シミュレーションと CAD/CAM/CAE

——その役割と未来像——

中 沢 優*
Masaru
NAKAZAWA

菊 地 勝 昭*
Katsuaki
KIKUCHI

Key Words: Simulation, CAD, CAM, CAE

1. はじめに

コンピュータの著しい発展は、あらゆる分野でのシミュレーション技術を加速的に進歩させている。工学の世界にも、実物を作らずにコンピュータ内部に数学的モデルを構築して対象物理系のシミュレーションを行う数学的シミュレーションが主流になってきている。

数学的シミュレーションの利点は

(1) 実際に物を作らないで実際状態を模擬できるので、物を作りながら開発を行う場合に比べて費用、時間の削減が図れる。

(2) 実物を使っては不可能な条件、あるいは危険な条件での現象を模擬することができる。たとえば、自動車の高速での衝突、飛行機の墜落、地震時の構築物の現象などである。

最近、CAD/CAMによる設計、製造が徐々に工場に浸透してきているが、この中に(1)のような機能をも持たせた新しいCAD/CAMシステムが構築されつつある。この分野でのシミュレーションはますます重要になるであろうし、また飛躍的な技術進歩も予想される。シミュレーションが主体になった新しいCAD/CAMシステムの将来像を提示し、その実現のための方法について私見を述べることにしたい。

2. 新しい CAD/CAM と シミュレーション技術

一つの理想的な形として無人化工場 (Factory

Automation)の概念が芽生え、この実現化のための世界的規模の開発努力がなされている。このような状況の中で、CAD/CAM は文字どおりの支援システムから柱となる Key Technology の一つになりつつある。すなわち、従来の CAD では図面作成、また、CAM では NC テープ作成と生産や開発の工程の一部を自動化するものから、CAD と CAM を総合化、一貫化し、CAD で作成したデータを CAM で利用する方向に変わってきている。また、内容も CAD では幾何モデリングやデータベース技術の進歩と相まって有限要素法を中心とした解析の導入、各種図形処理の端末やソフトの開発による Man-Machine Communication による、いわゆるコンピュータシミュレーションの操返しによる最適設計化の方向に進みつつある。

一方、CAM の方は単なる NC テープの作成、すなわち、工場における単一機能体としての工作機の自動運転から、これらの集合体としての工場全体の自動化、無人化の方向へ進んできている。

このシステムは、多種多様な部品を加工するフレキシビリティが要求され、従来形の専用機では採算のとれないロットサイズをカバーする、いわゆる FMS (Flexible Manufacturing System) であり、NC 工作機械とプログラマブルロボットの組合せがまず当面の課題となる。このようなシステムは、かなり複雑であり、効率のよいシステムの設計はむずかしくまた費用もかかる。節約できるはずの工作機械を余分に購入する等“むだ”をすることも十分あり得るし、失敗の認識のない場合でも最適のものとはほど遠いかも知れない心配がある。このような理由から実際のハードを導入する以前にシステムの計算機によるシミュレーション

* 正員、(株)日立製作所 機械研究所 (〒300 土浦市神立町502)。

ンが適用されることが重要である。

次に、製品の生産工程の中でシミュレーション技術がどのように活用されるかの検討をやや詳細に行う。図1は、シミュレーションを基礎とした新しい CAD/CAM の構想の例である。

製品の計画から研究開発、設計、製作などのすべてを一貫して処理できるようにし、可能な限り計算機によるシミュレーションによって、性能、強度あるいは加工性などを吟味し、製品開発の全工程でのバランスのもとで合理性を図るものである。このためにはまず、① 一元化され、しかもすべての工程で必要とされるデータを保有するデータベースの構築、② 各種解析シミュレーションに共通して使用でき、シミュレーションの繰返しによって得られた最適な部品や製品形状と NC テープなど加工情報伝達が可能な幾何モデル技術の開発、③ いわゆる解析技術のよりいっそうの進展と例えばロボットシミュレータ、などのいわば要素技術的な技術の開発が必要である。このようなシミュレーション技術を総合的に活用して、機械の設計、製作を行うが、これらの具体的なイメージはどのようになるであろうか。願望をこめて描くとこのようになるであろう。

(1) 人の頭中に存在する製品イメージが容易にモデリングできる。与えられた設計条件にかなった構造形状が容易にコンピュータ側から提示される。人は好みに応じて選定できる。モデリングされた実体は、CRT 上の三次元表示にとどまらず、立体ホログラフィ像として提示される。

モデリングの創案変更は人間の感性に適合して

おり、端末上のやりとりには違和感はない。

(2) モデリングされた構造体は、あくまでも理想の加工状態を想定しているから、これらを加工、組立における実際状態にシミュレーションする。指定された材料に応じて、想定される材料特性のばらつき、加工誤差、組立誤差が与えられ、コンピュータ内のモデルはまさに実物の条件を具備する。

(3) モデリングされた機械機器の動作確認がシミュレーションの主体である。人はあたかも実物を作ったかのように起動ボタンを押す。するとコンピュータ内のモデルは、実際の物理的・化学的条件に沿って動きはじめる。

性能がどの程度でるか、圧力があがる、温度があがる、スピードがあがるなどの特性が見えてくると同時に、もし強度的に弱い部分があればクラックが生じてくる。また弾性的に変動するところがあれば、振動や音も出る。たとえば、ガスタービンにおいては燃焼特性、出力特性、熱変形、振動、騒音などが、ロボットでは、負荷特性、運動特性、位置決め特性をはじめ、変形、振動、騒音、安全性などが同時に模擬できるのである。

シミュレーションは、機械、機器の本来機能のみならず、副次機能にかかわるすべての現象を模擬できる。

(4) もし、所期の性能などの条件が満たされないとき、多少なりともコンピュータが次善あるいは最善の変更を指示、あるいは示唆してくれる。この段階でもコンピュータは、独自にシミュレーションを繰返しているかもしれない。いずれにしても、改良はきわめて簡単にすむ。

(5) 初期の条件を満足するものが構築されてきたときに設計は完了するわけで、あとは製造のための CAD へと進むことになる。

(6) 当面はシミュレーションの結果修正された最終モデルに対して製作図面の作成を行うことになる。しかし、近い将来にはこの工程は省略され、直接 CAM 工程へと移行することになる。すなわち、工場からは“紙”はなくなり、情報はコンピュータ・ネット・ワークを通して伝達されるようになる。

実に、すべてコンピュータの内部で実物を目の前にしたかのような実体感あふれるシミュレーションができる。

このようなシミュレーションは、新しい製品の

図1 CAEシステム概略図

開発に伴う費用と時間を格段に低減する。

以上のシミュレーションあるいは CAD/CAM/CAE は、現在も各所でめざしている目標であり、いつかはこれに近づいていくであろう。しかしこれはあくまでも究極の理想像かもしれない。

3. 未来形シミュレーションへの課題

先に概観した将来像に進むためには、解決すべき課題は多い。主なものを列挙すると以下のものがある。

3.1 問題別シミュレーションソフトの高機能化 流体工学、熱工学、材料工学などの分野における解析ソフトは、現状よりさらに適用範囲が広く、柔軟性に富み、精度が高くななければならない。現状の解析手法と協調するか補完するか、あるいはとって替わる新しい解析法も必要であろう。

解析手法自体の発展は、それが直接的なツールであることから、シミュレーションを有効に活用する上で必須である。現在、機械工学のあらゆる分野において活用されている解析手法は総合化した CAD/CAM の中で使用するという点から、精度向上、計算時間の短縮など解決すべき課題も多い。しかし、線形問題に関しては一応実用化することが可能な技術あるいはソフトウェアが数多くある。ここでは、解析法の発展の方向を非線形構造解析の場合を例に検討する。

過去 10 年で非線形構造解析は多大な進歩をとげ、かなり信頼性のある解析が可能になり、各種機械の設計に役立っている。しかしながら、現在の方法では、非線形性を荷重増分で追う方法によるなどのため、線形解析に比較して数十倍から数百倍程度の計算時間を要し、時には経済的な理由から非常に単純化されたモデルについてしか計算できない場合も多い。したがって、非線形問題をもっと効率よく解く手法の開発が必要で、実際の複雑な環境条件のものが実際に近いモデル化で解析できるようにすることが必要である。

この分野での発展の方向を見定めるのは非常に困難であるが、まず、現在の有限要素法による解析に対する各方面の努力の結果による計算効率向上を考えてみると、現状より数倍程度計算速度を早めるのは非常に困難と思える。一方、計算機の

機能向上、低価格化は急速で過去には 8 年で 10 倍の割合で計算速度の向上があったし、今後はより急速の進歩も予想される。したがって徐々に計算時間の問題は軽減されていく。しかしながら、一貫システムのシミュレーションツールとして活用するためには次の 4 点についての画期的な進歩が望まれる。

- ① 非線形系の新しい解法の開発
- ② 有限要素法の高度化あるいは別の解析法の開発
- ③ 例えば材料非線形問題における材料モデルの取扱い方の改良
- ④ 高度な専門家でなくても誤りなく使用できるプログラム化。解法、要素、材料モデル、時間や荷重のきざみ幅などの自動設定などによる。

これらの各項に対して、実際数多くの研究がなされており、近い将来、総合シミュレーションシステムの中に非線形構造解析が実用的な意味でも含まれるものと考えられる。

3.2 問題別シミュレーションソフトのリレーショナルな結合化 モデルが実際の現象を複数個同時に表示することは結果の解析を容易にする上で有効である。これを実現するためには、問題別の解析ソフトが互いに連携を保ちながら同時に動作しているような仕組みが必要である。そのためには、柔軟で応用性の高いモデリング技術、データベースの一元化、インタフェースソフトの開発などが不可欠である。

ここではシステム全体を通して用いるはん用データベースについて検討する。

CAD/CAM によって、ほとんど例外なしに製品コストは下げることができるが、さらに進めて十分な機能を有するデータベースを介して連結、一貫化されればより効果は増大する。結局、前章で示した全製造工程のすべて、すなわち製品の初期の概略設計から詳細設計、生産さらには販売といったところまでへのデータの伝達ができることが重要である。おのおのの工程で幾何データや、部品の寸法、部品番号、部品表、製造設備、組立手順、スケジューリング、在庫品検査結果などの情報が整理されてストアされることによって、各工程ごとに新しくデータをつくるという従来のやり方が改良され、効率の向上と経費の節減ができるのである。

しかし、このようなデータベースの開発は非常に困難であり、完全なものはまだ世界中どこでも実現されていないと言える。非常に多種多量のデータをストアし、これらを効率よく引き出せることが要求されるが、このようなデータベースは単にソフトやハードを購入するといったことでは実現できず、十分な事前検討の後に開発に着手しなければならない。

有効なデータベース開発の最も困難な作業の一つは、コンピュータでやる仕事ではなく、会社内の業務手順の見直しである。すなわち、すべての手順を自動データ伝達に適するように変えることを検討する。先にも述べたとおり、生産過程で発生する多様のデータを効率よく管理するデータベース（正確にはデータベースマネジメントシステム）を中心に、各工程を処理する一貫システムを構築するためにこれがぜひとも必要である。

データベースに含まれるデータは大別して、(1) 幾何データ、(2) エンジニアリングデータ、(3) 管理データとすることができる⁽¹⁾。幾何データは、幾何モデリングを作成するためのデータ、あるいは幾何モデリング自体のデータ、幾何モデルの応用形態のデータなどであるが、それぞれの使用目的でデータ構造が違う上、データ間の関係が複雑であるため、ある程度一括して多量のデータを一度にアクセスする必要がある。このためデータ構造を忠実に反映した形で管理するシステムの構築は非常にむずかしい。標準化した幾何データだけをデータベースに保有して、支援ソフトウェアにより、図面データ、解析モデル、NC データなどに変換する方式をとるのがよいと思われる。しかし、これも幾何モデリング方式と密接な関係がありかなりの困難がある。

エンジニアリングデータは既作品の設計諸元や主要寸法などのデータ、品質、規格類のデータ、図1の生産の各過程で参照されるデータ、設計条件や設計値など製作中の製品に関するデータがある。各生産活動を進めていくことにより、自然にデータベースが成長してゆく方式にしておくことがこの種の支援システムを成功させるキーポイントである⁽¹⁾。

管理データは現在事務計算の中で扱われている生産管理、原価管理などのデータである。

以上の3種のデータはそれぞれ異質のものであり、これらを総合したデータベースの開発は非常に

にむずかしいが、CAD/CAM 一貫システムおよびその中のシミュレーションの中心技術であり、早期の技術の確立が望まれる。

3・3 不確定要素の取扱い 機械工学においては、摩擦、摩耗、ガタなどの定量化しにくい特性を含む問題が多い。特に本稿で検討している一貫システムにおいては、部品単体の解析やシミュレーションより、むしろ、機械や装置として組立て後、実際の運転状態における挙動のシミュレーションを行い、総合的にバランスのとれた機械の開発を可能にしようというものである。このような課題を達成するために、不確定要素の取扱いについての新しい展開が望まれる。

3・4 設計者の直観、経験の取扱い 現在の物づくりは、人が感覚、感触により確かめながら行っている。また物づくりはすべて定量化された部分からなりたっている訳でもなく、かなりの部分が設計者の直観や経験によっている。このようなものをうまく計算機に取り入れる必要があるが、かなり難しい問題である。設計その他の科学的な取扱いによる体系化、普遍化、そのソフト化やデータベース機能、格納データの充実などを着実に進めていくほかには解決方法はなさそうである。

これまで、設計におけるはん用システムは主として構造設計に限定されて開発が進められてきた。実際の機械の特に設計では、対象、方法とも千差万別であり、一般化されたソフトウェアの開発はむずかしい。普遍的な手法の確立が望まれる。このためには、従来学問的にあまり議論されなかった設計自体の再検討を行い、新しい体系化とそれを応用したシステムティックなソフト開発を行う必要がある。すでに“一般設計学”というよび方で、この分野における新しい理論の展開とその応用の研究⁽²⁾がなされている。今後こうしたものをベースにさらに設計自体をはっきりと定義し、その普遍性を利用したはん用的で自由な発想が計算機内で再現できるシステムをつくる試みを行う必要があろう。この場合の一つの有力な手段となる知識工学、知識ベースの研究が活発に行われており、この展開に注目したい。

3・5 幾何モデリングの効率化 幾何モデリングは形状設計で行われる種々の解析シミュレーションの入力部分に相当し、しかもそれらに連結するためのかぎをにぎっている。つまりこの問題が解決しない限り CAE は一歩も前進しない。従来

より多くのモデリングシステムが提案開発されているが意匠設計-金型加工, 機械設計-FEM 解析などの一部を除いてあまり効果を発揮していない。その理由は多々あるが, 基本的な問題として入力に費す man-power に比較し, 個々のアプリケーション接続によって得られる効果が小さいことが挙げられる。つまり

- (1) 幾何モデリングの入力を容易にすること
- (2) 幾何モデリングシステムの連結プログラムを拡大し, 一貫システム化すること

が現状での大きな課題である。

(1)については現在のマン-マシン形態が変わらない限り, 基本的部分においてより有効な手法の開発は望めない。従来から提案されている手法は大別すると次の三つに分類される。

- (1) 意匠設計システムにみられるような自由曲面サーブニスモデルを主体としたもの。
- (2) 二次元図形をベースにし, ワイヤフレーム, サーフェス, ソリッドモデルをその用途に合わせて次々と作成していくもの。
- (3) いわゆるボリューム (プリミティブ) を持ったソリッドモデルベースにしたもの。

(1)は形状表現範囲が広いことを特徴とするもので, 反面入力データ作成には多くの man-power を要する。(2)は従来の製図システムの延長に属するもので, 現状ではグラフィックスを主体とした図面作成のチェックに活用されている程度である。(3)は将来のあるべき姿として CAM の研究者によって提案された手法である。操作法は容易であるが, 入力 man-power がかかり, しかも形状表現範囲が狭いなど実用的でなく, 現状ではほとんど実用されていない。今後の方向は上記三つの利点を活用し, しかも融合された形(入力が容易でしかも形状表現範囲が広い)のモデリングシステムを開発すること, およびこれに基づいてシステムを専用化し, 使いやすくすることである。

システムの専用化, 標準化は設計者が直接利用できる形にする上で重要である。当面は専任の技術者による使用もやむを得ないが, これが本来の姿ではない。これに対してははん用システムの基本パッケージの組合せあるいはパタメトリック処理などにより専用化, 標準化が必要である。

(2)について重要なのは, アプリケーションの接続で必要とされる具備条件(データ, 親和性)の把握である。アプリケーションの接続のための具

備条件については, 現在のみならず将来の各分野の技術動向も把握せねばならない。ワイヤフレーム, サーフェス, ソリッドを階層構造にしたものを基本幾何モデリングシステムとし, 各分野で必要な固有のデータは, 幾何モデリングモジュールを活用し作成していくこと(例えば機構設計解析)になるであろう。

3・6 モデル表示の改善 三次元的に構築されたモデルを平面的な CRT に表示するのではいかにも不合理である。やはり三次元としてそのまま表示できれば素晴らしい。またアニメーション機能の充実も重要である。以下シミュレーション結果の表示としてのアニメーションについて検討する。

そもそもシミュレーションソフトの大部分は, 動的現象の解明であり, シミュレーション結果をアニメーションとして表示するということは必然的なことであろう。更に人間の理解力を考えた時数字あるいはグラフを読んで理解するよりは, 絵(静止画)さらには絵が実際の現象と同様に動く(動画)のほうが理解しやすいという特徴があり, この点からもシミュレーション結果をアニメーションとして表すことは意味がある。

現在, この種の研究はアメリカ, ヨーロッパを中心として進められているが, 計算機によるアニメーション製作はまだ緒についたばかりで問題点も多い。特に実物らしくみえるモデルに対してはデータ作成量が膨大であり, 現在の計算機能力では多大の製作時間を要する。従って多額の製作費用がかかってしまうという難点がある。容易にアニメーション製作を行うためには, 計算機技術の発達とデータ処理技術の高度化が望まれる。

3・7 コンピュータ進歩への対応 コンピュータそのものについての議論は主題からはずれるが, 解析シミュレーションにとってコンピュータが非常に影響をもつので, 若干これにふれる。当然のことながら, 解析シミュレーションには, 構造解析や流体解析あるいはアニメーションにおける画像処理など計算処理時間が非常に大きいものが含まれる。現状では, 例えば比較的単純形状の三次元乱流解析で2, 3時間かかり, 流路形状を少し変えた時の流れの変化の様子をアニメーションとの組合せでリアルタイム的にみる, ということは不可能である。したがって, さらに高速演算が可能なコンピュータの出現が2章で述べた夢が

実現するために必要である。この分野での技術の進歩は著しくかなり期待してもよさそうに思える。

一方、現在のノイマン形のコンピュータに替わる新世代のコンピュータの開発も進められている。これが例えば、学習機能や推論機能を備えたものであれば、知識工学あるいは知識ベースの実現が可能になり、かなり狭く限定した問題の解析結果を集大成し、推論することによってコンピュータ自らがはん用的なシミュレーションソフトを組立てたり、また、実際の物での実験結果とシミュレーション結果とを比較していくうちに、高機能なシミュレーションソフトに変換させていくということも可能になるであろう。

4. 結 び

シミュレーション技術は、コンピュータの著しい発展に支えられており、将来を的確に予測することは難しい。ここで予測した方向とは異なった展開をすることも十分ありうるであろう。具体的な図の例示もなく概念的な説明に終始したが、今後の機械工学におけるシミュレーションに関する一つの指針とでもなれば幸いである。

(原稿受付 昭和58年8月30日)

文 献

- (1) 中村・ほか2名, 日立評論, 65-3 (昭 58), 49.
- (2) 吉川, 日経メカニカル, (昭 57-12-6), 54.

文部省・科学研究費交付先 (その 12)

(13 ページより)

▽電圧印加による表面損傷防止法=九大工, 山本雄二 (1100), ▽トンネルの通気計測機器の試作と通気抵抗の実測=福大工, 段野 勝 (1100), ▽高感度超小形圧力センサーを用いた揺動走査方式による三次元変動流の計測法=九大工, 生井武文 (2000), ▽熱後流による壁面せん断応力測定法の実用化=慶大理工, 有賀一郎 (2100), ▽多ファイバ型レーザ流速計の試作=関西大工, 大場謙吉 (600), ▽任意流体, 形状断面流路バーンアウト予測用コンピュータ・プログラムの開発=東大工, 甲藤好郎 (900), ▽気体燃料噴射高圧縮機関に関する研究=京大工, 池上 詢 (2100), ▽気流中の微粒子の速度, 粒径並びに濃度の非接触同時測定に関する開発研究=慶大理工, 前田昌信 (2500), ▽体感を発生できる運転模擬装置の開発=東大工, 吉本堅一 (400), ▽完全デジタル制御方式による高知能工業用ロボットの実現=阪大基礎工, 有本 卓 (2300), ▽自動制御機構を備えた人工心肺装置の試作=電機大, 福井康裕 (2300), ▽臨床用補助人工心臓の自動制御装置の開発=国立循環器病センター, 梅津光生 (800).

〔奨励研究〕

▽薄板の破壊じん性評価への破壊力学的研究 (モー

ドⅡ 負荷の場合)=電通大, 高松 徹 (900), ▽炭素鋼の腐食疲労強度に及ぼす溶存酸素および切欠きの影響=富山大工, 石原外美 (1100), ▽摩耗粉の密度分布測定による結晶性プラスチック材料の摩耗の研究=金沢大工, 山田良徳 (1100), ▽レーザ硬化処理現象の解析とレーザ照射条件の最適化に関する研究=阪大工, 大村悦二 (1000), ▽ハイブリッド複合材料積層板の最適積層順序に関する研究=金沢工大, 三木光範 (900), ▽き裂の電磁弾性解析と特異応力場に関する理論的研究=東北大工, 進藤裕英 (900), ▽原子炉圧力容器用鋼における延性き裂安定伝播の応用形コンピュータシミュレーション=東北大工, 坂 真澄 (900), ▽地熱エネルギー抽出のための地下人工多重き裂の挙動に関する熱弾性学的研究=秋田大鉱山, 渋谷 嗣 (900), ▽内部欠陥を有する材料の熱応力と強度に関する研究=埼玉大工, 内山豊美 (800), ▽影響関数法によるき裂成長解析に基づく原子炉機器等の寿命予測=東大教養, 相澤龍彦 (800), ▽確立微分方程式法による弾性論の展開=東大生研, 久田俊明 (900), ▽境界要素法による表面き裂の解析および表面き裂進展解析法の確立=東大生研, 結城良治 (1100).

(63 ページへつづく)

〔服部 敏夫〕