

# 機械工学におけるスーパーコンピュータの高度利用

## Advanced Applications of Supercomputers to Mechanical Engineering

スーパーコンピュータによる大規模、高精度な数値解析技術は、機械製品の研究、開発、設計のための強力な武器として、その地位を不動のものにしている。

乱流解析、非線形構造解析、衝撃解析など、従来は不可能とあきらめていた数値解析がスーパーコンピュータと、その上で稼動する高度にベクトル化されたプログラムによって次々と実用に移されている。日立製作所では、有限要素法、境界要素法による数値シミュレーション技術を実際の製品開発に応用し実績を上げてきた。今後、コンピュータの処理能力の向上に伴い研究・開発・設計に占めるスーパーコンピュータの役割はますます大きくなるものと期待される。

守田邦宣\* *Kuninobu Morita*

池川昌弘\* *Masahiro Ikegawa*

千葉矩正\* *Norimasa Chiba*

塩幡宏規\* *Kôki Shiohata*

江澤良孝\* *Yoshitaka Ezawa*

### 1 緒言

近年、ニーズの高度化、多様化に伴い商品の性能・機能の大幅な向上、コストの低減、開発期間短縮への要求はますます強くなりつつある。製造業で必要とされるこのような商品開発のための基本技術にとって、スーパーコンピュータを用いた大規模・高精度な数値解析技術は欠くことのできない技術の一つとして、その地位を固めつつある。特に、熱・流体・構造・強度などの機械工学の基礎となる分野については、スーパーコンピュータの発展とともに応用ソフトの研究開発も精力的に進められ、ハード・ソフト相まって従来では考えられなかったような高度な解析ができるようになってきた。一方、スーパーコンピュータが吐き出す多量の実出力データの可視化処理や入力データの合理的な作成法など、いわゆるプリポスト処理の研究開発も続けられている。高速のスーパーコンピュータを有効に活用するためには、使い勝手の良い入出力システムは不可欠である。

本稿では、日立製作所で実際の製品開発に応用されて実績を上げてきたスーパーコンピュータ用数値シミュレーション技術を、具体的な適用事例を交えて紹介する。

### 2 流体解析

流体機械や空調機、クリーンルームやコンピュータおよびその周辺機器など、流体の流れが製品の性能向上や信頼性向上に深くかかわっている製品は多い。これらの製品の内部流れを詳細に解析し、それに基づいて高精度な性能予測や設計

の高度化を行うことを目的として、スーパーコンピュータ (HITAC S-810/20) の能力を最大限に活用した流れ解析システムの開発を行ってきている<sup>1)</sup>。流れ解析は、流体の圧縮性を考慮する必要があるか否かによって、圧縮性流れ解析と非圧縮性流れ解析とに大別されるが、いずれの解析を行う場合にも、実製品の流路構造は複雑であり、その形状を正確に解析に反映させる必要がある。そのために本システムでは、圧縮性流体解析にはバウンダリーフィット形曲線座標系を導入したコントロールボリューム法を、非圧縮性流れ解析には有限要素法を用いている。また製品のなかの流れは、従来解析が困難と考えられていた乱流である場合がほとんどであるが、スーパーコンピュータの出現によって二方程式乱流モデルによる解析は、実用性の高い乱流解析技術として、製品の研究・開発に利用されるようになってきている。このことは、解析プログラムのベクトル化を徹底して行うことにより、解析時間が飛躍的に短縮できることに起因している。本システムでは、従来の大形汎(はん)用計算機(HITAC M-200H)に比べて、圧縮性流れ解析では約20倍、非圧縮性流れ解析では約30倍の高速化を達成している。

圧縮性流れ解析の一例として、蒸気タービン段落内の二次元乱流解析結果を図1に示す。タービン性能の向上を図るためには、タービン内部の流動状態を詳細に把握し、内部流動に起因する各種の損失を低減する必要がある。この線に沿って、静翼あるいは動翼単独翼列に対する二次元翼間流れ解析、

\* 日立製作所 機械研究所 工学博士



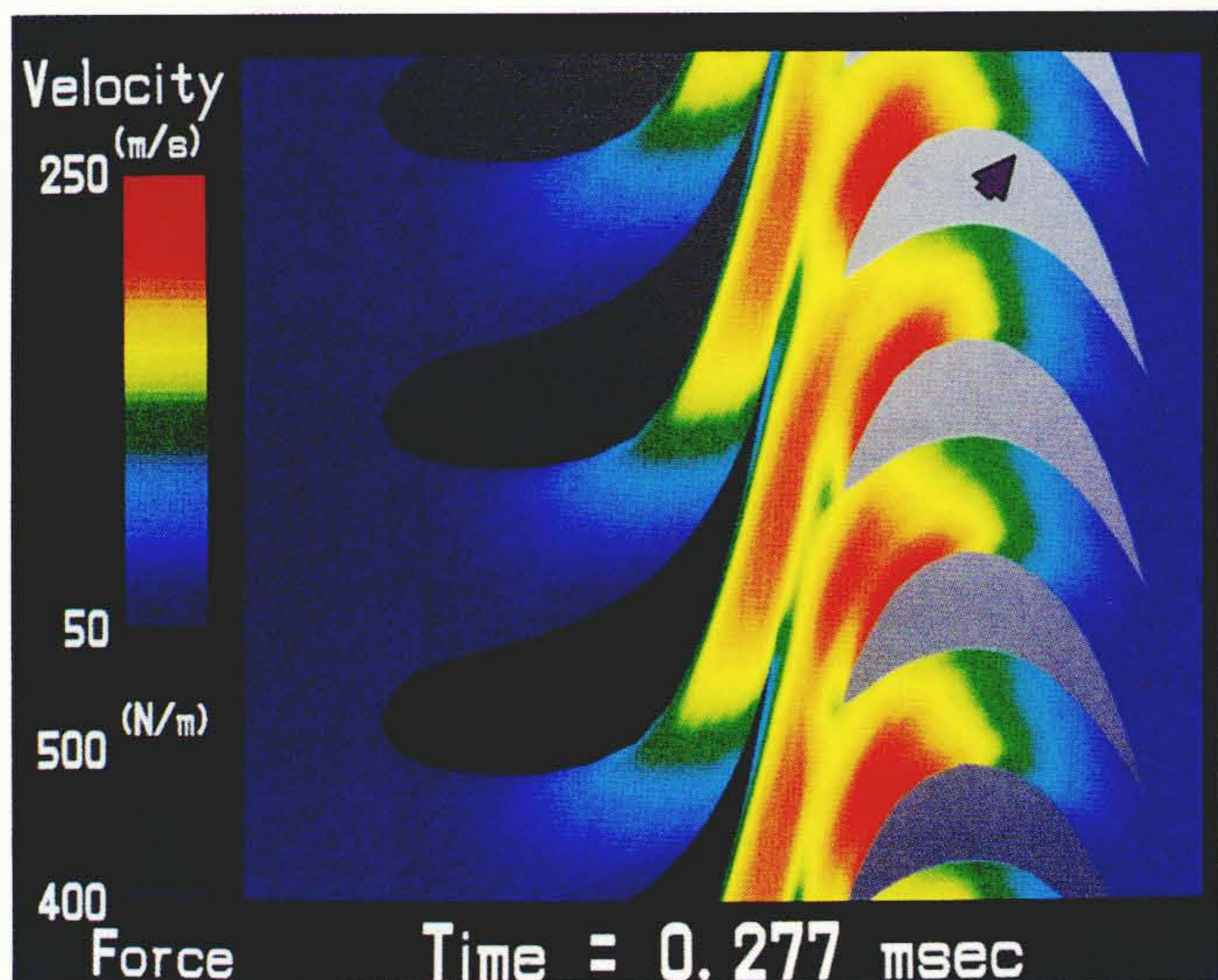


図1 蒸気タービン段落内の流れ 静翼と回転する動翼で構成する段落内の流速分布のカラー表示を示す。写真右上の矢印は動翼に作用する流体力の方向を示す。

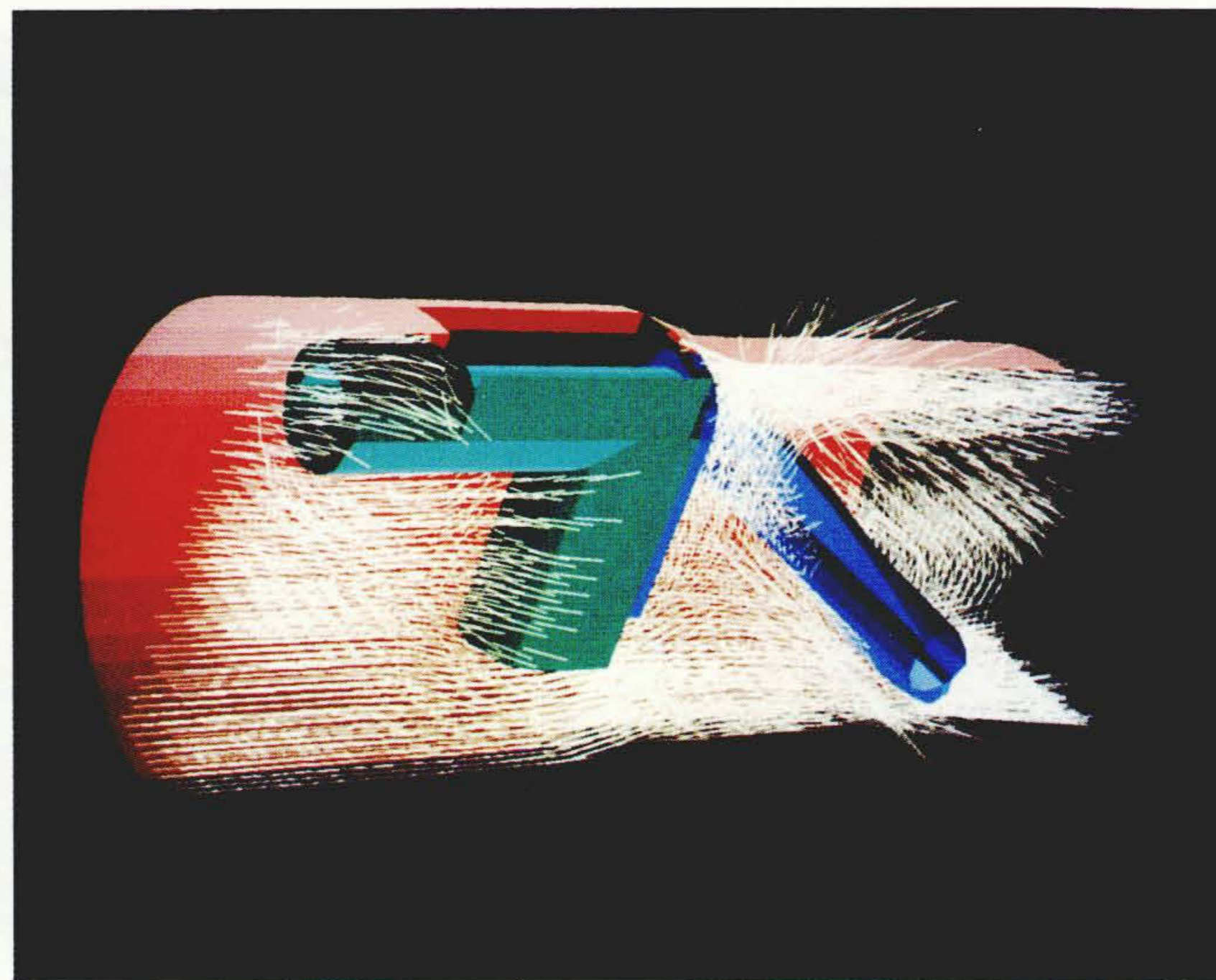


図2 エアフローセンサ内の流れ ホットワイヤセンサが収められるバイパス流路やスロットバルブを含むエアフローセンサ内の流れの三次元解析結果(流速のベクトル表示)を示す。

三次元解析から、静翼と動翼の相互干渉を考慮した二次元、三次元の段落流れ解析へと解析規模は拡大し、より実流状態に近い解析による性能予測精度の向上が図られてきており<sup>2),3)</sup>、これらの解析によって得られた知見は、タービン設計に活用されている。

非圧縮性流れ解析例として、自動車用エアフローセンサ内の乱流解析結果を図2に示す。この解析例は流路構造の最適化の検討に関するものであるが、クリーンルーム内の流れ解析などでも、空気流入口、流出口の配置や換気回数あるいは室内レイアウトなど、多くのパラメータが流れに及ぼす影響を、比較的短時間でサーベイできる気流シミュレーション技術が、製品設計の強力なツールとして利用されている。数値解析技術の利点は、これらの解析例にも示されているように、パラメータサーベイが容易にできること、微細構造物から巨大製品まで解析スケールに制限を受けず、実際の流動状態をシミュレートできること、および流れの詳細を解明できる豊富な情報量を持っていることであり、スーパーコンピュータの今後の発展に伴って、種々の製品の設計・開発に対して流れの数値シミュレーションの果たす役割は、ますます大きくなっていくものと予想される。

### 3 構造振動解析

機械構造物の複雑化、大形化および軽量化に伴い、製品設計の効率化と高速化、開発期間の短縮などの有効な手段として、コンピュータ利用による構造解析の数値シミュレーションに対するニーズは高い。そこで、これらニーズにこたえるため、メカトロニクス製品から重電製品まで広範囲な製品設計の高度化および構造振動の高精度予測を目的として、スー

パーコンピュータに適した構造振動解析システムの開発を行ってきた。本システムの内容は以下のとおりである。

- (1) 有限要素法をもとに、線形および集中非線形(がた、滑り、移動体など)を持つ構造振動解析
- (2) 機械構造物を部品分けし、各部品の振動特性をそれぞれ求めておき、これらを有効に結合させる超要素法を導入した大規模構造系の振動解析
- (3) スーパーコンピュータの能力を最大限に発揮するための徹底したベクトル化プログラム
- (4) 有限要素データの作成、解析、結果のグラフィック出力まで一貫して実行できるCAEシステム

上記内容をもとに開発した本解析システムの特長は次のとおりである。

- (1) 狭い間隙(げき)を持つ移動構造物と静止構造物との間で接触するとき発生する動的挙動を、非線形振動解析によってシミュレーションできる。
- (2) 超要素法を用いる際に、一般化座標の概念を導入することにより、解析対象外の高次モードに関する剰余固有値が構造物の振動特性に及ぼす影響を除去することができる<sup>5)~7)</sup>。この結果、大規模自由度を持つ構造物の振動を高精度に予測できるようになった。
- (3) スーパーコンピュータ(HITAC S-810/20)利用により、従来の汎用大形計算機(HITAC M-200H)に比べて、高速化を実現でき、最高34倍の実績を得ている。
- (4) 構造物のモデリング、有限要素のメッシュ分割、解析、結果のグラフィック出力までを一貫して実行できる<sup>8)</sup>。この結果、従来解析に必要なデータの作成および結果のまとめに多大な時間を費やしていたが、短時間で処理できるよう



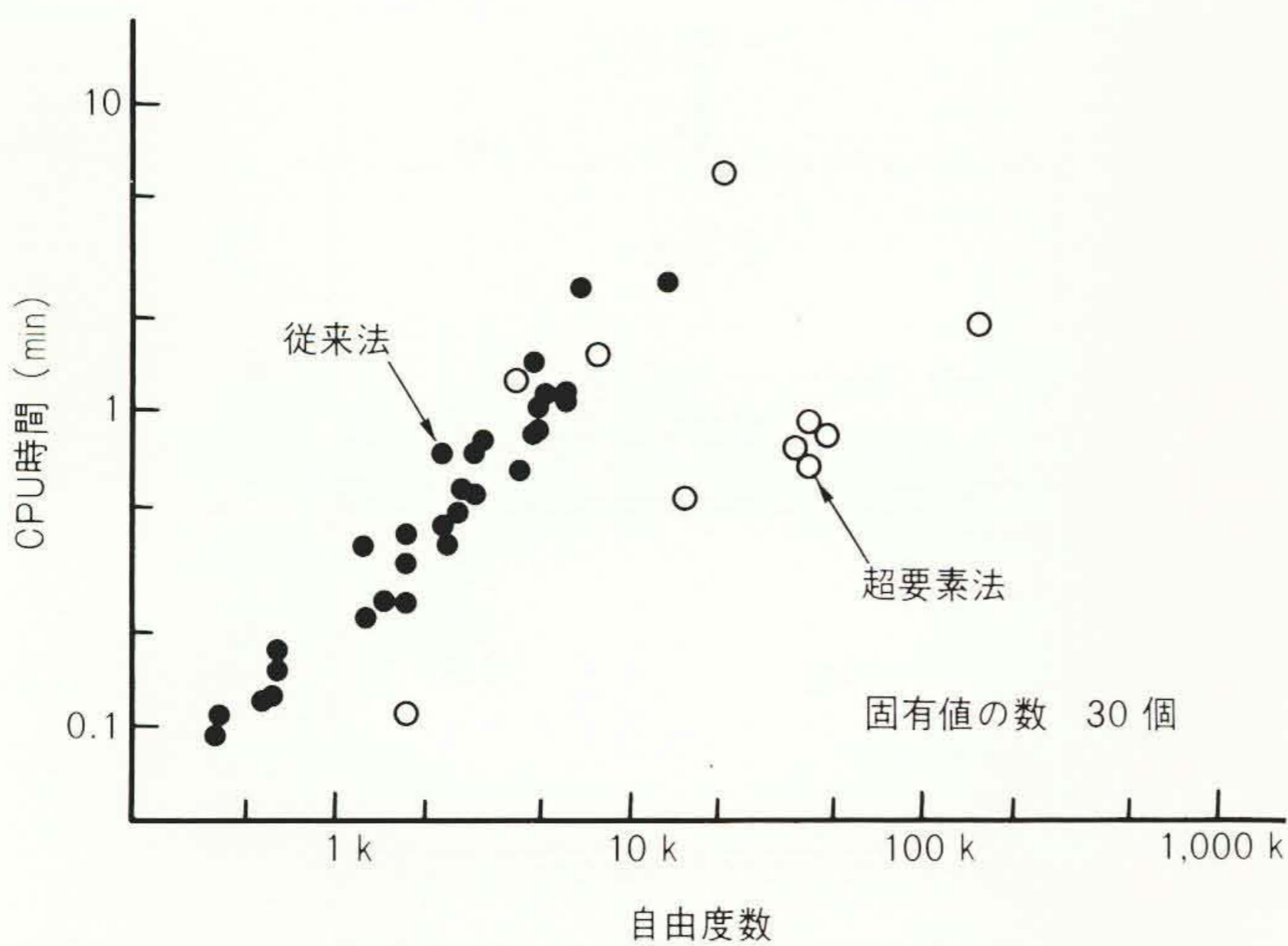


図3 計算規模と演算時間(固有値解析) 有限要素解析に超要素の概念を導入して、複雑・大規模構造系の解析を短時間で実行できる。

になった。

固有値解析での自由度の数とスーパーコンピュータ(HITAC S-810/20)のCPU時間との関係を図3に示す。固有値の数は30とした。従来の解析法によれば、自由度の増加に伴いCPU時間も増加する。このため、大規模な自由度を持つ振動解析には多大な時間を要していた。これに対して、超要素法を導入した本システムを用いれば、自由度の増加に対してCPU時間はそれほど増加しない。特に、多数の同形状部品で構成する構造物に対してその効果は顕著となる。

銀行端末装置の筐(きょう)体の振動解析に、本システムを適用した例を図4に示す<sup>9)</sup>。本システムを用いることにより、複雑な構造物の振動解析を容易に実行できる。

#### 4 境界要素法による構造解析

BEM(境界要素法)は、物体の境界面だけを離散化すればよいという特徴を持っている。そこで、計算のための作業量削減を目的として、境界要素法による対話形応力解析プログラムHIBEM(Hitachi Interactive Boundary Element Method)を開発した。HIBEMは以下に示す解析が可能である。

- (1) 弾性応力解析
- (2) 熱弾性応力解析
- (3) き裂・欠陥応力解析
- (4) 接触応力解析

境界要素法は、境界積分方程式作成時での積分方法によってその解析精度が大きな影響を受ける。積分方法としては通常ガウス・ルジャンドルの方法が使われる。しかし、この方法では、境界面に近い場所の値を求めるときに解析の精度が保証されない。そこで、HIBEMでは二重指数関数形積分公式などを採用し、高精度な解を実現している。

境界要素法応力解析では、境界積分方程式作成のための積分計算、および連立方程式の求解計算が大きな比重を占めている。スーパーコンピュータでの加速率を向上させるため、(1)関数のループ内展開によるオーバーヘッド削減、(2)IF文実行回数の削減、(3)スカラー演算のベクトル演算化などを行った。また、連立方程式の求解部分については、大規模問題解析時でのメモリネックに対処するため、縦ブロックガウス解法を採用した。本解法ルーチンでは、スーパーコンピュータのベクトル演算器を複数個並列稼働させるため、2行2列同時分解を行っている。これらの高速化処理を行い、スーパーコンピュータ(HITAC S-810/20)でのCPU時間を比較した例を

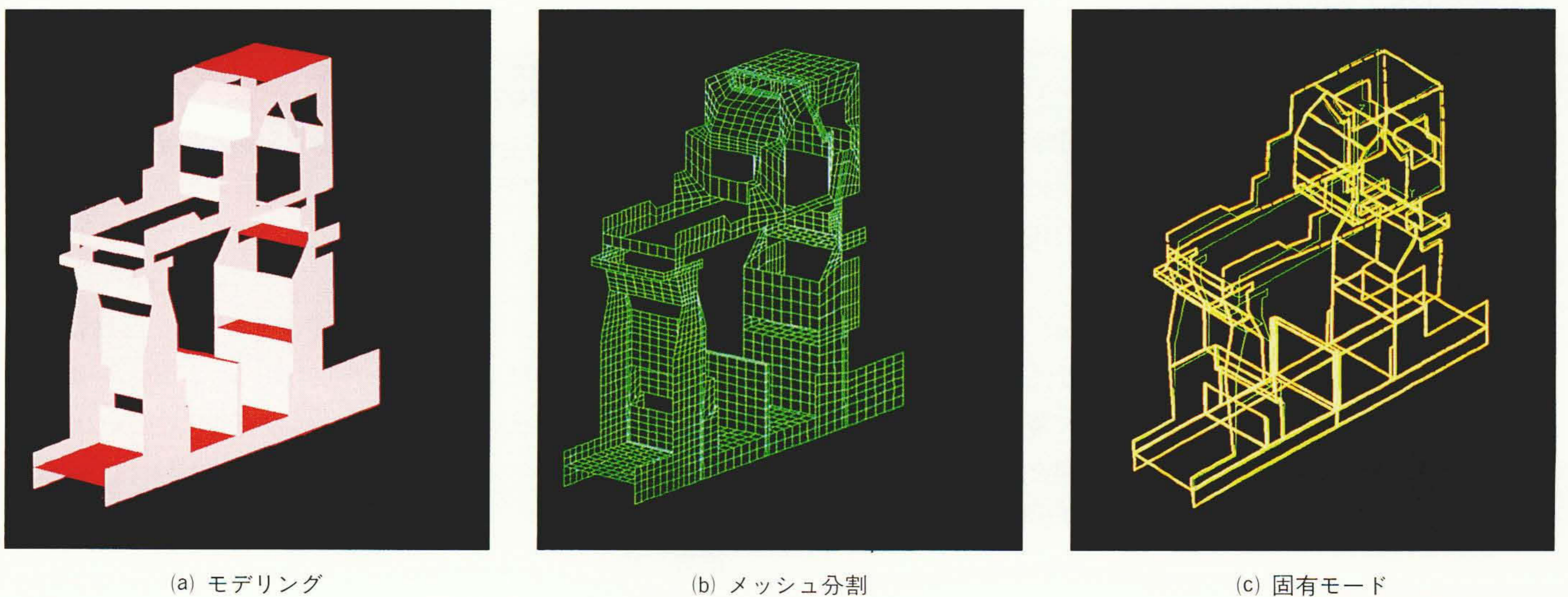
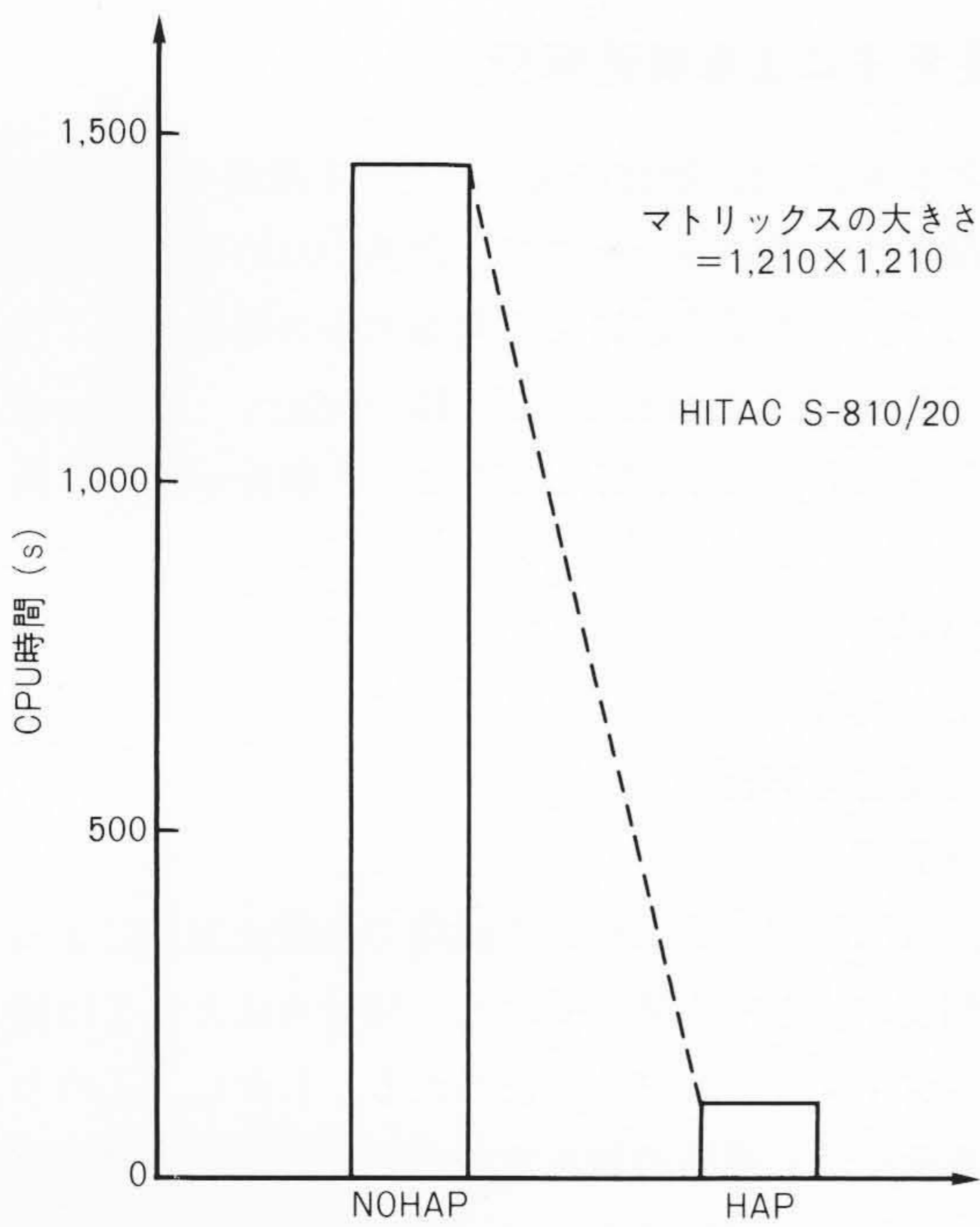


図4 CAEシステムによる構造振動解析の使い勝手向上 図面データ入力から解析結果の出力まで、一貫したコンピュータ処理ができる。これにより、解析データの作成および結果のまとめが短時間で実行できる。





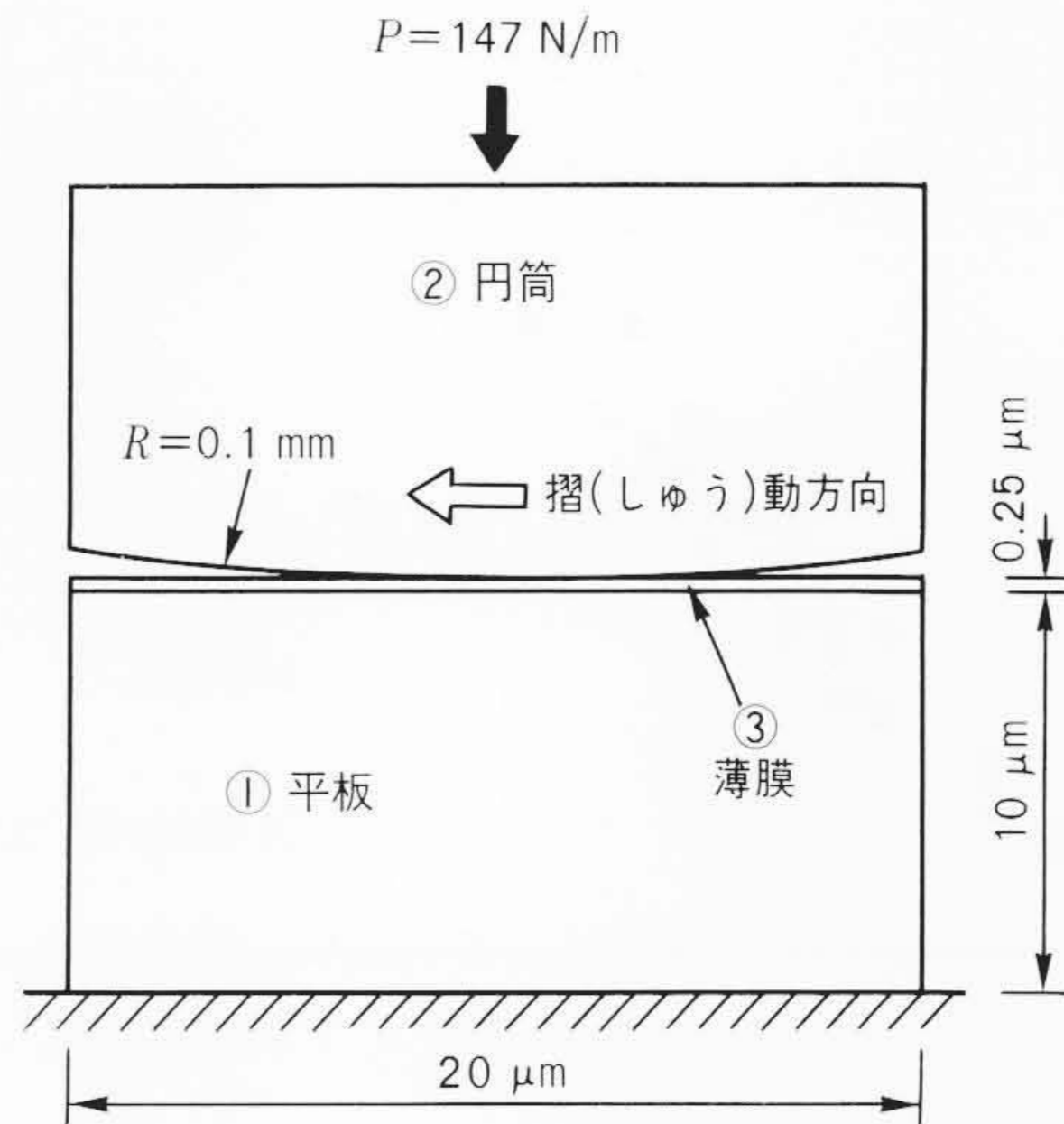
注：略語説明 NOHAP (スカラー演算器だけを使用した場合)  
HAP (ベクトル演算器を使用した場合)

図5 境界要素構造解析プログラムHIBEMのCPU時間比較 ベクトル演算器を使った場合は、使わない場合に比較して約15倍高速化された。

図5に示す。この例では15倍の高速化が達成されている。さらに、大規模な問題ではこれ以上の高速化が期待できる。

接触応力解析では、接触状態が荷重と変形に依存するため、非線形問題となる。したがって、接触状態を求めるための反復計算が不可欠である。そこで、スーパーコンピュータを使った反復過程の高速化技法を開発した。反復時でのマトリックスの変化成分はほんのわずかである。そこでマトリックスのLU分解<sup>\*)</sup>は一度だけ行い、反復時には変化成分の解に与える影響表示ベクトル $\gamma$ だけを計算するようにした。ベクトル $\gamma$ は変化行の数だけ求めればよく、また同じ行が反復修正される時は改めて求め直す必要はない。さらに、アルゴリズムのくふうによってベクトル $\gamma$ を複数同時に求めることができる。これによってスーパーコンピュータのベクトル演算器を複数並列稼働させることができる。HIBEMでは四つ同時に求めている。

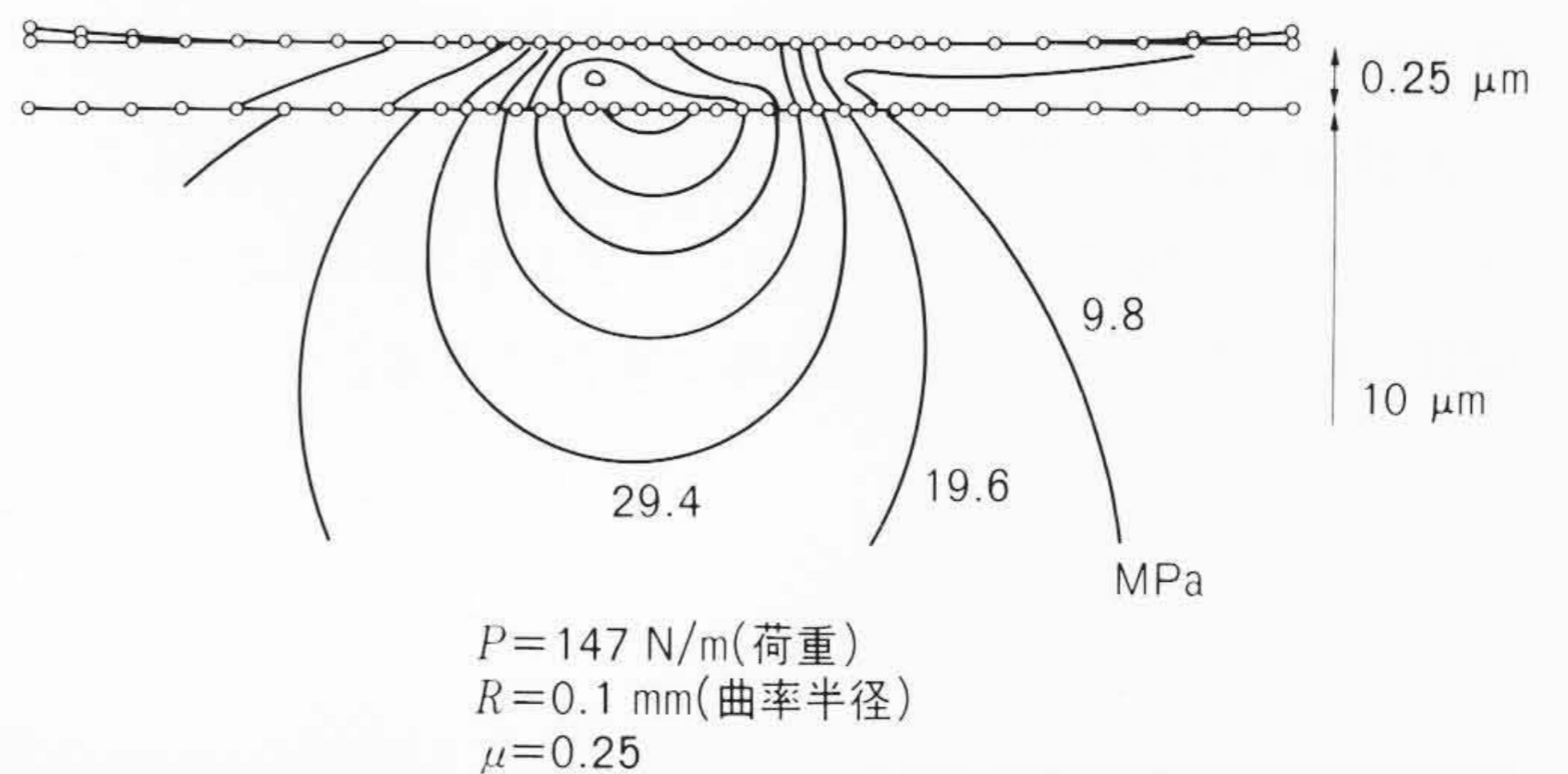
解析例として図6に示す問題を考える。これは、平板上に形成された膜と円筒状の接触面を持つ摺(しゅう)動子との接触応力を解析するものである。HIBEMで解析した結果の例を図7に示す。連立方程式の求解CPU時間を比較したのが図8である。横軸はマトリックスの修正反復が何回目かを示して



ブロック1:  $E_1=177$  MPa  
 $\nu_1=0.3$   
ブロック2:  $E_2=245$  MPa  
 $\nu_2=0.3$   
ブロック3:  $E_3=147$  MPa  
 $\nu_3=0.3$   
 $\mu=0.25$

注：略語説明 E (ヤング率),  $\nu$  (ポアソン比),  $\mu$  (摩擦係数)

図6 薄膜の付いた平板と円筒の摺(しゅう)動 薄膜の付いた平板上を円筒状の接触面を持つ摺動子が移動するときの応力、変形を計算する。



注：略語説明 P (荷重)  
R (摺動子の曲率半径)

図7 接触点近傍の主せん断応力分布 接触点近傍の主せん断応力は、膜部で最大になった。

いる。この例では、3回の修正反復で収束した。2回以降では高速化は約10倍になっている。したがって、新しい解法はマトリックスの修正反復回数が多いほど有利なことがわかる。

### 5 衝撃変形

機器・構造物が衝突などの衝撃荷重によって変形したり破壊する場合の数値シミュレーションは、実物モデルを用いた高価な衝撃実験の代替手段として、あるいは計測が不可能な

\*) LU分解：下三角行列Lと上三角行列Uへの分解



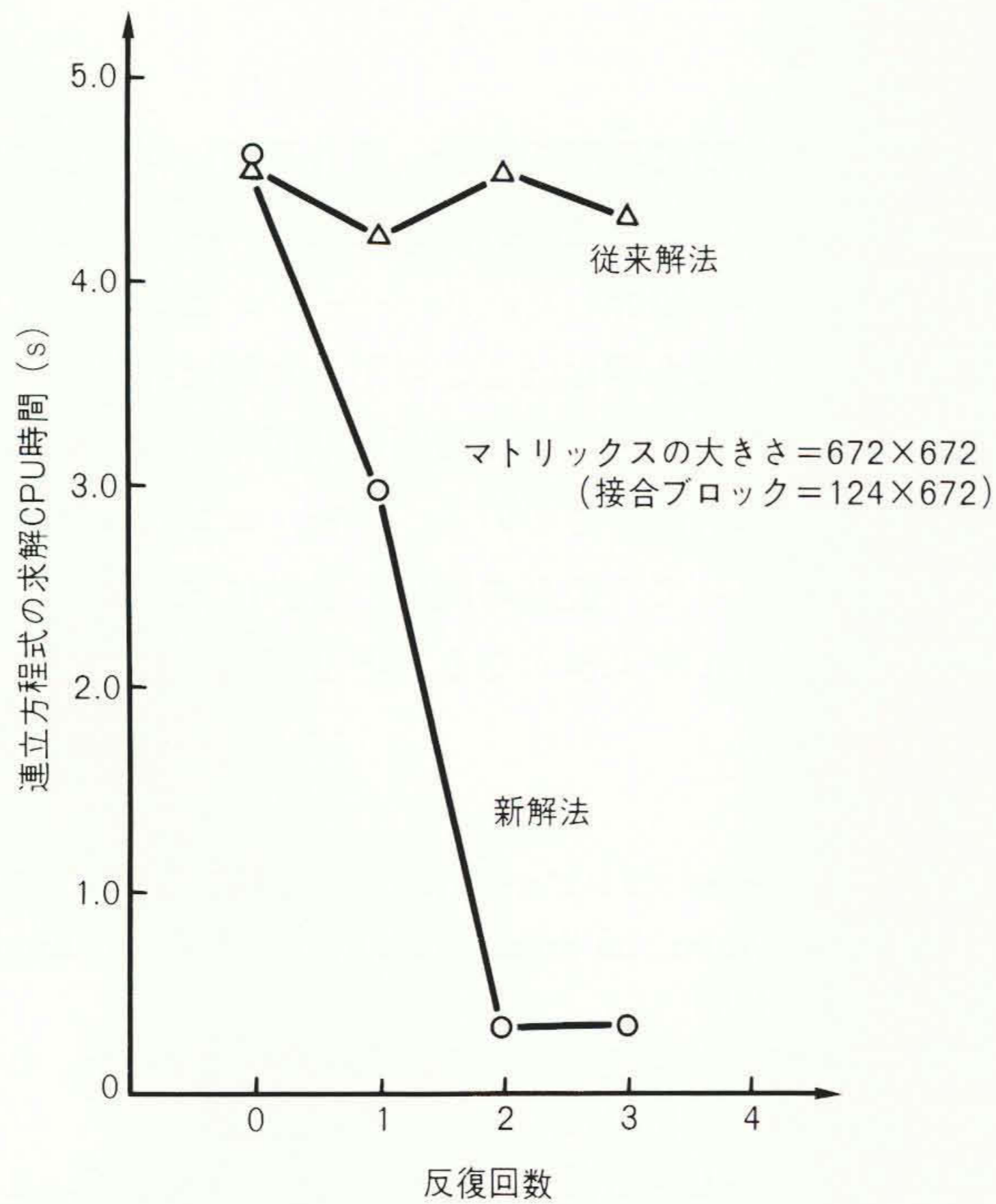


図8 接触解析での求解CPU時間比較 反復2回目以降は約10倍の高速化が達成されている。

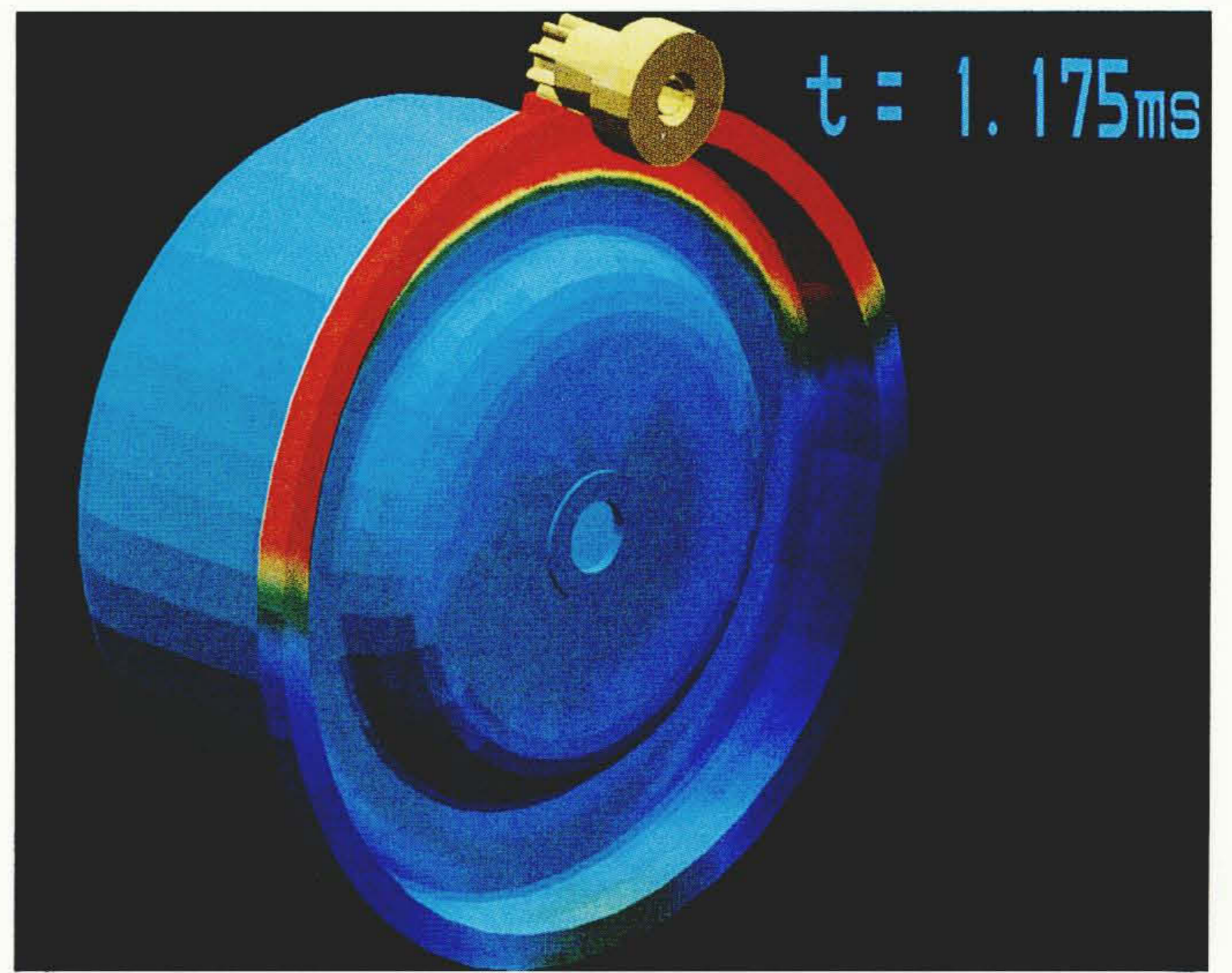
個所の応力ひずみの予測評価手段として用いられている。

衝撃変形のシミュレーションは、高度な非線形性を含み、またきわめて多くの時間増分から成る大規模な計算を必要とするため、スーパーコンピュータを使用することはもちろん、それを可能な限り効率的に利用することが不可欠となる<sup>10)~12)</sup>。

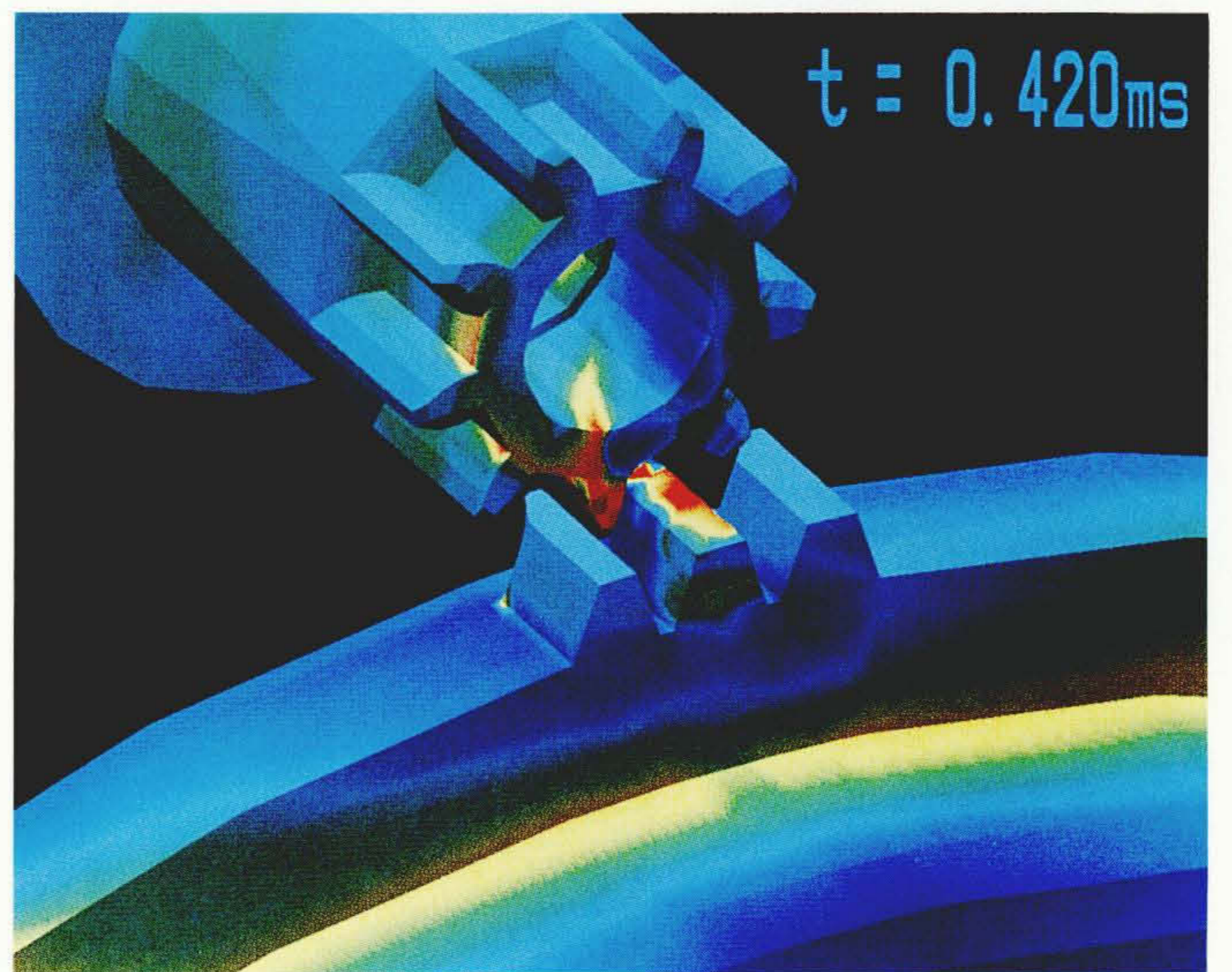
ここでは、スーパーコンピュータを用いて行った固体・機器の衝撃応力、変形の計算例2例について述べる。

(1) 自動車スタータギヤのかみ合い

自動車のキースイッチを入れると、スタータのピニオンがマグネットスイッチの電磁吸引力とばねによって押し出され、エンジンに連絡されているリングギヤに衝突し、ピニオンとギヤのかみ合いが生じる。このときの変形と歯の動的応力の計算結果を図9に示す。スタータ[同図(a)の黄色の部分]はシャフトに回転自由な状態で埋め込まれており、これがリングギヤ[同図(a)の中心部分のリング]の歯に衝突する。なお、実際のリングギヤでは外周に多数の歯が形成されているが、この計算では同図(b)に示すように歯数は3個とした。同図(a)は軸方向のたわみの大きさを赤から青の色により、また同図(b)は衝突時の歯の表面の応力を赤から青の色によって示したものである。実際にギヤかみ込み時に作用する歯の表面上の動的応力を測定することは困難であるが、このシミュレーションによって詳細な分布および時間変化を知ることができる。なお、本解析の計算時間はスーパーコンピュータ(HITAC S-810/20)を用いて172分であった。



(a) リングギヤのたわみ



(b) 歯の衝突接触応力

図9 自動車スタータギヤかみ合い時の変形と応力

- (a) リングギヤの軸方向のたわみが、赤から青への色によって示されている。
- (b) これは(a)を180度反対側から見た衝突部分の拡大図である。歯どうしの接触による圧力分布が、赤から青の色によって示されている。

(2) ゴルフボールのインパクトによる変形

50 m/sのクラブヘッドスピードで打ったときのゴルフボールの変形と運動のシミュレーション結果を図10に示す。インパクト開始後0.15 m/sでボールの変形は最大になり、1 m/sではすでにボールはヘッドを離れ、ヘッドとの摩擦によってスピンを与えられていることがわかる。また、ボール表面上の色は圧力の大きさを示している。このことから、ボール中を弾性波が往復していること、またインパクトでのボールとの接触面の圧力の大きさもシミュレーションの結果からわかる。なお、この解析での計算時間はスーパーコンピュータ(HITAC S-810/20)で105分であった。



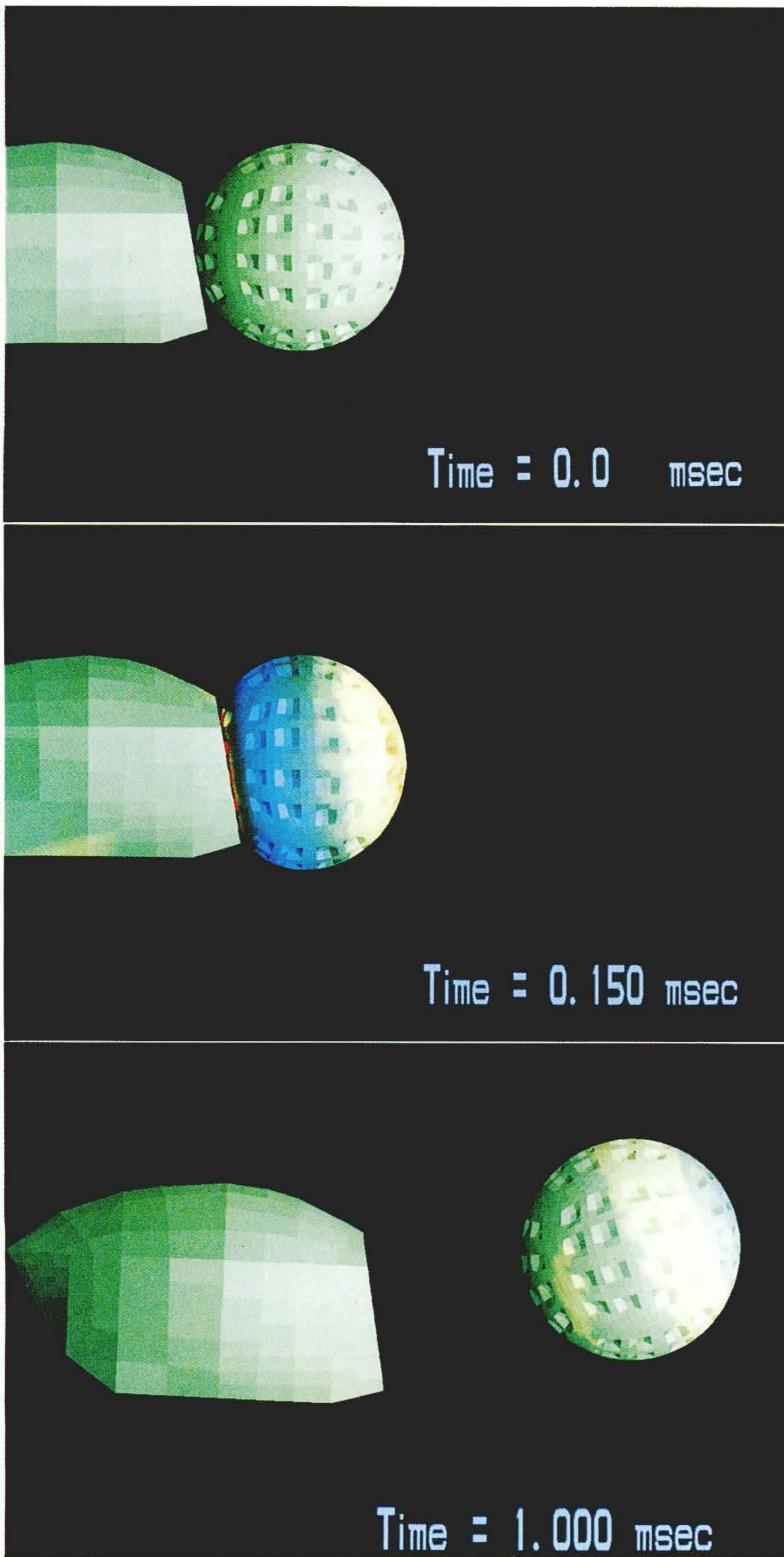


図10 ゴルフボールの変形と運動 クラブヘッドスピード50 m/s(プロゴルファー程度)で打ったときのゴルフボールの変形状態を示す。ヘッドとの摩擦によってボールは反時計回りのスピンを与えられている。

## 6 結 言

以上、日立製作所で実際の開発、設計業務に利用している流体解析、振動解析、構造解析、衝撃解析の数値シミュレーション技術について紹介した。スーパーコンピュータの利用による設計、開発の合理化はここに示した例だけにとどまらず、広い範囲にわたり機械製品の開発期間の短縮、製品コストの低減に多大の貢献をしている。今後、コンピュータの処理能力の増加に伴って、製品の開発、設計に占めるコンピュータの役割はますます大きくなることは確実である。

### 参考文献

- 1) 池川, 外: スーパーコンピュータによる大規模乱流解析, Proc. of 1st Int. Sympo. on Supercomputers for Mech. Engng., pp.58~65, 1988.
- 2) 鹿野, 外: タービン段落内の二次元圧縮性乱流解析, 日本機械学会論文集(B), 51-471, 3675~3679(1985)
- 3) 鹿野, 外: タービン段落内の三次元圧縮性乱流解析, 日本機械学会論文集(B), 53-496, 3622~3628(1987)
- 4) M. Ikegawa, et al.: Three-Dimensional Turbulent Flow Analysis in a Cleanroom by the Finite Element Method, in Advances and Applications in Computational Fluid Dynamics, FED 66, pp.161~167, ASME W. A. M., 1988.
- 5) 畠, 外: モーダル解析での高次モード削除の補正方法, 日本機械学会論文集(C), 50-449, 11~16(1984)
- 6) 畠: 動的応答計算における外力項を考慮した一般化座標(第1報)日本機械学会論文集(C), 51-468, 1897~1905(1985)
- 7) 畠, 外: 動的応答計算における外力項を考慮した一般化座標(第2報)日本機械学会論文集(C), 51-471, 2936~2943(1985)
- 8) 大西, 外: 機械系CAEシステムの開発, 日立評論, 69, 2, 126~132(昭62-2)
- 9) 川田, 外: メカトロニクス製品開発におけるCAD/CAEの適用, 第3回NICOGRAPH論文集, 253~259(1987)
- 10) 千葉, 外: スーパーコンピュータによる衝撃大変形解析, 日本機械学会日立地方講演会論文集, 22(昭63)
- 11) 千葉: 構造機器の衝撃解析, コンピュートロール, 26, 58(1989)
- 12) 千葉, 外: 衝撃大変形のスーパーコンピュータによるシミュレーション, 日本シミュレーション学会第8回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス(1989-6)