

vol. 2003-3

Mech D & A News

Mechanical Design & Analysis Co.

September 2003



アポロ 17 号 1972 年 12 月 7 日

【特集】 現代の CAE

— デスバレー構造とその克服 —

FEM Consulting Services for Engineering Practice
URL <http://www.mech-da.co.jp>

【1】産業構造の変化と非線形CAE

二度の世界大戦の後、約60年間の自由主義の蓄積を経て、現代の政治経済の勢力分野では著しい淘汰が進みつつある。高度技術を提供する能力が米国に集中する一方、製造面での価格競争力は中国に偏在し、日本国内の産業構造は、このような二極化の下で変化することを余儀なくされている。また一方では、インターネットを媒体として、情報の汎世界的な共有化が急速に広がっている。情報の共有化は産業構造の変化を促進すると同時に、得体の知れぬ強制力となって変化の方向性を束縛することに注意が必要である。

非線形CAEの動向は、これら経済情勢の変化に強く影響されている。Fig. 1は1991年と2003年における非線形CAEの適用産業別の分類を示す。有限要素法の利用に代表されるCAEは、航空宇宙、原子力といった高度な工業技術の分野で育成されてきた経緯を持っている。Fig. 1に示す1991年という年代は、このような高度技術が一時の花を咲かせてバブル期を迎え、また計算機技術の面からはグラフィックス機能を搭載したUNIX機が本格的に市場に参入してきた時期である。すなわち非線形CAEが研究段階から普及の段階に移行を始めた過渡期に相当する。この時期、鉄鋼に代表される基幹産業に非線形CAEの礎があったことをこの図は示している。

しかしこの10年来、基幹産業あるいは巨大技術と呼ばれる分野に対する需要は、社会的に飽和が見られるようになってきている。この結果、より短工期・低価格の製品分野に技術人口の重心が偏りつつあるのは避けがたい実情である。このような分野では、時間や費用あるいは民需の動向といった世俗的な制約が全てに先行する。非線形CAEの維持運用を、単に学術的な側面だけで支えてやるのが非常に難しい時代になってきた。

一方、これら民生用の製品群では、安全や環境といった課題が常に世間の耳目をそばだたせる性格を持っている。多くの異論があるだろうが、1基2000億円の原子力プラントの安全設計が多分に政策的な配慮の結果であるのに対して、1台200万円の自動車では、より直接的な視点から個々の人命の保全が求められる。例えばFig. 1の2003年における結果は、自動車の衝突や損傷に代表される極限領域の解析において、非線形CAEの需要が高いことを物語っている。

このような事情を踏まえ、今回は現代の非線形CAEが克服すべき課題について検討してみた。

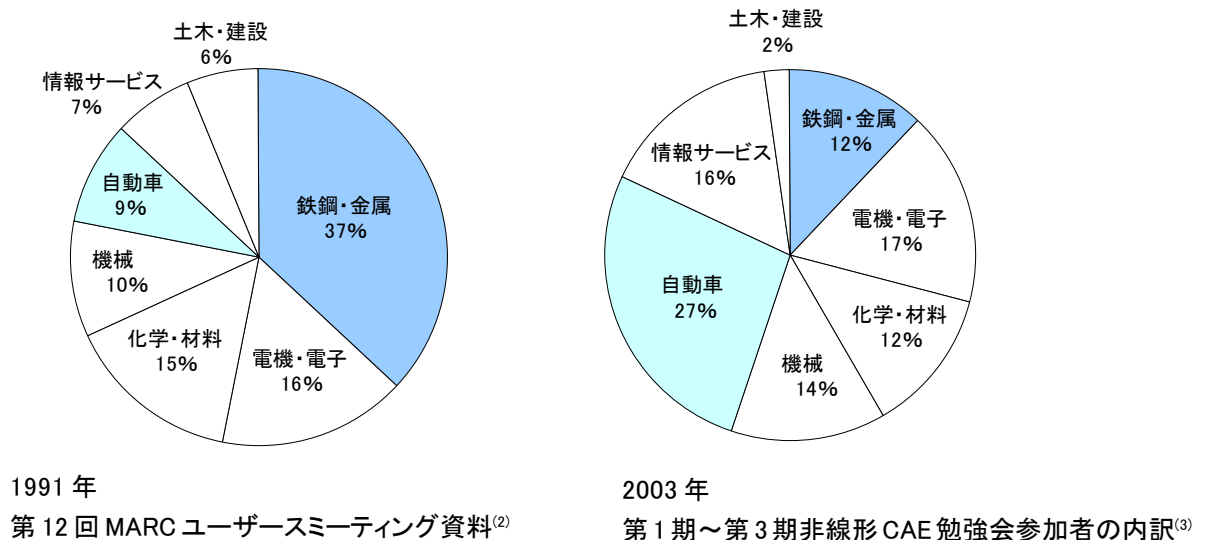


Fig. 1 非線形CAEの適用産業分野の変遷

【2】現代のCAE：低価格の壁

現代のCAEが抱える課題は、製品の低価格化と短納期化の2点に集約される。このうち低価格化の問題は、CAEが対象とする製品の価格の低下にあるだけでなく、より本質的な問題は、ハードウェアのダウンサイジングに伴ってCAE業務そのものの価値が矮小化しつつある点にある。すなわちPCに代表される極端な低価格製品の参入は、CAE業務の全体的な予算規模の圧縮をもたらし、人材の育成と維持を困難にしている。これは、CAEそのものの地位保全に関わる極めて重大な課題である。

企業の研究開発活動において、現在のCAEがどの程度の地位にいるか見てみよう。Fig. 2は経済産業省の白書から引用した国内製造業における研究開発費の動向を示す⁽⁴⁾。バブル期であった1990年以降、研究開発費は約10兆円の水準でほぼ一定となっている。国内の上場製造業は約2000社であるので、1社あたりの研究開発費は平均して約50億円となる。Fig. 2に示す

ように研究開発費が企業の売上高に対して占める割合は3.5%程度である。しかし白書の中では、バイオケミカル等の分野においてこの比率は約5%であるとしており、先端分野にある企業の研究開発費と売上高の比率としては、この5%という値が一応の目安と考えられる。

更に研究開発費の中に占めるCAEの割合はどの程度であろうか。Fig. 3は矢野経済研究所が公開している機械系のCAD/CAM/CAEソフトウェアの販売実績に関する調査結果である⁽⁵⁾。年間の販売総額は約1600億円でありほぼ横ばいであることがわかる。このうちCAEの占める割合は年間約120億円である。

先に示した上場製造業2000社でこれらの金額を除すと、1社あたりCAD/CAM/CAEに対しては8000万円を投資しているが、その内CAEに対する支出はわずかに600万円にしか過ぎないことがわかる。おそらくこの極めて低い金額は、企業のCAE従事者にとってそれほど意外な数字ではないはずである。

また以上の販売実績のうち、PC用のソフトウェアが占める金額は、CAD/CAM/CAEの総額で210億円という統計がある⁽⁶⁾。上記の全体額1600億円の13%程度であることから、この分野におけるPCの割合は決して大きくない。すなわち、一部のPC製品の低価格化に幻惑されて全体の予算規模を安易に縮小してしまうことは、非常に危険であることをこの数字は示唆している。

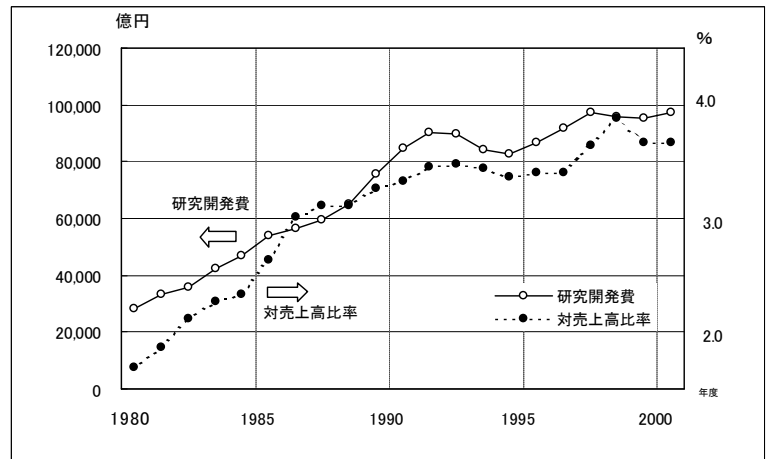
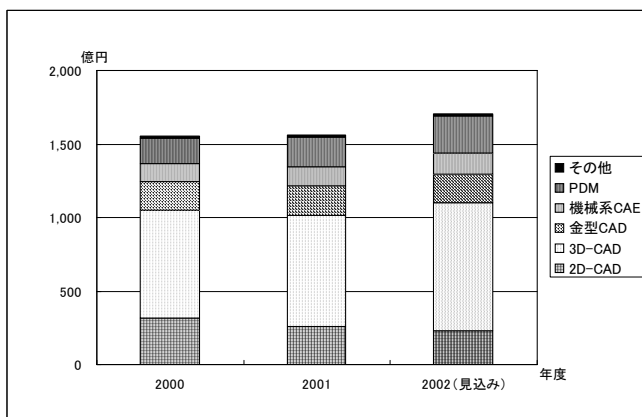


Fig. 2 国内の製造業における研究開発費の動向⁽⁴⁾

一方、これらのソフトウェアに関わる人件費はどの程度であろうか？ 例えば人材派遣業の大手であるメイテックは、国内の技術系のアウトソーシングの市場規模として、4250億円という推定値を計上している⁽⁷⁾。これはCAD/CAM/CAEの販売総額1600億円の2.5倍に相当する額である。人材派遣業の売上げからCAEの人件費を議論するのは乱暴ではあるが、実務の現場を考えたとき、1つのソフトウェアに2～3人が担当者として従事する図は現実に近い。

以上の統計から導かれる結果をFig. 4および以下にまとめて示す。再度言うが、1社あたりCAEに対する支出はわずかに年間600万円にしか過ぎない。橋梁や航空機など、CAE無しには設計が成立しない製品群があることを考えれば、CAEによってもたらされる益に比べてこの支出は不当に低い。しかし一方では、加速する製品開発に押されてCAEを導入したものの、技術的な裏づけのないままに推移し、放置されたりあるいは誤った運用結果ばかりをもたらししている例も少なくないはずである。これらの情勢の平均的な結果として、CAEに対する世評は非常に厳しいと認識すべきであろう。

- ・国内の上場製造業（2000社）の研究開発費は売上げの約5%、1社あたり平均約50億円である。
- ・国内の機械系CAD/CAM/CAEソフトウェアの販売総額は年間1600億円、内CAEの占める額は120億円である。1社あたりではそれぞれ8000万円、600万円に相当する。
- ・このうちPC用のソフトウェアが占める割合は13%程度にしかすぎない。
- ・ソフトウェアそのものの価格に比較して、従事者の人件費はその2～3倍、国内総額で年間約4000億円（1社あたり2億円）の規模である。



アプリケーション分野別	2000年度		2001年度		2002年度(見込)	
	金額	シート数	金額	シート数	金額	シート数
2D-CAD	31,785	95,030	26,068	102,448	22,732	103,670
3D-CAD	73,461	54,158	75,684	58,004	87,000	66,833
金型CAD	19,102	8,132	20,050	8,785	19,963	8,826
機械系CAE	12,445	1,385	12,735	1,850	14,420	2,970
その他	1,350	6,500	1,300	6,400	1,700	6,400
PDM	16,963	27,377	20,295	31,602	24,992	39,108
合計	155,106	192,582	156,133	209,089	170,738	227,807

金額単位: 100万円

Fig. 3 機械系CAD/CAM/CAEソフトウェアの国内販売実績⁽⁵⁾

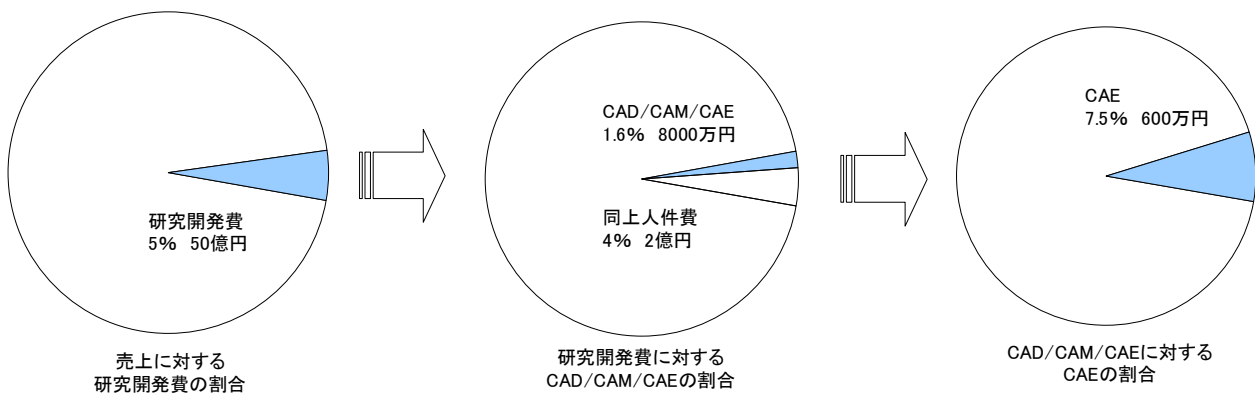


Fig. 4 上場製造業1社あたりのCAE予算の内訳

【3】現代のCAE：短納期の壁

非線形有限要素法による構造解析は、1970年代初頭に実用化されて以来、その歴史は既に30年を超える。最近の計算機の高速度化を得て、既存の解析手法としては成熟期に入ったと言って過言ではない。このような傾向は単にCAEにとどまらず、近年あらゆる技術分野に及び、最近の製品の低価格・短納期化はこのような成熟化の結果である。

棋士の羽生善治氏は、最近の記事の中で以下のようなことを述べている⁽⁸⁾。

私なんかは、将棋の中で知識や定式が重きをなしていくのは、あるプロセスを経てからという感覚ですが、今の若い人たちは最初から知識指向なんです。

嘘みたいな本当の話なんです、将棋会館の4階でよく公式戦をやります。そこで記録を取っている奨励会の子がいるんですけど、プロの棋士が対局を終えてその子に意見を聞くことがあるんです。つまりその奨励会の子がプロよりも深い研究をしていることがあるんです。

実際、ある特定の局面では、奨励会の子がプロよりエキスパートだということがあり得る。そういうことが別に不思議ではなくなっているんです。

知識の集積が高度に進んできた結果、特に短納期の技術分野では、知っているか知っていないかが一瞬の勝敗を定める時代となってきたと言える。最近の製造分野では、機械・電気・化学が複合的に折り重なったプロセスが少なくない。このようなプロセスを短納期でシミュレートすることがCAEに求められるのであれば、その職能は旧来の専門職の枠を超え、学際的な知識が要求される新しい職業分野とならざるを得ない。

このような需要から、例えば大学教育の科目編成では学科横断的なカリキュラムとCAEが組合されることも多いと思われる。しかし大学に限らず、限られた年限での応用的な教育には無理がある。本来、より基礎的な知識の習得が必須であるにもかかわらず、市場の状況がそれを許さない点に現代のCAEの本質的な問題がある。

【4】現代のCAE：デスバレー現象

Fig. 5は米国商務省が提唱しているデスバレーの概念である。この概念は日本語では死の谷と呼ばれ、三菱総合研究所のレポート^{(9), (10)}によって国内でも知られるようになったと言われている。図に示すように、デスバレーという表現は、基礎研究から実機製品に進化する過渡期において、企業が資金調達面での困難に陥りやすいことを示している。国内のCAEにこのデスバレーの概念をあてはめた場合、問題点は以下のように整理できる。

- ・製品の高度化と短納期化が極端に進み、CAE技術者の育成と確保が困難になっている。
- ・一方ではCAEの利便性が強調された結果、基礎工学に対する関心が減退し、この結果、解析の信頼性を保証する人材と手段が失われつつある。
- ・一部のPC製品の低価格化が急速に進んだ結果、ハードウェアのみならず、人件費を含めたCAE環境全体の予算規模が倏小化しつつある。
- ・以上の結果、CAEに対する期待と不信が背中合わせの状況に陥り、普及期に入ったものの人材・資金両面での投資に対する不安が顕在化している。

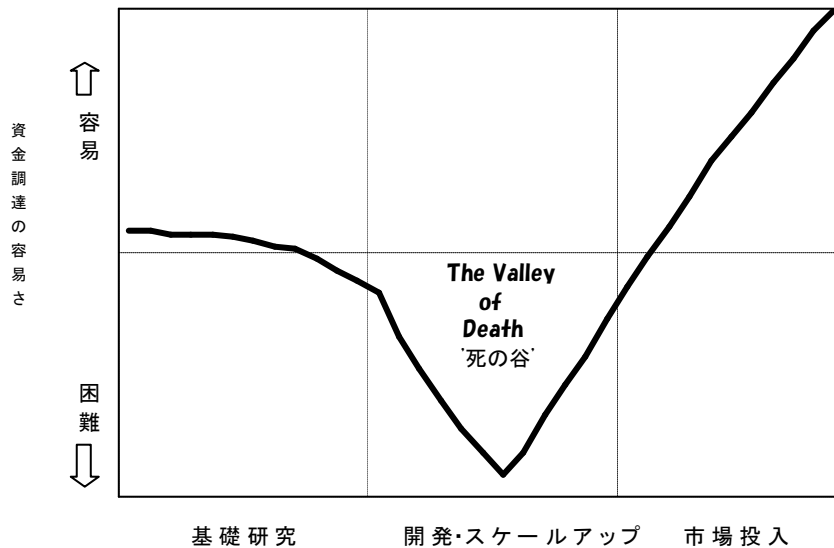
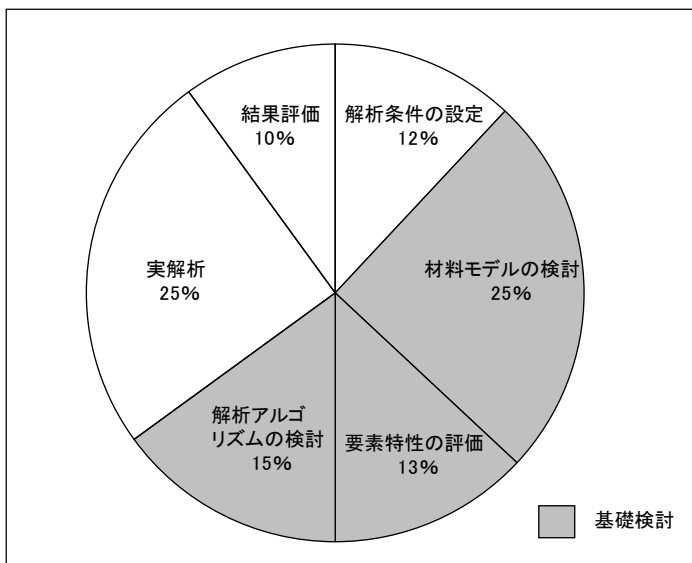


Fig. 5 研究開発におけるデスバレーの概念：米国商務省標準技術院 (NIST) 発表資料⁽⁹⁾

上に示したデスバレーの概念を念頭におき、弊社における解析業務の工数を分析してみた。Fig. 6は最近1～2年の間に実施された8案件、累計約2400時間の解析業務の分析結果である。いずれも要素数で1万程度の中規模な非線形構造解析の問題であるが、材料モデル、要素特性、解析アルゴリズムといった基礎検討の部分に50%を超える工数が必要とされ、実際の解析そのものの割合は25%にしか過ぎないことがわかる。

弊社では、約5000例の解析実績をデータライブラリとして保有し、その検索システムも電子化されている。またABAQUSを例にとれば、インストールされているデモデータは約8000件と言われている。このようなライブラリを背景にしたとしても、非線形の領域では個々の問題を一筋縄に扱うことは難しい。特に検証の手段が画一的でないことにその原因があると考えられる。



注. 以下に示す8案件、計2400時間の業務内容を分析した。

- ・自動車用複合材の衝撃損傷解析
- ・自動車用鋳造材の耐荷重解析
- ・自動車用ゴム材のシール性解析
- ・自動車用鍛造材の成形解析
- ・携帯電子機器の落下衝撃解析
- ・IC接合部の損傷解析
- ・建物用免震機構の解析
- ・土木用止水シールの経年履歴解析

Fig. 6 弊社における非線形構造解析業務の工数分析

【5】デスバレーの克服：CAEにおける検証の技術

対象となる技術の市場性が適切にアピールされ、外部からの認知が常に得られるのであれば、デスバレーといった問題は生じないだろう。その技術が既存の技術に近い実証可能なものであれば、投資家の理解は得やすいのである。特に実験的な技術の場合には、たとえ限られた条件下であったとしても定量的な実証を与えることができるため、外部からは認められやすい。

これに対して理論的な色彩の強い新技術が市場性を獲得することは容易ではない。例えばCAEの場合は、理論的な仮定に多くを頼るだけでなく、証拠能力に乏しい手作業の部分、例えばメッシュ分割や解析オプションの選択といった工程、を多く含む。そのため何らかの検証を伴わなければ、結果の正当性を主張するどころか、技術として認められることすら難しくなる。

大規模なCAE業務が日常化するに従って、その失敗の事例も多い。ありがちな失敗はいきなり複雑なメッシュの作成から入り、チェックや変更もできない状態に陥り、消費した工数のもつ重みに逆らえずそのまま直進し、成果の出ないまま2～3ヶ月を経過してしまうことである。オートメッシュに対する期待、大規模CAEに対する自負といったメンタルな面での過剰な思い入れが、この種の失策を招きがちである。この結果、CAE部門そのものの存続まで危うくした例はあまりにも多い。すなわちCAEにおけるデスパレーの克服は、一重に検証手段の向上にかかっている。ここでは参考文献(1)を参照し、CAEの検証技術をとりにまとめてみた。

◆検証ステップ0：解析業務の前に

設計業務にCAEを適用するとき、その意義は技術面と運用面の2つに大別できる。まず技術面での最大の課題は当然のことながら精度である。今日の有限要素法は数学的に精緻であるので、理論解との比較であれば2%以内の精度が目安となる。非線形問題では制約条件も多くなるが、対象となる問題を小間切れに分類整理し、既存の理論的知見に頼れば、この2%という精度水準を確保することは可能である。単純な問題であれば、1%以内の精度で厳密解に一致しなければならない。

また、実製品で得られる挙動が対象である場合にも、10%を上回るような誤差がある場合には、熟練した設計者の経験と度胸の前には負ける可能性が高い。実験事実の支配要因を把握し結果を予測する能力が、解析の精度を向上させるポイントである。現象が不明であるからとりあえず解析してみるという姿勢は厳に戒めなければならない。予測能力は解析者のみに存在し、ソフトウェアにはないことを認識することが必要である。

一方CAEの運用面では、経営的な価値を理解することが重要である。在来設計との折合いをつけるとともに過去のノウハウを伝承すること、解析業務の賃率を明らかにしコスト面での周囲の理解を得ることが大切であるのは言うまでもない。

なお、解析技術者の技量が最も問われるのは事故対策の場面である。技術面、経営面の双方に対して、CAEの着陸地点を見出さなければならないからである。

本来、事故対策の場面では、解析を行うことなく、説得力のある形で現象を説明する能力が求められている。すなわち解析技術者の本領は、現象の本質を見ることであって、解析そのものを実行することではない。

◆検証ステップ1：本質量に着目した検証

解析結果には、必ずあいまいさがつきまとう。従って、そのあいまいさをいかに排除できるかが検証の成否を定める。そのためには、解析作業のプロセスで現れる諸量の中で最も本質的な量に注目して検証することがポイントである。

例えばFig. 7は構造物の剛性が材料と形状によって定まることを示している。言うまでもなく材料と形状(すなわち剛性)は図面から得られる。設計・解析・製造・検査という異なった職種間の意思疎通を考えた場合、その共通言語は図面でしかあり得ない。すなわち「剛性」が共通の本質量ということになる。

Fig. 8はハンマリングによる振動応答を例にした図である。一般に解析結果としては出力(応答波形)の精度を追いがちであるが、本質量である剛性、この場合には伝達関数の表現精度、を追うことが確実な近道であることをこの図は示している。

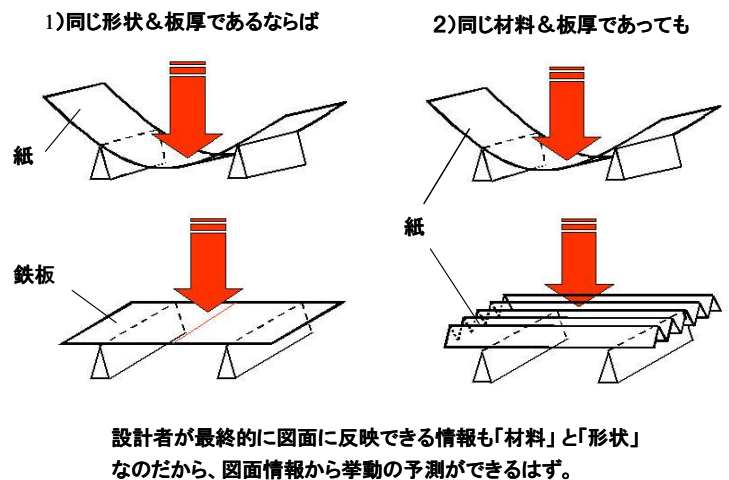


Fig. 7 構造物の剛性は材料と形状で決まる⁽¹⁾

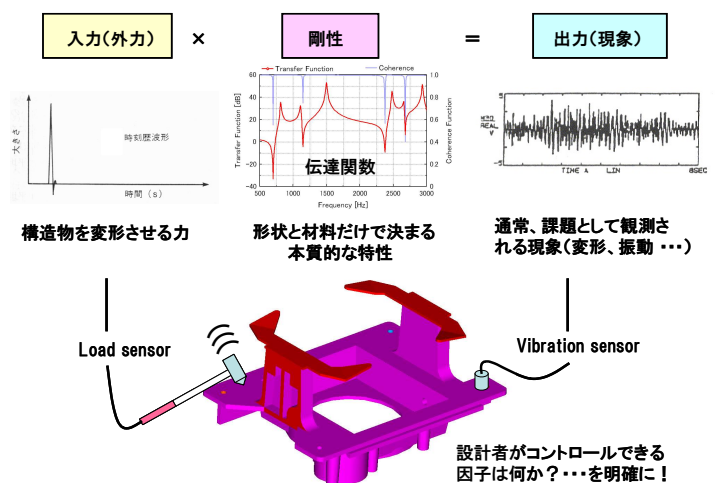


Fig. 8 現象そのものを再現するのではなく、本質量で検証する⁽¹⁾

◆検証ステップ2：解析者独自のアイデアによる検証

精度的なあいまいさ以外にも、検証の手続きを阻害する要因には多くのものがある。例えば社内の品質保証規定に沿った試験であっても、背景にあったノウハウが欠落して形骸化している場合には誤った運用がまかり通ってしまうことがある。

同様にJISに従った試験であっても、CAEとの比較には適さないものが少なくない。また購入品管理が徹底していれば、実験を自前で行うことも許されず、外注先からは血の通わないデータしか入手できないのが通常である。

一方、理論解が比較の対象であったとしても、便覧のミスタイプや単位系の誤りのおそれは高い。いずれの場合においても、検証用のデータは必ずウラを取ることが大切である。例えば材料定数は便覧などと比較してオーダの妥当性を確認すること、公式の類は2つ以上の出典に当たること、といった手順は最低限の安全保障である。

また実験や解析においては派生的な物理量からクロスチェックすることが望ましい。例えばFig. 9は先ほどのハンマリングの試験を例にとり、コヒーレンス関数を用いて相関性をチェックした結果である。

コヒーレンス関数は0から1までの値をとり、1に近いほど入力と応答の相関度が高い。すなわち線形応答に近いことを示している。試験体の振動絶縁が不十分であるような場合には、図中(a)に示すようにコヒーレンス関数は小さな値を示し、信頼性が低いと判断することができる。

またFig. 10はヒルベルト変換を用いて応答の非線形性をチェックした例である。試験体内部にガタがあるような場合には計測された伝達関数とヒルベルト変換後の伝達関数は一致せず、応答が非線形であると判断される。この例では各部分の取り付け状況を見直してびびり振動を低減し、目的に沿った測定が可能となるようにした結果を示している。

◆検証ステップ3：説得力のある検証

最近グラフィックスによるモデル作成手段が向上してきたため、メッシュや解析オプションの構成を意識せずに解析作業を進めることが可能である。しかし検証という観点から見れば、グラフィックスの中に埋没してしまったデータは手の施しようがない。

例えば3D-CADのデータを使ったモデルは見た目のインパクトはあるものの、物理的な説得力には欠ける。たとえ実現象との差異が10%以下であろうと、もし単一の解析結果しか示さないのであれば、それがまぐれであるのかベスト・プラクティスであるのかは判断がつかないのが当然である。

このような場合は、最終的なモデルに至る前の過程で簡易な工学モデルを積み上げ、その延長線上で最終モデルの妥当性を説明することが必要である。またその過程を逆に下り降りて、普遍性のある一般論、あるいは設計指針などを別に再構築できることが重要とすることもできる。

なお、これは弊社の一存であるが、グラフィックス形式のデータでは異種ソフト間の変換もままならない。たとえ一時的にそれが可能であったとしても、長い期間の維持は難しい。この10年の趨勢を見ても明らかのように、ソフトウェア業界には激しい浮沈がある。解析データをテキスト形式で作成・維持し、ソフトウェアの改廃にも耐えられるような対策を講ずることが必要である。

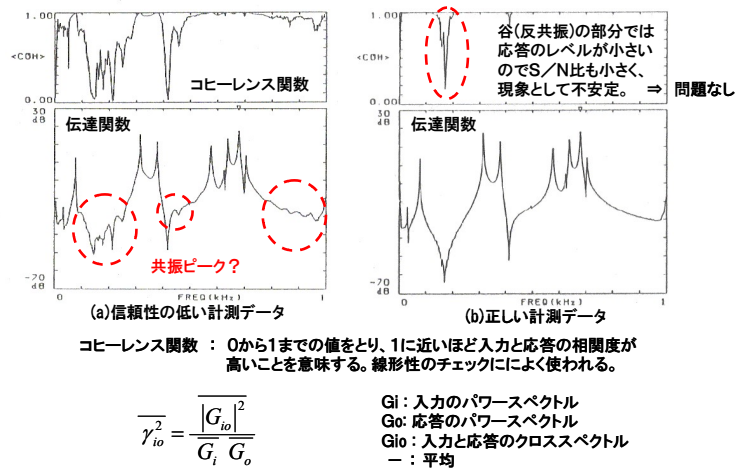


Fig. 9 コヒーレンス関数を使った相関性のチェック⁽¹⁾

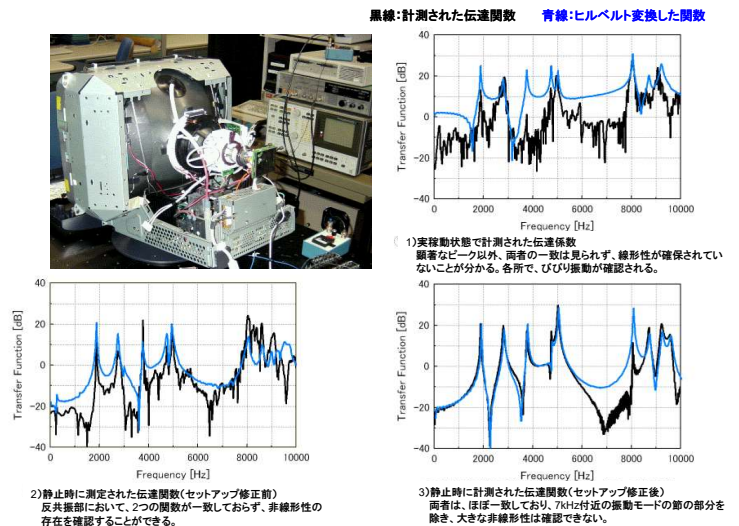


Fig. 10 ヒルベルト変換を使った非線形性のチェック⁽¹⁾

◆検証ステップ4：検証技術の伝承

成熟の時代にあっても知っているか否かが一瞬の勝敗を分けると先に述べた。そのためには単に解析技術を蓄積・分類するだけでなくノウハウまで含めた情報が欠落なく伝承され、ひいては部内で解析技術者が再生産できることが重要である。

そのためには、まず報告書と共に解析の入力データが保存されていなければならない。保存形式としてテキスト形式が望ましいのは先に示した通りである。このとき入力データの上に、実行時のソフトウェアのバージョン名と、ポイントとなる説明がコメント文の形で残されていれば、データの再生能力が高まり長期間の保存に耐える。また特殊なポスト処理が施されている場合には、使用したExcelファイルも同時に保存されているべきである。更に報告書として定量的な結果と考察が残されていれば、あとで第三者がその解析を完全に再現することができる。

また報告書とデータ類は電子ファイルと紙の形式で二重持ちにすることが望ましい。紙の形式は敬遠されるかもしれないが、ランダムアクセスが可能である有利さは何にも替え難い。また常に他人の目に触れる可能性が高いので、伝承資料としての緊張感を維持しやすい。その点、Excelファイルのようなデータは個人の資産の中に埋没しがちであるので、それが失われたとしても致命的な損害とならないような配慮が日頃必要であろう。

◆検証ステップ5：経営品質の向上

CAEによる解析業務を経営品質の向上につなげるという考え方は、CAEに対する適切な投資を得る上で重要である。例えばソニー殿ではSix Sigma手法による管理がR&D部門を含めて展開されているが、その具体的な方法論については企業それぞれの置かれた環境によると考えられるので、ここでは参考文献(1)および(11)を紹介するのにとどめたい。

CAD/CAMが図面を媒介にして、製造側すなわち会社経営側と意思疎通できるのに対して、CAEは社内で孤立しやすい。技術出身の役員の後押しでもない限り、経営側からCAEに手を差しのべるのは無理である。構造解析のエンジニアがきらきら光っていた時代は懐かしい。しかしCAEに対する投資状況が切迫している現在、経営側との唯一の共通言語として金銭価値を考えなければ、現代のCAEは立ちゆかないという現実を再度認識して、この稿を終えたい。

謝辞

本稿の内容は、特定非営利活動法人・非線形CAE協会（理事長：菊池昇 ミシガン大学教授）の講師陣および参加諸氏からの示唆に多くを頼っている。特にCAEの検証に関する具体的な方法論は、ソニー株式会社・井戸浩登氏の講義録から大半を引用させて頂いた。日頃の御支援に厚く御礼を申し上げる。

参考文献

- (1) 井戸，小林，解析結果のベンチマーク，第4期非線形CAE勉強会テキスト，特定非営利活動法人・非線形CAE協会，2003。
(<http://www.jancae.org/>)
- (2) 第12回MARCユーザズミーティング資料，日本マーク株式会社，1992。
- (3) 三原，小林，陰解法と要素，第4期非線形CAE勉強会テキスト，特定非営利活動法人・非線形CAE協会，2003。
(<http://www.jancae.org/>)
- (4) 平成13年度 製造基盤白書，経済産業省，2001。(<http://www.meti.go.jp/report/data/g20611d01j.html>)
- (5) 2002年版 CAD/CAM/CAEシステム市場の中期展望，株式会社矢野経済研究所，2002。
(http://www.yzbiztech.com/dm/2002_08_cad_cam_cae_dm.pdf)
- (6) 平成13年度 パソコンソフトウェアの市場動向調査報告書，社団法人日本パーソナルコンピュータソフトウェア協会，2001。
(http://www.jpasa.or.jp/publish/h14/h13_market.pdf)
- (7) 株式会社メイテックによる推定値，2001。(http://www.meitec.co.jp/japanese/kabunushi/shiryo/030326_03.PDF)
- (8) 羽生善治・才能とは情熱の継続，日経ビジネス，2003年7月7日号，p.102，2003。
- (9) デスバレー現象と産業再生，株式会社三菱総合研究所，2003。(<http://www.mri.co.jp/PRESS/2003/pr03012300.html>)
- (10) 死の谷を越え新たな産業創出へ，株式会社三菱総合研究所，2003。
(http://www.mri.co.jp/REPORT/NEXTING/2003/20030100_pec01.html)
- (11) 倉田，ソニーR&D領域へのシックスシグマ導入と展開，計算工学，9-1，日本計算工学会，2004年2月発行予定。

表紙：1972年12月7日，アポロ17号からの撮影，米航空宇宙局（NASA）提供，REUTERS。

