数 値 解 析　16－2
（1986. 3. 20）

科学技術計算出力結果表示システムの開発

大山恵三子　金野　千里　矢島　章夫
（（株）日立製作所　中央研究所）

1．はじめに

ＬＳＩの高集積化と低価格化に伴い、高性能、高機能なディスプレイデバイスが利用可能な環境になり、また、大量の計算機資源が利用可能な状況となってきた。特に、スーパーコンピュータの利用による数値シミュレーションが年々盛んになってきている。

このような数値シミュレーションから出力される多次元数値データの図形化と画像化は、解析作業を能率化するために不可欠である。実際、物理現象の正確なシミュレーションを行なおうとすれば離散化モデルは大規模になり、それに比例して出力データも膨大となる。近年のグラフィックディスプレイの発達によってこのような大量データも高速な表示が可能となり、図形・画像化システムが実用的に使用できる様になってきた。数値処理能力の向上に伴い、幾つかの数値シミュレーションが連続して実行される様になり、シミュレーション間のつなぎが必須である。

ところが、数値シミュレーションから出力されるファイルは、各シミュレータが固有に備えている場合が多く、つなぎの処理に多大な手間を要していた。また、図形化と画像化もその殆どは個別対応に行なわれており、標準的なパッケージが特に多次元データに対しては存在していない。このため、ハードウェア環境が向上したにもかかわらず、そのソフトウェア開発という点において各シミュレータの設計者に多大な負担を与え、しかも開発したソフトウェアにポータビリティがないという問題があった。

そこで科学技術計算出力結果表示システムＳ－ＧＲＡＦ（Scientific Graphing Facilities）として、各種シミュレーション間の共用に応えうる一般的な数値ファイルとその格納・検索機能及びその数値データの多次元グラフ化表示機能を提供する、サブルーチンパッケージの開発を進めている。

2．システムの概要

本システムＳ－ＧＲＡＦの目的は、

（１）各種シミュレーション間の共用に、機能的にも、性能的にも応えうる数値データファイルの提供

（２）多次元数値データとして出力される各種のシミュレーション結果のデータ解析を容易にする、多次元グラフ化機能の提供

の二点である。本システムは、特にこのグラフ化において、多次元データの表示方法、及び、その断面図・等高線図などの加工方法、陰影などを含むカラー画像の利用方法、隠線／隠面処理、光の透過モデル等による多次元表示の特徴を有する、コンピュータ・グラフィックスの一応用システムである。

図２．１にＳ－ＧＲＡＦのシステム構成を示す。本システムはサブルーチンパッケージであり、ユーザは必要なルーチンをアプリケーションプログラムからＣＡＬＬして使う。従って、目的に応じてファイル機能のみ、または、作画機能のみの使用も可能である。

対象とする数値シミュレーションは、差分法（ＦＤＭ）、有限要素法（ＦＥＭ）、Boundary Fit法（ＢＦＭ）〔1〕等である。

3．ファイル機能

本章では数値ファイルについて述べる。本システムでは一回のシミュレーションの解析結果をデータマトリックス（ＤＭ）という単位で取り扱う。一数値ファイル内には複数個のＤＭが定義でき、異なるシミュレーションのＤＭも混在可能である。一シミュレーションの結果は一回の実験に対応していると考えられ、ユーザにとっての実験データの全体は複数のシミュレーションの集合となる。従って、この集合を階層的に管理する必要がある。本システムではＤＭ名称をピリオドで区切り、Tree状の階層構造を持たせることで、デー

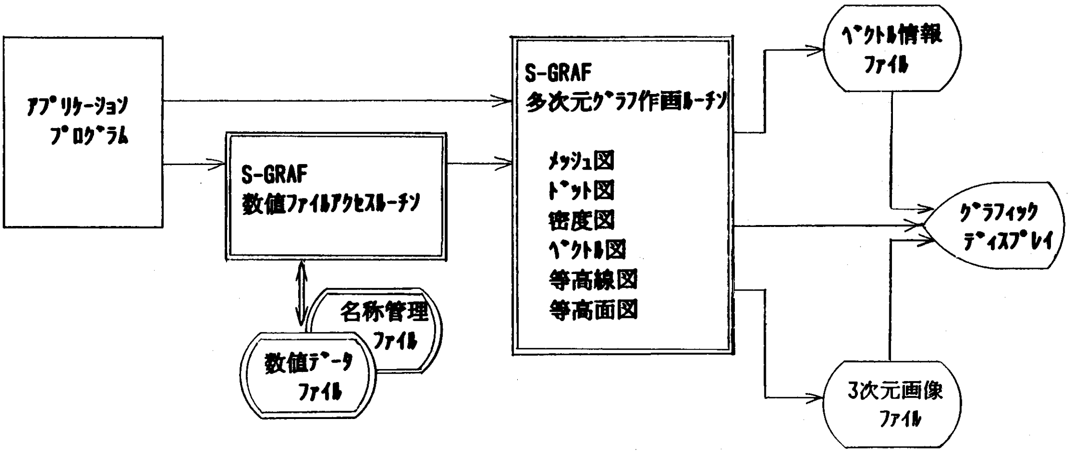


図２．１　Ｓ－ＧＲＡＦシステム構成

タマトリクス間の階層関係を表現できる。階層化は最大１２レベルである。

３．１　ファイル構造

本システムの数値ファイルは、名称管理ファイルと数値データファイルから構成される。名称管理ファイルではＤＭ名称の階層関係を管理する。後述のアクセスルーチンを用いて上位階層を指定し、名称の検索を行なうことができる。名称管理機能を必要としないユーザは本ファイルを使用せずに数値データファイルのみ使用できる。

シミュレーション出力結果データの実体は数値データファイルに格納され、シミュレーション固有のデータ構造が保存される。

対象とする数値シミュレーションの各データは以下の４種類である。

（１）ＦＤＭデータ

差分法等による格子点及びその上で定義された関数値群。

格子座標：　$X(i)\ ;\ i=1,\cdots,I$
　　　　　　$Y(j)\ ;\ j=1,\cdots,J$
　　　　　　$Z(k)\ ;\ k=1,\cdots,K$
時刻変数：　$T(l)\ ;\ l=1,\cdots,L$
物理条件：　$C(m)\ ;\ m=1,\cdots,M$
関数値：　$Fn(i,j,k,l,m)\ ;$
　　　　　　$n=1,\cdots,N$

ここで格子座標、時刻変数、物理条件のうち、対象によってはいずれかが存在しない場合もある。また、物理条件とは格子座標、時刻変数以外に独立変数としたいものを組み込むための変数で、物理定数値などを想定している。

関数値は各定義点（ｉ，ｊ，ｋ，ｌ，ｍ）においてＮ個定義され、各々のＦｎはスカラーデータでもベクトルデータでもよい。

（２）ＦＥＭデータ

有限要素法等による節点とメッシュ及びその上で定義された関数値群。

節点座標：　$\left.\begin{array}{l} X(i) \\ Y(i) \\ Z(i) \end{array}\right\}\ i=1,\cdots,I$
時刻変数：　$T(l)\ ;\ l=1,\cdots,L$
物理条件：　$C(m)\ ;\ m=1,\cdots,M$
メッシュ構成：　$V1(j)\ ;\ j=1,\cdots,J$
　テーブル　　$V2(j)$
　　　　　　：
　　　　　　：
節点関数値：　$Fn(i,l,m)\ ;$
　　　　　　$n=1,\cdots,N$
メッシュ関数値：　$Gk(j,l,m)\ ;$
　　　　　　$k=1,\cdots,K$

ここで、Ｉが節点個数、Ｊがメッシュ個数であ

る。関数値は各節点（ｉ，ｌ，ｍ）においてＮ１個定義され、各メッシュ（ｊ，ｌ，ｍ）においてＮ２個定義される。各関数はスカラーでもベクトルでもよい。

（３）ＢＦＭデータ

Boundary Fit法による格子点及びその上で定義された関数値群。

Boundary Fit法では、解析対象となる領域を複数のブロックに分割し、各ブロック毎に境界上に格子点を設定し、座標変換により矩形（２次元）、または直方体（３次元）にマッピングする。この射像空間（矩形　または直方体）側の正規メッシュに対応するメッシュを領域側に発生させる（図３．１）。従って、格子点（ＧＰ：Grid Point）のデータの他に各ブロック間の接続関係を示すデータが必要である。

ＧＰ座標：　Ｘ（ｉ）
　　　　　　Ｙ（ｉ）　ｉ＝１，…，Ｉ
　　　　　　Ｚ（ｉ）

時刻変数：　Ｔ（ｌ）；ｌ＝１，…，Ｌ

物理条件：　Ｃ（ｍ）；ｍ＝１，…，Ｍ

ＧＰ関数値：　Ｆｎ（ｉ，ｌ，ｍ）；
　　　　　　　　　　ｎ＝１，…，Ｎ

ブロック間　：　Ｂ１（ｊ）；ｊ＝１，…，Ｊ
接続テーブル　　Ｂ２（ｊ）
　　　　　　　　　：
　　　　　　　　　：

ここでＪはブロック数の最大である。

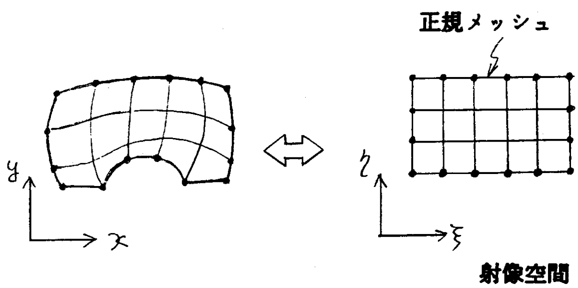


図３．１　ＢＦＭ解析メッシュの生成

（４）シリアル（ＳＥＲ）データ

自然数上で定義された関数値群。

関数値：　Ｆｊ（ｉ）；
　　　　　　　　ｉ＝１，…，Ｉ
　　　　　　　　ｊ＝１，…，Ｊ

ここでｉが定義域で、Ｆｊがｉ上で定義された関数値である。Ｆｊはスカラーかベクトル、もしくは文字列である。本データを導入した理由は、

（ａ）断面図、等高線図など、差分法／有限要素法データを加工することにより生成される可付番を特徴とするデータの格納

（ｂ）２次元グラフ専用のデータ、及び、ユーザ固有のデータ表現への適応

等である。

３．２　ファイルアクセス機能

本システムのファイルアクセスルーチンでは、各解析手法に適合したアクセス方式と名称管理方式を用いた格納・検索ルーチンを提供する。ユーザはこれらのサブルーチン群を用いて入出力処理を行なう。

（１）　数値データファイルアクセス

数値データファイルアクセスルーチンでは、

ａ）ファイルの初期化，オープン，クローズ

ｂ）ＤＭの登録・削除

ｃ）データの書き込み・読み出し

等の機能をもつ。

図３．２に示す様にデータの種別によりパラメタが全く異なるため、ＦＤＭ，ＦＥＭ，ＢＦＭ，ＳＥＲ用の各アクセスルーチンを用意している。

データの書き込み・読み出しは、データの番号、個数の指定によるインデクスアクセス機能を持ち、図３．３に示す様に列方向、行方向、指定個所別のアクセスが可能である。

また、３次元ＢＦＭデータに関しては、全体格子点データから表面格子点データを抽出する機能をサポートしている。

（２） 名称管理ファイルアクセス

名称管理ファイルアクセスルーチンでは、先に述べた名称のTree階層構造を用いて、

a）指定された階層下のDM個数の検出

b）指定された階層下のDM名称の検索

等の検索機能と、これらを利用した

c）DM構成情報の読み出し・プリント

d）日付・時刻・コメント情報の書き込み・読み出し

e）数値ファイル管理情報の読み出し・プリント

等のユティリティを提供する。

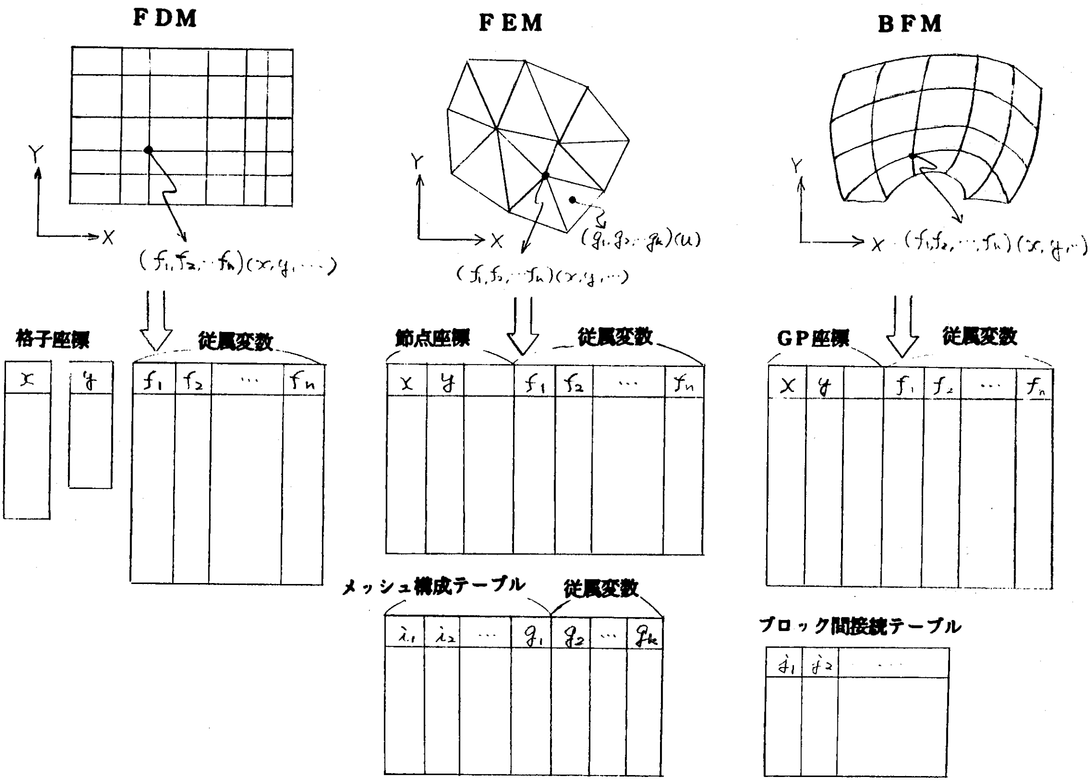
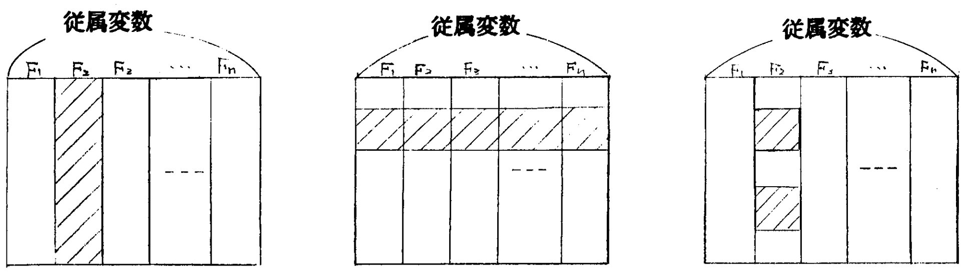


図３．２　シミュレーションデータとファイル形式



（１）列方向　（２）行方向　（３）指定箇所

図３．３　インデクスアクセス機能

４．作画機能

数値データのグラフ化表示では、独立変数・従属変数の次元が問題となる。独立変数はグラフ空間の次元に直接組み込まれるが、従属変数はその表現方法によってグラフ空間の次元に組み込まれるか、あるいは色・形状・ベクトルなどで表現することにより、グラフ空間の次元を上げずに表現することも可能となる。特に独立変数が３次元以上であった場合、こうした表現が不可欠である。

（１）独立変数の表現方法

ａ）表示空間次元の一部として組み込む

グラフの表現される空間の変数とみなす。

ｂ）動的表示中の動きとして組み込む

ある変数を逐次固定した場合の残りの独立変数と従属変数の関係をグラフ化する。例えば、この変数を時刻とすれば時系列表現となり、領域変数とすれば切断面列の表現となる。

（２）従属変数の表現方法

ａ）スカラー量

1)長さ・高さ

グラフ空間の独立変数に割り当てられていない変数を割り当てる。

2)形状（マーカ）

スカラー値に従い、ある形状を割り当る。形状自体を変えたり、形状は固定で大きさを変えて表現する。

3)色

スカラー値に従って色を割り当てる。

4)テクスチャ

塗り潰しの模様、材質感を割り当てる。

ｂ）ベクトル量

1)ベクトル

定義点を始点にしたベクトルを割り当てる。

2)流線

ベクトル場より流線を抽出し、それを表示する。

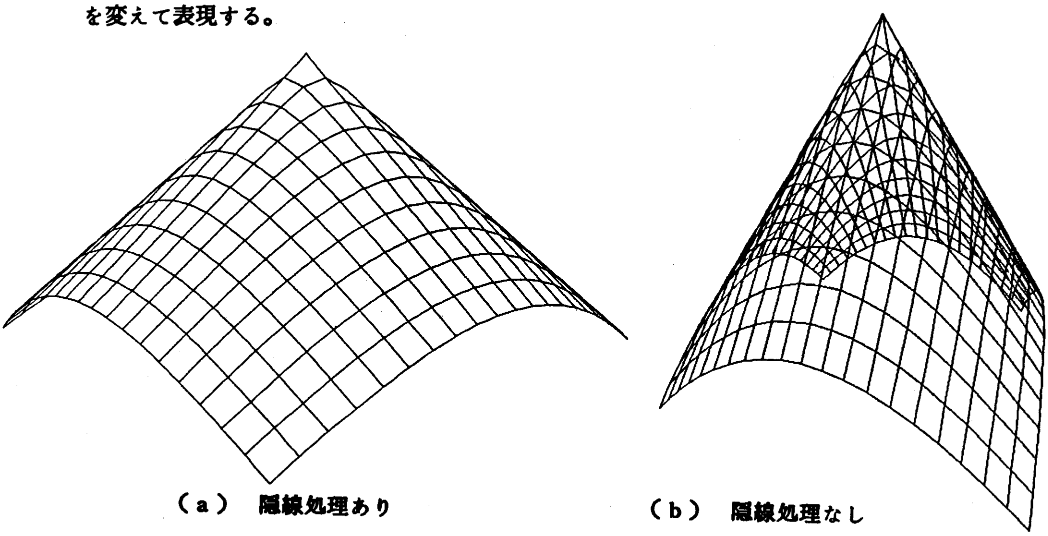
以上が表現方法の構成要素であるが、例えば形状と色を組み合わせることにより、二つのスカラー量を同時に表現するなど、種々の組み合わせによって多次元数値データのグラフ化が可能である。

逆に、次元を下げる操作として、ある変数を定数化する切断がある。独立変数に施したのが断面図であり、従属変数に施したのが等高線図・等高面図である。

本システムでサポートする多次元グラフの概要を以下に示す。

（１）平面（立体）メッシュ図

差分法／有限要素法における解析領域のメッシュ分割図である。従属変数０の場合にあたる。



（ａ）　隠線処理あり　　　（ｂ）　隠線処理なし

図４．１　メッシュ曲面図

（２）メッシュ曲面図

２独立変数をＸ，Ｙ軸に、１従属変数をＺ軸にとってメッシュ曲面を生成するもので、線画／面画の双方で表現する。線画に対しては隠線処理、面画に対しては隠面、及び、陰影処理が施される。図４．１（ａ），（ｂ）に表示例を示す。

（３）ドット図

２／３独立変数を空間内の定義点とし、その定義点に従属変数値に対応する色もしくは大きさ（半径値）の円／球を表示する。３独立変数の場合、隠面処理が施される。図４．２に２独立変数の時の表示例を示す。径の大きさで従属変数値を表現している。

（４）密度図

２次元メッシュを構成する各接点における従属変数値に従って、メッシュ内部を滑らかに塗り潰す。離散点における従属変数値で領域全体を補間することに対応する。

（５）ベクトル図

２／３独立変数を空間内の定義点とし、その定義点を開始点としたベクトルを表示する。ベクトル長及び向きによって矢印の色を制御することも可能であり、射影によって失われるベクトル長や向きの情報を補うことができる。図４．３に２独立変数の時の表示例を示す。

（６）断面図

２／３／４独立変数で定義された空間を、独立変数に対して切断する。切断点の従属変数値は線形補間される。次元の下がったデータは上記（１）～（５）の各作画ルーチンによってグラフ化される。

（７）等高線・等高面図

従属変数値によって切断する。２独立変数の時は等高線図を生成する。３独立変数の時は、各等高面を光透過モデルによる多層表示を行なう。図４．４に２独立変数の時の表示例を示す。

上記の（１）～（７）の各グラフは独立変数、従属変数以外に以下の諸元によって制御されて図形化／画像化される。

（ａ）視点及び視界（ウィンドウ）

視点位置と射影面、及びそれに対するクリッピングエリアを指定する。（図４．５）

（ｂ）定義領域クリッピングエリア

視界のみではなく、独立変数、従属変数の存在領域によるクリッピングである。

（ｃ）各変数のスケール変換

各独立／従属変数Ｘ毎に、

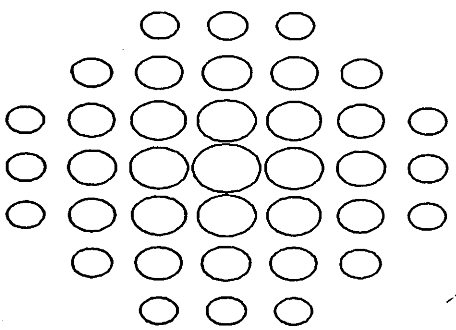


図４．２　ドット図

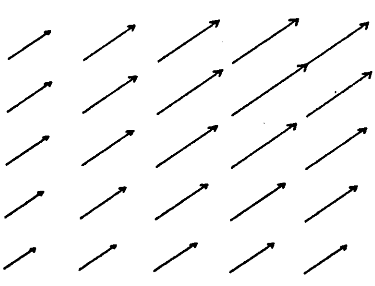


図４．３　ベクトル図

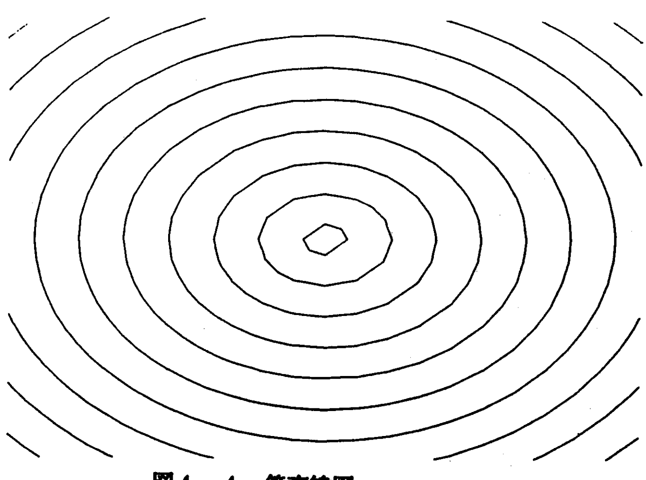


図４．４　等高線図

A＊F（X）＋B

（F：1，EXP，LOG；

A，B：定数）

の変換を指定する。

（d）表示仕様

線画／面画の選択。陰線／陰面処理、陰影処理の有無など。

（e）図形／画像化変数

従属変数に対する色、形状の大きさの対応関係など。

（f）画面上の表示位置（ビューポート）

画面上の表示位置を矩形で指定する。

（図4．6）

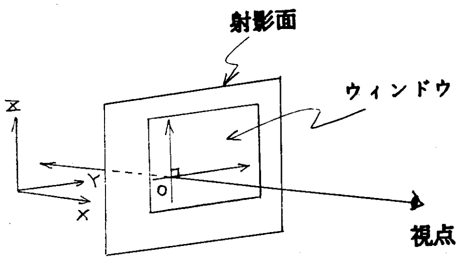


図4．5　ウィンドウ

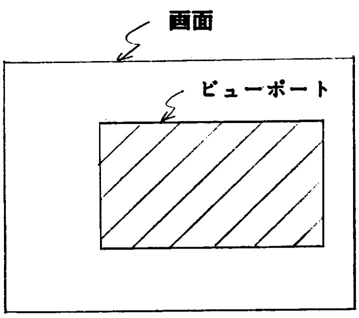


図4．6　ビューポート

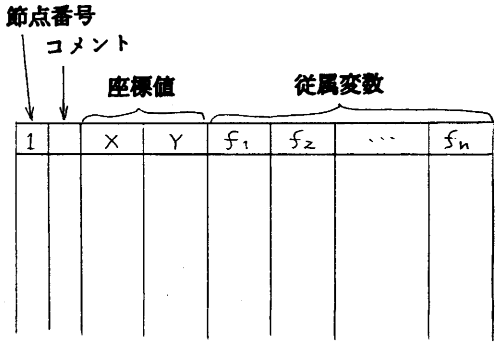
5．処理性能、表示例

本システムのファイル・作画機能の処理性能の目安として、以下に例を挙げる。

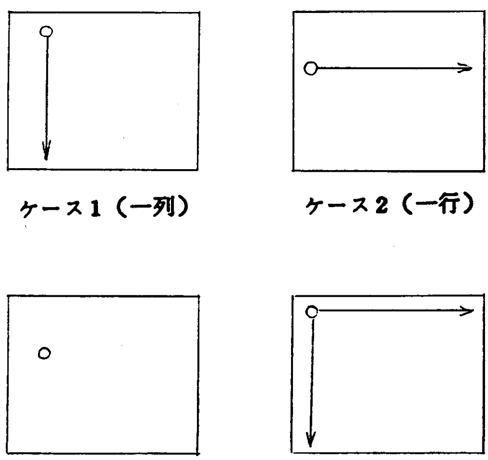
5．1　ファイル機能

本ファイルの目的の一つである高速なアクセス機能を検証するため実測を行なった。

対象としたデータの規模はFEM10000メッシュ，10201節点，従属変数10個である。これに対し、次の四つのアクセスのケースを



（a）入力データ



ケース1（一列）　ケース2（一行）

ケース3（一点）　ケース4（全体）

（b）アクセスのケース

図5．1　実験対象

測定した。

1）一従属変数に対する、全領域におけるデータ対象。（一列）

2）領域中の一点に対する、全従属変数対象。（一行）

3）領域中の一点に対する、一従属変数対象。（一点）

4）全従属変数に対する、全領域におけるデータ対象。（全体）

図５．１は本ファイルアクセスルーチンを通してユーザが入力するデータの構成と、これに対して上記実験の各ケースがどのようなアクセスに対応するかを示している。ここで、最も頻発するアクセスと考えられるのはケース１である。一従属変数に関する解析結果の入出力や、グラフ作画時のデータアクセスに相当し、本システムで特に性能を重視しているケースである。

各ケースに従ってデータをファイルに書き込んだ場合のＣＰＵタイム，ＵＳＥタイムの一例を表５．１に示す。全体一括入出力は通常一回だけ行われるものであり、以後頻発する列入出力においては、表に示す様に満足しうる性能を確認した。

５．２　作画機能

図５．２，図５．３，図５．４に表示例を示す。

図５．２は３次元デバイスシミュレーションの表示に密度図を用いたものである。立方体の３面を作画している。また、本ＦＤＭ密度図ではメッシュ内部の塗り潰し処理において、同色領域の統合化塗り潰しによりデータ転送量の削減と表示時間の短縮化を実現している〔2〕。

図５．３は物性解析結果を等高面図を用いて作画したものである。

図５．４は偏微分方程式の解をメッシュ曲面図と密度図を用いて作画したものである。（ａ）は差分法、（ｂ）は有限要素法による解である。

６．おわりに

本稿では、科学技術計算出力結果表示システムＳ－ＧＲＡＦのファイル機能、作画機能について述べた。数値シミュレーションをより容易に行なえる環境の整備を推進するため、個々のシミュレーションに依存しない一般的な出力表示システムの一層の機能拡充が要求されている。

今後、より多次元なデータの表現方法の開発、画像合成技術の高度化、グラフの修飾機能を含む対話処理への移行等が課題となる。

表５．１　ＦＥＭデータアクセス性能

	節点個数	従属変数個数	ＣＰＵタイム（秒）	ＵＳＥタイム（秒）
ケース１	１０２０１	１	０．５９	６．５
ケース２	１	１０	０．０９	２．４
ケース３	１	１	０．０７	２．０
ケース４	１０２０１	１０	１．９８	１６．８

（Ｍ２００Ｈ使用）

参考文献

〔１〕Joe F. Thompson
(Mississippi State University);
"Numerical Solution of Flow Problems
Using Body-Fitted Coordinate Systems".

〔２〕大山，矢島：多色図形塗り潰し方式，情報
処理学会第３１回全国大会論文集，
１Ｋ－５（１９８５）．

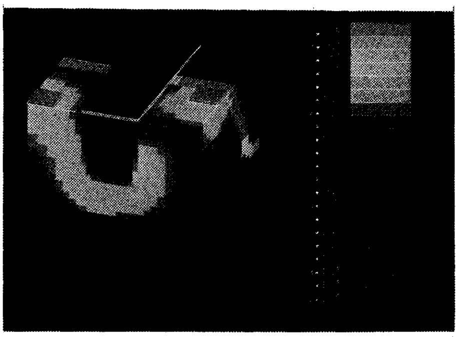


図５．２　３次元デバイスシミュレーション

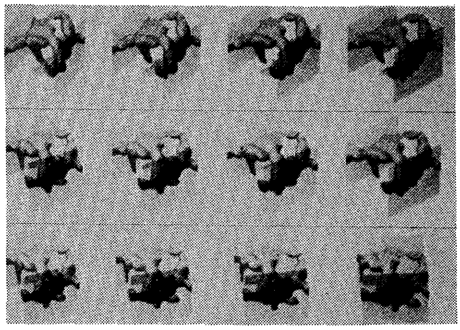
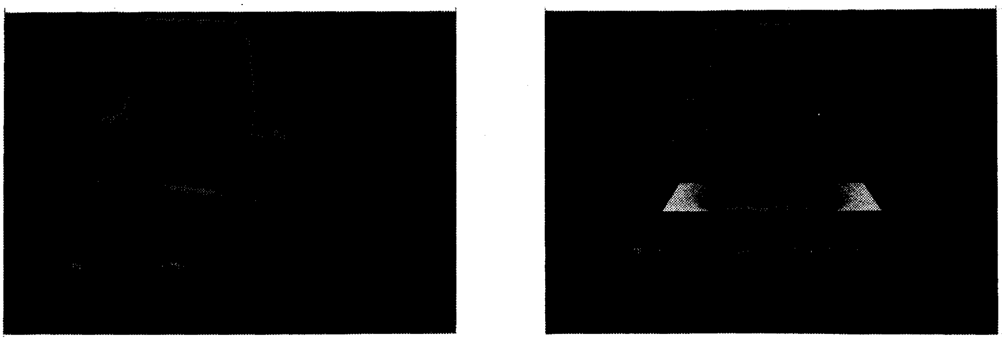


図５．３　物性解析



（ａ）　差分法

（ｂ）　有限要素法

図５．４　偏微分方程式の解