

# シミュレーションを遂行する力

## COMPREHENSIVE ABILITY IN SIMULATION TECHNOLOGY

小林 卓哉<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. (機械工学) 株式会社メカニカルデザイン代表取締役 (E-mail:koba@mech-da.co.jp)

工業製品の複雑化に伴ってその設計に必要な能力は近年大きく変化しつつある。特に企業の設計シミュレーションにおける課題は、(1) 力学そのものの深化に伴いより専門的な知識が求められること、(2) 人工物の複雑化に対応した分野横断的な知識と人材が求められること、(3) 自然災害などから旧来の科学観の見直しが迫られていること、の3点ほどに要約できる。本稿では欧日で行われたアンケート調査の結果を対比させると共に、ASME V&V など最近の動向を踏まえ、これらの課題に対する国内の現状を分析した。情勢の変化は速く複雑さも増すばかりであるので、課題の解決を安易に期待することはできないが、シミュレーションという新しい思想を通じて、困難に正面から向き合うための糸口を提示した。

**キーワード：**シミュレーション、有限要素法、CAE, Verification & Validation.

### 1. はじめに

シミュレーションという技術は、大規模な複雑系の中から難しすぎもしない簡単すぎもしない中庸なシステムを取り出し、その一部をより簡単なシステムで代替させることによって物事の本質を見きわめる試みである。今日、このような試みが計算機上で手軽に実感できるようになると、理論、実験、生産技術といった従来の設計手法を区分してきた壁が低くなる。またシミュレーションという考え方の方向性が、製品市場の動向によってこれまで以上に左右されることがありえる。今日、数万点を超える部品数を持ち、マイクロとマクロの複合など学問分野を横断する複雑性をもった工業製品は決して稀ではな

い。シミュレーションを、単に学術的な側面だけで支えることは難しい時代になってきた。製造業における解析が、その大半を商用ソフトウェアに依存している現実を踏まえ、その動向を分析した結果を報告する。

### 2. 解析から計算へ

Fig.1<sup>1)</sup>は、構造系のシミュレーション技術の発達を、計算機の発達と産業構造の変化に関連付けて表した図である。横軸を西暦に取って国内の状況を見たとき、1950年代から60年代にいたる20年間は、高度経済成長期と呼ばれた時代である。この時代は古典的な応用力学の完

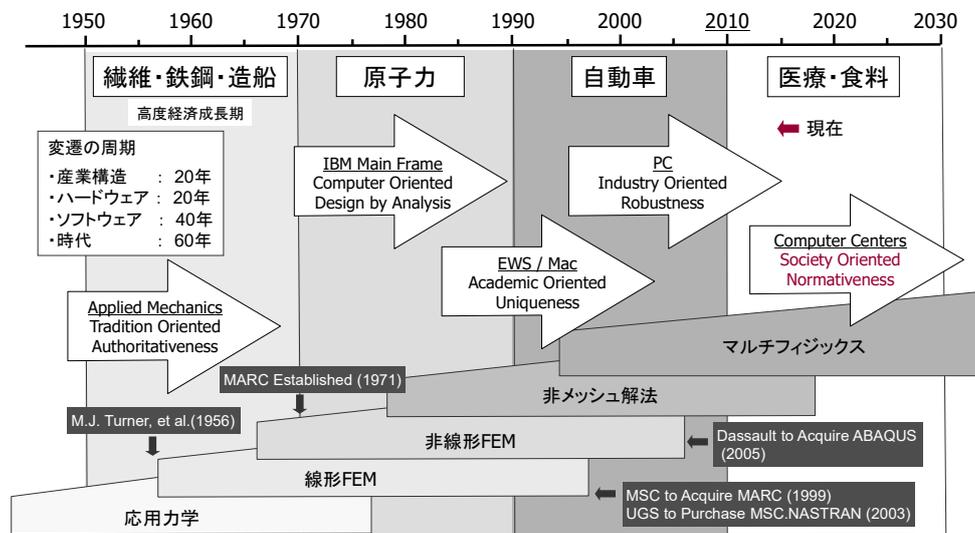


Fig.1 産業構造の変化とシミュレーション技術の発達<sup>1)</sup>

成の時期に一致する。工学の手法がさまざまな工業規格として権威化され、鉄鋼・造船といった基幹産業に適用された。ISO の設立は 1947 年、また JIS 規格の発足は 1949 年である。設計の標準化という概念が国内で成立した時代であった。1970 年代には IBM に代表される大型計算機が実用化された。当時現れたばかりの有限要素法（以下 FEM）のなかに、弾塑性や超弾性の概念が既に搭載されていたことは注目に値する。1983 年に発行された広辞苑第三版<sup>2)</sup>には、シミュレーションという用語が初めて掲載され、「システムの挙動をこれとほぼ同じ法則に支配される他のシステムによって模擬すること」という定義が明確に示された。原子力産業を中心に、(規格による手計算ではない) 解析による設計・Design by Analysis という概念が提唱された時期でもあった<sup>3)</sup>。

80 年代の中盤には、UNIX 環境で動作する EWS が市場に投入された。UNIX 機がもたらしたのは計算の高速化だけではない。グラフィックスを通じて、計算結果をリアルタイムに可視化する技術が提供された。同時期に Macintosh が現れたことを思うと、可視化は単に視野の問題を解決したにとどまらず、計算機の運用そのものを変化させたと言えることができる。計算機とユーザ、あるいはユーザ同士の意思疎通が相互補完的になり<sup>4)</sup>、試行の反復が容易になったということである。この時期、接触や連成を含む高度な非線形問題の解法が先を争うように実用域に入った<sup>5)</sup>のは、この経過に負うところが大きい。アカデミックを志向し、独自性を競う時代であった。

標準化という枠組みを越え、製品をシステムとして見るという方向に設計が変化していったのはこの時期ではないだろうか。CAE という用語<sup>6)</sup>が 70 年代後半に現れたのは、この事情を反映している。実際、管理可能な部品点数は、この時期を境に飛躍的に増加したはずである<sup>7)</sup>。「計算」という量が、設計の質を改変したと言えることができる。今日、理論や解析ではなく、「計算」を前面に押し出して設計を行うという新しい思潮が現れても不思議ではない。

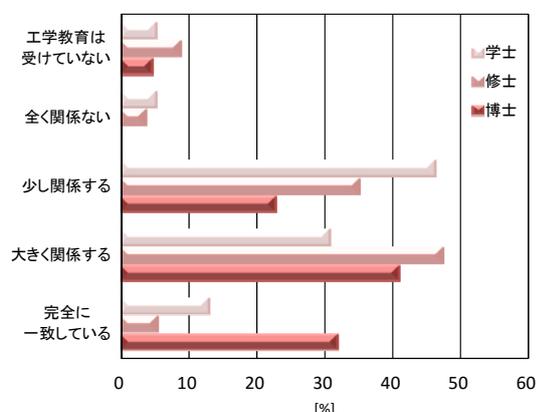
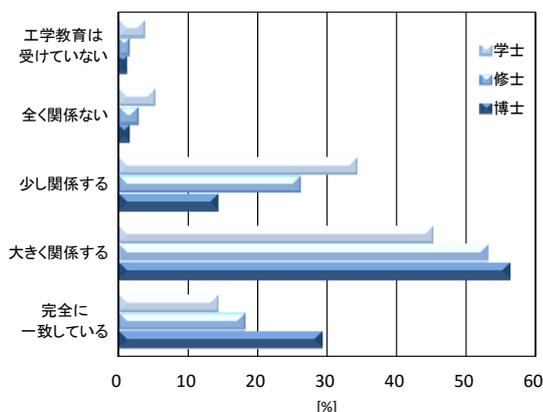
### 3. 欧日アンケートに見る動向

現在の製造業におけるシミュレーションの動向を、アンケートの結果から見てみよう。欧州を拠点とする EASIT2 という組織の調査結果<sup>8)</sup>を参照して、国内の状況と比較した結果を Fig.2 から Fig.5 に示す。EASIT2 (Engineering Analysis and Simulation Innovation Transfer) とは、シミュレーション技術の改革を目的として、欧州の大企業グループ（電力・e.on, 航空機・EADS, 自動車・Renault ほか）が提供するプロジェクトである。調査は 2011 年に NAFEMS<sup>9)</sup>のネットワークを通じて 28,000 人に配信され、欧州と米国を中心に 50 ヶ国、1094 人の回答を集めた。同年、特定非営利活動法人・非線形 CAE 協会主催の第 20 回記念シンポジウム<sup>10)</sup>において、同等の調査が国内で試みられた。回収数は約 120、参加者の年齢・経験などの観点から偏りのない調査をめざした結果である。今回 EASIT2 の許諾を得て、比較検討した結果を以下に報告する

#### 3.1. 学校教育との関連

まず Fig.2 は、回答者が受けてきた学校教育と解析業務の関連を示す。縦軸に関連の程度、横軸に回答の割合を示す。それぞれの回答は、最終学歴によっても区分されている。Fig.2(a)に示すように、欧米では解析業務と学校教育が「大きく関係する」という回答が 50%を超える。かつ最終学歴が高いほどその傾向が著しい。これに対して日本の場合は、「少し関係する」と「大きく関係する」の回答は、共に 40%と同程度の割合を示す。学歴による違いについても、欧米の結果ほど際立った傾向は認められない。すなわち Fig.2(b)を見る限り、解析業務における専門性の認識には、ばらつきが大きいと見るのが妥当である。

さらに国内の調査結果においては「工学教育は受けていない」とする回答が 7%近い数字を示し、割合は決して



(a) EASIT2 (欧米)

(b) 非線形 CAE 協会 (日本)

Fig.2 学校教育と解析業務の関連

て高くないものの特徴的な結果と見られる。専門教育を受けずに就労した人材が、実務を経ることによって（アンケートに答えるだけの意識を持った）職業人として輩出されることを示唆するからである。国内の製造業における特質と言ってよい。実際、経団連の継続的な調査<sup>13)</sup>を例にとると、新入社員に対する企業の期待は、首位がコミュニケーション能力（約 80%）であるのに対して、専門性は 10 位以下（約 10%）にとどまる。この傾向は最近 10 年にわたって変わらず、分業よりは集团的なすり合せを得意とする国内製造業の特徴<sup>7)</sup>をよく表している。Fig.2(b)に表れた数字は、これを裏付ける結果と言うことができるだろう。

しかし専門性とコミュニケーションの能力を、背反した資質としてとらえるのは必ずしも好ましくない。例えば今日の自動車は、約 3 万点の部品と 8 千万行のプログラムが組み込まれた複雑製品である<sup>14)</sup>。また国内では 550 万人が従事する巨大産業でもある<sup>15)</sup>。コミュニケーションに支えられた問題発見の能力と、専門性に支えられた問題解決の能力が両立しない限り、大規模化した設計を切り盛りすることは難しい。Fig.2 の設問の趣旨は、バランスの良い専門家の育成にあると見るのが適切ではないだろうか。実際、学校教育と解析業務が「完全に一致する」という回答は、博士層でさえ、どちらの調査においても 30%にとどまる。言うまでもなく、昨今のシミュレーション環境の変化は大きく、課題も多岐にわたる。専門家といえども、業務を通じて学習を反復しなければ、その専門性を維持することは難しい。

### 3.2. 企業内でのキャリア

Fig.3 は、従事年数に関する回答を示す。Fig.3(a)に示すように、欧米の場合、5 年以上の解析経験を有するエンジニアは全体の 80%を占め、かつ 20 年以上の経験者が 30%に及ぶ。回答者の問題意識はそもそも高いとはいえ、専門性に対する社会的な理解がこの明瞭な世代構成を支えていると推測される。Fig.3(b)を見ると、日本もその

傾向に近づきつつある。すなわち、入社以来一貫して解析に従事する人材、いわば CAE ネイティブとも呼ぶべき職能が成立し始めていると考えて良い。ただし 20 年以上の経験者は全体の 10%でしかなく、このキャリアの成立は欧米に比べて遅かったと理解される。事故対策など重要な場面でトップダウンが要求される事情はシミュレーションも例外ではない。予算獲得もしかりである。高位層の厚みは、シミュレーションの方向性をダイレクトに決定づけることに注意が必要である。

亀淵<sup>17)</sup>は西欧における例として、1930 年前後のニールス・ボーア研究所では、研究会に招聘された研究者が優れた若者一名を同伴することを許されていたと紹介している。Fig.2(a)と Fig.3(a)が示すように、少なくとも今回の調査に応じた欧米の集団に限れば、中堅を核として見事な世代間のバランスが成立している。人材の育成を、根気よく積み重ねてきた結果ではないだろうか。

### 3.3. 解析ツールの内訳

Fig.4 は、使用している解析ツールの内訳である。一見、欧米と国内との傾向に差異はなく、社内修正を加えたものを含めれば、どちらの調査でも業務の約 65%を商用コード（ソフトウェア）に頼ることがわかる。公開されている範囲に限れば、その利用技術に関しても彼我に水準の差はない。例えば代表的な汎用 FEM コードである Abaqus の場合、現在のユーザ数は 15 万人を数え、そのうち 2 万人が SIMULIA Learning Community と呼ばれるインターネット・コミュニティに属している<sup>18)</sup>。このコミュニティの目的は、開発者とユーザ、あるいはユーザ同士の意思疎通を、開発側の積極的な介入の下で、ソフトウェア保守の一環として可能にすることにある。少なくとも英語圏では、この種の関係を通じて解析の水準を向上させることは、かなり容易になったと推測される。

実際、今日の欧州では産学が連携し、汎用 FEM を核に据えた研究開発の例が多く見られる<sup>19), 20)</sup>。汎用 FEM が備える強靱な非線形解析の機能、あるいは高性能な要

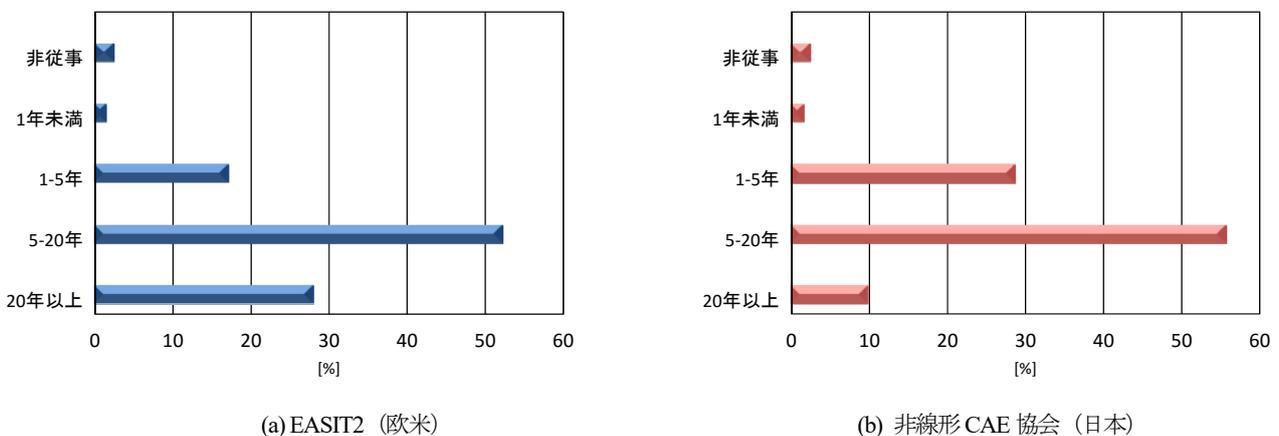


Fig.3 解析業務の従事年数

素群を利用することによって、学術的なテーマに完全な実用性を与えることが狙いである<sup>45)</sup>。これらの開発が、NAFEMS や ASME など海外が進める品質マネジメント<sup>21)</sup>と組み合わせられた暁には、戦略としての国際標準<sup>31)</sup>がシミュレーションの分野に持ち込まれる可能性を否定できない。今後の注視が必要ではないだろうか。

### 3.4. 解析業務の障壁

Fig.5 は、業務上の障害として想定された 8 項目に対して、4 段階で難度を評価させた結果である。難度の全体平均はどちらも 1.4 となり、障害の水準は（克服可能な）中庸程度と認識されていることがわかる。しかし欧米ではエンジニアの雇用を筆頭に 8 つの項目はなだらかな分布を示すのに対し、日本では 3 つの項目、

- 結果の妥当性検証
- 本人の技量不足
- 経験の蓄積と再利用

を困難とする回答が際立っている。他の項目はいわばやれば済む問題であるのに対し、この 3 つは異なる。日常的な業務の取り組み、ひいては個人の科学観に直結した問題だからである。

物理学者であり、在日仏大使館において科学参事官を務めたマルク・デュブイ<sup>22)</sup>は、「日本と異なり、フランスの教育では“分析と総合”の訓練に重きが置かれる。特に中等教育において、死んだ言語であるラテン語ないしギリシア語による作文と翻訳の演習は、生徒を分析に向かわせるひとつの方法である。」と明言している。分解と統合は Divide and conquer（分解と征服）、あるいは Divide and rule（分割統治）と呼ばれ、一挙には到達しがたい問題の解決、あるいは領土支配のための外交手段として用いられてきた西洋的な手法である<sup>23)</sup>。FEM がまさに形状の分解と統合の手法であることを思えば、シミュレーションという技法は、彼らの日常的な思考習慣にきわめて近いと推測される<sup>24)</sup>。

Fig.5(a)において雇用と科学観が同じ設問のなかにあり、しかも同程度の障害でしかないことは、我々には奇異に見えても西欧では既に論議が尽くされている<sup>25), 26), 27), (32)</sup>ように見える。今日、西欧での組織的な実践としての宗教は失われた<sup>64)</sup>とはいえ、職業と訳される profession、あるいは vocation は、いずれも信仰を前提とした就労を意味する<sup>38)</sup>ことに注意したい。

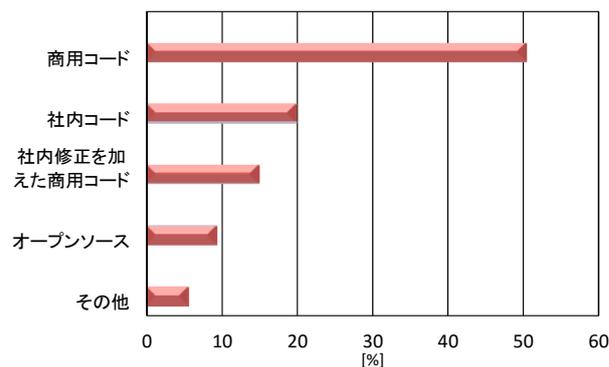
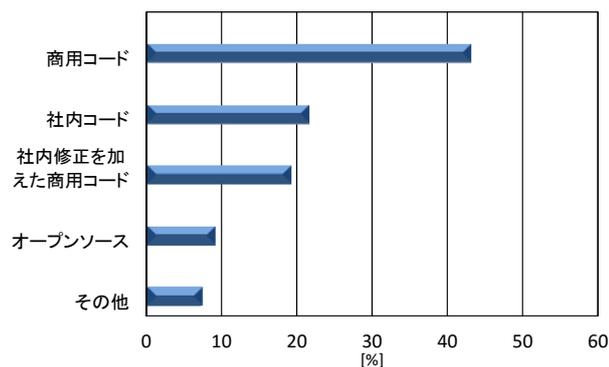
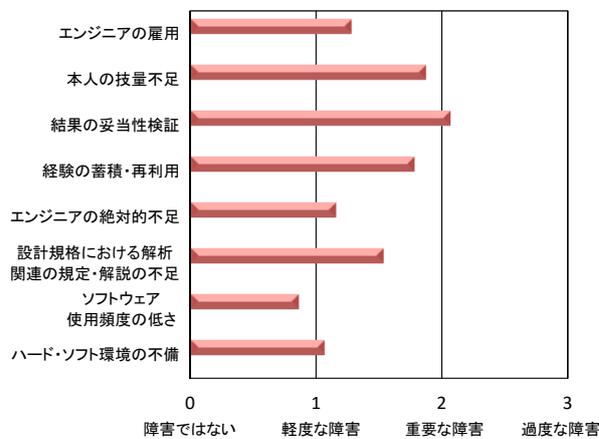
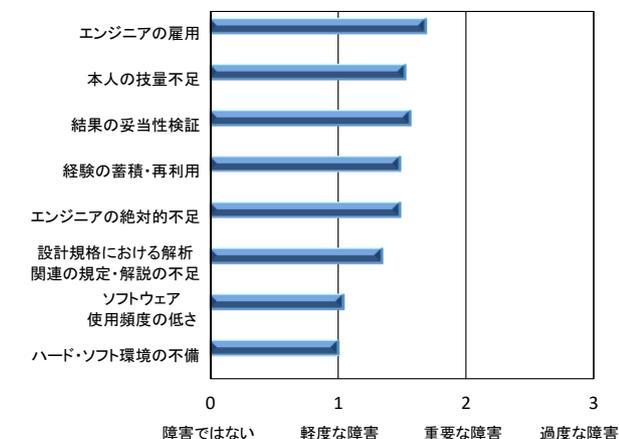


Fig.4 解析ツールの内訳



(a) EASIT2 (欧米)

(b) 非線形 CAE 協会 (日本)

Fig.5 解析業務に対する障壁

## 4. 説明知としてのシミュレーション

### 4.1. Public Understanding of Science

Fig.1に示したように今日の工学は、社会との整合性を高めることに評価の重点が移りつつある。要因は2つあり、一つは人工物の複雑化、いま一つは自然の圧倒的な威力との折り合いである。いずれも社会との合意の形成、端的に言えば専門家以外に対する説明の達成が要件である。藤本<sup>1)</sup>は北米における自動車のリコール問題を取り上げ、その本質的な原因は、製品の複雑性から来る開発負荷の（際限のない）増大にあるとしている。複雑化した製品においては、品質上の要求事項を満たすことはできても、ISO9000が謳う保証の「確信」<sup>28)</sup>を、市場に向かって一様に与えることはまず不可能だからである。この結果、専門家と専門家以外の間には生じる不信感、あるいは脱却できない相互依存の関係を、小林<sup>29)</sup>は「やるせなさ」と表現している。

日本機械学会は、Fig.6に示すように技術が遂行知（knowing how, 生活遂行のためのスキル）であるのに対して、科学を説明知（knowing thatないしknowing why, 自然を説明するための知）とし、両者のかけ橋として工学が存在するという概念<sup>29),30)</sup>を提示している<sup>31)</sup>。説明知である科学は、遂行知である技術の進歩に遅れることを免れないことは、これまでも複数の指摘がある<sup>27),32)</sup>が、人工物の複雑性はその傾向を更に助長する<sup>29),33)</sup>ために、地球規模の問題が顕在化するようになってきたと言えるだろう。

Fig.5(b)に示した国内での障害の筆頭は、解析結果の検証ができないことではなく、検証そのものの意味を説明知として見出せないこと、平たく言えば身についた科学観として見出せない「やるせなさ」にあると考えれば、今後の見通しも立てやすくなるのではないだろうか。例えば米国ではASMEにCommunicating to a Non-Technical Audience<sup>34)</sup>というプログラムが設けられ、リスク評価など、シミュレーションを定量的な説得の手段として使うミッションも散見される。総称してPUS (Public Understanding of Science)<sup>25)</sup>と呼ばれるこの種の活動が、いずれ実効をあげるように国内でも推進してゆく必要がある。



Fig.6 説明知と遂行知<sup>31)</sup>

### 4.2. 人工現実に対する知

Fig.1に示したように、1960年代は、古典的な応用力学が完成した時期である。理論と実験を二つの柱とし、科学技術の優位性を実証しようとする時代であった。しかし限りなく複雑化する現実を前にしたとき、既存の手法のなかに“ある種の閉塞感<sup>16)</sup>”が現れてきた時代でもあった。例えば中原<sup>35)</sup>には、「現実の問題に対して材料力学が（定性的であるために）いかに役に立たないか」と断った上で、実験もまた（特定の条件においてのみ正しいので）定量的な意味しか持たないことが多いという主張がある。

一方昨今の知見からは、理論と実験という二分法そのものに対して、シミュレーションという二分法に収まらない技法の出現が旧来の論点を無効にしてきたと出口<sup>33)</sup>は指摘している。次の4.3項に示すように、この指摘の背景には、理論・実験・シミュレーションの三つがいずれも人工現実に対する知に属するという理解がある。かつて1920年代には、「科学における分解と統合の手法は、数学と因果関係の説明を骨格とし、その妥当性はfactsとの比較によってsuggestされる、それをverificationという<sup>23)</sup>」と考えられていた。いまシミュレーションという技法のなかで、factsあるいはsuggestの意味を改めて問い直すことがポイントである。

### 4.3. facts: 抽象化された現実

Fig.7は、ASMEが提唱するV&V (Verification & Validation)のフローチャートである<sup>36)</sup>。ここでは解釈を助けるために、原文とその和訳<sup>37)</sup>を併記した。人工現実に対する知という観点から見たとき、まず注目すべきは“抽象化された概念モデル”がチャートの最上流に置かれることである。我々はこの種の始点があることは知っていても、明示的に訓練する場を持たなかったのが実情ではないだろうか。原文ではabstractionという用語が用いられ、Fig.7では慣用的に抽象化と訳されている。

Abstractionの起源は、abs-（離れて）とtrahere（引き出す）にある。科学技術の分野に限り、日本語で言い換えるならば捨象がよりの確である<sup>38)</sup>。実際、広辞苑<sup>2)</sup>には「抽象とは対象からその一部を抽（ぬ）き離して把握すること。その際、他を排除する作用を伴う。これを捨象という」とある。科学における分解と統合は、ニュートンの分光実験(1666年)、あるいはフーリエ(1768-1830)に起源を求めることが出来る<sup>23),39)</sup>。しかし更に踏み込んだ人工現実という理解は、実験科学を対象としてマッハ(1838-1916)によって提示された高田<sup>39)</sup>は指摘している。マッハによれば、実験は以下の連鎖を経て成立する。

体験 ⇒ 抽象化 ⇒ 概念モデル ⇒ 量的把握 ⇒ 実験

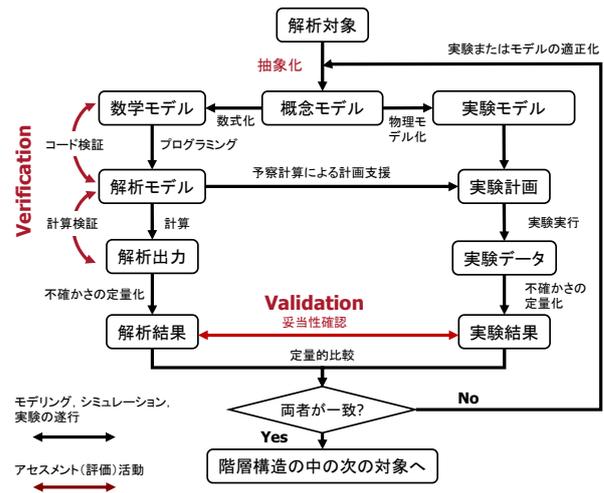
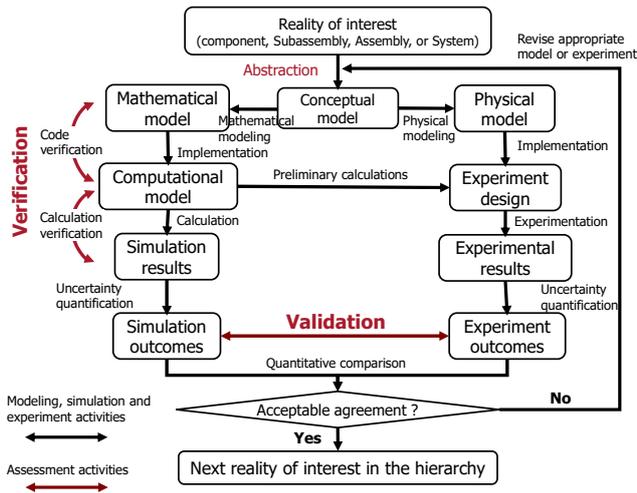


Fig.7 ASME V&V 10-2006, Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics<sup>36), 37)</sup>

これは V&V のチャートと全く同じ手続きである。例えば Fig.7 を注意して見ると、Validation の矢印 ⇄ は、シミュレーションと実験の双方を指している。二つはいずれも人工現実であるが故に、互いにその妥当性を検証するのが本来と読み取れる。無論、仮説が実験によって確認される例は、現在でも少なくない。しかし相互に検証しなければ見落としが出ることを、この矢印は示唆している。今日、ぼう大なデータが扱われるようになると、仮説にとらわれない思いもよらぬ facts は、理論・実験・シミュレーションのどこに現れても不思議はない<sup>40)</sup>からである。

Fig.8<sup>41)</sup>は、フランチェスコ・レディ (1626-1697) によるハエの発生に関する実験である。彼は外界と遮断した肉片にはハエは発生しないことを示した。この状況は明らかに自然そのものとは異なる。人間が自然に働きかけ、捨象し、日常とは違った状況を設定することによって、実験は成立することがわかる。冒頭に述べたように、シミュレーションが実物に代わるシステムの提示であるならば、実験もまた明らかに (広義の) シミュレーションである。いま近代的な機材を使い、広義のシミュレーション

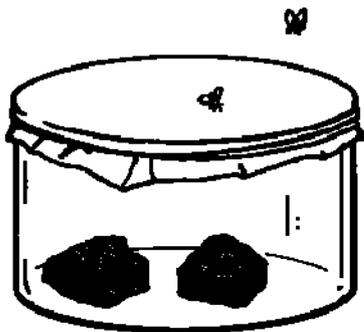


Fig.8 フランチェスコ・レディの実験<sup>41)</sup>

ョンという視点をもってトレースすれば、レディの実験はどのように変貌するだろうか？ 腐敗の要因、ハエを呼び寄せる機構等々、実験の背後にあるぼう大な現実を定量化することができるはずである。Fig.7に戻り、中流にある“Preliminary calculations”に注意すると、その矢印は一方向 ⇒ である。実験においてさえ、その近代的な解釈はシミュレーションという概念を通過することによって初めてもたらされることを、この一方向の矢印は示唆している。

4.4. suggest: 判断の連鎖

V&V のチャートのもう一つの特徴は、Fig.7 に示すように最後が“階層構造の中の次の対象 (関心) へ”で終わることである。越塚<sup>21)</sup>が指摘するように、検証を尽くした予測を受け入れることで今日の社会は成立してきた。言い換えれば“科学は確かに事実に基づいてはいるが、厳密には事実ではなく、むしろ広く認められている判断の連鎖にしかすぎない<sup>32), 42)</sup>”ということである。論文に投稿された知見は査読と引用を受け、やがて教科書に掲載されて周知となる経緯を思い出せば、この指摘は的確である。V&V のチャートは、連鎖のなかの一つの環を表していると思われることができるだろう。

この連鎖は何をもたらすだろうか？ 例えば Fig.9 は、Abaqus<sup>43)</sup>のマニュアルについてその変遷を示す。10年で分量は2.5倍に増加し、現在は5,000ページを超える。あるいは機械工学便覧を見れば、その索引は1万語から成る。個人の学習の容量としては上限に近い。ようやく20年をかけて、5,000ページあるいは1万語を習得するという推算は的外れていないだろう。我々には社会生活が並行するからである。

増大するのは必要な知識だけではない。「シミュレーションを導入することによって実機による試験の数が減り

ます」と我々は言い続けてきた<sup>41)</sup>。その結果どうなったか？ Fig.10<sup>44)</sup> に示すように確かにNGも減ったが、必要な試験はますます増えることになった。理解が深まると共に規制も綿密化し、要求には歯止めが無いからである。分野の横断、まして専門家以外への説明責任といった課題の実行は、これら語彙と技術の壁によってまず遮られる。

しかし一方では、量によってシミュレーションの質が強化<sup>45),46)</sup>される側面は見逃しがたい。高原<sup>47)</sup>が指摘するように、設計は学術にいつも頼れる訳ではない。因果関係には触れぬまま、実験式や経験則に頼らざるを得ない状況が往々にしてある。しかしそこにシミュレーションが正しく関与できれば、埋め込まれた理論による補強の効果は著しい。エンジニアは、自分もまた科学の徒であったことを思い出すのである。その体験の増加は、理想への願望を揺るぎないものにする。例えば Fig.9 に示した Abaqus の来歴からは、単体のコードとして汎用 FEM を開発するというよりも、現代工学を網羅したシステムを実現することに最終的な目標があるように見える。計算能力を付したアーカイブの構築ということである。アーカイブとは暗黙知を形式知に変換し、保存し、提供するための社会的基盤ないし制度をいう<sup>48)</sup>。前述のように、汎用 FEM を核として産学の共同研究を進める欧州の活動は、この試みの範疇に入ると言ってよい。

本章では、際限なく複雑化する現実の前に、説明知である科学の追従が常に遅れがちであることを示した。この種の本質的に困難な課題を対象として、ハーバードあるいは国内では慶應に代表されるビジネススクールでは、2年間に 300 から 400 ケースの議論を行い、意思決定の能力を高める教育が行われている<sup>49)</sup>。ケースメソッドと呼ばれるこの教育の目的は、問題を直接解決するには至らないかもしれないが、問題に正面から向き合う状況を組織のなかで作り出すことにある。直面する困難ににじり寄り寄るアプローチが、いま必要とされている。

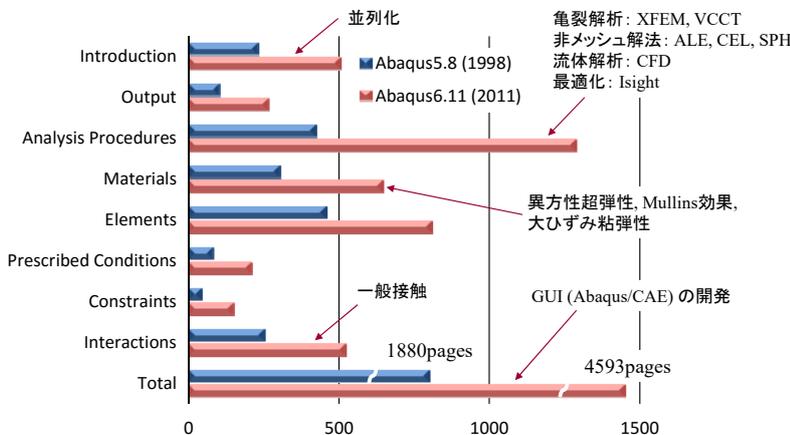


Fig.9 Abaqus マニュアルの変遷 (1998-2011)

## 5. 遂行知としてのシミュレーション

### 5.1. なぜ現物主義に負けるのか

Fig.11<sup>50)</sup>は、製品開発の達成を縦軸に取り、実験と解析の関連を描いた図である。図中(a)に示すように、実験による開発は時間  $t_1$  を必要とするが確実に目標に到達する。これに対して解析の立ち上がりは早い。しかし最後まで到達することは稀である。Fig.11(b)に示すように、もし両者を組み合わせることができれば、開発期間を  $t_2$  まで圧縮できる。経験を解析によって置き換えるというありきたりな発想はこのあたりに起源がある。だが現実には、実験と解析の不連続を乗り越えられず、結局、解析が足手まといになることが少なくない。図中の  $t_2'$  はこの状況を表している。現物主義に負けるということである。

単純な系、あるいは極端に複雑な系においてシミュレーションが現物主義に負けるのは、現物を上回る適切な代替システムを見出すことができないからである。ロッククライミングを想像してみよう。岩場が 1m ならば解析などしない。逆に 100m ならば信じるにはためらいが残る。しかし 10m ならどうだろうか。真剣に解析し、限界を見極めようという状況になるはずである。すなわち、シミュレーションは中位の複雑系に対して最も効果がある<sup>24),46)</sup>。

したがって解析部門のマネージャーには、問題の複雑性を正しく識別する能力がまず求められてきた。解析に乗りにくい課題を捨てる、あるいは何とかして課題に持ち上げる力量も、その中には含まれなければならない。最も重要なのは、事故対策、実験部門との軋轢、解析依頼の謝絶など、シミュレーションの現場で実際にありがちな（ネガティブな）場面における説得力である。理論解・手計算など、シミュレーション以外の明晰な方法を伴わなければ交渉は難しい。良い組織ほどトップダウンの傾向が強まりがちである。ASME V&V のフローチャートはボトムアップを前提にしていると明言しているが、

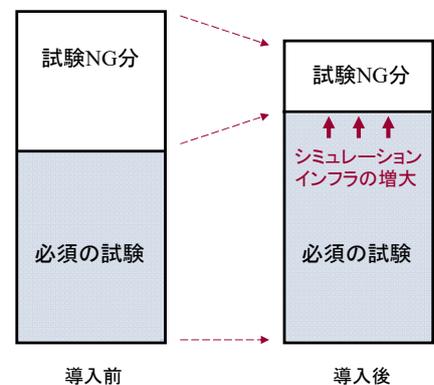


Fig.10 シミュレーションインフラの増大<sup>44)</sup>

ボトムアップによってこの壁を越えることは本来容易なことではない<sup>51)</sup>ことを理解しておく必要がある。

### 5.2. 設計段階に応じたシミュレーション

生産技術の分野で使われるシーケンシャルモデルの概念<sup>4)</sup><sup>51)</sup>を適用し、今日のシミュレーションを設計段階に応じて区分した結果を Fig.12 に示す。設計段階の分類は様々に考えられるが、ここではシミュレーションとの関わりに注目して、1. 概念設計、2. R&D、3. 製品設計・製造、4. 保守・維持の4段階に区分した。このうち2. と3. の段階については、現状、シミュレーションの方法論は概ね整ったと考えてよい。例えば前述の V&V は、主に2. R&D の段階に対して検討されてきた経緯があり、既に多くの知見がある。また3. 製品設計・製造の段階では、もはや解析上の試行錯誤は許されず、高速な演算実行が最優先の課題だからである。金銭的な投資の効果が

著しく、圧倒的な人員投入、圧倒的な分解能向上によって解決される部分が少なくない<sup>52)</sup>。自動車の衝突安全性評価などは、多くこの範疇に入る。

忘れられがちであるが、Fig.5 に挙げられた障壁のうち“設計規格における解析関連の規定・解説の不足”は、3. の生産段階における解析の水準を維持する上で重要である。例えば藤岡<sup>53)</sup>には火力・原子力分野の高温機器に対する応力評価、あるいは水野<sup>3)</sup>には原子力用配管の設計法について、規格の意図をシミュレーションの具体的な手順に展開した例がある。国内では稀少と言わなければならない。一方、未解決の課題は1. 概念設計と4. 保守・維持の段階に多く残されている。特に保守・維持に関するシミュレーションは、インフラの老朽化や災害復旧など社会的な問題に直結し最難関の課題である。寿命評価や事故対策のために、まずは破壊現象のモデリングが当面のターゲットではないだろうか。

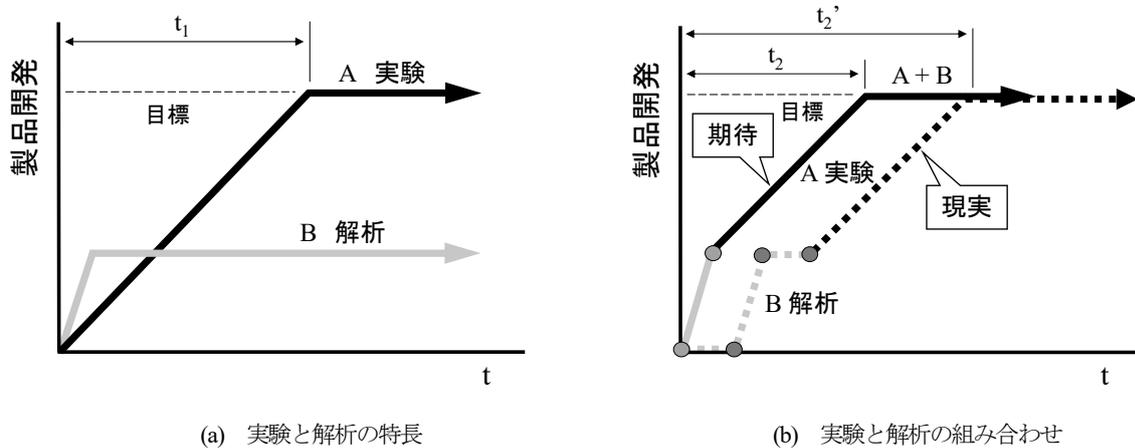


Fig.11 シミュレーションによる製品開発の加速<sup>50)</sup>

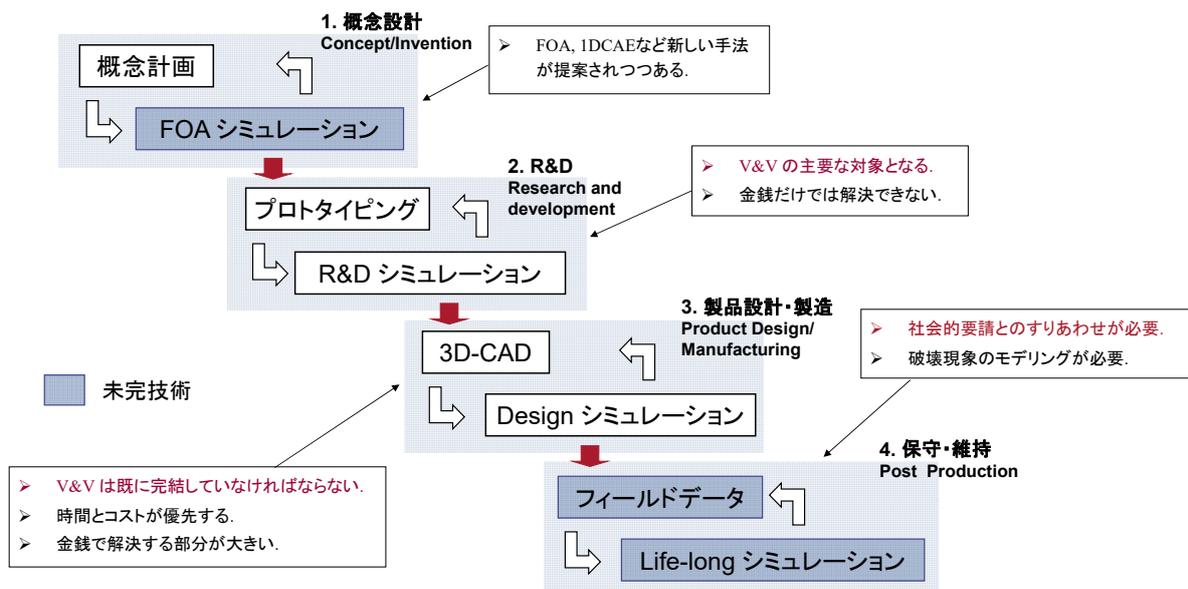


Fig.12 設計段階に応じたシミュレーション

## 6. シミュレーションという思想の醸成

現代は国境を越えて製品と情報が動く時代である。しかし天然資源の偏在が障壁になるのと同様に、国境を容易に越えない要因として、藤本<sup>11)</sup>は「組織能力 (organizational capability<sup>12)</sup>)」と呼ばれる国民性を挙げている。組織能力とは、(暗黙的かつ曖昧であることが少なくないが) 組織によって獲得される知識や能力、あるいは組織に特有な傾向を指す用語である。「有限要素法のことなら誰々に訊け・・・<sup>16)</sup>」といった事情が今日でも無視できないのは、シミュレーションという技術の伝承の難しさを物語っている。この難しさを平明に言えば、言葉で説明される以上のことを我々は暗黙裡に知っていて、その伝承が難しいということである。この暗黙知の精度を高め、共有の効率を高める作用が組織能力である。例えば日本においては、専門教育を受けずに就労した人材が、実務経験によって高度なシミュレーションに従事できることを3.1節に示した。これは日本に特有な「組織能力」の好例であろう。

反面、シミュレーション結果の検証という手続きを、我々は身に付いた科学観として実感しづらいことを4.1節では述べた。物理学者である Philipp Frank (1884-1966) には、「我々が知りえるものは、分析的な知性によって抽象の中に溶解されてしまった世界でしかない<sup>58)</sup>」といった指摘がある。シミュレーションの価値を単に計算の正しさによって議論するだけでは、この種の感覚を理解することは難しい。実際、国内のシミュレーションの現場において失敗の最たるものは、いきなり具体的な(複雑な)形状モデリングから入り、チェックや変更もできない状態に陥り、消費した工数の重みに逆らえず直進し、成果の出ないまま2,3ヶ月を経過してしまうことである。ハイパフォーマンスコンピューティングや3D-CADなど、高度に具象化した技術への過剰な期待と意気込みが、この種の失策を招きがちである。

Fig.7に示したASME V&Vを前にしたとき、日本人にとって最もわかりにくいのは、最上流に「概念モデル (conceptual model)」が置かれることである<sup>61)</sup>。いきなり形状モデリングから入る上記の事情は、概念モデルを冒頭に置くことが、決して一般的な習慣ではないことを端的に表している。これに対して欧米のエンジニアの日常会話の中には、conceptに関して以下のような認識<sup>59)</sup>がある。

- ▶ **concept** はきわめて“early”なものである。I have no idea. (見当がつかない) と言うときの idea に近い。
- ▶ 多様な考え方を許容するために **concept** という中間的な存在を置くことが必要。

日本人である我々は、「概念モデル」という(工業技術

とは由来の異なる) 訳語を手にした結果、訳語以上に踏み込む機会を日常の中で失い、平板的な受け止め方のままこれらの肉声から遠ざかる結果となった。概念の意味を知らずに、概念を冒頭に置くことはできないという指摘は痛切である。例えば佐久間<sup>57)</sup>には、西洋哲学の立場からV&Vを評して「conceptの語源はconceptio・受胎にある。西洋では特に聖母マリアの懐胎を容易に想起<sup>2)</sup>させる。」という指摘がある。概念モデルという訳語から離れ、シミュレーションの始点は受胎、すなわち思索の到来と着床にあると考えれば、この営みの価値を柔軟に理解する手がかりになりそうである。湯川には、これを「recollection (想起)」と解説する先例がある<sup>65)</sup>。

国内における最近の例として、寺田<sup>62)</sup>には「V&Vの直接の目的はシミュレーションの信頼性向上にあるが、本来その上流には現象の本質を見極めるといふ真の目的があり、特に今日の実験における計測法およびその量的向上がシミュレーションを新たな境地に導く。」という指摘がある。また山田<sup>63)</sup>には、「V&Vによるシミュレーションの質的向上を、新たにRegulatory science (規制科学)と位置付けることによって、例えば生体を対象とする医療のように素過程から演繹的にモデル化することができず、また十分な実験によって帰納的にモデル化することもできない分野に対して、trust (善性に対する主観的・直観的な信頼) に基づく信頼性の根拠、すなわち“credibility”を、できるだけ科学的な知見として提示する。」という指摘がある。いずれも「信頼性向上」といった従来の表現ではカバーしきれない知見である。

7世紀以降の日本は、かろうじて入ってくる典籍をよりどころとして、書籍に頼った言語文化を独自に築いてきた。科学も例外ではない。漢文的な素養の上に西洋は接ぎ木され<sup>22)</sup>、科学の分野に限っても4万語に近い和製の用語体系<sup>54)</sup>を完成させた。しかしその一方、翻訳に頼る学習がラディカルなイデオロギーに陥ることについては、洋の東西を問わず多くの例証<sup>42), 55), 56)</sup>がある。借り物ではない科学観、日常的な職能の底上げが重要である。専門家以外へのアプローチが、4.4節に示したように語彙と技術の壁によってまず遮られるのであれば、自身に内在する科学観の曖昧さは、より本質的に我々を妨げることになるだろう。

4.2節に示したように、シミュレーションという技法は理論と実験という二分法にとらわれず、その使い方によって様々な側面を見せる。今後のシミュレーションがもたらすぼう大なデータは、仮説にとらわれない思いもよらぬ事実を我々に見せるに違いない。すなわち新しい科学観を実践的、反復的に作り上げる手段を我々にもたらした点において、シミュレーションは単に技術にとどまらず、思想としての意味が深い。その醸成を通じて、現代の困難に立ち向かうことが求められている。

## 7. 結言

自然災害の苛烈を通して、我々のあらゆる活動は、社会的な規範を最優先の権威として受け入れる時代を迎えようとしている。一挙には到達しがたい問題の解決のために、現実を直視し循環的に肉迫する科学の方法論は、今こそ見直されて良い。シミュレーションに従事する者として、設計の向上、利益率の向上、キャリアの向上など、その役割はさまざまに考えられる。しかし今日もっとも求められるのは、次のことである。Improve our society, because fast is never fast enough<sup>60</sup>。

## 参考文献

- 1) 本図は、菊池昇(2009)「この25年を振り返って—研究と実用の両立そして未来に向けて—」株式会社くいんと創立25周年記念セミナー。の示唆による。
- 2) 新村出編(1983-2008)『広辞苑第3-6版』岩波書店。
- 3) 水野貞夫(2013)『配管の設計解析法』(pp. 181-186) エムエス配管解析技術。
- 4) 竹田陽子(2000)『プロダクト・リアライゼーション戦略—3次元情報技術が製品開発組織に与える影響』(pp. 44-46)白桃書房。
- 5) 例えば、鷲津久一郎編(1983)『有限要素法ハンドブック II 応用編』培風館。
- 6) 石谷隆広(2007)「Jason (Jack) Lemon 博士 開拓者、先見の明を持つ人、友人」『計算工学』12(2), 1585-1586。
- 7) 藤本隆宏(2006)「自動車の設計思想と製品開発能力」『東京大学 COE ものづくり経営研究センター, MMRC Discussion Paper.』74, 1-12。
- 8) EASIT2 (2011) *Industry Needs Survey Report, Engineering Analysis and Simulation Innovation Transfer*. [http://www.easit2.eu/?page\\_id=12](http://www.easit2.eu/?page_id=12) [2015, September 24].
- 9) NAFEMS <http://www.nafems.org/> [2015, September 24].
- 10) 特定非営利活動法人・非線形 CAE 協会(2011)『非線形 CAE 勉強会・第20回記念シンポジウム』<http://www.jancae.org/study/20/> [2015, September 24].
- 11) 藤本隆宏編(2013)『「人工物」複雑化の時代 産業立国日本の産業競争力』(p. 7, p.64 (藤本), p. 267 (糸久)).有斐閣
- 12) Nelson, R. R. and Winter, S. G (2007)『経済変動の進化理論』(p. 75, p. 95.) (角南他訳) 慶應義塾大学出版会(原著 1985).
- 13) 日本経済団体連合会(2014)『新卒採用 (2014年4月入社対象)に関するアンケート調査結果』[https://www.keidanren.or.jp/policy/2014/080\\_kekka.pdf](https://www.keidanren.or.jp/policy/2014/080_kekka.pdf) [2015, September 24].
- 14) 矢野経済研究所(2014)「自動車用組込みソフトウェア市場～自動車1台8,000万行時代の機能安全と開発手法」『自動車ニュース』14-07.
- 15) 日本自動車工業会(2014)『自動車関連産業と就業人口』[http://www.jama.or.jp/industry/industry/industry\\_1g1.html](http://www.jama.or.jp/industry/industry/industry_1g1.html) [2015, September 24].
- 16) 土木学会 応用力学委員会(2008)『いまさら聞けない計算力学の常識』(pp. iii-v, p. 3.) 丸善。
- 17) 亀淵迪(2008)「コペンハーゲン・ファウスト」『図書』6-2008 (p.20) 岩波書店。
- 18) 2014 SIMULIA Community Conference (2014 May 20-22), Providence, USA.
- 19) 寺田賢二郎(2010)「非線形 CAE の研究動向と材料モデリング」『Mech D&A News 2010-1』株式会社メカニカルデザイン。
- 20) 近藤晶子(2012)「欧州の CAE 教育、産学協同の試み」『第21期非線形 CAE 勉強会』非線形 CAE 協会 [http://www.jancae.org/study/21/03\\_03.html](http://www.jancae.org/study/21/03_03.html) [2015, September 24].
- 21) 白鳥正樹, 越塚誠一, 吉田有一郎, 中村均, 堀田亮年, 高野直樹(2013)『工学シミュレーションの品質保証と V&V』(pp. 21-39 (越塚)) 丸善。
- 22) マルク・デュブイ(1979)「科学と工学に対する日本人の態度」『科学の饗宴』(pp. 7-14) みすず書房。
- 23) Rupert Clendon Lodge (2009) *An Introduction to Modern Logic [1920]*. (p. 199, p. 202, pp. 208-229, pp. 264-266) Cornell University Library, Ithaca.
- 24) Weinberg, G. M. (1979)『一般システム思考入門』(pp. 32-40)(松田武彦, 増田伸爾訳) 紀伊国屋書店。(原著 1975).
- 25) 大貫徹, 坂下浩司, 瀬口昌久編(2002)『工学倫理の条件』(pp. 8-19 (小林), pp. 77-84 (古谷)) 晃洋書房。
- 26) マックス・ヴェーバー(1989)『プロテスタンティズムの倫理と資本主義の精神』(pp. 16-19, p. 48, p.307, pp. 390-394) (大塚久雄訳), 岩波書店。
- 27) 新 岩波講座 哲学(1986),『8 技術 魔術 科学』(p.8 (坂本), p.227 (伊東)) 岩波書店。
- 28) JISQ 9000 : 2006 (ISO 9000 : 2005) (2006)「3.2.10, 品質管理: 品質要求事項を満たすための品質マネジメント」, 「3.2.10, 品質保証: 品質要求事項が満たされるといふ確信を与えるための品質マネジメント」。
- 29) 伊藤笏康(1996),『科学の哲学』(pp. 119-120) 放送大学教育振興会。
- 30) ギルバート・ライル(1987)『心の概念』(p. 27) (坂本百大, 井上治子, 服部裕幸訳) みすず書房。
- 31) 日本機械学会(2005)『機械工学便覧, 基礎編, α1 機械工学総論』(p. 97-101, p.107).
- 32) E. H. カー(1962)『歴史とは何か』(p. 14, p.85, p.88, p. 175) (清水幾太郎訳) 岩波新書。
- 33) 岩波講座 哲学(2008)『9 科学/技術の哲学』(pp. 49-62 (出口), pp. 221-222 (小林)) 岩波書店。
- 34) ASME, *Communicating to a Non-Technical Audience*. <https://www.asme.org/products/courses/communicating-to-a-no>

- ntechnical-audience [2015, September 24].
- 35) 中原一郎(1966) 『材料力学』(上 p. 1, 下 p. 279) 養賢堂.
- 36) ASME V&V 10-2006 (2006) *Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics*. New York.
- 37) 瀧澤英男(2008) 「ASME V&V 解説」『第 13 期非線形 CAE 勉強会』 <http://www.jancae.org/study/13/04.html> [2015, September 24].
- 38) Oxford University Press (2010) *Oxford Advanced Learner's Dictionary* (8th ed.). Oxford.
- 39) 高田誠二(1987) 『実験科学の精神』(p.122, p.218) 培風館.
- 40) 荻谷義治(2014) 「材料の疲労破壊—疲労破壊の現象と寿命予測を考える—」『第 7 回株式会社メカニカルデザインユーザ会 Mechanical Design 2014』.
- 41) San Diego Miramar College, *Redi's Experiment*, <http://faculty.sdmiramar.edu/dtrubovitz/micro/history/Redi.html> [2015, September 24].
- 42) Barraclough G (1964) 『転換期の歴史』(p. 28., p. 59, p. 96) (前川貞次郎, 兼岩正夫訳) 社会思想社(原著 1957).
- 43) Dassault Systems Simulia Corp. (2013) *Abaqus Users Manual, Version 6.13*, USA.
- 44) 本図は富士重工・菅沼浩氏の示唆による(2012), 『第 5 回株式会社メカニカルデザインユーザ会 Mechanical Design 2012』.
- 45) 野口裕久(2009) 「野口先生遺稿 最近の非線形解析とその動向—汎用プログラムのカスタマイズ—」『計算工学』14(1), 1970–1973.
- 46) 廣瀬通孝, 小木哲朗, 田村善昭(2002) 『シミュレーションの思想』(p. 19, p. 131) 東京大学出版会.
- 47) 高原忠良(2006) 「樹脂の強度・剛性 CAE」『第 10 期非線形 CAE 勉強会』 <http://www.jancae.org/study/10/02.html> [2015, September 24].
- 48) 高山正也(2008) 「日本における文書の保存と管理, 図書館・アーカイブズとは何か」『別冊 環』15 藤原書店.
- 49) 高木晴夫, 竹内伸一(2010) 『ケースメソッド教授法入門』(p. 31) 慶應義塾大学出版会.
- 50) 本図は YKK 株式会社, 経営監査室 (当時)・永安孝志氏の示唆による(2001 年頃).
- 51) Branscomb, L. M. and Auerswald, P. E.(2002) *Between Invention and Innovation*. NIST GCR 02–841, National Institute of Standards and Technology. <http://www.atp.nist.gov/eao/gcr02-841/gcr02-841.pdf> [2015, September 24].
- 52) H. Yamaoka (2008) *2008 Abaqus Users' Conference Keynote Lecture*. Dassault Systèmes. Newport, USA.
- 53) 藤岡照高(2007) 「無次元化構造応答パラメータに基づく発電用高温圧力機器の簡易構造健全性評価法の開発」『電力中央研究所報告』M03.
- 54) 科学技術振興機構(2008) 『JST 科学技術用語シソーラス 2008 年版』昭和情報プロセス.
- 55) 丸山真男, 加藤周一(1998) 『翻訳と日本の近代』(p. 49) 岩波書店.
- 56) 司馬遼太郎(2002) 『司馬遼太郎が考えたこと』(9/p. 375, 15/p. 346.) 新潮社.
- 57) 佐久間彪(2012 年 6 月) 白百合女子大学名誉教授(1928–2014), ASME V&V に関して談話.
- 58) Philipp Frank (1958) *Contemporary Science and the Contemporary World View. Science and the Modern Mind* (p. 54). Beacon Press, Boston.
- 59) 2013 SIMULIA Community Conference, May 22–24, 2013, Vienna, Austria にて座談. フランスと米国の参加者による.
- 60) Dale Berry(2009) *Customer's Use of Realistic Simulation to Improve Our Society. 2009 SIMULIA Customer Conference*. Dassault Systèmes. London, UK.
- 61) 株式会社ブリヂストン, タイヤ研究部 (当時)・平郡久司氏の指摘による(2010), 「解析の検証と妥当性確認 (Verification & Validation), CAE の品質向上に向けて」『第 17 期, 第 18 期非線形 CAE 勉強会』 <http://www.jancae.org/study/17/>, <http://www.jancae.org/study/18/> [2016, March 15].
- 62) 寺田賢二郎(2016) 「実験・計測とシミュレーションのクロスアプローチ」『第 29 期非線形 CAE 勉強会』 <http://www.jancae.org/study/29/index.html> [2016, March 15].
- 63) 山田貴博(2013) 「ASME V&V symposium 2013 参加報告」『日本計算工学会 HQC 研究分科会』III 期第 1 回, 10–13, <http://www.jsces.org/research/hqc/documents.html> [2016, March 15].
- 64) エマニュエル・トッド(2016) 「宗教的危機とは何か」『三田評論』1199, 51.
- 65) 湯川秀樹(1964) 「科学的思索における直感と抽象」『科学』筑摩叢書, (1989) 『湯川秀樹著作集』2 (p. 156) 岩波書店.

## 謝辞

筆者は特定非営利活動法人・非線形 CAE 協会に属し、本稿はその 2001 年の設立以来の活動から得た知見によるところが大きい。協会の関係諸氏に感謝の意を表す。

## COMPREHENSIVE ABILITY IN SIMULATION TECHNOLOGY

Takaya KOBAYASHI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. (Mechanical Engineering), Mechanical Design & Analysis Corporation, Managing Director  
(E-mail:koba@mech-da.co.jp)

Considering today's increasing reliance on complicated computer simulations, it is necessary to use systematic concepts to augment comprehensive ability and competence in simulation technology. This paper is intended to discuss such concepts, including reducing the complexity of real-world systems, model abstraction methodology, maintaining the validity and reliability of simulation models, achieving knowledge management and responding to social requirements.

**Key Words:** *simulation, finite element method, CAE, verification & validation*