

計算固体力学の研究動向と実設計への適用

RESEARCH TRENDS OF COMPUTATIONAL SOLID MECHANICS AND THEIR PRACTICAL APPLICATIONS

小林 卓哉¹・寺田 賢二郎²

¹Ph.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)

² Ph.D. (計算力学) 東北大学災害科学国際研究所教授 (E-mail: tei@irides.tohoku.ac.jp)

シミュレーションという技術は、大規模な複雑系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。この技術の体系は、学問としての計算力学、応用としての生産技術、計算力学と生産技術を結ぶための計算機ハードウェアとソフトウェアの3つの柱から成る。シミュレーションが工業製品の高度化に深く関与してきた結果、単に学術的な側面だけでシミュレーションの方向性を考えることは難しい時代になってきた。しかしそれでもなお、物理的に明瞭な洞察のためには計算力学をシミュレーションの中心に据えることが本来と考え、これまでの計算固体力学研究の経緯、その方向性を定める要因、そして今後の展望を、国際会議と国際ジャーナルの動向から分析した結果を報告する。

キーワード： 計算固体力学, 計算力学, シミュレーション, 有限要素法, CAE, FEM.

1. はじめに

今日の計算力学の端緒といえる有限要素法が1950年代に現れた¹⁾とき、これが実際の設計に即座に適用されたのは、対象となる形状をそのまま表現する働きを備えていたからである。また今日の先端的な設計は多くを3D-CADに頼るが、これも緻密な形状表現によるところが大きい。力学的な抽象化の進歩に加えて具象化が実現し、現象への見通しをより鮮明にしたことが、シミュレーションという新たな体系を成立させたといえることができる。その発展の経緯が他の工学分野と際立って異なるのは、計算機の進歩と同時に進行した点にある。学問的な研究と実設計への応用が並行して要請されてきたために、計算機に関連した技術の開発が両者の媒介となってきた。有限要素法の登場から時を経ることなく、汎用目的のソフトウェアが商業的に開発された経緯²⁾は、この事情を如実に物語っている。体系化の柱となったのは、以下3つの分野である。

- i. 学問としての計算力学
- ii. 解析を前提とした設計法, および生産技術
- iii. 計算機ハードウェアとソフトウェア

この体系を総称して(狭義の)シミュレーション,あるいは特に国内ではCAE (Computer Aided Engineering³⁾)と慣行的に呼ぶ。

広辞苑⁴⁾の定義によれば、シミュレーションとは「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」である。上記3つの領域

はバランスよく関わりあうのが望ましいが、常に同期している訳ではない。たとえば生産技術は常に学問に先行しがちである。あるいは計算という「量」の爆発的な増加が、学問や生産の「質」を変えてゆくこともありえる。社会的・世俗的な要求がもたらす影響も決して小さくはない。しかしシミュレーションにとって何よりも重要なのは、物理的な適切さ、見通しの良さである⁵⁾。これを可能とするのは、3つの領域の中で計算力学以外にない。すなわち学問を工学的な体系の中心に据えるという(18世紀末以降に現れた)近代的な理解²⁹⁾は、シミュレーションにおいても同様ではないだろうか。

本論文では、計算力学を中心に置く視点に立ち、まず計算機のハードウェアとソフトウェアの発展を概観し、特に固体分野に注目して計算力学の学術論文と国際会議の重要性について再評価を試み、さらに最新の学術研究の動向を分析した結果を報告する。

2. シミュレーション環境の発展の経緯

1950年代,有限要素法(マトリックス構造解析法,以下FEM)が現れた背景には、冷戦によって航空宇宙産業が国家事業として位置づけられた経緯がある。それ以降70年代から80年代にかけては航空機,造船,土木・建築構造物,原子力,さらに90年代にかけては自動車産業など先端の分野に適用されていった。ソルバーであるFEMと並行して、メッシュ生成や解析結果の可視化を目

的としたソフトウェア（以下プリ・ポストプロセッサ）が開発され、ハードウェアもメインフレームから TSS 環境、さらに EWS から PC に移行し、効率的な計算環境が整えられていった（注. TSS (Time Sharing System), EWS (Engineering Workstation)). Fig. 1 は、そのような時代背景の下における計算力学の研究動向と、シミュレーション環境の変遷をまとめた図である⁶⁾。図中に示すように FEM とプリ・ポストプロセッサ、そして CAD は当初独立に開発されたが、連携を以下のように強めながら発展する経過をたどった。

- i. 互いに独立している (independent)
- ii. 連携できる (dependent)
- iii. どちらかに埋め込まれる (embedded)

連携の深化にしたがって、これらのソフトウェアは製造業のなかに着実に浸透し、2000 年代には普及と呼ぶに足る台数が国内に出回るようになった。CAE、すなわち計算機に支援された設計という考え方は、強度評価を目的とした当初の FEM の枠を超え、概念計画から設計、製造、保守にわたる総合的な工程管理の枠組みに発展するに至っている。PLM (Product Life-cycle Management) といった呼称が最近では使用される。

ソフトウェアの開発の面からは、1980 年代後半、メインフレームから EWS への移行が始まった頃を境に、FEM を自社開発するような個別の試みは衰退し、商用ソフトウェアを導入する動きが加速した⁷⁾。Fig.1 に示すように、計算機の高性能化を踏まえた汎用 FEM の組織的

な開発に、個人の能力が追い付かなくなった時期である。国内ではバブル景気の追い風が設備導入をさらに促した。しかし後述のように、2000 年代になると汎用 FEM の、特にソルバーに関する開発も技術的には一段落を迎えた。開発の重心は統合的なアプリケーションシステムの実現に移り、特定のベンダーによる市場の寡占が始まった。2000 年前後には、PLM を推進する CAD ベンダーあるいは企業複合体に多くの汎用 FEM が買収され、ソルバーを単体のソフトウェアとして開発する時代は終焉を迎えたといつて良い。

3. シミュレーションにおける学術研究の役割

3.1. 主要な国際ジャーナルとその成立経緯

本章ではまず、固体に関する計算力学研究を対象としたジャーナルを取り上げ、学術研究が果たしてきた役割を分析してみる。現在、この分野における代表的な国際ジャーナルとしては以下の諸誌がある。以降の引用のために略称を先頭に表記し、創設者と創刊年を付記する。

- JAM; Journal of Applied Mechanics (ASME, 1933-) ⁸⁾
- JMPS; Journal of the Mechanics and Physics of Solids (R. Hill, 1952-) ⁹⁾
- IJSS; International Journal of Solids and Structures (G. Herman, 1965-) ¹⁰⁾

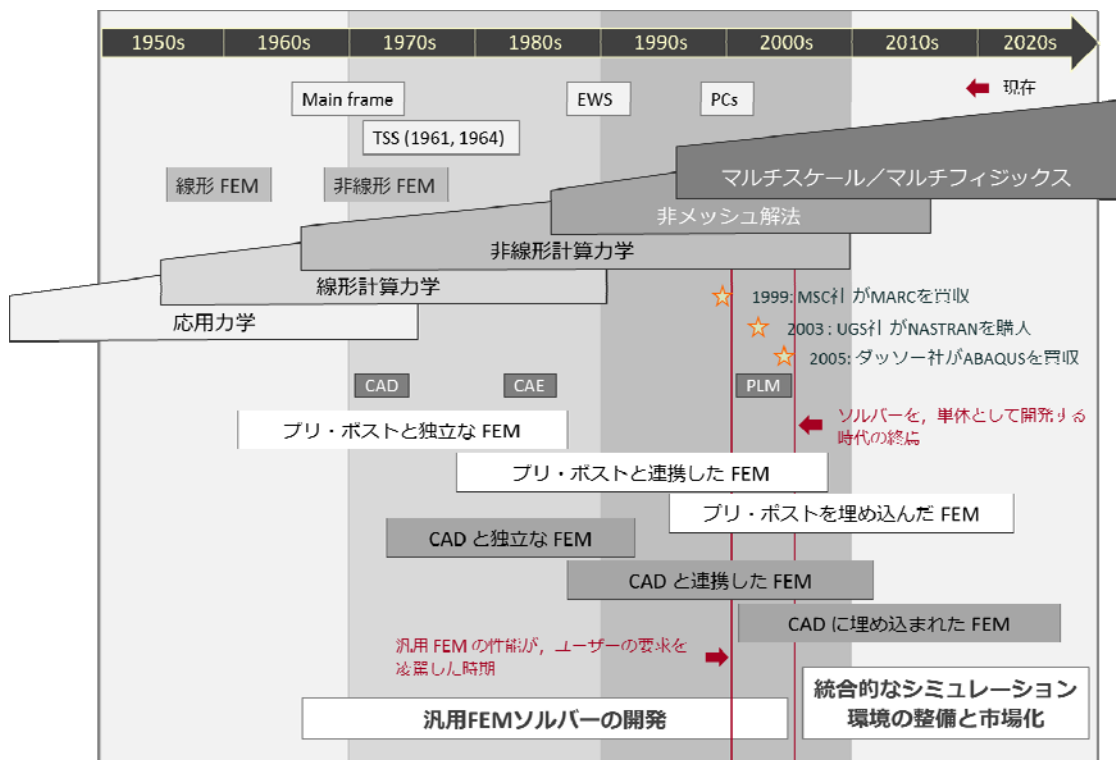


Fig. 1 計算力学の研究動向とシミュレーション環境の変遷⁶⁾

- IJNME; International Journal for Numerical Methods in Engineering (O. Zienkiewicz, 1968~)¹¹⁾
- CMAME; Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering (J.H. Argyris and W. Prager, 1972~)¹²⁾
- Computational Mechanics (N. Atluri, G. Yagawa, 1986~)¹³⁾

戦前から存在する ASME の JAM は、名称が示す通り応用力学、特に理論力学分野のジャーナルである。しかし FEM が実用的な成果を挙げるようになって、科学的要素が無いとして FEM に関連する手法、あるいはそれを用いた計算に関する論文は受け入れを拒んできた経緯を持っている。JMPS や IJSS も程度の差こそあれ同様の立場を取ってきたと推測される。実際、1960年代までの黎明期における FEM の論文は、各研究者が所属する既存の学問領域、たとえば機械工学や土木工学などのジャーナルに大半が掲載されている。このような状況の中、数値計算に特化したジャーナルの必要性に迫られ、当時 FEM 研究の第一人者であった O. Zienkiewicz により 1968 年に IJNME が、1972 年にはドイツにおける力学研究の拠点であった Stuttgart 大学の J.H. Argyris と Brown 大学の応用力学研究の泰斗であった W. Prager により CMAME が創刊された。計算力学という新しい学問分野は、これらのジャーナルにおける蓄積の上に成立してきたと言って良い。

3.2. 汎用 FEM ソフトウェアと計算固体力学

次に計算力学の知見が、現代のシミュレーションの中にかに反映されてきたかを見てみよう。主要な汎用 FEM を例にとり、その理論マニュアルに引用されている論文の発表年を整理して Fig. 2 に示す。横軸に発表年、縦軸に論文の数を示す。対象とした汎用 FEM は、非線形構造解析の分野で主たる位置にある以下の3つである。

- Abaqus, Dassault Systèmes Simulia Corp., Originated from Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., 1978~¹⁴⁾
- ANSYS, ANSYS Inc., John Swanson at Westinghouse, 1970~¹⁵⁾
- LS-DYNA, Livermore Software Technology Corporation, Stemmed from DYNA3D, John Hallquist, 1978~¹⁶⁾

Fig. 2 からわかるように、引用の数は 1970 年代の論文から急激に増加し、80 年代初頭から 90 年代前半までがピークにあたる。図中に示すように NASTRAN, ANSYS, MARC など初期の汎用 FEM が現れたのは、計算力学に関する前記2つのジャーナルが創刊された1970年前後の時期に完全に一致する。その数年後には、Abaqus, LS-DYNA など強度の非線形問題に特化した FEM が現れた。1983 年には、英国貿易産業省によって NAFEMS (National Agency for Finite Element Methods and Standards) が設立された。この組織は、実用問題に対する FEM の信頼性確保を目的とし、産学双方からの強い働きかけによって設立されたことが現在でも経緯として公開されて

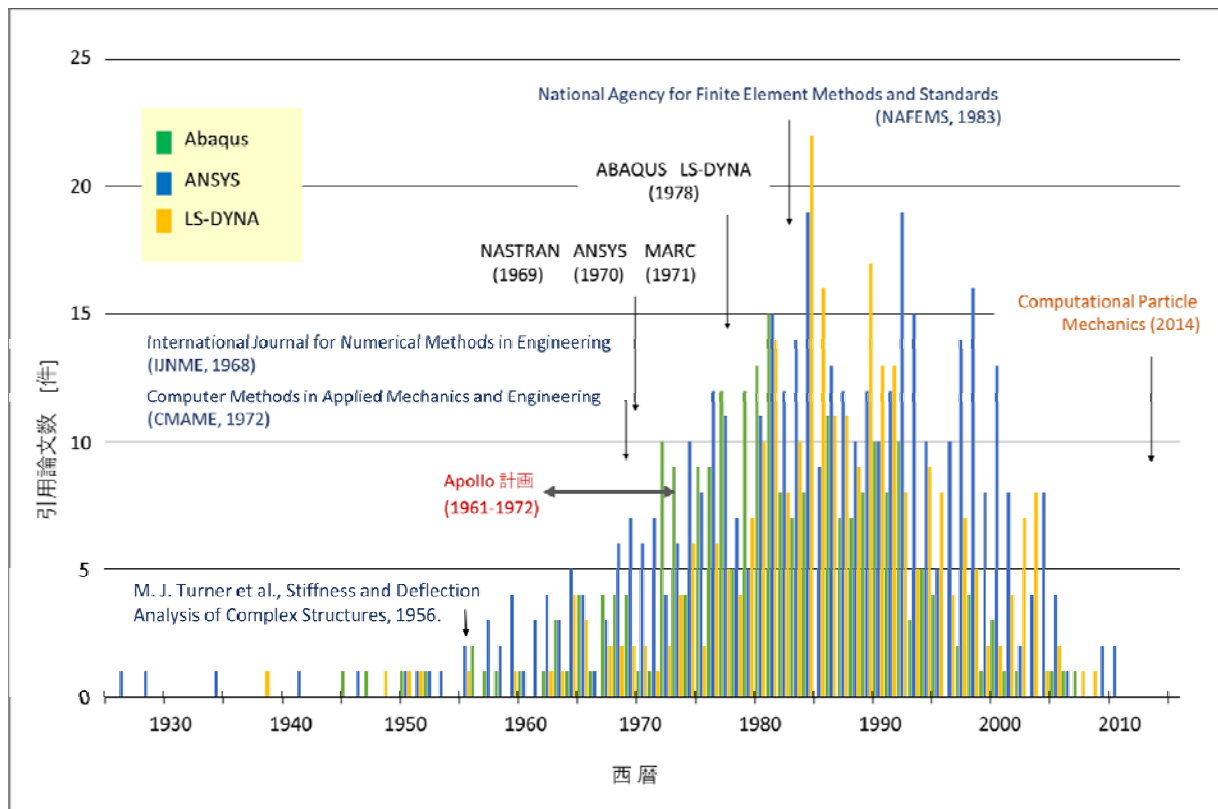


Fig. 2 汎用 FEM ソフトウェア^{14),15),16)}の理論マニュアルにおける論文引用数の推移

いる¹⁷⁾。Fig.2 が示すように、この時期、FEM に関する学術研究はピークを迎えた。

後述のように、「計算力学の地盤は欧米にこそある」という自信は、研究と実用が一体化した以上の経緯によるところが大きいのではないだろうか。計算固体力学の成立と汎用 FEM の実用化は、欧米において同時に進行する関係にあったと見てよい。その後 90 年代以降の文献の引用は、FEM そのものというよりも、材料モデルやメッシュフリー法など新しい概念の導入に移行した。2000 年以降の成果の引用は明らかに減少の傾向にあり、2 章に触れたように、ソルバー単体としての FEM の開発が終わりを告げたことに対応している。

次に Fig. 3 は、ジャーナル別に引用の数を整理した結果である。自社開発を重視するなど、ソフトウェアによって情報開示や文献に対する姿勢は異なるので参考にとどまるが、前述の 2 誌 IJNME と CMAME からの引用が多くを占めることがわかる。両誌はそれぞれ以下のような性格を有している。まず IJNME¹¹⁾ の編集目的は、その Aims and Scope (目的と範囲) に明記されているように「工学問題を解決するための数値計算手法の開発」にある。この方針は創刊時から一貫して引き継がれており、現在でも下記 2 名の編集者の研究姿勢が強く反映されている。

René de Borst (Department of Civil and Structural Engineering, The University of Sheffield)

Charbel Farhat (Institute for Computational and Mathematical Engineering, Stanford University)

一方 CMAME¹²⁾ は、応用力学の工学的応用をめざしつつも、主には数学理論を指向したジャーナルである。やはり創刊以来の編集者の研究姿勢が色濃く反映されており、現在の編集者は以下の 3 名である。

Thomas J.R. Hughes (Institute for Computational Engineering and Sciences (ICES), University of Texas at Austin)

J. Tinsley Oden (Institute for Computational Engineering and Sciences (ICES), University of Texas at Austin)

Manolis Papadrakakis (Institute of Structural Analysis & Antiseismic Research, National Technical University of Athens (NTUA))

3.3. 応用力学と計算力学の関係

ここで、計算力学の特徴を明瞭にさせるために、応用力学と計算力学の定義の違いを確認しておこう。

- 応用力学とは、質量保存、運動量、角運動量、万有引力などの少ない基本法則に基づき、論理的な推論によって対象とする系の挙動を解析し、予測することである。(中略) これらの法則は共通の記述言語である数学を用いて表現され、対象系を構成する材料、あるいは系全体の特性も数学的に記述される。これによりの確な共通理解が得られることになる¹⁸⁾。

次に、

- 計算力学とは、力学法則によって支配されている現象を解明するための、計算手法の構築と利用に関する学問領域である。計算科学 (Computational science) が現れる前は、計算力学は応用力学の一

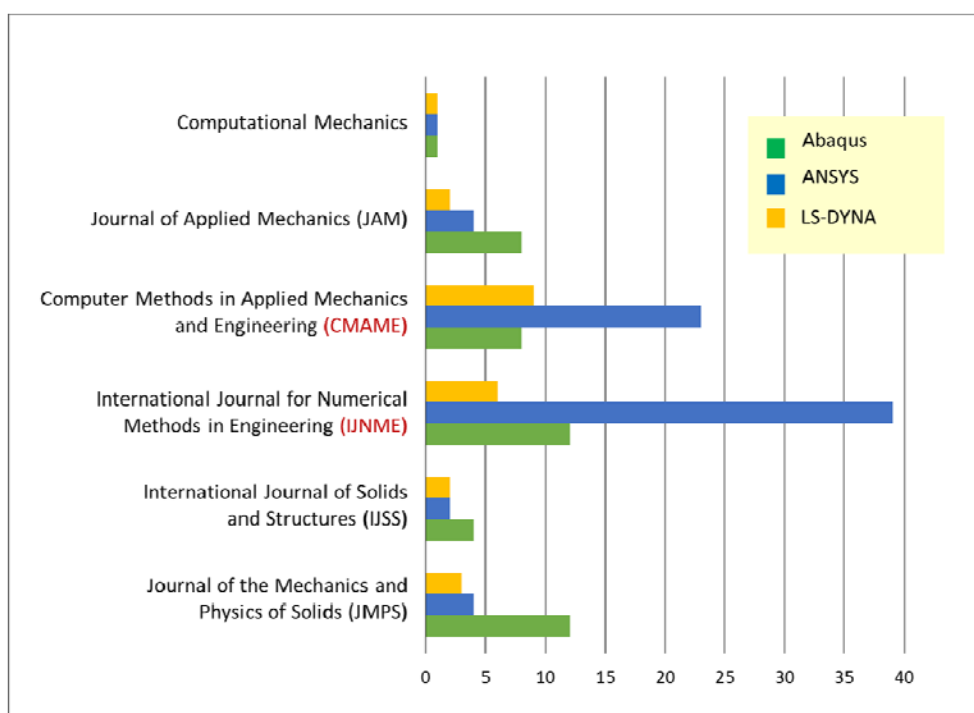


Fig. 3 汎用 FEM ソフトウェア^{14), 15), 16)}の理論マニュアルにおける主要ジャーナル別の論文引用数

分野として知られていたが、現在では計算科学の一領域と考えられている¹⁹⁾。

以上の対比から、計算力学の特徴を書き下してみると、

1. 応用力学の目的である「システムの挙動を解析して、予測すること」を継承し、
2. 数学モデルによる無用な近似の導入を避けつつ、
3. 挙動の数値的評価のための計算手法を構築し、
4. それを応用するための計算科学の一分野である。

ということになる。この特徴を踏まえて、計算力学をシミュレーションの中心に据えるという本論文の目的を達成しようとするれば、その課題は1~4の項目に対応して以下のように列挙できる。

- 1' 挙動把握のための、実験計測技術の高度化
- 2' 材料構成則など物理的に適切なモデルの開発
- 3' 計算技術の高度化と、計算機環境の整備
- 4' 最適化など設計応用技術の高度化

以下4章、5章ではこの課題を踏まえて研究動向を分析し、さらに6章において今後の取り組みを展望する。

4. 国際会議にみる研究動向

4.1. 新しい研究動向とテーマの盛衰

まず最近の国際会議におけるミニシンポジウムの動向を調査してみる。ミニシンポジウムとはオーガナイズドセッションと同義であり、指導的な立場にある研究者が、世界的な研究動向を踏まえて呼びかけることによって組

織される。情報交換と討議を目的とするが、最新の成果の披露によって新しい潮流の提起が思惑されることも稀ではない。直近の例として2016年6月にギリシアで6日間にわたって開催されたECCOMAS Congress 2016 (European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering)²⁰⁾を取り上げ、分析した結果をTable 1に示す。各トピックに対して企画されたミニシンポジウムと、対応するセッションの数をまとめた結果である(ミニシンポジウム内で約5論文をまとめて1セッションとする)。以下文中では、掲げられたトピックの名称を「」を付して示す。

この会議において注目すべき特徴の一つは「医療・生体」分野である。会議に先立って“Modeling of fiber-reinforced solids with application to soft tissue” (Gerhard A. Holzapfel)と題する基調講演が行われ、関連するミニシンポジウムの数は15件(34セッション)にのぼった。生体材料は血管や体液と連成して大きく変形するだけでなく、細胞レベルの電気化学的性質とも連成する。したがって複合した寸法と物理の場(マルチスケール・マルチフィジックス)に属する高難度の課題である。さらにその特性は部位や病状など状況に応じて異なり、時間的にも変化する。異方性の様相を示すことも多い。しかも外科的手術、薬品からの作用、循環系としての作用など、外的な要因にも左右される。しかしシミュレーションに期待されるものは大きく、多額の子算を背景に研究が進められていることが推察された。

計算力学の分野では1990年代に「メッシュフリー法」

Table 1 欧州計算理工学会議ECCOMAS²⁰⁾におけるミニシンポジウム(MS)の数

Topic	トピック	MS数	セッション数
Biological systems	医療・生体	15	34
Uncertainty quantification and error estimation	不確かさの定量化と誤差評価	10	14
Numerical simulation methods (including 10 sessions for IGA)	数値計算手法	20	55
Reduction methods	モデル縮約	4	12
Multiscale problems	マルチスケール問題	10	23
Optimization, inverse problems and control (including 19 sessions for Topology Optimization)	最適化と逆問題	13	32
Materials	材料モデル	14	24
Damage, fracture and failure	損傷・き裂・破壊	5	11
Discretization methods, grid, mesh and solid generation	離散化手法/モデル/メッシュ生成	8	14
Flow problems	流れ問題	12	26
High performance computing	ハイパフォーマンス計算	5	14
Interdisciplinary coupled and contact problems	連成問題と接触問題	13	23
Structural stability and dynamics	構造安定・動解析	22	35

が多数の注目を集め、一つの大きなテーマとなった。しかし今日では離散化やメッシュ生成の一部、ないしは単に数値計算手法の一つとして埋没しかねない状況にある。この種の盛衰は計算力学において珍しくない。第一人者といわれる研究者が喧伝することで流行が始まるが、汎用化の難しさが研究者の間で共有されたときに衰退する。70年代から80年代にかけて指摘されてきたように、自然科学もまた人間の社会的な営みの一部であることを免れない³⁰⁾ことの証左である。

Table 1 から読み取ることができないが、現在の流行は後述の *Isogeometric methods*²¹⁾ である。最初の発表から10年が経つが研究発表数も多く、未だ勢いは衰えていない。しかし汎用ソフトウェアへの実装例は現状極めて少なく、ミニシンポジウムとしては表中の「数値計算手法」に含まれてしまっている。

4.2. 伝統的なテーマと研究動向

一方、表中の「材料モデル」は「損傷・き裂・破壊」とならび古くからの課題である。ミニシンポジウムの数として突出してはいないが新しい課題が山積しており、多くの研究者が競い合う分野である。材料に関しては、原子・分子レベルの挙動と連続体の材料モデルを結びつける試みも「マルチスケール問題」の主要なテーマである。具体的には分子動力学法ないしは第一原理計算とFEMの連携、あるいはフェーズフィールドモデルによる相変態・凝固・溶融などの課題である。いずれも材料の微視的な形態変化と巨視的な物性を関連付けることによって材料特性を制御し、製造プロセスのシミュレーションに適用することが目的である。

また「構造安定・動解析」は、欧州において伝統的に好まれる課題である。世界計算力学会議 (*World Congress on Computational Mechanics: WCCM*) などにはあまり見られない特徴であり、近代的な研究といえども地域的な影響の下にあることがわかる。

4.3. 複雑化への対応

高度製品への実効が期待される分野として、「最適化と逆問題」は注目が集まるテーマである。今日、順問題であれば難度の高い問題でも相応に解けるようになってきたことに加え、人間の思考だけでは判断しづらい複合的な課題が増えてきたこと、あるいは個々からの積み上げ方式では全体系を把握できないような問題が日常的に現れるようになってきたためである。ベンダーにおいては、汎用FEMと最適化の組み合わせをアプリケーションプラットフォームの基幹機能として実装する動きが活発化しており、研究と並行した実務応用が急速に進む分野である。現在、いわゆる構造最適化に関してはトポロジー最適化の独壇場であるが、3Dプリンターを用いた積

層造形 (*Additive manufacturing*) との組み合わせに先端的な需要がある。勾配 (感度) が計算しづらい最適化問題に対しては進化的アルゴリズム (*Evolutionary algorithm*) を用いた展開も見られるようになってきた。

同様に、実用問題への適用の視点から「不確かさの定量化」にも多くの研究者が集まっている。ソフトウェアに一定の信頼性が期待できるようになった結果、ユーザーの技量が一定の水準を満たしていれば、その関心は解く行為に含まれる「曖昧さ」に向かうためである。

- ▶ 現象に対してモデルの定式化は整合しているか。
- ▶ 式を解くための条件設定は適切か。
- ▶ 入力データの精度は適切か。

といった妥当性を定量的に把握する試みは、事故対策など、シミュレーションに対する社会的な期待の面からも不可欠になってきている。この種の方法論は地味であり即効的でもないが、今後の大きな波となるに違いない。

製品の複雑化に関連しては、多数の構成要素からなるアセンブリ全体の挙動評価も難しい課題である。航空機や自動車など輸送機械の分野では、モデル縮約技術の歴史も古い。より精緻なシステムとして応答を予測するために、オンラインのハイパフォーマンス計算、またオフラインの最適化計算に対応した (パラメータ更新に対応した) 「モデル縮約」のための理論と技術の構築が始まっている。

5. 国際ジャーナルにみる研究動向

5.1. ジャーナルが求める研究の方向性

*IJNME*¹¹⁾ と *CMAME*¹²⁾ に改めて目を向けてみよう。出版社はそれぞれ *Wiley* と *Elsevier* であり、質量ともに研究のデータベースとして盤石の地位にある。両誌が掲げる *Aims and Scope* (目的と範囲) から、それぞれが確立してきたこれまでの研究動向を分析してみよう。この *Aims and Scope* の内容は、各誌の編集者が時代の動向を見極め、出版社と歩調を合わせながら定期的に改訂されている。掲載論文の先端性やインパクト性を高め、読者の指針となる役割を維持するためである。たとえば *IJNME* が受入れを表明している研究テーマは以下の通りである。 *Aims and Scopes* の原文通りの順に示すと、

- | | |
|---|------------|
| • model reduction, | モデル縮約 |
| • uncertainty quantification, | 不確かさの定量化 |
| • verification and validation, | 数学的・物理的検証 |
| • inverse analysis and stochastic method, | 逆問題と確率論的手法 |
| • optimization, | 最適化 |
| • element technology, | 要素技術 |
| • solution techniques and parallel computing, | 解法と並列化 |
| • damage and fracture, | 損傷と破壊 |

- mechanics at micro and nano-scales, ミクロ・ナノ力学
 - low-speed fluid dynamics, 流体力学 (低速流)
 - fluid-structure interaction, 流体 - 構造連成
 - electromagnetics, 電磁場解析
 - coupled diffusion phenomena, 連成拡散現象
 - error estimation and mesh generation. 誤差評価とメッシュ生成
- また補足として下記が声明され、国際会議の傾向と同じく、複合的な領域へ期待が向けられていることがわかる。It is emphasized that this is by no means an exhaustive list, and particularly papers on multi-scale, multi-physics or multi-disciplinary problems, and on new, emerging topics are welcome.

一方、CMAME が掲げる研究テーマは次の通りである。Mathematical models, variational formulations, and numerical algorithms related to finite element, boundary element, finite difference, finite volume, and meshless discretization methods in the following fields of computational science and engineering:

- Solid and structural mechanics, 固体・構造力学
- Fluid mechanics, 流体力学
- Mechanics of materials, 材料力学
- Heat transfer, 熱工学
- Dynamics, 動力学
- Geomechanics, 地盤・地質力学
- Acoustics, 音響
- Biomechanics, 生体力学
- Nanomechanics, ナノ力学
- Molecular dynamics, 分子動力学
- Quantum mechanics, 量子力学
- Electromagnetics, 電磁場

and also includes virtual design, multiscale phenomena, from nanoscale to macroscale, multiphysics problems, parallel computing, optimization, probabilistic and stochastic approaches.

IJNME と比較して、実用性よりは数学的に高度な内容への指向が見て取れる。また際立った特徴としては、分子動力学や第一原理計算など、計算物理の分野で発展してきた内容にまで投稿範囲を拡げている点を、挙げる事ができるだろう。

5.2. 主要2誌からみた研究動向

前述の国際会議の研究動向から主要なキーワードを選び、上記2誌のデータベースに対して検索をかけた結果を Table 2 に示す。表中の数字はヒットした論文数を示し、2誌が属する出版社が刊行する全てのジャーナルに対する結果も併記した。累積のデータであるので時間的な傾向はつかめないが、2005年に現れた Isogeometric 解析の136と334という数字は非常に大きい。Biological (生体)の272と285も大きく、今後はさらに増加すると見られる。一方 Multiscale (マルチスケール) や Topology optimization (トポロジー最適化) は登場から20年以上を経るにもかかわらず、依然として活発な研究対象である。

Model reduction (モデル縮約) の歴史も古く、現実的な問題をより少ない計算コストで解くための工夫は現在でもニーズが高い。近年では非線形問題や動的問題などに、固有直交分解 (Proper Orthogonal Decomposition: POD) や固有一般化分解 (Proper Generalized Decomposition: PGD) を適用し、大規模モデルの主要成分だけを抽出することによってモデルの自由度を縮約 (Model Order Reduction: MOR) する手法が注目を集めている。この

Table 2 主要ジャーナルにおけるキーワード検索の結果 (2016年3月現在)

	IJNME	Wiley	CMAME	Elsevier
isogeometric (アイソジオメトリック)	136	326	334	719
Multiscale (マルチスケール問題)	664	19,393	1,069	16,270
Uncertainty quantification (不確かさの定量化)	150	39,477	170	9,084
Topology optimization (トポロジー最適化)	607	23,050	583	22,009
Biological (生体工学)	272	1,244,805	285	85,770
Model reduction (モデル縮約)	2,734	1,033,842	2,533	262,042
Crack propagation (き裂進展)	997	31,706	607	41,225
Damage/fracture (損傷/破壊)	697	72,683	508	269,115
Coupled (mechanical) (連成問題)	2,873	185,061	2,281	131,122

MOR と呼ばれる手法は、最適化問題や V&V (Verification & Validation), メタモデルの構築, HPC など適用範囲が多岐にわたるため、コンスタントに投稿が多いようである。この MOR について日本で取り組む研究者は少なく、国内の学術講演会においてもセッションが組まれるほど認識は高くない。世界的な動向を見極めた研究を進めてゆく必要がある。

5.3. 粒子法など新たな研究動向

IJNME や CMAME は、新規の計算手法や数値モデルを主なスコープとしているが、前提となる解析手法の 90% 以上が FEM とその派生である。しかし近年の非線形シミュレーションの適用範囲は、複雑な相変化を伴う製造過程や、混相流、砕波を含む流れなど、従来の FEM では取り扱いが難しい対象に広がっている。逆にそのような対象を得意とする手法として粒子法がある。粒子法は流体の計算物理分野で開発されてきた経緯を持ち、空間にメッシュを用意する必要がない離散化の手法である。これまで FEM に従事するコミュニティとはやや距離があったため、Table 2 のキーワードにも表れないが最近の注目度は高い。3.2 節に示した主要な汎用 FEM にも急速に実装が進む状況である。これまで計算力学の主要ジャーナルの門戸は粒子法に対して決して広くなかったが、Fig.2 にも示すように、2014 年、Computational Particle Mechanics²²⁾ というジャーナルが T.I. Zohdi, E. Oñate, P. Wriggers らによって創刊された。Zohdi は米国計算力学の比較的若い継承者であり、製造過程におけるマルチフィジクス現象の FEM に取り組んできた経歴を持っている。また後者 2 名は FEM の権威である。今後はこのジャーナルを通して、粒子法の新たな知見が期待される。

6. 高度な実用問題への取り組み, 4 つの分類による対応

汎用 FEM と CAD が統合したアプリケーションプラットフォームの利点は、FEM が離散化手法であったこと（メッシュが存在すること）を意識せず、シミュレーションの目的を達成できる点にあると言われる。しかしその一方において先端的なニーズはますます突出し、産学協同など、研究者に対する期待も急速に高まる状況である。本章では高度な実用問題を実際に「解く」ことに注目し、その対応を 3 つに分類して考えてみる。

- 分類 1：現状では解けない問題への対応
- 分類 2：複雑化する現象と製品への対応
- 分類 3：汎用ソフトウェア利用技術の向上

検証の観点からは、さらに「解く以外」の対応についても注意が必要であるので、本論文では特に実験と計測の

役割について言及したい。すなわち、

- 分類 4：実験・計測の新たな役割

6.1. 分類 1：現状では解けない問題への対応

3.3 節に示したように、計算力学の目的は「支配方程式を、無用な近似を極力避け、適切に離散化して解くこと」にある。したがって第一の対応は、「現状では明らかに解けない問題を数値的に解く」ための方法論でなければならない。ここまでに述べた研究動向から選び出すと、以下のような具体例がある。

- 医療・医薬品分野における材料のモデリング：複合材料の有限変形・異方性モデル（生体材料、医療用樹脂などソフトマターと呼ばれる分野）
- 原子・分子レベルの挙動と連続体の材料挙動を結びつけるマルチスケール手法：分子動力学、第一原理計算などと FEM の連携。
- 損傷・破壊、き裂進展、破断・崩壊の問題：原子・分子シミュレーションと FEM の連携（マルチスケールを踏まえた動的および構造不安定問題）
- 高温、酸化・還元雰囲気など特殊環境下での材料のモデリング：変性や劣化、化学反応を考慮した材料モデル、およびその製造から保守、廃棄に至るまでのプロセスシミュレーション（フェーズフィールド法や粒子法の利用など）
- 凝固・溶融・分解および相変態を考慮した材料製造プロセスの数値シミュレーションと物性評価：フェーズフィールド法などと FEM の連携

一般に構造の非線形性は、材料非線形、幾何学的非線形、境界条件非線形の 3 つに分類される。上記の例はいずれも材料非線形を主としながら、幾何学的、境界条件的な非線形性が深く入り込んできた問題といえることができる。高機能製品の実現において、新材料の適用が革新的な役割を果たす場面は少なくない。しかし全く新しい材料の創製は容易ではないので、既存の材料を構造的に複合させ、あるいは複合した物理現象の下で利用することによって、新たな機能を実現する例が多い。上記の具体例はこのような事情の反映である。

この分類 1 において、V&V の観点からは数学的な検証 verification に力点があることに注意すべきだろう。解こうとする対象自体が新しいために、たとえ物理的な妥当性確認 validation が定性的にとどまるとしても、数値モデルの検証に研究の第一歩があるからである。実際、先端分野では材料の稀少性やコストのために実験自体が困難である場合も多く、現象解明の糸口をシミュレーションが担うケースは少なくない。3.3 節の課題 2' に示したように、材料に関連した研究は今日の最重要課題の一つであるが、個別のニーズに陥りやすく、汎用化への配慮が不可欠であることにも注意したい。

6.2. 分類2：複雑化する現象と製品への対応

一方、手法としては解析可能であっても、現象や工業製品の複雑化が実用的なシミュレーションを妨げる例がある。これらの問題を解析の「運用技術」、たとえば最適化、信頼性評価、大規模演算などの面から取り組む方法論を第2の分類として挙げたい。3.3節に示した課題3'と4'への対応である。

具体的には以下の例がある。

- 構造最適化、流体・構造連成、場の問題の最適化
 - ・ トポロジー最適化と積層造形
 - ・ 進化論的アルゴリズムによる最適化、および逆問題への適用
- CADとの融合、Isogeometric解析とその派生
 - ・ 高次の連続性・なめらかさなど、精度と利便性の向上
- システム全体の一体解析、大規模化への対応
 - ・ 高性能ハードウェアの利用技術（HPC）とビッグデータの活用技術
 - ・ モデル縮約（Model Order Reduction）技術、ID-CAE、メタモデル

● 検証と妥当性確認、V&Vのための不確かさの定量化
この分類2は現実的な課題を対象としているため、分類1と比較したとき、V&Vの観点からは物理的な妥当性確認 validation に力点がある。解法単独では到達し得ないが、運用技術の向上によって肉薄するという考え方である。最適化はその好例であろう。しかしこの分類2が対象とする複雑性の問題は、単に技術面だけでなく、より本質的な2つの課題を抱えている。

第1は複雑性から来る開発負荷の（際限のない）増大である。安全性と経済性など、高度なトレードオフによって成立している工業製品の分野では、事故の予防と対策に莫大な経費を必要とすることを思い出すのがよい。社会的な構造との関連を見ず、単に技術的な不具合として製品事故を捉えるのは不用意に過ぎる²⁶⁾。

第2は、これまで安全率や工学的判断によって片付けられてきた「低確率の事象」の顕在化である。自然災害や過酷事故は、「科学によって問うことはできても、科学によって答えることができない」トランスサイエンス³⁰⁾と呼ばれる領域に陥ることが、既に1970年代から指摘されている。数少ない基本法則から出発して扱うには、現代の技術を取り巻く環境はあまりにも複雑な様相を呈する²⁹⁾からである。

地震・津波に代表される自然災害を例にとると、予知は困難であるとしても、幾何学的情報、材料特性、境界・初期条件が揃い、大規模計算の環境が整えば、連続体近似の範囲において災害規模の予測やリスク評価は可能になってきている。破壊の問題、また地盤・構造物、構造物・流体の相互作用の問題など向上すべき課題は多いが、

手法論的に道筋は暗くない。しかしモデル縮約やメタモデルの導入によって計算コストを下げ、不確かさを定量化し、確率論的なリスク評価を実現することが当面の課題と言えるだろう。社会的な価値と工学の関連について、我々は真剣に取り組む必要がある。最適化問題やHPCの分野は多くの日本人研究者を擁しているが、Isogeometric解析、モデル縮約、不確かさの定量化に取り組む研究者は非常に少ない。人的資源の確保も重要な課題である。

6.3. 分類3：汎用ソフトウェア利用技術の向上

最近の欧日における調査からは、企業におけるシミュレーション業務の65%が汎用ソフトウェアに頼ることが知られている²⁴⁾。また特に欧米では、汎用ソフトウェアを中核として国家プロジェクトを進める例が多く見られる²⁵⁾。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²³⁾。3.3節に示した課題3'と4'に対応し、更に強化する方向性と言ってよい。

汎用FEMが登場してから既に50年が経過する。これまで示した二つの分類と矛盾するかのように見えるが、解けないと思われる問題であっても、汎用ソフトウェアの理論的な背景と性能を理解していれば解けるケースが少なからずありえる。連続体近似という前提を堅持できるのであれば、「応用力学は数少ない基本法則で支配される¹⁸⁾」のであるから、問題の大半は既に汎用FEMの守備範囲に入っている可能性を否定できないからである。多大な情報量の中から、本当に解けない問題と、知らない問題を正しく識別することが必要な時代になってきた。看過されがちであるが、汎用FEMの大半が外国製であることを踏まえると、ソフトウェアベンダーに属する日本人エンジニアの力量は、国内製造業におけるシミュレーションの水準を左右するといつて過言ではない。汎用FEMが内蔵する情報量は、開発側からの適切な支援が無い限り、ユーザーに許された習得時間の容量をはるかに上回るからである。ベンダーを交えた産学の強い連携の維持が突破口になるだろう³³⁾。昨今では開発者の想定を超える使い方を考案し、新たな課題に取り組む例も少なくない²⁷⁾。

第4章、第5章では多くを触れなかったが、「高性能要素の開発（特に板・シェル）」、「破壊・き裂進展」、「構造不安定問題」は、FEMにおける息の長い研究テーマである。新鮮さに欠けることは否めないが、計算力学の本流であることに間違いはない。なかでも構造不安定現象の解析は、汎用FEMの機能を駆使すれば相当のところまで現象の再現が可能であることが実証されており、分類3で一層の拡大が望まれる分野である。

6.4. 分類4：実験・計測の新たな役割

以上、難しい実用問題を「解く」視点から3つの分類を示したが、本節では「解く以外」の技術の役割について言及する。3.3節に示した課題1'への対応である。特に本論文では「計測」と呼ぶべき技法の高度化が、シミュレーションを新たな境地に導く可能性を指摘しておきたい。あえて「計測」としたのは、「実験」が目的であるとするれば計測はその具体的な手段だからである。

今日の計測技術は、これまで不可能であった条件下での観測を可能とするだけでなく、扱える物理量の種類、時間・空間の幅、データの量とその処理速度を格段に向上させてきた。これらの進歩によって現象の数値的な把握が進む結果、単に実験がシミュレーションの結果を一方的に検証するのではなく、「両者が“互いに”その妥当性を検証し、その手続きを通じて現象を定量的に理解する」という新しい考え方が現れてきた^{24),34)}。すなわち「計測」という手段の向上によって、「実験」の質と目的に大きな変化がもたらされたと言ってよい^{28),29),32)}。この対比関係は、「理論」あるいは「解析」に対して「計算」が果たしてきた役割と全く同じである。

今日、高真空、高純度、高精度など、これまで科学の仮定として扱われてきたような条件が工場規模で成立し、それを実現するための技術が現代の工学を特徴づけている。デジタル化された計測や計算は、この新しい分野に属する技術である。1章に示したようにシミュレーションという体系は、学問である計算力学を中心としながら、これら新しい技術の集合体として成る。そのつながりは計算機技術を媒介にしているため、時代の変化に対して柔軟であらざるを得ない。計測とシミュレーションが相乗し、互いを新たな方向に導くようになってきた昨今の経緯は、シミュレーションという体系が持つ本来的な柔軟性に由来している。

物理的な適切さを護り、同時に見通しの良さを追求する行為は、我々の知的探求心をかきたてる。現象の本質を理解するために、実践的、反復的な試みの継続を実現する点において、シミュレーションが果たしてきた役割は大きい。「理論と実験」また「科学と技術」という旧来の二分法的な理解を超える科学観の成立^{30),32)}を、この統合的な新しい体系は示唆している。

結言

計算力学を、シミュレーションの中心に改めて位置づけるという立場に立ち、主要な国際会議やジャーナルの研究動向に基づいて、固体の非線形シミュレーション技術の現状と今後を展望した。計算力学を3つの分類すなわち、現状では解けない問題への対応、複雑化する現象と

製品への対応、汎用ソフトウェア利用技術の向上に分けて方向性を示したが、これらの研究開発は学と産が協働で推し進めるべき対象であることを結言として強調したい。また近代的なシミュレーション技術の向上に対して、特に計測技術との連携の重要性を指摘した。

参考文献

- 1) Turner M. J., Clough R. W., Martin H. C. and Topp L. J. (1956) Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures, *Journal of the Aeronautical Sciences*, 23 (9), 805.
- 2) MacNeal, R. H. (2006) 「CAE 私の履歴書」『計算工学』11(1), 1325-1328.
- 3) 石谷隆広(2007) 「Jason (Jack) Lemon 博士 開拓者、先人の明を持つ人、友人」『計算工学』12(2), 1585-1586.
- 4) 新村出編(2008) 『広辞苑第6版』 岩波書店.
- 5) Hibbitt, D. (2005) 「CAE 私の履歴書」『計算工学』10(3), 1211-1214.
- 6) 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.
- 7) 石井恵三(2015) 「汎用構造解析ソフトウェアの歩み」『計算工学講演会論文集』20, D-12-3.
- 8) *Journal of Applied Mechanics*.
<https://journaltool.asme.org/home/JournalDescriptions.cfm?JournalID=1&Journal=JAM> [2016, September 30].
- 9) *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*.
<http://www.journals.elsevier.com/journal-of-the-mechanics-and-physics-of-solids> [2016, September 30].
- 10) *International Journal of Solids and Structures*.
<http://www.journals.elsevier.com/international-journal-of-solids-and-structures> [2016, September 30].
- 11) *International Journal for Numerical Methods in Engineering*.
[http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/\(ISSN\)1097-0207](http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/(ISSN)1097-0207) [2016, September 30].
- 12) *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*.
<http://www.journals.elsevier.com/computer-methods-in-applied-mechanics-and-engineering> [2016, September 30].
- 13) *Computational Mechanics*.
<http://link.springer.com/journal/466> [2016, September 30].
- 14) Dassault Systèmes Simulia Corp. (2014) *Abaqus Theory Guide*, RI, USA.
- 15) ANSYS Inc. (2016) *The Mechanical APDL Theory Reference*, PA, USA.
- 16) Livermore Software Technology Corp. (2016) *LS-DYNA Theory Manual*, CA, USA.
- 17) *NAFEMS*. https://www.nafems.org/about/about_nafems/history/

- [2016, September 30].
- 18) 小林昭一(2000)「応用力学の明日」『土木学会誌』85(8), 巻頭論説.
- 19) *Computational mechanics*.
https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_mechanics [2016, September 30].
- 20) VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS Congress 2016), June 5-10, 2016, Crete, Greece.
- 21) Hughes T.J.R., Cottrell J.A and Bazilevs Y. (2005) Isogeometric analysis: CAD, finite elements, NURBS, exact geometry and mesh refinement, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 194 (39-41), 4135-4195.
- 22) *Computational Particle Mechanics*
<http://www.springer.com/engineering/mechanics/journal/40571>
 [2016, September 30].
- 23) 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.
- 24) 小林卓哉(2016)「シミュレーションを遂行する力」『社会技術研究論文集』13, 1-12.
- 25) 例えば, 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 [2016, September 30].
- 26) 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.64(藤本)).有斐閣.
- 27) 例えば, 松原成志朗, 齊藤俊幸, 生出佳, 進博人, 梅田学, 勝田泰広, 三原康子, 小林卓哉, 寺田賢二郎(2016)「焼成過程における陶器材料の構成方程式とその関数形の決定方法の提案」『日本機械学会論文集』82(843), 16-00266.
- 28) 特定非営利活動法人・非線形CAE協会(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/> [2016, September 30].
- 29) 例えば 坂本賢三(1987)『先端技術のゆくえ』(p.14, p.19) 岩波書店.
- 30) 岩波講座 哲学(2008)『9 科学/技術の哲学』(p. 62(出口), p. 208, p. 221(小林)) 岩波書店.
- 31) Weinberg, A. M. (1972) Science and Trans-Science, *Minerva*, 10 (2), 209-222.
- 32) 新岩波講座 哲学(1986)『8 技術 魔術 科学』(p. 23(坂本)) 岩波書店.
- 33) 例えば 寺嶋隆史, 瀧澤英男, 吉田純司(2015)「NPO活動による超弾性体ダメージ粘弾性体構成則の汎用FEMコードへの組み込み」『計算工学公演論文集』20.
- 34) ASME V&V 10-2006 (2006) *Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics*, New York.

謝辞

筆者らは特定非営利活動法人・非線形CAE協会に属する。本論文の骨子は、その活動によってもたらされた知見に多くを頼った。関係の諸氏に深甚の敬意と感謝を表す。2008年、道半ばにして不帰となった野口裕久・慶應義塾大学教授を悼み、その先見の才識を惜しむ。

RESEARCH TRENDS OF COMPUTATIONAL SOLID MECHANICS AND THEIR PRACTICAL APPLICATIONS

Takaya KOBAYASHI¹, and Kenjiro TERADA²

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

²Ph.D. (Computational Mechanics) Professor, Tohoku University, International Research Institute of Disaster Science
 (E-mail: tei@irides.tohoku.ac.jp)

Simulation is the attempt to ascertain the true nature of a large-scale complex system by replacing a part of the system with a simpler alternative system. Simulation technology consists of three pillars: computational mechanics as a science, industrial technologies as applications, and computer hardware and software, which tie-up between science and its applications. Nevertheless, the authors believe that computer mechanics, which only provides physical insights into the true nature of objects, should be the central pillar of simulation technology. Based on the survey results of research trends in major international conferences and journals, this paper aims to discuss the fundamental factors related to the development of computational solid mechanics.

Key Words: *computational solid mechanics, computational mechanics, simulation, finite element method, CAE, FEM*