

JAERI-M

5981

GTOROTO-3, -4: グラフィック・ディスプレイ
によるブロック状炉心の地震シミュレーション・
プログラム

1975年2月

幾島 毅・小沼 吉男・中村 康弘

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

G TOROTO-3, 4 : グラフィック・ディスプレイによる
ブロック状炉心の地震シミュレーション・プログラム

日本原子力研究所動力炉開発管理室

幾島 毅・小沼吉男⁺・中村康弘⁺

(1975年1月23日受理)

ブロック状炉心の地震応答シミュレーション解析のために計算プログラムG TOROTO-3および4が作成された。この計算プログラムの特徴はつぎのとおりである。

- (1) 地震時の炉心の挙動をグラフィック・ディスプレイのCRT面上に表示することができる。これによって炉心の挙動を視覚によってとらえることができる。
- (2) ライトペンを使用して図形表示に関するパラメータの変更ができる。
- (3) ライトペンおよび変更スイッチによって処理ルーチンの変更ができる。
- (4) シミュレーション図形の表示は自動的に進行するが、進行中に一時停止をして、その時点でCRT面の図形をプロッタヘッド・コピーとして取出すことができる。グラフィックの表示は、予め定めた時刻から再び開始することができる。
- (5) 図形表示を速く行うために、ディスプレイ語列の形でディスクに図形情報として保存することができる。

GTOROTO-3, -4: Seismic Simulation Program Using
Graphic Display for Block-type Fuel HTGR Core

Takeshi IKUSHIMA

Office of Power Reactor Projects, Tokai, JAERI

Yoshio ONUMA and Yasuhiro NAKAMURA

Division of Reactor Engineering, Tokai, JAERI

(Received January 23, 1975)

Computer program GTOROTO-3, -4 has been prepared for the simulation of the seismic response of a block-type fuel HTGR core, using a graphic display. Features of the program are as follows:

- (1) Behavior of the block-type fuel HTGR core in earthquake can be represented on a CRT of the graphic display.
- (2) Parameters for the graphic representation can be changed with a light-pen.
- (3) Routines of the computing scheme can be changed with the light-pen or an alteration switch.
- (4) The simulation pictures are presented automatically. The hardcopy can be fixed on a plotter by stopping the progress of simulation pictures. The graphic representation can be restarted according to the predetermined program.
- (5) Information of graphic pictures can be stored using the assembled language on a disk for obtaining a rapid representation.

目 次

1. 緒 言	1
2. 解析対象の構造	3
3. 地震応答解析	6
4. グラフィック・ディスプレイによるシミュレーション	9
5. グラフィック・システム	15
6. グラフィック・サブルーチン・パッケージ：PGS	21
7. プログラムの構成	22
8. 入力および出力形式	26
9. 結 言	29
10. 参考文献	30

1. 緒 言

一昨年（1979年）のエネルギー危機以来、エネルギー源の多方面確保が考慮されつつあるが、当面は石油を主軸とした化石燃料以外に最も期待されているものは原子力エネルギーであろう。この原子力エネルギーを得るには、現在では水を減速材および冷却材とする軽水炉による発電が主流であるが、核燃料経済の観点から高速増殖炉が1990年代前半から、さらに資源および環境問題が大幅に解決できる核融合炉が今世紀末から21世紀初めにかけて、それぞれ実用化が予想されている。それまでの間は軽水炉および最近、注目されている高温ガス冷却原子炉（High Temperature Gas-cooled Reactor: HTGR）による核エネルギーが主軸となる。

高温ガス炉が注目されるようになったのは、この炉が環境へ放出する熱および放射性物質が他の在来の原子炉に比較して少ないことが予想されること、高温の熱を製鉄業および化学工業の分野でカスケード式に多目的利用をして熱効率の向上が計れること、およびウラン以外のトリウム資源を燃料として利用できることに起因している。

このように、この炉は種々の長所を持っているが、炉心が高温（最高で1200～1350℃）になるために、炉心は黒鉛ブロックを主要構成材料として製作されている。さらに、この黒鉛ブロック間にはすきまがあり、炉心は一体的に組まれていないから、予想される最大地震時に炉心が健全であるか否かが明らかにされていない。このため、振動解析および振動実験によって炉心の耐震性を確認する必要がある、種々の試みがなされつつある。

積み重ねられた黒鉛ブロックは上下方向には、ダウエルとピンによって連結されているが、横方向にはすきまがあり、隣り合う黒鉛ブロックは地震時に衝突を繰り返す行なりことである。この条件に従って振動方程式を作れば、明らかにこの中には、連成振動と衝撃振動が含まれる。衝撃振動は明らかに非線形振動であり、これは古くて新しい問題である。

振動方程式を解いて得られた結果をよりよく理解するために種々の図形処理が試みられており(1), (2), (3), 武藤と内田(4)によって、COMを使用した原子力発電所のシミュレーション解析についての解説などがある。筆者らは1972年から(5), (6), (7) 高温ガス炉炉心のシミュレーション解析をグラフィック・ディスプレイを使用して行ってきた（Photo 1）。そしてこれらの手法が耐震解析を行う上で非常に有効であると考えられるので、ここにグラフィック・システムを完成したので報告する。

J A E R I - M 5 9 8 1

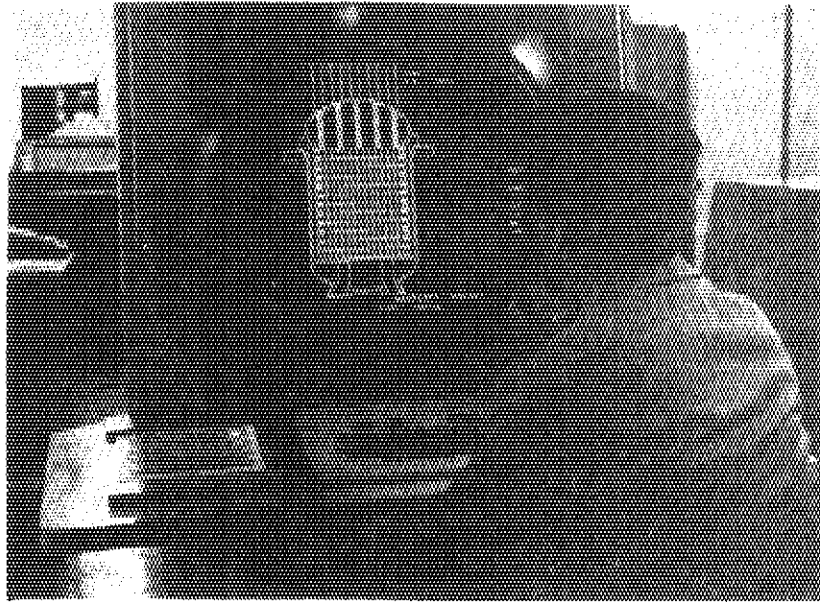


Photo 1

2. 解析対象の構造

多数の黒鉛ブロックから構成された高温ガス炉の構造は実用規模の発電炉⁽⁸⁾は Fig. 1 に、日本原子力研究所において設計研究が進行中の多目的高温ガス実験炉⁽⁹⁾は Fig. 2 に示すようなものである。Fig. 1 に従って構造を説明する。原子炉容器はプレストレスト・コンクリート (PCRVT) によって作られ、この内部に炉心、蒸気発生器および循環機を配置している。炉心は黒鉛のブロックから構成されており、このブロックの個数は実験炉のように小さな炉心でも数千個、実用炉では一万個近くにもなる。

黒鉛ブロックは上部では耐熱合金製の流量調節用のブロックによって、底部では炉心支持板によって拘束されている。炉心外周の炉心円筒に接する黒鉛ブロックは、この炉心円筒に拘束されているが、中間のブロックはすでに述べたように横方向にはすきまが存在する。このような構造の振動方程式はどのようになるであろうか、つぎに考えてみることにする。

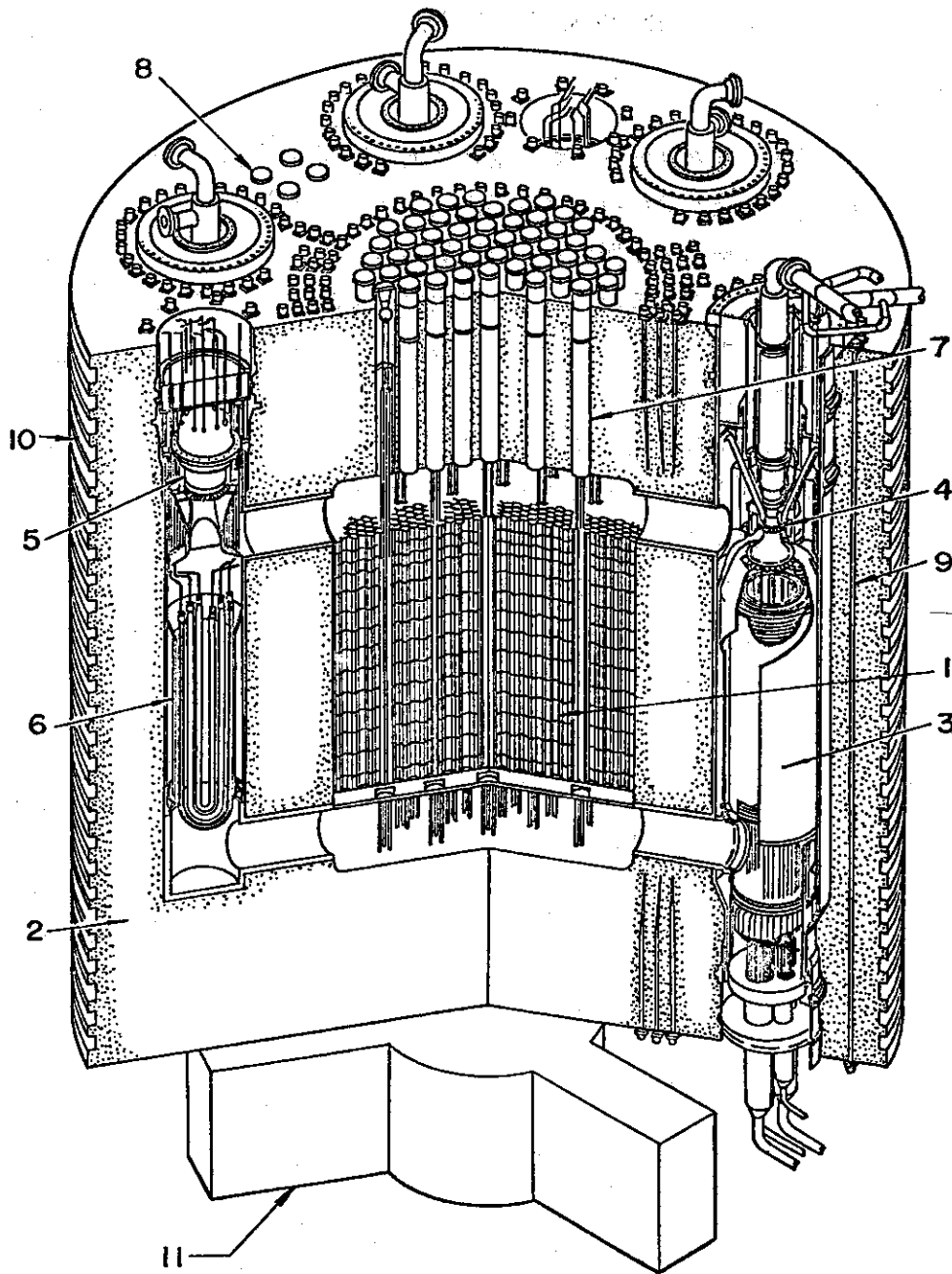


Fig. 1 LARG HTGR

- 1 Core
- 2 PCRV
- 3 Steam generator
- 4 Circulator
- 5 Auxiliary circulator
- 6 Auxiliary heat exchanger
- 7 Control rod and refueling penetration
- 8 Helium purification
- 9 Tendon
- 10 Prestress channel
- 11 PCRV support structure

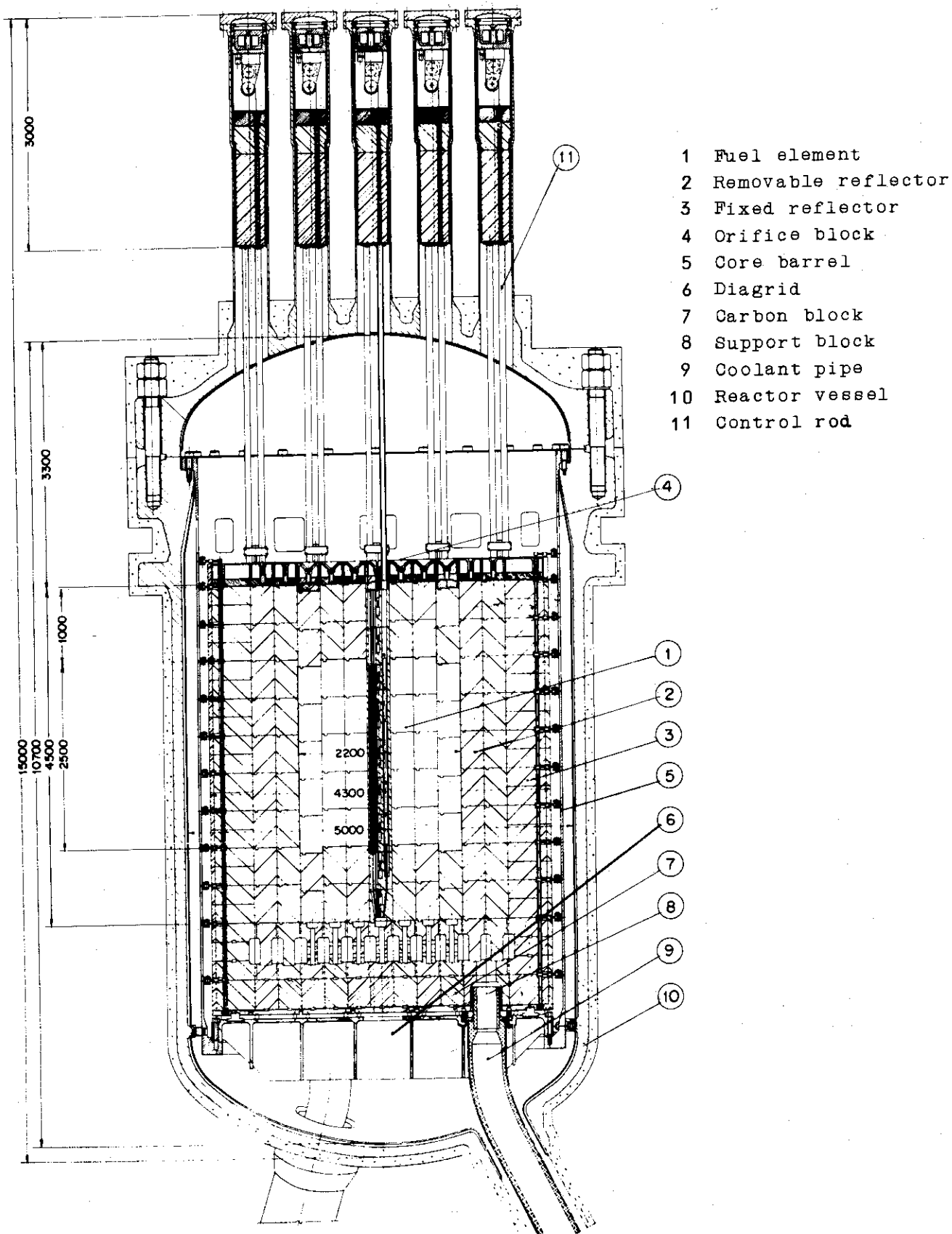


Fig. 2 Multi-purpose experimental HTGR

3. 地震応答解析

一般に構造物の振動方程式は集中質量モデルまたは分布質量モデルのいかににかかわらずつぎのように表わせる。

$$[M] \{\ddot{x}\} + [C] \{\dot{x}\} + [K] \{x\} = \{P(t)\} \quad (1)$$

ここで、 $[M]$ は質量、 $[C]$ は減衰、 $[K]$ は剛性のマトリックスであり、 $\{\ddot{x}\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 、 $\{x\}$ はそれぞれ加速度、速度および変位ベクトルであり、 $\{P(t)\}$ は外力ベクトルであり、 t は時間である。外力 P は一般に加えられる加速度 \ddot{x}_0 によるものでつぎのように表わされる。

$$\{P(t)\} = -[M] \{\ddot{x}_0\} \quad (2)$$

黒鉛ブロック間には横方向にすきまがあり、これによって隣り合うブロック間で衝突を繰り返す。これは衝撃力として働くので、これを式(2)の外力に加えなければならない。この力を F とすれば、つぎのようになる。

$$\{P(t)\} = -[M] \{\ddot{x}_0\} + \{F(t)\} \quad (3)$$

これを式(1)へ代入して振動方程式が成立し、式(1)を解いて加速度、速度、変位およびこれから曲げモーメント、せん断力などの応答値を求める。

式(1)において、振動を弾性振動と仮定すれば、もし外力 P が線形であれば式(1)は線形方程式となるが、一般に外力 P は線形ではないから、式(1)は非線形方程式となり、式(1)の解を求めるには数値解によらざるを得ない。この数値解を求める方法は Table 1 のようなものが一般的である。

Table 1 振動方程式の数値解法	
直接積分法	ニューマーク β 法 (線形加速度法)
	ルンゲ・クッタ・ジル法
	ハミング・予測子・修正子法
モーダル・アナリシス (モード重ね合せ法)	

これらについては詳しくは参考文献によるものとし、ここでは簡単にふれてみる。

(1) ニューマーク β 法 (線形加速度法) ⁽¹⁰⁾

加速度は線形に変化するものと仮定し、任意の時刻 t の速度および変位は同じ時刻の加速度からつぎの関係によって求まる。

$$\{\dot{x}_t\} = \{\dot{x}_{t-\tau}\} + \frac{\tau}{2} \{\ddot{x}_{t-\tau}\} + \frac{\tau}{2} \{\ddot{x}_t\} \quad (4)$$

$$\{x_t\} = \{x_{t-\tau}\} + \tau \{\dot{x}_{t-\tau}\} + \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \tau^2 \{\ddot{x}_{t-\tau}\} + \beta \tau^2 \{\ddot{x}_t\} \quad (5)$$

ここで β は加速度因子 (または Newmark- β) と呼ばれるもので、加速度が線形に増加すると考えれば $1/6$ であり、加速度が一定とすれば $1/4$ である。 τ は時間きざみである。式(4)と(5)から加速度はつぎのようになる。

$$\{\ddot{x}\} = [Q] (\{P(t)\}) - [C] \{A\} - [K] \{B\} \quad (6)$$

$$[Q] = \left[[M] + \frac{\tau}{2} [C] + \beta^2 [K] \right]^{-1} \quad (7)$$

$$\{A\} = \{\dot{x}_{t-\tau}\} + \frac{\tau}{2} \{\ddot{x}_{t-\tau}\} \quad (8)$$

$$\{B\} = \{x_{t-\tau}\} + \tau \{\dot{x}_{t-\tau}\} + \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \tau^2 \{\ddot{x}_{t-\tau}\} \quad (9)$$

(2) ルンゲ・クッタ・シル法⁽¹¹⁾

式(1)が n 個の連立二階常微分方程式,

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} = f_i \left(t, x_i, \frac{dx_i}{dt}, \frac{d^2 x_i}{dt^2} \right) \quad (10)$$

から成り立っているとして, これを解くには

$$\left. \begin{aligned} X_{1i} &= x_i & (i = 1, 2, \dots, n) \\ X_{2i} &= \frac{dx_i}{dt} = \frac{d^2 x_i}{dt^2} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

とにおいて, $X_{11}, X_{12}, \dots, X_{1n}, X_{21}, X_{22}, \dots, X_{2n}$ についての $2n$ 個の連立一階常微分方程式として処理すれば解ける。ルンゲ・クッタ・シル法およびハミング・予測子・修正子法の詳細については参考文献⁽¹¹⁾によるものとして, ここでは省略する。

(3) モーダル・アナリシス法 (モード重ね合せ法)⁽¹²⁾

モーダル・アナリシス法によって式(1)を解くには, いま,

$$\{x\} = [U] \{\phi\} \quad (12)$$

とおき, これを式(1)へ代入して, $[U]^T$ をかける。

$$[U]^T [M] [U] \{\phi\} + [U]^T [C] [U] \{\phi\} + [U]^T [K] [U] \{\phi\} = [U]^T \{P(t)\} \quad (13)$$

ここで, 添字 T は転位行列を表わす。正規化関数の直交性から,

$$\left. \begin{aligned} C_r C_s [U_r]^T [M] [U_s] &= \begin{cases} 0, & (r \neq s) \\ M_r^* & (r = s) \end{cases} \\ C_r C_s [U_r]^T [C] [U_s] &= \begin{cases} 0, & (r \neq s) \\ C_r^* & (r = s) \end{cases} \\ C_r C_s [U_r]^T [K] [U_s] &= \begin{cases} 0, & (r \neq s) \\ K_r^* & (r = s) \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

ここで, C_r は M_r^* が 1 になるように決めればよく, これをモードの正規化という。

$$C_r^2 = \frac{1}{[U_r]^T [M] [U_r]} \quad (15)$$

式(13)の r 番目の方程式はつぎのようになる。

$$M_r^* \ddot{\phi}_r + C_r^* \dot{\phi}_r + K_r^* \phi_r = \frac{1}{M_r^*} [U_r]^T \{P_r(t)\} \quad (16)$$

ここで,

$$\frac{C_r^*}{M_r^*} \equiv 2h_r \omega_r \quad (17)$$

$$\frac{K_r^*}{M_r^*} \equiv \omega_r^2 \quad (18)$$

$$\{U_r\}^T \{P_r(t)\} \equiv Q_r(t) \tag{19}$$

とおけば，式(18)はつぎのようになる。

$$\ddot{\phi}_r + 2h_r\omega_r\dot{\phi}_r + \omega_r^2\phi_r = \frac{1}{M_r^*} Q_r(t) \tag{20}$$

ここで， r 番目の固有振動数 ω_r^i は臨界減衰定数を ζ_r とすれば，

$$\omega_r^i = \omega_r \sqrt{1 - \zeta_r^2} \tag{21}$$

となり，式(20)はつぎの Duhamel の積分によって求められる。

$$\phi_r = \frac{1}{M_r^* \omega_r^i} \int_0^t Q_r(t) e^{-h_r \omega_r^i (t-\tau)} \text{Sin} \omega_r^i (t-\tau) d\tau \tag{22}$$

ϕ_r が求まると x はつぎの式から求めることができる

$$\{x\} = [U] \{\phi\} = \sum_{r=1}^n \{U_r\} \phi_r \tag{23}$$

4. グラフィック・ディスプレイによるシミュレーション

振動方程式(1)を解いて各時刻における応答値を得ることができ、これを時刻の関数で表示したものを時刻歴応答曲線という。例えば、高温ガス炉の第二次予備設計炉心の、ある設計条件における結果を示せば Fig. 3 のようになる。これは炉心の中央部のブロックの列における応答曲線であり、加速度および変位が示されており、変位図ではブロックの衝突の状態が明らかになる。このような応答曲線から地震時の部分的な挙動を理解することはできるが、全体の挙動を理解するため、イメージを描くことは専門家でも困難である。これを容易にするために、グラフィック・プロッタ、ディスプレイおよびCOM (Computer Output Microfilming) などを使用して、計算対象を模型図で表示しようと試みられている。すなわち、COM やグラフィック・ディスプレイによって模型図をフィルムとして得て、これを映写して動画 (Animation : アニメーション) としてイメージを描くことである。

このアニメーション・フィルムを作るために、一般にCOM が、より進んだ手法としてはグラフィック・ディスプレイが使用されている。これらについては種々の解説^{(13), (14)} がなされているので、ここでは筆者らが使用しているグラフィック・ディスプレイによるシミュレーション・システムに限って述べてみよう。

グラフィック・ディスプレイを使用したシミュレーション手法を Fig. 4 に従って説明すれば、まず式(1)を計算するプログラムによって応答値を得て、これをテープなどに貯える。つぎはシミュレーション・プログラムによって先のデータ・テープから炉心の挙動をグラフィック・ディスプレイのCRT (Cathode Ray Tube) の面上に表示し、これを16ミリシネカメラなどによって撮影する。つぎには、得られたフィルムを映写して炉心の動きを見る。

このシステムによって得たフィルムを Photo 2~4 に示す。これは図2の高温ガス実験炉炉心の地震シミュレーション写真であり、Photo 2 は炉心の垂直断面の動きを示したものである。写真では動きがよくわかるように、ブロックの大きさに比べて移動距離を20~30倍に拡大して示しているので、動きが誇張されている。入力地震波は Photo 8 に示すように正弦波を与え、地震の規模は日本において予想される最大のを想定している。写真の右上部には経過時刻を示し、この時刻における炉心の挙動がわかるようになっている。この炉心の中央部の平面断面におけるブロックの挙動は Photo 3 に示すようになる。なお写真中の星印は衝突したブロックを示す。

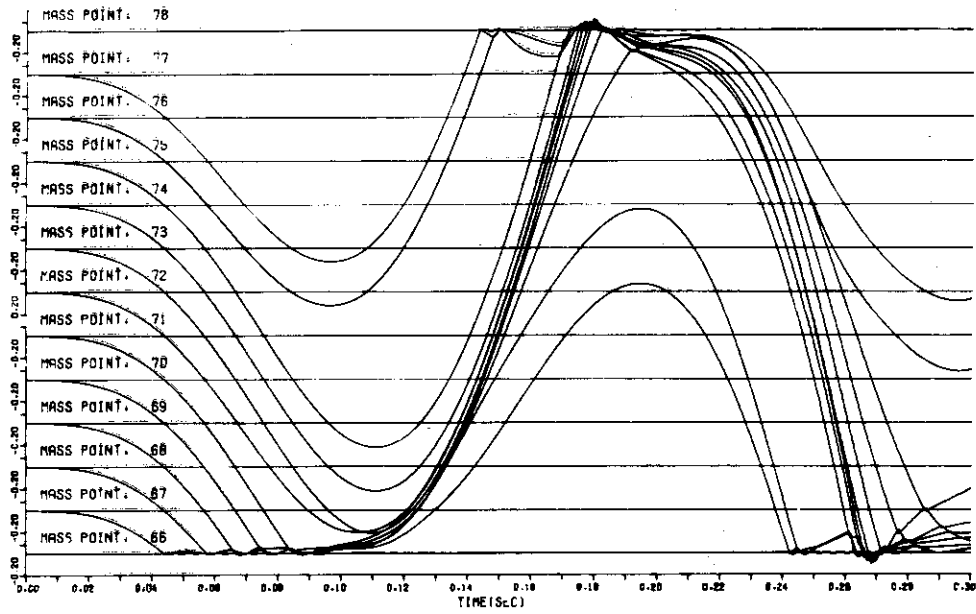
Photo 2 および3では、ブロックの動きを明確に示すために、現実の炉心とは異なるものを使用した。現実の炉心では Photo 4 に示す動きをするものと予想される。ここで使用した入力地震波は実際に観測された地震波 (1940年アメリカのエルセントロにおいて) である。この写真は炉心が大きな動きを示すと考えられる部分だけを示したものであるが、入力加速度は二秒前後から大きくなり、炉心は大きな動きを示していることがわかる。

Fig. 4 に示すように、シミュレーション・フィルムを作成するには、COM 装置によっても作ることができ、一般にはCOM によって作成されている。筆者らがグラフィック・ディス

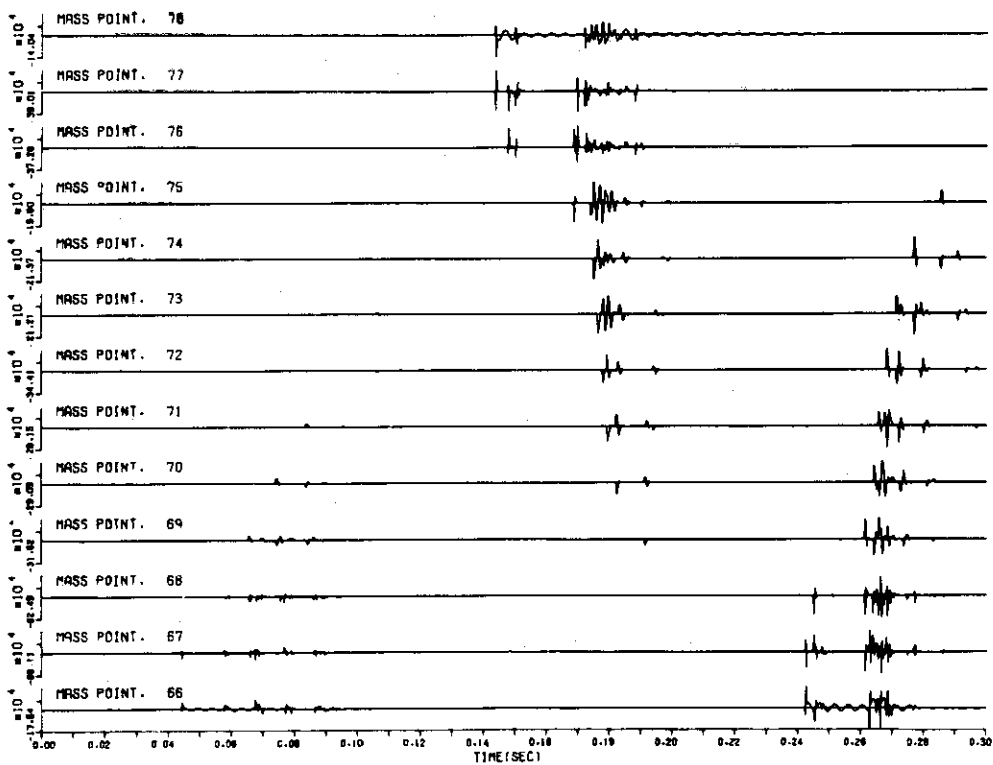
プレイを使用した理由についてはつぎの章で述べることにしよう。Fig. 4 において、応答計算とシミュレーション・フィルムの作成を一つの計算プログラムによって行うことができることに気付くであろう。二つの処理プログラムに分けた理由はつぎのことによる。

応答計算は一般に、グラフィック・ディスプレイの使用時間に比べて多くの計算時間を必要とするから、グラフィック・ディスプレイをオンラインに使用すれば、応答計算を行っている間、ディスプレイは待ち状態になり、計算機システムの有効利用とならないからである。

DISPLACEMENT (CM)



ACCELERATION (GAL)



INPUT ACCELERATION (GAL)

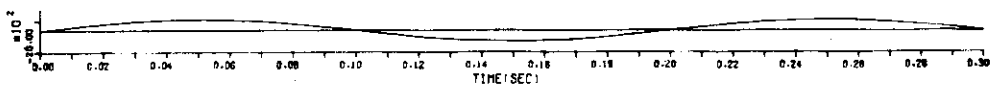


Fig. 3 Seismic response histories

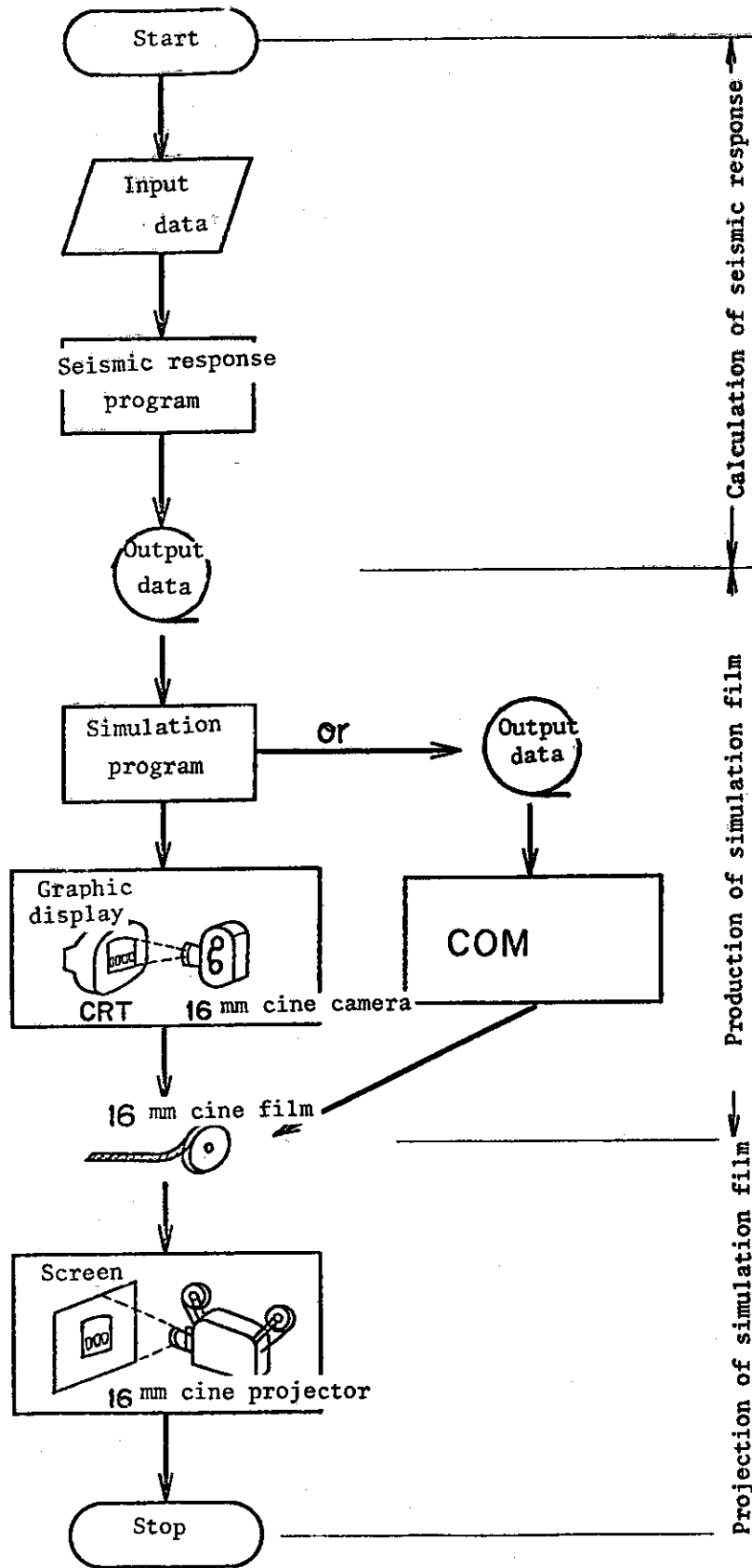


Fig. 4 Flow sheet of simulation

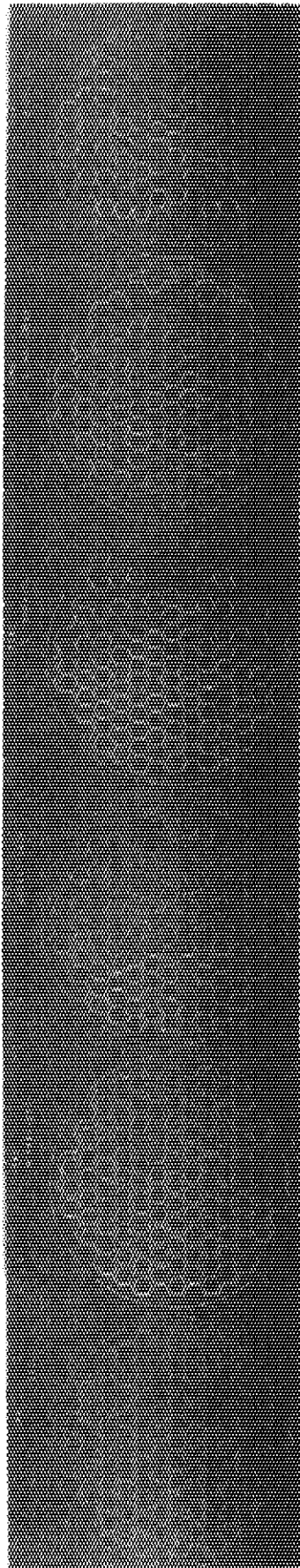
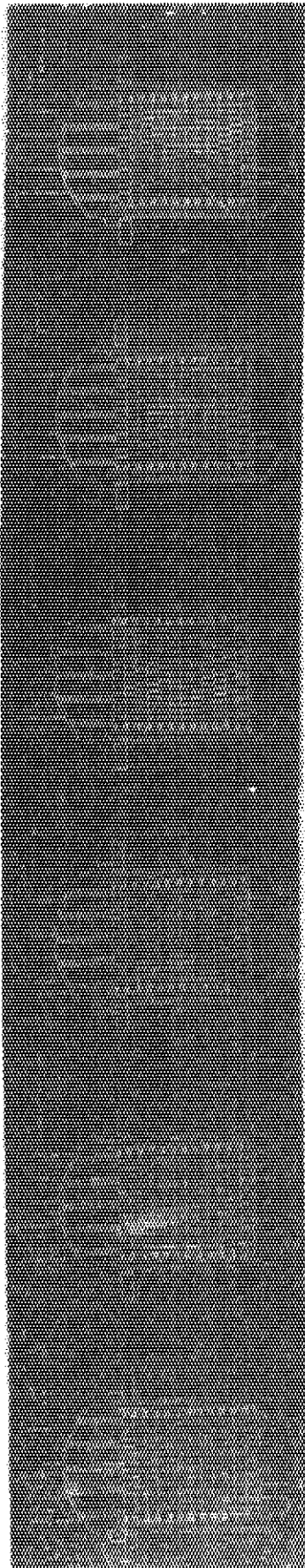


Photo 3

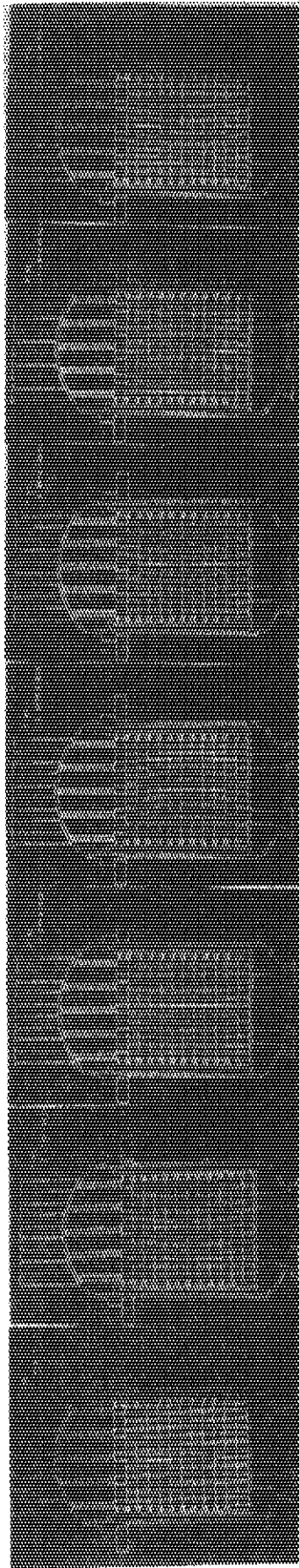
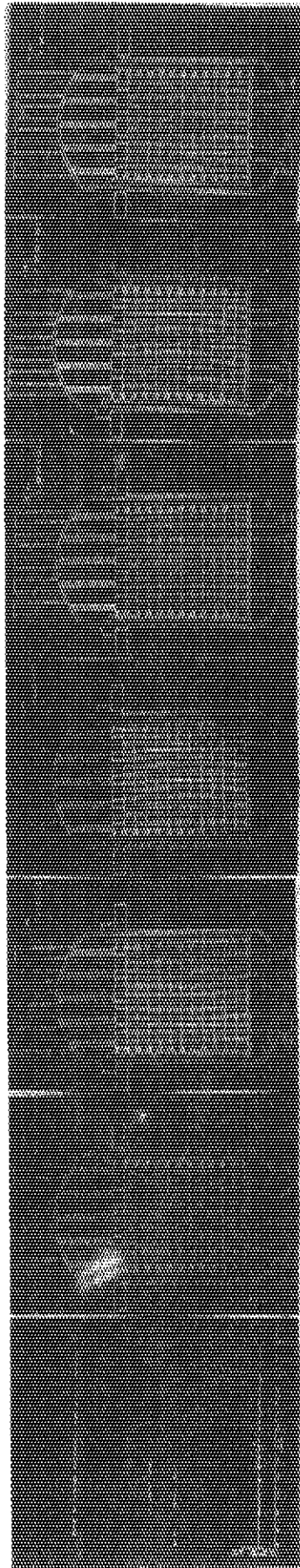


FIGURE 4

5. グラフィック・システム

グラフィック・システムについては、中原と野本⁽¹⁵⁾によって整理された解説があり、この認識はグラフィック・ディスプレイを使用した者に共通のものであろう。筆者らがグラフィック・システムをデザインするに際してグラフィック・ディスプレイの利点と考えたものはつぎのようなものである。

(1) イメージ交換機の役割

グラフィック・ディスプレイを使用することによって、解析対象および計算結果を容易にイメージとしてとらえることができる。

(2) す速い映像表示

グラフィック・プロッタおよびCOMによる図形処理には多くの時間が必要であるが、グラフィック・ディスプレイによって表示し、見るには少い時間でよい。

(3) 選択表示

ライトペンを使用する対話型のプログラムにすることで、映像を見ながら必要な情報だけを取り出し、またそれをハード・コピーとして容易に取り出すことができる。

(4) イメージ・バンク

必要な部分だけをイメージの形で貯え、必要に応じて、繰返し見ることができる。この機能はビデオ・コードを連結して使用すれば、さらに充実したものとなる。

(5) マン・マシン・システム

使用者が使用し易いようにパラメータの変更および処理ルーチンの変更が容易である。

さらに得られた結果は特定の専門家だけでなく、周辺の関係者に対する情報の交換に役立つ。

ここで、COMとグラフィック・ディスプレイによるシミュレーション・フィルム作成の相違について、少しふれてみよう。COMとは計算機の出力データをマイクロ・フィルム化することであり、この意味からグラフィック・ディスプレイを使用してフィルムを作ることも広くCOMといえることができる。しかし通常に使用されている意味でのCOMとは、計算機のグラフィック・プロッタへの出力データ・テープをCOM装置にかけ、図をCRT面上に表示し、これを自動的にフィルムに撮影するか、または初めにCOMによってフィルムを作ることにしてプログラムを作成し、出力データ・テープをCOM装置にかけてフィルムを作成することをいう。よって筆者らのグラフィック・システムは通常の意味でのCOMとは区別される。

COMに比較してグラフィック・ディスプレイ・システムの長所の一つはライトペン、キーボードなどを使用して、処理途中において随時にパラメータおよび処理の流れなどを対話的に変更できることであり、筆者らはこれを生かすようにシステムを作成した。このシステムの特徴はつぎのようなものである。

(a) ライトペンを使用して図形表示に関するパラメータの変更ができる。

(b) ライトペンおよび変更スイッチ(Alteration Switch: ASW)によって処理ルーチンの変更ができる。

- (c) シミュレーション図形の表示は自動的に進行するが、進行中に A S W をオフにすることで進行を停止して、その時点で C R T 面上の図をプロッタへハード・コピーとして取出すことができる。
- (d) 進行の停止および指示した時間から再び開始ができる。
- (e) 図形表示を連続して速く表示するために、ディスプレイ語列(グラフィック・ディスプレイの機械語)としてディスクなどに図形としての情報として保存して、それを使用して直接に図形表示することができる。

さて、つぎにグラフィック・プログラムの内容を Fig. 5 の流れ図に沿って説明しよう。計算が実行開始となると、最初に Photo 5 が表示される。これは Fig. 5 のライトペン・ボタン A の所で待ち状態 (Wait) にあり、ライトペンによって選択 (Pick-up) することによって、つぎの段階へ移る。ここではパラメータの変更と処理ルーチンの決定が行なわれ、パラメータの変更を行う場合にはライトペンによって Fig. 5 および Photo 5 の 1~3 項のいずれかを選択することによって行なえる。一方、処理ルーチンの決定には同じく 4~11 項を選択することで行える。これらの選択する項目は Photo 5 に示すように、その使用目的を簡略に表わす一行の文字列からなっている。

パラメータ変更については、例えば Photo 5 の 1 項を選択したとすれば、C R T 面には Photo 6 が表示され、取り上げるパラメータが表示されている。変更するパラメータをライトペンによって選択すれば、C R T 面には Photo 7 のように 'KEY-IN DATA' という図が表示され、使用者が文字キーボードから値をキー・インすることが指示される。必要な変更が終了したならば、ライトペンで '1. CONTINUE' を選択すれば、コントロールは Fig. 5 のライトペンボタン A に戻る。

つぎに処理ルーチンを決定して実行に移る。処理ルーチンはライトペンによって Fig. 5 および Photo 5 の 4~11 項の選択がある。4~6 項はデータ設定の方法を指示し、7 項は処理の終了へ、コントロールが移される。8 および 9 項では上の (e) に述べたようにディスプレイ語列としてディスクに保存し、直接図形表示するか否かを、10 および 11 項では炉心の各ブロックに番号を付けて表示するか否かの選択ができる。

処理ルーチンの選択が終ると、つぎに加速度波の入力データを読み込み、Photo 8 に示すような入力加速度波形の表示をする。そしてつぎには炉心挙動の入力データを読み込み Photo 9 のような炉心の挙動図が連続して表示され、入力データの終りがくるまで行われ、入力データの終了とともに、初めの状態へコントロールが移る。

炉心挙動表示中に Fig. 5 に示すように A S W 8 をオフにすることで、ライトペンボタン B の持ち状態に入り、Photo 10 に示すように 'RESET', 'CONTINUE', 'HARDCOPY' などがライトペンによって選択できる。'RESET' では図形表示の進行が中止されて初めの状態へ戻る。'HARDCOPY' ではプロッタへハード・コピーとして取り出すことを、'CONTINUE' では図形表示の進行を指示する。

コントロールが初めの状態に戻ったなら、別の条件で計算した結果のデータ・テープを使用してシミュレーションを行うため、データ・テープのファイル・ユニット番号を変更して実行することができる。これによって比較検討が容易に行なえる。さらに、計算結果と実験結果を対照表示して実験の解析ができる。

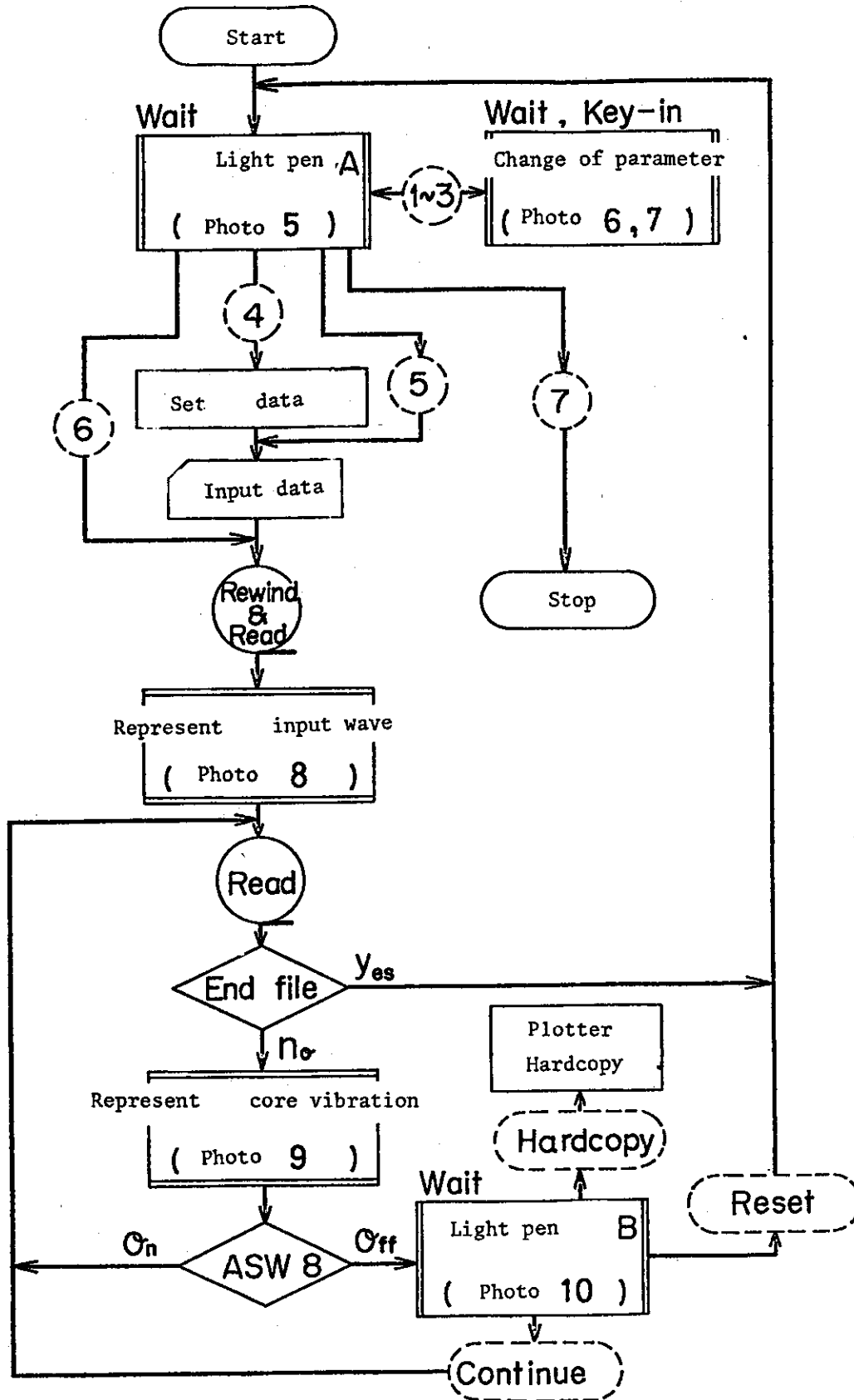


Fig. 5 Flow sheet of calculation program

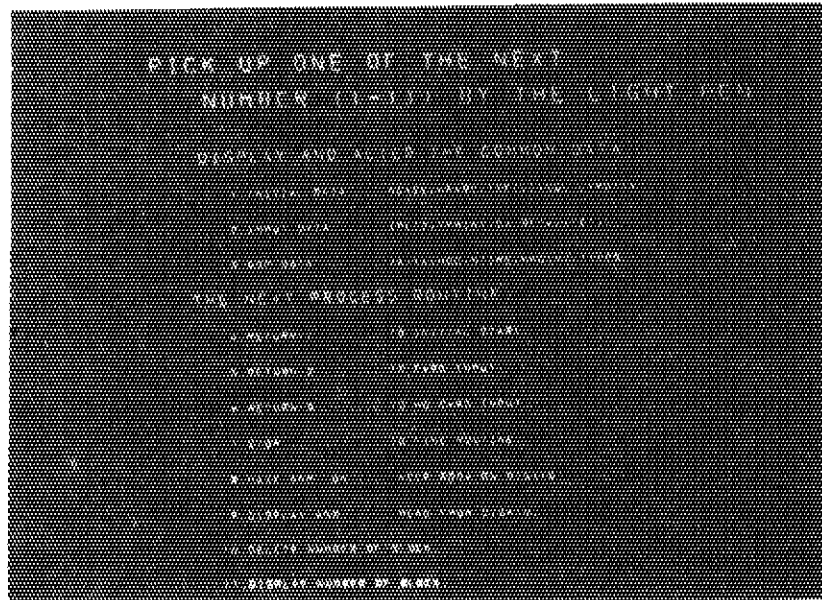


Photo 5

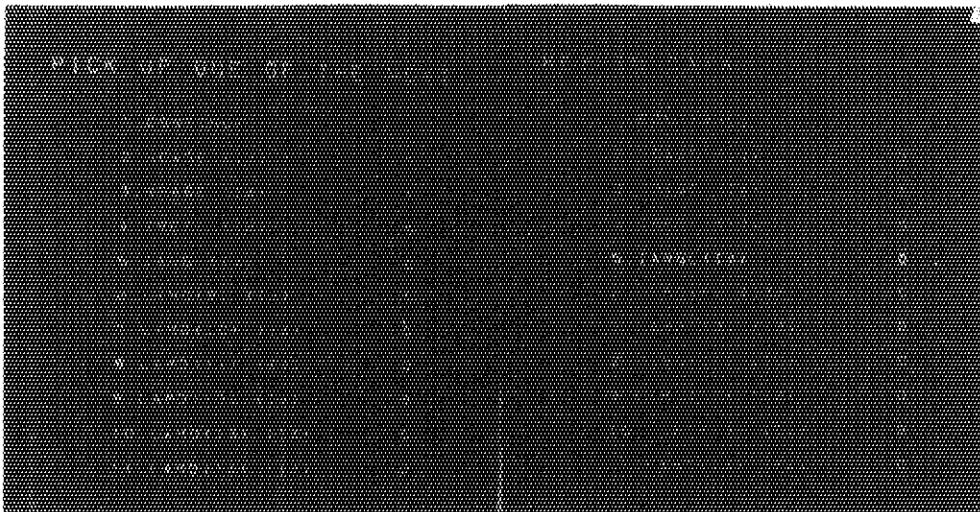


Photo 6a

Photo 7a

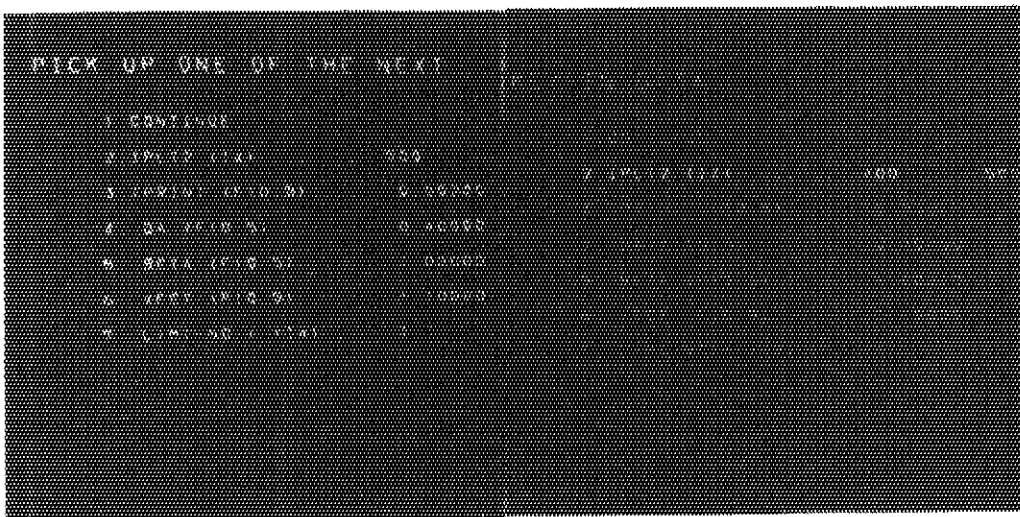


Photo 6b

Photo 7b

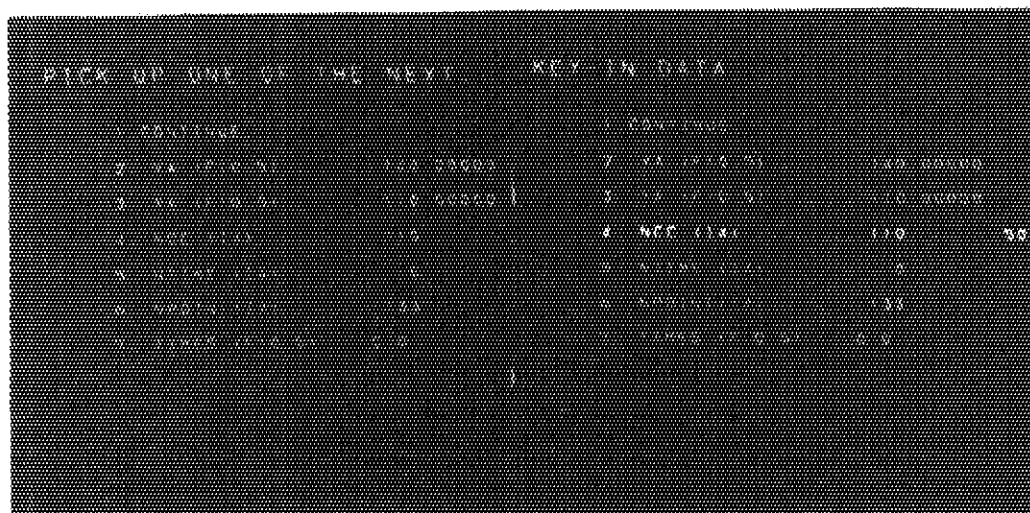


Photo 6c

Photo 7c

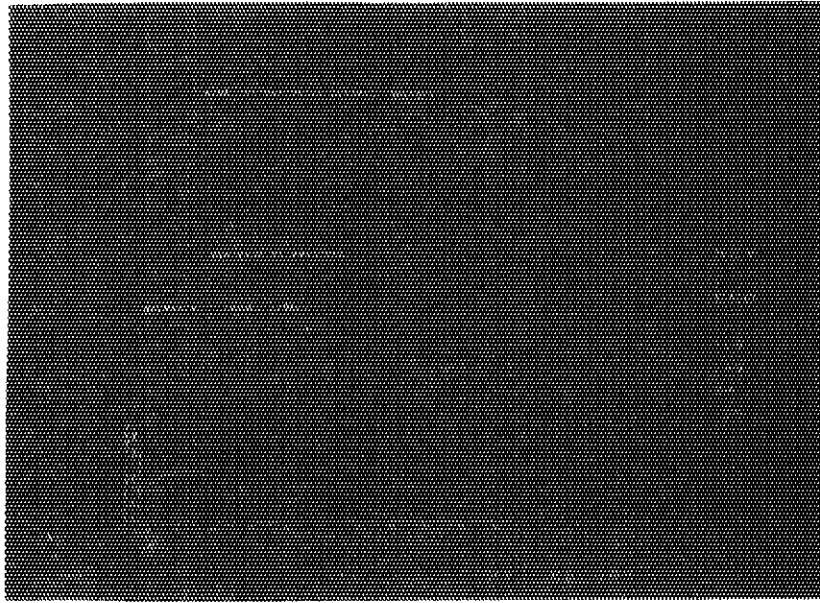


Photo 8

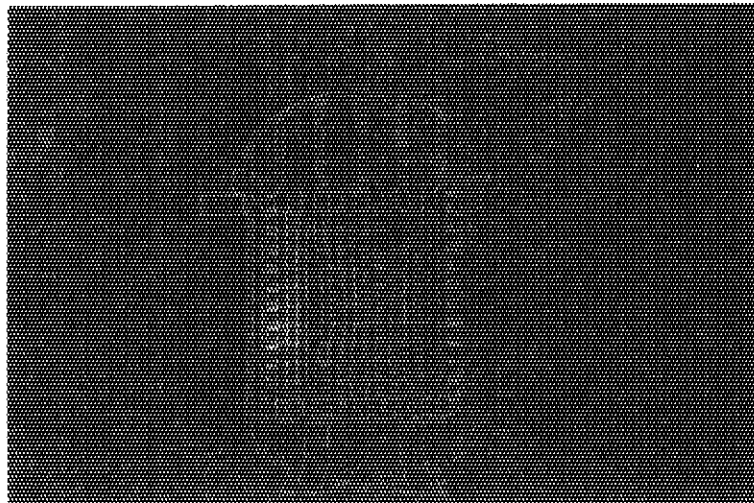


Photo 9

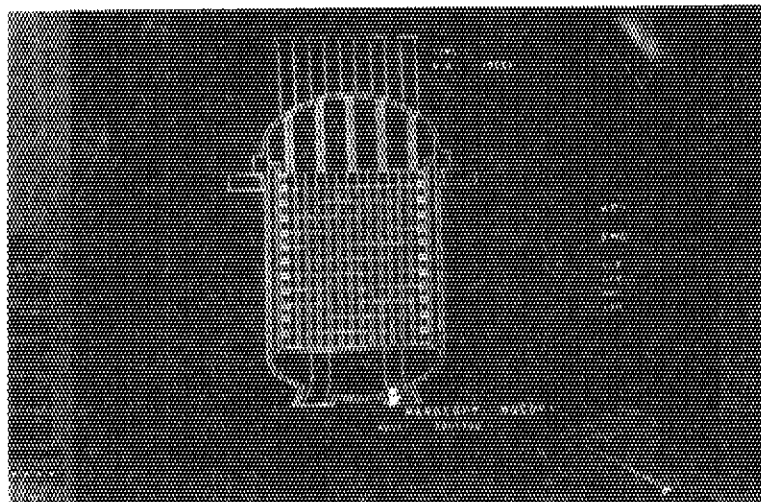


Photo 10

6. グラフィック・サブルーチン・パッケージ：PGS

前節で詳しく述べたグラフィック・シミュレーション・プログラムは、日本原子力研究所で開発されたグラフィック・サブルーチン・パッケージPGS⁽¹⁶⁾を用いFORTRANで書かれているので、ここではこのPGSについて簡単に述べる。

グラフィック・ディスプレイは文字や図形の入出力可能な優れた装置であるが、そのプログラミングはプロッタの場合に比べかなり面倒である。そこで筆者らはプロッタのプログラミング⁽¹⁷⁾と同程度の感でグラフィック・ディスプレイのプログラミングができないかと考え、1971年にFACOM230-35で、さらに1973年にFACOM230-60でPGSを開発した。PGSはGSP^{(18),(19)}を使ってFORTRANで書かれたサブルーチンの集まりで、つぎのような特徴をもっている。

- (1) グラフィック・ディスプレイを数値計算やデータ処理において計算結果や各種データのグラフなどによる図形表示中心に使用する場合のプログラミングに便利である。
- (2) 少ない命令数(9個のサブルーチン命令)でグラフィック・ディスプレイのプログラミングが行なえる。
- (3) プロッタの基本サブルーチン・パッケージとの間に互換性があるので、プロッタ・プログラムをそのままグラフィック・プログラムとして利用できる。
- (4) CRT面に表示した図形に対して、タイトル、説明文、使用者名および日付などのコメントがライトペンと文字キーボードを使って自由につけられる。
- (5) CRT面に表示した図形のハード・コピーをライトペンまたはファンクション・キーでプロッタに何枚でも出力できる。
- (6) 図形単位または画面単位でCRT面上での図形の表示や消去が行なえる。
- (7) 使用者が独自にライトペン、文字キーボードおよびファンクション・キーボードを使用したい場合は、その割込処理プログラムをGSPで書き、PGSで書いた図形処理プログラムに追加すればよい。

また、上記の(3)からPGSの使用によって、グラフィック・ディスプレイをプロッタ・プログラムのデバッグなどに利用することができる。

上記の(7)については現在、PGSに合わせてGSPを単純化した簡易GSPや、さらに、図形処理や割込処理などのプログラミングがPGSや簡易GSPだけによるよりも簡単に行なえる高レベル・サブルーチン群からなる汎用GSPが利用できる。

これらPGS、簡易GSPおよび汎用GSPは、まとめてPGSLIBライブラリ^{(20),(21)}と呼ばれ、約180個のサブルーチンで構成されている。このライブラリは、日本原子力研究所で開発された原子力関係の約30個のグラフィック・プログラム⁽²²⁾で利用され、その有効性が実証されている。

7. プログラムの構成

7.1 プログラムの構成

プログラム・システムは Fig. 6 に示すように、応答計算を行う計算プログラム PRELUDE-2 と結果を図形表示するシミュレーション・プログラム GTOROTO-3 および-4 から構成されている。GTOROTO-3 は炉心垂直断面図を GTOROTO-4 は炉心平面図を表示するためのものである。さらに、プログラム GTOROTO の中には、元来のプロッタ・プログラム TOROTO をグラフィック・ディスプレイ用に発展させたため、このプロッタ・プログラムとグラフィック・プログラムから構成されており、これらは、Fig. 7 に示されている。プログラムの内容およびサブルーチンの機能は 7.2 および 7.3 項に述べられている。

7.2 TOROTO ルーチン

このルーチンは、プロッタ・プログラムであったものをグラフィック・ディスプレイ用に変更したものである。

(1) GTOROTO 3, 4

計算の実行を制御する。

(2) INPUT

入力データの読み込みをする。

(3) VIBRAS

データをテープから読み込み、図形処理をする。

(4) VIEWVE

入力地震波を CRT 面にグラフ表示する。

(5) VIEWGD

応答計算結果をシミュレーション図形として CRT 面に表示する。

(6) SCALEX

データのスケールリングをする。

(7) VIEWST

グラフィック・ディスプレイをオープンする。

(8) FINE

グラフィック・ディスプレイをクローズする。

(9) HEXA

平面模型の応答計算結果をシミュレーション図形として CRT 面に表示する。

(10) HEXDJ

平面模型の枠を CRT 面に表示する。

なお、GTOROTO-3 では VIEWGD を使用し、GTOROTO-4 では HEXA および HEXDJ を使用する。

7.3 グラフィック・ルーチン

つぎの(1)~(5)のサブルーチンは6章で述べたPGSLIBライブラリに含まれている。また(6)、(7)のサブルーチンはシミュレーション・プログラムを対話型にするために作成されたものである。

(1) ファンクショナル・ルーチン

(POLY, CIRCL)

これはファンクショナル・サブルーチン・パッケージ⁽¹⁷⁾と呼ばれるものの一部分で、プロッタ用のものをグラフィック用に変更してある。POLYは正多角形、CIRCLは円を描く。

(2) 接続ルーチン

(PLOTS, PLOT, SYMBOL, NUMBER, AXIS, WHERE)

これはSCALE, LINE, FACTORルーチンと共に、接続サブルーチン・パッケージ⁽¹⁸⁾を構成する。これはプロッタ・ルーチンではなく、次のPGSルーチンとの接続の役目をするものである。

(3) PGSルーチン

(GPLOTS, GPLOT, GSYMBL, GNUMBR, GAXIS, GWHERE)

これはGSCALE, GLINE, GFACTORルーチンと共に、PGSサブルーチン・パッケージ⁽¹⁸⁾を構成する。PGSルーチンは接続ルーチンと一緒に、プロッタ・プログラムをほとんどそのままの形でグラフィック・プログラムとして実行可能とする。

(4) ハード・コピー・ルーチン

(HDMOVE, HDCOPY, DRREAD, CMDANL, BITON, BSHIFT, LINEST, LINTYP)

これはCRT面に表示されている図形のハード・コピーをプロッタへ出力可能とするサブルーチン・パッケージ⁽¹⁶⁾であり、富士通⁽¹⁶⁾より提供されたものである。

(5) プロッタ・ルーチン

(XPLOTS, XPLOT, BUFF, PLTHED, NEWPEN, XSYMBL, XNUMBR, XFACTOR, XWHERE)

これはXSCALE, XAXIS, XLINEルーチンと共に、プロッタのサブルーチン・パッケージ⁽¹⁷⁾を構成する。PGSLIBのプロッタ・ルーチンは標準のプロッタ・ルーチンの名前にXをかぶせ、接続ルーチンやPGSルーチンとの区別をしている。

(6) パラメータ変更ルーチン

(GDATAS)

グラフィック・ディスプレイのライトペン、キーボードおよびASW(Alteration Switch)を使って、処理ルーチンの選択とパラメータの変更などを対話的に処理するサブルーチンである。

(7) CRT画面のコントロール・ルーチン

(GNEWGD, GXOY0)

CRT画面上への表示、CRT画面の消去および座標原点の管理などCRT画面のコントロールに使われるサブルーチンである。

(8) GSPルーチン

これはライトペン、キーボード、図形表示などの処理を行うためのグラフィック・ディスプレイの基本的なサブルーチン・パッケージ⁽¹⁹⁾であり、富士通^(株)より提供されたものである。

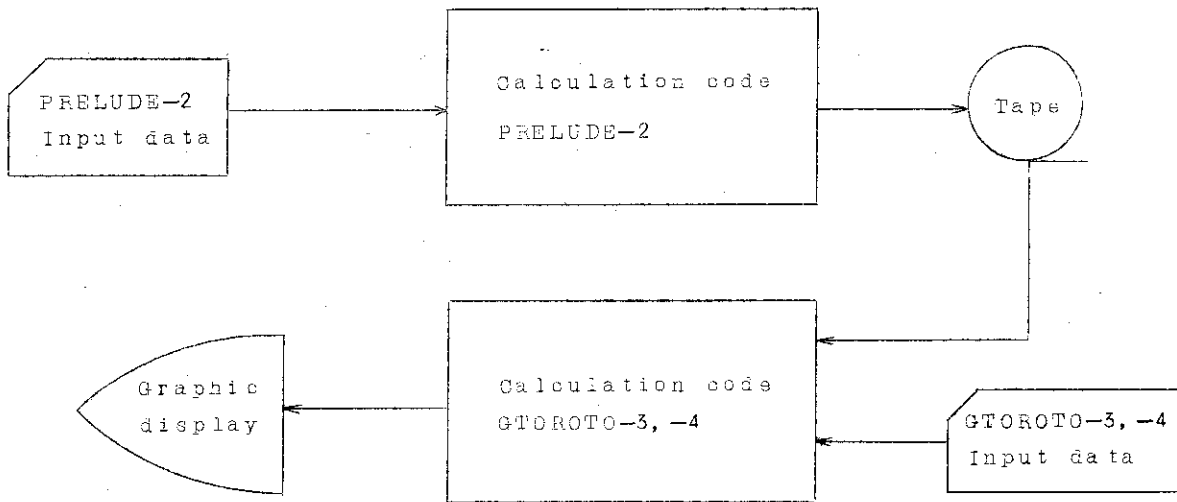


Fig. 6 System of calculation code GTOROTO-3, -4

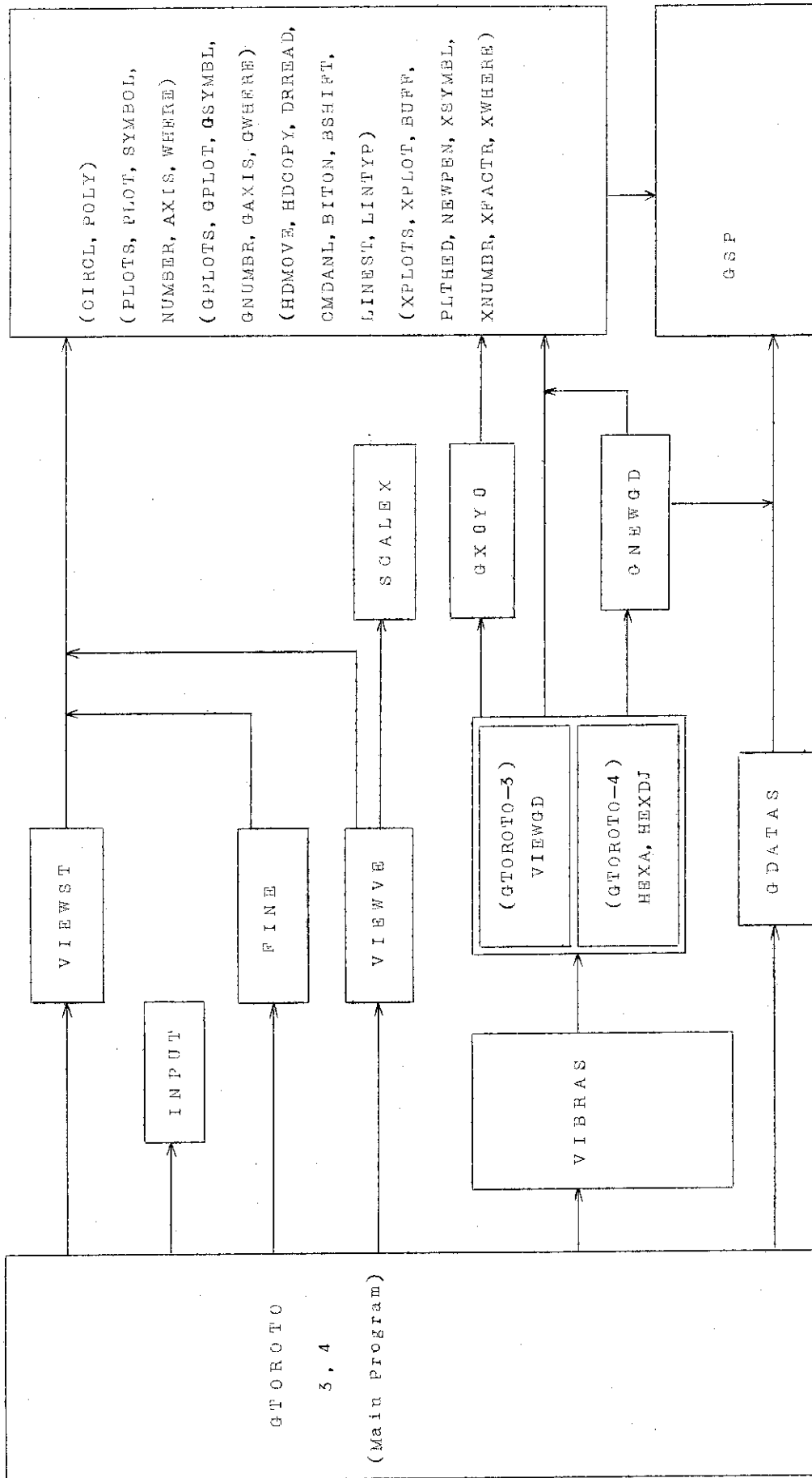


Fig. 7 Structure of GTOROTO-3, -4

8. 入力および出力形式

このプログラムのための入力および出力データは、グラフィック・ディスプレイによる対話型の入出力を主体として設計したために、入力カードおよび出力プリントは最小限にしている。

8.1 入力形式

入力形式は Table 2 および 3 に示すように極力少くしており、また、これらのデータは実行時にグラフィック・ディスプレイのライト・ペンによって変更できるようになっている。

- (1) 問題の名称
- (2) 図のスケール・ファクタ
- (3) 問題の大きさ

応答計算結果は通常 PRELUDE-2 によって計算され、磁気テープに保存されたデータを使用する。

8.2 出力形式

出力形式はプリントとしては Table 4 に示すように極力少くしている。グラフィック・ディスプレイに表示されるものはつぎの項目である。

- (1) 問題の名称
- (2) 各種パラメータの設定
- (3) 各種処理ルーチンの設定
- (4) 入力地震波の名称
- (5) 入力地震波の図形表示
- (6) 炉心挙動図の表示

Table 2 Input data list

Card group	FORMAT	Variables	Descriptions
1	I 1	TITLE 2	Calculation control. =0: Calculation continue. =1: Calculation stop.
	9 A 8	TITLE 1(I) (I = 1, 9)	Problem identification.
2	4 F 1 0.0	DA	Gap between masses.
		TPRINT	Graphic represent interval time (sec).
		BETA	Scale factor of gap.
		XFOCT	Scale factor of figure.
3	I 3	NPOINT	Number of masses.
	I 6	IPLT 2	Length of time axis, IPLT 2 (mm/sec).
	I 3	LAMD(9)	Option for keyed block. =0: No-key block. =1: Keyed block.
	1 2 X	.	
	I 3	LAMD04	Option for reactor frame. =0: No-reactor frame. =1: Represent of reactor frame.

Table 3 Input data of sample problem

.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8			
TOKYO -3 SAMPLE			
1	0.1	1.0	0.77
156	90	1	
1	LAST CARD		

Table 4 Output list of sample problem

```

TOKYO -3 SAMPLE
* VIBRAS * IS CALLED:
NCASE..... 1  IPLT2.... 50  TPRINT... 0.10000  DA .... 0.40000
BETA..... 1.00000  XFCT..... 0.770  (UNIT=NO.).. 1

** INPUT DATA **

1. EARTHQUAKE WAVE      EARTHQUAKE WAVE NAME
                        1      EL CENTRO WONS
                        GALMAX (GAL)      1000.0
                        CASE 1-NORMAL END.
    
```

9. 結 言

グラフィック・ディスプレイを使用して、地震時の原子炉炉心をシミュレートさせるプログラム・システムについて述べた。構造物の地震時の挙動が図形によって視覚的にとらえることができる。グラフィック・ディスプレイによるシミュレーション手法は、非常に有効であり、今後盛んに使用されるであろう。そのために、この小文が少しでも役立つことがあれば、また識者のご教示をいただければ、筆者らは幸せと考える。

なお、使用した計算機はFACOM 230-60であり、グラフィック・ディスプレイ装置はFACOM 6233Aである。

最後に、このシステムを完成するに際して種々のご援助をいただいた、日本原子力研究所の能沢正雄博士、下川純一博士および計算センタの関係者に感謝します。

10. 参 考 文 献

- (1) 穂坂 衛：機械力学におけるコンピュータグラフィックスの応用，機械学会誌 Vol. 74，
No. 629, p. 732 (1971)
- (2) 内海武士：Weather Simulation, bit Vol. 5, No. 6, p. 477 (1973)
- (3) 川畑隆一：自動車設計におけるコンピュータ・グラフィックス，bit Vol. 4，増刊号
「電子計算機の基礎知識」 p. 854 (1972)
- (4) 武藤 清，内田一義：COM による原子力発電所の地震シミュレーション解析，bit
Vol. 4, No. 6, p. 521 (1972)
- (5) 幾島 毅他：ブロック状炉心の地震応答解析(I)，原子力学会昭和47年炉物理・炉工学分
科会講演予稿集
- (6) 幾島 毅，小沼吉男，中村康弘：グラフィック・ディスプレイによるシミュレーション，
原子力学会昭和48年炉物理・炉工学分科会予稿集
- (7) 幾島 毅：不連続な質点を含む系の地震応答解析(I)，機械学会昭和49年年会講演論文集
- (8) Kaplan, S. L. : HTGR Safety, Nuclear Safety, Vol. 12, No. 5, p. 438
(1971)
- (9) 野沢俊弥他：多目的高温ガス実験炉第二次予備設計，JAERI-memo 4852 (1972)
- (10) Wilson, L.M. and Clough, R.W. : Dynamic Response by step-by-step
Matrix Analysis, Symp. on Use of Computers in Civil Engineering,
Lisbon (1962)
- (11) 磯田和男編：FORTRAN による数値計算ハンドブック，オーム社 (1971)
- (12) Clough, R.W. : Japan-U.S. Seminar on Matrix Method of Structural
Analysis and Design (1969)
- (13) 杉山 光他：COM システム，日刊工業新聞社 (1971)
- (14) 下村尚久，倉持矩忠：コンピュータ・グラフィックス (CAD への応用)，オーム社
(1972)
- (15) 中原陽一，野本雄一：グラフィックスのためのデザイン(I)，bit, Vol. 6, No. 11,
p. 1044 (1974)
- (16) 中村康弘，小沼吉男他：プロッタ・プログラムをグラフィック・プログラムとして利用す
る方法，情報処理学会第13回大会予稿集 (1972)
- (17) 吉沢ビジネス・マシンズ株式会社：CALCOMP プログラミング・マニュアル-I，-II
(1969)
- (18) 富士通株式会社：FACOM 230-25/35 ROS GSP 文法編 (1971)
- (19) 富士通株式会社：FACOM 230-60 GSP601 文法編 (1971)
- (20) 中村康弘，小沼吉男：科学技術計算用グラフィック・サブルーチン・ライブラリ PGSLIB
について，情報処理学会第14回大会予稿集 (1973)

- ① 中村康弘, 小沼吉男: PGSLIB/BASIC グラフィック・プログラミングのための基本ソフトウェア, JAERI-M (to be published)
- ② 中村康弘, 小沼吉男: グラフィック・ディスプレイの使い方と各種グラフィック・プログラムの概要, JAERI-M レポート 5659 (1974)