

報告

ものづくり支援のための
計算力学シミュレーションの
品質保証に向けて



平成23年（2011年）4月28日

日本学術会議

総合工学委員会・機械工学委員会合同

計算科学シミュレーションと工学設計分科会

この報告は、日本学術会議総合工学委員会・機械工学委員会合同計算科学シミュレーションと工学設計分科会が同分科会ものづくり支援シミュレーション検討小委員会での審議を反映して取りまとめ、公表するものである。

日本学術会議総合工学委員会・機械工学委員会合同
計算科学シミュレーションと工学設計分科会

委員長	萩原 一郎	(連携会員)	東京工業大学大学院理工学研究科教授
副委員長	松宮 徹	(連携会員)	新日本製鐵(株) 顧問
幹事	杉原 正顕	(連携会員)	東京大学大学院情報理工学系研究科教授
幹事	高橋 桂子	(連携会員)	(独) 海洋研究開発機構地球シミュレータセンタープログラムディレクター
	笠木 伸英	(第三部会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
	岸浪 建史	(第三部会員)	(独) 国立高等専門学校機構・理事、釧路工業高等専門学校校長
	岸本 喜久雄	(第三部会員)	東京工業大学大学院理工学研究科教授
	北村 隆行	(第三部会員)	京都大学工学研究科教授
	木村 文彦	(第三部会員)	法政大学理工学部機械工学科教授
	矢川 元基	(第三部会員)	東洋大学計算力学研究センター・センター長・教授
	久保 司郎	(連携会員)	大阪大学大学院工学研究科教授
	小林 敏雄	(連携会員)	東京大学名誉教授 (財) 日本自動車研究所副理事長・研究所長
	白鳥 正樹	(連携会員)	横浜国立大学名誉教授、同安心・安全の科学研究教育センター特任教授
	杉原 厚吉	(連携会員)	明治大学大学院先端数理科学研究科特任教授
	鈴木 宏正	(連携会員)	東京大学先端科学技術研究センター教授
	田端 正久	(連携会員)	早稲田大学理工学術院教授
	中橋 和博	(連携会員)	東北大学大学院工学研究科教授
	中尾 充宏	(連携会員)	(独) 佐世保工業高等専門学校校長
	福田 収一	(連携会員)	Stanford University, Consulting Professor、放送大学客員教授
	藤井 孝蔵	(連携会員)	(独) 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所副所長・教授
	松尾 亜紀子	(連携会員)	慶応義塾大学理工学部教授
	三井 斌友	(連携会員)	同志社大学理工学部教授
	水野 毅	(連携会員)	埼玉大学大学院理工学研究科教授

宮内 敏雄	(連携会員)	東京工業大学大学院理工学研究科教授
宮崎 則幸	(連携会員)	京都大学工学研究科教授
室田 一雄	(連携会員)	東京大学大学院情報理工学系研究科教授
吉村 忍	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
加藤 千幸	(特任連携会員)	東京大学生産技術研究所教授

ものづくり支援シミュレーション検討小委員会

委員長	白鳥 正樹	(連携会員)	横浜国立大学名誉教授、同安心・安全の科学研究教育センター特任教授
幹事	鈴木 宏正	(連携会員)	東京大学先端科学技術研究センター教授
	岸浪 建史	(第三部会員)	(独) 国立高等専門学校機構・理事、釧路工業高等専門学校校長
	木村 文彦	(第三部会員)	法政大学理工学部機械工学科教授
	小林 敏雄	(連携会員)	東京大学名誉教授 (財) 日本自動車研究所副理事長・研究所長
	杉原 厚吉	(連携会員)	明治大学大学院先端数理科学研究科特任教授
	中橋 和博	(連携会員)	東北大学大学院工学研究科教授
	松尾 亜紀子	(連携会員)	慶応義塾大学理工学部教授
	水野 毅	(連携会員)	埼玉大学大学院理工学研究科教授
	加藤 千幸	(特任連携会員)	東京大学生産技術研究所教授
	大富 浩一		(株) 東芝研究開発センター・参事
	工藤 啓治		ダッソー・システムズ・シムリア (株) コンサルタント
	沢田 龍作		トヨタ自動車 (株) 第二技術開発本部・シニアスタッフエンジニア
	渡邊 昌俊		(株) 日立製作所機械研究所・主任研究員

1 作成の背景

シミュレーションとは現実の世界で起こっている現象を数学モデルで記述して、その仮想空間の中で起こる現象をコンピュータを駆使して解き、結果を可視化等の手法により表示して、あたかもその解が現実空間で起こった事象であるかの如くに見せる手法である。この言葉は極めて広義の意味を持つが、本報告の表題である「ものづくり支援のための」シミュレーションと限定した場合には、これを「工学シミュレーション」と呼ぶことができよう。この手法をものづくりのための有用な手段として活用するためには、設計が許容する誤差（あるいは不確かさ）の範囲で、この仮想空間で求められた解が現実世界でおこる現象を正しく表していること、すなわち「工学シミュレーションの品質保証」が必須の条件として求められる。

工学シミュレーションには機械・構造物を対象とする力学シミュレーションのほか、集積回路作成支援のための半導体シミュレーションあるいは化学分野における分子設計シミュレーション等それぞれの分野で様々な手法が開発されているが、本報告においては論点が発散するのを防ぐため、連続体を対象とした力学シミュレーションに焦点を絞り、以下これを「計算力学シミュレーション」と称して議論をすすめることにする。

2 現状および問題点

1990年代から現在にかけて、コンピュータを利用した設計のツール CAD (Computer Aided Design) および計算力学シミュレーションのツール CAE (Computer Aided Engineering) が相次いで開発され、これらが統合化されて、産業界のものづくり現場で活用されるようになってきた。これらのツールの導入により、従来の試作・実験の繰り返しをシミュレーションで代行することが可能になり、開発工期とコストの大幅な削減がはかれるようになった。企業の経営者もものづくりのプロセスに計算力学シミュレーションを採用することの利点に気づき始め、最近では大企業のみならず、中小企業に至るまでこの手法が広範に採用されつつある。

このことはものづくり現場で働く一般の設計者が、力学および計算科学等の高度の知識の詰まったシミュレーションツールをブラックボックスとして使うことを意味しており、正しく使いこなせれば極めて有効であるが、誤った使い方をした場合にはそれによって開発された構造物等の安全性は必ずしも保証されず、使用中に破壊する等の思わぬ事故のもとになる可能性があり、実際にそのような事例も報告されている。ものづくりにおいては安全性を担保することが他の何よりも優先事項であり、これはものづくりのためのシミュレーションにおいても例外ではない。すなわち計算力学シミュレーションの品質保証の仕組みを作ることが極めて重要である。産業界においては開発する製品それ自体の品質に対するこだわりは極めて高いにも関わらず、製品を開発するツールとしての計算力学シミュレーションの品質に関しては、これを担保するための組織的な取り組みが行われている状況にはない。また学術界においても計算力学シミュレーションが

切り拓く新たなイノベーションの可能性の追究に研究の主眼がおかれ、この手法が産業界に普及した場合の負の側面、すなわち品質を担保するためのリスク管理の方法論に関する体系的な研究が行われているとはいいがたい。

海外においては英国の NAFEMS (National Agency for Finite Element Methods and Standards) および米国機械学会等においてこの問題の重要性が指摘され、国際的な標準化への戦略的な取組みが展開されつつある。我が国においても計算力学シミュレーションの品質を担保する仕組みづくりに産官学が連携して早急に取り組む必要がある。

3. 提案の内容

我が国の産業の基幹をなすものづくりにおいて、計算力学シミュレーションの果たす役割が増大しており、将来的にはさらに大きくなって次世代のイノベーションをもたらすキーテクノロジーとなりつつある。また一般の設計者も含めてシミュレーション業務に従事する技術者も爆発的に増大しつつある。このような環境の下で我が国が従来と同様あるいは従来にも増して国際的に競争力のある高機能・高品質の製品を開発してものづくり産業の活性を維持・発展させていくためには、「計算力学シミュレーションの品質」について課題の分析を行い、しかるべく対応していくことが極めて重要である。この分野の学術研究に携わる研究者、産業界においてこれらの業務に携わっている技術者、および産官学の指導的立場にある者に対して以下の提案を行う。

- (1) シミュレーションの品質にも様々な側面があり、学術的な視点から研究を行って解決をはかるべき課題も数多くある。研究者がこれらの課題に積極的に取り組み、課題の解決に貢献することを期待する。また関連学協会が協調してこれら研究の成果を体系化、標準化していくことが求められる。
- (2) シミュレーション業務がビジネスの一環として扱われるようになってきた現在、そのビジネスの流れの中で品質保証を行う仕組みを構築していく必要がある。現在いくつかの学協会が始まっているこのような取組みに対して、国際的な標準化への流れに乗り遅れないよう、国としても積極的に支援していくことが必要である。また産業界もこのような品質管理システムを作ることの重要性を理解し、早急に導入するとともに、これに必要な対価を負担すべきである。
- (3) 高品質なシミュレーションを担保する最も重要な因子は人材育成の問題である。この問題は大学および大学院教育の問題と社会人教育の問題に分けられるが、本報告の範囲で議論をするにはテーマが大きすぎる。別途この問題を取り上げて議論をする必要がある。本報告の中では計算力学技術者の認定制度について述べたが、日本機械学会で行われているこの取組みをさらに発展させ、他分野も含めて国際的に通用する技術者認定制度に発展するよう国レベルでの支援が必要である。

目 次

1 はじめに（計算力学シミュレーションの発展と産業界への普及）	1
2 ものづくりと計算力学シミュレーション	5
3 産業各分野における計算力学シミュレーション適用の現状と課題	7
4 計算力学シミュレーションにおける誤差と品質保証	11
5 計算力学シミュレーションにおける品質管理システム構築の必要性	15
6 人材の育成と解析技術者認定	18
7 まとめ	21
<参考文献>	22
<参考資料1>ものづくり支援シミュレーションの課題	23
A 1 概要	23
A 2 設計における CAE 活用プロセス変革への期待と実践	25
A 3 航空機開発における数値流体力学の活用	30
A 4 ものづくりのためのシミュレーションに必要な物理現象モデル	34
A 5 高エネルギー物質の設計	36
A 6 メッシュ生成技術の現状と課題	38
A 7 現物ベース CAE	40
A 9 今、なぜ計算の品質なのか	48
A 10 ものづくり現場における計算品質について	52
<参考資料2>委員会の開催記録	57

1 はじめに（計算力学シミュレーションの発展と産業界への普及）

シミュレーションとは現実の世界で起こっている現象を数学モデルで記述して、その仮想空間の中で起こる現象をコンピュータを駆使して解き、結果を可視化等の手法により表示して、あたかもその解が現実空間で起こった事象であるかの如くに見せる手法である。この言葉は極めて広義の意味を持つが、本報告の表題である「ものづくり支援のための」シミュレーションと限定した場合には、これを「工学シミュレーション」と呼ぶことができよう。工学シミュレーションには、機械・構造物等を主たる対象とする力学シミュレーションのほか、集積回路作成支援のための半導体シミュレーションあるいは化学分野における分子設計シミュレーション等、それぞれの分野において様々な方法があるが、本報告においては論点が発散するのを防ぐため、連続体を対象とする力学シミュレーションに議論を絞ることにして、以下これを「計算力学シミュレーション」と呼ぶことにする。（以下ではこの言葉を単にシミュレーション、解析、あるいはCAE等の言葉で表すこともある。）計算力学シミュレーションの基礎となる計算力学の代表的な手法としては、有限要素法、差分法、有限体積法等が挙げられるが、これらはそれぞれ、構造、流体、熱移動等の連続体に対して、連立偏微分方程式の初期値問題あるいは境界値問題で表される場の問題を離散化して解く汎用的な工学シミュレーションの手法として、1960年代から1970年代にかけて開発された手法であり、デジタル・コンピュータ（以下コンピュータという。）の発展とともに発展・普及してきた。70年代にはNASTRAN等の汎用プログラムが開発され、ユーザーは自分でプログラムを作らなくてもこれをブラックボックスとして利用することが可能になり、また当初それぞれ別の分野で研究・開発が行われていたこれらの手法が計算力学と総称され、実験、理論に次ぐ第三の方法として認知されるようになった。

研究面ではIACM (International Association of Computational Mechanics)が1981年に設立され、第1回WCCM (World Congress on Computational Mechanics)が1986年に米国で開かれて以来、2010年オーストラリアのシドニーにて第9回目の開催に至るまで毎回千人（最近では3千人）以上の参加者を集めて活発な研究交流が行われている。これはひとつの代表例を示したに過ぎず、現在では計算力学に関する国際会議は世界各地でほぼ日常的に開かれており、この分野で活躍する研究者の層の厚さを示している。研究者の専門分野を分析してみると、上記の構造力学、流体力学、熱工学等に携わる研究者をコアとして、機械工学、建築・土木工学、航空工学、船舶工学、電気・電子工学、材料工学、応用数学、応用物理等の多岐にわたっており、まさにこの分野が学際的な多方面の研究者からなる総合工学としての特徴を持っていることが分かる。

我が国においては、1988年に日本機械学会において材料力学、機械力学、流体工学、熱工学等に携わる研究者・技術者らが横断的に集まって計算力学部門が新たに設置され、また1995年には、機械工学、建築・土木工学、電気・電子工学、原子力工学、情報科学、応用数学等の多様な分野の研究者・技術者で構成される日本計算工学会が発足して活発な活動を展開している。このほか日本シミュレーション学会、日本応用数理学会ほかの多数の

学協会においても、計算力学に関する研究あるいはこの手法を用いた研究は活発に行われており、先に述べたようにこの手法がこれまでの実験、理論に次ぐ第三の方法として地位を築いていることが分かる[1]。

一方、産業界におけるものづくりの現場においては、従来は実験および理論に基づく研究開発と、経験の積み重ねに基づいた規格・基準に依拠して設計が行われていた。70年代から80年代にかけて、コンピュータの能力の飛躍的发展とあいまって計算力学シミュレーションの有効性が立証され、各種汎用プログラムが整備されるとともに、産業界においてこれを積極的に活用する機運が出てきた。例えば既存の機械・設備等における運転中の事故などのトラブル発生等緊急の対応を迫られた折に、実験による検証は時間がかかりすぎ、またパラメーター・スタディは困難であるなどの理由で、シミュレーションによる事故原因の究明に活用されて成果を挙げた。次いでシミュレーションの信頼性が担保されればという条件付で、従来の規格・基準に基づく保守的な設計に代えて、シミュレーションに基づくより合理的な設計が認められるようになり、航空機、建築構造物、自動車などの各種構造物の軽量化を追求する有力な手法として活用されるようになった。しかしこれらの解析は、企業の大型コンピュータの周辺で仕事をする解析の専門家により行われていた。

90年代に入って、エンジニアリング・ワークステーション（EWS）およびパーソナル・コンピュータ（以下パソコンという。）の普及により、各種の商用の汎用プログラムがEWSあるいはパソコン上で使えるようになり、企業の設計現場の最前線で仕事をする設計技術者達にもこれを使って設計の仕事をする環境が整ってきた。設計技術者は通常、CAD

（Computer Aided Design）のツールを使って設計図面を描くなどの仕事をする。まず作るべき製品を構想し、これを図面に表す。その上で構造強度、振動、流体特性、熱特性等検討すべき点があれば、まずは規格・基準に従って検討し、さらに改良すべき点があれば解析の専門家に委託してシミュレーションによる詳細解析を行い、設計のより合理化をはかる。ここで二つの問題が発生する。ひとつは、設計者が使うCADのツールと解析の専門家が使うシミュレーションのツールであるCAE（Computer Aided Engineering）はそれぞれ開発・発展の過程が異なるために、それぞれのツールで処理するデータ構造が必ずしも整合的でないことである。このため、CADデータとCAEデータの整合をはかり、これらがネット

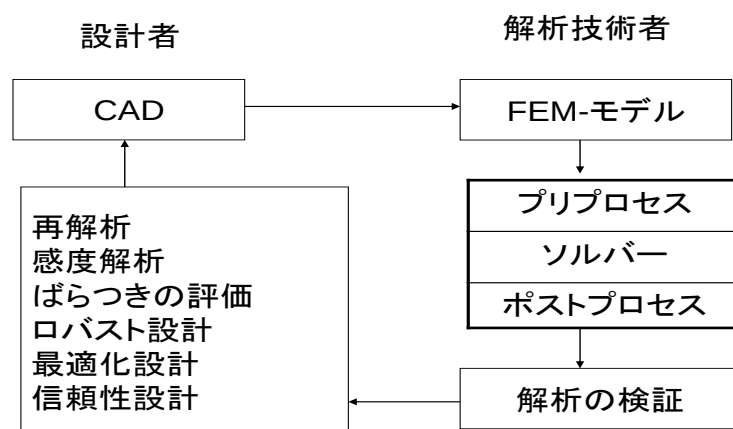


図1 CAD-CAE 統合化システム

上でスムーズにやり取りできるようにする必要がある。これをCAD-CAEの統合化と言う(図1参照。図の左側の欄は主としてCADに関する業務を、また右の欄は主としてCAEに関する業務を示す)。

この問題は90年代半ば以降集中的に研究開発がおこなわれて、現在では市販の主たるCADソフトとCAEソフトとの間では統合化が行われている。

第二の問題は、設計者が解析の専門家に詳細解析を委託した場合、その結果が設計者に戻ってくるまでにかなりの時間がかかることである。設計者は開発の最前線で絶えず時間に追われて仕事をしており、解析を委託して結果が戻ってくるのを1ヶ月待つ代わりに、自分で解析してその日のうちに結果を出したいというニーズがある。すなわち力学、計算科学等に精通した解析の専門家が解析を行う代わりに、一般の設計者がCAEのツールをブラックボックスとして使いたいというニーズである。このようなニーズに応えるべく、最近では設計者にも使えるようなCAD-CAE統合化ツールが市販されるようになってきている。このような状況の下、新たな問題が発生してきた。すなわち必ずしも高度の力学および計算科学等に通じているわけではない一般の設計者が、これらの知識が高度に詰まったシミュレーションツールを正しく使いこなせるのかという問題である。すなわち、計算の品質をいかに保証するかという問題である。(CAD/CAEの現状に対する考察は参考資料1のA2を参照)。計算力学シミュレーションのツールは正しく使いこなせれば極めて有効であるが、誤った使い方をした場合にはそれによって開発された構造物等の安全性は必ずしも保証されず、使用中に破壊する等の思わぬ事故のもとになる可能性があり、実際にそのような事例も報告されている(第5章参照)。ものづくりにおいては安全性を担保することが他の何よりも優先事項であり、これはものづくりのためのシミュレーションにおいても例外ではない。すなわち計算力学シミュレーションの品質保証の仕組みを作ることが極めて重要である。

以上のような背景の下、日本学術会議総合工学委員会・機械工学委員会合同 計算科学シミュレーションと工学設計分科会においては、上記に見たような計算力学シミュレーションがものづくり、特に設計のプロセスに果たす役割について現状分析と課題の抽出を行うべく、ものづくり支援シミュレーション検討小委員会を設置して、鋭意検討を行ってきた。その詳細は<参考資料1：ものづくり支援シミュレーションの課題>にまとめられている。本報告はこれらの議論をさらに吟味し、社会のなかで直接・間接にこれらの業務に携わっている技術者および研究者、および産・官・学の指導的立場にある者に向けて発信すべき事項を提案としてまとめたものである。

計算力学シミュレーションの品質問題については、日本学術会議の報告「大規模計算力学ソフトウェア開発に関する日本の総合戦略」[1]、「構造工学における現在の課題—設計クライテリアとコンピュータ依存社会—」[2]においてこれまでも言及されている。特に後者においては、構造工学(土木、建築、航空機、船舶)分野における計算力学シミュレーションの果たす役割を高く評価しつつも、コンピュータ依存社会に懸念されるリスクに警鐘を鳴らしており、その立場は基本的に本報告で展開する議論と同じ立場に立つものである。本報告においては、現在直面しているこの問題の緊急性に鑑みて、改めてこの問題

に正面から取り組み、主として機械工学の立場から課題の分析を行うとともに課題解決へ向けての具体的方策を示した。

2 ものづくりと計算力学シミュレーション

「ものづくり」という言葉は我が国では好んで使われるが、これを英語で表現しようとすると適切な表現が見つからない。manufacturingと敢えて英訳することもあるが、これは加工とか製造を意味しており、「ものづくり」という言葉の持つ広義の意味を表していない。敢えて言うならば、市場調査、商品企画、設計、加工、組み立て、販売に至る一連の流れを指しており、特に、作られる製品がサービスなどの目に見えないものではなく、車とか、電子機器などのようにハードの製品である場合に、これをものづくりと言っているようである。しかし最近ではハード製品の中にも様々なソフトのサービスが含まれており、このような場合にはソフトのサービスも含めたハード製品を対象としていると行うことができる。上記のものづくりの一連の流れの中で、コンピュータを駆使したシミュレーションは、様々な手法が開発され実際のものづくりプロセスの中に採用されて、開発工期の短縮とコストの削減に大きく寄与している。しかし、ここでこれらの全体像について語るにはテーマが大きすぎて無理がある。ここではものづくりの中核部としての「設計」に焦点を当て、設計とそれを支援するシミュレーションの関係について考察する。

ここで設計と計算力学シミュレーションの関係を整理して示しておこう。図2の左側の欄は構造の形状、板厚などの形状パラメーター、ヤング率などの材料パラメーター、それに負荷のパラメーター等の設計変数 $\{x\}$ を表し、右側の欄は設計目標としての特性値 $\{y\}$ を表す。例えば自動車を例に取れば、 $\{y\}$ の各パラメーターは、走行性能、安全性、コストと言ったものが挙げられる。これらは一般に二律背反の関係にあり、走り重視のスポーツカー、安全重視の高級車、あるいはコスト重視の大衆車など、開発目標に合わせてこれらのパラメーターのバランスする点($\{y\}$ の目標値)が決められる。設計者が設計変数の初期値の組 $\{x\}$ を決めてやると、それに対応する特性値の組 $\{y\}$ は決定される。すなわち図の下側の欄に示すように $\{y\}$ は $\{x\}$ の関数である。しかし車の衝突問題等を考えれば分かるように、この関数関係は高度の非線形性を持っており、理論的にその関係が求められることは少ない。従来はこの関係を求めるために試作・実験による検証が行われてきた。設計の初期値 $\{x\}$ による特性値 $\{y\}$ は、必ずしも設計者が意図した目標値にはならない。従って設計者は特性値が目標値に近づくまで設計変更を何回か繰り返すことになる。これは試作・実験を何回か繰り返すことを意味しており、多大の開発期間とコストを要する理由となっていた。CAEのツールが充実するとともにこの試作・実験の代わりにシミュレーションが実施され、これにより開発期間とコストの大幅な削減が計られるようになってきた。

しかしこの段階では、まだシミュレーションは解析のツールとして使われているだけである。上記のプロセスで見たように、設計は $\{y\}$ の目標値がまず決まっており、これに適合する $\{x\}$ を求めること、すなわち逆解析を行うことによって解が求められる。このためには $\{x\}$ の組み合わせを変えて、 $\{y\}$ が目標値に達するまで何回も解析を繰り返す必要がある。図1に示すように、設計目標に合わせて再解析、感度解析、ロバスト設計、

最適化など様々な設計手法があるが、いずれの場合にも目標値を得るためには多数の解析を実行する必要がある。さらにこの設計変数 {x} は必ずしも確定変数ではなく、板厚などのように加工条件によってばらつきのある統計的な変数であるとも考えることもできる。

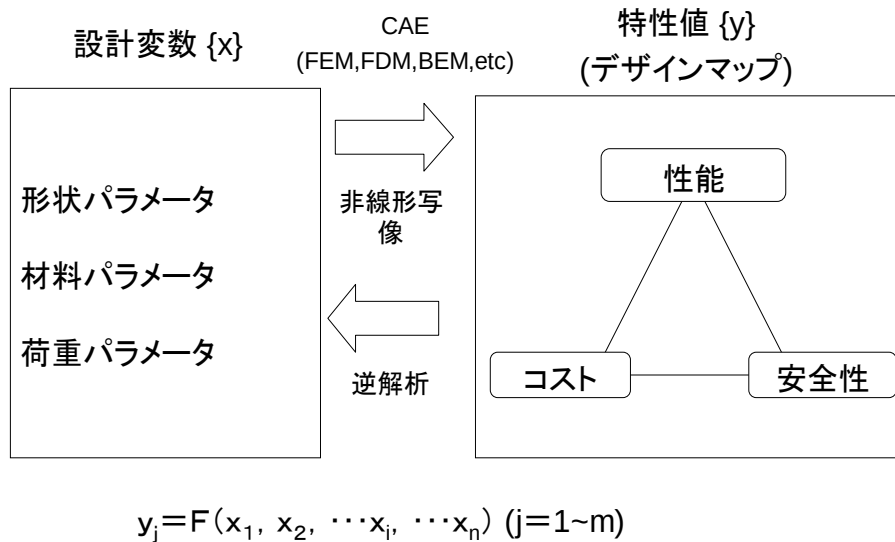


図2 設計におけるCAEの役割

この場合 {x} と {y} の関係は確定的な関係ではなく、統計的な相関関係として捉えることができる。{x} のばらつきに対して {y} はどの程度にばらつくのかという、不確かさに対する統計的な評価をして、これを安全裕度の評価に反映させることも必要となる。この場合にも必要とされる解析の数はさらに膨大になる。

このような多数の解析を要求される場合に、そのつど詳細解析を繰り返す代わりに、例えば実験計画法などの手法を使って、直交表に基づく数十回の繰り返しで {x} と {y} の近似的な関係（応答曲面）を求め、これをパソコンに搭載して、図1の左下欄に示すような感度解析などの設計者が必要とするもろもろの解析を応答曲面上で行う手法（応答曲面法）が開発され、これを実行するための汎用設計支援システムも開発されている。このようなツールを使うにあたっては、応答曲面が {x} と {y} の関係を設計の要求する範囲で正しく近似していることが前提条件となる。

3 産業各分野における計算力学シミュレーション適用の現状と課題

計算力学シミュレーションはものづくり支援のための有力なツールとして、産業界の様々な分野において活用されるようになってきた（＜参考資料1＞を参照）。しかし、シミュレーションの品質という視点で見た場合、それぞれの分野において生産される製品の特性に応じて、その活用の仕方には微妙な違いがある。シミュレーションの品質を議論するに当たっては、仮定された数理モデルに対して計算が正しく行われているという検証

(Verification) と計算された結果が実際の物理的挙動を正しく表現していることを保証するための実験等による妥当性確認(Validation)の両面からの検討が必要とされる。またこれらを総称して、V&Vと呼ぶこともある。(第5章参照)。

以下にいくつかの代表的な例について概観する。

(1) 原子力発電プラント

この分野は計算力学シミュレーションが早くから取り入れられた分野のひとつである。この分野では安全性が最優先され、機能面の改善をはかる努力よりも安全に対する十分な裕度を担保すること、すなわち十分に安全であることに重点がおかれてきた。たとえば開発設計あるいは既存の発電プラントの耐震性評価等において活用されているシミュレーションモデルは、建屋・格納容器・原子炉を連成させた単純なバネマスモデルが現在でも使われている。また配管系のシミュレーションでは基本的に弾性解析が行われており、使用されている鋼材が持つ塑性変形による大きなエネルギー吸収能力は安全に対する裕度とみなされている。これらは70-80年代に開発された手法で、多度津の大型振動台を用いた実証試験により十分に安全であることが裏付けられたモデルが規格・基準に反映され、いまなおその規格・基準に基づいて設計・評価が行われているためである。研究面では最先端のシミュレーションツールが活用されているものの、直接ものづくりに関わる設計・評価において、シミュレーションの最新の技法の成果を活用するには、開発された技法を用いたシミュレーションに基づく評価が十分に安全であるという保証が要求され、日進月歩の解析技術を取り込んでいくのに時間がかかるという事情がある。

(2) 航空機産業

航空機もその開発に当たって計算力学シミュレーションが最も早くから積極的に活用された分野のひとつである。航空機は安全に対する要求が極めて高いとともに、高速安定飛行、燃費の改善のための空力抵抗の削減、低騒音化等、機能面についても高度の要求を満たすことが求められる。従来の試作・実験の繰り返しによる開発は膨大な日数と労力およびコストを要し、できればこれをシミュレーションに置き換えて開発期間とコストの削減をはかりたいとのニーズが極めて高い。試作・実験に取って代わりうる精度の高いシミュレーションツールの開発が鋭意おこなわれてきた。現在では風洞実験を

行う代わりに、シミュレーション（数値風洞）により基本特性の把握が可能になってきた。（この分野の現状と課題については参考資料 1 の A3 を参照）。

(3) 自動車産業

自動車産業では当初は試作・実験の繰り返しに基づく設計がおこなわれており、上記 2 分野に比べると計算力学シミュレーションをものづくりに導入する時期は比較的遅かったようである。研究・開発レベルでは80年代から使われていたが、設計者が使うツールとして積極的に活用が始まったのはCAD-CAEの統合化がおこなわれた90年代以降である。しかし一旦使われ始めるとその有用性が強く認識され、現在ではエンジンの開発、エンジン周りの部品および車体の軽量化、衝突安全性の確認、部品製造プロセスおよび組み立てのシミュレーションなど、車づくりのあらゆる分野に最先端のシミュレーション技術が活用され、車の機能の改善のみならず大幅な開発工期の短縮と、コストの削減に寄与している。例えば70年代には新しい車の計画段階から出荷までに4、5年かかっていたものが、現在では一年未満に短縮されているものもある。計算力学シミュレーションの大幅な採用が製品の品質の改善と開発期間およびコストの削減に大きく寄与している代表的な事例である。車は典型的な大量生産品であり、その意味ではさきに述べた発電プラントや航空機とは異なる。最新のシミュレーションツールを積極的に導入して、感度解析、最適設計、あるいはロバスト設計等のツールとして活用しているが、計算力学シミュレーションにおける品質保証の要求については原子力あるいは航空機分野ほど厳しくはない。設計が決まったら必ず試作して機能、安全性の確認等については実機の実験による検証が行われる。車の開発においては、この現物による実験的検証が原子力や航空機にくらべて比較的容易なためである。しかしシミュレーションによるものづくりをより確実にするために品質の高い計算が必要なことは言うまでもない

（車、特にエンジン開発における計算力学シミュレーションの適用については参考資料 1：A8およびA10を参照）。

この他、蒸気タービンやガスタービンなどのターボ機械、家電製品、パソコン・携帯電話などの電子機器等、ものづくりのあらゆる分野において計算力学シミュレーションが活用されるようになってきたが、その活用のされかたをV&Vに対する要求と言う視点に基づき大きく分類すると、上記に見た三つに大別されよう。すなわち(1)原子力プラント、建築・土木構造物、石油タンクのようなオーダーメイドの大規模構造物、(2)航空機、重電機器等のようなオーダーメイドあるいは少量生産で開発コストが極めて高いもの、および(3)車、家電品、電子情報機器等の大量生産品、である。

(1)においては、基本的に規格・基準に基づく保守的な（安全裕度の大きい）設計が行われており、最新のシミュレーション技術の導入には慎重でシミュレーション結果の品質保証（V&V）に対する要求が極めて高い。(2)においては安全性に対する要求とともに機能に対する要求が極めて高く、(1)におけるような大きな保守性（安全裕度）を担保することができない。この二つの要求を満たすために従来の試作・実験の繰り返しによる開発はき

わめて高くつくので、もはやこのような開発形態では市場のニーズに耐えるコストでの開発は不可能である。従って最先端のシミュレーションツールを積極的に導入し、試作・実験をシミュレーションに置き換えることにより高機能な製品の開発と開発コストの削減がはかられている。この場合実機レベルでの試作品による検証は困難であるため、製品が実際に製作された段階で実機に対して性能試験、安全性評価等が行われる。この段階で所期の性能が満たされなかったり、安全性に問題が出たり、その他の予期せぬトラブルが発生した場合、開発計画は致命的な損傷を受ける。従ってそのような事態の発生を防ぐために、シミュレーションの品質保証（V&V）に対する要求は極めて高い。(3)の大量生産される製品については、既に述べたように実機ベースでの実験による検証が比較的容易なため、シミュレーションの品質に多少問題があったとしても不具合は出荷前の実機試験により検出することが可能である。そのような意味で前記二者ほどV&Vに対する要求は厳しくはない。しかし実機試験レベルでの不具合の発生は、不具合の原因究明と前工程へのフィードバックを意味しており、結果として開発工期の大幅な延長をもたらす。このような製品の開発は極めて厳しい競争的環境のもとで行われており、競争に勝ち抜くためにも実機レベルでの不具合の発生は是非とも避けたいところである。そのような意味ではやはりシミュレーションの品質はそれなりに担保しておきたいとのニーズがある。またシミュレーション結果が繰り返し実験と比較される環境にあることから、そのプロセスにおいて絶えずV&Vが実行されシミュレーションの品質改善がやりやすい分野であるということもできる。

以上、産業分野ごとに計算力学シミュレーション適用の現状を概観したが、これを要約して示せば以下のように言うことができる：

計算力学シミュレーションはものづくりの各産業分野において、ものづくり支援のための重要なツールとして採用されている。これによって開発工期とコストの大幅な削減が実現できることが実証され、その有用性について経営者が認識し始めている。さらに、この手法はまだ発展途上にあり、コンピュータの発展とあいまってさらにその能力を発展させつつある。特に次世代のスーパーコンピュータの開発にあわせて開発されているプログラムでは、構造解析で10億自由度、流体解析では1000億自由度の解析が可能とされており、これにより解析精度の飛躍的向上がはかれるとともにこれまで手の届かなかった複雑な現象が解明され、ものづくりにおいて新たなイノベーションがもたらされる可能性がある。このような状況において、従来の試作・実験に取って代わる方法として計算力学シミュレーションがその地位を確立するには、「シミュレーションの品質保証」の問題は避けて通れない課題である。

以下に、シミュレーションの品質を保証するための課題を挙げる。

① 大規模高速解析のさらなる追究

これまで追究されてきた大規模高速解析も一義的には物理現象を精度良く表すことを目指したものである。すなわち解析精度を高めるための第一の方法は大規模構造解析を追究することである。歴史的に見ても、まず一次元モデル、次いで二次元モデル、最近では三次元モデルによる解析が可能になってきたが、これはひとえに大規模構造解析

技術の進歩によるものである。またこの進歩により要素（メッシュ）の細分割が可能になり、これにより解析精度が大幅に改善されてきた。次世代コンピューティングにおいては連続体のマクロスケールからミクロスケールまでをカバーしたマルチスケールコンピューティングの可能性も研究されている。

② 高品質解析のための方法

しかし大規模高速解析だけではシミュレーションの品質は必ずしも保証されない。品質を保証するための全体像を描き、高品質解析のための方法を追究すべきである。（参考資料1の A9 および参考文献[3]を参照）。この問題については、次の第4章において詳細に検討する。

③ 品質を保証する仕組みの確立

産業界においてはシミュレーション業務が外注され、一種の商品として扱われている。そのようなビジネスの仕組みの中で品質を保証する仕組みを確立する必要がある。この問題については第5章において述べる。

④ 解析を行う者の技量の認証

品質保証のためのもうひとつの有力な方法は、人材育成すなわち解析を行う者の技量の認証である。解析の専門家が解析を行えばその品質は保証されるが、解析に精通していない一般の設計者が行った解析の品質は必ずしも保証できない。従って解析を実行する者の技量の認証制度を確立する必要がある。この問題は第6章で言及する。

4 計算力学シミュレーションにおける誤差と品質保証

シミュレーションをものづくりのための有用な手段として活用するためには、設計が許容する誤差（あるいは不確かさ）の範囲で、この仮想空間で求められた解が現実世界で起こる現象を正しく表していること、すなわち「シミュレーションの品質保証」が必須の条件として求められる。産業界における計算力学シミュレーションの重要性にもかかわらず、この品質保証の問題に正面から取り組んでいる事例は少なく、産官学を挙げての体系的な取り組みが急務となっている。

計算力学シミュレーションにおける誤差発生要因を分析してみると、以下のような項目に分類される。

(1) 自然現象を連続体力学の問題として数学モデルに近似するモデル化による誤差

連続体の場の問題に限れば、構造、振動、熱移動、流体、電磁場等における基本的な現象はそれぞれ対応する数学モデルで表すことができる。またこれらの現象を個別に解析するための汎用プログラムも開発されて、市販に供されている。しかしこれらの現象のいくつかが複合して連成する場合（マルチフィジックス問題）、これを解くための信頼しうる汎用プログラムはまだ利用できる状態にはなっておらず、多くの研究者が取り組んでいる課題である。たとえばロケットエンジンの燃焼の問題は、化学変化、熱、流体、構造、振動等が高度に連成する問題であり、シミュレーション技法の開発に携わる研究者も少なく未解決の課題が多いと報告されている（参考資料1のA4、A5参照）。

(2) 材料データなど入力データの持つばらつき（構成式、減衰率、熱伝達率など）

これらのデータは偏微分方程式で表される数学モデルにおいては、単純な係数として扱われており一見簡単のように見えるが、シミュレーションの品質を考える場合大きな問題がある。例えば材料データの一例として塑性の構成則（応力とひずみの関係、言い換えれば降伏応力と加工硬化特性）を考えてみる。これらは使用する材料ごとに異なる値を持ち、規格上同じ材料と認定されたものでもばらつきを持つ。またこれらのデータを入力する際に、単純な2直線近似等のモデル化を行う場合が多い。この分野に通じた解析の専門家であれば、このようなばらつきあるいは近似モデルが解析の結果にどのような影響を及ぼすか、充分承知の上で結果の解釈を行うことができるが、一般の設計者は結果を正しいものと信じて、ばらつきおよび近似のもたらす不確かさに思い至らない場合が多い。従って、このようなデータに関してはデータを取得する際の試験方法の標準化、統計的なばらつき特性の把握、およびシミュレーション入力時のモデル化の標準化等を行って、誰が解析しても信頼できる結果が得られるよう、データベースの整備をしておくことが望ましいが、現状ではこれは解析者あるいは解析する機関に任されている。

(3) 形状の近似による誤差

形状の近似による誤差については、まず3章で述べた大規模高速解析手法の進歩（コンピュータの進歩に負うところ大である）により、1次元から2次元そして3次元解析が可能になってきており、これにより形状近似の精度が格段に上がった。現在では3次元CADを使って形状表現を行い、このデータを直接CAEツールに転送して3次元の解析モデルを作成し解析することが簡単にできるようになってきた。しかし構造物には部品と部品を接合する継ぎ手部があり、この継ぎ手には溶接（溶接にも隅肉溶接、突合せ溶接、点溶接など様々な形態がある）、ボルト結合、接着等多様な形態があり、それぞれの用途によって最適な形態が使い分けられている。この継ぎ手部を適切にモデル化する汎用的な手法はまだ開発されておらず、それぞれの場において経験に基づいたモデル化が行われている。このあたりの事情を知らない初心者がいい加減なモデル化を行って解析すると、結果の精度は保証されない。一方CAD図面で描いた形状がそのまま精度良く製作されるとは限らない。特に鋳造や鍛造などのプロセスを経て製作された機械部品は肉厚などが図面通りにできているとは限らない。実際に製作された現物をX線CTスキャン装置などで測定して、このデータをCAD-CAEシステムに入力して現物の評価を行うリバース・エンジニアリングの手法の開発も活発に行われている。（参考資料1のA7参照）

(4) 境界条件の設定による誤差

境界条件の設定による誤差についても実際の構造物などにおいて境界条件を特定することが難しい場合が多くある。単純な梁の問題を考えてみても、本来は弾性支持とすべきところをその弾性支持部の剛性を特定することが難しいために、固定支持あるいは回転支持などの単純化が行われることが多い。このような単純化が解析の結果にどのような影響を及ぼすのかについて十分な理解が必要である。また無限領域が解析の対象となる場合、そこから有限領域を切り出して解析モデルが作られる。この場合どの範囲を切り出してくるか、あるいは切り出された境界における境界条件をどのように設定するかなどに力学的知見と経験が必要とされる。

(5) 離散化誤差

離散化誤差は計算力学シミュレーションの手法が持つ本質的な問題であり、これまでも多くの研究が行われてきた。一般の設計者が市販の汎用シミュレーションソフトを使って解析を行う場合、要素の選択と要素分割を適切に行うことが求められるが、これを適切に行うためには力学および解析手法の基本事項に対する理解が必要である。多くの場合離散化する要素またはメッシュを細かくすることにより、解が正解に収束することが知られており、従って極めて細かい要素分割を行い、大規模高速計算によって精度の高い解を求める努力が払われてきた。一方弾性の応力集中の問題などでは誤差を評価しながら適宜再分割を行っていくアダプティブ・メッシングの方法なども開発されている。（3次元問題における6面体要素の可能性など、メッシュ生成の可能性と課題については参考資料1のA6を参照）

(6) 丸め誤差

丸め誤差の問題についても最近では応用数学を専攻する研究者の間で様々な研究が行われており、その成果は MATLAB などの解析ソフトの中に反映されている [4]。

(7) 結果の表示に関わる誤差

一般に解析の結果得られる数値データは膨大で、これを直接見て結果の解釈を行うことは稀である。特に解析者が解析を行いその結果を設計者に手渡す時などにおいては、解析者は設計者が必要とするデータを抽出し、これを可視化して渡す場合が多い。このデータの抽出と加工の段階で、たとえば設計者と解析者の思惑の違いにより、真に設計者が必要とするデータが設計者にフィードバックされないなどのミスマッチが発生する可能性がある。また、あつてはならないことであるが、都合の悪いデータが意図的に隠されてしまうようなことがあれば、これは設計者をミスリードすることになる。このような事態の発生を防ぐためには、設計者と解析者の密接なコミュニケーションが必要であるとともに、解析の結果が正しく受け渡されていることをチェックする何らかの仕組み（たとえば監査など）が必要である。

(8) 単純な間違い

単純な間違いについては、これもあつてはならないことであるが、膨大な解析業務を時間に追われてこなしていく場合に往々にして発生することがある。計算力学シミュレーションにおいては入力データは人が手で入力する必要がある、データの内容も複雑でそれを正しく理解するには高度の力学的知識を必要とする。間違った入力データからは正しい解を得ることができない。結果が可視化され定性的なアニメーションなどで示される場合、小さなミスには気がつかずこれを正解とみなしてしまう場合もある。この単純なデータ入力のミスはいったん発生してしまうとこれを発見して取り除くことがなかなか困難な場合が多い。入力データの作成は一定の技術水準の者に課する、あるいはデータ入力時に他者によるダブルチェックを行うなどの仕組みを作ることが必要である。

(9) その他

その他に、知的財産保護による市販ソフトのブラックボックス化に起因する誤差なども考えられる。この場合、ビジネス上、ソースコードを公開することは不可能である。従って、(ア) そこで使われているアルゴリズム（使用している式やその離散化方法およびプログラムの解法手順等）や特許に相当する知財等を理論マニュアルに明記する、(イ) 正解の分かっている問題を含む様々なベンチマーク問題において正しい答えが得られていることを検証する、等が求められよう。これらのことはソフトを販売する企業の責務と考えられる。

以上に見たように誤差発生の原因には様々な要因が考えられるが、これらの誤差を定

量的に評価し、誤差発生に基づくトラブルを未然に防ぐためには、以下のことが重要な課題として挙げられる。

- ① 学術的観点から誤差を定量化、最小化する方法論について研究を深めて体系化する。
- ② 人為的なミスによって生じる間違いについては、品質管理システムの体系化、標準化を行い、このような間違いの発生する確率を最小化する。
- ③ 解析に従事する技術者の技量を高める。

上記の①については、大学および産業界の研究者の責務であろう。研究者はこれまでどちらかと言えば大規模高速解析の研究に大きな関心を持って取り組んできたが、上記に示したように高品質解析の分野にも取り組むべき重要な課題が山積している。ぜひ高品質解析の諸課題にも積極的に取り組むことが期待される。

②については第5章、③については第6章で詳述する。

5 計算力学シミュレーションにおける品質管理システム構築の必要性

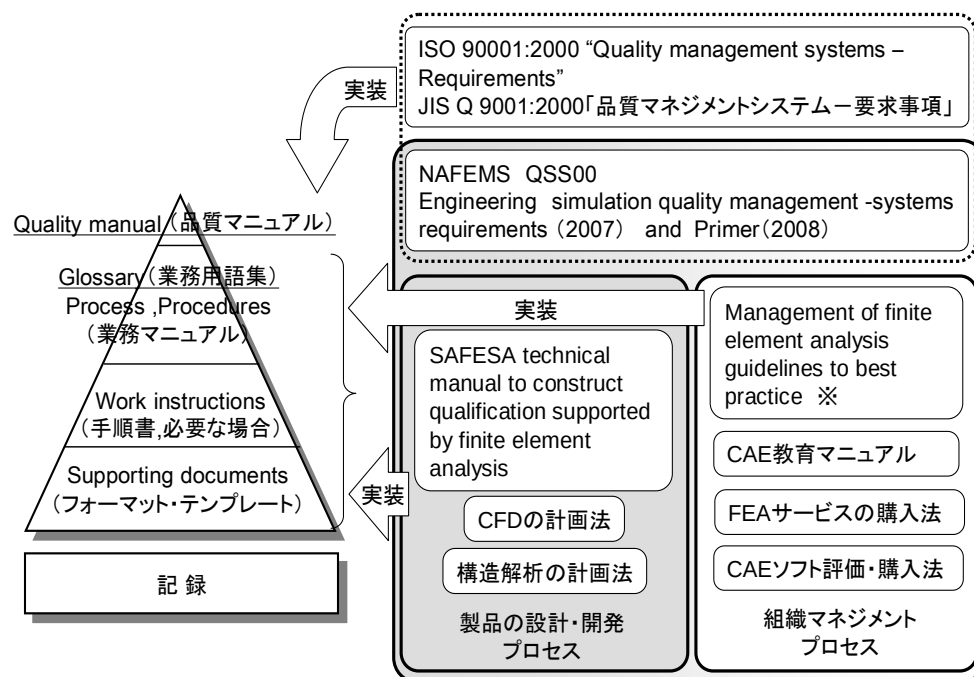
第3章でみたように、産業界における様々な分野において、ものづくりプロセスにおける計算力学シミュレーションの果たす役割が増大してきた。シミュレーション技法は今後さらに飛躍的に発展する可能性を秘めており、単に開発工期の短縮とコストの削減に寄与するだけでなく、新たなイノベーションをもたらす画期的な製品開発を生み出すためのツールとして期待するところが大きい。このような薔薇色の側面を持つ反面、このツールの誤った使い方をすると、それによって作られた製品が思わぬトラブルや事故の発生を引き起こす可能性があり、そのようなトラブルや事故が発生した場合の社会的影響やその対策にかかるコストは計り知れない。一例を挙げると、1991年8月23日、北海でオイル・ガスを産出する海上プラットフォームが、ノルウェイStavanger沖のGrandsfjordenにて沈没し、本事故の経済的損失は約7億ドルに上った。この事故の原因は、計算力学シミュレーションの一手法である有限要素法の専門家ならまず間違えない部分で初歩的ミスが発生したことにあることが報告されている。世界的に定番のソフトウェアNASTRANを使用していたが、そのような定番ソフトであっても、使う人の技術不足を補うことは不可能であったことが読み取れる [5, 6]。

従って、経営者は予めそのようなトラブルや事故の発生を未然に防ぐためのリスク管理の仕組みをしっかりと構築しておくことが必要である。本章では、品質を担保する仕組みすなわち品質管理システムの構築について述べる。

欧米においては、工学シミュレーションの品質管理システム構築の重要性は早くから認識され、EUでは英国NAFEMS (National Agency for Finite Element Methods and Standards) が既に1980年代からこの問題に取り組んでおり、汎用構造解析プログラムの精度向上のため、多くのベンチマークテストを作成・実施しており、このベンチマークテストは世界中に利用されている。また各種教育用テキストの作成、各種セミナーの実施、Registered Analyst制度の運用、BENCMmark誌の発行など広範な活動をしている。また、NAFEMSの品質保証システム (QMS: Quality Management System) として、工学シミュレーションを実施する組織の品質マニュアル[7]等、工学シミュレーションの品質保証に資する種々のマニュアルを発行している。特に構造関係の解析に対しては、SAFESA (SAFE Structural Analysis) の詳細な体系が準備されている。

一方米国においては、2002年に米国機械学会 (ASME: American Society of Mechanical Engineers) の中に工学シミュレーションの品質保証に関する標準化を目指した委員会が組織され、委員会で定めた標準はV&Vとして体系化されてきた。現在、構造解析、流体解析など様々な分野のドラフトが準備され、ASME Standardとして発行されつつある[8]。またNAFEMSのAnalysis Management Working GroupとASMEのV&V委員会は相互交流を通じて密接な情報交換を行っている。

図3は品質管理の国際標準ISO9001規格の実装とNAFEMSが作成した工学シミュレーションの品質管理関連のマニュアルの対応関係を簡単な図に表したものである。まず品質保証全般にわたる要求事項が記述されたマニュアルがあり、その下に組織マネジメントプロセスと製品の設計・開発プロセスが記述されたマニュアルがある。前者には更にCAE教育マニュアル、FEA(Finite Element Analysis)の購入法（社内あるいは社外の解析の専門家に解析業務を委託する場合）、およびCAEソフトの評価・購入法が詳細に記述されたマニュアルがある。また後者においては実際に解析に携わる者がモデル化の方法、入力データの作成、結果の評価等において留意すべきことが、具体的事例をあげて述べられている。これらの記述に従って解析業務を実行することにより、解析の品質が担保されるとするものである。また万一解析結果にミスが発見された場合、ISO9001の要求事項に従ってそれぞれの業務の記録を詳細に残しておくことにより、どこでミスが発生したかについて原因の究明が可能になるとしている。



※SAFESA management guideline も同様。SAFESAはNAFEMSの登録商標

図3 ISO9001 規格の実装と NAFEMS の QMS 関連マニュアル

一方、図4は2006年10月に発表されたASME V&Vの概念図である。まず場の状態を表す数理モデルに従って解析プログラムが正しく記述されているかのコード検証(Code Verification)、そのプログラムを使って行われる計算（解析モデルの作成、データ入力、結果の表示など）が正しく行われているかなどの計算の検証(Calculation Verification)を行い、このようにして得られた計算結果が実際の物理現象を忠実に模擬しているかにつ

いて実験による妥当性確認 (Validation) を行う。このようにして検証された計算は品質の保証された計算として認証される。

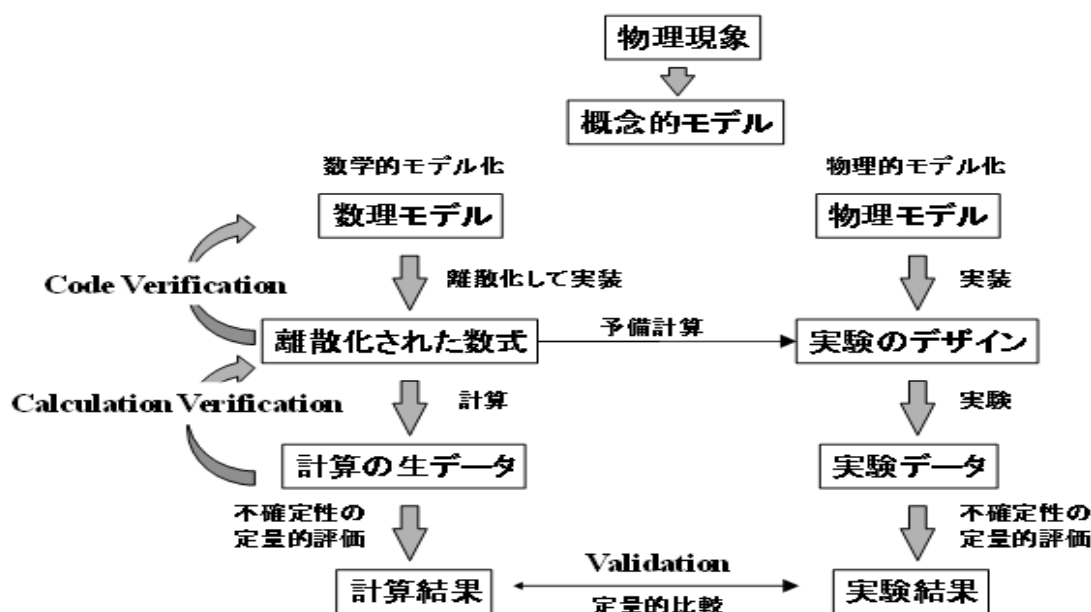


図4 ASME V&V 10-2006 の概要

翻って我が国においては、工学シミュレーションの品質保証問題への取組みは比較的立ち上がりが遅く、1995年に伊理[3]が高品質解析に関する研究の重要性に警鐘を鳴らして以来、この問題は応用数学上の問題であると捉えられ、もっぱら応用数学面の研究が深められてきた。前章で述べたような幅広い分野での総合的なアプローチ、あるいは海外において積極的に展開されているような標準化へのアプローチについての重要性は、ごく最近になって認識されるようになったと言えよう。日本計算工学会では2009年に「シミュレーションの品質・信頼性研究分科会」が組織され、海外動向、産業界における取組みの状況等について調査を行うとともに、日本として取り組むべき課題の抽出および我が国の実情にあった実務的な標準やガイドライン(案)の作成に向けて、作業が開始された[9]。また日本原子力学会においては米国機械学会のV&Vを参照しつつ、原子力産業界向けの我が国独自の標準(案)を作成している。

学会単位で行われているこのようなアプローチを国単位で組織化し、日本独自の国際的に整合性のある標準を早急に作っていくことが重要な課題である。

6 人材の育成と解析技術者認定

計算力学シミュレーションに携わる技術者は、

- (1) 開発しようとしているものの機能および加工・組み立て等製造プロセスの知識
- (2) 材料力学、機械力学、流体力学、熱工学等の力学の基礎知識
- (3) 構造力学、固体力学、連続体力学等に関する知識
- (4) 上記(3)で記述される偏微分方程式の境界値問題及び初期値問題を離散化してコンピュータ上で大規模高速解析を行うための計算科学に関する知識

等、極めて多様かつ高度の知識を修得しておくことが求められる。すべての技術者がこのように多様で高度な知識を持っているわけではない。大きく分ければ(1)は企業の設計現場において修得される知識であり、一方(2)は大学の学部および大学院修士レベル、(3)および(4)は大学院において特に計算力学を専攻する修士および博士のレベルであり、後二者を修得している技術者はそれほど多くはない。

一方、計算力学シミュレーションの進歩とその爆発的な普及により、産業界でものづくりに携わる多くの技術者が、このツールを使って仕事をする機会が増えてきた。第1章で概観したように、これらの解析に携わる技術者は、ものづくりの現場で働くCAD-CAE統合ソフトを使用する設計技術者と、設計技術者から解くべき課題を受託して業務を行ういわゆる専門家としての解析技術者に大別され、さらに、新たな解析ソフトの開発を行う技術者も存在する。以下に、それぞれにおける課題とともに、解析技術者認定による品質保証の必要性について述べる。

(1) ものづくりの現場で働く設計技術者

これは圧倒的多数を占め、一般的には市販のCADソフトに内蔵されているCAEソフトをブラックボックスとして用いる場合が多い。これらの技術者の教育レベルは大半が大学学部卒あるいは大学院修士修了程度であり、高度の力学及び計算科学に関する知識はほとんど持っていない。このような場合、彼らが行った解析の品質保証を担保する仕組みを作っておくことが必要である。ひとつの方法は、前章で述べた品質管理システムを適用して、解析を一人の設計者に任せるのではなく組織としてのチェックが働くような仕組みを作ることである。またそれと並行して、解析に携わる設計技術者の解析能力を上げることである。現在、大学においては力学の基礎知識については教育しているが、3D-CADとそれに内蔵されるCAEソフトを使って設計を行うなどの教育を行っているところはごく一部に限られ、一般にはほとんど行われていない。従って多くの技術者は、社会に出てから企業におけるOn the Job Trainingの一環としてこれらのスキルを身につけているというのが現状ではないと思われる。このような場合、解析ソフトに添付されているマニュアルに従ってデータ入力の方法を機械的に覚えるのみで、解析ソフトの根拠となっている高度の力学体系と計算科学に関する知識を理解し身につけることは困難である。より充実した社内教育、あるいは学協会等が主催するセミナー等に積極的に出席して、必要最小限の知識の習得など自らのポテンシャルを高めるよう努力するこ

とが必要である。また企業としても、技術者のレベルアップの努力を積極的に支援することが求められる。解析の対象に応じて彼らが自分で解析が可能な比較的簡単な問題と手に余る問題を識別し、難しい問題についてはなるべく解析の専門家に任せるなどの工夫も必要であろう。

(2) 設計技術者から解くべき課題を受託して業務を行う解析技術者

例えば大企業においては、研究部あるいは技術支援部などにおいて日常的に計算業務に携わっている技術者がこれに相当する。またソフトウェアベンダー、あるいは解析請負業務を専門とする会社があり、ここにも解析を専門に行う技術者がいる。本報告ではこれらの技術者を解析の専門家あるいは解析技術者と呼んでいるが、現状ではこのような呼称の専門職があるわけではない（経済産業省が認定しているITスキルスタンダードを拡大運用してCAEスペシャリストという専門職を置いている企業も一部にはある）。従って彼らの技術レベルも、学位を持って専門的な研究を行っている者からルーチンワークとしての計算業務をこなしているだけの者に至るまで、そのキャリアに従ってまちまちである。また最近では、ルーチンワークとしての計算業務は人件費の安い海外に発注するケースも増えてきた。これらの技術者の技量、すなわち解析能力を高めることが、結果として計算力学シミュレーションの品質保証へとつながっていくことになるが、現状では上記にみたように、彼らの能力にも大きなばらつきがある。従って、現在関連学協会において講習会やセミナーなどの名目で行われている、これらの技術者がキャリアアップするための社会人教育をさらに体系化して、基礎から応用まで体系的な教育を受けられるような仕組みをつくる必要がある。またこのようにしてキャリアアップした技術者を専門職として認定し、それぞれのレベルにふさわしい処遇をすることは技術者に大きなインセンティブを与え、優秀な技術者を集めるための良い方策となるであろう。さらに、解析技術者は力学や計算科学に関する知識を持っているだけでは充分ではない、とのものづくり現場からの厳しい批判がある。現場の設計、加工、組み立て等のプロセスに関する理解が欠けていると、適切な解析モデルを作することは不可能である。解析技術者が一度設計現場を経験する、あるいは設計技術者と協働するなどの密接なコミュニケーションが求められる。

(3) 解析ソフトの開発を行う技術者

この他に、社会のニーズに応じて新たに解析ソフトの開発を行う技術者がいる。既に市販のソフトが多数出回っている状況の下、これから開発しようとするソフトは、超並列の大規模高速解析、マルチスケール解析あるいはマルチフィジックス解析等の極めて高度の解析技術を必要とする。従ってこれらの開発業務は一人で実行することは困難で、高度の力学的知識を持った技術者・研究者と情報科学に通じた技術者等がチームを組んでこれに当たっている。例えば、次世代スパコンの稼動に合わせて、国の支援を受けていくつかの開発プロジェクトが進行しており、ここに我が国のトップ頭脳とも言うべき優秀な人材が集められて成果を挙げつつある。これらの開発されたソフトが国際的にデ

ファクト・スタンダードとなって流通するには、国内のみならず海外においても積極的に使ってもらう仕組みを作る、あるいは前章で述べたコード検証、特にソフトウェアの品質保証のプロセスを踏み、開発および保守のプロセスにおける記録を残しておくなどの作業が必要とされ、国としてもこのような観点からさらに積極的に支援していくことが求められよう。

ものづくりに従事する技術者が計算力学シミュレーションのツールをうまく使いこなすためには、大学・大学院レベルにおける教育、および社会に出てからの教育の両面から論じる必要がある。また計算力学に関する教育の問題は、単に品質保証の観点からだけではなく、先端科学・技術としての計算科学の教育の在り方という総合的視点からの議論も必要で、これについては別途機会を設けて議論することが必要である。ここでは日本機械学会が実施している「計算力学技術者認定制度」について紹介し、将来のあるべき姿について提案をするにとどめる。

「高性能かつ廉価で使い易いPC やOS が普及し、様々な汎用計算力学ソフトウェアが簡単に利用できるようになり、計算力学のユーザー層が急速に広がっている。一方、グラフィカル・ユーザーインターフェースが整備されてデータ入力が簡便になり、可視化技術の進歩によって解析結果がきれいに表示されるようになってきたとはいえ、計算力学ソフトウェアをブラックボックスとして利用して信頼できる解を得ることはまだできておらず、一見するともっともらしい解析結果が得られたとしても、境界条件の設定間違い、不適切な要素分割、あるいは不適切なアルゴリズムの選択などによって、まったく見当違いの解析結果を得ている危険性は常に存在する。力学計算は、解析対象の性能や安全性などに直結する重大な任務を担っているため、知らずに誤った解析結果を採用してしまうということは大きな損失につながる。このような状況において計算力学解析結果の信頼性を担保するためには、計算力学ソフトウェアの品質保証に加えて、計算力学技術者の技量の保証が大変に重要である[10]。」

以上の趣旨に基づき日本機械学会では2003年度から「計算力学技術者」認定事業をスタートし、現在では上級、1級、2級および初級を合わせて2,000名以上の認定者を輩出し、産業界からある程度の社会的認知を得るようになってきている。

このような技術者認定制度についても、機械系のみならず建築・土木系、電気・電子系などの他分野への展開を図るとともに、欧米における類似の制度との整合性をはかりつつ国としての技術者レベルの標準化を行い、専門職として処遇の改善を図っていくことが重要である。また技術者認定制度を世界標準とすることにより、計算業務を海外に発注するあるいは海外から受注するなどの際に、それに取り組むべき技術者のレベルを契約に盛り込むことが可能になる。裏を返せば、このような標準化の波に乗り遅れると、我が国の技術者がいかに優秀であっても、国際的な場で活躍するチャンスを失することになりかねない。早急な対応が必要である。

7 まとめ

我が国の産業の基幹をなすものづくりにおいて、計算力学シミュレーションの果たす役割が増大しており、将来的にはさらに大きくなって次世代のイノベーションをもたらすキーテクノロジーとなりつつある。また一般の設計者も含めてシミュレーション業務に従事する技術者も爆発的に増大しつつある。このような環境の下で我が国が従来と同様あるいは従来にも増して国際的に競争力のある高機能・高品質の製品を開発してものづくり産業の活性を維持・発展させていくためには、「計算力学シミュレーションの品質」について課題の分析を行い、しかるべく対応していくことが極めて重要である。この分野の学術研究に携わる研究者、産業界においてこれらの業務に携わっている技術者、および産官学の指導的立場にある者に対して以下の提案を行う。

- (1) シミュレーションの品質にも様々な側面があり、学術的な視点から研究を行って解決をはかるべき課題も数多くある。研究者がこれらの課題に積極的に取り組み、課題の解決に貢献することを期待する。また関連学協会が協調してこれら研究の成果を体系化、標準化していくことが求められる。
- (2) シミュレーション業務がビジネスの一環として扱われるようになってきた現在、そのビジネスの流れの中で品質保証を行う仕組みを構築していく必要がある。現在いくつかの学協会で始まっているこのような取り組みに対して、国際的な標準化への流れに乗り遅れないよう、国としても積極的に支援していくことが必要である。また産業界もこのような品質管理システムを作ることの重要性を理解し、早急に導入するとともに、これに必要な対価を負担すべきである。
- (3) 高品質なシミュレーションを担保する最も重要な因子は人材育成の問題である。この問題は大学および大学院教育の問題と社会人教育の問題に分けられるが、本報告の範囲で議論をするにはテーマが大きすぎる。別途この問題を取り上げて議論をする必要がある。本報告の中では計算力学技術者の認定制度について述べたが、日本機械学会で行われているこの取り組みをさらに発展させ、他分野も含めて国際的に通用する技術者認定制度に発展するよう国レベルでの支援が必要である。

＜参考文献＞

- [1] 日本学術会議メカニクス・構造連絡委員会計算力学専門委員会報告、「大規模計算力学ソフトウェア開発に関する日本の総合戦略」、2003 年 7 月 15 日.
- [2] 日本学術会議メカニクス・構造連絡委員会構造工学専門委員会報告、「構造工学における現在の課題—設計クライテリアとコンピュータ依存社会—」、2005 年 8 月 31 日.
- [3] 伊理正夫、“計算の品質向上を目指して” 日本機械学会誌、Vol .98、No.920, 7, pp538-539, 1995.
- [4] 大石進一、精度保証付き数値計算、コロナ社、2000 年.
- [5] Jersin, E. and Soreide, T. H., “Sleipner A GBS Loss, Report 16. Quality Assurance”, STF38A97428, ISBN82-14-00444-6, 1997.
- [6] Selby, R. G., Vecchio, F. J., Collins, M. P., “The Failure of an Offshore Platform”, Concrete International, 19-8, pp28-35, August 1997.
- [7] NAFEMS QSS001 Engineering simulation quality management-system requirements, 2007.
- [8] ASME HP <http://www.asme.org/>.
- [9] 日本計算工学会 HQC 研究会 HP、<http://www.jsces.org/research/hqc/index.html>
- [10] 日本機械学会計算力学技術者（CAE 技術者）の資格認定 HP
<http://www.jsme.or.jp/cee/cmnintei.htm>.
- [11] Kazuyuki Sugimura Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi Ltd., Japan Shigeru Obayashi and Shinkyu Jeong Institute of Fluid Science, MULTI-OBJECTIVE DESIGN EXPLORATION OF A CENTRIFUGAL IMPELLER ACCOMPANIED WITH A VANED DIFFUSER, Proceedings of 5th Joint ASME/JSME Fluid Engineering Conference, FEDSM2007-37502 , Tohoku University, Japan, 2007.
- [12] 磯島宣之, 渡邊昌俊, 佐々木一郎, 定岡紀行, 森田達雄, 高エネルギー X 線 CT 装置を用いた現物融合ボクセル流体解析技術の開発と液晶プロジェクタへの適用, 日本機械学会 第 21 回計算力学講演会, 2008.

＜参考資料１＞ものづくり支援シミュレーションの課題

A 1 概要

日本学術会議総合工学委員会・機械工学委員会合同計算科学シミュレーションと工学設計分科会ものづくり支援シミュレーション検討小委員会（以下「委員会」という。）では、機械の設計製造準備の過程で利用されるシミュレーションについて検討を行い、学術としての「ものづくり支援シミュレーション」の課題を抽出した。本分野は近年高度に進化するスーパーコンピューティングによるシミュレーション技術を基盤とした応用分野に相当し、そのソフトウェアシステムは、一般にCAE（Computer Aided Engineering）と呼ばれている。CAEは、熾烈な企業間競争を勝ち抜くための製品開発力強化の切り札として利用・普及が進み、その利用規模は増大の一途を辿っている。

そのような過程の中で、シミュレーションの開発や利用に対して様々な要求と課題が噴出している。これらの課題を解決することは、我が国のものづくりの発展にとって非常に重要である。しかし従来技術の延長では解決の困難な課題が多く、そのため学術的見地からの課題の整理・体系化を行い、より科学的・普遍的で革新的な解決を目指して行く必要がある。そのため委員会では、アカデミアに加えて産業界からの識者の参画も得て、企業の実践の場での状況や課題、さらには将来へ向けての戦略的課題について検討を行った。委員会では、これらの委員からの報告をベースとして議論を行うとともに、外部講師にも講演を依頼している。また、各委員にそれぞれの専門領域での現状や課題についてレポートを提出してもらい、検討を進める上での基礎資料とした。その資料は次節から掲載するが、以下三つの観点から、全体をまとめて紹介する。

(1) シミュレーションの効用・適用範囲の拡大

まずA2では、CAEの企業における利用の歴史や、現在の状況について、総合電気・電子機器メーカーの立場から、設計におけるCAEの必要性や目的が網羅的に整理されて述べられている。既にCAEは製品開発において不可欠のものとなっており、その適用を高度化させるとともに、その一方でブラックボックス化などの問題をはらんでいることが紹介され、これからの発展に対する期待と課題が述べられている。さらに最先端の設計支援ツールとして、A3では航空機開発における数値流体力学の活用について述べられている。ここでは、風洞実験の代替を目指し、設計で必須となる定量的な信頼性の課題を克服しつつ巡航状態以外でのシミュレーションが可能になっていることが紹介されている。またCAEの適用範囲を拡大するためには物理現象のモデル化が基礎となるが、A4ではそれらを整理し、まだ未適用の現象があり、その開拓の必要性が述べられている。そのような一つの課題として、A5では高エネルギー物質の設計の問題を紹介されている。ここでは、技術的あるいは現象の特殊性からシミュレーション技術が適用されていない領域があることが指摘され、その一つとして固体燃料の燃焼シミュレーションを紹介している。

またCAEを支える技術としてのメッシュ生成技術は依然として課題を抱えていることが

A6で指摘されている。またA7では、通常設計されたCAD (Computer Aided Design) モデルを分割して生成されるメッシュに加えて、試作品や実験部品などの形状を計測したデータからメッシュを生成して解析を行う現物ベースのCAEについて紹介されている。

(2) シミュレーションと設計

CAEを考える上で忘れてならない観点は、CAEは設計のためのツールである、という点である。近年CAEの精度や使い勝手が向上する中で、確かに実験がシミュレーションで代替できるようになってきてはいるが、それはあくまでも性能の解析であって、それだけでは設計者を支援するには十分でないという指摘がある。第8節では、自動車メーカーの立場から、設計者のためのCAEはどうあるべきかについて議論している。その中で発想のヒントになり、かつ、現象の理解となるCAEが必要で、そのためには機能から形状を創成できるような仕組みが重要と指摘している。

(3) シミュレーションの品質

シミュレーションの結果が製品設計に重要な役割をもつようになり、その品質が問題となっている。第9節では、この品質に関して問題提起が行われていている。品質には、単に計算結果だけでなく、入力データやCAEソフトウェアそのものの品質も含まれる。現状ではそれらの品質管理が体系的に行われておらず、今後大きな問題となることに警鐘を鳴らしており、High Quality Computing (HQC) の必要性を説いている。また、第10節においては、企業のものづくり現場における計算品質、特に計算精度について論じている。その中で、物理現象に対するシミュレーションと実験・計測、そしてその過程で生じる「誤差」について分析し、またシミュレーションの品質を、解析解によるVerificationと、実験結果に対するValidationとに整理して議論している。

A 2 設計における CAE 活用プロセス変革への期待と実践

設計における CAE の必要性

1990年代の工業製品の設計におけるCAE（Computer Aided Engineering）とは、製品設計支援システム（おもにCAD：Computer Aided Design）を中核としたものが多く、JIS B3401の定義による「CAD：製品の形状、その他の属性データからなるモデルを、コンピュータの内部に作成し解析・処理することによって進める設計」から大きく逸脱するものではなかった（図1）。ここでいう「逸脱」とは、オリジナルデザインは3D-CADソフトにより人間の感性により決定され、その後、Engineeringツールであるコンピュータシミュレーションソフトにより材料・構造強度や冷却・通風性能等の特性を評価し、3D-CADを修正し、シミュレーションで確認するというループを繰り返す3D-CAD起点の範疇にあるという意味である。（シミュレーションは3D-CADデータを必要としないものもあるが、工業製品の設計では、最終的に製造と直結した形状データが必要となるために、結果として、最終判定におけるシミュレーションには3D-CADデータを用いることが多い。）

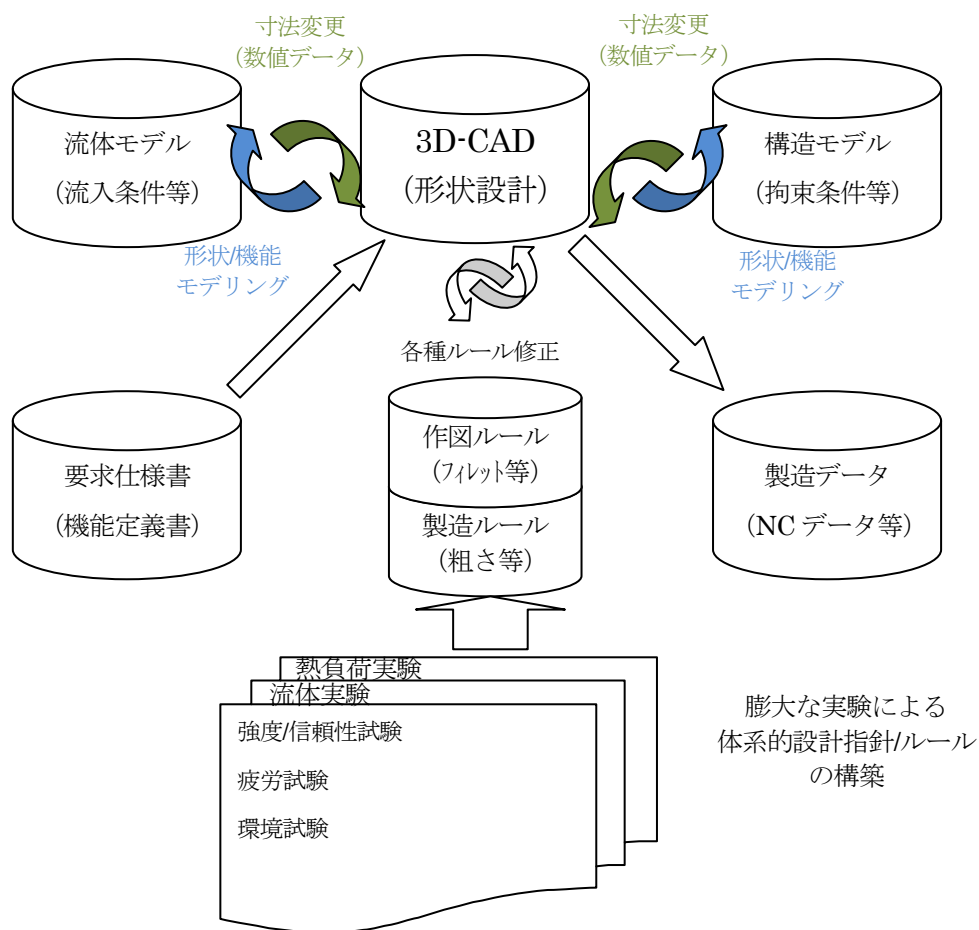


図1 1980-90年代のCAEシステムの一例

このようなCADであっても、3D-CADの普及率が低く、シミュレーションソフトが一部の産業分野（主に航空宇宙や重電関連の開発規模が大きく、大がかりな投資を必要とする開発分野）でしか保有できなかった1980年代と比較すれば、製品の機能、性能、動作等が使用状況に応じてどのように変化するかを、試作品により実際に確認する工程が減り、不具合抽出から製造データ作成までの工程が短縮されており、十分生産性向上の効果をもたらしていた。

2000年代においては、シミュレーション技術、コンピュータ環境の進化により、シミュレーション可能な物理現象、規模が、部品単位や、単一現象に特化したものから、製品全体や、熱・流体・構造等の複合現象解析に広がりつつあり、企業経営を圧迫する設計コスト（試作、実験、人件費等）の削減や、多種多様な市場に投入する製品を短期間に完成度の高いものに仕上げるために、CAEが必要不可欠なものとなっている。

技術の進歩とともに、CAEの重要普及を後押ししたものが、2007年問題と言われた製品開発/設計経験の豊富な人材の減少により困難になってきているという製造業共通の人材育成という社会的背景である。多くの企業が、知識財産が「人」について回る現場主義の開発体制からの脱却を目指し、市販シミュレーションソフトの導入、専門のDE（Digital Engineering）部門の設置を進めてきた。この時代のCAEとは、熟練技術の体系化によるソフトウェアへの置き換えといった意味合いもあったかと思われる。企業サイドでは、シニア制度（退職者の再雇用）や、定年延長等の対応も含め現在でも引き続き対応が行われている。

2010年代の突入した現在では、2008年のリーマンショック等からさらなる設計期間短縮、工数削減等による開発効率の向上や、組織の簡素化等が望まれるようになった。その結果、既に1990年代のバブル崩壊から、一部で進められていた受託解析化（内部組織ではなく、解析自体をアウトソーシング。熟練技術者を保有しなくとも高度なCAEが可能。）が加速されるとともに、内部組織で自主開発ソフトシステムを用いてCAEを運用していた企業でも、シミュレーションソフトやシステム自体の市販品の購入が進んできている。

さらに、近年の製品安全性の問題に対して、設計時における広範囲な使用条件での信頼性確保、想定される問題に対しての健全性のチェック、また、製品自体が複雑化、微細化することにより実験では計測困難な物理量が増えてきていることから、CAE（上記課題に対しては、高度シミュレーション技術）の必要性は経営効率（ここでは、時間や設備、材料等の製品製造時にかかるコスト）以上に、企業のバリュー（社会的信頼、製品ライフサイクルマネジメント、特色ある製品作り）において必要不可欠となってきている。

CAE活用の目的

現在、CAE（ここでは3D-CADとシミュレーションツールにより構築された設計支援システムとする）を用いる目的は、必要性でも述べたが、設計コスト（試作、実験、人件費等）の削減や、多種多様に市場投入する製品を短期開発することが第一目的としてあげられる。

「CAEの活用推進」という言葉は、コンピュータが世の中に誕生して以来、コンピュータを活用できる環境下にある産業分野では常に言われてきたものである。

当初は、実験手段が無い（計測手段がない、実機レベルの実験ができない、何が起きるか分からない。）といった理由から、分かる範囲の物理現象をできるだけとりこみ、現象に基づいて、簡略モデル化できる部分はできるだけ簡略化を施し、少ない資源から多くの情報を引き出すといった、実験を補うためのツールとしての活用が目的であった。

計測技術の進歩とともに、シミュレーション技術も進化し、ある程度実物との比較対応が可能となってきた。流体力学分野では、乱流のモデリング、燃焼反応のモデリング、相変化等であり、固体力学では、弾塑性、動的変形解析などが進歩した例であろう。このようなシミュレーション技術の進化に伴い、1980-90年代には、パーツ単位の評価は過去の解析や実験データの蓄積からシミュレーションのみで評価可能な時代が訪れた。

その後、3D-CADの本格的な本格的な設計現場への導入が進み、CAD連携シミュレーションが当たり前の時代となる。この頃には、パーツ設計だけではなく、全体のバランス設計や、寿命評価等にCAEが用いられるようになり、1990年後半には、設計のチェック項目としてシミュレーションによる評価が当たり前のように加えられるようになった（図2）。

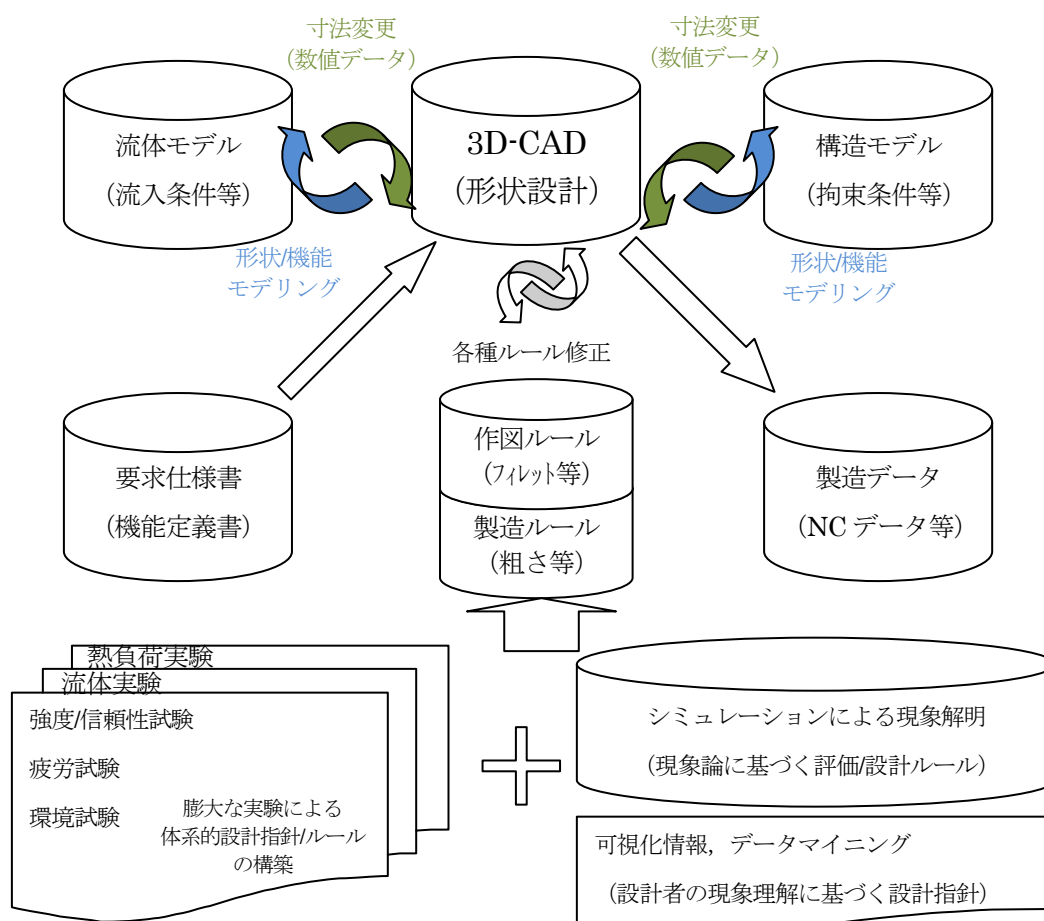


図2 1990-2000 年代の CAE システムの一例

当初は実験により確認できないものを確認するための実験の代替手段的要素を持っていた一つのツールであったシミュレーション技術が、3D-CADの発展などに伴い、実験の置

き換えに用いられ、さらに、部品から製品の信頼性評価にまで使われようとしている。2010年代を迎えた今では、設計業務として日常的に3D-CADからのシミュレーションが行われ、その目的は、製品の評価、時間短縮だけにとどまらず、設計・製造知識の取得、体系化、さらに、人材育成へと広がっている。

CAE 活用における設計プロセスの変革への期待と不安

現在では、多目的最適設計技術（設計パラメータを変数とした、様々な評価指標に対するトレードオフ設計）が多くの分野で導入されてきている。この技術により、3D-CADとシミュレーションの融合が不可欠となってきており、3D-CADがベースとなるシミュレーションから最適設計の結果を3D-CADに戻すシミュレーションベースCAD技術が必須になってきている。飛躍した表現をすれば、目的指標（関数）と設計変数がしっかり選定されていれば、初期設計は何でも良いということである。

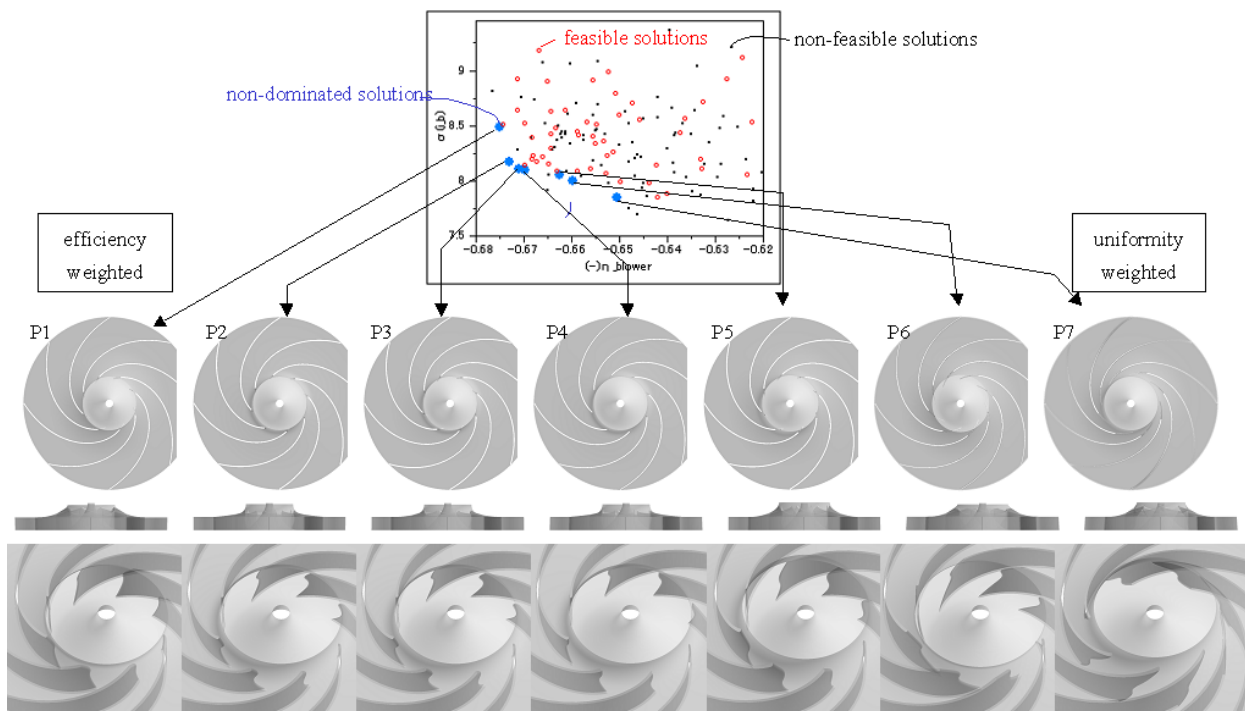


図3 遠心送風機のトレードオフ設計例[11]

図3に、掃除機に用いられる遠心送風機の最適設計例を示す。初期値は現状設計品のCADデータであり、グラフの横軸は送風機羽根車単独の流体力学的効率、縦軸は送風機以下の流路に影響を与えるであろう、羽根車出口速度の変動割合を示している。この二つの指標を目的関数として形状最適化を行った結果として、様々な形状の羽根車が示されているが、いずれも最適化の中で見出された形である。グラフの横軸右、縦軸下に行くほど、速度変動は小さいが効率は低い、横軸左（原点側）、縦軸上へ行くほど、効率は高いが変動が大きい傾向の羽根車となる。このように、目的関数を決め、CAD形状データに関わるものを自動的に変更する仕組みさえ作ってしまえば、システムが様々な形状と目的関数の満足度を示してくれる。

製品全体解析もシミュレーションの普及とコンピュータ資源の進歩により、多くの分野で可能となっており、従来の部品からの積み上げ設計から、製品全体からのブレイクダウン設計（初期解析により、全体バランス、目標を見定め、それから効果的改良の割り付け、起こりうる障害の回避を行う）に方向が変わってきている分野も見受けられる。

このような最先端の技術はCAEの活用目的で示した設計・製造知識の取得、体系化、人材育成が十分に行われている部門では非常に安定して、成長の望めるツールとなるが、ブラックボックス的に導入した場合、信頼性や機能実現性に十分な現象的理解が行われず、ある時に、潜在的問題が顕在化することが危惧される。

製造・製品活用設計プロセス改革の実践

上記のように、デジタル設計分野はCAEの活用により、大きく変わる可能性を秘めている。しかし、デジタル設計では、製造誤差、組み立て誤差、等の影響を評価する技術（ロバスト最適化がデジタル設計では行われているが）が開発されてきているが、現状では十分表すことができない。これを解決する手法として、現物融合型エンジニアリング（Convergence Engineering）という、現物情報の設計へのフィードバックが行われている（図4）。現物の結果をデジタル化することで、CAEによる設計プロセスをより不確定性を考慮したプロセスへ強化することが可能となる。また、試作や実験に関しても、光造形機の普及などにより、シミュレーション結果の確認が従来の数十から数分の一の時間で実施できるようになってきている。

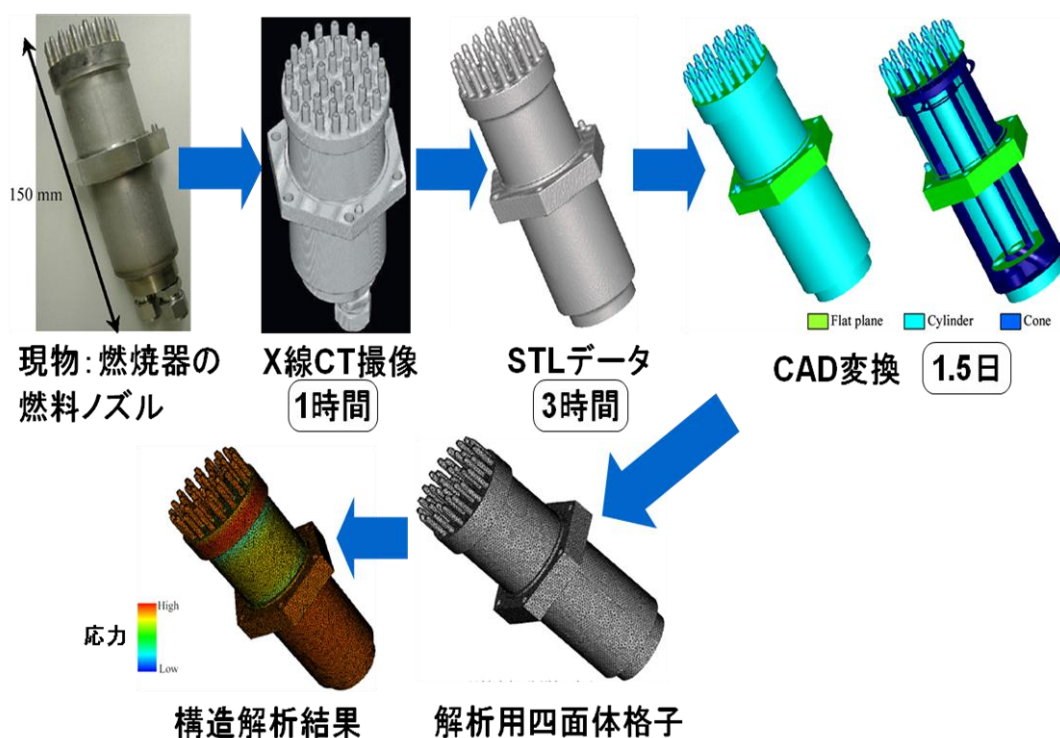


図4 現物融合型エンジニアリングの一例[12]

A 3 航空機開発における数値流体力学の活用

背景

- ・ CO₂ 排出の削減から旅客機においても燃費性能の改善要求が高まっているが、近年の原油価格高騰からエアラインの運航費に占める燃料費の割合が人件費よりも大きくなり、旅客機の低燃費化はエアラインの経営面でも重要課題になっている。
- ・ 空港騒音も ICAO(International Civil Aviation Organization) の規制が 2006 年から強化され、今後更に厳しくなる見込みである。また、空港によっては着陸料に騒音別料金体系を採用している。この空港騒音は、過去はエンジン騒音が主であったが、過去 40 年でエンジンの低騒音化が大幅に進み、最新の旅客機では高揚力装置や脚等からの風切り音の低減が重要になってきている。
- ・ 表 1 に示すように、最近に開発された又は開発中の旅客機はすべて、低燃費・低騒音をセールスポイントにしている。

表 1 最近の旅客機のセールスポイント

Airbus A380 (2005 年 4 月初行)	Boeing 787 (2009 年 12 月初飛行)	MRJ (Mitsubishi Regional Jet) (2012 年に初飛行予定)
555～800 席	217～289 席	70～90 席
競合機に比べ 13%低い燃費	Boeing767 に比べ 20%の燃費改善	既存機に比べ 20%低い燃費
騒音も大幅に削減	シェブロン等の騒音低減のための工夫	既存機に比べ圧倒的に低騒音

- ・ 上記の燃費改善および空港騒音の低減には空力解析が最も重要であり、欧米の航空機メーカーは風洞試験の高度化とともに、CFD(数値流体力学)による解析や最適化の研究を強化している(表 2)。
- ・ 我が国では、風洞試験設備が欧米に比べ劣っているため(図 1)、それを補うためにも CFD 技術への期待は大きい。

表 2

Boeing における CFD の活用例 (NASA CP-2004-213028)	
B-767(80 年代)	風洞で 77 個の翼を試験
B-737NG(90 年代)	風洞で 11 個の翼を試験
B-787 (2000 年代)	風洞で 5 個の翼を試験



図 1 JAXA の遷音速風洞 (1960 年～)

欧州 ETW や米国 NTF は実機 Re 数の試験が可能であるが、JAXA の遷音速風洞では実機の Re 数の 10 分の 1 の試験しかできない。

航空機開発における CFD 活用の現状

- ・旅客機全機モデルの CFD 解析には、抵抗係数で $C_D=0.0001$ （これを 1 カウントと呼び、全抵抗の 0.3%程度、揚力も含めた翼にかかる力からは 0.02%程）の精度が求められる。
- ・現在の CFD は、ソルバー、計算格子、物理モデルの違い等で 10 カウントあるいはそれ以上の誤差を発生し、絶対精度についてはまだ改良の余地がある。
- ・空力形状の最適化（例えば抵抗最小の形状を求める等）の場合は、図 2 のように形状の違いによる空力係数の差が得られれば良く、その点では現状の CFD は有効であり、MRJ でも開発コスト・期間短縮と高性能化に重要な役割を果たしている。

表3

MRJ における CFD 活用	
✓	構造・流体連成解析による主翼最適設計
✓	エンジンナセルと主翼間の最適化
✓	高揚力翼型の設計
✓	空気抵抗を減らすウィングレット形状の探索
✓	後部胴体形状の設計
✓	着陸形態の解析と設計
✓	風切り音の解析と低騒音化

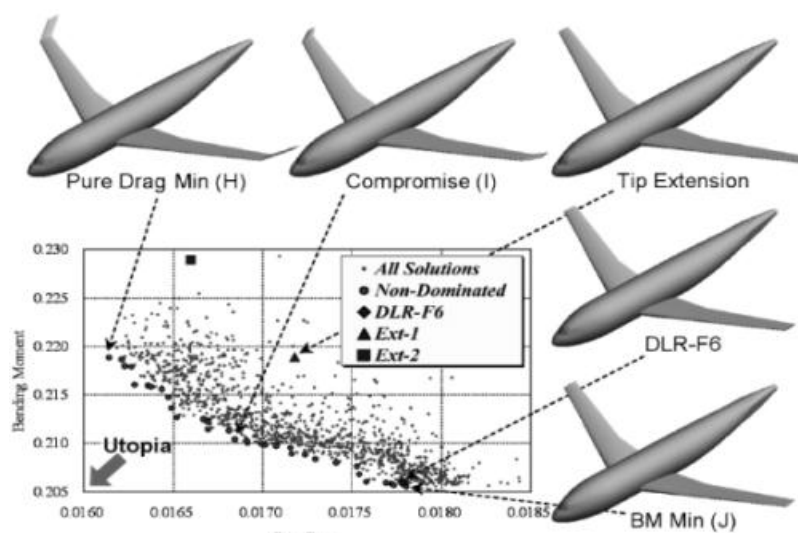


図2 CFDによるwingletの最適化

航空 CFD の課題

- ・CFD は巡航条件（設計点）では活用されているが、失速などの大きな剥離を伴う非設計点の解析では未だに定量的な信頼性が無い。物理モデル（乱流モデル等）の高度化やソ

ルバーの空間精度改善等の研究開発が必要。

- ・旅客機開発では様々な迎え角、速度等での CFD 解析が必要であるが、Navier-Stokes 計算では未だに計算時間が大きく、生産性は風洞試験の測定に比べ劣る（風洞模型製作の時間は除く）。
- ・形状最適設計等に使う場合は数百ケースの膨大な計算を行うことになるため、低次の CFD 解析（例えば Navier-Stokes 計算でなく Euler 等）を用いている。
- ・計算機性能が 10 年で 1000 倍程の改善が続いているため、計算時間の問題はいずれは解決すると思われる。むしろ、格子生成の時間を更に短縮すること、また大規模計算に伴う膨大なデータ処理についての技術開発が必要である。
- ・市販ソフトが自動車関係では広く流通し、いずれは航空機関係でも一般的に使われるであろう。しかし市販ソフトを使う限り、海外メーカーとの技術差別化ができなくなる。また、空力最適化等ではコード修正等が困難な市販ソフトでは対応が困難である。

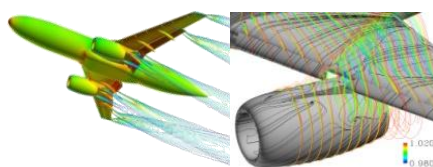
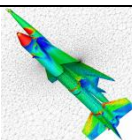


図3 東北大学の TAS-code の解析例

表 3 東北大学の TAS-code

TAS-code を NEC SX-9 の 1 ノード 16CPUs で使用した場合の計算時間	
・巡航形態の解析では、500 万節点（2500 万要素）で 1 ケース 2 時間 ・離着陸形態の解析では、1000 万～2000 万節点（1 億要素）で半日から 1 日	
備考：TAS-code=Tohoku university Aerodynamic Simulation Code	
は東北大で開発した非構造格子（四面体とプリズム要素のハイブリッド）の Re 平均ナビエ・ストークス計算コード(1998～)で、東北大以外でも JAXA、メーカー、NASA 等で使われていて、MRJ 開発でも様々な解析・最適化に活用されている。	



- ・航空分野 CFD は、これまでは巡航状態の静的な解析を主にして風洞試験に置き換わることを目指してきたが、スパコンの更なる性能向上で、飛行安定性解析や舵角応答、旋回や離着陸時等の動的シミュレーション等、つまり飛行試験の置き換えが期待されている（図 4）。試験設備において欧米に劣る我が国では特に重要な技術である。
- ・空力音への展開は更に高度な CFD 技術の開発が必要である。
- ・大学では CFD の応用研究は増えているが、CFD アルゴリズム研究を行う者が減少しており、次の若手研究者の育成に不安がある。

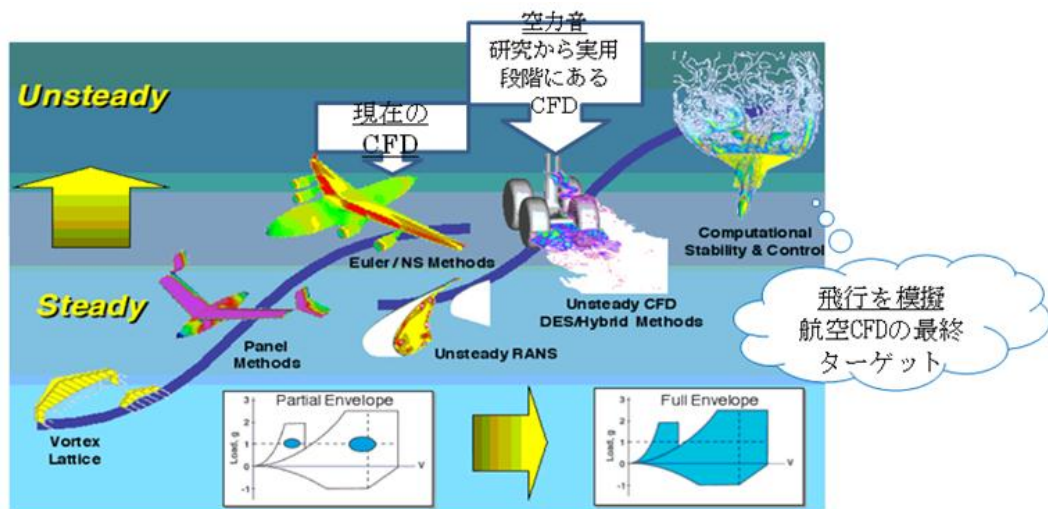


図4 航空 CFD の展開 (NASA LRC のスライドより)

A 4 ものづくりのためのシミュレーションに必要な物理現象モデル

ものづくりのためのシミュレーションに必要なモデルのうち最も重要なものは、物理現象の数理モデルであろう。これに関して、基本的なモデルは、既に確立されたものが多いが、あたらしい材料や、新しいスケールの現象などが開発されると、その振る舞いをシミュレートするために、新しいモデルが必要になる。その意味で、物理現象モデルの開拓は、終わりのない課題である。

今までに確立されている主な物理現象モデルは、変微分方程式で表されるものが多く、次のようなものがある

【1次元振動】 弦の振動（横振動）も棒の振動（縦振動）もニュートンの運動法則から導かれる1次元波動方程式（変数は変位）で表される。速度抵抗の項がある場合は、電信方程式（電線中の電磁波の減衰現象を表す）とも一致する。

【2次元の振動】 ニュートンの運動法則から導かれる2次元波動方程式（変数は変位）で表される。定常状態は、極小曲面を表すラプラス方程式と一致し、外力がある場合はポアソン方程式となる

【3次元弾性体の運動】 ニュートンの運動法則から導かれる方程式（変数は変位）で表される。場面を制限することにより、薄板の運動方程式、棒の運動方程式も得られる。

【熱現象】 熱量保存則より導かれる熱伝導方程式（変数は温度）で表される。物質質量保存則から導かれる拡散方程式（変数は溶媒中の物質の濃度）も同じ式となる。拡散方程式を拡張したものに、移流拡散方程式（流れる溶媒中の物質の濃度が満たす式）、反応拡散方程式（非線形な物質生成項をもつ）、多孔性媒質中の拡散現象を現す方程式などがある。

【流体現象】 質量保存則から導かれる連続の方程式（変数は流速ベクトルと密度）、粘性がない場合（完全流体と呼ばれる）にニュートンの運動法則から導かれるオイラー方程式（変数は流速ベクトル）、音の伝播を表す3次元波動方程式（変数は密度）、非圧縮粘性流体の運動を表すナビエ・ストークス方程式（変数は流速ベクトル）がある。渦無しの流れ（層流）に対しては速度ポテンシャルが存在し、ラプラス方程式を満たす。渦無しの完全流体（非圧縮とは限らない）に対しては、圧力方程式が得られ、さらに時間変化のない流れ（定常流）に対してはベルヌイ方程式が得られる。

水面の波は、自由境界の時間変化現象とみなされ、特に非粘性で渦無しのときは、速度ポテンシャルに関する4つの方程式で表される。場面を限定することにより、深水波、浅水波、重力波、表面張力波などを現す方程式（変数は水面の変位）に帰着でき、特に浅水重力波はKdV方程式（変数は水面の変位）で表される。

【電磁波】 クーロンの法則から導かれる電場と磁場のそれぞれに関する2つの方程式、ファラデーの法則（磁場の変化により電場が誘導される）から導かれる方程式、アンペール・マックスウェルの法則（電場の周りに磁場が生じる）から導かれる方程式の合計4つの方程式からなるマックスウェルの方程式（変数は、電場ベクトルと磁束密度ベクトル）。

これらの方程式およびそれらの発展形の組み合わせで、応力分布、変形、破壊、座屈、振動、熱分布、流れ、電流・電圧、電磁波などの諸現象を、数理モデルとして表現し、それを差分法や有限要素法によって解くことによって、物理現象をシミュレーションできる。

一方、ものを設計するときには、それをユーザが使う場面も含めた総合的なシミュレーションをしたい場合も多い。なぜなら、ものの使いやすさや、誤操作の危険性などを評価しなければならないからである。その場合には、物理現象だけの世界に閉じこもっていることはできない。そのものを使うユーザも含めたシミュレーションが必要である。そこで必要になるのが人間の数理モデルである。

人間は通常どのような振る舞いをするか、あわてたときやパニックに陥ったときどのような振る舞いをするかなどのモデルは、物理現象のモデルと違って、ほとんど手のつけられていない領域であり、今後に残された大きな課題である。

A 5 高エネルギー物質の設計

近年のシミュレーション技術の向上は目覚ましく、工業製品の開発形態にも大きな変貌をもたらしている。しかしながら、扱うべきシミュレーション技術の特殊性などから、ものづくりのためのシミュレーション技術の向上が見えない分野もある。ここでは、高エネルギー物質である固体燃料・発射薬の設計のためのシミュレーション技術を例に取り紹介する。

固体発射薬は、密閉された燃焼室において燃焼が開始し、固体から気体への燃料の相変化によって気体体積は極端に膨張する。その時、化学エネルギーは燃焼室を密閉している壁面である飛翔体下部に圧力を作用させることで、飛翔体は極めて短距離内で超音速に加速する。このように、発射薬や燃焼室内部の設計指針を得るためには、相変化を伴う燃焼過程の再現、発射薬固体と燃焼気体の固気混相流体の取り扱い、飛翔体の移動に伴う燃焼室の拡大効果など、流体流動の再現だけでなく多くの付随する効果を物理モデルとして取り入れる必要がある。また、現象が msec オーダーで完了することと燃焼室が高温高压であることから、可視化による現象理解は難しい。このように、固体発射薬の設計に必要なとされるシミュレーション技術は、高度な熱流体の取り扱いを必要とする解析技術であり、再現された結果の検証も難しいとされる。一般に、火薬メーカーは化学系企業であることから流体現象への知見と関心は高くなく、流体解析技術の蓄積は十分とは言えない。このように、シミュレーション技術の応用が期待される分野はまだ多く残されているものの、シミュレーション技術の向上から取り残された分野は残念ながら存在している。

図1～5は、実験によって僅かに得られたデータを用いて行ったデータ検証に関する報告である。図1は、実験で用いられた燃焼室試験装置の概略図である。図2は燃焼室内部の計算モデルである。図3は、燃焼室内部の発射薬燃焼過程の時間発展の様子について温度分布を用いて示している。図4、5は、図1で示すP1とP3における圧力の時間履歴について実験と計算の結果を比較している。検証データは2箇所の圧力データであるが、その結果が実験と良好な一致を示すことで、見ることはできない燃焼室内部の燃焼気体と発射薬の様子をうかがいしることができる。

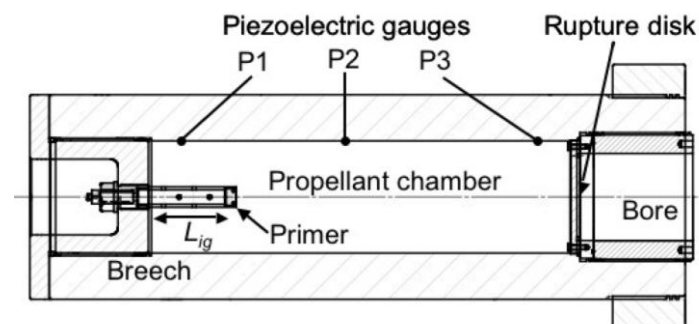


図1 燃焼室試験装置の概略図

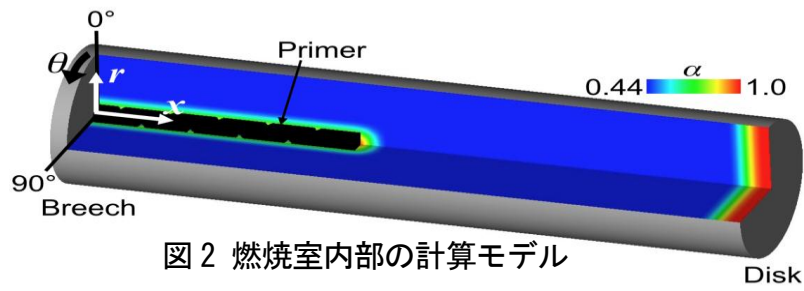


図2 燃焼室内部の計算モデル

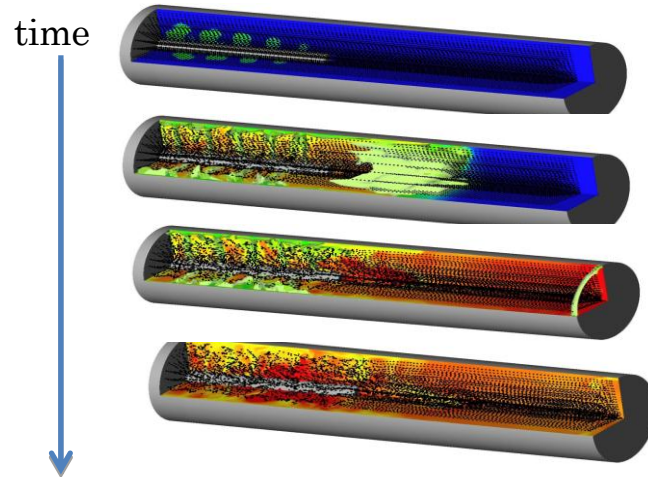


図3 気相温度と代表粒子分布の時間発展

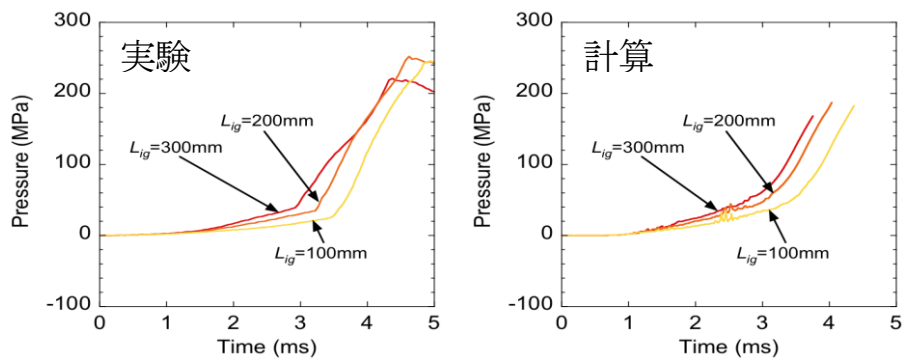


図4 L_{ig} を変化させた場合のP1の時間履歴

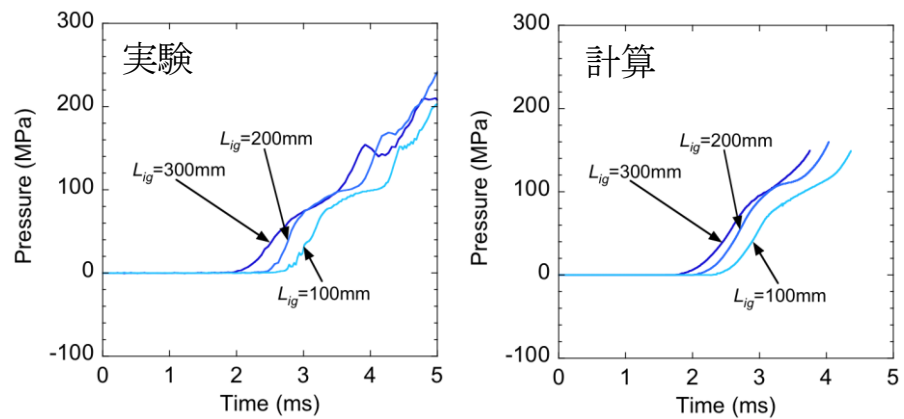


図5 L_{ig} を変化させた場合のP3の時間履歴

A 6 メッシュ生成技術の現状と課題

ものづくりのための物理現象シミュレーションは、対象の振る舞いを偏微分方程式で表し、それを有限要素法で解くのが主流である。そのための偏微分方程式理論や、有限要素法の手法は既に確立されている部分が多い。一方、偏微分方程式を有限要素法に載せるための離散化を行う段階では、対象領域を要素に分割したメッシュ構造が必要になる。しかし、このメッシュ構造は、特に対象領域が複雑な境界を持つ場合には作ることが難しい。従って、メッシュ生成技術が、物理シミュレーションの一つの大きなボトルネックとなっているのが現状である。

(1) 2次元平面領域メッシュ

2次元では、三角形メッシュと四角形メッシュが代表的なもので、いずれも良質のメッシュを作るための技術はかなり完成している。特に、ドロネーメッシュと呼ばれる3角形メッシュは、効率がよく且つロバストな構成アルゴリズムが既に確立しており、さらにこの方法で作ったメッシュの質のよさも、理論的に保証されている。また、実用上は、このドロネーメッシュにさらに、ラプラシアンスムージングなどのヒューリスティックな改良法を施すことによって、良質のメッシュを得ることができる。

(2) 3次元空間の曲面領域メッシュ

3次元空間の曲面を表現するメッシュについては、三角形メッシュと四角形メッシュがある。これらの生成手法についても、既に確立している部分が多い。特に、グラフィックス分野では、細分轄曲面と呼ばれるメッシュ生成技術が開発され、その操作性のよさ、データ量の少なさ、人の直感にあったパラメータ指定ができること、計算がロバストで安定して使えることなどから、非常に多くの場面で使われている。

(3) 3次元空間領域メッシュ

3次元領域に対しては、四面体メッシュと六面体メッシュが代表的なものである。六面体メッシュは、有限要素法などの偏微分方程式の解法のためには変数が少なくてすむために好まれるが、作るのが難しい。今から10年ぐらい前までは、世界中で、汎用の六面体メッシュ生成アルゴリズムを追及する動きが活発であった。しかし、多くの努力にもかかわらず、汎用性の高いアルゴリズムを見つけることには誰も成功しなかった。現在では、汎用の六面体メッシュ生成は難しいと言う認識が広まっており、六面体メッシュは、立体の特徴に応じて手法を使い分ける考え方が主流である。そのため、それぞれの領域形状の特徴に合わせた多くの六面体メッシュ生成アルゴリズムがメニューとして蓄積されてきている。

一方、四面体メッシュの生成法は汎用性が高い。代表的なものには、ドロネー法、境界前進法などがある。

六面体メッシュのよさが捨てがたいために、できるだけ六面体をつかい、無理なところ

だけ、四面体や、三角柱を使う混合メッシュも使われる。

以上のような現状から、メッシュ生成技術の主な課題を次のようにまとめることができる。

- (1) 汎用の3次元六面体メッシュ生成アルゴリズムを作ることは未解決である。
- (2) 3次元四面体メッシュは、スリーバーと呼ばれる好ましくない四面体が生じることがあるが、これをいかに抑制するかは未解決である。
- (3) すべてのメッシュに共通する課題としては、等方性の向上、望みの異方性の実現、良質なメッシュを保った上での要素数の削減などがある。

A 7 現物ベース CAE

リバースエンジニアリング

部品や試作品の形状を3次元形状スキャナーによって取得し、そのスキャンデータから3次元形状モデル、特に、3次元CADモデルを生成する処理を（機械生産分野では）リバースエンジニアリングと呼ぶ。リバースエンジニアリングの歴史は非常に古く、特に自動車のスタイルデザイン分野で、外板形状のクレイモデルからCADデータを作成する用途に主として用いられてきた。これに対して、近年スキャニング装置やそのデータ処理技術の進化によって、リバースエンジニアリングの適用分野が拡大して来ている。その一つがリバースされた形状データをCAEで活用するものである。

デジタルエンジニアリングと現物ベースの CAE

近年のものづくりは、CAD/CAM/CAEを中心としたデジタルエンジニアリングによってコンピュータの中に構築された設計対象のモデルをベースにして行われるのが一般的である。ここではCADによって生成された3次元CADモデルを用いて、CAEの入力となるメッシュデータが生成されている。

しかし現実にはCADモデルの形状と試作品や製品の3次元形状は異なっており、その差異は公差範囲での偏差のレベルのものではない。そのため、例えばCAE計算結果と試作実験結果との非適合性の原因となることがある。差異の要因には、様々なものがある。例えば鋳造部品の場合には、鋳造プロセスのための見切り（パーティング）が設計段階では決まらずに金型設計の段階で決まるために、その決め方によって成形品の形状が設計形状からずれてしまう。また、鋳造プロセスによる変形も大きく、さらには後加工として切削加工が行われた場合に加工部位の周辺にまで設計段階では予測の付かない切削が行われる可能性がある。このような場合に、より試作試験に忠実なCAE解析を行うには、リバースエンジニアリングによって生成されたCADデータを用いてCAEを行う必要性が生じる。

また、デジタルエンジニアリングによって、設計者はCADデータがないと作業ができない環境に置かれている。しかし例えば他社からの購買品を組み込んだ製品を設計する場合には、そのような購買品のCADデータは存在しない。そこでリバースエンジニアリングによってCADデータを生成し、自社の部品のCADデータと合わせて設計を進め、CAEを実施する必要がある。また競合他社製品の性能を解析するベンチマーキングにおいても、他社製品をリバースすれば性能評価をCAEによって行うことができるため、有効な手法となっている。

課題

(1) データ処理の効率化

リバースエンジニアリングによる現物ベースのCAEは、既に先進的な企業では実務として行われている。しかし、データ処理の多くを人手に頼っているために、膨大な作業工数を要しており、それが普及の大きな障害となっている。また、スキャナーの性能向上によりスキャンデータのサイズも膨大になっており（数千万から数億個のスキャン点）、さらな

る効率化が必要とされる。また測定ノイズやアーチファクトの処理は避けては通れない。

(2) データ処理の多様性

一口にリバースエンジニアリングといっても、CAEでの利用に適した3次元モデルを生成するには、応用によって様々なデータ処理技術が必要となる。例えば、スキャニングは忠実に3次元形状をスキャンするが、CAEではソリッド、シェル、ビームなどの構造要素の概念に基づく形状モデルが必要とされるため、スキャンデータからそれらを抽出する必要がある。

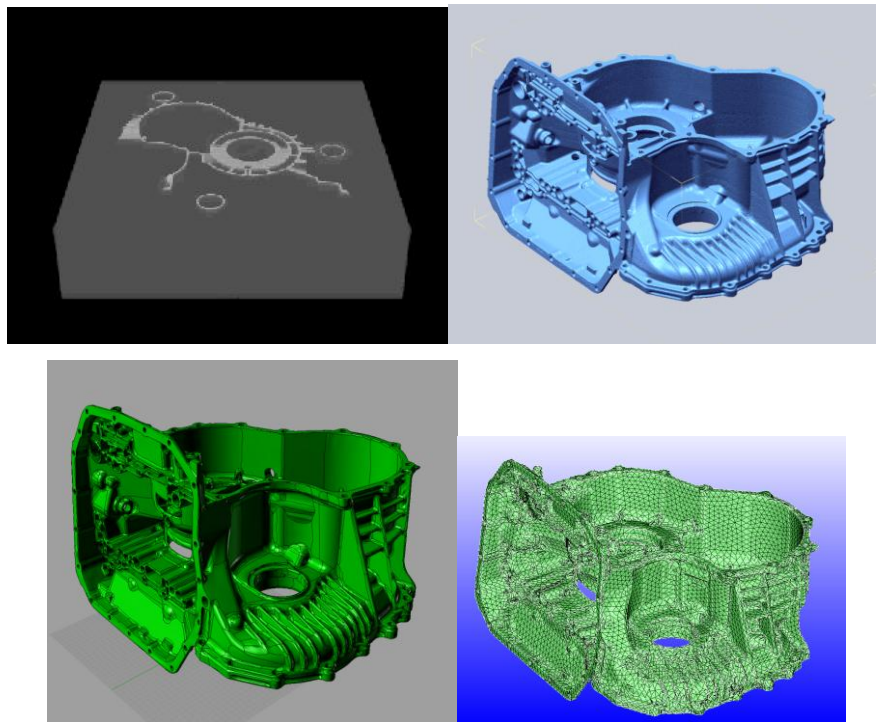


図1 産業用X線CTによるリバースエンジニアリングとメッシュ生成。
左上：X線CTスキャン画像。右上：スキャンデータによる三角形メッシュ
左下：CADモデル、右下：FEMメッシュ

(3) 精度保証

リバースされた3次元モデルが、測定対象物に対してどの程度の精度で生成されているかを正確に示すことが重要である。それがなければ設計や製造にスキャンデータを用いることはできない。もちろん高精度であることは重要であるが、精度保証がなければCAEによる解析結果の信頼度が不確実なものになってしまう。

以上のような課題に対する実用的な技術開発は急務であり、またその基盤となる形状モデリングや計算幾何学のアルゴリズム研究が必要である。

A 8 設計者のための CAE

CAE をものづくりにおいて真に役立つようにするために、また、設計者自身が進んで使う気にさせるために、適切な解析内容、タイミング、目的、場所、人、つまり 5 W1H、TP0 を深く考える必要がある。そのために、CAE 活用の歴史を振り返り、また設計者と議論を重ね、長年の CAE 提供者、開発者の経験から自分自身でも考えた。その結果、ひとつの仮説を得た。今後、試行と検証が必要であるが、「設計者が進んで使う気になる CAE」の仮説の紹介をする。

CAE 活用法の歴史

ものづくり現場における設計のための計算は、引張力を断面積で割ったり、曲げ力を断面係数で割ったりして応力を求め、ハンドブックや材料試験で得た疲労限度線で強度判定し、強度問題がないことを確認し、試作するのが、一般的であった。形状が複雑な場合、簡略化や部分を抜き出して計算する必要があった。

1970年代、有限要素法と大型計算機により、形を離散化しある程度複雑なものも荷重、拘束条件、材料定数を与えれば応力の値が計算できるようになった。さらに80年代から90年代にかけて、まずはワイヤフレームCAD、その後の3次元ソリッドCADの登場と、計算機の高性能化により、CAEの活用方法が大きく変化した(図1)。設計者は自分自身で計算をしなくなり、まずはCADで形を作り、それを解析専任者に依頼して計算結果を受け取る。また人によっては、対策形状を求めるようになった。一方、解析専任者は、単純な構造解析から熱、流体、潤滑など現象的な高度化と、より詳細な形状を高い精度で解く方向に進んでいった。(図2)

このように、設計者と解析専任者の分業化が進み、設計者は、単純な形状の構造解析のみ自身で行うようになった。それも、自分自身ではなく、設計室の中で人に頼んで行うケースが大多数を占める状況である。

設計者 CAE 活用の現状

現状、設計者が活用している CAE は難易度の低い構造解析で、解析専任者が作った手順書の基づく限られた範囲のもので、活用率は 10% に満たない。さらに自分自身で解析を行うケースはさらに低い(表1)。

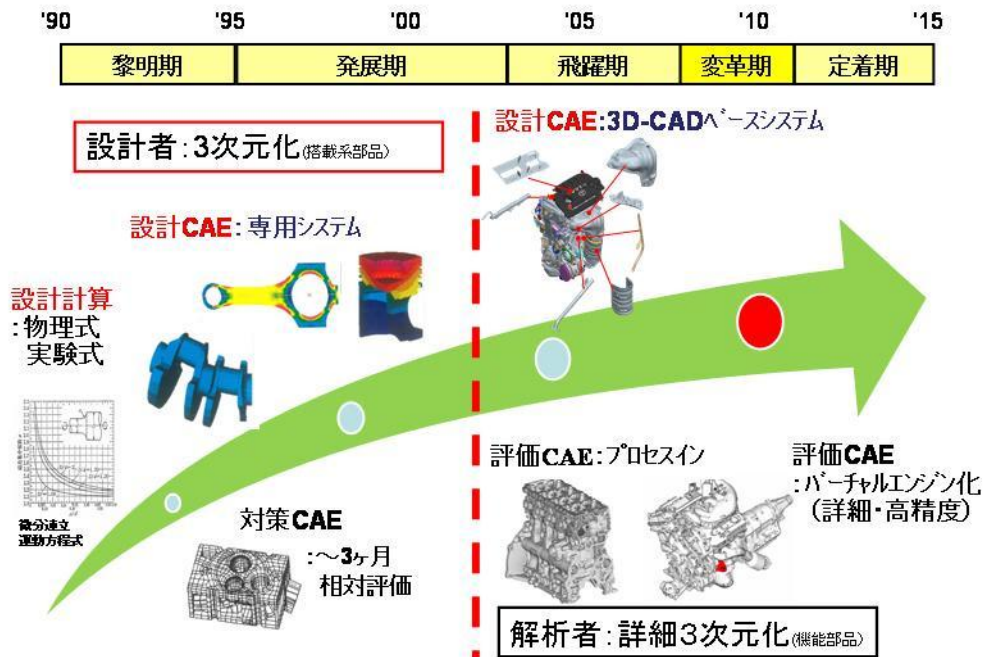


図1 CAE 活用の歴史

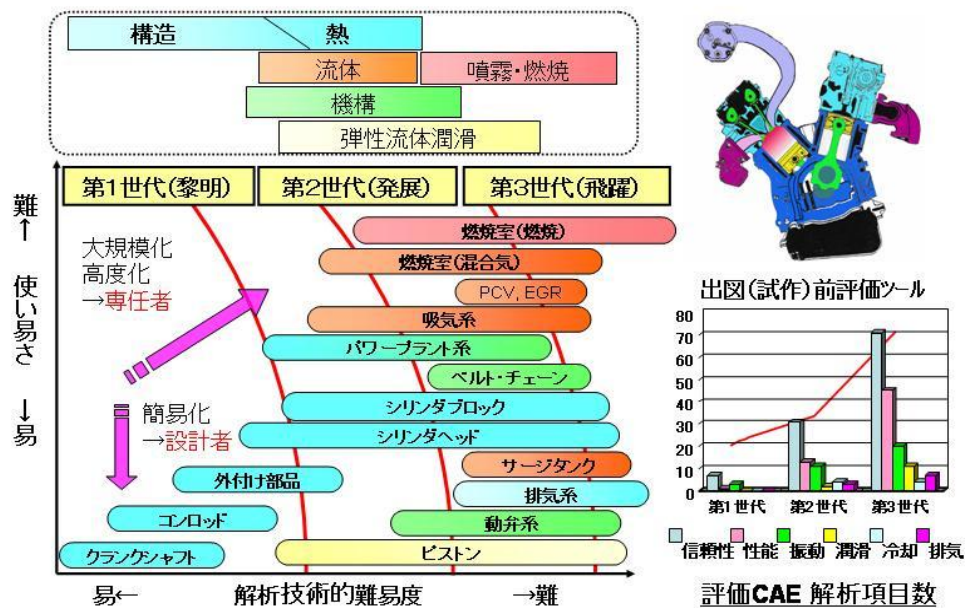


図2 CAE 発展の歴史

表1 設計者 CAE の現状 (TP0)

活用のTPO	解析専任「評価CAE」	設計者「評価CAE」
解析目的・効果	試作費、設計工数削減	試作費、設計工数削減
解析項目	エンジン機能部品 信頼性、音・振動、出力性能 全80項目程度(非線形含む)	エンジン外回り部品 信頼性、振動(固有値)全12項目 程度(PTC/MECHANICA)
解析タイミング	試作前、CAE監査 活用100%/年12Eng.	試作前評価、不具合発生 時、活用率10%未満
解析方法	各CAE項目毎に活用 手順、判定法あり	解析手順書あり (ごく一部)
解析部署	解析専任部署	各設計部署
解析者	解析専任者	トレーサー、設計者

表2 設計者 CAE 活用率向上策

設計者「評価CAE」活用課題	課題対応
活用率が低い(10%未満)	① 管理者 CAE教育実施(top down) ② 新人 CAE教育実施(熱いうちに) ③ 実務者 教育(手順書説明、実習)
外回り部品は多種多様で個別の 手順書なし	④ 実務者 応用教育実施 CAE座学、モデル化方法など
各解析の精度検証不十分 誤差評価等も行っておらず、 解析品質不明確	⑤アダプティブ手法導入、離散化 誤差は最小化 ⑥ 実務者 応用 教育 の中、精度に関 する留意事項を徹底

設計者自身のCAE活用率を向上させるために、様々な教育や、解析手順書の展開などを実施しているが(表2)、教育の受講率は向上するものの、活用率は伸び悩んでいる状況である。設計者の声を聞くと、自身でCAEを活用しない理由で多いのが、
①解析を頼むとやってくれる人が居る。自分で解析をする必要性を感じない。
②解析そのものをする必要性を感じない。解析をするよりモノを作って評価した方が早くて信頼できる場合も多い。というものである。

なぜ、このように設計者が自分自身でCAEを活用する必要性を感じないのか、教育や手順書の展開を行っても効果が少ないのか、その真因を考察する必要がある。

設計者が使う気になる CAE とは

表 3 に従来の CAE 活用率向上策（A、B）と今回考えた案（C、D）を示す。

表 3 設計者 CAE 活用率向上策

案	タイプ	具体的方法(案)	効果
A	強制	CAE実施しないと、出図や試作をさせない	試作費・設計工数の削減
B	効果実感	以下ができるCAEを提供 ・実験の代替 ・設計のやり直し削減→負荷軽減	試作費・設計工数の削減
C	プロセスイン (半強制)	VA VE、軽量化など設計標準プロセスにCAEを組み込む	軽量化、原価低減 試作費削減
D	動機付け	以下ができるCAEを提供 ・いい設計ができる(最適化) ・背反の解決 ・発想のヒントが得られる ・現象の理解の手助け	商品力向上 原価低減 試作費削減 成長感

案Aのうれしさ実感型は、会社の収益としてのうれしさであり、設計者自身の「実感」には直接ならないため、必ずしも自分自身でCAEを実施するモチベーションには直結しないと考えられる。案Bの強制型は、即効性、実効性はあるが、安定的な向上、長期的な効果につながるかどうか疑問がある。案Cは、設計者、設計のあるべき姿、設計プロセスの中にCAEを組み込むもので、案AやBと比べ、設計者の納得は得られ易いと考える。案Dが、設計者のモチベーションを喚起する、最良の案と考える。従来、解析専任者が開発してきたCAEは、3次元の詳細なCAD形状があり、それをメッシュ分割して構造解析や流体解析をする、形を評価するものであった。それに対し、設計者が自ら活用する気になる、「動機付け」となるCAEは、形を作る、あるいは「創る」CAEであると考え。案Dの中、最適化や背反の解決（多目的最適化）については、一般的に普及している方法であり、今回は、発想のヒント、現象理解の手助けになるCAEがどんなものであるかを考察する。

形を創る CAE

①発想のヒント、②現象理解の手助けになるCAEとは、3次元の形ありきで、メッシュ分割から結果出力、判定までを自動的にできるのではなく、形や結果の根拠が利用者に分かるものでなくてはならないと考える。つまり、「形」→「形の機能評価」→「判定」ではなく、「機能の最適化」→「形」である。形の前に機能の最適化をするために、「機能」のモデル化が必要になる。これを「物理式（モデル）」とした（図3）

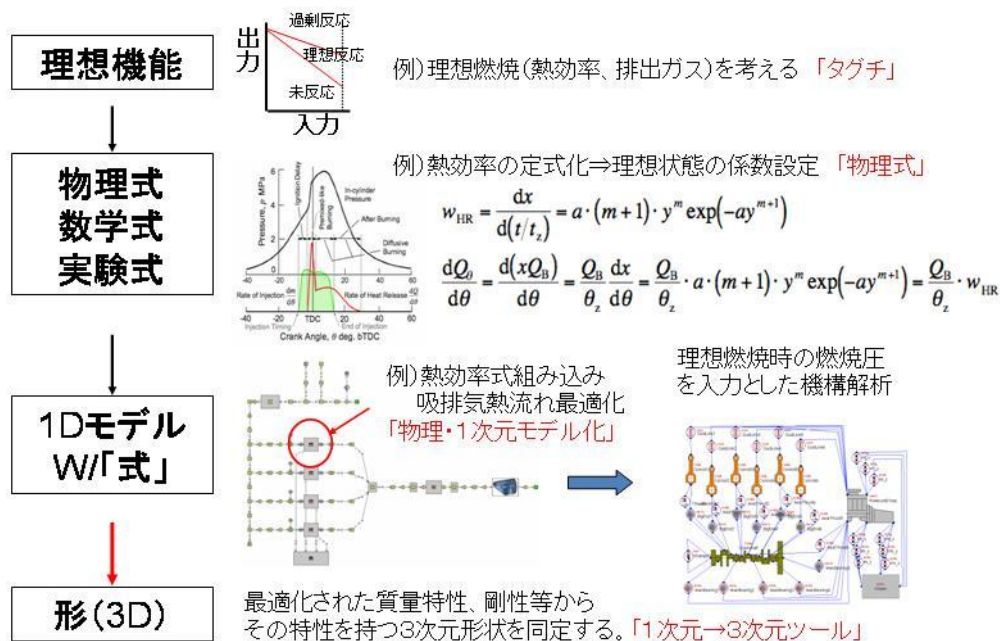


図3 理想機能を形にする

理想機能を形にするプロセス実現のための課題を以下に述べる

(1) 機能の物理モデル化の課題

訓練、教育としてまずは「形」の機能を考えさせる。具体的には、例えばその形がふるまう現象、不具合を分析して、「要素」「状態」「機能」にばらす。これをつなげて全体系を表現する(図4)。この表記は、まさに「物理モデル」表記であり、シミュレーションモデルに変換し、振る舞いを再現することができる。

(2) 物理モデルの形(3次元)化の課題

物理モデルは設計パラメータを有するが、これを3次元化する際、自由度が多く、一意に形が決まらないという課題がある。しかし、一般には、搭載の制約や、生産技術、製造コスト上の制約があり、最適化手法を用いれば、機能、搭載、生産技術を両立する「形」を求めることは可能であると考えられる。

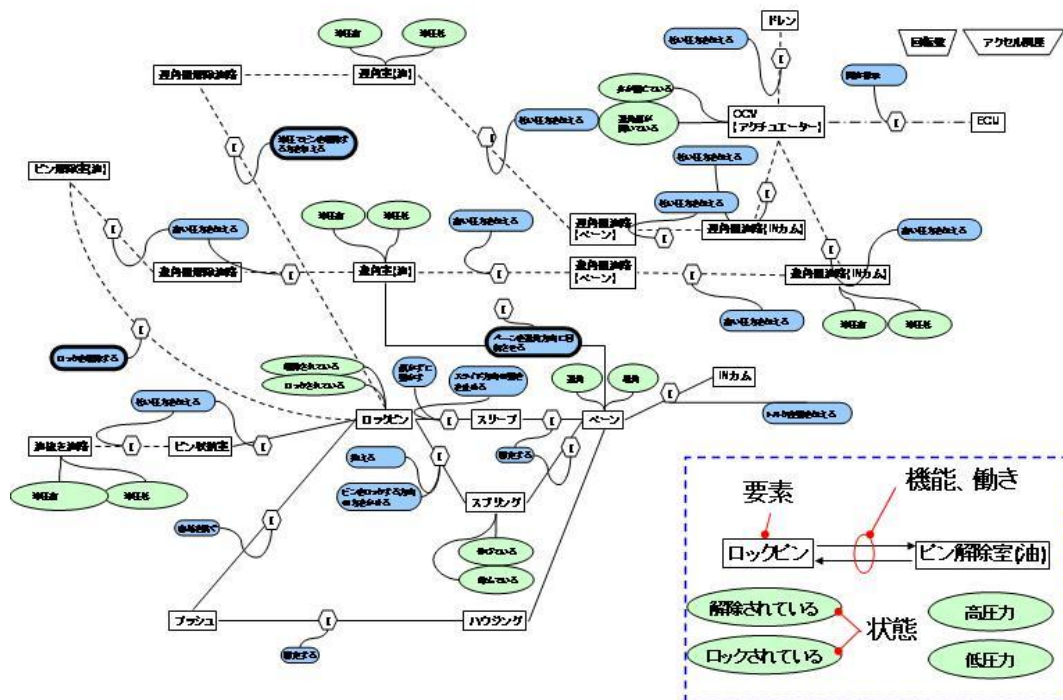


図4 要素、状態、機能ばらし図

A 9 今、なぜ計算の品質なのか

はじめに—ヒストリカル レビュー

有限要素法 (FEM) 等のシミュレーション (本稿ではシミュレーションと計算を同義に用いる) のツールは、構造、熱・流体、電磁場等における物理現象を記述する偏微分方程式の境界値問題、あるいは初期値問題を離散化して解くための手法として、コンピュータの発達とともに発展してきた。従ってこれらの手法は、大型計算機の周辺で仕事をする、力学、物理、計算科学等に精通した解析の専門家によって開発され、使用されてきた。この場合には解析の結果は問題の物理現象に精通した専門家の厳しい精査を受けており、計算の品質はある程度保障されていたといえることができる。また当時は解析部隊にまわってくる仕事は事故解析などの特別な課題で、日常的なものづくりにつながっているわけではないので、品質の問題はそれほど重視されず、もっぱらより大規模に、より高速にといういわゆる High Performance Computing (HPC) が志向されてきた。

1990 年代の半ばごろから、これらのツールの有効性が解析の専門家のみならず、現場でものづくりに携わっている設計技術者たちにも認識されるようになり、これらを設計のツールとして使いたいとのニーズが高まってきた。このニーズに応えるべく、これらのツールの販売あるいは計算サービス等を行っているソフトウェアベンダーは関係学協会で活躍する先生方の支援をうけて、CAD と CAE の統合化、最適化等の設計支援ソフトの開発等に取り組んできた。

このような様々な努力の結果、これらのシミュレーションツールが設計現場における日常業務のなかに取り入れられるようになってきた。また、ものづくりの陣頭に立つ企業トップのスタッフの間にも、ものづくりプロセスの中にシミュレーションを積極的に組み込むことにより、開発工期の大幅な短縮とコストの削減が可能になるとの認識が広まり、現在ではシミュレーションはものづくりの一翼を担う重要なプロセスのひとつとなりつつある。

High Quality Computing (HQC)

計算の品質保証の重要性については既に伊理が 1995 年に以下のように指摘している [3]。

“工業製品についていえば、品質管理がおろそかにされ、品質保証のなされていない製品には市場競争力、国際競争力がない。製造技術においては品質と信頼性の概念は最も重要なものであり、品質に敏感でない技術は今やないといってよい。計算技術と製造技術とは同列に論じられない点も多いかもしれないが、現在までのところ、計算および計算結果についての品質、信頼性の概念の重要性が関係者の間で一般に広く認識されているとはいえないのではないか。しかし、計算も技術の一つであるとすれば、このような現状は速やかに改善されなければならない。少々誇張して「今までの計算は、計算のやりっぱなしだ」と言ったりすることもある。計算者はその手順や結果について他人をきちんと説得し納得させることができなければならない。そのような方法論を我々は確立しなければならない。コンピュータの性能はどんどん向上しており、並列超高速計算技術も現実のもの

成りつつある(いわゆる HPC-High Performance Computing). 扱う問題の規模の拡大にこの性能向上のすべてを当てるのではなく、その一部(あるいは全部)を計算の品質の向上(すなわち HQC-High Quality Computing)にも振り向けたいものである.” [3]。このような貴重な提言があったにもかかわらず、我が国ではこれまで専ら HPC が追究され、HQC が議論の俎上にのることはほとんどなかったと言って良い。

今、なぜ計算の品質なのか

日本の工業製品はその優れた品質の故に国際的に高い評価を受け、ものづくり立国日本の名声を得るとともに外貨獲得の原動力となっている。特に中国をはじめ途上国の追い上げを受けて価格で勝負することは不可能になりつつあり、高い信頼性に裏打ちされた技術力を現在よりなお一層高めていくことにより、他国では追随できない高品質の製品とサービスを提供し続けることによってのみ国際社会のなかで生き残りを図ることができる。

シミュレーションがものづくりプロセスの一翼を担うようになった今、シミュレーションの結果として得られる計算の結果は、ハードの製品と同じように品質の保証されたものでなければならない。ハードの製品を売買するとき、必ず品質保証書が添付され、品質保証の仕組みが標準化されている。また企業内では品質改善のための努力が日常的に払われている。しかしソフト(シミュレーション、計算)に関しては、このような品質保証の仕組みはまだできていない。シミュレーションはあくまでバーチャルの世界であり、シミュレーションの結果予測される事象が現実の世界で起こる事象を再現しているとは限らない。設計上許容しうる不確かさの範囲で現実を模擬していることを保障しなければならない。ここのところを無視あるいは軽視すると、シミュレーションに基づいて製作された製品の品質に様々な問題が発生する。まだ顕著な形で表立って出てきてはいないが、小さなトラブルはあちこちで耳にする。我々は今こそ計算の品質を保証する仕組みを構築しなければならない。

海外の動向

EUでは英国のNAFEMS (National Agency for Finite Element Methods and Standards) が既に1980年代からこの問題に取り組んでおり、汎用構造解析プログラムの精度向上のため、多くのベンチマークテストを作成・実施。ベンチマークテストは世界中のベンダーに利用されている。また各種教育用テキストの作成、各種セミナーの実施、Registered Analyst 制度の運用、BENCHmark誌の発行など広範な活動をしている。最近では、NAFEMS のQMS (Quality Management System) を体系化して、計算の品質保証に関するビジネスモデルを提案している。特に構造関係の解析に対しては、SAFESA (SAFE Structural Analysis) の詳細な体系が準備されている。

一方米国においては2002年にASMEの中に計算の品質保証に関する標準化を目指した委員会が組織され、V&V (Verification and Validation) として体系化されてきた。現在構造解析、流体解析など様々な分野のドラフトが準備され、ASME Standard として発行されつつある。

NAFEMのAMWG (Analysis Management Working Group) とASMEのV&V委員会は相互交流を通じて密接に情報交換を行っている。

我が国の動き

翻って我が国では日本機械学会において、計算力学の教育と技術認証制度が軌道に乗っており、人材の育成という面では大きな成果を挙げている。以下にその事業の概要を示す。

“高性能かつ廉価で使い易いPC やOS が普及し、様々な汎用計算力学ソフトウェアが簡単に利用できるようになり、計算力学のユーザー層が急速に広がっている。一方、グラフィカル・ユーザーインターフェースが整備されてデータ入力が簡便になり、可視化技術の進歩によって解析結果がきれいに表示されるようになってきたとはいえ、計算力学ソフトウェアをブラックボックスとして利用して信頼できる解を得ることはまだできていない。一見するとともにもらしい解析結果が得られたとしても、境界条件の設定間違い、不適切な要素分割、あるいは不適切なアルゴリズムの選択などによって、まったく見当違いの解析結果を得ているかもしれないという危険性を常にはらんでいる。力学計算は、解析対象の性能や安全性などに直結する重大な任務を担っており、知らずに誤った解析結果を採用してしまうということは大きな損失につながる。このような状況において計算力学解析結果の信頼性を担保するためには、計算力学ソフトウェアの品質保証に加えて、計算力学技術者の品質保証が大変に重要であると言える。社団法人日本機械学会では、以上のような認識のもとに、2003年度より「計算力学技術者」認定事業をスタートした。[10]” 現在、固体力学分野の有限要素法解析技術者ならびに熱流体力学分野の解析技術者を対象とした上級アナリスト、1級、2級の試験と、初級の認定を実施している。

一方、日本計算工学会では2009年に「シミュレーションの品質・信頼性に関わる調査・研究分科会」(略称: HQC (High Quality Computing) 研究分科会) を組織し、調査研究活動を開始した。以下にその概要を示す。

- ・ 背景
 - － 家電、自動車などの民生品から原子力発電所のような公衆安全に係わる施設に至るまで、設計・製造におけるシミュレーションの役割の拡大
 - － 製品の品質や安全性に対して、計算技術者が責任ある役割を担うためには、シミュレーションの信頼性を保証する方法論や技術の確立が不可欠
 - － 標準化の取組みは、現状では欧米が大きく先行 (米 ASME、英 N A F E M S)
- ・ 趣旨・目的
 - － 早期に情報分析の上、実務的な標準やガイドラインを整備していく必要
 - － 上記活動の端緒になるべく設置。日本計算工学会は CAE 技術の産業横断的な学会
- ・ 海外動向の調査

- － ASME：シミュレーションの V&V（検証と妥当性確認）および UQ（不確かさの定量化）の標準および関連文書
 - － NAFEMS： 計算業務の品質保証に関わる標準および関連文書
 - ・ QSS001：ISO9001 準拠の要求事項、SAFESA：構造解析の標準等
- ・ **国内動向の調査**
 - － 専門委員の所属組織・会社における取組み状況ほか
- ・ **日本として取り組むべき課題の抽出およびガイドライン等の検討**
 - － 計算業務の品質保証に関わるガイドライン
 - － シミュレーションの信頼性を確保するための方法論・技術の標準化
 - － 学術面で取り組むべき課題および学術研究のあり方
- ・ **平成 22 年度の対外活動**
 - － 計算工学講演会（5 月、九大）、日本学術会議安全シンポジウム（7 月、東京）、機械学会年次総会（9 月、名工大）でワークショップ等開催
 - － HP 開設：<http://www.jscs.org/hqc/>

まとめ

海外の動向を調査しているうちに分かったことは、ASME も NAFEMS もともに、計算の品質保証の仕組みを体系化して、これを国際標準にしていこうとの意図が明白に読み取れることである。そのような状況のもとでは、日本の企業およびそこで働く技術者も、海外で仕事をする場合、あるいは海外向けの仕事をする場合には、このような標準化の枠組みの中で仕事をすることを迫られることになる。このような場合、我が国で開発されたシミュレーションソフトはそれがいかに高性能・高品質であることが分かっているとしても、海外のこれらの機関で認証されない限りは使うことができない、あるいは業務に携わる技術者についても、いかに高い能力を持っていようとも、これらの機関で認証を受けることを義務化されるようになる、などの恐れがある。

このような恐れを未然に防ぐために、我が国においても早急に我が国独自の（我が国の研究開発体制に即した）標準化へのシナリオ作成し、国際的にも通用する相互認証の仕組みを構築すべく、活動を開始しなければならない。

A10 ものづくり現場における計算品質について

ものづくり現場における計算精度、計算品質に対する考え方、実用上の課題について述べるとともに、今後、CAE を真に役立つツールとするために取り組むべきことと、取組状況を紹介する。

ものづくり現場における現状

従来、計算精度は主に歪ゲージや熱電対で計測した歪や温度の値と、計算値との比較で、その差異を「精度」と呼んでいた。そして、CAEの開発目標として歪精度 $\pm 10\%$ や、温度精度 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ としていた。しかしこの「精度」は利用者の立場からすると、計算の信頼性の定性的な指標にはなるが、実用的数値ではなく、また理屈からしても実測の精度やばらつきを把握していないので、精度という言い方はおかしく、「差異」というべきである。実際のCAE活用方法の典型的な事例を図1に示す。

前述のように、ここに「精度」の言葉はなく、「判定」が重要になってくる。つまり、計算精度、材料強度のばらつき、その他の誤差を全て含む形の「判定線」と計算結果を比較し、強度判定を行う。ここで計算精度、材料強度のばらつき、その他の誤差は、理論や精密な実測によって求めたものでもなく、実際の判定には用いていない。応力などの計算値と、実機試験での亀裂の発生有無の経験値より判定値を決めているのである。

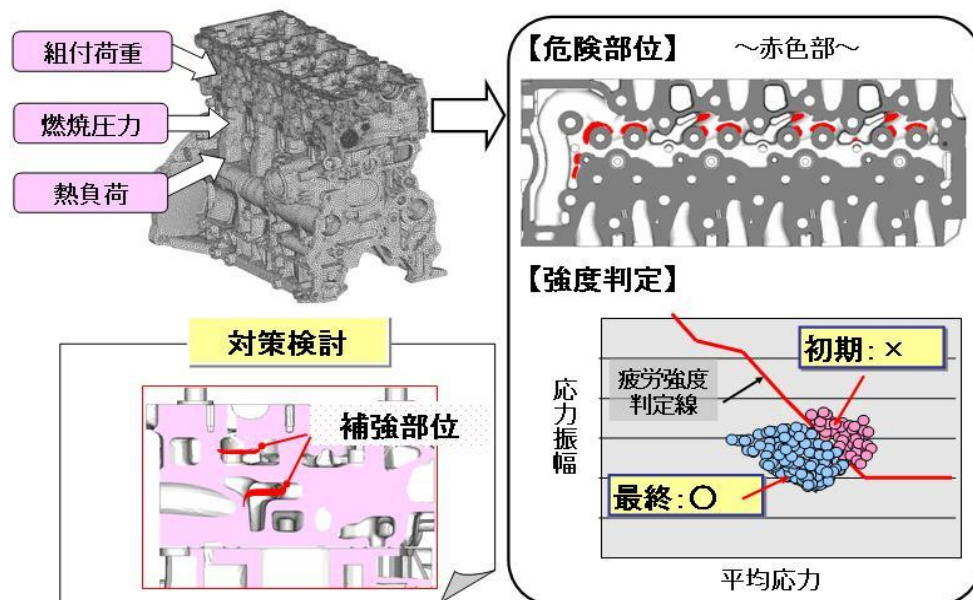


図1. CAE解析と判定値

しかし、このような強度判定の方法は、経験のN数に依存する上に、過剰品質となる可能性があり、軽量化、限界設計の方向に逆行するものである。非常に挑戦的ではあるが、理論に基づく誤差を、まずは正確に把握し、理にかなった安全率を決め、同時に計算精度

を向上し、より少ない安全率で信頼性を保証しなければならない。

ValidationとVerification

計算品質、精度を考察する上で、表記 V&V の考え方は非常に参考になる。欧米で決められてきた、この考え方、手順をそのまま採用するのではなく、ものづくり現場で実際に Validation と Verification の考えで試行して、実用現場に即した使い方を検討すべきである。図2に Validation と Verification の定義を示す。現状、物理モデルの解析解は、「理論解」と称して、物理モデルを離散化した計算モデルの結果と比較（Verification）しているが、計測モデルがなく、計測結果と、計算結果を比較（Validation）しているのが実態である。

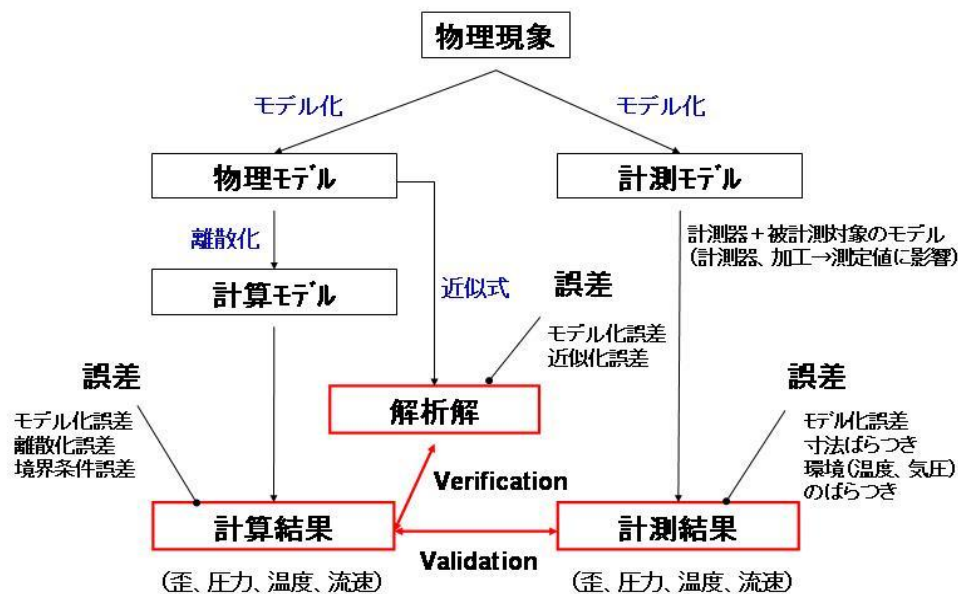


図2. Validation and Verification

その実例を示す。図3は、エンジン部品であるシリンダヘッドからL字型の試験片を切り出し、歪の実測値とFEMモデルによる計算値を比較したものである。ここでは、FEMモデルの要素タイプ、サイズを様々に変化させ、影響を見た。計測モデルを構築しておらず、計測誤差も把握していないので厳密な比較はできないと考える。

一方、表1はプリミティブ形状と、単純な荷重による物理モデルの解析解（理論解）とFEMで、メッシュサイズ、パターンを変化させた時の比較である。ここでもメッシュ分割の方法の比較を行っていて、FEMの解の厳密なVerificationを行っていない。これは現象の物理モデル化および解析解を得る時の近似式の誤差を考慮していないからである。

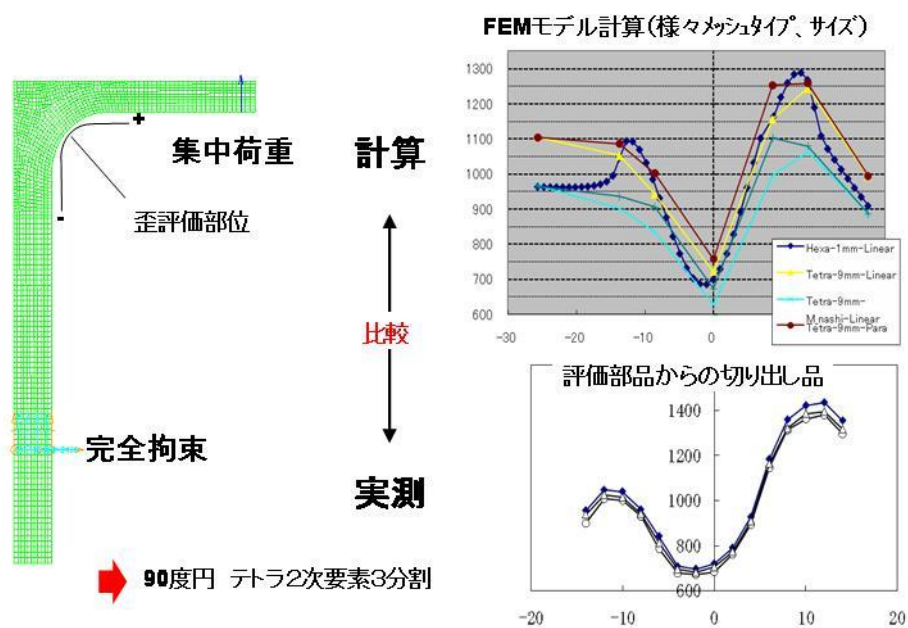


図3. 試験片の歪の Validation

表1. プリミティブ形状の理論解による Verification

プリミティブ形状(理論解、実験式あり)	メッシュサイズ	精度検証
A 単純支持梁		
B 曲がり梁		
C 有限幅円孔平		
D 有限幅半円切り欠き平板		

計算品質保証の課題

図2に示したValidation とVerificationに対し、あるべき姿と3項で述べた現状とのギャップを表2にまとめた。

表2. V&V のあるべき姿と課題

	あるべき姿	課題
Validation	①計測原理の理解、誤差把握 ②実測ばらつきの把握、 統計的処理	①歪、温度、流速など計測器の原理(特にPIVなど流体)理解→文献不足 ②「不確かさ」(乱流)など現象のばらつき把握
Verification	③プリミティブ形状による 離散化誤差検証 ④境界部モデル感度解析による境界条件誤差検証	③プリミティブ形状の入手接触、結合など単一形状でないモデル ④高感度な境界部のモデル化

前項でも述べたが、Validationの最大の課題は、計測モデルの構築である。特に流体計測について、PIVなど、モデルがないのが実情である。さらに、計測誤差だけでなく、現象の「不確かさ」の問題もあり、流体のValidationは非常に困難である。一方、Verificationの課題は、複雑形状をプリミティブな形状で組み立てた時の誤差の予測と形状と形状の相互関係や境界条件のモデル化が課題である。

実用上必要な精度について

実用上、絶対的な精度が何%以下でなくてはならない、ということはない。精度が明確であれば、その割合を安全率として余裕代を持たせればよい。精度向上は、限界設計、軽量化設計のために行う。ただ、いくら精度が明確になっても、強度判定の際に、材料強度と、精度が明確な、例えば応力を比較するわけで、材料強度のばらつきが明確になっていないと、やはり実用的な「判定」をすることはできない(図4)。

＜参考資料２＞委員会の開催記録

平成 21 年 4 月 15 日	第 1 回分科会
平成 21 年 9 月 29 日	第 1 回小委員会
平成 21 年 11 月 9 日	第 2 回小委員会
平成 21 年 11 月 18 日	第 2 回分科会
平成 22 年 3 月 15 日	第 3 回小委員会
平成 22 年 6 月 11 日	第 4 回小委員会
平成 22 年 7 月 13 日	第 4 回分科会

報告書案について

平成 22 年 11 月 10 日	第 5 回分科会
-------------------	----------

報告について

平成 23 年 4 月 28 日	日本学術会議幹事会（第 123 回）
------------------	--------------------

総合工学委員会・機械工学委員会合同計算科学シミュレーションと工学設計
分科会報告「ものづくり支援のための計算力学シミュレーションの品質保証
に向けて」について承認