

JAERI-M

88-119

3次元熱流体解析コード'STREAM'の
ベクトル化と高機能化

1988年7月

切刀 資彰・横川三津夫・千葉 猛美*

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 日青工業株式会社

3次元熱流体解析コード 'STREAM' のベクトル化と高機能化

日本原子力研究所東海研究所高温工学部

刃刀 資彰・横川三津夫⁺・千葉 猛美^{*}

(1988年6月6日受理)

最近の計算機の高速化・記憶容量の増大に伴って原研内での利用（特に，高温工学試験研究炉関係での）が急速に高まっている3次元熱流体解析コード STREAM のベクトル化を行い，従来の同コードに比べて約20倍の高速化を達成した。本報告は，ベクトル化作業の概要と計算手法の検討を行った結果をまとめたものであり，ベクトル化版 STREAM コードの入力マニュアルとしても利用できる。また，各物理量の経時変化プロットや高速フーリエ変換によるデータ処理機能を新たに追加し，定常判定や非定常現象の観察に利用できる解析システムへの機能向上を図った。

Vectorization of a Three Dimensional Thermal-Hydraulic
Analysis Code 'STREAM'

Tomoaki KUNUGI, Mitsuo YOKOKAWA⁺ and Takemi CHIBA^{*}

Department of High Temperature Engineering
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 6, 1988)

This paper describes the vectorization of a thermal-hydraulic analysis code 'STREAM', which can solve the three-dimensional time-dependent incompressible Navier-Stokes equations, the energy and the concentration equations for the laminar flows, and can use the k- ϵ model of turbulence for the turbulent flows. Computations of the design and the safety evaluation for the HTTR (High Temperature Engineering Test Reactor) in JAERI have been carried out by this code. In consequence of the vectorization, computational time of the vectorized code for sample problems is about 1/20 times that of the original code. Moreover, this paper describes the usage of new functions for the transient analysis.

Keywords: Three-Dimensional, Thermal-Hydraulic Analysis,
Navier-Stokes Equation, k- ϵ Model of Turbulence,
High Temperature Test Reactor, Vectorization,
New Functions, Transient Analysis

+ JAERI Computing Center

* Nuclear Energy Data Center

目 次

1. はじめに	1
2. 基礎方程式	1
3. 境界条件	3
4. 乱流モデル	7
5. 解析手法	11
6. ベクトル化	12
6.1 Hyper Plane 方式	12
6.2 FUNCTION文の内部展開	15
6.3 DO文の書き下し	15
6.4 作業配列の導入	16
6.5 DO文の分割	16
6.6 ワークファイルの内部処理化	16
6.7 ルーチンの内部展開	17
6.8 ベクトル化不適命令	17
6.9 チューニング	17
7. テスト計算	30
7.1 ケース1	30
7.2 ケース2	31
7.3 ケース3	32
7.4 ケース4	32
8. I/O回数の削減	42
9. 機能向上および追加ルーチン	43
9.1 定常状態の判定	43
9.2 計算経過時間による計算打ち切り	43
9.3 各物理量の経時変化プロット機能	44
9.4 高速フーリエ変換による時系列データ処理	44
10. 計算結果の評価	48
11. ベクトル化版STREAMコードの取り扱い	50
11.1 SOLVER入力データの説明	50
11.2 GRAPHIC入力データの説明	61
11.3 JCLの説明	64
11.4 修正ルーチンの一覧	65
11.5 新規ルーチンの説明	67
11.6 インクルード・ファイルの説明	72

12. 制限・注意事項	79
謝 辞	79
参考文献	80

Contents

1. Introduction	1
2. Basic Equations	1
3. Boundary Conditions	3
4. Model of Turbulence	7
5. Numerical Procedure	11
6. Vectorization	12
6.1 Hyper Plane Method	12
6.2 FUNCTION Statements	15
6.3 DO Statements	15
6.4 Usage of Working Area	16
6.5 Dividing of DO Statements	16
6.6 Internal Managements	16
6.7 Internal Developments of DO Loops	17
6.8 Non-vectorizable Statement	17
6.9 Tuning	17
7. Test Runs	30
7.1 Case-1	30
7.2 Case-2	31
7.3 Case-3	32
7.4 Case-4	32
8. Reducing the Input/Output Count	42
9. New Functions	43
9.1 Check of the Steady State	43
9.2 Check of the Executing Time (CPU)	43
9.3 Trend Plot of Time Series Data	44
9.4 Analysis by Fast Fourier Transformation	44
10. Evaluation of Test Runs	48
11. Treatment of a New Vectorized 'STREAM' Code	50
11.1 Input Format of the Solver Program	50
11.2 Input Format of the Graphic Program	61
11.3 Job Control Statements	64
11.4 List of Modified Routines	65
11.5 Explain of New Routines	67
11.6 Explain of INCLUDE Files	72
12. Limitation and Notice	79

Acknowledgment	79
References	80

主 な 記 号

- x_i : 位 置 座 標 (m)
 u_i : x_i 方向の流体速度 (m/s)
 U, V, W ; r, θ, z 方向の流速成分
 t : 時 間 (s)
 ρ : 流体か固体の密度 (kg/m^3)
 P : 流 体 の 圧 力 (N/m^2)
 ν : 動 粘 性 係 数 (m^2/s)
 (= $\nu_1 + \nu_t$: 分子動粘性係数 + 渦動粘性係数)
 f_i : 体 積 力 (m/s^2)
 f_r, f_θ, f_z ; r, θ, z 方向の加速度
 g_i : 加 速 度 (m/s^2)
 g_r, g_θ, g_z ; r, θ, z 方向の重力加速度
 β : 体 膨 張 率 ($1/^\circ\text{C}$)
 T : 流体か固体の温度 ($^\circ\text{C}$)
 T_{ref} : 流体の基準温度 ($^\circ\text{C}$)
 C_p : 定 圧 比 熱 ($\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$)
 K : 熱 伝 導 率 ($\text{J}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$)
 \dot{q} : 発 熱 量 ($\text{J}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$)
 k : 乱流エネルギー (m^2/s^2)
 ϵ : 乱流消失率 (m^2/s^3)
 C : 拡散物質の濃度 (l)
 D_m : 拡散係数 (m^2/s)
 \dot{d} : 拡散物質の発生項 ($1/\text{s}$)
 $(\bar{\quad})$: 平 均 値
 $(\quad)'$: 変 動 分

1. はじめに

最近の計算機の高速化・記憶容量の増大に伴って、原子炉の熱流動設計や安全審査のための評価計算に従来のネットワーク・モデルと並行して2次元および3次元の熱流動計算が数多く行われるようになってきた。^{1,4)} 現在、原研に設置されている汎用の大型計算機は、(株)富士通製のVP 100と呼ばれるベクトル演算ユニットを利用するタイプのスーパー・コンピュータである。このタイプの計算機では、ベクトル・プロセッサを有効に利用することで計算速度の向上を図っている。したがって、ある問題を解析する場合、全計算時間の内ベクトル・プロセッサを使用している時間の割合(ベクトル化効率)が80%以上であることが望ましいと言われている。しかしながら、原子力コードは炉物理や2相流関係のコードのようにベクトル化が困難若しくはベクトル化効率が低いものが多く、ベクトル計算機の実効が上がりにくい面がある。一方、航空機分野に代表される多次元流体解析コードはベクトル化効率が非常に高いことが報告²⁾されており、原子力分野でも大気拡散のシミュレーション・コードではベクトル化が有効であることが報告³⁾されている。

本報告は、原研が開発を進めている高温工学試験研究炉の安全審査用基礎資料の評価解析に使用⁴⁾されている3次元熱流体解析コード「STREAM」¹⁾のベクトル化作業の概要と計算手法の検討を行った結果をまとめたものであり、ベクトル化版 STREAMの入力マニュアルとしても利用できる。本コードのベクトル化の結果、従来の同コードに比べて約20倍の高速化を達成した。また、各物理量の経時変化プロットや高速フーリエ変換によるデータ処理機能を新たに追加し、定常判定や非定常現象の観察に利用できる解析システムへの機能向上を図った。このような機能は、計算コードを一つの実験装置とみなした場合のセンサーや信号解析機に相当するものであり、単なる設計計算や評価計算に留まらず熱流体の物理現象を研究する上で有力な武器となる。

2. 基礎方程式

STREAMは、3次元非圧縮性ニュートン流体を対象としたコントロール・ボリューム法による差分法の熱流体解析コードであり、その基礎方程式は3次元のNavier-Stokes方程式、エネルギー方程式と拡散方程式から構成されている。なお、乱流状態における熱流体挙動を解析するため、後述する現象論的乱流モデルである $k-\epsilon$ 型2方程式モデル⁵⁾が組み込まれている。座標系としては、デカルト座標系 (x, y, z) と円柱座標系 (r, θ, z) が選択できるようになっている。ここでは、円柱座標系の表式で基礎方程式を記述するが、式中の係数 α の値によって座標系の切り換えが可能となる。すなわち、 $\alpha=1$ の場合が円柱座標系であり、 $\alpha=0$ を選択すればデカルト座標系 (x, y, z) となる(但し、この場合には、 $r=x$ 、 $\theta=y$)。また、体積力・発熱・拡散物質の発生などはその過程は考慮せずに全てソース項 (f_i, \dot{q}, \dot{d}) として取り扱っている。

(a) 質量の保存式

$$\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r^\alpha} \frac{\partial V}{\partial \theta} + \frac{\partial W}{\partial z} + \frac{\alpha U}{r} = 0 \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

(b) 運動量の保存式

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{V}{r^\alpha} \frac{\partial U}{\partial \theta} + W \frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\alpha V^2}{r} = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r^{2\alpha}} \frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \frac{\alpha}{r} \frac{\partial U}{\partial r} - \right. \\ \left. \frac{\alpha U}{r^2} - \frac{2\alpha}{r^2} \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + f_r - g_r \beta (T - T_{ref}) \quad \dots\dots\dots (2.2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{V}{r^\alpha} \frac{\partial V}{\partial \theta} + W \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\alpha UV}{r} = \\ - \frac{1}{\rho r^\alpha} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \nu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r^{2\alpha}} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + \right. \\ \left. \frac{\alpha}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{2\alpha}{r^2} \frac{\partial U}{\partial \theta} - \frac{\alpha V}{r^2} \right) + f_\theta - g_\theta \beta (T - T_{ref}) \quad \dots\dots (2.3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{V}{r^\alpha} \frac{\partial W}{\partial \theta} + W \frac{\partial W}{\partial z} = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r^{2\alpha}} \frac{\partial^2 W}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} + \frac{\alpha}{r} \frac{\partial W}{\partial r} \right) \\ + f_z - g_z \beta (T - T_{ref}) \quad \dots\dots\dots (2.4) \end{aligned}$$

(c) エネルギーの保存式

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} + U \frac{\partial \rho C_p T}{\partial r} + \frac{V}{r^\alpha} \frac{\partial \rho C_p T}{\partial \theta} + W \frac{\partial \rho C_p T}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial r} K \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^{2\alpha}} \frac{\partial}{\partial \theta} K \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\alpha K}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \dot{q} \quad \dots (2.5) \end{aligned}$$

(d) 乱流エネルギー・乱流消失率の式 (k-ε方程式)

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + U \frac{\partial k}{\partial r} + \frac{V}{r^\alpha} \frac{\partial k}{\partial \theta} + W \frac{\partial k}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial r} \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial r} + \frac{1}{r^{2\alpha}} \frac{\partial}{\partial \theta} \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} + \frac{\alpha \nu_t}{r \sigma_k} \frac{\partial k}{\partial r} \\ + G_s + G_T - \epsilon \quad \dots\dots\dots (2.6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U \frac{\partial \epsilon}{\partial r} + \frac{V}{r^\alpha} \frac{\partial \epsilon}{\partial \theta} + W \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial r} \nu_t \frac{\partial \epsilon}{\sigma_\epsilon} + \frac{1}{r^{2\alpha}} \frac{\partial}{\partial \theta} \nu_t \frac{\partial \epsilon}{\sigma_\epsilon} + \frac{\partial}{\partial z} \nu_t \frac{\partial \epsilon}{\sigma_\epsilon} + \\ + \frac{\alpha \nu_t}{r \sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial r} + C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_S + G_T) (1 + C_3 R_f) - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad \dots\dots\dots (2.7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_S = \nu_t \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{1}{r^\alpha} \frac{\partial V}{\partial \theta} + \frac{\alpha U}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 \right\} + \right. \\ \left. \left(\frac{1}{r^\alpha} \frac{\partial U}{\partial \theta} + \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{\alpha V}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{1}{r^\alpha} \frac{\partial W}{\partial \theta} \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial r} + \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

$$G_T = \frac{\nu_t}{\alpha} \beta \left(g_r \frac{\partial T}{\partial r} + g_\theta \frac{\partial T}{r^\alpha \partial \theta} + g_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

$$R_f = -G_T / (G_S + G_T)$$

$$\nu_t = C_t \frac{k^2}{\epsilon}$$

(e) 拡散物質の保存式

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{V}{r^\alpha} \frac{\partial C}{\partial \theta} + W \frac{\partial C}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial r} D_m \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{1}{r^{2\alpha}} \frac{\partial}{\partial \theta} D_m \frac{\partial C}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial z} D_m \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\alpha D_m}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \dot{d} \quad \dots\dots\dots (2.8) \end{aligned}$$

3. 境 界 条 件

STREAMにおける境界条件は、一般のコントロール・ボリューム法と同様に解析領域内の境界面を有するコントロール・ボリューム・セルに対して適用される。境界条件を指定しないことは、例えば、運動方程式では壁面での摩擦によるせん断応力が無いこと、すなわち、すべり壁 (Free Slip Wall) を設定したことになり、エネルギー方程式では断熱壁 (Adiabatic Wall) を設定したことになる。また、流体と固体、流体と解析領域外が接する面での流体の流入出や拡散は生じない。

以上のような基本的な境界条件が初期設定される。したがって、境界面を通過する流束(Flux)がある場合や、境界面での摩擦・発熱・拡散などがある場合には境界面を有するセルに対して以下のような境界条件を設定することができる。

- (1) 流体が境界面を通過する場合 (Flux 境界条件)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} + \frac{V}{r^\alpha} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \theta} + W \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial r} \nu_t \frac{\partial \varepsilon}{\sigma_\varepsilon} + \frac{1}{r^{2\alpha}} \frac{\partial}{\partial \theta} \nu_t \frac{\partial \varepsilon}{\sigma_\varepsilon} + \frac{\partial}{\partial z} \nu_t \frac{\partial \varepsilon}{\sigma_\varepsilon} + \\ + \frac{\alpha \nu_t}{r \sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_S + G_T) (1 + C_3 R_f) - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad \dots\dots\dots (2.7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_S = \nu_t \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{1}{r^\alpha} \frac{\partial V}{\partial \theta} + \frac{\alpha U}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 \right\} + \right. \\ \left. \left(\frac{1}{r^\alpha} \frac{\partial U}{\partial \theta} + \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{\alpha V}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{1}{r^\alpha} \frac{\partial W}{\partial \theta} \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial r} + \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

$$G_T = \frac{\nu_t}{\alpha} \beta \left(g_r \frac{\partial T}{\partial r} + g_\theta \frac{\partial T}{r^\alpha \partial \theta} + g_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

$$R_f = -G_T / (G_S + G_T)$$

$$\nu_t = C_t \frac{k^2}{\varepsilon}$$

(e) 拡散物質の保存式

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{V}{r^\alpha} \frac{\partial C}{\partial \theta} + W \frac{\partial C}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial r} D_m \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{1}{r^{2\alpha}} \frac{\partial}{\partial \theta} D_m \frac{\partial C}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial z} D_m \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\alpha D_m}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \dot{d} \quad \dots\dots\dots (2.8) \end{aligned}$$

3. 境 界 条 件

STREAMにおける境界条件は、一般のコントロール・ボリューム法と同様に解析領域内の境界面を有するコントロール・ボリューム・セルに対して適用される。境界条件を指定しないことは、例えば、運動方程式では壁面での摩擦によるせん断応力が無いこと、すなわち、すべり壁 (Free Slip Wall) を設定したことになり、エネルギー方程式では断熱壁 (Adiabatic Wall) を設定したことになる。また、流体と固体、流体と解析領域外が接する面での流体の流入出や拡散は生じない。

以上のような基本的な境界条件が初期設定される。したがって、境界面を通過する流束(Flux)がある場合や、境界面での摩擦・発熱・拡散などがある場合には境界面を有するセルに対して以下のような境界条件を設定することができる。

- (1) 流体が境界面を通過する場合 (Flux 境界条件)

流体が境界面を通過する場合には、流体の移動に伴って質量、運動量、エネルギーおよび拡散物質などが移動する。これは運動方程式やエネルギー式などの次式の対流項によるものである。

一般の従属変数 ϕ についての保存形表示した対流項は

$$\int \phi u_j n_j dS \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで、
 ϕ ; $\rho, \rho u_j, \rho C_p T, C$
 u_j ; 境界面を通過する流速
 n_j ; 境界面に外向きに立てた法線ベクトルの方向余弦
 S ; 積分領域 (境界面)

と書ける。

非圧縮性流体では密度変化は考慮しない ($\rho = \text{一定}$) ので質量についての指定は不要であるが、運動量、エネルギーと拡散物質の濃度については指定が必要となる。

しかし、本コードでは後述するように対流項に一次風上差分が適用されているので境界面を通過する流束は流入の場合には境界外の値を設定する必要があるが、流出の場合には特に境界条件を指定する必要はない。

(2) 境界面で摩擦・発熱・拡散を生ずる場合 (非 Flux 境界条件)

境界面での摩擦・発熱・拡散を運動方程式、エネルギーおよび拡散方程式で考慮するための境界条件である。発熱や拡散物質の発生については境界セルにおいてソース項として組み入れるだけなので、ここでの説明は省略する。

運動方程式で壁面の摩擦を考慮する場合、層流と乱流の場合で取り扱いが異なるので注意が必要となる。以下の説明では、境界面に平行な方向を x 、境界面に垂直な方向を y とする。

(a) 層流の場合

① 滑り無し境界 (No-Slip 壁) : 壁面での摩擦によるせん断応力は、境界面に流体が粘着し速度が 0 になることによって発生する。

② 移動壁境界 : この場合の壁面での応力は、流体と壁面との相対速度差によって生ずることになる (Fig. 3.1 参照)。

壁面の移動速度を u_B とすれば、せん断応力 τ は①と②をまとめて次式で表わされる。

$$\tau = \mu \frac{\partial (u - u_B)}{\partial y} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

(b) 乱流の場合

乱流の場合の壁面での応力の取扱いは、層流ほど単純ではない。ここでは、本コードのような $k-\epsilon$ 型 2 方程式モデルを用いた場合よく使用される壁面せん断応力の取り扱い方法について述べる。

乱流では、その乱れ (渦) が捉えられる程に空間分解能を上げる。即ち、計算格子点を増加させる必要がある。この渦のスケールを Kolomogorov のスケールに採った場合、必要な格子点数は $Re^{9/4}$ のオーダー⁶⁾ となり、計算機の進歩が飛躍的に進んだとしても実現は困難であろう。そこで、格子点数を節約するため Launder らによって提案された手法が対数則法または壁関数法

(Wall function method) と呼ばれる方法⁵⁾である。

平板や円管壁に沿った乱流境界層内の速度分布は多くの実験結果から次式で表されることが知られている。^{7,8)}

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln(u^* y / \nu) + A \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

ここで、 κ : カルマン定数 (= 0.42) A : 定数 (= 5.5)
 y : 壁からの距離 u : y における流速
 u^* : 摩擦速度 ($=\sqrt{\tau/\rho}$) τ : せん断応力

これが対数則 (log-law) であり、Fig. 3.2 に示した乱流境界層の普遍速度分布のうち、図中に示した対数則領域 ($30 < u^* y / \nu < 1000$) に対して成り立つ経験則である。 $u^* y / \nu < 30$ の領域は壁面の極く近傍に存在する粘性低層と呼ばれ、その厚みは極めて薄く、速度分布が線形 (y に比例する) の層流状態の領域である。コード中では壁関数法を用いることによって、この非常に薄い粘性低層を考慮しない (計算を行わない) ので計算量の低減化が図られている。

対数則は壁乱流 (乱流境界層的な流れ場) に対して本来適用すべきものであるが、再循環流領域を含む数多くの熱流動解析に適用され工学的にはほぼ妥当な結果を与えることが報告⁹⁾されており、著者らも円形乱流衝突噴流の熱流動解析においてその妥当性を確認している。¹⁰⁾

格子点位置や乱量諸量の関係で対数則領域から逸脱した場合、コード中ではそれぞれ $u^* y / \nu = 30$ 、 1000 に固定するようになっており、壁面に最も近い計算セルの寸法には特に注意を払う必要がある。

計算の手順としては、式 (3.3) の非線形方程式を Newton Raphson 法で解いて u と u^* を求め、摩擦速度の定義からせん断応力 τ を求めて運動方程式の境界条件として繰り込むことになる。また、乱流諸量についての境界条件は第 4 章で説明する。

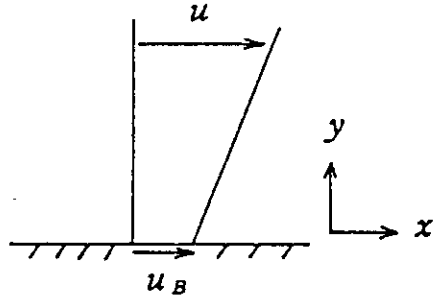


Fig. 3.1 Wall Boundary

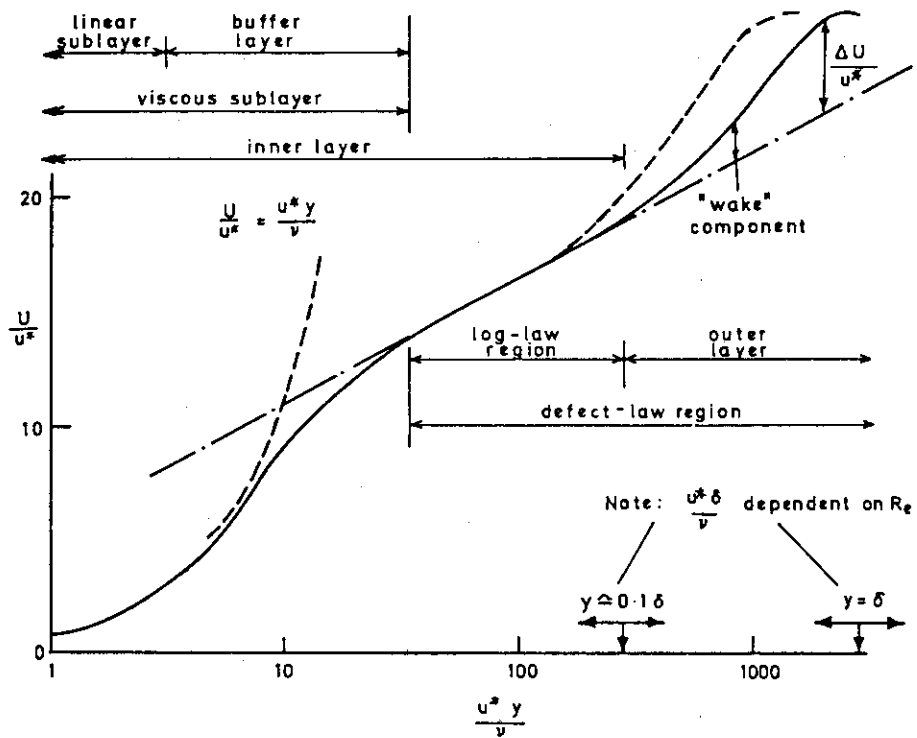


Fig. 3.2 Universal Velocity Profile⁸⁾

4. 乱 流 モ デ ル

乱流モデルの取り扱いについては、その詳細を他の成書^{5,6)}に譲ることにして、ここでは本コードで取り扱っている $k-\epsilon$ 型 2 方程式乱流モデルと方程式中の各項の簡単な説明だけを行い、境界条件や経験定数の設定について述べる。

ある瞬間における速度、圧力、温度および拡散物質の濃度をそれらの時間平均値とそれからの変動分とに分けて考え、これらを元来の Navier-Stokes 方程式に代入して時間平均を行うと、以下のような方程式群が得られる。

$$\frac{\partial \overline{\rho u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_j \rho u_i}}{\partial x_j} = - \frac{\partial \overline{P}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \overline{\rho u_j' u_i'} \right) + \rho f_i \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

$$\frac{\partial \rho C_p \overline{T}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_j \rho C_p T}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K \frac{\partial \overline{T}}{\partial x_j} - \rho C_p \overline{u_j' T'} \right) + \dot{q} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

$$\frac{\partial \overline{C}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_j C}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_m \frac{\partial \overline{C}}{\partial x_j} - \overline{u_j' C'} \right) + \dot{d} \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

式中の上付きバーは時間平均値、プライムは変動値を表している。式(4.1)はレイノルズ方程式であり、 $(-\overline{\rho u_j' u_i'})$ がレイノルズ応力である。同様に、式(4.2)と式(4.3)の変動成分同士の相関項はスカラー量の乱流輸送を表している。これらの方程式群中の乱流相関項は新しい未知変数であるので、このままでは方程式の数と未知変数の数が一致しないので解くことができない。したがって、これらの乱流相関項を既知変数から求められるようにモデル化する必要がある。

(a) レイノルズ応力項のモデル化

レイノルズ応力 $(-\overline{\rho u_j' u_i'})$ のモデル化には Boussinesq に始まる交換係数モデル¹¹⁾以来現在まで渦粘性の概念が導入されている。この渦粘性係数 μ_t は層流時のせん断応力が分子粘性係数 μ と速度の空間勾配で表されることになって、次式のような関係により定義されている。

$$-\overline{\rho u_j' u_i'} = \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_k' u_k'}$$

ここで、 k は乱流運動エネルギーと呼ばれ、上式のように速度変動テンソルの対角成分の総和の $1/2$ で定義される量である。この項は時間平均の圧力の寄与を表しており、これによってレイノルズ応力テンソルの主応力 ($i = j$) が保たれることになる。

(b) スカラー量の乱流輸送項のモデル化

乱流熱流束項および乱流物質拡散流束項のモデル化は一般のスカラー従属変数 ϕ の変動成分 ϕ'

と速度変動成分 u' との相関項のモデル化を考えることによって一意的に取り扱う。 Γ_t をスカラー量 ϕ の乱流拡散係数とすると、相関項は次式で表せる。

$$-\overline{\rho u_j' \phi'} = \Gamma_t \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

ここで、 $\Gamma_t = \mu_t / Pr_t$, Pr_t は乱流プラントル数または乱流シュミット数であり、通常おおよそ 0.9 ~ 1.0 である。

(c) $k-\epsilon$ 型 2 方程式

第 2 章の(d)で示した方程式系がここで取り扱われている $k-\epsilon$ 型 2 方程式モデルである。乱流の特性量として、乱流エネルギー k とその乱流消失率 ϵ を選びこれらによって渦粘性係数を次式で定義している。

$$\nu_t = C_t \frac{k^2}{\epsilon} \quad , \quad (\mu_t = \rho \nu_t) \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

$$\epsilon = \nu \frac{\partial u_i' \partial u_i'}{\partial x_i \partial x_j}$$

したがって、新しい未知数である k と ϵ の輸送方程式を運動方程式に連成させて時間平均の局所等方的な乱流場を解析することになる。以下にテンソル表示した $k-\epsilon$ 方程式を示す。ただし、時間平均の上付き $-$ は省略している。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_i k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_S + G_T - \epsilon \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_i \epsilon}{\partial x_i} = & \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_S + G_T) (1 + C_3 R_f) \\ & - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad \dots\dots\dots (4.8) \end{aligned}$$

$$G_S = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$G_T = g_i \beta \frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

$$R_f = - \frac{G_T}{G_S + G_T}$$

ここで、 G_S と G_T の項はそれぞれせれ断力および浮力による乱流エネルギーの発生を表す項であり、両者の比をフラックス・リチャードソン数 R_f として定数 C_3 を掛けて浮力の効果の調節を行う。この係数 C_3 は鉛直自然対流の場合 $C_3 = 0$, 水平自然対流の場合 $C_3 = 1$ をとる。一般の再循環領域については C_3 の値をどのように設定すべきかは確立されていないが、例えば、Rodi は $C_3 = 0.8$ が推奨値であると報告している。¹²⁾ しかし、ソース項中でのこの項が負であり、乱流エネルギーの散逸速度を小さく見積る方向に働くことから、数値解析上の振動・発散の原因

となる場合も生ずる。したがって、コード中では初期設定値を $C_3 = 0$ としている（もちろん変更は可能である）。

$k-\epsilon$ モデルでは6個の係数が含まれているが、その由来は以下の類推および最適化によるものである。 C_3 については上述したので残りの5個について述べる。

C_t : 壁近傍では乱流エネルギーの対流と拡散を無視できるので、 k 方程式の発生項と散逸項が局所的に平衡状態にあると仮定する。

例えば、2次元乱流境界層では、

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 - \rho \epsilon \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

(対流) (拡散) (発生) (散逸)

と書ける。ここで対流と拡散を無視すれば、

$$\mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 = \rho \epsilon = C_t \frac{\rho k^{3/2}}{L} \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

(発生) (散逸) (局所等方性仮説¹¹⁾: 次元解析結果, Lは場のスケール)

となる。両辺に μ_t を掛けると、左辺はせん断力 τ の2乗となり、渦粘性の定義より

$$C_t = [\tau / (\rho k)]^2 \quad \dots\dots\dots (4.11)$$

と書ける。数多くの実験⁷⁾によれば、 $\tau / (\rho k) = \overline{uv} / k \sim 0.3$ である。したがって、 $C_t = 0.09$ が得られる。

C_2 : 格子乱流の減衰についての実験結果⁷⁾を適用してこの係数を決める。この場合、式(4.9)の例えば x 方向について対流項と散逸項のバランスを考える。

$$\rho u \left(\frac{\partial k}{\partial x} \right) = - \rho \epsilon \quad \dots\dots\dots (4.12)$$

また、乱流消失率 ϵ の輸送方程式は、

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \frac{\epsilon}{k} \left[C_1 \mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 - C_2 \rho \epsilon \right] \quad \dots\dots\dots (4.13)$$

(対流) (拡散) (発生) (散逸)

であるから、同様に x 方向について対流項と散逸項のバランスを考えて、

$$\rho u \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) = - C_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k} \quad \dots\dots\dots (4.14)$$

と書ける。一方、実験⁷⁾では格子乱れ k の減衰は格子からの距離 x に逆比例するので、

$$kx^n = C^* \quad (C^* : \text{定数}) \quad \dots\dots\dots (4.15)$$

ここで、 $n = 1 \sim 1.2$ が報告されている。これらの関係から $C_2 = 2.0 \sim 1.85$ が得られるが、多くの計算実験から $C_2 = 1.92$ などが標準的に用いられている。

C_1 : 壁近傍においては、 ϵ の輸送方程式の対流項は無視できる。また、対数則の成り立つような定せん断層内では式 (4.11) の関係が成り立ち、速度勾配は対数則

$$\partial u / \partial y = (\tau / \rho)^{1/2} / \kappa y \quad \dots\dots\dots (4.16)$$

に従うので、これらを定常時の式 (4.13) に代入し、整理しなおすと、

$$C_1 = C_2 - \kappa^2 / (\sigma_\epsilon C_t^{1/2}) \quad \dots\dots\dots (4.17)$$

ここで、 $\sigma_\epsilon = 1.3$ 、 $\kappa = 0.42$ とすれば、 $C_1 = 1.47$ が得られるが、標準的には $C_1 = 1.44$ が用いられる。

σ_k : k の拡散についての乱流プラントル数、通常 $\sigma_k = 1.0$ を用いる。

σ_ϵ : ϵ の拡散についての乱流プラントル数、壁近傍で定常状態の式 (4.13) を考え、対流項は無視し、定せん断層、対数則領域の速度分布を代入すれば、最終的に次の関係式が導かれる。

$$\sigma_\epsilon = \kappa^2 [(C_2 - C_1) C_t^{1/2}] \quad \dots\dots\dots (4.18)$$

この式にこれまで得られた係数を代入すれば、 $\sigma_\epsilon = 1.225$ が得られる。標準的には $\sigma_\epsilon = 1.3$ が使われている。

以上に一応の由来を示したが、実際には数多くの計算実験によって Table 4.1 のように最適化された標準の係数群となっている。これらの係数は局所等方的な乱流場や境界層的な流れについて発展してきたものであるから、非等方的な乱流場や旋回流・再循環流などについての適用には本質的な問題を抱えていると言える。このような流れ場は、より高次の乱流モデルや L.E.S.

(Large Eddy Simulation), D.N.S. (Direct Numerical Simulation) などで取り扱わなければならない、現在この方面の研究が急がれている。¹³⁾

(d) 境界条件

$k-\epsilon$ 方程式の境界条件については、モデルの説明のところでも述べたように、定せん断層を仮定するか、または Free Slip 壁を設定することになる。

- Free Slip 壁の場合、壁面に垂直な方向を n とすると、

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0 \quad , \quad \frac{\partial \epsilon}{\partial n} = 0 \quad \dots\dots\dots (4.19)$$

- 定せん断層を仮定した場合、対数則に従って

$$k = u^{*2} / C_t^{1/2} \quad , \quad \epsilon = u^{*3} / \kappa y \quad \dots\dots\dots (4.20)$$

(y は壁面に垂直方向の距離)

の条件を設定することになる。

Table 4.1 Constants of k- ϵ Model of Turbulence

σ_k	σ_ϵ	C_1	C_2	C_3	C_t
1.0	1.3	1.44	1.92	0.0	0.09

5. 解析手法

運動方程式は速度と圧力を未知数として含んでおり、その定式化の方法には以下の例がある。

- (1) 速度と圧力を用いる方法（原始関数法：Primitive variable method）
- (2) 渦度と流れ関数を用いる方法
- (3) 速度と渦度を用いる方法

STREAM は、(1)の方法で定式化されており、流速値とスカラー値を分離した点で取り扱うスタガー格子を用いたコントロール・ボリューム法¹⁴⁾で離散化している。着目した要素の境界から流入する運動量とエネルギーの評価は、中心差分¹⁴⁾で取り扱った場合、テイラー級数展開で2次の精度を持つ（等間隔格子の場合）ことが知られている。しかし、対流項に中心差分近似を行った場合には安定性の解析¹⁴⁾でも指摘されているようにセル・ペクレ数 P_d [$P_d = (\text{計算セル幅}) \times (\text{セル流速}) / (\text{動粘性係数})$] が2を越えた場合に計算が発散する可能性がある。したがって、本コード中では対流項に風上差分¹⁴⁾を適用して計算の安定化を図っている。離散化の方法については、種々の成書^{14, 15, 16)}があるのでそれらを参考にされたい。ともかく、以上のように対流項を除く他の項については中心差分を適用している。

解法は良く知られた SIMPLE法¹⁶⁾を用いており、その手法は以前に報告している¹⁾のでここでは省略するが、概略は以下のようなものである。

①初期圧力場を用いて運動方程式を解く。得られた流速値は連続条件を満足していないので、②この量を使って圧力補正量のポアソン方程式を反復法（後述するSOR法やMICCG法）で解いて圧力補正量を求める。③この補正量を元の圧力値に加えて新しい圧力場、速度場を構成する。これを収束判定条件を満足するまで（連続条件： $\nabla u < \epsilon$ 、例えば $\epsilon = 10^{-6}$ ）繰り返す。収束後、次のタイム・ステップへ進む。時間方向の定常判定条件を満足した時点で計算を終了する。

定常判定について、本コードのような非定常コードの場合には時間方向の定常判定条件の決め方が難しい。これは、完全な定常な流れ場がほとんど存在しないことによるためと考えられる。完全に定常な流れ場の実験による実現は困難であろうし、計算でも非定常計算コードでの行列計算の係数はタイム・ステップを進める度にわずかずつ変化するためである。また、現象的に不安定性を内在している場合などでは、定常的になった後で再び振動を開始し、新たな安定状態に至る経過を示す。この現象自体が予想される場合には解析者は対応することが可能であるが、予想し得なかった場合（解析者の準備不足や複雑あるいは複合的な現象を扱う場合など）の判断は難しい。このようなことは、本コードに限らず熱流体解析に残されている大きな問題の一つである。

Table 4.1 Constants of k- ϵ Model of Turbulence

σ_k	σ_ϵ	C_1	C_2	C_3	C_t
1.0	1.3	1.44	1.92	0.0	0.09

5. 解析手法

運動方程式は速度と圧力を未知数として含んでおり、その定式化の方法には以下の例がある。

- (1) 速度と圧力を用いる方法（原始関数法：Primitive variable method）
- (2) 渦度と流れ関数を用いる方法
- (3) 速度と渦度を用いる方法

STREAM は、(1)の方法で定式化されており、流速値とスカラー値を分離した点で取り扱うスタガー格子を用いたコントロール・ボリューム法¹⁴⁾で離散化している。着目した要素の境界から流入する運動量とエネルギーの評価は、中心差分¹⁴⁾で取り扱った場合、テイラー級数展開で2次の精度を持つ（等間隔格子の場合）ことが知られている。しかし、対流項に中心差分近似を行った場合には安定性の解析¹⁴⁾でも指摘されているようにセル・ペクレ数 P_d [$P_d = (\text{計算セル幅}) \times (\text{セル流速}) / (\text{動粘性係数})$] が2を越えた場合に計算が発散する可能性がある。したがって、本コード中では対流項に風上差分¹⁴⁾を適用して計算の安定化を図っている。離散化の方法については、種々の成書^{14, 15, 16)}があるのでそれらを参考にされたい。ともかく、以上のように対流項を除く他の項については中心差分を適用している。

解法は良く知られた SIMPLE 法¹⁶⁾を用いており、その手法は以前に報告している¹⁾のでここでは省略するが、概略は以下のようなものである。

①初期圧力場を用いて運動方程式を解く。得られた流速値は連続条件を満足していないので、②この量を使って圧力補正量のポアソン方程式を反復法（後述する SOR 法や MICCG 法）で解いて圧力補正量を求める。③この補正量を元の圧力値に加えて新しい圧力場、速度場を構成する。これを収束判定条件を満足するまで（連続条件： $\nabla u < \epsilon$ 、例えば $\epsilon = 10^{-6}$ ）繰り返す。収束後、次のタイム・ステップへ進む。時間方向の定常判定条件を満足した時点で計算を終了する。

定常判定について、本コードのような非定常コードの場合には時間方向の定常判定条件の決め方が難しい。これは、完全な定常な流れ場がほとんど存在しないことによるためと考えられる。完全に定常な流れ場の実験による実現は困難であろうし、計算でも非定常計算コードでの行列計算の係数はタイム・ステップを進める度にわずかずつ変化するためである。また、現象的に不安定性を内在している場合などでは、定常的になった後で再び振動を開始し、新たな安定状態に至る経過を示す。この現象自体が予想される場合には解析者は対応することが可能であるが、予想し得なかった場合（解析者の準備不足や複雑あるいは複合的な現象を扱う場合など）の判断は難しい。このようなことは、本コードに限らず熱流体解析に残されている大きな問題の一つである。

6. ベクトル化

ベクトル化作業は以下に示す手順で行った。

- i) ソフトウェア・ツール FORTUNE¹⁹⁾ を用いてオリジナル版 STREAM の動的解析を行い、計算コストの高いルーチン群を選び出す。
- ii) 計算コストの高いルーチン群について、ベクトル化が可能であるかを調べ、可能であるものについてベクトル化作業を進める。
- iii) オリジナル版とベクトル化版との計算結果の違いを調べる。

オリジナル版で最も計算コストの高い部分は MICCG 法および ILUCR 法のワークファイル入出力部分であり、これは内部処理化することで計算コストを下げるとともにベクトル計算向きとした。

連立一次方程式の解法 (MICCG 法, ILUCR 法, SOR 法) 部分はデータの参照に再帰性があるためにベクトル計算できないが, Hyper Plane 方式によるリストを作成することでベクトル化を可能とした。

その他 FUNCTION の内部展開等の手法を用いてベクトル化を行い、最終的に95%以上の部分がベクトル化された。以下に本作業で行ったベクトル化の内容を説明する。なお計算結果はオリジナル版とベクトル化版で完全に一致した。

6.1 Hyper Plane 方式

MICCG 法, ILUCR 法, SOR 法ではその DO ループ構造が再帰的であるためベクトル化には不向きである。本作業ではこれらのループを, Hyper Plane 方式によるリストベクトルを用いることによってベクトル計算向きとした。

Hyper Plane 方式を利用した場合の利点として、「平均ベクトル長が長くできる」、「オリジナル版と基本的な演算順序が同じであるため計算結果は一致する」等があげられる。逆にリスト領域を必要とするため主記憶領域が増加するのが短所としてあげられる (MICCG 法では前進消去, 後退代入用に2種, SOR 法では解く方程式によって4種のリストが必要。但し ILUCR 法のリストは MICCG 法の前進消去用と同じ)。

さて, Hyper Plane 方式の計算手順を以下に示す (簡単のために2次元格子を用いる)。

a) MICCG 法²⁰⁾

MICCG 法は不完全 Cholesky 分解にある修正を加えた行列に対して CG 法を適用したもので, CG 法より収束が速くなる。MICCG 法の計算手順は,

- ① 行列 A を LDL^T の形に不完全 Cholesky 分解する。
- ② $\vec{r}_0 = \vec{b} - A\vec{x}_0$, $\vec{p}_0 = [LDL^T]^{-1} \vec{r}_0$ 。
- ③ $i = 0$

- ④ $\alpha_i = (\vec{r}_i, [\text{LDL}^T]^{-1} \vec{r}_i) / (\vec{p}_i, \vec{A} \vec{p}_i)$
- ⑤ $\vec{x}_{i+1} = \vec{x}_i + \alpha_i \vec{p}_i$
- ⑥ $\vec{r}_{i+1} = \vec{r}_i - \alpha_i \vec{A} \vec{p}_i$
- ⑦ 収束ならば終了
- ⑧ $\beta_i = (\vec{r}_{i+1}, [\text{LDL}^T]^{-1} \vec{r}_{i+1}) / (\vec{p}_i, \vec{A} \vec{p}_i)$
- ⑨ $\vec{p}_i = [\text{LDL}^T]^{-1} \vec{r}_{i+1} + \beta_i \vec{p}_i$
- ⑩ $i = i + 1$ として④に戻る。

となっているが、内積、行列×ベクトルの計算部分が多いためその部分はベクトル化できる。しかし次の2つの計算は再帰的となるためにベクトル化できない。

- LDL^T 分解
- $[\text{LDL}^T]^{-1} \vec{r}$ の計算

本作業ではこの2つの計算部分に Hyper Plane 方式を適用しベクトル化を行った。

Fig. 6.1 は MICCG 法における格子上の計算順序を示したものである。オリジナル版(左図)では配列の一次元化によって巨大なループ構造となっているが、○の点を計算する際に●の点を参照(再帰参照)するためにベクトル化できない。Hyper Plane(右図)ではループを [1], [2~3], [4~6]…… [37~45]…… [79~80], [81] のように分割し斜めに計算する。○の点を計算する際に参照する▲の点は直前のループで定義されるため再帰参照とならず、この分割されたループ単位でベクトル化が可能となる。この場合のリストベクトルは左図オリジナル版の計算順序番号で表わすと, [1], [2, 10], [3, 11, 19], [4, 12, 20, 28] となる。これを2次元的に表わすと [(1, 1)], [(2, 1), (1, 2)], [(3, 1), (2, 2), (1, 3)], [(4, 1), (3, 2), (2, 3), (1, 4)] …… となり, ループ番号 n には [(i, j) : i+j=n+1] の要素が並ぶ(3次元の場合は [(i, j, k) ; i+j+k=n+2] となる。)

プログラムの場合は Fig. 6.2 のようなリストを作成する。

【注】

本コード(オリジナル版)では係数の関係でループを [1], [2~9], [10~81] のように分けてある(実際は3次元なので4つに分類される)。本作業では最も計算コストの高い [10~81] のループに Hyper Plane 方式を適用した。

〔修正例〕

(1) 不完全 Cholesky 分解

Fig. 6.3 は不完全 Cholesky 分解部分に Hyper Plane 方式を適用した例である。オリジナル版では配列 D に関して再帰参照があるためにベクトル化できない。ベクトル化版では Hyper Plane 方式によって再帰性はなくなるためベクトル化できる。ただし、コンパイラ指示行(*VO CL)を入れなければならない。

配列 IA はリスト領域で、添字 IA1 以降が list-1, IP1 以降が list-2 である。

(2) 前進消去・後退代入

$[LDT^T]^{-1} \vec{r}$ の計算は $[LDT^T] \vec{g} = \vec{r}$ を前進消去、後退代入で求めることになるが、 \vec{g} の参照に再帰性がある。Fig. 6.4 はこの前進消去部分に Hyper Plane 方式を適用した例である。後退代入では後退代入用のリストを用いて同様の計算を行う。

(3) リスト作成の例

Hyper Plane 用のリスト作成例（前進消去用）を Fig. 6.5 に示す。後退代入用も同様にして作成できる。

b) ILUCR 法²⁰⁾

ILUCR 法は不完全 LDU 分解を前処理として用いてから CR 法を適用するものでその演算内容は ICCG 法と類似している。このため MICCG 法で用いた Hyper Plane リストがそのまま利用できる。

c) SOR 法²⁰⁾

SOR 法は連立一次方程式の代表的な反復解法の一つであり MICCG 法、ILUCR 法 より一回の反復計算当たりの計算量が少ないという利点がある（ただし収束速度や精度の点で他解法よりやや劣る）。SOR 法では第 k 回目の近似解 $x_i^{(k)}$ を求める際に既に計算された $x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_{i-1}^{(k)}$ を参照するためこのままではベクトル化できない。これをベクトル計算向きとする方法として以下の方法がある。¹⁷⁾

- ① Odd-even 法
- ② Hyper-plane 法
- ③ Multi-color 法

本作業では MICCG 法と同様に Hyper Plane 方式を適用してベクトル化を行った。

Fig. 6.6 は SOR 法における格子上の計算順序を示したものである。オリジナル版（左図）ではループ構造は [1~9], [10~18], …… [73~81] の 2 次元ループ（実際は 3 次元ループ）になっており ○ の点を計算する際に ● の点が再帰参照となってベクトル化できない。これを MICCG 法と同様に Hyper Plane 方式（右図）とすることで再帰関係はなくなりベクトル化が可能となる。

STREAM コードでは解く方程式によって計算するメッシュ点が異なるため以下の 4 種のリストを作成する。

- i) U 方程式 [i = 2~IM, j = 1~JM, k = 1~KM]
- ii) V 方程式 [i = 1~IM, j = 2~JM, k = 1~KM]
- iii) W 方程式 [i = 1~IM, j = 1~JM, k = 2~KM]
- iv) スカラー方程式 [i = 1~IM, j = 1~JM, k = 1~KM]

なおモデルが円筒型の場合、V 方程式は iv) と同型になる。

〔修正例〕

Fig. 6.7 は SOR 法に Hyper Plane 方式を適用した例である。オリジナル版では変数 VARX 1 に再帰性があるためベクトル化できない。ベクトル化版では配列を一元化して Hyper Plane 方式を適用した。なお配列 JY1, JY2 は円筒型モデルの周期境界を意識したものである。また IF 文を削除してベクトル化効率の向上を図っている。

修正・作成ルーチン				
CDECMP	CLU	DECOMX	DECOMY	HYPLAN
HYPLA2	HYPLA3	LDLTPX	LDLTPY	PROCES
RDECMP	RLU	SORHYP	SORSLV	

6.2 FUNCTION 文の内部展開

DO ループ内で FUNCTION を引用している場合そのループはベクトル化されない。本作業では計算コストの高いものについて FUNCTION を引用しているルーチン内で文関数として定義しベクトル化した。Fig. 6.8 はその修正例である。

IF 文を含む FUNCTION の場合は引用している箇所に IF 文を入れた。またオプションによって式が異なる場合には FUNCTION を分割し、引用している箇所を使い分けを行った。

修正ルーチン				
COSOCC	COSOEI	COSOKK	COSOPP	COSOTT
COSOUU	COSOVV	COSOWW	LOGLAW	
展開した FUNCTION				
DFNCUU	DISCEN	FUNCGG	FUNCHH	FUNCUU
FUNGRV				

【注】

インクルードファイルのメンバ名は FUNCTION 名と同じにした。ただし、FUNGRV は FUNGR1, FUNGR2 に分割した。

6.3 DO 文の書き下し

多重 DO ループで最内 DO ループのベクトル長が短い場合、ベクトル演算の効率は低くなる。そのベクトル長が既知であれば書き下すことによって外側の DO ループがベクトル化できるので効率的となる。Fig. 6.9 は修正例である。オリジナル版では文番号 110, 120 の L に関する DO ループのみベクトル化されるがベクトル長が短く、外側の DO ループの計算コストが高いためベクトル化の効率は悪い。修正版ではこの DO ループを書き下すことによって文番号 100 の I に関するベクトル化ができるためベクトル長の増大、計算密度大の点で効率的となった。

修正ルーチン				
COSOCC	COSOEI	COSOKK	COSOPP	COSOTT
COSOUU	COSOVV	COSOWW		

6.4 作業配列の導入

FUNCTION の場合と同様に DO ループ内にサブルーチンの参照がある場合もベクトル化できない。この場合作業配列を導入し、下位ルーチンに DO ループを組み込むことでベクトル化できる。

Fig. 6.10は修正例である。変数GSは作業配列Aを用いてDOループの前で計算しておく。下位ルーチンでは上位ルーチンと同じDOループを組み込むことによって両ルーチンでベクトル処理ができるようになる。

修正ルーチン			
COSOKK	COSOTT		
PKSCYL	PKSORC	PTSCYL	PTSORC

6.5 DO文の分割

MICCG法、ILUCR法の(行列) × (ベクトル) 演算 ($LDL^T x$ または $LDU x$ の演算) では Lx と $L^T x$ または Lx と Ux を同時に計算しているため部分的に再帰参照となっている。しかしこれらは別々に計算することによってベクトル化が可能である。Fig. 6.11に修正例を示す。

ただし加算の順番が変わるのでオリジナル版とベクトル化版で若干の差異が出る場合がある。

修正ルーチン			
AXSUBX	AXSUBY	CAXSUB	RAXSUB

6.6 ワークファイルの内部処理化

MICCG法およびILUCR法では係数行列(帯行列)を作成する際にワークファイルでデータの授受を行っている。しかしこれは計算コストが高く、またベクトル計算向きでない。修正版では帯行列を格納する領域を別に設け、内部処理化することでベクトル計算向きとした(このため記憶容量は若干増加)。

Fig. 6.12はILUCR法におけるワークファイルへの出力部分を内部処理化した例である。配列Aは帯行列および定数ベクトルを格納する領域として使用している。

Fig. 6.13はMICCG法でのデータの流れを示したものである。オリジナル版ではCOF, SOCをワークファイルに出力し(PCSOL1), 同一領域上のA, Bに入力している(PCSOL2)。修正版ではA, Bの領域を別に設け直接COF, SOCを設定する(PCSOL1)。

Fig. 6.14はILUCR法でのデータの流れを示したものである。オリジナル版ではVAR, COF, SOCを用いて帯行列等を作成しワークファイル上に出力する(ILUCRM)。その後同一領域上のA, B, Xに入力する(CILUEXまたはRILUEX)。修正版ではMICCG法と同様に別領域に設けたA, B, X上に直接値を設定する(ILUCRM)。

【注】 別領域を設ける手順は MAIN ルーチンの変数 ITBO の設定で行っている。

修正ルーチン				
CILUEX	ILUCRM	PCSOL1	PCSOL2	RILUEX

6.7 ルーチンの内部展開

6.4 節と同じケースで、下位ルーチンが単純な構造の場合は上位ルーチンに展開してベクトル化を行う。Fig.6.15 はその例であり、サブルーチン SETDIM が配列 AC に定数 (0.0) を代入するだけなので DO 文を書き下して展開する (6.3 節と同様の手法)。

修正ルーチン
ILUCRM

6.8 ベクトル化不適命令

計算型 GOTO 文はベクトル化不適命令であり、このままではベクトル化できない。これは IF……THEN……ELSE……の形に書き直すことでベクトル化できる。Fig.16 にその例を示す。

修正ルーチン	
BDFORC	OPNFLX

6.9 チューニング

これまでにベクトル化したルーチンでも、IF 文を多く含む等ベクトル化の効率が悪いと処理速度の向上はあまり望めない。ここでは境界判定等の IF 文が多い係数行列を作成するルーチンに対して行ったチューニングの例を示す。Fig.6.17 はその一例であるが、主な修正内容は以下のものである。

- i) ループ変数 J, K のみで計算できるものは I ループの外に出す。このときマスク (FM221 など) を作成しておき、I ループ内の IF 文を減らす。
- ii) 変数 TSM はループに入る前にマスク TSMX に値を入れておき、ループ内での IF 文を削除する。
- iii) ループ変数 J に関しては円筒型モデルの周期境界条件を考慮して JM1, JP1 という変数を導入する。

以上の修正によって IF 文の数は大幅に減り、ベクトル化の効率はかなり改善された。

修正ルーチン				
COSOCC	COSOEE	COSOKK	COSOPP	COSOTT
COSOUU	COSOVV	COSOWW		

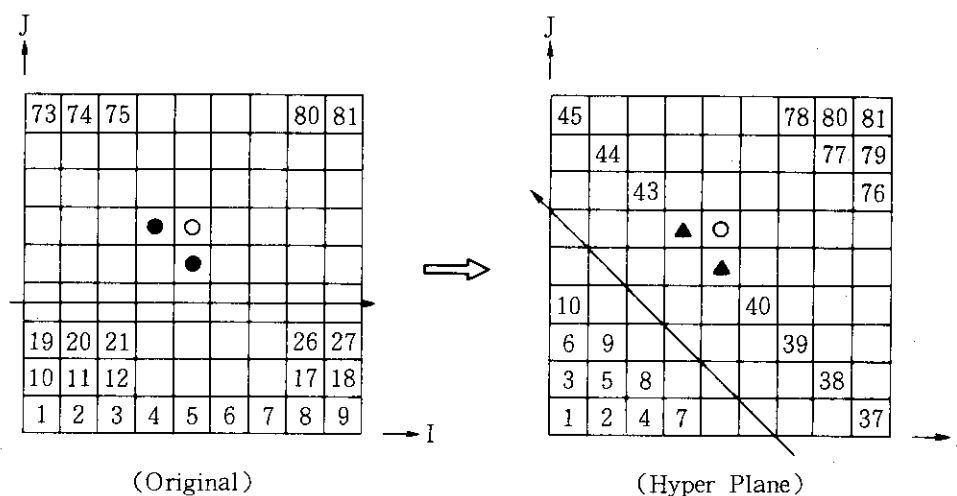


Fig. 6.1 Calculation Ordering for the MICCG Method

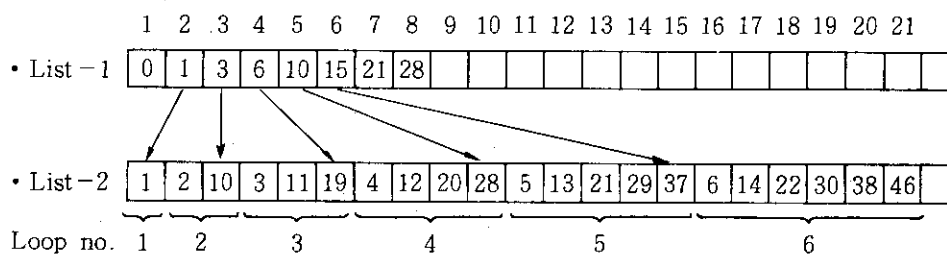


Fig. 6.2 List Index for the Hyper Plane Method

```

M      DO 105 I=M2P,N
M      W=A(1,I)-A(2,I-1)*(A(2,I-1)+(A(3,I-1)+A(4,I-1))*PARM)*D(I-1)
M      *      -A(3,I-M1)*(A(3,I-M1)+(A(2,I-M1)+A(4,I-M1))*PARM)*D(I-M1)
M      *      -A(4,I-M2)*(A(4,I-M2)+(A(2,I-M2)+A(3,I-M2))*PARM)*D(I-M2)
S      D(I)=1.0/W
V      105 CONTINUE

```

↓

```

S      DO 105 L = 2, NA1
S      ISTT = IA(IA1 + L - 2) + 1
S      IEND = IA(IA1 + L - 1)
*VOCL LOOP,NOVREC
V      DO 105 K = ISTT, IEND
V      I = IA(IP1 + K - 1)
V      W=A(1,I)-A(2,I-1)*(A(2,I-1)+(A(3,I-1)+A(4,I-1))*PARM)*D(I-1)
V      *      -A(3,I-M1)*(A(3,I-M1)+(A(2,I-M1)+A(4,I-M1))*PARM)*D(I-M1)
V      *      -A(4,I-M2)*(A(4,I-M2)+(A(2,I-M2)+A(3,I-M2))*PARM)*D(I-M2)
V      D(I)=1.0/W
V      105 CONTINUE

```

Fig. 6.3 Vectorization of the Incomplete Cholesky Decomposition
Using Hyper Plane Method

```

S      DO 105 I=M2P,N
S      P(I)=D(I)*(R(I)-A(2,I-1)*P(I-1)-A(3,I-M1)*P(I-M1)
S      *      -A(4,I-M2)*P(I-M2))
S      105 CONTINUE

```

↓

```

S      DO 105 L = 2, NA1
S      ISTT = IA(IA1 + L - 2) + 1
S      IEND = IA(IA1 + L - 1)
*VOCL LOOP,NOVREC
V      DO 105 K = ISTT, IEND
V      I = IA(IP1 + K - 1)
V      P(I)=D(I)*(R(I)-A(2,I-1)*P(I-1)-A(3,I-M1)*P(I-M1)
V      *      -A(4,I-M2)*P(I-M2))
V      105 CONTINUE

```

Fig. 6.4 Vectorization of the Forward Elimination

```

NA = 1
IA(1) = 0
JA = 0
M      DO 4300 L = IS + JS + KS, IM + JM + KM
S      DO 4100 K = KS, KM
S      DO 4100 J = JS, JM
V      DO 4100 I = IS, IM
V      IF (I + J + K .EQ. L) THEN
V      JA = JA + 1
V      IP(JA) = I + IMP*(J - 1 + JMP*(K - 1))
V      END IF
V      4100 CONTINUE
V      NA = NA + 1
S      IA(NA) = JA
V      4300 CONTINUE

```

Fig. 6.5 Example of Hyper Plane List

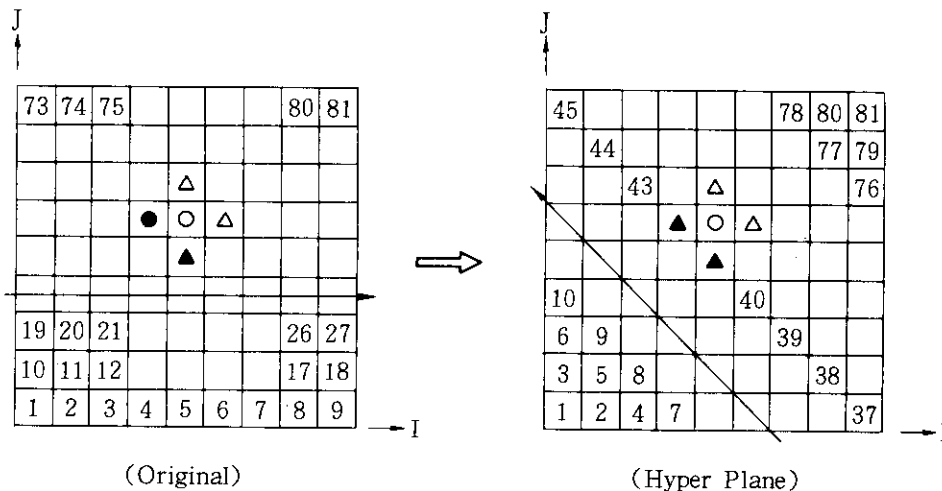


Fig. 6.6 Calculation Ordering of the SOR Method

```

DO 850 IT=1,ITR
ERR=0.0
S DO 150 K=K1,K2
S KK=K
S DO 150 J=J1,J2
S JM1=J-1
S JP1=J+1
S IF(J.EQ.J1) JM1=J2
S IF(J.EQ.J2) JP1=J1
S DO 150 I=I1,I2
V IF(COF(7,I,J,KK).EQ.0.0) GO TO 150
V VARX1=0.0
V VARX2=0.0
V VARZ1=0.0
V VARZ2=0.0
M IF(I.GT.1) VARX1=VAR(I-1,J,K)
V IF(I.LT.IGEN) VARX2=VAR(I+1,J,K)
V VARY1=VAR(I,JM1,K)
V VARY2=VAR(I,JP1,K)
V IF(K.GT.1) VARZ1=VAR(I,J,K-1)
V IF(K.LT.KGEN) VARZ2=VAR(I,J,K+1)
M DVAR=COF(1,I,J,KK)*VARX1+COF(2,I,J,KK)*VARX2
* +COF(3,I,J,KK)*VARY1+COF(4,I,J,KK)*VARY2
* +COF(5,I,J,KK)*VARZ1+COF(6,I,J,KK)*VARZ2
* +SOC(I,J,KK)
V ER =ABS(DVAR-COF(7,I,J,KK)*VAR(I,J,K))
V ERR=AMAX1(ERR,ER)
S DVAR=DVAR/COF(7,I,J,KK)-VAR(I,J,K)
S VAR(I,J,K)=VAR(I,J,K)+DVAR*DMG
V 150 CONTINUE
IF(ERR.LE.EQC) GO TO 955
850 CONTINUE

```

↓

```

DO 850 IT=1,ITR
ERR=0.0
S DO 150 L = 2, NA
S ISTD = IAD(L - 1) + 1
S IEND = IAD(L)
*VOCL LOOP,NOVREC
V DO 150 M = ISTD, IEND
V IP = IPT(M)
V IF (COF(7, IP) .EQ. 0.0) GO TO 150
V DVAR = COF(1, IP)*VAR(IP - 1) + COF(2, IP)*VAR(IP + 1)
* + COF(3, IP)*VAR(JY1(IP)) + COF(4, IP)*VAR(JY2(IP))
* + COF(5, IP)*VAR(IP - M3) + COF(6, IP)*VAR(IP + M3)
* + SOC(IP)
V ER = ABS(DVAR - COF(7, IP)*VAR(IP))
V ERR = MAX(ERR, ER)
V DVAR = DVAR/COF(7, IP) - VAR(IP)
V VAR(IP)= VAR(IP) + DVAR*DMG
V 150 CONTINUE
IF (ERR .LE. EQC) GO TO 955
850 CONTINUE

```

Fig. 6.7 Vectorization of the SOR Method

```

SUBROUTINE XXXXXX
:
S   DO 100 K=1,KM
S   DO 100 J=1,JM
S   DO 100 I=1,IM
:
S   AAAA1=BBB1*FUNC GG(SS(I,J,K))
:
S 100 CONTINUE
RETURN
END

FUNCTION FUNC GG(X)
FUNC GG=X-SQRT(X)
RETURN
END

```

↓

```

SUBROUTINE XXXXXX
:
*INCLUDE  FUNC GG
FUNC GG(XXXX) = XXXX - SQRT(XXXX)
:
S   DO 100 K=1,KM
S   DO 100 J=1,JM
V   DO 100 I=1,IM
:
V   AAAA1=BBB1*FUNC GG(SS(I,J,K))
:
V 100 CONTINUE
RETURN
END

```

Fig. 6.8 Vectorization by Developing of FUNCTION statements


```

S      DO 100 K=1, KM
S      DO 100 J=1, JM
S      DO 100 I=1, IM
S      :
S      COF(1, I, J, K)=AAAA1
S      COF(2, I, J, K)=AAAA2
S      COF(3, I, J, K)=AAAA3
S      COF(4, I, J, K)=AAAA4
S      COF(5, I, J, K)=AAAA5
S      COF(6, I, J, K)=AAAA6
S      COF(7, I, J, K)=BBB*CCMOM
V      DO 110 L=1, 6
V      COF(7, I, J, K)=COF(7, I, J, K)+COF(L, I, J, K)
V 110 CONTINUE
S      :
V      DO 120 L=1, 7
V      COF(L, I, J, K)=0.0
V 120 CONTINUE
S      :
S 100 CONTINUE

```



```

S      SUBROUTINE XXXXXX
S      :
S      DO 100 K=1, KM
S      DO 100 J=1, JM
V      DO 100 I=1, IM
V      :
V      COF(1, I, J, K)=AAAA1
V      COF(2, I, J, K)=AAAA2
V      COF(3, I, J, K)=AAAA3
V      COF(4, I, J, K)=AAAA4
V      COF(5, I, J, K)=AAAA5
V      COF(6, I, J, K)=AAAA6
V      COF(7, I, J, K) = BBB*CCMOM + COF(1, I, J, K) + COF(2, I, J, K)
V      .                   + COF(3, I, J, K) + COF(4, I, J, K)
V      .                   + COF(5, I, J, K) + COF(6, I, J, K)
V      :
V      COF(1, I, J, K) = 0.0
V      COF(2, I, J, K) = 0.0
V      COF(3, I, J, K) = 0.0
V      COF(4, I, J, K) = 0.0
V      COF(5, I, J, K) = 0.0
V      COF(6, I, J, K) = 0.0
V      COF(7, I, J, K) = 0.0
V      :
V 100 CONTINUE

```

Fig. 6.9 Vectorization by Developing of the DO Loop

```

SUBROUTINE XXXXXX
:
DO 100 K=1,KM
DO 100 J=1,JM
DO 100 I=1,IM
:
CALL PKSCYL(IM,JM,KM,IMP,JMP,KMP,X,Y,Z,OPNX,OPNY,OPNZ,OPNV
*      ,U,V,W,EVS,I,J,K,GS)
SOC(I,J,K)=SOC(I,J,K)+GS*VOL
:
100 CONTINUE
RETURN
END

SUBROUTINE PKSCYL(IM,JM,KM,IMP,JMP,KMP,X,Y,Z,OPNX,OPNY,OPNZ,OPNV
*      ,U,V,W,EVS,I,J,K,PK)
:
R1=X(I)
R2=X(I+1)
RR=R1+R2
:
PK=2.0*(PK01**2+(PK05+PK10)**2+PK09**2)
*      +(PK02+PK04-PK11)**2+(PK06+PK08)**2+(PK07+PK03)**2
PK=PK*EVS(I,J,K)
RETURN
END

```

↓

```

SUBROUTINE XXXXXX
:
CALL PKSCYL(IM,JM,KM,IMP,JMP,KMP,X,Y,Z,OPNX,OPNY,OPNZ,OPNV
*      ,U,V,W,EVS,A(IAGS + 1) )
:
S      DO 100 K=1,KM
S      DO 100 J=1,JM
V      DO 100 I=1,IM
V      NAGS = NAGS + 1
:
V      GS = A(NAGS)
V      SOC(I,J,K)=SOC(I,J,K)+GS*VOL
:
V 100 CONTINUE
RETURN
END

SUBROUTINE PKSCYL(IM,JM,KM,IMP,JMP,KMP,X,Y,Z,OPNX,OPNY,OPNZ,OPNV
*      ,U,V,W,EVS,PK)
:
S      DO 4000 K = 1, KM
S      DO 4000 J = 1, JM
V      DO 4000 I = 1, IM
V      R1=X(I)
V      R2=X(I+1)
:
V      RR=R1+R2
V      PK00 = 2.0*(PK01**2+(PK05+PK10)**2+PK09**2)
*      + (PK02+PK04-PK11)**2+(PK06+PK08)**2+(PK07+PK03)**2
V      PK(I,J,K) = PK00*EVS(I,J,K)
V 4000 CONTINUE
RETURN
END

```

Fig. 6.10 Usage of the Working Area

```

S      DO 101 I=1,NM1
      IR=I
      IL=N-I+1
M      Y(IR)=Y(IR)+A(2,IR )*X(IR+1)
M      Y(IL)=Y(IL)+A(2,IL-1)*X(IL-1)
V      101 CONTINUE

```

↓

```

V      DO 101 I=1,NM1
      IR=I
      Y(IR)=Y(IR)+A(2,IR )*X(IR+1)
V      101 CONTINUE
V      C
      DO 201 I=1,NM1
      IL=N-I+1
V      Y(IL)=Y(IL)+A(2,IL-1)*X(IL-1)
V      201 CONTINUE

```

Fig. 6.11 Vectorization by Dividing of the DO Loop

```

S      DO 910 K=1,KM
S      DO 910 J=1,JM
S      DO 910 I=1,IM
S      WRITE(MPCS) COF(7,I,J,K)
      *      ,COF(2,I,J,K)
      *      ,COF(4,I,J,K)
      *      ,COF(6,I,J,K)
      *      ,SOC(I,J,K)
S      910 CONTINUE

```

↓

```

      NNN = 0
S      DO 910 K=1,KM
S      DO 910 J=1,JM
*VOCL LOOP,NOVREC(A)
V      DO 910 I=1,IM
V      A(LPCA + 5*NNN ) = COF(7, I, J, K)
V      A(LPCA + 5*NNN + 1) = COF(2, I, J, K)
V      A(LPCA + 5*NNN + 2) = COF(4, I, J, K)
V      A(LPCA + 5*NNN + 3) = COF(6, I, J, K)
V      A(LPCB + NNN) = SOC(I, J, K)
V      NNN = NNN + 1
V      910 CONTINUE

```

Fig. 6.12 Vectorization by Internal Management

```

SUBROUTINE XXXXXX
:
DO 100 K=1,KM
DO 100 J=1,JM
DO 100 I=1,IM
:
CALL PKSCYL(IM,JM,KM,IMP,JMP,KMP,X,Y,Z,OPNX,OPNY,OPNZ,OPNV
*      ,U,V,W,EVS,I,J,K,GS)
SOC(I,J,K)=SOC(I,J,K)+GS*VOL
:
100 CONTINUE
RETURN
END

SUBROUTINE PKSCYL(IM,JM,KM,IMP,JMP,KMP,X,Y,Z,OPNX,OPNY,OPNZ,OPNV
*      ,U,V,W,EVS,I,J,K,PK)
:
R1=X(I)
R2=X(I+1)
RR=R1+R2
:
PK=2.0*(PK01**2+(PK05+PK10)**2+PK09**2)
*      +(PK02+PK04-PK11)**2+(PK06+PK08)**2+(PK07+PK03)**2
PK=PK*EVS(I,J,K)
RETURN
END

```

↓

```

SUBROUTINE XXXXXX
:
CALL PKSCYL(IM,JM,KM,IMP,JMP,KMP,X,Y,Z,OPNX,OPNY,OPNZ,OPNV
*      ,U,V,W,EVS,A(IAGS + 1) )
:
S      DO 100 K=1,KM
S      DO 100 J=1,JM
V      DO 100 I=1,IM
V      NAGS = NAGS + 1
:
V      GS = A(NAGS)
V      SOC(I,J,K)=SOC(I,J,K)+GS*VOL
:
V 100 CONTINUE
RETURN
END

SUBROUTINE PKSCYL(IM,JM,KM,IMP,JMP,KMP,X,Y,Z,OPNX,OPNY,OPNZ,OPNV
*      ,U,V,W,EVS,PK)
:
S      DO 4000 K = 1, KM
S      DO 4000 J = 1, JM
V      DO 4000 I = 1, IM
V      R1=X(I)
V      R2=X(I+1)
:
V      RR=R1+R2
V      PK00 = 2.0*(PK01**2+(PK05+PK10)**2+PK09**2)
*      + (PK02+PK04-PK11)**2+(PK06+PK08)**2+(PK07+PK03)**2
V      PK(I,J,K) = PK00*EVS(I,J,K)
V 4000 CONTINUE
RETURN
END

```

Fig. 6.10 Usage of the Working Area

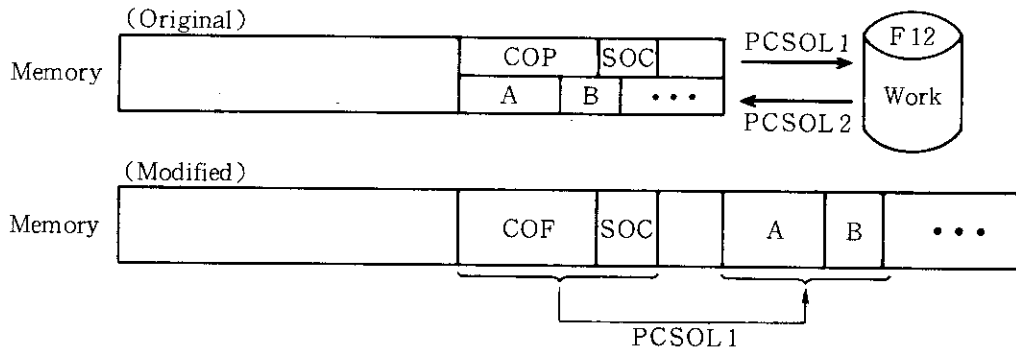


Fig. 6.13 Data Flow of the MICCG Method

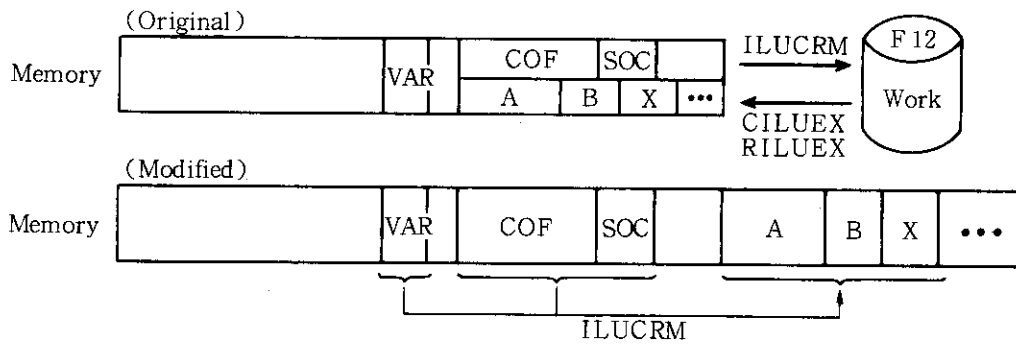


Fig. 6.14 Data Flow of the ILUCR Method

```

S      DO 100 K=1,KM
S      DO 100 J=1,JM
S      DO 100 I=1,IM
S      CALL SETDIM(AC,7,0.0)
      :
S      RDIAG=1.0/COF(7,I,J,K)
M      IF(K.GT.1 ) AC(1)=-COF(5,I,J,K)*RDIAG
M      IF(J.GT.1 ) AC(2)=-COF(3,I,J,K)*RDIAG
M      IF(I.GT.1 ) AC(3)=-COF(1,I,J,K)*RDIAG
S      AC(4)=+1.0
M      IF(I.LT.IM) AC(5)=-COF(2,I,J,K)*RDIAG
M      IF(J.LT.JM) AC(6)=-COF(4,I,J,K)*RDIAG
M      IF(K.LT.KM) AC(7)=-COF(6,I,J,K)*RDIAG
      :
V     100 CONTINUE
      :

      SUBROUTINE SETDIM(A,N,AC)
      DIMENSION A(N)
V     DO 100 I=1,N
V     A(I)=AC
V     100 CONTINUE
      RETURN
      END
      ↓
S      DO 100 K=1,KM
S      DO 100 J=1,JM
V     DO 100 I=1,IM
V     AC(1) = 0.0
V     AC(2) = 0.0
V     AC(3) = 0.0
V     AC(4) = 0.0
V     AC(5) = 0.0
V     AC(6) = 0.0
V     AC(7) = 0.0
      :
V     RDIAG=1.0/COF(7,I,J,K)
V     IF(K.GT.1 ) AC(1)=-COF(5,I,J,K)*RDIAG
V     IF(J.GT.1 ) AC(2)=-COF(3,I,J,K)*RDIAG
V     IF(I.GT.1 ) AC(3)=-COF(1,I,J,K)*RDIAG
V     AC(4)=+1.0
V     IF(I.LT.IM) AC(5)=-COF(2,I,J,K)*RDIAG
V     IF(J.LT.JM) AC(6)=-COF(4,I,J,K)*RDIAG
V     IF(K.LT.KM) AC(7)=-COF(6,I,J,K)*RDIAG
      :
V     100 CONTINUE
      :

```

Fig. 6.15 Vectorization by Expanding of the DO Loop

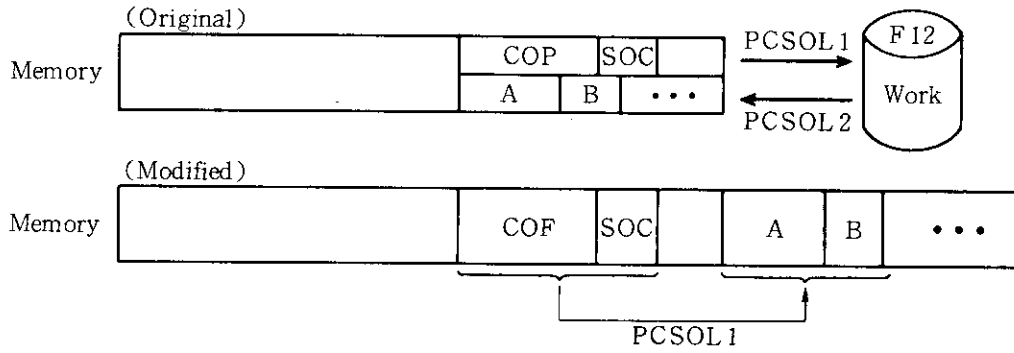


Fig. 6.13 Data Flow of the MICCG Method

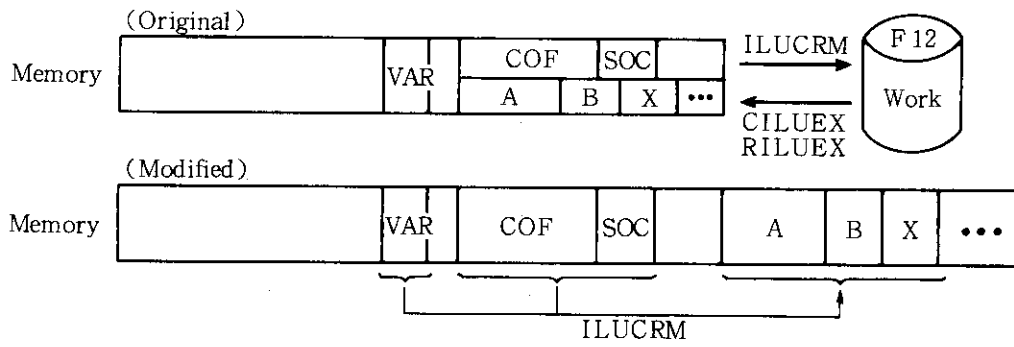


Fig. 6.14 Data Flow of the ILUCR Method

```

S      DO 101 K=K1,K2
S      DO 101 J=J1,J2
      DO 101 I=I1,I2
      :
      GO TO (1,2,3),IUVW
1 CONTINUE
      :
      VOL2=DX2*DY2*DZ2*OPNV(I,J,K)
      GO TO 10
2 CONTINUE
      :
      VOL2=DX2*DY2*DZ2*OPNV(I,J,K)
      GO TO 10
3 CONTINUE
      :
      VOL2=DX2*DY2*DZ2*OPNV(I,J,K)
10 CONTINUE
      :
101 CONTINUE
      ↓
S      DO 101 K=K1,K2
S      DO 101 J=J1,J2
V      DO 101 I=I1,I2
      :
V      IF (IUVW.LE.1 .OR. IUVW.GT.3) THEN
      :
V      VOL2=DX2*DY2*DZ2*OPNV(I,J,K)
V      ELSE IF (IUVW.EQ. 2) THEN
      :
V      VOL2=DX2*DY2*DZ2*OPNV(I,J,K)
V      ELSE
      :
V      VOL2=DX2*DY2*DZ2*OPNV(I,J,K)
      END IF
      :
V 101 CONTINUE

```

Fig. 6.16 Non-vectorization Statement


```

S      DO 100 K=1,KM
S      DO 100 J=1,JM
V      DO 100 I=1,IM
V      IF(MAT(I,J,K).NE.MFLD) GO TO 10
V      DX1=1.0E+20
V      DX3=1.0E+20
V      DY1=1.0E+20
V      DY3=1.0E+20
V      DZ1=1.0E+20
V      DZ3=1.0E+20
V      DX2=X(I+1)-X(I)
V      DY2=Y(J+1)-Y(J)
V      DZ2=Z(K+1)-Z(K)
V      IF(I.NE.1 ) DX1=X(I)-X(I-1)
V      IF(I.NE.IM) DX3=X(I+2)-X(I+1)
V      IF(J.NE.1 ) DY1=Y(J)-Y(J-1)
V      IF(J.NE.JM) DY3=Y(J+2)-Y(J+1)
V      IF(K.NE.1 ) DZ1=Z(K)-Z(K-1)
V      IF(K.NE.KM) DZ3=Z(K+2)-Z(K+1)
V      IF(COC.GT.0.0.AND.J.EQ.1 ) DY1=Y(JM+1)-Y(JM)
V      IF(COC.GT.0.0.AND.J.EQ.JM) DY3=Y(JM+1)-Y(JM)
V      :
V      M122=0
V      :
V      :
V      IF(I.NE.1 ) M122=MAT(I-1,J,K)
V      :
V      :
V      DM122=0.0
V      :
V      :
V      IF(M122.EQ.MFLD) DM122=DM(M122,LCD)
V      :
V      :
V      IF(LEQU( 6).EQ.0) GO TO 66
V      :
V      IF(M122.EQ.MFLD) DM122=DM122+EVS(I-1,J,K)/TSM
V      :
V      :
V      66 CONTINUE
V      100 CONTINUE

```



Fig. 6.17 Tuning Example

7. テスト計算

ベクトル化版 STREAM を用いて4ケースのテスト計算を行った。計算モデルは円筒型および直方体状の単純なものである。使用マシンは FACOM VP-100 でありスカラーモードの場合 OPT(3)、ベクトルモードの場合 ADV (EVL) オプションで実行した。各ケースとも時間きざみ Δt で 20 サイクルまでの実行時間 (CPU 時間) を測定し比較を行った。ただし計算は全て倍精度で行った。以下に計算モデルの概要を示す。

i) ケース 1

50 × 2 × 50 メッシュの円筒型の管で、内部に階段状の物体がある。Fig.7.1 はそのモデル図である。流体は下端から流入して上端へ抜けるものとし、壁面はすべてすべり壁 (Free Slip Wall) とする。

○方程式の解法

U, V, W : Jacobi 法

p : MICCG 法 ITR=20, $OMG=10^{-20}$, $EQC=10^{-2}$

T, k, ϵ : Jacobi 法

c : ILUCR 法 ITR=4, $EQC=10^{-2}$

ii) ケース 2

ケース 1 と同じモデルであるが p 方程式の解法を SOR 法としたものである。

○方程式の解法

p : SOR 法 ITR=200, $OMG=1.8$, $EQC=10^{-3}$

iii) ケース 3

50 × 10 × 10 メッシュの直方体の管で壁面には Free slip 条件を入れる。Fig.7.2 はそのモデル図である。図の矢印方向 (X 方向) の流れを計算する。

○方程式の解法

U, V, W : Jacobi 法

p : MICCG 法 ITR=100, $OMG=10^{-2}$, $EQC=10^{-2}$

T, k, ϵ , C : ILUCR 法 ITR=5, $EQC=10^{-2}$

iv) ケース 4

ケース 3 と同モデルであるが、メッシュのとり方を 10 × 10 × 50 と Z 方向を長くしたものである。

7.1 ケース 1

ケース 1 のオリジナル版とベクトル化版のコスト・テーブルを Table 7.1, 7.2 に示す。表中に示されている内容は以下の通りである。

NO : コスト順位

NAME : ルーチン名
 LINE : ソースライン数
 EXEC : 実行回数
 COST : 実行コスト
 COST% : 全体のコストに対する比率
 CUM % : COST%の累計
 V % : ベクトル化部分のコスト比率
 M % : ベクトル/スカラー混合部分のコスト比率
 S % : スカラー部分のコスト比率
 V CS % : ベクトル化率
 V CM % : VCS%の累計

オリジナル版では全体のベクトル化率が12%と低いのに対しベクトル化版では96.7%に向上した。中でも大きな効果があったのは ILUCRM, CILUEX で実行コストは約 $\frac{1}{10}$ に減少しベクトル化部分も99%になっている。これはワークファイルを内部処理化したことによる。また全体の実行コストも1/2以下に減った。

Table 7.3 は実行時間の比較を行ったものである。表中に示されている内容は以下の通りである。

CPU : CPU時間 (秒)
 VU : ベクトル・ユニットでの実行時間 (秒)
 Memory : 整合配列の使用容量 (千語)
 OS : オリジナル版をスカラーモードで実行
 VS : ベクトル化版をスカラーモードで実行
 VP : ベクトル化版をベクトルモードで実行
 α : OSに対するVPの速度比
 β : VSに対するVPの速度比

このケースではベクトル化版はオリジナル版の約17倍の速度向上を示している。ただしスカラーモードでのVU時間はVIO/F機能を使用しているためである(第8章参照のこと)。

7.2 ケース 2

ケース2のコスト・テーブルをTable 7.4, 7.5に示す。このケースではSOR法の実行部分(SORSLV, SORHYP)にコストが集中している(オリジナル版で全コストの約50%, ベクトル化版で約60%)。これはMICCG法を使用したときと比べてSOR法の解の収束が悪く、反復回数が非常に大きくなっているためである。Table 7.6は実行時間の比較を行ったものである。このケースでは α の値がケース1に比べて小さくなっているが、これはSOR法の実行部分のコストが他の部分と比べて非常に高いため、ワークファイルの内部処理化(ILUCRM, CILUEX)の効果が現れないためである。 β の値はケース1とほぼ同じ値を示している。

7.3 ケース 3

ケース 3 のコスト・テーブルを Table 7.7, 7.8 に示す。このケースでのコスト分布はケース 1 とほぼ同じになっている (モデル領域が異なるため Table 7.1 のルーチン名と異なる) T, k, ϵ 方程式を ILUCR 法で解いているがオリジナル版ではワークファイルを使用しているため、ILUCRM, RILUEX のコストが高くなっている。ベクトル化版ではケース 1 の場合と同様の傾向を示している。Table 7.9 は実行時間の比較を行ったものである。 α が 22.7 と大きな値になっているのはやはりワークファイルの内部処理化の影響である (ケース 1 では 2 方程式で使用しているのに対し、ケース 3 では 5 方程式で使用している)。 β の値で比較するとケース 1 と同程度である。

7.4 ケース 4

ケース 4 はケース 3 と同モデルで x 方向を短くした場合の計算である。MICCG 法や ILUCR 法、SOR 法は Hyper Plane 方式の適用でリストベクトルとなっているが、その他の部分は x, y, z 方向の 3 重ループになっており、最内ループは x 方向となっている。ベクトル化はこの最内ループのみ行われるので、ベクトル長を短くした場合にどのような結果になるか調べた。Table 7.10, 7.11 はケース 4 のコスト・テーブルである。ケース 3 とほぼ同じコスト分布を示している。全体のコストが若干高くなっているのは収束計算の反復回数が変わったためと思われる。Table 7.12 は CPU 時間を比較したものである。 α , β の値はケース 3 より極端に悪くなっている。このことはモデル化する際に x 方向のメッシュ分割数を大きくする方が計算速度が速くなることを表わしている。

Table 7.1 FORTUNE Cost Table for 'Case-1' (Original)

NO	NAME	LINE	EXEC	COST	COST %	CUM %	V %	M %	S %	V CS %	V CM %
0001	ILUCRM	99	40	215221800.	13.02	13.02	1.31	4.55	94.14	0.17	0.17
0002	CILUEX	36	40	203081400.	12.28	25.30	0.41	0.0	99.59	0.05	0.22
0003	FUNCHH	8	4612000	139364000.	8.43	33.73	0.0	0.0	100.00	0.0	0.22
0004	PCSOL2	92	20	105225160.	6.36	40.09	3.21	0.0	96.79	0.20	0.43
0005	COSQCC	152	40	104170240.	6.30	46.39	6.23	0.50	93.28	0.39	0.82
0006	PCSOL1	55	20	101043120.	6.11	52.50	0.0	0.0	100.00	0.0	0.82
0007	FUNCGG	6	4129600	70203200.	4.25	56.75	0.0	0.0	100.00	0.0	0.82
0008	COSOKK	188	20	64544232.	3.90	60.65	4.85	0.0	95.15	0.19	1.01
0009	PKSCYL	116	86000	64412000.	3.90	64.55	0.0	0.0	100.00	0.0	1.01
0010	COSDTT	182	20	60846100.	3.68	68.23	5.31	0.42	94.27	0.20	1.20
0011	COSQVV	210	20	57420940.	3.47	71.70	27.61	14.26	58.13	0.96	2.16
0012	COSQVV	219	20	54731520.	3.31	75.01	15.56	19.16	65.28	0.52	2.68
0013	COSQEE	160	20	51972180.	3.14	78.16	14.83	9.00	76.18	0.47	3.14
0014	COSQWW	173	20	46514960.	2.81	80.97	18.65	9.47	71.87	0.52	3.67
0015	AXSUBY	45	298	45818096.	2.77	83.74	41.99	57.95	0.06	1.16	4.83
0016	CLU	76	241	33528402.	2.03	85.77	0.07	0.14	99.79	0.00	4.83
0017	COSOPP	89	20	30404720.	1.84	87.61	16.04	0.0	83.96	0.29	5.13
0018	CAXSUB	47	201	27919101.	1.69	89.29	35.79	64.14	0.07	0.60	5.73
0019	SORSVL	170	180	26259580.	1.59	90.88	98.87	0.0	1.13	1.57	7.30
0020	CILUCR	55	40	20006313.	1.21	92.09	98.92	0.0	1.08	1.20	8.50
0021	LDLTPY	76	139	19336568.	1.17	93.26	0.07	0.14	99.79	0.00	8.50
0022	DISCEN	8	509800	15268800.	0.92	94.19	0.0	0.0	100.00	0.0	8.50
0023	FIDPRN	110	5	14560461.	0.88	95.07	0.0	0.0	100.00	0.0	8.50
0024	TURBOY	55	20	12322762.	0.75	95.81	99.12	0.0	0.88	0.74	9.24
0025	PTSCYL	66	86000	12126000.	0.73	96.55	0.0	0.0	100.00	0.0	9.24
0026	SCVSUM	9	397	9935719.	0.60	97.15	99.92	0.0	0.08	0.60	9.84
0027	SETDIM	9	200034	9596484.	0.58	97.73	66.65	0.0	33.35	0.39	10.23
0028	CORECT	58	20	8300240.	0.50	98.23	99.29	0.0	0.71	0.50	10.72
0029	INERPR	10	298	7456854.	0.45	98.68	99.92	0.0	0.08	0.45	11.17
0030	CDECMP	101	40	5370680.	0.32	99.00	7.44	62.63	29.92	0.02	11.20
0031	DECDMY	58	20	3972100.	0.24	99.24	5.04	74.77	20.19	0.01	11.21
0032	MOVDIM	9	120	2811360.	0.17	99.41	99.92	0.0	0.08	0.17	11.38
0033	TURBYS	18	20	2163980.	0.13	99.55	99.63	0.0	0.37	0.13	11.51
0034	DKFLUX	40	35200	1936000.	0.12	99.66	0.0	0.0	100.00	0.0	11.51
0035	FLUXTM	440	220	1897870.	0.11	99.78	0.0	0.0	100.00	0.0	11.51
0036	MATOCL	131	1	1029657.	0.06	99.84	95.05	0.0	4.95	0.06	11.57
0037	MVPCLE	192	20	667485.	0.04	99.88	19.46	0.0	80.54	0.01	11.58
0038	PASTOT	30	21	212541.	0.01	99.89	0.0	0.0	100.00	0.0	11.58
0039	GETVEP	48	1399	193062.	0.01	99.90	0.0	0.0	100.00	0.0	11.58
0040	OPENRT	56	1	183587.	0.01	99.92	99.76	0.0	0.24	0.01	11.59
0041	PASTIN	8	160	164800.	0.01	99.93	0.0	0.0	100.00	0.0	11.59
0042	PROCES	487	1	158397.	0.01	99.94	0.0	0.0	100.00	0.0	11.59
0043	YDKEVV	10	20	155740.	0.01	99.94	99.55	0.0	0.45	0.01	11.60
0044	INCNUM	31	420	150716.	0.01	99.95	89.97	0.0	10.03	0.01	11.61
0045	RDPCL	73	1	131648.	0.01	99.96	0.0	0.0	100.00	0.0	11.61
0046	FLDRWS	25	13	130403.	0.01	99.97	0.0	0.0	100.00	0.0	11.61
0047	MATNUM	22	1	78224.	0.00	99.97	22.79	0.0	77.21	0.00	11.61
0048	CD100	74	3	67464.	0.00	99.98	0.46	10.32	89.23	0.00	11.61
0049	RDFLUX	61	1	60269.	0.00	99.98	0.0	0.0	100.00	0.0	11.61
0050	PRPCLE	37	20	51160.	0.00	99.99	0.0	0.0	100.00	0.0	11.61
TOTAL		6455		1653421263.		100.00					11.61

Table 7.2 FORTUNE Cost Table for 'Case-1' (Vectorized)

NO	NAME	LINE	EXEC	COST	COST %	CUM %	V %	M %	S %	V CS %	V CM %
0001	PKSCYL	126	20	61489520.	8.59	8.59	99.93	0.0	0.07	8.59	8.59
0002	COSDCC	280	40	55968280.	7.82	16.41	99.71	0.0	0.29	7.80	16.38
0003	CLU	91	241	53035424.	7.41	23.82	99.01	0.09	0.90	7.34	23.72
0004	COSQVV	333	20	50793080.	7.10	30.92	99.89	0.0	0.11	7.09	30.81
0005	AXSUBY	61	298	50245184.	7.02	37.94	99.98	0.0	0.02	7.02	37.83
0006	COSOUU	338	20	50122000.	7.00	44.94	99.85	0.0	0.15	6.99	44.82
0007	COSDWW	285	20	39924060.	5.58	50.52	99.83	0.0	0.17	5.57	50.39
0008	COSOKK	363	20	37369952.	5.22	55.74	99.78	0.0	0.22	5.21	55.60
0009	LDLTPY	93	139	34672160.	4.84	60.59	99.14	0.08	0.79	4.80	60.40
0010	CAXSUB	63	201	33891012.	4.74	65.32	99.97	0.0	0.03	4.73	65.14
0011	COSDDE	273	20	33720160.	4.71	70.03	98.86	0.0	1.14	4.66	69.79
0012	COSOTT	470	20	26290420.	3.67	73.71	99.76	0.0	0.24	3.66	73.46
0013	SORSLV	176	180	26269520.	3.67	77.38	98.89	0.0	1.11	3.63	77.09
0014	CILUCR	55	40	20006313.	2.80	80.17	98.92	0.0	1.08	2.77	79.85
0015	ILUCRM	174.	40	19929080.	2.78	82.96	99.90	0.0	0.10	2.78	82.63
0016	COSDPP	176	20	17847860.	2.49	85.45	97.85	0.0	2.15	2.44	85.07
0017	FLDPRN	110	5	14560461.	2.03	87.48	0.0	0.0	100.00	0.0	85.07
0018	TURBOY	55	20	12322762.	1.72	89.21	99.12	0.0	0.88	1.71	86.78
0019	HYPLAN	39	5	10620370.	1.48	90.69	99.01	0.0	0.99	1.47	88.25
0020	SCVSUM	9	397	9935719.	1.39	92.08	99.92	0.0	0.08	1.39	89.64
0021	CORECT	58	20	8300240.	1.16	93.24	99.29	0.0	0.71	1.15	90.79
0022	PTSCYL	80	20	7912720.	1.11	94.34	99.65	0.0	0.35	1.10	91.89
0023	INERPR	10	298	7456854.	1.04	95.39	99.92	0.0	0.08	1.04	92.93
0024	CDECMP	115	40	6792800.	0.95	96.33	98.86	0.47	0.67	0.94	93.87
0025	DECOMY	66	20	5563220.	0.78	97.11	99.08	0.54	0.38	0.77	94.64
0026	PCSOL2	92	20	3384900.	0.47	97.59	99.68	0.0	0.32	0.47	95.11
0027	MOVDIM	9	120	2811360.	0.39	97.98	99.92	0.0	0.08	0.39	95.50
0028	TURBVS	18	20	2163980.	0.30	98.28	99.63	0.0	0.37	0.30	95.81
0029	HYPLA2	36	1	2087303.	0.29	98.57	99.04	0.0	0.96	0.29	96.09
0030	DKFLUX	40	35200	1936000.	0.27	98.84	0.0	0.0	100.00	0.0	96.09
0031	FLUXTM	442	220	1859280.	0.26	99.10	0.0	0.0	100.00	0.0	96.09
0032	PCSOL1	73	20	1047060.	0.15	99.25	99.33	0.0	0.67	0.15	96.24
0033	MATOCCL	131	1	1029657.	0.14	99.39	95.05	0.0	4.95	0.14	96.38
0034	CILUEX	36	40	836800.	0.12	99.51	98.72	0.0	1.28	0.12	96.49
0035	SETDIM	9	34	796484.	0.11	99.62	99.93	0.0	0.07	0.11	96.60
0036	MVPCLE	192	20	667485.	0.09	99.71	19.66	0.0	80.54	0.02	96.62
0037	PASTOT	30	21	212541.	0.03	99.74	0.0	0.0	100.00	0.0	96.62
0038	GETVEP	48	1399	193062.	0.03	99.77	0.0	0.0	100.00	0.0	96.62
0039	OPENRT	62	1	183596.	0.03	99.80	99.76	0.0	0.24	0.03	96.65
0040	PASTIN	8	160	164800.	0.02	99.82	0.0	0.0	100.00	0.0	96.65
0041	PROCES	641	1	159940.	0.02	99.84	0.0	0.0	100.00	0.0	96.65
0042	YDKEVV	10	20	155740.	0.02	99.86	99.55	0.0	0.45	0.02	96.67
0043	INCNUM	31	420	150716.	0.02	99.88	89.97	0.0	10.03	0.02	96.69
0044	RDPCLC	79	1	131712.	0.02	99.90	0.0	0.0	100.00	0.0	96.69
0045	FLDRWS	29	13	130429.	0.02	99.92	0.0	0.0	100.00	0.0	96.69
0046	MATNUM	26	1	78090.	0.01	99.93	22.63	0.0	77.37	0.00	96.69
0047	COD100	74	3	67464.	0.01	99.94	0.46	10.32	89.23	0.00	96.69
0048	HYPLA3	51	1	65251.	0.01	99.95	99.24	0.0	0.76	0.01	96.70
0049	RDFLUX	67	1	60279.	0.01	99.96	0.0	0.0	100.00	0.0	96.70
0050	PRPCLE	37	20	51160.	0.01	99.97	0.0	0.0	100.00	0.0	96.70
TOTAL		8704		715706719.		100.00					96.70

Table 7.3 Comparison of CPU Time between Original and Vectorized Codes for "Case-1"

	CPU (S)	VU (S)	Memory (Kwords)
Original-Scalar (OS)	103.23	1.78	415
Vectorized-Scalar (VS)	51.53	0.03	602
Vectprized-VP (VP)	6.10	4.55	602

$\alpha = 16.9$ (OS/VP) $\beta = 8.4$ (VS/VP)

Table 7.4 FORTUNE Cost Table for 'Case-2' (Original)

NO	NAME	LINE	EXEC	COST	COST X	CUM X	V X	M X	S X	V CS X	V CM X
0001	SORSLV	170	180	1294440000.	49.56	49.56	59.76	25.82	14.42	29.62	29.62
0002	ILUCRM	99	40	215222000.	8.24	57.80	1.31	4.55	94.14	0.11	29.73
0003	CILUEX	36	40	203081000.	7.78	65.58	0.41	0.0	99.59	0.03	29.76
0004	FUNCHH	8	4612000	139364000.	5.34	70.91	0.0	0.0	100.00	0.0	29.76
0005	COSOCC	152	40	104170000.	3.99	74.90	6.23	0.50	93.28	0.25	30.01
0006	FUNCGG	6	4129600	70203200.	2.69	77.59	0.0	0.0	100.00	0.0	30.01
0007	CXSOKK	188	20	64541300.	2.47	80.06	4.85	0.0	95.15	0.12	30.13
0008	PKSCYL	116	86000	64412000.	2.47	82.53	0.0	0.0	100.00	0.0	30.13
0009	COSOTT	182	20	60846100.	2.33	84.86	5.31	0.42	94.27	0.12	30.25
0010	COSQUU	210	20	57420900.	2.20	87.05	27.61	14.26	58.13	0.61	30.86
0011	COSOVV	219	20	54731500.	2.10	89.15	15.56	19.16	65.28	0.33	31.18
0012	COSOEY	160	20	51972200.	1.99	91.14	14.83	9.00	76.18	0.30	31.48
0013	COSOWW	173	20	46515000.	1.78	92.92	18.65	9.47	71.87	0.33	31.81
0014	CLU	76	229	31858900.	1.22	94.14	0.07	0.14	99.79	0.00	31.81
0015	COSOPP	89	20	30404700.	1.16	95.30	16.04	0.0	83.96	0.19	32.00
0016	CAXSUB	47	189	26252300.	1.01	96.31	35.79	64.14	0.07	0.36	32.36
0017	CILUCR	55	40	18685300.	0.72	97.03	98.85	0.0	1.15	0.71	33.06
0018	DISCEN	8	509800	15268800.	0.58	97.61	0.0	0.0	100.00	0.0	33.06
0019	FLDRPN	110	5	14560500.	0.56	98.17	0.0	0.0	100.00	0.0	33.06
0020	PTSCYL	66	86000	12126000.	0.46	98.63	0.0	0.0	100.00	0.0	33.06
0021	SETDIM	9	200034	9596480.	0.37	99.00	66.65	0.0	33.35	0.24	33.31
0022	CORECT	58	20	8300240.	0.32	99.32	99.29	0.0	0.71	0.32	33.62
0023	CDECMP	101	40	5370680.	0.21	99.52	7.44	62.63	29.92	0.02	33.64
0024	MOVDIM	9	120	2811360.	0.11	99.63	99.92	0.0	0.08	0.11	33.75
0025	TURBVS	18	20	2163980.	0.08	99.71	99.63	0.0	0.37	0.08	33.83
0026	DKFLUX	40	35200	1936000.	0.07	99.79	0.0	0.0	100.00	0.0	33.83
0027	FLUXTM	440	220	1897870.	0.07	99.86	0.0	0.0	100.00	0.0	33.83
0028	MATQCL	131	1	1029660.	0.04	99.90	95.05	0.0	4.95	0.04	33.87
0029	MVPCLE	192	20	662256.	0.03	99.92	19.47	0.0	80.53	0.00	33.87
0030	PASTOT	30	21	212541.	0.01	99.93	0.0	0.0	100.00	0.0	33.87
0031	GETVEP	48	1388	191544.	0.01	99.94	0.0	0.0	100.00	0.0	33.87
0032	OPENRT	56	1	183587.	0.01	99.95	99.76	0.0	0.24	0.01	33.88
0033	PASTIN	8	160	164800.	0.01	99.95	0.0	0.0	100.00	0.0	33.88
0034	PROCES	487	1	158397.	0.01	99.96	0.0	0.0	100.00	0.0	33.88
0035	YOKEVV	10	20	155740.	0.01	99.97	99.55	0.0	0.45	0.01	33.89
0036	INCNUM	31	420	148908.	0.01	99.97	89.85	0.0	10.15	0.01	33.89
0037	RDPCLC	73	1	131648.	0.01	99.98	0.0	0.0	100.00	0.0	33.89
0038	FLDRWS	25	13	130403.	0.00	99.98	0.0	0.0	100.00	0.0	33.89
0039	MATNUM	22	1	78224.	0.00	99.98	22.79	0.0	77.21	0.00	33.89
0040	COD100	74	3	67464.	0.00	99.99	0.46	10.32	89.23	0.00	33.89
0041	RDFLUX	61	1	60269.	0.00	99.99	0.0	0.0	100.00	0.0	33.89
0042	PRPCLE	37	20	51160.	0.00	99.99	0.0	0.0	100.00	0.0	33.89
0043	RDDFUS	34	1	50121.	0.00	99.99	0.0	0.0	100.00	0.0	33.89
0044	RDDFSO	30	1	20041.	0.00	99.99	0.0	0.0	100.00	0.0	33.89
0045	MAIN	120	1	18168.	0.00	99.99	0.0	0.0	100.00	0.0	33.89
0046	DLNMX	22	3	16227.	0.00	99.99	7.03	0.0	92.97	0.00	33.89
0047	MIJK12	20	480	13920.	0.00	100.00	0.0	0.0	100.00	0.0	33.89
0048	DFUSWL	31	40	13520.	0.00	100.00	0.0	0.0	100.00	0.0	33.89
0049	PLOT2	47	1	12132.	0.00	100.00	0.0	0.0	100.00	0.0	33.89
0050	SAVEDT	32	1	12115.	0.00	100.00	0.0	0.0	100.00	0.0	33.89
TOTAL		6455		2611822079.		100.00					33.89

Table 7.5 FORTUNE Cost Table for 'Case-2' (Vectorized)

NO	NAME	LINE	EXEC	COST	COST %	CUM %	V %	M %	S %	V CS %	V CM %
0001	SORHYP	62	20	881744362.	60.11	60.11	99.91	0.0	0.09	60.05	60.05
0002	PKSCYL	126	20	61489520.	4.19	64.30	99.93	0.0	0.07	4.19	64.24
0003	COSQCC	280	40	55968280.	3.82	68.12	99.71	0.0	0.29	3.80	68.05
0004	COSQVV	333	20	50793080.	3.46	71.58	99.89	0.0	0.11	3.46	71.51
0005	CLU	91	229	50394656.	3.44	75.01	99.01	0.09	0.90	3.40	74.91
0006	COSQOU	338	20	50122000.	3.42	78.43	99.85	0.0	0.15	3.41	78.32
0007	COSQWW	285	20	39924060.	2.72	81.15	99.83	0.0	0.17	2.72	81.04
0008	COSQKK	363	20	37366996.	2.55	83.70	99.78	0.0	0.22	2.54	83.58
0009	COSQEE	273	20	33720160.	2.30	86.00	98.86	0.0	1.14	2.27	85.85
0010	CAKSUB	63	189	31867668.	2.17	88.17	99.97	0.0	0.03	2.17	88.02
0011	SORSLV	176	180	26369580.	1.80	89.97	98.52	0.0	1.48	1.77	89.79
0012	COSQTT	470	20	26290420.	1.79	91.76	99.76	0.0	0.24	1.79	91.58
0013	ILUCRM	174	40	19929080.	1.36	93.12	99.90	0.0	0.10	1.36	92.94
0014	CILUCR	55	40	18685265.	1.27	94.39	98.85	0.0	1.15	1.26	94.20
0015	COSOPP	176	20	17847860.	1.22	95.61	97.85	0.0	2.15	1.19	95.39
0016	FLDPRN	110	5	14560461.	0.99	96.60	0.0	0.0	100.00	0.0	95.39
0017	HYPLAN	39	5	10620370.	0.72	97.33	99.01	0.0	0.99	0.72	96.10
0018	CORECT	58	20	8300240.	0.57	97.89	99.29	0.0	0.71	0.56	96.67
0019	PTSCYL	80	20	7912720.	0.54	98.43	99.65	0.0	0.35	0.54	97.20
0020	CDCMP	115	40	6792800.	0.46	98.89	98.86	0.47	0.67	0.46	97.66
0021	MOVDIM	9	120	2811360.	0.19	99.09	99.92	0.0	0.08	0.19	97.85
0022	TURBVS	18	20	2163980.	0.15	99.23	99.63	0.0	0.37	0.15	98.00
0023	HYPLA2	36	1	2087303.	0.14	99.38	99.04	0.0	0.96	0.14	98.14
0024	OKFLUX	40	35200	1936000.	0.13	99.51	0.0	0.0	100.00	0.0	98.14
0025	FLUXTM	442	220	1859280.	0.13	99.63	0.0	0.0	100.00	0.0	98.14
0026	MATQCL	131	1	1029657.	0.07	99.70	95.05	0.0	4.95	0.07	98.21
0027	CILUEX	36	40	836800.	0.06	99.76	98.72	0.0	1.28	0.06	98.26
0028	SETDIM	9	34	796484.	0.05	99.82	99.93	0.0	0.07	0.05	98.32
0029	MVPCLE	192	20	662256.	0.05	99.86	19.47	0.0	80.53	0.01	98.33
0030	PASTOT	30	21	212541.	0.01	99.88	0.0	0.0	100.00	0.0	98.33
0031	GETVEP	48	1388	191544.	0.01	99.89	0.0	0.0	100.00	0.0	98.33
0032	OPENRT	62	1	183596.	0.01	99.90	99.76	0.0	0.24	0.01	98.34
0033	PASTIN	8	160	164800.	0.01	99.91	0.0	0.0	100.00	0.0	98.34
0034	PROCES	641	1	159935.	0.01	99.92	0.0	0.0	100.00	0.0	98.34
0035	YOKEVV	10	20	155740.	0.01	99.93	99.55	0.0	0.45	0.01	98.35
0036	INCNUM	31	420	148908.	0.01	99.94	89.85	0.0	10.15	0.01	98.36
0037	RDPCLC	79	1	131712.	0.01	99.95	0.0	0.0	100.00	0.0	98.36
0038	FLDRWS	29	13	130429.	0.01	99.96	0.0	0.0	100.00	0.0	98.36
0039	MATNUM	26	1	78090.	0.01	99.97	22.63	0.0	77.37	0.00	98.36
0040	COD100	74	3	67464.	0.00	99.97	0.46	10.32	89.23	0.00	98.36
0041	HYPLA3	51	1	65251.	0.00	99.98	99.24	0.0	0.76	0.00	98.36
0042	RDFLUX	67	1	60279.	0.00	99.98	0.0	0.0	100.00	0.0	98.36
0043	PRPCLC	37	20	51160.	0.00	99.98	0.0	0.0	100.00	0.0	98.36
0044	RDDFUS	38	1	50137.	0.00	99.99	0.0	0.0	100.00	0.0	98.36
0045	RDDFSO	34	1	20046.	0.00	99.99	0.0	0.0	100.00	0.0	98.36
0046	MAIN	159	1	18274.	0.00	99.99	0.0	0.0	100.00	0.0	98.36
0047	DLNMNMX	22	3	16227.	0.00	99.99	7.03	0.0	92.97	0.00	98.37
0048	MIJK12	20	480	13920.	0.00	99.99	0.0	0.0	100.00	0.0	98.37
0049	DFUSWL	31	40	13520.	0.00	99.99	0.0	0.0	100.00	0.0	98.37
0050	PLOTFF2	47	1	12132.	0.00	99.99	0.0	0.0	100.00	0.0	98.37
TOTAL		8704		1466926606.		100.00					98.37

Table 7.6 Comparison of CPU Time between Original and Vectorized Codes for "Case-2"

	CPU (S)	VU (S)	Memory (kwords)
Original-Scalar (OS)	152.02	1.02	415
Vectprized-Scalar (VS)	111.42	0.03	602
Vectprized-VP (VP)	14.16	12.44	602

$\alpha = 10.7$ (OS/VP) $\beta = 7.9$ (VS/VP)

Table 7.7 FORTUNE Cost Table for 'Case-3' (Original)

NO	NAME	LINE	EXEC	COST	COST X	CUM X	V X	M X	S X	V CS X	V CM X
0001	ILUCRM	99	100	539927000.	23.49	23.49	0.67	4.47	94.87	0.16	0.16
0002	RILUEX	34	100	507664000.	22.09	45.58	0.40	0.0	99.60	0.09	0.25
0003	FUNCHH	8	5224000	163868000.	7.13	52.71	0.0	0.0	100.00	0.0	0.25
0004	COSDCC	152	40	118255000.	5.15	57.86	5.58	0.51	93.91	0.29	0.53
0005	PCSOL2	92	20	104481000.	4.55	62.41	2.81	0.0	97.19	0.13	0.66
0006	PCSOL1	55	20	100934000.	4.39	66.80	0.0	0.0	100.00	0.0	0.66
0007	FUNCGG	6	4700000	79900000.	3.48	70.27	0.0	0.0	100.00	0.0	0.66
0008	COSOTT	182	20	73902300.	3.22	73.49	10.85	0.41	88.74	0.35	1.01
0009	COSOKK	188	20	73792400.	3.21	76.70	4.20	0.0	95.80	0.13	1.14
0010	PKSORC	99	100000	60868000.	2.65	79.35	11.34	0.0	88.66	0.30	1.44
0011	COSDEE	160	20	59016800.	2.57	81.92	13.51	9.47	77.02	0.35	1.79
0012	COSOUU	210	20	53760400.	2.34	84.26	17.04	17.94	65.02	0.40	2.19
0013	COSOVV	219	20	48921100.	2.13	86.38	14.62	19.07	66.32	0.31	2.50
0014	COSQWW	173	20	46611700.	2.03	88.41	18.12	10.36	71.52	0.37	2.87
0015	RLU	58	308	33226100.	1.45	89.86	0.09	0.18	99.73	0.00	2.87
0016	COSOPP	89	20	29264500.	1.27	91.13	17.77	0.0	82.23	0.23	3.10
0017	RAXSUB	39	208	28224400.	1.23	92.36	36.05	63.89	0.06	0.44	3.54
0018	AXSUBX	36	152	22821700.	0.99	93.35	42.20	57.74	0.06	0.42	3.96
0019	SETDIM	9	500034	19630000.	0.85	94.21	59.24	0.0	40.76	0.51	4.46
0020	SORSLV	170	180	17931700.	0.78	94.99	99.81	0.0	0.19	0.78	5.24
0021	DISCEN	8	556000	16680000.	0.73	95.71	0.0	0.0	100.00	0.0	5.24
0022	ILUCR7	62	100	14683000.	0.64	96.35	96.47	0.0	3.53	0.62	5.86
0023	FLDPRN	110	5	14607300.	0.64	96.99	0.0	0.0	100.00	0.0	5.86
0024	PTSORC	51	100000	12900000.	0.56	97.55	0.0	0.0	100.00	0.0	5.86
0025	RDECOMP	81	100	10298000.	0.45	98.00	9.70	51.32	38.98	0.04	5.90
0026	CORECT	58	20	7419820.	0.32	98.32	99.71	0.0	0.29	0.32	6.22
0027	LDLTPX	59	66	7119820.	0.31	98.63	0.09	0.18	99.73	0.00	6.23
0028	TURBOX	55	20	6114850.	0.27	98.90	98.28	0.0	1.72	0.26	6.49
0029	SCVSUM	9	178	4454810.	0.19	99.09	99.92	0.0	0.08	0.19	6.68
0030	INERPR	10	152	3803500.	0.17	99.26	99.92	0.0	0.08	0.17	6.85
0031	DECOMX	37	20	2835600.	0.12	99.38	7.06	64.71	28.24	0.01	6.85
0032	FLUXTM	440	220	2637020.	0.11	99.49	0.0	0.0	100.00	0.0	6.85
0033	TURBVS	18	20	2421180.	0.11	99.60	99.90	0.0	0.10	0.11	6.96
0034	OKFLUX	40	44000	2310000.	0.10	99.70	0.0	0.0	100.00	0.0	6.96
0035	CORCEL	37	20000	1250000.	0.05	99.75	0.0	0.0	100.00	0.0	6.96
0036	MOVDIM	9	60	1111920.	0.05	99.80	99.90	0.0	0.10	0.05	7.01
0037	HTRANS	39	20	985700.	0.04	99.84	0.0	0.0	100.00	0.0	7.01
0038	CORARE	23	20040	921960.	0.04	99.88	0.0	0.0	100.00	0.0	7.01
0039	MATOCL	131	1	902963.	0.04	99.92	94.73	0.0	5.27	0.04	7.05
0040	PASTOT	30	21	212541.	0.01	99.93	0.0	0.0	100.00	0.0	7.05
0041	MVPCLE	192	20	206008.	0.01	99.94	22.78	0.0	77.22	0.00	7.05
0042	PASTIN	8	160	164800.	0.01	99.95	0.0	0.0	100.00	0.0	7.05
0043	PROCES	487	1	158357.	0.01	99.96	0.0	0.0	100.00	0.0	7.05
0044	OPENRT	56	1	151347.	0.01	99.96	99.84	0.0	0.16	0.01	7.05
0045	RDPCLC	73	1	130850.	0.01	99.97	0.0	0.0	100.00	0.0	7.05
0046	FLDRWS	25	13	130403.	0.01	99.97	0.0	0.0	100.00	0.0	7.05
0047	COD100	74	3	65192.	0.00	99.98	0.33	7.34	92.33	0.00	7.05
0048	GETVEP	48	456	62928.	0.00	99.98	0.0	0.0	100.00	0.0	7.05
0049	RDFLUX	61	1	60269.	0.00	99.98	0.0	0.0	100.00	0.0	7.05
0050	INCNUM	31	420	54764.	0.00	99.98	72.39	0.0	27.61	0.00	7.06
TOTAL		6455		2298201934.		100.00					7.06

Table 7.8 FORTUNE Cost Table for 'Case-3' (Vectorized)

NO	NAME	LINE	EXEC	COST	COST %	CUM %	V %	M %	S %	V CS %	V CM %
0001	COSGCC	280	40	64199560.	9.33	9.33	99.86	0.0	0.14	9.32	9.32
0002	COSOTT	470	20	49958780.	7.26	16.60	99.95	0.0	0.05	7.26	16.58
0003	RLU	72	308	49023744.	7.13	23.73	94.33	0.12	5.55	6.72	23.31
0004	COSOUU	338	20	48414000.	7.04	30.77	99.91	0.0	0.09	7.03	30.34
0005	ILUCRM	174	100	47657200.	6.93	37.70	99.96	0.0	0.04	6.93	37.27
0006	PKSORC	125	20	46704680.	6.79	44.49	99.98	0.0	0.02	6.79	44.06
0007	COSOVV	333	20	45347460.	6.59	51.08	99.94	0.0	0.06	6.59	50.65
0008	COSOKK	363	20	42785080.	6.22	57.30	99.89	0.0	0.11	6.21	56.86
0009	COSOWW	285	20	42439820.	6.17	63.47	99.91	0.0	0.09	6.17	63.03
0010	COSOEE	273	20	38207560.	5.56	69.03	98.97	0.0	1.03	5.50	68.52
0011	RAXSUB	51	208	34237216.	4.98	74.01	99.98	0.0	0.02	4.98	73.50
0012	AXSUBX	48	152	25018744.	3.64	77.64	99.98	0.0	0.02	3.64	77.14
0013	COSOPP	176	20	19878260.	2.89	80.53	98.05	0.0	1.95	2.83	79.97
0014	SORSLV	176	180	17939340.	2.61	83.14	99.81	0.0	0.19	2.60	82.58
0015	ILUCR7	62	100	14682988.	2.13	85.28	96.47	0.0	3.53	2.06	84.63
0016	FLDPRN	110	5	14607293.	2.12	87.40	0.0	0.0	100.00	0.0	84.63
0017	RDECMP	95	100	13088800.	1.90	89.31	94.20	2.56	3.25	1.79	86.43
0018	LDLTPX	73	66	12578808.	1.83	91.13	95.27	0.10	4.62	1.74	88.17
0019	CORECT	58	20	7419820.	1.08	92.21	99.71	0.0	0.29	1.08	89.25
0020	HYPLAN	39	5	6718288.	0.98	93.19	99.74	0.0	0.26	0.97	90.22
0021	PTSORC	60	20	6484700.	0.94	94.13	99.90	0.0	0.10	0.94	91.16
0022	TURBOX	55	20	6114848.	0.89	95.02	98.28	0.0	1.72	0.87	92.04
0023	SCVSUM	9	178	4454806.	0.65	95.67	99.92	0.0	0.08	0.65	92.68
0024	DECOMX	45	20	3841260.	0.56	96.23	94.59	3.24	2.17	0.53	93.21
0025	INERPR	10	152	3803496.	0.55	96.78	99.92	0.0	0.08	0.55	93.76
0026	PCSOL2	92	20	2936400.	0.43	97.21	99.89	0.0	0.11	0.43	94.19
0027	FLUXTM	442	220	2593560.	0.38	97.59	0.0	0.0	100.00	0.0	94.19
0028	TURBVS	18	20	2421180.	0.35	97.94	99.90	0.0	0.10	0.35	94.54
0029	OKFLUX	40	44000	2310000.	0.34	98.27	0.0	0.0	100.00	0.0	94.54
0030	RILUEX	34	100	2073100.	0.30	98.57	99.53	0.0	0.47	0.30	94.84
0031	HYPLA2	36	1	1281015.	0.19	98.76	99.77	0.0	0.22	0.19	95.03
0032	CORCEL	37	20000	1250000.	0.18	98.94	0.0	0.0	100.00	0.0	95.03
0033	MOVDIM	9	60	1111920.	0.16	99.10	99.90	0.0	0.10	0.16	95.19
0034	HTRANS	39	20	985700.	0.14	99.25	0.0	0.0	100.00	0.0	95.19
0035	PCSOL1	73	20	939860.	0.14	99.38	99.68	0.0	0.32	0.14	95.33
0036	CORARE	23	20040	921960.	0.13	99.52	0.0	0.0	100.00	0.0	95.33
0037	MATOCIL	131	1	902963.	0.13	99.65	94.73	0.0	5.27	0.12	95.45
0038	SETDIM	9	34	630020.	0.09	99.74	99.91	0.0	0.09	0.09	95.54
0039	PASTOT	30	21	212541.	0.03	99.77	0.0	0.0	100.00	0.0	95.54
0040	MVPCLE	192	20	206008.	0.03	99.80	22.78	0.0	77.22	0.01	95.55
0041	PASTIN	8	160	164800.	0.02	99.83	0.0	0.0	100.00	0.0	95.55
0042	PROCES	641	1	159893.	0.02	99.85	0.0	0.0	100.00	0.0	95.55
0043	OPENRT	62	1	151356.	0.02	99.87	99.84	0.0	0.16	0.02	95.57
0044	RDPCLC	79	1	130914.	0.02	99.89	0.0	0.0	100.00	0.0	95.57
0045	FLDRWS	29	13	130429.	0.02	99.91	0.0	0.0	100.00	0.0	95.57
0046	COD100	74	3	65192.	0.01	99.92	0.33	7.34	92.33	0.00	95.57
0047	GETVEP	48	456	62928.	0.01	99.93	0.0	0.0	100.00	0.0	95.57
0048	RDFLUX	67	1	60279.	0.01	99.94	0.0	0.0	100.00	0.0	95.57
0049	INCNUM	31	420	54764.	0.01	99.94	72.39	0.0	27.61	0.01	95.58
0050	PRPCLE	37	20	51160.	0.01	99.95	0.0	0.0	100.00	0.0	95.58
	TOTAL	8704		687742444.		100.00					95.59

Table 7.9 Comparison of CPU Time between Original and Vectorized Codes for "Case-3"

	CPU (S)	VU (S)	Memory (Kwords)
Original-Scalar (OS)	130.58	3.21	363
Vectprized-Scalar (VS)	46.96	0.02	516
Vectprized-VP (VP)	5.74	3.74	516

$\alpha = 22.7$ (OS/VP) $\beta = 8.2$ (VS/VP)

Table 7.10 FORTUNE Cost Table for 'Case-4' (Original)

NO	NAME	LINE	EXEC	COST	COST %	CUM %	V X	M X	S %	V CS %	V CM %
0001	ILUCRM	99	100	540723000.	21.47	21.47	0.74	4.46	94.80	0.16	0.16
0002	RILUEX	34	100	507892000.	20.17	41.64	0.45	0.0	99.55	0.09	0.25
0003	FUNCHH	8	5224000	163868000.	6.51	48.15	0.0	0.0	100.00	0.0	0.25
0004	COSOCC	152	40	119456000.	4.74	52.89	5.53	0.50	93.97	0.26	0.51
0005	PCSOL2	92	20	104635000.	4.16	57.05	2.95	0.0	97.05	0.12	0.63
0006	PCSOL1	55	20	100981000.	4.01	61.06	0.0	0.0	100.00	0.0	0.63
0007	AXSUBX	36	584	89996100.	3.57	64.63	41.97	57.97	0.06	1.50	2.13
0008	FUNCGG	6	14700000	79900000.	3.17	67.81	0.0	0.0	100.00	0.0	2.13
0009	COSOTT	182	20	77691100.	3.09	70.89	14.49	0.39	85.12	0.45	2.58
0010	COSDKK	188	20	73854000.	2.93	73.82	4.20	0.0	95.80	0.12	2.70
0011	PKSDRC	99	100000	60868000.	2.42	76.24	11.34	0.0	88.66	0.27	2.98
0012	COSOEE	160	20	59575200.	2.37	78.61	13.85	9.38	76.76	0.33	3.31
0013	RAXSUB	39	390	54293500.	2.16	80.76	35.77	64.17	0.06	0.77	4.08
0014	RLU	58	490	53761300.	2.13	82.90	0.02	0.03	99.95	0.00	4.08
0015	COSOWW	173	20	51253300.	2.04	84.93	18.58	10.21	71.21	0.38	4.46
0016	COSOUU	210	20	49925200.	1.98	86.92	17.25	17.78	64.96	0.34	4.80
0017	COSOVV	219	20	49316300.	1.96	88.87	14.82	18.91	66.26	0.29	5.09
0018	ILUCR7	62	100	40242500.	1.60	90.47	98.68	0.0	1.32	1.58	6.67
0019	LDLTPX	59	282	30939900.	1.23	91.70	0.02	0.03	99.95	0.00	6.67
0020	COSOPP	89	20	29747500.	1.18	92.88	17.48	0.0	82.52	0.21	6.87
0021	TURBOX	55	20	24483100.	0.97	93.85	99.53	0.0	0.47	0.97	7.84
0022	SCVSUM	9	826	20672300.	0.82	94.68	99.92	0.0	0.08	0.82	8.66
0023	SETDIM	9	500034	19630000.	0.78	95.45	59.24	0.0	40.76	0.46	9.12
0024	SDRSLV	170	180	19143700.	0.76	96.22	99.40	0.0	0.60	0.76	9.88
0025	DISCEN	8	556000	16680000.	0.66	96.88	0.0	0.0	100.00	0.0	9.88
0026	FLDPRN	110	5	15582700.	0.62	97.50	0.0	0.0	100.00	0.0	9.88
0027	INERPR	10	584	14613400.	0.58	98.08	99.92	0.0	0.08	0.58	10.46
0028	PTSORC	51	100000	12900000.	0.51	98.59	0.0	0.0	100.00	0.0	10.46
0029	RDECPH	81	100	10470000.	0.42	99.00	9.54	52.12	38.34	0.04	10.50
0030	CORECT	58	20	7993420.	0.32	99.32	98.77	0.0	1.23	0.31	10.81
0031	DECOMX	37	20	2888400.	0.11	99.44	6.93	65.35	27.72	0.01	10.82
0032	TURBVS	18	20	2501980.	0.10	99.54	99.68	0.0	0.32	0.10	10.92
0033	OKFLUX	40	44000	2420000.	0.10	99.63	0.0	0.0	100.00	0.0	10.92
0034	FLUXTM	440	220	2381280.	0.09	99.73	0.0	0.0	100.00	0.0	10.92
0035	HTRANS	39	20	1156220.	0.05	99.77	0.0	0.0	100.00	0.0	10.92
0036	MOVDIM	9	60	1111920.	0.04	99.82	99.90	0.0	0.10	0.04	10.96
0037	CORARE	23	20040	1031960.	0.04	99.86	0.0	0.0	100.00	0.0	10.96
0038	MATOC	131	1	930443.	0.04	99.89	93.91	0.0	6.09	0.03	11.00
0039	CORCEL	37	20000	900000.	0.04	99.93	0.0	0.0	100.00	0.0	11.00
0040	MVPCLE	192	20	214898.	0.01	99.94	22.66	0.0	77.34	0.00	11.00
0041	PASTOT	30	21	212541.	0.01	99.95	0.0	0.0	100.00	0.0	11.00
0042	PASTIN	8	160	164800.	0.01	99.95	0.0	0.0	100.00	0.0	11.00
0043	PROCES	487	1	158357.	0.01	99.96	0.0	0.0	100.00	0.0	11.00
0044	OPENRT	56	1	157747.	0.01	99.97	99.72	0.0	0.28	0.01	11.00
0045	RDPCL	73	1	131648.	0.01	99.97	0.0	0.0	100.00	0.0	11.00
0046	FLDRWS	25	13	130403.	0.01	99.98	0.0	0.0	100.00	0.0	11.00
0047	GETVEP	48	476	65688.	0.00	99.98	0.0	0.0	100.00	0.0	11.00
0048	COD100	74	3	65192.	0.00	99.98	0.33	7.34	92.33	0.00	11.00
0049	RDFLUX	61	1	60269.	0.00	99.98	0.0	0.0	100.00	0.0	11.00
0050	PRPCLE	37	20	51160.	0.00	99.99	0.0	0.0	100.00	0.0	11.00
	TOTAL	6455		2518162406.		100.00					11.01

Table 7.11 FORTUNE Cost Table for 'Case-4' (Vectorized)

NO	NAME	LINE	EXEC	COST	COST X	CUM X	V X	M X	S X	VCS X	VCM X
0001	AXSUBX	48	584	98694248.	10.31	10.31	99.98	0.0	0.02	10.31	10.31
0002	RLU	72	490	81049920.	8.47	18.78	98.71	0.02	1.27	8.36	18.67
0003	RAXSUB	51	390	65910780.	6.89	25.66	99.98	0.0	0.02	6.88	25.55
0004	COSOCC	280	40	65741960.	6.87	32.53	99.35	0.0	0.65	6.82	32.38
0005	LDLTPX	73	282	56295096.	5.88	38.41	98.93	0.02	1.05	5.82	38.19
0006	COSOTT	470	20	52875980.	5.52	43.94	99.81	0.0	0.19	5.51	43.71
0007	ILUCRM	176	100	49761800.	5.20	49.14	99.90	0.0	0.10	5.19	48.90
0008	PKSORC	125	20	47240680.	4.94	54.07	99.93	0.0	0.07	4.93	53.83
0009	COSOWV	285	20	46806220.	4.89	58.96	99.57	0.0	0.43	4.87	58.70
0010	COSOVV	333	20	46365060.	4.84	63.81	99.73	0.0	0.27	4.83	63.53
0011	COSOUU	338	20	45658000.	4.77	68.58	99.56	0.0	0.44	4.75	68.28
0012	COSOKK	363	20	43267480.	4.52	73.10	99.50	0.0	0.50	4.50	72.78
0013	ILUCR7	70	100	40243880.	4.20	77.30	98.67	0.0	1.33	4.15	76.93
0014	COSOEE	273	20	38749960.	4.05	81.35	98.85	0.0	1.15	4.00	80.93
0015	TURBOX	63	20	24483316.	2.56	83.91	99.53	0.0	0.47	2.55	83.48
0016	SCVSUM	9	826	20672302.	2.16	86.07	99.92	0.0	0.08	2.16	85.63
0017	COSOPP	176	20	20323860.	2.12	88.19	97.92	0.0	2.08	2.08	87.71
0018	SDRSLV	185	180	19175220.	2.00	90.19	99.38	0.0	0.62	1.99	89.70
0019	FLDPRN	110	5	15582741.	1.63	91.82	0.0	0.0	100.00	0.0	89.70
0020	INERPR	10	584	14613432.	1.53	93.35	99.92	0.0	0.08	1.53	91.23
0021	RDECMP	95	100	13500800.	1.41	94.76	98.73	0.49	0.78	1.39	92.62
0022	HYPLAN	39	5	8382728.	0.88	95.63	99.15	0.0	0.85	0.87	93.49
0023	CORRECT	58	20	7993420.	0.84	96.47	98.77	0.0	1.23	0.82	94.31
0024	PTSORC	60	20	6814300.	0.71	97.18	99.66	0.0	0.34	0.71	95.02
0025	DECOMX	45	20	3982060.	0.42	97.60	98.88	0.63	0.49	0.41	95.44
0026	PCSOL2	97	20	3074880.	0.32	97.92	99.68	0.0	0.32	0.32	95.76
0027	TURBVS	18	20	2501980.	0.26	98.18	99.68	0.0	0.32	0.26	96.02
0028	OKFLUX	40	44000	2420000.	0.25	98.43	0.0	0.0	100.00	0.0	96.02
0029	RILUEX	36	100	2341800.	0.24	98.68	98.87	0.0	1.13	0.24	96.26
0030	FLUXTM	442	220	2334640.	0.24	98.92	0.0	0.0	100.00	0.0	96.26
0031	HYPLA2	36	1	1678455.	0.18	99.10	99.19	0.0	0.81	0.17	96.43
0032	HTRANS	39	20	1156220.	0.12	99.22	0.0	0.0	100.00	0.0	96.43
0033	MVDIM	9	60	1111920.	0.12	99.33	99.90	0.0	0.10	0.12	96.55
0034	PCSOL1	75	20	1091140.	0.11	99.45	99.35	0.0	0.65	0.11	96.66
0035	CORARE	23	20040	1031960.	0.11	99.56	0.0	0.0	100.00	0.0	96.66
0036	MATOCCL	131	1	930443.	0.10	99.65	93.91	0.0	6.09	0.09	96.75
0037	CORCEL	37	20000	900000.	0.09	99.75	0.0	0.0	100.00	0.0	96.75
0038	SETDIM	9	34	630020.	0.07	99.81	99.91	0.0	0.09	0.07	96.82
0039	MVPCLE	192	20	214898.	0.02	99.84	22.66	0.0	77.34	0.01	96.82
0040	PASTOT	30	21	212541.	0.02	99.86	0.0	0.0	100.00	0.0	96.82
0041	PASTIN	8	160	164800.	0.02	99.87	0.0	0.0	100.00	0.0	96.82
0042	PROCES	644	1	159893.	0.02	99.89	0.0	0.0	100.00	0.0	96.82
0043	OPENRT	62	1	157756.	0.02	99.91	99.72	0.0	0.28	0.02	96.84
0044	RDPCLC	79	1	131712.	0.01	99.92	0.0	0.0	100.00	0.0	96.84
0045	FLDRWS	29	13	130429.	0.01	99.94	0.0	0.0	100.00	0.0	96.84
0046	GETVEP	48	476	65688.	0.01	99.94	0.0	0.0	100.00	0.0	96.84
0047	COD100	74	3	65192.	0.01	99.95	0.33	7.34	92.33	0.00	96.84
0048	RDFLUX	67	1	60279.	0.01	99.96	0.0	0.0	100.00	0.0	96.84
0049	PRPCLE	37	20	51160.	0.01	99.96	0.0	0.0	100.00	0.0	96.84
0050	RDDFUS	38	1	50137.	0.01	99.97	0.0	0.0	100.00	0.0	96.84
TOTAL		8762		957180008.		100.00					96.85

Table 7.12 Comparison of CPU Time between Original and Vectorized Codes for "Case-3"

	CPU (S)	VU (S)	Memory (Kwords)
Original-Scalar (OS)	153.63	3.00	363
Vectprized-Scalar (VS)	72.08	0.02	516
Vectprized-VP (VP)	13.71	10.63	516

$\alpha = 11.2$ (OS/VP) $\beta = 5.3$ (VS/VP)

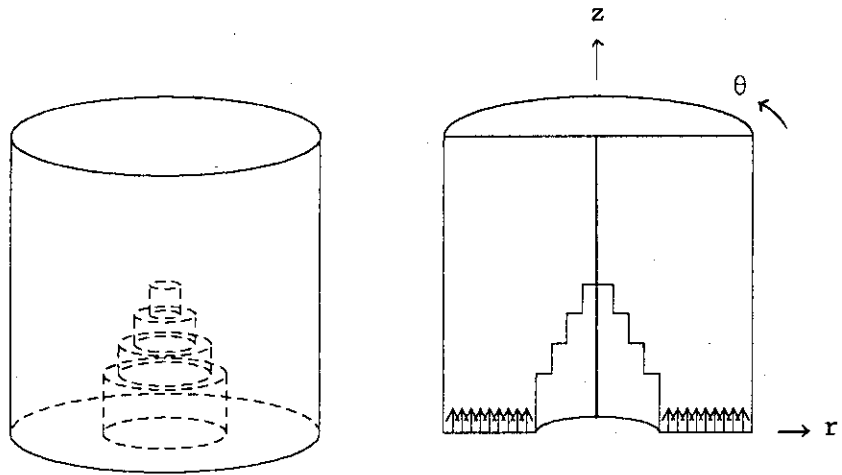


Fig. 7.1 Calculation Model for 'Case-1'

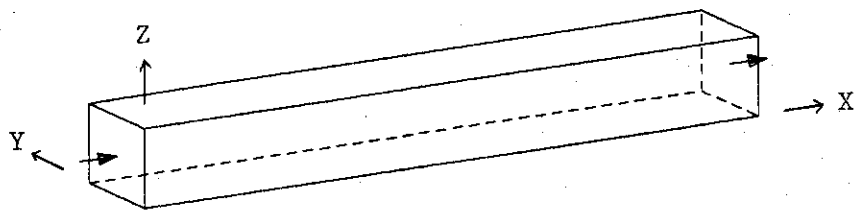


Fig. 7.2 Calculation Model for 'Case-2'

8. I/O 回数 の 削減

オリジナル版では機番 11, 12 (F11, F12) をワークファイルとして使用している。このうち F 12 はベクトル化作業で内部処理化したため不要となった。F 11 は前ステップの計算結果を保存しておくために使用しており、計算コストは低いが I/O 回数が多いという欠点がある。FACOM VP-100 にはワークファイルに対する VIO/F (主記憶ファイル) 入出力機能¹⁸⁾が備わっており、この機能を利用すると I/O 回数を大幅に減らすことができる。Table 8.1 は 7.1 節のケース 1 について本機能を適用した例である。表中の内容は以下のとおりである。

I/O : I/O 回数

CPU : CPU 時間 (秒)

Memory : 主記憶領域 (KB)

VIRT : 実記憶領域, ERGN : 拡張領域

Elapse Time : JOB の実行開始から終了までの時間

本機能の適用によって I/O 回数は大幅に減らすことができた。なおベクトル化版 VP において JOB の経過時間 (Elapse Time) があまり短縮されていないのは、VP コンパイラの実行時間が長いためであり、ロードモジュールを作成しておくことによって大幅な時間短縮が期待できる。Table 8.2 はその例である。

Table 8.1 Comparison of I/O Counts between Work File and VIO/F

	I/O (Counts)	CPU (S)	Memory (KB)		Elapse Time
			VIRT	ERGN	
Original-Scalar (Work)	11092	94.61	3384	-	12 m 16 s
(VIO/F)	15	103.26	3032	2420	3 m 48 s
Vectorized-VP (Work)	3355	6.82	3648	-	9 m 20 s
(VIO/F)	15	6.13	3104	1608	6 m 46 s

Table 8.2 Comparison of the Elapse Time between Work File and VIO/F

	I/O (Counts)	CPU (S)	Memory (KB)		Elapse Time
			VIRT	ERGN	
Vectorized-VP (Work)	3354	6.78	3648	-	2 m 26 s
(VIO/F)	14	6.08	3104	1608	0 m 39 s

9. 機能向上および追加ルーチン

9.1 定常状態の判定

旧 STREAM (原研版) には時間サイクル毎に各量の変化量を求め、これらが指定値以下になったときに定常状態とみなして計算を打ち切る機能がある。本作業ではこのルーチン群をベクトル化版 STREAM に移植した。なお定常判定の一部を Fig.9.1 のように修正した。これは各量の絶対値が定常判定値の 2 乗以下の場合は絶対誤差、そうでなければ相対誤差を判定に用いるものである。

定常状態の判定は 8 種の諸量 (U, V, W, p, T, k, ε, C) のうち指定されたものについて、指定メッシュ点 (各 1 点) および全体 (絶対値の総和平均) に対して行い、これらが定常条件を満足したときに定常状態とみなす。

追加ルーチン				
LOADRB	SAVERB	STD100	STD200	STD210
STD300	STD400			
修正ルーチン				
PROCES	STD210			

9.2 計算経過時間 (CPU 時間) による計算打ち切り

STREAM コードを用いた大規模な解析計算では定常状態に落ち着くまでに多大な時間サイクル数を要し、それによって CPU 時間も増加する。このためにリスタート機能が備わっていて、解析計算を数回に分けて実行できるようになっている。しかし計算機運用上の制約により CPU 時間のオーバーによる異常終了は避けられず、せっかく計算した結果が無駄になる場合もある。

今回の作業ではこれに対処するために時間サイクル内に経過 CPU 時間の測定部を入れ、設定時間に達すると計算を打ち切るようにした。Fig.9.2 はそのフローである。現在までの経過時間 (CPU 時間) を t とするとき、

$$(t + t_{\max}) \geq t_0$$

のときに計算を打ち切る。ただし、

t_{\max} : これまでの 1 サイクルの計算に要した最大の時間

t_0 : 設定時間

である。

9.3 各物理量の経時変化プロット機能

STREAM コードには解析結果を三次元図化する機能があり、3次元の流速ベクトル図、温度、圧力、濃度の等高線図を描くことができる。これはある時間における解析領域全体の図であり、時間変化をみる場合には適さない。本作業ではベクトル化版 STREAM に対して、メッシュ上の1点の各物理量の経時変化をプロットする機能を加えた。プロット対象とする物理量は以下のものである。

U : x方向流速 V : y方向流速 W : z方向流速
P : 圧力 DP : 圧力補正量 DIVR : 発散量

Fig.9.3は圧力補正量の経時変化をプロットした例であり、横軸はサイクル数、縦軸はDPの値を表わしている。

9.4 高速フーリエ変換による時系列データ処理²²⁾

いくつかの問題を STREAM を用いて解析した結果、流速や温度が時間とともに周期的な変動を示すものが得られた (Fig.9.4)。このため、各物理量の時系列データをフーリエ変換して、現象の特性周波数を求め、それをプロットする機能を加えた。Fig.9.4で示した時系列データに対して、フーリエ変換した結果を Fig.9.5(a)に示す。この図において、横軸は波数、縦軸はパワーを表わしている。波数が20以上のものに対して縦軸のスケールを変えたものを Fig.9.5(b)に示す。これらの周期は (解析対象総時間) / (波数) となる。この結果により、Fig.9.4の時系列データは波数7の主成分を持つことがわかる。

この機能は、9.3節で述べた経時変化プロット機能に加えられているため、同様の物理量に対して解析可能である。使用法に関しては、11.3節(d)を参照していただきたい。

```

:
SCH1 =1.0E+3
:
IF (ABS(AA1).LE.EPSV) GO TO 20
SCH1=ABS((AA2-AA1)/AA1)
IF (SCH1.LE.ESTD1(NO)) ISTD1=1
20 CONTINUE
:
↓
:
SCH1 =1.0E+3
:
IF (ABS(AA1) .LE. ESTD1(NO)**2) THEN
  SCH1 = ABS(AA2 - AA1)
ELSE
  SCH1 = ABS((AA2 - AA1)/AA1)
END IF
IF (SCH1.LE.ESTD1(NO)) ISTD1=1
20 CONTINUE
:

```

Fig. 9.1 Modification of the Steady Judgement

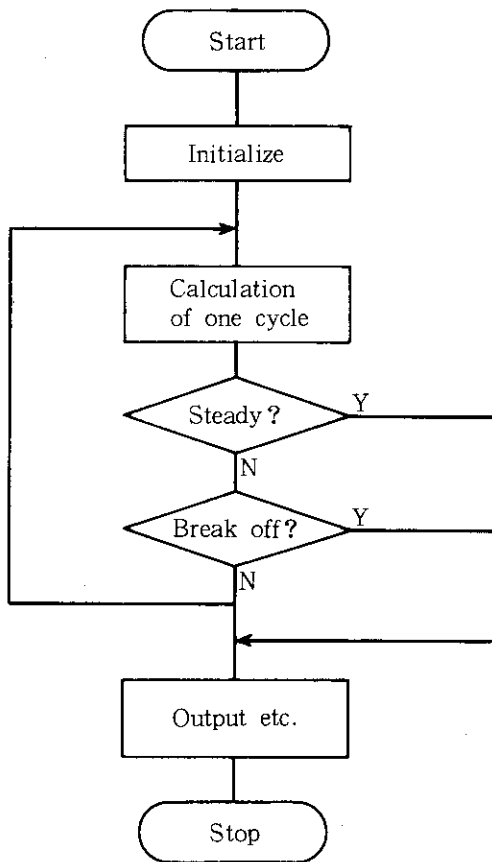


Fig. 9.2 Check of the Executing Time

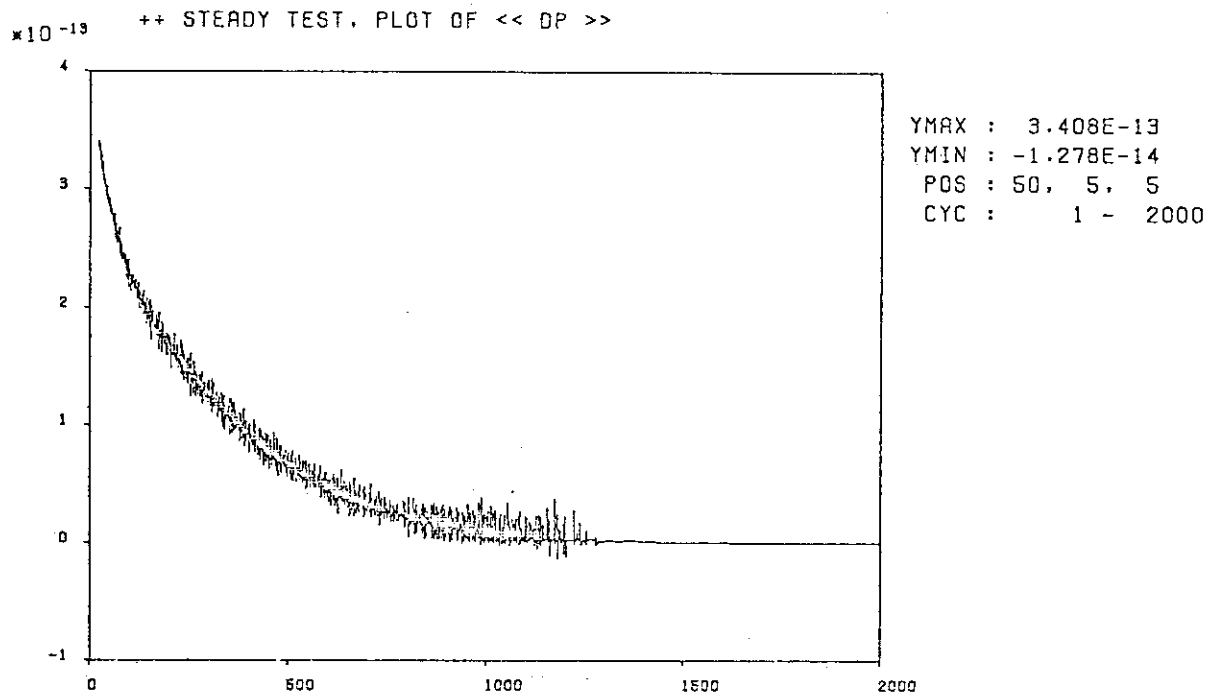


Fig. 9.3 Example of the Trend Data

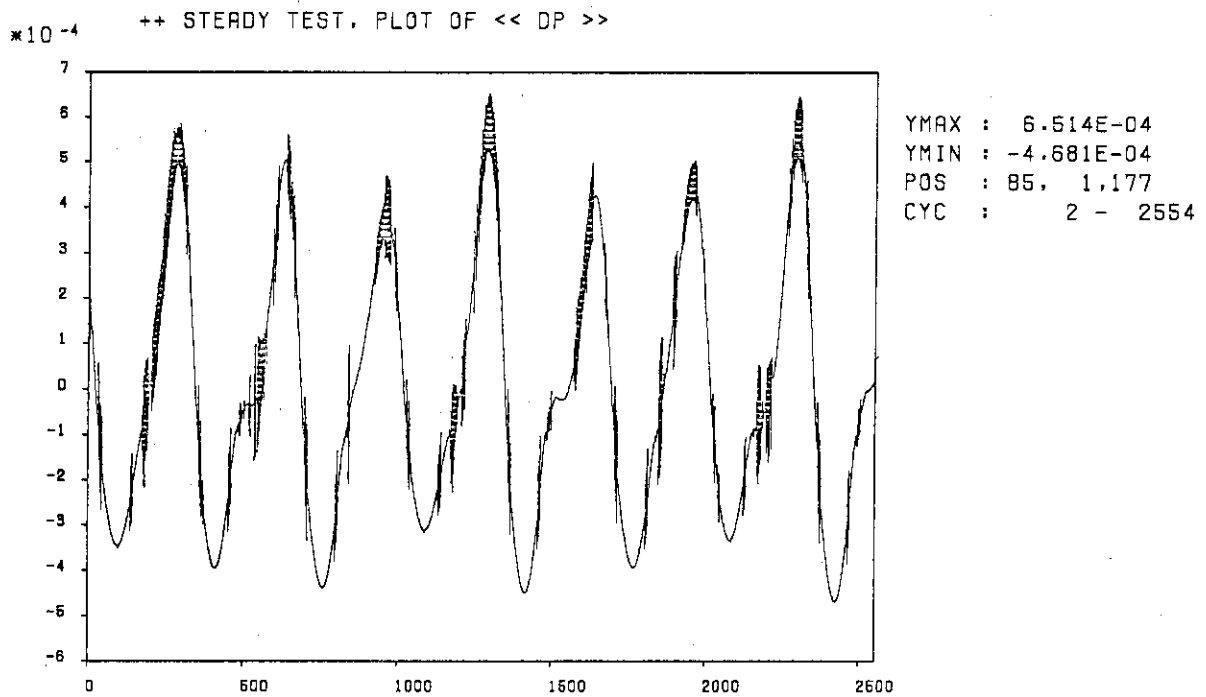
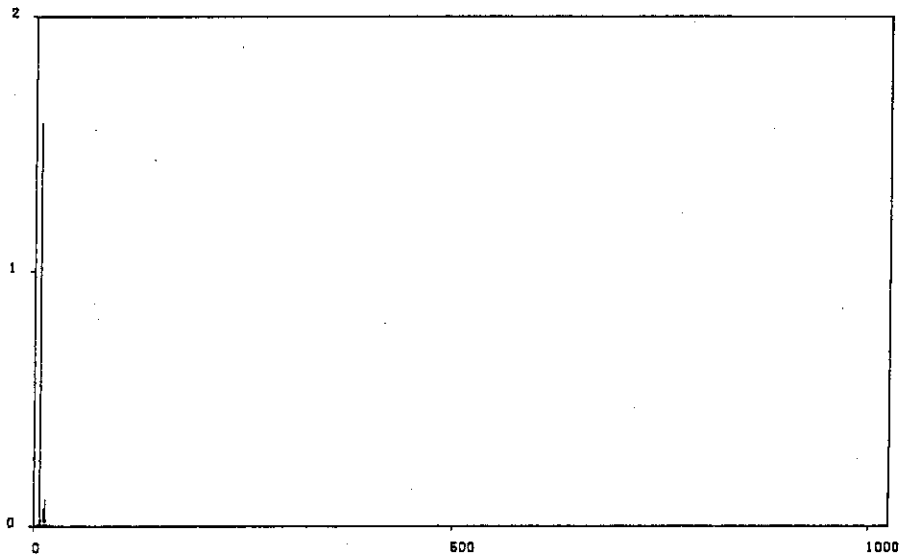


Fig. 9.4 Example of the Trend Data

*10⁻¹¹ ++ SPECTRUM OF << DP >>

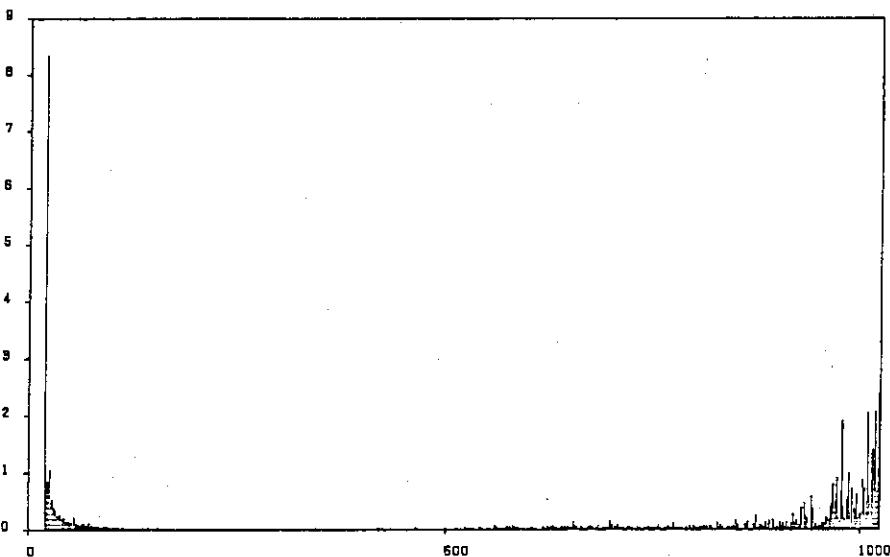


POS :	85,	1.177
CYC :	2 -	2554
CONST :	1	1.565E-16
K-01 :	7	1.580E-11
K-02 :	13	1.069E-12
K-03 :	11	7.094E-13
K-04 :	8	2.971E-13
K-05 :	14	2.799E-13

(a)

Fig. 9.5 Power Spectrum of the Trend Data

*10⁻¹⁴ ++ SPECTRUM OF << DP >>



POS :	85,	1.177
CYC :	2 -	2554
CONST :	1	1.565E-16
K-01 :	19	8.343E-14
K-02 :	1022	2.377E-14
K-03 :	1018	2.069E-14
K-04 :	1009	2.042E-14
K-05 :	978	1.906E-14

(b)

Fig. 9.5 Power Spectrum of the Trend Data

10. 計算結果の評価

p方程式（圧力補正式）ではこれまでSOR法が多く用いられてきた。これは式が簡単であり、適当な加速係数を与えると安定した収束性を示す等の理由によるが、問題が複雑になってくると収束が遅く精度が悪い。また反復回数が多くなることによって計算時間がかかる等の問題が出てくる。このような理由から最近ではもっと収束が速く、精度の良い解法（例えばMICCG法等）を用いるようになってきている。ここではSOR法およびMICCG法での計算結果に対して比較、検討を行った。

計算に用いたモデルは7.3節のケース3と同モデルであるがp方程式以外はJacobi法を用いた。p方程式にはSOR法、MICCG法を用い、最大反復数は200回、収束判定値は 10^{-6} で500サイクル、2000サイクルまでの計算を行った。Table 10.1はCPU時間を比較したものである。500サイクルではMICCG法の方が1.4倍速いが、2000サイクルになるとその差は小さくなっている。これはサイクル数が大きくなる程収束性が良くなり、反復回数が減少するためと考えられる。Fig.10.1は両解法の残差をサイクル毎にプロットしたものである。残差は対数をとって示してある。SOR法では約150サイクルまで収束せず残差は大きい、サイクル数が進むにつれて徐々に小さくなり、 10^{-6} 以下に収束している。MICCG法では全サイクルで収束し、定常状態となる1300サイクル以降は残差が急激に減少している（これはSOR法では見られない）。Fig.10.2は両解法の反復回数の変化をプロットしたものである。SOR法は初めの段階では収束しないため反復回数は200回を越えているが徐々に減少し、収束した後の反復回数は10回以内になっている。MICCG法の反復回数は定常状態になるまでは30回以内で振動しているが、定常状態になってからは1回の反復で済んでいる。以上の結果から次の事が言える。

- 計算の初期段階においてはMICCG法が圧倒的に速く収束し、精度も高い。
- 定常状態に近い段階ではSOR法の反復回数は小さくなり、1回の反復当りの計算量が少ない点でSOR法の方が有利になる。

しかしここで行ったテストモデルは非常に単純なものであり、問題が複雑になった場合はMICCG法の収束の速さがより顕著に現れるであろう。SOR法は問題が非常に単純であるか、それ程の精度を要求しない場合に用いた方が良いであろう。

Table 10.1 Comparison of CPU Time between SOR and MICCG Methods

	Cycle no.	CPU	VU
SOR method	500	2 m 31 s	2 m 10 s
	2000	6 m 29 s	5 m 10 s
MICCG method	500	1 m 49 s	1 m 22 s
	2000	6 m 2 s	4 m 31 s

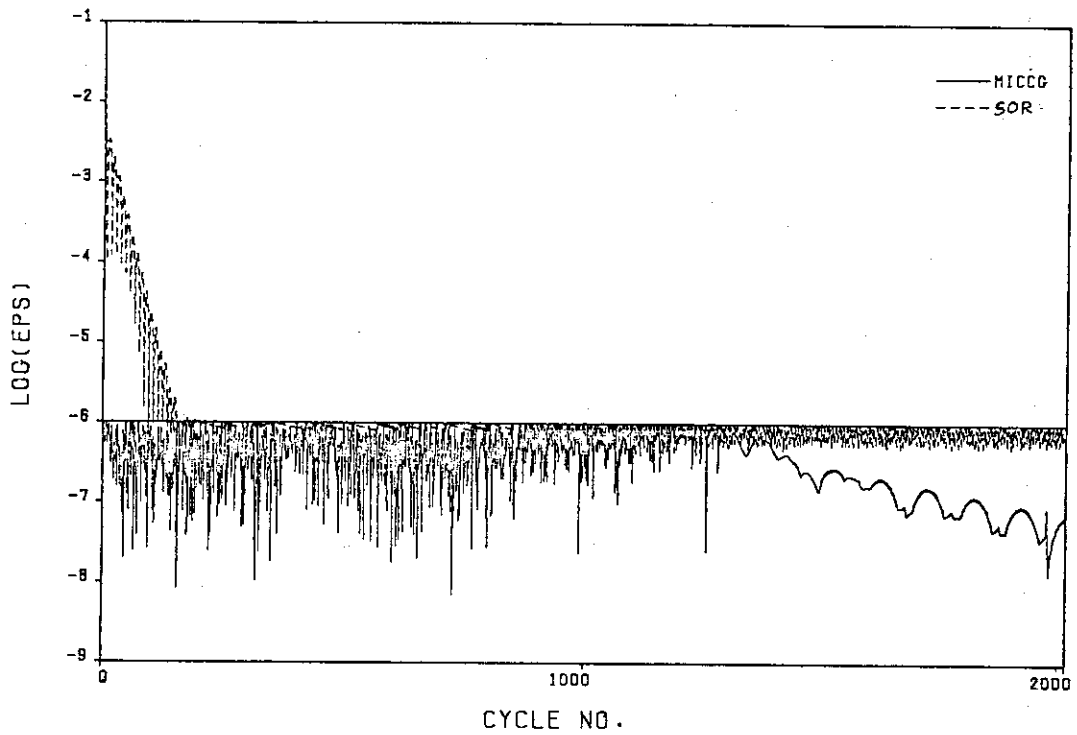


Fig. 10.1 Residual of SOR and MICCG Methods

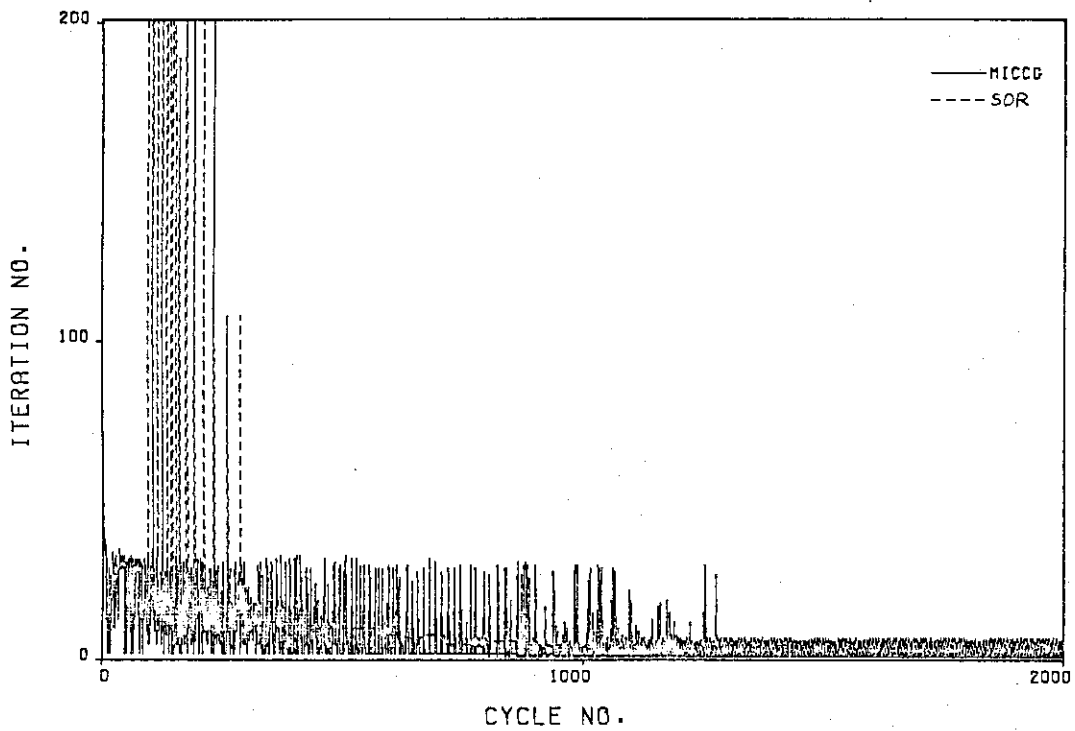


Fig. 10.2 Iteration Number of SOR and MICCG Methods

11. ベクトル化版 STREAM コードの取り扱い

11.1 SOLVER 入力データの説明

(1) IM, JM, KM, CYL, COC, ICONO, ISWPT, IGENK, IGENP, IGENS
(3 I 5, 5 X, 2 F 1.0, I 3, 4 I 5)

JM ; x 軸方向の領域区分数。CYL が 1 のとき半径(r)方向の領域区分数

JM ; y 軸方向の領域区分数。CYL が 1 のとき円周(θ)方向の領域区分数

KM ; z 軸方向の領域区分数。CYL が 1 のとき軸(z)方向の領域区分数

CYL ; 座標系の選択

(0 のとき直角座標系, 1 のとき円筒座標系)

COC ; 円筒座標系のとき θ 方向の周期境界の有無

(0 のとき周期境界でない, 1 のとき周期境界を設定)

ICONO ; 拡散物質数 (≤ 3)

ISWPT ; 1 のとき Particle を考慮

IGENK ; 1 のとき x, y, z 座標 { (4) の入力 } を " COD 100 " で入力する。

IGENP ; 1 のとき入力データを全てリスト出力する (0 のとき簡略型)

IGENS ; 1 のとき定常判定を行う。このとき (8-1) ~ (8-3) の入力が必要。

Fig.11.1 に STREAM が扱う座標系を示す。

(2) (LEQU(l), l = 1, 10), ITMH, ITMM, ITMS, NTPT, (IIX(I), IYY(I),
IIZ(I), I = 1, NTPT)

(10 I 1, 10 I 5)

LEQU(1) ; 1 のとき U 方程式を解く

LEQU(2) ; 1 のとき V 方程式を解く

LEQU(3) ; 1 のとき W 方程式を解く

LEQU(4) ; 1 のとき Pressure Correction *1

LEQU(5) ; 1 のとき T 方程式を解く

LEQU(6) ; 1 のとき k 方程式を解く *2

LEQU(7) ; 1 のとき ϵ 方程式を解く *2

LEQU(8) ; 1 のとき C 方程式を解く

LEQU(9), LEQU(10) ; ダミー

ITMH, ITMM, ITMS ; CPU 打ち切り時間を時, 分, 秒で与える。これらが 0 のときは打ち切りしない。

注) *1 U, V, W 方程式のいずれか 1 つを解くとき, Pressure Correction を必ず行なう。

(LEQU(4) = 1)

*2 LEQU(6), (7) はどちらも 1 かどちらも blank かである。

NTPT ;トレンド・プロットを行うときに、メッシュ内の点の数を指定する
($0 \leq \text{NTPT} \leq 2$)

IIX, IIY, IIZ ;トレンド・プロットを行うメッシュ点

(3) NFILE, ICORD, (NPRIN(*l*), *l*=1, 9)

(1615)

NFILE ;プロットファイル出力の制御

0のとき出力なし

正整数のとき NFILE サイクルに1回出力

(最後のサイクルは必ず出力される)

ICORD ;結果のリスト出力のとき図の(L_x, L_y)をどの座標にするかを指定

1のとき (x, y), 2のとき (x, z)

3のとき (y, x), 4のとき (y, z)

5のとき (z, x), 6のとき (z, y)

Fig.11.2 にリスト出力パターン図を示す。

NPRIN(1); Uのリスト出力の制御。制御方法は NFILE と同じ。

NPRIN(2); Vのリスト出力の制御。制御方法は NFILE と同じ。

NPRIN(3); Wのリスト出力の制御。制御方法は NFILE と同じ。

NPRIN(4); Pのリスト出力の制御。制御方法は NFILE と同じ。

NPRIN(5); Tのリスト出力の制御。制御方法は NFILE と同じ。

NPRIN(6); kのリスト出力の制御。制御方法は NFILE と同じ。

NPRIN(7); ϵ のリスト出力の制御。制御方法は NFILE と同じ。

NPRIN(8); Cのリスト出力の制御。制御方法は NFILE と同じ。

NPRIN(9); SOR法, MICCG法, ILUCR法の残差のリスト出力の制御。

-2のとき 出力なし

-1のとき 収束しない場合に出力

0のとき 全て出力

nのとき nサイクル毎に出力

(4) ($X(i), i=1, \text{IM}+1$), ($Y(j), j=1, \text{JM}+1$), ($Z(k), k=1, \text{KM}+1$)

(6F 10.0)

X(*i*); 要素境界の x 座標 (m) または r 座標 (m)

Y(*j*); 要素境界の y 座標 (m) または θ 座標 (ラジアン)

Z(*k*); 要素境界の z 座標 (m)

円筒座標系の場合, Y(*j*)の値は必ず $0 \leq Y(j) \leq 2\pi$ の範囲にあり, 単調増加でなければならない。完全な円筒の場合, $Y(1)=0$ かつ $Y(\text{JM}+1)=2\pi$ となる。

なお, STREAMは $\pi = 3.14159$ として取り扱っている。

Fig.11.3 にメッシュポイントと座標の対応を示す。なお(1)で IGENK=1 とした場合は(4)の方法で座標を入力する。

(4) X0

IX, NX

RX, XE

(F 10.0)

(I 1, I 4)

(F 10.0)

X0 ; x座標の初期値 (m)

IX ; 必ず1にする (等比級数)

NX ; 分割数

RX ; 等比級数の r (1の場合は等差級数となる)

XE ; x座標の終値 (m)

IX~XEまでは繰り返して入力できる。その場合の初期値は前回の終値がとられる。IX=0のとき読み込み中止。y座標, z座標も同じように入力する。

(5) MPRO

(RHO (mp), VISL (mp), CP (mp), CAP (mp), BETA (mp), DM (mp),
mp = 1, MPRO)

(15)

(6 F 10.0)

MPRO ; 領域内に存在する物性の種類数 (≤ 9)mp ; 物性No. ただし mp = 1のみが流体で, mp ≥ 2 は固体を表わす。RHO (mp) ; 物性No. mp の密度 (kg/m³)VISL (mp) ; 物性No. mp の動粘度係数 (m²/s)CP (mp) ; 物性No. mp の定圧比熱 (J/kg \cdot °C)CAP (mp) ; 物性No. mp の熱伝導率 (J/m \cdot s \cdot °C)

BETA (mp) ; 物性No. mp の体膨張率 (1/°C)

DM (mp) ; 物性No. mp の物質拡散係数 (m²/s)

a. 流体 (mp=1) で, 等温のとき

RHO, VISL が必要

b. 流体 (mp=1) で, 温度変化はあるが無重力のとき

RHO, VISL, CP, CAP が必要

c. 流体 (mp=1) で, 重力場のとも温度変化を考慮するとき (浮力)

RHO, VISL, CP, BETA が必要

d. 流体 (mp=1) で, 物質拡散のあるとき

a, b, c いずれの場合も, DM の追加が必要

e. 固体 (mp ≥ 2) の場合

RHO, CP, CAP が必要

(6) GX, GY, GZ, TREF, IGRV

(4 F 10.0, I 1)

LEQU(5) = 1 かつ BETA(1) > 0 のとき意味をもち、その他の場合は全て 0 をあたえておく。

GX, GY, GZ ; 重力加速度ベクトルの成分 (m/s²)

a. 直角座標系または円筒座標系で IGRV=0 のとき

GX ; x 方向成分または r 方向成分

GY ; y 方向成分または θ 方向成分

GZ ; z 方向成分または z 方向成分

b. 円筒座標系で IGRV=1 のとき

(r, θ , z) の円筒座標系と次の関係にある直角座標系 (R_x , R_y , R_z) を考え、その直角座標系で定めた重力加速度を与える。

R_z 軸と Z 軸とは同じで、 R_x と R_z 軸でつくられる面が $\theta = 0$ の面に対応し、 R_y 軸は右手系で同面に垂直。また円筒座標系 (0, 0, 0) と直角座標系 (0, 0, 0) とは同一点になる (Fig.11.4 参照)。

GX ; R_x 方向成分

GY ; R_y 方向成分

GZ ; R_z 方向成分

TREF ; T 方程式を解き、浮力を考慮するときの基準温度 (°C)

IGRV ; 円筒座標系で用いる重力加速度の選択

(GX, GY, GZ の説明参照)

(7) NCYC1, NCYC2, MOCOF, NTCG

(NTCX (nt), DTX (nt), nt = 1, NTCG)

(415)

(4 (15, F15.0))

NCYC1 ; 計算開始サイクルNo. 1 のとき初期計算, 2 以上のとき Restart 計算

NCYC2 ; 計算終了サイクルNo.

MOCOF ; 1 サイクル内の係数行列の再設定回数

NTCG ; 時間間隔の変化数 (≤ 100)

NTCX, DTX ; サイクル NTCX までの時間間隔 DTX

(8) MTDU, ITRU, OMGU, EQCU

MTDV, ITRV, OMGV, EQCV

MTDW, ITRW, OMGW, EQCW

MTDP, ITRP, OMGP, EQCP

MTDT, ITRT, OMGT, EQCT

MTDK, ITRK, OMGK, EQCK

MTDE, ITRE, OMGE, EQCE

MTDC, ITRC, OMGC, EQCC

(215, 2F10.0)

以下の ϕ は U, V, W, p, T, k, ϵ , C を代表している。

MTD ϕ : マトリックス解法の選択スイッチ

- 1 のとき, JACOBI 法
- 2 のとき, SOR 法
- 3 のとき, MICCG 法 (圧力補正式のみ使用可能)
- 4 のとき, ILUCR 法 (スカラー量の計算のみ使用可能)

ITR ϕ ; マトリックス計算の最大収束回数

OMG ϕ ; MTD $\phi = 1$ のとき, 無意味

MTD $\phi = 2$ のとき, 加速係数

MTD $\phi = 3$ のとき, マトリックス計算の実行下限

MTD $\phi = 4$ のとき, 無意味

EQC ϕ ; MTD $\phi = 1$ のとき, 無意味

MTD $\phi = 2$ のとき, 許容最大誤差, 許容最大誤差とは, 各要素に対する次の単位系に関する方程式誤差。

$$\begin{array}{cccc} \textcircled{1} \frac{U \cdot \Delta V}{\Delta t} & \textcircled{2} \frac{V \cdot \Delta V}{\Delta t} & \textcircled{3} \frac{W \cdot \Delta V}{\Delta t} & \textcircled{4} \Delta A \cdot U \\ \textcircled{5} \frac{\rho C_p T \Delta V}{\Delta t} & \textcircled{6} \frac{k \cdot \Delta V}{\Delta t} & \textcircled{7} \frac{\epsilon \cdot \Delta V}{\Delta t} & \textcircled{8} \frac{C \cdot \Delta V}{\Delta t} \end{array} \text{ の単位}$$

MTD $\phi = 3$ のとき, 方程式残差の相対誤差 (一般に 10^{-2})

MTD $\phi = 4$ のとき, 方程式残差の相対誤差 (一般に 10^{-2})

一般的な例として, 次の例をあげておく。

- MTDU = 1, ITRU = 1, OMGU = 0, EQCU = 0
- MTDV = 1, ITRV = 1, OMGV = 0, EQCV = 0
- MTDW = 1, ITRW = 1, OMGW = 0, EQCW = 0
- MTDP = 3, ITRP = 30, OMGP = 10^{-20} , EQCP = 10^{-2}
- MTDT = 4, ITRT = 5, OMGT = 0, EQCT = 10^{-2}
- MTDK = 4, ITRK = 5, OMGK = 0, EQCK = 10^{-2}
- MTDE = 4, ITRK = 5, OMGE = 0, EQCE = 10^{-2}
- MTDC = 4, ITRC = 5, OMGC = 0, EQCC = 10^{-2}

(8-1) NCSTD

(I 5)

NCSTD ; 0 のとき定常条件をキャンセル (以下のデータは不要)

(8-2) (NRPA 1 (NO), ESTD 1 (NO), (MONP 1 (L, NO), L=1, 3), NO=1, 8)

(I 5, F 10, 0, 3 I 5)

NRPA 1 ; 判定するサイクル数 (0 のとき対象としない)

ESTD 1 ; 定常判定値

MONP 1 ; 定常を判定するメッシュ点 (x, y, z)

以上は指定点での定常判定, U, V, W, p, T, k, ϵ , C の順に入力

(8-3) (NRPA2 (NO), ESTD2 (NO), NO=1, 8)
(I 5, F 10.0)

NRPA2 ; 判定するサイクル数 (0 のとき対象としない)
ESTD2 ; 定常判定値

以上は全体での定常判定, U, V, W, p, T, k, ε, C の順に入力

(8-1) ~ (8-3) は IGENS=1 としたときだけ必要。

(9) MAT, I1, I2, J1, J2, K1, K2 [このカードは何枚も繰り返せるが, I1=0 のとき読み込み中止]

(I1, I4, 5I5)

MAT ; $I1 \leq i \leq I2, J1 \leq j \leq J2, K1 \leq k \leq K2$ の要素を物性 No. MAT の物性とする。

MAT=0 のときは計算領域外となる。

(5) の mp と対応。

(10-1) OPNX, I1, I2, J1, J2, K1, K2 [このカードは何枚も繰り返せるが, I1=0 (F 10.0, 6I5) のとき読み込み中止]

(10-2) OPNY, I1, I2, J1, J2, K1, K2 [このカードは何枚も繰り返せるが, I1=0 (F 10.0, 6I5) のとき読み込み中止]

(10-3) OPNZ, I1, I2, J1, J2, K1, K2 [このカードは何枚も繰り返せるが, I1=0 (F 10.0, 6I5) のとき読み込み中止]

(10-4) OPNV, I1, I2, J1, J2, K1, K2 [このカードは何枚も繰り返せるが, I1=0 (F 10.0, 6I5) のとき読み込み中止]

OPNX ; $I1 \leq i \leq I2, J1 \leq j \leq J2, K1 \leq k \leq K2$ の要素の X 面開口率

OPNY ; $I1 \leq i \leq I2, J1 \leq j \leq J2, K1 \leq k \leq K2$ の要素の Y 面開口率

OPNZ ; $I1 \leq i \leq I2, J1 \leq j \leq J2, K1 \leq k \leq K2$ の要素の Z 面開口率

OPNV ; $I1 \leq i \leq I2, J1 \leq j \leq J2, K1 \leq k \leq K2$ の要素の流体占有率

(i, j, k) 要素は (i, j, k) と (i+1, j, k) の X 面

(i, j, k) と (i, j+1, k) の Y 面

(i, j, k) と (i, j, k+1) の Z 面に囲まれている。

Fig.5. 11 は要素と面の関係を示したもので要素 (i, j, k) を囲む X, Y, Z 面は次のとおりである。

X 面 (i, j, k) とは A-B-C-D 面 (x = X (i) または r = X (i) 面)

X 面 (i+1, j, k) とは E-F-G-H 面 (x = X (i+1) または r = X (i+1) 面)

Y 面 (i, j, k) とは A-E-F-B 面 (y = Y (j) または θ = Y (j) 面)

Y 面 (i, j+1, k) とは H-G-C-D 面 (y = Y (j+1) または θ = Y (j+1) 面)

Z 面 (i, j, k) とは A-E-H-D 面 (z = Z (k) 面)

Z 面 (i, j, k+1) とは B-F-G-C 面 (z = Z (k+1) 面)

なお, X 面 (i, j, k) は要素 (i, j, k) の 1 面

X 面 (i+1, j, k) は要素 (i, j, k) の 2 面

Y 面 (i, j, k) は要素 (i, j, k) の 3 面

Y面〔i, j+1, k〕は要素(i, j, k)の4面
 Z面〔i, j, k〕は要素(i, j, k)の5面
 Z面〔i, j, k+1〕は要素(i, j, k)の6面と呼ぶ。

(11) NFLUX

(MEN (nf), (IFX (l, nf), l=1, 6)

a. DVDP (nf), PEXT (nf), UEXT (nf), VEXT (nf), WEXT (nf), TEXT (nf),
 TKEX (nf), TEEEX (nf), nf=1, NFLUX)

b. DVDP (nf), PEXT (nf), UEXT (nf), VEXT (nf), WEXT (nf), TEXT (nf),
 TKEX (nf), TEEEX (nf), (CEXT (ic, nf), ic=1, ICONO), nf=1, NFLUX)

(15)

a. (7I5/6F 10.0/2F10.0)

b. (7I5/6F 10.0/5F10.0)

a.は LEQU(8)=0 のとき, b.は LEQU(8)=1 のとき。

NELUX ; Flux 境界条件数 (≤ 100)

MEN ; IFX (1, nf) $\leq i \leq$ IFX (2, nf), IFX (3, nf) $\leq j \leq$ IFX (4, nf),
 IFX (5, nf) $\leq k \leq$ IFX (6, nf) を満足する (i, j, k) 要素の MEN 面に
 境界条件を適用する。 ($1 \leq \text{MEN} \leq 6$)

(10)の1~6面に関する説明を参照。

DVDP ; 圧力差を流速換算する係数 (次元 $\frac{dt}{\rho dl}$)

PEXT ; 外部圧力

UEXT ; 境界面から流入時に使用される外部流速U

VEXT ; 境界面から流入時に使用される外部流速V

WEXT ; 境界面から流入時に使用される外部流速W

TEXT ; 境界面から流入時に使用される外部温度T

TKEX ; 境界面から流入時に使用される外部乱流エネルギー k

TEEX ; 境界面から流入時に使用される外部乱流消失率 ϵ

CEXT ; 境界面から流入時に使用される外部物質濃度 C

ただし、境界面に垂直な流速は、外部流速 (UEXT, VEXT, WEXTのいずれか1つ) 及び
 DVDP と PEXT から計算される。

境界面が1面のとき $U_1 = \text{DVDP} \cdot (\text{PEXT} - P_{i,j,k}) + \text{UEXT}$

境界面が2面のとき $U_2 = \text{DVDP} \cdot (P_{i,j,k} - \text{PEXT}) + \text{UEXT}$

境界面が3面のとき $V_3 = \text{DVDP} \cdot (\text{PEXT} - P_{i,j,k}) + \text{VEXT}$

境界面が4面のとき $V_4 = \text{DVDP} \cdot (P_{i,j,k} - \text{PEXT}) + \text{VEXT}$

境界面が5面のとき $W_5 = \text{DVDP} \cdot (\text{PEXT} - P_{i,j,k}) + \text{WEXT}$

境界面が6面のとき $W_6 = \text{DVDP} \cdot (P_{i,j,k} - \text{PEXT}) + \text{WEXT}$

もし、要素 (i, j, k) の6面が境界のとき、

$W_{i,j,k+1} = \text{DVDP} \cdot (P_{i,j,k} - \text{PEXT}) + \text{WEXT}$

これは Pressure Correction を容易に行なうために定められた方法である。

(12) NBFOC

(ISBF (nb), (IBF (l, nb), l=1,6), BFOC (nb), nb=1, NBFOC)

(I5)

(7I5, F 10.0)

NBFOC ; 体積力を与える領域数 (≤ 100)

ISBF ; 1 のとき U 方程式に, 2 のとき V 方程式に, 3 のとき W 方程式に体積力を与える

BFOC ; 加速度 (m/s^2)

IBF (1, nb) $\leq i \leq$ IBF (2, nb), IBF (3, nb) $\leq j \leq$ IBF (4, nb),

IBF (5, nb) $\leq k \leq$ IBF (6, nb) を満足する要素面 (i, j, k) に与える。

(13) NHSOC

(IHS (l, nh), l=1,6), HSOC (nh), nh=1, NHSOC)

(I5)

(6I5, F 10.0)

NHSOC ; 発熱を与える領域数 (≤ 100)

HSOC ; 発熱 (単位体積, 単位時間当りの発熱)

IHS (1, nh) $\leq i \leq$ IHS (2, nh), IHS (3, nh) $\leq j \leq$ IHS (4, nh),

IHS (5, nh) $\leq k \leq$ IHS (6, nh) を満足する要素 (i, j, k) に与える。

(14) NDSOC [14は ICONO 回繰り返す]

(IDS (l, nd), l=1,6), DSOC (nd), nd=1, NDSOC)

(I5)

(6I5, F 10.0)

NDSOC ; 拡散物質の発生を与える領域数 (≤ 100)

DSOC ; 拡散物質の発生量 (単位体積, 単位時間当り)

IDS (1, nd) $\leq i \leq$ IDS (2, nd), IDS (3, nd) $\leq j \leq$ IDS (4, nd),

IDS (5, nd) $\leq k \leq$ IDS (6, nd) を満足する要素 (i, j, k) に与える。

(15) NSTRS

(ISST (ns), (IST (l, ns), l=1,6), CMYU (ns), VWAL (ns), ns=1, NSTRS)

(I5)

(7I5, 2 F 10.0)

NSTRS ; 非 Flux 境界条件 (U, V, W 方程式) の指定領域数 (≤ 100)

ISST ; 101 のとき U 方程式の圧力損失

102 のとき U 方程式の Y 面に対する No Slip 条件

103 のとき U 方程式の Z 面に対する No Slip 条件

112 のとき U 方程式の Y 面に対する対数則条件

113 のとき U 方程式の Z 面に対する対数則条件

201 のとき V 方程式の圧力損失

- 202 のとき V 方程式の X 面に対する No Slip 条件 (要素下面)
 - +202 のとき V 方程式の X 面に対する No Slip 条件 (要素上面)
 - 203 のとき V 方程式の Z 面に対する No Slip 条件
 - 212 のとき V 方程式の X 面に対する対数則条件 (要素下面)
 - +212 のとき V 方程式の X 面に対する対数則条件 (要素上面)
 - 213 のとき V 方程式の Z 面に対する対数則条件
 - 301 のとき W 方程式の圧力損失
 - 302 のとき W 方程式の X 面に対する No Slip 条件 (要素下面)
 - +302 のとき W 方程式の X 面に対する No Slip 条件 (要素上面)
 - 303 のとき W 方程式の Y 面に対する No Slip 条件
 - 312 のとき W 方程式の X 面に対する対数則条件 (要素下面)
 - +312 のとき W 方程式の X 面に対する対数則条件 (要素上面)
 - 312 のとき W 方程式の Y 面に対する対数則条件
- IST (1, ns) ≤ i ≤ IST (2, ns), IST (3, ns) ≤ j ≤ IST (4, ns), ≤
 IST (5, ns) ≤ k ≤ IST (6, ns) を満足する要素面 [i, j, k] に与える。境
 界面を含む流体要素の番号を指定すること。

CMYU ; 動粘性係数または抵抗係数

VWAL ; U 方程式のとき X 方向の壁面速度

V 方程式のとき Y 方向の壁面速度

W 方程式のとき Z 方向の壁面速度

圧力損失のとき

$$\Delta P = CMYU \cdot \frac{1}{2} \rho (V_{i,j,k} - VWAL)^2$$

No Slip 条件のとき

$$\tau = CMYU \cdot \rho / l \cdot (VWAL - V_{i,j,k})$$

対数則条件のとき

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{U_* \cdot l}{CMYU} + A \quad \tau = \rho U_*^2$$

[l : 境界面から要素中心までの距離] [U* : 壁面摩擦速度]

(16) NHTRN

(MENH(nh), (IHT(l, nh), l=1, 6), HTRC(nh), TCOR(nh), nh = 1, NHTRN)

(I5)

(7I5, 2 F 10.0)

NHTRN ; 熱伝達境界を与える領域数 (≤ 100)

MENH ; 要素のどの面に熱伝達を与えるかを指定 (1 ≤ MENH ≤ 6)

(10)の1～6面に関する説明を参照。

HTRC ; 熱伝達係数

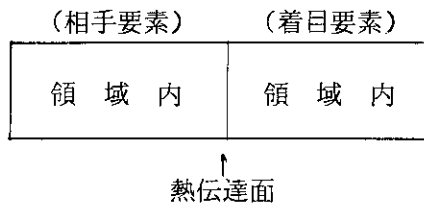
(注) 熱伝達を与える面は、熱伝導を無視する。したがって、HTRC=0 のとき断熱面となる。

TCOR ; 相手側の要素が領域外るとき TCOR を外部温度とする。相手側の要素が領域内るとき、その要素の温度を外部温度とする。

$$\dot{q} = \text{HTRC} \cdot (T_{\text{外}} - T_{i,j,k})$$

$$T_{\text{外}} = \begin{cases} \text{相手側の要素が領域外 TCOR} \\ \text{相手側の要素が領域内 } T_{\text{相手側}} \end{cases}$$

(注) 図のように熱伝達面の相手側要素が領域内ときは、相手側要素にも熱伝達を指定する必要がある。



$$\text{IHT}(1, \text{nh}) \leq i \leq \text{IHT}(2, \text{nh}), \quad \text{IHT}(3, \text{nh}) \leq j \leq \text{IHT}(4, \text{nh}),$$

$$\text{IHT}(5, \text{nh}) \leq k \leq \text{IHT}(6, \text{nh}) \text{ を満足する要素 } (i, j, k) \text{ に与える。}$$

注) a) 壁面熱流束 \dot{q} を与える場合の指定例

$$\text{HTRC} = 10^{10}, \quad \text{TCOR} = \dot{q} * 10^{-10}$$

b) 壁面温度 T_w を与える場合の指定例

$$\text{HTRC} = \frac{K}{\frac{1}{2}\delta} \quad (\text{ただし } \delta \text{ は境界要素幅})$$

$$\text{TCOR} = T_w$$

(17) NDFUS [(17)はICONO回繰り返す]

(MEND(nd), (IDF(l, nd), l=1, 6), DFSC(nd), DCOR(nd), nd = 1, NDFUS)

(I5)

(7I5, 2 F 10.0)

NDFUS ; 物質拡散境界を与える領域数 (≤ 100)

MEND ; 要素のどの面に拡散境界条件を与えるかを指定 (1 ≤ MEND ≤ 6)

(10)の1～6面に関する説明を参照。

DFSC ; 要素面からの拡散流入流出量を規定する係数

DCOR ; 要素面からの拡散流入流出量を規定する定数

要素面より単位時間、単位面積当りに着目要素に流入する物質は次式から求める。

$$\dot{C} = DFSC \cdot (DCOR - C_{i,j,k}) \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

$IDF(1, nd) \leq i \leq IDF(2, nd)$, $IDF(3, nd) \leq j \leq IDF(4, nd)$,

$IDF(5, nd) \leq k \leq IDF(6, nd)$ を満足する要素 (i, j, k) に与える。

(18) NCPTC, NDMY [(18)は ISWPT=1 のときのみ入力される。]

(215)

(WOZ (nd), (NRGP (L, nd), L=1,3)

((RGCOD (L1, L2, nd), L1=1, 2), L2=1, 3), nd=1, NDMY)

(F 10.0, 315/6 F 10.0)

NCPTC ; Particle の位置座標出力コントロールで NCPTC サイクルに 1 回出力

NDMY ; 初期 Particle 群の数

WOZ ; 沈降速度 Z 方向成分 (m/s)

WOZ=0 のとき Particle は Marker Particle となり流体の運動を Lagrange 的に追跡する。

NRGP ; $RGCOD(1, 1, nd) < X < RGCOD(2, 1, nd)$

RGCOD ; $RGCOD(1, 2, nd) < Y < RGCOD(2, 2, nd)$

$RGCOD(1, 3, nd) < Z < RGCOD(2, 3, nd)$ を満足する。

領域内の X 方向に NRG (1) 個

Y 方向に NRG (2) 個

Z 方向に NRG (3) 個

等間隔で初期 Particle を配置する。

(19-1) UINT, I1, I2, J1, J2, K1, K2 [このカードは何枚も繰り返せるが, I1=0 のとき読み込み中止]
(F 10.0, 615)

(19-2) VINT, I1, I2, J1, J2, K1, K2 [このカードは何枚も繰り返せるが, I1=0 のとき読み込み中止]
(F 10.0, 615)

(19-3) WINT, I1, I2, J1, J2, K1, K2 [このカードは何枚も繰り返せるが, I1=0 のとき読み込み中止]
(F 10.0, 615)

(19-4) PINT, I1, I2, J1, J2, K1, K2 [このカードは何枚も繰り返せるが, I1=0 のとき読み込み中止]
(F 10.0, 615)

(19-5) TINT, I1, I2, J1, J2, K1, K2 [このカードは何枚も繰り返せるが, I1=0 のとき読み込み中止]
(F 10.0, 615)

(19-6) KINT, I1, I2, J1, J2, K1, K2 [このカードは何枚も繰り返せるが, I1=0 のとき読み込み中止]
(F 10.0, 615)

(19-7) EINT, I1, I2, J1, J2, K1, K2 [このカードは何枚も繰り返せるが, I1=0 のとき読み込み中止]
(F 10.0, 615)

(19-8) CINT, I1, I2, J1, J2, K1, K2 [このカードは何枚も繰り返せるが, I1=0 のとき読み込み中止]

(F 10.0, 6I5) き読み込み中止)

UINT ; $I1 \leq i \leq I2, J1 \leq j \leq J2, K1 \leq k \leq K2$ を満足する X 面 (i, j, k) の初期流速 U。OPNX (i, j, k) = 0 のとき、自動的に 0 となる。

VINT ; $I1 \leq i \leq I2, J1 \leq j \leq J2, K1 \leq k \leq K2$ を満足する Y 面 (i, j, k) の初期流速 V。OPNY (i, j, k) = 0 のとき、自動的に 0 となる。

WINT ; $I1 \leq i \leq I2, J1 \leq j \leq J2, K1 \leq k \leq K2$ を満足する Z 面 (i, j, k) の初期流速 W。OPNZ (i, j, k) = 0 のとき、自動的に 0 となる。

PINT ; $I1 \leq i \leq I2, J1 \leq j \leq J2, K1 \leq k \leq K2$ を満足する要素 (i, j, k) の初期圧力 p。MAT (i, j, k) \neq 1 のとき、自動的に 0 となる。

TINT ; $I1 \leq i \leq I2, J1 \leq j \leq J2, K1 \leq k \leq K2$ を満足する要素 (i, j, k) の初期温度 T。MAT (i, j, k) = 0 のとき、自動的に 0 となる。

KINT ; $I1 \leq i \leq I2, J1 \leq j \leq J2, K1 \leq k \leq K2$ を満足する要素 (i, j, k) の初期乱流エネルギー k。MAT (i, j, k) \neq 1 のとき、自動的に 0 となる。

EINT ; $I1 \leq i \leq I2, J1 \leq j \leq J2, K1 \leq k \leq K2$ を満足する要素 (i, j, k) の初期乱流消失率 ϵ 。MAT (i, j, k) \neq 1 のとき、自動的に 0 となる。

CINT ; $I1 \leq i \leq I2, J1 \leq j \leq J2, K1 \leq k \leq K2$ を満足する要素 (i, j, k) の初期物質濃度 C。MAT (i, j, k) \neq 1 のとき、自動的に 0 となる。

何も定義せずに直ちに $I1=0$ で読み込みを中止する場合、全領域 UINT, VINT, WINT, PINT, TINT, CINT は 0 が、KINT, EINT は 10^{-10} が設定される。

なお、U, V, W はそれぞれ X 面, Y 面, Z 面で定義され、他は全て要素中心で定義されていることに注意を要する。

Fig. 11.6 に SOLVER の入力データの例を示す (7.3 節のケース 3 の入力データ)。

11.2 GRAPHIC 入力データの説明

(1) IM, JM, KM, CYL, COC, ICONO, ISWPT

(3I5, 5X, 2F10.0, I3, I5)

IM, JM, KM, CYL, COC, ICONO, ISWPT は 11.1 節(1)と同一値を与え、その意味も同じである。

(2) XWC, YWC, ZWC

(3F10.0)

観察者が着目している World 座標系の中心位置の座標。一般に解析領域の中心の World 座標値を与える。

(3) RXD, RYD, RZD, (IRT(l), l = 1, 3)

(3F10.0, 3I1)

IRT(l) は回転軸の選択を意味し、その値が

1 のとき X_v 軸の回転でその角度は RXD° , 2 のとき Y_v 軸の回転でその角度は RYD°

3 のとき Z_v 軸の回転でその角度は RZD°

となり、回転の順序は IRT(1), IRT(2), IRT(3)になる。

観察者の立場でみると、その順序は別として、着目位置で上へRXD°向き、右へ頭をRYD°かしげ、左へRZD°向いた方向が視線方向となる。

(4) XVM, YVM, ZVM

(3 F 10.0)

観察者が着目位置から遠ざかるとき、その平行移動量を示すベクトル。YVMは必ず正で、XVMとZVMは一般に0.0。

(5) SXD, SZD

(2 F 10.0)

視野。観察者は水平方向に2×SXD°、垂直方向に2×SZD°の視野がある。そこからはみ出たものはクリッピングされる。

World座標系内の長さLwの物体が、視野全体にぴったり入る場合、SXD, SZDは次式から求まる。(Fig.11.7参照)

$$SXD = \tan^{-1} \left(\frac{Lw}{2 \cdot YVM} \right) \quad SZD \text{ も同様。}$$

(6) XLD, ZLD, XWAK, ZWAK

(4 F 10.0)

図の枠内に3次元グラフィックが描かれる。XWAKかZWAKのどちらかが、視野一杯にとられる(Fig.11.8参照)。

(7) NMCY, (LCY(l), l = 1, NMCY)

(16I5/5 X, 15I5)

NMCYは、図化するサイクルの数を与える(NMCY ≤ 20)。LCY(l)はそのサイクルNo.である。なお、NMCYが-1のとき、第7章(3)で出力された全てのサイクルを図化する。

(8) NGRA

(I5)

図の数(NGRA ≤ 30)。(9)~(13)の1グループで1図を描くが、そのグループの入力数に対応。

(9) (IVE(l), l = 1, 6), SCV

(6I5, F 10.0)

$\left\{ \begin{array}{l} IVE(1) \leq i \leq IVE(2) \\ IVE(3) \leq j \leq IVE(4) \\ IVE(5) \leq k \leq IVE(6) \end{array} \right\}$ を満足する要素(i, j, k)の中心位置における流速ベクトル図を描く。

SCVは流速ベクトルを描くときのスケールで、Fig.11.9の図のように領域10m内で0.2 m/sの流速を1.5 mに描くとき、

$$SCV = \frac{1.5}{0.2} = 7.5$$

を与える。

(10) MENT, (ITE(l), l = 1, 6), NTV, IAUT
 (CTV(n), n = 1, NTV)
 (I1, I4, 7I5)
 (8 F 10.0)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ITE}(1) \leq i \leq \text{ITE}(2) \\ \text{ITE}(3) \leq j \leq \text{ITE}(4) \\ \text{ITE}(5) \leq k \leq \text{ITE}(6) \end{array} \right\}$$
 を満足する要素 (i, j, k) の中心を通る断面の温度コンター
 図を描く。

その断面の向きは MENT = 1 のとき x または r 座標一定の断面
 = 2 のとき y または θ 座標一定の断面
 = 3 のとき z 座標一定の断面

で、コンター線の本数は NTV 本とし、それらの値は CTV(1), …… CTV (NTV) である。(コンター線の本数は、最大 20 本まで)

なお、IAUT を 1 にすると、CTV(n) は不要となり、自動的に全領域の温度から最大 (T_{\max}), 最小 (T_{\min}) を抽出し、次式で求まる値 (CTV(n)) のコンター線を描く。

$$\text{CTV}(n) = T_{\min} + (T_{\max} - T_{\min}) \cdot (n-1) / (NTV-1)$$

(n = 1 ~ NTV)

(11) MENP, (IPE(l), l = 1, 6), NPV, IAUP
 (CPV(n), n = 1, NPV)
 (I1, I4, 7I5)
 (8 F 10.0)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{IPE}(1) \leq i \leq \text{IPE}(2) \\ \text{IPE}(3) \leq j \leq \text{IPE}(4) \\ \text{IPE}(5) \leq k \leq \text{IPE}(6) \end{array} \right\}$$
 を満足する要素 (i, j, k) の中心を通る断面の圧力コンター
 図を描く。

その断面の向きは MENP = 1 のとき x または r 座標一定の断面
 = 2 のとき y または θ 座標一定の断面
 = 3 のとき z 座標一定の断面

で、コンター線の本数は NPV 本とし、それらの値は CPV(1), …… CPV (NPV) である。(コンター線の本数は、最大 20 本まで)

なお、IAUP を 1 にすると、CPV(n) は不要となり、自動的に全領域の圧力から最大 (P_{\max}), 最小 (P_{\min}) を抽出し、次式で求まる値 (CPV(n)) のコンター線を描く。

$$\text{CPV}(n) = P_{\min} + (P_{\max} - P_{\min}) \cdot (n-1) / (NPV-1)$$

(n = 1 ~ NPV)

(12) MENC, (ICE(l), l = 1, 6), NCV, IAUC
 (CCV(n), n = 1, NCV)
 (I1, I4, 7I5)
 (8 F 10.0)

$$\left. \begin{array}{l} \text{ICE}(1) \leq i \leq \text{ICE}(2) \\ \text{ICE}(3) \leq j \leq \text{ICE}(4) \\ \text{ICE}(5) \leq k \leq \text{ICE}(6) \end{array} \right\} \text{を満足する要素}(i, j, k) \text{の中心を通る断面の濃度コンター} \\ \text{図を描く。}$$

その断面の向きは MENC = 1 のとき x または r 座標一定の断面
 = 2 のとき y または θ 座標一定の断面
 = 3 のとき z 座標一定の断面

で、コンター線の数は NCV 本とし、それらの値は CCV(1), …… CCV(NCV) である。(コンター線の数は、最大 20 本まで)

なお、IAUC を 1 にすると、CCV(n) は不要となり、自動的に全領域の濃度から最大 (C_{\max})、最小 (C_{\min}) を抽出し、次式で求まる値 (CCV(n)) のコンター線を描く。

$$\text{CCV}(n) = C_{\min} + (C_{\max} - C_{\min}) \cdot (n-1) / (NCV-1) \\ (n = 1 \sim NCV)$$

(13) NDRWP [(13) は ISWPT=1 のときのみ入力される。]

(15)

NDRWP が 1 のとき Particle の位置を図化。

(9)~(13)の読み込みは NGRA 繰り返される。

Fig. 11.10 に GRAPHIC の入力データの例を示す。

11.3 JCL の説明

11.3.1 SOLVER の JCL

Fig. 11.11 に SOLVER 実行用の JCL 例を示す。図中の内容は以下のとおりである。

- ④ VIO/F (主記憶ファイル入出力) 機能を使用する場合に指定する。また巨大ジョブで拡張領域を使用する場合も必要である。
- ⑥ VP ジョブであることを指定する (④を指定した場合は 3 または 4 とする)。
- ① STREAM (SOLVER) の実行
- ② 入力データの指定
- ③ VIO/F の指定
- ④ Graphic 用出力ファイル
- ⑤ リスタート・ファイル (入力用)
- ⑥ リスタート・ファイル (出力用)
- ⑦, ⑧ 経時変化プロット用ファイル

11.3.2 GRAPHIC の JCL

Fig. 11.12 に GRAPHIC 実行用の JCL 例を示す。図中の内容は以下の通りである。

- ① STREAM (GRAPHIC) の実行
- ② 入力データの指定
- ③ 11.3.1 の④で作成したファイル

④ NLPの指定

11.3.3 経時変化プロットの方法

経時変化 (Trend) のプロットは TSS 端末上でコマンドプロシジャを起動して行う。Fig. 11.13 はその実行例である。図中の内容は以下のとおりである。

- ① コマンドプロシジャの起動。DSN パラメタで 11.3.1 の⑦または⑧のファイル名を指定する。
 - ② プロットの対象とする物理量 ID (U, V, W, P, DP, DIVR) を入力する。省略値は "DEF=xx" で表示されているものである。実行を終了する場合には '/'* を入力する。
 - ③ プロットを開始するサイクルNoを入力する。省略値は 1 である。計算初期に値が大きく振動し、これを削除する場合に 2 以上を入力する。
- ②で '/'* が入力されるまで②, ③の入力は繰り返される。

11.3.4 フーリエ解析の方法

時系列データのフーリエ解析は、TSS 端末上でコマンドプロシジャを起動して行う。Fig. 11.14 はその実行例である。以下に入力項目の説明を行う。

- ① コマンドプロシジャの起動。DSN パラメタで 11.3.1 の経時変化プロット用ファイルのファイル名を指定する。
- ② フーリエ解析の対象とする物理 ID (U, V, W, P, DP, DIVR) を入力する。省略値は 'DET=xx' で表示されているものとなる。実行終了は '/'* を入力する。
- ③ 物理量をそのままプロットする。これは 11.3.3 の機能と同じである。省略値は 1 である。
- ④ 指定された物理量のフーリエ解析の結果、表示させたい波数の最小値を指定する。省略値は 2 である。これは、高周波成分のパワーが低周波に比べて小さい場合に高周波成分だけを図化するとき指定する。

これらは、②で '/'* が入力されるまで②~④が繰り返される。ただし、フーリエ解析の対象となるデータ数は、時系列データ数に最も近い 2^n 個である。

11.4 修正ルーチンの一覧

以下に本作業で修正したルーチンの修正点を示す。なお⑤はベクトル化に関する修正であることを表わす。

AXSUBX	⑤ (DO文の分割)
AXSUBY	⑤ (DO文の分割)
BDFORC	⑤ (ベクトル化不適命令)
CAXSUB	⑤ (DO文の分割)
CDECMP	⑤ (Hyper Plane 方式)
CILUEX	⑤ (ワークファイルの内部処理化)
CLU	⑤ (Hyper Plane 方式)
COSOCC	⑤ (FUNCTION の内部展開, DO文の書き下し, チューニング)
COSOEE	⑤ (チューニング)
COSOKK	⑤ (" , 作業配列の導入)

COSOPP	⑤ (チューニング)
COSOTT	⑤ (" , 作業配列の導入)
COSOUU	⑤ (")
COSOVV	⑤ (")
COSOWW	⑤ (")
DECOMX	⑤ (Hyper Plane 方式)
DECOMY	⑤ (")
FLDPRN	リスト出力制御
ILUCRM	⑤ (ルーチンの内部展開, ワークファイルの内部処理化)
LDLTPX	⑤ (Hyper Plane 方式)
LDLTPY	⑤ (")
LOGRAW	下位ルーチンの組み込み
MAIN	配列のアドレス計算等追加
MATNUM	リスト出力制御
OPNFLX	⑤ (ベクトル化不適命令)
PCSOL1	⑤ (ワークファイルの内部処理化)
PCSOL2	⑤ (")
PKSCYL	⑤ (DO文の移行)
PKSORC	⑤ (")
PROCES	定常オプション, CPU 時間オプション処理の追加, Hyper Plane リストの授受, Trend プロット機能の追加
PTSCYL	⑤ (DO文の移行)
PTSORC	⑤ (")
RAXSUB	⑤ (DO文の分割)
RDBDFO	リスト出力制御
RDDFSO	"
RDDFUS	"
RDECMP	⑤ (Hyper Plane 方式)
RDFLUX	リスト出力制御
RDHTRA	"
RDHTSO	"
RDPCLE	"
RDSTRE	"
RILUEX	⑤ (ワークファイルの内部処理化)
RLU	⑤ (Hyper Plane 方式)
SORSLV	⑤ (Hyper Plane SOR の呼び出し)
STD 210	定常判定法

11.5 新規ルーチンの説明

本作業では Hyper Plane 方式に関して以下のルーチンを新規に作成した。

HYPLAN HYPLA2 HYPLA3 SORHYP

以下にこれらのルーチンの説明を行う。ただし、引数欄の記号の意味は次のとおりである。

- in : そのモジュールの入力であることを示す。
- i/o : そのモジュールの入力及び出力であることを示す。
- out : そのモジュールの出力であることを示す。
- dmy : そのモジュールでは使用されていないことを示す。
- * : 実引数として使用されていることを示す。
- % : DATA文で定義されていることを示す。
- [] : 変数の属性を示す。
- () : 配列宣言を示す。
- [] : 変数の型を示す。

モジュール記述シート					Page	1																												
モジュール名	HYPLAN	プログラム名	STREAM	日付	88/03/31																													
モジュールタイプ	SUBROUTINE	モジュールNo.		作成者																														
<p>【機能】</p> <p>MICCG法（前進用）、ILUCR法（前進用）及びSOR法用のHyper Planeリストを作成する。</p>																																		
<p>【呼出し形式】</p> <p>HYPLAN (IS , JS , KS , IM , JM , KM , IMP , JMP , NA , IA , IP)</p>																																		
<p>【被呼出しモジュール】</p> <p>PROCES</p>																																		
<p>【引数】</p> <table style="border: none;"> <tr> <td style="padding-right: 10px;">[in] JS (I*4) :</td> <td style="font-size: 2em; padding-right: 10px;">}</td> <td rowspan="3" style="vertical-align: middle;">リスト作成開始インデックス</td> </tr> <tr> <td>[in] JS (I*4) :</td> <td></td> </tr> <tr> <td>[in] KS (I*4) :</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="padding-right: 10px;">[in] IM (I*4) :</td> <td style="font-size: 2em; padding-right: 10px;">}</td> <td rowspan="3" style="vertical-align: middle;">リスト作成終了インデックス</td> </tr> <tr> <td>[in] JM (I*4) :</td> <td></td> </tr> <tr> <td>[in] KM (I*4) :</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="padding-right: 10px;">[in] IMP (I*4) :</td> <td style="font-size: 2em; padding-right: 10px;">}</td> <td rowspan="2" style="vertical-align: middle;">Dimension サイズ</td> </tr> <tr> <td>[in] JMP (I*4) :</td> <td></td> </tr> <tr> <td>[i/o] NA (I*4) :</td> <td></td> <td>リストポインタの数</td> </tr> <tr> <td>[out] IA (I*4) (*):</td> <td></td> <td>リストポインタ</td> </tr> <tr> <td>[out] IP (I*4) (*):</td> <td></td> <td>Hyper Plane リスト</td> </tr> </table>							[in] JS (I*4) :	}	リスト作成開始インデックス	[in] JS (I*4) :		[in] KS (I*4) :		[in] IM (I*4) :	}	リスト作成終了インデックス	[in] JM (I*4) :		[in] KM (I*4) :		[in] IMP (I*4) :	}	Dimension サイズ	[in] JMP (I*4) :		[i/o] NA (I*4) :		リストポインタの数	[out] IA (I*4) (*):		リストポインタ	[out] IP (I*4) (*):		Hyper Plane リスト
[in] JS (I*4) :	}	リスト作成開始インデックス																																
[in] JS (I*4) :																																		
[in] KS (I*4) :																																		
[in] IM (I*4) :	}	リスト作成終了インデックス																																
[in] JM (I*4) :																																		
[in] KM (I*4) :																																		
[in] IMP (I*4) :	}	Dimension サイズ																																
[in] JMP (I*4) :																																		
[i/o] NA (I*4) :		リストポインタの数																																
[out] IA (I*4) (*):		リストポインタ																																
[out] IP (I*4) (*):		Hyper Plane リスト																																
<p>【備考】</p> <p>(IS , JS , KS) は MICCG , ILUCR 法では (1 , 1 , 2) である。 SOR 法の場合は解く方程式によって変る (6.1 c) 参照 MICCG 法 , ILUCR 法では IM=IMP , JM=JMP である。</p>																																		

モジュール記述シート					Page	1																				
モジュール名	HYPLA2	プログラム名	STREAM	日付	88/03/31																					
モジュールタイプ	SUBROUTINE	モジュールNo.		作成者																						
<p>【機能】</p> <p>MICCG法（後退用），ILUCR法（後退用）Hyper Plane リストを作成する。</p>																										
<p>【呼出し形式】</p> <p>HYPLA2 (IM , JM , KM , NA , IA , IP)</p>																										
<p>【被呼出しモジュール】</p> <p>PROCES</p>																										
<p>【引数】</p> <table style="border: none;"> <tr> <td style="padding-right: 10px;">[in] IM (I*4)</td> <td style="padding-right: 10px;">:</td> <td rowspan="3" style="font-size: 3em; vertical-align: middle;">}</td> <td rowspan="3" style="vertical-align: middle;">リスト作成開始インデックス（上限のこと）</td> </tr> <tr> <td>[in] JM (I*4)</td> <td>:</td> </tr> <tr> <td>[in] KM (I*4)</td> <td>:</td> </tr> <tr> <td>[i/o] NA (I*4)</td> <td>:</td> <td colspan="2">リストポイントの数</td> </tr> <tr> <td>[out] IA (I*4) (*)</td> <td>:</td> <td colspan="2">リストポイント</td> </tr> <tr> <td>[out] IP (I*4) (*)</td> <td>:</td> <td colspan="2">Hyper Plane リスト</td> </tr> </table>							[in] IM (I*4)	:	}	リスト作成開始インデックス（上限のこと）	[in] JM (I*4)	:	[in] KM (I*4)	:	[i/o] NA (I*4)	:	リストポイントの数		[out] IA (I*4) (*)	:	リストポイント		[out] IP (I*4) (*)	:	Hyper Plane リスト	
[in] IM (I*4)	:	}	リスト作成開始インデックス（上限のこと）																							
[in] JM (I*4)	:																									
[in] KM (I*4)	:																									
[i/o] NA (I*4)	:	リストポイントの数																								
[out] IA (I*4) (*)	:	リストポイント																								
[out] IP (I*4) (*)	:	Hyper Plane リスト																								
<p>【備考】</p> <p>後退用ではリストポイントは (IM + JM + KM - 1) から 3 まで 1 ずつ減少していく。</p>																										

モジュール記述シート					Page	1																																																			
モジュール名	HYPLA3	プログラム名	STREAM	日付	88/03/31																																																				
モジュールタイプ	SUBROUTINE	モジュールNo.		作成者																																																					
<p>【機能】</p> <p>Hyper Plane SOR法用の (I, J-1, K), (I, J+1, K) のアドレスリストを作成する。</p>																																																									
<p>【呼出し形式】</p> <p>HYPLA3 (IS , JS , KS , IM , JM , KM , IMP , JMP , JY1 , JY2 , COC)</p>																																																									
<p>【被呼出しモジュール】</p> <p>PROCES</p>																																																									
<p>【引数】</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">[in]</td> <td style="width: 35%;">IS [I*4]</td> <td style="width: 5%;">:</td> <td style="width: 5%; border-left: 1px solid black;">}</td> <td style="width: 40%;"></td> </tr> <tr> <td>[in]</td> <td>JS [I*4]</td> <td>:</td> <td style="border-left: 1px solid black;">}</td> <td rowspan="3">リスト作成開始インデックス</td> </tr> <tr> <td>[in]</td> <td>KS [I*4]</td> <td>:</td> <td style="border-left: 1px solid black;">}</td> </tr> <tr> <td>[in]</td> <td>IM [I*4]</td> <td>:</td> <td style="border-left: 1px solid black;">}</td> </tr> <tr> <td>[in]</td> <td>JM [I*4]</td> <td>:</td> <td style="border-left: 1px solid black;">}</td> <td rowspan="3">リスト作成終了インデックス</td> </tr> <tr> <td>[in]</td> <td>KM [I*4]</td> <td>:</td> <td style="border-left: 1px solid black;">}</td> </tr> <tr> <td>[in]</td> <td>IMP [I*4]</td> <td>:</td> <td style="border-left: 1px solid black;">}</td> </tr> <tr> <td>[in]</td> <td>JMP [I*4]</td> <td>:</td> <td style="border-left: 1px solid black;">}</td> <td>Dimension サイズ</td> </tr> <tr> <td>[out]</td> <td>JY1 [I*4] (*)</td> <td>:</td> <td></td> <td>(I, J-1, K) のリスト</td> </tr> <tr> <td>[out]</td> <td>JY2 [I*4] (*)</td> <td>:</td> <td></td> <td>(I, J+1, K) のリスト</td> </tr> <tr> <td>[in]</td> <td>COC [R*4]</td> <td>:</td> <td></td> <td>周期境界オプション</td> </tr> </table>							[in]	IS [I*4]	:	}		[in]	JS [I*4]	:	}	リスト作成開始インデックス	[in]	KS [I*4]	:	}	[in]	IM [I*4]	:	}	[in]	JM [I*4]	:	}	リスト作成終了インデックス	[in]	KM [I*4]	:	}	[in]	IMP [I*4]	:	}	[in]	JMP [I*4]	:	}	Dimension サイズ	[out]	JY1 [I*4] (*)	:		(I, J-1, K) のリスト	[out]	JY2 [I*4] (*)	:		(I, J+1, K) のリスト	[in]	COC [R*4]	:		周期境界オプション
[in]	IS [I*4]	:	}																																																						
[in]	JS [I*4]	:	}	リスト作成開始インデックス																																																					
[in]	KS [I*4]	:	}																																																						
[in]	IM [I*4]	:	}																																																						
[in]	JM [I*4]	:	}	リスト作成終了インデックス																																																					
[in]	KM [I*4]	:	}																																																						
[in]	IMP [I*4]	:	}																																																						
[in]	JMP [I*4]	:	}	Dimension サイズ																																																					
[out]	JY1 [I*4] (*)	:		(I, J-1, K) のリスト																																																					
[out]	JY2 [I*4] (*)	:		(I, J+1, K) のリスト																																																					
[in]	COC [R*4]	:		周期境界オプション																																																					
<p>【備考】</p> <p>円筒型で周期境界があるとき, (I, 1, K) の y 方向左隣は (I, JM, K), (I, JM, K) の右隣は (I, 1, K) である。このアドレスを作成する。</p>																																																									

モジュール記述シート				Page	1
モジュール名	SORHYP	プログラム名	STERAM	日付	88/03/31
モジュールタイプ	SUBROUTINE	モジュールNo.		作成者	
【機能】 Hyper Plane SOR 法の実行					
【呼出し形式】 SORHYP (IMP , JMP , COF , SOC , VAR , J1 , J2 , IT , ERR , NA , IAD , IPT , JY1 , JY2)					
【被呼出しモジュール】 SORSLV					
【引数】 [in] JMP (I*4) : } Dimension サイズ [in] JMP (I*4) : } [in] COF (R*4) (7,*) : 係数行列 [in] SOC (R*4) (*) : 定数ベクトル [i/o] VAR (R*4) (*) : 解ベクトル [dmy] J1 (I*4) : } 使用せず [dmy] J2 (I*4) : } [i/o] IT (I*4) : 反復回数 [out] ERR*(R*4) : 残差 [in] NA (I*4) : Hyper Plane用リストポイントの数 [in] IAD (I*4) (*) : Hyper Plane用リストポイント [in] IPT (I*4) (*) : Hyper Plane用リスト [in] JY1 (I*4) (*) : (I, J-1, K) のアドレスリスト [in] JY2 (I*4) (*) : (I, J+1, K) のアドレスリスト					
【コモン変数】 /SLVR/ ITRAA [in], OMGAA [in], EQCAA [in]					
【備考】 詳細は、6.1 ベクトル化 c) を参照のこと					

11.6 インクルード・ファイルの説明

ベクトル化版 STREAM では文関数の定義および配列サイズの定義にインクルード文を使用している。以下にこのファイルのメンバーを説明する。

a) 文関数の定義

- DFNCUU : 関数 DFNCUU の文関数版
- DISCEN : 関数 DISCEN の文関数版
- FUNCGG : 関数 FUNCGG の文関数版
- FUNCHH : 関数 FUNCHH の文関数版
- FUNCUU : 関数 FUNCUU の文関数版
- FUNGR1 : 関数 FUNGRV の文関数版 (分割 1)
- FUNGR2 : 関数 FUNGRV の文関数版 (分割 2)

b) 配列サイズの定義

- PARAMG : GRAPHIC コードの配列サイズの定義 (整合配列)
- PARAMT : SOLVER コードの配列サイズの定義 (整合配列)
- PARAM2 : 各種条件 (各面開口率, Flux 境界条件, 体積力等) の配列サイズの定義
- PARAM3 : 定常判定用の配列サイズの定義

注) 大規模な計算を行う場合にはこれらのパラメタの変更が必要になるので, 詳細については著者に相談されたい。

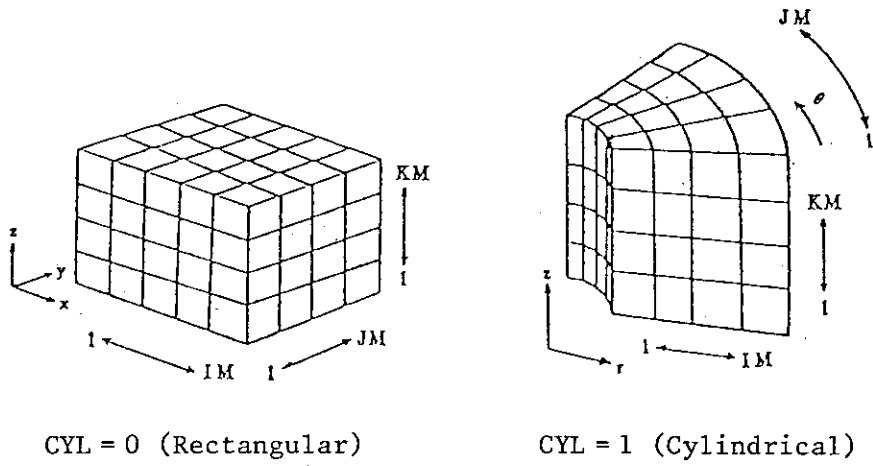


Fig. 11.1 Coordinates for STREAM Code

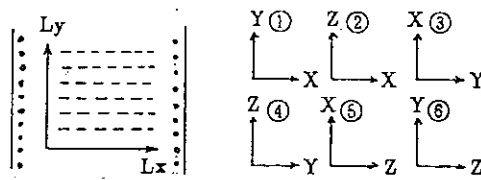


Fig. 11.2 Output Pattern

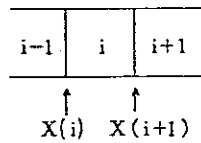


Fig. 11.3 Definition of Mesh Point and X-Coordinate

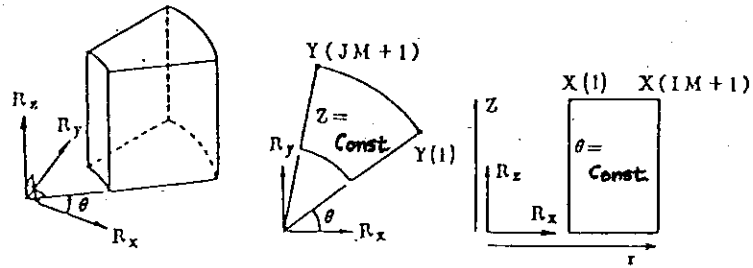
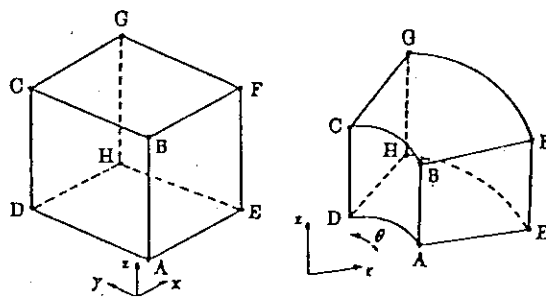


Fig. 11.4 Gravity Model for Cylindrical Type



Element (i,j,k)
for rectangular

Element (i,j,k)
for cylindrical

Fig. 11.5 Relation between the Element and Surface

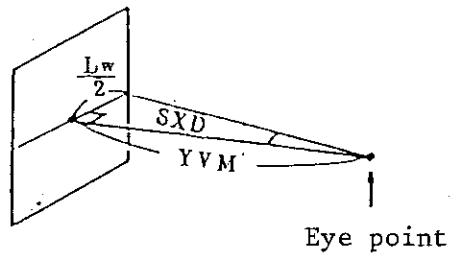


Fig. 11.7 Example of the Range of Vision

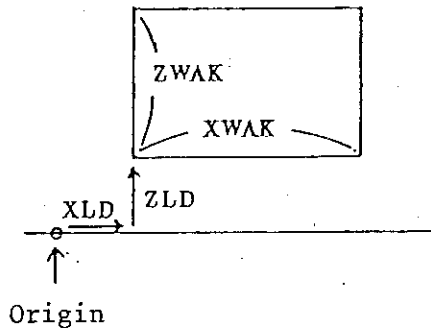


Fig. 11.8 Plotting Point and Frame

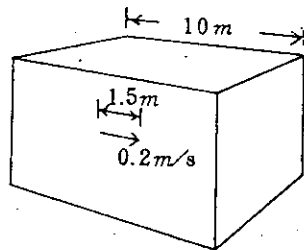


Fig. 11.9 Model of Stream Velocity

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7.....*.....8
50 10 10 00 2 1
5.0 0.5 0.5
20.0 0.0 0.0 123
0.0 10000. 0.0
0.02 0.02
0.0 0.0 230.0 230.0
-1
3
1 50 5 5 1 10 0.5E-1 (1)VEC
00000 . T
00000 . P
2 1 50 5 5 1 10 20 1 . C1
00000 . C2
0 . MARKER PARTICLE
1 50 1 10 5 5 0.5E-1 (2)VEC
00000 . T
00000 . P
00000 . C1
3 1 50 1 10 5 5 20 1 . C2
0 . MARKER PARTICLE
00000 (3)VEC
00000 . T
00000 . P
00000 . C1
00000 . C2
1 . MARKER PARTICLE
.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7.....*.....8

```

Fig. 11.10 Sample Data of the Graphic Program

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7.R
//JCLG JOB
// EXEC JCLG
//SYSIN DD DATA,DLM='++'
// JUSER 99999999,XX.XXXXXX,0000.00
T.7 C.3 W.2 I.4 E.24① OPN
DPTP NOTIFY=J9999 PASSWORD=XXXXXX CLASS=3②
EXEC LMGO,LM=J0001.STREAM,PNM=TEMPNAME
①//SYSIN DD DSN=J9999.STREAM.DATA(SOLVER),DISP=SHR
②//FT11F001 DD SUBSYS=(VPCS,'SPACE=3M')
③//FT30F001 DD DSN=J9999.GRAPH.DATA,DISP=OLD
④//FT133F001 DD DSN=J9999.RSTRT1.DATA,DISP=SHR
⑤//FT34F001 DD DSN=J9999.RSTRT2.DATA,DISP=OLD
⑥//FT61F001 DD DSN=J9999.TREND1.DATA,DISP=OLD
⑦//FT62F001 DD DSN=J9999.TREND2.DATA,DISP=OLD
++
//
.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7.R

```

Fig. 11.11 Example of JCL for the Main Program

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7.R
//JCLG JOB
// EXEC JCLG
//SYSIN DD DATA,DLM='++'
// JUSER 99999999,XX.XXXXXX,0000.00
T.4 C.3 W.0 I.4 E.4 OPN GRP
DPTP NOTIFY=J9999 PASSWORD=XXXXXX CLASS=3
①//GO EXEC LMGO,LM=J0001.STREAMG,PNM=GRAPH
②//SYSIN DD DSN=J9999.STREAM.DATA(GRAPHIC),DISP=SHR
③//FT30F001 DD DSN=J9999.GRAPH.DATA,DISP=SHR
④//GRNLP EXPAND GRNLP,SYSOUT=H
++
//
.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7.R

```

Fig. 11.12 Example of JCL for the Graphic Program

```

READY
① EX 'J0001.STREAM.CLIST(TREND)' 'DSN(TREND1.DATA)' ↵
  ALLOC F(GDFILE) SYSOUT(H)
  ALLOC F(FT11F001) DA(TREND1.DATA) SHR REU
  CALL 'J0001.STREAMG.LOAD(TREND)' 'FLIB(PROMPT=NO)'
  KEY IN PLOT ID (U,V,W,P,DP,DIR), DEF= U
② ↵
  +++ PLOT OF < U > +++ DATA NO. = 100
  ENTER STARTING INDEX (DEF=1)
③ ↵

```

Fig. 11.13 Execution Example of Trend Plot on TSS Terminal

```

READY
① EX 'J0001.STREAM.CLIST(FFTPLT)' 'DSN(TREND1.DATA)' ↵
  ALLOC F(GDFILE) SYSOUT(H)
  ALLOC F(FT11F001) DA(TREND1.DATA) SHR REU
  CALL 'J0001.STREAMG.LOAD(FFTPLT)' 'FLIB(PROMPT=NO)'
  KEY IN PLOT ID (U,V,W,P,DP,DIR), DEF= U
② ↵
  +++ PLOT OF < U > +++ DATA NO. = 100
  ENTER STARTING INDEX (DEF=1)
③ ↵
  +++ FFT ANALYSIS OF < U > +++ DATA NO. = 100
  ENTER STARTING INDEX (DEF=2)
④ ↵

```

Fig. 11.14 Execution Example of FFT Analysis on TSS Terminal

12. 制限・注意事項

- 1) ベクトル化版 STREAM のベクトル化部分 (3重ループ) の最内ループは x 方向メッシュになっている。このため計算モデルを作成する場合は x 方向メッシュ分割数が大きくなるように工夫すると計算速度は速くなる (7.4 節の例を参照)。
- 2) ベクトル化版 STREAM の整合配列サイズの大きさはメッシュサイズ (IM, JM, KM) を用いて以下のように計算できる。

$$I \text{ IMAXO} \geq 2 \cdot I \text{ JKP} + 7 \cdot I \text{ JK} + 6 (IM + JM + KM)$$

$$I \text{ RMAXO} \geq (23 + I \text{ CONO}) \cdot I \text{ JKP} + 16 \cdot I \text{ JK} + IM + JM + KM + 3$$

ここに, $I \text{ JKP} = (IM + 1)(JM + 1)(KM + 1)$, $I \text{ JK} = IM \cdot JM \cdot KM$

で, $I \text{ IMAXO}$ は整数型, $I \text{ RMAXO}$ は実数型の配列サイズである。このときの実行時のメモリは近似的に,

$$\text{[単精度]} \quad (I \text{ IMAXO} + I \text{ RMAXO}) / 250 + 200 \quad (\text{KB})$$

$$\text{[倍精度]} \quad (I \text{ IMAXO} + 2 \cdot I \text{ RMAXO}) / 250 + 250 \quad (\text{KB})$$

と表わされる。

- 3) y 方向メッシュ数を 1 にする場合 (x-z の 2 次元計算), y, z 座標に関して $[Y(1) \neq Z(1)]$ とする必要がある (ゼロ割り防止のため)。
- 4) 定常条件を入れてリスタート計算を行う場合には, 常に同形式の定常条件を指定すること。リスタートの前後で条件が異なる場合の結果は保障されない。
- 5) CPU 時間による JOB の打ち切り時間を指定する場合は JCL で指定する時間以内になければならない (T.n の n の値に注意する)。
- 6) 大規模な計算モデルでは総和計算においてオリジナル版 (スカラー・モード) とベクトル化版 (ベクトル・モード) による計算結果に若干の差異の生じる場合がある。これは演算順序の違いによるものであり, 工学的には無視できる程度のものである。²¹⁾

謝 辞

本ベクトル化は原研と㈱ソフトウェア・クレイドル社との共同研究の一環として行われたものであり, 実際の作業は高温熱工学研究室・計算センター・(財)原子力データセンターの 3 者の協力で進められた。

共同研究を進めるに当たりご協力頂いた高温工学部宮本喜晟 HENDEL 開発試験室長および菱田誠高温熱工学研究室長, 「STREAM」使用に関していろいろと便宜を図って頂いた㈱ソフトウェア・クレイドル社駒田一郎・中西純一の両氏に感謝いたします。また, ベクトル化を勧めて頂き, また種々の討論を頂いた計算センターの石黒美佐子主任研究員に記して感謝いたします。

12. 制限・注意事項

- 1) ベクトル化版 STREAM のベクトル化部分 (3重ループ) の最内ループは x 方向メッシュになっている。このため計算モデルを作成する場合は x 方向メッシュ分割数が大きくなるように工夫すると計算速度は速くなる (7.4 節の例を参照)。
- 2) ベクトル化版 STREAM の整合配列サイズの大きさはメッシュサイズ (IM, JM, KM) を用いて以下のように計算できる。

$$I \text{ IMAXO} \geq 2 \cdot IJKP + 7 \cdot IJK + 6 (IM + JM + KM)$$

$$I \text{ RMAXO} \geq (23 + I \text{ CONO}) \cdot IJKP + 16 \cdot IJK + IM + JM + KM + 3$$

ここに, $IJKP = (IM + 1)(JM + 1)(KM + 1)$, $IJK = IM \cdot JM \cdot KM$

で, $I \text{ IMAXO}$ は整数型, $I \text{ RMAXO}$ は実数型の配列サイズである。このときの実行時のメモリは近似的に,

$$\text{[単精度]} \quad (I \text{ IMAXO} + I \text{ RMAXO}) / 250 + 200 \quad (\text{KB})$$

$$\text{[倍精度]} \quad (I \text{ IMAXO} + 2 \cdot I \text{ RMAXO}) / 250 + 250 \quad (\text{KB})$$

と表わされる。

- 3) y 方向メッシュ数を 1 にする場合 (x-z の 2 次元計算), y, z 座標に関して $[Y(1) \neq Z(1)]$ とする必要がある (ゼロ割り防止のため)。
- 4) 定常条件を入れてリスタート計算を行う場合には, 常に同形式の定常条件を指定すること。リスタートの前後で条件が異なる場合の結果は保障されない。
- 5) CPU 時間による JOB の打ち切り時間を指定する場合は JCL で指定する時間以内になければならない (T.n の n の値に注意する)。
- 6) 大規模な計算モデルでは総和計算においてオリジナル版 (スカラー・モード) とベクトル化版 (ベクトル・モード) による計算結果に若干の差異の生じる場合がある。これは演算順序の違いによるものであり, 工学的には無視できる程度のものである。²¹⁾

謝 辞

本ベクトル化は原研と(株)ソフトウェア・クレイドル社との共同研究の一環として行われたものであり, 実際の作業は高温熱工学研究室・計算センター・(財)原子力データセンターの3者の協力で進められた。

共同研究を進めるに当たりご協力頂いた高温工学部宮本喜晟 HENDEL 開発試験室長および菱田誠高温熱工学研究室長, 「STREAM」使用に関していろいろと便宜を図って頂いた(株)ソフトウェア・クレイドル社駒田一郎・中西純一の両氏に感謝いたします。また, ベクトル化を勧めて頂き, また種々の討論を頂いた計算センターの石黒美佐子主任研究員に記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 井川, 功刀, 神永, 数土: JAERI-M86-093 (1986)
- 2) 例えば, 航技研ニュース (1986~1988) など。
紹介記事としては, 功刀: 流れの可視化, Vol.8, No.29, 49 (1988)
- 3) 石川, 横川, 浅井: 原子力誌, 29 [2], 158 (1987)
- 4) Inagaki Y., Kunugi T., Miyamoto Y.: Proceed. of the 1st Int. Sympo. on Supercomputers for Mech. Eng., Tsuchiura, Japan, 37 (1988)
- 5) Launder B. E., Spalding, D.B.: Mathematical Models of Turbulence, Academic Press, Lecture 5 (1972)
- 6) 例えば, 谷編: 流体力学の進歩, 乱流, 丸善, 133 (昭55)
- 7) Hinze J. O.: Turbulence, 2nd Edt., McGraw-Hill, 625 (1975)
- 8) Bradshaw P.: Turbulence, Topics in Applied Physics, Vol. 12, 34 (1976)
- 9) Spalding D. B.: Numerical Prediction of Elow, Heat Transfer, Turbulence and Combusti, Pergamon Press (1983)
- 10) Kunugi T., Kawamura H.: Proceed. 2nd Int. Sympo. on Transport Phenomena in "Turbulent Flows", 509 (1987)
- 11) 例えば, ロッタ著, 大路訳, 乱流, 岩波書店, 160 (1981)
- 12) Rodi W.: Turbulence Models and Their Application in Hydraulics-A State of the Art Review, Univ. of Karlsruhe, 30 (1980)
- 13) 第1~3回生研 NST シンポジウム講演論文集, 東大生産技研 (1986~1988)
- 14) ローチェ著, 高橋編, コンピュータによる流体力学 (上・下), 構造計画研 (昭53)
- 15) Anderson D. A., Tannehill, J. C., Plecher R. H.: Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, Hemisphere Pub. Co. (1984)
- 16) Patankar S. V.: Numerical Heat Transfer and Fluid Folw, Hemisphere Pub. Co. (1980).
- 17) 徳永他: JAERI-M85-143 (1985)
- 18) 富士通, FACOM OSIV/F4 MSP FORTRAN 77/VP 使用手引書, 78SP-5680-2
- 19) 富士通, FACOM OSIV/F4 FORTUNE 使用手引書, 70SP-5731-1 (1984)
- 20) 例えば, 村田, 小国, 唐木著: スーパーコンピューター, 科学技術への適用, 丸善 (1984)
- 21) 鶴岡, 牧野, 幾島, 石黒: JAERI-M87-019 (1987)
- 22) 例えば, 日野著: スペクトル解析, 朝倉書店 (1977)