



## 対話方式による有限要素法の形状データの作成\*

米長 治男\*\* 馬場 亘\*\* 大西 忠博\*\*

### Abstract

A man-machine interactive mesh generation procedure is presented which works with a graphical communication system composed of a mini-computer and a storage-type CRT with keyboards and a joystick. An arbitrary mesh pattern can be obtained easily in which each mesh is triangle in shape and forms a polygon as a whole. Data of this mesh pattern are taken out as geometrical input data for finite element analysis. After feeding a simple mesh pattern as an initial guess, one conversationally repeats the modification of the mesh pattern displayed on the CRT with keyboard-and joystick-operations until a desirable mesh pattern is obtained.

For a large scale problem, an output of an existing automatic mesh generation program may be used as an initial guess of the mesh pattern. Some examples for the operation are shown as well as the composition of the system.

### 1. ま え が き

有限要素法による解析プログラムの入力データは、解析対象を多数の三角形で分割した要素からなり、この要素の作成および要素と節点（要素を構成している頂点）の番号づけ等、入力データの作成は一般に多大の労力を要する。近年有限要素法の発展に伴い、これら多量のデータ準備による煩雑さを軽減する自動データ作成プログラムが各方面で開発されている。しかしこれらのプログラムの多くはその結果をプロッタに出力しているので、いったん得られたデータを部分的に修正したい場合、あるいは設計者の思い通りの形状に細分化する必要のある場合に、データの準備に時間がかかる。そこで筆者らは2次元形状で3角形要素からなる形状データを、ミニコンピュータとディスプレイ装

置とからなる図形処理システムのもとで対話方式により作成ないし修正する方法を検討し、プログラム化を試みた。ここではその概要を報告する。

### 2. 対話方式による図形作成法の条件

有限要素法においては、複雑な形状を有する連続物体を多数の3角形要素\*\*\*に分割している。この分割された要素には一連の番号\*\*\*\*を付し、すべての要素間の頂点\*\*\*\*\*にも一連の番号\*\*\*\*\*を付すことによって構造物の幾何学的データとし、電子計算機への図形入力データとしている。本方法では、これらの図形入力データに基づいてCRT上に表示された図形を人間が識別し、修正したい箇所をキーボードやジョイスティック等の外部入力装置を使って、修正すべき情報を電子計算機に与える。電子計算機は与えられた外部情報により、図形データを変換し再びCRT上に表示し、人間の判断をうながし、さらにつきの情報が与えられるのを待つ。この操作を所望の図形が得られるまで繰り返す。最終的にはその図形データを大型機による有限要素法計算のインプットデータとする。

プログラムが具備していなければならない主な条件と、それを満たすための対策を以下に列挙する。

\* Preparation of Input Data for Finite Element Method with a Man-Machine System by Haruo YONENAGA, Motomu BABA and Tadahiro OHNISHI (Atomic Energy Research Laboratory, Hitachi, Ltd.)

\*\* (株)日立製作所原子力研究所

\*\*\* 有限要素法の名称を借用して要素 (element) と呼ぶことにする。

\*\*\*\* 要素番号と呼ぶことにする。

\*\*\*\*\* 節点 (node) と呼ぶことにする。

\*\*\*\*\* 節点番号と呼ぶことにする。

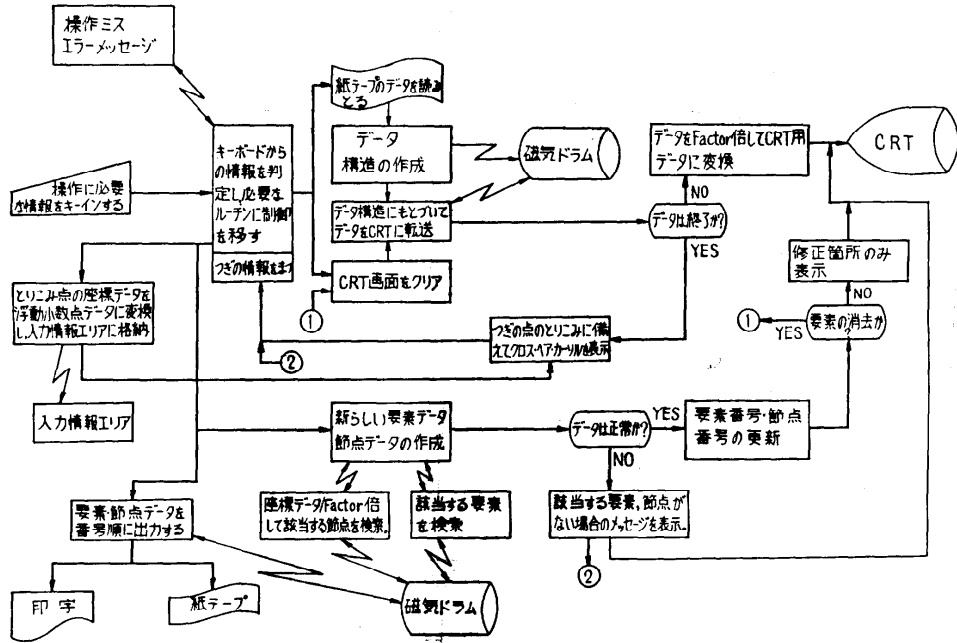


Fig. 1 structure of the system

- (1) 対話方式であることから点のとりこみや、キーボード操作が容易であること。
- (2) 要素番号や節点番号を表示すると、表示面が小さいので図形の識別が困難になる恐れがある。そこでこれらの文字情報を表示しなくても十分作成ないし修正ができるようにすること。この方法として各要素の重心に小さな●印を表示し、この近辺を指示することにより、その重心値に相当する要素を探出し、その構成を知ることができるようにする。
- (3) 図形の作成ないし修正にもなう新しい要素、節点の番号は、その近傍の要素、節点番号の値をとるようにすること。これはそれらの番号づけが大きな連立方程式や固有値を解く際のマトリックスの形状に大きな影響をおよぼすためである。そこで本方法では後述 3.6 のように修正しようとする要素の要素番号およびその要素を構成している節点番号中の最大値に着目し、この2つのデータにもとづいて新しい要素、節点に番号を付し、従来のデータをずらすことによって更新する。
- (4) 有限要素法では内部において、すべての節点はその節点をとりまく多数の要素の頂点になっ

ている必要がある。そこでこの条件にかなう図形の作成ないし修正法の種類として後述 3.5 の方法を採用する。

- (5) CRT 表示面上からとりこまれる点を実設計データとしてとりあつかえるデータに変換すること。これは CRT 表示面がラスタと呼ばれる格子状のメッシュに細分化されているため、そのとり得る値は整数となる。そこでこれらの点を実数に変換する。
- (6) 線分の近辺の点をとりにこんだ場合でも、正しく線分上の点としてとりこむこと。これは2節点間の線分上あるいは境界線上に新しい節点を作成した場合その座標値の精度を考慮する必要があるためである。この対策として、その線分を構成している2節点のデータに基づく直線の方程式を作成し、その方程式にのるように補正する。
- (7) 座標データの寸法のいかにかわからず、それらのデータを CRT 上に表示できること。その方法として、設計データを読みとる段階で、最大値を有する座標値を検出し、その値と CRT 表示面との比 (Factor) を算出し、図形を表示するとき、あるいは逆に CRT 表示面上の点を

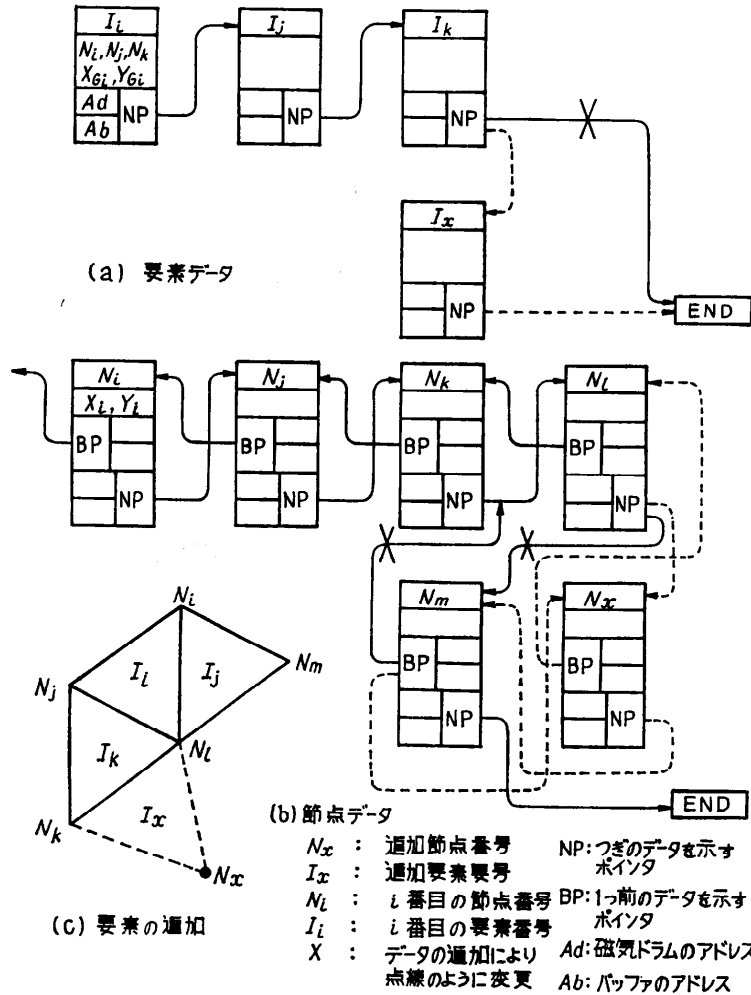


Fig. 2 data structure

とりこむとき、それぞれこの比にもとづいてデータ変換するようにする。

### 3. 対話形式による図形作成法

本方法による図形作成の論理過程は下記のとおりである。

- (1) インプットデータの準備
- (2) データ構造の作成・表示寸法の決定
- (3) 図形・重心の表示
- (4) 着目した要素の修正
- (5) 上記操作に必要なデータのキーボードからの入力
- (6) 要素の修正にともなうデータの更新

### (7) データの出力

本システムの構成を Fig. 1(前頁参照)に示し、上記論理過程の詳細を以下に述べる。

#### 3.1 インプットデータの準備

まず作成ないし修正しようとする有限要素法の図形データを準備する。このデータは要素データと節点データからなっている。要素データは要素番号順にその要素を構成している節点番号を反時計方向の順に、一次元的に配列( $N_i, N_j, N_k, \dots$ )したものである。節点データはこれら要素データのあとに、各節点の座標を節点番号の順( $X_1, Y_1, X_2, Y_2, \dots$ )に配列したものであり、有限要素法データとして一般的に用いられている形式に従ったデータを与える。

3.2 データ構造の作成・表示寸法の決定

上記データを読み取りながら、修正に便利なデータ構造 (Fig. 2(前頁参照)) を作成し、最後にそれらのデータが表示面上におさまるように Factor を算出する。要素データに関しては、節点番号を3個読み取るとともにその読み取り回数 (i) をその要素の要素番号 (I<sub>i</sub>) とし、主記憶装置の一定領域 (バッファエリア) に要素番号および3個の節点番号 (N<sub>i</sub>, N<sub>j</sub>, N<sub>k</sub>) を格納する。このあとその要素の重心 (X<sub>G<sub>i</sub></sub>, Y<sub>G<sub>i</sub></sub>) を格納する2語領域だけ確保し、つぎの領域に、そのつぎの要素情報が格納されるべきアドレス (NP) を算出して格納する。ここでバッファエリアは一定領域を確保しているにすぎないので、バッファエリアがいっぱいになると磁気ドラムに転送する。したがって NP にはつぎに格納すべき磁気ドラムのアドレスと、バッファエリアのアドレスの2つを格納する。このようにして、順次要素データを格納し、データが終了すると、最後の要素の NP には END 情報を入れた特定の領域を示すアドレス情報を格納し、つぎに節点データの読み取りを開始する。要素データと同様に、座標値 (X<sub>i</sub>, Y<sub>i</sub>) を読み取るごとに、その読み取り回数 (i) をその座標の節点番号 (N<sub>i</sub>) とし、節点番号およびその座標値を格納する。節点データの場合には、前後の節点を参照できるように、前記した NP の他に、BP を設けて、そこには1つ手前の節点情報が格納されている磁気ドラムおよびバッファのアドレス等を格納するようにした。ここで、X<sub>i</sub>, Y<sub>i</sub> を読み取る過程で常にその最大値を監視し、節点データの読み取りが終了した時点で、その最大値と表示面との比を算出する。この比 (Factor) は座標の最大値が表示面内であれば1以上の値となり、入力されたデータが表示面いっぱいには拡大表示されることを意味し、逆の場合には、1以下の値となり表示面内におさまるように縮小されて表示されることを示す。

3.3 図形・重心の表示

データ構造が作成されると、このデータ構造にもとづいて図形を表示する。まず1つの要素を表示するには、要素データ構造から、その要素を構成している3つの節点番号を知り、その番号からそれらの座標値を節点データ構造により探索する。この具体的手順のフローチャート

を Fig. 3 に示す。この座標値に Factor を乗じた値を整数化して順次 CRT に転送し、3個の節点座標を転送した時点で、その重心を算出する。この値は前もって確保してある要素データ領域に格納し、さらに最初の節点座標をもう一度 CRT に転送して1つの三角形要素図形を表示する。この後、先に求めた重心値に ● 印を表示して1つの要素の表示を完了する。以下同様に NP によりつぎつぎと要素を表示する。

3.4 着目した要素の修正

本プログラムでは1つ1つの要素に着目し、その着目した要素に対する修正を基本とした。従って基本操作として(1)着目した要素内をさらにいくつかの要素に細分化する、(2)要素の外部に新しい要素を作成する、(3)着目した要素あるいは節点を消去するという3つの操作を採用した。

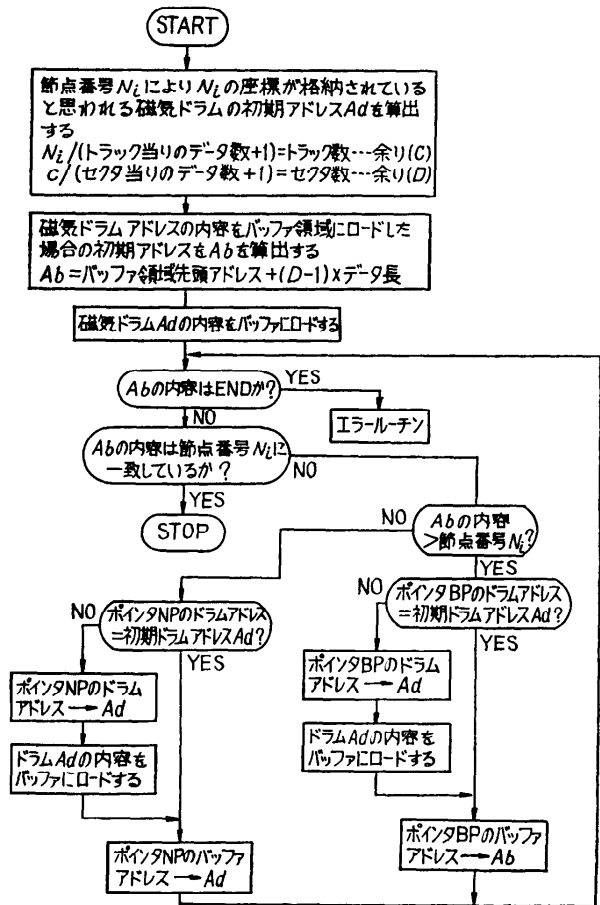


Fig. 3 algorithm of node search

これらの操作の具体的内容は下記のとおりである (Fig. 4 参照).

- (a) 節点  $N_i, N_j, N_k$  よりなる要素の各線分上に任意の点 ( $P_1, P_2, P_3$ ) を3点指定し, 着目した要素内を4つの要素に細分化する, 線分上の点を指定した場合の補正手順のフローチャートを Fig. 5 に示した.
- (b) 上記操作において, 周囲の要素により, 着目した要素の線分上にすでに節点がある場合である. すでにある節点の数に応じて (b'), (b'') の3つの場合が存在する.
- (c) 表示面上の任意の領域に任意の3点 ( $P_1, P_2, P_3$ ) を指定して, 新しい要素を作成する.
- (d) 節点  $N_i, N_j, N_k$  よりなる要素の外部に任意の1点 ( $P_1$ ) を指定し, この点と各々の節点を結んでできる線分が, 着目した要素を構成している線分と交差しないとき, その線分のみ発生し, 新しい要素を外部に作成する. (d') は指定した点が, すでに他の要素の節点に相当する場合である. この手順のフローチャートを Fig. 6 (次頁参照) に示した.
- (e) 着目した要素の任意の1線分上に, 任意の1点 ( $P_1$ ) を指定し, その点が存在する線分の対頂角に相当する節点とを結ぶ線分を発生し, 着目した要素を2つの要素に細分する. (e') は指定点ですでに他の要素の節点として存在している場合である.
- (f) 着目した要素を消去する. この場合, その要素を構成している節点の中に, 他の要素が共有しない節点が存在するならば, その節点をも指定して消去する.
- (g) 着目した要素内に, 任意の1点 ( $P_1$ ) を指定し, その点からその要素を構成している各節点に線分を発生し, 着目した要素を3つの要素に細分する. ただし, 一般に有限要素法では, 要素内の角度が鈍角になるものは, 数値計算上好ましくないので, 本機能はなくても差しつかえない.

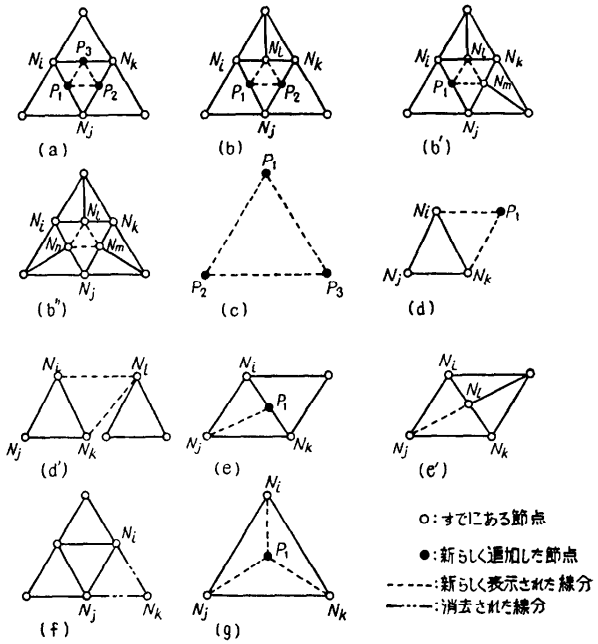


Fig. 4 kinds of modification

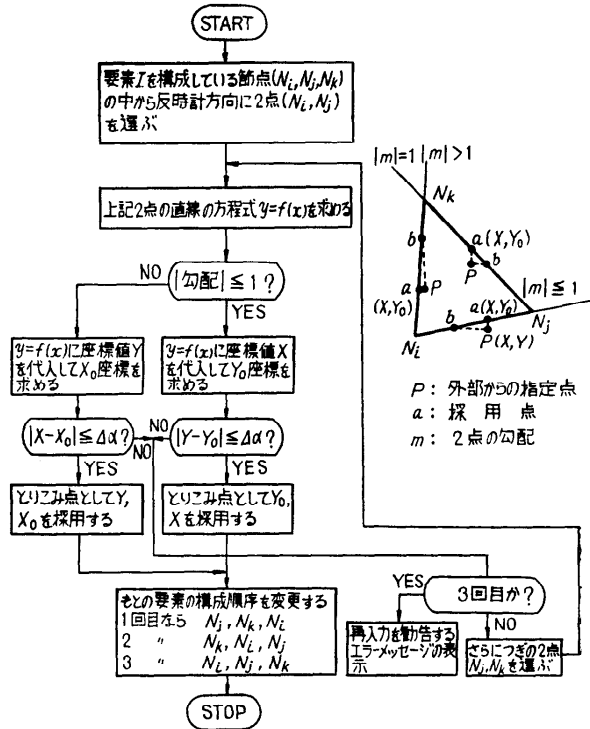


Fig. 5 scheme for adoption of point on a line

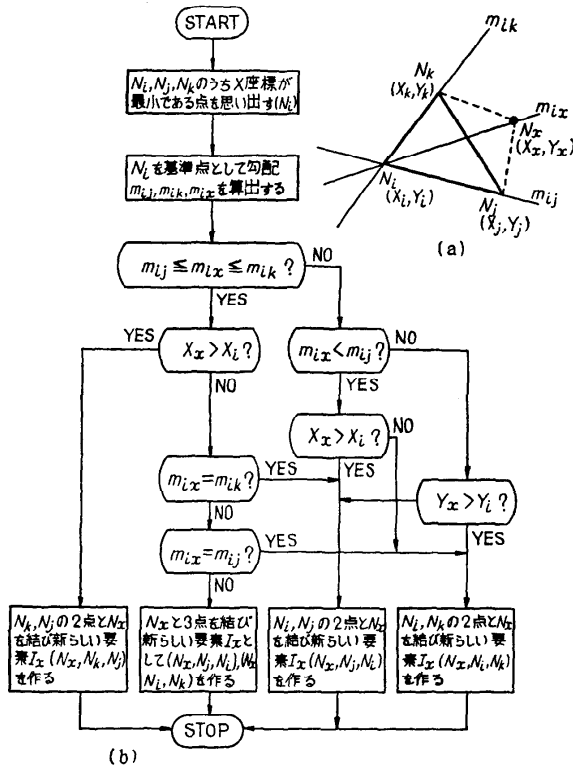


Fig. 6 scheme for selection of the new element

3.5 要素の修正に必要なデータのキーボードからの入力

上記操作に必要な情報として下記のものがあげられる。

- (1) 着目した要素の重心の指定 (その要素データを探索するのに用いる。)
- (2) 他の要素を構成している節点の指定と、任意の点の指定との区別。

Table 1 information of key board

修正方法 (図3.4参照)	修正方法の種類						修正方法の種類	
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	ニモニック情報
(a)	○	○	○	○	○	○	○	TRI 4
(b)	○	○	○	○	○	○	○	
(b')	○	○	○	○	○	○	○	
(b'')	○	○	○	○	○	○	○	
(c)	○	○	○	○	○	○	○	
(d)	○	○	○	○	○	○	○	TRI 1
(d')	○	○	○	○	○	○	○	TRI 1
(e)	○	○	○	○	○	○	○	TRI 2
(e')	○	○	○	○	○	○	○	TRI 2
(f)	○	○	○	○	○	○	○	TRI 0
(g)	○	○	○	○	○	○	○	TRI 3

①はキーボードの数字を意味し、Iは数字、⑥⑦はスペースを意味し、○は使用することを表す

(3) 修正方法の種類指定

これらの3つの判定を Table 1 に示すように定めた。ここで、他の要素を構成している節点をも含めて、一度に3点の指定をする必要がある場合とそれ以外の場合とに大別する。前者の場合には、3点の指定にキーボードの3~5を用い、他の要素を構成している節点から先に、反時計方向の順にジョイスティック装置により順次指定する。他の要素を構成している節点の数に応じて、キーボードの6~0を選択する。後者の場合には、他の要素を構成している節点と任意の点との区別をキーボードの2と3で区別した。最終的にニモニック情報をキーインすると、それらの情報にもとづいて処理を実行するようにした。

3.6 要素の修正ともなうデータの更新

要素および接点が新しく作成あるいは消去されることにより、下記3項目のデータ更新を行う必要がある。

- (1) 新しく作成された要素、節点への番号づけ。
- (2) 従来の要素、節点番号の更新。
- (3) データ構造への追加、削除。

Fig. 2(c) に示すように  $I_k$  なる要素の外部に  $N_x$  なる新しい点を指定し、 $I_x$  なる新しい要素を作成した場合について、データ構造への追加例を Fig. 2(a), (b) に破線で示した。ここで、新しく作成された要素、節点への番号づけは、着目した要素番号 ( $I_k$ ) に +1 した番号を  $I_x$  とし、 $N_x$  には着目した要素を構成している節点番号中の最大値 ( $N_i$ ) に 1 を加えた番号を与える。その後、基準となった  $I_k, N_i$  より大きい要素番号、節点番号を有する従来のデータについて、要素番号、節点番号に 1 を加えて更新する。最後に Fig. 2(a), (b) に示すように基準となった  $I_k, N_i$  のつぎに追加されるように、BP, NP を更新した。要素内部を複数個の要素に細分化する場合についても、単に新しい要素、節点の増加数が異なるだけで、これらデータ更新の手順は本質的に同じである。

この他、Fig. 4(f) に示すように、要素、節点の消去の場合には、それぞれ該当する要素、節点番号が格納されている領域を零にして、それ以降の要素、節点番号から 1 を減じるようにした。なお再表示する場合、要素、節点番号が零ならばスキップしてつぎのデ

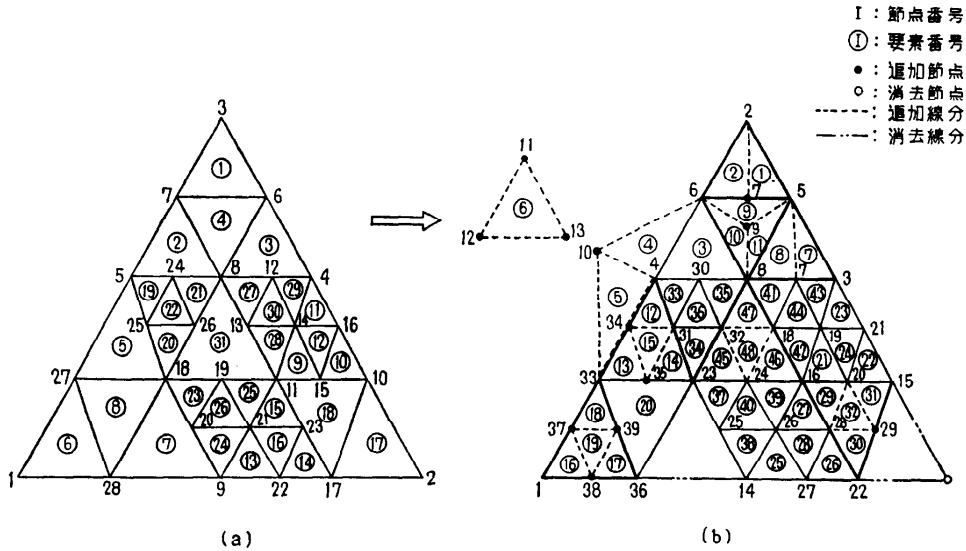


Fig. 7 example of fundamental operation

ータを表示する。

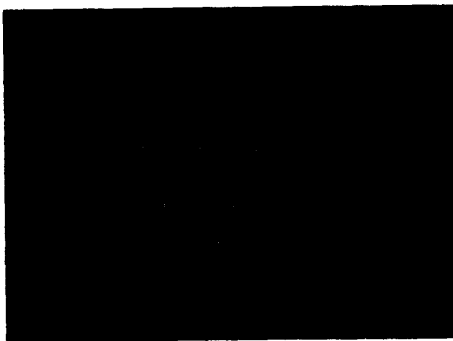
#### 4. 作 図 例

以上述べた方法に基づいて開発したプログラムにより、表示面上の図形を対話方式により作図した例を Fig. 7 に示す。電子計算機は HITAC-10、図形処理装置はソニーテクノロジックスの T4002A と、ジョイスティック装置を使用した。Fig. 7(a) は Fig. 3 に示した基本操作が 1 通り実行できるように配慮した原型図であり、Fig. 7(b) がその結果である。この実際図を Fig. 8(a), (b) に示した。

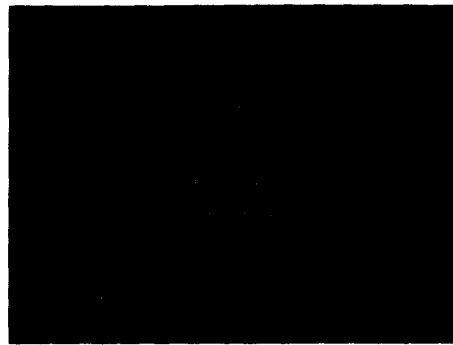
Fig. 9(a) (次頁参照) は 1 つの三角形内を多数の要素に細分化した図である。さらにその外部に要素を追加した図を (b) に示した。

#### 5. む す び

以上、有限要素法による解析のための図形データを対話方式により作成する方法について述べるとともにこれに基づいて作成したプログラムの基本的操作と、作図例を紹介した。本方法によれば、図形データを新しく作成する場合はもとより、現在各方面で開発されている自動データ作成プログラムの出力を磁気テープ装置に出力し、その磁気テープをこのシステムにかけることにより、その結果を迅速に知ると同時に、その場で要素の追加、分割あるいは消去などの修正が容易にできるなど、その適用範囲は広い。なお現在とりあつかえるデータ量は、要素数 5,000 個、節点数 5,000 点までである。また、表示面の大きさに制限があるの



(a)



(b)

Fig. 8 actual picture of Fig. 7

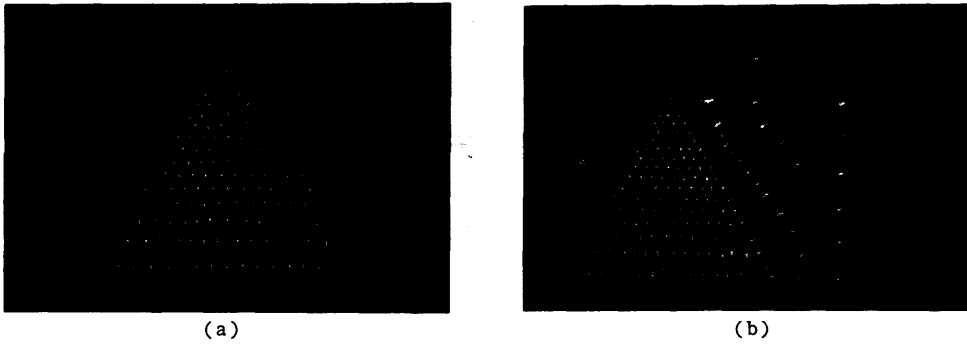


Fig. 9 example of element division

で、データ構造に階層をもたせるなどして、詳細に検討したい部分のみ表示できるようにするなどの改良の余地がある。

謝辞、本プログラムの作成に多大なる御理解と御援助を頂きました本研究所谷口薫所長、松岡謙一主管研究員に深く感謝致します。

#### 参 考 文 献

- 1) 川面恵司他：有限要素法による構造解析のため

の自動データ作成法，情報処理，Vol. 14, No. 5, pp. 334~340 (1973).

- 2) 古川康一：データ構造 (I)，情報処理，Vol. 13, No. 5, pp. 302~310 (1972).

- 3) 古川康一：データ構造 (II)，情報処理，Vol. 13, No. 8, pp. 554~562 (1972).

- 4) 中原陽一他：グラフィックスによる構造設計，bit, Vol. 5, No. 2, pp. 199~116.

(昭和 50 年 4 月 8 日受付)

(昭和 51 年 5 月 24 日再受付)