

スーパーコンピュータによる機械系解析 シミュレーションシステム

Numerical Simulation Systems Using Supercomputers for Mechanical Engineering

スーパーコンピュータの出現によって、従来は不可能であった大規模な解析シミュレーションが可能となってきた。機械系の設計分野では、従来から有限要素法などによるシミュレーション技術を用いて性能や信頼性の事前評価を行ってきたが、今後はスーパーコンピュータを用いて、より高精度の予測ができる可能性が出てきた。

本稿では、スーパーコンピュータを用いた機械系高度解析シミュレーションの演算高速化のための工夫を紹介するとともに、シミュレーションの実例を示す。また、設計過程全体の効率化という点で問題となる入力データの作成、出力データの整理に要する時間の短縮を目指した機械系CAEシステムの概要についても述べる。

大西紘夫* Hiroo Ônishi
池川昌弘** Masahiro Ikegawa
坂田信二** Shinji Sakata

1 緒 言

機械設計では、機械装置の性能や信頼性をあらかじめ予測するために、構造・振動、機構・制御、熱・流体、振動・騒音などの解析シミュレーション技術が駆使される。これらの分野では、有限要素法に代表される数値解析技術の発展により高精度のシミュレーションが可能となっている。そして近年のスーパーコンピュータの処理能力の向上によって、従来は経済性や計算時間の点で不可能とされてきた大規模な問題や非線形問題の解析が可能となってきた。

本稿では、機械系分野の解析シミュレーションでのスーパーコンピュータ利用の現状を紹介する。更に、その解析シミュレーション技術を、設計上有効に活用するための機械系CAE(Computer Aided Engineering)システムについても言及する。

2 機械系解析シミュレーション技術

機械系解析シミュレーション技術は、前章冒頭に述べたように多岐にわたる分野を包含している。これらの分野では、差分法、有限要素法、境界要素法などの手法が用いられるようになって、シミュレーション技術の応用範囲が急速に広がってきた。本章では、これらの分野のうち、まずスーパーコンピュータの高速性をうまく引き出すように工夫された構造解析プログラムについて述べる。次に、スーパーコンピュータを用いた流体解析技術の現状と応用例を紹介する。

2.1 構造解析

構造解析の応用分野は、コンピュータの進歩に伴い急速に拡大しつつあり、日常の設計業務にも取り入れられている状況にある。一方、解析対象としては大規模問題や非弾性解析

への要望が一段と高まり、計算時間と経済性の観点から計算の高速化が大きな課題であった。このような環境下で登場したスーパーコンピュータHITAC S-810(以下、S-810と略す。)は、日ごろ、コンピュータ能力の限界に悩まされていた解析者たちに一条の光を投げかけるものとなった。

本節では、S-810の特性に合わせて開発を行った構造解析プログラムSIMUS(Simulation System for Integrated Multi-layer Using Supercomputer)の高速化アルゴリズムとその評価・結果について述べる¹⁾。

2.1.1 高速化アルゴリズム

S-810を用いた高速化アルゴリズムの基本的な考え方は、以下の3項が最も基本的なものとなる。

- (1) DOループの比率を高め、ベクトル化率を大きくする。
- (2) DOループの繰返し数(ベクトル長)を大きくし、ベクトル処理速度を高める。
- (3) 複数演算器の並列利用を図る。

以上の3項目を、可能な限り取り込んだ構造解析プログラムSIMUSを開発した。有限要素法を用いたSIMUSで、計算時間の多くかかる3点に対して施した高速化手法を以下に示す。

(a) 要素剛性マトリックスの作成

要素剛性マトリックスを作成する段階で、 $B^T \cdot D \cdot B$ という行列の積を求める必要がある。ここに、 D は6行×6列、 B は6行×60列の行列で、 B^T は B の転置行列である。この計算をFORTRANで書くと図1(a)のようになり、最内側DOループのベクトル長が6であるため高速化の割合が小さい。

* 日立製作所機械研究所 ** 日立製作所機械研究所 工学博士

SIMUSでは、 B , D などを1次元配列とし、リストベクトル(間接指標用指数)を用いて同図(b)のようにDOループを一重化し、ベクトルを長大化している。

上述の改良点と、行列の零成分に対しては演算を行わないという改良点の効果をS-810で測定したところ、22.8倍という値を得た。

(b) 連立一次方程式の解法

大規模問題を有限要素法で解く場合、計算時間の大部分は連立一次方程式を解くことに費やされる。したがって、この部分を高速化することはプログラム全体の高速化に大きく寄与することになる。

SIMUSでは、連立一次方程式の解法として直接法(消去法)の一種であるスカイライン法を用いている。スカイライ

ン法では、 x を未知ベクトルとする連立一次方程式

の係数行列 A を次のように三角分解する。

ただし、 U は対角要素より右上の部分だけに非零要素を持つ上三角行列、 M は対角要素だけが非零要素の対角行列となる。通常、(2)式の分解は図2(a)のように要素一つずつに対して行われるが、SIMUSでは、 A が3行×3列の小行列を単位として作られているのを利用して、同図(b)のように9個の行列成分を最内側DOループ内で同時に分解する。この結果、ベクトル長をほとんど変化させずに最内側DOループ内の演算量を9倍にすることができる。この手法を3行3列同時分解と呼び、節点数1,825(自由度数5,475)規模の

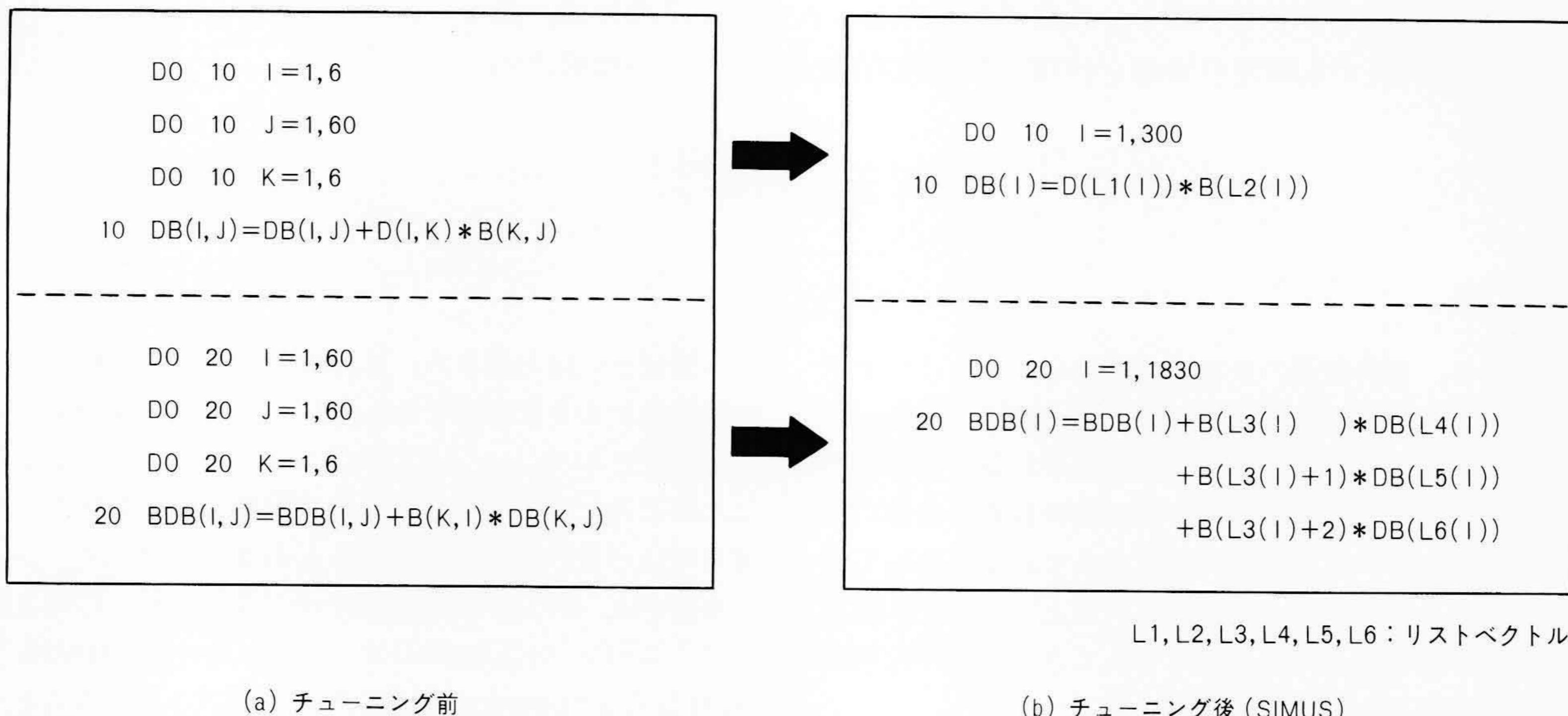


図1 要素剛性マトリックス作成ルーチンの高速化 ベクトル長(最内側DOループの繰返し数)は、チューニングによって6から300及び1,830になった。

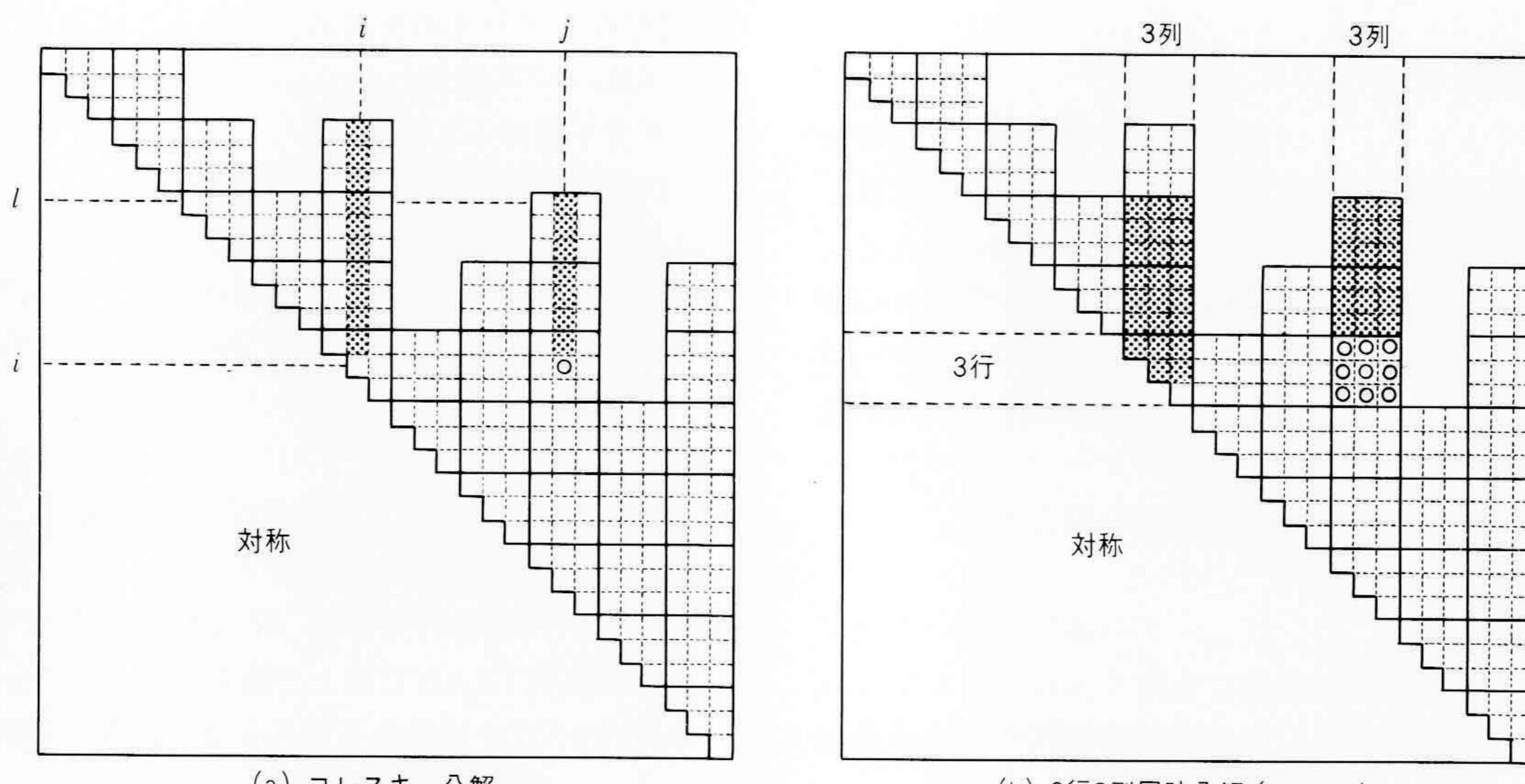


図2 三角分解の高速化 通常の分解(コレスキーフ分解)では1要素ずつ分解するが、SIMUSでは9個の要素が同時に分解される。

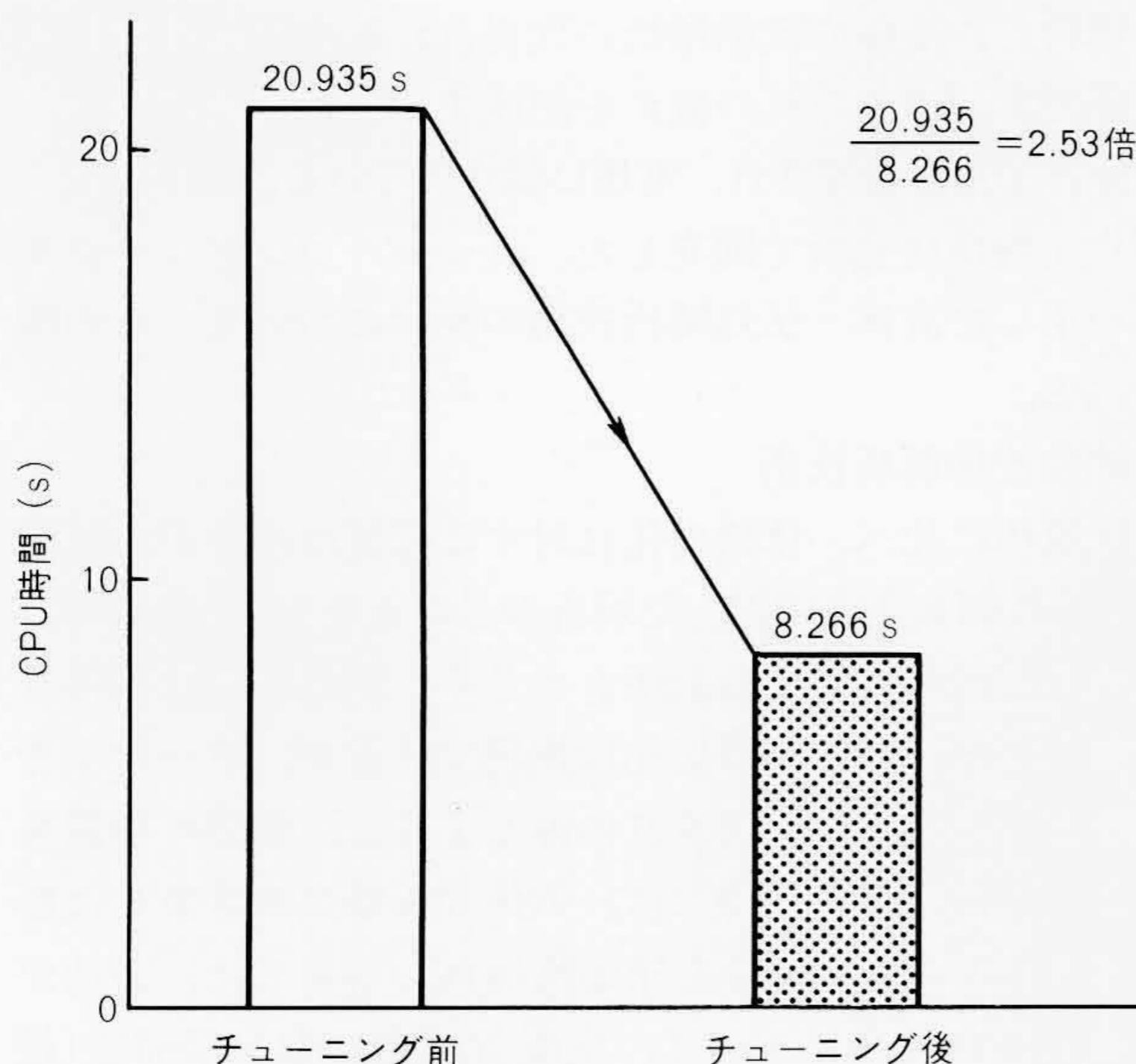


図3 三角分解の計算時間 3行3列同時分解によって、通常のコレスキーディクションに対して2.53倍の高速化を達成した。

問題に適用した結果、図3に示すように、2.53倍の高速化が得られた。この手法は三好²⁾、小国³⁾らによってその有効性が報告されている。

(c) 応力・ひずみの計算

変位法に基づく有限要素法では、節点変位からひずみを算出し、そのひずみから応力が計算される。応力、ひずみは要素内の8~27個の特定点に対して計算され、通常の方法ではベクトル長が6となる。SIMUSでは、計算の順序を変えて、ベクトル長が全要素数となるようにして高速化を図っている。

2.1.2 解析例

SIMUSの高速性能を評価するため、4ケースの例題解析を実施した。例題1と2は、図4(a)に示す立方体の一様引張り問題で、例題1は $4 \times 4 \times 4$ 分割、例題2は $10 \times 10 \times 10$ 分割である。例題3は貫通き裂を持つ平板の引張り問題(同図(b))、例題4はコーナー部に表面き裂を持つノズルの内圧負荷問題(同図(c))である。例題の節点数、計算時間及び処理速度比の関係を図5に示す。

2.2 流体解析

スーパーコンピュータの処理能力の向上と、それに歩調を合わせた解析アルゴリズムの発展とあいまって、流体・伝熱解析の分野では、従来ほとんど不可能と考えられていた大小様々なスケールの渦運動が混在する乱流の数値シミュレーションが、盛んに試みられるようになってきている。最近では、粘性流体の支配方程式である3次元非定常ナビエストークス方程式を、乱流渦の最小スケール程度の大きさに解析領域を分割して解くことによって乱流解析を行おうとする崭新的な試み(直接シミュレーション)も行われているが⁴⁾、比較的単純な流路内の流れの解析に数十万~数百万の格子点を用いる必要があるために、膨大な計算時間と記憶容量を要する現状であり、工学的に実用段階に入るまでにはまだ相当の時間を要するものと思われる。したがって、現段階では時間的に平均化された流れに着目し、これに対する乱流渦の影響をなんらかのモデル化を行って評価しようとする、乱流モデルによる解析が一般的であり、中でも、乱流エネルギーと粘性散逸率の二つの乱流統計量を用いて乱流場を記述しようとする二方程式乱流モデルによる解析が、比較的普遍性が高く、かつ経済的であるという理由からよく行われている⁵⁾。

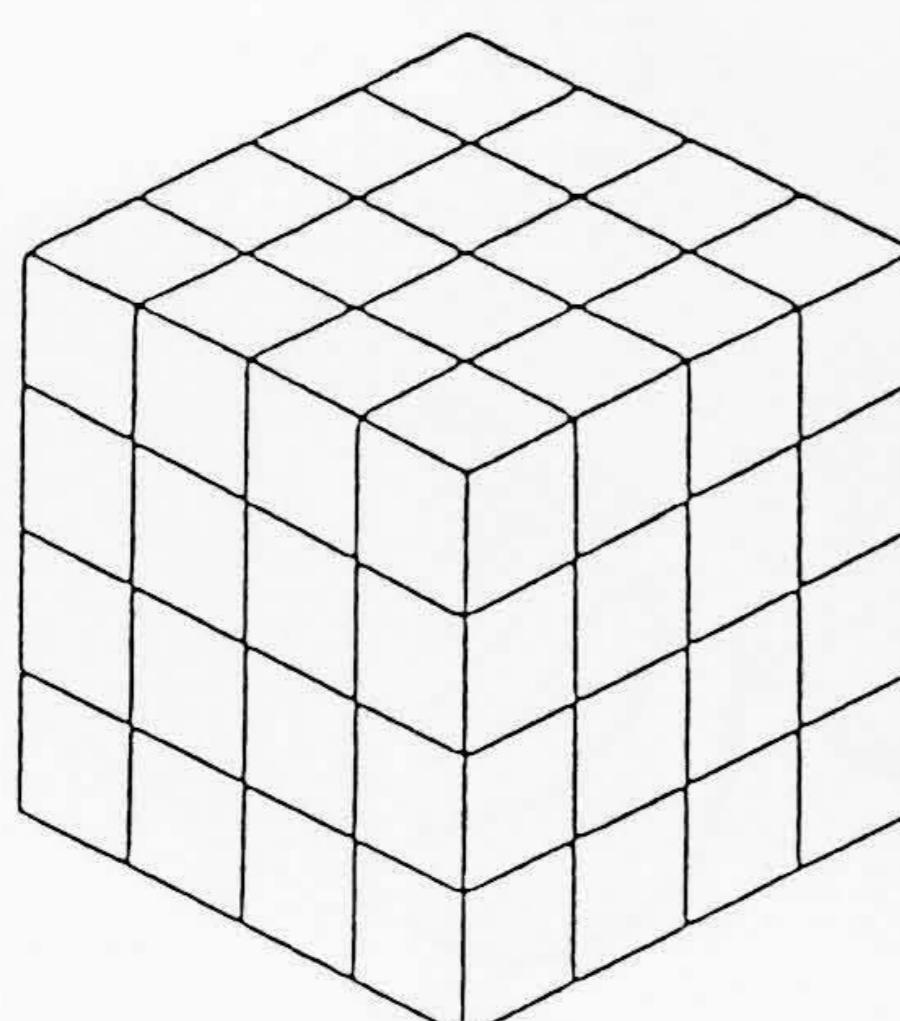
このような流体解析は、気体の高速流動問題に対する圧縮

例題1
節点数：425
要素数：64

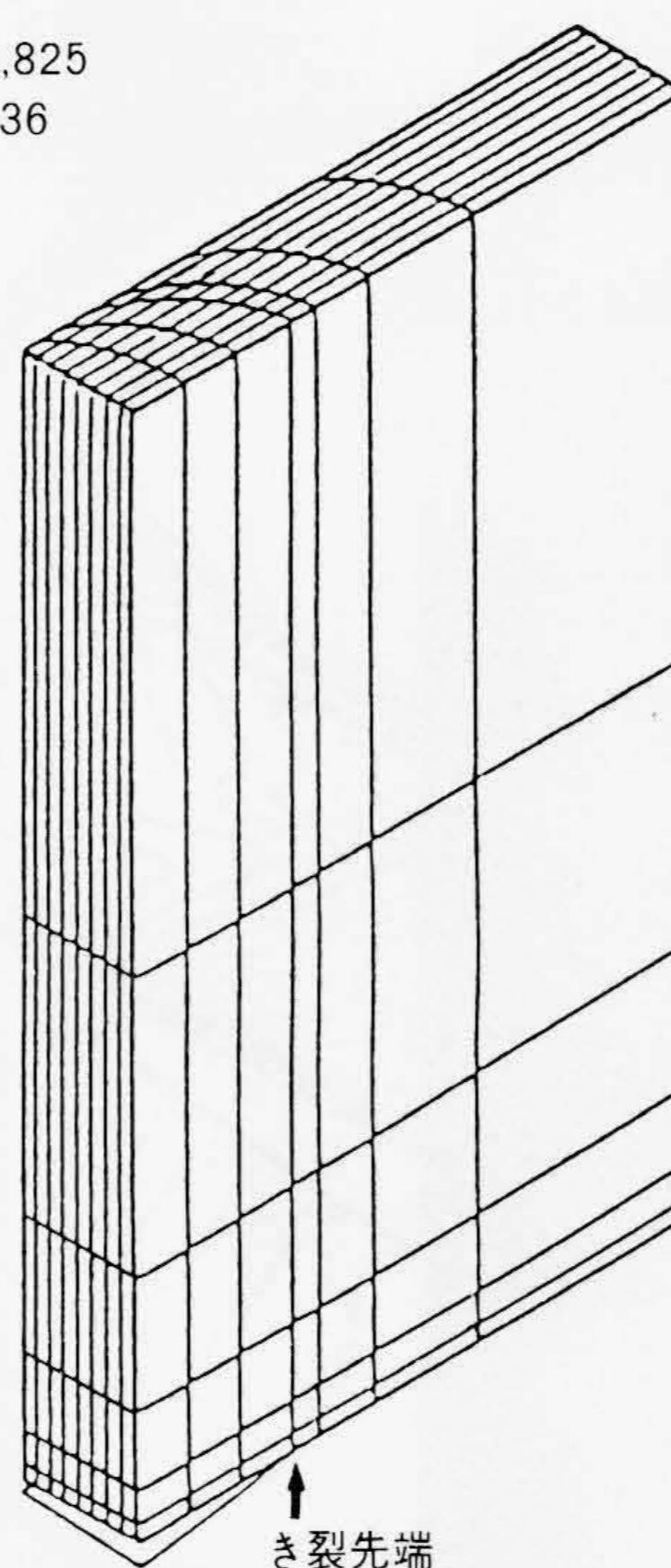
例題2
節点数：4,961
要素数：1,000

例題3
節点数：1,825
要素数：336

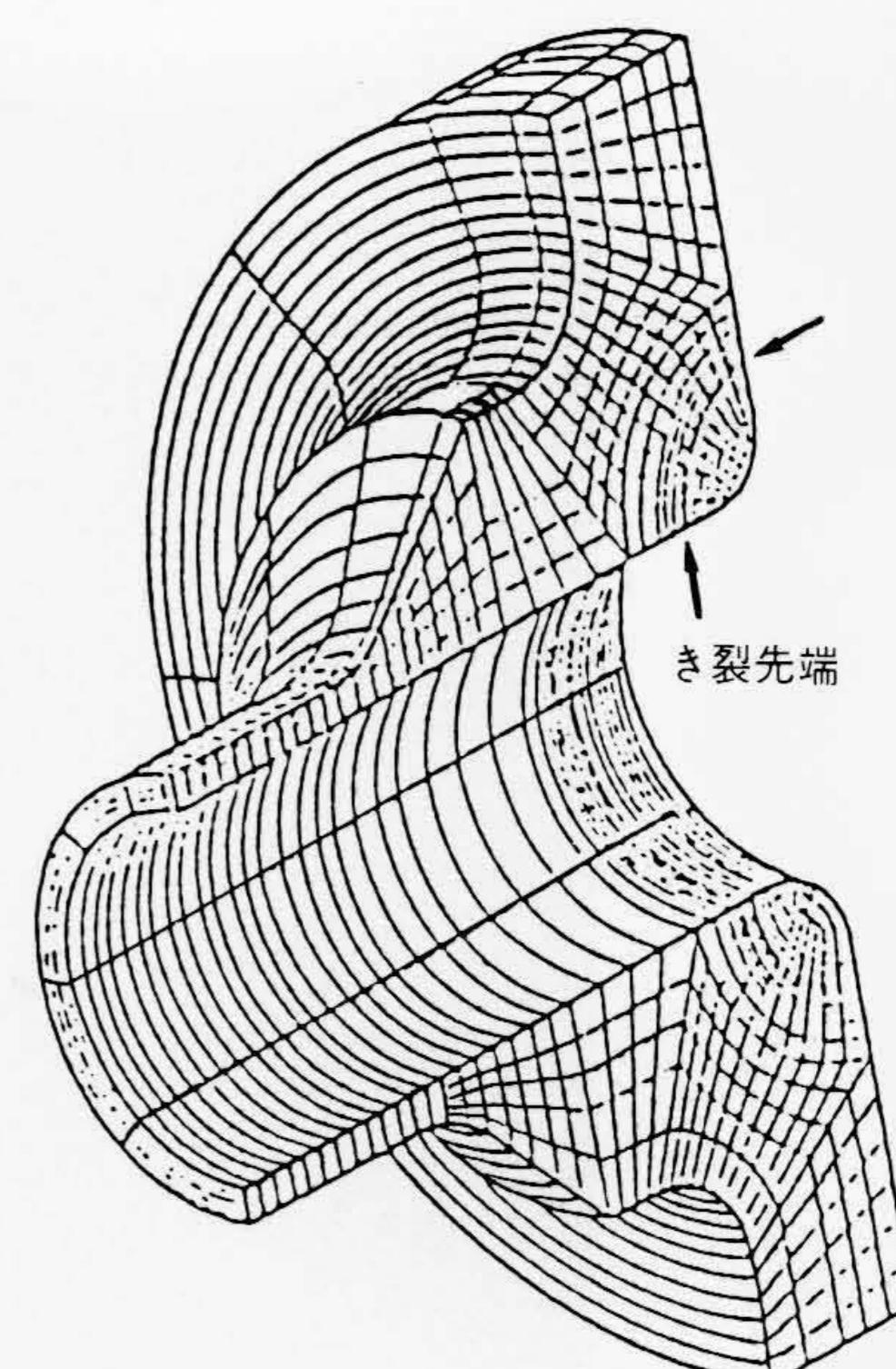
例題4
節点数：10,077
要素数：1,992



(a) 立方体(例題1,2)



(b) き裂を持つ平板(例題3)



(c) コーナーにき裂を持つノズル(例題4)

図4 例題解析に用いたモデル

3種類のモデルの解析を実施して、SIMUSの計算速度を検討した。

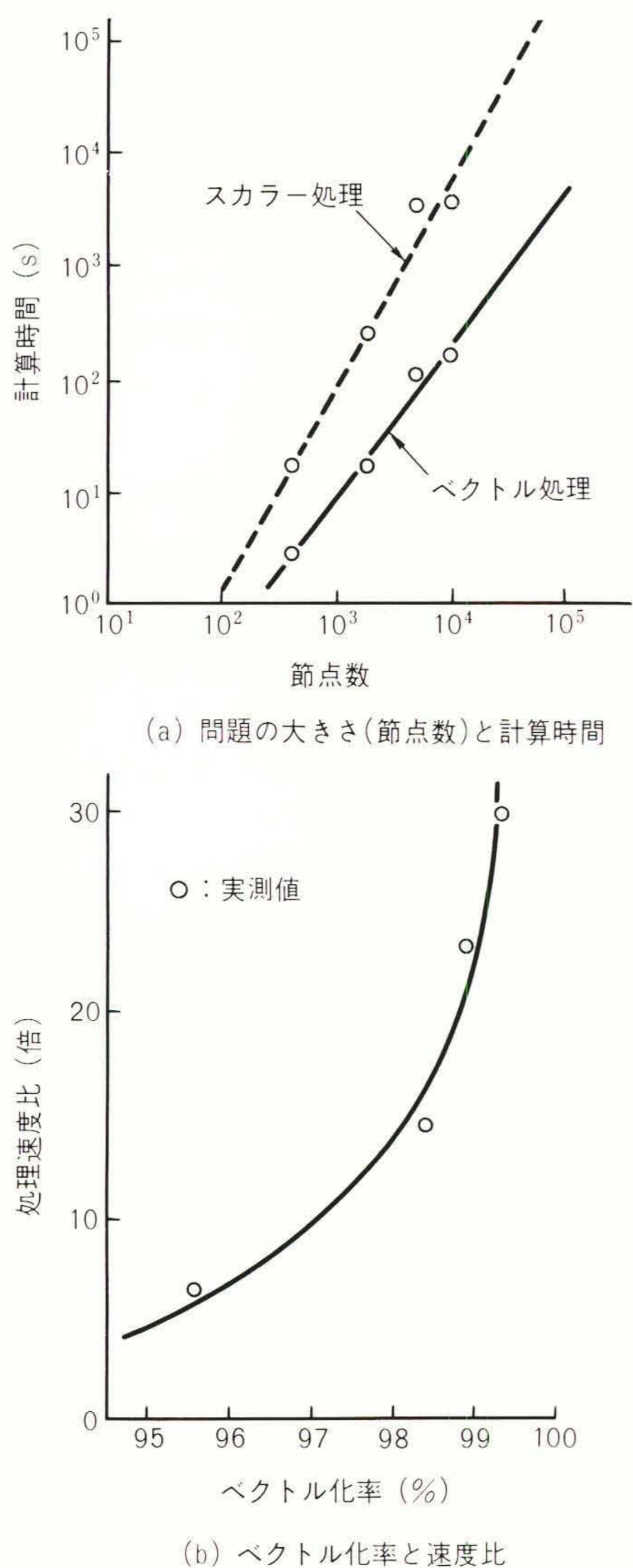


図5 例題解析におけるS-810の計算性能 4種類の例題について解析を実施したところ、計算規模が大きいほどベクトル化率、処理速度比が向上することが分かった。

性流れ解析と、液体の流動解析に代表される非圧縮性流れ解析に大別でき、それぞれの流れを記述する方程式系に対し、種々の解析手法が提案され、実用に供されている。以下では、日立製作所機械研究所で開発した、スーパーコンピュータを高度に利用した流体・伝熱解析技術の現状について、その概要を述べる。

(1) 圧縮性流体解析技術

気体は液体に比べ、体積変化に対する抵抗は小さく、圧力変動による体積変化を考慮した解析が必要となる。すなわち、低速気流の場合には流れの動圧も小さく、流れの状態に伴う圧力変動による気体の体積変化は無視できるが、タービンや圧縮機などの流体機械内の流れにみると、音速の数割を超えるような高速流の場合には、気体の圧縮性を考慮した解析が要求される。このような圧縮性流れの解析では、流速が音速を超えるか否かによって、支配方程式の型が双曲型(超音速流)と長円型(亜音速流)とに分かれるという数値計算上の問題点に遭遇する上に、流れには一種の不連続面(衝撃波)が存在し得るという困難な問題に直面する。この困難を克服するために、Mac Cormack法やBeam-Warming法など、種々の数値解析が提案されているが、日立製作所では、流体機械のような複雑な形状を持つ流路内の流れ解析に適用できるように、Body-fit型曲線座標系を導入したコントロールボリューム法という空間離散化手法を独自に開発し⁶⁾、タイムマーチング法を用いて、蒸気タービンや遠心圧縮機内の乱流解析(乱流モデルは二方程式モデル)を行い、流路形状や翼形状の詳細設計に活用している。

図6は、蒸気タービンの二次元翼間乱流解析結果を、シュリーレン写真による流れの可視化結果と比較した図である。また図7、8は、蒸気タービンの3次元段落解析での要素分割図と解析結果の例である。

本解析にはS-810/20を用いており、HITAC M-200Hによる解析に比べ16.2倍の高速化を達成している。スーパーコン

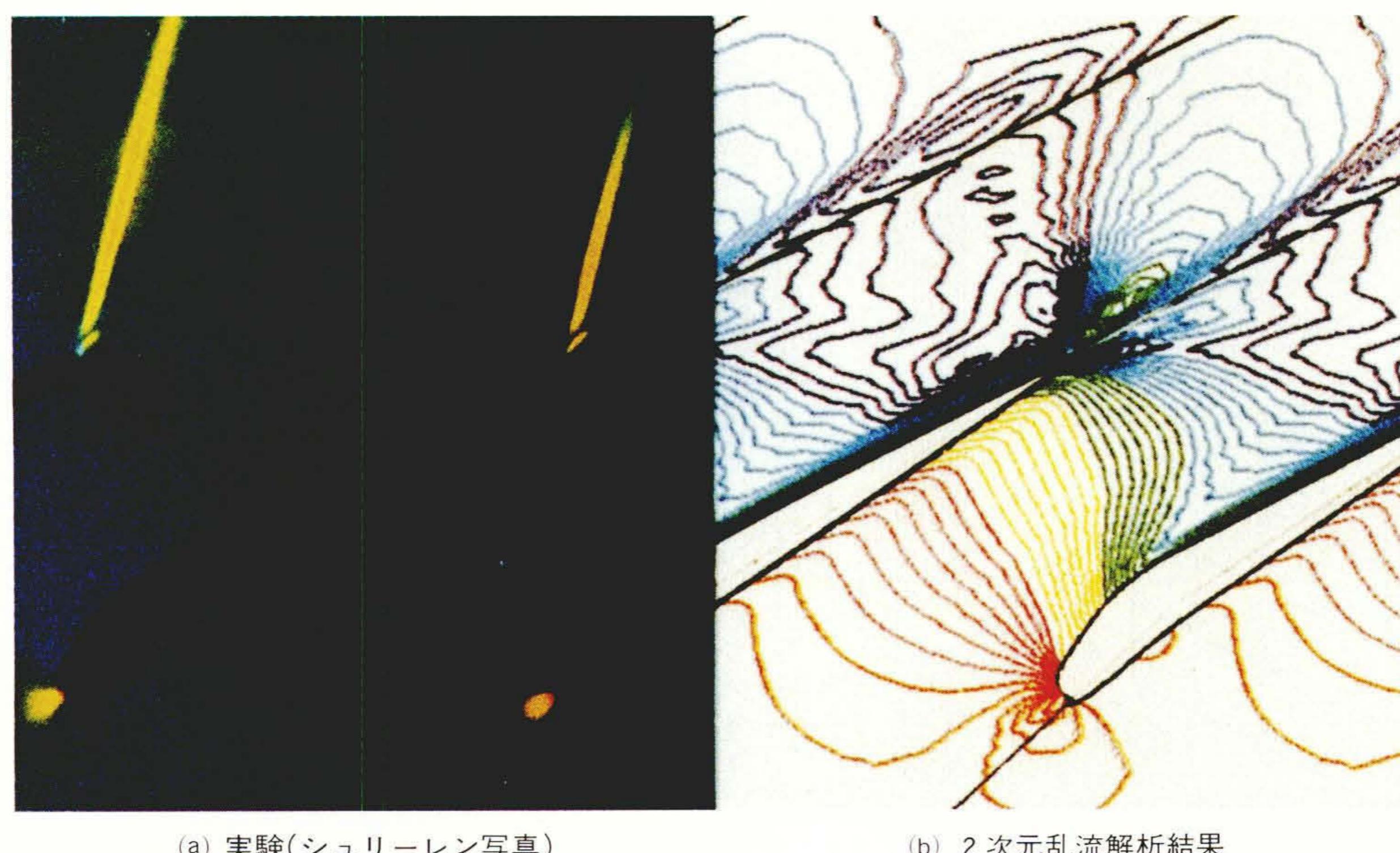
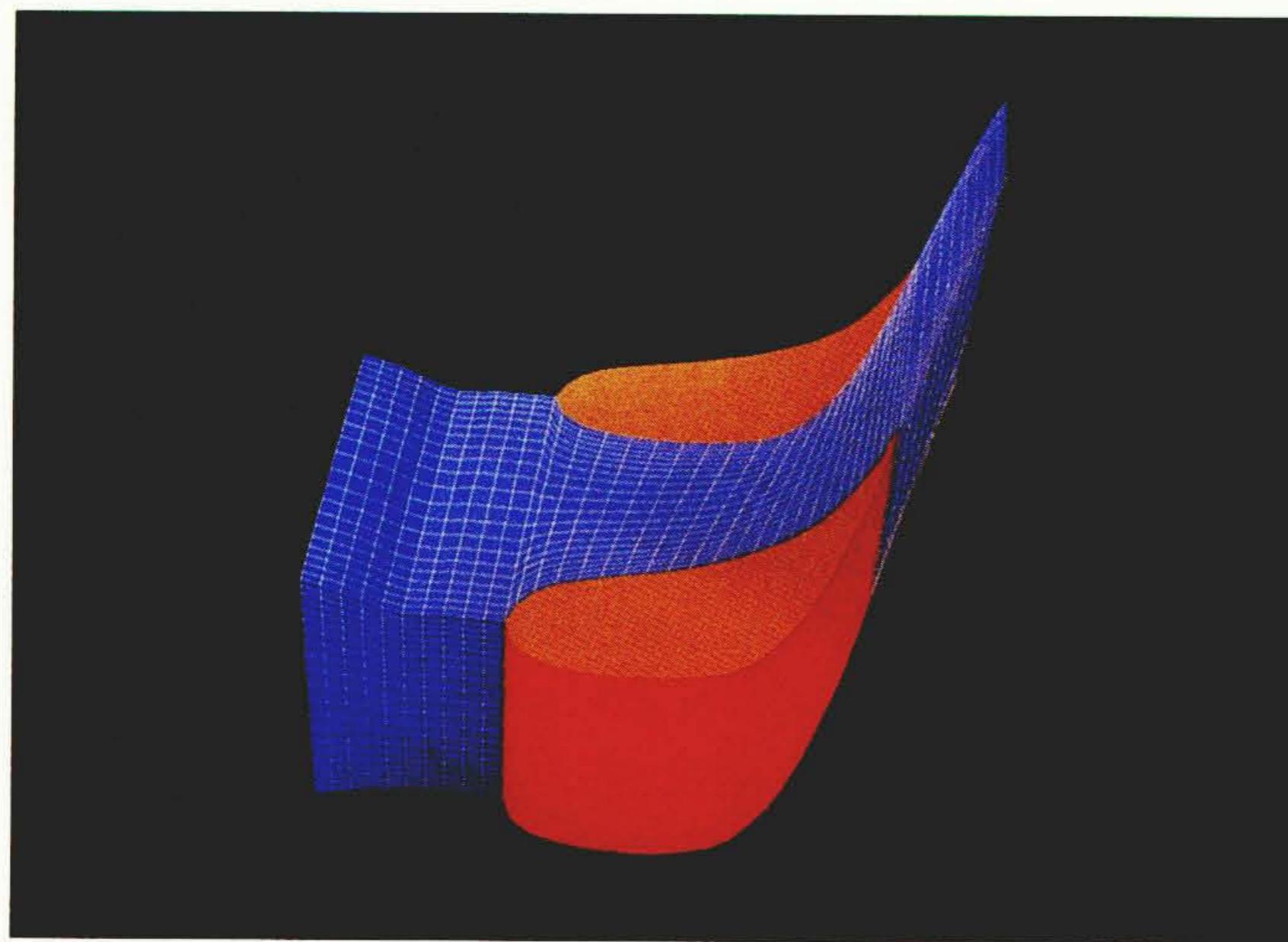
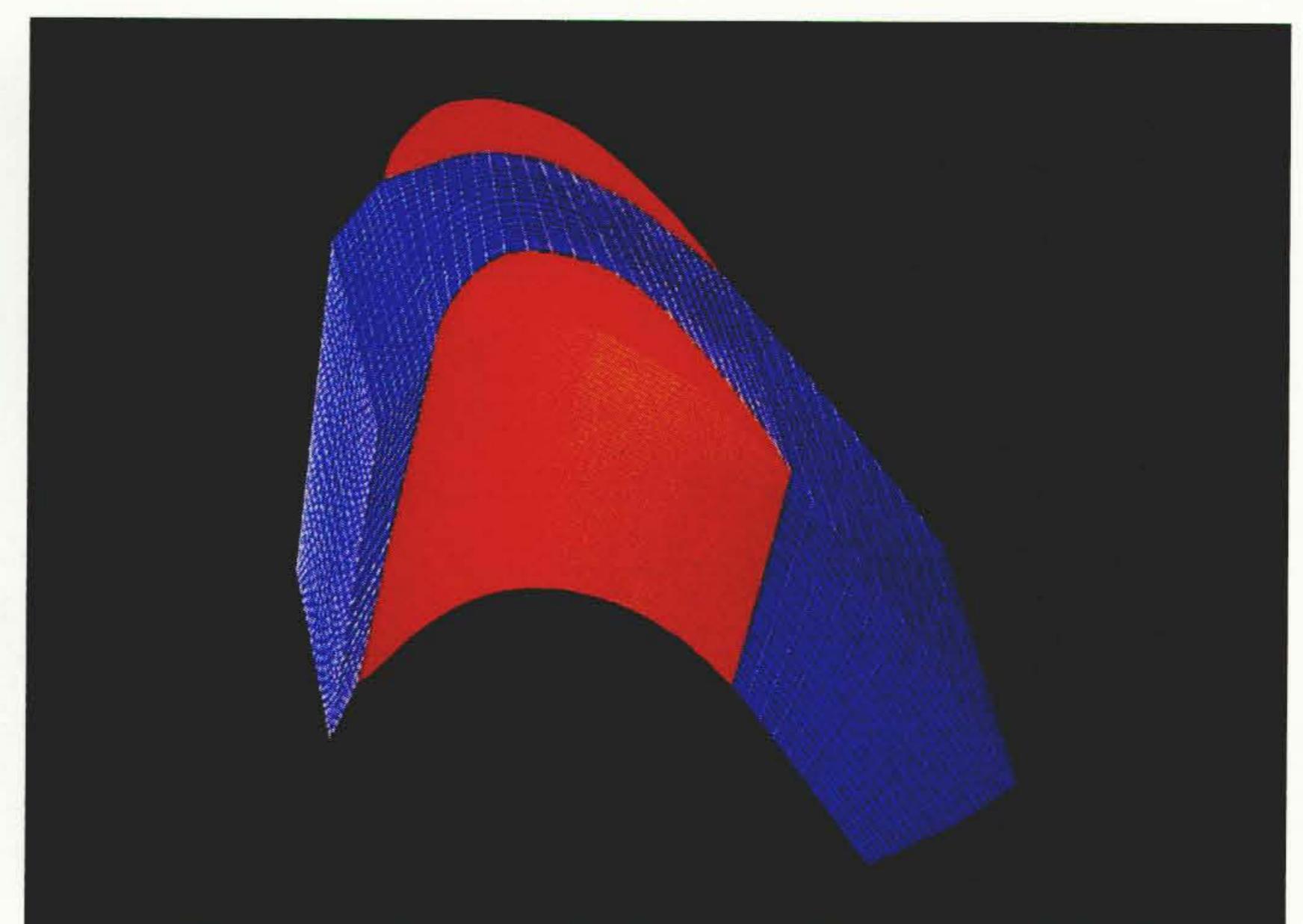


図6 蒸気タービンの翼間の流れ 実験でとらえられた衝撃波(黄色い部分)が、解析結果にも現りようとしている。



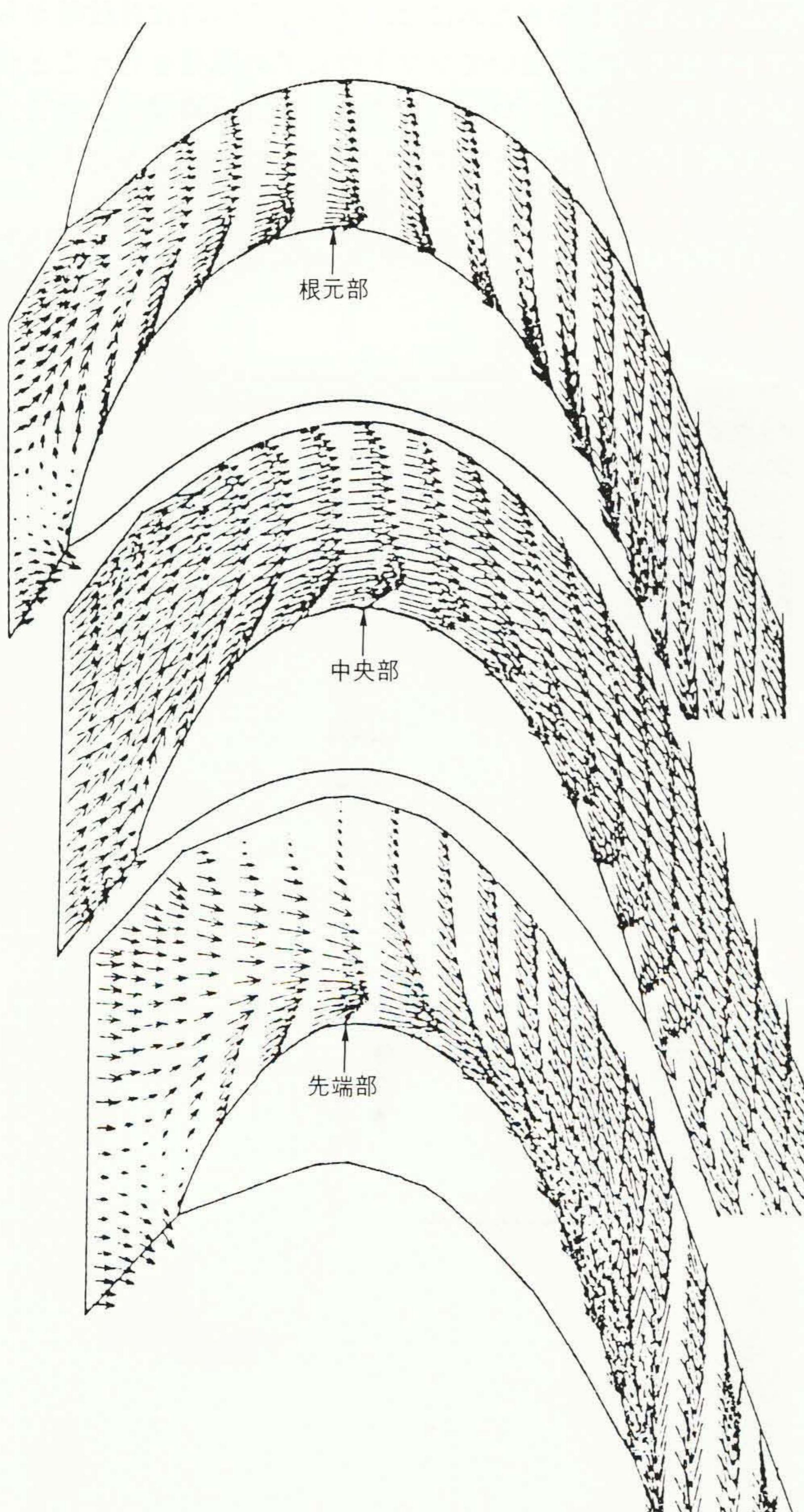
(a) 静翼部



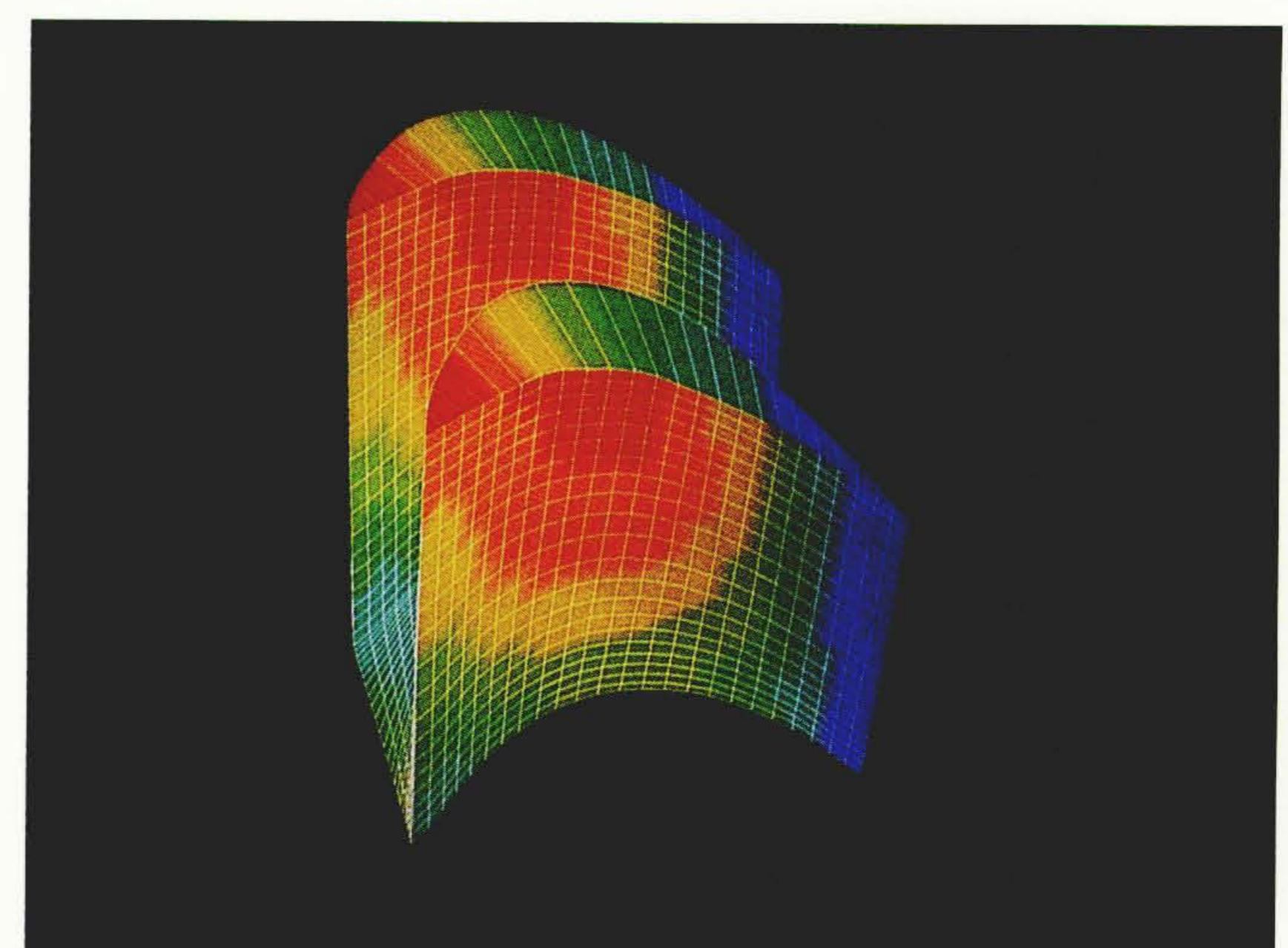
(b) 動翼部

図7 蒸気タービンの3次元段落解析の要素分割

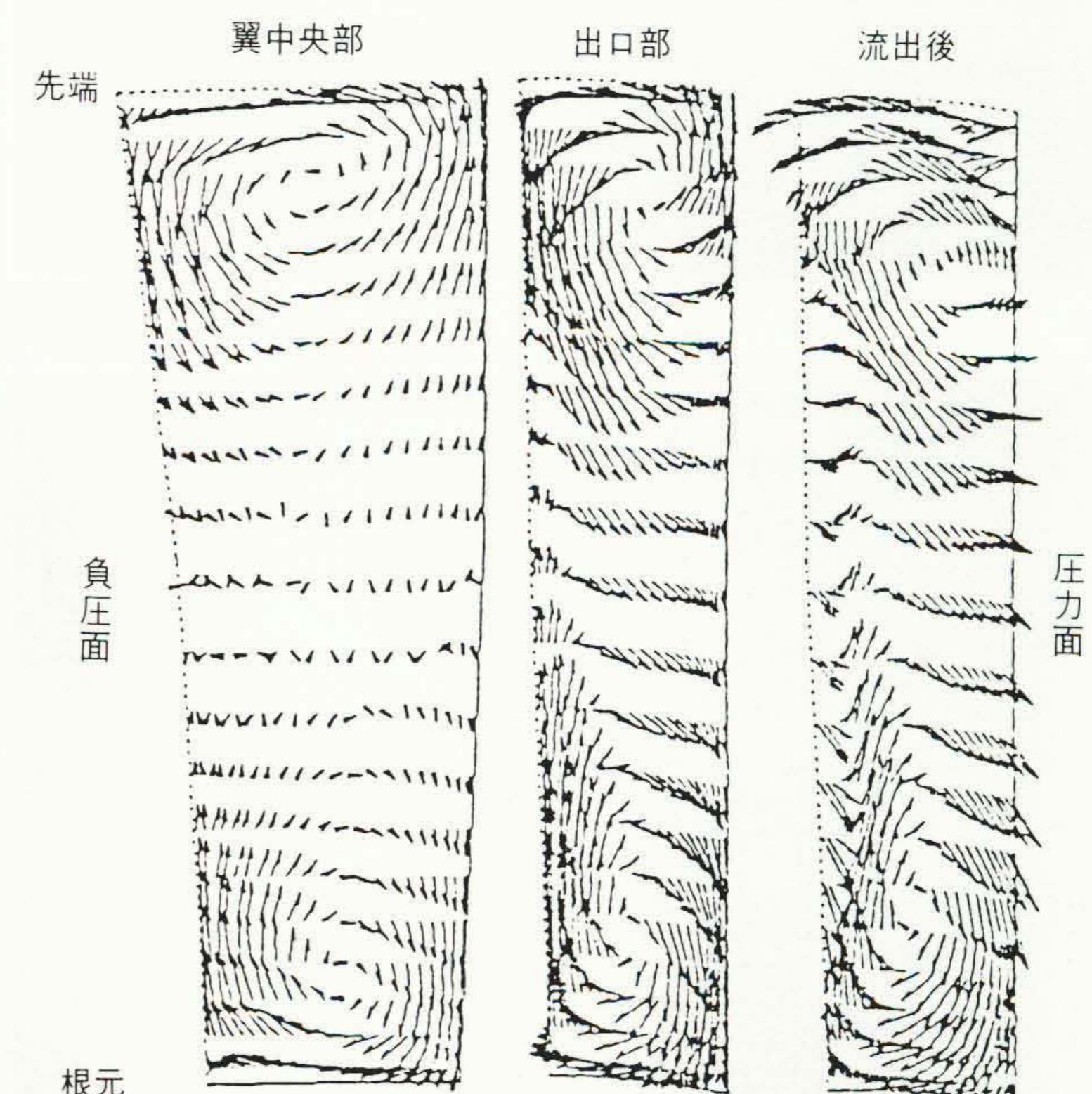
静翼, 動翼の間の空間を六面体要素に分割し, 周期境界条件を用いて解析した。



(a) 半径方向断面の速度ベクトル



(c) 翼面上の圧力分布



(b) 流れ方向断面の速度ベクトル

図8 蒸気タービン翼間の流れの解析結果(動翼)

2次元解析では分からなかった複雑な流れを生じていることが、3次元解析で明らかになった。

ピュータの出現によって、図8に示すように境界層流れや二次流れなどの複雑な流動現象を、従来に比べて格段に詳細に把握することが可能となっており、今後更に解析技術の高度化が進めば、数値シミュレーションによって、より実流状態に近い段落内の流れを予測することができ、流体機械の詳細な流体力学的設計を行うことが可能となる。この実現のために、計算機能力のよりいっそうの増強と解析上のノウハウの蓄積を含めて、圧縮性流れの数値シミュレーション技術のいっそうの充実とが、車の両輪となって進んでゆくことが強く望まれる。

(2) 非圧縮性流体解析技術

流体解析は、航空機の空力設計の分野で発達してきたものであり、差分法による解析が主流を占めているが、差分法による解析では解析領域を直交格子状に分割して解析することを前提としており、複雑な形状を持つ流路内の流れに適用することはできない。これに対し有限要素法は、流体解析への応用の歴史は浅いものの、任意形状流路内の有力な流れ解析法として、差分法による解析に比肩できる実用性を持っている。日立製作所では、流体機械や空調機、コンピュータやその周辺機器など複雑な形状を持つ流路内の流れ解析に最適な有限要素法に着目し、他に先駆けて二方程式モデルによる実用的なはん(汎)用乱流解析プログラムの開発を行い、クリー

ンルーム内の流れ解析などへの適用を図ってきている⁷⁾。

また最近では、これまで開発を進めてきた定常流解析技術を更に発展させ、流体関連振動解析や空調制御時の過渡温度解析などへの応用を目的として、非定常流の挙動を高精度に解析可能なアルゴリズムの開発を行う一方、スーパーコンピュータの能力を最大限に活用するソフトウェアの開発に取り組んでいる⁸⁾。本解析プログラムは、差分法による粘性流解析の代表的な解法のひとつであるSMAC法に準拠した有限要素法的定式化に基づいており、前述の高精度非定常流解析アルゴリズムの開発によって、数値的に不安定になりやすい高速な流れのシミュレーションも、安定かつ精度よく行うことができる特徴を持っている。さて、このような有限要素法による粘性流解析では、同一種類の演算を全要素に対して、あるいは全節点に対して行う場合が多く、ベクトル長が大きくとれるために本質的にスーパーコンピュータ向きの解法であるということができる。しかし、ベクトルプロセッサの性能を最高度に発揮させるためには、プログラムの設計段階からベクトル化を念頭においてソフトウェアの開発を行うことが必要であり、本解析プログラムでは、全計算時間の大半を占める時間反復の計算ループに関して100%のベクトル化を行っている。

解析結果の一例として室内暖房開始時の気流の状態を図9

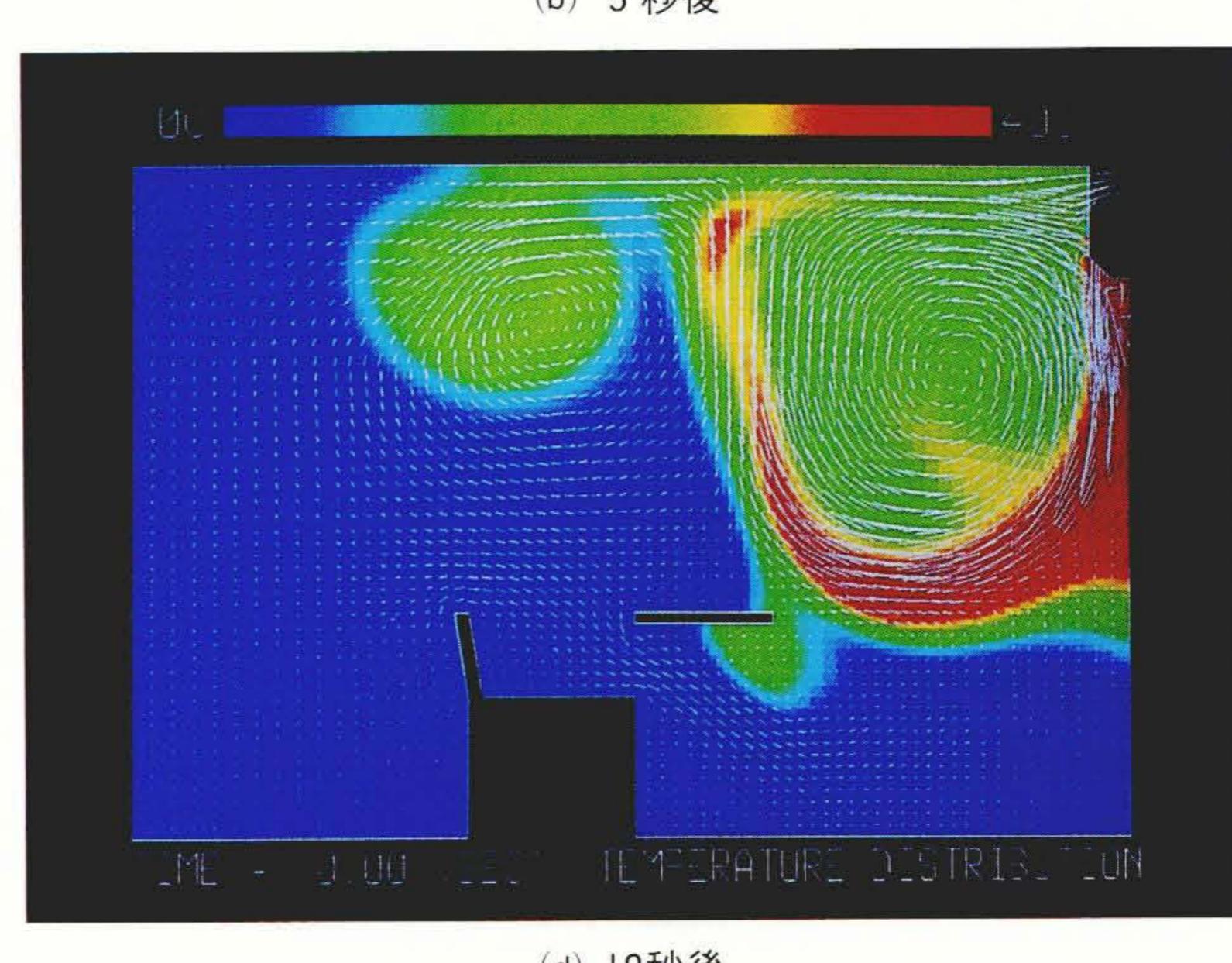
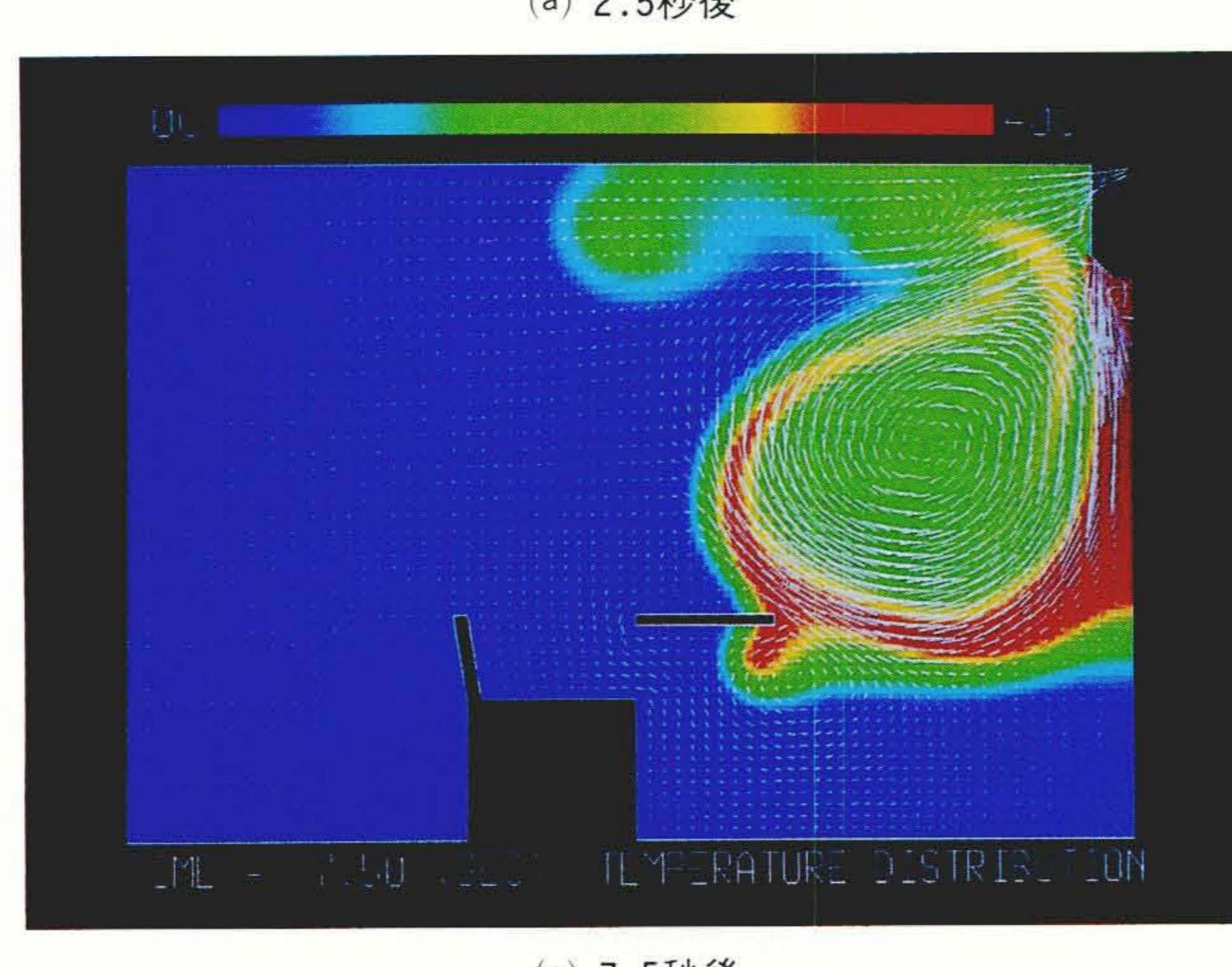
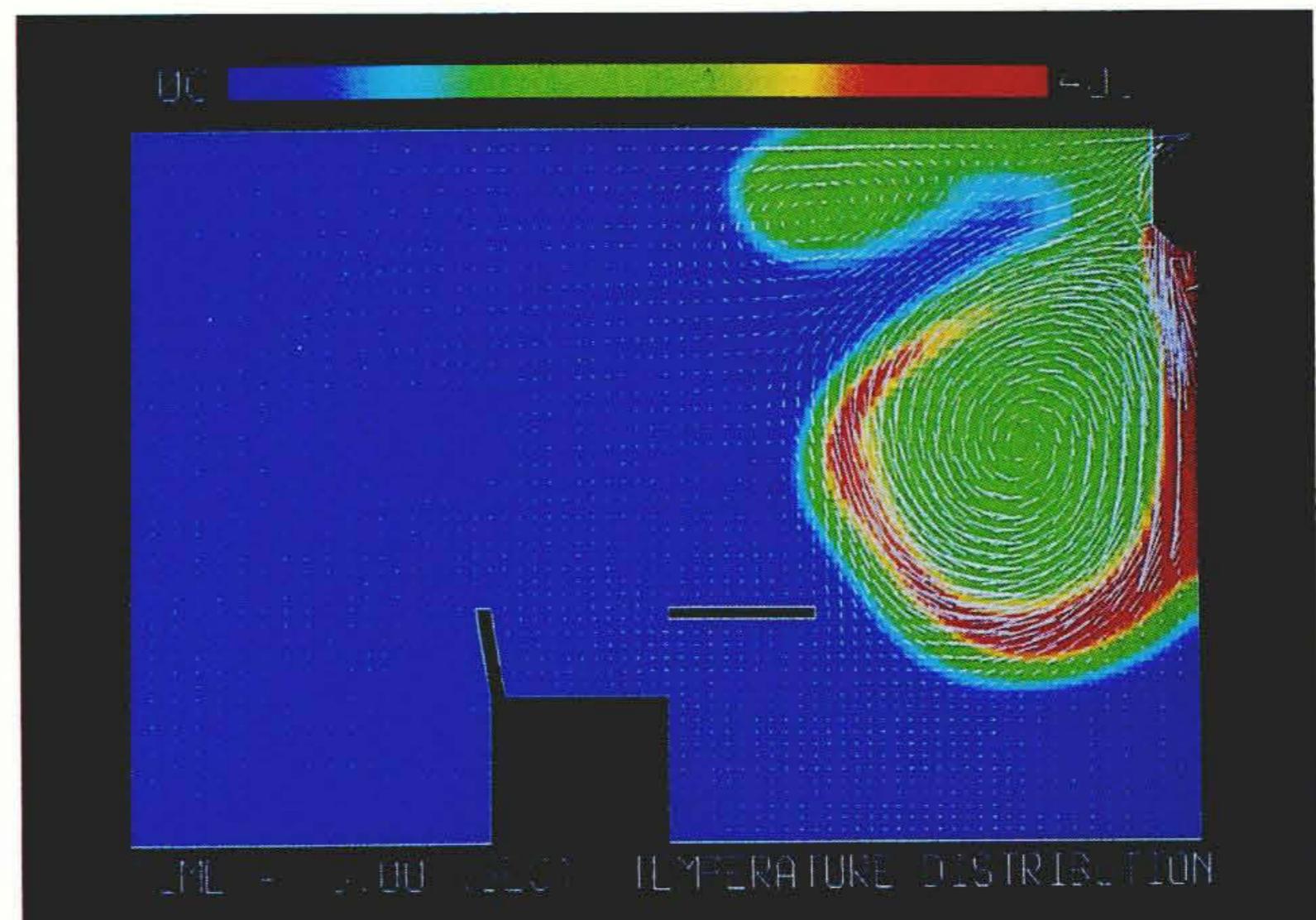
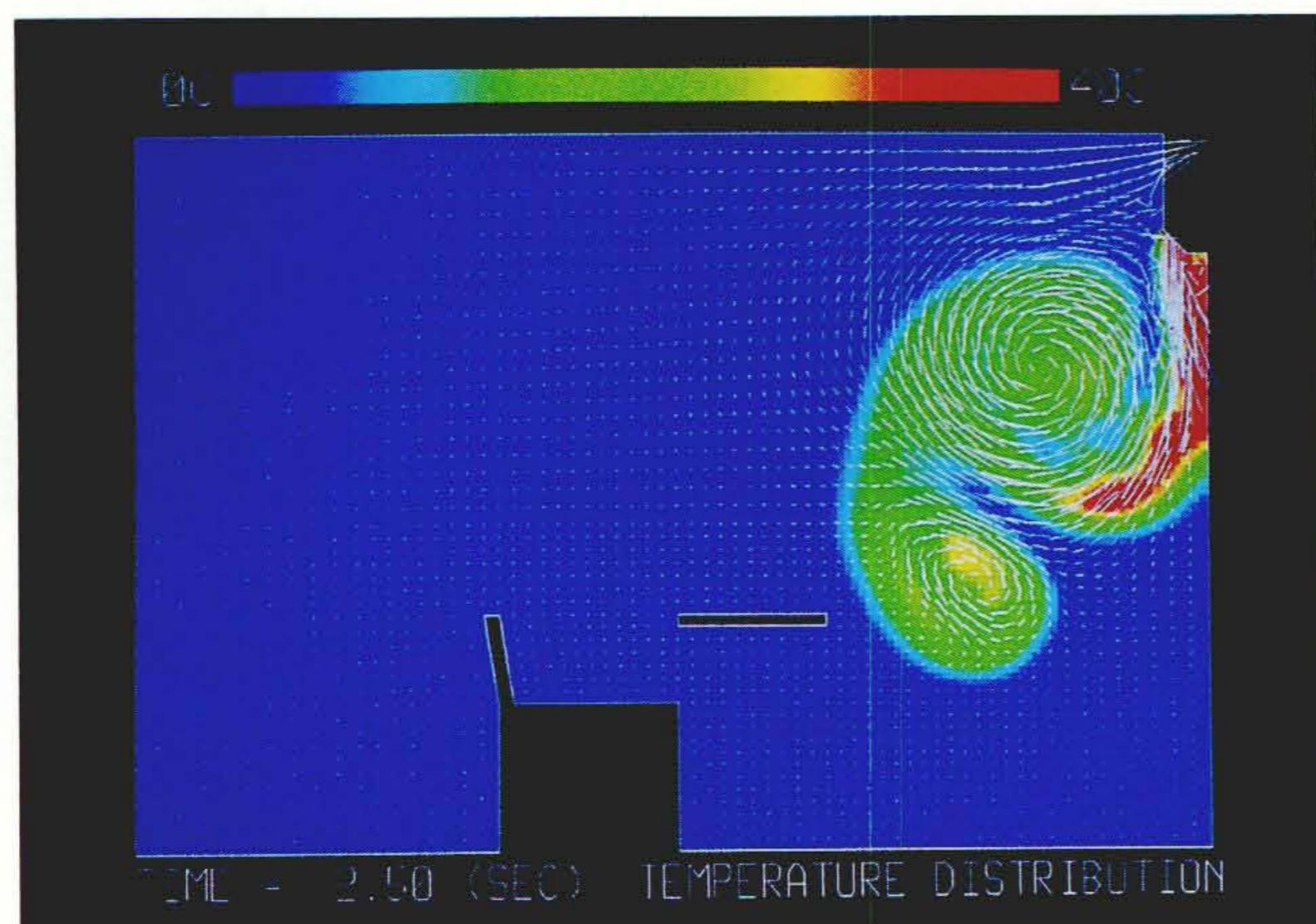


図9 室内暖房時の気流シミュレーション 暖房開始時の暖気の広がり方と、温度分布の変化が解析された。

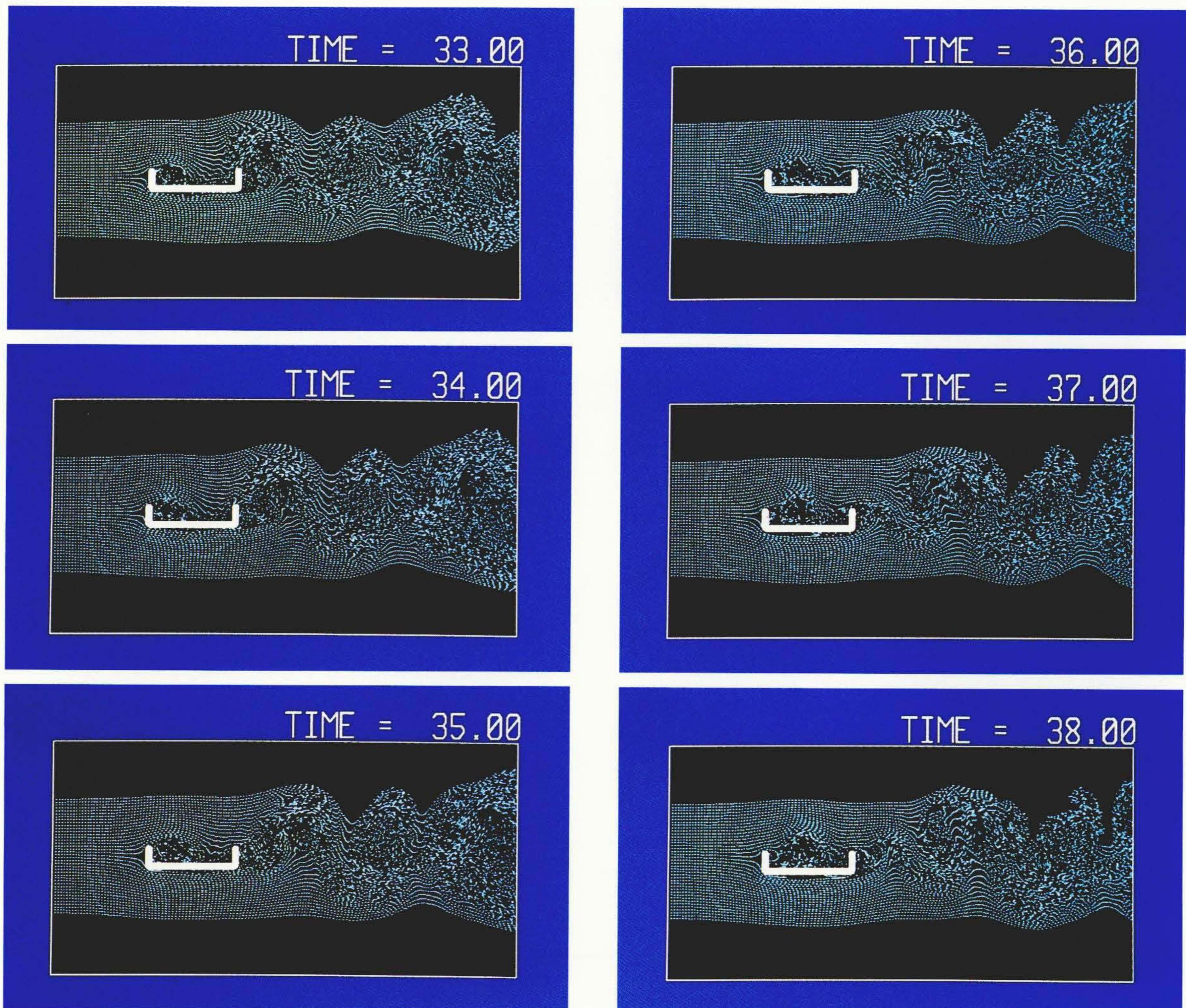


図10 磁気ディスクヘッドのロードアーム周りの流れ ロードアーム周りの気流の状態が刻々変化する様子が、アニメーション表示によって手にとるように分かる。

に、磁気ディスクヘッドのロードアーム周りの気流が時間の経過とともに変化する様子を図10に示す。これらの解析に要する時間は、いずれも数分のオーダであり、スーパーコンピュータを用いることによって、時々刻々変化する流れの状態や温度分布、あるいは流体力に関する定量的な評価や、コンピュータグラフィックスを利用した流れや温度場の可視化を短時間で行うことが可能となり、製品の設計・開発を行うまでの貴重な資料を得ることができる。

3次元流体解析に関しては、現状では長大な計算時間を必要とし、製品の設計段階で手軽に利用できる状況にはないが、ソフトウェアの進歩とハードウェアの発展と共に継続してゆくことは確実であり、近い将来、プリ及びポストプロセッサとの有機的結合による数値シミュレーションシステムが、製品の設計・開発に多大の貢献を果たすであろうことは容易に予測できる。

3 機械系CAEシステム⁹⁾

スーパーコンピュータの出現によって、上述のように計算時間が著しく短縮され、大規模かつ複雑な現象のシミュレーションが可能になってきた。しかし、準備すべき入力データの量や出力される情報量は解析の規模とともに増大する傾向

にあり、データ作成作業及び出力整理作業の増大が実用化へのネックになっている。

入出力作業を省力化し、かつ入力した形状データを各種解析に共通に利用することによって、機械製品の設計過程を支援しようとするのが機械系CAEシステムである。日立製作所のシステムの構成図を図11に示す。

図11中の解析シミュレーションシステムには、前章に述べたようなスーパーコンピュータを用いたプログラムや、その他のはん用解析プログラムが組み込まれている。形状モデリングシステムの「幾何モデリング」では、「図形処理」で作られた図12(a), (b)のような図面データを用いて同図中に示すような操作で3次元面を生成する。面で囲まれた領域をソリッド(中実体)にすることもできる。このようにして3次元体が定義できると、「解析モデリング」ではワンタッチ(メッシュの基本寸法又は総要素数を入力するだけ)で図13のようなメッシュを自動生成する。

出力についても、前章に示したようなカラー表示やアニメーション表示を用いて、ユーザーの解析結果の理解を助けたり、各種のグラフ図を用いて解析対象の特性を定量的に示すことによって、ユーザーの机上に出力リストの山を築くことを防いでいる。

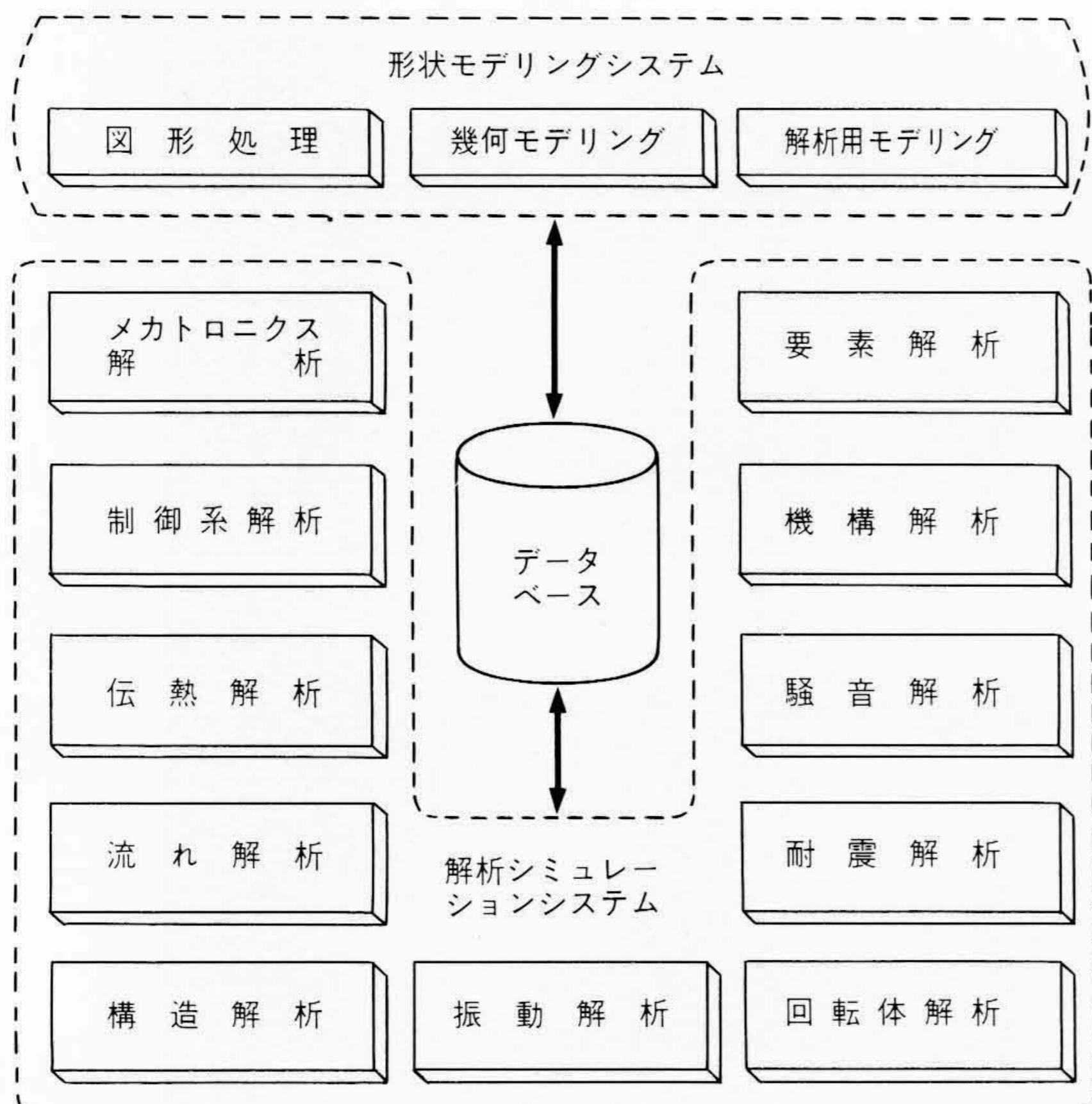


図11 機械系CAE(Computer Aided Engineering)システムの構成
機械の形状を入力する形状モデリングシステムと性能、信頼性などの解析シミュレーションシステムとをつなぎ、設計の効率化を図っている。

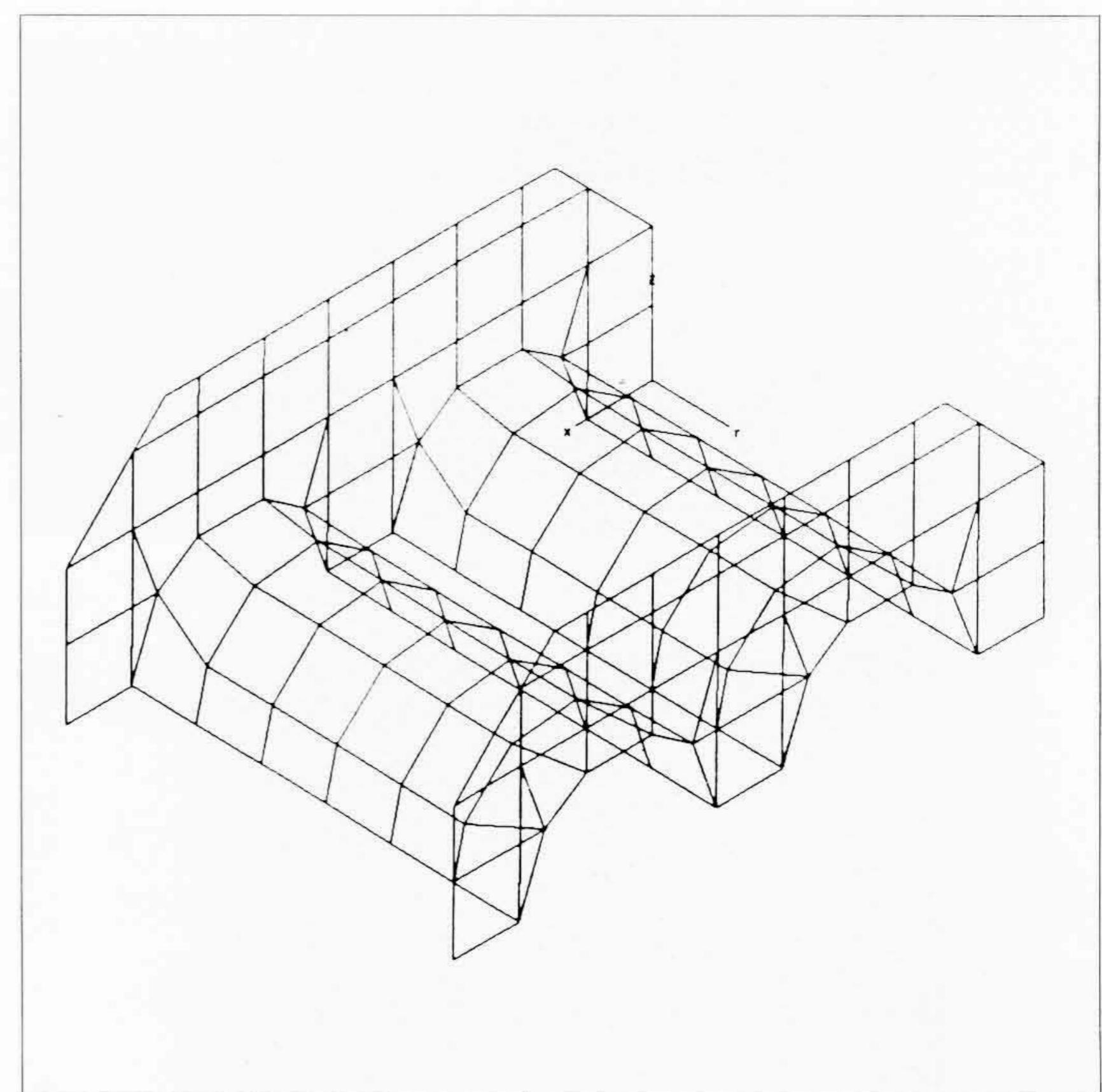


図13 有限要素メッシュの自動分割 三角と四角の混合メッシュによって、境界線の凹凸を忠実に表し、面と面との結合線上でも整合性のとれた有限要素メッシュが得られる。

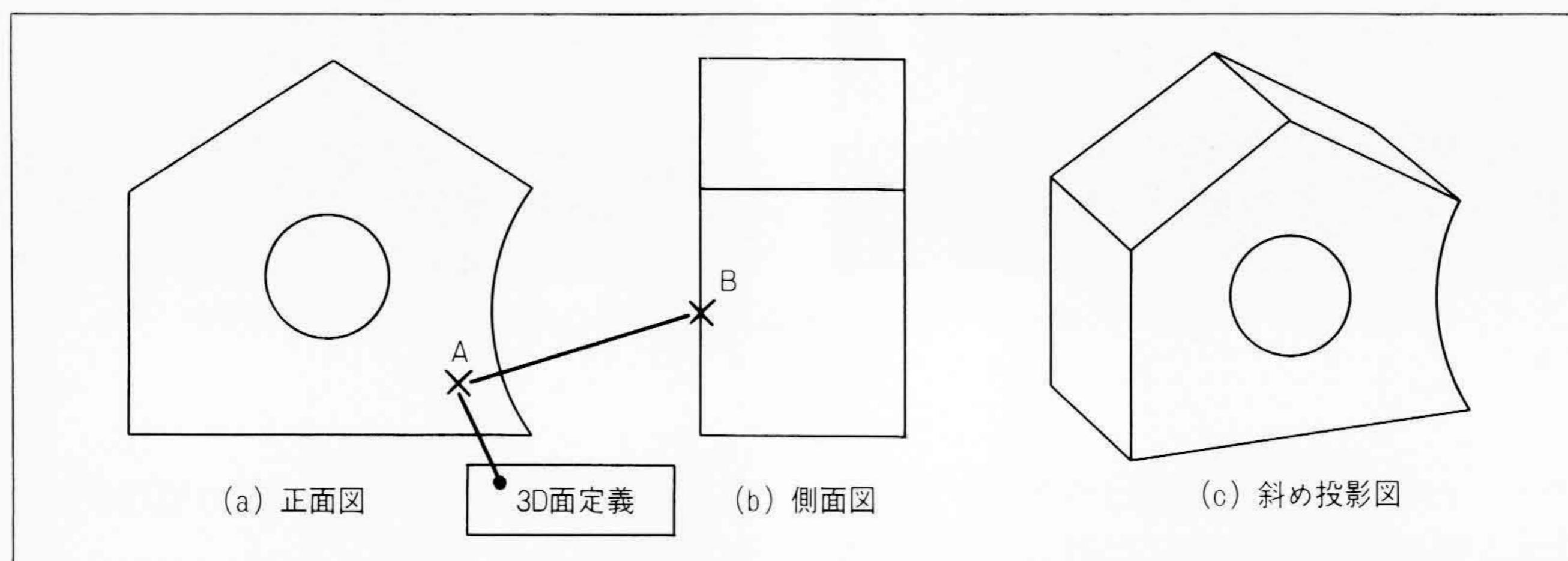


図12 面の3次元化操作 正面図のA点と側面図のB点を指示するだけで、穴を持つ面が3次元化される(斜め投影図の陰影面)。

4 結 言

スーパーコンピュータは、機械系解析シミュレーションの分野に大きな可能性をもたらした。この可能性を実用化に結び付けるためには、前章までに述べたような高速化のための種々の工夫や、入出力作業の省力化のためのシステム作りが必ず(須)である。特に、実用的なCAEシステムの開発は解析シミュレーションシステムを生かすために最も重要な課題である。今後も更に高速・高精度化、システム化に向かって研究を進め、機械製品の性能・信頼性向上に寄与していきたい。

参考文献

- 1) 斎藤, 外: スーパーコンピュータ用高速構造解析プログラムの開発, 機械学会論文集, 87-0019B(昭62-11)

- 2) 三好, 外: スーパーコンピュータによる3次元表面き裂の有限要素解析, 機械学会論文集, 52, 477A, 1348~1351(昭61-5)
- 3) 小国, 外: スライス法のベクトルプロセッサへの適応性, 情報処理学会論文誌, 27, 2, 148~154(昭61-2)
- 4) T. Kawamura, et al.: Computation of High Reynolds Number Flow around a Circular Cylinder with Surface Roughness, AIAA paper, 84-0340(Jan. 1984)
- 5) 大路: 乱流モデルとその応用, 航空宇宙学会誌, 28, 313, 48~56(昭55-2)
- 6) 鹿野, 外: 3次元翼間圧縮性乱流解析, 機械学会論文集, 51, 462B, 461~469(昭60-2)
- 7) 池川, 外: 有限要素法によるクリーンルーム内の乱流解析, 第7回流体力学における数値解析法シンポジウム報文集, 205~212(昭61-8)
- 8) 加藤, 外: 有限要素法による非圧縮性粘性流体の高精度解析, 第1回計算力学シンポジウム報文集, 111~118(昭62-8)
- 9) 大西, 外: 機械系CAEシステムの開発, 日立評論, 69, 2, 125~132(昭62-2)