

熱流体解析へのスーパーコンピュータの応用

Application of Supercomputers to Thermal Hydraulic Analysis

熱流体の数値シミュレーションで問題となる計算時間を短縮するために、スーパーコンピュータに適するアルゴリズムを検討し、その効果を定量的に評価した。その結果、ベクトル計算で、計算時間の大半を占める圧力計算に、リストベクトル^{※1)}を用いたICCG法^{※2)}を適用することにより、スカラー計算に対して10～30倍高速化できることが分かった。これにより、原子炉や空調機器などの熱流体解析の計算時間が短縮され、機器設計の効率と信頼性を向上させることができた。

大塚雅哉* Masaya Ôtsuka

山川正剛* Masanori Yamakawa

1 緒 言

熱流体の数値シミュレーションは、近年の数値解析技術の進歩によって、各種機器の伝熱流動評価に広く利用されるようになってきた。例えば、原子力のような大形機器の製品開発では、模型実験に代わる数値シミュレーションによる実機流動評価が重要な役割を占めてきている¹⁾。また、空調機器などの量産製品に対しても、運転条件や製品形状の最適化に、数値シミュレーションが活用されてきている²⁾。しかし、このような複雑な流路内の3次元解析や非定常解析などでは、膨大な計算時間を必要とするため、機器設計の効率化を図るためには、計算時間の短縮が必要不可欠である。特に、強い非線形性を伴う流体解析では、他の科学技術計算に比べて高い空間分解能を必要とするため、計算時間の短縮が大きな課題となっている。

これに対し、必要な計算を並列処理して高速演算を図ることができるスーパーコンピュータが登場し、従来のスカラー計算機に比べて、飛躍的に計算時間を短縮することが可能となってきた。ここで、HITAC S-810システムなどのスーパーコンピュータでは、多重パイプライン方式のベクトル演算方式を採用して、高速処理を実現している。したがって、このようなスーパーコンピュータの性能を最大限に引き出すためには、ベクトル演算機能を有効に活用できるソフトウェアの開発が必要である。

本論文では、このような背景のもとに、熱流体の数値シミュレーションでの計算時間を短縮することを目的として、ス

ーパーコンピュータのベクトル演算機能に適するアルゴリズムを検討し、計算時間短縮に対する効果を定量的に評価した。以下、スーパーコンピュータを熱流体解析に適用する際の計算アルゴリズムの最適化について述べるとともに、実際の熱流体解析に適用した結果について報告する。

2 熱流体の数値解析手法

非圧縮性を仮定した熱流体に対する基礎方程式は、質量保存則、運動量保存則及びエネルギー保存則で記述される。これらの基礎方程式に対する独立変数としては、一般に流速、圧力、温度などがとられる。ここで、流速に対しては、運動量保存則と質量保存則を同時に満たす必要があるため、質量保存則の代わりに圧力に対するポアソン方程式を導入する。この場合、流速は運動量保存則、圧力は圧力に対するポアソン方程式、温度はエネルギー保存則から求めることができる。

これらの方程式のうち、運動量保存則とエネルギー保存則は、時間の一次微分項を含むため、初期値問題としてこれを時間積分することにより、解を求めることができる。つまり、流速と温度の計算は、時間に対する常微分方程式の時間積分に帰着する。一方、圧力に対しては、時間微分項を含まない境界値問題としてポアソン方程式を解くことにより解を求めることができる。したがって、圧力に対しては、ポアソン方程式に対する行列方程式を解けばよい。ポアソン方程式から得られる行列方程式を解く方法としては、共役こう配法による反復計算が有効であることが報告されている³⁾。特に、行列が対称行列である場合には、ICCG法(Incomplete Cholesky Conjugate Gradient Method)の適用が有効である^{3), 4)}。

図1に、ICCG法を用いて流れ場を計算する場合の解析フローの一例を示す。この解析フローでは、時刻に対する計算ループの中で、まず流速、圧力を求め、その後、連続の式を満たすように流速を補正する。この操作を終了時刻まで繰り返

※1) リストベクトル：配列変数の添字の順番を変換するために使用される配列で、この配列を用いると、ベクトル化により高速演算が可能である。

※2) ICCG法(Incomplete Cholesky Conjugate Gradient Method)：共役こう配法を用いた行列解法の一つであり、不完全コレスキー分解を利用して解の収束を速めた解法である。

* 日立製作所エネルギー研究所

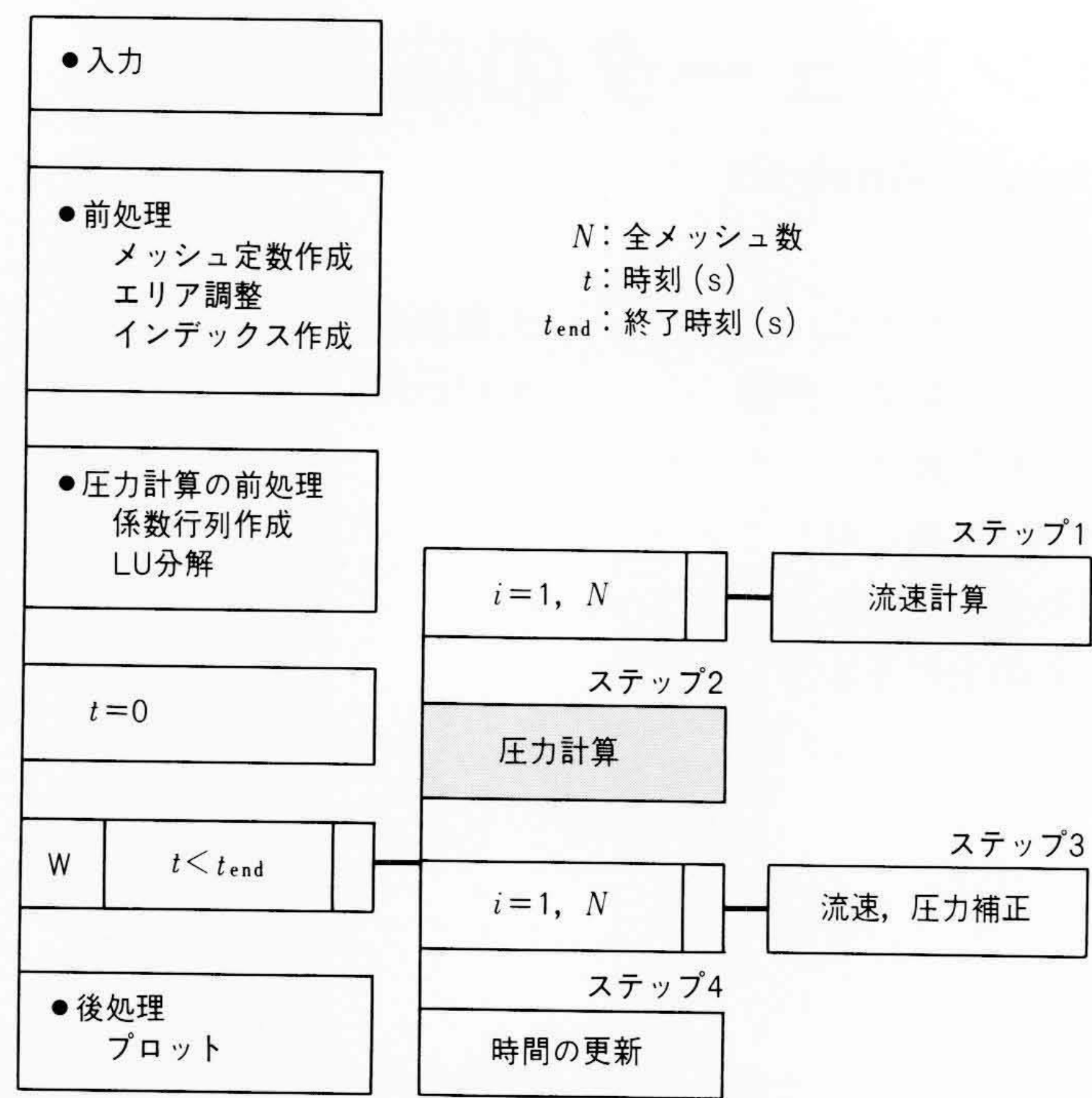


図1 流れ解析プログラムの解析フロー 計算本体では、流速計算→圧力計算→流速、圧力補正→時間の更新の各ステップが計算終了時刻まで繰り返される。

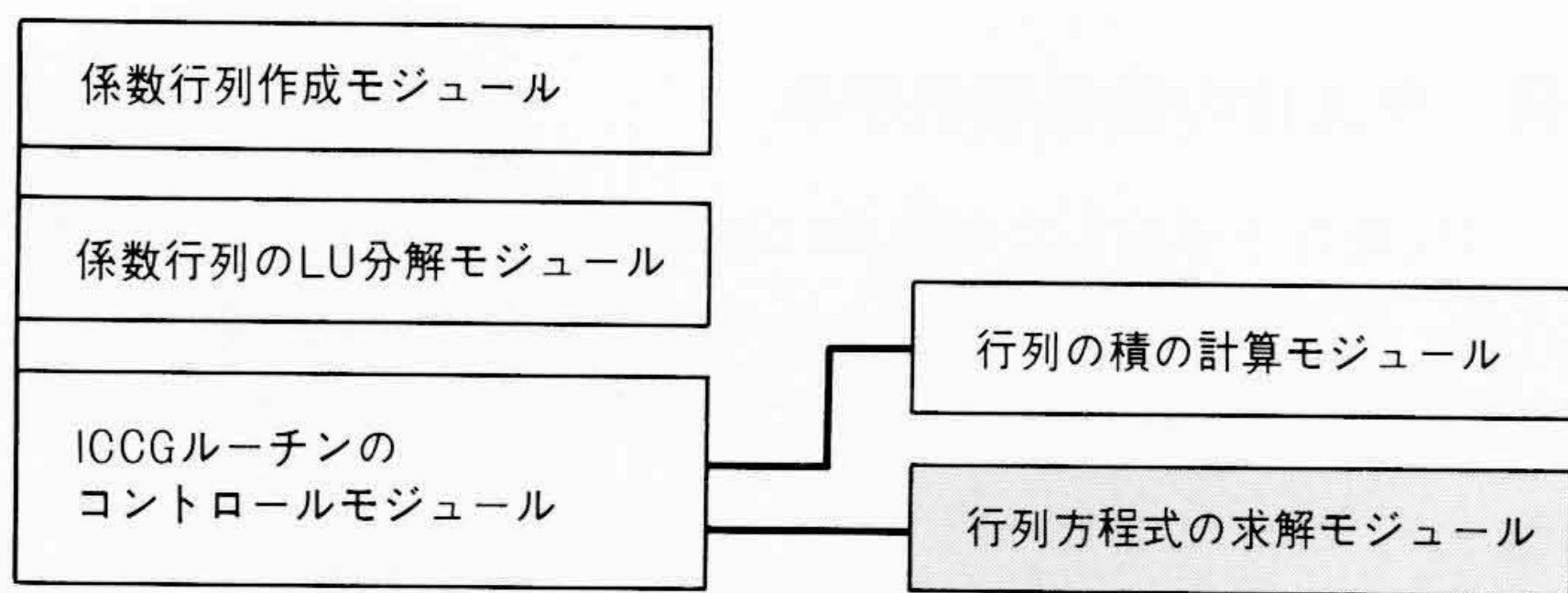


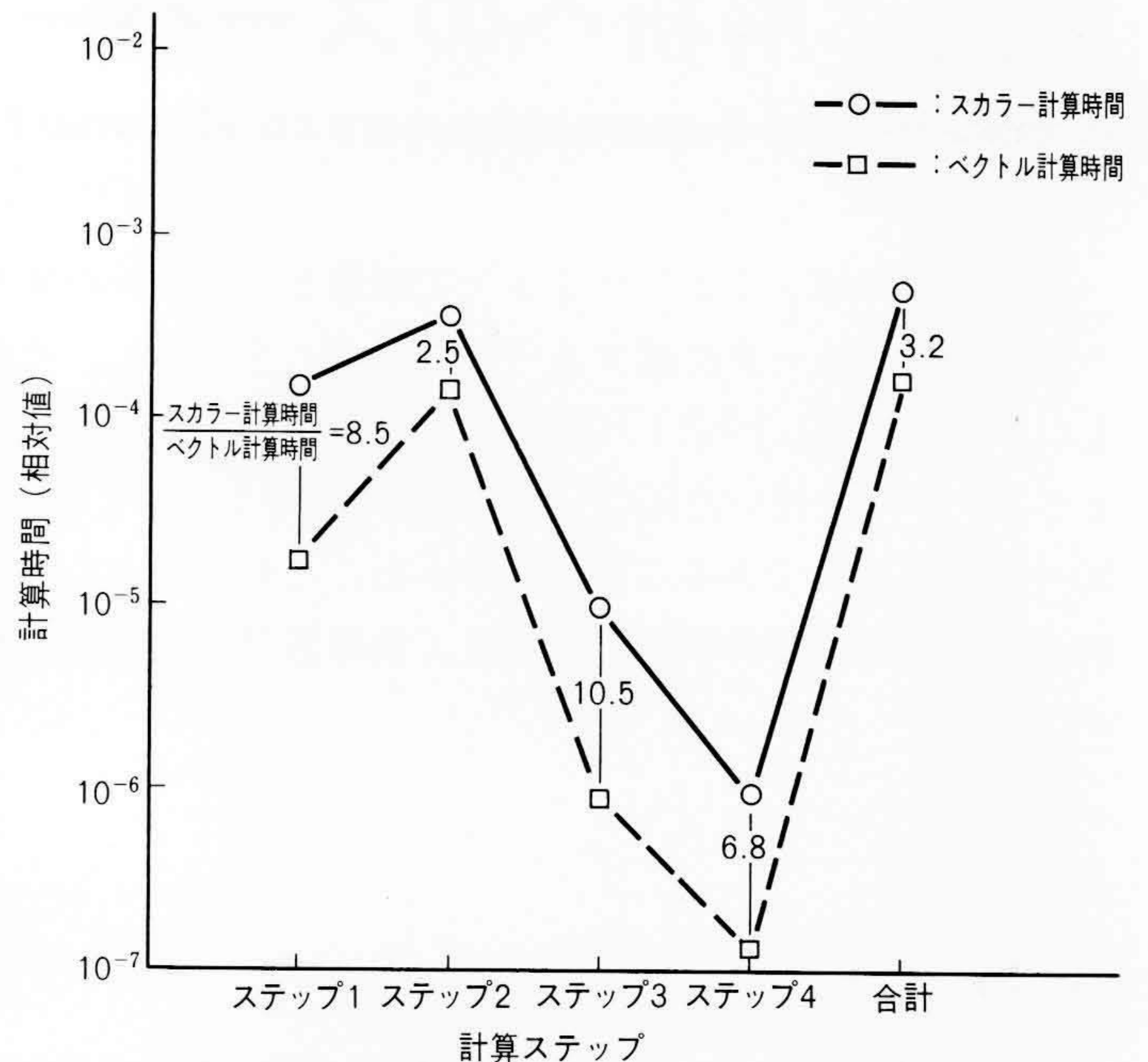
図2 圧力計算のツリー図 流れ解析プログラムの計算本体で繰り返し計算される部分は、ICCGルーチンのコントロールモジュール、行列の積の計算モジュール及び行列方程式の求解モジュールである。

す。圧力計算で使用するICCG法のサブプログラムは、図2に示すような階層構造になる。この中で、係数行列を作成するモジュール、及びこの係数行列を下三角行列と上三角行列に分解(LU分解)するモジュールは、計算本体で係数行列が変化しないことを利用して、計算本体に入る前に処理する。したがって、計算本体で繰り返し計算される部分は、ICCGルーチンのコントロールモジュール、行列の積の計算モジュール及び行列方程式の求解モジュールである。

3 数値解析法とスーパーコンピュータ

3.1 スカラー計算機用ICCG法を用いた流れ解析プログラムの特性

図3に、立方体容器内の循環流を解析した場合の、3次元計算(空間メッシュ: $20 \times 20 \times 20 = 8,000$)に対する各計算段階でのCPU(中央処理装置)処理時間を示す。同図には、スカラー計算をした場合と、ベクトル計算をした場合を比較して示してある。また、各計算ステップは、図1の計算ステップ



注: 使用計算機(S810/20), ICCGサブプログラム(ICCG-1)
計算メッシュ数(8,000)
略語説明 ステップ1(流速計算), ステップ2(圧力計算), ステップ3(流速, 圧力補正), ステップ4(時間の更新)}……図1参照

図3 各計算段階でのCPU時間 特にベクトル計算では圧力計算の計算時間に占める割合が高く、80%にも達する。

に対応している。ここで、流速に対する時間積分法としては、1時刻前の物理量の空間分布を用いて次の時刻の物理量の値を求める陽解法を用いた。陽解法は、計算式の左辺と右辺の独立性が保証されており、ベクトル演算によく適合する解法である³⁾。同図から、計算時間に占める圧力計算の割合が高いことが分かる。特に、ベクトル計算をした場合には、計算時間の80%以上を圧力計算が占めることになる。これは、圧力計算に対する加速率、すなわち、スカラー計算時間に対するベクトル計算時間の比が2.5と低いためであり、ベクトル化による効率を向上させるためには、ICCG法のベクトル化率の向上が極めて重要であることが分かる。

ICCG法のモジュールの中で、ベクトル化の上から特に重要な計算は、行列方程式の求解モジュールに含まれる後退代入計算で生ずる二次以上の逐次演算処理である。これをベクトル化する方法を図4に示す。図3に取り上げた計算に使用したサブプログラムでは、一重ループのICCG法を用いている。このため、右辺に表れるY(IJ-IMAX)は、同一のDOループ内で計算されたものが使用される。一般に、 $IMAX \geq 2$ のときにはベクトル化されない。これを避けるための方法としては、一重ループを多重ループに分割し、一次逐次演算としてベクトル化することが可能である。しかしこの場合には、ループ長が短くなるとともに、並列処理性能の悪い一次逐次演算を使用することになり、ベクトル化による飛躍的な効率向上は望めない。一方、リストベクトルを用いたICCG法³⁾では、計算順序を指定するリストベクトルLISTをあらかじめ作成しておき、斜め方向にDOループの計算が進むように番号づけを変

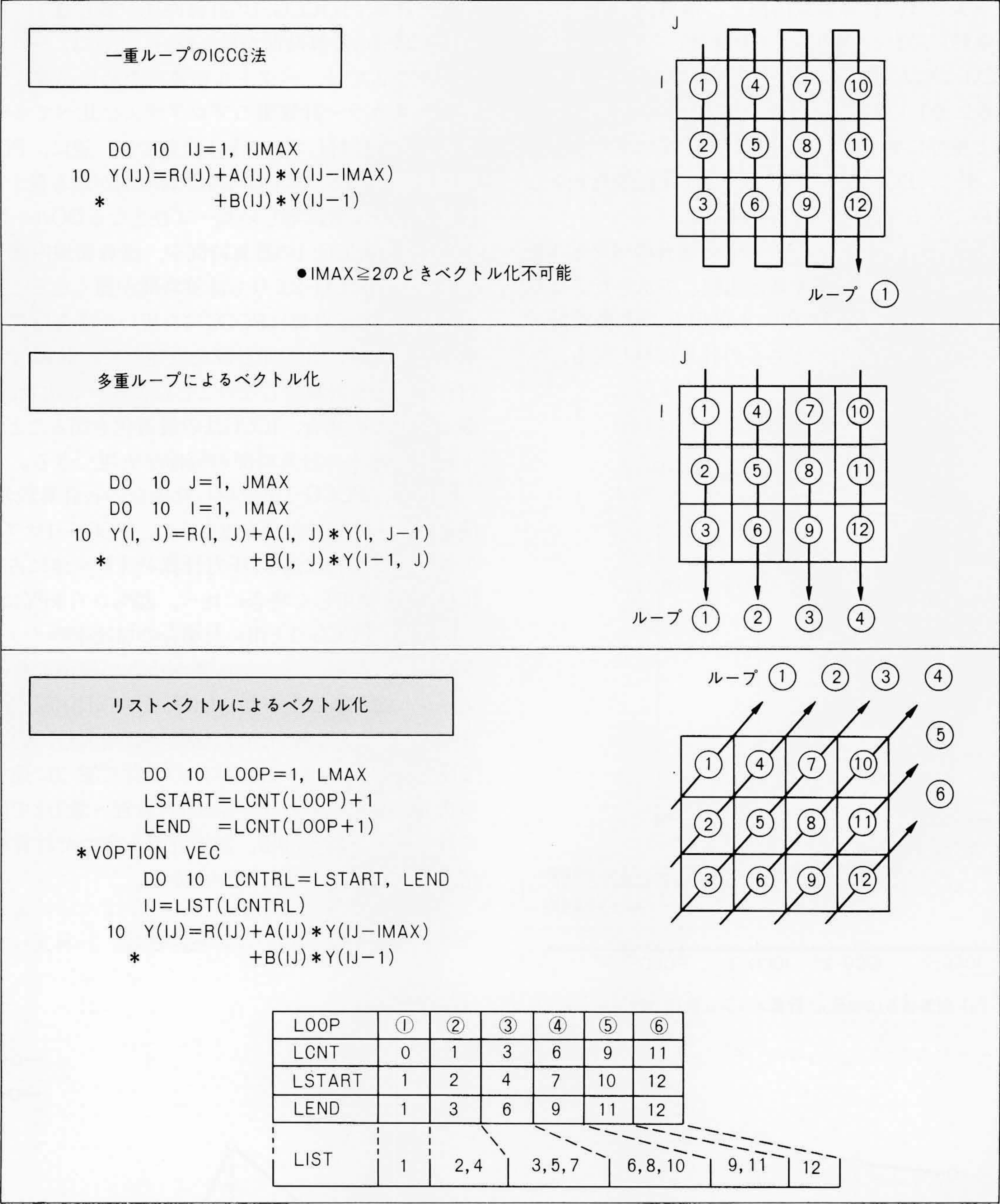


図4 ICCG法のベクトル化 多重ループやリストベクトルを用いることによって、ICCG法をベクトル化できる。

更する。この場合には、右辺に表れる変数は、すべて一つ手前のDOループで計算されるため、ベクトル計算に適した定義参照関係となる。

3.2 ベクトル計算機用ICCG法を用いた流れ解析プログラムの特性

リストベクトルを用いたICCG法のサブプログラムを用いて、流れ解析に対する適用性を検討した。比較に用いたサブプログラムは、表1に示した4種類であり、ここではこれらをICCG-1、ICCG-2、ICCG-3及びPCCG-1(Preconditioned Cholesky Conjugate Gradient-1)と呼ぶ。ここで、ICCG-1はスカラー計算用のICCGサブプログラムであり、ICCG-2は、ICCG-1に対してリストベクトルを用いて改良したものである。これら

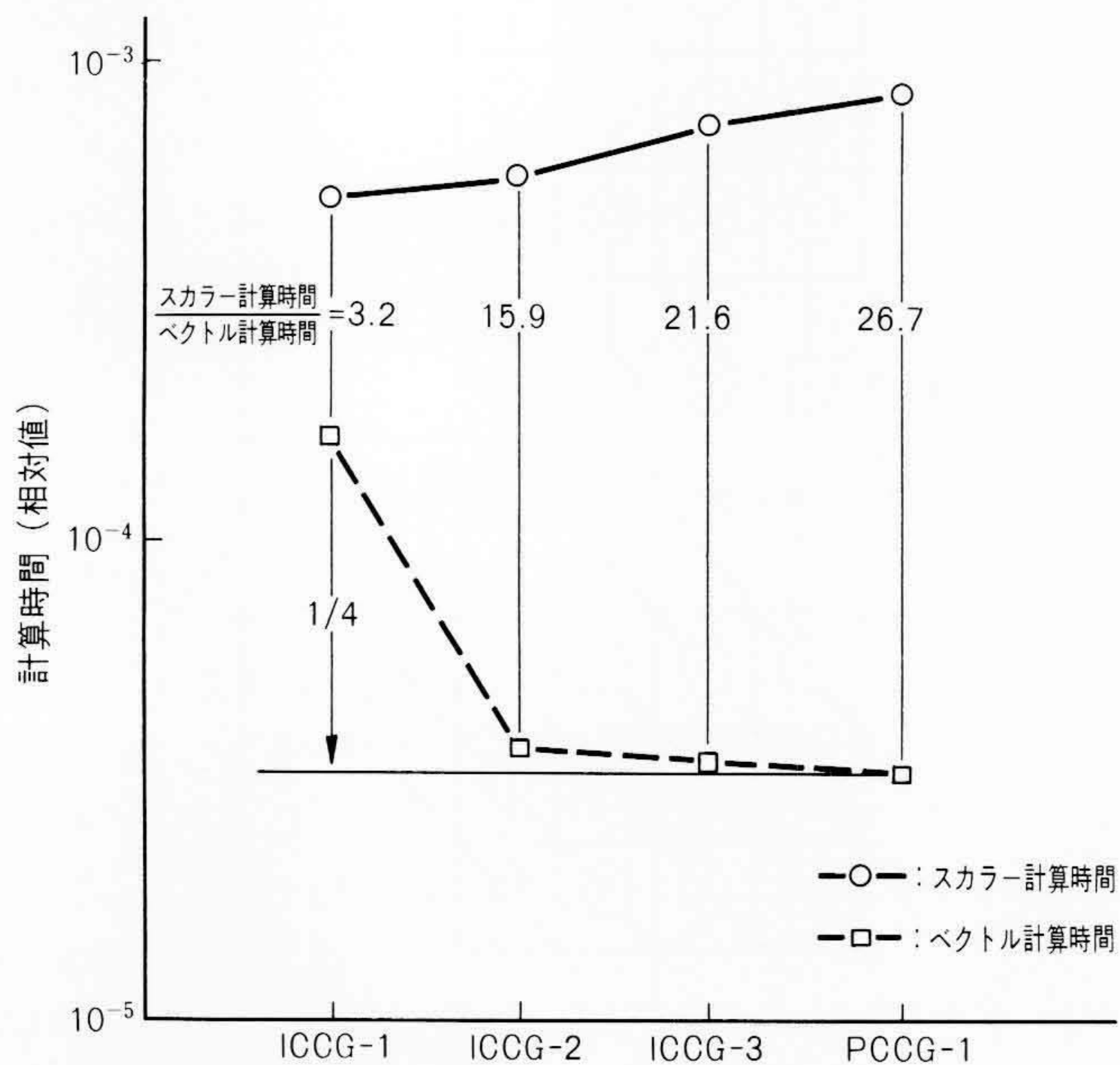
表1 各ICCGサブプログラムの特徴 ベクトル計算用のサブプログラムは、すべてリストベクトルを用いてベクトル化している。

サブプログラム名	用 途
ICCG-1	スカラー計算，規則行列用
ICCG-2	ベクトル計算，規則行列用
ICCG-3*	ベクトル計算，規則行列用
PCCG-1*	ベクトル計算，不規則行列用

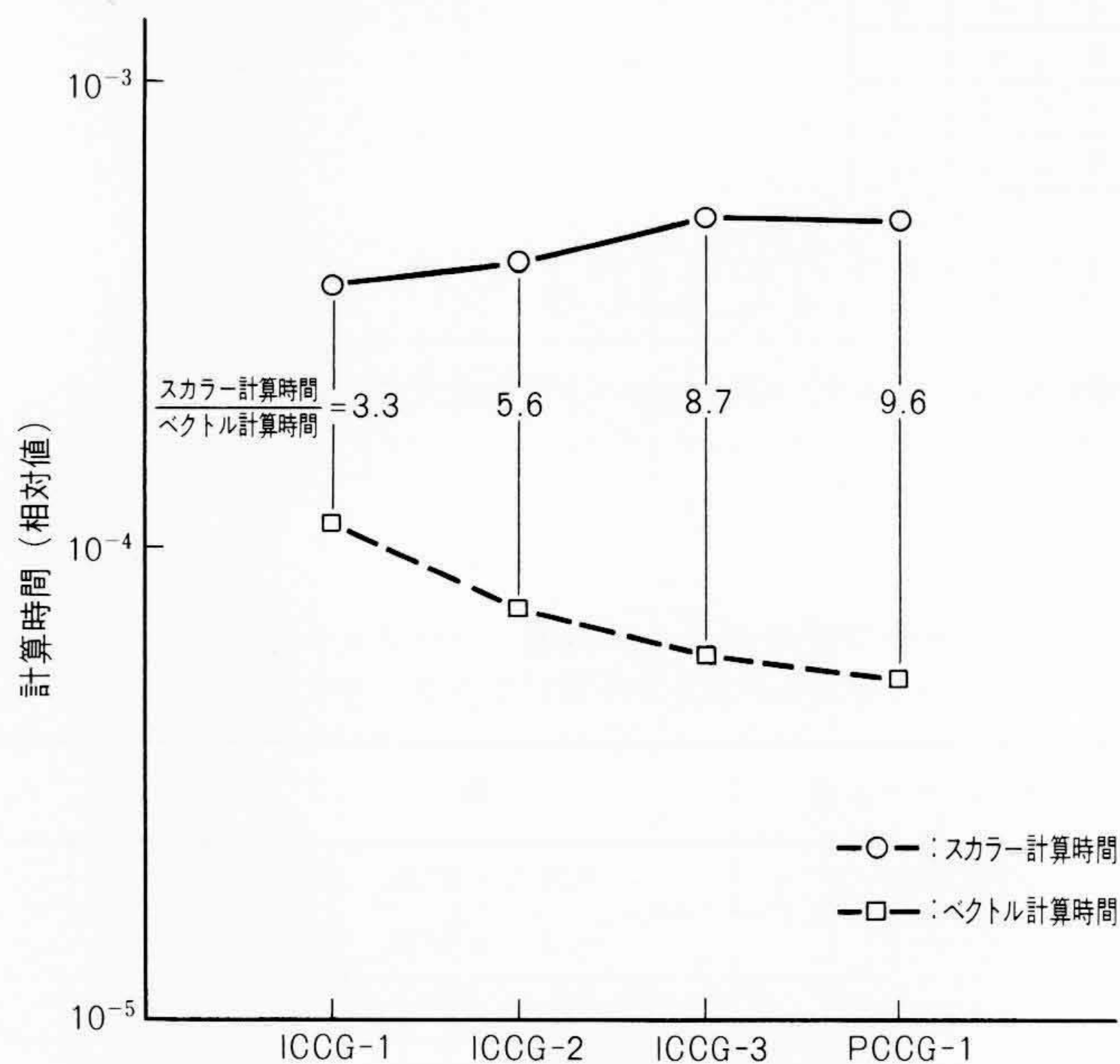
注：* 境界部と体系内部を同一のDOループで処理

のサブプログラムでは、計算領域内部と、境界に接する部分とで計算式を変更し、別々のDOループで計算している。一方、ICCG-3とPCCG-1では、負の配列要素を用いることにより、計算メッシュ数に等しいループ長となるDOループを用いて、計算領域内部と境界に接する領域とを分離せずにプログラミングしている。更に、PCCG-1は、係数行列が不規則行列となる場合にも適用できるサブプログラムである。

図5に、各ICCGサブプログラムを用いた場合のベクトル計算によるCPU時間を、スカラー計算と比較して示した。3次元計算(空間メッシュ: $20 \times 20 \times 20 = 8,000$)及び2次元計算(空間メッシュ: $20 \times 20 = 400$)のどちらの計算に対しても、ス



(a) 計算体系(3次元), 計算メッシュ数(8,000)



(b) 計算体系(2次元), 計算メッシュ数(400)

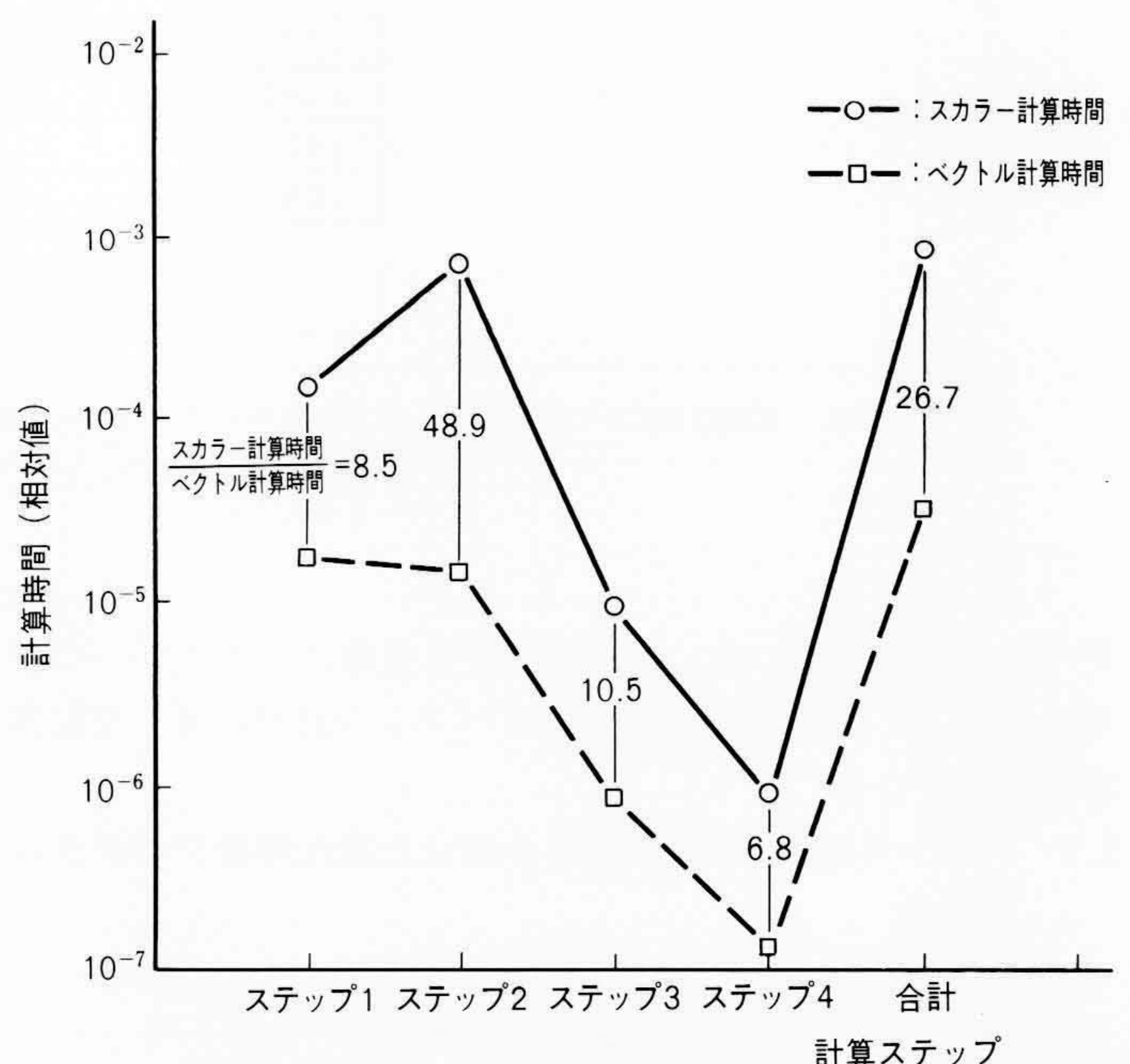
注: 使用計算機(S810/20)

図5 各ICCGサブプログラムによる流れ場の計算時間 2次元及び3次元計算に対する各サブプログラムのベクトル計算によるCPU時間を、スカラー計算と比較して示す。

カラー計算ではICCG-1の計算時間が最も短く、不規則行列用のPCCG-1の計算時間が最も長い。これは、ベクトル計算用のプログラムでは、ベクトル演算のために必要な実行ステップ数が、スカラー計算用のプログラムに比べて多くなるためである。これに対してベクトル計算では、逆に、PCCG-1の計算時間が最も短く、ICCG-1の計算時間が最も長くなる。また、計算メッシュ数に等しいループ長となるDOループ長を用いたICCG-3とPCCG-1の計算時間が、計算領域内部と境界部の処理を分けたICCG-2よりも計算時間が短くなることから分かる。さらに、2次元計算にPCCG-1を用いた場合に最も計算時間が短くなるのは、3次元計算を仮定して、計算対象外の領域に対して無効な計算をしないことによる。3次元計算(メッシュ数=8,000)の場合、ICCG法の最適化を図ることにより、ベクトル計算で $\frac{1}{4}$ の計算時間の短縮が実現できる。

図6に、PCCG-1を使用した場合の各計算段階でのCPU時間を示す。同図から分かるように、PCCG-1サブプログラムでの加速率が48.9に達し、圧力計算が計算全体に占める割合は、ICCG-1を使用した場合に比べ、89%から45%に低下する。

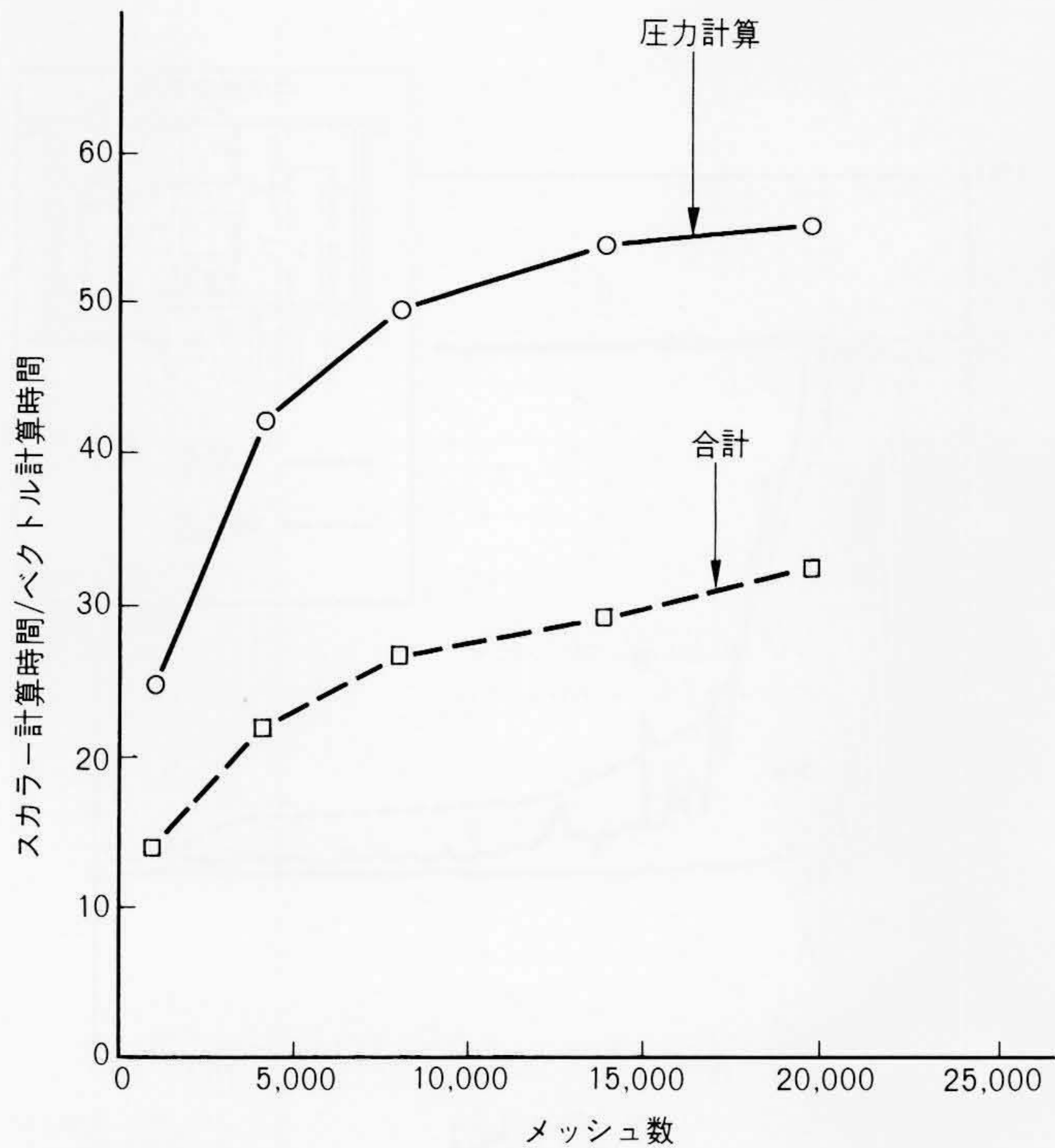
図7に、PCCG-1を用いた場合の加速率のメッシュ依存性を示す。加速率は、メッシュ数が小さい領域で急激に立上り、メッシュ数が増加するとともにしだいに飽和する傾向となる。メッシュ数の増加とともに加速率は増大し、約2万メッシュで圧力計算は55.1、計算本体の合計で32.3に達する。通常の多次元解析で用いるメッシュ数(数百~数万)では、圧力だけの計算時間を20~50倍、流速計算を含めた計算時間を10~30倍高速に計算できることが分かる。



注: 使用計算機(S810/20), ICCGサブプログラム(PCCG-1), 計算メッシュ数(8,000)

ステップ1(流速計算), ステップ2(圧力計算), ステップ3(流速, 圧力補正), ステップ4(時間の更新)……図1参照

図6 各計算段階でのCPU時間 圧力計算に対する加速率は48.9に達し、ベクトル計算により計算時間の短縮が図られている。



注：使用計算機(S810/20), ICCGサブプログラム(PCCG-1)

図7 加速率のメッシュ数に対する依存性 通常の多次元解析で用いるメッシュ数では、圧力だけの計算時間を20～50倍、流速計算を含めた全計算時間を10～30倍高速に計算できる。

4 スーパーコンピュータによる熱流体解析例

4.1 タンク型高速増殖炉の熱流体解析への応用

図8に、現在開発が進められているタンク型高速増殖炉主容器の縦断面図を示す。冷却材であるナトリウムは、主容器中央部に位置する炉心で加熱された後、上部の高温プレナムから中間熱交換器に流入して冷却され、下部に設けられた低温プレナムに達する。その後、ポンプにより再び炉心に送り込まれる。この一巡のナトリウムの流れを数値シミュレーションによって求めた結果を図9に示す。

タンク型高速増殖炉の実用化を図る上で、プラント機器の軽量・小型化による建設費の低減と設計条件の緩和による構造の健全性を向上することが課題となっている。一次冷却材であるナトリウムの熱流動挙動は、プラントの熱効率や機器の健全性と深く結びついている。例えば、原子炉を停止する際に高温プレナムで発生する温度成層化現象は、成層界面の急激な温度こう配が炉内構造物に熱変形を与える。また、成層界面が徐々に上昇して中間熱交換器の入口に達すると、中間熱交換器に急激な温度変化が加わる可能性がある。このような過渡流動挙動は、実験及び解析面から検討されているが、特に実機の流動評価に対しては、数値シミュレーションによる予測が不可欠となっている。

図10は、高温プレナムを模擬した縮尺模型流動実験装置に

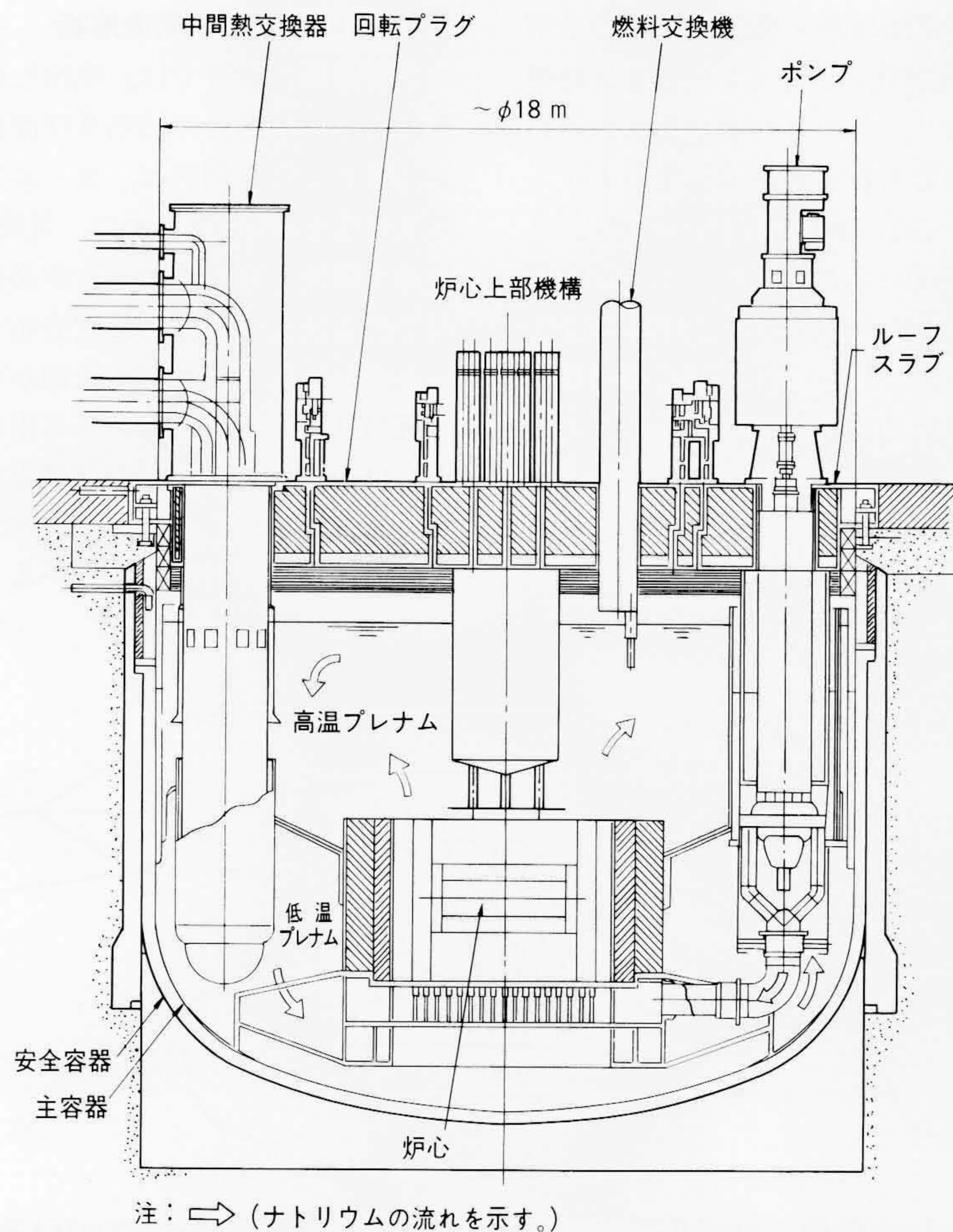
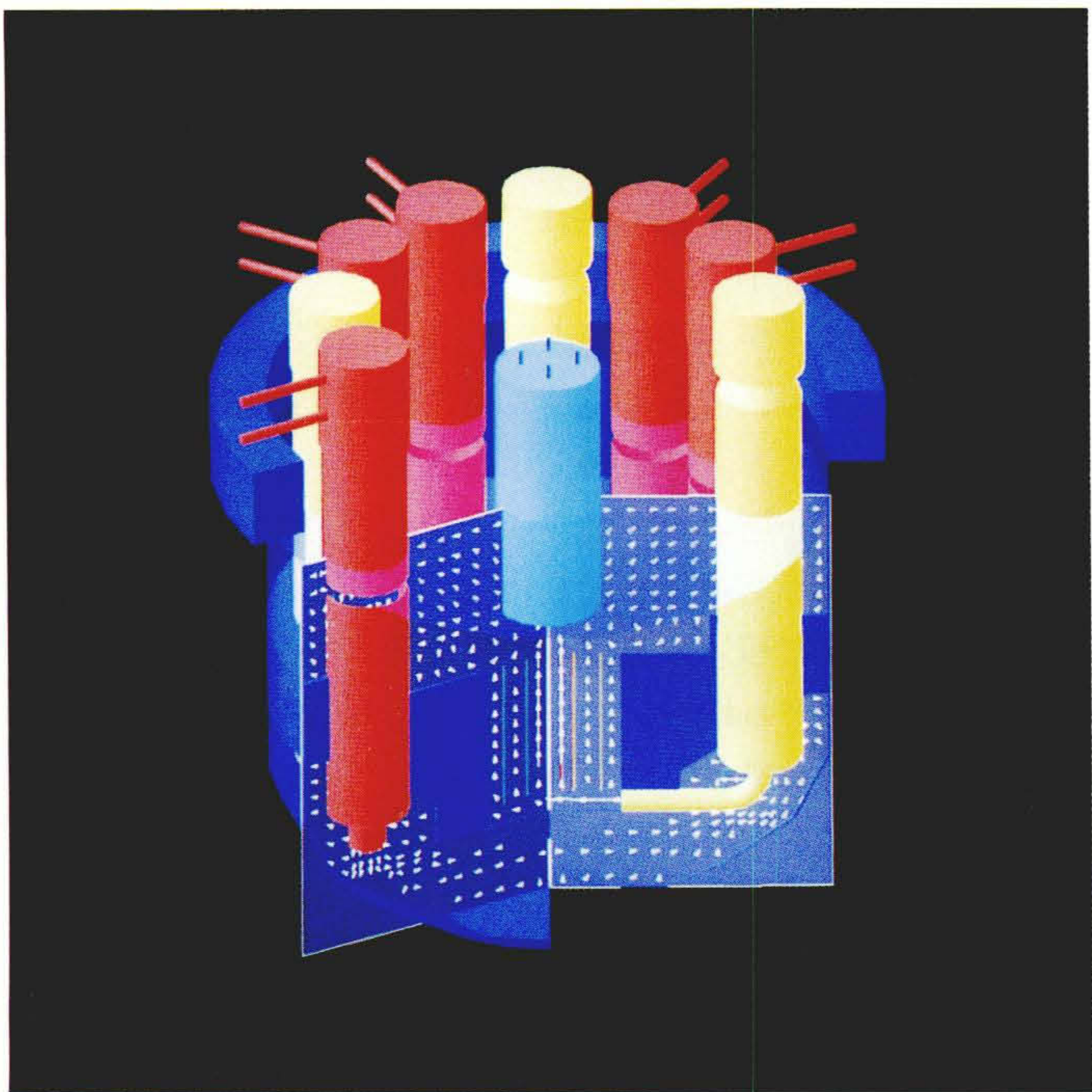
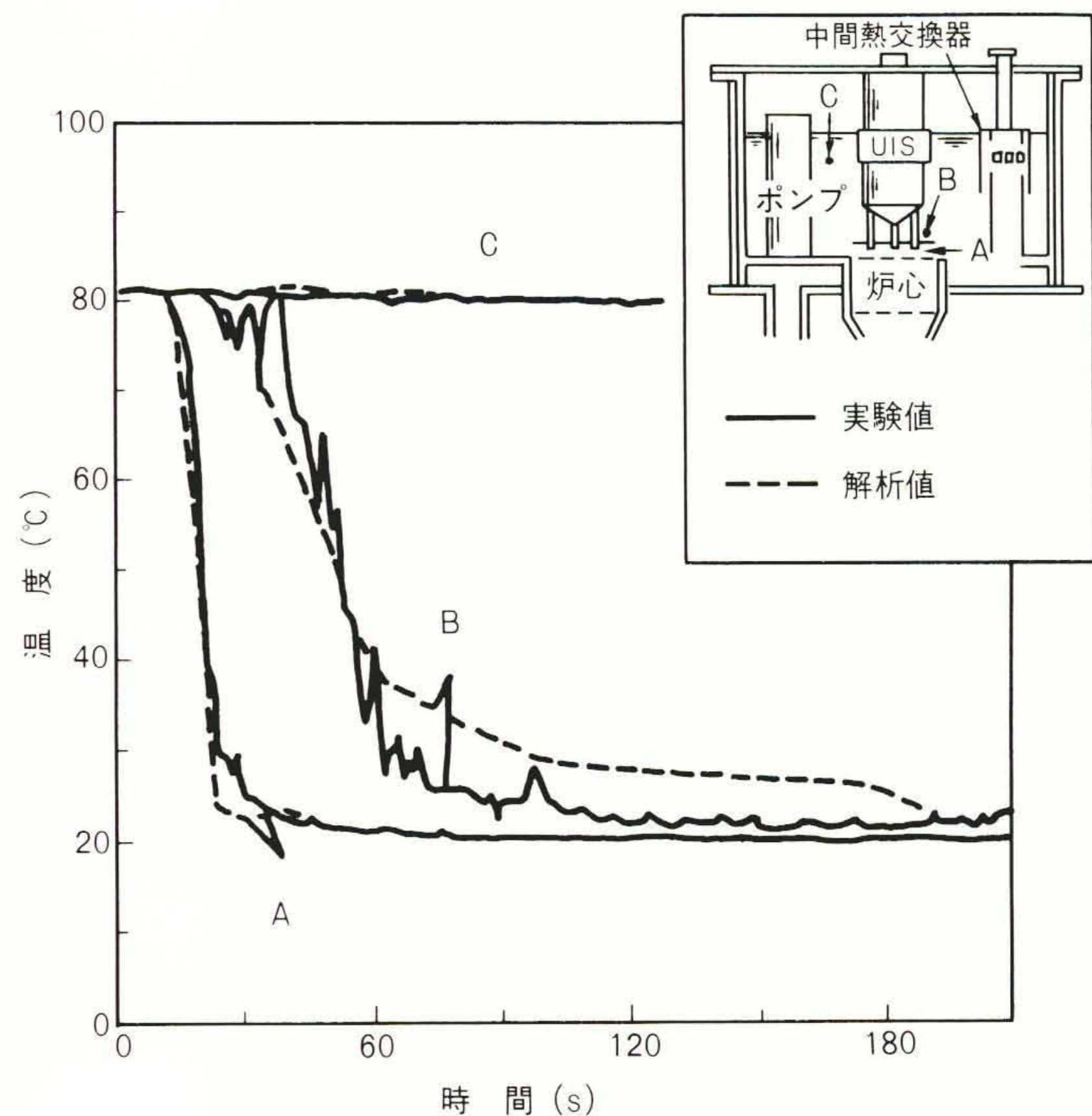


図8 タンク型高速炉主容器の縦断面図 電気出力1,000 MW実証炉に対する構造の一例を示す。



注：赤(中間熱交換器), 黄(ポンプ), 水色(炉心上部構造)

図9 タンク型高速炉主容器内のナトリウムの流れ 主容器内のナトリウムの一巡流れを, 数値シミュレーションした結果を用いてケーキカット断面の流速分布をベクトル表示したものである。



注：略語説明 UIS(炉心上部機構)

図10 原子炉スクラム後の高温プレナム内各部の温度変化 タンク型高速増殖炉の高温プレナムを模擬した水流動実験装置(容器径=1.2m)による実験結果を, 数値シミュレーションした結果である。

より, 原子炉スクラム後の過渡流動現象を模擬した実験を解析した結果である⁵⁾。各部の温度変化のシミュレーション結果は, 実験結果とよく一致しており, このようなシミュレーションが, 流動現象の評価に有効であることを示している。

このような3次元解析に対しては, 計算のCPU時間は, メッシュ数に比例して増大する。図10に示した解析では, HITAC M-200Hコンピュータによるスカラー計算で約2時間のCPU処理時間を要するが, スーパーコンピュータHITAC S-810によるベクトル計算では, これを約10分で計算できる。このため, ベクトル計算を用いた数値シミュレーションにより, 炉内機器の形状や運転方法の最適化に対する設計効率を, 飛躍的に向上させることが可能になった。

4.2 自動車室内の気流解析

空調機器の設計では, 吹出し口の配置と運転方法を決定するために, 室内での伝熱及び流動現象を正確に予測することが必要となる。例えば, カーエアコンの設計では, 車室内での快適性を確保するために, 気流の風速・温度分布を把握し, 最適な環境を作り出すことが必要である。このような, 車室内での3次元の風速や温度分布を求めるために, 気流の数値シミュレーションによる予測が実施されている。

図11は, 解析対象である車室内の構造図であり, 前面に吹出し口が, 前方下部及び後部座席後方に吸込み口が設けられている。図12は, 車室内の3次元気流分布を示しており, 3次元の循環流が形成されていることが分かる。ここで解析体

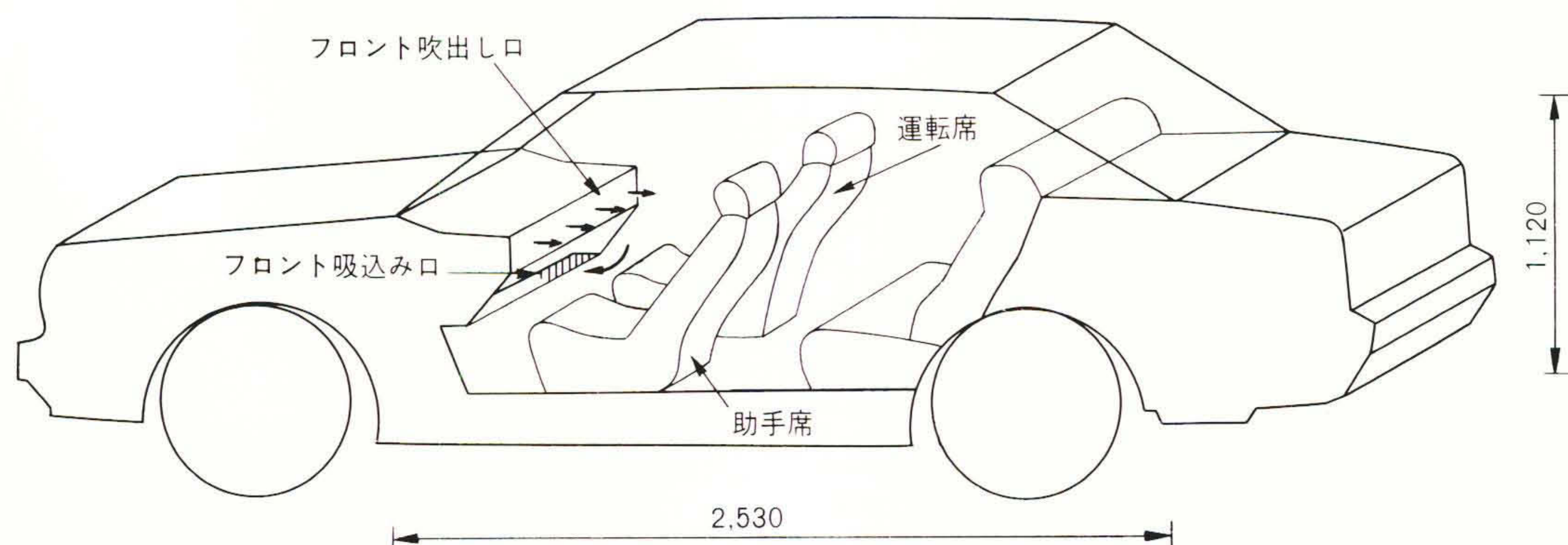


図11 自動車車室内の構造図 車室内の空気はフロント吹出し口から供給され, フロント及びリア吸込み口に吸い込まれる。

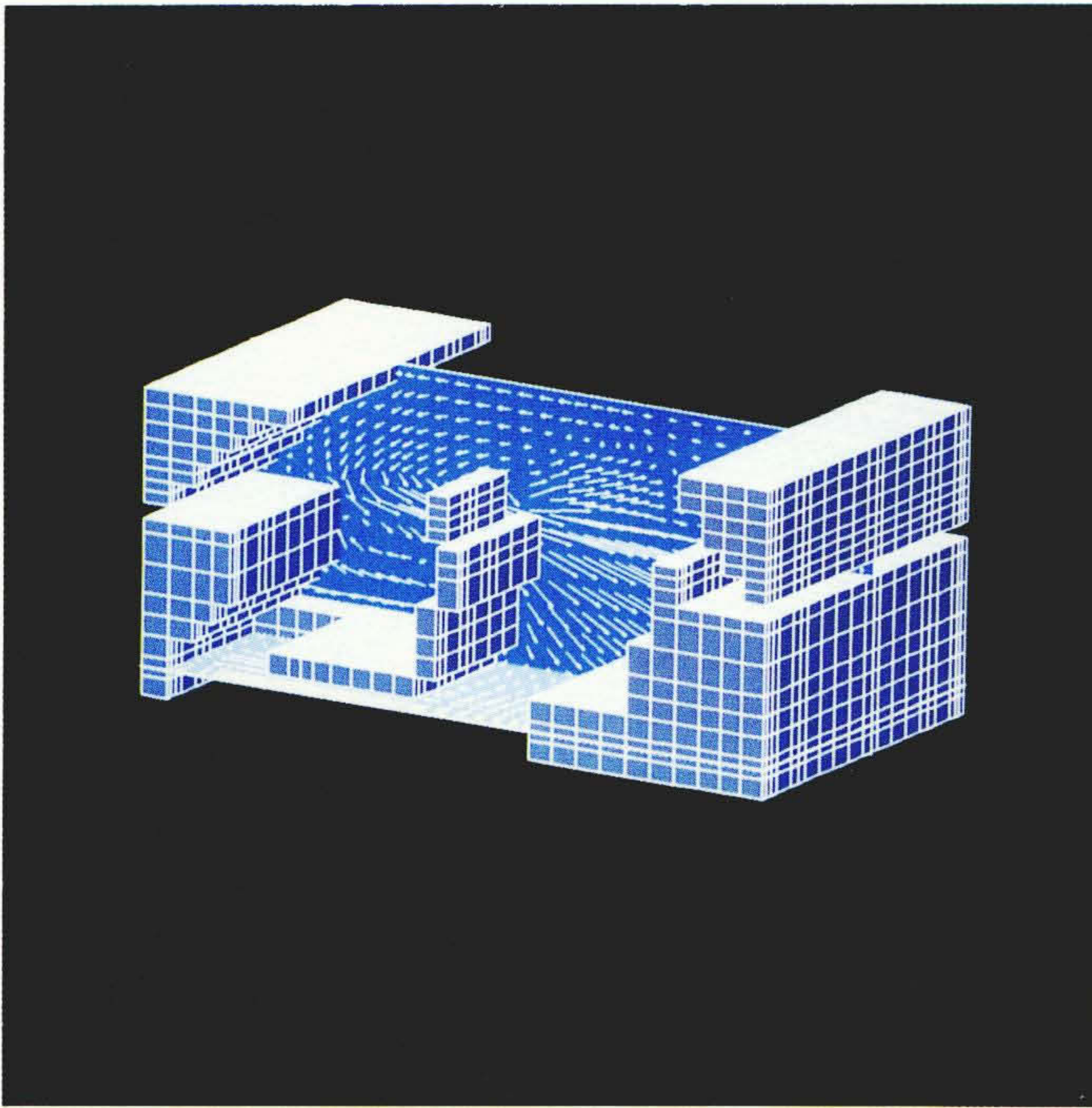


図12 自動車室内の気流分布 直交メッシュにより、運転席、助手席、後部座席などの3次元構造をモデル化している。車室内には3次元の循環流が形成されている。

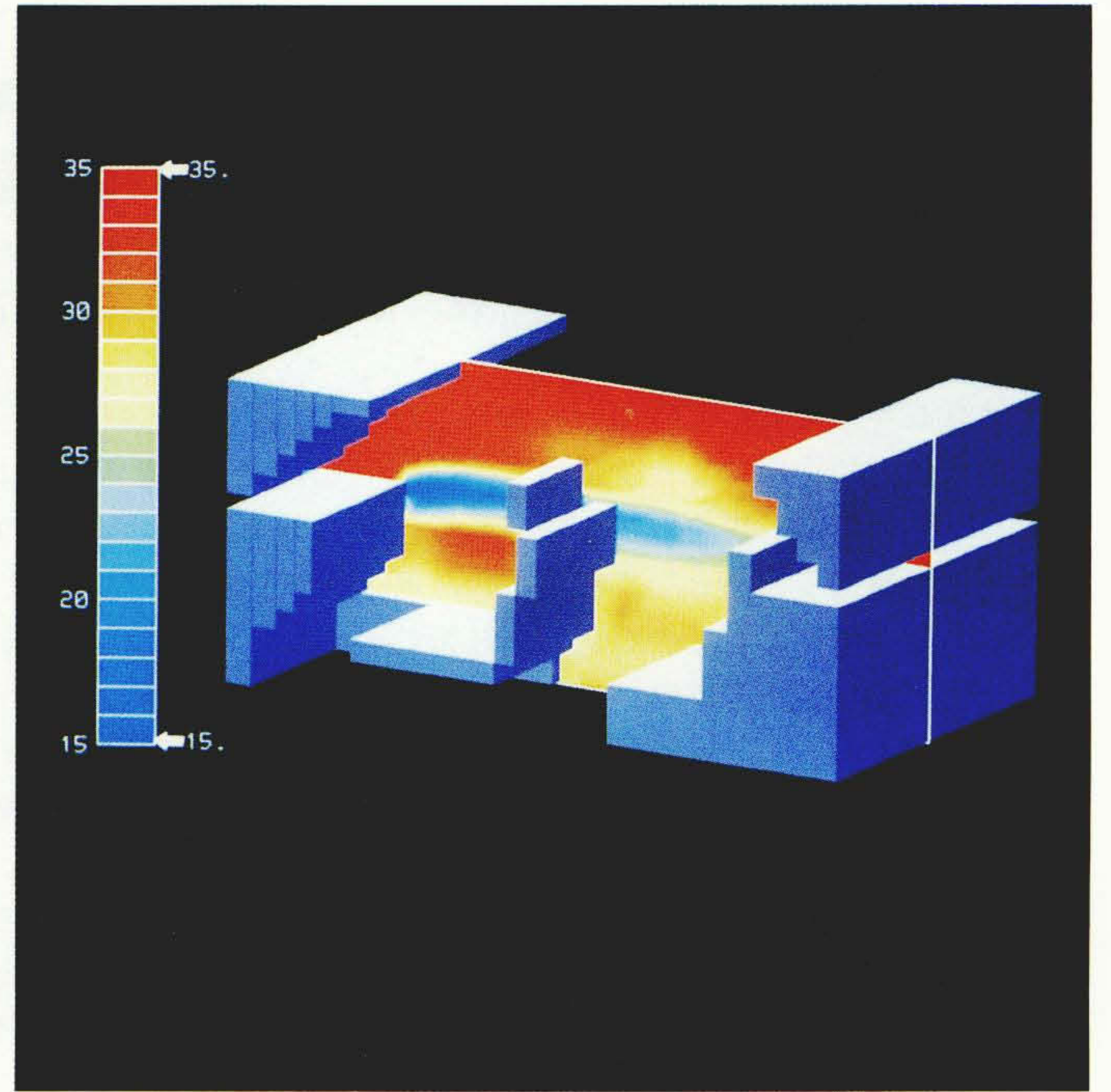


図13 自動車室内の温度分布 冷房起動時の各断面の温度分布をカラー表示したものである(最高温度35℃, 最低温度15℃)。

系は、運転席、助手席、後部座席などの内部構造物をモデル化した3次元体系としている。また、図13は、冷房起動時の車室内の温度分布であり、暖かい空気が浮力の影響で上昇し、車室内が徐々に冷えていく様子が分かる。

このような気流シミュレーションでは、流れは強い3次元性を示すために3次元解析が必要であり、また起動後の非定常現象を解析する必要があることから、一般に長い計算時間を必要とする。そのため、吹出し口、吸込み口の位置、形状、運転方法などのパラメータをすべて実験によって決定していた。これに対して、3章に述べたベクトル計算によってシミュレーションに要する計算時間を短縮することが可能となり、計算機シミュレーションを用いて、これらの実験回数を減らせる見通しを得ることができた。

5 結 言

熱流体の数値シミュレーションで問題となる計算時間を短縮するために、スーパーコンピュータのベクトル演算機能に適するアルゴリズムを検討した。その結果、ベクトル計算で、計算時間の大半を占める圧力計算に、リストベクトルを用いたICCG法を適用することにより、スカラー計算に対して10～30倍高速化できることが分かった。これにより、原子炉や空

調機器などの熱流体解析の計算時間が短縮され、機器設計の効率を向上することができた。

今後、このような計算時間の短縮により、まだ十分解明されていない乱流などの高精度シミュレーションが可能となり、熱流体研究がよりいっそう加速されることが期待できる。

参考文献

- 1) 山川, 外: タンク型高速増殖炉原子炉主容器内の熱流動特性, 日立評論, 67, 11, 887～892(昭60-11)
- 2) 池川: 気流シミュレーション技術の応用例, 冷凍, 60, 688, 61(昭60-2)
- 3) 村田, 外: スーパーコンピュータ, 丸善(1985)
- 4) 大塚, 外: FBR炉容器内熱流動特性の研究(Ⅱ), 粘性流体の汎用三次元熱流動解析プログラムTHERVIS-Ⅲ, 日本原子力学会予稿集, A17(1983-9)
- 5) M. Ohtsuka, et al.: Study on Thermal Stratification Phenomena in LMFBR Hot Plenum, Proceeding of ANS 1985 Winter Meeting(1985)

高濃度石炭水スラリー(CWM)の流動性に及ぼす石炭性状の影響

日立製作所 梶 隆一・村中 廉・他2名
燃料協会誌 65—10, 847～853 (昭61-10)

高濃度石炭水スラリー(CWM)は、粉碎した石炭を分散剤の作用により少量の水の中に分散したもので、石炭を取扱いの容易な流体燃料に変換する方法として注目され、石油代替エネルギーとしての石炭利用技術の一つとして研究開発が展開されている。CWMは石炭を60～75wt%含有する粘ちゅう(稠)なスラリーで、あらかじめ脱水処理することなく直接噴霧し燃焼させることができる。ボイラでCWMを効率よく燃焼するためには、流体燃料として取り扱える程度の流動性を保ちながら極力石炭濃度を高める必要があるが、CWMの流動性は使用する石炭の種類により大きく異なる。石炭は炭質分と灰分の複雑な混合物で、その表面性状を規定することが難しく、CWMの流動性に及ぼす影響も非常に複雑である。しかし、我が国では石炭の大部分を輸入に頼っており、その性状も多岐にわたっているため、石炭性状に応じたCWM製造技術を確立し

ておくことが重要となっている。

一般に、CWMのような固液分散系の粘度は固体の体積濃度の関数として表され、高濃度域まで実験値とよく一致する式として次式が知られている。

$$\eta = \eta_0 \left[1 - \frac{\phi}{\phi_c} \right]^{-[\eta]\phi_c}$$

ここに、 η ：固液分散系の粘度、 η_0 ：分散媒の粘度、 $[\eta]$ ：定数、 ϕ ：固体の体積濃度、 ϕ_c ：最密充てん時の固体の体積分率

本論文では、性状の異なる数種類の石炭を用いてCWMを調製し、その粘度と石炭濃度との関係について検討した。

石炭は多孔質の物質で、その細孔内に水を吸収することが知られている。ここでは、石炭の吸水性に着目し検討した。石炭が水を吸収すると、CWM中の石炭の体積濃度は見掛け上増加する。このため、吸水性の大きい石炭ほど低濃度でもCWM粘度は高くなり、吸水性の小さい石炭ほど高濃度CWM

の調製が容易であることを明らかにした。

また、CWM中の石炭粒子の粒径分布幅が広いほど最密充てん時の固体の体積分率 ϕ_c が大きくなり、CWM粘度は低くなる。

以上のことから、調製したCWMの ϕ 及び ϕ_c を使用した石炭の吸水率並びに比重から算出し、各石炭濃度でのCWM粘度の測定値を上式によって検討した。その結果、大多数の石炭について、CWM粘度と石炭濃度との関係が $[\eta] = 3.8$ とする上式で表されることを明らかにした。

これらの結果から、石炭の吸水性がCWMの高濃度低粘性化の指標となることを示し、CWM粘度と石炭濃度との関係を予測することを可能とした。また、実用面では、使用炭種の吸水性からCWM製造条件をあらかじめ決定できるようになった。

ファクシミリ自動ダイアル用手書き数字認識方式

日立製作所 中島啓介・多々内允晴
画像電子学会誌 16—3, 168～172 (昭61-12)

ファクシミリの急速な普及につれて、機能、性能の追求だけでなく、操作性の向上が重要な課題となっている。

現在、ファクシミリのダイアリングを簡単化するため、リダイアル、短縮ダイアル、1タッチダイアルなど多機能電話の便利機能を取り込んでいる。

しかし、ファクシミリ特有の自動送信、自動集信、最適な原稿濃度、文字サイズ、中間調モード設定のためには、多種のボタンを操作する必要があり、使いこなせていないのが現状である。

一方、送信原稿の先頭にあて先マークシートを置き、複数のあて先に自動送信するファクシミリも出始めたが、マークシートでは記入、検証、保管、整理が大変であるという問題があった。

本論文では、以上の問題点を解決するため手書き数字認識方式をファクシミリに適用した自動ダイアル方式を提案している。

手書き数字認識はOCRなどで実用化され

ているが、普及形のファクシミリに適用するためには簡単な処理で実用的な認識率を実現する必要がある。このため、(1)処理データ数の削減、(2)正確な記入領域切出し、(3)認識の多層化を検討した。

まず、処理データ数の削減には、はん(汎)用MPUで処理すると処理時間が増大するビット処理を、日立製作所で開発した文書画像符号復号LSI(DICEP)を用いてランレングスデータ化することにより大幅に処理を簡単化した。これにより、MPUでは論理アドレス値を加減算するだけで、所定領域内に含まれる黒画素数を算出でき、約10倍の高速化が可能となった。

次に、正確な記入領域切出しに関しては、従来から提案されていたシートの上辺と左辺にだけタイミングマークを付加する方式から、各文字に個別の切出しマークを付加する方式とした。これは複数のあて先シートと原稿がスタッカに積み上げられての通信の際、多種の用紙サイズが混在し、挿入

位置ずれ、傾き、スキューが大きくなっても正しく切り出すことを配慮している。

最後に、認識率を向上させるため、記入文字の大まかな形を検出するブロックと、細かな線の連続性を検出するブロックの双方を用いた二重ブロック判定方式を開発した。このことによって、記入文字の制約を少なくし、かつ高い認識率を得ることができ

る。以上のような検討を踏まえ、ファクシミリのハードウェアを最大限に利用し、高速、低コスト、高認識率の認識アーキテクチャを提案した。日立製作所の高感熱ファクシミリで評価を行い、十分に実用的であることを確認した。

本提案方式の利用形態としては、ノートタッチダイアル(シートに必要事項を記入しておけば、ボタン操作は不要)機能を夜間料金を用いる通信や海外との時差通信に用いるなど、マンマシン性向上の幅広い応用が考えられる。