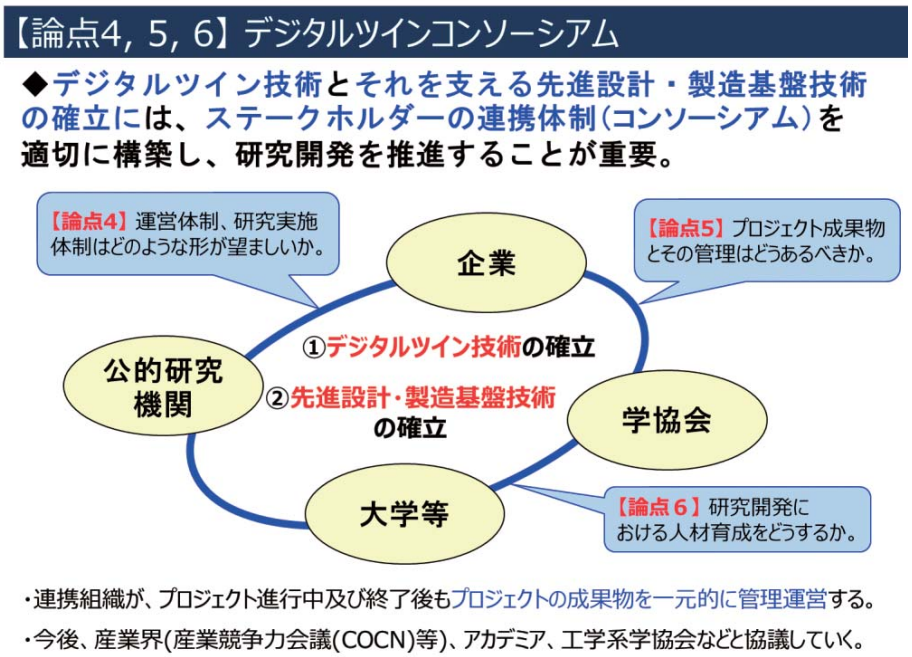


図 2-10

図 2-11 は、プロジェクト成果物のイメージ例を示す。上が包括的なソフトウェア、下が部分的なソフトウェアとすると、例えば成果①は従来、簡易な仮定を用いて部分的ソフトウェアを包括的ソフトウェアに組み込んでいたものを物理現象解明に基づく境界条件モデル、あるいはベースデータを構築してしっかり組み込むというもの、それから、成果②は複合現象モデル解析に必要な部分的なソフトウェアを新規に構築するもの、成果③はこういう包括的汎用ソフトウェアの連成をどのように連成するか、あるいはそれに関連するベースデータをどう構築していくかだ。ここから出てくる知的財産権あるいはデータ等を成果④としている。

図 2-12 は、具体的な推進体制のイメージ例である。これは研究開発課題の構成にもよるが、例えばＡからＤの拠点は、研究開発課題と基盤技術をあわせて推進していくということを示している。さらに、拠点Ｅは、統合化モデルを推進していくところで、全体をマネジメントする拠点というイメージだ。プロジェクトマネージャー（PM）には、基礎科学、社会実装、人材育成、この同時達成が図れるようマネジメントしてもらう。ネットワークというのは、拠点ＡからＥまでを上手に連携させていくという拠点間連携という意味である。さらに、研究開発課題の研究遂行を支える基盤技術の育成では、基盤技術からプロジェクト推進への貢献とプロジェクトからのフィードバックが大事な点になる。

以上が、本日のワークショップの論点１から論点６になる。これを中心に招聘識者から発表してもらい、その後、総合討議で議論する。

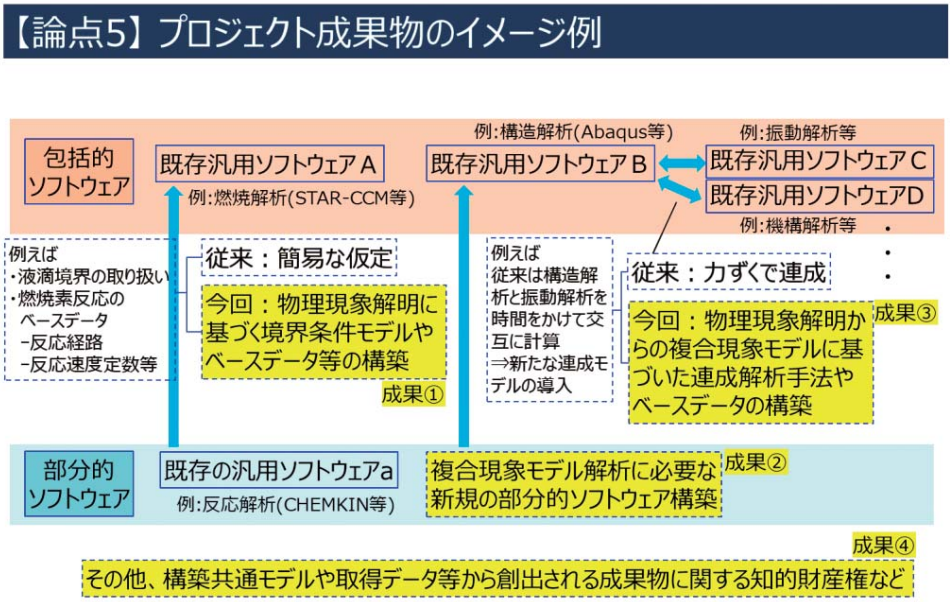


図 2-11

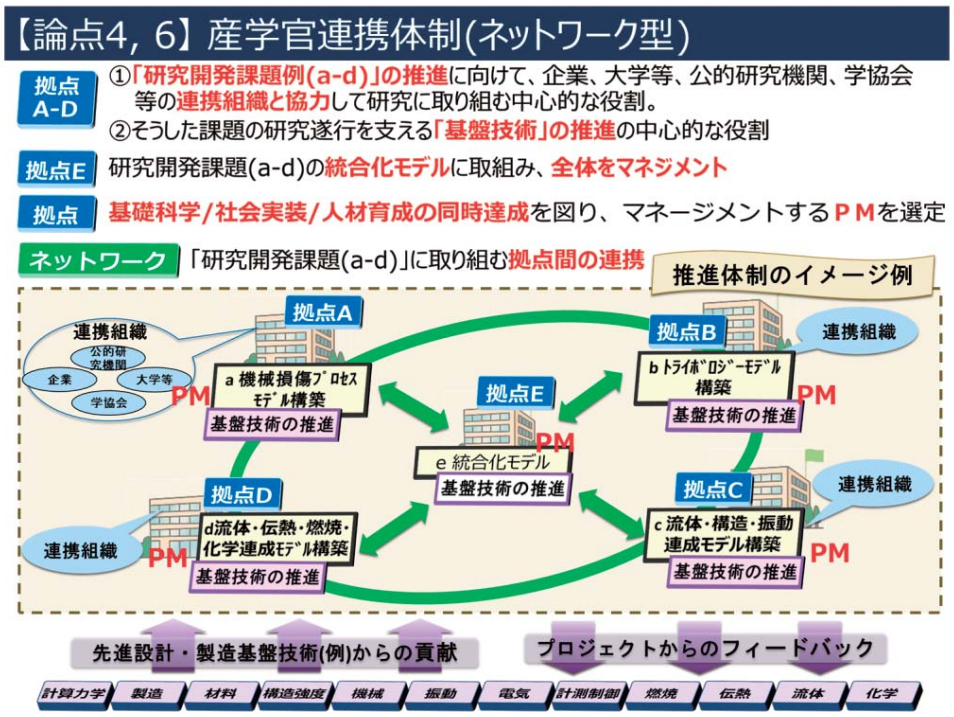


図 2-12

3. 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

3.1 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）

日立製作所の立場で日立のデジタルツインについて、産業競争力懇談会（COCN）の実行委員という立場で学会をオープンイノベーションの場とする施策について報告する。

グーグル、アマゾン、GE のプレディックスなど、世界のプラットフォーマーと同様に、日立も Lumada というプラットフォーム事業を持つ。プラットフォームの概念は、複数のプレーヤーが多くのアイデアとデータを持って集まり、新しい価値をプラットフォーム上で創出することである。そのためにはセキュアで、多くのデータの集まる信頼性の高いプラットフォームが要求される（図 3-1-1）。

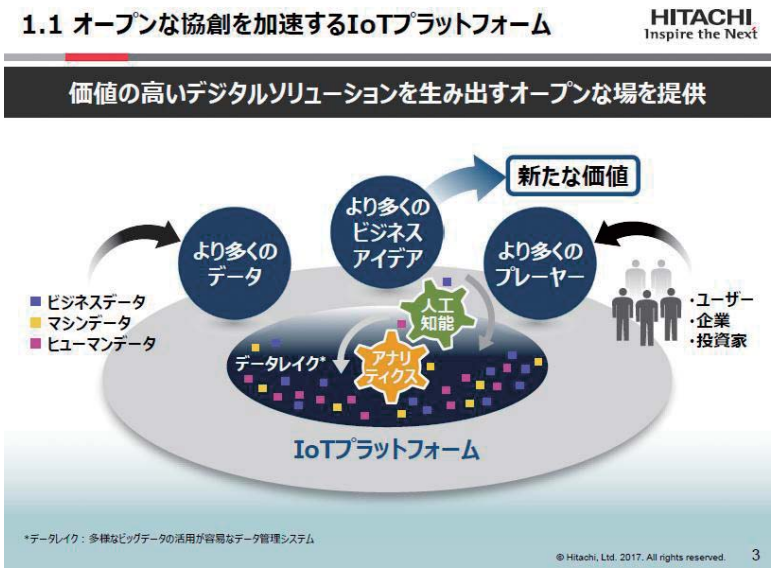


図 3-1-1

日立は複数分野の事業をしており、保有する多くのデータをオープンにして供給して、協創（コンペティションではなくてコクリエーション）して、様々な新しい価値を生みだし事業にするために、このプラットフォームをつくる（図 3-1-2）。

図 3-1-2

IoT プラットフォームはカスタマーのバリューチェーンに従って我々のソリューションコアやユースケースからソリューションを提供する。事業過程に応じて抱えている課題を解決するいろいろな技術を一カ所に集めて提供するのがその趣旨である。プラットフォームの Edge はデータを集め、データを供給する先端の計算機である。Core の中のアセットアバターとは、計算機の中にあるアセットの分身であり、デジタルツインである。これが今日の本題である（図 3-1-3、図 3-1-4）。

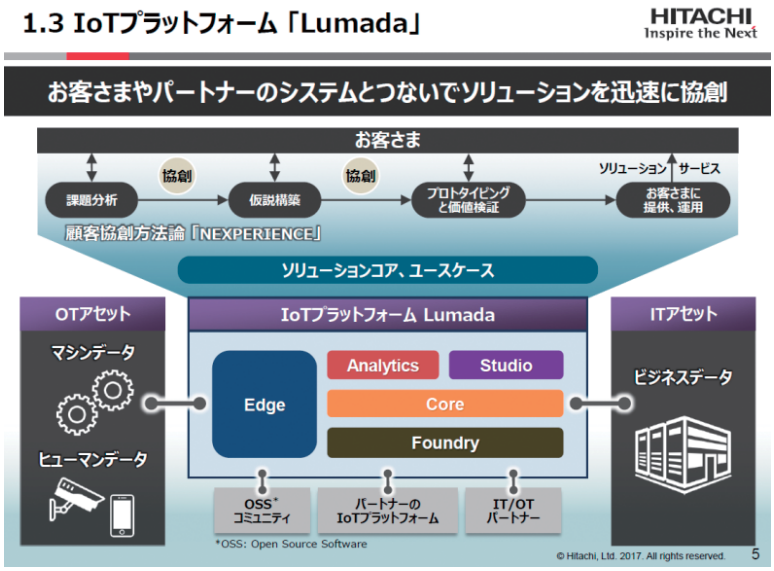


図 3-1-3

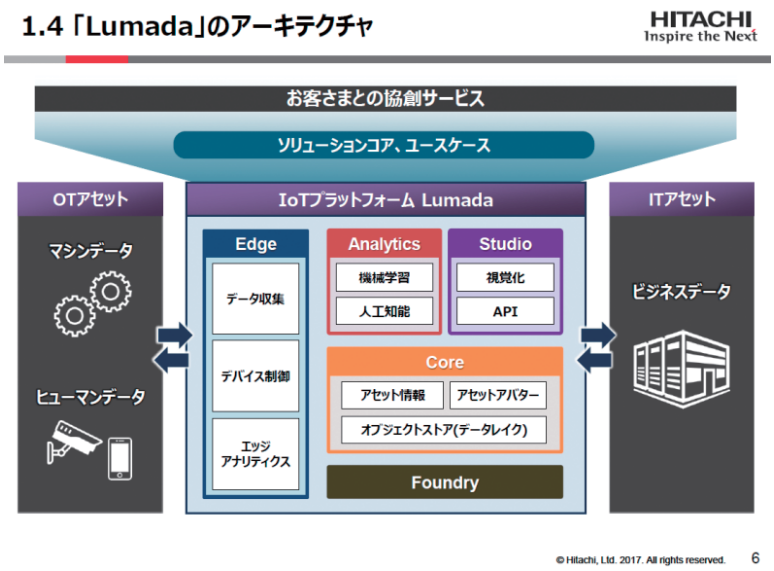


図 3-1-4

Lumada は illuminate + data の略であり、オープンかつアダプタブルで、高信頼のプラットフォームを提供する（図 3-1-5）。

図 3-1-5

例えば鉄道車両の部品の状態を監視しながら、プリベンティブメンテナンスをする。多くの産業分野では、壊れたら直す、壊れるまで使うのが国内でも海外でも大半で、メンテナンスにより壊れるのを未然に防ぐ概念になかなか至らない。これを変えていくのが課題である（図 3-1-6）。

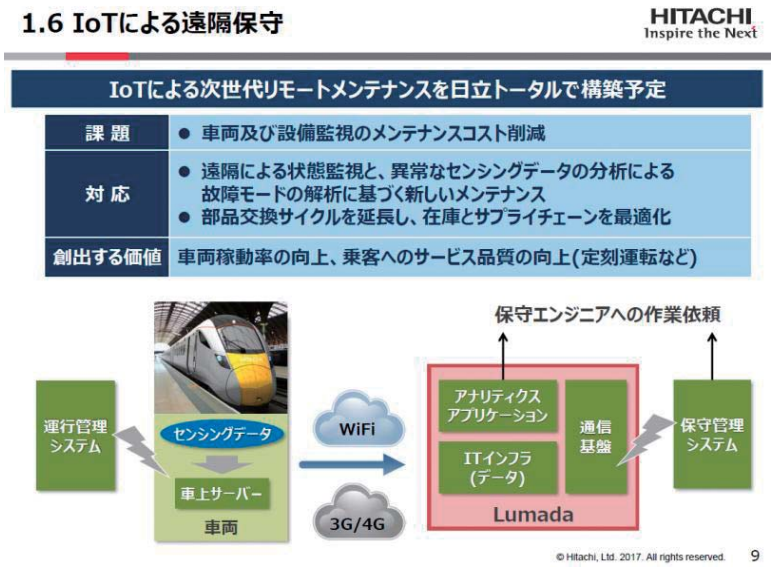


図 3-1-6

デジタル化の事例を紹介する。先ず現実の動作や作業をデジタル化する。標準的な作業から外れると事故が増える。このようなモデルをつくり、ミス削減に貢献する。あらゆるもののデジタル化を考えている（図 3-1-7）。

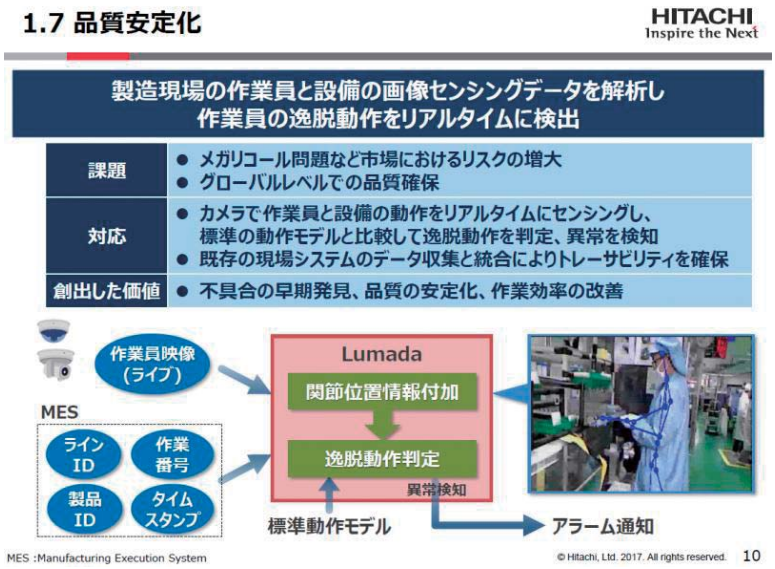


図 3-1-7

作業監視の他の例として、倉庫のピッキングがある。棚にあるものを人が集めて配送するときに、棚に載せるものや、順番を AI で予測する（図 3-1-8）。風車も、古くなると故障が多くなるので、先ほどの電車と同じようにモデリングベースに、壊れるのを未然に防ぐことを考えている。以上がプラットフォームの概要である（図 3-1-9）。

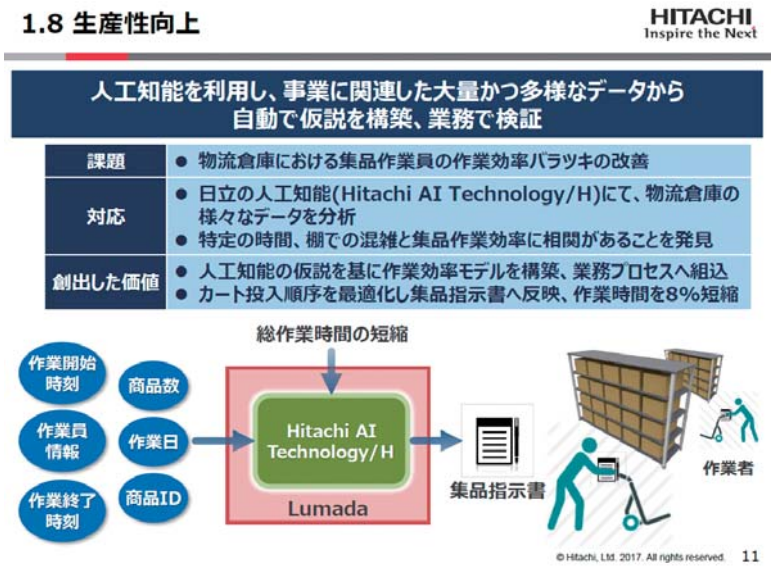


図 3-1-8

図 3-1-9

学会をオープンイノベーションの場とする施策について COCN で活動している。学会と産業界の連携については、報告書が多くある。多くの施策が実行されているが、思いどおりに進んでいないようである。背景を見ると、例えば再興戦略には企業から研究開発法人への投資を倍増するとの記載があり、多くの同様な発言や報告書がある。しかし実際には、これまでのデータでは毎年産業界から大学とか研究機関に 20 億円しか伸びていない（図 3-1-10）。

COCN

2.1 背景

日本再興戦略(案) 2016：
「2025 年までに企業から大学、国立研究開発法人への投資を 3倍増とすることを目指す。」

第5期科学技術基本計画：
「大学及び国立研究開発法人における企業からの共同研究の受入金額が2020年までに5割増加となることを目指す。」

榊原経団連会長：「企業から国内の大学･研究開発法人への投資は2014年度で614億円である。････これを2025年までには、････少なくとも3倍増の規模に拡大する必要がある。」
出典：首相官邸：未来投資に向けた官民対話(第5回) 議事要旨

国内大学と民間企業との共同研究：
2014年度の大学の研究費受入額416億円、共同研究1件あたりの平均研究費は218万円、1千万円を超える研究は3.6%、この6年平均では毎年20億円の伸び。
出典：科学技術庁･学術政策局：26年度 大学等における産学連携実施状況について

©COCN 2017 All rights reserved. 14

図 3-1-10

次に調査報告書である。当初は日本企業にはオリジナルの製品がないのが原因で大学にお金が回らないという指摘があった。最近は基礎研究にも企業が投資するようになり、独創型の企業を目指すという気迫や気概を持ってきている（図 3-1-11）。

2.2 産学連携に関する調査/検討報告書：

COCN

(1)科学技術庁･学術政策局：26年度 大学等における産学連携実施状況について
(2)日本経済団体連合会：産学官連携による共同研究の強化に向けて
～イノベーションを担う大学･研究開発法人への期待～, 2016年2月16日
(3)首相官邸：未来投資に向けた官民対話(第5回) 議事要旨
(4)総合科学技術会議：産学官連携の基本的考え方と推進方策, 2002年6月19日
(5)元橋一之：日本型オープンイノベーションの研究, シンポジウム 日本型オープンイノベーションの展開、21世紀政策研究所新書-53, 21世紀政策研究所, 2016年
(6)文部科学省 科学技術･学術政策研究所；民間企業の研究活動に関する調査報告 2013, 2014年9月
(7)長岡貞男 他3名：産学連携による知識創出とイノベーションの研究-産学の共同発明者への大規模調査からの基礎的知見
(8)元橋一之：日はまた高く 産業競争力の再生, 日本経済新聞出版社, 2014
(9)澤本光男：産学連携と大学の使命、化学と工業 第58巻 第7号、pp797-798, 2005
(10)経産省、科学技術･学術審議会：イノベーション促進のための産学官連携基本戦略、2007
(11)文科省、科学技術･学術政策局："今求められる大学発イノベーション", 2016
(12)COCN：「産学官技術人材流動化プログラム」
(13)経団連：産学官連携による共同研究の強化に向けて
(14)経済同友会：民間主導型イノベーションを加速させるための23の方策 -産学官の効果的な連携を目指して-, 2014年2月27日
(15)経済同友会：今こそ、産学官連携によるイノベーション創出を, 2016年7月13日
(16)JOIC, NEDO: オープンイノベーション白書（初版）, 2016年7月

©COCN 2017 All rights reserved. 15

図 3-1-11

成果の満足度について、共同研究を実行している大学の先生と企業側の担当者同士は満足だが、なかなか事業に結びつかないのが現実である。また、共同研究を研究開発部門が推進するために、共同研究成果が事業成果に結びつかない、あるいは大学はもともと基礎研究が本分であり、これに企業がどこまで投資できるか、また海外の投資は高額であるが成果は少ないと指摘する報告書もある。

また、非競争領域の協創について、企業は他の企業と非競争領域と競争領域の議論をするとの考えはい。そういう背景で､非競争領域と協調領域を見つるのは大きな課題である。例えば、公正取引委員会の対象になるような恐れは避けないといけない。

政府は促進策と色々な手を打っているが、一番日本が海外と異なるのは人材の流動化である。今、徐々に崩れつつある終身雇用制がなくなり、人が産学間を渡り歩くような社会にならないと両者に情報が伝わらない。そのためなかなか共同というような仕事はできないのだろう。大学の経営者を育成するために、代表者を何人か、アメリカの大学へ送って教育していると聞くが、そういった教育者の育成も大事である。

調査報告書では学会について書かれていることはなく、国家レベルの研究開発の施策作りでは学会は存在感がない。学会所属の先生や企業の技術者が個人的に施策策定に参加することはあっても、学会が母体になることはない。学会は重視されておらず、効果があると思われていない。しかし､学会には産業界や大学の技術者や最先端の情報が全て集まる。これを有効活用するための活動をしている（図 3-1-12）。

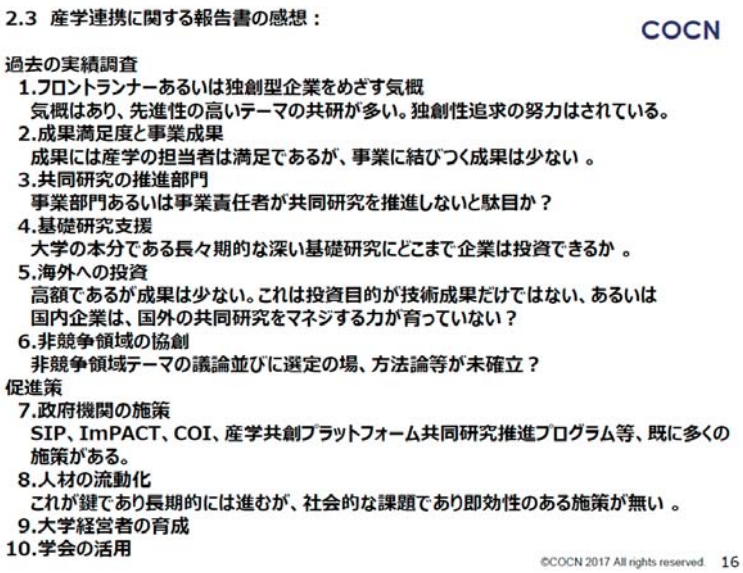


図 3-1-12

学会をオープンイノベーションの推進母体にするとの趣旨で活動を始めた。通常の学会の仕組みでは、大学の研究への企業の出資の可否を判断するが、今回は逆に企業が本当に欲しいと思っているものを大学に提案して、これに賛同する先生がいたら、その先生に出資する。この仕組に学会を使うことを検討している（図 3-1-13、図 3-1-14）。

これだけの学会と今、検討をしている（図 3-1-15）。各学会がいろいろな産学協同をするための対応組織を持っている。機械学会ではイノベーションセンター、応用物理学会ではインダストリアルチャプタ、高分子学会では、企業がバックアップする組織がある。土木学会は従来から調査研究委員会がある。

2.4 科学技術基本計画(2016年1月22日閣議決定)

COCN

第5章 イノベーション創出に向けた人材、知、資金の好循環システムの構築
(1)オープンイノベーションを推進する仕組みの強化
③人材、知、資金が結集する「場」の形成

→「学会」は人材、知が結集、資金の結集が不足

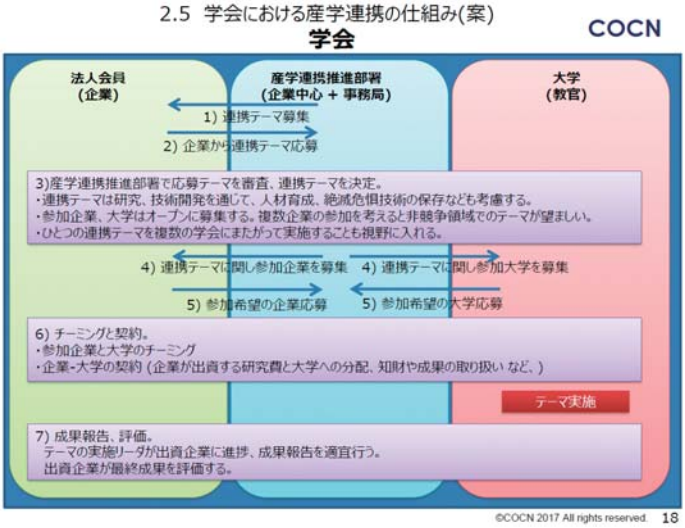
学会は産学の研究者、技術者の集まりであり、情報交流の場が既に構築されている。しかも、企業出身の学会の会長、理事は、執行役員や経営のトップ層の人材が就任する。しかしながら、知識と情報は講演会や雑誌等の伝達媒体を通じて会員が共有するだけであり、その具体的な活用には学会は積極的に関与しない。
基礎的な自然科学（理学）系はさておき、工学系の学会は、産学協創プラットフォームとして創生された。この原点に立ち返り、学会をオープンイノベーション推進の母体のひとつにする。

©COCN 2017 All rights reserved. 17

図 3-1-13

2.5 学会における産学連携の仕組み(案)

COCN



©COCN 2017 All rights reserved. 18

図 3-1-14

2.10 活動のポイント(3)

COCN

表1 各学会WGの検討状況

学会WG	学会内の対応組織	テーマ発掘	学会組織の対応	学会連携
日本機械学会WG	イノベーションセンター内に「協調領域技術懇談会」を設置、COCN会員4社で議論を活性化。	トライボロジ、強度信頼性の分野に絞り、15テーマを提案。	RC（Research Committee）分科会のスキームを活用。来年度の開始を目指し、1テーマを提案中。	今後、「協調領域技術懇談会」にて議論。
応用物理学会WG	インダストリアルチャプタにて議論を進めている。	「エネルギーと健康」をテーマにした特別シンポジウムを実施し、テーマを検討する計画。	本プロジェクトに関連したシンポジウム開催等を理事会に諮る計画。	高分子学会とシンポジウムを共催し、特定テーマに関して学会連携を進めている。
高分子学会WG	本プロジェクトの推進組織として「プロジェクト準備調査会」発足作業を進めている。	「MI（Material Informatics）×接着」をテーマ候補として、具体的な研究課題を纏めた。	「プロジェクト準備調査会」の理事会での承認と具体化。	応用物理学会と同様。
土木学会WG	従来からの29の調査研究委員会が対応。	検討範囲を「コンクリート･建設材料分野」「地盤分野」「ICT･ロボット分野」に絞り込み、テーマ探索を開始した。	調査研究委員会で実務を遂行。本プロジェクトの進捗を理事会に報告。	過去のCOCNプロジェクトのテーマ（付録参照）や接着、ロボットでの連携を検討中。

©COCN 2017 All rights reserved. 24

図 3-1-15

機械学会では、先端の中に協調領域技術懇談会をつくり、COCN の会員 4 社でテーマの検討を進めた。今回はトライボロジー分野に焦点を当て、RC という分科会にテーマを提案している。これが採択されたら、機械学会の会員企業対象に応募して、賛同する企業からお金を集めて大学の先生に研究を依頼する。応用物理学会は、高分子学会と協力して新しいテーマを見つける活動をしている。高分子学会は、この趣旨に賛同していただき、接着関係と材料インフォマティクスを掛け合わせ、プラットフォームをつくる活動を企業と一緒に始めている。土木学会は、コンクリートなど建材分野では既に経験があり、ICT やロボット分野で挑戦してみる。

学会には企業のような経営者がいない。学会を一人称で語る人がおらず、会長も 1 年か 2 年で終わる。そのため一つのプロジェクトを仕上げるまでの責任者がいない。長期的に継続して検討する経営課題については、対応の難しい組織になっており非常に運営が難しい。事務局長やそれに相当する方は、経営者として育てられていない。アカデミアの人たちがそういうのを今まで嫌ってきたのであろう。学会を利用するのは難しいとは思うが、ここを何とか活用していきたい。

今回のデジタルツインの活動も国からお金が出ると集まってくる人はたくさんいる。お金の切れ目が縁の切れ目で、プロジェクトが終わったときに解散して終わり、これが今までの国のプロジェクトだと思う。これを恒久的に続けるための仕組みづくりが重要で、学会が中核になればいい。どうやったらできるかは努力中である。最終的な回答になっていないが、そういうことをしないと、学会も外国と戦っていくのが非常に難しいのではないかと思う。

論文集もエルゼビアの雑誌への投稿が多く、見ようによっては、税金を使ってエルゼビアを助けている。大学の研究の結果を外国の出版会社の利益のために投稿している。これがずっと続いていいのかという課題もある。また、産業界にとってみると、高いお金を法人会費として払ってもメリットは全くない。景気が悪くなって学会を退会しても何も事業上問題はないので、二度とその企業は会員になろうとしない。

企業にとっても学会は大事な場所ではある。技術がなければ新しい製品はつくれない。新しい情報も重要である。支援は単なるドネーションになっている。そういう改革をデジタルツインの研究を通してできればいいのではないか。

【質疑応答】

質問：日本の学会は海外の学会と比べてどうか。イギリスは人口が半分で、機械工業も日本ほど発達していないのに、イギリスの機械学会員は日本の機械学会の倍以上いる。

回答:しかも伸びている。これは、オーストラリアとか、インドとか、イギリス連邦の国々の研究者がイギリス機械学会に入ってきているからだ。チャータードエンジニアという日本でいうと技術士の仕組みというのがイギリスにはあり、これが、社会的に価値がある資格である。これを持っていることは、コンサルテーションを開けたり、企業への就職が有利になったりなど、いろいろなメリットになっている。イギリスの機械学会はこの取得支援をする。日本では終身雇用になっているから資格制度が全く機能しない。例えばドクターや技術士の資格の有無で企業の中での仕事は余り変わらない。日本の企業の場合は、資格よりは成果、能力で判定する。いい面は、学歴によらず、いい仕事をすれば、工場長や部長になる。悪いところは、大学や大学院で優れた知識を勉強してきても、ゼロベースからの競争にさせられる。特異な知識を持っている人には、それに相応しい仕事を与えるべきであろう。社長になる方も労働組合員から始めるので、最初から経営層に入るわけではない。一労働者として入って、そこから評価されてトップになるのが日本の企業の仕組み。なかなか、資格が有効に働かないというのはあると思う。

3.2　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）

ガスタービンを中心とした研究開発や設計の経験から、産官学の産（メーカー）は製品の目標やビジョンをきちんと示して、アカデミアの方々の研究を行う課題、すなわち、研究のモチベーションを提供することが、非常に大事な役割の一つと考えている（図 3-2-1）。

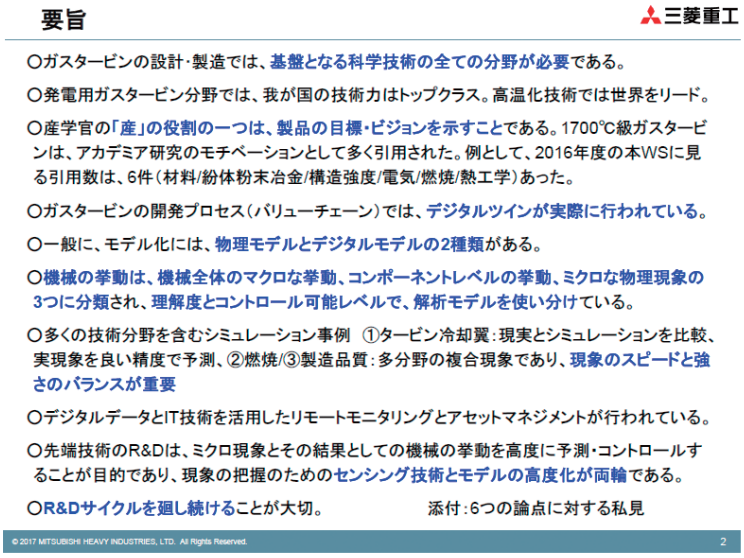


図 3-2-1

ガスタービンの特徴をまとめた（図 3-2-2）。ジェットエンジンはガスタービンの一種だが、発電用ガスタービンでは、ジェットエンジンの一番前についているファンを回すかわりに、発電機を回して発電をする。大型のものは、長さが 15 メートル程度、重さが 300 トンを超える複雑な機械システムである。圧縮機、燃焼器、タービンから成り、空気を吸い込んで、燃料を入れて高温ガスをつくって、そのエネルギーでタービンを回して駆動力を得る。非常に多くの技術分野が関係している。

ガスタービンは、火力発電の中で最も高効率で、ディーゼルやレシプロエンジンと比べると CO_2 などのエミッションが非常に少ない。燃料に CO_2 排出量の少ない天然ガスを使い、サイクル効率も最も高いコンバインドサイクルであるため、ガスタービンを用いたコンバインド発電方式では、CO_2 を最小限に抑える効果がある。大容量の発電所だと従来の石炭焚きから高効率のガスタービンコンバインドサイクルに変えるだけで、日本全体の CO_2 排出量の約 1%程度を削減することができる。また、フレキシブルな運用が可能なので、特に再生可能エネルギーが増えていったときの発電量の調整を短時間かつ大容量でできる発電方式だと考えられている。さらに、多様な燃料が使用可能で、再生可能エネルギーの変動幅の調整のために余剰な再生可能エネルギーを用いて製造した水素を燃料とすることができる特徴がある。

現在、研究の中心は 1700℃や 1800℃レベルに到達しており、これはタービン翼の超耐

熱合金の融点である 1350℃レベルに比べはるかに高い温度なので、耐熱性、遮熱性、冷却などいろいろな分野の研究が必要になる。ジェットエンジンでは 1600℃、1700℃で運転されるのは離陸のときの数分間だが、発電用ガスタービンの場合は、定格条件で 1 年以上連続運転しないといけない。市場規模も大きく、技術開発が市場のシェアに直結する製品であるため、機械分野では、各国のフラグシップ的な技術としてみなされている。航空宇宙分野と並ぶ重要な技術で、参入障壁も非常に高いという特徴がある。

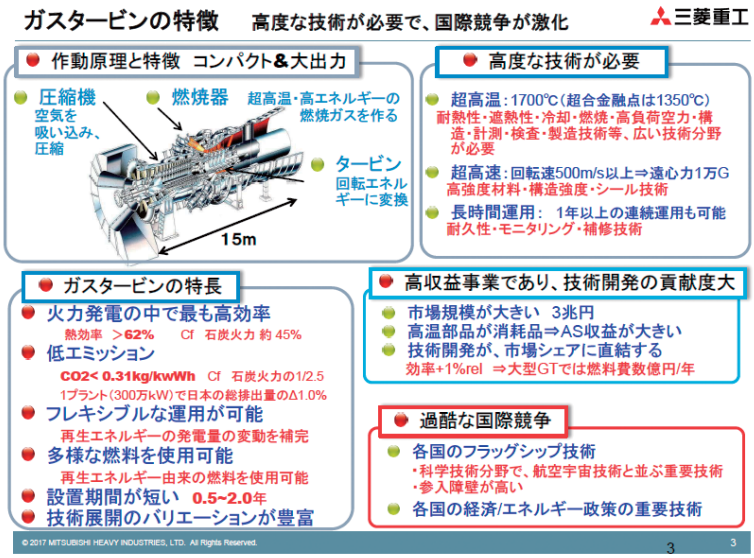


図 3-2-2

1997 年に日本が初めて外国のメーカーのタービンの燃焼温度のレベルを超えた。1600℃級も世界で先駆けて市場投入し、次の勝負は 1650℃、1700℃級に移っている（図 3-2-3）。外国は国や特に軍の資金もかなり投入して開発している。

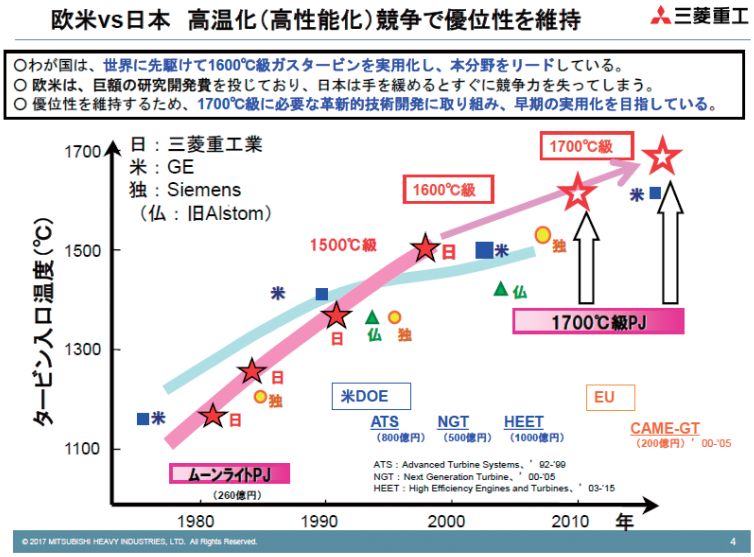


図 3-2-3

ガスタービンの開発では、デジタルツインは古くから実際の開発の場で行われており、多くのシミュレーションを使用する。そのためのシミュレーションモデルの開発を社内の研究やオープンイノベーションを使って国内外の大学とやっている。モデル化には、物理モデル（Physics Model）とデジタルモデルがある。いわゆるハイフィデリティのシミュレーションはデジタルモデルに入り、こちらの割合がふえてきている。物理モデルとは、例えば一次元的に機械を設計するときの一部、経験則も含めた人が頭で追えるレベルのモデルで、一次元、二次元、準三次元、一部、三次元の組み合わせで開発が行われている。研究開発から保守、アフターサービス、モニタリングまで含めデジタルモデルの割合が増えてきている。ガスタービンの場合は、ここにある全ての技術分野が開発のために必要である（図 3-2-4）。

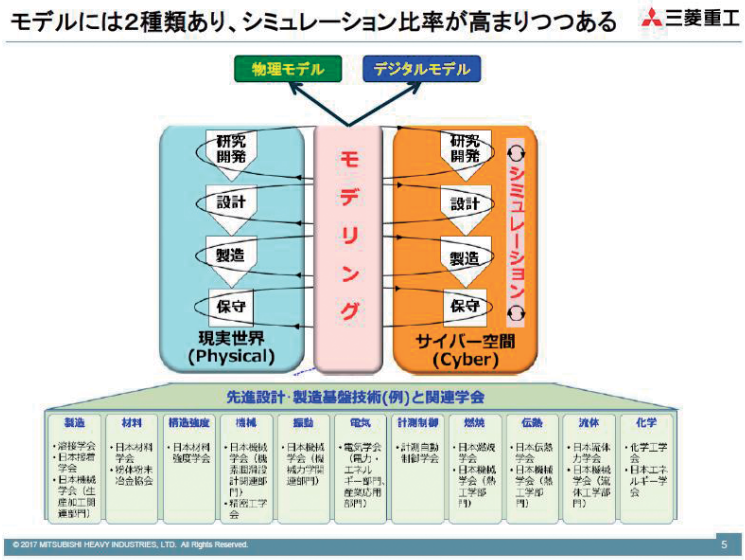


図 3-2-4

物理モデルとは、主要な設計パラメータを機械の挙動としてマクロに表現するものであり、設計者が何もない白紙の状態から設計を始めるときに、頭で考えながら最適化を行い、その最適化の中でデジタルモデルとしていろいろな分野のシミュレーションを実施する。二つ以上の分野にまたがるシミュレーションも多くある（図 3-2-5）。設計開発では、空力－伝熱－構造、いわゆるコンジュゲート解析と言われているものを使う。燃焼もラージエディシミュレーションなどが入ってきている。また、設計のみならず、製造分野を一緒にやっておかないと、実際にハードウエアができない。製造は新設計に対する制約になるため、性能を上げるために空力技術でタービン翼の形を変える研究をやるが、実は製造の制約を取り除く方が、効率向上度が大きい場合もある。そのため、精密鋳造、溶接、塑性変形、溶射などいろいろな分野のシミュレーションが大事である。

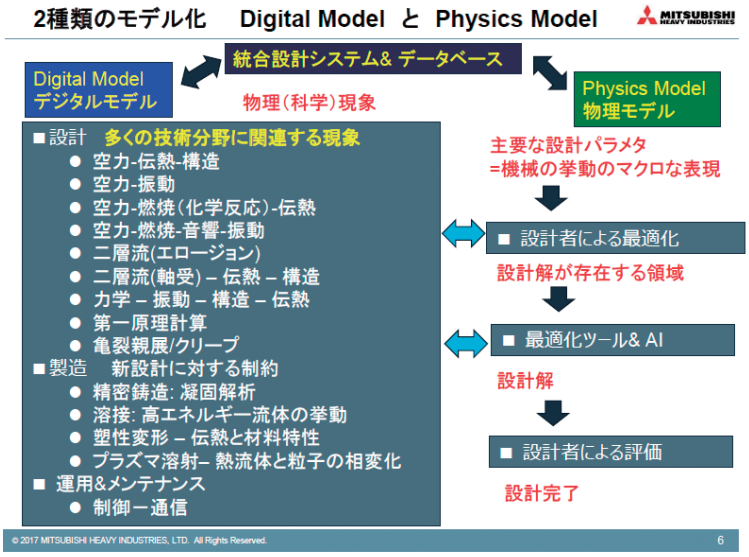


図 3-2-5

最適化ツールも、随分前から実用化されており、使用される種類も多い。遺伝的アルゴリズムは随分前から実際の設計で使われているし、目的によって、その都度最適なツールを選択して使っている。最近では、AI が入ってきて、最適化のテクニックも難しくなってきている。最終的には設計者が評価するが、ここも一部 AI が入ってくるかもしれない。

モデリングの種類と内容について分類すると、機械全体のマクロな挙動や、ガスタービンを圧縮機、燃焼器、タービンを分けた場合のコンポーネントレベルの現象、それのもとになっている局所・微細・詳細な物理現象の 3 種類がある。最初のガスタービンのマクロな挙動はほとんどわかっていると思われる。一方、分解してコンポーネントレベルの現象になるとわかっていないことがかなりある。何故その現象が起きるのかを現象レベルまで分解していくと、ミクロな物理現象についてはほとんどわかっていない。設計の初期段階では、設計仕様を検討するためには物理モデルを使うが、最終的な最適化や懸念事項の評価、では、デジタルモデルを使用する必要がある。最弱の項目がトータルの製品としての設計や製造のレベルを決めるため、いかに弱いところを引き上げるかが実際の開発のレベルでは大切である（図 3-2-6）。

具体例として、1700℃級ガスタービンの要素技術の開発では、ほとんどの技術分野で両方のモデルを使う。differentiator としての技術（図 3-2-7）と enabler としての技術（図 3-2-8）があり、前者を支える計測センシング技術、製造技術等もそこに入る。

燃焼分野のシミュレーションの逆火（燃焼器の中で炎が上流側に遡ってきて、ハードウエアを短時間で焼損してしまう現象）について、ガスタービンの燃焼器では、通常は火炎がハードウエアと少し離れたところで燃えている。この炎が上流側に遡る現象があり、壁を伝ってくるタイプと、旋回流の渦中心に入り込むタイプがある。壁を伝ってくるタイプでは、境界層の流体の速度、壁の温度など、火炎が維持できる温度レベルに従い、火炎が壁から少し離れたところにある。壁の温度が、火炎端の位置や燃焼の速度（化学反応のスピード）にも影響するので、実験も合わせながら精緻に予測している。この現象のスピードと強さのバランスが大事で、異分野にまたがるような場合に非常に問題になる（図 3-2-9）。

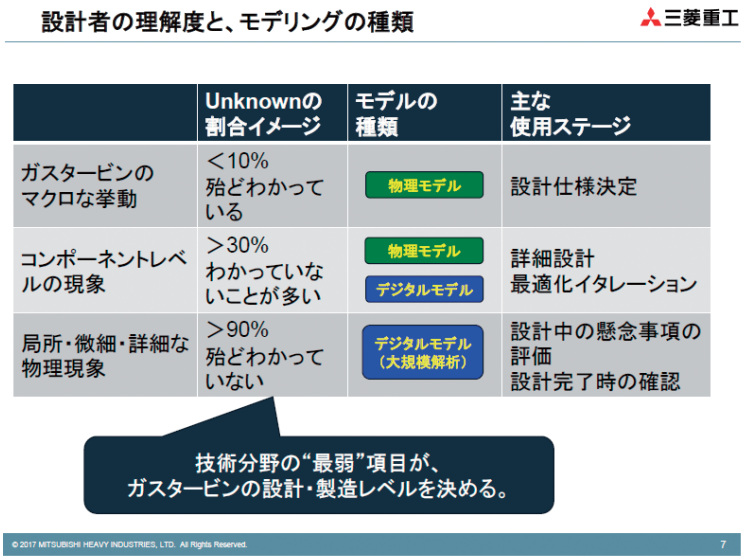


図 3-2-6

製造品質も多分野の複合現象とみなすことができる。鋳造に関係する凝固のプロセス、鋳造欠陥の発生確率の予測の際に、わかっている範囲でミクロな現象を再現できるシミュレーションを使う。また凝固の結晶方位などにもシミュレーションを使う（図 3-2-10）。

シミュレーションは R&D に支えられており、センシング技術とモデル化技術の両方が必要である（図 3-2-11）。この両方の技術を組合せて、IT、IoT を活用することによって、プラントのリモートモニタリングが行われている。遠い海外で稼働しているプラントの異常の検知や要因分析が自動でできるようになっている（図 3-2-12）。

最後に、R&D のサイクルを回す重要性を強調したい。モデルの精度を向上したうえで、設計・製作・運用するが、実機データをしっかり取得して評価すると、必ず予測との乖離が出る。その場合は、物理現象に立ち返り、モデルを改良し予測精度を上げる必要がある。この R&D のサイクルを回すことにより、初めてナレッジを蓄積することができる。この R&D のサイクルを継続することが非常に大切である。

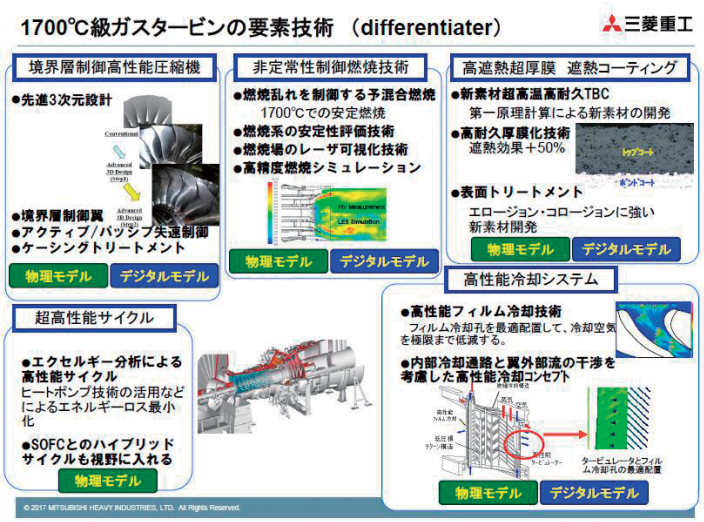


図 3-2-7

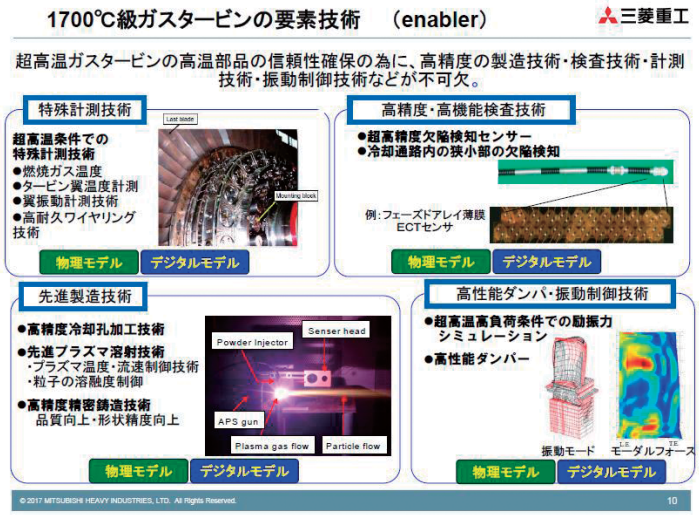


図 3-2-8

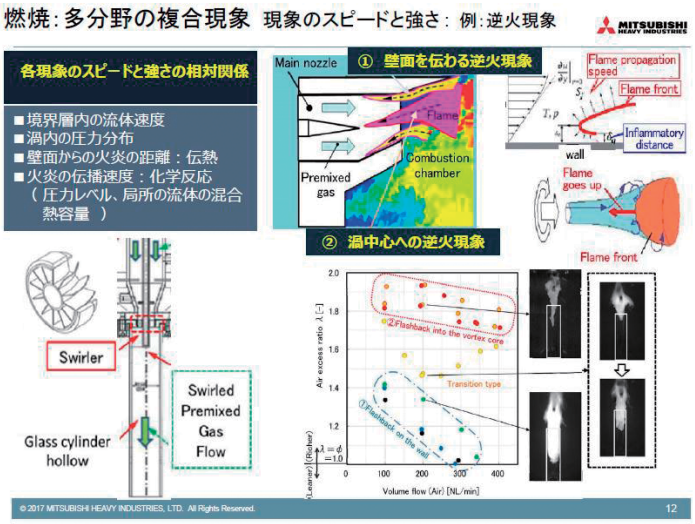


図 3-2-9

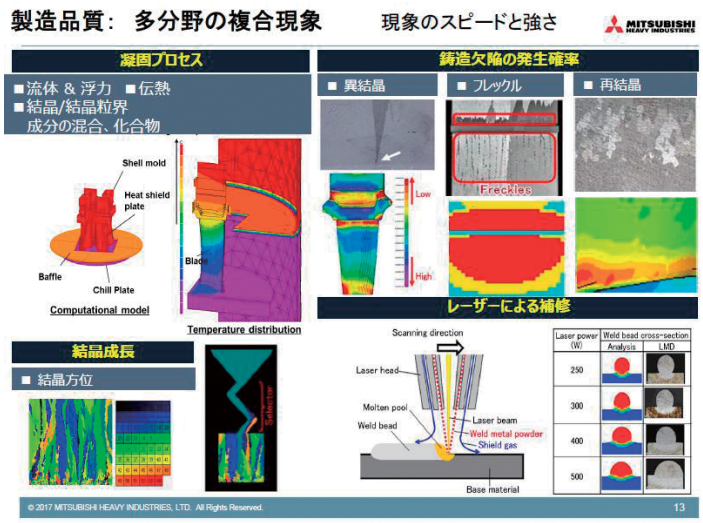


図 3-2-10

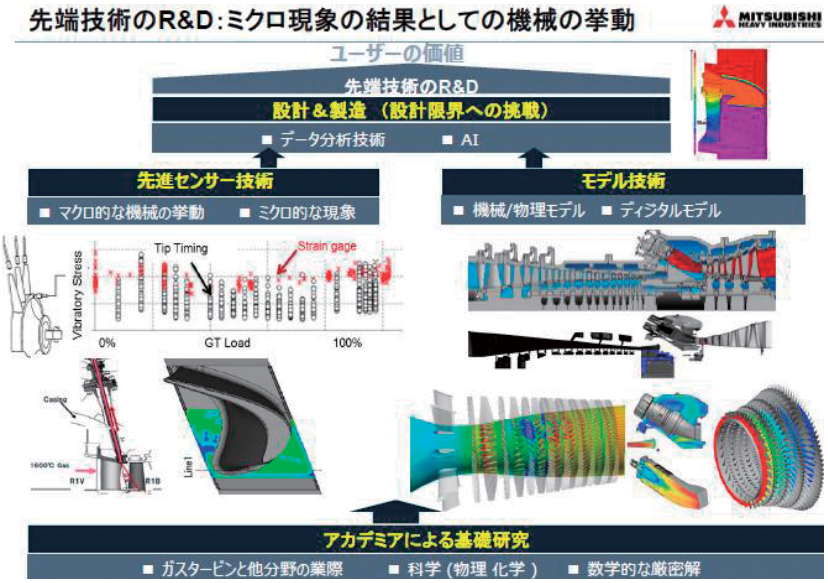

先端技術のR&D:ミクロ現象の結果としての機械の挙動
MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES
ユーザーの価値
先端技術のR&D
設計＆製造（設計限界への挑戦）
■ データ分析技術
■ AI
先進センサー技術
■ マクロ的な機械の挙動
■ ミクロ的な現象
モデル技術
■ 機械/物理モデル
■ ディジタルモデル
Tip Timing
Strain gage
Vibratory Stress
0%
GT Load
100%
アカデミアによる基礎研究
■ ガスタービンと他分野の業際
■ 科学（物理 化学）
■ 数学的な厳密解

図 3-2-11

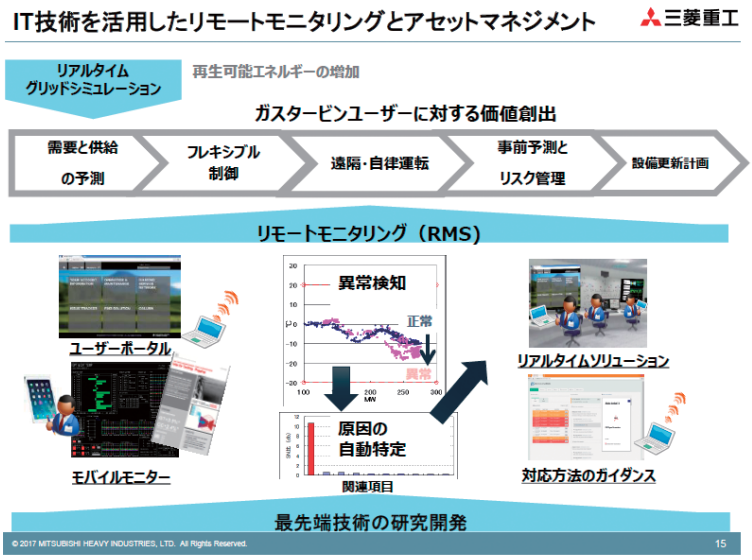

IT技術を活用したリモートモニタリングとアセットマネジメント
三菱重工
リアルタイム
グリッドシミュレーション
再生可能エネルギーの増加
ガスタービンユーザーに対する価値創出
需要と供給の予測
フレキシブル制御
遠隔･自律運転
事前予測とリスク管理
設備更新計画
リモートモニタリング（RMS）
ユーザーポータル
モバイルモニター
異常検知
正常
異常
原因の自動特定
関連項目
リアルタイムソリューション
対応方法のガイダンス
最先端技術の研究開発
© 2017 MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.
15

図 3-2-12

【質疑応答】

質問：協調領域と競争領域の切り分けができるか。

回答：ガスタービン学会では、いろいろなメーカーの人が集まって、それぞれの守備範囲が少し違うのはあるが、材料開発などで何か共同でできないかなど、定期的にやっている。

質問：具体的に研究開発費を持ち寄って、どこかの研究機関に開発してもらって、その結果をシェアする活動になっているか。税金を頼りにしないと協調ができないというところに、産業界の問題があるのか。

回答：次の世代の技術として何をやるべきかによる。予算については、どこかのメーカーが代表して国のお金をとり、得意分野を分担してやることはある。例えば共通の技術課題、特に現状レベルよりはるかに困難なレベルのモデル化は、メーカー単独ではできず、大学にお願いしないといけない。ここまで課題を落とし込めたら、できる可能性がある。直近の市場で競争している製品同士では恐らく無理である。

質問：同じ製品でも原理的なところとか、9割がわからない領域だったら可能性はあるか。

回答：可能性はあると思う。

質問：基礎的な部分に関して企業の中に大学の教授と同レベルで理解する人がいないとうまく進まない。いろいろな国の大手企業では日本よりもそういった専門家がいる。教授が戻るような人材交流も含めて、そういう人間の育成や存在をどのように考えているか。

回答：特に最先端のことをやろうとしたときに、少なくとも各分野で一人はいないと、オープンイノベーションで結果が出ない。育てるのは非常に難しくて、一番いいのは実機開発で自分自身が困り、何とか解決しようとするときに本当に成長する。そう考えると、機会をたくさんつくるのが非常に大事だと思う。そこを解決するような解を見つけた体験があると、自動的にその人は外からも声がかかるし、自分からも出ていくようになる場合が多い。

3.3 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）

本日は、航空用ガスタービンやターボチャージャー等の回転機械の解析モデリング等の紹介をする。設計としては、かなり限界設計に近いところで競争している分野になる。もう一つはデジタルツインシミュレータについてである。従来はフィジックスから組んでいくモデルが多かったが、簡略化モデルを使用した事例の紹介をする。（図 3-3-1）。

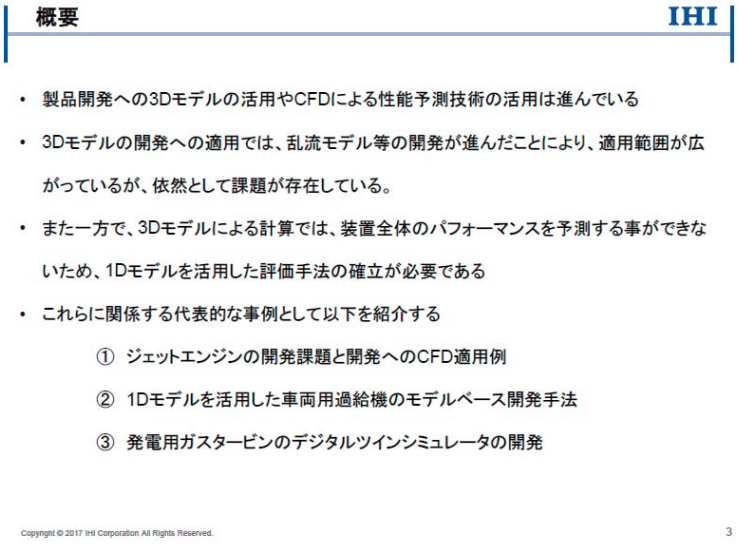


図 3-3-1

ジェットエンジンにおいて効率は非常に重要であり、ジェットエンジンならではの要求として、軽量化の要求がある。このため材料開発が重要であり、その成果として一番前面のファンを金属から炭素繊維複合材料（CFRP）に変えている。ここを軽量化すると、シャフトその他も全て軽量化することができ、非常に大きなインパクトがある。燃焼器の下流のタービンでは、シリコンカーバイド（SiC）を構造材に適用する無冷却構造を目指している。無冷却化することで、タービン自体を軽量化し、エンジン全体の効率向上に繋がる。非常にインパクトのある開発で、まさにこういうところが競争領域になる（図 3-3-2）。

それ以外にコンプレッサー、燃焼器、タービンという、主要なコンポーネントの高効率化や、排気ノズルのノイズの低減も非常に重要な課題になっている。これらの構造の検討については、高度な解析技術が使われている領域になる。そのほか、バードストライクなど、異物が混入したときの強度解析もかなりの部分ができるようになっている。最終的に認証をとる上では、試験は必要になるが、設計段階ではかなり解析の比重が増えている（図 3-3-3）。

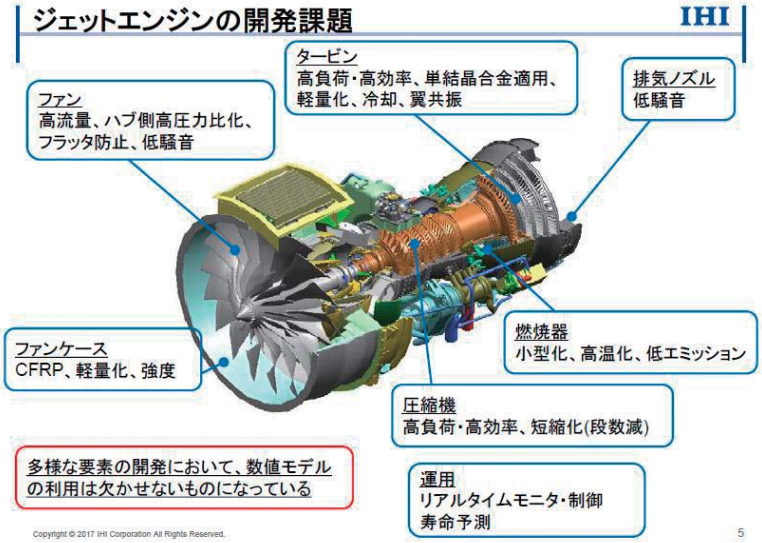
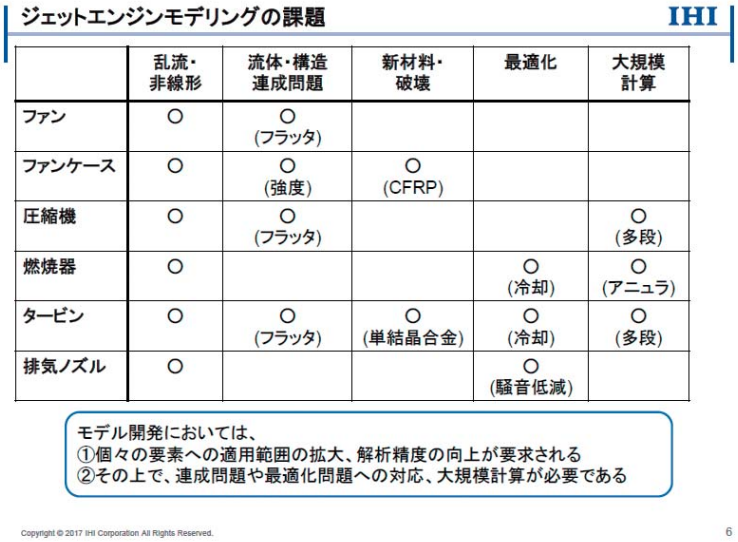


図 3-3-2



	乱流・非線形	流体・構造連成問題	新材料・破壊	最適化	大規模計算
ファン	○	○ (フラッタ)			
ファンケース	○	○ (強度)	○ (CFRP)		
圧縮機	○	○ (フラッタ)			○ (多段)
燃焼器	○			○ (冷却)	○ (アニュラ)
タービン	○	○ (フラッタ)	○ (単結晶合金)	○ (冷却)	○ (多段)
排気ノズル	○			○ (騒音低減)	

図 3-3-3

燃焼器についてはエミッション等の課題もあるが、エンジンを軽くするにはエンジンを短くするのが一番効果的であるため、燃焼器自体の短縮化も重要な課題である。エンジンの開発で基本仕様を決めるときに、エンジンのサイズ、燃焼器のサイズを５ミリ、１センチ短くできるかが議論になる。そういうところでは、今のシミュレーションの精度では検討に足る精度がないため、他の構造解析に比べると弱いところがあって、解析の信頼度でも課題がある。

エンジン自体のモニタリング等は常にやっており、異常の予測を行う。特に航空エンジンは世界中、どこでも飛ぶので、例えば黄砂の多い地域では微粒子が飛んでくる問題などがある。そのような外的な環境に対してのガスタービンの堅牢性をどう担保していくかが重要で、シミュレーションに多く活用されている。ただ、解析だけでは十分でないのが現状である（図 3-3-4）。

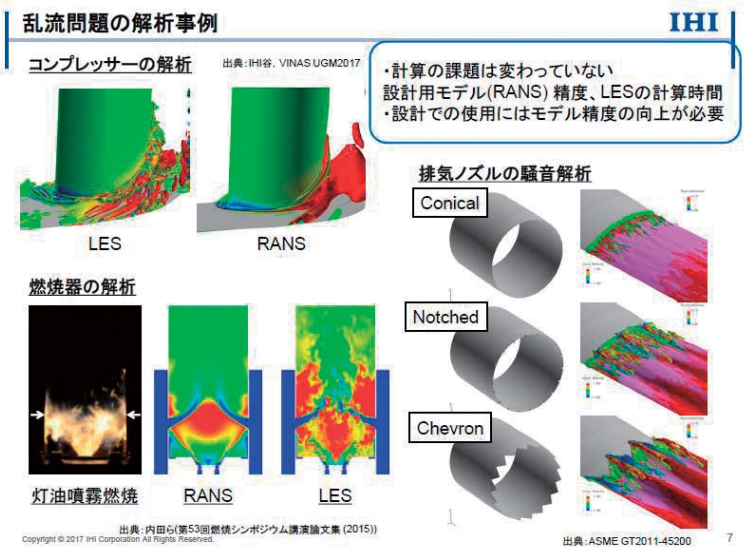


図 3-3-4

熱流体構造のフラッターに対する複合的な解析の例を示す。作業のうちの 7、8 割は解析に費やされている。例えばタービンの開発では、最近ではほぼ 1 回の試験でかなりの部分は予測ができるようになってきている。ただ、非常に性能の高いコンプレッサーや燃焼器に対しては、実現象との比較が常に必要になってくる。例えばノズルは音波の放射解析等も含めた形で、周囲環境へのノイズの拡散をシミュレーションする（図 3-3-5）。コンプレッサーについても境界面などの局所の解析精度が十分でなく、乱流モデルにも依然として課題がある。燃焼器の解析では、基本的な温度分布が重要である、特にタービン冷却はぎりぎりで設計しているので､温度分布の予測が十分に追い込めていない｡コンプレッサーの共振その他の連成解析は通常の業務として実施されている（図 3-3-6）。

ブレードの破壊について、バードストライクなどへの対処がある。従来のメタルから CFRP に変えた場合に、亀裂の進展を評価する。ストライクしても、あるいは羽が一部損傷しても、全損に至らないための評価、すなわち亀裂進展の解析が非常に重要になっている（図 3-3-7）。

要素的な点で、フィルム冷却においては、AI 等を含めた最適化手法を使って設計を進めている。燃焼器も解析できるようになってきているが、精度他について問題がある（図 3-3-8）。

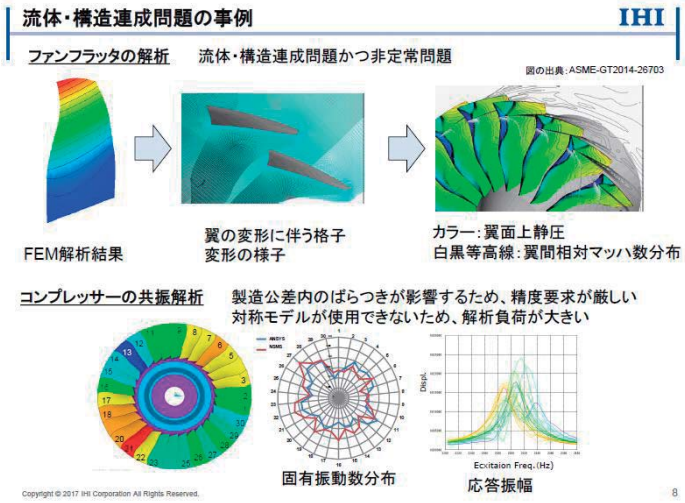


図 3-3-5

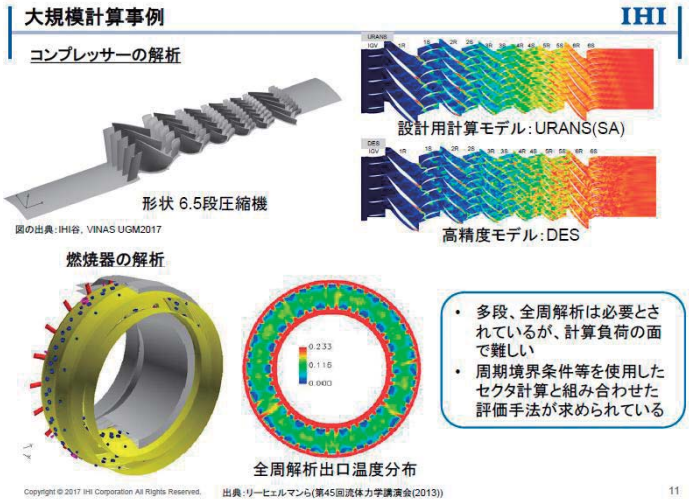


図 3-3-6

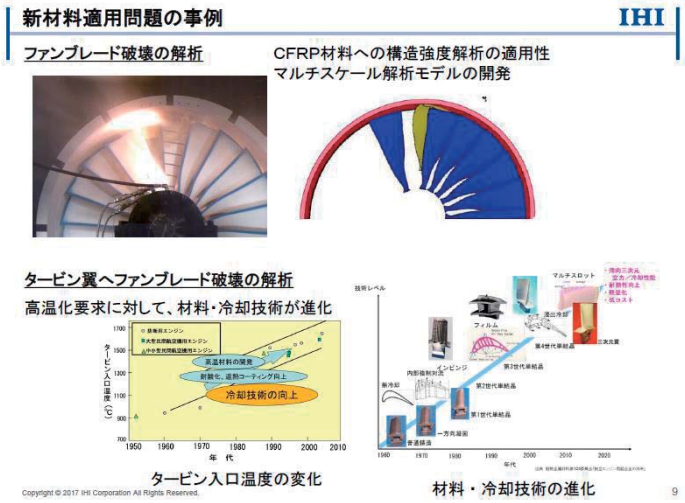


図 3-3-7

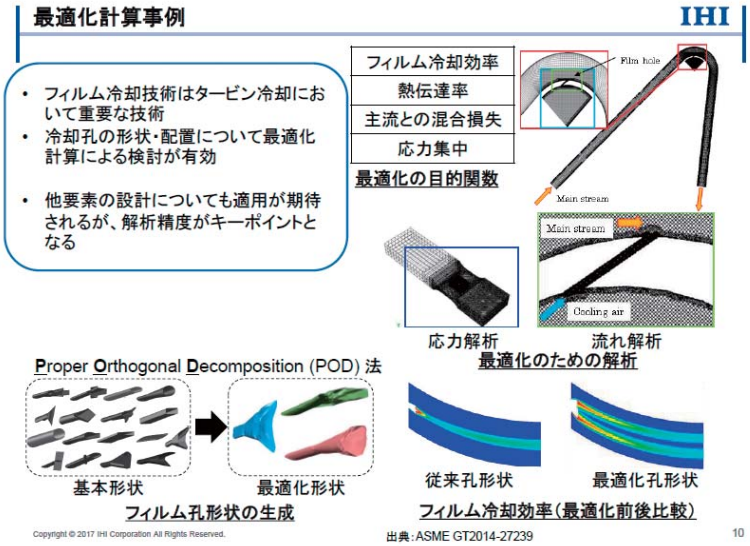


図 3-3-8

ターボチャージャーについては、開発のステージで、エンジンにどうマッチさせるかを検討している。数十プロジェクトが常に流れている状況であり、このようなプロセスは非常にシステム化されている。逆に、こういうツールを使い慣れてしまうと、基礎現象を理解しなくても設計できてしまう怖さもある。例えば入社２～３年目でも、新しいターボチャージャーの設計が、こういうツールを使ってしまうとできてしまう。これは、石炭火力でも同じで、違った構造になると途端にできなくなってしまう。今の技術者は、ツールを使いこなすところに長けていて、現象を適切に理解できていない場合もかなりある。これが根本的な技術者の地盤沈下につながるおそれがある（図 3-3-9）。

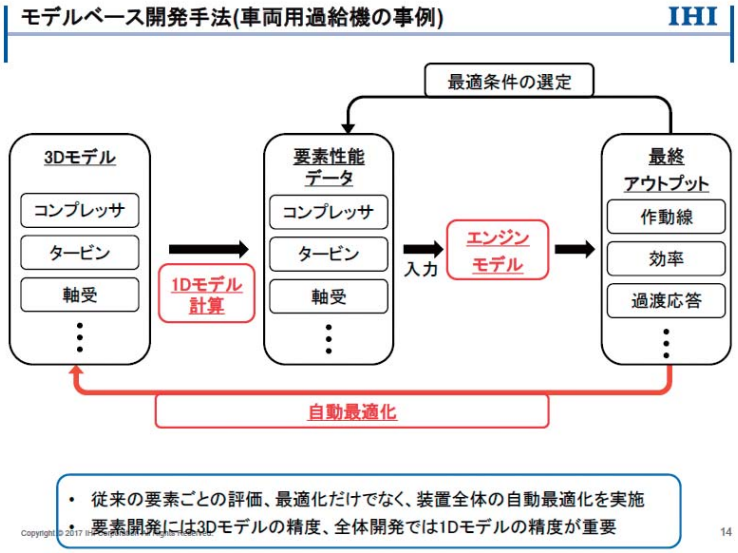


図 3-3-9

ガスタービンの事例で、NOx などある特性を予測した赤い計測値とシミュレーション値がある。実際のデータとの合わせ込みも含めつつ実機を予測する（図 3-3-10）、いわゆるデジタルツイン的なモデルシミュレーターでの予測だが（図 3-3-11）、例えば、単純に実機から得られる情報から推定したモデルというのは、ある部分になると途端に合わなくなってくる。ここにはしっかりしたフィジックスも組み合わせるということも必要で、物理モデルと実機とのデータ、ビッグデータ等をうまく活用し、オフデザインの予測をどうするかが課題になっている。精度向上には物理現象の把握が重要である（図 3-3-12）。

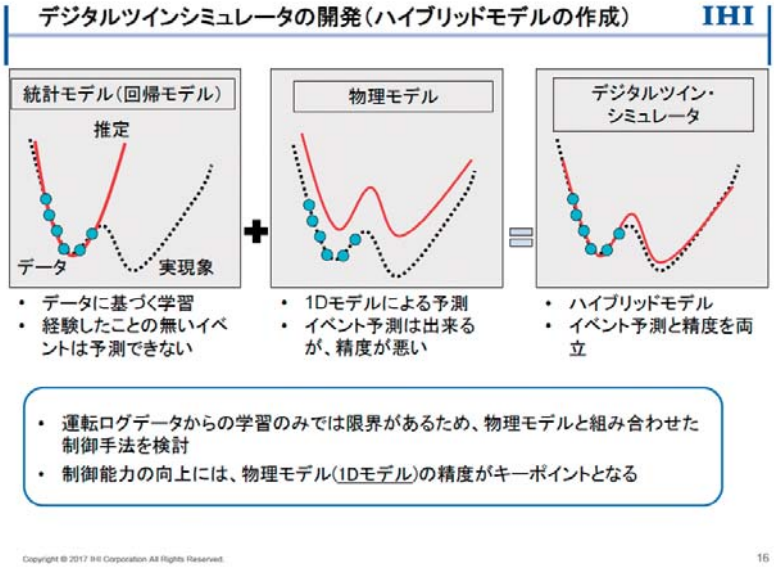


図 3-3-10

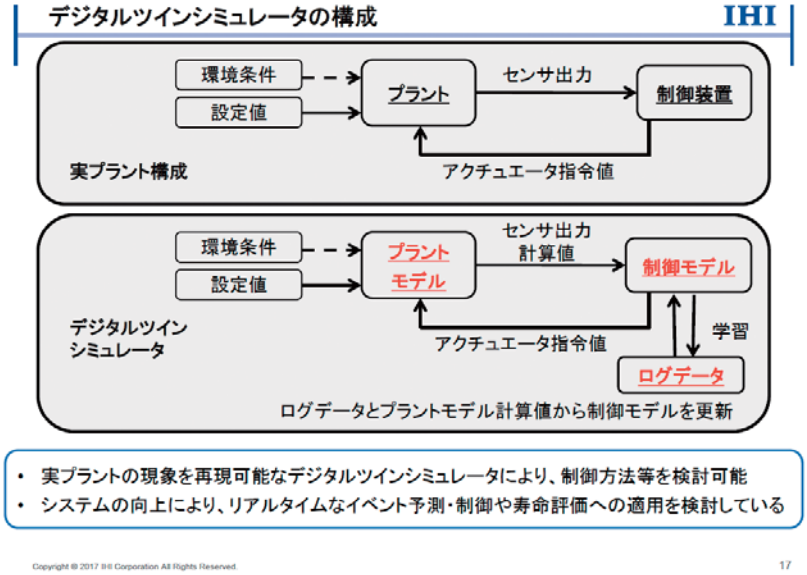


図 3-3-11

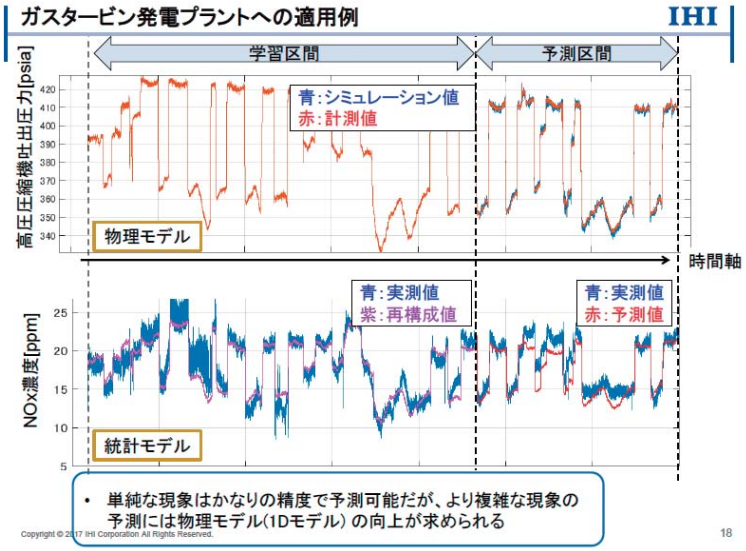


図 3-3-12

解析技術自体はほとんどの機械の設計に使われているが、その先では実現象をしっかり理解した技術者の育成というのは、喫緊の課題である。企業ではできる分野とできない分野がかなりあり、なかなか技術者の手が回らない。そういうところをこのプロジェクト等を使って、底上げができればいいのではないかと考える。

【質疑応答】

質問：シミュレーションでは必ず合う、合わないという話題が先にくるが、実はこういうシミュレーションを使って方向性の探知に使う必要性が出てくる。そういう見方は、どのように進められているか。

回答：シミュレーションは初期の検討でシンプルなモデルを使って自分たちのアイデアがいけるのかを判断するのに使う場合もある。今回紹介したのは実機の精度解析で、そういうところはどんどん使っていかなければいけない。残念ながら、そういうところをしっかりゼロからつくり上げる技術者はそんなに多くない。技術開発本部の中にもメンバーはいるが、既存の解析にとどまり、十分手が当てられていない。

質問：自動車のターボチャージャーのところで、企業のツールを使えば設計ができることについて、設計ツールが技術者の技術のスキルアップにならないことに対して、何らかの方策があるのか。

回答：確かにターボや空力の性能はぎりぎりのところで競争している領域なので、絶えず性能を上げるための開発をやっている。そういう標準的なプロジェクトを回していくチームで使っているツールとリサーチベースで効率向上のためのバージョンを考えるのは別のフェーズで動いている。

質問：製品設計で性能だけを追求した設計をすると、幾らでも効率の高い製品はできるか

もしれないが、信頼性、起動から停止までの運用特性などを全部知った上で物をつくらないと製品にはならない。そういうことをきちんとわかった人がデータを使わないと、製品にならない。ツールはいいものができても、使い方が企業のノウハウとか技術になる。ツールは共同開発してもいいが、それをどう使うかが企業の競争軸であるという認識でよいか。

回答：そういうところがデジタルツインの設計の中に、きっちりと組み込まれる必要がある。

コメント：実は機器にとって重要なのは最高性能ではなく部分負荷で、そこの特性も含めて総合的に考えるということがデジタルツインにとっても非常に重要なところになってくる。

コメント：負荷変動をきちんと追及できる必要がある。

コメント：設計とは各機能の最適化である。1カ所を上げることは幾らでもできる。ツールをうまく使いこなすということが結局、デジタルツインではなくて、人間、設計者の能力を上げることであり、それが日本の競争力になる。そういう見方が重要と思う。

コメント：物理モデルというのは非常に大切で、昔から有名な設計者は、物理的な把握と部分負荷とのバランスのとり方がうまかった。デジタルツインで非常に重要なところは、バランスができることではないか。最高性能だけであったら一つのプログラムでできる。

コメント：先ほどのガスタービンの例がそういうことで、通常、ツールで幾つか赤い線に沿ったようなモデルだけでいくと、部分負荷とこういう性能の外れたところだと、本質的に間違ったことをやってしまう可能性もある。現象の理解は非常に重要と思う。

3.4 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）

私の所属する自動車産業では、Virtual Engineering 時代の開発とものづくりのやり方が他の産業に比べてリードしていると思われる。今日は、その視点での話をしたい。

2001 年の時点では 3D 設計環境が発達し、すべての技術領域ではないが、CAE（Computer Aided Engineering）シミュレーションを用いながら設計仕様を検討することができるようになった。大きな変化は、そこからの 10 数年で、分野が分かれていた設計と 研究･テスト（CAE）が同じ場に入ったことだ。また、ここの場に、ものづくり、営業、企画、認証なども入ってきたことである。このモデリング・デザインレビュー・CAE が一緒になった場を我々は Virtual Engineering と呼んでいる（図 3-4-1）。デジタルツインの概念と基本的には同じだと思う。

従来の開発の場合には、図 3-4-2 のように、量産寸前の詳細設計の段階で、実物または機能確認中心の CAE を用いて設計仕様検討と検証を行っていた。目的の機能仕様が得られないときは、そのつど、現物を作り直し、物中心で機能熟成を行ってきた。車 1 台のコンセプトや振る舞いに対して、実車を用いた仕様の“検討と検証”が必要であった。それが新しい開発の姿では実車は機能確認のみに使われるのであって、“検証と検討”は Virtual Model を用い、設計段階に終了する。

図 3-4-3 に記述してある V 字フローで説明する。右側の軸に検証、左側の軸に設計を表してある。左右の軸は各層が上から、車一台レベルの層、モジュールレベルの層、部品レベルの層にレベル分けしてある。左が各レベルの設計仕様とすると右は物検証となる。

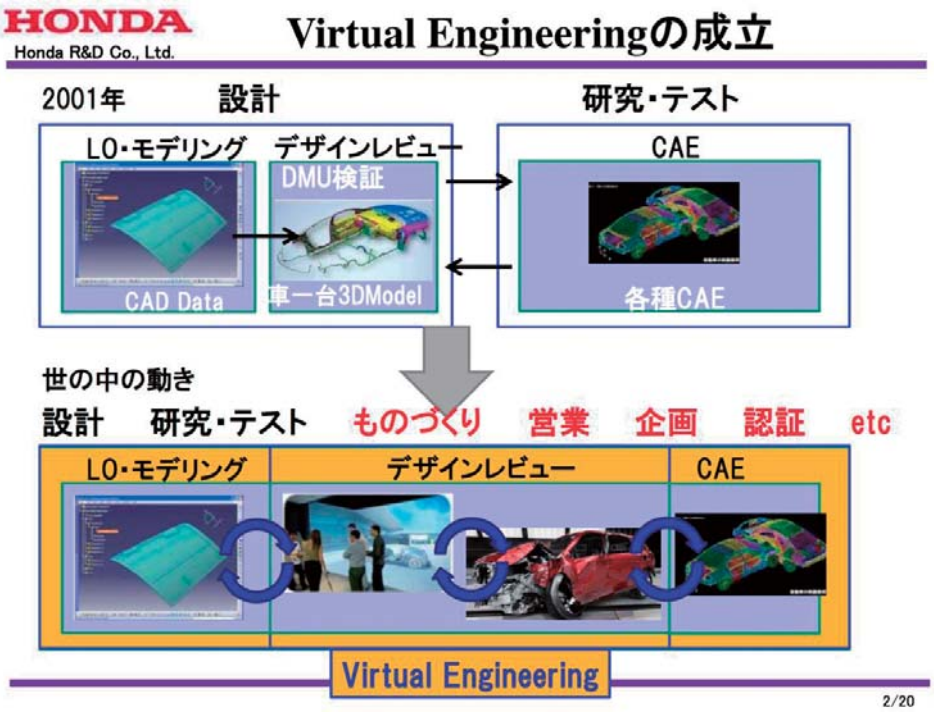


図 3-4-1

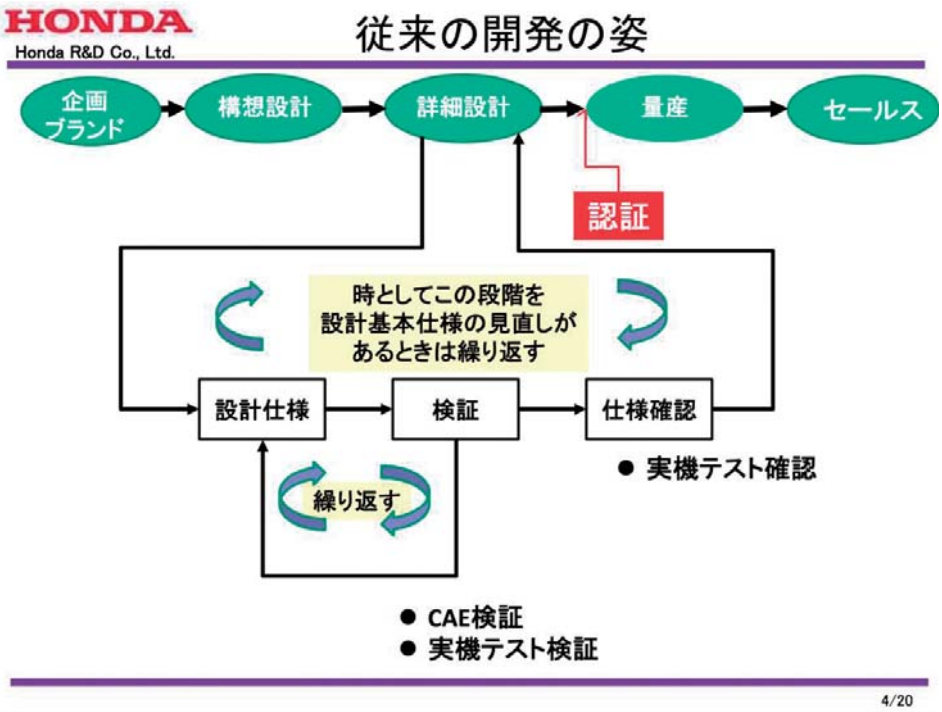

HONDA
Honda R&D Co., Ltd.
従来の開発の姿
企画
ブランド
構想設計
詳細設計
量産
セールス
認証
時としてこの段階を
設計基本仕様の見直しが
あるときは繰り返す
設計仕様
検証
仕様確認
繰り返す
● 実機テスト確認
● CAE検証
● 実機テスト検証
4/20

図 3-4-2

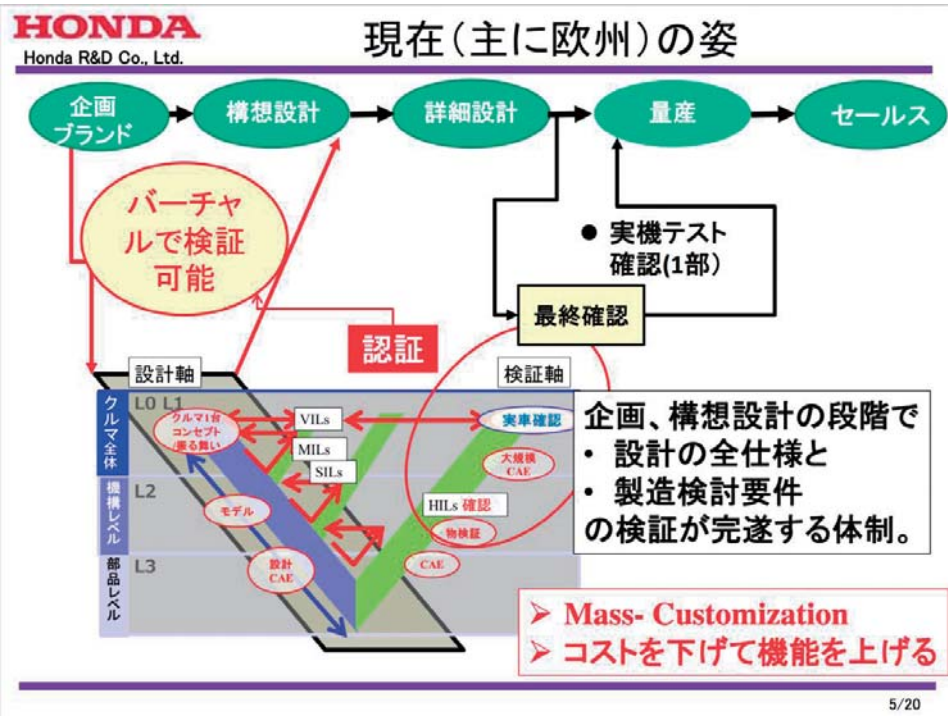

HONDA
Honda R&D Co., Ltd.
現在（主に欧州）の姿
企画
ブランド
構想設計
詳細設計
量産
セールス
バーチャルで検証可能
● 実機テスト確認(1部)
最終確認
認証
設計軸
検証軸
クルマ全体
機構レベル
部品レベル
L0 L1
L2
L3
VILs
MILs
SILs
HILs 確認
実車確認
CAE
企画、構想設計の段階で
• 設計の全仕様と
• 製造検討要件
の検証が完遂する体制。
➢ Mass- Customization
➢ コストを下げて機能を上げる
5/20

図 3-4-3

そのためそれに対応する部品、モジュール、車一台の実物が準備される。この右側の現物による検証が左側の設計段階で出来るようになったのがバーチャルエンジニアリングである。即ち、現在では企画と構想設計の段階の全てを決めることができる。このため、今までは後ろ工程に位置する詳細設計よりはるか前に仕様が決まるため、詳細設計終了後の量産間際にあった公的機関による認証も、このバーチャルでの検証の中で行うことになる。そのためにEU議会が技術とルールを決めるプロジェクトをここ10数年の間、進めてきた。現物の車は量産の前に機能の”検証と検討”ではなく、機能の“確認”を行うことになる。これがVirtual Engineeringと呼んでいる場で進めていることである。

このような取り組みは、欧州の自動車会社が2010年頃から一般的になった。現代の日本でやれない理由は何もない。実際、まだ十分でないが、我々のところでも、企画、構想設計の段階で設計の全仕様と製造検討の全要件の検証を完遂する体制を目指している。欧州のIndustrie4.0の目的はマスカスタマイゼーションとコストを下げて機能を上げることである。これらは欧州全体の合言葉となっている。規格、標準化、技術等の連携は欧州議会のフレームワークプログラム（今はHorizon2020と呼ばれる）の中の様々なプロジェクトの中で行われている。

具体例として、ダイムラーが、2010年頃に発表したトラックのバリエーションが120もあったが、(図3-4-4)、バーチャルテストで認証を受けたため、120のうちリアルテストは3つだけで、残りの117はバーチャルテストである。これはFP7（フレームワークプログラム7　2007 － 2013）の中のIMVITERプロジェクトで既に、公的に対応が出来ている認証制度を活用しただけである。説明に使ったこの例は操縦安定制御機能についての認証項目である。実際に人が運転してテストする場合には、ドライバーの技量によって大きく差が出てしまうため、マージンを20%位取る必要があるが、バーチャルテストではこのような問題も安定したバーチャルによるテスト認証が可能となったため、オーバークオリティになるマージンの設定が不要となる。現在は、制御、剛性、機構等のシミュレーションモデルの塊であるVILs（：Vehicle In the Loop Simulation）等で、制御を入れたサスペンションの動きなど全て計算されて出てくる。

バーチャル認証のロードマップがIMVITERプロジェクトにより2012年に発表された(図3-4-5)。これによると、2020年からはバーチャルテストだけでも良いとなっている。なぜこれほど利用が進むかというと、認証に要求される全派生の解析結果をもはやリアルテストでは出せないからだろう。2020年、発表されるコメントを予想するとバーチャルテストによる認証を受けることの出来ない企業はリアルテストを用いて良いことになる。しかし、今後の車の機能の増加、例えば自動運転等の認証項目の増加を考えると、バーチャルテストでの認証を受けることの技術を持たない企業はリアルテストで全ての項目の認証を受けることは不可能である。ということは、市場からの退出を促されているのと同じことを意味している。

欧州では高さが0.1mmの精度でのヨーロッパ中の自動車道路の3Dマップが売られており、石畳の道路などの3Dマップが簡単に手にはいる。この道路の上を走った時、どのくらいの車の性能になるかは計算でわかってしまう。そして、実機能エンジンの性能の情報があれば、例えば、フォルクスワーゲンの車体にBMWのエンジンを積んだ時に、どのぐらいの運動性能で走れるか、別の道路だったらどうなるか、標高が高く空気の薄いところを走った時にどうなるか、燃費も含めて設計段階で全てが高い精度で判断できる状態

になっている。(図 3-4-6)。

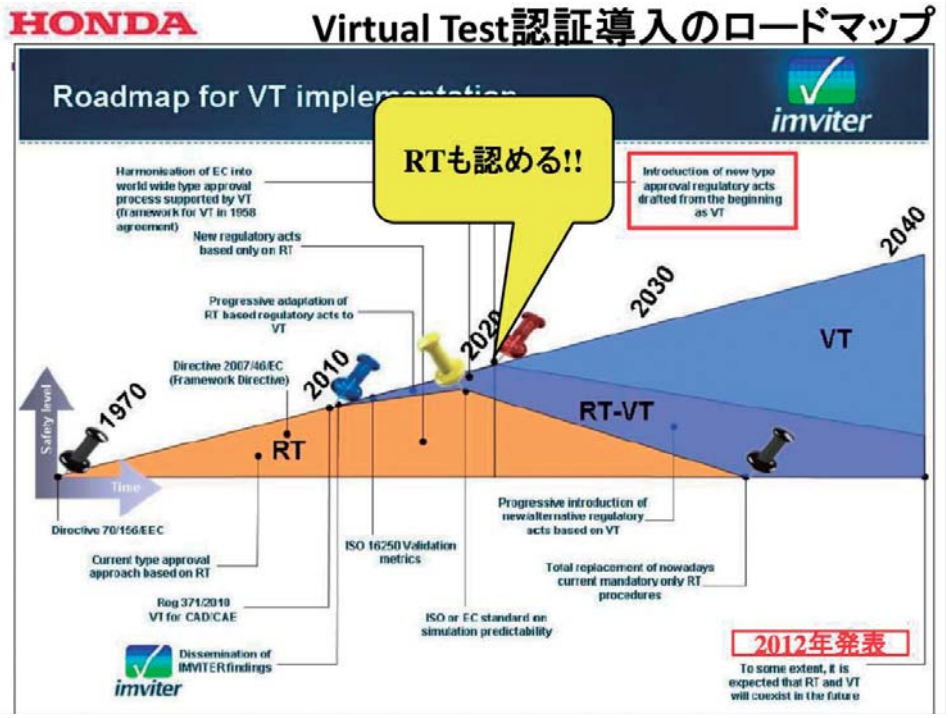


図 3-4-4

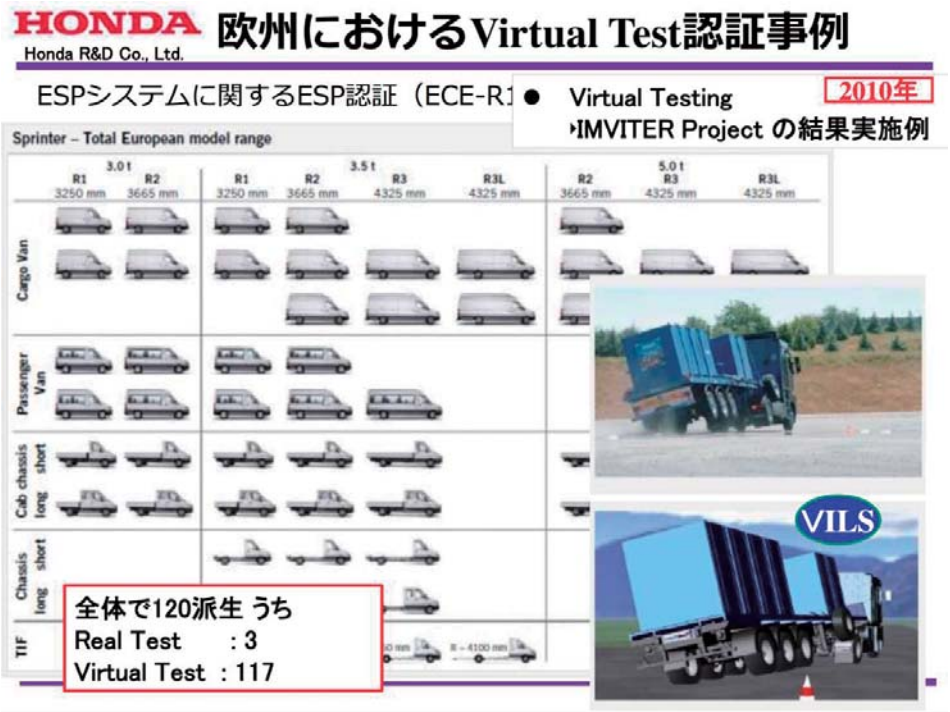


図 3-4-5

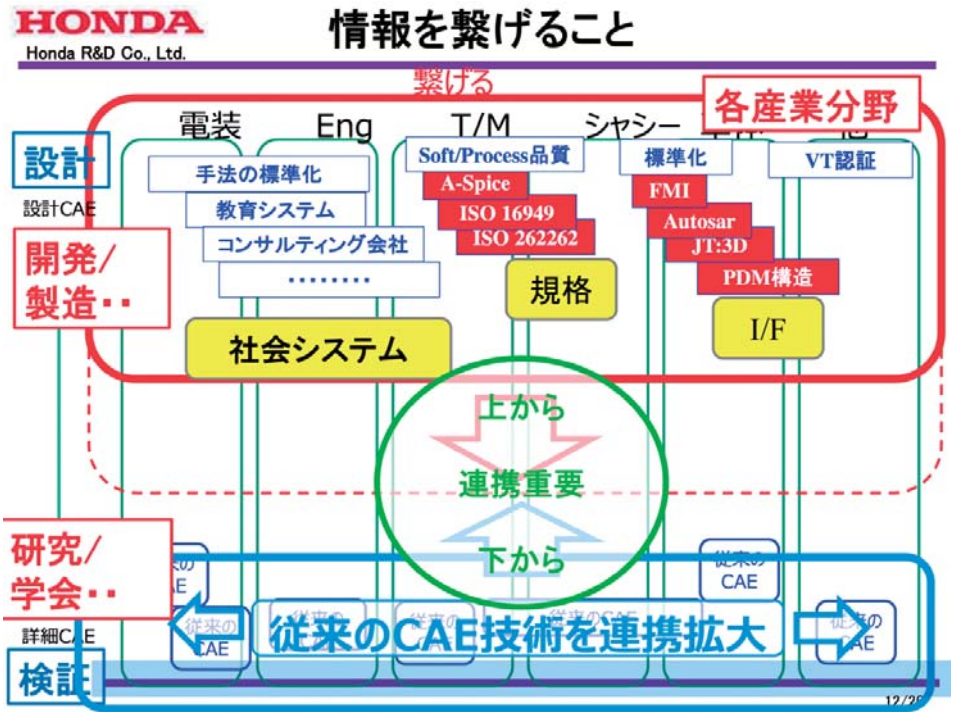


図 3-4-6

こういうことができる理由は、各分野のデータ連携が可能となったからである（図 3-4-7）。今までのCAEは単体で詳細の機能､現象を解析することに注力されていたと思われる。特に、北米の CAE の考え方はその傾向が強かった。データやモデルをつなぐということに関してはあまり検討されてなかった。この､「つなぐ」ために EU のプロジェクトが決めてきた中に、標準化のためのインターフェースがある。FMI（Functional Mockup Interface)、AUTOSAR（車載ソフトウェアの標準仕様)、JT（3D 製品定義データのファイルフォーマット）などだ。PDM（Product Data Management：製品情報管理システム）の構造も推奨の形が決められてきている。また、バーチャルエンジニアリング展開では、どのように検証を進めたかというプロセスが重要になってくるため、プロセス品質に対する規格もできている。

例えば、A-Spice（Automobile Spice）というのがあり、サプライヤーとの契約の時にレベルが 1 から 5 まで品質保証レベルがあり、プロセス品質のランクを契約で結ぶことになる。この規格の品質保証レベルは、多分、バーチャル認証と連携しているものと思える。その品質保証レベルが例えば 4 とか 5 だったらバーチャルテストだけでいいということになると思われる。こういったプロセス品質の関する規格が既に整っている。

そして､手法の標準化の他､大学の講座にも新しい講座が生まれている。また､バーチャルエンジニアリングや Industrie4.0 に関する技術導入をサポートするコンサルティング会社など、新しいビジネスも生まれてきている。

設計から開発・製造のところは自動車産業だけでなく、産業機械や建設機械でも同じである。どこかの会社が作った 3D 図面をそのまま、ある工場に渡せば、その工場で同じものが作れるというところまで標準化・規格化で出来るようになった。一方で、検証用の CAE はこれまで米国中心に進んできたが他分野や、他機能との連携の考え方が欧州に大きく後れを取っている。とは言っても、北米側の動きは、今までの詳細の解析を行える

CAE を横に繋げようと活動し始めている。私の感覚では、設計・開発・製造の産業界の動きが上手く連携し社会システムとして活動している欧州に対し、北米は CAE による検証はその技術的機能を研究・学会・アカデミアを大きく動かして学術サイドでの対応のように思える。何れにせよ、どちらもあまり進んでいない日本としては、両方の良いところを理解し､日本が良いとこ取りを行うことが出来ると理想というのが私のイメージだ。（イメージとして、北米は欧州に対し、ビジネス活用として 10 年遅れており、日本はビジネス活用として 20 年遅れているのが現状と見える。）

さらに、世の中の状況としては製品開発の中のソフトウェアの割合は高い。日本の場合でも、製品開発費に対するソフトウェアの割合は 70% を超える。これは制御設計が増えて来たため多くなったと言えよう。そのため、21 世紀初頭から、制御系の設計が大きく改革されてきた（図 3-4-8）。21 世紀に入ったと同時に運動方程式で制御検討するやり方から 1D モデルに変わった。よく、1DCAE というキーワードを聞くがそれである。制御アルゴリズム検証のため、ハードを使った制御検証（Hils）が行われていた。その後、このハードの代わりに 3D モデルを用いて検証をするようになる。この動作検証の仕方として始まったのが、動きを 3D モデルで表現する MILs（Model In the Loop simulation）、制御アルゴリズムの計算時間から遅れ時間を算出する SILs（Software In the Loop simulation）などである。

また、10 年前の MILs ではガタや剛性を考慮していなかった。しかし、今は簡単に公差解析をやればあちこちのガタがわかり、剛性解析で変形もわかるので、ガタと変形による遅れ時間を考慮できるようになった。MILs は、今までの HILs（Hardware In the Loop simulation）の検証ツールを軽く超えてしまった。さらに、SILs により、電子制御ユニット（ECU）の動作検証をチップ同等の CPU で検証できるようにもなった。これにより HILs は検証ツールではなくなり、単なる確認ツールになった。そして、これらの MILs と SILs を全部合わせると車 1 台のモデルになる。これを VILs（Vehicle In the Loop Simulation）として、これで検証するようになった。即ち、実車は単なる最後の確認ということになる。これが 2010 年以降のバーチャルテストの認証がうまく動き出した欧州の背景である。そして、日本の状況は、我々も含めて今はまだ 21 世紀初頭から 10 年前の間のあたりにいて必死になっている、というのが現実である。

バーチャルエンジニアリングに関わるデジタル技術を考えた時に、日本の現状で不足しているのは活用技術がないことが課題だろう。デジタルの環境運用技術や機能開発技術は世界の平均レベルとしては存在している。しかし、デジタルパフォーマンスを理解した上での戦略と施行がない。世界を調査する機関も、活用を考える機関も、シナリオを発信する機関もない。欧州ではここ 30 年以上、EU 議会が次世代技術の構築の為にリードしていた。この中で各分野の技術を「つなげる」という考え方を構築しないといけない。例えば、自動車であれば衝突の時には人体の影響を見るために人体の内臓モデルというのがあり、それで検討する。そのようなことを考えれば医学会との連携も必要となる。このように、連携をどこまで行うか、それをどうやって決めるか、誰がシナリオを作成するか、それを JST 発のプロジェクトで行えるのか。もし行うことが出来るのであればものすごい機能と効果を生むと思う。

企画・構想設計段階で設計全仕様と製造全要件を検証完遂する社会システム構築を提案したい。そのためには、産業界・アカデミアが強調したデジタル推進のシナリオが要る。

アメリカのデジタルツイン、欧州のビジネスモデルを中心として既に社会システムとして出来上がったやり方の両方の調査を行い、良いところ取りをしてなんとか日本のものにしたい。また、機械工学を例に取ると 4 力（材料力学、熱力学、流体力学、機械力学）と言われる分野の教科書は 60 ～ 70 年変化が無い。CAE 技術等の新しい解析法が活用されている時代に、時代錯誤の教育が続いているのが事実である。機械工学だけでなく、工学系教科書の見直しも含めて、企画・構想設計段階で必要となる講座をもっと生み出していかなければいけない。加えて、医学会など、これまで連携を考えてこなかった分野の技術･情報の連携・活用の推進検討が不可欠、というのが私の提案である。

HONDA
Honda R&D Co., Ltd.

制御系設計の改革

時代の流れ	動作モデル				動作検証					ハード確認	
	ECU関連	形状			ECU	設計検証		ハード検証		モジュール	車1台
		運動方程式プログラム形態	3Dモデル 剛性、ガタ等考慮			モジュール	車1台	モジュール	車1台		
			無	有							
21世紀初頭	簡易疑似CPU	○	—	—	Sils △	—	—	Hils ○	○	—	○
日本の状況											
10年前	疑似CPU	—	○	—	Sils △	Mils △	—	Hils ○	○	—	○
現在：VE時代	チップ同等CPU	—	—	○	Sils ○	Mils ○	Vils ○	—	—	Hils ○	○

14/20

図 3-4-7

【質疑応答】

質問：マツダの技術分野の方の講演を伺った時には、マツダでは新車開発は既存のエンジンで使うとあとは商品開発としては本当にモデルベースだけでやってしまう。一方で、そこには人員はかけず、新しい燃焼技術などエンジン開発の方に人員をかけるといったように、かなりはっきり分けているようであった。今日の話の欧米の方向というのは、ある既存技術の組み合わせの中での話であって、さらにそれを一歩踏み出すようなものは、現象解明の方から入っていくというのも並行して行う必要があると思う。そのあたりの考えを聞きたい。

回答：現象解明をやらなければいけない部分はまさにここの上と下をつなげるところ（図 3-4-7 の緑の丸のあたり）であろう。既存のものをどんどんやっていくのは（図 3-4-7 の）上のところで、この中がどんどん下がってゆく。こういうことが可能となってきている。マツダさんのやり方は非常に進んでいる。日本の中ではトップクラスで進んでいるが、日本の中の影響があるためと推察されるが、データの標準化がされていないなど、欧州のようにはまだできていない。それが日本の実情。現象解明のところはやらないといけないが、そこをやるところまで来ていないというのが現実である。

質問：今日の話は設計・製造のところであったが、車だとユーザーによる保守なども設計の初期や構想の段階で検証するのだと思う。これはどの辺りまで進んでいるのか？

回答：この場（図 3-4-1）の中にユーザーの意見を入れるようにする。デジタルなので、どこからでも入れられる。例えば、我が社には世界中に 25 拠点あるが、そこに部品を一遍に一瞬に送るということを考えると実物ではほとんど不可能だが、データは瞬間的にできる。また、この逆もできる。要するに、いまの時代お客様の要求、要望、欲求をそのままここに入れようと思えばできる、というデジタル社会になっている。したがって、考えていないのではなく、日本では考えるだけの理解とそれを活用する環境の活用シナリオがまだないだけであり、いくらでも考えられる。

質問：学会を連携させるのは、非常に素晴らしい思想なのだが、何がそれを邪魔していると思うか？

回答：本音で話していないので、利害を正確にお互いが理解していないため、この程度でいいではないかとなっていることだと思う。そのため、コアの技術構築が難しいのではないかと考える。

3.5 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）

工作機械は、これまで構造解析・流体解析・熱解析など、いろいろなことを今までやってきているが、その統合解析や連成はほとんどうまくいっていない。加工する前に、うまく削れるかというようなことが大体分かっているかというと、ほとんど分かっていない。しかし、経験を踏まえつつシミュレーション解析を入れて、分かるようになりつつある、というのが現状である。

実は、工作機械におけるデジタルツインには工場全体をシミュレートする形のデジタルツインと、切削のメカニズムを扱うような機械 1 台のデジタルツインの 2 種類ある。前者の工場全体のデジタルツインについては、Industrie4.0 の流れであり、工場全体のスマート化によるスマートなものづくりがテーマ。

ドイツが国策として仕掛けた Industrie4.0 の流れは、労働生産性のこれからのあり方が重要である。ドイツはこれまで労働生産性が世界一でやってきていたが、人口構成は老齢化が始まっており今のままでは立ち行かなくなるとの認識から、次の生産性に立ち向かうために Industrie4.0 をやっている。このような状況は日本も同じである。実は、日本では、毎日労働者人口が二千数百人減っている。今日も明日も工作機械メーカーが 1 つなくなる、というぐらい労働者人口が減ってきている。1 週間で 15,000 人なので、非常に大事な日本のトップ企業のようなところがなくなってきていて、状況が変わってきている。

デジタルツインとは厳密には異なるが、オークマではサイバーフィジカルシステムを 2000 年ごろに描いていた（図 3-5-1）。お客様の要求を受けて設計または物を作るが、これをデジタルエンジニアリングとしてデジタルな領域で物を作るようにする。また、設計情報から最短で切り子を作る仕組み、パートナーから素材が入ってきたら最短で物を削って出荷するためのサプライチェーンマネジメント、などである。

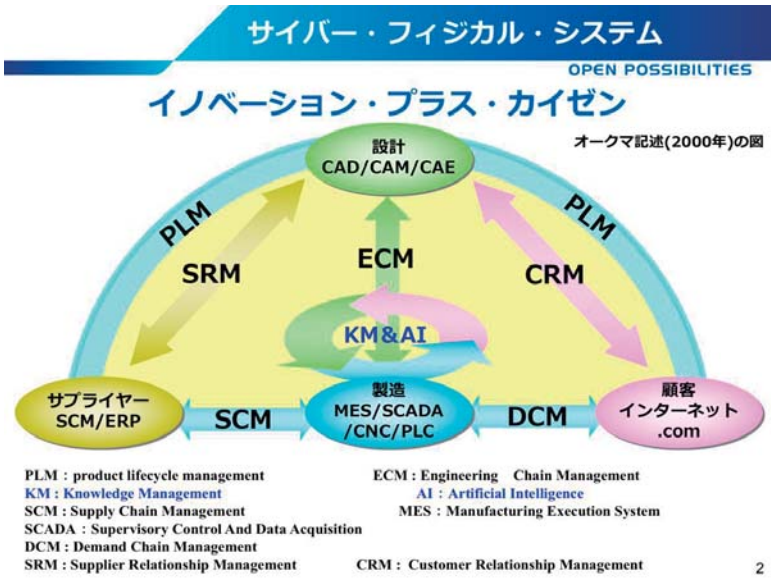


図 3-5-1

サイバーフィジカルシステムは我々にとっては工場の内外の機械や設備機器と、サービスや基幹システムとをつなぐということである。つなげばそれで上手くいくかというと、全然上手くいかないことが多い。我々が ERP（Enterprise Resource Planning）を使ったり、工作機械を使うお客様が ERP を使ったりしても、そう上手くいかないことが非常に多い。そのような状況の中で、何が必要なのかということを考え、鍵となってくるのは、ナレッジマネジメントや AI ではないかと思い、サプライチェーンマネジメントにおける AI の活用、最適化スケジューリングなどに取り組んでいる。

サイバーフィジカルシステムは、ドイツではサッカーにも使われている。SAP 社がドイツのサッカーチームの支援をしていて、選手にセンサーを付けて 90 分間を解析している。どんなに優れた監督やコーチでも、ある 1 点を見ている時には、他の 21 人は見られない。その意味で、サイバーフィジカルシステムにより同時に起こるものを全て解析し、全体最適を行えるのが大事である。全体最適の結果が顕著に現れたのは 3 年前の W 杯でのドイツ対ブラジルの試合で、ドイツの選手の動きを全部分析して、ブラジルを後半 90 分まで 7 対 0 と勝利に導いたとされる。この分析は、AI で物流システムを最適化するのと同じようなことを行った。

もう 1 種類のデジタルツインである、工作機械がちゃんと削れるかどうかというような話は、実はこの例ではサッカー選手がちゃんと判断できるかというようなことに相当している。機械の加工のメカニズムをしっかりすることと、物流全体をしっかりさせることは、2 つに分けて考えるべきだろう。このように、我々とってデジタルツインのテーマは 2 つあるが、今日は機械をしっかりと削れるようにする、という部分にフォーカスして話をしたい。

工場全体としてはマスカスタマイゼーションがテーマである（図 3-5-2）。これまで、日本やドイツは大量生産で徹底的に量産指向の効率を上げてきた。これに対し、一品のものや飛び込みで入ってきたものも、できる限り量産に近い性能で仕上げていきたいというのが、マスカスタマイゼーションである。この中で、工作機械 1 台 1 台におけるデジタルツインは、我々にとっては、規定通りの加工やお客様の所望の加工をするための技術と捉えることができる。

工作機械には、Numerical Control（NC：数値制御）のコンピュータとサーボという制御装置がある。また、機械構造には温度特性・振動特性のほか、摺動特性やトライボロジーの部分などもある。さらに、加工プロセスがあり、最終的な製品の精度を、制御モデルと構造体モデルについて温度や振動のシステム同定をしながらモデルを作り、切削のメカニズムをサイバー上に再現することに取り組んでいる。

我々が今やり始めているのは、温度特性がどうなるかである。温度特性によって精度がどうなるか、また、ニードルの条件によって切削がどうなるか、というようなことをそれぞれの部分ごとにモデル化してアプローチしている。しかし、全体としてどういう精度になるか、どういう面精度・面品位になって削れるのか、削れないのかといったと言ったものをトータルで見るようなことは、まだ全然できていない。一部分でのデジタルツインというのが現状である。

取り組みの例として衝突防止機能を挙げる（図 3-5-3）。工作機械は、ある意味でぶつかるのは当たり前で、刃物と被削材を接触して削るので、やり方を間違えるとぶつかってしまう。コンピュータの中に 3 次元データを使ったシミュレーションモデルを作っておき、

実際の NC 装置を動かす前に常にバーチャル側も動かすようにすることで、衝突を防止する。リアルにあるものと完全に同じモデルを用意して、ぶつかることをバーチャル側で検知したらリアルを止める、という仕組みである。この仕組みは、プログラムで動かすときも、マニュアル運転の時も効いており、自動で止めるようになっている。この仕組みの導入により、お客様の被害は随分減ってきた。これは 2002 年から工作機械に投入するようになったが､それ以前ではとても 2 つの制御を 1 つの NC 装置でやる気にはならなかった。

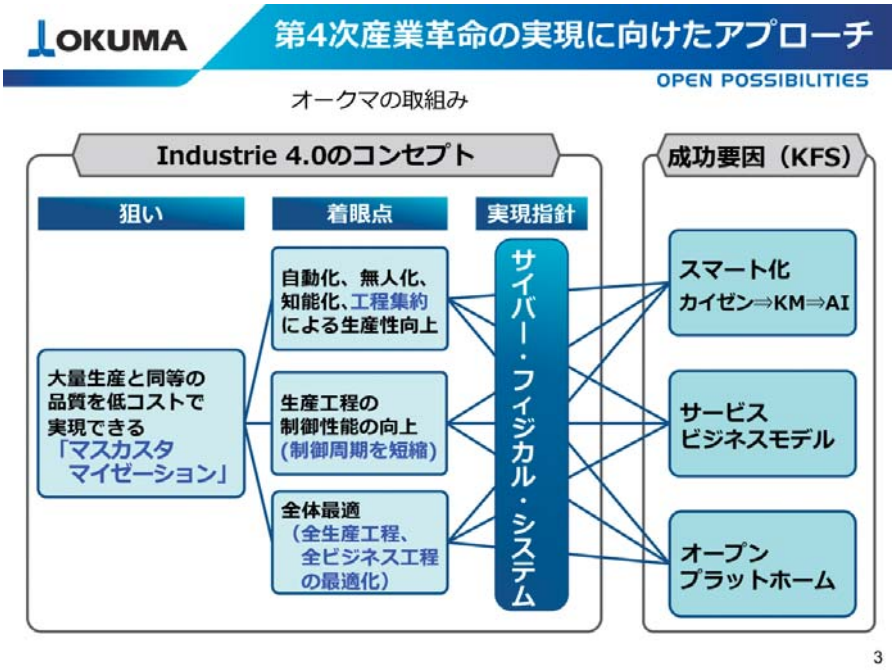


図 3-5-2

図 3-5-3

もう一つの例は、温度センシングをしながら保守をするという取り組みである。これも2000年代初頭から取り組み始めた技術である。室温が変わると中心誤差が変わったり、たわみが出たりするが、装置の中に熱変位モデルを持っておき、熱変位の予測に基づいてXYZの三次元空間における補正が可能となる。これにより、お客様側で機器を使用する室温が変わっても、中心点の温度変化がないと言ったようなことができるようになった。

また、振動についても、再生びびりの抑制も行なっている。例えば、エンドミルのような幾つかの刃がついたもので鉄を削ると、断続切削現象によるびびりが生じる。実は、これはある系の動的特性と入力エネルギーから、ある回転数においてどこが安定になるかを予測することができる。そういったものを遠心する装置の中で出力するようにしている。このNC装置が出す振動モデルを見て、今は安定のところで削れているのだとか、不安定なところで削っているからもう少し良い条件のところへ持っていくといい、というようなアドバイスを出すようにしている。これはシミュレーションではなく、実際の加工の中で動作するシステムとして提供している。

この中で、ある機械をある条件で使って削るとうまく削れて精度も出る、ということを削る前に予測したいわけだが、今は全くできていない。今できているのは、NCプログラムにいろいろなデータを入れるとスムーズに削れるなどの3次元データは見られる。しかし、この時にびびるかもしれないとか、変位がこういうふうに起こるかもしれないなどは、ここには入っていない。実際にアクションが始まった時には、そのモデルデータで補償するようなことを行なっているだけである。その意味で、連成がまだできていないという状況である。

削る前に大体のことをシミュレーションして、その予測を元に実際に生産するというデジタルツインをやりたいわけだが、切削性能においては、静剛性は大体わかるが動剛性の減衰性やトライボロジーなどによる劣化予測は大きな課題である。機械損傷モデルに基づく異常の予知は、ディープラーニングなどを活用して部分的にはできるようになってきている。

減衰は非常に難しい問題。全体をモデル化する中で、接触面などを部分的に完全剛体と連結モデルというように分けて解析し、接触問題をシミュレートしている。また、制御系モデルについても、非線形特性をモデル化しながら制御する仕組みを考えている。トータルとして、制御系モデル、構造体モデル、切削モデルなどの連成が行いたいが、まだまだ未解明の領域が多い。今回の提案にあるような各テーマに合わせて、最後にそれを連結して連成モデルを作るという部分は、我々にとって非常に重要なことだと考える。オークマと日本工作機械工業会と大学とで連携し、加工システム研究開発機構というのをやっているが、今回のようなテーマも、ぜひやりたいなと思う。また、名古屋大学に寄付講座を作り名古屋工業大とともに共同研究を進めており、切削に関する研究を大学の中で継続できるような取り組みもさらに進めていきたいと考えている。

【質疑応答】

質問：サイバーフィジカルシステムの中でのナレッジマネジメントの部分。今、ある程度の部分はこれまでに分かった知識でマネジメントできると思うが、工作機械の場合だと暗黙知やスキルのような部分がかなり多く含まれていると思う。その辺りは、サイバーフィジカルシステムの中でどのように組み込まれていくのか。

回答：今、その点を一番悩んでいる。例えば、今までは熟練の技でやってきたことをどうやって伝えるか。そこで形式知化してしまうと大事な情報が次々と落ちてしまう。職場に熟練の名人がいるうちはマニュアルを作ってもすぐに伝わる。それは実は眼に映るもの全てを毎日見ながらやっているので、マニュアルを読んでいるか読んでいないかわからないうちに、若い人に伝わっていた。しかし、そういう人がいなくなると毎年、伝わっているものの形が変わってしまう。我々がトライしようと思っているのは、すべての情報をどうやって伝えるか、伝えるためにAIをどう使っていくか、ということである。ナレッジマネジメントとAI、冒頭のサッカーの例でいうとグラウンド上のすべての情報を学習する方法をトライしている。これが正しいかどうかわからないが。

質問：デジタルツインというと、因果関係のはっきりしたモデルを使って計算していくということだが、それだけでは解決できない問題がたくさんあるので、相関の強さだけで決めても良いのではないかというのが現実としてはある。実際に、企業の設計では、現象解明が全部できて初めて物を作ることはしていない。ある程度分かったところで作る、あるいは、わからないところは実験するなど、今までの経験ベースを積み上げて物を作る。したがって、究極的にはすべての因果関係がわかるかもしれないがそれにはかなり時間がかかるので、そこに統計モデルなり、あるいはAIのようなものをどう入れていくかというのがデジタルツインの１つの課題だろうと思うが、そうか。

回答：そうだと思う。それが非常に重要なテーマだと言える。

4. アカデミアのデジタルツインへの取り組みと今後の技術シーズ展望

4.1 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）

CRDS から話を聞いたときに、学あるいは学会との連携、あるいはその役割というのが非常に強調されていた。これはまさに私たち日本燃焼学会がいま進めている産学連携事業「燃焼解析プラットフォーム開発」と非常に親和性が高いと感じた。そのため今日はこれを中心にお話させていただく。

デジタルツインというのは解析技術の集合体であり、目指すものはコンピュータ上にバーチャルなそれを実現するというものである。燃焼という現象はデジタルツインを構成する上でのボトルネックになるくらい複雑な連成問題と考えることができる。とにかく連成する現象が多い（図 4-1-1）。

例えば現象空間で考えると火炎の伝播、着火、液体燃料の蒸発、界面の問題がある。流動すなわち流体力学や、場合によってはススが生成された際の凝縮、あるいは電子が特に役割を果たすプラズマも関わってくる。

条件空間では温度や圧力が高く、燃料種は混合のバイオ燃料などを含めて非常に多様なものを扱わなければならない。乱流や滞在時間、組成といった問題もあるが一番厳しいのは反応のところであり、これを素反応から追いかけていくと、例えばガソリンエンジンだと数百の化学種に対して数千の素反応を解かないと原理的には正確な答えは出ない。しかし現在のところ、一次元モデルならいいが、デジタルツインに適用できるような三次元モデルの展開は不可能。さらに蒸発その他の連成が入ってくると、相当な計算時間や技術が必要になってくる。そこで、我々は学のシーズと産のニーズがしっかりと手を結んでやる必要があるという認識のもとに、このプロジェクトをスタートした。

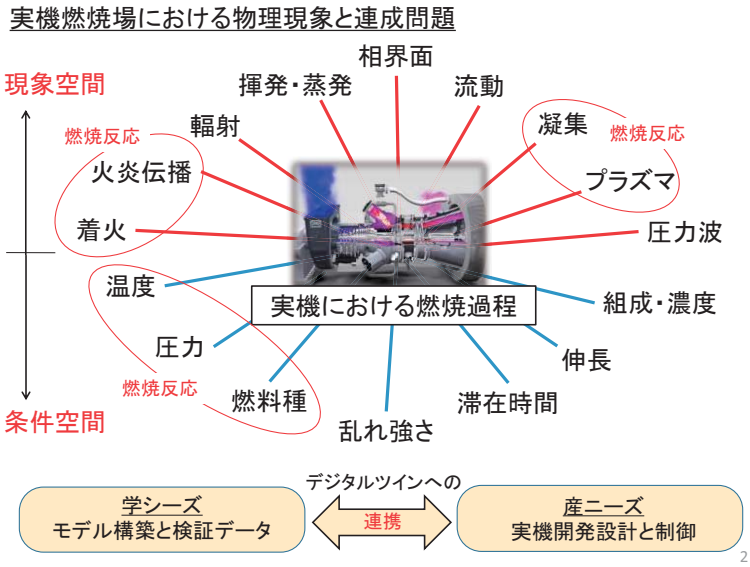


図 4-1-1

デジタルツインというものを現象ベースのデジタルツインから積み上げていくと、おそらく最終目標は社会やプロセスのデジタルツインである。製造工場から出荷製品のサプライチェーンまで含めて、社会構造としてのいわゆる双子のようなシミュレーション空間を構築して、社会システムの制御と管理を容易にする。これが日本経済あるいは日本の産業技術を将来にわたって支えるものになっていくと思う（図 4-1-2）。

しかし、その一つ下のレベルには、例えば IoT によって稼働中の装置や製品のデータをリアルタイムに収集する、これはビッグデータになるが、これを収集して企業が装置や製品を開発したり、モデルを統合して製品や装置や資産の状態、いわゆるバリュー、を最適化することがある。これを構築していくためには、現象ベースのデジタルツインが少なくとも燃焼では必要である。そこでは装置内で生じる連成現象をモデル化して、そもそも解析を構造化しなければならない。そしてシミュレーション空間で双子のように再現する。これができないとおそらくガスタービンのデジタルツインは難しい。

燃焼が関わるデジタルツインの特徴は、まず流体・伝熱・化学反応の連成モデルでは特にダイナミックレンジが大きい。例えば化学反応はピコセコンドからミリセコンドまでの幅だが、流体力学的な特性時間というのはミリセコンドとか、場合によってはセコンドのオーダー。そこに 10 億倍、1,000、100 万、10 億倍のスケールの幅がある。これをいかにモデルとして縮めていくかということが重要だ。

そもそも連成問題というのは一つの現象が理解できてもそれが現実には適用できないということ。つまり、その現象をしっかりと理解できて初めてモデル化が見えてくる。また詳細モデルは計算負荷が非常に大きいので、実際の現実世界を再現できるような簡易なモデルの構築も不可欠である。こういったことを総合していくと、燃焼というのはエネルギーにおけるデジタルツインを構築するためのボトルネックになっていると言える。

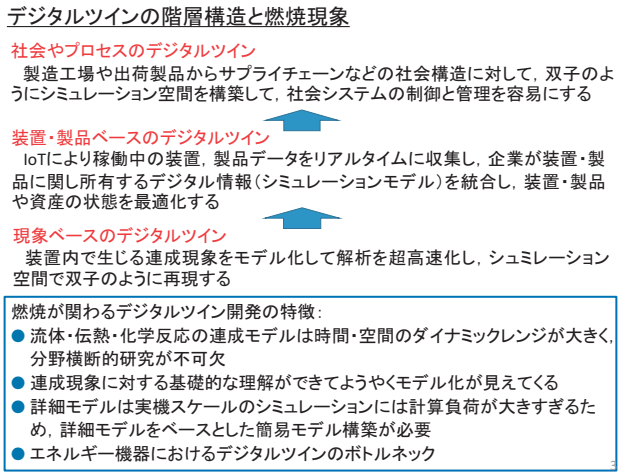


図 4-1-2

産学連携研究プロジェクトは、日本燃焼学会の研究分科会においてニーズ・シーズマッチングを 2008 年ごろから 4 年ほどかけて行なってきた中から出てきたもの（図 4-1-3）。当時の小豆畑会長の強い想いがここに生きている。実際には私が会長だった 2016 年から 2 年間ということで開始した。現在の計画では今年度に終了するプロジェクト終了後は各参加企業内で使用可能なサブルーチンとして個別共同研究で提供していくというシナリオ

だ。現在、9 大学、13 企業、1 団体がメンバーとして加入している。課題選定は、非競争領域で複数の企業が共通に知りたいテーマ、個々の企業で研究するには投資に対して非常にリスクが大きいテーマ、それから成果が各企業の製品や事業に直結して展開できるテーマを選んでいる。

日本燃焼学会は 60 年の歴史を有しており、産学の協力がすでに非常に密である。34 名の理事のうち半数が企業人である。会員数は約 1,000 名強だがこのくらいの規模の学会というのは会員がどういったところに強みを持っているか、研究活動しているかが把握しやすい。また国際燃焼学会の日本支部であり国際協力なども非常に容易にできる。

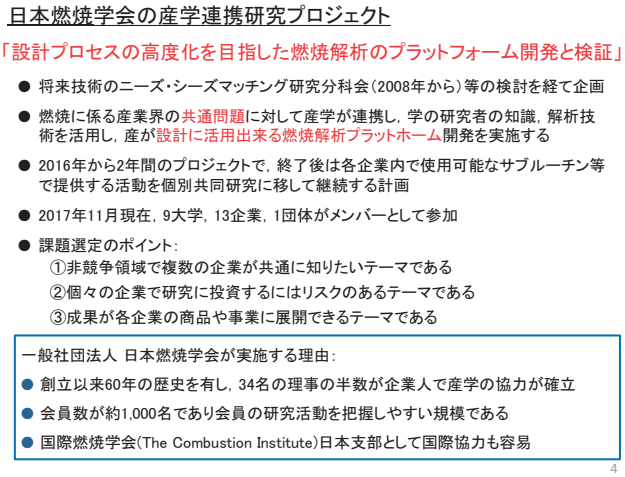


図 4-1-3

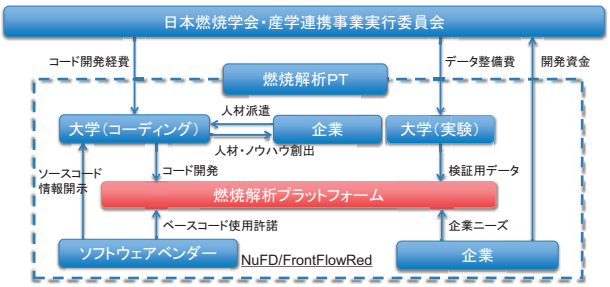
プロジェクトは学会の実行委員会が大学と企業を統括している（図 4-1-4）。いわゆる 3D モデルを構築してコーディングする大学と実験検証データを提供する大学があり、そこに企業が入ってくる。燃焼学会の会員としての企業だけではなく、この趣旨に賛同していただいた企業の方々もここに出資して入っていただく。具体的には年間の参加費は 100 万円。2 年間のプロジェクトなので 200 万円。これは何かを開発する上では決して高い額ではないが、9 大学に対して活動していただくためにはそのくらいの予算は最低限必要であるというところからきている。

学会がやるのは数理モデルをコーディングし、選定した現象に対してそれを適用するということである。そのためにはまず基本となるベースコードが必要。そのベースコードは東京大学生産技術研究所の小林敏雄先生が中心になって国プロで開発した FrontFlowRed を利用している。このベースコードと企業のニーズと大学のシーズを合わせて、プラットフォームを開発するというスキームになっている。

燃焼解析プラットフォームは、企業ニーズに基づいてプロジェクトチームにおいて開発方針を策定する（図 4-1-5）。プロジェクトチームには企業と大学の会員が入っている。もしくは学会の会員が入っている。産業界のニーズの高い対象に絞り込み、実用性の高い燃焼解析モデルを開発する。それから、企業からの資金によってコーディング担当の大学は燃焼解析プラットフォームを開発する。これは要するにサブルーチン群を FrontFlowRed に組み込むことが可能になる数理モデルなどをコーディングしていくということ。実験担当の大学は高精度な検証データを提供する。

海外の公開データを利用する場合もある。開発したモデルが海外の既存のモデルに比べていかに優れているかを示すためには、共通のデータが必要になるためである。こういうデータが世界に幾つかあり、本プロジェクトで作ったプラットフォームが優れている、あるいはモデルが優れていることを示す必要がある。

燃焼解析プラットフォーム開発体制とプロジェクトチームメンバー



- プロジェクトチームメンバー 9大学，13社，1団体

大阪大学，鹿児島大学，京都大学，九州大学，東京大学，東京工業大学，徳島大学，名古屋大学，北海道大学，IHI，大阪ｶﾞｽ，川崎重工業，神戸製鋼所，JFEｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ，JFEｽﾁｰﾙ，新日鐵住金，東京ｶﾞｽ，日立製作所，日立造船，三浦工業，三菱重工業，三菱日立ﾊﾟﾜｰｼｽﾃﾑｽﾞ，電力中央研究所

5

図 4-1-4

企業にとっては計算のコスト低減と、コードを知っていることによる解析コードの高いカスタマイズ性の確保が可能になる。モデル選定の際に参考となる精密なデータも最終的に提供される。ソフトウエアベンダーはコードの仕様、つまり FrontFlowRed のソースコードの情報開示を実施する。また GUI も作る。

人材育成という面では、企業は大学へ人材を派遣し、開発過程から商用コードに準じたような保守サービスが可能で、かつ燃焼の原理も理解できるような人材の育成を共同で行う。将来的には、このような完成されたプラットフォームは産学連携の基礎となるという可能性も秘めている。こういうのを我々は目指している。

燃焼解析プラットフォーム開発の方針と効果

- 企業ニーズに基づき，プロジェクトチームにおいて開発方針を策定
- 産業界のニーズの高い対象に絞り込み，実用性の高い燃焼解析モデルを開発
- 企業からの開発資金により，大学（コーディング担当）が燃焼解析プラットフォームを開発
- 大学（実験担当）は，高精度な検証用データを提供．海外の公開データ利用もある
- 企業における大規模並列計算のコスト低減と解析コードの高いカスタマイズ性が目標
- モデル選定の際に参考となる精密な検証データおよび検証結果を提供
- ソフトウェアベンダーはベースコード使用許諾とソースコード情報開示を実施
- ユーザーフレンドリなインターフェースGUIも開発可能
- 企業は大学へ人材を派遣し，コード開発過程において商用コードに準じた保守・サポートや燃焼解析分野に関わる人材の育成が可能
- 将来のさらなる産学連携研究の礎となるプラットフォームとなる

6

図 4-1-5

スケジュールは、2015 年に準備フェーズがあり、2016 年にガス燃焼モデル等の開発が概ね完了し、2017 年は液体燃焼／固体燃焼モデルの開発に進んでいる（図 4-1-6）。これらは学会の中で紹介し、ホームページ等でも公開しながら、新しい会員を募りながら進んでいる。来年度は、モデルの開発が終わるため、企業内でこのコードを使っていただいて、さらにコーディングをした大学あるいは検証データを提供した大学と、直接、個別共同研究を行っていただいて、それぞれの企業で使われているシステムの中にこれを組み込むという、そういう特別研究を行うという考え方である。

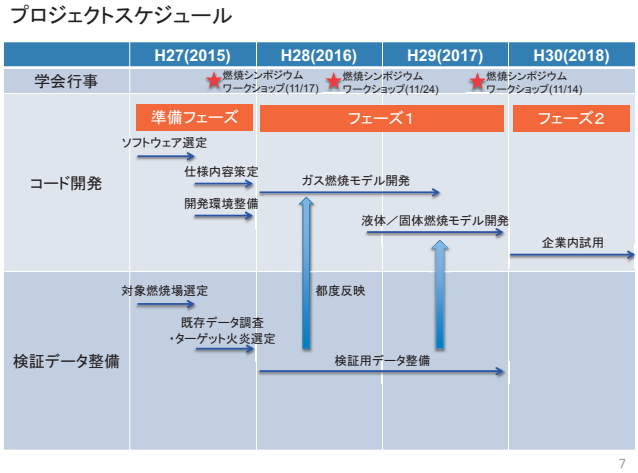


図 4-1-6

対象燃焼場としては、ガス燃焼、予混合燃焼と拡散燃焼、ガス燃焼、それから、液体燃焼、噴霧燃焼、固体燃焼、こういったものに対してターゲット火炎として非常に精緻な計測がされている国内のデータ、場合によっては国際的な標準データとして使われている Sandia のデータあるいは国内のデータを利用して、検証データとしてプラットフォーム等の対応をとっていくということをやっている（図 4-1-7）。プロジェクトチームでピックアップした評価対象モデルには、プロジェクトチームに参加している大学の研究者が独自に開発したものや改良を加えたもの､高速化を含めたり改良を加えたものが入っている。それぞれについて開発項目が明記されている。

例えばガス燃焼の拡散燃焼については、例えば GRI というよく使われる化学物質を利用した場合、メタンでは 50 程度の化学式であるのに対して 325 の反応式が必要になる。これを解くには非常に計算時間がかかるので、progress-variable 法が使われる。これは化学反応を解かずに一旦 flamelet ライブラリーを作りそこから参照して結果を求めるという高速化技術。こういったものを使って、例えば Sandia の標準火炎データベースに対して開発されたコードによる計算結果の温度分布や混合分布、つまり濃度の分布がより高い精度を持っているということを示し、参加している企業の方に提供する。図 4-1-8 も液滴燃焼だが、噴霧燃焼に対して、混合燃料によってもこれが利用できる蒸発モデルを用いて解析が実際に行えるということを示したもの。こういったところに､燃焼学会のメンバーが実施した論文の成果が生かされている。

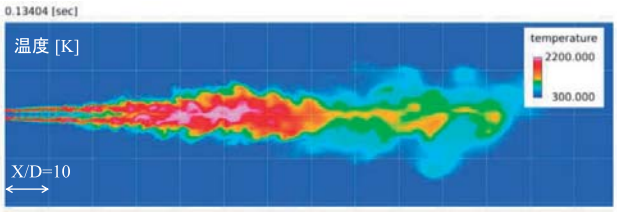
対象燃焼場と開発項目の概要

対象燃焼場	ターゲット火炎	評価対象モデル	備考
ガス燃焼／予混合燃焼	・東工大噴流バーナ ・東工大旋回流バーナ	FDSGSモデル	フラクタル次元解析に基づく高精度モデル LES用
		モード選択的燃焼モデル	乱流燃焼ダイヤグラム上の各燃焼モードに対して，選択的に対応する燃焼モデルを用いるモデル（RANS/LES両用）
		G方程式ベースST/SLモデル	既存のG方程式ベースST/SLモデル RANS/LES両用
ガス燃焼／拡散燃焼	・Sandia Flame D ・JHCバーナ	Classical flamelet	最も一般的なPetersの非予混合flameletモデル（RANS/LES両用）
		Extended flamelet/progress-variableモデル（E-FPV法）	不安定な燃焼状態や，輻射，相変化による熱移動等を考慮可能な拡張版非予混合flameletモデル（RANS/LES両用）
		多成分仮定PDF法	3流体混合問題にも適用可能な高精度モデル（RANS/LES両用）
液体燃焼／噴霧燃焼	・シドニー大噴流バーナ	Langmuir-Knudsenモデル + E-FPV法 + NOx生成モデル (Eulerian-Lagrangian)	小粒径，高温条件において高精度な非平衡Langmuir-Knudsen型式蒸発モデルとE-FPVのカップリング，Flameletモデル用NOx生成モデル（RANS/LES両用）
	・北大液滴蒸発装置 ・阪大対向流バーナ ・1/2スケールエンジン燃焼器	**多成分蒸発モデル** (Eulerian-Lagrangian)	粒子内部の温度・濃度分布を考慮することで多成分系燃料の蒸発曲線を再現可能な蒸発モデル（RANS/LES両用）
固体燃焼／微粉炭燃焼	・電中研噴流バーナ ・ケンブリッジ大旋回流バーナ	Postulate substance/single first-order reaction + Homogeneous reaction + Scale similarity filtered reaction rate model (PS/SFOR + HR + SSFRRM) + NOx (Eulerian-Lagrangian)	単一一次反応熱分解モデル，固気全域反応モデル，および直接クロージャ型気相総括反応モデルのカップリング，総括反応ベース fuel/thermal NOx生成モデル（LES用）

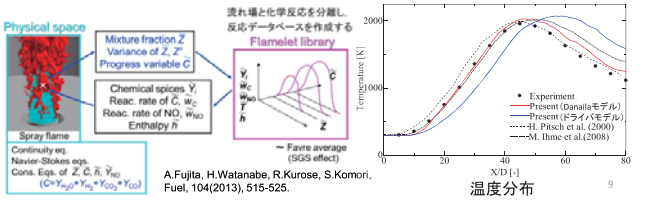
8

図 4-1-7

研究開発の例：ガス燃焼/拡散燃焼　　京都大学



拡張Flamelet/Progress-Variable法の検証　　※検証データ：Sandia Flame



A.Fujita, H.Watanabe, R.Kurose, S.Komori, Fuel, 104(2013), 515-525.

温度分布

9

図 4-1-8

最後に以下のことを申し上げたい（図 4-1-9）。燃焼解析というのは、エネルギー機器におけるデジタルツイン構築の、多分、ボトルネックである。また、対象となる機器や対象燃焼場の選択時点から産学のニーズとシーズを十分にマッチングさせないと、絵に描いた餅になりなかなか進まない。学会の役割は、学のシーズを俯瞰的に捉えられること。信頼性の高い 3D モデルや検証データを提供することができる人が誰かを知っている。知のデータベースとしての役割を果たすことができる。

まとめ

- 燃焼解析はエネルギー機器におけるデジタルツイン構築のボトルネックである
- 対象機器と対象燃焼場の選択時点から産学のニーズとシーズをマッチングさせる必要がある
- 学会は学のシーズを俯瞰的に捉え信頼性の高い数理モデルや検証データを提供する「知のデータベース」の役割を果たすことができる
- ここでは日本燃焼学会が実施しているプロジェクト「燃焼解析プラットホーム開発」を紹介した

10

図 4-1-9

【質疑応答】

質問：海外と伍していくためにはある程度のマスが必要で、企業の数も大学の数も、先生の数も企業の技術者の数もある程度、クリティカルマスを超えるような数がいないと勝てないと思うがどうか。

回答：この会員数でここまでできる、あるいはこのくらいだとこういうことができるということの一つの例と思う。国の一つのプロジェクトとして､あるいは世界と伍していくとなると、こういったグループが幾つか集まって協力するという体制をつくるのが大事ではないか。

質問：参加メンバーなどは公開すべきではないか。欧州のホライズン 2020 では、結果は終わるまで言わないが、やる内容は公開し、こうだから参加しないかという形をとっている。参加している会社や団体の名前は、入った時点で公表になる。そのため、どこまでやらなければいけないか、あるいは途中から入ろうとすると今からでは入れない又は入ったら何を持ってくるんだと相手は言ってくるような厳しさがある。公表しない場合はこういう厳しさがなくなるのではないか。

回答：参加費をいただいている中で、どこまでそれを公開するかという判断が必要。こういうことを我々はしたいが入りませんかという営業活動をしながらの判断となっている。

コメント：その営業活動を欧州は非常にうまくやっていると思う。

コメント：ヨーロッパ、アメリカは国がきちんと関与している印象がある。そのベースで企業も大学もきちっと集まってやっている。だから、国の関与が非常に大きいと思う。

コメント：確かに一つは国かもしれない。あそこは EU 議会だが。それに対して日本の企業も入ろうと思えば入ることができる。世界中の企業が入っている。それは何をやるかを公開しているからだと思う。

質問：なぜこのような取り組みが燃焼学会ではできたのか。

回答：燃焼学会は理事の半分が企業である。学会によっては 100％学というところもある。こういったところではなかなか企業とのやりとりが難しいところがある。燃焼学会も最初は学だけだったがこの 20 年ぐらいで大きく変わっていった。企業の方たちと非常に密接な関係を持ち、こういうことを始めたいというスタートができた。そういう学会を選ぶか、あるいは学会がそういうふうに変わっていかなければいけないという一つのある意味で示唆かもしれない。

4.2　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）

本日は、流体と伝熱と燃焼あるいは化学反応に関連するモデルについて、現在どういったところでデジタルツイン的なことに取り組まれているかを紹介する。その前に、私は工学院の教授であるとともに、文部科学省の博士課程リーディング大学院プログラムに採択されている環境エネルギー協創教育院の副教育院長も担当している。このプログラムは環境エネルギー分野で博士の学位取得者を社会に輩出して、彼らにどうやって活躍してもらうかという教育プログラムである。これを 7 年ほどやっており、今年が最終年度だが、先ほど話題に上がった人材育成とも関係している。また、工学院という教育組織の副学院長補佐も担当しており、先ほど小豆畑様の話にもあったが、この業務も研究担当として、どれだけ、そのようにして企業から研究資金を大学に導入するのかを考える立場にある。

さらにもう一つ、日本機械学会が運営している計算力学技術者認定試験の熱流体分野の主査も担当しており、解析分野の技術者の底上げあるいは技術者のレベル担保、あるいは地位の担保、それも含めてどういう基準で、どういった認定をしていくかというのにも、関わっている。

ただし、今日はそういう話題ではなく、SIP の革新的燃焼技術の中のエンジン 3 次元燃焼シミュレーションコード（HINOCA）の開発について話題提供する（図 4-2-1）。SIP が立ち上がるときから、最後の出口、あるいは成果としては HINOCA のような解析ソフトウェアしかないという思いで、協力している。ただし、燃焼の中でもエンジンを専門としている研究者とそうでない研究者がおり、必ずしも燃焼イコール車のエンジンの燃焼をやっている研究者だけではなく､私自身も自動車エンジンは専門ではない。しかしながら、立ち上げ時から協力しているのは、多分、SIP 自身が熱効率 50％を目指したため、基礎的な研究から変えていかないと、それが成しえないというのが最初からわかっていたのだと思われる。そういう意味で、私は基礎研究をやってきた研究者だが、SIP に参加している。本プロジェクトの良いところは、非競争領域を自動車会社がきちんと設定し、大学が協力してエンジン開発をする点にある。当初、熱効率 50％達成に向けてプロジェクトが進められていたが、プログラムが始まって 2-3 年後ぐらいに出口として解析ソフトが重要と方向が少々変更になった。また、このプログラムでは、現在、現象解明、物理現象に基づいた物理数学モデルの開発から、解析用のプラットフォームの開発、最終的にエンジンの開発につなぐシステムができ上がりつつある。

さらに、本日は、日本燃焼学会の産学連携事業について、私の目から見た新しい点を紹介するとともに、日本伝熱学会で進められている取り組みも紹介する。

SIP の革新的燃焼技術の HINOCA の開発では、エンジンの素課程から分けて、熱効率 50％達成には何が良いか検討されている。ただし、こういうアプローチを描くのはエンジン屋さんで、モデル作りをする我々は、物理現象の複雑さから見直さないと、新しいエンジンはできないと考えている。そういう観点からエンジンを捉え、流動、点火、伝播、冷却損失には、流体、伝熱現象、燃焼現象、さらにプラズマとか、非常に難しい物理現象が入ってくる。これらを順番にモデリングしていかないと、本当にデジタルツインに向けた解析ソフトは構築できないと考えられる（図 4-2-2）。

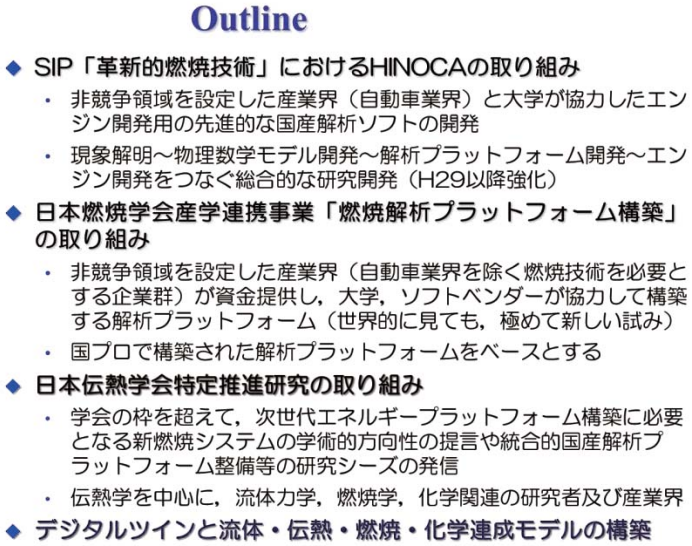


図 4-2-1

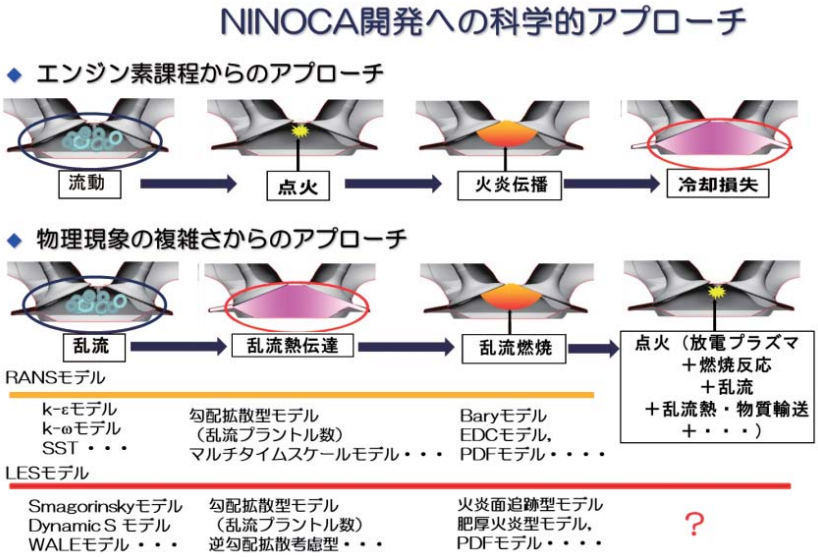


図 4-2-2

乱流現象一つにしても、純粋乱流の研究をやっている研究者は、こういうプログラムにはなかなか参加できない現状がある。しかし、そういった点を見直し、エンジン内の流動現象を全体的に見直し､デジタルツインを実現するソフトウェアのモデリングをもう一回、やり直すことから始めている。それから、伝熱についても、自動車会社が通常使っているソフトは､従来の伝熱研究や乱流研究で構築されたモデルを単に組み上げたものである(図4-2-3)。

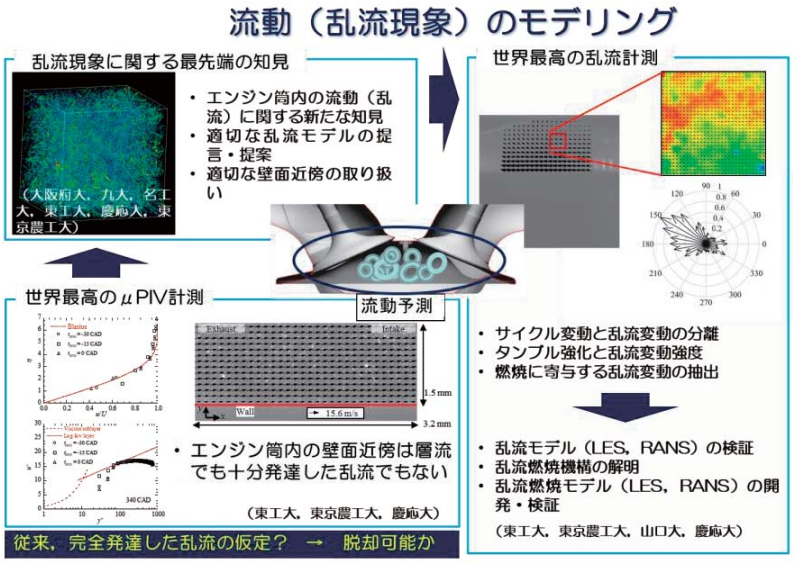


図 4-2-3

ところが、少し違う現象を対象としようとすると、そのモデルの前提が崩れる場合がある。今まで開発研究からは遠かった研究者を、こういうプログラムの中へぐっと引き込んで、できるだけ実物を見ながら基礎研究を実施し、新しいモデリングをしていくことに取り組んでいる。さらにもう一つ、これまで、様々な分野で研究投資が行われてきた。この場合は微小電気機械システム（MEMS）の例ですが、こういうものを自動車のような歴史のあるものに適用できないかというところで、自動車のエンジンを全く想定していなかった研究者を連れてきて、新しい計測の装置や方法、そういうものを組み込んで開発を進めている（図 4-2-4）。

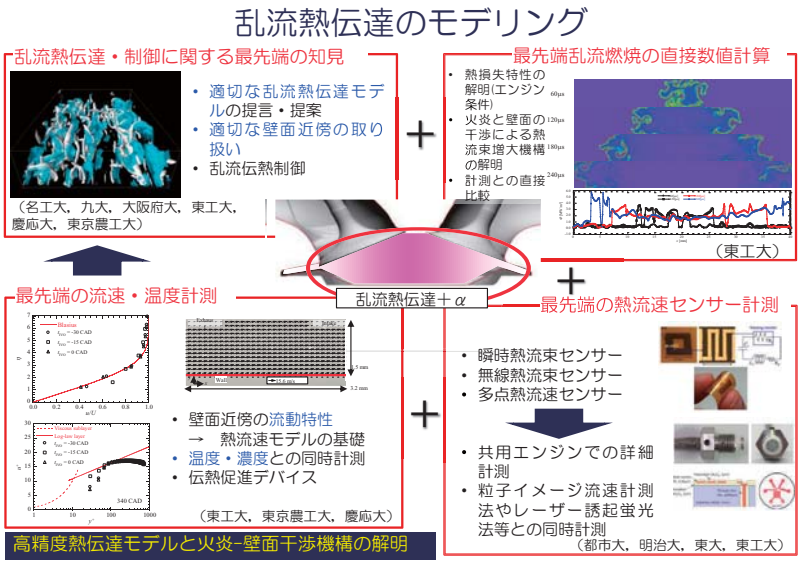


図 4-2-4

火が燃えるところ（燃焼現象）でも、詳細な基礎研究が行われているが、実際にそのような基礎研究的な解析を車のエンジンに適用するとなると、100 年、200 年、かかってしまう。ただし、詳細な研究を実施する研究者と実際にエンジン開発のシミュレーションソフトを構築する研究者を近いところに持ってくることで、お互いのニーズとシーズを認識させることは可能になる（図 4-2-5）。

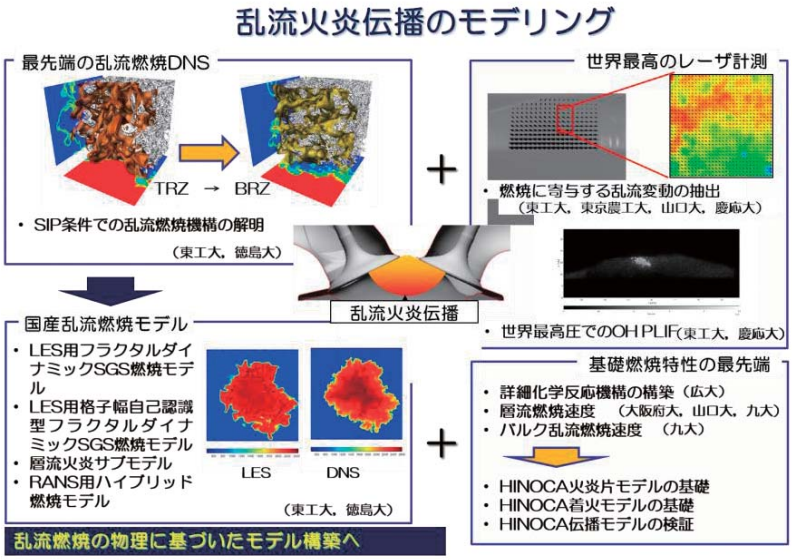


図 4-2-5

火をつけて伝播させて、エネルギーを取り出すわけだが、ここではプラズマ的な考えを入れなければならない。流体や反応がどうなるのか、モデリングはどうするのか、様々な角度から見ていく必要がある。通常、大学の研究者は自分の分野だけを一生懸命にやっていて、なかなか他分野や産業界と一緒に研究を行わない。しかしながら、SIP プログラムでは、企業出身者がプログラムディレクター（PD）をしており、企業的な研究開発のやり方がプログラムの中に入ることで、半ば強制的かも知れないが、大学内だけでなく大学を超えた様々な連携が行われています（図 4-2-6）。

HINOCA の開発体制は今年から変わったと私は認識している。これまで、いわゆるエンジンをつくる企業の方々や解析ソフトをつくるベンダー、ソフトウェアをつくる研究者の取り組みと、そこで使われている基礎的な物理数学モデルをつくる研究者との間には、非常に時間的な距離があった。例を幾つか書いているが、1996 年や 1994 年に開発されたモデル等がやっと今になって総合的な解析モデルの中、それも大抵の場合、外国のソフトウェアに入っている。

つまり、基礎研究と応用研究等とが残念ながら国内では非常に距離があって、時間もかかって、さらには意外と解析ソフトウェアができると見た目が派手なため、研究費は応用研究側にいく傾向が強かったと思われます。基礎的なモデルをつくる研究者が、本当は応用研究側を見て、研究費を獲得して研究を進めないといけないが、研究費もなかなか獲得できず、良い研究を進めてこられなかったというのが、ここ 10 年か 15 年ぐらいと思われる。しかしながら、それを HINOCA のプログラムでは変えている。基礎的なモデルを作る方々に入っていただき、例えばエンジンの中をきちっと見てもらって、何が必要か、

何を変えなければいけないかというところを直接見ながら研究をやっている。

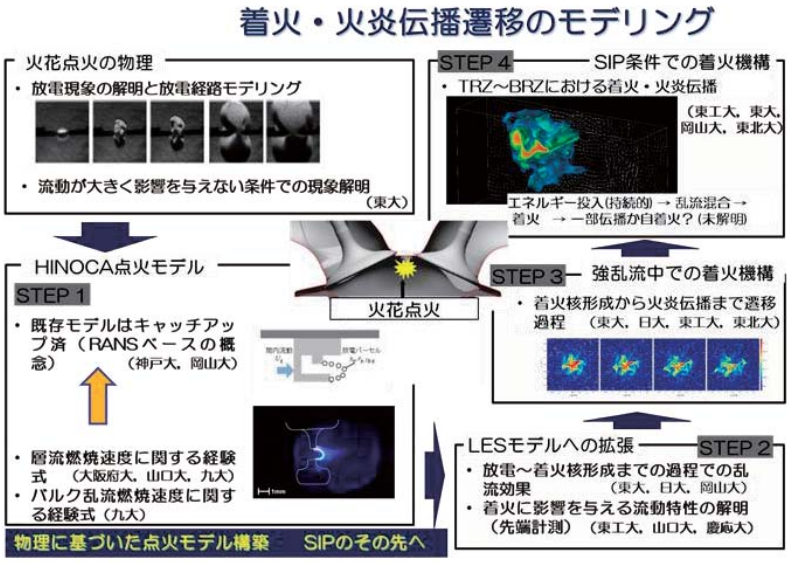


図 4-2-6

デジタルツインを本当に推進しようとするのならば、こちら側のきれいな解析の絵（解析結果）が出てくるところだけに注目するのではなく、基礎研究にどれだけ投資して、その結果を短時間で反映させるかが重要であると考える（図 4-2-7）。

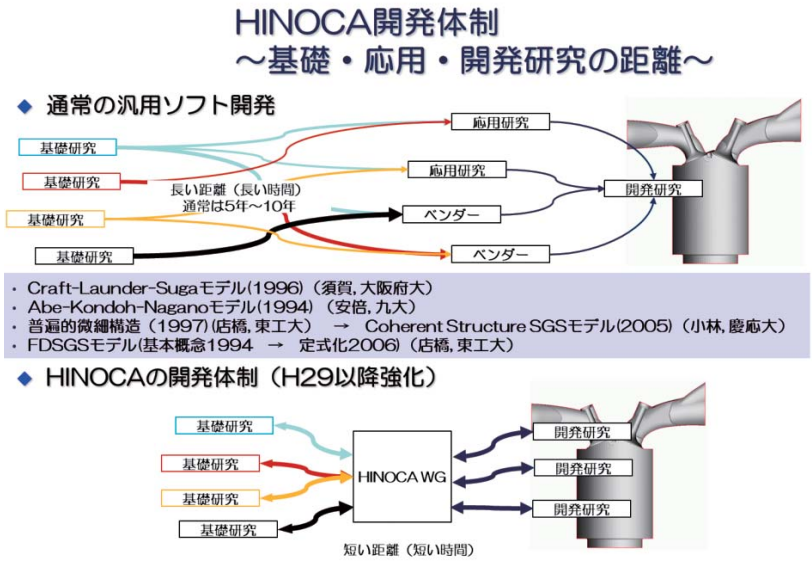


図 4-2-7

日本燃焼学会が行っている燃焼解析プラットフォームの開発体制にもコミットしているが、このプログラムで一番おもしろいのは、ソフトを開発するのに企業の皆さんが非競争領域を自分たちで設定し、開発資金を直接出したという点にある。多分、これは世界で初めての試みであると思われる。そういう意味では、燃焼解析プラットフォームは、非常に先進的な形である。

ただ、開発費と期間の問題から、燃焼だけに注力しており、乱流モデルや伝熱モデルには、手をつけないという前提で開発が行われている。検証については、研究費や設備の問題もさることながら、データ取得から解析の仕方というところが進んでおらず、この点がもう少し努力すべきことと思われる（図 4-2-8）。

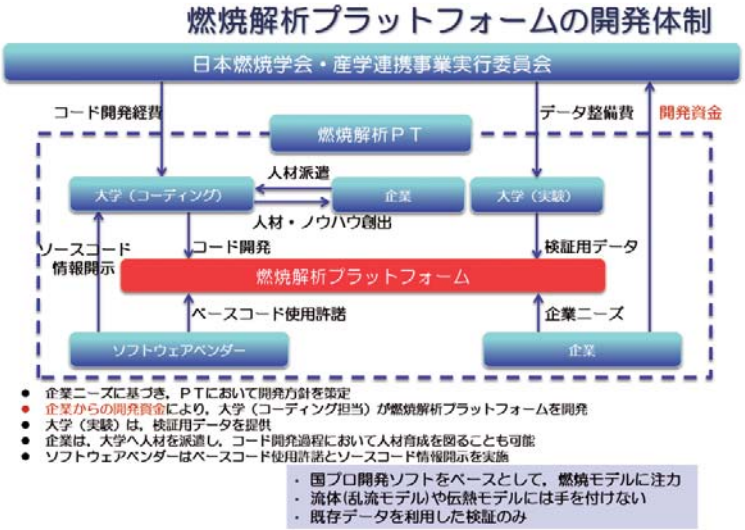


図 4-2-8

日本伝熱学会の状況はというと、実は 2017 年 3 月ぐらいに、ここに示した研究特定推進研究の設置が認められ、現在走り出している。これは、未来のエネルギーシステムを開発する際に、乱流や伝熱、燃焼の研究を改めて考え直すことを念頭においている。

組織としては日本伝熱学会の中につくるが、日本流体力学会や日本燃焼学会など、他学会の研究者にも集まってもらい、さらに、自動車業界だけでなくて重工業といった産業界にも参加してもらっている（図 4-2-9）。2 年間の活動の中で、統合的な国産ソフトウェアをつくれるプロジェクトをどこかで創設できるといいのではないかということを発信する予定である。

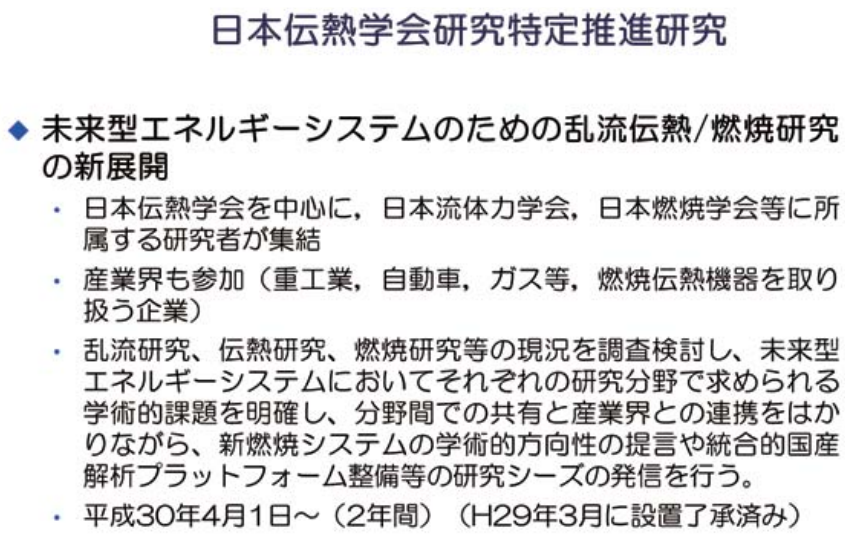


図 4-2-9

もう一つ強調しておくとすれば、こういうデジタルツインを実現するときには、国産のプラットフォームがあることが望まれるという点だ。基礎研究にきちっと投資して、使われているモデルも国産であってほしいというような気がしている。それに加えて、多様な人たちが参画するので、研究のマネジメント、組織のマネジメントをうまく設計すれば、きっと底力はあるはずと思っている。また、先ほど小林先生も述べていたが、燃焼が関わるような現象でデジタルツインをやろうとすると、大学だけでなくて企業でも計算機環境をきちんと整備しておく必要があると思われる（図 4-2-10）。

デジタルツインと流体・伝熱・燃焼・化学連成モデルの構築

◆ デジタルツインの実現へ
- 統合的国産解析プラットフォーム整備
- 基礎研究（理論，解析，実験）への投資（国産モデル）
- 基礎研究（流体，伝熱，燃焼，化学の各分野）ー応用研究ープラットフォーム構築ー開発研究ー製品開発の距離（時間）を短くするプロジェクトとその運営
- 学会（あるいは学術分野）の枠を超えた研究者連携と研究マネジメント
- 製品開発（あるいは開発研究）のニーズを直接基礎研究へ反映させる方策（基礎研究者の意識改革も含む）
- モデル開発とプラットフォーム開発を明確に分離し，適切な人員配置と経費配分（燃焼器に代表される流体，伝熱，燃焼，化学連成問題では，基本モデル開発なしに革新的なプラットフォーム開発は不可能）
- デジタルツインを実現できる計算機環境の整備（大学，企業）

図 4-2-10

【質疑応答】

質問：先ほどの学会を見ると、流体や伝熱、燃焼はみんな機械学会の中の一つの分科会である。それがどうしてわざわざ新たな連携の仕組みをつくらないと連携できないのか。

回答：多分、小さく分かれた一つの法人として学会でやっているので、多分、小さいがゆえに自分たちできっちりやらないと、という使命感がある。

質問：機械学会になると使命感が沸かないということか。

回答：そうとは言えないが、いろんな研究者がいる。

コメント：問題なのは多分、国のお金等が入っている間はできるが、それが切れてある規模になったときに、本当にどこまで継続していけるかというのが課題である。

コメント：今、様々なプロジェクトが言われていることだが、お金は産業界からもらうしかないわけで、そこは産業界とどこまでやっていけるかではないか。だから、大学がやることと産業界の要望をどこまで決められるかというところかと思う。

コメント：最初の趣旨の説明でもあったのが、デジタルツインのあるツールができたときに、プロジェクトが終わったときにどこが引き受けるかということ、ここも最初の段階できっちりと計画しておかなければいけない。例えば HINOCA はどこが受けるのか、燃焼学会でやっているプラットフォームはどこが受けるかである。後者は、燃焼学会としてベースは持つが、個々の適用に関しては国プロのようなものではないので、あとは学会の担当会員と、それから、企業の間でやってもらう、そこをどうするかだと思う。

そこが非常に重要なところで、引き受けるところがないと国産のプラットフォームとして活用はされない。

コメント：それをずっと懸念しており、ある程度のマスのある部隊でないと、道ができないようになるのではないかなと懸念している。というのは、流行的にわっと皆さんが盛り上がったときにはできるかもしれないが、冷めたときでも維持しないといけないものは維持しないといけない。私も、それを学会がやるべきだと思うが、学会は当てにできないのであれば、学会を捨てて別の仕組みにしたほうがよくて、やる気のある先生だけを集めてやる。また、別の組織をつくったほうがいいというのだったら、多分、そうすべきだと思う。私も学会を活用すべきだと思うが、学会がその役を果たさないと会員の皆さんがいうのだったら学会へはお願いしないということになる。

質問：国産ソフトウェアベースである FrontFlow は国プロでつくられ、今、それを商品としている企業が存在している。そういう形で、企業に使ってもらって、かつ、その改良に学会が継続して関与していくような、スキームができるかどうかが非常に重要だ。それともう１点、重要なことは、例えばあるプラント会社の人たちに聞くと、国際的に使われているソフトウェア、それで検証したものでないと、その商品の検証結果を信用しないということもある。例えば StarCD を使って設計したものでないとだめだ。こういった状況を変えていくには、もっと新たに開発したものを日本の企業の皆さんに使っていただいて、それが商品として信頼できるものだということを示していくことがとても大事であり、いつまでも外国産ソフトウェアが開発に必至な状況が続いてしまう気がする。そこをどう変えていくかが課題である。

質問：ソフトウェアが外国製か日本製か、企業にとってはどちらでも良い。企業が出すアウトプット、プロダクトがいいものになればいい。もう一つは、やりやすいから人数は少ないほうがいいという話があったが、本当に日本のためであれば、必要なニーズというものを明確に出す。ニーズがないまま、展開をやっていると感じる。

回答：ソフトウェアの国産化というのは、そういう意味よりは、実は多分、ホンダもそうだし、いろんな会社、ソフトウェア会社がお金を海外へ出している。それは本当にいいのかなという気持ちもある。もちろん、同じことができて、国内である程度のコストで抑えられれば、そのほうが多分、いいのではないかなという気持ちはある。

コメント：ただし、企業がソフトウェアのテストをやる気にはならない。わざわざ、販売のための手伝いをする気はない。日本の問題点は、CAE（Computer Aided Engineering）のライセンスがアメリカに比べると３倍するが、これを誰も暴かない。カントリーファクターに 2.5 から３をかけられるかということだ。これをなぜ皆さんは知っているのに暴かないのか。それを暴けば、日本のソフトウェアはもっと強いことをやらないといけないということになる。

4.3　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）

デジタルツインと機械システム相互作用、および機械損傷モデルの構築という内容でお話しする。私は、機械システム設計、人間支援工学、脳科学などを専門としているので、特にデジタルツインの中でこれから重要になってくると思われる人のモデル化については最後に簡単に紹介する。

基礎科学から多様な技術基盤の統合化による複合現象のモデル化、検証ということが非常に重要になっている。設計・開発、製造だけではなくて出荷後のメンテナンスについての効率化を見据えた上で上流段階を考え、しっかりとしたものを作っていくことが必要である。実際にメンテナンスになったときにうまくデジタルツインの過程が入り込んでいくことが、これからの革新的デジタルツインと思っている。デジタルデータをもとに、物理的な機械システムのサイバー空間上での仮想的な複製をつくるということだが、設計、開発、製造、物流、保守、それぞれがデジタルツインをしっかりと回していくということが必要になる（図 4-3-1）。今日は私の守備範囲である機械要素や、トライボロジー、あるいは機械と機械が連成したときの機械システム、それとインターフェースする部分、特に潤滑や、保守の場合には人と機械がつながっていくことも含めて、そのあたりを考えていきたい。

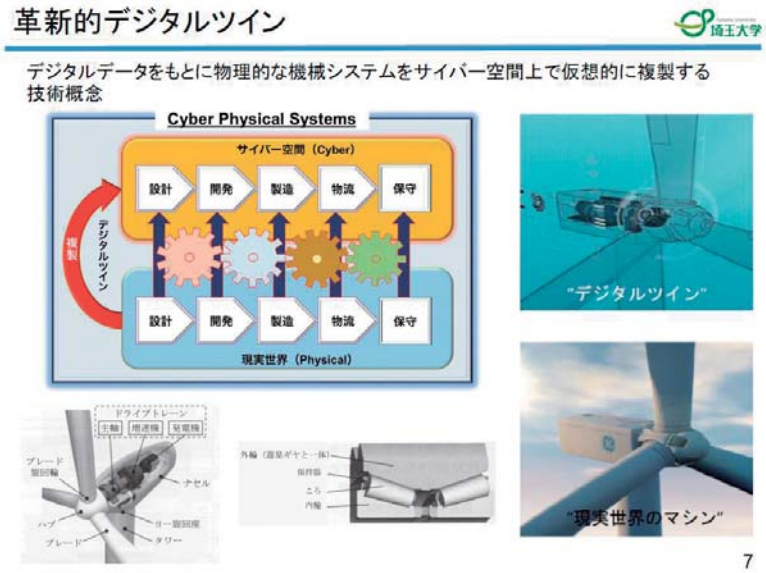


図 4-3-1

革新的デジタルツインではそれぞれの機械要素、トライボロジー要素などが重要になる。例えば風車では、風車を支える主軸用の軸受には高負荷容量、高剛性などが求められる。一旦設置すると 10 年以上の高寿命が求められ、また洋上にある風車では塩害対策など様々なファクターを加味した上で、高い信頼性のものを作る必要がある（図 4-3-2）。それをメンテナンスする時期、あるいは損傷する前にうまく保守するというタイミングも解析した上でやる。壊れてから保守しにいくのではなく、これからはこのぐらいの時期で寿命が

くる､損傷しそうということを考えていく。この増速機では遊星歯車機構が使われていて、振動に起因した事故、故障が多いが、潤滑方法、潤滑油の選定や、洗浄度合いの管理というところも非常に重要になる。

また誘導発電機では、電食防止のような電気的な要素との連成でトライボロジーを捉える必要があり、電食を防止するような材料の利用など、機械工学の範疇とそれに隣接する領域が結びついて、使われる環境を考慮してデジタルツインを作らなければならない。

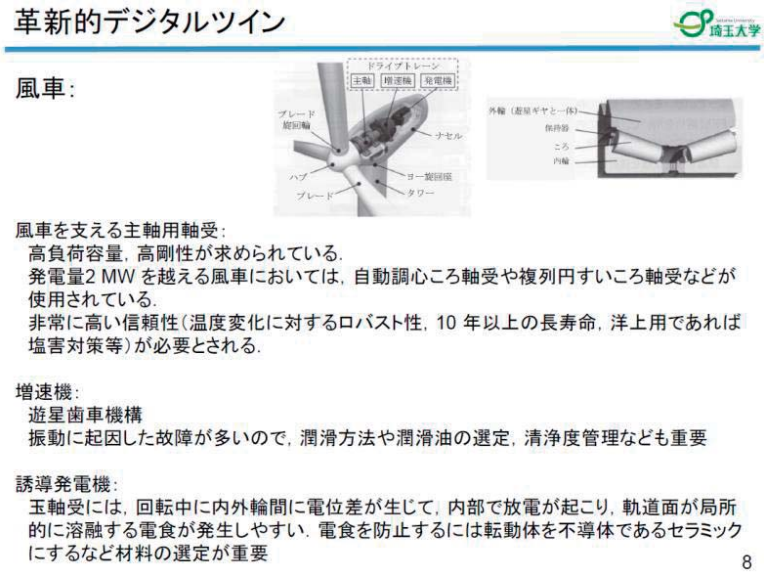


図 4-3-2

今、デジタルツインの中ではバーチャルシンガポールというものがあり、シンガポール全体を 3D でデジタイジングして、道路、交通網あるいは都市行政、社会インフラの管理といった効率化までを目指して、いろいろな地域の天候状態や、河川の状態、人の動きまでをデジタルツインで制御していこうとしている（図 4-3-3)。世界的に非常に大きい規模のデジタルツインの事例である。

例えば、どのようなエネルギーの使われ方をするか、変動があるか、そのときに使われる機械をどのようにコントロールするか、どのタイミングで保守していくか、機械工学の中でやっているデジタルツインと行政側のデジタルツインとうまく組み合わせていくことが必要である。

一方、GE のガスタービン製造工場において AI を導入したという例（図 4-3-4）では、実工場とその裏のデジタルツインがあり､このサイクルを回して最適化するだけではなく、実際に動かした場合の負荷状況に応じたそれぞれのパフォーマンスの変化を考慮して、どうチューニングして全体の最適化を図るのかにデジタルツインを使っており、さらにそのチューニングを人の経験的な知識だけではなくて、ディープラーニングのようなものを活用しながら最適化を図っている。これも今後、あるべき姿の一つである。

図 4-3-3

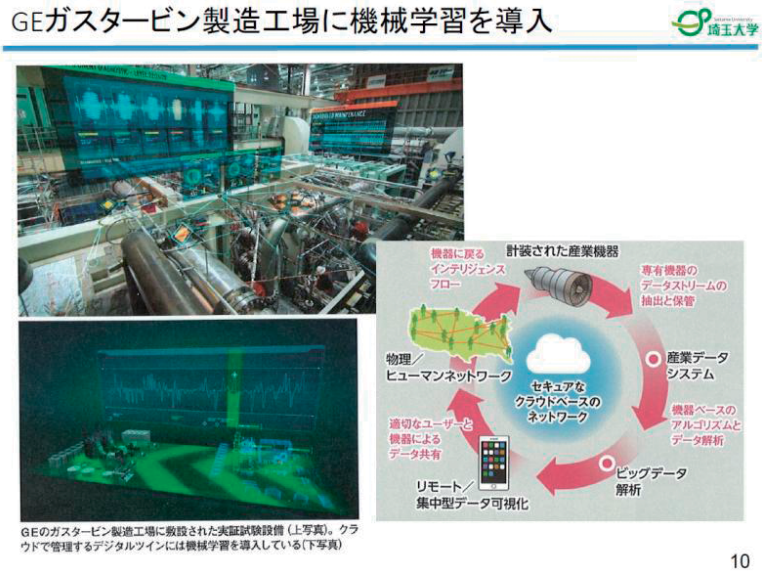


図 4-3-4

次に、要素とトライボロジーと損傷分野におけるモデル・シミュレーションを考える。トライボロジー分野の解析では、実機の磨耗予測、焼きつけの状況の予測は非常に困難で、今まではフィールド試験で行ってきたが、時間や費用が膨大になる。そのため加速試験が不可欠で、うまくデータとシミュレーション等を合わせて解析できることが求められる。

部材の疲労試験の場合では、応力の変動サイクルを変化させて試験をする際に、トライボロジー要素のスペックの設定が非常に重要である。その際、トライボロジーのシミュレーションと組み合わせて、正確な油膜厚さの推定や、トライボシミュレーターの精度を上げていくことが重要で､デジタルツインのためには高度なシミュレーション技術が必要となる。

トライボロジーは機械要素がそれぞれつながっていて、システム、サブシステム、機械要素、それぞれが複合していれば必ず起きる現象であるので、複合した技術の俯瞰分野を持ち、多様性があるため難しい分野である（図 4-3-5）。

社会の問題、社会環境を背景に、軸受に求められる技術は、例えば省エネ、小型化、長寿命など、それに対応する技術も多様にある（図 4-3-6）。さらに、材料の選定、潤滑技術を解明していくことが非常に重要で、今まで個別に行われていたものをデータベース化することも非常に重要な分野になっている。

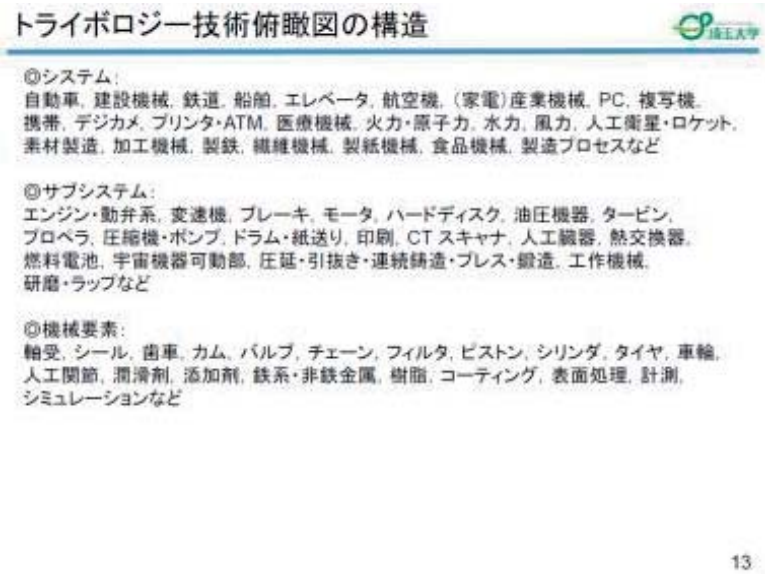


図 4-3-5

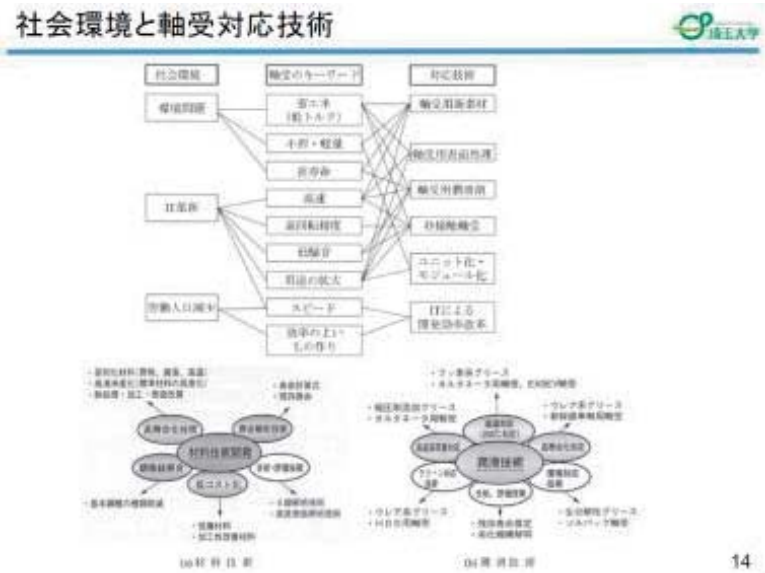


図 4-3-6

一部に関しては、物理モデルを用いた劣化予測、設備の部品等で稼働状況、それをトータルに生産コストを最大にするようなプラントライフマネジメントの適用などが行われている（図 4-3-7）。その際に軸受の磨耗低減策や、潤滑油の改良などが必要になる。

図 4-3-8 に示すような火力発電の設備においても、例えばボイラーの部分では、図 4-3-9 のようにローラー、テーブル等ですり潰しながら微炭を作る構造になっている。これは給炭量やこれを回すための電流、油圧、その差圧、振動によって状態が決まる。

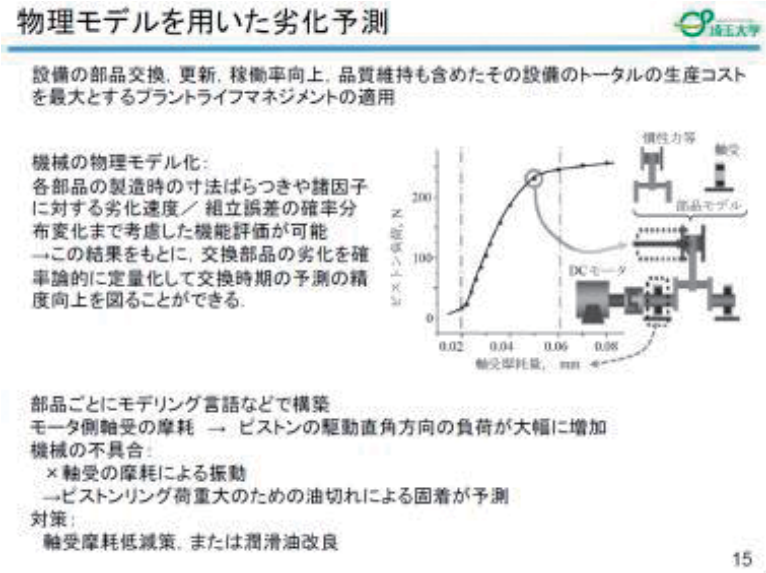


図 4-3-7

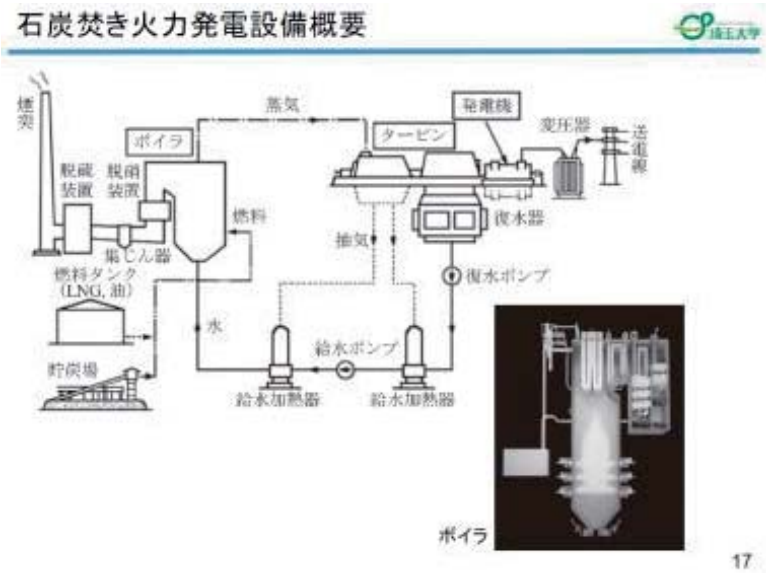


図 4-3-8

これを解析するのは大変だが、最近は部分的にデータをとり、どこでどのように不具合が生じるかを、AI を使って分析することによってモデル化をする、あるいはモデル化をするだけでは暗黙知になるので、どこの要素が連成しているか、どのような連携があるかを AI によって分析し、その現象を解明していくような使い方もされている（図 4-3-10）。単に AI を使ってブラックボックスにするだけでなく、わからなかった部分を少しずつわかるように紐解いていくような、AI のディープラーニングの使い方をすることによって、デジタルツインに関わるモデルの可能性が出てきている。

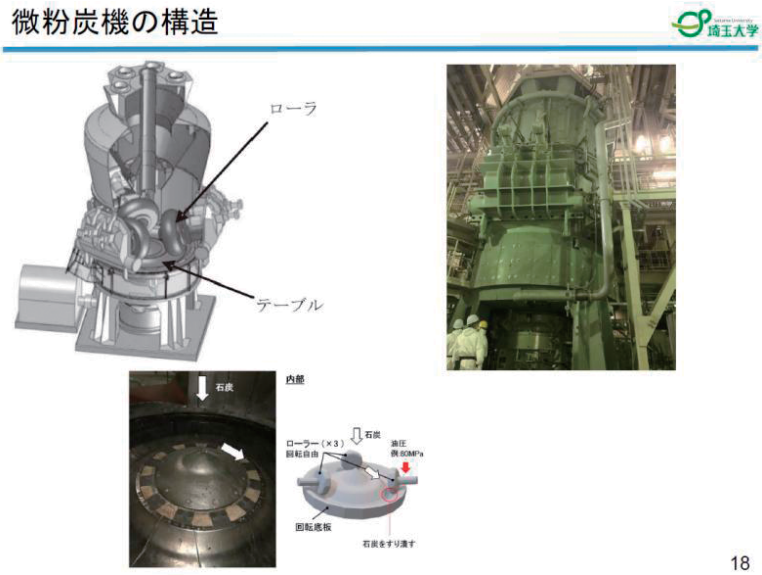


図 4-3-9

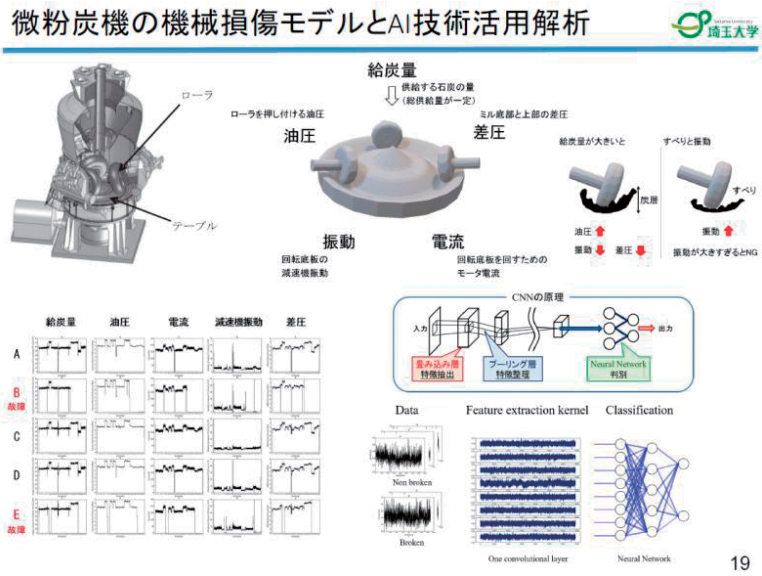


図 4-3-10

産業機械分野においても、多岐にわたってロボットや生産分野などで機械要素、潤滑等が使われている。また、保守などを考えると、人のモデル化が非常に重要になる。自動車の運転支援ではドライバーと自動車の関係で生体情報や運動情報をとって支援するような仕組みができており、このような他分野の知識をうまく機械工学の中にも入れていくことが非常に重要である。

具体的には、図 4-3-11、4-3-12 のように生体情報の特徴量を抽出するような AI の手法や、最近ではその人に合ったリハビリテーションのように、模範に合わせてその人を動かすのではなく､その人の特性に合わせて個別にリハビリテーションすることも大事である。機械がそれぞれの部品の特性に合わせて全体を最適化していくような知見が、他分野でも活用可能であり、私たちもこのような医学的な知見を、うまく工学系に入れている。それにより、高齢者の生活支援など、一見すると違った分野に適用し、隣接する研究分野に応

用することが考えられる。

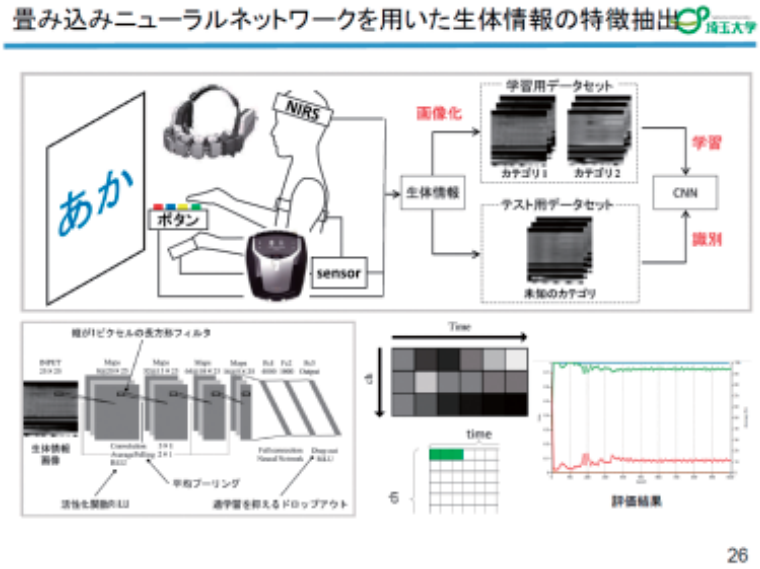


図 4-3-11

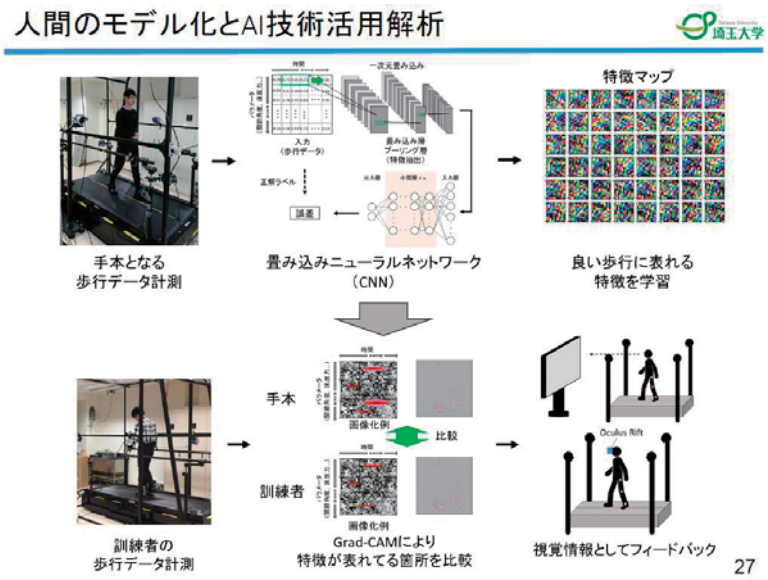


図 4-3-12

この分野における研究テーマとしては、機械要素、トライボロジーの解析モデル、シミュレーション技術の開発、さらに保守などの点検を考えると、人間とのシステム相互作用としてインタラクションやインターフェースについての研究、要素ごとだけではなくシステムとしての解析、シミュレーション技術も重要になっている。また、解析モデルやシミュレーションの標準化も重要である。バーチャルリアリティ（VR）や拡張現実（AR）、IoTやAI、といった新しい技術と組み合わせて、新しい体験的価値を付加していくということである。

もう一つ、デジタルツインでは開発だけではなく、デジタルの情報漏えいやサイバーセキュリティといったセキュリティ面での危険性が以前に比べて多くなるので、そこへの配

慮が必要である。これらを総合した人材育成、マネジメントが求められる。

私たちは、現在、埼玉大学先端産業国際ラボラトリーで色々な取り組みをしており、その中で産学官連携によりワークショップ・スペースにてワークショップやセミナーなどを開催するとともに、インキュベーション・スペースで実践的な活動を行っている。そこでキーになるテクノロジーは、クロスオーバー型オープンイノベーションである。例えば、自動車とか重工業分野での知見を医療系、ヘルスケアに持っていく、逆に、医療、ヘルスケアの分野のものを先ほどのように、機械工学の分野に持っていくことが非常に重要になっている。

現在、図 4-3-13 のようなネットワーク構築から基礎研究、研究開発、試作、製品化、事業化を約 70 社、年間 1,100 人程と一緒に活動している。このワークショップ・スペースやインキュベーション･スペースにおいて、異業種連携での交流と共創の場をつくって、研究開発協働、人材育成を行っている。さらに、研究開発支援、標準化支援のスキームをうまく入れて地域と連携して特区などを活用しながら国際標準化も意識していく。このような先端的な研究開発、新市場の創出のスキームと並行して研究開発用の設備とインキュベーション・スペースをうまく活用して、知的財産なども支援している。そして、グローバルな社会と学会や学協会との連携をうまく入れることによってコストの低減や、標準化の推進、新しい産業の創出、ベンダー等によるデファクトスタンダードを含めた展開が必要である。

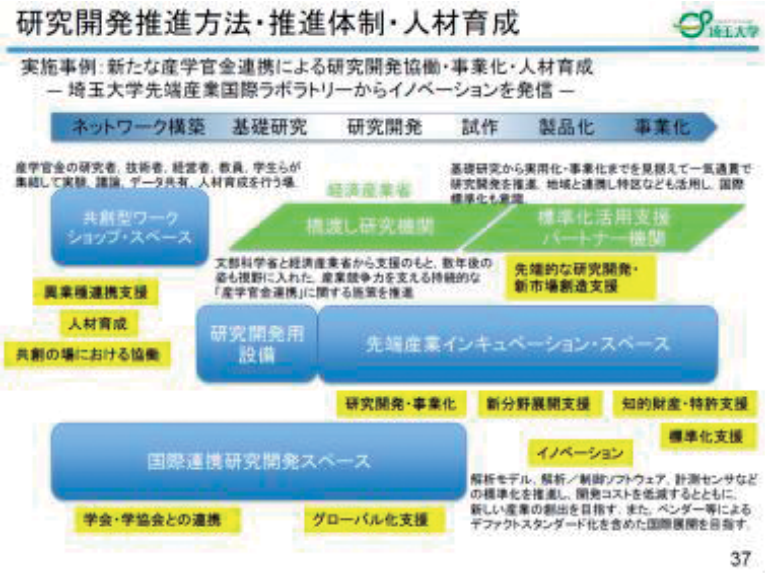


図 4-3-13

【質疑応答】

質問：具体的に産の要求が非常に重要になると思うが、その捉え方と、産はそれぞれの知見をしっかりと提供できているのか、その辺りの実情を、産がなすべきことを踏まえる意味でも教えてほしい。

回答：大変重要な視点である。デジタルツインのためのモデリング技術や、解析技術、それを製品に応用するとなるといきなりやるのは難しい。そのために重要なことは、共創型ワークショップで単に人材育成して､セミナー等で情報を提供し合うだけではなくて、最初の構想の段階から金融界も入って、本当に市場性があるか、製品化した上でビジネスになるかをしっかりと考え、技術的な課題をしっかりと検討することである。そのようにして、開発したときに本当に有益なのかどうかというのをこの段階でしっかりと議論して、うまくいきそうなものがインキュベーション・スペースの中に入っている。実際に昨年も約 20 社入り、その半分以上は既に 1 年程で製品化を終えている。また標準化についても、1 年程で JIS を 1 件獲得している。これを迅速に行うために、橋渡し研究機関と標準化活用支援パートナー機関と、経済産業省と文部科学省の施策をうまく連携させることで、企業の方にもメリットがある取り組みにしている。

質問：そのときに、産には産の研究水準があって、それを反映するような形で産学官が連携することがある。そのような連携では、産はできればここで注入するものが他の産に流れないことを希望する。うまく成功する例はあるかもしれないが、まだそこのシェアリングがうまくいかない。例えば先ほども物流モデルを使って劣化を見る例や、AI、機械学習を使った劣化の診断という話があったが、本当はあらゆる英知を集めると解決が早いと思うが、呉越同舟がなかなかできずに止まっていることがよくあるのではないか。

回答: おっしゃるとおり、情報マネジメントなどは重要な課題である。また、学協会など、もう少し英知を集めることもこのような取り組みをするときには非常に重要だと考えている。例えば、大学が核になり強みが異なる複数の企業をコーディネートし、学協会などとも協力し、インキュベーション・スペースにて異業種連携や新分野展開支援を行いながら、新たな製品の企画、研究開発、製品化・事業化・標準化を一貫して取組み、共創の場における実践的な人材育成や新たな事業化を目指し、デジタルツインに関するイノベーションを起こしたいと考えている。

4.4　デジタルツインと材料強度モデル

北村 隆行（京都大学）

私の話は、大学やアカデミア側から本音･本質をすることであると思っている。そこで、システム的なことや計算テクニックではない視点からお話しする。今日は、機械工学を専門としない方にも問題点を理解していただけるように、材料強度学の課題を一歩一歩積み重ねて話をしたい。

機械の中でのデジタルツインのキーとは何か。それは、実際の現象とシミュレーションの現象が合わないといけないということである。結びつけるためには何が必要か。シミュレーションをコンピュータで実行するためには、一般的な法則を数式で表す必要がある。材料の挙動を数式で表す学問は、材料力学と言われるものである。

材料力学は、固体力学と言われたり、連続体力学と言われたりする。なお、連続体力学は、流体力学も熱力学も、そして材料力学も一緒になったものをいう。

いい材料を作るということに関する学問は、主に材料科学、材料開発である。今回は焦点が設計であり、材料の特性を数式に落としてシミュレーションすることが中心課題であるので、力学が中心のプロジェクトになる。こういうプロジェクトは余りなく、ここに固体力学の研究の必要性がある。固体の力学を研究するときに、2つ大きな分類が必要である（図 4-4-1）。材料に力をかけると、形が変わる。もっと力をかけると壊れる。数式的にあるいは物理法則では、形が変わるということと壊れるということは全然違う。一緒なのは力をかけているということだけで、法則性としては全然違うことに注目しなければならない。

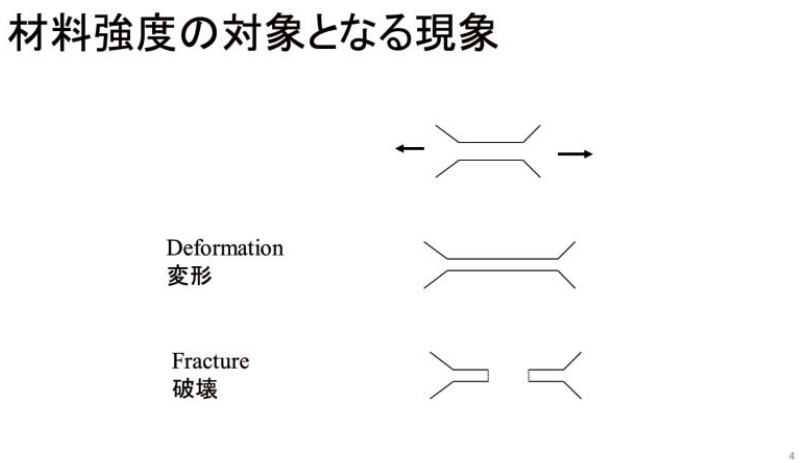


図 4-4-1

これについて詳細な話をする前に理解していただきたいのだが、少し言葉を変えると熱力学でも流体力学でも類似の話になる。基礎や物理現象が大事だと今までの先生方も強調された。現時点でもいずれも難しい課題が残されており、定式化されていない部分を知って探求することが重要である。ここでも同じで、材料強度の現象はものすごく複雑である

(図 4-4-2)。金属疲労という言葉を聞いたことがあるかもしれない。それは 1 回の負荷では壊れないけれども、何回も繰り返して力を与えていると壊れることを、人間が疲れるのと同じように疲労と言う。1 回で壊れるときにはもっとたくさんの力が要るということである。壊れ方も変形の仕方も現象によって違う。材料によっても違う。疲労をシミュレーションするためには、本質を知って形が変わる、壊れるということを物理的に考えなければならない。

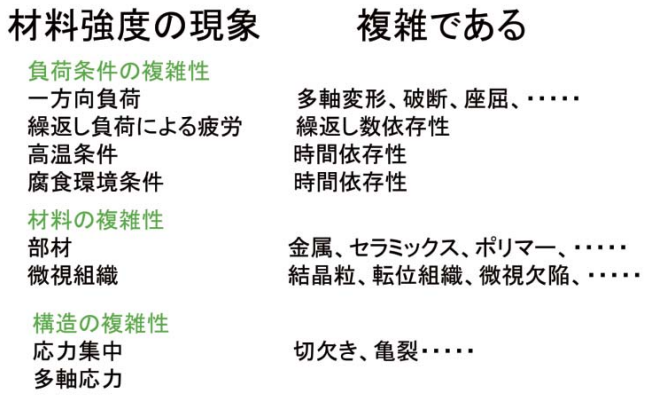


図 4-4-2

形が変わるというのはどういう数式かということは、偏微分方程式としてわかっている(図 4-4-3)。図に示したのは線形弾性材料の場合で、簡単に三つの式で書いてあるが、材料の各点において 15 の偏微分方程式で変数は 15 個あります。これを構造物全体で解こうというわけである。

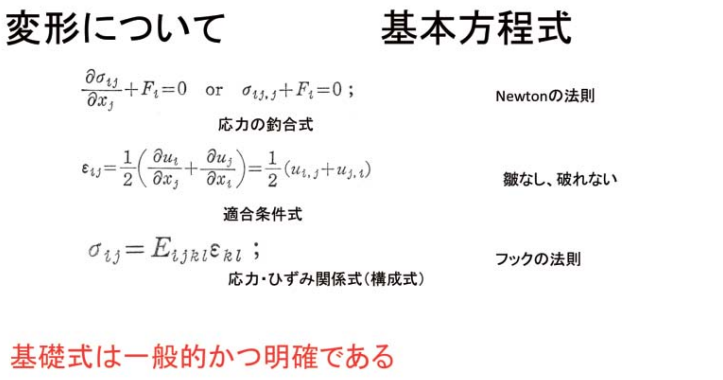


図 4-4-3

これが一番簡単な場合の形が変わるという式である。ばねを引っ張ったら、かけた力と伸びる量は比例するということを複雑に三次元で表したものが線形弾性と考えてほしい。基礎的な種類の式がわかっているので、これを複雑な条件での設計で使う際に、すなわち、様々な難しい条件が出てきた場合は、式のどこを変えればいいということがわかっている(図 4-4-4)。例えば衝撃では、ものすごく速い速度で形が変わる。そのときは上の第一式

を変えればいいことがわかっている。なぜかいうと、第一式はニュートンの法則なので、上では加速度項が入っていないから加速度項を入れればいい。他にも、温度が高かったら、ここの式を変えればいいということが法則性から分かる。ゴムのようなもの、例えばタイヤで大きく形が変わったら、これは大変形というが、ここを変えればいいという式もわかっており、ある意味でちょっと簡単である。

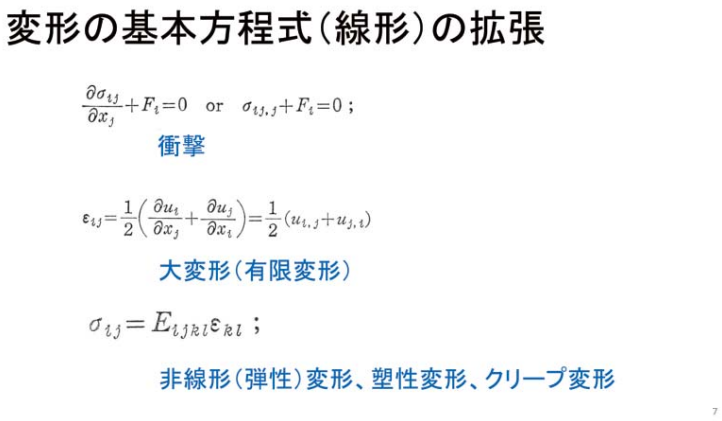


図 4-4-4

式を変えればいいが、どういう形に変えればいいのかわからないというのが、変形における１番目の研究の主題である。２番目の主題は数値解析するときの境界条件。後者は、例えば、力をかけて押す、接触問題は触っているところがどこからどこまでで、どういう力の分布で押しているかということがわからない。触っているところだけを外からみたら均等にかかっているように見える。でも、足裏のつま先だけに力がかかっているかもしれない。あるいは途中でさびていく、さびが隙間の中に入っていくというような問題は現象面のシミュレーションや実験で難しい面がある。また、このような式の定数を決めていくことは難しい問題になる。

次に､破壊について述べる。ある状況における破壊現象に対して一つの条件が出てくる。例えば、亀裂のような尖った傷がない場合には、一定応力の破壊条件がある。ところが、亀裂が入っているとまた違う条件・パラメータが法則性として出てくる。この場合も、力のかかかり方によってはもっと違うパラメータとなり、また違う法則が出てくる。例えば異なる材料が張り合わされた界面で壊れるようなときである。このように、一般的にどのようなパラメータに基づく数式になっているのか、基礎の式がわかっていない。では、どうするかというと、壊れる条件をシミュレーションする人が予め推定してプログラムに入れることを判断しなければならない。あるいはもう少し気が利くプログラムでは、複数の条件を汎用ソフトの中に入れておいて、ソフトができるだけ自動的に選ぶようにする。どちらにしろ、材料や構造物によって基礎式が決まっていない、すなわち物理現象として力学的観点から理解にいたっていないのが、大きな課題である。

破壊について取り組むべきことを整理したのが図 4-4-5 であるが、詳細に入るのでここでは議論しない。

企業の方は、あるいは大学の先生も、機械工学といったら四力（材料力学、熱力学、流

体力学、機械力学）だと言われる。大学で教わったときのことを思い出すと、材料力学というのは大体２年生で、長くても１年間程で習う。その目標は応力やひずみという、変形や破壊に関係したパラメータを教えることが一番の主眼である。もう一つの学部における材料に関する講義として、材料学がある。これは物質の基本的な特性、結晶とは何か、金属とセラミックスはどこが違うか、ポリマーとセラミックスはどこが違うか、ということを教える。

損傷･破壊に関するデジタルツインの具体的課題

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、実験が難しい

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 4-4-5

これらの基盤の習得を経て、中級になって偏微分方程式が出てくる。これをいろいろな条件を与えて解いているのが今の有限要素法（FEM）等の解析技術である。しかし、これでは一般的な応用問題には十分ではなく､破壊現象はさらに上級にならないと解けない。とくに、完成された知識となっていない部分が問題である。これら機械工学の材料関係の学問全体を指して、広義の材料力学と言っている（図 4-4-6）。これの学問の詳細を全部の設計にあたる技術者に、全部教えないといけないのか、どこまでを教えないといけないのか、ということはその人の技術者のレベルによる。

材料強度に関する力学

上級基盤	破壊力学、損傷力学 モデルの科学（FEM, BEM, PF, DDD, MD, DFTなど）	先進複雑材料学（複合、生体、ナノ など）
中級基盤	弾性力学（基礎偏微分方程式） 塑性力学（非線形構成式） モデルの科学（FEM）	材料基礎学（変形･破壊の現象論）
初級基盤	材料力学（応力･ひずみの概念）	材料基礎学（物質の基本特性）
基礎教養	数学（微分積分、線形代数） 化学　物理（電磁気学、量子力学）	物理（力学） 生物学

図 4-4-6

図 4-4-7 はなぜ力学の研究がプロジェクトとして今まで注目されてこなかったか、一般受けしなかったか、ということを示している。このようなものを私は基盤学術と呼んでい

る。基盤学術は人が多用しているものだ（図 4-4-8）。基礎というのは数学や、物理、宇宙物理など、様々な学問のもとになるものだが、今使っている基盤学術そのものではない。これはある意味で重要さが違う。

力学研究が「受けない」理由

- 一般人が接する生活や自然の知識から遠い
  基礎学術の範疇ではない
- 学術の先端部分が分かりにくい
- 進展が遅い
  成熟度が高い
- 課題にインパクトがない
  分野内の新規領域開拓意欲が低い

図 4-4-7

「基礎学術」ではなく、「基盤学術」の重要性

基盤学術
　実際の技術において多用されている学術

基礎学術
　学問の素になる学術（成熟度は問題ではない）

基盤学術としての固体力学の特徴（成熟した学術）
　既知な部分と未知な部分が分かっている。
　　学術的研究領域がないとの誤解を産む原因
　既知な部分は体系化されているが、全体を知ることは容易ではない。
　　専門家を養成することが難しい原因
　未知な部分は研究が難しく、進展が遅い　slow progress
　　技術の進展を阻む原因

図 4-4-8

逆に力学研究が効果的な理由を示したのが図 4-4-9 である。先ほども述べたが、応用範囲が広い。解析技術（例えば、FEM）があればほとんど全部の産業に使える。そして、波及効果が非常に大きい。熱と流体と材料は親戚関係にあるので式は非常に似ている（連続体力学）。すると、体系的な全体的な視野で物事・設計を進めることができる。また、基盤として成熟しているということは、一歩競合者より進めば、競合相手との機能の差別化は、この上から考えれば容易だ。

さらに、最近は IT やセンサー、計算科学というデータ解析やその詳細データを得るハード、に大きな進展があるが、これらシステム側との相性はとてもいい学問である。力学があれば詳細化がすぐできる。センサーとも一緒にやればもっと効果が上がる。

実践と研究を用いた高度人材育成（図 4-4-10）は、大学教育だと言われるが、学部と修士と博士は全然意味が違う。博士でも、社会人で経験して大学に来る博士と、学部から上がっていく博士は全然考え方が違う。育て方も当然違う。社会人のレベルアップをすることは、社会人博士とは全然違う。これらを一括りに人材育成と言ってもらっては困る。

意義のことなる教育を同一方式で考えるため、アカデミア・大学の中の教育体制が滅茶苦茶になっているのだと思う。

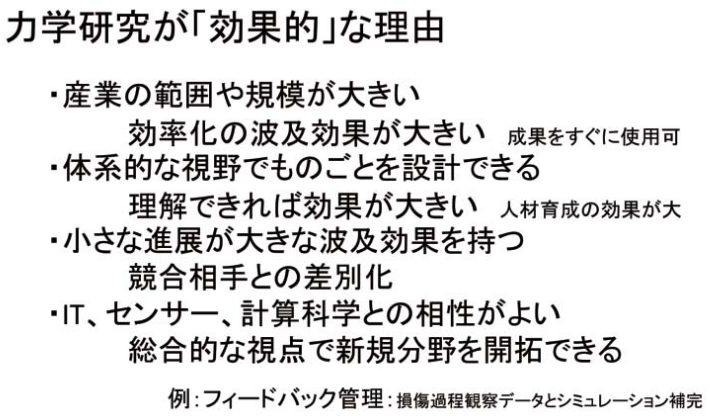


図 4-4-9

基盤学術をやるためには、四つの力学だ、五つの力学だ、そんなことを言っていないで、力学基盤は相互に似ているのだから、力学を統合した力学基盤のシンクタンクが必要だろう。アカデミア側の代表と企業側の力学基盤といかに接続するかというのが大切で、別に学会であろうと、機構であろうと、何であろうと構わない。大学直接であろうと構わないと思うが、アカデミアとエンジニアリングの両方が必要である。ここで強調するのは、それぞれ性格が違うのでコーディネーターが別々にいて、そのコーディネーターが連携をとらないと絶対にうまくいかないだろうと思っている。この辺は議論をさせていただきたい。

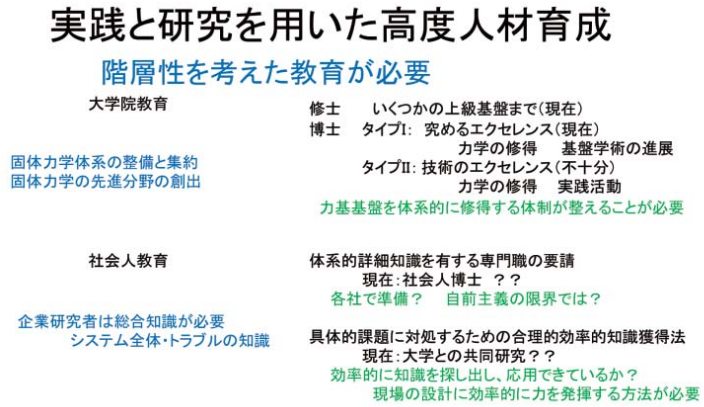


図 4-4-10

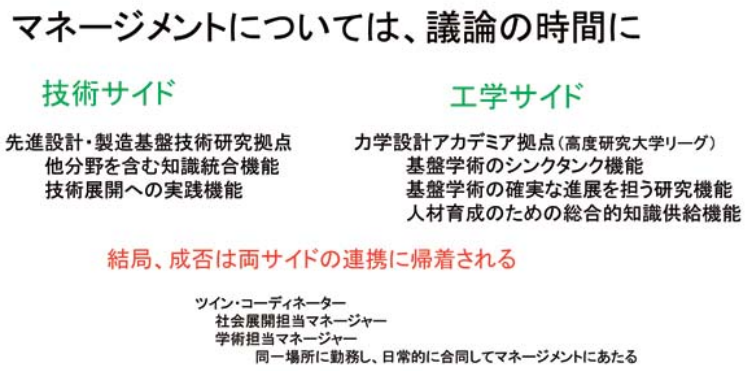


図 4-4-11

【質疑応答】

コメント：デジタルツインというか、新しい時代のデータ、そして技術の使い方で、本当に私どもが欲しいのは先生のこういうやり方だ。我々が欲しいのは基本的なこと。したがって、非常に私は共感する。四つの力学が 60 ～ 70 年、教科書が変わっていない、それで済んでいるということ自体も不思議だが、このように先生に言い出していただいたことを、非常に私はありがたく思った。感謝する。

回答：拝承。実は 60 年間、変わっていないのは初級基盤や中級基盤のところである。

質問：問題は上級基盤。だから、みんな、困っている。

回答：そのとおり。だから、この辺はもっと整備する必要がある。

質問：私も非常に感銘を受けた。この領域のことをしっかり学ぶということと、工作機械の関係だと、実際に物を触ってくることが大事ではないか。例えば切削の理論をどれだけ学んでも削ったことのない人には実際に物を触ってほしい。この考え方が古いのか、新しいのか。私は学部のうちは、現場を触ってほしいと思うが、そのあたりはどうか。

回答：学生の育て方は大学によっても違うし、学生によっても違うと思う。それはどちらがいいかという問題ではなく、両方成立する話だ。先に力学から入って、物を触る。社会人博士の中にもいろんな方、タイプがあるというのもいいことだと思うし、大学院になって企業へ行く、一緒にコラボするというのもいいかもしれない。その逆に、学部の間にできるだけ物に触って、触っているうちにこれはなぜだろうと思って、力学について深く知る。これも非常に大切な方向で、どちらがいいかは教育の中では言えず、両方あっていい、両方とも許すべきだと思う。

質問：材料強度学のまずいのは、プリディクションにならないことだ。壊れた後に、これぐらいの力がどれぐらいのサイクルでかかって壊れたのではないか、というポストディクションである。こういう構造だと振動する、こういう荷重のかけ方だとまずい、というプリディクションに全くならずに、現実には起こった後を説明するだけにしかなっていないのではないか。

回答：私はそう思っていない。それは一つには、破壊についての基礎式がないので、プリディクションはしているが、外れることが往々にしてある、ということだ。

質問：外れたらプリディクションにならないのではないか。

回答：そういう意味では完全なプリディクションではない。それは燃焼でも一緒で、完全

にプリディクションができていれば、デジタルツインができているからプロジェクトは要らないということになる。企業の方で特に問題になるのは、壊れたときにはニュースになる。壊れなかったものはニュースにならない。企業から売り出されているほとんどのものは壊れていない。そんな毎日、毎日、壊れたら大変だ。でも、壊れたらそれはなぜだろうと、後づけをしないといけない。壊れたということは予測が外れており、なぜ外れたかについて後づけをしている。予測が当たっているときは壊れていない。

質問：破壊力学を使った設計はほとんどやっていないのではないか。

回答：いいえ、それはやっている。それは様々な考え方の違いだけだ。

コメント：最後は多分、企業が実験で検証しているのではないか。

コメント：機械設計の基本では材料は線形領域だけ。だから、その範囲内で壊れないように設計する。

回答：自動車の車体は、製造では曲げたりする。あれは線形弾性か。

コメント：基本的な機能を持った部品は、機械設計材料の線形領域でやっている、衝突解析云々は非線形だが。今まで衝突などで、合う、合わないの問題点は、例えばプレスしたときの板厚減少などを考慮しないモデルでやると合わない。ところが、シミュレーションした板厚減少をそのまま入れるときれいに合う。要はモデルが合っていないだけだ。今まではそういうことをやってきている。

回答：それはその通り。

コメント：エンジンのブレードの破壊、あれは明らかに線形では絶対に無理。非線形を入れて何とか全損まで至らないという設計で、実際に企業での構造設計はそういうレベル。今はいわゆる一般の連続体というものの考えではない。繊維強化プラスチックだとファイバーと樹脂の構造まで入れるし、粒界を入れたような解を使う。

回答：当たっていないというのは、あなた方研究者、もっと頑張れよと、今のよりもうまくいくようになったら、革新的に他国をリードできるぞということだと受け取る。

コメント：一つだけ先ほどの意見と違い、私はプリディクションに使いたい。設計制限の予測精度を上げるとか、どうしても材料強度についてはばらつきがあるが、それを製造条件と組み合わせて減らしていく、その辺にかなり伸びしろがある領域だと思っている。

回答：確率有限要素法などの手だてはあるが、マチュアになっているかというと、そんなことは全然ない。

4.5　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）

私は人間、人工物、自然が相互作用する複雑系を大規模なシミュレーションを通して課題解決に当たりたいと思っている。物理現象や力学現象については計算科学や計算力学、人間系や生命系については知的情報処理を組み合わせながら、モデルを作り、それを高速計算機で解くというアプローチとっている。今日の話は、そういう技術をものづくり系である CAE、あるいはそれを活用したバーチャル試作やバーチャル実証試験に展開するという話をしたい（図 4-5-1）。

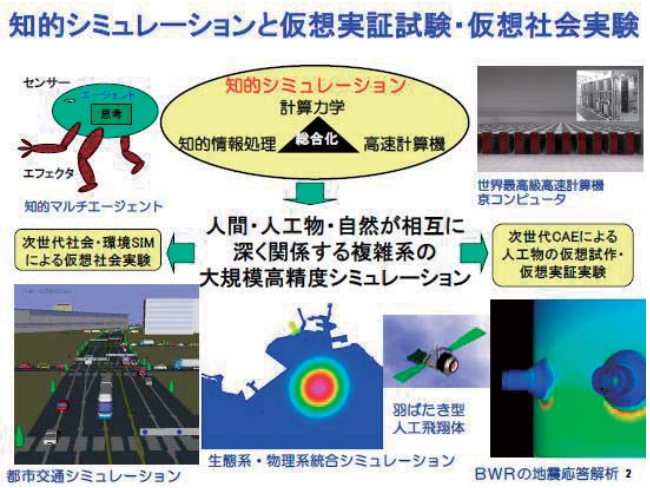


図 4-5-1

シミュレーションの中には色々な誤差要因がある。物理モデルの誤差、特に非線形項や連成項、あるいは固体であれば構成式等に入ってくる物理モデルの誤差があり、さらにそれを数値計算法で解けば数値計算の誤差もある。常にこれらを念頭に置いておかないといけない（図 4-5-2）。

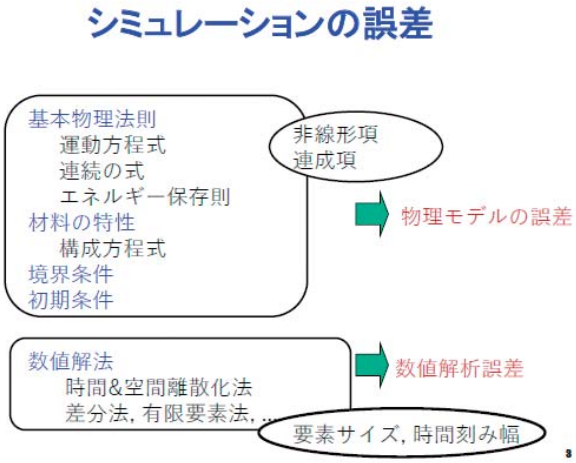


図 4-5-2

一方で実験はオールマイティかと言うとそういうことはなく、実際の現象を実験室に置きかえる中で色々なものをどうしても省略する可能性がある。そういう中で非線形項や連成項に関わる実験モデルの誤差、また、そこに測定法に絡む測定誤差がある（図 4-5-3）。

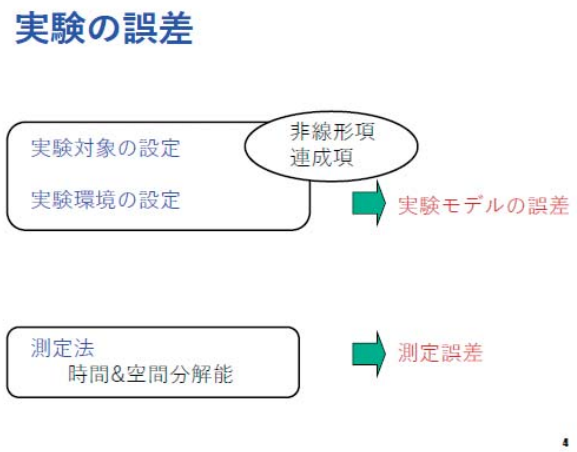


図 4-5-3

シミュレーションの開発プロセスとしてまとめると、基本的にはまずは解きたい実現象をよく観察して、それから適切なシミュレーションモデルや解法を構築する（図 4-5-4）。先にシミュレーションモデルがあってそのシミュレーションモデルが適用できる対象を探すというのは、実は研究者がよくやる過ちだが現実には必ずしも適切ではない。次にモデル実験でシミュレーションと比較する。しかし実験に誤差があり、シミュレーションにもさまざまな誤差があるので、誤差があるもの同士をどのように比較検討すればよいかということになる。この部分の研究は実際に活用していく上での肝になる。誤差を低減するようにモデルや数値計算、解析法を改良する。当然、その結果をベースに、実験に対しても色々な要求をしていく。その後、実験では不可能であったり、実証機を作ろうとすると大変なコストがかかったりするような部分をシミュレーションで予測する。先ほど店橋先生紹介の日本機械学会計算力学技術者認定事業もこういうプロセスについての基本的な知識を個人が獲得するための基盤として運営されている。

最近、Ｖ＆Ｖ（Verification & Validation）という言い方が色々なレベル、いわゆるマルチフィジックス、マルチスケールレベルでも要求されるが、理論・モデルのレベルの信頼性、アルゴリズムの信頼性、数値モデル特にデジタル化の信頼性、ソフトウエアの信頼性、そして入力データの信頼性を一つ一つ積み上げていく必要があるため、モデル開発と信頼性検証のある種のスパイラルプロセスが何よりも重要になる。またそういうスパイラルプロセスを実現するために、ある同一組織の実験と理論の担当者がクローズドな環境の中で進めていくというやり方はあるが、段々問題が複雑化してくると、当然、オープンな環境で少しずつ仲間を増やしていくというようなアプローチがないとうまくいかない。後者の場合には、お金がつくプロジェクト実施期間中は頑張って作ることはできても、プロジェクト終了後にその先の運用、利用の過程で色々な課題に直面することがあると思われる。

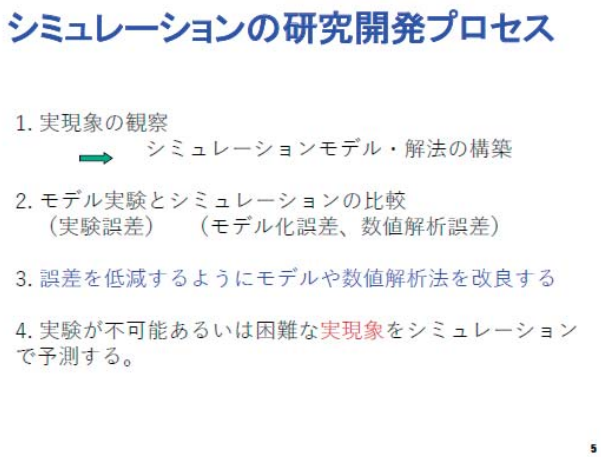


図 4-5-4

研究としての計算力学の具体的なターゲットをリストアップした（図 4-5-5）。これまでは精度を向上するために空間解像度と時間解像度を上げるべく「京」のような高速計算機を活用するという話があったが、他にも固体力学ということでいえば材料や幾何学的や境界、接触等の種々の非線形のモデル化がある。また、実際の構造の関係では、北村先生の話にも関わるが、接合部や溶接部等のモデル化が相変わらず大きな問題である。またダイナミクスの問題になると実は減衰がきちんとモデル化されていない。

様々なところで連成の現象が起こっており色々な課題がある。設計に比較的余裕があったときには構造だけ、熱だけ、流体だけ、燃焼だけというように分けられた。しかし今は例えば軽量化を狙っていくと流体との連成が起こってきたりする。

設計で活用しようとするときに、大規模・複雑な解析を自動化したり、あるいはそれを高速化するという考え方がある。一方で、設計で使う際にはどうしても色々なパラメータを振った計算があるため、今は例えば 1DCAE や Reduced Order Modeling という考えがある。また低自由度で高精度のモデル開発、設計用のモデル開発というのが言われているところであるが、単に低自由度なだけでもだめで、それがどれだけ高精度かというところがポイントになる。そういう意味では、大規模・詳細なシミュレーションモデルのシミュレーション結果からどのようにして高精度モデルかつ低自由度モデルの精度保証をするかというところが理論的にも重要になっている。

高速化という観点で、最近の HPC マシンを使いこなすための色々な工夫がある。我々は ADVENTURE というオープンソースのソフトウエアを開発しているが、これで福島の 1F1 の本震地の計算を「京」を使ってやっている。巨大データだが何とか計算ができるようになり、本震地の応答計算ができるようにまでなってきている。これは今、論文を書いて学術的な評価を受けようと思っている。ここでは、いわゆる大規模性であるとか形状の複雑さに関しては何とかそれを解くだけの準備ができてきているということをお伝えしたい。

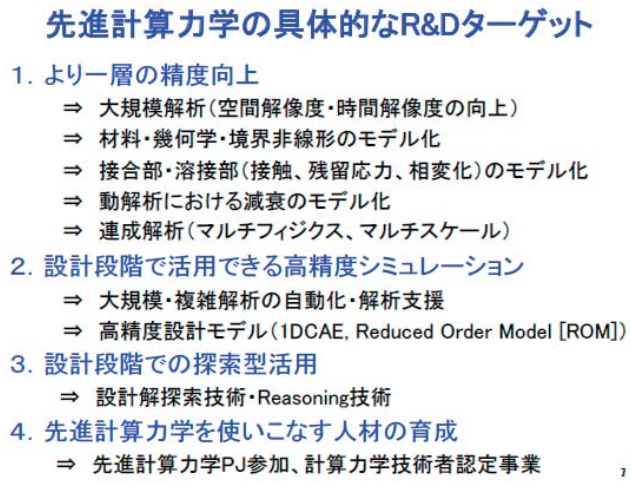


図 4-5-5

他方、いわゆるシミュレーターがあって実験装置があればそれですぐ済むということはない。実際には大規模な構造解析と小型の試験、それと実証試験をどういうふうに関係させながらモデルのレベルアップを図り、最終的に実機の予測に結びつけていけるのかということが課題である（図 4-5-6）。このあたりを単にバーチャルの世界とフィジカルの世界をくっつければいいという話にするのではなく、そこにもう一段階、スケール性や、色々な技術のコミュニケーションあるいはプロトコル的なところをきちんと定式化していくことが必要である。

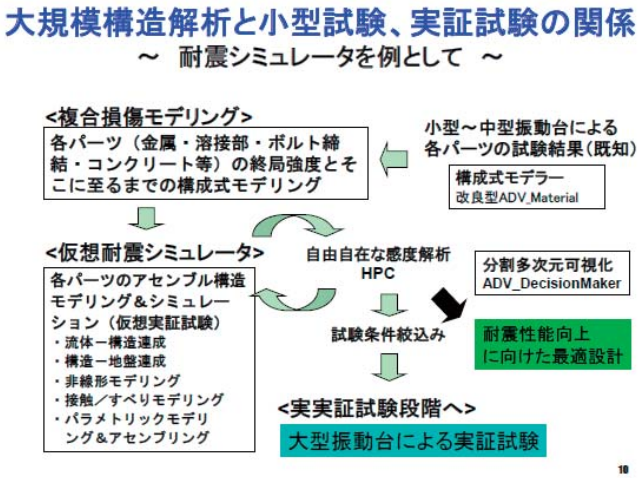


図 4-5-6

我々は HPC 環境で実機の連成解析をどのようにやるかということに随分前から取り組んでいる。先ほども話が出ていた燃焼系について、ポスト「京」プロジェクトの重点課題 6 の革新的クリーンエネルギーシステムの研究開発を担当している。その中でマルチフィジックスシミュレーションが重要な課題になっており、燃焼系のコードでは先ほどの FrontFlowRed-Comb と、我々の構造系の ADVENTURE を、いわゆる並列カプラーを使って、一般的にどのように連成して解くかという解析の準備も進めているところである。

それの意味するところを少しご紹介する。燃焼というと、当然、中のケミカルな反応で

あるとか、熱の現象に注目が当たるが、実はそこで発生した熱はどこかに伝わって、それをちゃんと冷却しなければいけない。そうすると当然、燃焼部周りの構造系の部分との熱の取り合いの問題がある。そこまで広げないと実は正確な熱的境界条件を設定できない。つまり、当然、全体としての熱的なバランスがとれていない中で燃焼部だけ計算だけしてもなかなか実現象と合わない。それを、例えば実験と燃焼部だけの計算結果をパラメータ合わせをするというのは結構大変であるため、そういった問題を同時に全系で解いてしまおうという発想で現在取り組んでいる。石炭ガス化炉に関して電中研の試験炉があるが、そちらのデータを機密保持契約のもとに提供いただいて、実際のＶ＆Ｖまで含めて解析を進めようとしているところである。（図 4-5-7）

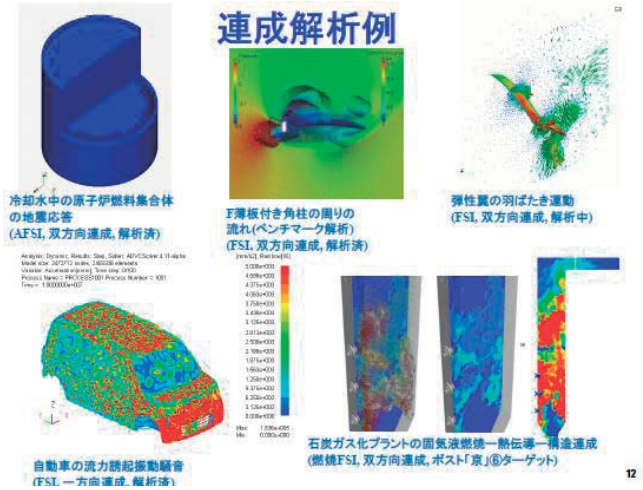


図 4-5-7

日本学術会議の中の「知の統合」に関する分科会において学術大型研究計画を検討した際､前々期ぐらいに､｢バーチャル Japan｣という提案を出した（図 4-5-8）。日本社会の色々な物理現象あるいは社会現象をシミュレーション世界の中につくり上げて、それにリアルワールドを双方向にインタラクションさせることによって、実際の社会の色々な課題をさまざまなステークホルダーの人に参加してもらってインタラクティブに解いていくと、必然的に色々な学術分野が統合していく環境ができるのではないかと提案した。しかし当時は日本学術会議の中でうまく理解いただけなかった。しかしデジタルツインの発想は基本的にこういう形にも進んでいくだろうと思っている。その次のスライドは今の話を少し抽象化したものである（図 4-5-9）。

最後に、日本が得意である、あるいは得意だったものについて私見を述べたい。私が感じるのは個人や比較的少人数の仲間が行う作業、ものづくり、システムづくりは日本は得意である。こういうものは極めてうまくいって、あうんの呼吸だとかノウハウだとか、伝習だとか匠の世界だとか、これはかなり放っておいてもうまくいっている。一方、日本人が不得意なものの共通性は何かと考えたとき、私が思うのは異分野の専門家が集まって行う共同作業やものづくり、システムづくりである。また異なる組織が集まって行う共同作業やものづくり、システムづくり、その中には文理融合的なものもあり、規格や標準づくり、あるいは私が専門としている大規模なシミュレーションソフトウエア、こういったものは日本あるいは日本人がかなり不得意なところではないかと思っている。デジタルツイ

ンをプロジェクトとしてスタートするときには、日本人がこういうことは不得意なんだということをあえて自覚しながら、具体的にそれをどうやって解いていくかという仕掛けも合わせて考えることが重要である。

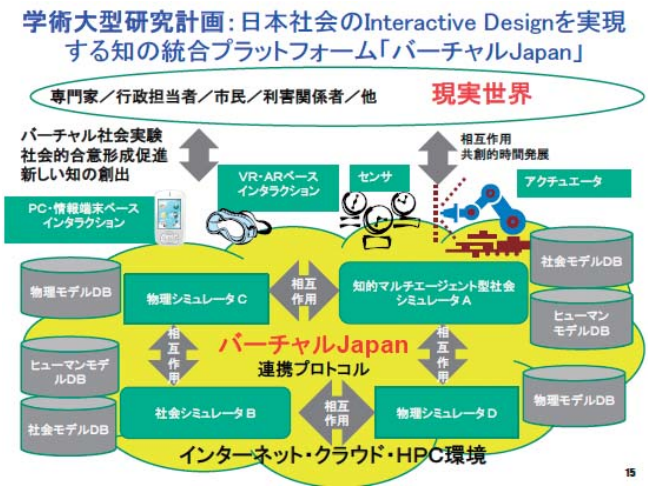


図 4-5-8

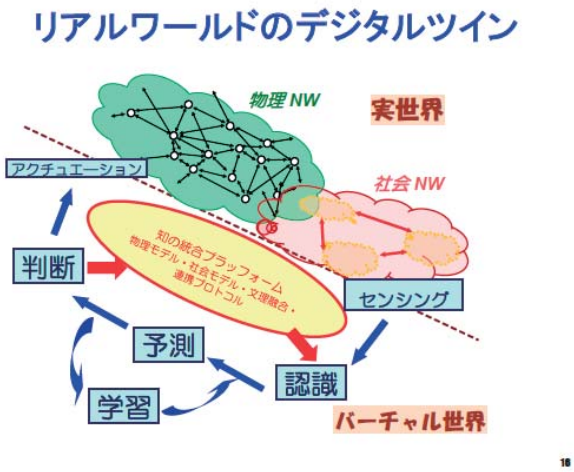


図 4-5-9

5. 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（JST-CRDS）

私のほうからは､研究開発プロジェクトの推進方法･体制の事例紹介をする。ワークショップの冒頭、大平から説明したように、本日は六つの論点を示しており、以下では、後半の研究開発推進方法、推進体制、人材育成に関しての事例紹介ないしは話題提供をする。

プロジェクトの研究開発推進方法を考える際、STI 政策の過去 20 年ぐらいの流れを科学技術基本計画から見てみる。第 1 期基本計画では、政府研究開発投資の拡充、それと同時に競争的資金拡大、産学官の人的交流の促進が行われたが、その後、第 2 期、第 3 期基本計画では、重点 4 分野が設定されるとともに競争的資金が大幅に拡大し、産学連携の強化も推進された。2000 年前後に国内外でイノベーションという言葉が盛んに言われ始め、第 4 期からは科学技術イノベーションの一体的展開という理念のもと、STI 政策が行われ、課題達成型の重点化へと政策がシフトしてきた。こうした流れを踏まえ、現在、第 5 期基本計画の中で、ソサエティ 5.0 に代表されるようなさまざまな施策が進められている（図 5-1）。

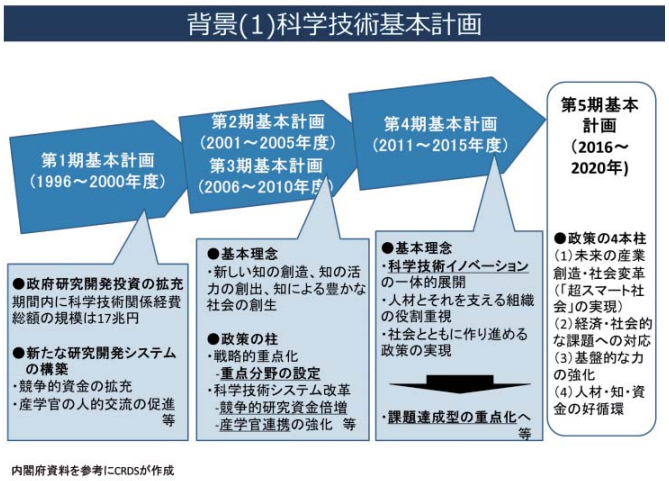


図 5-1

こういった政策の動きを受けて、公募型の資金がどのような形で変遷してきたのかを考えてみたい。一つには、競争的資金がふえたことにより、さまざまなプロジェクトが創設された。そして、もう一つは従来、基礎研究を指向したプロジェクトが中心であったのが、イノベーションを指向したプロジェクトが多数、創設されてきた。（図 5-2）

では、こうしたイノベーションを指向したプロジェクトの推進方法が、どういう形で行われているかを考えてみたい。イノベーションを指向したプロジェクトでは、研究者ないしは研究室で行われていた研究から、公的研究機関、企業、大学等、学協会との連携が非常に重要な意味を持つと同時に、1 社のみならず複数の企業の参加が重視されるようになっている。こうしたプロジェクトの推進体制としては、大きく二つあると考えており、拠点を形成とネットワークの創設である。

拠点形成型に関しては、人材、資金、インフラを集積させることによって事業を進め、例えばCOIや先端融合のような事業である。このメリットは、学際・融合分野が推進されたり、大学等の固有の強みの形成にもつながるという点であるが、多額の資金を必要としたり、物理的なインフラが存在するため、終了が難しい場合もある。

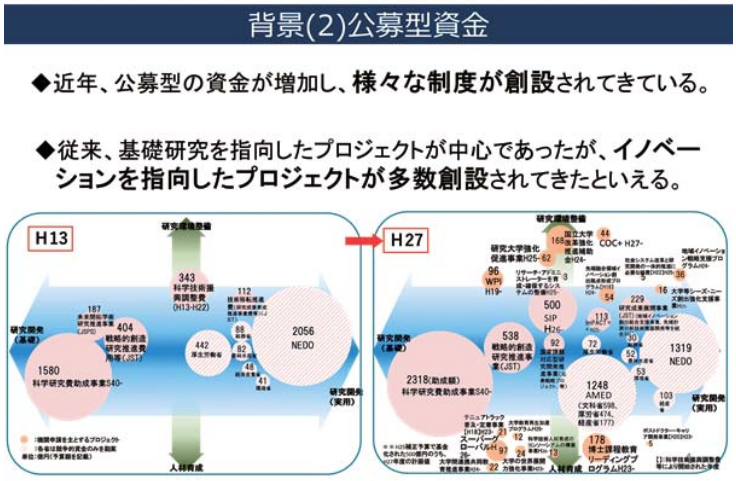


図 5-2

一方で、ネットワーク型は、研究ネットワークを創設し、研究プロジェクトを共同で実施し､例えばSIPなどが相当する。物理的なインフラが必要ないために､少額でネットワークを構築することができる一方で､事業終了後､インフラがないため､結集力が弱いといったデメリットもある（図 5-3）。

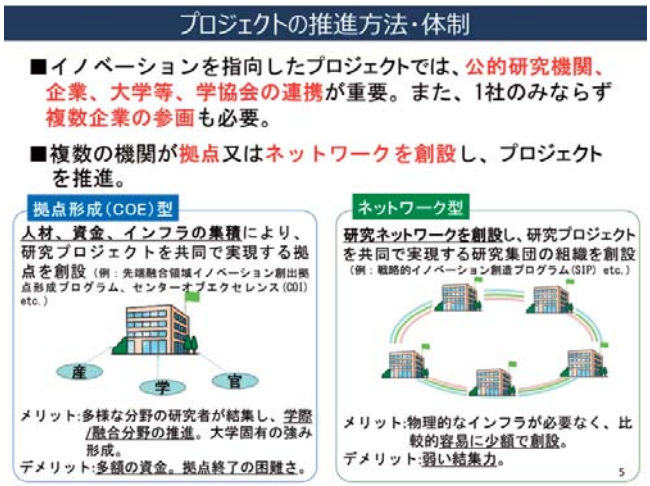


図 5-3

こういった拠点形成ないしはネットワークにより、プロジェクトが進められる中で、革新的デジタルツイン実現に向けた推進体制について考えてみたい。本プロジェクトを進める大きなコンセプトは、デジタルツインの技術である、研究開発課題および、それを支える先進設計、製造基盤技術の両方を確立する必要がある。そのためには、企業、公的機関、大学等、学協会の連携体制を適切に構築することが必要であると考えている。そして、創

設した連携組織において、プロジェクトの成果物を一元的に管理・運営していくことができると考えている。ただし、この連携は、産業界、アカデミア、工学系学協会などと協議しながら進めていく必要がある。

ここまでは、推進体制のコンセプトを示したが、より具体的なイメージ例を示したのが次のスライドである。まず研究開発課題ごとの拠点を創設し、その拠点内で研究開発課題例に取り組むと同時に、関連する基盤技術も推進する。その際には、公的機関、企業、学協会､大学等の組織と連携しながら進めていくことも重要であるということを考えている。さらに、各拠点に、基礎科学、社会実装、人材育成の同時達成を図り、かつマネジメントする PM を選定し、置くことが重要である。

もう一つ、各拠点、研究開発課題に取り組むわけだが、その中の統合化モデルを行う拠点では、全体をマネジメントし、そして、拠点間の連携を図る。つまり、今回の構想では、拠点形成と同時に、研究ネットワーク構築にも取り組むことを示している（図 5-4）。

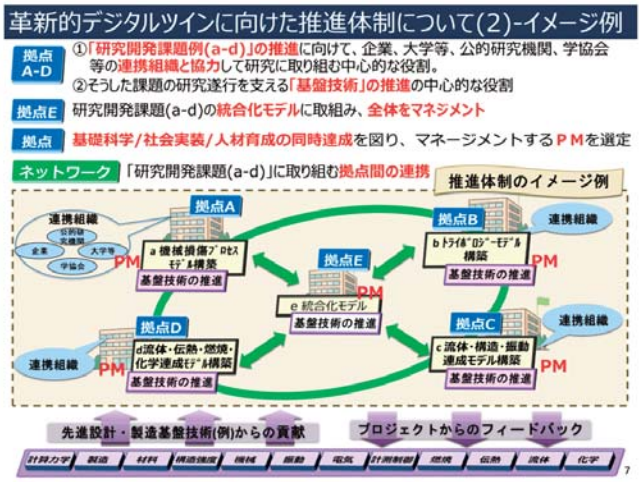


図 5-4

ここまで推進体制の概念とイメージを紹介したが、以下では、関連する 3 つのプロジェクト例を紹介する。SIP の革新的燃焼技術。それから、文科省の省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発プロジェクト、米国の NSF の ERC である。

SIP の革新的燃焼技術では､当該技術の持続的な産学連携体制の構築を実現し､世界トップクラスの内燃機関研究者の育成、省エネ、CO_2 削減及び産業競争力の強化の寄与を目指して進められている｡この中では約 80 の大学が終結し､四つのチームが構成されている。各チームの組織体制は、リーダー大学と、そのリーダー大学と連携する大学と企業である。そして、これとは別に関連企業群である、AICE（自動車内燃機関技術研究組合）と連携して進められており、この点が非常に特徴的である。

この AICE について説明すれば、2007 年ごろから複数企業が協力体制を検討し、2014 年に SIP の創設をきっかけに設立され、現在、9 企業 2 団体から構成される技術研究組合である。SIP 側の四つのチームの、ミラー組織が存在している。そして、各組織が、企業のニーズや戦略などの助言を行っており、お互いに連携を図りながら進めている点も非常に特徴的である。

資金規模は、年間 20 億円、1 チームがおおよそ 3 億円から 6 億円程度である。実施期

間は最長５年間で、来年度に終了予定だが、産総研を事務局としたコンソーシアムが既に創設されており、終了後もここを中心に持続的な体制を維持する枠組みができている。本コンソーシアムは 100 程度のアカデミアの研究室の連合体で､AICE は特別会員となり、業界ニーズをコンソーシアムに伝えると同時に、運営費をサポートしている。

ここでのポイントは、継続的に事業を進めていくコンソーシアムが創設され、企業群である AICE と大学の連携がうまく図られた点である。ただし、事業の初期段階においては連携が容易ではなく、PM、両者をつなぐ人材といった方々の存在が非常に大きな役割を果たしたと聞いている。一方で、成果物のソフトウェアの管理と維持･発展、それから、取得データの管理を、どういう形で進めるのかが課題として上がっている（図 5-5）。

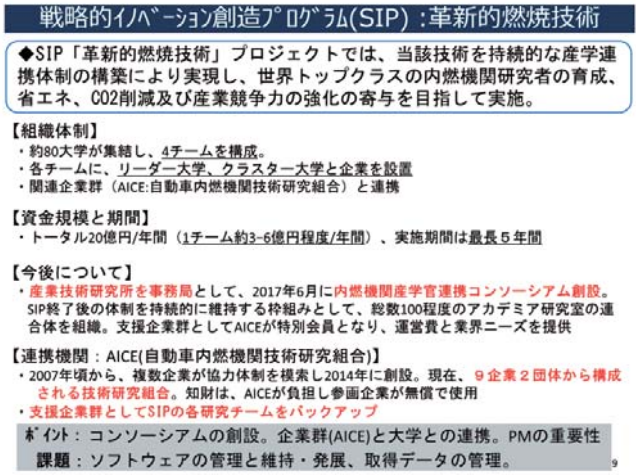


図 5-5

文科省の省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発プロジェクトでは、理論、シミュレーションを活用した次世代半導体の研究開発を一体的に加速することが行われていて、その中では産学官が結集した研究開発拠点の構築が、進められている。このプロジェクトでは、中核拠点と二つの研究領域を実施する拠点がある。これらの三つの拠点がそれぞれの分担連携機関を有して、プロジェクトを推進している。中核拠点は年間 6 億円程度、研究領域の拠点は 2 億円程度を支援されており、実施期間は 5 年間である。

ここでの特徴的な点は、先ほどの SIP ではプロジェクトが立ち上がることを契機に AICE が創設されたが、このプロジェクトでは、プロジェクト開始前の 2015 年に、企業、大学､研究開発法人が参画して GaN 研究コンソーシアムが設立している。ここで研究テーマや課題について議論し、それを踏まえてこのプロジェクトが創設され、先ほどの SIP とは異なるが､議論する体制が重要な役割を果たしている。今後､この GaN 研究コンソーシアムは、パテント申請、パテントプールの実施を目指して、現在、技術研究組合の設立を予定している。また､プロジェクトのポイントは､GaN 研究コンソーシアムが創設され、この中でさまざまな議論が行われたということである。ただし、プロジェクト自体が基礎寄りの研究テーマを実施しているということもあり、企業の参画や産業化については今後の課題である（図 5-6）。

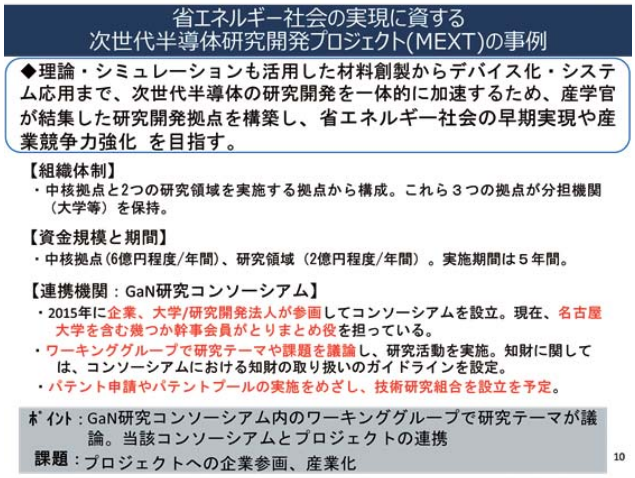


図 5-6

ここまで日本のプロジェクトを説明したが、最後にアメリカの NSF の ERC プロジェクトを紹介したい。ERC プロジェクトは、1985 年に創設されたプログラムである。1980 年代、アメリカは製造業の国際競争力が低下しており、そういった背景から、アメリカは統合化技術を最終目的とし、実用化まで一貫して行うプログラムを創設している。このプロジェクトの特徴は、知識基盤、技術基盤、それから統合化技術という三層構造の研究戦略の枠組みである（図 5-7）。

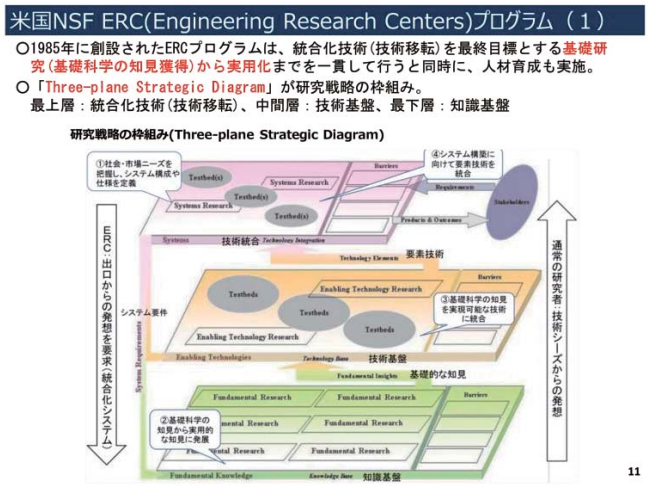


図 5-7

現在、このプロジェクトは、四つの支援分野があり、先進製造、バイオテクノロジー・ヘルスケア、エネルギー等と電子機器、センサー、情報技術についてである。18 センターを支援し、先進製造分野では二つセンターがある。一つはイリノイ大学が中心となって進めているセンターで、五つの連携大学、企業が参加している。もう一つのセンターは、テキサス大学が中心になって進めており、二つの連携大学が存在している。

なお、特徴的な点は、公募要領に、連携大学は最高 4 校までで、そのうち 1 校は多くのマイノリティ学生が工学部の大学であるということが明記されていることである。また、1 センターの支援額は 400 万ドルで、おおむね 4 億円程度である。支援期間は通常 10 年

間で、9 年目、10 年目に関しては前年比の 33％減で、ソフトランディングを意識したプログラムになっている。それから、センターの運営資金に関しては、ERC から 4 割、その他の競争的資金が 4 割、産業界と大学からもそれぞれ 1 割ずつと、運営資金の財源は多様である（図 5-8）。

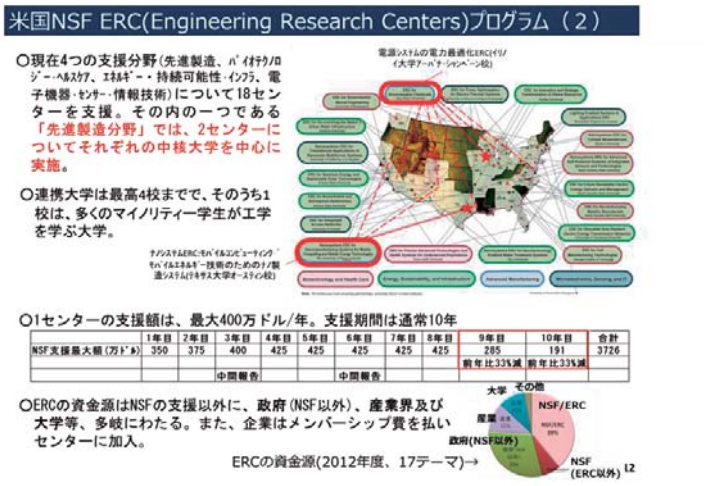


図 5-8

最後に、ERC プロジェクトの都市水利用システムの再構築センターを紹介したい。スタンフォード大学内にセンターが設けられ、水不足の問題解決に向けた課題に取り組んでいる。連携大学は、カリフォルニア大学バークレー校、コロラド鉱山大学、ニューメキシコ州立大学と水供給企業などと連携している。教員 30 名、学生 100 名で、予算規模は 900 万ドルである。予算の内訳は、400 万ドルを ERC プロジェクトから、大学本部から 130 万ドル、競争的資金 80 万ドルと、企業からも資金を得ながら運営している。

実施内容は、水再生システム等を研究テーマとして行い、NSF の人材育成のプログラムを活用して、学部学生のための体験学習等を実施している（図 5-9）。

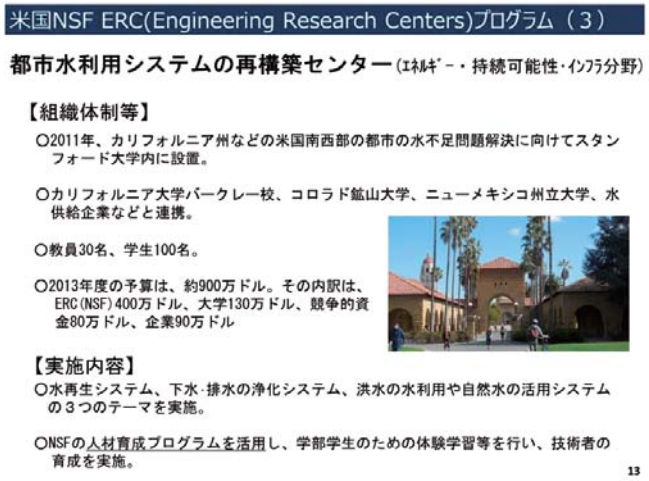


図 5-9

6. 総合討議

総合討議では、下記の具体的論点に関して議論を行った。以下に論点毎に分類した発言内容を示す。

①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について

【論点 1】研究開発課題の構成はどうあるべきか。
－構築すべきモデル、取得すべきデータは何か。データをどのように取得するか。

【論点 2】参画企業の協調領域と競争領域の課題テーマをどのように切り分けるか。
－産学が一体となった研究開発課題をどのように設定するか。

【論点 3】統合化モデルは誰がどのように構築するか。

②研究開発推進方法、推進体制、人材育成について

【論点 4】運営体制、研究実施体制はどのような形が望ましいか。
－産学官の役割を踏まえ、ネットワーク型の産学連携コンソーシアム創設をどのように進めるべきか。
－社会実装に向けた産学官連携の現状課題は何か。組織の壁を超えた連携に何が必要か。
－創設された産学連携組織の継続的な運営をどうすべきか。

【論点 5】プロジェクト成果物とその管理はどうあるべきか。
－成果物の帰属とその公開 / 利用はどうあるべきか。

【論点 6】研究開発における人材育成をどうすべきか。
－若手の研究人材育成はどうあるべきか。
－参画研究者のインセンティブをどのように保つべきか。

【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

◇研究開発課題を絞り込むには、業界団体や学会などと、どういう産業分野に国が注力するか、産業界のニーズも含めてデジタルツインのどういうところに注目するかという議論から始めるのが大事だ。今回は機械系の課題が中心だが、実際に研究開発を進めていくと化学、材料、電気などの課題も関係してくるのではないかと考える。

◇研究開発課題の大項目は「何々に関するデジタルツイン」とすべきだ。力学を使う機器の設計、製造にかかわるため、「力学基盤に関するデジタルツイン」ではどうか。

◇対象にする業界や製品を明示的に特定するような形がよいか、また、仮説で提示している課題 a-e のみでよいかどうか、さらに議論が必要である。

◇ EU の技術プログラムではライフサイエンス系も含めている。EU では認証のバーチャルテスト化をやっているように、標準化戦略と組み合わせて考えることも重要である。

◇課題 e［a ～ d 統合化モデル（デジタルツイン）構築と検証］は、他分野への展開もできるよう、もう少し柔軟性のある課題設定になるようにしてはどうか。

◇統合する前段階における「デジタルツインの基盤技術の開発」が、課題 e に取り組むために必要になるのではないか。

◇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」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り、「学」が担当してはどうか。何れも、センシング技術の並行開発が必要である。
◇「デジタルツイン」はあくまでも手法であり、目的ではない。今回、提案の「研究開発課題」例は手法中心で、日本の立ち遅れている「先進設計･製造基盤技術」推進のテーマとしての選定検討が必要だ。また、今までの延長線上には答えが無いテーマ選定が必要。テーマの一例として、例えば、産業基盤としての中小製造業を含めた日本独自のデジタル化業務プロセス変革やカイゼンなどはどうか。

【論点 2】協調領域と競争領域の課題テーマ切り分け

◇産業界には協調領域、競争領域を分けて考える習慣がないので難しい論点だ。解けない問題があるからこそ協調してやるという考え方と、だからこそ競争するという考え方がある。
◇現象論まで遡り、現状レベルよりはるかに困難なレベルでのモデル化などに課題を落とし込むことにより、課題を共有しやすくなる。このような参画企業共通の技術課題があれば、協調領域になりうる。日本が世界に勝てる領域で、基礎的なテーマを協調領域として設定するのがよいのではないか。基礎の理解が最終的に競争力につながる。
◇解析ソフトは協調できないが、基盤ソフトは協調できる。例えば CAD ソフトは自動車会社各社が一緒になって Windows で使えるようにしたことがある。また、熱平衡プログラムで言えばエドワーズのようなものを見つけられるとよい。
◇メーカーが 10 年後、20 年後も必要になるようなものについてはぜひやってほしい。

【論点 3】統合化モデル構築

◇ A と B と C というサブシステムをつなぐための統合化モデルを考えるとき、統合化モデルが A、B、C の自律的な発展を常に吸収できるようなメカニズムや仕組みを持っていないと､すぐに陳腐化する。A と B と C それぞれを担当するソフト会社 3 つが協調し、情報を提供しないとうまくいかない。いわゆるプロトコルをどういうふうにするか、そのときの統合化モデルの基準はどうするかを考えて、それなりの日本スタンダードをつくり、国際的にも展開できるようなものを中長期的な視点で構築すれば非常に価値がある。
◇いろいろなモデルを統合化するということであればインターフェースの標準化が必要。まずは世界標準のものが使えるかどうかを確かめる必要がある。国産のものを作るならそれが世界標準と合うかどうかを検討すべきだ。
◇統合化モデルの骨格は、実際に使う人＝「産」が作るのがよく、各専門分野でのモデリングは、現象論に近い人＝「学」が作るのがよいではないか。
◇統合化モデルを公的な機関でいつまでも維持するというのは難しく、サービスを継続させるソフトウェア会社が受け皿になるべきだ。
◇世界に伍する領域において､「学」の提案する技術の将来像を踏まえ、最終的なユーザー

である「産」の意見を踏まえ、両者で統合化モデルシステムの仕様を設定するのがよい。

【論点 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）

◇現状、大学は、かなり手一杯になってきているため、大学のどこかに新たに拠点を作るとなると人的リソースを確保できるようにしないと厳しい。
◇拠点化は必要。欧州だとトライボロジーはリヨン、燃焼はアーヘンというように、拠点の所在が明らかでそこの大型施設を使えたりするというのはよい。
◇今ある組織の一部を活用するのがよく、いくつかの大学等がゆるい連合体を作って拠点になるのがよいのではないか。一方、革新的燃焼 SIP の仕組みのように、企業内にラボが作られ、しっかりしたデータ取得も行っている例もある。ただし、そこにも人的リソース確保は不可欠ではないかと考える。
◇趨勢として大学の拠点化は今後進んでいく方向だと思われる。そういう流れの中で今回のテーマに沿った拠点化もやっていけるかどうかがポイントではないか。あと、マネジメントする仕組み構築が鍵である。
◇人材育成の観点も踏まえるとプロジェクト中の 5 年＋プロジェクト後の 5 年も見据えた拠点の検討が重要である。プロジェクト後は、産業界のニーズテーマと拠出費用で継続すればよい。
◇現在の日本の学会には活動予算と人事権がないことが問題。ただし、人材や知の集積というアドバンテージを活かした学会活用もあるのではないか。英国の事例（MTC：Manufacturing Technology Centre）を参考にしてはどうか。
◇官は、イノベーティブな研究要素を随時取り入れるフレキシブルな運用・連携の環境を整えてはどうか。中間レベルでの実用化率を増やすことが連携の活性化に有効と考える。

【論点 5】プロジェクト成果物とその管理

◇成果の管理は、ある程度、体力（人数規模など）のある組織がやらないともたないのではないか。
◇学会がその役割を担えるのかどうか。できないのであれば、学会に託すことにこだわらず、個別に有志が集う組織（法人格をもつ技術研究組合や株式会社等）を別途作るほうがよいのではないか。
◇成果物の帰属・管理は開発者（団体）として、継続的な精度・レベルの維持向上を図ることが重要。
◇基礎研究（理論、解析、実験）への投資から国産モデルを開発し、統合的国産解析プラットフォームを整備してはどうか。アカデミアのモチベーション維持や、アカデミアと企業が共通の言葉を共有してコミュニケーションを図れるメリットから国産コードの開発も有効ではないか。
◇コードに関しては、例えば世界標準になっている CHEMKIN（反応解析ソフトウェアパッケージ）というのがある。CHEMKIN Ⅱまではオープンソースで、いろいろ修正することができたが、CHEMKIN Ⅲになってからサンディアが国の指導もあったりしてクローズになった。一切、中がわからず、修正できなくなってしまった。それまでは、

実はCHEMKINのオープンソースになっていたものが、非常に基礎研究にも役に立っていた。オープンになるかどうかと考えたときに、外国製はまず絶対にあり得ないと思う。日本で我々がつくるから、オープンで中を見るし、中を修正できる。ここは、開発にとっては重要な部分だ。我々がこういうプロジェクトを実施する中で、基礎現象に立脚したモデルをそこに入れて、それをさらに人材育成された方々が操作できること、こういったものも企業、大学と共同でできることが結構、大事なことではないか。

◇新たなシミュレーションソフトウエアは、各組織が現状使用中のシステムに組み込み、活用できる形で公開してはどうか。I/Oを予め規定し、欧米のシミュレーションツール*との組合せも可能としてuser-defined-function的にユーザーが活用できるようにする。
*既に高度なレベルにあり、これらを活用しつつ、新たな機能・高度な機能の付加を目指すことが現実的と考える。

【論点6】研究開発における人材育成

◇こういうプロジェクトを通して、大学院教育、あるいは企業の若手研究者、技術者の人材育成で、大学と企業がいわゆる連携しながら人材育成に取り組むのは非常にいい機会になる。そういう方向の人材育成が近年欠けており、このような人材育成とそこで活躍する人材の評価軸もあわせて議論する必要がある。

◇若手の人材育成では、「学」と「産」の連携は特に重要と考える。ニーズと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どんどん実用化していくことが、刺激とモチベーション維持につながる。実用化事例に対し、研究費ボーナスを与えることはインセンティブにつながるかもしれない。

◇SIP革新的燃焼で実施されているように、学生のプログラムテーマ実施成果に対する報償制度をもうけてはどうか。

◇中堅教育者の議論が十分に行われていないのではないか。米国には米国オーディオ技術学会（AES）という工学分野の教育について議論する大きな学会がある。移民も多いため高等教育での人材育成に力を入れた例がある［STEM（科学・技術・工学・数学）教育］。

◇一方、研究と人材育成は異なるタイムスパンを持っているため、プロジェクト実行と人材育成は、一緒に考えない方が良いのではないか。

◇プロジェクトによる成果をもとにした機械工学系の4力（材料力学、機械力学、流体力学、熱力学）の教科書の見直し、および3次元設計学構築活動推進が必要である。

7. まとめ

7.1 発表の主な論点

招聘者 10 名による発表から今後必要になると考えられる研究開発課題内容を、趣旨説明で提示した具体的な研究開発課題ごとに、以下の通り整理した。（敬称略）

＜研究開発共通課題の概要＞

a　機械損傷プロセスモデル※構築と検証

機械損傷プロセスモデルでは、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（北村）、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及び、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。

※ 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、既存の流体現象では、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

トライボロジーモデルでは、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（綿貫）。

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（吉村）などが課題となる。

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（小林）、伝熱・熱伝達（店橋）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

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（藤森）。

＜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、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。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も課題となる（小豆畑）。

（2）ガスタービン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、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。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研究開発も課題となる（伊藤）。

（3）蒸気タービン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、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。

（4）自動車を例とした研究開発イメージ

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いる。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（内田）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。

（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・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。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（家城）。

なお、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。

7.2 総合討議

討議における主な意見は以下の通りである。

①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について

【論点 1】研究開発課題の構成はどうあるべきか

・研究開発課題の大項目は、力学を使う機器の設計、製造にかかわるため、「力学基盤に関するデジタルツイン」ではどうか。統合する前段階におけるデジタルツインの基盤技術開発も必要。コンセプト確認のためのマクロデータは実機での計測が必要であり「産」が担当し、現象確認のミクロデータは厳密な実験装置で「学」が担当してはどうか。

【論点 2】参画企業の協調領域と競争領域の課題テーマ切り分け

・課題を現象論まで遡り、現状レベルよりはるかに困難なレベルでのモデル化などに落とし込むことにより、参画企業が課題を共有しやすくなり、協調領域の共通の技術課題として切り分け可能である。日本が世界に勝てる領域で、基礎的なテーマを協調領域として設定するのがよいのではないか。基礎の理解が最終的に競争力につながる。

【論点 3】統合化モデルは誰がどのように構築するか

・骨格は実際に使う人である「産」が担当し、各専門分野モデリングは現象論に近い人である「学」が担当してはどうか。

②研究開発推進方法、推進体制、人材育成について

【論点 4】望ましい運営体制、研究実施体制

・ネットワーク型拠点化は必要。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重要である。ただし、大学はかなり手一杯になってきているため人的リソース確保も大切である。

【論点 5】プロジェクト成果物とその管理

・成果物の帰属・管理は開発者［産学官の有志組織（コンソーシアム等）］として、継続的な精度・レベルの維持向上を図ることが肝要である。

【論点 6】研究開発における人材育成

・若手の人材育成では、「学」と「産」の連携は特に重要である。ニーズと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が、刺激とモチベーション維持につながる。

付録

付録 1：プログラム

（敬称略）
司会　大平　竜也（JST-CRDS）

11：00 ～ 11：05　開会挨拶　佐藤　順一（JST-CRDS）
11：05 ～ 11：20　ワークショップの趣旨説明　大平　竜也（JST-CRDS）

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
（各講演 15 分 + 議論 5 分）
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り組みと今後の技術シーズ展望（各講演 15 分 + 議論 5 分）
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（講演 15 分 + 議論 5 分）
松尾　敬子（JST-CRDS）

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（JST-CRDS）
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（JST-CRDS）

付録２：参加者一覧

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

JST-CRDS 先進製造基盤技術チームメンバー

佐藤　順一	上席フェロー・チーム総括責任者（環境・エネルギーユニット）
大平　竜也	フェロー・チームリーダー（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）
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）

関係府省他（当日参加者及び事前登録者）

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
竹内　渉	内閣府 政策統括官（科学技術政策・イノベーション担当）付 参事官付（エネルギー・環境担当）上席政策調査員
福島　崇	文部科学省 高等教育局専門教育課 企画官
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
三上　建治	経済産業省 製造産業局 製造技術戦略室 室長
大塚　亮太	経済産業省 製造産業局 製造技術戦略室 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

JST

尾山　宏次	CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー
松田　一夫	CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー
松本　麻奈美	CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー
古賀　明嗣	環境エネルギー研究開発推進部 部長
嶋林　ゆう子	環境エネルギー研究開発推進部 副調査役

■ワークショップ企画・報告書編纂メンバー■

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）
髙橋 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）

※お問い合せ等は下記ユニットまでお願いいたします。

CRDS-FY2017-WR-09

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

～デジタルツインを支える先進設計･製造基盤技術～

2018年３月　March 2018

ISBN 978-4-88890-580-0

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
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　K's 五番町
電　　話　03-5214-7481（代表）
ファックス　03-5214-7385
http://www.jst.go.jp/crds/

©2018 JST/CRDS

許可なく複写・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.

ISBN 978-4-88890-580-0