有限要素法による構造解析支援システムの開発 (第1報)*

——要素分割支援エキスパートシステム MESHELP——

東 町 高 雄** 山 口 孝*** 高 橋 寛†

A Knowledge-based Consulting System for the Finite Element
Structural Analysis (1st Report)

—MESHELP: An Expert System for the Finite Element Mesh Generation—

Takao HIGASHIMACHI, Takashi YAMAGUCHI and Hiroshi TAKAHASHI

This paper describes the global conception of the knowledge-based consulting system for the finite element structural analysis and partially implemented a consulting system called MESHELP for the finite element mesh generation. The know-how and expert's knowledge about mesh generation in the finite element structural analysis are defined clearly as mesh generation rules. This mesh generation rules are stored in knowledge data base. By using these rules, any beginner in structural analysis is able to judge the right or wrong of mesh, and moreover, to master mesh generation techniques for himself. In MESHELP system, user only answer a series of question putted from MESHELP system. Then, MESHELP system inferentially decide the right or wrong of mesh by using mesh generation rules in knowledge data base. In order to help user answer the question, a lot of figures for additional explanation are stored in knowledge data base.

Key words: expert system, knowledge-based consulting system, FEM, structural analysis, mesh generation

1. は じ め に

有限要素法は、今日、強力なシミュレーションツールとして、CAE 技術の中核的役割を果たしている。特に、汎用性、経済性、精度の面で優れた効果を発揮するので、新製品開発には欠かすことのできないツールとして大企業を中心に広範囲に普及している。この有限要素法も、数年前までは、大型コンピュータがないと利用できなかったが、近年のコンピュータハードの著しい発展と有限要素法ソフトの進歩により、今日では、かなりの規模の問題までパーソナルコンピュータを用いて手軽に解けるようになってきた。

このような状況の中で、現在、有限要素法のパソコン化と地方への普及が急速に進行中である。しかし、

地方の中小企業には有限要素法の専門家は少なく、有効に使いこなすことは一般に困難である。そこで、中小企業の経験の浅い技術者が、専門家の助けを借りることなく、有限要素法を自ら使いこなせるようになるのを支援するシステムの必要性が考えられる。

ところで、有限要素法に関する支援システムとしては、非線形解析プログラム MARC¹⁾を対象とした SACON²⁾がある。これは当該問題の概略分析を行って、MARC の持つ 38 個の解析機能のいずれを用いて解析すれば良いかを教えるのみであり、MARC そのものの使い方にはなんら言及しない。著者らの知る限りでは、有限要素法の使用法のノウハウを教えるような支援システムで公表されたものは存在しない。また、要素分割に関しては、いわゆるプリプロセサの発展が著しく、要素分割の自動化技術は今日非常に進んでいる³⁾。しかしあくまでも、どのように分割するかがあらかじめ分かっていることを前提として、単に機械的に処理するのが普通であり、どのように分割すべきかという観点からの研究は少ない。この種の研究例として、

* 原稿受付 昭和 63 年 2 月 10 日。昭和 62 年度精密工学会春季大会学術講演会（昭和 62 年 3 月 28 日）にて発表

** 正 会 員 (財)熊本テクノポリス財団電子応用機械技術研究所 (熊本県上益城郡益城町田原 2081-10)

*** (株)構造計画研究所 (東京都中野区本町 4-38-13)

† KCE(株) (熊本県下益城郡城南町下宮地 912-43)

Fig. 1 Overall system structure

Adaptive 法⁴⁾が最近注目されつつあるが、これは誤差評価を行って繰返し法により最適メッシュを自動的に探す方法である。他の方法として、知識工学的手法⁵⁾により専門家の経験やノウハウを積極的に活用する方法が考えられる。

そこで、本研究では、要素分割に関する経験的専門知識やノウハウを知識ベースとして体系化し、これを利用した要素分割支援エキスパートシステム ME SHELP を開発することにした。

2. 構造解析支援システムの全体構想

有限要素法を用いて構造解析を行うときの標準的な流れを考えてみると、以下ようになる。例えば設計者であるユーザが、これから開発しようとする製品のイメージを頭に描き、目的、予算、工程などを勘案しながら、有限要素法で解析すべき課題を選定したとする。

課題が決まると、まず、どのような有限要素モデルにするかを定める。モデル化のポイントは、解析目的（例えば高精度の解を求めることなど）を達成できる範囲内でできるだけ単純なモデルにすることであるが、そのためには高度の専門知識が必要とされる。

次に行う重要な作業は要素分割である。要素分割は有限要素法プログラムへの入力データ作成作業の中で、量的にも質的にも高いウエイトを占める。しかもその良否が解析精度を直接左右するので、最も経験と

ノウハウを必要とされる部分である。

更に、有限要素法はブラックボックス化されているので、得られた解析結果に信ぴょう性があるかどうかの判断をユーザが行わなければならない。その判断にも、専門知識とノウハウが必要とされる。

最後に、解析結果が信頼しうるものであることが分かれば、その結果に対する強度評価を行う。この強度評価にも幅広い専門知識と経験が必要とされる。

以上のように、有限要素法のデータ入力から結果の評価に至るまで専門家を抜きにして遂行できないのが現状のシステムである。

ここで、図1に示すような有限要素解析のための新しい支援システムを考えてみた。本システムは、同図に示すように、有限要素解析（プリ/ポスト処理を含む）汎用プログラムとこれを稼動する際の支援を行う支援プログラムから構成される。有限要素解析汎用プログラムは既存のものを用いる。支援システムの部分はまだ公表されたものは存在しない。この支援システムは、①モデル化、②要素分割、③結果検討、④強度評価の4つのシステムで構成され、各々に入出力処理部分、制御部分、知識ベースが含まれる。専門家の持つ専門知識、経験、ノウハウなどは知識ベースの中に蓄えられている。ユーザは知識ベースを持つ支援システムとの対話を繰り返すことにより、あたかも専門家の指導を直接受けているような形で解析を進めることが可能になる。

Fig. 2 MESHELP system structure

3. 要素分割支援システム MESHELP の概要

3.1 MESHELP のシステム構成

MESHELP のシステム構成は図2に示す通りであり、ユーザインタフェースモジュール、コントロール及び診断モジュール、入出力データ解析モジュール、ランク解析モジュール、知識ベース、データベースからなる。知識ベースの中にHELP図として要素分割に関する様々な経験的知識が格納されている。一方、要素分割の良否を判断するためのルール化された知識が要素分割ルールである。この知識はAND/OR木として体系化されており、各ノード位置の項目の良否の程度を示すランクを決定するのがランク解析モジュールである。また、ユーザの入力データのエラーチェックや次に表示する画面の選択を行うのが入出力データ解析モジュールである。

使用言語は、コントロール及び診断モジュールがOPS5 (DEC社)、他はFORTRANであり、グラフィックライブラリとして、IGL (ソニーエレクトロニクス社) を用いている。

3.2 知識モデル

要素分割の良否を決定する要因には、個々の要素形状、分割パターンの規則性、粗い分割部と細かい分割部の接続法、分割粗さなど多くのものがある。ある要素分割において、これらの項目がどのように処理されているかを専門知識に照らしてチェックすることにより、得られる解の精度をある程度予測することが可能と考えられる。そこでこれらの決定要因の処理状況をそれぞれ数段階にランク分けし、その組合せ状況から、

< 1 要素形状に関する質問 >

Fig. 3 Question diagram on element configuration

中間仮説を経て最終結論に至るまでの経験的知識をAND/OR木として体系化した。このAND/OR木の特長は、最上位の結論はもちろん、中間仮説もすべて数段階にランク分けされていることである。これはAND/OR木図において、より下位の要因の単純な組合せ数は膨大になるが、その上位で経験的専門知識に基づいて、ランクの段階を限られたものにうまく整理統合することにより達成された。最下位の要因数は14項目(要素形状、分割パターンの規則性、分割粗さ変化、予想応力分布と分割粗さ、要素間の接続性、形状近似の度合、集中荷重との対応、分布荷重との対応、拘束条件との対応、板厚との対応、材料物性との対応、座標系のとり方、節点番号の付け方、要素番号の付け方)、最終結論は、得られる解の精度に関するもの、使用メモリーや計算時間など資源に関するもの、入出力の取扱いやすさに関するものの3項目からなる。

3.3 MESHELP の機能

3.3.1 質問表示

前述の14項目の要因についての質問はすべて、日本語表現の分かりやすいフローチャート形式とした。例を図3、図4に示す。これらの質問表示図は、専門家が初心者の要素分割をチェックする時の思考の流れに即した内容とした。ユーザは自分が行った要素分割図をCRT画面または図面上に前もって用意し、これを見ながら、本システムからの質問に対する答を質問表示図の最下段の番号の中から選ぶだけでよい。

3.3.2 HELP機能

HELP機能はユーザに質問の意味を良く理解させ、

< 2 分割パターンの規則性に関する質問 >

Fig. 4 Question diagram on regularity of mesh pattern

< 三角形要素の形状 >

<RETURN>キーでもとの質問にもどります

Fig. 5 Help diagram on element configuration

具体例によって客観的な判断ができるようにするための解説機能であり、現在約 100 画面用意されている。質問表示図の中に出てくる用語の中で HELP 機能が利用できるものは、質問表示画面右上に明記されている。

HELP 画面の例を図 5、図 6 に示す。これらの例からも分かるように、HELP 図には有限要素法のいわゆる専門知識やノウハウが盛り込まれており、一つの画面

< 要素分割の粗さと精度の関係 >

Fig. 6 Help diagram on solution accuracy

だけでその項目の内容が直観的に分かるように工夫されている。

3.3.3 診断

以上のようにして 14 項目の質問に答えると、前述の AND/OR 木に従った診断が実行され、最終結論が導かれる。

結論は解析精度に関するもの 5 段階、入出力の取扱いやすさ及びメモリーなど計算機資源に関するものをそれぞれ 2 段階にランク分けして要素分割の良否を示す。更に、結論表示の中で、改良すべき点がある場合にはこれを表示してユーザに注意を喚起させる。診断結果の表示例は 4 節の図 9 に示される。

3.3.4 補足機能

本システムには以下に述べるような補足機能が用意されている。

(1) 回答確認コマンド： ユーザが各質問で回答した番号及びそれに対応してシステムで用意している回答内容を文章で出力する機能。このコマンドによる表示例は 4 節の図 8 に示される。

(2) 計算時間予測機能： ユーザが行った要素分割で有限要素解析を行った場合の予想計算時間をグラフ出力させる機能。診断結果表示画面に示されているように、総節点数、拘束自由度数、平均バンド幅の 3 データを入力すると、計算時間の予測値がグラフ出力される。

(3) WHY 機能： 14 項目の質問に対する解答結果から中間仮説を経て最終診断結果に至るまでのプロセスを示す機能。要素分割改良のための注意点も同時

＜診断結果導出の過程＞

Fig. 10 Process of conclusion

Table 1 Comparison of solutions

Items	Exact solutions	Finite element solutions
Maximum displacement mm	0.733	0.552 (0.753)
Maximum stress MPa	153	115 (0.752)

() ; ratio to exact solution

Proc. 6th Int. Joint Conf. on AI, Stanford University, (1978) 47.

- 例えば、川面はか：有限要素法による会話型構造解析プログラム・パッケージ-COSMOS-，ソフトウェア流通，19 (1984) 90.
- N. Kikuchi: Adaptive Grid Design Methods for Finite Element Analysis, Preprints of 2nd Joint ASCE / ASME Mechanics Conf., (1985).
- 例えば、上野晴樹：知識工学入門，オーム社 (1985).

編集後記

技術力が企業の盛衰を直ちに左右しかねない昨今，取り分け先端技術情報に対する会員の関心が高いのは当然だと思います。このような事情もあって本誌の小特集で取り上げる話題にも，従来この種のテーマが多かったようです。

しかしハイテク繚乱時代の今日ですら，極めて身近に意外に曖昧なまま見過ごされている，月並みながら重要で，かつ本質的問題が少なくないことを我々は兎角忘れ勝ちとなります。例えばその1つに本号小特集で取り上げた edge の問題があげられます。

edge “角” は日常生活の中においても，馴染み深い生活用語です。それだけに，日ごろ何気無く用いているこの言葉の持つ工学的意義を殊更意識し，追求することはまずまれで，“丸み”の対称語，あるいは物体のとがった端縁の比喩的表現としてこれまで暗黙の了解をし合ってきたのではないのでしょうか。

もしここで改めて edge “角” の定義を問われると，恐らくだれしもが最初は戸惑ってしまうに違いありません。「2面の交わる稜線」と言われると少し納得できるような気持ちにさせられますが，現実にこの定義に適う理想的稜線が存在し得るのでしょうか。ここに edge “角” の工学的取扱いの難しさが潜んでいると思います。edge “角” を回避するか利用するかいずれにせよ，edge “角” の性状，品質は機械設計の段階で明らに計画，指示すべきことは当然と思われます。にもかかわらず工学分野でまだかなり曖昧なまま見過ごされて来たのはむしろ意外な感じが受け受けます。

この小特集が日ごろ忘れ勝ちなこの edge “角” の持つ工学的意義と，edge quality の重要性を改めて喚起できれば幸いです。

最近，投稿論文数が漸増の傾向にあります。今日の過剰な情報量の弊害かも知れませんが，引用文献の不備が指摘されるケースも増えて来ております。この件は著作権問題と共に今後，当学会でも急いで取り組まなければならない課題のようです。

(柴田順二)