

# 特別寄稿 設計とCAE\*

Design and CAE

白鳥正樹

Masaki SHIRATORI

## 1. はじめに

有限要素法(Finite Element Method, FEM), 差分法(Finite Difference Method, FDM)および有限体積法(Finite Volume Method, FVM)等は, 基本的に連続体に対して記述された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近似し, 連立一次方程式の問題に書き換えて解く近似解法である。

これらの手法は1960年代半ばに我国に導入され, コンピュータ・ハードウェアの進歩と共に発展普及してきた。1980年代になるとアカデミックな立場からは計算力学と総称され, 大規模・高速計算を可能にして広く科学技術の発展に貢献すると共に, 産業応用分野ではプリ/ポストプロセッサと一体になった汎用解析コードの普及により, 総合的なCAE(Computer Aided Engineering)のツールとして活用されるようになった。

その活用のされ方を今少し詳細に眺めてみると, これらはいくまで冒頭に述べた“解析のツール”として使われているようである。すなわち, 企業のものづくり現場において, 従来の試作・実験にとって代わるコンピュータ・シミュレーションのツールとして使われており, これにより確かに試作・実験に伴う工数と費用を大幅に削減することに成功している。

しかし, 1990年代半ばから今日に至る新たなすう勢として, CAEを単なる解析のツールとしてではなく, “設計のツール”として使いこなしたいとのニーズが次第に高まっている。すなわち, 設計者が解析の専門家に依頼して結果が出るのを1ヶ月待つ代りに, デスクサイドのパソコン上で自分でハンドリングして, その日のうちにあるいは望むらくは1時間以内に結果を得て次の設計業務に進みたいとのニーズである。このニーズを満足するために解決されるべき課題は

- (1) CAD・CAE 統合化システムの開発
- (2) モデリング/評価技法の確立
- (3) 設計支援システムの開発

等が挙げられる。以下, 各項目ごとに現状と将来のあるべき姿について著者の私見を述べてみたい。

## 2. ものづくりにおける設計と解析

まず本論に入る前にものづくりにおける設計と解析の役割について今少し明確にしておきたい。Fig. 1は構造設計を例として, 設計と解析の違いおよび相互の関係を模式的に説明したものである。

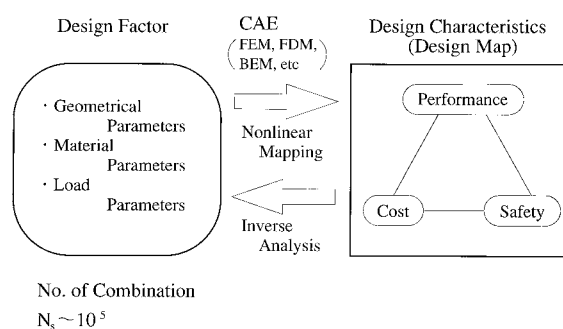


Fig. 1 Application of CAE to structural design

例として車の車体設計を念頭において述べれば, 計画段階で評価されるべき代表的な特性値 $Y_i$ は例えば性能, 安全性, コスト等であり, これらは互いにトレード・オフの関係にある。市場調査により次に開発されるべき車のコンセプトが定められると, これらの特性値の重みが決定され, 評価マップ上の目標点として示される。この段階で設計者に要求されることは, この目標を達成するために個々の設計変数 $X_j$ を定めることである。

一般に設計変数は形状, 材料, および負荷のパラメータ等からなり, これらの変数の組合せは無数にある。従って設計者は従来の経験と本人のセンスに基づいて適当に設計変数の初期値を定め, 試作・実験によって所定の目的が達せられたか否か, すなわち評価特性 $Y_i$ が目標値を満たしているか否かの検証を行う。一度で目標が達成されることはないので, また元に戻り設計変更を行い, このルーチンを何回か繰返す。多数回繰返すことは時間と費用に制約があるため, 結局数回の繰返して目標に近い点が達成された時点をもって設計の作業を終了する。

FEMに代表されるCAEのツールは費用と工数のか

\* 2000年10月20日原稿受理

かる試作と実験にとって代わる有力な方法として使われるようになった。すなわち、形状、材料、負荷等の設計変数 $X_i$ が適当に仮定されると、評価特性 $Y_i$ を求める問題は偏微分方程式の境界値問題あるいは初期値問題として記述することができ、この問題を解くのはCAEの最も得意とするところである。

一般に設計変数 $X_i$ と評価特性 $Y_i$ の間にはある関数関係 $Y_i = F_i(X_i)$ が成り立つ。そして例えば車の衝突問題等を考えればすぐわかるようにこの関係は高度の非線形性を有する場合が多い。現在開発され、市販されているFEMのソルバーはこのように高度な非線形性を持つ問題に対しても対応可能な能力を持つまでになっている。従ってこのようなCAEのツールは $X_i$ を与えて $Y_i$ を求める順解析のための有力なツールであると言える。

一方、本節のはじめに述べた設計の作業は、この反対であらかじめ評価特性 $Y_i$ を与えてこれに適合する $X_i$ を定める問題である。設計が一種の逆問題であると言われる所似である。CAEは順解析のツールであるため、これを用いて設計を行うためには、設計者自身の経験に基づいた繰返しの作業を要求される。できればより合理的な最適値探索の手法の導入が望まれる。

### 3. CAD・CAE 統合化システム

CAD(Computer Aided Design or Drawing)は設計者が自分の構想を図面に表現するためのツールである。CADとCAEはそれぞれが育ってきた土壌が異なるためお互いの相性は必ずしも良くない。従って現状では設計者が、あるひとつの構想を持って設計の初期パラメータを設定し、その構想の妥当性を検証する必要性に迫られた場合、その問題はCAEを業務とする解析部隊に引き渡される。

解析者はあらかじめ設計者がつくったCADデータを参照しながら、解析モデル(FEMモデル)の作成、解析および結果の信頼性の評価までを行って設計者にフィードバックする。設計者の意図を良く理解した解析のプロがこの作業を行えば、得られた解析結果の品質はある程度保証される。設計者はフィードバックされた解析結果を見ながら初期設計の妥当性の検証を行い、また必要に応じて設計変更を行って上記のルーチンを繰返す。おおむね上記のような使われ方が企業現場における現状であろうか。すなわち、現状ではCADをツールとして使いこなす設計者とCAEをツールとして使いこなす解析者の分業と協調により成り立っている。

解析のプロが適切なモデルを作成して解析を行い、結果の品質が保証されれば、これは確かに従来の試作・実験の繰返しに比べてはるかに工数と費用を削減でき、有効である。しかし、詳細解析が必要になるたびにその都度解析のプロに頼まねばならないということは、正確な意思の伝達が必要とされると共に、極めて時間がかかる面倒な作業である。設計の合理化を一層すすめるためには、解析モデルの作成から解析、そして結果の評価に至る一連の作業を解析のプロに依頼することなく、設計者が自ら実行できることが望ましい。

Fig. 2は次世代のCAD・CAE統合化システムの概念図を示す。

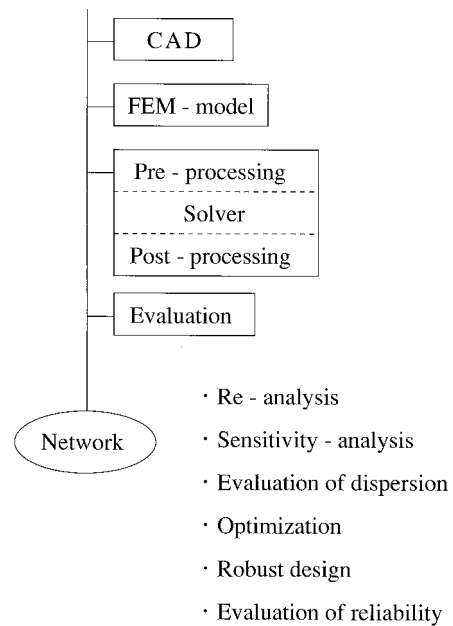


Fig. 2 CAD - CAE Integration system

本システムではCADとCAEがネットワーク上で結合され、データの標準化を行うことによってFEMモデル作成の環境が大幅に改善される。このようなコンセプトは以前から提唱され、部分的には既にその実現がはかられている。またCAEを業務とするソフトウェアベンダーがこの方向に向けて本格的に動き出しており、この問題は早晩解決されるように思われる。

従ってこの場合に問題になることは、いかに優れた解析モデラーが開発されようとも、これを使う一般の設計者が、適切なモデル化を行い、得られた結果の品質について評価できる能力を持っているか、あるいは設計者の能力に頼らなくても品質の保証された解析結

果を自動的に供給し得るか、という点である。この点については次節で議論する。

さて、ここで品質の保証された解析結果が得られたとしよう。この場合にも初期の設計変数の設定が悪ければ設計としては所期の目的は達成されない。従って設計変更を行って目標が達成されるまでこのルーチンを繰り返す必要がある。この段階で設計者が行う一般的なアプローチを分析すれば、Fig. 2に示すように再解析、感度解析、ばらつきの評価、最適化、ロバスト設計、あるいは信頼性評価等を挙げることができる。従ってこのような諸作業を単に設計者個人の経験とセンスに依拠することなく客観化を行い、一般的な手法として確立することが望まれる。この具体例について第5節で述べる。

#### 4. モデリング/評価技術

Fig. 3は著者が学生に講義する際に良く用いている図で、古典的な材料力学の手法に基づく強度設計の基本的なコンセプトおよび最近急速に発展してきた計算力学の果たす役割について説明したものである。

材料力学の方法では、実構造物を基本的なはり、軸、板、シェルなどの構造要素にモデル化し、モデル化された構造要素の応力解析を行って最大応力  $\sigma_{max}$  を求める。一方、実構造物に使用される材料からサンプリングを行って標準の材料試験の手順に従って引張り試験あるいは疲労試験等を行い、引張り強さ  $\sigma_B$ 、降伏応力  $\sigma_Y$ 、あるいは疲労限  $\sigma_w$  等の材料強度特性を求める。この強度特性を安全率  $F$  で割って許容応力  $\sigma_a$  とし、

$$\sigma_{max} \leq \sigma_a$$

を強度設計基準として、この式を満たす最適値として部材寸法が定められる。このとき、モデル化による不確かさおよび材料強度のばらつき等を考慮して経験的に安全率が定められている。この手法は既に多くの経験の積重ねにより成りたっており、手堅い設計手法と言えるが、複雑な実構造物を極めて単純な構造要素にモデル化するのに無理があり、いきおい安全率の大きい保守的な設計とならざるを得ない。

これに対して、FEM等の計算力学的手法を用いれば実構造物をそれ自身に極めて近い形でモデル化して解析することが可能で、応力解析の精度が格段に改善される。従ってその分だけ安全率を小さくすることができ、軽量化等より合理的な設計が可能となる。

しかし、ここで注意しなければならないのは、従来

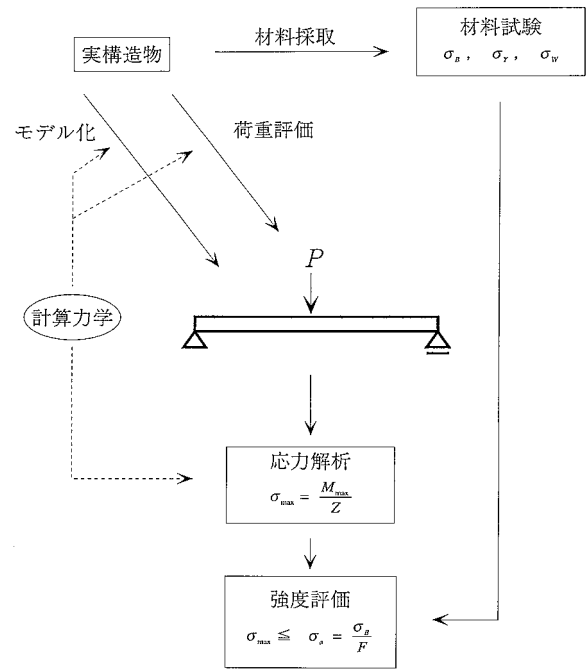


Fig. 3 Role of computational mechanics in the strength design

の材料力学的手法に基づくモデル化の技法は単純化しすぎるが故に保守的にすぎるとは言うものの、既に多くの経験に裏打ちされて、実績があるのに対して、計算力学的手法を用いる場合のモデル化の技法はまだその体系化が確立していない点である。

例えば、高压の圧力容器とその配管系の設計に対しては古典的な材料力学的手法による設計手順が規格化され、これに基づく設計はDesign by Ruleと呼ばれている。

より経済的合理性を求めて肉厚を薄くしたい場合にはFEM等の解析に基づく設計手法、Design by Analysisが認められている。しかしこの場合、解析の品質が保証されていることが条件となる。

現状ではこのモデル化の技法は設計者あるいは解析者個人の判断に委ねられており、これによる解析結果の品質のばらつきが、計算力学的手法を設計に利用する際の大きな混乱の原因になっている。

既に述べたように解析のプロがモデル化を行い、結果を評価すれば品質のばらつきは比較的少ない。しかし、今後予想されるように、一般の設計者が手軽にCAEのツールを利用するようになると、モデル化の技法をある程度標準化しておかないと、解析結果の品質を保証することは困難である。設計対象が極めて多様であることを考えると、このモデル化の技法を体系

化・標準化することは極めてむずかしい．今後に残された重要な課題である．

従って現状では，設計者自身の品質をあげること，すなわち教育の問題としてとらえることができよう．設計者には単にCAEの使い方を習得するのみでなく，経験とセンス(実験と理論的考察)に裏打ちされた，ものの挙動を正しく考察する判断力が要求される．

### 5. 設計支援システム

既に述べたように設計者はCAEのツールを使って順解析と設計変更を繰返し行うことにより，そこそこ満足できる解を見つけ出している．現状ではこの作業は，設計者の経験とセンスに委ねられており，従って設計の良否は設計者個人の資質に大きく依存する．最適化設計等より合理的な設計手法の導入が叫ばれている所である．

ところで従来，学会等で標榜されてきた最適化基準法，数理解析法あるいはGA( Generic Algorithm )，NN( Neural Network )等の先進的アルゴリズムに基づく最適化手法によれば，経験を積んだ設計者が手で作る作業より，はるかに多く(数千回ときには数万回の設計変更とそれに伴う解析の繰返しが必要となる．車体の衝突問題等を想定すればすぐわかるように1回の解析が重い場合にはこの作業は極めて重くなり，従って最適設計は理論的には可能でも現実的にはごく単純な問題を除けば不可能と考えられてきた．

しかし，最近はこの繰返し作業の中でその都度，重い構造解析を実行する代わりに，極めて軽い近似モデルで置き換える手法が相次いで開発され，最適化という作業がにわかに現実味を帯びて語られるようになってきた．この手法は一般に応答曲面法( Response Surface Method )と呼ばれているが，以下に著者らが開発したSDSSを例としてその概要を述べる．

近似モデルあるいは応答曲面と呼ばれるものは2節で述べた評価関数 $Y_i$ を設計変数 $X_j$ に関する高々2次の多項式程度の簡単な陽関数として近似したものである．問題は，例えば車の衝突のような複雑な現象を対象にして，いかにしてこのような簡単な関係を導くことができるかという点である．著者らはこの問題を解決するために実験計画法( Design of Experiment, DOE )と構造解析を組み合わせることを考えた．実験計画法は要因 $X_j$ の組合せに対してある作用(例えば車の衝突という作用)を及ぼした結果生じる特性(吸収エネルギー，減速特性，変形等)を $Y_i$ とした場合，無数にある $X_j$ の組合せの

うちで最も少ないサンプリングで $X_j$ と $Y_i$ の関係を求めるために確立された体系である．個々の $X_j$ の値には統計的なばらつきがあり，結果として生じる特性値 $Y_i$ にもばらつきが生じる．従って一般には $X_j$ と $Y_i$ の関係は決定論的な関数関係というよりは統計的性質を持った相関関係が成り立つと考えることができる．

著者らのアイデアは，上記サンプリングの作業として従来実行されていた実験の代わりにCAEのツールを利用した解析を実施することを考えたものである．従ってDOEとCAEを用いた解析の組合せにより，極めて少ない解析の繰返しにより $X_j$ と $Y_i$ の近似的な関係を求めることができる．著者らはこの一連の作業を影響度解析( Effectivity Analysis )と名づけた．その概要をFig. 4に示す．

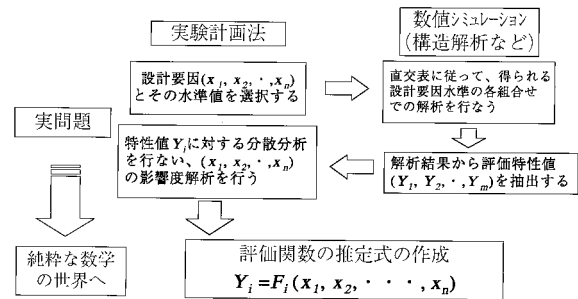


Fig. 4 Statistical design support system 1

この解析において重要な点は構造解析を実施するに際して市販のCAEのツールをそのまま利用できるという点である．また本手法は構造問題のみに限らず，流体，熱移動，磁場解析など解析のツールが存在する任意の問題に対して適用が可能である．影響度解析により，この簡単な近似モデルが構築されてしまえば，近似モデルによる計算は極めて軽いため，これを最適化の繰返しルーチンの中に組込めば以降の諸作業はすべてパソコン上で進めることができる．

ところで現場の設計者が日常行っている作業としては以下のような項目を挙げることができる．

- (1) 再解析：設計変数 $X_j$ の新たな組合せに対して評価特性 $Y_i$ を求める作業
- (2) 感度解析：設計変数の変化が評価特性にどのように影響を与えるか，すなわち $\frac{\partial Y_i}{\partial X_j}$ を求める作業
- (3) ばらつきの評価：設計変数 $X_j$ のばらつきにより評価特性 $Y_i$ はどの程度ばらつくかを特定する作

業

- (4) 最適設計：ある特性値に関する制約条件の下で目的関数を最大化または最小化する作業
- (5) ロバスト設計：制御できない設計変数のばらつきに対して評価特性の変動をある閾値の範囲に収めて、製品の品質を確保する作業。
- (6) 信頼性設計：設計変数のばらつきに対して評価特性の統計的性質を評価して設計時に製品の信頼性を予測する作業。

近年の学会等での議論では最適化ということばかりが一人歩きしているようであるが、現場の設計者にとっては上記の諸作業をパソコン上で手軽にできることが望ましい。設計者は目的に従って自分のやりたい作業を実行すれば良い。

影響度解析により近似モデルが作成され、それがパソコンにインストールされると、上記の諸作業は近似モデルで記述された空間の中で比較的簡単に実行することができる。著者らは影響度解析を含めて上記諸作業を総合的に実施するための手法を開発し、これを統計的設計支援システム(Statistical Design Support System, SDSS)と名付けた(Fig. 5参照)。

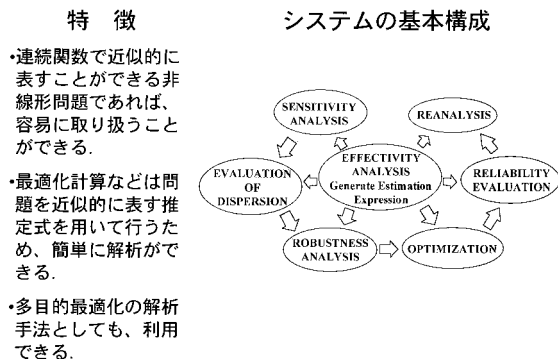


Fig. 5 Statistical design support system 2

その後の調査により応答曲面法をベースとした類似の手法が、米国をはじめとする世界の各地で開発されつつあることを知った。既に製品化して発売されているものもあり、競争的環境の中で数年ならずしてかなり完成度の高い総合的設計支援システムが実用に供されるようになると思われる。

6.まとめ

本稿の依頼を口頭で受けた際、私は巻頭言の1ページ程度のものと思い、気軽にお引き受けした。書面による正式の執筆依頼を受けて、これは特別寄稿という

かなり重い記事を書かねばならないことに気づき、困った困ったと思っているうちに締切日が近づき、やっとペンをとった。

本稿で私が伝えたいメッセージはCAEの役割が“解析のツールから設計のツールへ”移行しつつあるとの時代認識である。これは簡単に1ページでお伝えできる内容である。特別寄稿ということで中身を分析して内容を増やしたため、却ってまわりくどい文章になってしまった。また、設計実務の経験のない大学人が推定で分析しているため、ピント外れのこともあるかとも思う。御容赦いただければ幸いである。

既に述べたようにネットワークによるCAD・CAEシステムの統合化および総合的設計支援システムの開発等は既にそのコンセプトが明確になり、一部商品化されたソフト等も出ている段階であり、これらの部分は時ならずして使いやすい環境が整ってくるように思われる。

問題は4節で述べたモデリングおよび評価技術の確立である。これを体系化し、自動化するアプローチが見つからない現在、設計者の教育をどう行うかという点が重要なキーとなる。この点に関連して蛇足になるが最後に一言つけ加えておきたい。著者はこの1~2年の間、CAEのソフトウェアベンダーのユーザー会に招かれる機会を何回か得た。その際に気になったことは、ユーザーである企業の若い技術者諸氏が個々の設計におけるモデル化の技法までが、あたかもベンダーがやるべき仕事であるかのごとく勘違いしてまら投げしていることである。

この技術はものづくりの根幹にかかわる重要な技術であり、技術者が自ら開発し、保持すべきであると考える。この点についても技術者教育の一環として考えることができよう。



< 著 者 >



白鳥 正樹  
(しらとり まさき)

横浜国立大学 工学部 生産工学科  
教授

計算力学，破壊力学，材料強度学  
の研究に従事．最近は，経年配管  
の耐震裕度に関する研究のほか，  
エレクトロニクス実装における強  
度信頼性評価および統計的最適化  
手法に関する研究に取り組んでい  
る．