

# 機械系CAEシステムの開発

## Development of CAE System for Mechanical Engineering

大西 紘夫\* Hiroo Oonishi  
 中沢 優\*\* Masaru Nakazawa  
 田中 秀樹\* Hideki Tanaka

CAEの適用範囲のうち、CAD/CAMの分野に関しては種々のシステムが実用化されているが、CADの上流の解析シミュレーション支援技術に関しては、まだ実用システムは現れていないというのが実情であろう。本稿では、日立製作所の機械系CAEシステムの構想を示し、要素技術として解決すべき課題と、課題に対する対応策の試みについて述べる。

CAEシステムの中核である形状モデリングシステムでは使い勝手が最も重要であるが、本システムでは3次元モデルの生成、有限要素メッシュの生成で省力化を図った。また、はん(汎)用CAEシステムをベースに設計対象機器を絞った専用CAEシステムを構築することによって、CAEシステムをいっそう使いやすいものにするを目標としている。

### 1 緒言

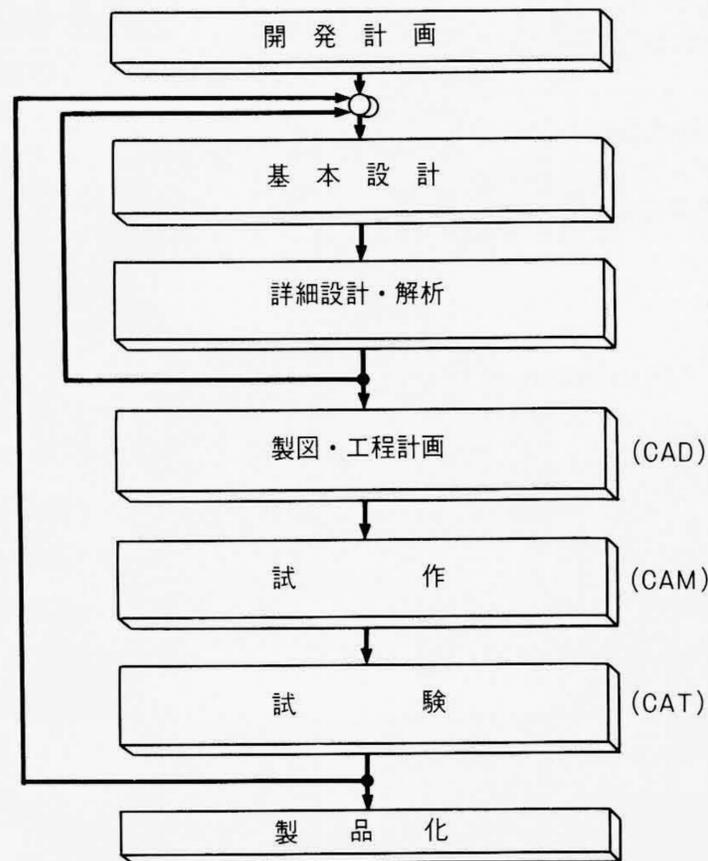
本特集の標題であるCAD/CAM/CAE(Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing/Computer Aided Engineering)のうち、CAMは比較的性格がはっきりしているが、CADとCAEの違いについては一般にあまり明確な定義がない。ここでは、CADを製図システムと定義づける。すなわち、CADは設計対象物の形状寸法が決定した後に図面を作るためのシステムと考える。これに対してCAEは、CADの上流に位置する計画、解析シミュレーション、形状設計を支援するシステムとCAD/CAMを総称したものである。最近、CIM(Computer Integrated Manufacturing)という言葉が一般化されてきているが、これはCAEのうち、特に下流の製造工程の計画などをコンピュータ化することを目指したシステムである。

CAEシステムを中心課題は、設計者によって仮定された製品形状が仕様を満足する性能を持ち、信頼性が十分であるか否か、また、加工性、組立性かどうかというチェックを解析シミュレーション技術を駆使して事前に行うことにある。そこで、CAEイコール解析シミュレーションという非常に狭い見方もある。しかし、CAEの本来の目的は製品の計画から設計製造までのすべてを一貫して処理することであり、これによってバランスのとれた合理的な製品が開発できると考えている。

本稿では、上述のような概念に基づいて日立製作所の構築している機械系CAEシステムの構想を、既に開発を終えて日立製作所内で実用化している実例を交えながら紹介する。

### 2 機械系CAEシステムの概要

機械製品の開発は、図1に示すような流れに従って行われる。従来は、解析シミュレーション技術が不十分であったた



注：略語説明 CAD(Computer Aided Design)  
 CAM(Computer Aided Manufacturing)  
 CAT(Computer Aided Testing)

図1 製品開発の流れ 機械製品は設計段階、試作段階での何回かの試行錯誤のあと製品化される。

め、実際に試作品(ハード)を作って試験を行わないと、製品の性能や信頼性の確認ができなかった。したがって、同図での外側のループの試行錯誤を行わざるを得なかった。

しかし、最近のコンピュータ技術や解析シミュレーション技術の進歩は著しく、わざわざハードを作らなくても、コン

\* 日立製作所機械研究所 \*\* 日立製作所大森ソフトウェア工場

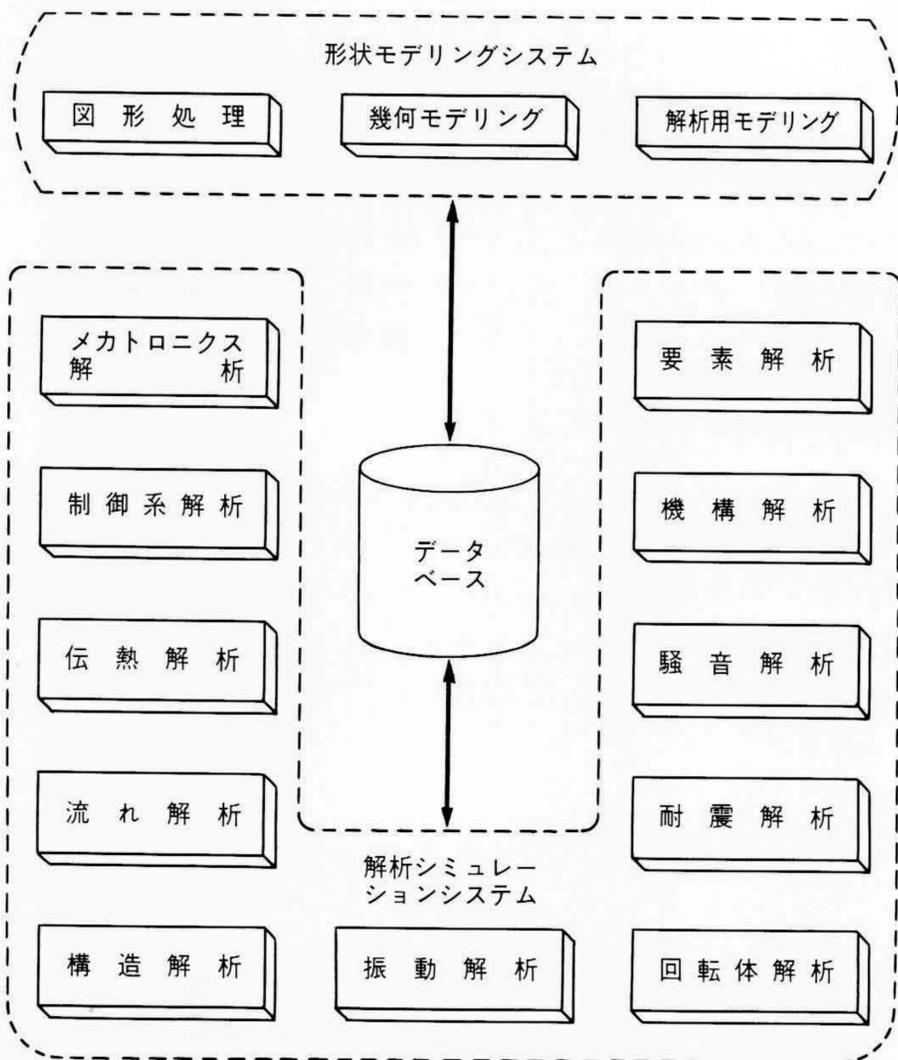


図2 機械系CAEシステムの構成 機械の形状を入力する形状モデリングシステムと性能、信頼性などの解析シミュレーションシステムとをつなぎ、解析の効率化を図っている。

各種の解析シミュレーションを行うためのプログラム群と形状入力を行うための形状モデリングシステムを、データベースを介して結合したものである。

通常、設計者は機械装置の設計に当たって、まず形状を仮定し、この形状に対して性能解析や強度解析を行う。そこで、このシステムでは、まず形状モデリングシステムで形状を定義し、このデータをデータベースに蓄積する。解析プログラムの起動に当たっては、形状データをそのプログラムの入力フォーマットに合わせてデータベースから取り出すとともに、その解析特有の属性データを入力する。あらかじめ解析された結果を次の解析で用いる複合解析に当たっては、データベースを介して必要なデータを転送する。このようなシステムを用いると、設計者は解析プログラムごとに形状データを入力し直す手間が省け、入力ミスも少なくなる。また、ある解析の結果、仮定した形状が仕様を満足しないことが分かったときには、元の形状データを修正するだけで、他の解析をやり直すことができ、多様な要求仕様を持つ設計対象にも適している。

さて、図2のようなシステムを構築し実用化していくためには、解決すべき種々の課題がある。その主なものを挙げると次のようになる。

- (1) 使い勝手のよい形状モデリングシステムの開発
- (2) 多様な分野にわたる高精度解析プログラムの開発
- (3) はん用システムを使いやすくするための工夫

これらの課題に対する対応を、以下にそれぞれ章を改めて述べる。

### 3 形状モデリングシステム

CAEシステム用形状モデリングシステムの目的は、解析プログラムの入力データを作成することである。構造・振動、熱・流体、音響などの分野の高精度はん用解析プログラムは、ほとんど有限要素法、境界要素法、差分法など対象形状のメッシュ分割を必要とする解法を用いている。したがって、形状モデリングシステムの課題は、いかにたやすくメッシュデータを作成するかということになる。

コンピュータ内に作られたソフトモデルを対象としたシミュレーションによって十分性能や信頼性の予測ができるようになり、同図の内側のループの試行錯誤だけで、製品の仕様を煮詰められるという可能性が出てきた。このように、解析シミュレーション技術を駆使して十分な検討を実施し、試作品を作るのは確認のための1回だけにするとというのがCAEシステムの目標である。

さて、上述のような目標を実現するためのCAEシステムとして、図2に示すような構成のものを考えた<sup>1),2)</sup>。すなわち、

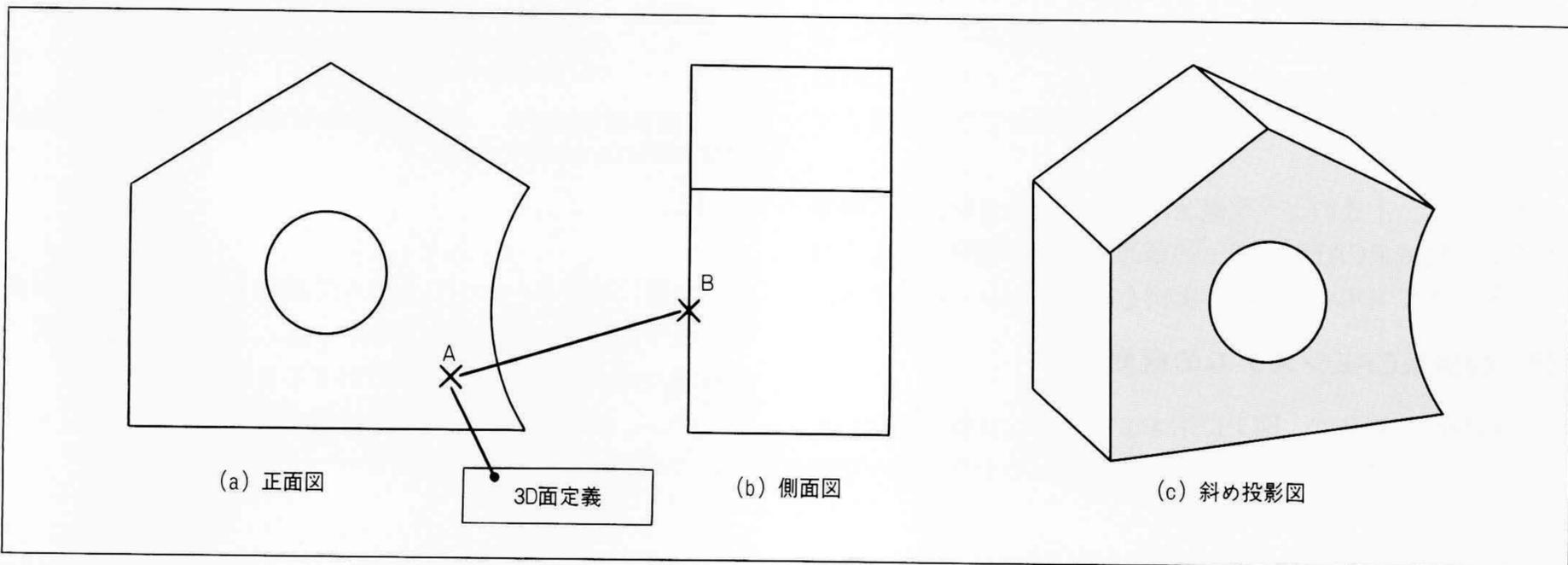


図3 面の3次元化操作 正面図のA点と側面図のB点を指示するだけで、穴の含まれた面が3次元化される。

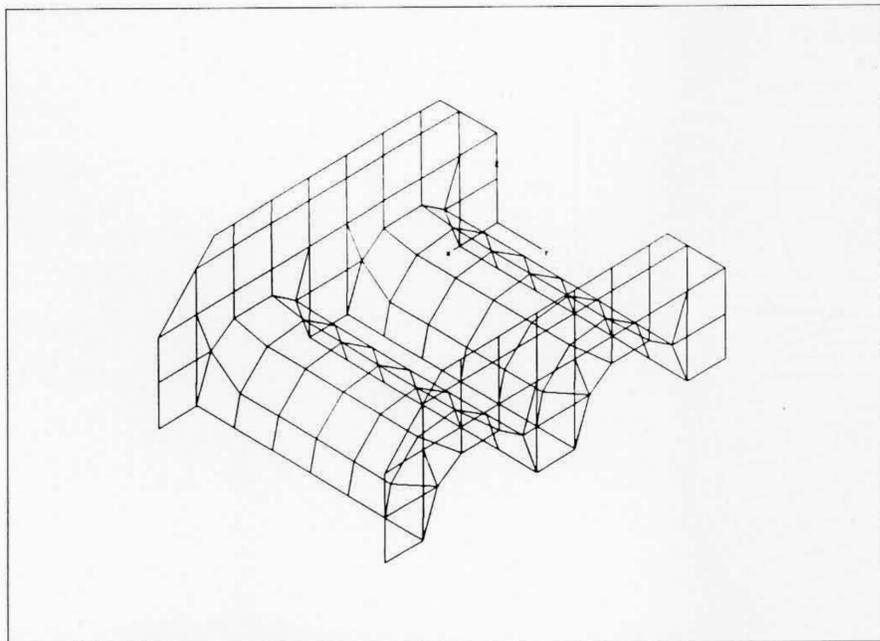


図4 有限要素メッシュの自動生成 三角と四角の混在メッシュによって、境界線の凹凸を忠実に表し、面と面の結合線上でも整合性のとれた有限要素メッシュが得られる。

このシステムでは、形状モデリングシステムは、図2に示したように、図形処理、幾何モデリング及び解析モデリングのサブシステムから成っている。機械の形状は機械製図法にのっとり三角法の図面で与える。図面を作成するために用いるのが図形処理システムである。CAEで用いる図形処理システムは、通常のCADシステムと同様の作図機能を持っているが、粗さや公差の表示、注釈の記入などの機能は持っていない。

図面ができると、次に、幾何モデリングシステム<sup>3)~6)</sup>を用いて対象物の3次元形状を定義する。このシステムでは面ごとに形状を作成していく。例えば、図3(c)で網目が施された面を作成するには、「3D面定義」のファンクションキーを押し、正面図(a)のA点をピックし、側面図(b)のB点をピックすればよい。すなわち、この操作によりコンピュータはAで示された図形(穴も含む)をBで示された線上に投影する。Bが円弧であれば、Aは円筒上に投影される。また、これとは別に、既に定義された二つの面の縁と縁の間に面を張る機能もあるので、これらを使えばかなり効率的に3次元形状が定義できる。また、この幾何モデリングシステムでは矢視図や断面図、詳細図などからも形状を定義できるので、かなり複雑な構造物も取り扱うことが可能である。

次に、解析モデリングシステムでは、幾何モデリングシステムで作られた形状データを有限要素、境界要素などにメッシュ分割する。このシステムでは、ユーザーがメッシュの粗さ寸法を入力するだけで、定義済みの幾何モデル全体にメッシュ分割が施される。図4はこのシステムで作成されたシェル構造物のメッシュの例である。メッシュは境界線の凹凸を忠実に表さねばならず、面と面との結合線上では両方の面のメッシュ点が一致しなければならないが、三角形と四角形の混合メッシュを用いることにより、このような条件を満足するメッシュが得られている。なお、ここで得られるメッシュは一様メッシュであるが、解析の都合上部分的に細かいメッシュが必要な場合は、その範囲を指定すると自動的にメッシュ

を細分する機能も備えている。

中実体(ソリッド)要素のメッシュ分割は、特に熱・流体解析、音響解析など空間を対象とする分野で重要である。この場合はBody Fit法<sup>7)</sup>を用いた手法が有用であり、境界近傍でのメッシュ粗さを調整する機能なども持たせられるので良好なメッシュが得られる。図5は2次元領域に対するBody Fit法応用の例である。

#### 4 解析シミュレーション技術

機械系の設計で必要となる主な解析シミュレーション技術は先の図2に示したが、これらの技術一つ一つが非常に多様な広がりを持っている。例えば、構造解析では手法としては有限要素法や境界要素法が用いられ、解析対象としては通常の弾性解析のほか、弾塑性解析、大変形解析(図6)、座屈解

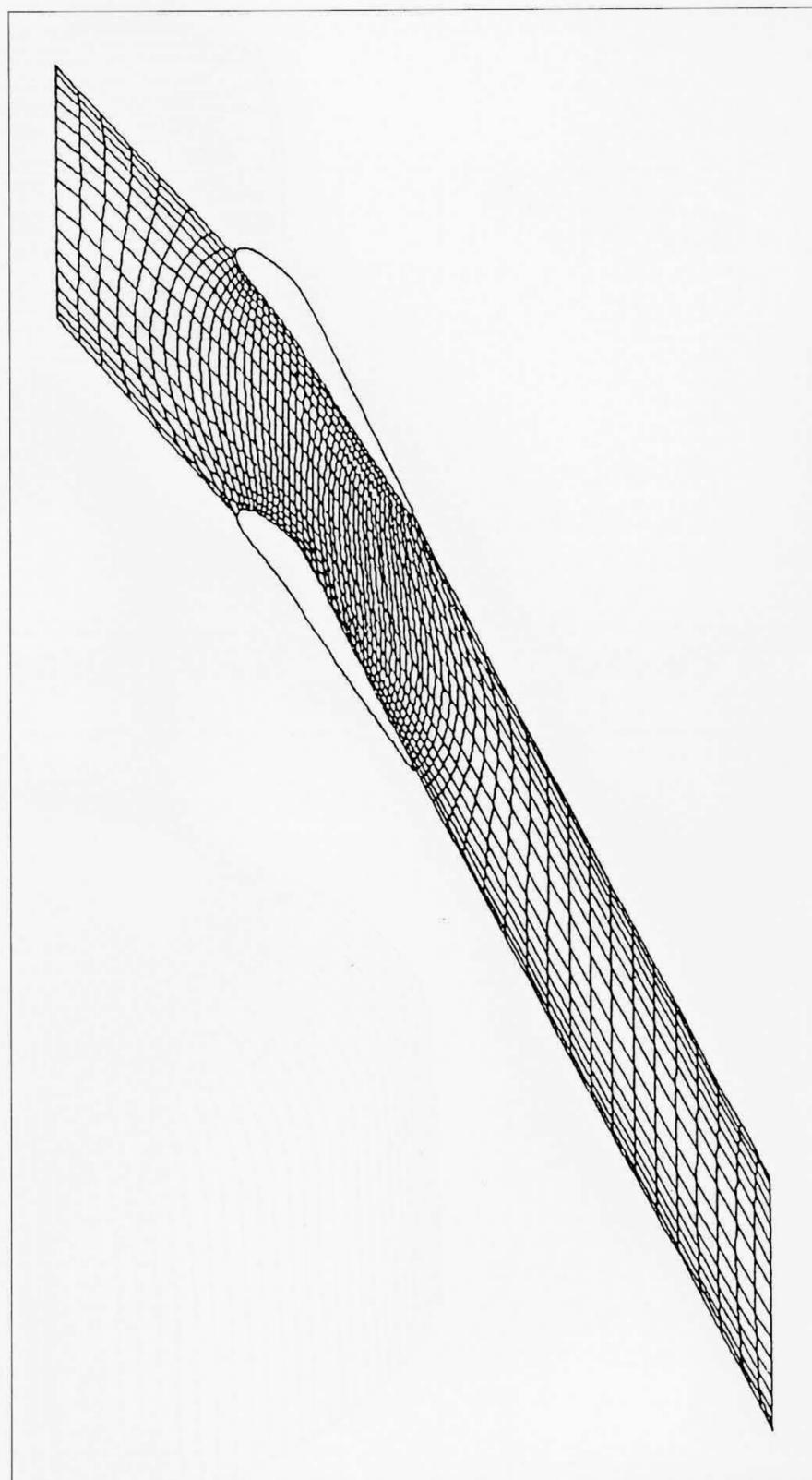


図5 Body Fit法によるメッシュ生成 翼と翼の間の流路をメッシュ分割した例で、翼に近い部分を細かくするようにコントロールされたメッシュが生成されている。

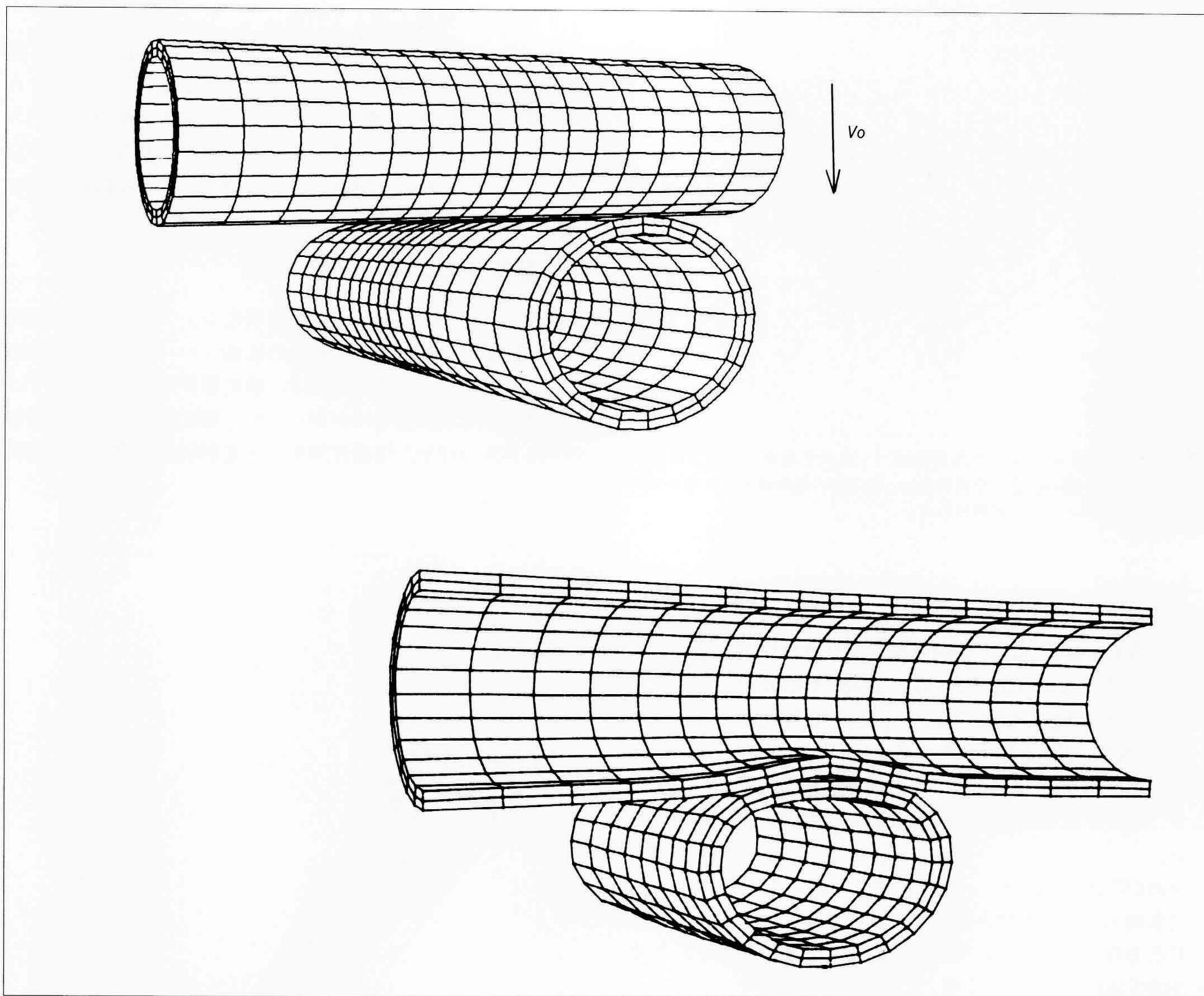


図6 配管どうしの衝突解析 2本の配管が衝突したあとの変形を、弾塑性解析によって求めた。

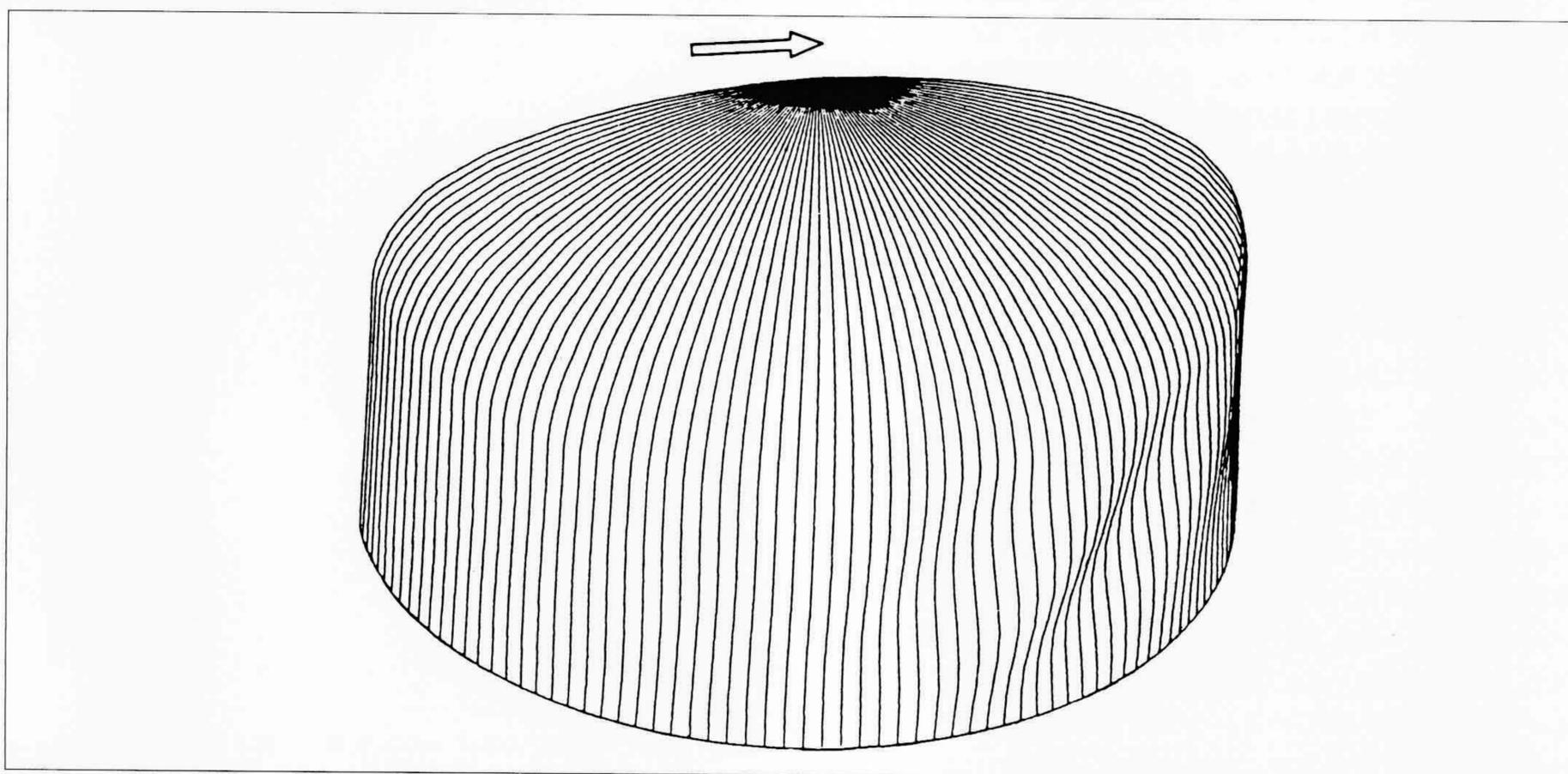


図7 円筒容器の座屈解析 背の低い円筒容器に、横荷重が加わったときのせん断座屈モードを解析した。

析(図7), き裂先端の応力拡大係数解析, 接触部の応力解析(図8), 衝撃応力解析(図9)など多岐にわたっており, 対象の材料も, 半導体, 磁気テープ, 紙, プラスチック, ゴム, セラミックスなど多様化している。このような多様化の傾向は, 振動解析や機構解析, 流体解析の分野でも同様であり, したがって, 解析シミュレーション技術の応用範囲は非常な勢いで拡大しつつあると言えよう。

また, スーパーコンピュータが実用域まで普及してきたことによって, 従来は計算時間の点で不可能であった大規模な大変形弾塑性解析(図10)や乱流解析(図11)が比較的短時間で実現できるようになった。

以上述べたような解析シミュレーション技術の拡大, 充実の傾向は今後も継続していくことは確実であり, これらの技術を有効に利用していくためにも, 2章に述べた機械系CAEシステムの拡充がぜひとも必要となる。

## 5 機械-制御系CAEシステム

図2の解析シミュレーションシステムの中には, 制御系解析が含まれている。制御系シミュレーション技術は, 今後の機械系設計技術の中で重要な位置を占めると考えている技術者が約60%おり, 各種技術の中で最高のパーセンテージであるというアンケート結果<sup>9)</sup>がある。日立製作所もこの技術を重要と考えて, CAEシステムに採り入れている。

通常の制御系シミュレーションシステムは, 各要素の伝達関数から成るブロックダイアグラムで表わされた制御系に, 特定の入力(例えばステップ入力)が与えられたときの応答を求めるようなものが多く, 図2に示したようなCAEシステムとは一見なじまない異質のものと考えられることが多い。

しかし, この場合も制御対象が機構系あるいは構造系であることを考えれば, 機械設計の一部であることには変わりはない。また, メカトロニクス系の設計では主流となるべき技

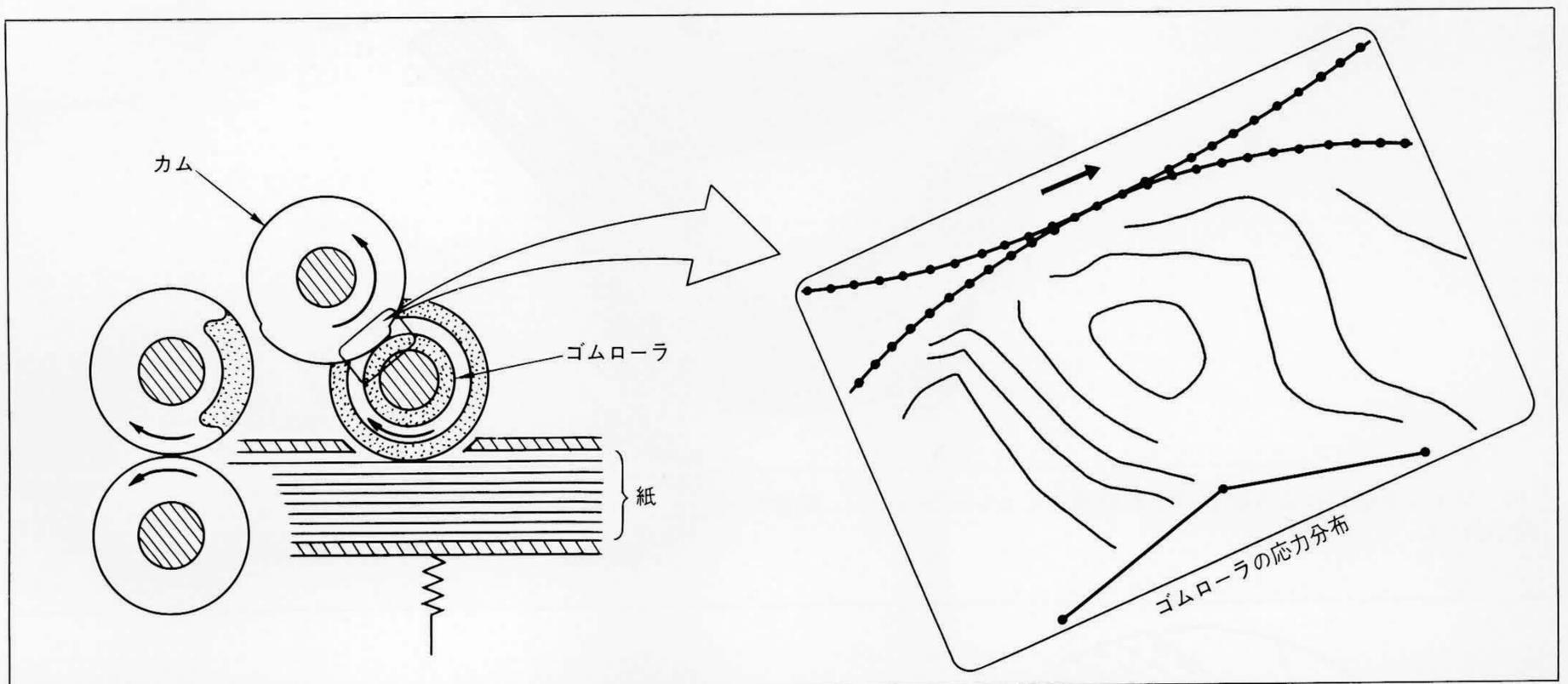


図8 ゴムローラの接触応力解析 紙送り機構で, カムで駆動されるゴムローラの接触応力を境界要素法で解析した。

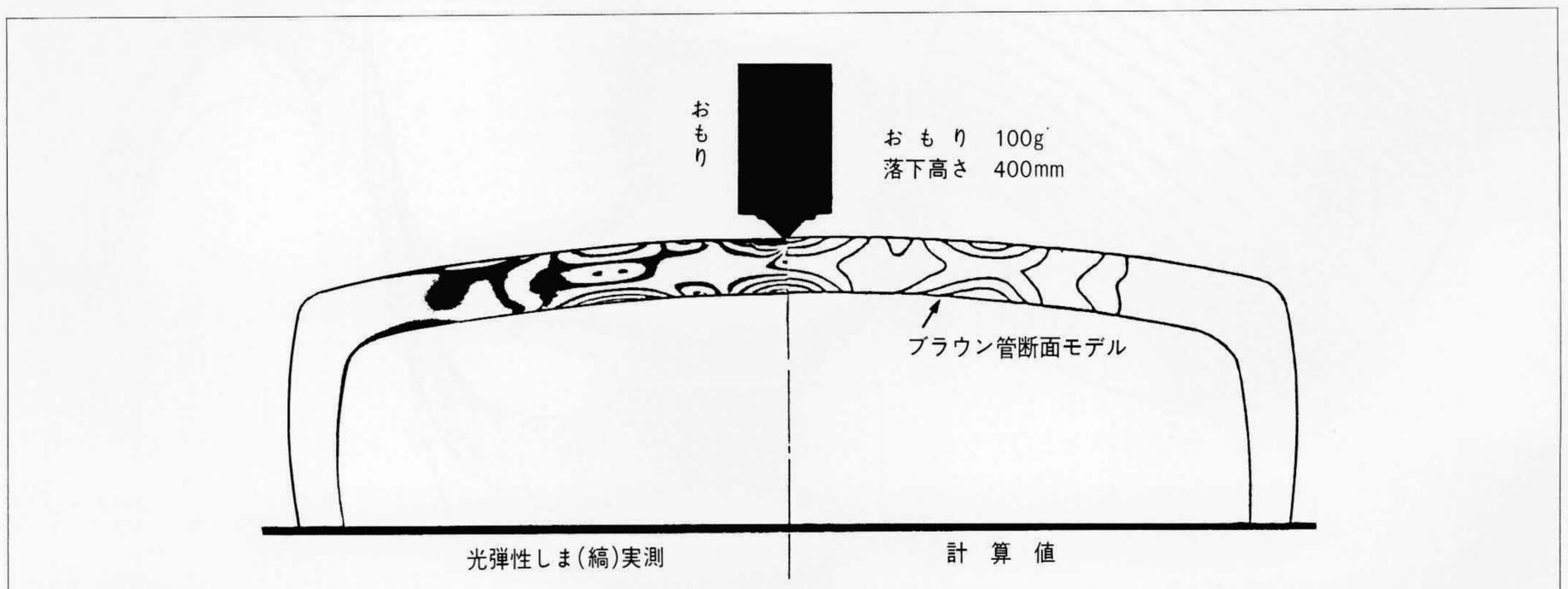


図9 ブラウン管モデルの応力波伝搬 ブラウン管の2次元モデルにおもりを落下させたときの応力波伝搬の計算値を, 光弾性実験の結果と比較した。

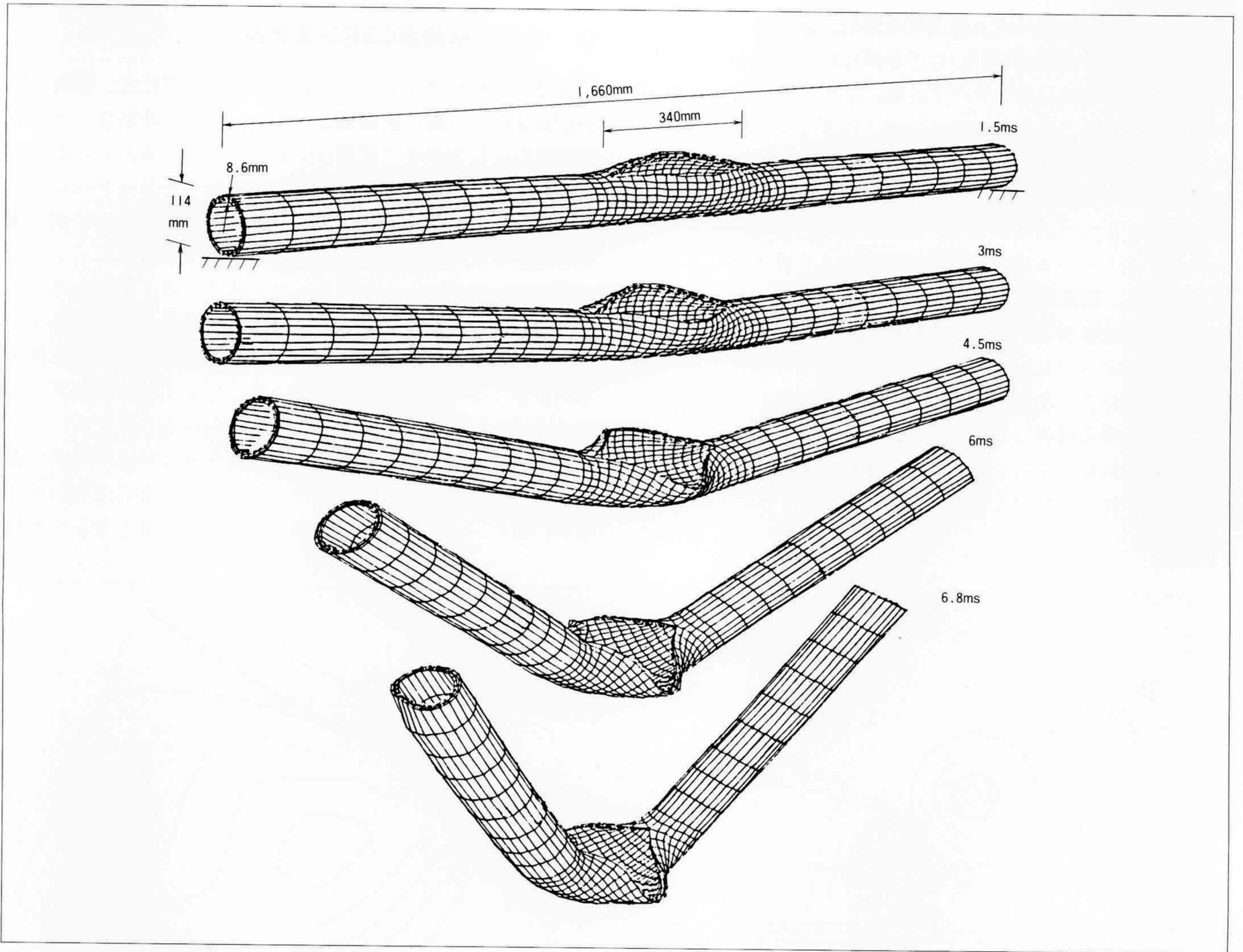


図10 ジェット噴出による配管の動的崩壊シミュレーション 配管の一部に穴があき、そこから噴出する流体の反力で管が押し曲げられる過程を解析した。

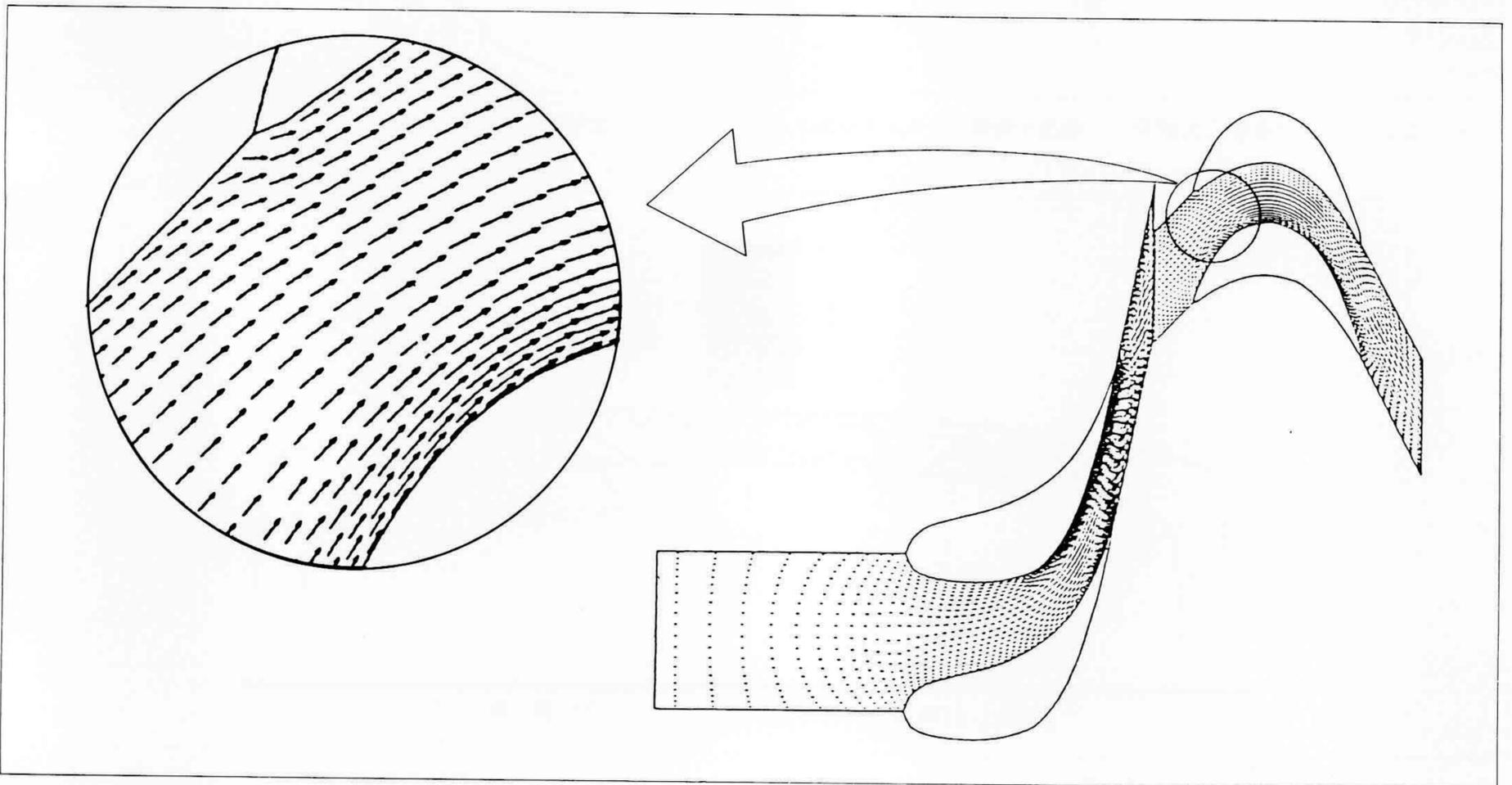


図11 タービン段落の2次元乱流解析 タービンの静翼、動翼を通る流れを2次元乱流解析プログラムを用いて解析した。

術であるから、当然機械系CAEシステムに組み込まれるべきである。

日立製作所は、図12に示すようなシステム構成として制御系設計システムをCAEシステムに組み込んだ。すなわち、制御対象である機構系、構造系の動特性はそれぞれ機構解析、構造・振動解析プログラムによって求め、この動特性を制御系設計システムの入力データに自動変換して転送する。制御系設計システムは、与えられた動特性を適当なモデルに変換し、制御系の構成を決定する段階で設計者を支援する。設計された制御系はシミュレータで制御特性をチェックされ、更に機構・構造系に改良の余地が認められれば、最初のステップに戻って機械-制御全体系の最適化が図られる。図13は、プリンタ紙送り機構制御系での応答性改善の例を示すもので

ある。

### 6 機械系CAEシステムの専用化

前章までには図2に示したはん用システムについて述べたが、はん用システムは多機能で便利であるが、個々の製品を設計するには不要の機能もあって煩雑である。また、基本設計の段階では3次元形状データを作成して詳細解析を行うようなことは少なく、2次元の図と材料力学レベルの独自の簡易設計解析を行うことが多い。そこで、日立製作所ははん用システムの開発と並行して、機種別の専用システムの開発をも手がけている。専用CAEシステムは、はん用システムの中から対象とする機械装置の設計に不必要な解析システムを取り除いたものと、その機械に固有の図形処理や簡易設計式の

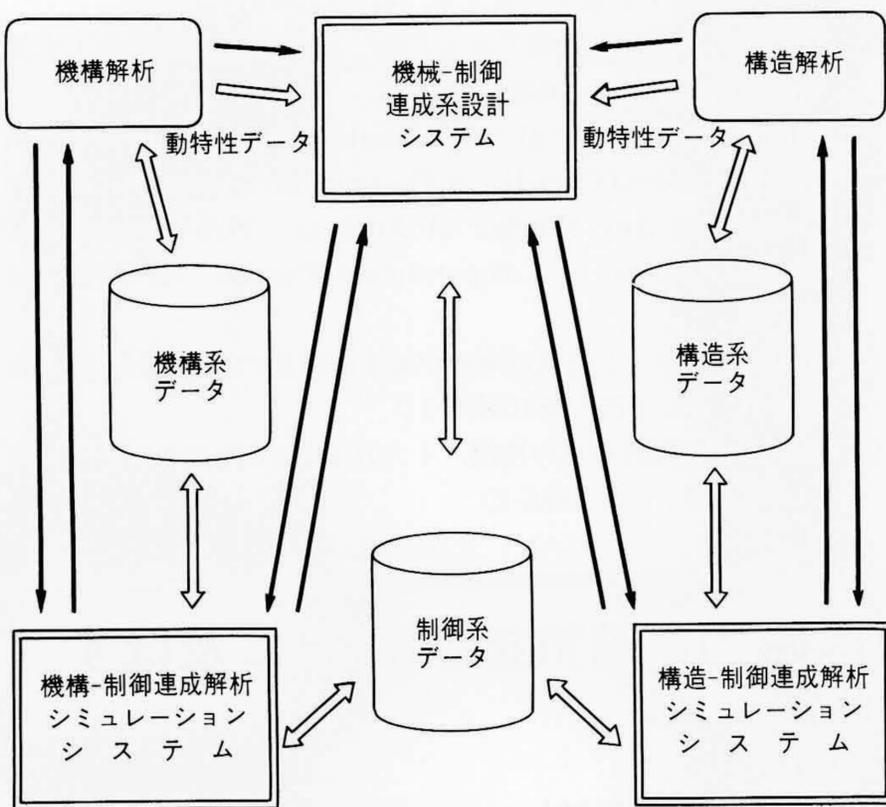


図12 機械-制御連成系設計解析システム 本システムを用いれば、機械系(機構系、構造系)特性と制御系特性のバランスのとれた最適設計が可能となる。

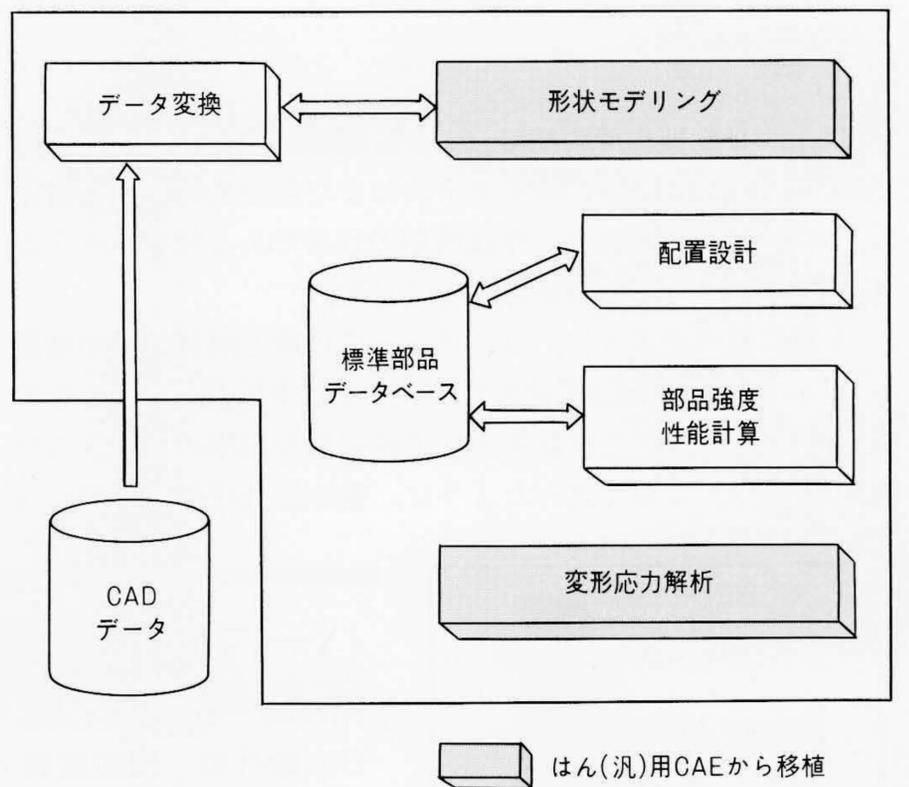


図14 専用CAEシステムの一例 このシステムの設計対象では、多くの標準部品の配置設計が重要な位置を占め、独自の強度、性能設計式を持っている。

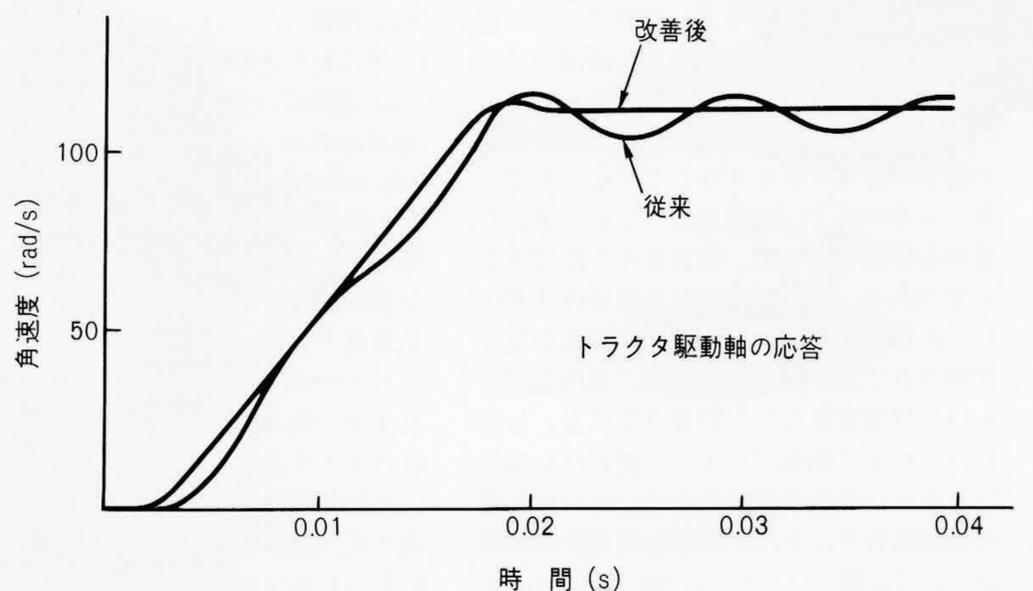
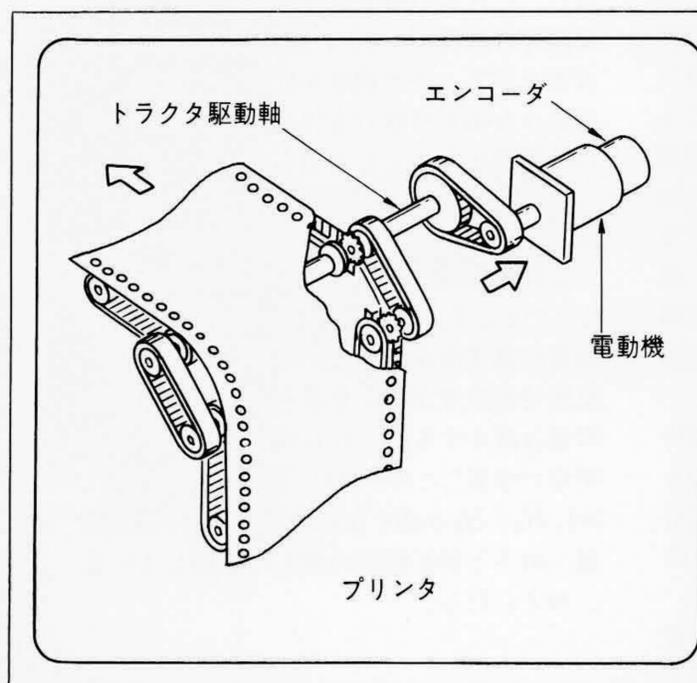


図13 プリンタ紙送り機構制御系の時間応答の改善例 トラクタ駆動軸の角速度を検出し、フィードバックすることが不可能なので、動力伝達部の動特性を模擬したシミュレータにより角速度を計算し、これをフィードバックする。

プログラムや設計データの格納されたエンジニアリングデータベースから成る。

図14に専用CAEシステムの構成例を示す。このシステムの対象とする機械装置は部品点数が多く、その部品を限られたスペースに収めなければならないため、配置設計が重要な位置を占めている。また、部品は標準化されており、その強度計算、性能計算は独自の方法によって行われる。更に、既にCADシステムを用いた図面データが蓄積されており、形状入力のためのデータとしてはこれが用いられる。そこで日立製作所は、図14に示すような専用システムを構築した。このシステムでは、まず2次元データを用いて概略の配置設計及び強度・性能設計を行う。次に、CADデータとはん用形状モデリングシステムを利用して、3次元空間で配置を確認する。更に、支持構造系をもモデル化して変形応力解析を行い、部品強度及び機能・性能を確認する。

## 7 結 言

以上、日立製作所の構築している機械系CAEシステムの構想について述べたが、本システムはまだ部分的に完成を目指しつつある段階であり、今後所期の目標である統合システム化に向けて発展させたいと考えている。

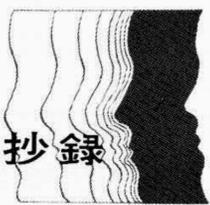
4章に述べたように、コンピュータ技術と解析技術の発展に伴って、機械系CAEシステムはますます拡充していくものと考えられるが、これは主として詳細設計段階の支援システムとなろう。6章に述べたように、基本設計段階の支援シ

テムとしては、当面对象機種別の専用システムが実際的であると思われる。この段階を支援するはん用システムとしては、システム工学や知識工学を応用した新しい発想のシステムが現れることが予想されるが、その構想を具体化していくことが日立製作所の次の課題であると考えている。

## 参考文献

- 1) 中沢, 外: シミュレーションとCAD/CAM/CAE, 機械学会誌, **87**, 782, 46~51(1984-1)
- 2) 中沢, 外: 機械系CAEシステムの開発と応用, 機械学会誌, **88**, 794, 29~35(1985-1)
- 3) 相沢, 外: 幾何モデリングシステムの構造, 第4回設計自動化工学講演会論文集, 15~17(昭61-7)
- 4) 高原, 外: 二次元ワイヤフレーム図形からの二次元有限面の生成法, 第4回設計自動化工学講演会論文集, 18~20(昭61-7)
- 5) 相沢, 外: 親子関係を有する平面図形の三次元化手法, 第4回設計自動化工学講演会論文集, 21~23(昭61-7)
- 6) 相沢, 外: 相貫線処理アルゴリズム, 第4回設計自動化工学講演会論文集, 24~26(昭61-7)
- 7) Thompson J.F., et al.: Automatic Numerical Generation of Body-Fitted Curvilinear Co-ordinate System for Fields Containing Any Number of Arbitrary Two-Dimensional Bodies, Journal of Computational Physics, **15**, 299~319 (1974)
- 8) 重田, 外: タンク型高速増殖炉原子炉構造の耐震評価, 日立評論, **67**, 11, 875~880(昭60-11)
- 9) 増大する機械技術者の役割, 4 大力学のワクを打ち破る, 日経メカニカル, 212(1986-2)

## 論文抄録



# パーマロイ薄膜の保磁力と磁気抵抗効果に及ぼす蒸着時真空度の影響

日立製作所 田辺英男・北田正弘

日本金属学会誌 49—12, 1125~1130 (昭60-12)

近年、薄膜磁気ヘッドなどの薄膜磁性デバイスに関連したパーマロイ膜の研究が盛んである。薄膜磁性デバイスの中でも、パーマロイの磁気抵抗効果を利用した感磁デバイスでは、膜厚100nm以下の極めて薄いパーマロイ膜を感磁素子として使うので、低保磁力で高磁気抵抗効果をもつ極薄パーマロイ膜が必要とされている。

薄膜の電磁気特性は、一般に薄膜作製時の条件によって変化することが知られている。したがって、上記目的のための優れた薄膜を作製するには、作製条件を探究する必要がある。極薄パーマロイ膜は通常電子ビーム蒸着法により $10^{-4}$ Pa程度の真空度で作製されており、基板の種類、基板温度あるいは付着速度などの影響を受ける。しかし、これまで感磁デバイスに使われる磁気ひずみゼロ近傍の組成をもつパーマロイ膜の電磁気特性に及ぼす蒸着時真空度の影響については報告は少なく、特に $10^{-5}$ Pa以下の高真空中で作製したパーマロイ膜の電磁

気特性は明らかでない。本論文では、 $10^{-4}$ ~ $10^{-6}$ Paの高真空中でパーマロイ膜を作製し、保磁力及び磁気抵抗効果に及ぼす蒸着時真空度の影響について検討した。

パーマロイ薄膜試料は、電子ビーム蒸着法で作製した。パーマロイ膜の組成は磁気ひずみゼロ近傍の81wt%Ni-19wt%Feである。基板にはガラスを用い、蒸着時の基板温度は573K、パーマロイの付着速度は~10nm/minとした。このような条件の下で蒸着時の真空度を $6.65 \times 10^{-4}$ ~ $3.0 \times 10^{-6}$ Pa、膜厚を15~300nmにしてパーマロイ膜の電磁気特性に及ぼす蒸着時真空度の影響と膜厚依存性を調べた。

パーマロイ膜の平均比抵抗 $Pa$ は、蒸着時真空度が高くなるほど、また膜が厚くなるほど低下するが、磁気抵抗効果による比抵抗変化 $\Delta P$ は、蒸着時真空度及び膜厚には依存せず、ほぼ一定な値を示す。したがって、磁気抵抗変化率 $\Delta P/Pa$ は、高真空中で作製したパーマロイ膜ほど高く、また膜が厚く

なるほど高くなる。

これに対し、保磁力 $H_C$ と異方性磁界 $H_K$ は、蒸着時真空度が高くなるほど増大する。また、これらの値の蒸着時真空度依存性には膜厚の影響がみられ、膜厚70nm近傍で極大値を示す。磁区観察を行なった結果、このような磁気特性の変化と磁区構造との間には相関があることが明らかになった。

上記の現象を更に詳細に調べるために、透過電子顕微鏡による結晶組織観察とオージェ電子分光分析法による不純物分析を行なったところ、パーマロイ膜の結晶粒径は、蒸着時真空度が高いほど大きくなる。また、蒸着時真空度が高くなるとともに膜中の酸素量は減少する。これらの結果から、高真空中で作製したパーマロイ膜ほど $Pa$ が低く、逆に $H_C$ ,  $H_K$ が高くなる現象は、膜中の酸素量の減少と結晶粒径の増大に関連していると考えられる。