

分置

本資料は 年 月 日付けで登録区分、  
変更する。

01.11.30

[技術情報室]

## 原子炉炉心振動解析コードの開発(II)

(受託研究)

(縮小版)

1980年2月

東京芝浦電気株式会社

TOSHIBA CORPORATION

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

で

製,

転載，引用等には事業団の承認が必要です。



## 原子炉炉心振動解析コードの開発(Ⅱ)\*

佐々木 陽 一\*\* , 藤 本 滋\*\*  
郷 田 勝 彦\*\* , 佐々木 恒 夫\*\*

### 要 旨

高速増殖炉「もんじゅ」の炉心構成要素は六角形断面を有する細長い梁構造をしており、その振動性状は、下端支持の梁のそれと同様なものとみなす事ができる。高温の冷却材で満された炉心内にはこのような構成要素約700体が小間隔をおいて密に装荷されている。したがって、このような構造特性を持つ炉心構成要素群の地震時の挙動は構成要素同士の衝突や、流体力の影響等によって複雑なものとなる。このような挙動は厳密には非線形型応答となるが、その解析手法は十分に確立されているとは言えない。

本報告は「もんじゅ」の炉心構成要素群の地震時の挙動を適確に把握し、各構成要素における衝突力、たわみ量など基本的な応答特性を評価するための解析コードの開発に関して述べたものである。前年度(53年度)の「高速炉炉心振動解析コードの開発(I)<sup>7)</sup>」においては、炉心構成要素頭部の群挙動を把握する基本的解析コードを開発したが、本研究においては、(1)上記解析コード(I)を拡張し、構成要素の上部および中間部の応答(衝突力、たわみなど)を評価するための数字アルゴリズムおよび解析コードの作成を行うと共に、(2)解析コード(I)のI/O整備として、群挙動の図示化のためのプロッタ・ルーチンの作成を実施した。

本研究において開発した炉心振動解析コード(Ⅱ)及び解析コード(I)用プロッタルーチンの特徴について述べる。(1)本解析コードは、各炉心構成要素の上部および中間部の時刻歴挙動(衝突力、加速度、たわみなど)を把握するためのものである。(2)炉心構成要素群の任意の組合せ(構成条件)に対する応答解析を行うことができる。(3)非線形微分方式のための直接積分においては、時間に関して自動メッシュ法を採用し、数値積分上の計算誤差をできるだけ小さく抑えながら、計算時間を短縮する事が可能である。(4)解析コード(I)用のプロッタ・ルーチンにおいては、各要素の応答の時刻歴波形を図示出来、全体的な挙動を視覚的に把握する事ができる。

\* 本報告は東京芝浦電気株式会社が動力炉・核燃料開発事業団殿の委託により、実施した研究成果である。

\*\* 東京芝浦電気株式会社 総合研究所 機械研究所



Development of Vibration Analysis Code for Fast Breeder  
Reactor Core Structure (II)\*

Yooich Sasaki\*\* Shigeru Fujimoto\*\*  
Katsuhiko Goda\*\* Yukio Sasaki\*\*

Abstract

Core assemblies in "Monju" reactor are slender beams with hexagonal cross section. They can be assumed to be cantilevers which are supported at the lower end plug. About 700 core assemblies are installed with very small spacing between them which is filled with liquid metal in the reactor core. Therefore, the seismic response for such a structure is considered to be very complicated by fluid forces and collisions of the core assemblies. The analytical method for the seismic responses in such a nonlinear system is not established well as yet.

This report deals with fundamental research on the development of a vibration analysis code to evaluate the seismic responses of the core assemblies (ex. collision force, acceleration and displacement).

In the development of Vibration Analysis Code for Fast Breeder Reactor Core Structures (I) in 1979, the Basic analysis code to evaluate the seismic responses of the top of the core assemblies was constructed.

In this research, the simplified mathematical model and the analysis code to evaluate the seismic responses of the top and the middle of the core assemblies are rationally

constructed. Plotter Routine for the Analysis code (I) is made up to enable determining the overall behavior of core assemblies.

Features of the vibration analysis code (II) for the core assemblies are mentioned as follows;

- (1) The purpose of the vibration analysis code (II) is to evaluate the seismic responses (ex. collision force and displacement) at the top and the middle of core assemblies.
- (2) The time history responses of the core assemblies which are constructed arbitrarily (ex. multi-row model) can be evaluated with the vibration analysis code (II).
- (3) Auto-mesh method in time axis is adopted in numerical direct integral for nonlinear differential equations. Therefore, calculation time can be reduced in the computer.
- (4) In the plotter routine for the vibration analysis code (I), the core assemblies time history responses are described and the overall behavior can be determined visually.

---

\*) Work performed by TOSHIBA CORPORATION under Contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

\*\*\*) TOSHIBA CORPORATION, Research and Development Center, Mechanical Engineering Lab.

## 目 次

要 旨 .....	I
Abstract .....	II
List of Figures .....	V
第1章 緒 言 .....	1
第2章 基礎理論 .....	3
2.1 ま え が き .....	3
2.2 力学モデル .....	4
2.2.1 炉心構成要素の力学モデル .....	4
2.2.2 炉心構成要素群の力学モデル .....	4
2.2.3 運動方程式 .....	5
第3章 炉心振動解析コード(II)「VIOLLON II」の概要 .....	8
3.1 ま え が き .....	8
3.2 数 値 積 分 .....	9
3.3 プログラムの構成 .....	13
3.3.1 解析コード(II)の概要 .....	13
3.3.2 主なルーチンの概要 .....	13
3.3.3 解析コード(II)の入出力の概要 .....	34
3.3.4 解析コード(I)用のプロットルーチンの入出力の概要 .....	37
3.4 数値計算例 .....	39
第4章 結 言 .....	54
図 .....	55
謝 辞 .....	60
記 号 表 .....	61
参 考 文 献 .....	63

## List of Figures

	Page
Fig. 1.1 Arrangement of Core Assemblies (Horizontal Cross Section) .....	55
Fig. 2.1 Dynamic Model of Core Assemblies (Vertical Cross Section) .....	56
Fig. 2.2 Multi-Rows Model of Core Assemblies (Horizontal Cross Section) .....	56
Fig. 2.3 Dynamic Model of Core Assemblies (Solid Model) .....	57
Fig. 2.4 Load-Deflection Diagram of Nonlinear Function $f_{ij}$ at Collision Point $i-j$ .....	58
Fig. 3.1 Numerical Example Calculated by Reformed Kutta-Merson Method (Comparison with Exact Solution) .....	59

## 第 1 章 緒 言

高速増殖炉「もんじゅ」の炉心構成要素（燃料集合体，ブランケット，制御棒案内管，中性子しゃへい体 etc.）は六角形断面を有し，下端で支持された細長い梁構造をしている。また，構成要素の種類によって，質量分布が異なるため，その振動特性は異っている。図 1.1 に示されるように液体ナトリウムで満された炉心内には，このような構成要素約 700 体が，各パッド部で約 0.7～1.0 mm（常温中）の間隔をおいて炉心支持板上に密に装荷されている。したがって，このような構造を持つ炉心構成要素群の地震時の挙動は互いに小間隔を有する構成要素同士の間隔や流体力の影響等によって複雑なものとなる。この挙動は厳密には非線形型応答となるが，その解析手法は十分に確立されているとは言えない。

このような多数の構成要素群の全体的な挙動を把握するために，振動特性の異なる要素群ごとに分け，それらを等価な一体の梁モデルに置き換え，要素の種類に対応する数体の梁モデル系としたものによる解析<sup>1)</sup>，要素個々の頭部単列方向の衝突を考慮した反発係数単列モデルによる解析<sup>2), 3), 4), 5)</sup>，そして，各梁の断面を円形で近似し，多数の球体群の平面的な衝突振動モデルによる解析<sup>6)</sup>などが行われ，それぞれの要素群の基本的振動特性が調べられている。しかし，これらの解析においては，要素群の Gross な挙動把握に主眼がおかれているため，要素同士の個々の応答（特に，衝突力など）を正確に評価するという問題に対しては不十分であった。また，既存の解析プログラムにおいては，「もんじゅ」炉心構成要素群の構造特性を十分にモデル化でき，また耐震設計のための解析 needs に十分対応できるものが見い出せないのが現状である<sup>7)</sup>。このため，六角形断面を有し，下端支持された構成要素同士の衝突および流体力の影響を考慮しながら，地震時の構成要素群全体の，また，個々の挙動を適確に把握できる振動解析コードの開発が望まれている。

本報告は，流体中における六角形断面を有する炉心構成要素群の地震時の挙動を解析するための時刻歴応答解析コードの開発に関する研究の一環として行われたものである。

昭和 53 年度の「高速炉炉心振動解析コードの開発(I)<sup>7)</sup>」においては，炉心構成要素上部の群挙動（衝突力，変位，加速度等）を把握できる基本的解析コードを開発した。

本研究においては上記解析コード(I)を拡張し，構成要素の上部および中間部の衝突力を評価できる計算コードを作成すると共に，解析コード(I)用の要素挙動図示化（プロッタ）ルーチンの開発を行った。本報告書はこれらの開発及びその結果について述べたものである。

本報告書の構成は次のようになっている。第 2 章では振動解析コードの基礎理論として，炉



心構成要素群の力学モデルの作成，および，その数学的取り扱いについて述べている。第3章では，本解析コードに用いられている数値積分法の概要，プログラムの構成および入出力の概要，そして，簡単な数値計算を行った結果について述べている。第4章では，解析コード(II)および解析コード(I)のプロッタルーチンの開発に関する研究成果について要約が述べられている。なお，「付録 I」では振動解析コード(II)の使用法，および付録(II)では振動解析コード(I)用のプロッタ・ルーチンの使用法について詳しく述べられている。

## 第2章 基礎理論

### 2.1 まえがき

「もんじゅ」炉心構成要素群の構造についてはすでに1章で述べたが、このような構造物の振動特性を把握するには、なるべく個々の要素の構造特性を単純化した力学モデルを設定することが望ましい。

六角形断面を有する梁としての炉心構成要素群の力学モデルを設定する場合、大きくわけて、3つの力学的特性を考慮する必要がある。

#### (1) 要素群の全体的な力学モデルとしての単列又は複数列モデル

単列モデルの場合には、加振方向一列の構成要素間の相互干渉の影響がその列の要素の応答に支配的という仮定に基づいている。<sup>2), 3), 4), 5)</sup>

複数列モデルの場合には、加振方向一列の要素間の相互干渉の影響ばかりでなく、隣接する他の列の要素との相互干渉の影響も無視できないとする考え方に基づいている。<sup>6)</sup>

これらの力学モデルの選択は、各要素を取り囲む境界条件の差、解析の目的等によって考慮されるべきであろう。

#### (2) 要素自体のモデル化

下端支持梁としてのモデル化は、衝突や地震入力による梁の卓越する振動モードを考慮して、必要な自由度（又は質点数）を決めなければならない。

#### (3) 衝突部のメカニズムのモデル化

一般に衝突部の力学モデルは大きく分けて2つ考えられ、一つは衝突前後の運動量保存則を考慮し、衝突後の速度を衝突前の速度と反発係数を用いてあらわすもの、もう一つは、衝突部を線形又は非線形のばね、ダンパーで置き換え、ばねの変形によって反発力が生じるものである。前者は、各要素の衝突力の正確な評価が困難であるが、後者は衝突力をばねの変形量として評価する事が可能である。

本章では、互いに隣接する六角形断面を有する炉心構成要素同士の上端および中間部での衝突がそれぞれの構成要素の応答に及ぼす影響を調べるための力学モデルとして、①複数列モデル、②梁については2質点系、③衝突部は各質点についてのばね-ダンパ系などが組み合わさったモデルを提案し、この力学モデルの基礎理論について述べる。

## 2.2 力学モデル

### 2.2.1 炉心構成要素の力学モデル

各炉心構成要素はある質量分布を持つ下端支持あるいは固定，上端自由の梁である。本報告においては前回開発した振動解析コード(I)の拡張として，梁の2次モード振動までを考慮し，構成要素の上部および中間パッド部での衝突による影響に注目した次のような力学モデルを設定する。

- (1) 応答の1次，2次モードに注目し，各構成要素を2質点で近似し，それらは等価なばね，ダンパを介して，たがいにあるいは支持板と結ばれている。その振動特性は，梁の1，2次モードの振動特性に近似するものとする。
- (2) 衝突は各構成要素の上端および中間パッド部で衝突が起るものとする。この際，衝突による各要素の変形は各パッド部付近のラップ管の変形が含まれるため，この要素間の衝突部をある初期 gapを持つ線形ばね，ダンパでおきかえ，そのばねの変形によって反発力が生じるものとする。ただし，ばね定数は実験値で得たもの，減衰係数は実験より得た反発係数をもとにして等価値を設定するものとする。

この力学モデルを炉心垂直断面で示すと図 2.1 のようになる。

### 2.2.2 炉心構成要素群の力学モデル

構成要素群の衝突や流体力の相互干渉を考慮するために，複数列モデルを考える。

(図 2.2 参照) 解析コード(I)においては，複数列モデルの基本モデルとして3列モデルとしたが，本研究においては前回モデルを拡張し，任意の複数列モデルを設定する。

ここで，図 2.2 の力学モデルに対して次のような仮定を設けて問題の単純化をはかる。

- ① 加振方向はX軸に一致する水平振動とする。
- ② 衝突時の衝突力の加振直角方向(Y方向)成分は図 1.1 に示されるような多数の要素を考えた場合，近似的には打ち消し合うと考えられるので，ここではこの力の成分を省略し，加振方向の力の釣り合いのみを考える。
- ③ 衝突時の要素相互の摩擦や要素のねじれは無視できるものとする。
- ④ 構成要素同士が互いに与える流体力の影響は各要素に隣接する6つの要素のそれが十分大きいため，各要素あるいは要素間の virtual mass は，各要素およびそれに隣接する要素によるもので近似する。

このような仮定のもとで力学モデルを構成すると図 2.3 のようになる。

### 2.2.3 運動方程式

図 2.3 であらわされる力学モデルの運動方程式は次のようになる。

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} + \{F\} = -[P]\{\ddot{u}\} \quad (2.1)$$

ここで,

$[M]$  : 質量マトリクス

$[C]$  : 減衰定数マトリクス

$[K]$  : ばね定数マトリクス

$[P]\{\ddot{u}\}$  : 入力加速度  $\{\ddot{u}\}$  による外力ベクトル

$\{F\}$  : 衝突力ベクトル

$\{\delta\}$  : 相対変位ベクトル

$\{\dot{\delta}\}$  : 相対速度ベクトル

$\{\ddot{\delta}\}$  : 相対加速度ベクトル

また, 上記マトリクス, ベクトルにおいて

$$\textcircled{1} \quad \delta_i = x_i - u \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (2.2)$$

$$\textcircled{2} \quad u_i = u \quad (2.3)$$

$$\textcircled{3} \quad \begin{cases} M_{ij} = m_i + r_{ij} & (i=j) \\ \phantom{M_{ij}} = r_{ij} & (i \neq j) \end{cases} \quad (2.4)$$

④ 質点  $i, j$  間の剛性マトリクス

$$K' = \begin{bmatrix} k_{ij} & -k_{ij} \\ -k_{ij} & k_{ij} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$


⑤ 質点  $i, j$  と支持板との剛性マトリクス

$$K'' = \begin{bmatrix} k_{oi} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$


⑥ 2質点系剛性マトリクス

$$K = K' + K'' \quad (2.7)$$


⑦ 全体系剛性マトリクス(線形部のみ)

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{01} + k_{12} & -k_{12} & & & 0 \\ -k_{12} & k_{12} & & & \\ & & k_{03} + k_{34} & -k_{34} & \\ & & -k_{34} & k_{34} & \\ 0 & & & & k_{0n-1} + k_{n-1n} & -k_{n-1n} \\ & & & & -k_{n-1n} & k_{n-1n} \end{bmatrix}$$



要素と右壁との衝突

$$\left. \begin{aligned} f_{rB} &= K_{rB}(-\delta_r + G_{rB}) + C_{rB}(-\dot{\delta}_r) & (-\delta_r \leq -G_{rB}) \\ &= 0 & ( \quad > \quad ) \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

<2> 要素 i が衝突により受ける力 ( x 方向 )

$$F_i = f_{ki} + f_{li} + f_{mi} - f_{in} - f_{ip} - f_{iq} \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

(k, l, m, n, p, q: 隣り合う要素)

ただし,

$x_i$  : 各質点の絶対変位,  $u$  : 入力変位,  $\delta_i$  : 各質点の入力に対する相対変位  
 $m_i$  : 要素の等価質量,  $c_i$  : 要素の等価減衰係数,  $k_i$  : 要素の等価ばね定数  
 $\gamma_{ij}$  : 要素 i, j に関する virtual mass,  $G_{ij}$  : 要素 i, j 間のすき間 (gap),  
 $C_i$  : 衝突部 i の減衰係数,  $K_i$  : 衝突部 i のばね定数  
 (要素の等価減衰  $c_i$  については, 要素自体の内部減衰, 流体の流れの影響などによる減衰を含んだものとする。)

$f_{ij}$  : i, j 間衝突部の衝突力関数 (図 2.4 参照)

以上のような非線形微分方程式を直接積分によって解く。

ただし, 本解析モデルにおいては, 要素一体に関しては, 1 質点又は 2 質点モデルを選択でき, また, 列の構成に関しては任意の複数列を選択できる。

## 第 3 章 炉心振動解析コード (Ⅱ)「VIOLLON Ⅱ」の概要

### 3.1 まえがき

本解析コードは不規則な励振力を受ける炉心構成要素群の時刻歴応答解析を行い、各応答に対する安全性の評価を行うことを目的として開発されたものである。本章では、解析コードに用いられている数値積分法、プログラムの構成および入出力の概要について述べる。

対象とする振動系は 2 章で述べたような一体の炉心構成要素を等価な 2 質点系、それを複数列に並べた多自由度衝突振動系である。数学的には式 ( 2.1 ) であらわされる 2 階非線形微分方程式の初期値問題となる。

数値積分は①ニューマークの  $\beta$  法<sup>8)</sup>、②改良 Kutta-Mason 法<sup>9)</sup> (③田中法<sup>9)</sup>)<sup>\*</sup>のいずれかを用い、連立方程式はコレスキー分解法<sup>9)</sup>を用いて解く。

なお、入力データの入力形式、出力データの出力形式の詳細な説明、コードの取り扱い、数値計算例及びソースリストについては、付録 1 「原子炉炉心振動解析コード使用法」において述べる。

※ 田中法は②の改良 Kutta-Mason 法の check 用のため組み込んだプログラムである。

### 3.2 数値積分

#### (1) ニューマークの $\beta$ 法<sup>8)</sup>

この数値積分法の簡単なアルゴリズムについて述べる。

式(2.1)は本積分法により次の様に積分される。

$$\begin{aligned} \{\ddot{\delta}(t+\Delta t)\} &= \left( [M] + \frac{\Delta t}{2}[C] + \beta(\Delta t)^2[K] \right)^{-1} \times \\ & \left( -[P]\{\ddot{u}(t+\Delta t)\} - \{f(t)\} - [C] \times (\{\dot{\delta}(t)\} + \frac{\Delta t}{2} \times \{\ddot{\delta}(t)\} + \frac{\Delta t}{2} \times \{\dot{\delta}(t)\}) \right. \\ & \left. - [K] (\{\delta(t)\} + \Delta t \{\dot{\delta}(t)\} + (\frac{1}{2} - \beta) \times (\Delta t)^2 \times \{\ddot{\delta}(t)\}) \right) \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\{\dot{\delta}(t+\Delta t)\} = \{\dot{\delta}(t)\} + (\Delta t/2) (\{\ddot{\delta}(t)\} + \{\ddot{\delta}(t+\Delta t)\}) \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \{\delta(t+\Delta t)\} &= \{\delta(t)\} + \Delta t \{\dot{\delta}(t)\} + ((\Delta t)^2/2) \cdot \{\ddot{\delta}(t)\} \\ & \quad + \beta(\Delta t)^2 (\{\ddot{\delta}(t+\Delta t)\} - \{\ddot{\delta}(t)\}) \end{aligned} \quad (3.3)$$

ただし、ここでは $\beta = 1/6$ を用いる。

式(3.1)を解く時、逆マトリクスを組み立てず<sup>9)</sup>コレスキー分解法を用いて連立方程式を解く。このように、式(3.1)~(3.3)を用いて数値積分が実行される。ただし、このニューマークの $\beta$ 法による非線形微分方程式の数値積分はルンゲ・クッタ法によるそれと同等の精度を得るためには、 $\Delta t$ をルンゲ・クッタ法のそれよりも十分細く(1/5~1/10)する必要がある。

#### (2) 改良クッタ・マーソン法(自動メッシュ型)

微分方程式を直接分法で解く場合、常に問題になるのが時間増分(increasing time)である。increasing timeが大き過ぎる場合、精度が悪くなり、系の解が不安定となり収束しなくなり、increasing timeが小さ過ぎる場合、精度は確保できるが、積分回数が多くなり、計算時間あるいは累積誤差の増大と言った問題が起きる。

increasing timeの最適値は、関数が激しく変化する部分では $\Delta t$ を小さくし、比較的ゆるやかに変化する部分は $\Delta t$ を大きくとれば効率的である。ここで用いる改良クッタ・マーソン法はある2つの計算法で積分を行いそれらの相対誤差評価をしながら、各ステップ毎にある誤差評価式を満す最小 increasing time を決定して、計算を行う方法である。ここに、改良クッタ・マーソン法のアルゴリズムについて簡単に述べる。

クッタ・マーソン法はルンゲ・クッタ法系統の手法であり、打ち切り誤差が精密に評価できる<sup>9)</sup>公式である。この式を用いることによって $\Delta t$ の自動調節を行うことができる。

#### 改良 Kutta-Mason の公式およびアルゴリズム

いま、次のような常微分方程式に対して考える。



$$\frac{dF}{dt} = f(t, F) \quad (3.4)$$

$\Delta t$ : increasing time

$$\left. \begin{aligned} \Delta F_1 &= \Delta t \cdot f(t, F(t)) \\ \Delta F_2 &= \Delta t \cdot f\left(t + \frac{\Delta t}{3}, F(t) + \frac{\Delta F_1}{3}\right) \\ \Delta F_3 &= \Delta t \cdot f\left(t + \frac{\Delta t}{3}, F(t) + \frac{\Delta F_1}{6} + \frac{\Delta F_2}{6}\right) \\ \Delta F_4 &= \Delta t \cdot f\left(t + \frac{\Delta t}{2}, F(t) + \frac{\Delta F_1}{8} + \frac{3\Delta F_3}{8}\right) \\ F_A &= F(t) + \frac{1}{2}\Delta F_1 - \frac{3}{2}\Delta F_3 + 2\Delta F_4 \\ \Delta F_5 &= \Delta t \cdot f(t + \Delta t, F_A) \\ F_B &= F(t) + \frac{1}{6}\Delta F_1 + \frac{2}{3}\Delta F_4 + \frac{1}{6}\Delta F_5 \end{aligned} \right\} (3.5)$$

この  $F_A$ ,  $F_B$  はいずれも  $F(t + \Delta t)$  の近似値であるが,  $F_B$  の方が精度が良い。

この  $F_A$  を  $F_B$  の誤差推定に用いる。本コードにおいては誤差評価式として次式を定義する。

$$T = 0.2 | (F_A - F_B) / F_A | = 0.2 | 1 - F_B / F_A | \quad (3.6)$$

ただし,  $0.2(F_A - F_B)$ : 打切り誤差の推定値

$T$ :  $F_A$  に対する打切り誤差の相対比 (誤差比)

この誤差比  $T$  に次の様な基準を設ける。

$$\textcircled{1} \left\{ \begin{array}{l} T \leq \epsilon \\ 6.4T \leq \epsilon \end{array} \right. \quad \textcircled{2} \left\{ \begin{array}{l} T < \epsilon \\ 6.4T > \epsilon \end{array} \right. \quad \textcircled{3} \left\{ \begin{array}{l} T > \epsilon \\ 6.4T \geq \epsilon \end{array} \right. \quad (3.7)$$

ただし,  $\epsilon$ : 誤差基準値,  $6.4T$ : きざみ時間  $\Delta t$  を 2 倍した際生じる推定誤差。

式 (3.7) ① ~ ③ において,  $F_A$  及び  $F_B$  による誤差の大きさを判定し, 次の様な  $\Delta t$  を設定する。①の場合, 次回のステップより 2  $\Delta t$  とする。②の場合, 次回のステップも  $\Delta t$  とする。③の場合, 誤差が大きいと見なされるので, その計算ステップにおいて  $\Delta t$  を 0.5  $\Delta t$  として計算をやり直し, 式 (3.7) の①又は②を満すまで  $\Delta t$  を細くし, そのステップの計算を繰り返す。

(計算例)

簡単な計算例として次のような式について計算する。

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y) = -y + g(t) \quad (3.8)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} g(t) = 0 & (0 \leq t \leq 1, t > 2) \\ = 1 & (1 \leq t \leq 2) \end{array} \right\} \quad (3.9)$$

$$y(0) = 1$$

これを改良クッタ・マーソン法によって計算したものと厳密解とを比較したものを図 3.1 に示す。このように、応答の変化に応じて time メッシュを自動的に変えて精度良く計算する事ができる。

### (3) 田 中 法

田中法は、クッタ・マーソン法をさらに改良し、より精度の良い、しかも誤差評価も優れた公式である。<sup>9)</sup> 田中法というものは 1 種類ではなく、論文として発表されたものだけでも 20 種類以上もあり、概して新しいものほど多くの改良がなされている。それらの公式は係数がマーソンの公式ほど簡単な数でないため親しみにくい感じを与えるかもしれないが、1 ステップ当りの計算の必要量は同じ次数のマーソンの方法とほとんど同一であり、それでいて精度がよいのであるから、それだけステップ・サイズを広く取る事が出来、計算時間の短縮が可能である。このように、田中法は非常に有利な方法である事は確かだが、まだ広く一般に Authorize されていないのが欠点である。本解析コード(II)においては、田中法は本研究で開発した改良クッタ・マーソン法を check するために用いられている。このため、ここでは田中法は改良クッタ・マーソン法の計算精度 check 用プログラムと考えられたい。

以下に田中法の公式の一例を示す。

田中法の公式<sup>9)</sup>(例)

式(3.4)であらわされる微分方程式について考える。

$$\left. \begin{aligned} \Delta F_1 &= \Delta t \cdot f(t, F(t)) \\ \Delta F_2 &= \Delta t \cdot f(t+0.0005 \Delta t, F(t)+0.0005 \Delta F_1) \\ \Delta F_3 &= \Delta t \cdot f(0.285 \Delta t, F(t)-80.89939470 \Delta F_1 + 81.18439470 \Delta F_2) \\ \Delta F_4 &= \Delta t \cdot f(t+0.992 \Delta t, F(t)+2113.327899 \Delta F_1 - 2117.778035 \Delta F_2 \\ &\quad + 5.442136522 \Delta F_3) \\ \Delta F_5 &= \Delta t \cdot f(t+\Delta t, F(t)+2249.757677 \Delta F_1 - 2254.48940 \Delta F_2 \\ &\quad + 5.739991965 \Delta F_3 - 0.008629230728 \Delta F_4) \\ F_A &= F(t) - 131.2823524 \Delta F_1 + 131.4998223 \Delta F_2 \\ &\quad + 0.4837620276 \Delta F_3 + 0.2987680354 \Delta F_4 \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{aligned}
F_B = & F(t) + 65.80784286 \Delta F_1 - 65.94767173 \Delta F_2 \\
& + 0.7959885276 \Delta F_3 + 4.715404915 \Delta F_4 \\
& - 4.371564570 \Delta F_5
\end{aligned}
\tag{3.10}$$

また、誤差評価式は

$$T = F_A - F_B \tag{3.11}$$

この打切り誤差および自動メッシュ方式は、上記(2)の改良クッタ・マーソン法と同様である。

#### (4) 地震波入力の内挿法

地震波入力のステップ時間より、積分のためのステップ時間の方がかなり小さいため地震波の各ステップ間の内挿法は、一次補間法を用いる。

いま、時刻  $t_n$  と  $t_n + \Delta t$  の加速度を  $\ddot{u}(t_n)$ 、 $\ddot{u}(t_n + \Delta t)$  とし、時刻  $t$  ( $t_n \leq t \leq t_n + \Delta t$ ) の加速度を次のように定義する。

$$\ddot{u}(t) = \{\ddot{u}(t_n + \Delta t) - \ddot{u}(t_n)\} \times (t - t_n) / \Delta t + \ddot{u}(t_n) \tag{3.12}$$

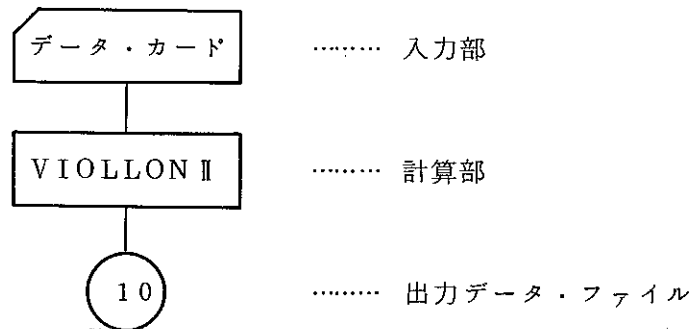
### 3.3 プログラムの構成

#### 3.3.1 解析コード(II)の概要

本解析コード VIOLLON II は、不規則な励振力を受けるガタを持つ衝突系構造物の時刻歴応答を調べるため、数学モデルとしての多次元非線形微分方程式・式(2.1)を直接積分法によって解く解析コードである。直接積分法としては、Newmark  $\beta$ 法及び改良 Kutta-Mason 法(又は田中法)をオプションによって選択することができる。

本プログラムは、メンテナンス及び拡張の容易さを考え、最適なモジュールに分割されている。各サブルーチン間の変数はアークギュメント(引数)で受け渡される。このため、サブルーチンの流れ、変数の流れをフォローする事は容易である。

本プログラムの Job の流れは大きく分けて次のようになる。



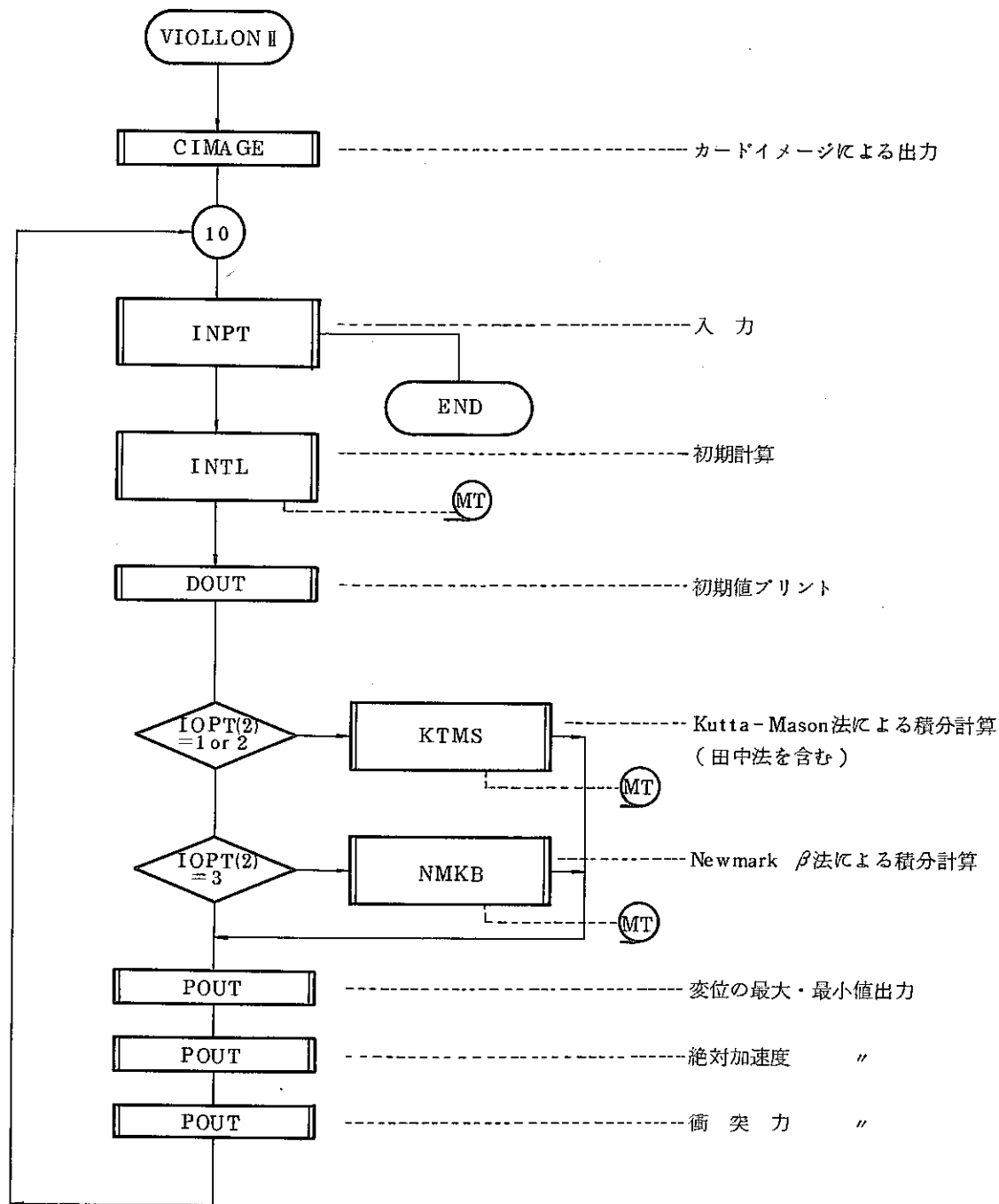
このように、本プログラムにおいては、計算を行い、主なデータ(主に最大値)をプリント・アウトし、その他の細かい時刻歴データはテープ(MT)に書き込まれる。

#### 3.3.2 主なルーチンの概要

ここでは、本プログラムの概略フローチャート・プログラム・ツリー図、各ルーチンの機能及び、それらのルーチンのフローチャートについて述べる。

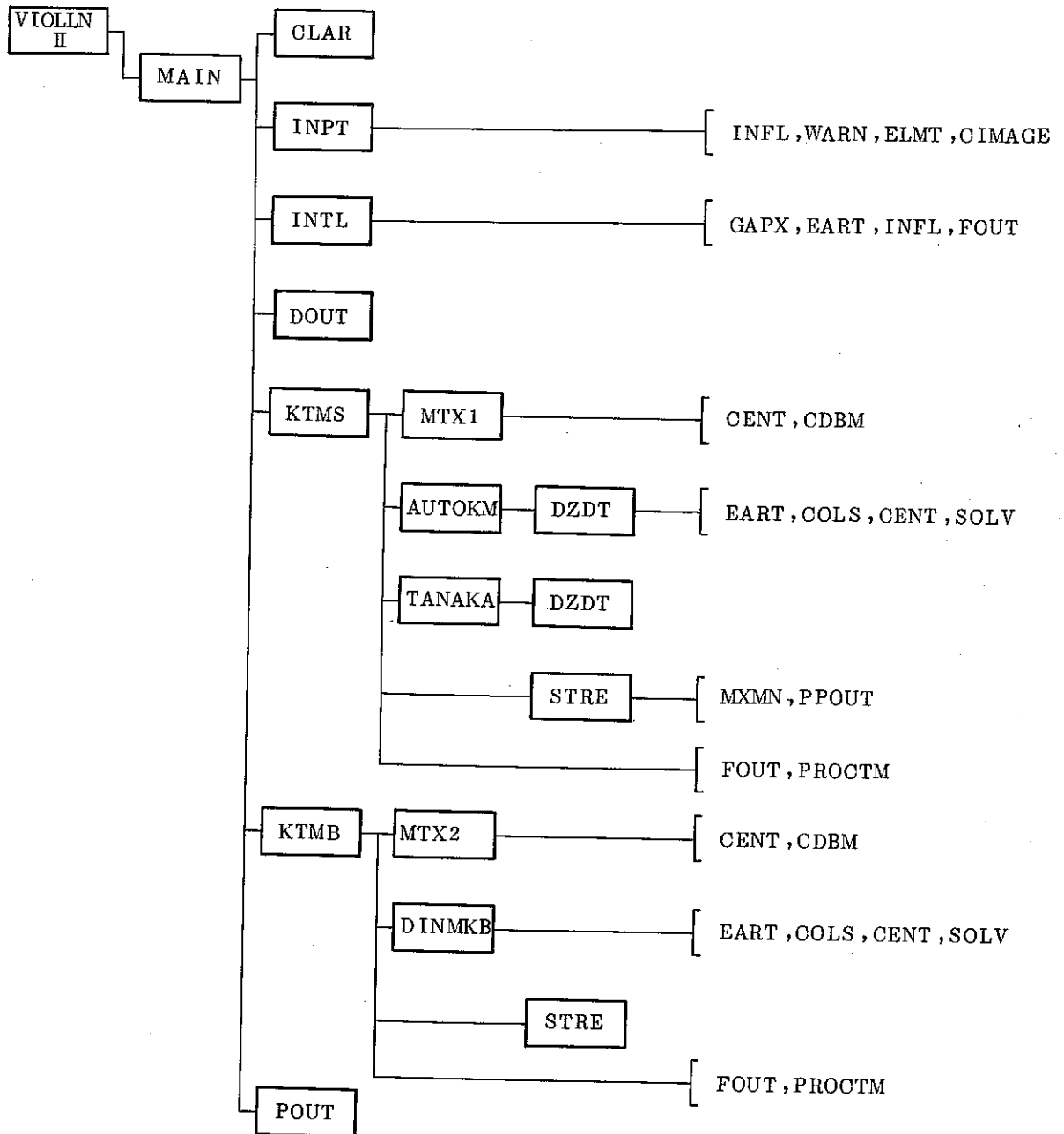
##### (1) VIOLLON II の概略フローチャート

VIOLLON II の概略フローチャートを次に示す。



(2) VIOLLON II のプログラム・ツリー図

VIOLLON II のプログラム・ツリー図を次に示す。



(3) サブルーチンの機能説明

機能の概略を次に示す。

**MAIN** プログラムの流れを制御する。

① MAIN ルーチンに関して

**CLAR** 使用変数のゼロクリアを行う。

**INPT** カードまたはテープより (Re-run の場合) 入力を行う。

**INTL** 時間・計算方法に依らない変数の計算を行う。

**DOUT** 初期値のプリントを行う。

**KTMS** Kutta-Mason 法の計算の流れを制御する。

**NMKB** Newmark  $\beta$  法の計算の流れを制御する。

**POUT** 結果の最大・最小値とその時間、許容値との比をプリントする。

② KTMS ルーチンに関して

**MTX1** 左辺のマトリックス計算を行う。

**AUTOKM** Kutta-Mason 法による積分計算を行う。

**TANAKA** 田中法による積分計算を行う。

**DZDT** 右辺の増分値の計算を行う。

③ NMKB ルーチンに関して

**MTX2** 左辺のマトリックス計算を行う。

**DINMKB** Newmark  $\beta$  法 (直接法) による積分計算を行う。

④ ワーク・ルーチンに関して

**STRE** 結果の最大・最小値、許容比を求め、衝突力をエリアに格納する。

**COLS** 各ギャップでの衝突力を計算し、各質点に働く非線形力を求める。

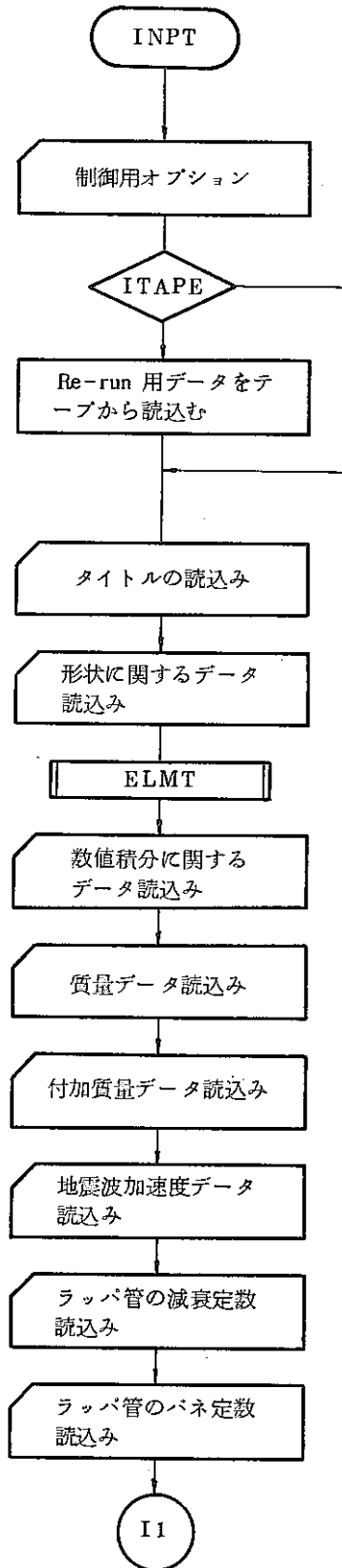
**GAPX** ギャップ幅の計算を行う。

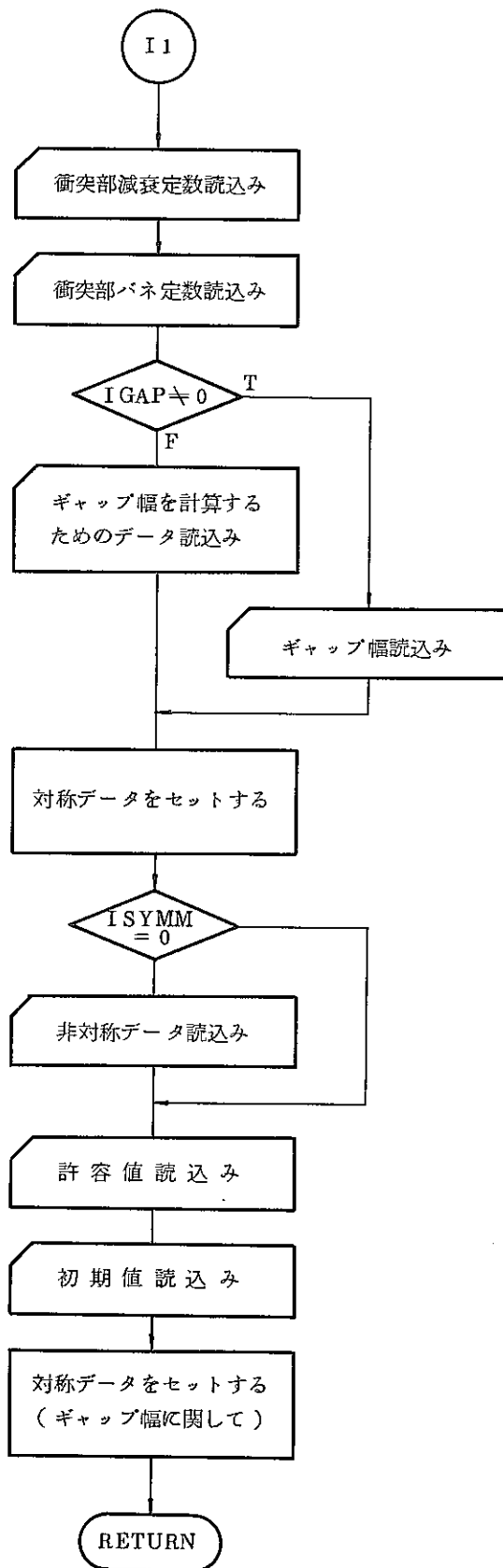
EART	地震波の加速度を求める。
BLOCK DATA	デバッグ・プリントの出力に必要なデータを与える。
INFL	初期値のテーブルへの書き込みおよび読み出しを行う。
FOUT	計算値をテーブルへ書き込む。
HEAD	改頁，タイトル，頁数をプリントする。
WARN	カード入力データのエラーチェックを行う。
ELMT	要素数，ギャップ数等の計算を行う。
CENT	中心部両端要素が無い場合の操作を行う。
CDBM	マトリックスを上三角，下三角に分解する。(コレスキー分解)
SOLV	連立一次方程式の解を求める。(コレスキー分解)
MXMN	データの最大・最小値を求める。
PPOUT	許容値を越すデータをプリントする。
CIMAGE	入力のカードイメージをプリントする。
PROCTM	プロセッサ・タイムを求める。

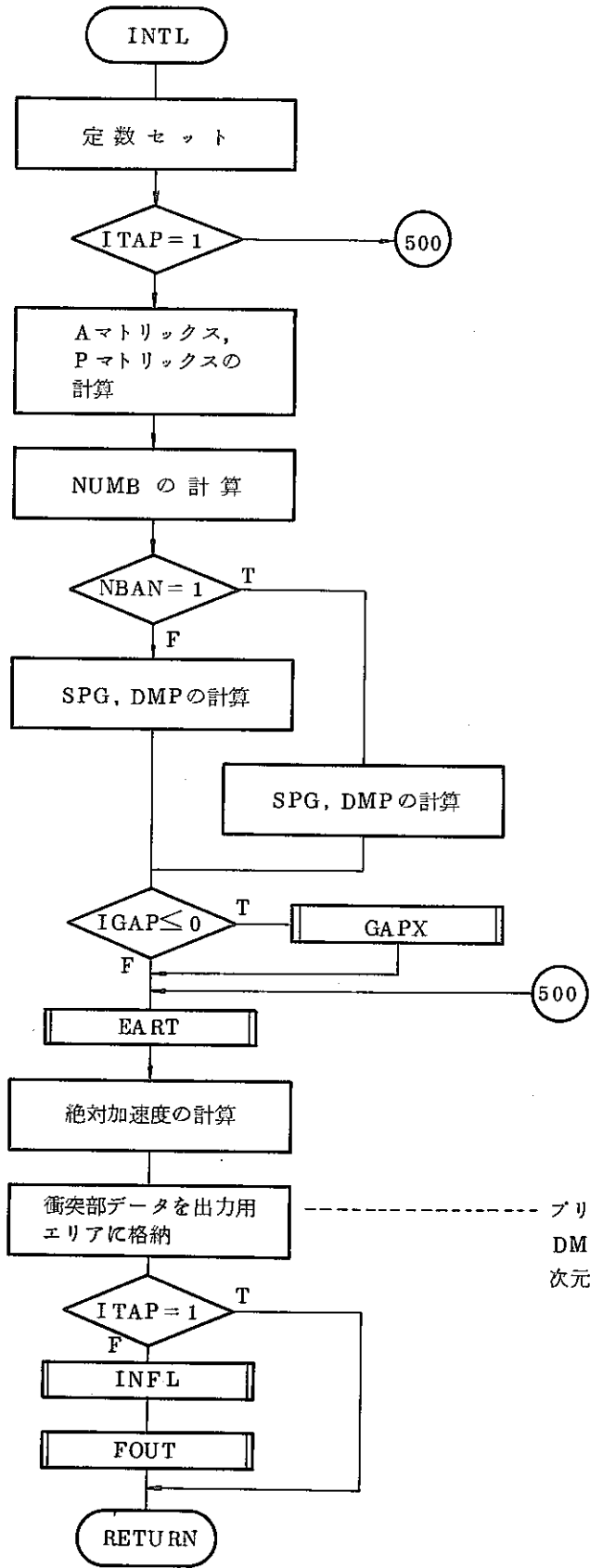


(4) 各サブルーチンのフローチャート

各サブルーチンのフローチャートを次に示す。

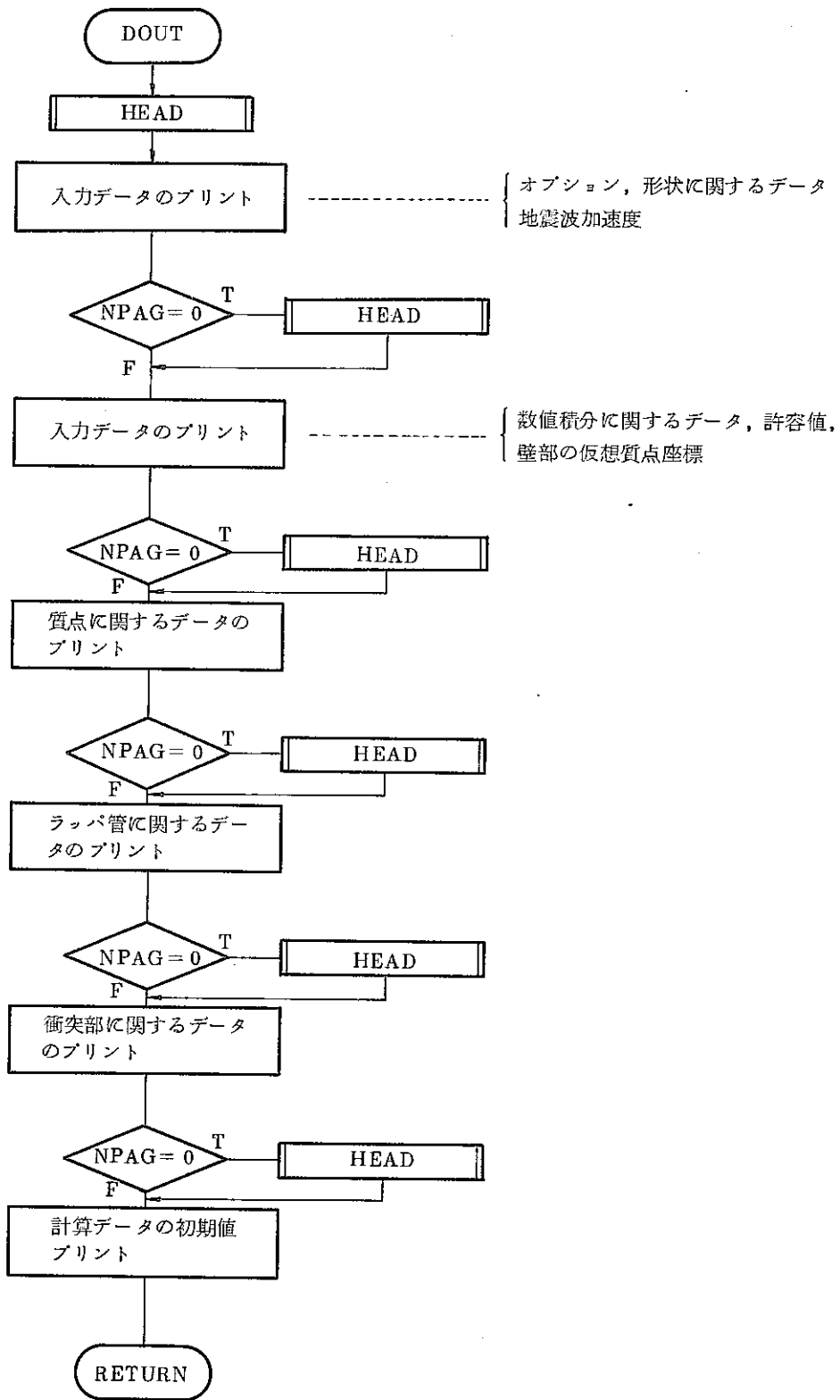


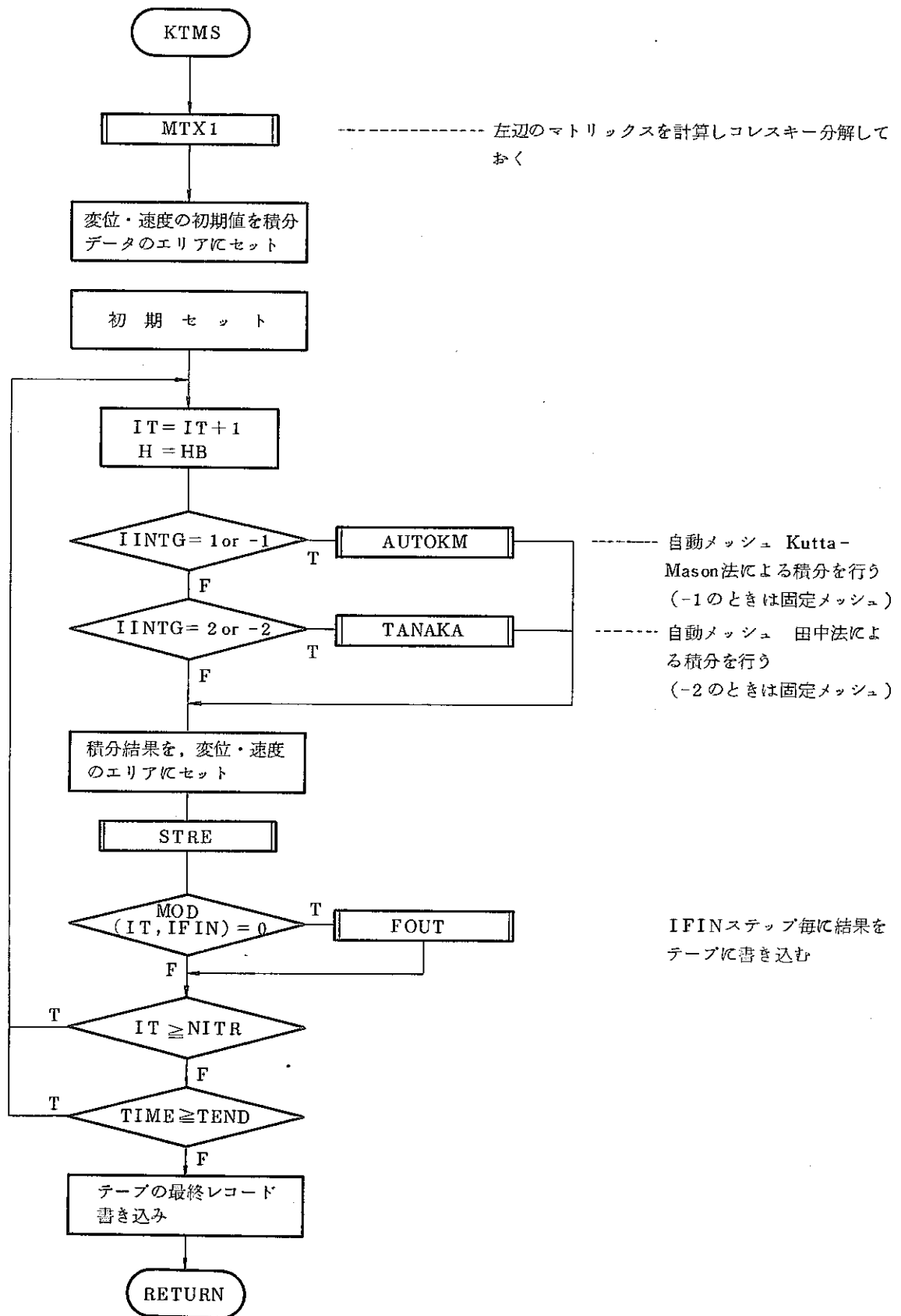


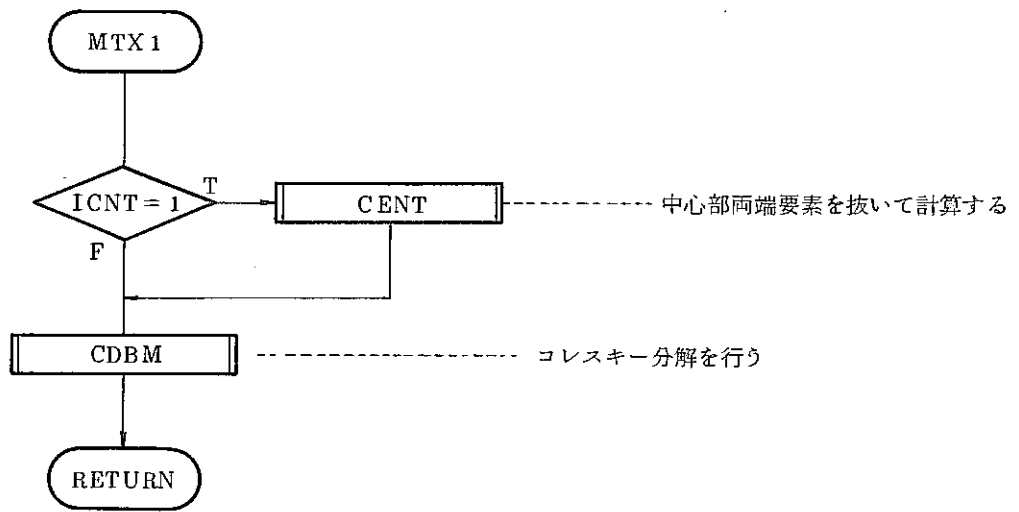


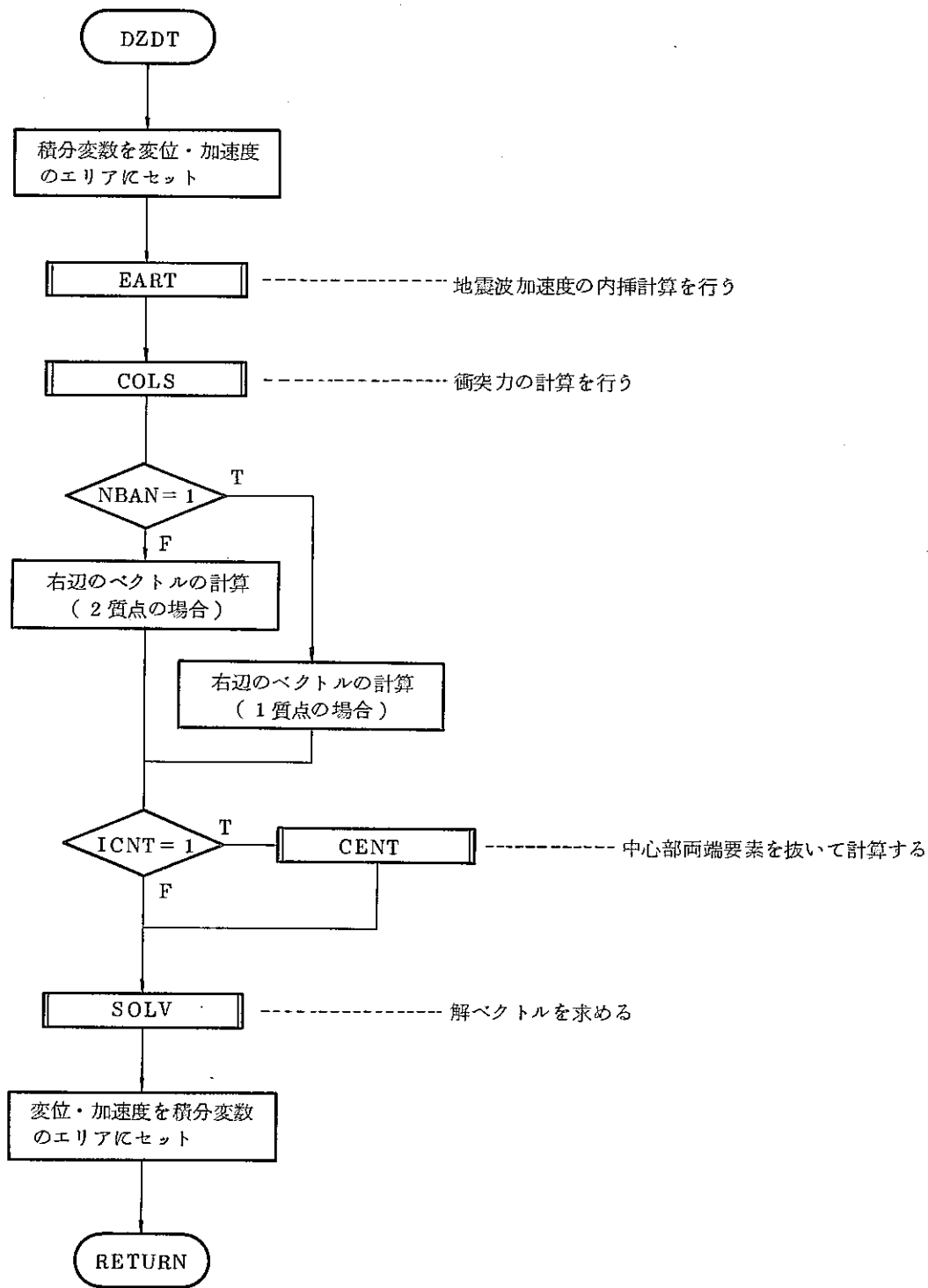
A = 質量マトリックス  
P = 地震波の係数

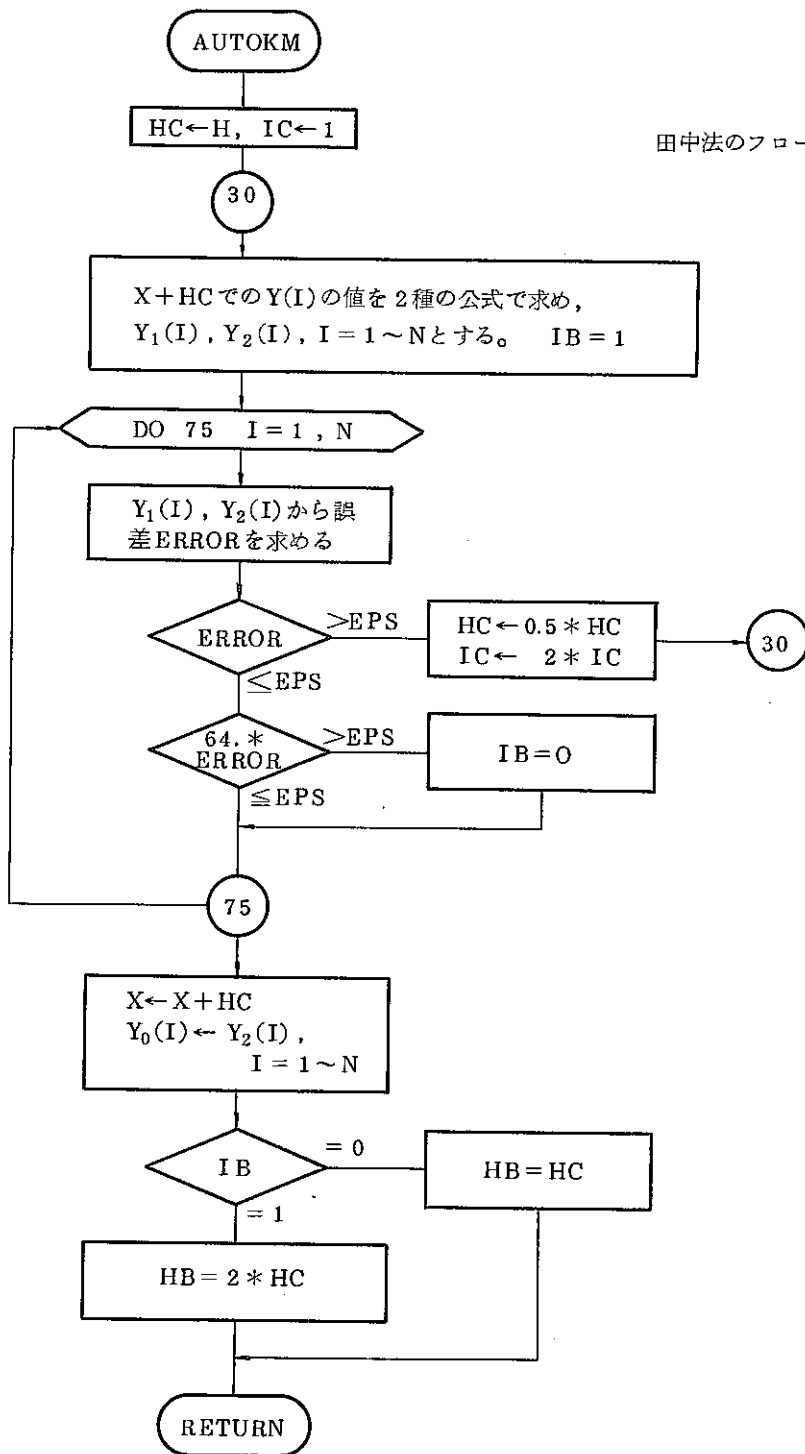
----- プリント出力のために変数PF, SPG2,  
DMP2, GAPの内容を前づめにして、一  
次元エリアに格納





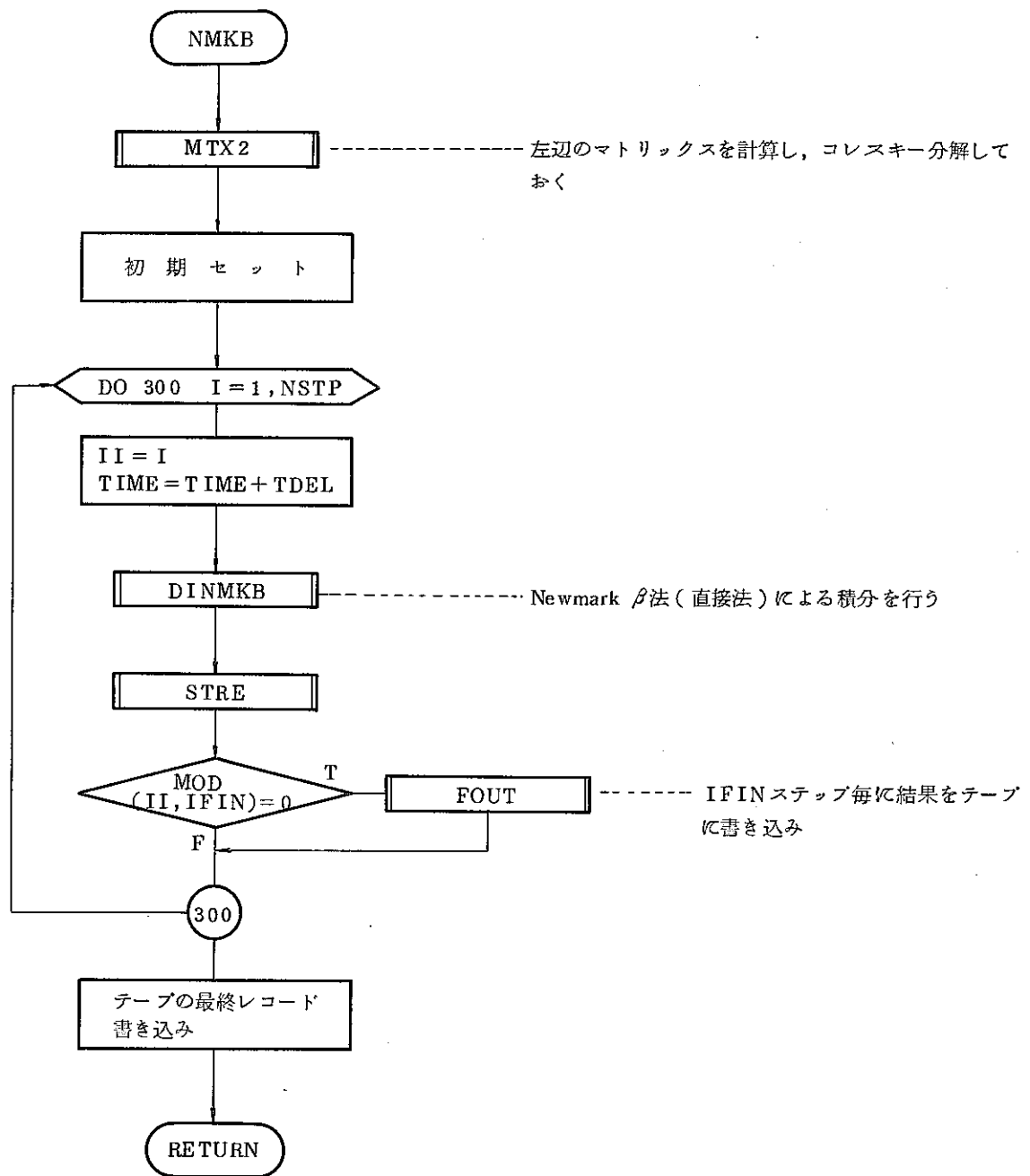


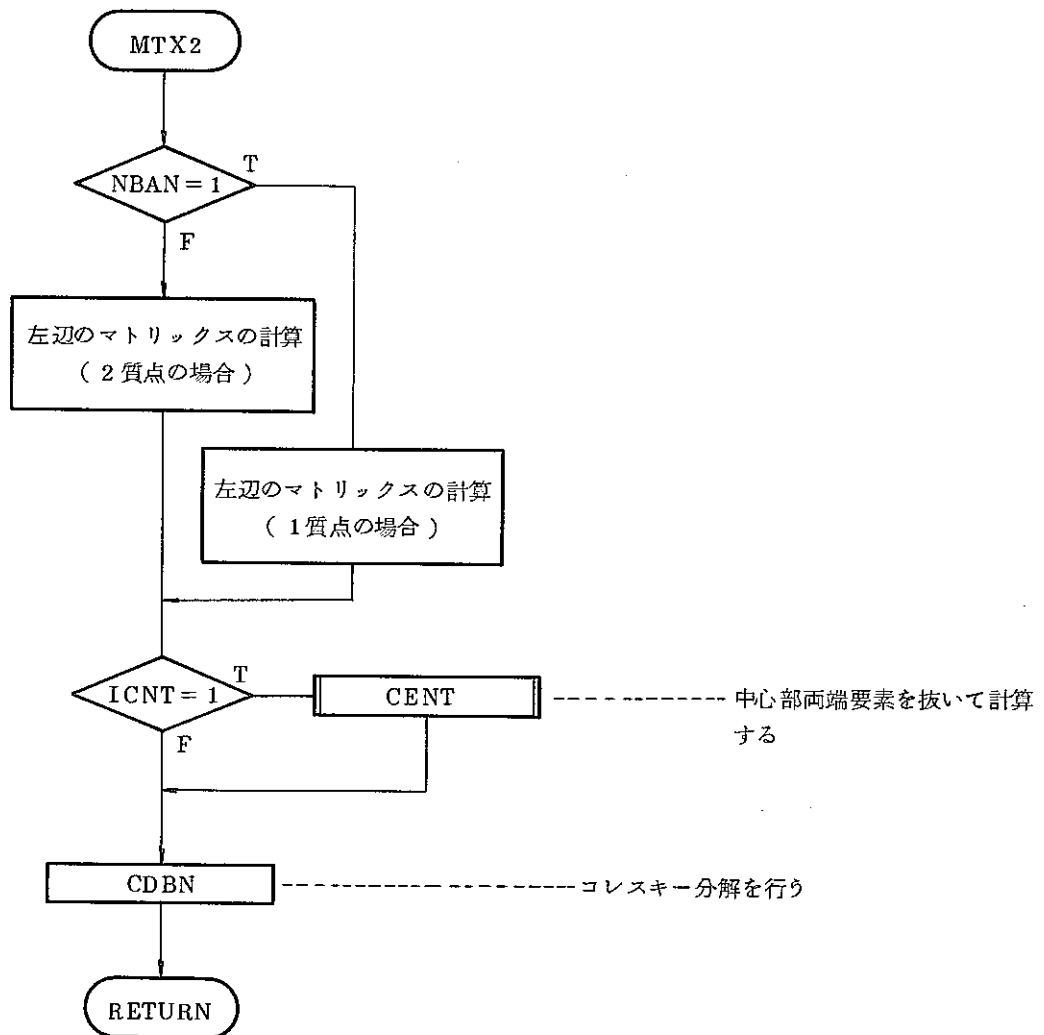


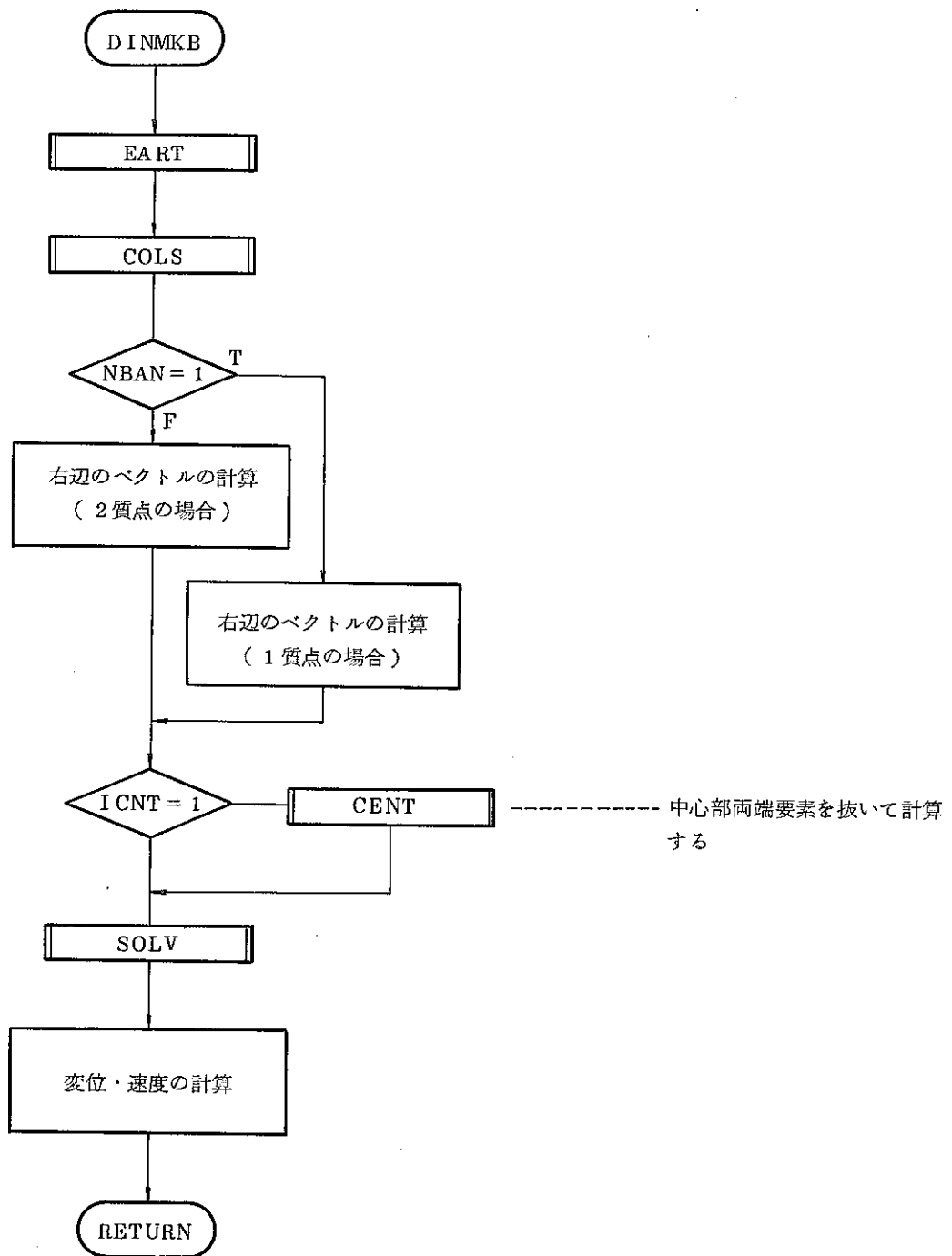


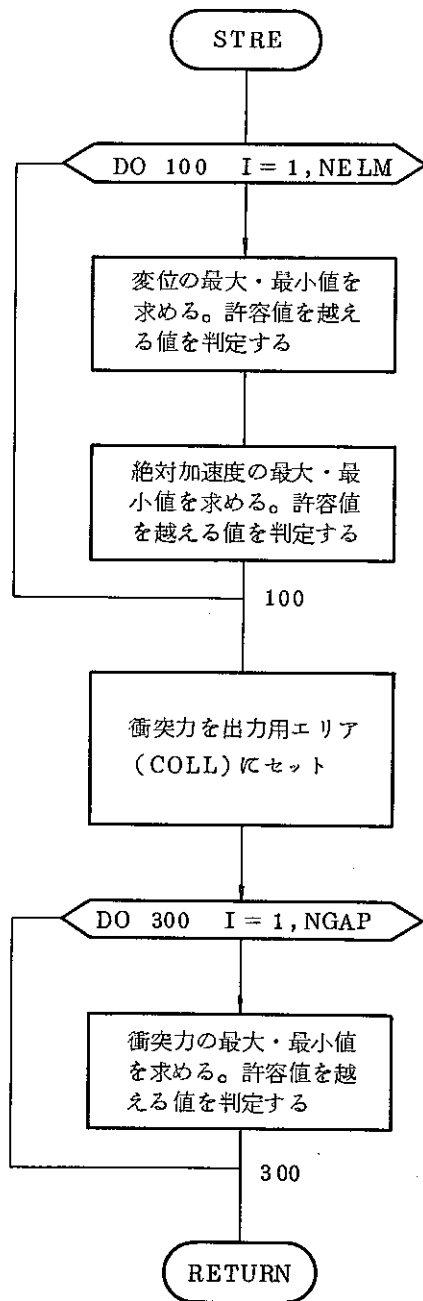
田中法のフローチャートもほぼ同じ

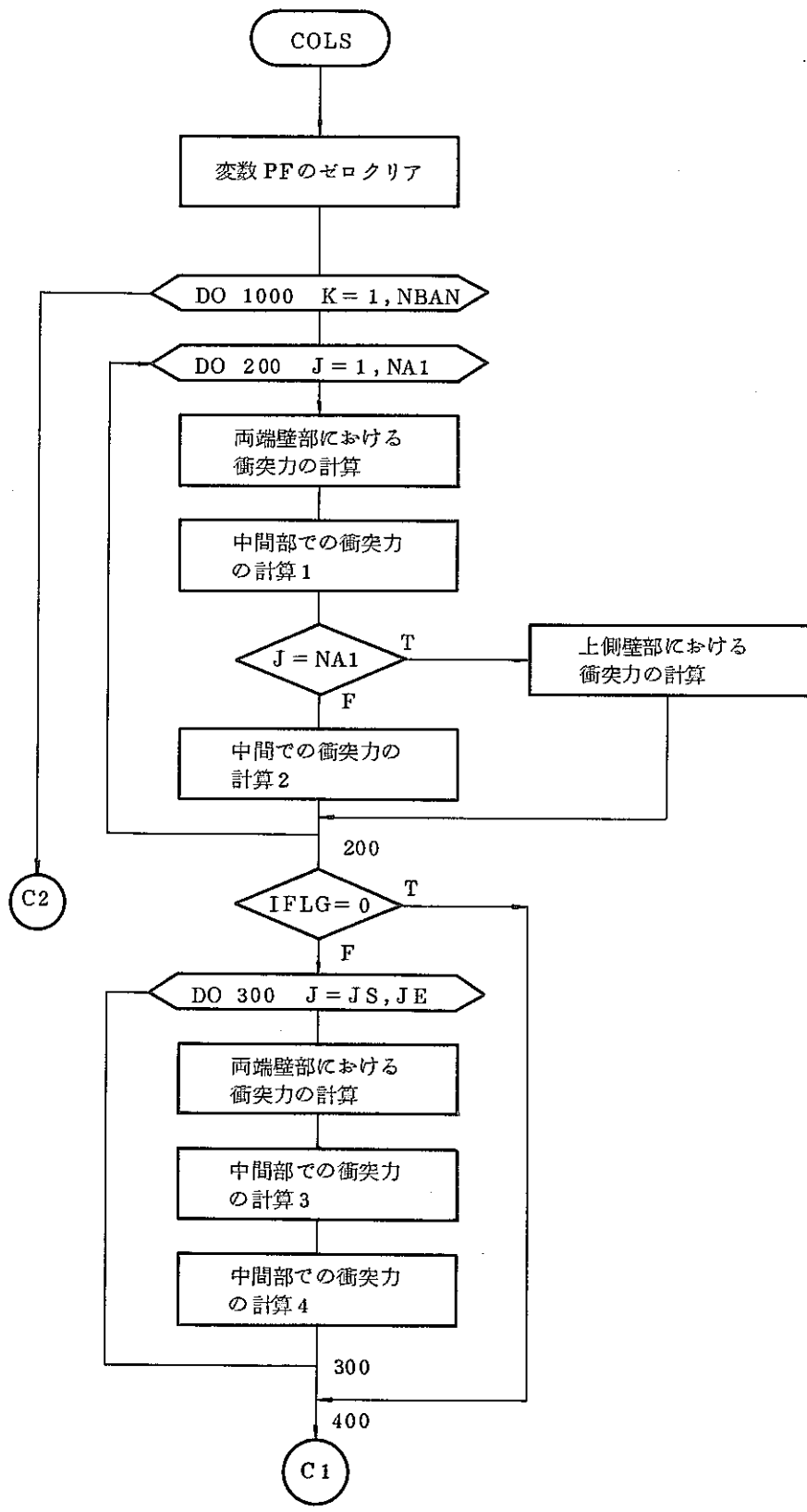


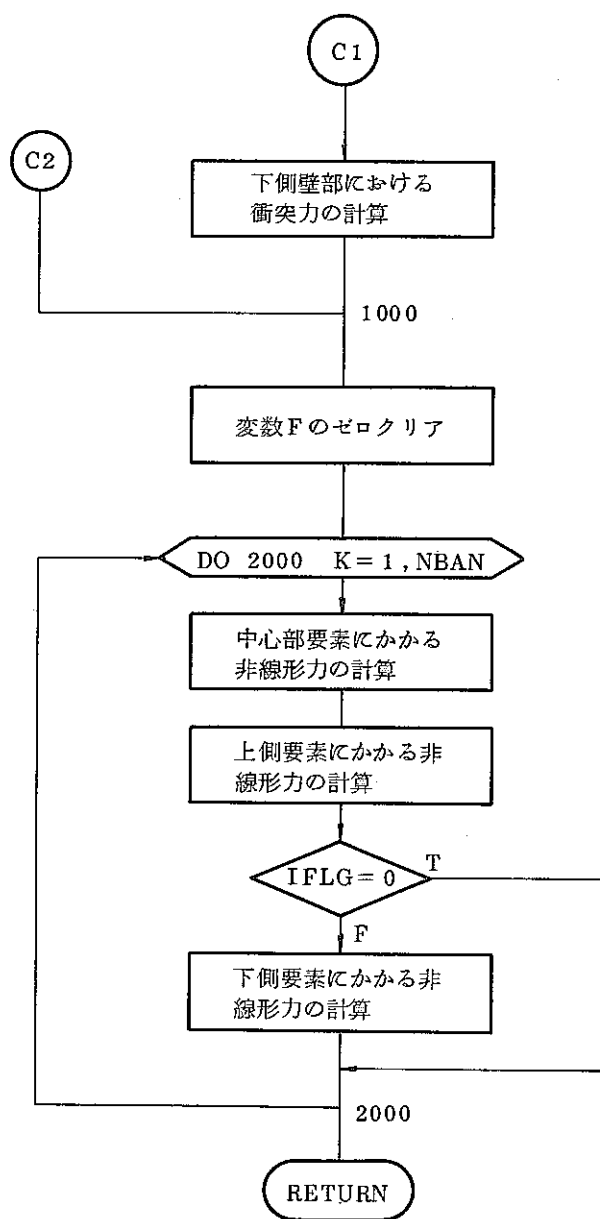


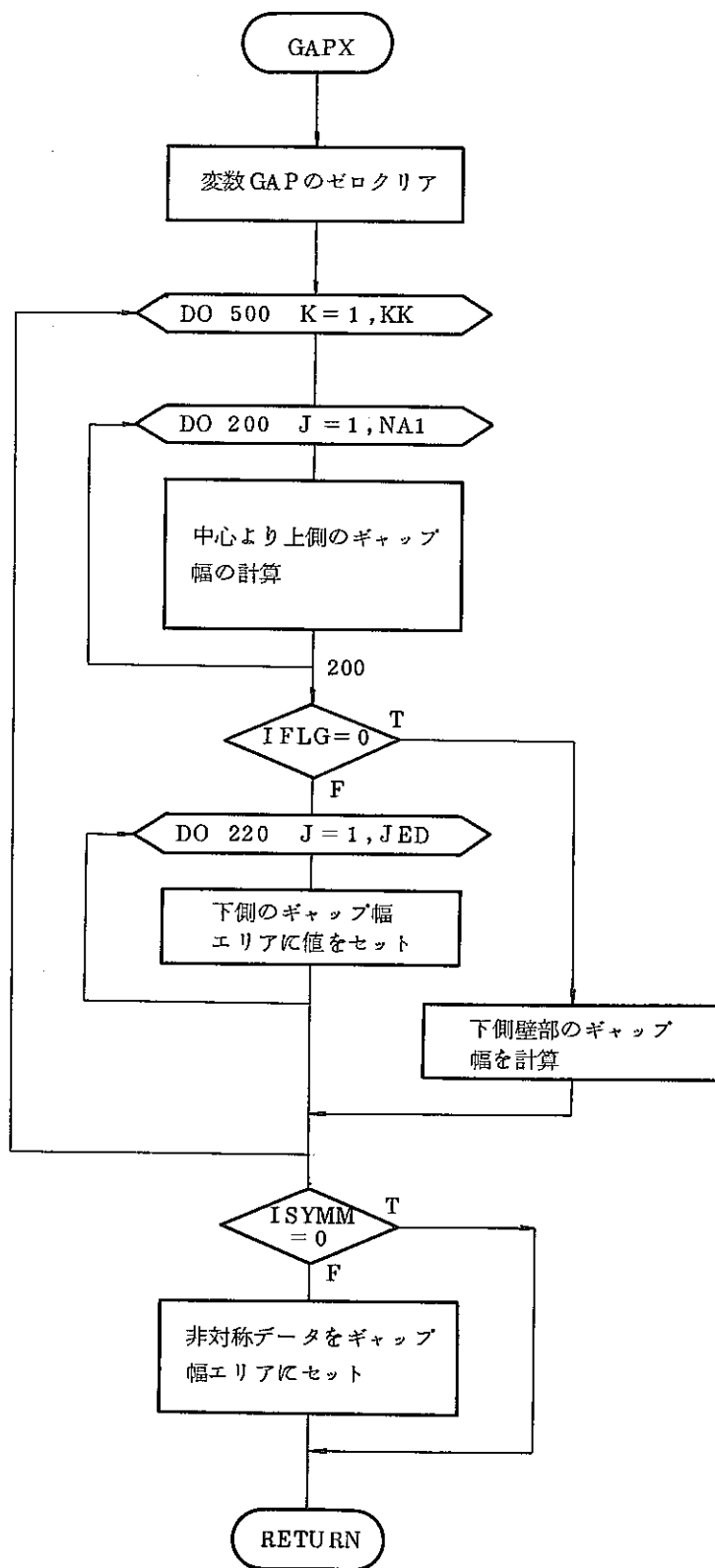


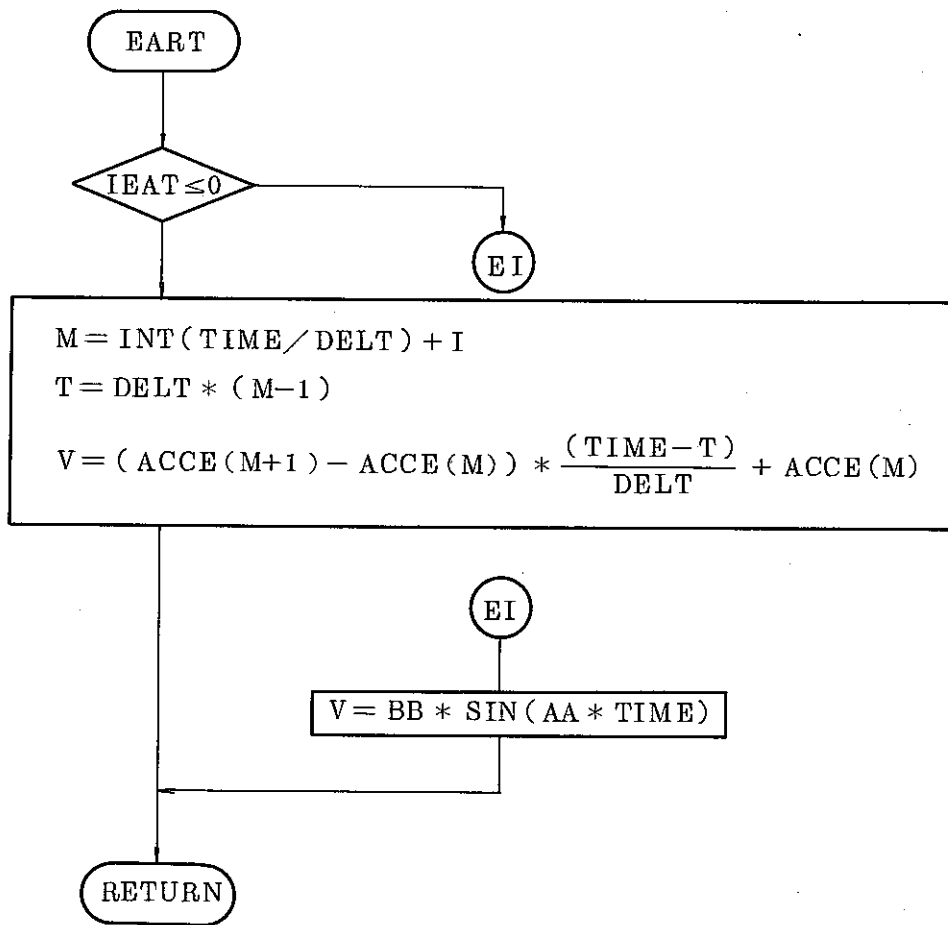




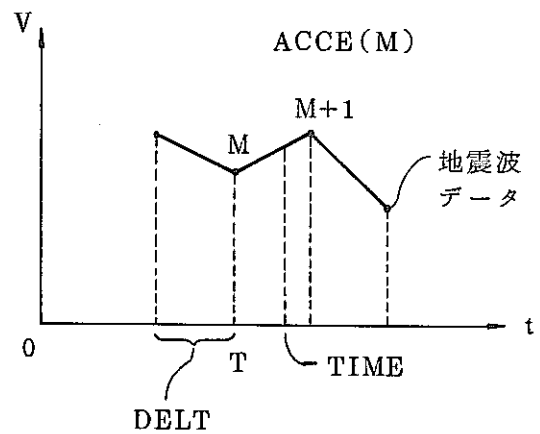








直線内挿の方法



V : 地震波加速度



### 3.3.3 解析コード(II)の入出力の概要

#### I 入力データ

本解析コードでは、時刻歴応答計算を行うために、次に述べるような種々の計算条件、構造条件、および各種の指令が必要である。ここで用いる単位は kg, mm, sec とした。ただし、詳細は付録1で述べる。

##### (1) 使用変数のエリア (Dimensionの大きさ) を指定する。

計算を行うための各変数のエリアを取っておかなければならない。ここでは、メイン・ルーチンで宣言する配列の大きさ、及びサブルーチン DZDT の配列の大きさを指定する。(プログラム自体の Dimension を変更)

##### (2) 入力カード

###### A. 計算制御用データ

- A-1: 計算制御用フラグ。  
積分法, 要素群の構成パターン, および出力パターンを指定する。
- A-2: タイトル用データ  
計算のタイトルを与える。

###### B. 要素群の構成形状を指定するデータ

- B-1: <B>のデータを表わすタイトル
- B-2: 要素の自由度, 要素群の大きさ(構成形状)を指定する。

###### C. 積分に関するデータ

- C-1: <C>のデータを表わすタイトル
- C-2: 数値積分に必要なデータ(ex, きざみ時間, ステップ数, 積分係数など)を指定する。

###### D. 質量に関するデータ

- D-1: <D>のデータを表わすタイトル
- D-2: 各質点の質量データを入力する。ただし, このデータ以下D~Mは中央列より半分のデータのみでよい。残り半分のデータは対称として自動的にデータが入力される。

E. Virtual Mass に関するデータ

- E-1: <E> のデータを表わすタイトル
- E-2: 各質点の Virtual mass データ。ただし、入力順には十分注意が必要 (付録 1 参照)

F. 地震波加速度に関するデータ (又は, sine 波加速度)

- F-1: <F> のデータを表わすタイトル
- F-2: 地震波加速度
- F-2': sine 波の加速度振幅, 振動数データ

G. 要素 (ラッパ管) の減衰定数

- G-1: <G> のデータを表わすタイトル
- G-2: 各質点間の減衰係数データ

H. 要素 (ラッパ管) のばね定数

- H-1: <H> のデータを表わすタイトル
- H-2: 各質点間のばね定数データ

I. 衝突部の減衰係数

- I-1: <I> のデータを表わすタイトル
- I-2: 各衝突部の減衰係数データ

J. 衝突部のばね定数

- J-1: <J> のデータを表わすタイトル
- J-2: 各衝突部のばね定数データ

K. 質点の絶対座標

各要素 (質点) 間のギャップ計算のためのデータ

- K-1: <K> のデータを表わすタイトル
- K-2: 壁面の要素との衝突点 (仮想点) の (x, y) 座標データ
- K-3: 各要素の重心の (x, y) 座標

L. 要素断面形状 (六角形断面の一辺の長さ)

各要素 (質点) 間のギャップ計算のためのデータ

- L-1: <L> のデータを表わすタイトル
- L-2: 六角形断面の一辺の長さデータ

M. ギャップ幅 ( KおよびLのデータを用いない場合 )

要素間のギャップ幅を直接入力する場合に必要。上記、K及びLを用いる場合は不要。

N. 非対象要素 ( 質点の個数 )

D～Mまでのデータは各要素の諸元が中央列を境として対称とみなし、上半分のデータのみを入力し、残り半分のデータは自動的に中央列に対して対称の要素のそれが与えられるようになっている。しかし、モデルの取り方によっては、中央列に対して要素群が互いに対称でない場合もあるので、ここでは、残り半分の要素のうち、対称でないものについての諸元を入力する。

- N-1: <N> のデータを表わすタイトル
- N-2: 追加すべき非対称データ ( 要素の個数, 衝突部の個数 )
- N-3: 要素に関するデータ ( 減衰係数, ばね定数 )
- N-4: 衝突部に関するデータ ( 減衰係数, ばね定数, ギャップ幅 )

O. 許 容 値

各部の応答に対する許容値を与え、応答と比較するためのデータ

- O-1: <O> のデータを表わすタイトル
- O-2: 許容値データ ( 変位, 加速度, 衝突力 )

P. 初 期 値

- P-1: <P> のデータを表わすタイトル
- P-2: 相対変位の初期値データ
- P-3: 相対速度の初期値データ
- P-4: ( 絶対 ) 加速度の初期値データ

II 出 力

上記 I で述べた様な入力データによって、計算が実行され、次に述べるようなデータが出力される。なお、単位は kg, mm, sec である。

II-1 出力ファイル

ファイルコード 10 に次のようなデータを出力する。

- (1) 計算に必要な入力データ全て。
- (2) 各要素の各時刻での時間, 相対変位, 絶対加速度, 衝突力。
- (3) 最終のデータとして, 計算ステップ数, 最終時間, 最小ステップ時間及び

各要素の応答（相対変位，相対加速度，絶対加速度，衝突力）の最終値

## II-2 出力プリント

- (1) 入力データ（カードイメージのまま全て出力）
- (2) 入力データ（各データ毎に整理して出力，ただし，計算されたギャップ幅出力）
- (3) 相対変位の最大・最小値，その発生する時刻，及び許容値に対する割合。
- (4) 絶対加速度の最大・最小値，その発生する時刻，及び許容値に対する割合。
- (5) 衝突力の最大・最小値，その発生する時刻，及び許容値に対する割合。

ファイルコード 10 には，設計に必要なデータがすべて納められているので，これを用いて，任意の出力形式に編集する事が可能である。

### 3.3.4 解析コード(I)用のプロッタ・ルーチンの入出力の概要

解析コード(I)によって得られた時刻歴データを時刻歴波形として図示し，視覚的に把握するためのプロッタ・ルーチンである。

#### I 入力データ

##### I-1 入力ファイル

解析コード(I)によって得られた時刻歴データ（MTファイル）より，ディスク・ファイルにコピーしたものを入力ファイルとする。

##### I-2 カード入力

カードからは，グラフ出力オプション，その他作図する際に必要な情報（データ）を入力する。

- |            |   |                                  |
|------------|---|----------------------------------|
| カード        | { | ①出力すべき応答の選択，データ入力の間隔の指定。         |
|            |   | ②質点を選択するか，あるいはすべて出力するかのオプション     |
| (1) No.1 : |   | ③対象とする節点の個数                      |
|            |   | ④グラフ横軸長さの指定                      |
|            |   | ⑤，⑥プロット開始及び終了時間の指定               |
|            |   | ⑦プロットのための時間きざみ幅                  |
| (2) No.2 : |   | 各応答の絶対値の最大値を指定                   |
|            | { | これは，縦軸の最大長さを最大値として定義するためのデータである。 |

(3) No.3： 選択する節点番号を指定する。(1~25個まで)

## II 出力データ

1ページには5節点までのプロット(時刻歴波)を行い、プロットすべき節点数を満たすまで改ページを行う。なお、プロットすべきデータ個数が2000点を越える場合には1 case 2000点の入出力の処理を繰り返し行う。

### 3.4 数値計算例

(1) 各諸元の数値例

本解析コードの数値計算例として次に述べるような入力データを用いた。

① 総質点数, バンド幅

$$N = 14, \text{ MBAN} = 1$$

(単列 7体モデル)

② 質量 ( $\text{kg} \cdot \text{sec}^2 / \text{mm}$ )

$$\begin{cases} m_2 = m_4 = \dots = m_{14} = 5.93 \times 10^{-3} \\ m_1 = m_3 = \dots = m_{13} = 3.97 \times 10^{-3} \end{cases}$$

③ Virtual mass ( $\text{kg} \cdot \text{sec}^2 / \text{mm}$ )

$$\begin{cases} \gamma_{22} = \gamma_{44} = \dots = \gamma_{1414} = 0.07 \\ \gamma_{11} = \gamma_{33} = \dots = \gamma_{1313} = 0.03 \end{cases}$$

④ 要素の減衰定数 ( $\text{kg} \cdot \text{sec} / \text{mm}$ )

$$\begin{cases} c_2 = c_4 = \dots = c_{14} = 3.31 \times 10^{-2} \\ c_1 = c_3 = \dots = c_{13} = 5.86 \times 10^{-3} \end{cases}$$

⑤ 要素のばね定数 ( $\text{kg} / \text{mm}$ )

$$\begin{cases} k_2 = k_4 = \dots = k_{14} = 2.10 \\ k_1 = k_3 = \dots = k_{13} = 19.1 \end{cases}$$

⑥ 衝突部の減衰定数 ( $\text{kg} \cdot \text{sec} / \text{mm}$ )

$$\begin{cases} C_2 = C_4 = \dots = C_{16} = 1.54 \\ C_1 = C_3 = \dots = C_{15} = 0.33 \end{cases}$$

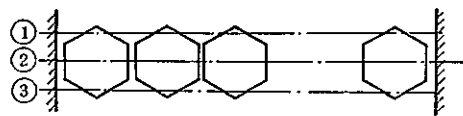
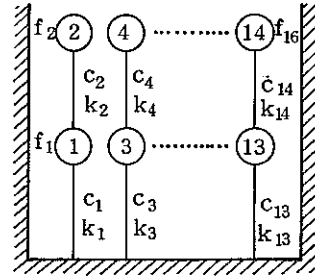
⑦ 衝突部のばね定数 ( $\text{kg} / \text{mm}$ )

$$\begin{cases} K_2 = K_4 = \dots = K_{16} = 1 \times 10^4 \\ K_1 = K_3 = \dots = K_{15} = 7 \times 10^2 \end{cases}$$

⑧ ギャップ幅 ( $\text{mm}$ )

(上部) (下部)

$$\begin{cases} \textcircled{1} G = 2.0 \\ \textcircled{2} G = 1.0 \\ \textcircled{3} G = 2.0 \end{cases} \quad \begin{cases} \textcircled{1} G = 2.0 \\ \textcircled{2} G = 1.0 \\ \textcircled{3} G = 2.0 \end{cases}$$



⑨ 許 容 値

相対変位  $1.5 \text{ (mm)}$ , 加速度  $4.9 \times 10^4 \text{ (mm/sec}^2\text{)}$ , 衝突力  $1.0 \times 10^3 \text{ (kg)}$

⑩ 数値積分のためのコントロールデータ

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{初期きざみ時間} \quad 1 \times 10^{-5} \text{ (sec)} \\ \text{最終時間又は最終ステップ} \quad 6 \text{ (sec)}, 400 \text{ (stop)} \\ \beta = 1.667 \times 10^{-1} \end{array} \right.$$

ここでは, Kutta-Mason 法を用いる。

⑪ 入力地震波加送度データ

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.5 \text{ G 正弦波} \\ \ddot{u} = 14700 \sin \omega \cdot t \quad (\text{mm/sec}^2) \\ \omega = 18.2112 \text{ (rad/sec)} \end{array} \right.$$

ただし, 正弦波はオプションで選択しているが, 生データにはエルセントロ地震波が読み込まれている。このため, データ出力には生データが書れているが, 実際の地震入力としては正弦波である。

(2) 計 算 結 果

計算結果は次のようなプリント出力であらわされる。また, 積分時間は Kutta-Mason 法により,  $T \doteq 0.3 \text{ sec}$  である。

OPTION FLAG

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
IOPT= 1 0 0 0 1 0 1 0 0 10 0 0 0 0 0 0 0 0 0

MASS NUMBER DATA

NH = 7 NA = 1 NBAN= 1 NBAN= 2 NEM= 14 NGAP= 72

ACCELERATION OF EARTHQUAKE

ISTP= 700 DELT= 1.000E-02

ACCE= 1.530E-04 -1.130E-04 -1.200E-04 1.280E-04 3.420E-04 2.590E-04 -1.300E-04 -6.130E-04 -9.260E-04 -8.740E-04
-5.790E-04 4.540E-04 1.291E-03 1.650E-03 1.154E-03 -2.170E-04 -2.070E-03 -3.783E-03 -4.780E-03 -4.749E-03
-3.746E-03 -2.188E-03 -6.840E-04 2.520E-04 4.350E-04 -2.100E-05 -9.720E-04 -2.473E-03 -4.669E-03 -7.455E-03
-1.026E-02 -1.229E-02 -1.300E-02 -1.237E-02 -1.078E-02 -8.605E-03 -5.928E-03 -2.697E-03 1.010E-03 4.853E-03
8.371E-03 1.133E-02 1.358E-02 1.511E-02 1.567E-02 1.489E-02 1.256E-02 9.078E-03 5.441E-03 2.706E-03
1.304E-03 8.080E-04 4.000E-04 -3.940E-04 -1.423E-03 -2.292E-03 -2.920E-03 -3.611E-03 -4.642E-03 -5.969E-03
-7.456E-03 -9.335E-03 -1.217E-02 -1.626E-02 -2.109E-02 -2.562E-02 -2.910E-02 -3.162E-02 -3.367E-02 -3.548E-02
-3.669E-02 -3.688E-02 -3.606E-02 -3.471E-02 -3.329E-02 -3.206E-02 -3.126E-02 -3.134E-02 -3.269E-02 -3.523E-02
-3.848E-02 -4.219E-02 -4.680E-02 -5.293E-02 -6.048E-02 -6.831E-02 -7.490E-02 -7.925E-02 -8.114E-02 -8.070E-02
-7.823E-02 -7.442E-02 -7.058E-02 -6.795E-02 -6.665E-02 -6.532E-02 -6.218E-02 -5.655E-02 -4.925E-02 -4.155E-02
-3.407E-02 -2.680E-02 -1.999E-02 -1.462E-02 -1.170E-02 -1.133E-02 -1.271E-02 -1.516E-02 -1.897E-02 -2.490E-02
-3.314E-02 -4.285E-02 -5.283E-02 -6.241E-02 -7.155E-02 -8.027E-02 -8.809E-02 -9.437E-02 -9.876E-02 -1.012E-01
-1.017E-01 -9.998E-02 -9.598E-02 -9.052E-02 -8.506E-02 -8.100E-02 -7.905E-02 -7.921E-02 -8.103E-02 -8.391E-02
-8.729E-02 -9.091E-02 -9.503E-02 -1.002E-01 -1.064E-01 -1.130E-01 -1.188E-01 -1.227E-01 -1.248E-01 -1.256E-01
-1.249E-01 -1.220E-01 -1.158E-01 -1.062E-01 -9.398E-02 -8.023E-02 -6.565E-02 -5.081E-02 -3.644E-02 -2.323E-02
-1.140E-02 -5.500E-04 9.773E-03 1.949E-02 2.820E-02 3.602E-02 4.394E-02 5.311E-02 6.369E-02 7.436E-02
8.321E-02 8.900E-02 9.173E-02 9.237E-02 9.221E-02 9.256E-02 9.472E-02 9.980E-02 1.082E-01 1.193E-01
1.311E-01 1.408E-01 1.456E-01 1.431E-01 1.325E-01 1.142E-01 8.955E-02 6.042E-02 2.838E-02 4.899E-03
-3.731E-02 -6.644E-02 -9.029E-02 -1.079E-01 -1.195E-01 -1.259E-01 -1.279E-01 -1.267E-01 -1.233E-01 -1.189E-01
-1.143E-01 -1.100E-01 -1.062E-01 -1.031E-01 -1.007E-01 -9.869E-02 -9.684E-02 -9.510E-02 -9.290E-02 -8.853E-02
-7.970E-02 -6.555E-02 -4.846E-02 -3.320E-02 -2.329E-02 -1.754E-02 -1.026E-02 4.536E-03 2.845E-02 5.744E-02
8.452E-02 1.034E-01 1.101E-01 1.027E-01 8.058E-02 4.586E-02 3.174E-03 -4.160E-02 -8.388E-02 -1.213E-01
-1.520E-01 -1.726E-01 -1.777E-01 -1.631E-01 -1.285E-01 -7.778E-02 -1.692E-02 4.812E-02 1.119E-01 1.690E-01
2.140E-01 2.428E-01 2.535E-01 2.464E-01 2.230E-01 1.860E-01 1.400E-01 9.163E-02 4.860E-02 1.737E-02
1.608E-03 1.993E-03 1.707E-02 4.407E-02 7.935E-02 1.189E-01 1.587E-01 1.956E-01 2.265E-01 2.483E-01
2.584E-01 2.552E-01 2.389E-01 2.110E-01 1.744E-01 1.326E-01 8.988E-02 5.057E-02 1.818E-02 -5.388E-03
-1.762E-02 -2.458E-02 -2.043E-02 -7.826E-03 1.162E-02 3.563E-02 6.209E-02 8.924E-02 1.147E-01 1.348E-01
1.449E-01 1.422E-01 1.275E-01 1.046E-01 7.858E-02 5.306E-02 3.035E-02 1.210E-02 -3.450E-04 -6.624E-03
-7.951E-03 -6.310E-03 -2.362E-03 2.724E-03 1.126E-02 2.250E-02 3.488E-02 4.655E-02 5.627E-02 6.299E-02
6.498E-02 6.018E-02 4.802E-02 3.077E-02 1.232E-02 -4.940E-03 -2.193E-02 -4.136E-02 -6.388E-02 -8.582E-02
-1.008E-01 -1.038E-01 -9.406E-02 -7.446E-02 -4.901E-02 -2.136E-02 4.556E-03 2.379E-02 3.156E-02 2.601E-02
9.572E-03 -1.301E-02 -3.847E-02 -6.682E-02 -9.905E-02 -1.330E-01 -1.619E-01 -1.767E-01 -1.715E-01 -1.467E-01
-1.081E-01 -6.304E-02 -1.759E-02 2.417E-02 5.927E-02 8.520E-02 9.998E-02 1.027E-01 9.359E-02 7.406E-02
4.709E-02 1.750E-02 -8.621E-03 -2.569E-02 -3.071E-02 -2.412E-02 -9.033E-03 1.064E-02 3.156E-02 5.147E-02
6.889E-02 8.267E-02 9.168E-02 9.462E-02 9.017E-02 7.749E-02 5.715E-02 3.182E-02 5.931E-03 -1.573E-02
-2.998E-02 -3.651E-02 -3.765E-02 -3.669E-02 -3.585E-02 -3.537E-02 -3.389E-02 -2.988E-02 -2.278E-02 -1.325E-02
-2.778E-03 6.750E-03 1.338E-02 1.557E-02 1.304E-02 7.244E-03 7.960E-04 -4.173E-03 -7.479E-03 -1.089E-02
-1.669E-02 -2.594E-02 -3.828E-02 -5.207E-02 -6.581E-02 -7.829E-02 -8.862E-02 -9.635E-02 -1.016E-01 -1.050E-01
-1.068E-01 -1.066E-01 -1.040E-01 -9.918E-02 -9.326E-02 -8.767E-02 -8.315E-02 -7.944E-02 -7.604E-02 -7.290E-02
-7.039E-02 -6.870E-02 -6.760E-02 -6.669E-02 -6.569E-02 -6.421E-02 -6.152E-02 -5.691E-02 -5.065E-02 -4.440E-02
-4.046E-02 -4.038E-02 -4.420E-02 -5.089E-02 -5.924E-02 -6.816E-02 -7.660E-02 -8.370E-02 -8.949E-02 -9.520E-02
-1.024E-01 -1.114E-01 -1.204E-01 -1.269E-01 -1.292E-01 -1.277E-01 -1.240E-01 -1.201E-01 -1.172E-01 -1.151E-01
-1.123E-01 -1.065E-01 -9.491E-02 -7.667E-02 -5.355E-02 -2.974E-02 -9.779E-03 3.594E-03 9.921E-03 9.996E-03



4.664E-03	-5.336E-03	-1.866E-02	-3.286E-02	-4.486E-02	-5.211E-02	-5.369E-02	-5.049E-02	-4.433E-02	-3.628E-02
-2.524E-02	-8.438E-03	1.623E-02	4.735E-02	7.954E-02	1.061E-01	1.227E-01	1.287E-01	1.256E-01	1.134E-01
9.092E-02	5.761E-02	1.632E-02	-2.719E-02	-6.687E-02	-9.326E-02	-1.180E-01	-1.228E-01	-1.100E-01	-8.057E-02
-4.014E-02	2.452E-03	3.932E-02	6.595E-02	8.033E-02	8.095E-02	6.634E-02	3.871E-02	-4.668E-03	-5.227E-02
-1.005E-01	-1.445E-01	-1.801E-01	-2.026E-01	-2.085E-01	-1.974E-01	-1.724E-01	-1.386E-01	-9.991E-02	-5.887E-02
-1.758E-02	2.119E-02	5.433E-02	7.938E-02	9.450E-02	9.764E-02	8.679E-02	6.188E-02	2.687E-02	-1.068E-02
-4.281E-02	-6.433E-02	-7.352E-02	-7.030E-02	-5.454E-02	-2.643E-02	1.208E-02	5.682E-02	1.026E-01	1.449E-01
1.798E-01	2.041E-01	2.147E-01	2.104E-01	1.927E-01	1.649E-01	1.304E-01	9.257E-02	5.530E-02	2.456E-02
7.367E-03	8.657E-03	2.835E-02	6.140E-02	1.007E-01	1.404E-01	1.770E-01	2.087E-01	2.333E-01	2.487E-01
2.528E-01	2.447E-01	2.247E-01	1.947E-01	1.588E-01	1.234E-01	9.556E-02	8.019E-02	7.808E-02	8.569E-02
9.759E-02	1.093E-01	1.187E-01	1.250E-01	1.275E-01	1.251E-01	1.164E-01	1.012E-01	8.055E-02	5.627E-02
3.007E-02	3.739E-03	-2.057E-02	-4.037E-02	-5.364E-02	-5.999E-02	-6.091E-02	-5.900E-02	-5.659E-02	-5.482E-02
-5.383E-02	-5.358E-02	-5.460E-02	-5.799E-02	-6.467E-02	-7.454E-02	-8.624E-02	-9.769E-02	-1.070E-01	-1.130E-01
-1.155E-01	-1.145E-01	-1.102E-01	-1.029E-01	-9.364E-02	-8.336E-02	-7.310E-02	-6.363E-02	-5.562E-02	-5.001E-02
-4.779E-02	-4.929E-02	-5.364E-02	-5.907E-02	-6.392E-02	-6.735E-02	-6.917E-02	-6.909E-02	-6.643E-02	-6.068E-02
-5.217E-02	-4.186E-02	-3.046E-02	-1.792E-02	-4.075E-03	1.013E-02	2.237E-02	3.018E-02	3.245E-02	2.976E-02
2.319E-02	1.317E-02	-2.880E-04	-1.617E-02	-3.166E-02	-4.303E-02	-4.759E-02	-4.477E-02	-3.557E-02	-2.131E-02
-3.185E-03	1.711E-02	3.683E-02	5.271E-02	6.247E-02	6.552E-02	6.250E-02	5.403E-02	4.043E-02	2.253E-02
2.824E-03	-1.478E-02	-2.650E-02	-3.054E-02	-2.764E-02	-2.031E-02	-1.742E-02	-3.224E-03	2.883E-03	6.278E-03
6.989E-03	5.490E-03	2.311E-03	-2.335E-03	-8.583E-03	-1.653E-02	-2.582E-02	-3.558E-02	-4.471E-02	-5.239E-02
-5.829E-02	-6.257E-02	-6.574E-02	-6.833E-02	-7.046E-02	-7.147E-02	-7.014E-02	-6.555E-02	-5.792E-02	-4.887E-02
-4.058E-02	-3.458E-02	-3.117E-02	-2.984E-02	-3.009E-02	-3.188E-02	-3.539E-02	-4.033E-02	-4.565E-02	-4.975E-02
-5.090E-02	-4.771E-02	-3.965E-02	-2.732E-02	-1.251E-02	2.373E-03	1.511E-02	2.429E-02	2.929E-02	2.998E-02
2.666E-02	2.029E-02	1.258E-02	5.366E-03	-1.080E-04	-3.506E-03	-4.858E-03	-3.905E-03	-1.780E-04	6.226E-03
1.413E-02	2.174E-02	2.781E-02	3.225E-02	3.560E-02	3.817E-02	3.957E-02	3.930E-02	3.727E-02	3.382E-02
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.

DATA FOR NUMERICAL INTEGRAL

TOEL= 1.000E-05    TSTR= 0.    TEND= 6.000E 00    NITR= 400    BETA= 1.667E-01    EPS = 1.000E-03

ALLOWABLE VALUE

PBSP= 1.500E 00    PACC= 4.900E 04    PCOL= 1.000E 03

COORDINATE OF IMAGENATIVE MASS POINT

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X0 =	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
Y0 =	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
X0 =	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
Y0 =	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
X0 =	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
Y0 =	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40

x0 = 0.      0.      0.      0.      0.      0.      0.      0.      0.      0.  
y0 = 0.      0.      0.      0.      0.      0.      0.      0.      0.      0.

## MASS POINT DATA

	EMAS	VMAS
1	3.970E-03	3.000E-02
2	5.930E-03	7.000E-02
3	3.970E-03	3.000E-02
4	5.930E-03	7.000E-02
5	3.970E-03	3.000E-02
6	5.930E-03	7.000E-02
7	3.970E-03	3.000E-02
8	5.930E-03	7.000E-02
9	3.970E-03	3.000E-02
10	5.930E-03	7.000E-02
11	3.970E-03	3.000E-02
12	5.930E-03	7.000E-02
13	3.970E-03	3.000E-02
14	5.930E-03	7.000E-02

MATERIAL CONSTANT OF RAPPA-KAM

	DMP1	SPG1	X	Y	SLH
1	5.860E-03	1.901E 01	0.	0.	0.
2	3.306E-02	2.103E 00	0.	0.	0.
3	5.860E-03	1.901E 01	0.	0.	0.
4	3.306E-02	2.103E 00	0.	0.	0.
5	5.860E-03	1.901E 01	0.	0.	0.
6	3.306E-02	2.103E 00	0.	0.	0.
7	5.860E-03	1.901E 01	0.	0.	0.
8	3.306E-02	2.103E 00	0.	0.	0.
9	5.860E-03	1.901E 01	0.	0.	0.
10	3.306E-02	2.103E 00	0.	0.	0.
11	5.860E-03	1.901E 01	0.	0.	0.
12	3.306E-02	2.103E 00	0.	0.	0.
13	5.860E-03	1.901E 01	0.	0.	0.
14	3.306E-02	2.103E 00	0.	0.	0.

CONSTANT VALUE OF COLLISION SECTION

	DMP2	SPG2	GAP	COLL
1	3.350E-01	7.000E 02	1.000E 00	0.
2	3.330E-01	7.000E 02	1.000E 00	0.
3	3.330E-01	7.000E 02	1.000E 00	0.
4	3.330E-01	7.000E 02	1.000E 00	0.
5	3.350E-01	7.000E 02	1.000E 00	0.
6	3.330E-01	7.000E 02	1.000E 00	0.
7	3.330E-01	7.000E 02	1.000E 00	0.
8	3.330E-01	7.000E 02	1.000E 00	0.
9	0.	0.	2.000E 00	0.
10	0.	0.	2.000E 00	0.
11	0.	0.	2.000E 00	0.
12	0.	0.	2.000E 00	0.
13	0.	0.	2.000E 00	0.
14	0.	0.	2.000E 00	0.
15	0.	0.	2.000E 00	0.
16	0.	0.	2.000E 00	0.
17	0.	0.	2.000E 00	0.
18	0.	0.	2.000E 00	0.
19	0.	0.	2.000E 00	0.
20	0.	0.	2.000E 00	0.
21	0.	0.	2.000E 00	0.
22	0.	0.	2.000E 00	0.
23	0.	0.	2.000E 00	0.
24	0.	0.	2.000E 00	0.
25	0.	0.	2.000E 00	0.
26	0.	0.	2.000E 00	0.
27	0.	0.	2.000E 00	0.
28	0.	0.	2.000E 00	0.
29	0.	0.	2.000E 00	0.
30	0.	0.	2.000E 00	0.
31	0.	0.	2.000E 00	0.
32	0.	0.	2.000E 00	0.
33	0.	0.	2.000E 00	0.
34	0.	0.	2.000E 00	0.
35	0.	0.	2.000E 00	0.
36	0.	0.	2.000E 00	0.
37	1.540E 00	1.000E 04	1.000E 00	0.
38	1.540E 00	1.000E 04	1.000E 00	0.
39	1.540E 00	1.000E 04	1.000E 00	0.
40	1.540E 00	1.000E 04	1.000E 00	0.
41	1.540E 00	1.000E 04	1.000E 00	0.
42	1.540E 00	1.000E 04	1.000E 00	0.
43	1.540E 00	1.000E 04	1.000E 00	0.
44	1.540E 00	1.000E 04	1.000E 00	0.
45	0.	0.	2.000E 00	0.
46	0.	0.	2.000E 00	0.
47	0.	0.	2.000E 00	0.
48	0.	0.	2.000E 00	0.
49	0.	0.	2.000E 00	0.
50	0.	0.	2.000E 00	0.
51	0.	0.	2.000E 00	0.
52	0.	0.	2.000E 00	0.
53	0.	0.	2.000E 00	0.
54	0.	0.	2.000E 00	0.
55	0.	0.	2.000E 00	0.
56	0.	0.	2.000E 00	0.
57	0.	0.	2.000E 00	0.

58	0.	0.	2.000E 00	0.
59	0.	0.	2.000E 00	0.
60	0.	0.	2.000E 00	0.
61	0.	0.	2.000E 00	0.
62	0.	0.	2.000E 00	0.
63	0.	0.	2.000E 00	0.
64	0.	0.	2.000E 00	0.
65	0.	0.	2.000E 00	0.
66	0.	0.	2.000E 00	0.
67	0.	0.	2.000E 00	0.
68	0.	0.	2.000E 00	0.
69	0.	0.	2.000E 00	0.
70	0.	0.	2.000E 00	0.
71	0.	0.	2.000E 00	0.
72	0.	0.	2.000E 00	0.

INITIAL VALUE

	DISI	VELI	ACCI	ABAC
1	0.	0.	0.	0.
2	0.	0.	0.	0.
3	0.	0.	0.	0.
4	0.	0.	0.	0.
5	0.	0.	0.	0.
6	0.	0.	0.	0.
7	0.	0.	0.	0.
8	0.	0.	0.	0.
9	0.	0.	0.	0.
10	0.	0.	0.	0.
11	0.	0.	0.	0.
12	0.	0.	0.	0.
13	0.	0.	0.	0.
14	0.	0.	0.	0.

RELATIVE DISPLACEMENT

NO.	MAXIMUM	TIME	PER.	MINIMUM	TIME	PER.
1	1.965E 01	0.	1.310E 01	-3.999E 00	0.	-2.666E 00
2	1.347E 01	0.	8.992E 00	-2.356E 00	0.	-1.570E 00
3	2.039E 01	0.	1.359E 01	-7.545E 00	0.	-5.030E 00
4	1.257E 01	0.	8.380E 00	-4.523E 00	0.	-3.015E 00
5	1.912E 01	0.	1.275E 01	-1.095E 01	0.	-7.303E 00
6	1.080E 01	0.	7.202E 00	-6.535E 00	0.	-4.357E 00
7	1.603E 01	0.	1.072E 01	-1.397E 01	0.	-9.313E 00
8	8.973E 00	0.	5.982E 00	-8.314E 00	0.	-5.543E 00
9	1.295E 01	0.	8.634E 00	-1.670E 01	0.	-1.113E 01
10	6.682E 00	0.	4.455E 00	-9.969E 00	0.	-6.646E 00
11	8.960E 00	0.	5.973E 00	-1.935E 01	0.	-1.290E 01
12	4.682E 00	0.	3.121E 00	-1.121E 01	0.	-7.474E 00
13	4.819E 00	0.	3.213E 00	-2.148E 01	0.	-1.432E 01
14	2.453E 00	0.	1.635E 00	-1.229E 01	0.	-8.193E 00



## ABSOLUTE ACCELERATION

NO.	MAXIMUM	TIME	PER.	MINIMUM	TIME	PER.
1	2.153E 04	2.387E-01	4.394E-01	-5.159E 04	2.387E-01	-1.053E 00
2	8.320E 04	0.	1.698E 00	-1.175E 05	0.	-2.399E 00
3	2.946E 04	0.	6.011E-01	-9.731E 04	0.	-1.986E 00
4	9.867E 04	0.	2.014E 00	-1.149E 05	0.	-2.344E 00
5	6.731E 04	0.	1.374E 00	-8.947E 04	0.	-1.826E 00
6	8.338E 04	2.387E-01	1.702E 00	-1.153E 05	0.	-2.354E 00
7	4.024E 04	0.	8.212E-01	-8.899E 04	0.	-1.816E 00
8	1.430E 05	2.387E-01	2.918E 00	-1.305E 05	0.	-2.664E 00
9	4.507E 04	0.	9.198E-01	-8.203E 04	0.	-1.674E 00
10	1.319E 05	2.387E-01	2.693E 00	-1.141E 05	0.	-2.329E 00
11	5.076E 04	0.	1.036E 00	-6.817E 04	0.	-1.391E 00
12	1.197E 05	2.387E-01	2.443E 00	-9.186E 04	0.	-1.875E 00
13	5.295E 04	0.	1.081E 00	-5.676E 04	0.	-1.158E 00
14	1.159E 05	2.387E-01	2.366E 00	-8.654E 04	0.	-1.766E 00

## COLLISION FORCE

NO.	MAXIMUM	TIME	PER.	MINIMUM	TIME	PER.
1	0.	2.387E-01	0.	-2.100E 03	1.102E-01	-2.100E 00
2	2.100E 01	1.577E-01	2.100E-02	-1.870E 03	1.194E-01	-1.870E 00
3	1.308E 01	1.551E-01	1.308E-02	-2.907E 03	2.302E-01	-2.907E 00
4	2.906E 01	1.494E-01	2.906E-02	-2.668E 03	2.190E-01	-2.668E 00
5	1.246E 01	1.639E-01	1.246E-02	-2.738E 03	2.106E-01	-2.738E 00
6	1.118E 01	1.529E-01	1.118E-02	-2.924E 03	2.007E-01	-2.524E 00
7	4.513E 01	1.182E-01	4.513E-02	-2.376E 03	1.930E-01	-2.376E 00
8	0.	1.732E-01	0.	-2.672E 03	1.873E-01	-2.672E 00
9	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
10	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
11	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
12	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
13	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
14	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
15	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
16	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
17	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
18	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
19	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
20	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
21	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
22	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
23	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
24	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
25	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
26	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
27	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
28	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
29	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
30	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.

31	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
32	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
33	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
34	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
35	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
36	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
37	6.770E-01	1.668E-01	6.770E-02	-1.358E-04	8.872E-02	-1.358E-01
38	2.491E-02	2.355E-01	2.491E-01	-1.307E-04	8.392E-02	-1.307E-01
39	7.072E-01	1.103E-01	7.072E-02	-1.215E-04	8.840E-02	-1.215E-01
40	2.714E-01	1.706E-01	2.714E-02	-1.167E-04	2.340E-01	-1.167E-01
41	9.732E-01	1.122E-01	9.732E-02	-1.296E-04	2.380E-01	-1.296E-01
42	5.124E-01	1.119E-01	5.124E-02	-1.424E-04	2.334E-01	-1.424E-01
43	1.033E-02	2.030E-01	1.033E-01	-1.381E-04	2.361E-01	-1.381E-01
44	0.	2.030E-01	0.	-1.480E-04	2.387E-01	-1.480E-01
45	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
46	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
47	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
48	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
49	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
50	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
51	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
52	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
53	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
54	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
55	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
56	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
57	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
58	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
59	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
60	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
61	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
62	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
63	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.

64	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
65	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
66	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
67	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
68	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
69	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
70	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
71	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.
72	0.	2.387E-01	0.	0.	2.387E-01	0.

## 第 4 章 結 言

本報告においては、高速炉「もんじゅ」の炉心構成要素群の地震時の時刻歴応答、特に、上部および中間部における変位量、衝突力等を求める解析コードの開発を行い、また、前年度開発した「高速炉炉心振動解析コード(I)」の I/O 整備として、要素群の挙動を視覚的に把握するためのプロッタ・ルーチンの作成を実施した。以下に本解析コードの特徴、開発の結果得た結論、および今後の課題について述べる。

- (1) 本解析コードは、前年度開発した解析コード(I)の理論を拡張したものであり、本質的にはガタを持つ振動系としての非線形常微分方程式を直接積分法によって解く計算コードである。
- (2) 構成要素群の数学モデルとして、まず、各構成要素を上部及び中間部の衝突を考慮した等価な 2 質点系モデルでおきかえ、次に、群全体を要素同士の相互干渉（衝突力、流体力）を考慮した複数列モデルを考えた。この数学モデルにおいては、列数及び壁との境界条件を任意に選ぶ事ができる。（前回の解析コード(I)では 3 列まで）なお、この数学モデルの最終的な妥当性については、今後行われる実物スケール模型実験により、検討および検証される必要がある。
- (3) 上記(2)で述べたような数学モデルを設定することによって、任意の構成条件（境界条件）での各要素の上部及び中間部の地震時の応答（たわみ量、衝突力等）を評価する事ができる。
- (4) 本解析コードの数値積分法においては、Newmark- $\beta$ 法、改良 Kutta-Mason 法及び、田中法をオプションで選択できるようにし、数値積分上の誤差の check を行いやすくした。また、改良 Kutta-Mason 法及び田中法においては、自動メッシュ(可変メッシュ)法を採用する事によって数値積分上の計算時間を短縮する事が可能である。
- (5) 解析コード(I)用のプロッタ・ルーチンにおいては各要素の応答（加速度、相対速度、相対変位、衝突力など）の時刻歴波形を描く事ができ、全体的な挙動を視覚的、定量的に把握する事が可能となった。
- (6) 今年度より段階的に実施される 4 体実スケール模擬燃料集合体振動実験、29 体単列振動実験及び 37 体群振動実験結果を本解析コードに必要な諸元の推定あるいは決定のために利用すると共に、本解析コードの妥当性を検証して行く必要がある。

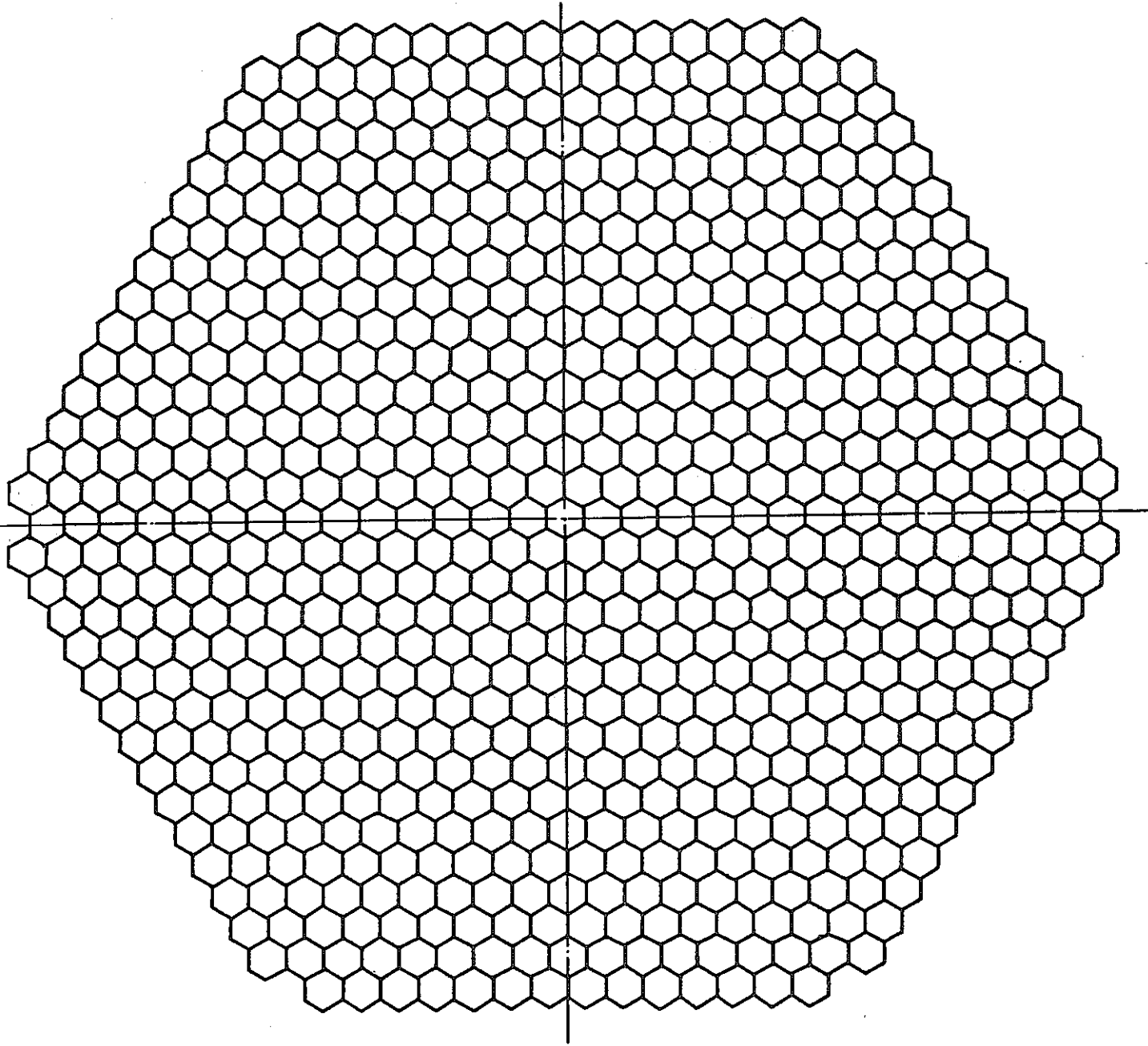


Fig. 1.1 Arrangement of Core Assemblies  
(Horizontal Cross Section)

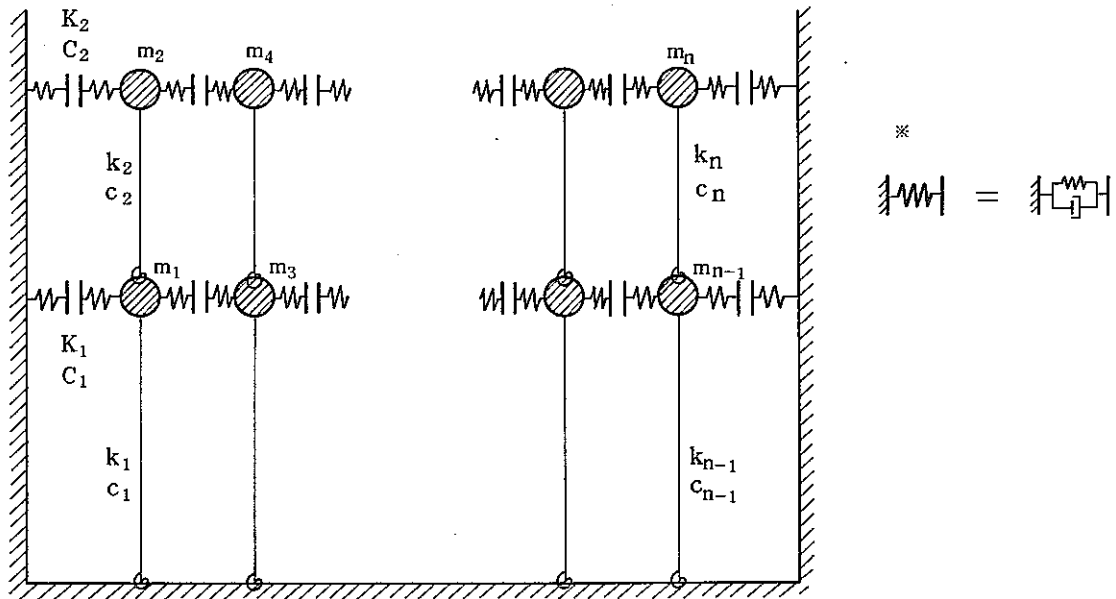


Fig. 2.1 Dynamic Model of Core Assemblies  
(Vertical Cross Section)

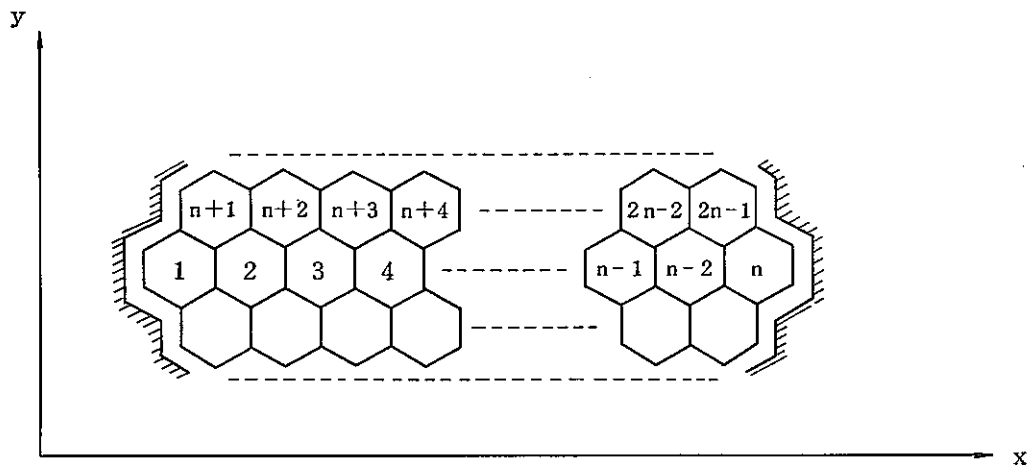


Fig. 2.2 Multi-Rows Model of Core Assemblies  
(Horizontal Cross Section)

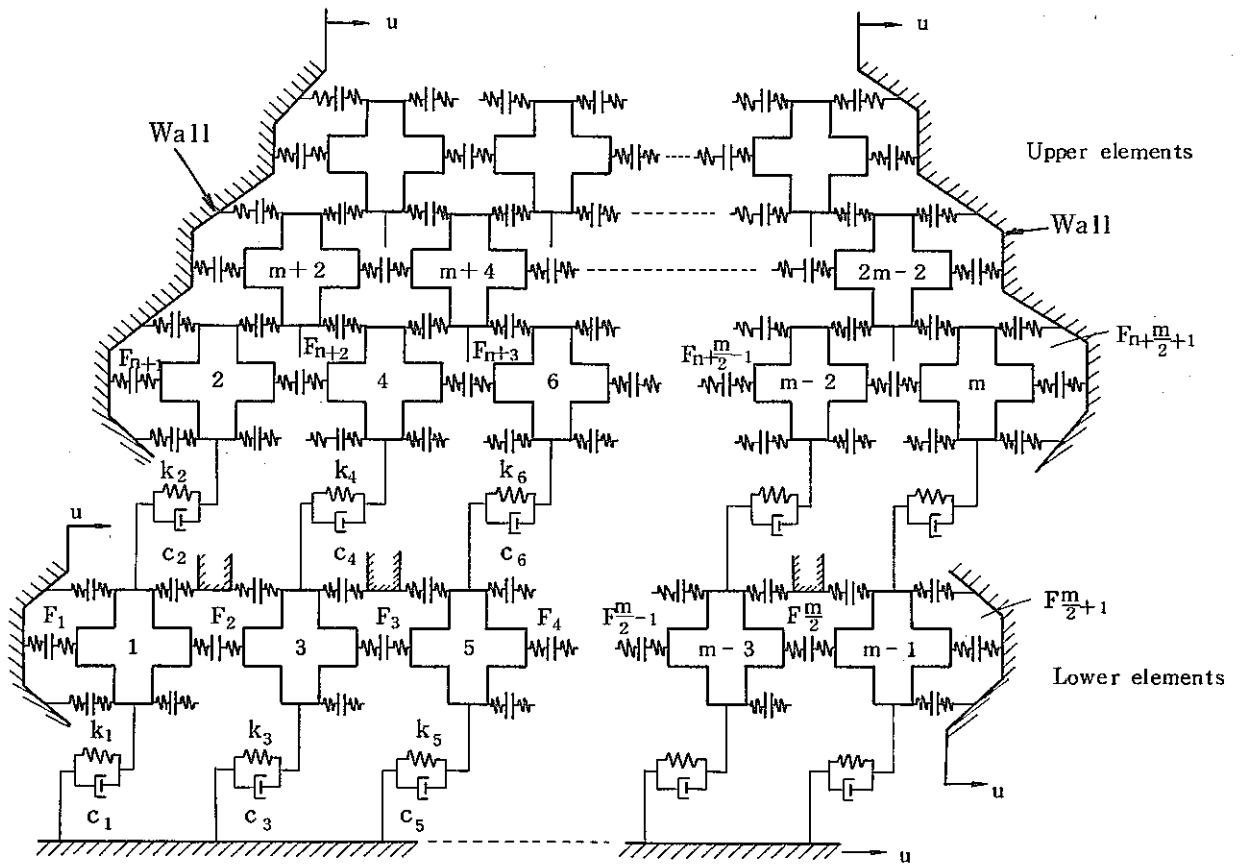


Fig. 2.3 Dynamic Model of Core Assemblies  
( Solid Model )



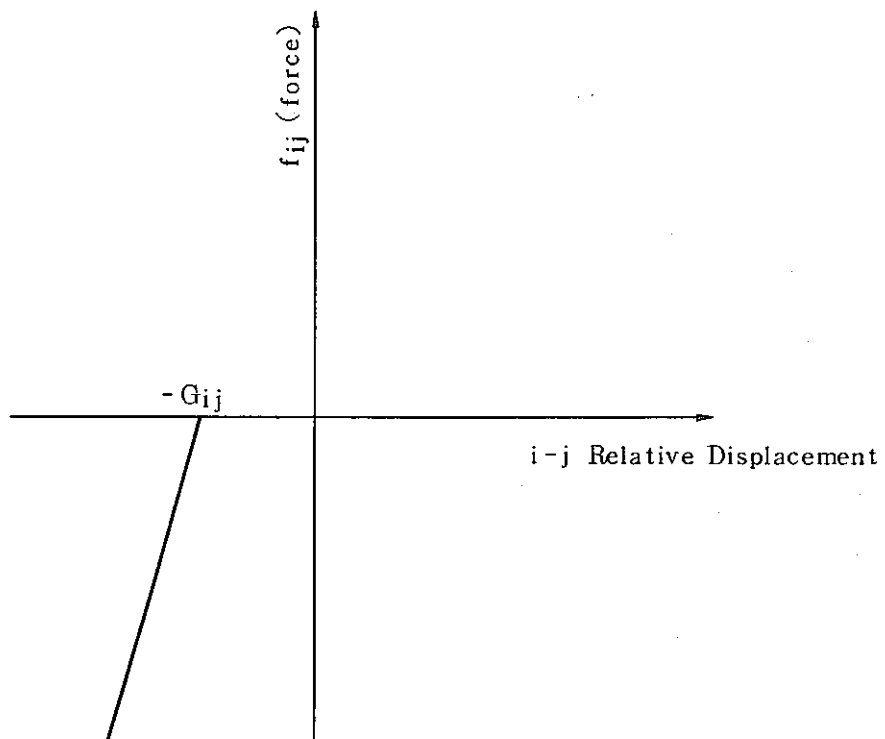


Fig. 2.4 Load - Deflection Diagram of Nonlinear Function  $f_{ij}$  at Collision Point  $i-j$

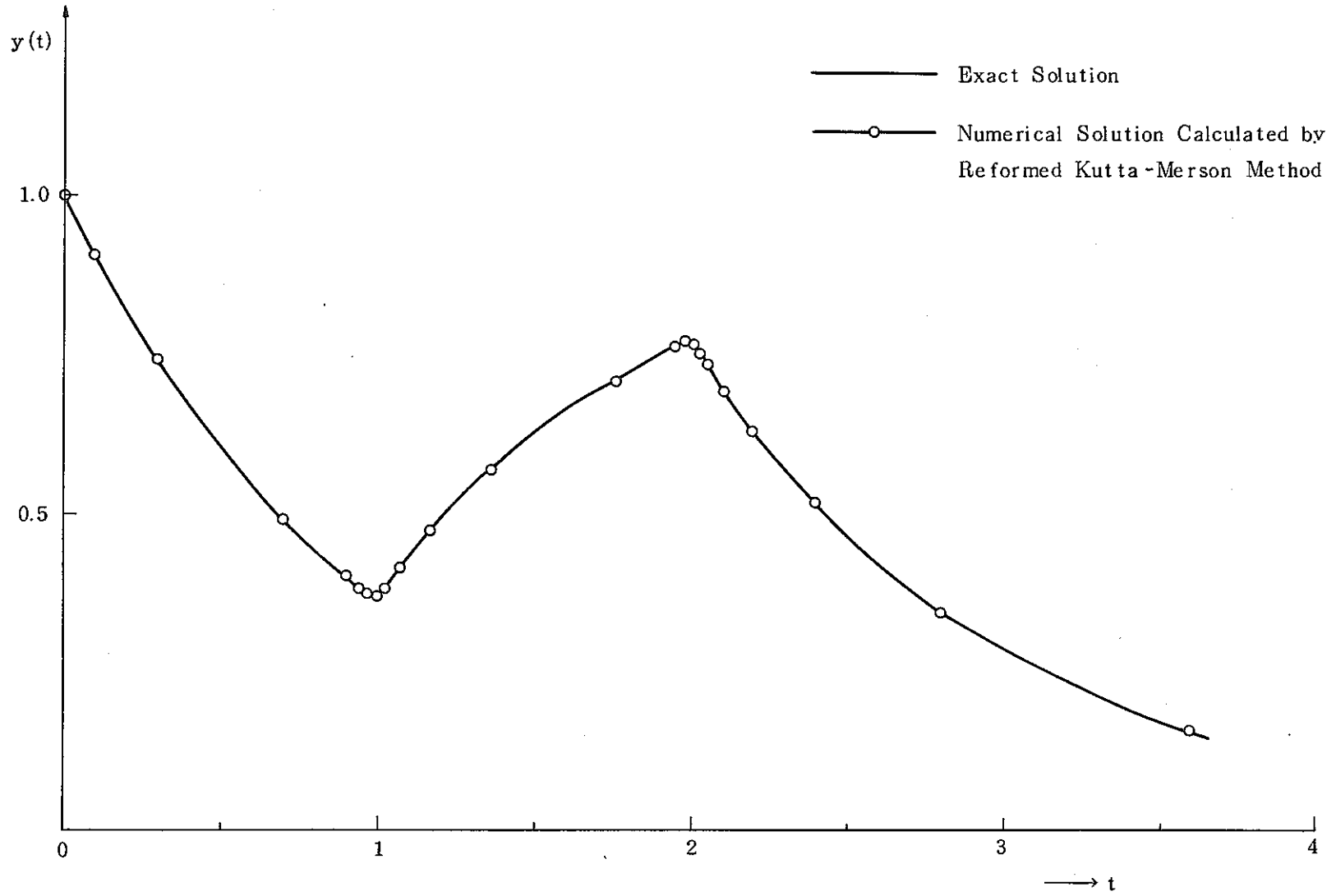


Fig. 3.1 Numerical Example Calculated by Reformed Kutta-Merson Method  
( Comparison with Exact Solution )

## 謝 辞

本研究の遂行にあたって，多大なる御協力を頂いた動力炉・核燃料開発事業団高速増殖炉開発本部 主任研究員 望月恵一氏，福島恒和氏に謹んで感謝の意を表します。

## 記号表

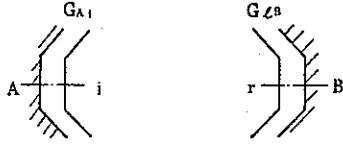

[C]	減衰係数マトリクス
C	2自由度系の減衰マトリクス
C'	質点 $i, j$ 間の減衰マトリクス
C''	質点 $i$ - 支持板間の減衰マトリクス
$c_{ij}$	質点 $i, j$ 間の減衰係数
$c_{oi}$	質点 $i$ - 支持板間の減衰係数
$C_{Ai}$	壁 (左側) と質点 $i$ との衝突点の等価減衰係数
$C_{ij}$	質点 $i, j$ 間の衝突点の等価減衰係数
$C_{rB}$	質点 $r$ と壁 (右側) との衝突点の等価減衰係数
{f}	衝突力ベクトル
$f_{Ai}$	壁 (左側) と質点 $i$ との衝突点の衝突力関数
$f_{ij}$	質点 $i, j$ 間の衝突点の衝突力関数
$f_{rB}$	質点 $r$ と壁 (右側) との衝突点の衝突力関数
$F_i$	質点 $i$ にかかる合成衝突力
$G_{Ai}$	壁 (左側) と質点 $i$ とのギャップ幅
$G_{ij}$	質点 $i, j$ 間のギャップ幅
$G_{rB}$	質点 $r$ と壁 (右側) とのギャップ幅
[K]	剛性マトリクス
K'	質点 $i, j$ 間の剛性マトリクス
K''	質点 $i$ - 支持板間の剛性マトリクス
$k_{ij}$	質点 $i, j$ 間のばね定数
$k_{oi}$	質点 $i$ - 支持板間のばね定数
K	2自由度系の剛性マトリクス
$K_{Ai}$	壁 (左側) と質点 $i$ との衝突点の等価ばね定数
$K_{ij}$	質点 $i, j$ 間の衝突点の等価ばね定数
$K_{iB}$	質点 $r$ と壁 (右側) との衝突点の等価ばね定数
[m]	質量マトリクス
$m_i$	構成要素 (質点) の等価質量

$\{P\}$	入力項の係数マトリクス
$t$	時刻
$\Delta t$	数値積分における時間増分
$u$	入力変位
$\ddot{u}$	入力加速度
$\{\ddot{u}\}$	入力加速度ベクトル
$x_i$	質点 $i$ の絶対変位
$\dot{x}_i$	質点 $i$ の絶対速度
$\ddot{x}_i$	質点 $i$ の絶対加速度
$\beta$	数値積分法・ニューマーク $\beta$ 法の係数
$\{\delta\}$	相対変位ベクトル
$\delta_i$	質点 $i$ の入力 $u$ に対する相対変位
$\{\dot{\delta}_i\}$	相対速度ベクトル
$\dot{\delta}_i$	質点 $i$ の入力 $\dot{u}$ に対する相対速度
$\{\ddot{\delta}_i\}$	相対加速度ベクトル
$\ddot{\delta}_i$	質点 $i$ の入力 $\ddot{u}$ に対する相対加速度
$r_{ij}$	質点 $i, j$ に関する流体力係数 (Virtual mass)

## 参 考 文 献

- 1) T.J. Moran, ANL-CT-76-33, June, 1976
- 2) “炉心構造物の振動性に関する試験(受託研究)”, SJ-201 73-31, 東芝,  
1973-10
- 3) H. Tomita, et, al., JAPENR-174, May, 1974
- 4) “HTGR CORE TEST(垂直断面振動解析コードCOLLAN2-V)”, 1976-4,  
EPDC-MISM
- 5) 座古ほか, 機械学会講演論文集, No. 780-14, P. 29
- 6) “HTGR CORE TEST(水平断面振動解析コードCOLLAN2-H)”, 1977-3,  
EPDC-MISM
- 7) “高速炉炉心振動解析コードの開発(1)(受託研究)”, SJ-201 79-31,  
東芝, 1979-4
- 8) 戸川隼人, “有限要素法による振動解析”, サイエンス社, P. 34
- 9) 戸川隼人, “マトリクスの数値計算”, オーム社

正 誤 表

頁	行	誤	頁	行	訂 正
I	㉔12	数字アルゴリズム	I	㉔12	数学アルゴリズム
6	㉔10	$C_{01} + C_{12}$	6	㉔10	$C_{01} + C_{12} - C_{12}$
6	㉔18		6	㉔18	
9	㉔9	……部分では $t$ を小さくし、 …	9	㉔9	……部分では $t$ を小さくし…
40	㉔8	入力地震波加速度データ	40	㉔8	入力地震波加速度データ
61	㉔10	……質点 $r$ ……	61	㉔10	……質点 $r$ ……
61	㉔14	同上	61	㉔14	同上
61	㉔12	同上	61	㉔12	同上
61	㉔3	$K_{1B}$ 質点 $r$ と壁 ( ……	61	㉔3	$K_{rB}$ 質点 $r$ と壁 ( ……