

対話形式による有限要素メッシュの自動生成と修正†

福田 順 子††

有限要素法を用いて構造解析を行う場合、入力データの作製に多くの人力と時間を必要とし、また解析結果の精度と自由度数は相互に関連し、自由度総数には制限があるので、応力分布の平坦な箇所ではメッシュを粗く、応力集中部ではメッシュを細かくする必要がある。著者は任意形状の平面構造物を必要最小限の入力データにより有限要素の大きさおよび分布密度を自由に制御し、自動的に要素分割を行う自動要素分割法を開発し、解析精度の向上と入出力の手続きの簡易化を図った。また構造解析に際して最も適当と思われるメッシュパターンを得るために、前述の方法によるメッシュ分割の結果をグラフィック・ディスプレイ装置の CRT 上に表示し、自動分割パターンのチェック、目視によるパターンの修正および生成を対話形式で行う機能を持たせることにより実用性の向上を図った。このシステムにより構造解析を行うに際して入出力の手続きが大幅に簡易化され省力化が可能なることを示した。

1. ま え が き

近年電子計算機の大型化に伴い、複雑な構造物の応力、歪等の解析に有限要素法が広く応用されるようになったが、そのために必要な入力および出力のデータ量が膨大となり、その準備および処理に多くの人力および時間を必要とするので、これらを軽減する必要がある。また解析結果の精度と自由度数は相互に関連し、自由度総数には制限があるので、応力分布の平坦な箇所ではメッシュを粗く、応力集中部ではメッシュを細かくする必要がある。著者は任意形状の平面構造物を必要最小限の入力データにより有限要素の大きさおよび分布密度を自由に制御し、自動的に要素分割を行う自動要素分割法を開発し、解析精度の向上と入出力の手続きの簡易化を図った。また構造解析に際して最も適当と思われるメッシュパターンを得るために、前述の方法によるメッシュ分割の結果をグラフィック・ディスプレイ装置の CRT 上に表示し、自動分割パターンのチェック、目視によるパターンの修正および生成を対話形式で行う機能を持たせることにより実用性の向上を図った。

2. 自動要素分割法の概要

2.1 入力データ

本方法により任意形状の平面領域に三角形メッシュを自動生成するに当たって入力できるデータはつぎの通

りである。

1) 平面領域の形状を定義するために必要な節点の節点番号と座標を指定する。平面領域は多重連結であってもよい。

2) 平面領域を適当な数のサブ・ブロックに分割し、各サブ・ブロックをそれぞれの周辺上の節点の集合により指定する。

3) 平面領域の外周辺およびサブ・ブロック間の境界線上の節点間を更に等分し、新たに節点を自動生成させる場合は、その節点間の等分数を指定する。例えば図1の()内の数字がこれに該当する。

4) 平行領域の外周辺およびサブ・ブロック間の境界線上で、曲線 AB 上に順次節点を設定したい場合は曲線 AB の両端の節点番号と点列の座標のみを順次入力する。例えば図1の番号のついていない■印がこれに該当する節点を示す。

5) 必要に応じて平面領域内に特定節点を指定する。図1の※印で示した節点がこれに該当する。

6) メッシュ分割法としては後述するように、規則的な分割法による規則的メッシュ分割法 (RMG: Regular Mesh Generation)、半規則的メッシュ分割法 (SRMG: Semi-Regular Mesh Generation) または乱数の使用による不規則的メッシュ分割法 (IMG: Irregular Mesh Generation) があるので、サブ・ブロックごとにその分割法を任意に指定することができる。またメッシュの分割法を特に指定しないサブ・ブロックについては、その外形および領域が単連結であるか等によって要素が適当な形状になるように自動的に分割の方法を選択する。不規則的メッシュ分割法を指定したサブ・ブロックについては必要に応じて、そ

† Automatic Finite Element Mesh Generation and Modification by Means of Interactive Graphics by JUNKO FUKUDA (Department of Naval Architecture, Faculty of Engineering, Kyushu University.).

†† 九州大学工学部造船学教室

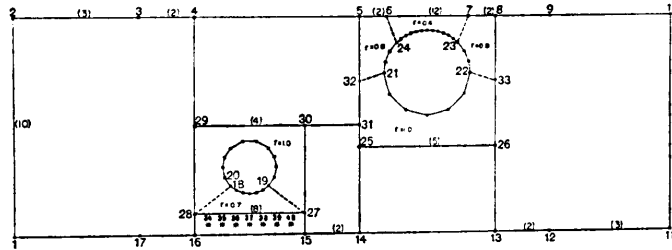


図 1 二円孔を有する矩形板を自動分割する場合の入力データ
Fig. 1 Input data to subdivide plate with 2 circular holes.

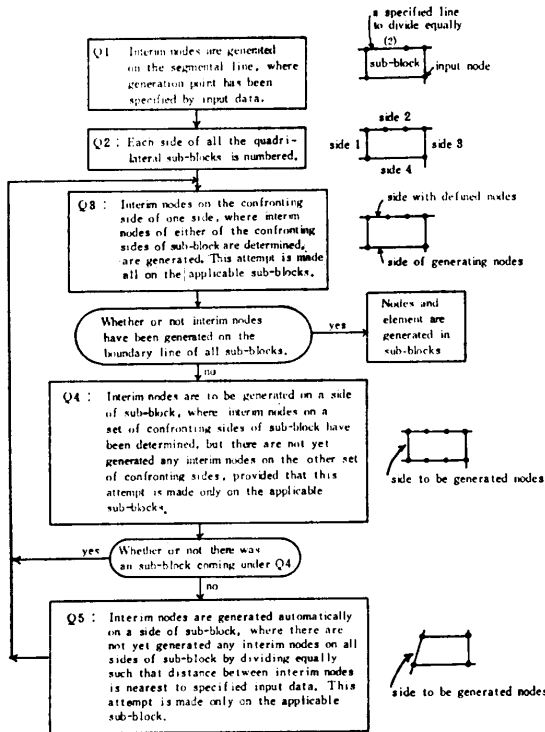


図 2 サブ・ブロックの周辺上に中間節点を生成する手順

Fig. 2 Flow-chart in which interim nodes are generated on the boundary line of sub-block.

の領域内を更に小領域に分けて、メッシュサイズの下限を指定する。図1の二円孔を有するサブ・ブロックがこれに該当する。

2.2 自動要素分割法の手順

前述の入力データにより平面領域を自動的に分割する手順について述べる。

1) 入力データにより節点間を等分することを指定した線分については、指定された等分数に従って中間節点を自動生成し、その他の節点間ではサブ・ブロックの対応辺上の節点距離ができるだけ等しくなるよう図2のフローチャートに示す手順によって中間節点を順次自動生成する。このようにして全サブ・ブロックの周辺上に節点を設定し、附番する。図1の入力データによりサブ・ブロックの周辺上に節点を自動生成した例を図3に示す。

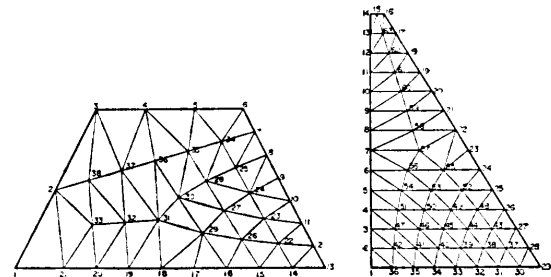


図 4 SRMG による要素分割例
Fig. 4 Mesh patterns generated by SRMG.

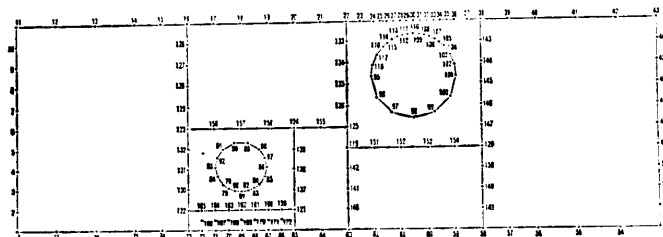


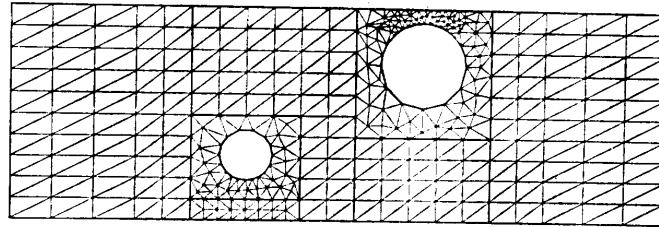
図 3 サブ・ブロックの周辺上に中間節点を自動生成し、一貫番号をつけた例
Fig. 3 Nodes generated and put consecutive numbers on boundary lines of sub-block.

2) つぎに各サブ・ブロックの領域内に後述のいずれかのメッシュ分割法により節点を自動生成し、三角形要素を生成する。

a) 規則的メッシュ分割法

四辺形サブ・ブロックの相対する辺上の節点の数が

等しい場合、それぞれ対応する節点を順次直線で結び、サブ・ブロックを更に四辺形小領域に分割し、各各の小四辺形に属する2本の対角線の内、指定した方向の対角線あるいは短い方の対角線によって更に2個の三角形に分割する。



(a) 図1の入力データにより自動分割した例

(a) Mesh pattern generated automatically by input data shown in Fig. 1.

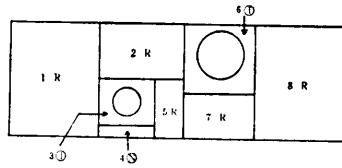
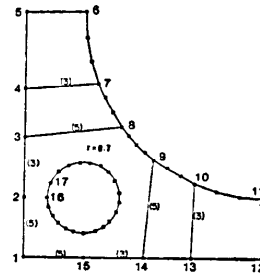


Figure : Sub-block number.
 R : Domain automatically subdivided by RIG.
 I : Domain automatically subdivided by IMG.
 N : Domain where element has been generated only from the nodes previously specified.
 It is, however, provided about the block for which method of generation has been previously specified that mark o is fixed to it, similarly as in the case of ①.

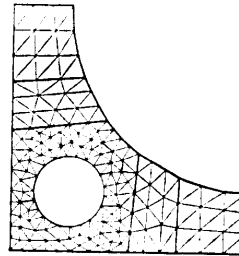
(b) (a)の例で適用された要素分割法

(b) Example of element mesh generation where the case of application was given in (a).

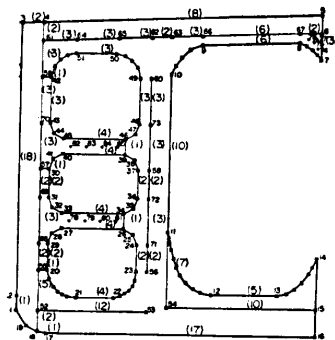
図 5
Fig. 5



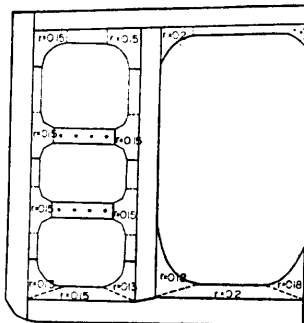
(a) Input data to specify external form of structure and nodes.



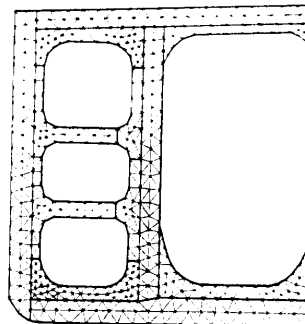
(b) Mesh pattern generated automatically by (a).



(c) Input data to specify external form of structure and nodes.



(d) Sub-blocks subdividing into mesh of given size r by IMG.



(e) Mesh pattern generated automatically by (c) and (d).

図 6 自動要素分割の応用例

Fig. 6 Examples of automatic mesh generation.

b) 半規則的メッシュ分割法

四辺形サブ・ブロックのそれぞれ相対する二辺上の節点の数が等しくない場合、生成メッシュサイズが二辺に挟まれる領域内で急激に変化しないように、サブ・ブロック内に節点を自動生成し、三角形要素を自動生成¹⁾する。この方法により自動的に要素分割した例を図4に示す。

c) 不規則的メッシュ分割法

サブ・ブロック内のそれぞれ指定された小領域に指定されたメッシュサイズに従って、乱数を用いて節点を生成し、サブ・ブロック全体で三角形要素を自動生成¹⁾する。

図5は図1の入力データにより、上述の三種類の分割法を同一領域内に任意に併用して自動分割した結果である。

2.3 応用例

本方法により平面領域を自動的に要素分割した例を図6に示す。

3. 要素の会話型処理の概要

図7に示すようなメッシュの自動分割システム Generator により平面領域のメッシュ分割を行った後、必要に応じてメッシュパターンの修正システム Modifier によりメッシュパターンの修正を行う。これを作動すると CRT 上に、種々の処理を行うためのコ

マンドのメニューおよび指示が順次表示されるので、その指示に従ってライトペン、ファンクションキー等によりデータを入力し、対話をしながら要素パターンの修正を行う。要素パターンの修正はサブ・ブロックごとに行い、その修正方法を指定するためのつぎに示す4個のコマンドがある。

(1) WHOLE: サブ・ブロック全領域について要素パターンの修正を行う。

(2) PART: サブ・ブロックの一部について要素パターンの修正を行う。

上記の(1)および(2)のコマンドには指定された修正領域内で節点の追加および消去を指定する下記のサブコマンド ADD および DELETE がある。

(a) ADD: 修正領域内に新たに節点をつぎの3種のいずれかの方法により生成する。すなわち

(i) 節点の座標を入力する方法

(ii) トラッキングマークを発生し、ライトペンにより節点の位置を指定する方法

(iii) 標準メッシュサイズに対する比を入力し、前述の乱数を用いて節点の座標を計算する方法

の3つが可能である。

(b) DELETE: 修正領域内の全節点あるいは CRT 上の節点の傍に表示された節点番号を key in することにより、その節点を消去する。

(1)および(2)のコマンドにより修正領域を指定すると、その領域内の要素が消去され、節点のみが表示されるので、必要に応じて CRT 上にて目視により節点の位置を確認しながら、サブコマンド ADD および DELETE を用いて対話形式で節点の追加、消去を行い、つぎにその領域内の要素を自動生成¹⁾する。図8はサブ・ブロックの一部に修正領域を指定し、その領域内にライトペンにより2個の節点を追加し、要素パターンを修正した例である。

(3) SIDE: 二つの要素間の共通辺を変更する。すなわち図9に示すように □ABCD 内における二つの共通辺 DB の両端の節点番号を入力することにより共通辺を DB から AC に修正する。

(4) ON BOUNDARY: サブ・ブロックの周辺上の節点について修正を行う。

このサブコマンドにはサブ・ブロックの周辺上の節点の追加、消去および位置の変更を指定する3個のサブコマンドがある。

(a) ADD: サブ・ブロックの周辺上の任意の節

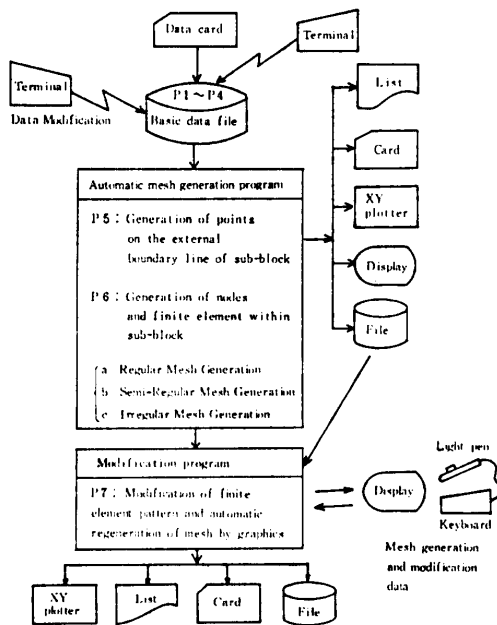


図7 自動要素分割システム

Fig. 7 Automatic mesh generation system.

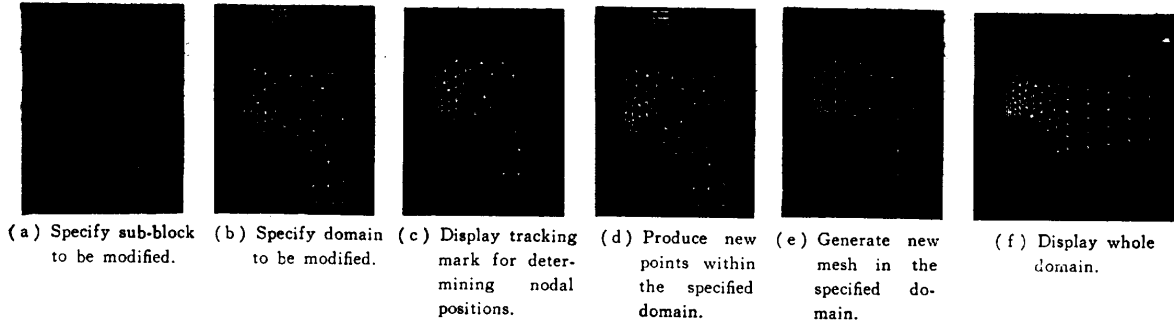


図 8 要素パターンの修正手順の例
Fig. 8 Procedure to modify mesh pattern.

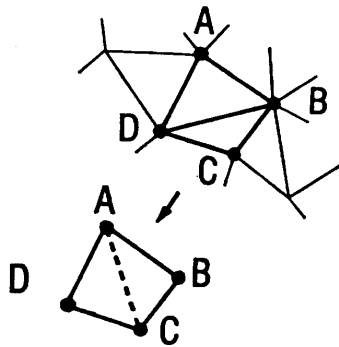


図 9 二つの三角形要素間の共通辺の変更
Fig. 9 Alteration of common side between two triangular elements.

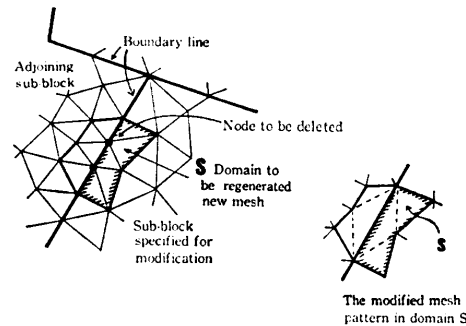


図 11 サブ・ブロックの周辺上の節点の消去と要素の生成
Fig. 11 Deletion of nodes on boundary line of sub-block and regeneration of new mesh.

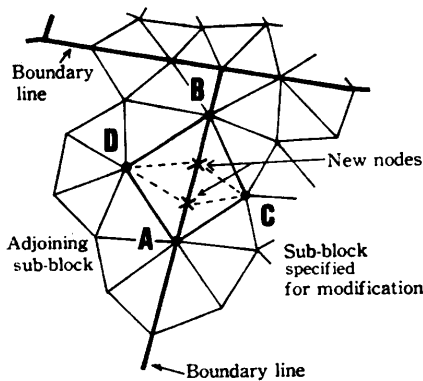


図 10 サブ・ブロックの周辺上の節点の追加
Fig. 10 Addition of nodes on boundary line of sub-block.

点 AB 間の任意の位置に n 個の節点を追加することを指定し、三角形要素の一辺 AB に相対する頂点 C と追加した節点をそれぞれ結び、要素 ABC を $n+1$ 個の三角形要素に分割する (図 10 参照)。追加する節点の位置の指定は座標 x, y の値を共に入力し、必ずしも線分 AB 上でなくてもよい。また x および y のどちらか一方の座標のみを指定すると線分 AB 上の節点

として他方の座標値を計算する。

(b) DELETE: サブ・ブロックの周辺上において消去する節点の節点番号を任意に数個指定すると、その節点を含む要素を探して消去し、それらの要素が構成していた領域 S 内を全く節点の存在しない領域として新たにメッシュを自動生成¹⁾する (図 11 参照)。

(c) CHANGE: サブ・ブロックの周辺上の任意の節点の位置を前述のサブコマンド ADD と同様に座標を指定し変更する。

図 10 と 11 に示すように追加、消去および位置の変更を指定した節点がサブ・ブロックの境界線上の節点である場合は、その隣接したサブ・ブロックについても自動的に要素パターンの修正を同様にを行う。ただしこのようにして修正した要素パターンが適切でない場合は前述の PART コマンド等を用いてその部分を修正することができる。

以上 Modifier に含まれる主なコマンドについて説明したが、これらが構成するシステムによる有限要素の自動生成および修正の手続きを図 12 にフローチャートにて示す。

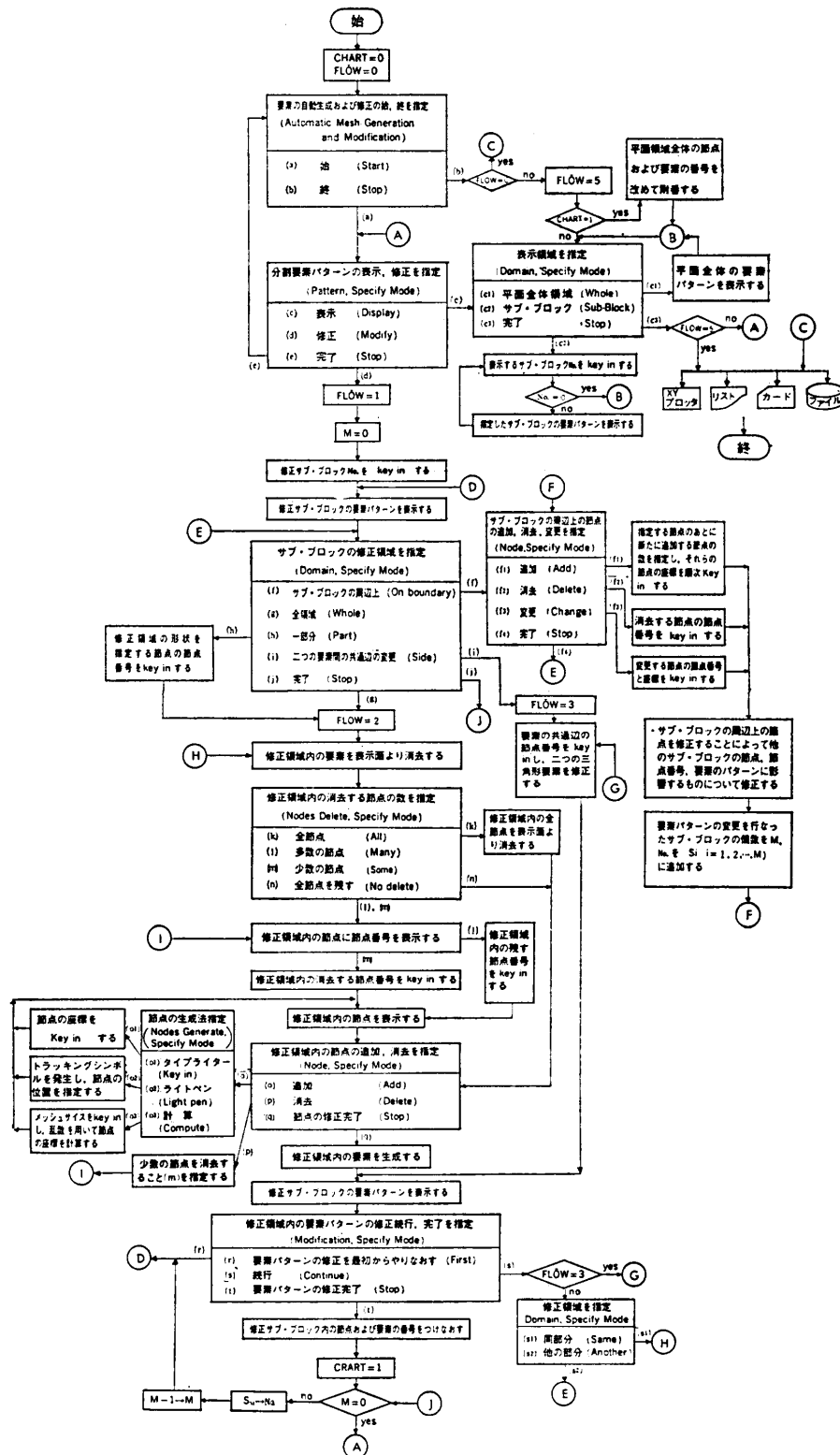


図 12 対話形式により有限要素を自動生成および修正する手順
 Fig. 12 Flow-chart showing procedure of automatic generation of FEM mesh and its modification by interactive mode.

4. むすび

有限要素法による平面構造解析を行うに当って、著者の通常入力データの作製等に要する多大の手数を軽減するための、CRT を用いた対話形式によるデータ生成、修正およびチェック機能をもった自動要素分割システムについて述べ、これにより構造解析を行うに際して手続きが大幅に簡易化され省力化が可能なることを示した。最後に本研究を行うにあたって御教示頂いた九州大学栖原二郎教授に深く感謝致します。

この研究は科学研究費の援助のもとに行われ、九州

大学大型計算機センターの FACOM M-190 システムを使用したことを付記する。

参 考 文 献

- 1) Suhara, J. and Fukuda, J.: Automatic Mesh Generation for Finite Element Analysis, Advance in Computational Methods in Structural Mechanics and Design. Univ. Alabama Press, pp. 607-624 (1972).

(昭和54年5月21日受付)

(昭和54年7月19日採録)