

計算力学に基づく設計のための
支援技術とその自動化

寺島 敏夫



計算力学に基づく設計のための
支援技術とその自動化

平成 2 年 4 月

中 島 憲 宏

論文要旨

中島 憲宏

論文題目

計算力学に基づく設計のための 支援技術とその自動化

本論文は、機械設計における設計計算に計算力学を有効活用することにより設計計算の信頼性を向上させその業務を効率良く支援する技術について理論と実践の両面により検討したもので、全6章よりなる。特に、有限要素法、境界要素法、差分法などの計算力学手法とその実現形であるシミュレーションプログラムを活用し、設計者の設計案の確認を容易にすることを第一目的とする設計計算支援システムのアーキテクチャについて述べる。また、本システムを構築するために必要な要素技術に関する実現方式についても述べる。設計計算支援システムとしては、幾何モデルを中核とする設計計算支援システムと設計計算モデルを中核とする設計計算支援システムの二つについて、その方法論と基本思想を明確にする。そして、これらのシステムにおいて必要な要素技術として、設計計算支援に適した自動要素分割手法やシミュレーションプログラムの入出力データ作成及び編集支援技法についても述べる。各章の内容は、以下の通りである。

第1章 緒言

初めに、CAD(Computer Aided Design)における解析の役割とCAE(Computer Aided Engineering)の発展について述べ、機械設計の自動化に貢献する上で計算力学を活用するための問題点と研究課題を明らかにする。

CAEにおいて、計算力学を活用するための基本となる技術の一つは、シミュレーションプログラムの入出力データ処理を簡略化する技術であり、特に要素分割の効率化や自動化に関する要素技術が重要である。二つ目は、機械設計における設計計算作業の信頼性向上や開発期間の短縮及び省力化を目的として計

算力学を活用する上で必要となる統合的な意味でのシステム化技術である。しかしながら、現状の要素分割技術及びシステム化技術は、いわゆる計算機との対話操作に頼る部分が多く、そのために必要となる対話操作による介入方法は複雑で使いづらいものになっている。

本研究の目的は、このような状況下において計算力学を機械設計のなかで設計者が容易に且つ有効に活用できるように設計計算環境を提供することにより、機械設計の効率化に寄与することにある。本研究では、

- ①有限要素分割において、単純な対話操作による介入で要素分割を自動的に行う技術
 - ②計算力学手法における代表的な三種の数値解析手法（有限要素法、境界要素法、差分法）に対して、共通的、且つ全自動処理で要素分割を行う技術
 - ③計算力学手法における代表的な三種の数値解析手法を用いたシミュレーションを共通的に支援するために必要なシステム化周辺技術
 - ④設計における解析作業を支援するためのシステム化技術
- に関する手法を確立し、計算力学を活用した設計計算の自動化に基づくCAD/CAEの方法論を提案する。

第2章 幾何モデルを中核とした設計計算支援技術

第2章では設計計算支援のためのシステム化技術として、幾何モデルを中核とした設計支援方法における設計計算の支援方法について述べる。但し、本章においては計算力学のうち最も一般的な有限要素法を用いたシミュレーションに主体を置き、幾何モデルと計算力学を有機的に連携させる方法について論じる。次に、この方法を用いた幾何モデルを中核として構成した設計計算支援システムを示す。但し、本節で述べる設計計算支援システムは、対話形構造解析支援システムの範疇であり、幾何モデラ、有限要素モデラ、解析モデラの三種類のモデラを持つグラフィックプロセッサとシミュレーション結果の可視化を行うポストプロセッサとから構成される。それぞれは、①CAEのための形状表現機能、②幾何モデルのための有限要素分割機能、③有限要素法を用いたシミュレーションのための計算条件入力機能、④シミュレーション結果の可視化機能を代表する。最後に、本システムを用いて幾つかの実験を行い、これらの実験例に基づ

いて前述した方法の検証を行う。

第3章 対話形構造解析支援システムの要素技術

本章では、対話形構造解析支援システムを構築する上で必要な要素技術についてその詳細を述べる。幾何モデルを中核としたCADシステムにおいて、対話形構造解析支援システムは幾何モデリングシステムの一つのアプリケーションシステムである。そこで、このCADシステムにおいて、本システムが有機的に連携しうるための方策として、ワイヤフレームモデルをベースにしたサブストラクチャモデルを考案した。サブストラクチャモデルとは、ワイヤフレームモデルを部分領域（サブストラクチャ）に粗分割したものである。しかしながら、幾何モデルをワイヤフレームモデルで表現したために幾つかの問題が生ずる。これらは、位相情報や幾何情報に関する幾何モデルの表現の不完全性に関することであり、次に述べるような方法で解決する。まず第一に、このサブストラクチャモデルの要素分割するべき領域を自動的に抽出する手法を構築する。領域を抽出するという意味は、位相的に面や立体の情報を作成するということである。これにより、対話操作の介入が大幅に削減できた。第二に、CADシステムとの親和性を良好に保つためと生成する要素の歪みを少なくするために、曲面補間式を用いてサブストラクチャモデルを全自動で要素分割する手法を構築する。曲面補間式としては、Coonsの式を応用する。本手法の特長は、従来のように等分割だけでなく、不等分割をより一般的に可能としたことにある。これにより、抽出した位相情報に幾何情報を自動的に与えることが可能となり、前記問題点が解決される。

次に、シミュレーション結果を可視化する手法を構築する。これは、シミュレーション結果として出力される数値情報の羅列をCG(Computer Graphics)技術を用いて可視化するものである。更に、単に図形処理を行うことで可視化するだけでは意味がないので、物理量の分布を統計処理して直感的に理解し易い表示を行う技法を構築する。

これらの要素技術を組み合わせた対話形構造解析支援システムのシステム化技術の検証として、実業務に適用した解析例を示す。これらの検証結果から、対話形構造解析支援システムの成果と有効性について確認したことをまとめる

と、以下のようになる。それらは、

- ① CADにおいて計算力学を活用することで信頼性が向上すること
- ② 計算力学の利用において、従来に比べ大幅に省力化が実現できること
- ③ 設計業務における解析作業の一部分をCADと計算力学により、置換しうる可能性のあること
- ④ 一方、日常の設計業務において本章で述べた方法では未だ不十分であることなどである。

第4章 設計計算モデルを中核とした設計計算支援技術

第4章では、第2章で述べた幾何モデルを中核とした設計計算支援方法を更に発展させ、プロダクトモデルやフィーチャベースドモデルの考え方をCAEの世界に持ち込んだ設計計算モデルを中核とした設計計算支援方法について論じる。次に、設計計算モデルに基づいた空間分割方式による全自動要素分割手法を構築する。これにより、設計計算支援システムの活用範囲を有限要素法、境界要素法、差分法まで広げるとともに、入力データの作成処理が自動化可能なことを示す。設計計算モデルを用いる目的は、解析対象の定義以後の複雑なモデル化作業を自動化することにある。複雑なモデル化作業とは、要素分割の粗密付けやシミュレーションの計算条件の設定などである。

この設計計算モデルは、幾何モデルに①環境情報、②材料情報、③機能特性情報、④形状特性情報などの設計情報を付加する形で表現される。そして、これらの付加情報は、①要素分割するための粗密付けに関する指針情報、②境界条件などを自動的に設定するための情報として用いられる。これにより、有限要素法、境界要素法、差分法のための要素分割に対応でき、形状の要素分割とシミュレーションの入力データの生成を自動的に行うことを可能とする要素分割手法が実現される。また、前述した空間分割方式とは、3次元空間を8分木構造を持つ立方体で表現し、木構造の深さ表現で分割の粗密付けやシミュレーション情報の保存や再生を行う方法である。

第5章 設計計算支援の周辺技術と設計計算支援システムの開発

第5章は、設計計算支援システムを構築する上で必要な周辺技術についてそ

の詳細を述べる。第一に、計算力学をユーザフレンドリィに支援する環境を提供するための仕組みについて述べる。これは、有限要素法、境界要素法、差分法などの手法別、及び構造、熱、流体などの分野別に異なる計算条件や出力情報などや個人の好みによる表示手段の違いに統一に対応するための方式を構築したものである。第二に、シミュレーションプログラムを容易に接続するための方式について述べる。従来のようにシミュレーションプログラムとのデータ入出力を個別にプログラムを作成して対応していくのは、効率的でない。そこで設計者が容易にデータインタフェースがとれるように、データ変換則を定義するだけで接続可能となる方式を構築する。

次に、これまで述べてきた要素技術やシステム化技術を組み合わせ、対話形の計算力学による設計計算支援システムを開発する。また、本システムを用いて実業務に適用した解析例を検証例として示す。これらの実験及び検証結果から本システムは、有限要素法、境界要素法、差分法などの手法別、及び構造、熱、流体などの分野別に異なる設計計算を統一的に支援する道具として有効であることを確認した。

第6章 結 言

第2章から第5章までに述べた方法論やアルゴリズムをシステムとして具現化し、実験や実践的な検証を通して得られた主要な結果をまとめる。それらは、①機械設計における設計計算に、計算力学を有効活用する一つの方法を提案し、その有効性を実務において確認したこと（特に、有限要素法、境界要素法、差分法を用いた高度なシミュレーションプログラムを共通的に活用し、設計者の設計案の確認を容易にすることを第一目的とする設計計算支援システムのアーキテクチャを構築したこと）

②本設計計算支援システムに必要な要素技術に関する実現方式として、有限要素法、境界要素法、差分法のための要素分割を共通的に且つ自動的に行う方法を構築し、その有効性を実務において確認したこと

③上記計算力学手法に基づくシミュレーションプログラムの入力データを自動的に作成する方法を構築し、その有効性を実務において確認したことなどである。

目 次

第1章	緒 言	1
1.1	研究の動機	4
1.2	研究の背景	6
1.3	研究の目的	11
第2章	幾何モデルを中核とした設計計算支援技術	12
2.1	有限要素法を用いた設計計算支援方式	13
2.1.1	設計計算における有限要素法を用いた シミュレーションの利用	13
2.1.2	CAD/CAM/CAE一貫システムにおけるCAEシステム	14
2.1.3	構造解析支援システム構築の課題	15
2.2	設計計算支援システムの構成と基本設計	15
2.2.1	有限要素法を用いた構造解析支援システムの構想	15
2.2.2	システムの構成	17
2.2.3	メッシュプロセッサの基本方式	18
2.2.4	プリプロセッサの基本方式	23
2.2.5	データインタフェイスプロセッサの基本方式	24
2.2.6	ポストプロセッサの基本方式	24
2.2.7	シミュレーション支援の範囲	25
2.2.8	設計計算手順	27
2.3	数値実験	29
2.4	第2章のまとめ	30
	第2章の図・表	31
第3章	対話形構造解析支援システムの要素技術	42
3.1	幾何モデルとのインタフェイス	42
3.1.1	サブストラクチャ方式とサブストラクチャ機能群	42
3.1.2	サブストラクチャモデルの内部表現と構造	44

3.1.3	サブストラクチャ探索アルゴリズム	46
3.2	幾何モデルのための有限要素分割手法	49
3.2.1	サブストラクチャ方式による要素自動分割方法	50
3.2.2	有限要素分割アルゴリズム	52
3.2.3	サブストラクチャの細分割処理	59
3.2.4	特殊分割手法	62
3.2.5	節点座標値の補正処理と節点番号の決定方法	63
3.2.6	サブストラクチャ方式における有限要素分割の 実験と検討	66
3.3	コンピュータグラフィックス技術を用いた シミュレーション結果の評価と表示	67
3.3.1	ポストプロセッサにおける表示機能群	68
3.3.2	等高線表示機能における色彩表示方法の課題	70
3.3.3	滑らかな補間とイメージ補間処理	72
3.3.4	物理量分布と色分布	72
3.4	解析事例と設計計算支援方法の検討	73
3.5	第3章のまとめ 第3章の図・表	75 76
第4章	設計計算モデルを中核とした設計計算支援技術	149
4.1	設計計算モデルを中核とした設計計算支援システム	150
4.1.1	統合形シミュレーション支援システムによる 設計計算支援構想	150
4.1.2	設計計算モデルを中核とした設計計算支援方式	152
4.1.3	システムの基本設計	157
4.2	幾何情報と属性情報の取り扱い	159
4.2.1	設計計算モデルの表現方法とその応用	159
4.2.2	設計計算モデルの内部記述	161
4.2.3	マクロストラクチャモデリング機能	167
4.3	設計計算モデルの要素自動分割手法	169
4.3.1	空間分割方式を用いた要素分割手法	170

4.3.1	空間分割方式を用いた要素分割手法	170
4.3.2	拡張4分木法を用いた要素分割手法	172
4.3.3	拡張8分木法を用いた要素分割手法	180
4.3.4	拡張4/8分木法を用いた再分割処理	190
4.3.5	設計計算モデルからシミュレーションプログラムの 入力データへの自動変換	191
4.3.6	拡張4/8分木法による要素分割の実験と検討	194
4.4	第4章のまとめ 第4章の図・表	196 198
第5章	設計計算支援の周辺技術と設計計算支援システムの開発	265
5.1	CAEのためのユーザインタフェース管理システム	266
5.1.1	CAEにおけるユーザインタフェースの課題	266
5.1.2	ユーザインタフェース管理方式	267
5.1.3	ユーザインタフェース管理システムの構築と実験	269
5.1.4	プリプロセッサにおけるユーザインタフェース 管理システム	271
5.1.5	ポストプロセッサにおけるユーザインタフェース 管理システム	272
5.2	シミュレーションプログラムとのデータインタフェース 手法	273
5.2.1	データインタフェースの基本方針	273
5.2.2	データインタフェースシステムの構築	275
5.2.3	データ変換則の作成方法	277
5.3	設計計算支援システムの開発と適用	279
5.4	第5章のまとめ 第5章の図・表	281 283
第6章	結 言	318
附 録		323
参考文献		324

第 1 章 緒 言

電子計算機（以下、単に計算機と略す）を用いて設計業務を支援すると言う考え方は、1959年に始まったMIT（米国、Massachusetts Institute of Technologyの略）のCAD（Computer Aided Designの略、以下略語を用いる）プロジェクトにより提唱されたと思われる[1]。ここで提唱されたCADの概念とは、

- ① 計算機と利用者の対話環境で作業あるいは処理を進めること
- ② 図形を計算機と利用者のインタフェイスとすること
- ③ シミュレーションを活用して設計案をまとめていくこと

などである。このプロジェクトの結果、2次元図形処理システムSketchpadが誕生した。しかしながら、当時の技術は未だ未熟であり3次元図形処理やモデリング及びモデルの概念、更にはシミュレーション手法などは考えられていなかった。例えば、シミュレーションに関する提唱は、設計式とパラメータテーブルから経験と勘により最も妥当な解を得るというものであった。その後1973年のPROLAMATで幾何モデルと幾何モデリングに関する概念が明確に提示された[2][3]。つまりここで初めて、設計対象物の形状データ（幾何モデル）を設計情報の共通データとして、設計の上流から下流までの作業を支援する方法論が示された。設計の上流から下流までの作業とは、設計案を具体化する図面化作業からその内容を検討あるいは確定するシミュレーション作業、そして加工や生産までのことをさす。また、シミュレーション作業においても有限要素法を用いるということも提案され、CAE（Computer Aided Engineeringの略、以下略語を用いる）という言葉が定着し始めた。この当時のCAEの定義は、統合化作業と解析作業の二つある設計作業のうち解析作業の部分の主な役割とするものであった。

現在ではCAEという言葉が世に出てから既に20年余りが過ぎようとしており、広義と狭義の意味があることは良く知られている[4][5]。日本情報処理開発協会発行の「CAEに関する調査研究報告書」も米国SDRC社の提唱したCAEの考え方と従来のもとの違いを、即ち、広義と狭義の意味があることを示している[6]。そして、その役割も広義と狭義のCAEとは自ずと異なってくる。本論では、設計業務全体を計算機の力を借りて支援することをCADと呼び、CAEは狭

義の意味で用いる。狭義の意味のCAEは、前述の通り古くから定着されており数値計算などの各種シミュレーションに重点を置いている。CAEの広義な解釈は、1977年頃に米国のSDRC社が提案したものを一般的に指す。それは、製品の開発設計における一連のエンジニアリング作業（例えば、基本設計、詳細設計、数値実験、製図、加工など）を統合し、合理化するためのシステム化概念である。そして近年では、広義のCAEの方が一般的に広く使われている[7]。その理由はIBM社がSDRC社の考えに同調して以来、多くの利用者や開発者たちが類似の思想をベースにしたシステムを提案したり構築したからである[8]。しかしながら、CADやCAEに関する基礎技術や応用技術は未だ未完成的な部分が多く、CADや広義のCAEの理想と現実の差が大きい。例えば、現在最も多く利用されている有限要素法や境界要素法、差分法などを用いたシミュレーションプログラムにしても、それらが対象としている現象を全て精度良く模擬実験できない。また現在の多くのCAEシステムは有限要素法を用いたシミュレーションプログラムの単なるデータ入出力支援を実現しているに過ぎず、CAEではなくて有限要素法を用いたシミュレーションの支援システムと評価せざるをえない状態である。しかし、利用者である設計者は現状から急速に理想に近づく事を強く期待しており、設計業務において設計計算の道具として利用できることを切望している。

一方、計算機を用いて設計業務を支援すると言う考え方や設計作業のなかでシミュレーションを活用すると言う考え方はCAD特有のものではなく、計算力学手法の研究者やシミュレーション技術者にとってもこれらの考え方は古くから自然な考え方であった[9]・[11]。そこで、CAEの原点とも言うべきシミュレーションの歴史をさかのぼって見る。そして、その背景を明確にすることににより、筆者が狭義の意味でCAEを用いる理由と筆者が考えるCAEの役割を述べる。設計のなかで必ず使われてきている設計計算というものは、梁理論を用いたものを始めとしてその昔から多々ある。1950年代の初頭、航空機産業がジェット機の時代に切り変わろうとすると、設計者や構造技術者にとって、翼構造の設計はとてつもなく複雑な問題であった。この問題を解決する方策として米国や欧州の研究者達が、その後有限要素法の母体となったマトリックス構造解析法という新しい設計計算手法の開発に成功した[12]。その当時、全くの偶然の

一致ではあるが、技術計算用の計算機が開発された。有限要素法はマトリックス代数を用いて、組織的かつ統一的に計算の手順を記述した方法で、計算機を利用すれば大量の計算を短時間に処理できるという優れた特長を持っていた。1950年代の宇宙開発時代になると有限要素法は航空機産業界の設計などの最先端の設計には必要不可欠になった。その後、有限要素法は土木工学のなかで飛躍的な発展を遂げ、有限要素法の応用拡大の道を開き、1984年に日本に導入されると同時に日本国内でも鉄鋼、建設、造船、自動車などの分野で広くブーム的に利用され、今日に至っている。また、有限要素法は構造問題に適用されただけでなく、流体、電磁場、導波管、金属転位論、化学反応などにも適用されている[13]。一方、近年有限要素法が万能という考え方は、境界要素法の出現や差分法の見直しにより、一般的でなくなっている。例えば、無限領域に広がる流体問題や音響問題、また亀裂のように特異点をもつような領域の問題は有限要素法は不得意である。そして、RBSM法のようなまったく新しい理論も出現してきている[14][15]。しかしながら、広範囲な設計分野で有限要素法を用いたシミュレーション、特に、構造解析が従来の設計計算の一部に取って変わろうとしてきているのも事実である。現在のところ構造解析は、ただ単に製品を構成する部品の強度評価や重量軽減のためなどの設計（計算）の確認に利用されることが多いが、今後は、製品の構造的健全性が製品の性能仕様全般に影響を及ぼすことから、構造解析の設計における位置付けは益々重要となる。以上のように、有限要素法の普及とともに製品構造の挙動予測ツールなどとして、設計業務のなかでシミュレーションを活用しようとする動きが加速し、構造解析などのシミュレーションの自動化や機械化が活発に行われるようになった。その先駆的な役割を示したのが、いわゆる構造解析支援システムと呼ばれる対話形システムである[16][17]。しかし、この道具は、あくまで構造解析の合理化であり自動化が第一目的であって、設計との密な融合や設計全般の合理化は実現し得ていないのが現状である。

このようにして有限要素法の普及とシミュレーション技術の有効利用という考え方が発展し、更に幾何モデルという考え方がCADにおいて生まれた事により、CAEという考え方が登場したと言える。それゆえに、CAEの発展の歴史から現在のCAEシステムと言え、単に、構造解析支援システムを指すことが多い

のである。しかしながら、設計との融合と設計の合理化を実現しようとするならば、計算機が扱えるデータモデルを作成してからシミュレーションを行い、最適化と評価を繰り返す作業を合理的に効率良く支援できる環境あるいは道具を提供する必要がある。ここで言うシミュレーションとは、例えば、性能、機構、形状解析、構造挙動、配置手順、アSEMBル手順など数多くある。もちろん、そう言ったシミュレーションだけでなく、データモデルやシミュレーション作業と実験や試作、製図、加工などとの間をも上手く関係させ得ることを考えねばならない。しかし、シミュレーション作業だけでなくこれらの関係作業をもCAEにより支援しようとするには、あまりにもその範囲が広すぎる。それゆえに、計算機による設計支援という設計業務の効率化に関する研究や開発はCAD/CAM(Computer Aided Manufacturingの略、以下略語を用いる)/CAEの三つの分野に大きく分けて、それぞれ独自の方法で目的を同じとして進められていると考える。筆者の考えるCAEの役割は設計計算の支援による初期設計業務の効率化や合理化を図ることである。具体的には、設計案の確認や検討を容易に実現し得ることが当面のCAEの役割であり、決して設計案を算出しようというものではない。例えば、設計者が勘で決めた部品配置における特性確認や、経験的に決めた肉厚の安全性確認などを効率良く支援することである。広義の意味のCAEの役割の多くの部分、例えば、シミュレーション作業と実験や試作との係わりあいなどは、もっと大局的な形で設計業務支援を考える方がより実現性が高いと考える。なぜならば、広義のCAEの概念に代表されるような設計の合理化や機械化、自動化に関する議論や考え方はまだまだ研究開発途上であり、そう言う総合的な設計支援のモデル化は、これからの研究によっておそらく形成されて行くものと判断されるからである。

1. 1 研究の動機

現在では設計業務を支援する道具として、CAD/CAM/CAEシステムが広く普及してきており、設計業務に従事するすべての技術者に共通の基礎的で必須の道具となりつつある。そして機械設計においては、設計から製造までの作業を幾何モデルを中核として支援しようとするCAD/CAM/CAE一貫システムが現在のところ主流となっている。ここで、CADの利用目的は、設計業務の効率化や

信頼性向上にあり、CAD(Computer Aided Draftingの略とする、以下略語を用いる)は製図/図面の自動化である。CAMの利用目的は、NC(Numerical Controlの略、以下略語を用いる)の利用に代表されるように生産設計の機械化にある。そして、数値実験などに代表されるCAEは、

①製品の重量低減や小型化など最適設計に基づく原価低減を実現すること
②新製品の開発期間短縮を図ること

③製品の信頼性はもとより、設計及び製造作業の信頼性向上を図ることなどを特に目的としている。CAD/CAM/CAEのうち特に現実のCAEの利用実態については、以下①～④に述べるような報告がされている[18]～[21]。

①機械系3次元CADシステムでは、各種アプリケーションが幾何モデルのデータを共有することで設計業務を一貫的に支援しようとしている。しかし、現実の使われ方は各種アプリケーション専用の幾何モデルを生成し、そのデータを独立のかつ専用的に利用することが多い。例えば、有限要素法を用いた構造解析支援システムを利用するために作られた幾何データは、シミュレーション用として専用的に利用されているのが実態である。

②CAEシステムの本来の目的の一つは、設計過程における設計案の確認や評価を行うことである。しかし、現在の3次元CADシステムの最も多い利用分野が構造解析であるのに、解析は設計終了後に設計結果の確認を目的として行われる事が多い。

③設計者にとって構造解析を行うという作業は特殊な作業であるため、設計者自身がCAEシステムを利用するという事はまれである。すなわち、CAEシステムはCADとしてではなくて、有限要素法を用いたシミュレーションの支援システムとして構造解析の利用者に使われることが多い。

④利用者の今後のCAD/CAM/CAE展開計画の主要課題として「構造解析システムなどのCAEに展開する」という意見を58%の利用者が項目の一つとしてあげている。

一方、筆者の調査によれば、これらに加えて次のような事実が明らかになっている。

⑤利用者はCAEを初期設計から積極的に設計案の確認などに利用していきたいが、そのためには多種多様なシミュレーションプログラムが必要である。しか

しながら、数種のシミュレーションプログラムを利用するにも、現実的にはそれぞれ専用のデータ入出力支援システムを利用しなければならない。しかも、少人数でそれら多くのCAEシステムを利用している。

④CAEの思想は数値実験を駆使して設計業務の効率化を図ろうとするものであるが、数値実験にともなう計算機負荷が膨大なものとなっている。

以上のように、CAE利用者が持つ問題点や今後の展開への期待とニーズは膨大であり、これら数多くの問題点や課題の基本的な部分を少しでも解決する必要がある。

1. 2. 研究の背景

①CAEシステムに関する研究

1.1節でも述べたように、有限要素法の技術の発展とともにその周辺技術も発展してきた。有限要素法の主な周辺技術とは、シミュレーションプログラムの入出力データの作成作業を支援する技術のことである。また、Sketchpadに始まる対話形CADシステムの技術の発展とともに、1970年代後半頃からは、いわゆる対話形のプリ/ポストプロセッサが開発及び利用されるようになった。プリ/ポストプロセッサとは、シミュレーションプログラムをメインプロセッサとするとメインプロセッサの入力データを準備する側がプリプロセッサであり、出力データを整理する側がポストプロセッサである。この対話形プリ/ポストプロセッサの原型は、グラフ用紙などを用いて作画することで節点や要素のデータを作成していた作業や計算結果の数値の羅列を整理する作業をパッチ処理的にプロッタやデジタイザを用いて簡略化したものであった[24]~[26]。1970年代の半ば頃になると、グラフィック端末の出現とともに対話形のプリ/ポストプロセッサの考え方やシステム化概念が出現してきた。そして1970年代後半になると、初期の商用システムや企業内の実践システムが開発されるようになった[27]~[30]。このように有限要素法の周辺技術が発達するとともに、有限要素法を用いたシミュレーションプログラムも汎用化されてきた。これらの環境が整備されるに従い、この頃ようやく限られた科学者だけの技術から一般の技術者にも利用できる技術として計算力学手法を用いたシミュレーションプログラムが浸透してきた。同時に、1970年代後半においてCAD/CAMとの融合に

関する考え方とシステム化概念が提示されてきた。当時、CAEにおいては有限要素法を用いたシミュレーションプログラムの入力データ作成作業を自動化することが究極の問題であり、それに向けてのプリ/ポストプロセッサの考え方とシステム化概念が主流であった。現在も、この作業の自動化が究極的な目標であることは変わらないが、当時の技術においては完全な自動化という目標に対しては未完成なものが多かったと思われる。そこへ対話処理による設計業務の補助を目的とするCADシステムの考え方が提示され、その枠組みのなかでCAEを活用しようとする動きが現れた。これが、1980年代の大きなCAEの流れである。1980年代には、CAEシステムにおける要素技術である要素分割技術や表示技術が1970年代に比較すると飛躍的に向上し、実践的なシステムが数多く発表されている[31]~[54]。1980年代前半のCAEシステムは、ハードウェアと要素技術の進歩によって自動処理化やカラー表示などの機能を特長とした。1980年代中頃は、主にコンピュータグラフィックス技術や使い勝手などの面が強調されたものが台頭した。そして、計算機環境もみんなて共有する大型計算機から個人が占有できるワークステーションへと移行してきた。また従来の汎用化指向と共に、利用目的や分野に依存して専用化を指向する分化傾向も現れてきた。その理由として、飛躍的に進歩してきたはずのプリ/ポストプロセッサのシステム技術であるはずなのに現実の設計業務においては、未だに数多くの不満が残されていることがあげられる[44][46][51]。このことは、設計と計算力学の融合が未だ不十分な状態にあることを示唆する。その理由の多くは、プリ/ポストプロセッサというシステム化概念にあると思われる。前述したように、プリ/ポストの考え方はメインプロセッサであるシミュレーションプログラムから見た概念である。すなわち、現在までのプリ/ポストプロセッサはシミュレーションプログラムを利用するために必要な入出力処理を行うシステムではあるが、設計者の問題意識や設計課題を入力してシミュレーションを行い、その結果を設計問題として評価することを支援するものではない。そこで1980年代後半においては、計算力学手法を用いたシミュレーションプログラムの利用と設計支援を更に高度な次元で機械化していく考え方が、人工知能の応用という形や[57]~[60]それに類似あるいは関係した方式を用いて設計業務との密な結合という形で生まれてきた[46][51][52][56]。

②要素技術に関する研究—要素分割技術に関する研究—

まず初めに、要素分割に関する技術について述べる。計算力学における要素分割技術の研究開発の歴史は古く、計算機を用いたものでは1958年に発表されたものが最古とされている[51]。その後、数多くの要素分割の自動化方法が提案され、それらの調査報告も幾つか報告されている[61]-[88]。当初の要素分割方法は2次元問題に限られたものであり、3次元問題に拡張されたのは1970年代後半以降である。また、実用化の面からすると、2次元問題は1970年代半ば頃からであり、3次元問題は1980年代初頭である。要素分割方法を大きくそのアプローチ方法で分類すると、自動化を指向した方法と対話処理を基調とした方法の二つに分類できると考えられる。ここでは、自動化を指向したものに對象を絞って以下に述べる。自動化を指向した方法は、更に部分領域分けを基調とするか否かによって二つに分類できる。本論では、この自動化を指向した方法のうち前者を間接分割方式、後者を直接分割方式と便宜的に呼ぶことにする。直接分割方式における要素分割方法は、空間分割法とボロノイ多面体分割法[69]-[73]の二つに分類できる。空間分割法を更に細かく分類すると三つの技法に分けることが可能だが、基本的には形状に格子を被せる網目法である[74]-[96]。現在、直接分割方式はわずかに試みられている程度であり、その他の要素分割方法はすべて間接分割方式に属する。間接分割方式における各種手法の違いは、部分領域分けの方法や部分領域形状の任意性と要素分割技法の違いである。部分領域分けを行うという観点から見ると、自動化指向の強いものと弱いものの二つに分類できる。前者は部分領域を自動的に生成した後、要素分割を自動処理で行う方法であり[97]-[100]、後者は部分領域分けを対話処理に委ねるものである[101]-[138]。しかしながら、自動化を強く指向する直接分割方式や間接分割方式における部分領域分けを自動化する方法は、世の中で十分認知されていないのが現状である。その理由としては、この方式が全自動を指向しているために利用者の経験的知識や要求、及び要素分割が満たすべき指針を充分満足させることができないからである。それに引き換え部分領域を対話処理で分割する方法では、要素分割処理の前処理として利用者が単純な形をした部分領域に形状を分割してくれる。そのため、要素分割が満たすべき指針や経験的知識を部分領域に反映することが利用者の対話的介入により可

能となる。また、それを前提としているために実践的な方式となっており、現状では必要不可欠な方式として周囲から認められている。更に、部分領域を對象にすることで要素分割技法の適用形状の範囲を限定できるために要素生成が容易となり、より良い要素分割結果を求めて色々な技法が提案がされている。ここで要素分割する對象のデータの種類からみた分類を行ってみると、曲面補間法[123]-[130]だけがワイヤフレームモデルを對象にしている。他の全ての技法はサーフェイスモデルまたはソリッドモデルを對象にしていることから、對象とするデータにより二つの方式に分類することも可能である。以上述べてきたように、要素分割方法においては数多くの方式と技法が開発されているにもかかわらず、各々、一長一短があると指摘されているのが現状である[64]。つまり要素分割の仕方は定性的にも定量的にも明確な定義はなく、経験や知識に頼った要素分割が最適なものと考えられているのが現状である。

一方、有限要素分割や差分法のための要素分割においては初期の要素分割だけでなく、シミュレーションを一度した後に要素分割を修正してシミュレーションの解の精度を高めようとする方法も提案されてきている。古くは、1984年にWinslowにより発表された要素分割の平滑化手法であると思われる[131]。また、1970年代初頭には r -法（節点移動法：re-location）や誤差の取り扱い、最適化要素分割方法に関して数多くの研究が行われていた[132]-[135]。その後、Babuskaが誤差の取り扱い方と h -法（要素細分割法：要素の高さを小さくする：height）及び P -法（高次要素化法： n^* ；power）の技術を提唱して、広く一般に研究開発が広がった[136]-[141]。しかしながら、現状の技術は専用のものが多く、汎用的な手法や実践的な意味で信頼性の高い手法は確立されていないと思われる。

③要素技術に関する研究—その他の技術に関する研究—

シミュレーションの入力情報は、要素分割データの他にシミュレーションの計算条件データがある。計算条件データの自動生成に関する方法の提案は、わずかに川面らが提案している[142]。この計算条件の付加作業は、要素分割作業と同様に、計算力学に関する知識や経験を必要とするものである。更に、シミュレーションプログラムをブラックボックス化すればするほど計算条件の付加に関する問題は、経験と知識が必要になる。近年、知識工学の発展と共にコ

ンサルテーションや知識ベースの活用が提案されているが[57]-[60]、過去ではSACONというコンサルテーションシステムが人力の支援道具として開発されているにすぎない[143][144]。また知識処理と明確にうたっていないが、過去に作成したシミュレーションプログラムの入力データを編集利用して経験的な判断を活用するシステムも提案されている[145]。要素分割方法においては、幾つかの具体的な提案がされ始めている[84][95][146][147]。

シミュレーションプログラムの活用に関しては、1970年代に比較して汎用化されてきたが未だ計算力学手法の1手法を用いたシミュレーションを専用的に活用する範囲に留まっている。また、データインタフェイスもプログラミングという専門知識がなければ構築できない仕組みになっており[148]、利用上において種々の課題が残っている。

シミュレーション結果の表示技術に関しては、ハードウェアの進歩とコンピュータグラフィックス技術の発展とともに飛躍的にその表現力が増してきている[149][151]。しかしながら、シミュレーションの可視化に関するアルゴリズム的な技術は、本質的には1970年代と大きく変わっていないように思われる。表現力が向上したという意味は、カラー表現が多彩になったことやグラフィックプロセッサの能力が向上したといっても過言ではないと思われる。シミュレーションの可視化を行うことは一つの課題ではある。しかしながら、シミュレーション結果の表示を行うことの意味は評価を支援することであるので、美しい表示だけでは設計業務の支援にはならない。シミュレーション結果の評価に関する研究は、要素分割の再分割のところで述べた誤差の評価がある。

CAEにおいて要素分割技術と同様に重要な役割を果たす設計対象物のモデルの表現方法は、現在のところ幾何モデルが一般的である。これは、CAEというよりもCADの世界で活発な研究開発がなされてきている[2][3][152]-[161]。CAEにおける設計対象物のモデル表現に関する提案は、現在のところ数多くは見当たらない[162]-[164]。また、近年のCADの分野では、幾何モデルに代わり、設計対象物の表現を幾何形状だけの記述に留まらないモデルの提案がなされてきている。それらは、製品モデル、フィーチャベースドモデル、生物型モデル、設計過程モデルなどであり、研究的にはこれらのモデルの考え方が一般的になりつつある[165]-[174]。

1. 3 研究の目的

筆者が考えるCAEは設計計算を支援する機能を持つものであり、シミュレーションプログラムの入出力を支援するのは2次的な機能である。要素技術開発上、自動化や機械化できない部分はやむを得ないとしても、できる限り設計案の確認を容易に支援する機能を持つべきである。ここで機能を持つということは、単に使い勝手を良くするという意味ではない。設計者が無理なく(新しく勉強することなく)対話することを支援する機能である。その機能を実現するにはマンマシンインタフェイスやユーザインタフェイスも大切であるが、むしろ設計者がシステムを利用するときにも最も問題とするモデルやモデリングをどういう形で計算機内部に構築するかということが重要となる。

CAEを用いた設計支援の問題も設計全般を見て考えるか、あるいは設計計算の支援だけを考慮してモデルやモデリングの問題を考えるかでそのアプローチは大きく変わる。設計全般を考慮してアプローチすれば、やはり設計対象物をいかに抽象化してCAEのモデル化を図るかが一つの課題である。設計計算の支援だけを考慮してアプローチすれば、CAEのモデルをいかに設計者にとって効率良く定義させそれをどう設計対象物と連携をとらせるかが課題となる。現在、一般的に設計対象物のモデルとして用いられているのは幾何モデルであるが、この幾何モデルによる設計対象形状の抽象化でさえも難しく、一朝一夕では実用レベルに至らない。そこで本論では、この問題をどちらかというとして後者に近い立場で設計支援と設計計算支援を考えてみることにする。

本研究の目的は、計算力学手法を用いたシミュレーションプログラムによる設計計算を効率良く支援する技術を確立することで設計業務の省力化や製品設計の信頼性を向上させることにある。本論では、まず初めに有限要素法を用いたシミュレーションプログラムによる設計計算の支援方法とその技術について述べる。次に、計算力学手法(有限要素法、境界要素法、または差分法)を用いたシミュレーションプログラムによる設計計算を、その手法の種別の如何にかかわらず統合的に支援する方法とその自動化技術について述べる。

第2章 幾何モデルを中核とした 設計計算支援技術

製造業での、CAD/CAM/CAEの取組みは、従来の省力化指向が更に拡大されるとともに、製品の最適化や設計の信頼性向上など、競争力のある新製品を生み出すための、より高度な次元へと展開しつつある。本章では、このようなニーズに対応することを目標とするCAEシステムの構築方法について述べる。

本章で述べるシステムの概要は、多種の有限要素法によるシミュレーションプログラムに対して、有限要素分割やシミュレーションプログラムの入力データ作成などの前処理や計算結果の検討などの後処理を付加して、使い勝手のよい機能を提供するものである。また、本システムはCAD/CAM/CAE一貫システムのなかで[153]、境界要素法や差分法によるシミュレーションを含む、より強力なCAEシステムとして展開する際のシステム化技術の基本となる。

基本設計から製造や加工までの工業生産の省力化や効率を上げることを目的として、現在までにCAD/CAM/CAEに関する研究開発が活発に行われている。また、昨今では多くのCAD/CAM/CAEシステムが実用化されてきている。しかしながら、実用化されたシステムは、幾何モデリングシステム、自動製図システムやNC加工支援システムなどのように生産工程のある一工程に対して省力化や効率の向上を図った専用のものである。生産工程全体を対象にして、省力化や効率の向上といった問題を考えると、確かにこれら専用のシステムを導入することで各工程において、その効果は上がっているが、専用のシステム間あるいは従来の工程間における膨大なデータの作成とその授受などあまりにも多大な人間の介入が行われなければならない。そこで、上記のような問題を解決すべく、生産工程全体を一貫して省力化し、効率をよくしようとする動きが展開されてきた。すなわち、各々専用のシステムが有機的に連携しうるCAD/CAM/CAE一貫システムの構築に関する研究開発である。このCAD/CAM/CAE一貫システムにおいて、最も重要な役割を果たし、システムの中核として存在するのが幾何モデリングシステムである。なぜならば、設計対象の製品形状情報をモデル化したもの、すなわち幾何モデルを設計の上流から下流までの作業における共通的なデータと考えると設計作業の機械化を推進しようとする

からである。本章では、この共通的な設計情報である幾何モデルを最大限に活用し、有限要素法を用いたシミュレーションにより設計計算を行う設計作業を機械化する方策について述べる。具体的には、幾何モデリングシステムを中核とするCAD/CAM/CAE一貫システムのなかで、製品の強度や性能の評価と確認などの作業を支援するCAEシステムの構築方法について述べる。

2. 1 有限要素法を用いた設計計算支援方式

2. 1. 1 設計計算における有限要素法を用いたシミュレーションの利用

機械設計における設計計算は種々あり、簡単なものから複雑な計算式を多数用いなければならないものまでである。本章では、これらの設計計算のうち有限要素法と呼ばれる計算力学手法が適用できる範囲を、特に構造解析に代表させて設計計算と呼ぶことにする。一般に構造解析は、有限要素法を用いたシミュレーションにより、材料力学的な計算を行うものである。しかし、有限要素法の応用範囲は、静的な力学計算だけでなく、動的シミュレーションや熱的、更に流体の計算にまで拡大されており、その実績も各方面で認められている。そこで、本章で言う構造解析は、その範囲を少しひろげて、動的シミュレーションや熱的、及び流体の計算までをその範疇とする。一方、シミュレーションの手法は有限要素法だけでなく、境界要素法や差分法などの手法もある。それにもかかわらず、数あるシミュレーション技術のなかから、有限要素法を用いたシミュレーションに絞って設計計算の一部分を代行させる理由は、以下に示す通りである。

①生産工程においては、熱的あるいは電気的計算や流体及び構造計算などの多岐にわたる設計計算が必要不可欠である。そして、幅広い分野にわたるシミュレーションでは有限要素法を用いるのが一般的である。

②有限要素法を用いたシミュレーションは、信頼性や精度的な面において一般に認知されている。

③複雑な構造物や部品は、従来の設計計算方式では精度良く計算できない場合がありうる。しかし、有限要素法を用いたシミュレーションならば、可能にしよう。

④有限要素法を用いたシミュレーションプログラムは数多く市販されており、

入手が容易である。また、近年では、ある程度の基礎知識があれば対象製品専用のシミュレーションプログラムを設計者自身が作成することができる。このことは、設計計算手段を設計者自身により専用化できることとなり、設計計算業務及びその支援を行う道具において必須な付加価値となる。

⑤設計業務において設計者の負担を軽減するためには、なるべくなら一つのシステムで設計計算作業を行えるようにすべきである。そのためには、一つの手法でシミュレーションする方式が好ましい。

以上、五つの主な理由から設計計算の手段として有限要素法を用いたシミュレーションを活用することとする。

2. 1. 2 CAD/CAM/CAE一貫システムにおけるCAEシステム

図1-1にCAD/CAM/CAE一貫システムにおける幾何モデリングシステムとCAEシステムの位置付けを示す。CAD/CAM/CAE一貫システムでは、幾何モデリングシステムを中核とし、各設計や製造工程を担うシステムがその衛星となるように連携をとる。そのなかで、計算機によるシミュレーション技術を最大限に生かし、実験や試作を最小限にして設計及び製作を効率的に行えることを目的としたシステムが、CAEシステムである。そして、このCAD/CAM/CAE一貫システムにおいて設計や製造を担当する各々のアプリケーションサブシステムは、[Inter-System Bridge File (以下、本文および図中においてISBFと略す)]を介して幾何モデリングシステムと接続する[158]。ISBFは、幾何モデルのデータや各システム特有のデータなどが格納できるエンジニアリングのためのデータファイルのことである。つまり、幾何モデリングシステムで生成された幾何モデルを起点とし、そこで定義された製品形状に対して各工程を担当するシステムが、このISBFを介してデータを受け取り個別に処理をするわけである。幾何モデリングシステムとCAEシステムの関係で言えば、CAEシステムは幾何モデルの情報を幾何モデリングシステムからISBFを介して受け取る。そしてCAEシステムは、幾何モデルからシミュレーションのモデルへの変換を行い、各種シミュレーションに必要なデータを作成する。また、シミュレーションの計算結果情報も整理して、設計者が行う計算結果の評価作業を容易にするための処理も行う。ここで、本章において設計計算の手段として対象とするのは構造解析で

あるので、以下、本章で言うCAEシステムとは構造解析支援システムのことである。

2. 1. 3 構造解析支援システム構築の課題

本項では、有限要素法を用いたシミュレーションを利用して、設計計算の一部を効率的に精度良く支援する構造解析支援システムの構築に関する課題について述べる。そのシステムとは、幾何モデルと有限要素法を用いたシミュレーションを有機的に結ぶものである。理想的な接続方法としては、設計者が対話的に幾何モデルを定義したあと、すべて自動的に処理が行われシミュレーションとその評価すらも自動的に行う方法が考えられる。しかし、シミュレーション結果の自動評価は、現状の技術の範囲では実現が困難であると思われる。更には、設計者の意図した有限要素分割の自動化やもともと幾何モデルには存在しない荷重や拘束などのシミュレーションの計算条件を創成することも困難である。そこで、その有機的な接続方法として考えられることは、自動化できる処理は自動化し、自動化が難しい部分は対話処理により人間の介入をすることである。すなわち、構造解析作業の機械化を行うシステムを構築することになる。ここで、本システムを構築するための具体的な重要課題を以下に列挙する。それらは、

- ①自動処理と対話処理の部分の切り分けを適切に行うことで、設計計算業務の効率化と実用性を図ること
 - ②幾何モデリングシステムで生成された幾何モデルを用いて効率よく有限要素分割し、有限要素法を用いたシミュレーションを可能にすること
 - ③有限要素法を用いたシミュレーションによる計算結果を、設計者に直感的にわかりやすく表示すること
- などである。

2. 2 設計計算支援システムの構成と基本設計

2. 2. 1 有限要素法を用いた構造解析支援システムの構想

初めに、有限要素法を用いたシミュレーションを設計計算の手段として用いる設計計算支援システム、すなわち構造解析支援システムの設計思想を以下に

述べる。

①下記に列挙したCAD/CAM/CAEの利用目的のうち、特に①～④の目的を果たすこと

- ①工数低減及び省力化を含む原価低減
- ②製品の納期短縮
- ③製品の重量低減や小形化など最適設計に基づく原価低減
- ④新製品の開発時間の短縮
- ⑤製品の信頼性はもとより、設計や製造作業の信頼性向上（設計ミス、設計情報の授受に関する手違いなどの排除）
- ⑥機械設計手順のなかで有効に活用できること
- ⑦種々のシミュレーションのうち、最も一般的な有限要素法を用いたシミュレーションプログラムを設計計算の手段とすること
- ⑧自由曲面を含めた任意の3次元形状構造物のシミュレーションまで支援できること
- ⑨有限要素法を用いたシミュレーションに関して、初心者から上級者までが容易に活用できるシステムであること
- ⑩有限要素法を用いたシミュレーションプログラムに共通な入出力処理を持つ汎用システムの構成をとること

ここで、汎用性の条件を具体的に述べると、それは、

- ①世に数多くある市販されている有限要素法を用いたシミュレーションプログラム（例えば、NASTRAN[®][173]、MARC[®][176]、SAP[®][177]、ADINA[®][178]など）やユーザ作成のプログラムに関して共通な入出力機構、すなわちプリ/ポストプロセスを持つこと
 - ②上記①のシミュレーションプログラムの入出力データ形式は、標準化されていないので、各シミュレーションプログラムの個別な入出力データ形式を標準化する機能を持つこと
- である。

上記、①～⑩の目標を達成するために、以下に述べる方針でシステム構築を行うことにする。まず、一般に機械構造物の3次元形状は複雑であるため、対話形式によるアプローチは複雑な形状を扱うには必須条件と考えられる。また、

幾何モデルを中核としたCAD/CAM/CAE一貫システムの構想が根底にあるので、幾何モデリングシステムで定義された幾何モデルから、いかに効率的に計算力学手法（ここでは単に有限要素法を指す）を用いたシミュレーションのための解析モデル（解析モデルとは、シミュレーションを行うために必要な計算条件や材料情報などの情報を要素分割データに付加したモデルである。以下、単に解析モデルと呼ぶ）を生成するかが課題となる。そこで、有限要素法を用いたシミュレーションに照準を合わせた幾何モデリングシステム側からの出口仕様をもたせることで、効率的な一貫処理を実現させることにする。その出口仕様とは、図形処理的側面を持つ有限要素分割処理のことで、要素分割処理をインタフェースとして幾何モデルから有限要素モデルを生成すれば、状況に応じた活用が可能になると考えられる。ここで、有限要素モデルとは有限要素に分割された形状モデルのことである。

以上述べてきたように、本システムは、幾何モデリングシステムで生成された機械構造物の幾何モデルを基本データとして、計算機と対話しながら有限要素モデルを計算機内に作成し、構造解析支援システムに有限要素モデルの情報を引き渡すことを目的として構築しようとするものである。

2. 2. 2 システムの構成

2.1.1項で述べた構築思想にそってシステム設計した本システムの構成を、図1-1に示す。本システムは、幾何モデルと有限要素モデルの2種類のモデルを持つメッシュプロセッサ、解析モデルを持つプリプロセッサとシミュレーション結果の可視化を行うポストプロセッサとからなる対話形構造解析支援システムである。ここで解析モデルとは、解析モデルを生成するものである。本システムを大きく分類すると、この三つのプロセッサとシミュレーションプログラムのためのデータインタフェースプロセッサによって構成されている。メッシュプロセッサは、

①CAEのための形状表現機能

②幾何モデルのための有限要素分割機能

の二つの代表的な機能モジュールより構成されている。プリプロセッサは、

①材料情報入力機能（弾性定数、ポアソン比、熱伝導係数などの指定）

②境界条件入力機能（荷重条件、拘束条件、ダンピング係数などの指定）

③要素属性入力機能（接触要素、アイソパラメトリック要素などの要素タイプやオフセット量、板厚などの要素に関する詳細情報などの指定）

④計算環境入力機能（荷重条件と拘束条件の組み合わせ方やマトリックスの解法などの指定）

などの有限要素法を用いたシミュレーションプログラムのための各種計算条件の入力機能モジュールより構成されている。ポストプロセッサは、複数のシミュレーション結果の可視化機能により構成する。その代表的な機能モジュールとして、

①コンピュータグラフィックス（以下、本文及び図中でCG[Computer Graphics]と略す）表示機能（等高線表示、アニメーション表示など）

②表及びグラフ表示機能（断面線上の応力グラフ、歪み量の表など）

③数値情報表示機能（節点や要素の任意の計算結果データの表示）

などがある。そして、データインタフェースプロセッサは、シミュレーションプログラムの入力と出力データに関する二つのデータ標準化機能からなる。これらの機能モジュールによって構成される本システムの全体的な特長は、

①サブストラクチャ方式と呼ぶデータ処理方式

②CGを用いたグラフィックス処理

③異種のシミュレーションプログラムを全く同じアクセス方法で利用できるユーザフレンドリなインタフェースの提供

などである。

以下、これらのプロセッサにおける機能モジュールの構成と各々の機能の基本方式について述べる。

2. 2. 3 メッシュプロセッサの基本方式

メッシュプロセッサの役割は、CAEのための幾何モデルを計算機内部に構築し、この幾何モデルから有限要素モデルを生成することである。この役割を実現させるためには、幾何モデリング機能と有限要素分割機能が必要である。以下、これら二つの機能を実現するための基本方式について述べる。

幾何モデリング機能の基本方式

本システムで扱う幾何モデリング機能は、CAD/CAM/CAE一貫システムの中核となる幾何モデリングシステムの部分集合である。その包含関係を図1-3に示す。CAD/CAM/CAE一貫システムの中核となる幾何モデリングシステムは、①ワイヤフレームモデリング機能、②サーフェイスモデリング機能、③ソリッドモデリング機能の3つの機能から構成されているが[158]、CAEのため幾何モデリング機能は、このうち①のワイヤフレームモデリング機能に限定する。その理由は、ワイヤフレームモデルの表現の自由度の高さにある。なぜ形状表現の自由度が高くなければならないかと言うと、有限要素法を用いたシミュレーションを設計計算手段として用いる場合、現実的に形状の表現方法は二通りの方法が存在するからである。その二通りの方法とは、①設計計算の手段とは独立に設計計算をする対象物を正確に表現する方法、②設計計算の手段である有限要素法を用いたシミュレーションの計算効率や計算精度などを考慮して設計対象物を抽象化して表現する方法である。形状のモデル化が二通り行われる第一の理由は本システムがシミュレーションプログラムのデータ入出力支援と設計計算（業務）支援という二面性を持っているからである。第二の理由は、利用者が有限要素法やシミュレーションプログラムを熟知しているか否かによってモデル化が異なるという事実があげられる。そして、この二通りのモデル化をシステムが許容するために、形状表現の自由度を高める必要がある。ここで、例えば形状の表現方法をソリッドモデリング機能のみに限定する方法論も考えられるが、実践的な利用を考えるとソリッドモデリング機能だけでは不十分である。また、三つのモデリング機能を混在させて形状を表現する方法もありうるが、それも三つのモデリング機能により表現されたデータの互換性を考慮すると実践的に十分とは言いがたい。以下、具体的な例を用いてCAEにおける形状表現の問題点について述べる。

例えば、図1-4に示す有限要素法を用いたシミュレーションのための片持ち梁のモデルを例にとる。図1-4の(a)は設計作業で扱う幾何モデルであり、設計者が強度を確認したいときの有限要素モデルは(b)が最適である。また、振動の固有値を知りたい場合は(c)が最適な有限要素モデルである。このように、CAEにおける幾何モデルの表現方法は製図作業で扱う幾何モデルなどと異なり、ワイヤフレームモデルからサーフェイス、ソリッドモデルまで幅広く表現する必要

がある。更に、図1-4の(a)に示すようなウイングドエッジ構造[152]では表現できない形状や(b)に示したような複雑に三つのモデルが組み合わさった形状まで表現する必要がある。これら図1-4の(a)や(b)のような形状を、ワイヤフレーム、サーフェイス、ソリッドモデルを混在させて互いにデータを共有しようとする、データの表現に曖昧さが生じてしまう。これら三つのモデルのデータの共存や混在は可能であるが[158]、モデルの内部処理操作や外部操作が複雑になったり制限されることがある。結果的に、これら三つのモデルを矛盾なく扱おうとすると、ソリッドモデルの表現方法の範疇で表現することになる。また、図1-4の(a)のようなモデル化方法を優先しても、CAEにおいては幾何モデルを修正する必要が生じる場合がある。例えば(b)の幾何モデルにおいて、一つの面や立体の内部の材料が均一（一様）でない場合や間接分割方式による要素分割方法を用いる場合には、そのままCAEモデルの形状情報として用いる事はできず、面や立体を有限要素分割のための領域に分割しなければならない。以上述べたように単純に三つのモデリング機能を用いたり混在させただけでは、CAD/CAM/CAE一貫システムにおける幾何モデルは十分に表現できない。

そこで、CAD/CAM/CAE一貫システムにおけるCAEモデルの形状表現方法としては、最も自由度の高いワイヤフレームモデリング機能を基本にして、上記要求を満足させるためにワイヤフレームモデリング機能を拡張することにする。拡張すべき部分は、ワイヤフレームモデリング機能では表現できない面や立体のデータを別の形で付加することである。そこで、面や立体のデータを付加する方法として、サブストラクチャと呼ぶ有限要素分割のための領域を考える。サブストラクチャは、基本的にはどんな形でも良いのだが、ここでは図1-5に示すように有限要素と同相の形状をもつものとする。つまり、1次元サブストラクチャは、ビームやトラス要素などの1次元有限要素を生成するための領域であり、2次元サブストラクチャは面の位相を意味し、平面要素やシェル要素を生成するための領域となる。同様に、3次元サブストラクチャは立体領域を表し、ソリッド要素を生成するための領域である。ワイヤフレームモデリング機能により表現された形状は、このサブストラクチャと呼ぶ有限要素分割のための領域の集合で構成されているものとし、サブストラクチャと呼ぶ領域を内挿することにより、面や立体のデータを表現することにする。この領域をサブ

ストラクチャと呼ぶ理由は、

① CAEモデルの基本図形の総称として幾何モデルの部分構造的な意味をもたせる

② 有限要素分割のための領域の部分領域の意味をもたせる

③ 部分領域としてだけでなく、それ自身が大局的な有限要素としても用いることができるようにする

などである。

以上、述べてきたことをまとめると、メッシュプロセッサにおける幾何モデリング機能では、サブストラクチャという概念をワイヤフレームモデリング機能に加わえることにより、有限要素法を用いたシミュレーションのための幾何モデルが表現できるようになる。また、サブストラクチャ単位に設計者が形状を作成してくれるため、設計者が経験的知識や計算の意図をサブストラクチャに反映することが可能となる。ゆえに、より実践的な方式となりえると考えられる。一方、有限要素分割する対象領域をサブストラクチャにすることで、有限要素生成手法の適用形状の範囲を限定できるために有限要素生成が容易となり、より良い有限要素分割が可能となる。

有限要素分割機能の基本方式

有限要素法は近似解法であるので、有限要素分割の仕方（離散化のやり方）によっては正しい近似解が得られない。つまり、有限要素法を用いたシミュレーションでは有限要素の大きさを制御することで近似解の精度を向上できる。一般的には、有限要素の寸法を小さくすると精度が向上されるが、計算領域内の有限要素を小さくすると要素数が増加し自由度が増えることから計算時間も増える。すなわち、有限要素分割とは、近似解精度と要素寸法、そして計算時間との三つのパラメータの最適解を求めることであると言える。つまり、幾何モデルから有限要素モデルを生成する機能は、一般に以下に示すような条件を満足しなければならない。

① 入力するデータ量が少ないこと

② 専門家たちの知識や経験を必要としないような入力方法であること

③ 有限要素の寸法から求められる要素の幾何学的な性質や量、例えば、要素の平面性や要素の辺の縦横の長さの比などを考慮すること

④ 要素分割の粗密付けが目的に合致してできること

⑤ 有限要素分割は規則的にすること

⑥ 有限要素の寸法の変化量は、局所的には小さくなっていること

⑦ 節点や要素の数を規定できること

⑧ 処理時間が短いこと

しかし、これらの指針は概念的には存在するものの、現状では有限要素分割の仕方は定性的にも定量的にも明確な定義はなく、経験や知識に頼った有限要素分割が最適なものと考えられている[54]。また、これらの条件をすべて満足させて三次元形状構造物までを有限要素に分割することは容易ではない。

このような状況から実践性を強く考慮して、筆者は間接分割方式の一つであるサブストラクチャ方式を提案する。本方式により、特に上記①、④、⑦、⑧を満足させる。サブストラクチャ方式における有限要素分割方法は、幾何モデリング機能に依存して曲面補間手法を用いる。この要素分割手法により、上記の③、⑤、⑥、⑧を満足するようにする。この時、CAD/CAM/CAE一貫システムの中核システムとなる幾何モデリングシステムの曲面補間式と一致させることにより、CAD/CAM/CAE一貫システムにおけるデータの一元性を保つことにする。具体的には、サブストラクチャの図形情報から有限要素分割すべき領域を内挿することで、面や立体の有限要素分割を行う。

以上述べてきた①幾何モデリング機能と②有限要素分割機能の基本方式をメッシュプロセッサのなかで具現化することにより、以下に述べるような特長を持つ。それらは、

① サブストラクチャモデルを作成することで、分割したい領域あるいは図形を指示しなくても自動的に有限要素分割が可能である。ここで、サブストラクチャモデルとは、サブストラクチャを基本図形として生成された幾何モデルのことである。

② サブストラクチャモデルの基本図形の組合せ方や大小など変化を付けることで、ニーズに合った有限要素分割が可能である。

③ 境界表現法（B-reps: Boundary Representative Method[2][152]の略、以下略語を用いる）を応用した有限要素分割手法により、自由曲線や自由曲面を含めた任意の3次元形状が正しく、且つ自動的に有限要素分割できる。

④ 形状が複雑であっても、サブストラクチャ単位あるいは任意の複数サブストラクチャの集合体ごとに、有限要素分割のチェックなどの作業が行えるので操作性がよい、
などがあげられる。

2. 2. 4 プリプロセッサの基本方式

プリプロセッサの役割は、シミュレーションプログラムの入力データを作成することにある。有限要素法を用いたシミュレーションプログラムに限って必要なデータの例をあげると(ⅰ)形状情報、(ⅱ)有限要素分割情報(離散化情報)、(ⅲ)環境情報(利用環境、拘束、荷重などの諸境界条件情報)、(ⅳ)材料情報、(ⅴ)有限要素の特性情報、(ⅵ)シミュレーションプログラムの実行情報などである。これら(ⅲ)～(ⅵ)の情報の付加は、2.2.3項で述べた二通りのモデル化に共通である。メッシュプロセッサにて既に(ⅰ)と(ⅱ)のデータが作成されているので、プリプロセッサでは(ⅲ)～(ⅵ)の情報を(ⅱ)の情報に付加してシミュレーションプログラムの入力データを完成させることとする。従ってプリプロセッサの機能構成は、(ⅲ)～(ⅵ)の情報入力支援部分と、シミュレーションプログラムを起動させる部分からなる。

このプリプロセッサを具現化するための基本方針は、

- ① 初心者から上級者までが、容易に人力操作ができるようにすること
 - ② 市販あるいは自家製を問わずシミュレーションプログラムの入力データ作成作業を幅広く支援できること
 - ③ サブストラクチャ方式の考え方にそって、サブストラクチャ単位の入力データ作成や編集などのデータ処理ができること
- などである。これらの基本方針の実現手段となる、その基本方式について以下に述べる。まず①の方針は、階層構造をベースにした内部データ記述方式とコマンド処理方式により実現する。具体的には、図2-1に示すような木構造をしたコマンド群をマンマシンインタフェースとして設計者に提供する。つまり設計者は木構造をしたコマンド群をトゥリーウォークするように順にたどって行けば、必要な入力データはすべて生成されるというコマンド処理方式である。このコマンド処理方式に対応して、内部処理を行う。そして、すべてのデータ

はコマンド手順の木構造とともに保存することとする。これによりシミュレーションプログラムの入力データの過不足検査などが容易になり、初心者にありがちな入力洩れを防止することができる。②の方針を実現するためには、シミュレーションプログラムの入力データ形式に依存しない形で解析モデルを内部表現する方式をとる。しかし、シミュレーションプログラムの入力データに矛盾がないかどうかの検査をする時には、プリプロセッサの内部処理では大まかな入力データ関係の検査に留める。詳細な検査はどうしても個別処理にならざるをえないからであり、この作業はデータインタフェイスプロセッサに任せることとする。③のサブストラクチャ方式の考え方は、当然プリプロセッサのなかでも活かすこととする。つまり、データの設定方法からモデルの表示及び非表示に至るまでの操作や処理を、節点あるいは要素やサブストラクチャ構成図形、及びサブストラクチャ自身までの構造関係を活用してできるようにする。これにより、ユーザフレンドリな操作及び表示機能を実現することにする。

2. 2. 5 データインタフェイスプロセッサの基本方式

データインタフェイスプロセッサは、①解析モデルの情報をシミュレーションプログラムの入力データ形式に変換する機能と②シミュレーションプログラムの出力データ形式をポストプロセッサのデータ形式に変換する機能の2つからなる。基本的には、標準形式のデータ群を個別形式のデータ群に変換する方法(あるいは、その逆)をとる。その変換方法は、個別プログラムによるデータ変換方法を用いる。具体的には図2-7に示すように、それぞれのシミュレーションプログラムの入出力データに対して、データ変換を個別に行うトランスレータを持つ方式である。

2. 2. 6 ポストプロセッサの基本方式

ポストプロセッサの重要な役割は、多くの数値データの羅列を利用者に分かりやすく、正しく、効率よく提供することである。その機能構成は、CG処理部、数値データ処理部及びグラフ表示部の3タイプのシミュレーション結果編集機能からなる。本プロセッサもプリプロセッサ同様な方式と機能により、実現する。図2-3に、ポストプロセッサの機能木構造図(コマンド画面)を示すよ

うに、プリプロセッサと仕様を合わせている。

2. 2. 7 シミュレーション支援の範囲

シミュレーションの範囲

本システムで支援するシミュレーションの範囲は、大きくは①静的解析、②動的解析、③熱的解析、④非線形解析、⑤流体解析の五つの分野である。詳細には、①の静的解析では基本的な静的荷重に対するシミュレーションに加え、慣性運動を行っている物体の静的解析もその範囲とする。②の動的解析では、固有モード解析、複素固有値解析、ランダム応答解析、過渡応答解析までを支援範囲とする。③の熱的解析としては、線形定常解析、非線形定常解析そして非定常解析の三つを支援する。④の非線形解析の範囲は、座屈解析と材料非線形解析、そして幾何学的非線形解析までとする。⑤の流体解析は、流体節点における圧力の調波成分（フーリエ係数）を計算するものであり、軸対称容器内の流体の微小運動解析を行う範囲とする。但し、扱える対象は過剰して圧縮及び非圧縮流体である。

座標系

本システムが扱う座標系は、①直交座標系、②円筒座標系、③球座標系の3種である。これらの座標系は、全体座標系及び局所座標系ともにある。更に、局所座標系は節点座標系、変位座標系、荷重座標系、要素座標系の4種の座標系がある。節点座標系は、節点の座標を局所的に入力する時に用いることができる。変位座標系は、節点の変位成分の方向を定義するためのものである。例えば、拘束や強制変位、オフセット量などを入力する時に用いることができる。また、変位や加速度などの出力結果をこの座標系で扱うこともできる。荷重座標系は、荷重を与える時に用いることができる。要素座標系は、要素特性とか応力など要素に関する出力はこの座標系を用いる。

有限要素の種類

本システムが提供する要素の概要は以下の通りである。

- ① 1次元要素：トラス構造の要素となるロッド要素、管要素、フレーム構造の要素となるバー要素、配管構造の要素となる曲管要素と直管要素がある。
- ② 2次元要素：面内の外力に抗する膜要素、面に垂直方向の外力に抗する板要

素、そして膜と板を混合したシェル要素がある。これらの要素においては、アインパラメトリックかノンアインパラメトリックか選択できる。その他に、要素の頂点の対角線方向に剛性を持つ剪断パネル要素と、頂点の対角線方向に垂直なまわりの振りに剛性を持つ振りパネル要素がある。

- ③ 3次元要素：4面体、5面体、6面体のソリッド要素がある。2次元要素と同様に、アインパラメトリックかノンアインパラメトリックか選択できる。
- ④ コニカルシェル要素：円筒形、円錐形、台錐形、円板状などをした対称シェル要素である。
- ⑤ 軸対称シェル要素：軸対称となるリング要素とトロイダルリング要素である。リング要素は、厚肉で断面が3角形または4角形の回転体である。トロイダルリング要素は、薄肉シェルで円錐の回転体である。
- ⑥ スカラ要素：二つの任意の自由度を結合する要素で、スカラばね、スカラ減衰、スカラ質量要素がある。
- ⑦ 集中質量要素：節点に集中質量を定義したり、質量行列を直接入力する時に使う。
- ⑧ 熱境界要素：熱境界条件のうち熱流束、対流熱伝達、ふく射熱交換などの自由境界条件を定義する要素である。
- ⑨ 流体要素：流体問題や音響問題のときに用いる2次元対称要素である。
- ⑩ 剛体要素：剛体的な挙動を示す構造要素をモデル化するときの要素である。**荷重**

本システムが扱う荷重条件は、下記に示すとおりである。

- ① 節点荷重：節点にかかる集中荷重やモーメント荷重を定義する。
- ② 辺上及び面上の荷重：要素の面や辺にかかる圧力や内圧を与える。
- ③ 重力荷重、遠心力：自重による荷重を計算するときに重力荷重を定義する。
- ④ 熱荷重：温度を定義する。
- ⑤ 初期変形及び強制変位：移動量と方向を初期状態として入力する。
- ⑥ 動的荷重：時間依存の荷重や周波数依存のもの、またパワースペクトルや衝撃スペクトルなどを与える。
- ⑦ 部材荷重：1次元要素の部材にかかる分布荷重または集中荷重を定義する。**拘束**

本システムが扱う拘束条件は、下記に示すとおりである。

- ①単点拘束：特定の自由度を拘束するものである。
- ②多点拘束：複数個の自由度の変位の間の線形関係を指定するものである。
- ③自由体支持：剛体的な変位が可能な構造物を版に支持する。
- ④行列の分割：演算の効率を上げたり、特異性を除くために自由度数を減らす一種の多点拘束である。

材料特性

本システムが扱う材料特性は、①等方性材料、②2/3次元直交異方性材料、③温度依存性材料、④応力依存性材料、⑤時間依存性材料などである。

2. 2. 8 設計計算手順

本システムによる幾何モデリングからシミュレーションまでの手順を図2-9に示す。一般的に、有限要素法を用いたシミュレーションを行うためにはなんらかの方法で形状データを作成しなければならない。本システムでは、CAD/CAM/CAE一貫システムの幾何モデリングシステムを用いて形状データを作成し、メッシュプロセッサの幾何モデリング機能で設計計算用に編集しなおす方法とこの幾何モデリング機能で初めから設計計算用に生成する方法の二通り考えられる。ここでは説明を簡単にするために前者の方法に基づいて、その作業手順を図2-9と図2-10を用いて説明する。

①ステップ 1

図2-9のステップ1では、CAD/CAM/CAE一貫システムの幾何モデリングシステムを用いて幾何モデルを生成する。この場合、モデルはワイヤフレーム、サーフェイス、ソリッドのうちいづれでも良い。但し、図2-9のステップ2におけるすべてのデータは、ワイヤフレームモデルのデータとなる。この時の作成形状を図2-10の(a)とする。

②ステップ 2

(1)図2-9のメッシュプロセッサ部におけるステップ2では、まず初めにステップ1で作成した幾何モデルを図2-9に示すようなサブストラクチャと呼ぶ基本図形の単位で粗分割する。この粗分割した幾何モデル、あるいはサブストラクチャを基本図形として生成した幾何モデルを、サブストラクチャモデルと

呼ぶ。図2-10の(b)に、例として幾何モデルからサブストラクチャモデルを生成した結果を示す。

(11)サブストラクチャモデルを作成することにより、システムはサブストラクチャという基本図形を有限要素分割すべき領域として自動的にとらえる。すなわち、従来のように利用者は有限要素分割する領域として逐一基本図形(サブストラクチャ)を計算機に指示することなく、すべて自動的に有限要素分割することができる。

(111)サブストラクチャモデルが生成されたならば、有限要素分割するために必要なパラメータとなる分割数(分割比)をすべてのサブストラクチャに与える。図2-10の(c)分割数をすべてのサブストラクチャに与えた結果を例として示す。この図において、数字はその辺の分割数を示す。

③ステップ 3

メッシュプロセッサ部のもう一つの機能である有限要素モデルを生成する部分が、図2-9のステップ3である。ここでは、サブストラクチャモデルを自動的に有限要素分割し有限要素モデル(厳密な意味では単に要素分割したのではなく、シミュレーションや設計における解析の意図を含んだ形で粗密付けがなされたもの)を自動生成する。図2-10の(d)にその自動生成結果を示す。図2-10の(d)は、(c)の分割数に合致した数の有限要素が生成された結果を示したものである。この図の例が示すように、基本的に有限要素はサブストラクチャと同相に生成される。

④ステップ 4

有限要素モデルに、境界条件や材料データなどをプリプロセッサ部で与える。その結果、図2-9のステップ4では図2-10の(e)に示すように、解析モデルがプリプロセッサの内部で生成される。この場合は、有限要素モデルの節点に集中荷重と拘束条件が付加された例である。

⑤ステップ 5

図2-9のステップ5では、解析モデルのデータを利用者が利用したいシミュレーションプログラムの入力データ形式に自動変換して、シミュレーションプログラムを実行する。

⑥ステップ 6

シミュレーションの結果として出力された数値データの羅列をポストプロセッサ部で利用者に理解しやすい形でデータをCG技術などを用いて表現し、利用者はそれを評価する。その一例として、等応力線図を図2-11(0)に示す。

以上、本システムを用いた設計計算は、サブストラクチャモデルから有限要素モデル、解析モデルに至るまで、サブストラクチャという基本図形をデータ処理の中心的役割を演ずる構造単位として用いて行う。また、操作に関しては、解析モデルの作成時やシミュレーション結果の評価を行う場合に、数千節点のモデルを全体表示するだけでなく、作業を行いたいサブストラクチャだけを部分的に取り出したり、表示して局所的な作業ができる点など、サブストラクチャを処理また構造単位として行うことができる。

2.3 数値実験

具体的な解析対象を用いて本システムで形状の入力から結果の評価までを行ってみた。図2-11を用いて実験の内容を説明する。解析対象として選んだのは、ホイストのフックである。

①まず初めに図2-11の(0)に示すように解析対象の形状をワイヤフレームモデリング入力した。形状の定義方法は、設計図面に記されている特徴断面を平面空間に定義し、次に3次元空間へ断面図形を移動した。断面図はコンパスを用いて書かれたものなので円弧の集合であるが、滑らかになくという指示があるために1本の3次のBézier曲線に変換した。

②次に、図2-11の(1)に示すように定義された幾何モデルをサブストラクチャモデルに修正した。サブストラクチャモデルへの修正は、すべての断面線を均等に4分割したあと、各断面線の対応する4等分割点を自由曲線でつないだ。そして、断面を定義したのと同様にサブストラクチャの断面を別の平面空間に定義して、それから3次元空間へ移動した。このとき、サブストラクチャモデルとしては(1)の他にも幾つか考えられるが、経験的判断から(1)のようなモデル化をした。

③サブストラクチャモデルに分割数を与えて後、自動的に要素分割することにより、有限要素モデルを図2-11の(2)のように生成した。そして、プリプロセッサにISBFを介して要素分割データを渡し、計算条件を与えた。

④シミュレーションプログラム、ISAS-I[®] (Integrated Structural Analysis System II)[17]を実行させ、その結果をポストプロセッサに渡し、図2-11の(3)のように結果を表示させ評価を行った。

本数値実験において、各プロセッサとも何らかの支障もなく順調にデータの作成及びシミュレーションの実行、そして評価が行えた。シミュレーション結果も実際の実験と良く一致した。

2.4 第2章のまとめ

有限要素法を用いたシミュレーションを用いて設計計算を支援するシステムを開発した。本システムは、①メッシュプロセッサ、②プリプロセッサ、③ポストプロセッサ、④データインタフェイスプロセッサの4つのサブシステムから構成された。そして、本システムの機能動作及びその有効性を確認するために数値実験を行った。

本実験から得られた事柄をまとめると、以下のようになる。

①一連の計算作業が滞りなく支援できることが確認できた。

②設計業務のなかで、幾何モデルのわずかな変更操作で解析作業が支援できる見通しが得られた。

③従来の手作業によるシミュレーションプログラムのデータ作成時間に対して、大幅な効率化を実現できる見通しが得られた。

④有限要素法を用いたシミュレーションに関する知識や経験の少ない利用者でも、短い期間のトレーニングでこれらのシミュレーションを利用可能となる見通しが得られた。

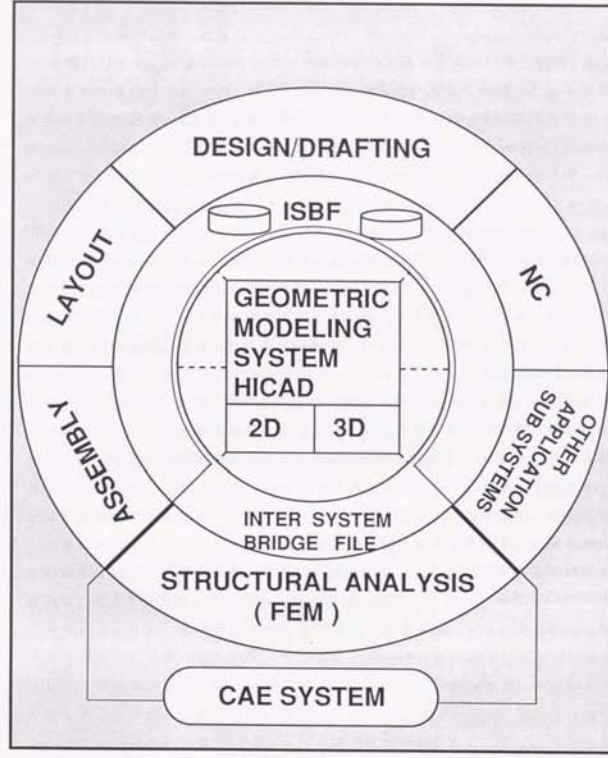


図 2-1 CAD/CAM/CAE一貫システムにおけるCAEシステムの位置付け

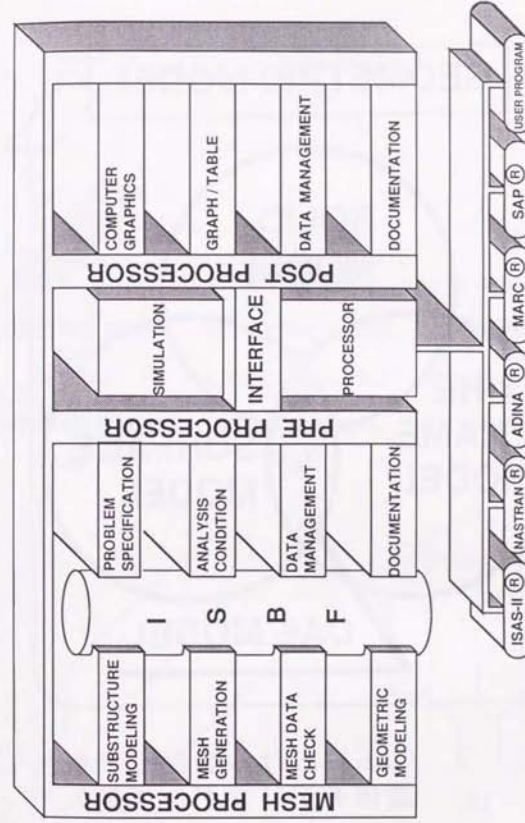


図 2-2 対話形構造解析支援システムの構成

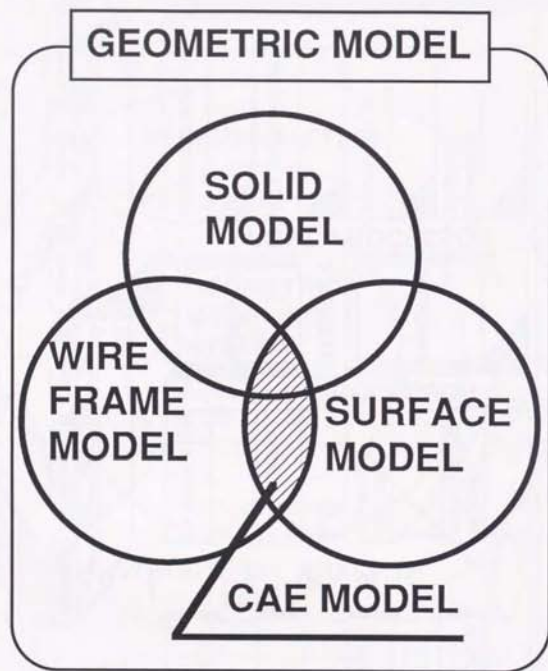


図 2-3 CAEにおける幾何モデルと幾何モデリングシステム

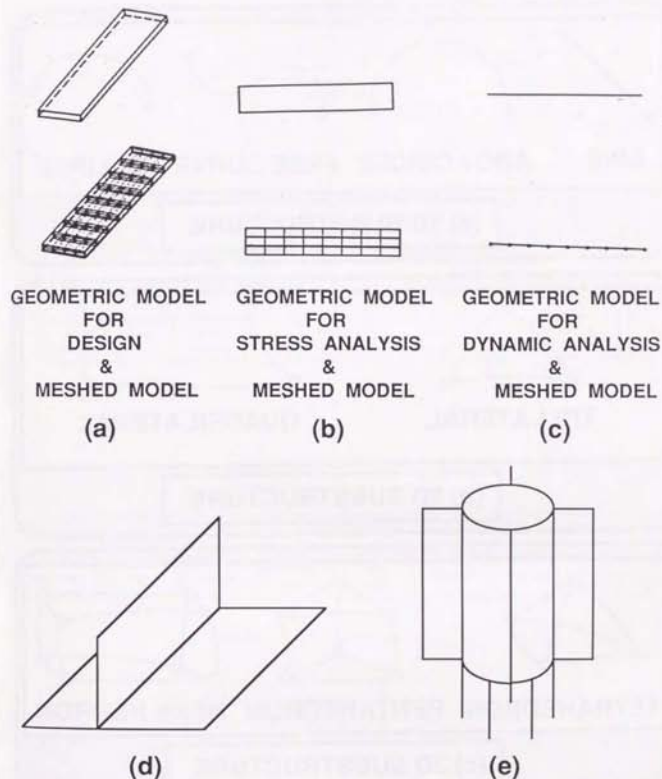


図 2-4 CAEモデルのモデル化の違い

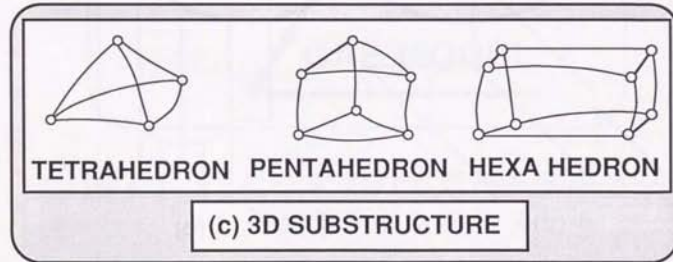
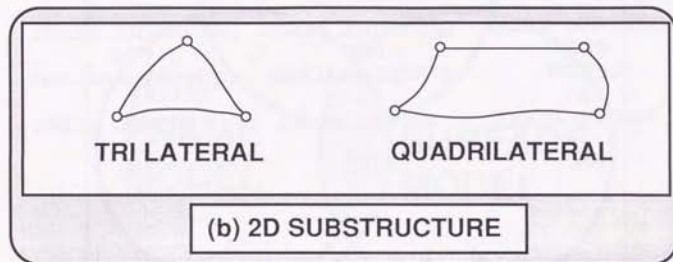
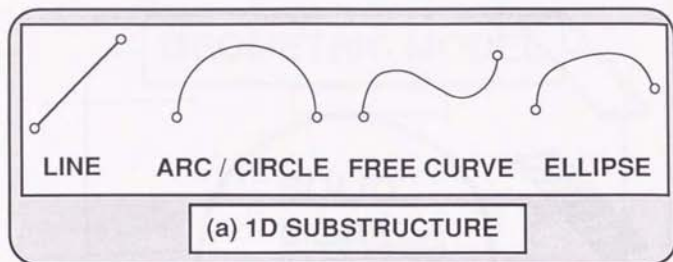


図 2-5 サブストラクチャの種類

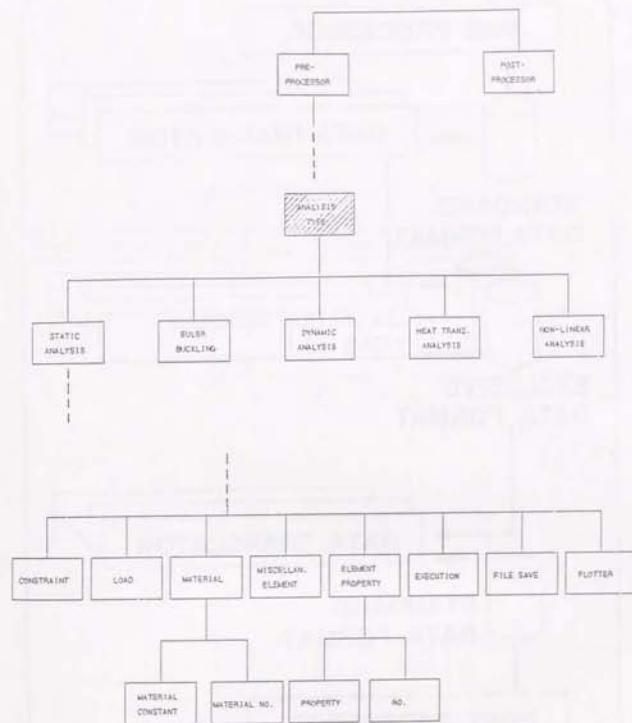


図 2-6 プリプロセッサの構成

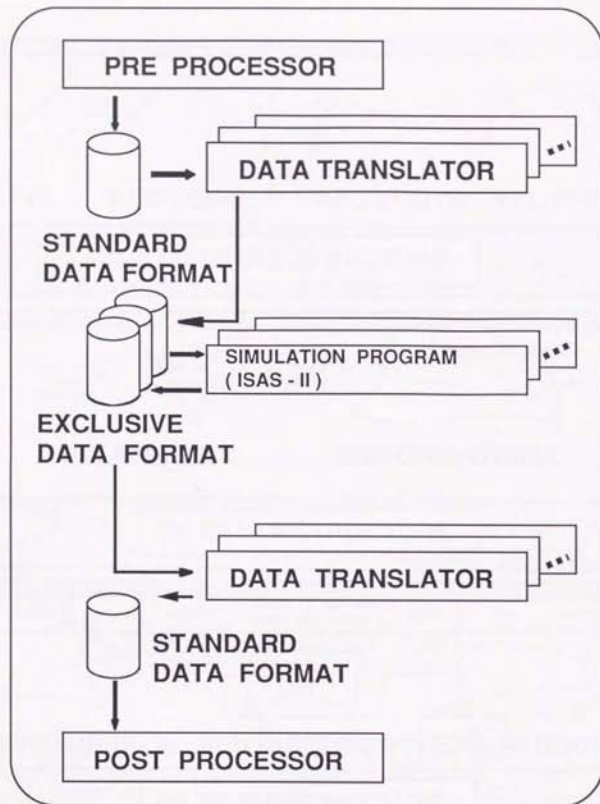


図 2-7 データインタフェース

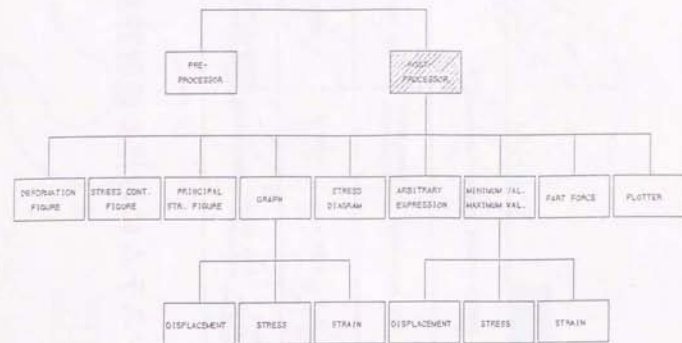


図 2-8 ポストプロセッサの構成

GEOMETRIC MODELING SYSTEM		CAE SYSTEM (FINITE ELEMENT ANALYSIS)				
WIRE FRAME	SURFACE	SOLID	MESH PROCESSOR	PRE PROCESSOR	SIMULATION PROCESSOR	POST PROCESSOR
STEP 1		STEP 2 / STEP 3		STEP 4	STEP 5	STEP 6
GEOMETRIC MODELING		SUBSTRUCTURE MODELING		FINITE ELEMENT MODELING	SIMULATION	VISUALIZATION OF SIMULATION RESULTS
ISBF						

図2-9 対話形構造解析支援システムにおける設計計算手順

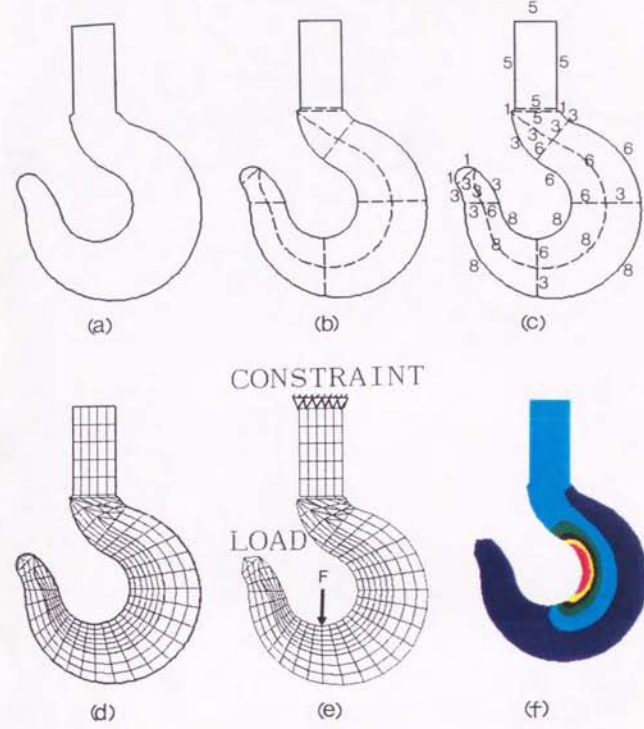
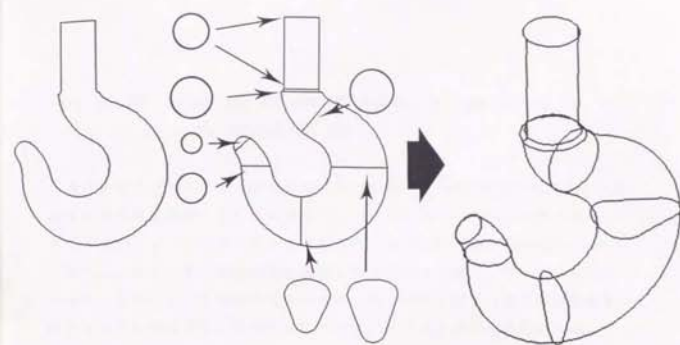
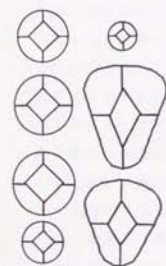


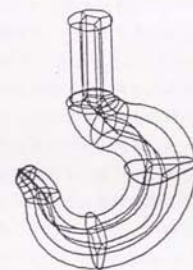
図2-10 対話形構造解析支援システムにおける具体的な操作手順(2次元形状の例)



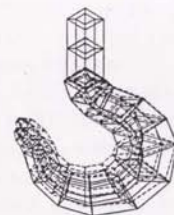
(a)



(b)



(c)



(d)

図2-11 実験による検証(3次元形状の例)

第3章 対話形構造解析支援システムの の要素技術

幾何モデリングシステムを中核としたCAD/CAM/CAE一貫システムにおいて、対話形構造解析支援システムは幾何モデリングシステムから見ればその一つのアプリケーションシステムである。そこで、このCAD/CAM/CAE一貫システムにおいて、本システムが有機的に連携しうるための方策として、ワイヤフレームモデルをベースにしたサブストラクチャモデルを用いて、構造解析作業を支援する方式を考案した。本章では、このサブストラクチャモデルを中心としたシステムの要素技術の主なものについて詳細に述べる。その要素技術とは、①サブストラクチャモデルの内部表現方法、②サブストラクチャモデリング機能、③CGによるシミュレーション結果の表示技術の三つである。ここでサブストラクチャモデリング機能としては、①形状モデリング機能と②有限要素分割機能の二つがある。1.1節では、サブストラクチャモデルの内部表現方法とその形状モデリング方法について述べる。特に、そのモデリング機能のうち重要な役割を果たす、サブストラクチャの自動探索機能、すなわち要素分割すべき領域を自動的に抽出する手法について述べる。1.2節では、サブストラクチャモデルを自動的に有限要素分割する手法について述べる。1.3節では、シミュレーション結果を可視化する手法と可視化表現において統計的なデータ編集を行うことで設計者が直感的にシミュレーション結果を理解できるように手助けをする手法などについて述べる。1.4節では、これらの要素技術を用いた対話形構造解析支援システムを実業務で適用した例を実用実験結果として示す。そして、1.5節で本章のまとめを行う。

3. 1 幾何モデルとのインタフェイス

3. 1. 1 サブストラクチャ方式とサブストラクチャ機能群

第2章の1.2.8項で図2-3と図2-10を用いて設計計算手順を示したように、本システムでは、サブストラクチャを有限要素モデルや解析モデルの基本図形と考え、サブストラクチャを有効利用してシミュレーションを支援する。これをサブストラクチャ方式と呼び、その特徴は、サブストラクチャを意識したコ

マンド体系をとっていることにある。このコマンド体系をサブストラクチャ機能群と呼び、図1-1に示すとおり大きく分けて定義、探索、検査、分割機能の四つに分類できる。以下、本節では、これら四つの機能の概要について述べる。主な機能の実現方法については、次項または次節以降で述べる。

①サブストラクチャの定義機能

本機能は、サブストラクチャモデルを対話操作で生成するための機能である。定義機能としては、①図形の定義機能、②図形編集機能、③図形操作機能、④サブストラクチャ編集及び操作機能、⑤サブストラクチャの分割数設定機能の五つがある。図形の定義機能は、幾何モデルの四種の基本図形である直線、円及び円弧、自由曲線、楕円及び楕円弧を定義するための機能である。図形編集機能は、図形の定義機能で定義された基本図形の編集を行うものであり、図1-2に示すように、基本図形自身あるいは基本図形間におけるそれらの分割、削除、延長などの処理を行うものである。図1-3に図形操作機能の詳細を示すように、操作とは一つ以上の基本図形に対して、移動、回転、複写、挿引、反転などの処理を行うことである。以上、述べた部分は幾何モデリングシステムの機能と等価なものである。サブストラクチャ編集機能や操作機能は、サブストラクチャ単位で図形の編集や操作を行う機能である。サブストラクチャの分割数設定機能は、図1-4に示すように大きく分けて自動設定機能と対話設定機能の二つがある。自動設定機能は、①すべてのサブストラクチャを一種類の分割数に設定する機能、②分割数を既定したいサブストラクチャだけに分割数を与え、全体の分割数を矛盾なく設定する機能の二つがある。対話設定機能は、①線分を指示して分割数を入力する機能、②すでに設定されている分割数を指定して分割数を変更する機能の二つである。

②サブストラクチャ探索機能

本機能は、サブストラクチャ方式におけるモデリング機能の代表的なものであり、また本方式を特徴づけているものである。これは、サブストラクチャモデルの基本図形であるサブストラクチャを自動処理により探索し、要素分割する領域として認識するものである。この自動探索機能により、分割数の設定、要素分割、分割データのチェックなどの機能においても、すべてサブストラクチャを単位として処理を行うことが容易となる。その詳細については、3.1.1

項で述べる。

③サブストラクチャ検査機能

検査機能としては、分割数の設定状態の検査機能と要素分割状態の検査機能、及びサブストラクチャの検査機能の三つがある。分割数の設定状態の検査機能は、サブストラクチャ単位に順次その分割数の設定状態を検査し、矛盾が生じるものに対して利用者にその対策を対話的に仰ぐものである。矛盾が生じるとは、例えば2次元あるいは3次元のサブストラクチャの対辺の分割数が一致しない場合である。図1-5に矛盾が生じない場合の分割数設定例とその有限要素分割結果を、図1-6に矛盾が生じる場合とその有限要素分割結果の例を示す。本システムでは、対辺の分割数が一致しないようなサブストラクチャでも有限要素分割が可能であるが、このような場合は有限要素分割結果が分割数の設定において矛盾が生じない場合に比べて規則的でなくなるなど一般的でないため、警告を発する意味で矛盾が生じるとしている。一方、要素分割状態の検査機能は、①サブストラクチャ単位に順次有限要素分割を行い視覚的な検査を行う機能、②隠線消去表示と断面切断処理により対話的に視覚検査を行う機能、③生成された有限要素に対して個別に幾何学的な検査を行う機能、の三つがある。これらの機能をコマンド化した際の表示画面例を、図1-7、図1-8、図1-9に各々示す。

④サブストラクチャ分割機能

本機能は、①1、2、3次元サブストラクチャの次元別有限要素分割機能、②各次元が混在する場合の一括有限要素分割機能、③サブストラクチャ対辺の分割数が一致する場合の等分割機能、④サブストラクチャ対辺の分割数が一致する場合の特殊分割機能、⑤サブストラクチャ対辺の分割数が一致しない場合の不等分割機能、の五つの機能がある。次元別の分割例を図1-10に、各次元が混在する場合の一括分割例を図1-11に示す。また、等分割例を図1-12に、特殊分割例を図1-13に、不等分割例を図1-14にそれぞれ示す。本機能に関する詳細な記述は、3.2節で行う。

3.1.2 サブストラクチャモデルの内部表現と構造

CAD/CAM/CAE一貫システムにおける幾何モデリングシステム[158]は、実務

における汎用性を高めるために大別して三種の基本図形を取り扱う。幾何モデルにおけるこれらの基本図形とは、線分、平面及び曲面、および立体のことである。製品形状の定義方法は千差万別であるが、3次元形状構造物の幾何モデルは、これらの基本図形を用いて定義される。言い換えれば、幾何モデルはひとつの基本図形そのものか、あるいは基本図形の集合である。この幾何モデルの内部表現は、図1-15に示すようなデータ構造で表されている。図1-15は、グループ(部品)の下位にユニット(立体)があり、その下に面と線があり、線の下に点があるという構造の階層的関係を示している。サブストラクチャモデルでは、基本図形を有限要素法で扱われる代表的な有限要素と同相なものとしている。また、サブストラクチャモデルにおける基本図形、すなわちサブストラクチャは、幾何モデルにおける基本図形の部分集合であり、その対応関係を図1-16に示す。サブストラクチャの定義を詳細に述べると、以下のとおりである。

位相的次元数が1のサブストラクチャ、すなわち1次元サブストラクチャは直線、円及び円弧、自由曲線、楕円及び楕円弧のことで、位相的次元数が2のサブストラクチャ(2次元サブストラクチャ)は、3辺または4辺で構成される平面と曲面である。位相的次元数が3のサブストラクチャ(3次元サブストラクチャ)は、2次元サブストラクチャから構成される4面体、5面体、6面体である。サブストラクチャが成立するためには、前記の位相形状が合致し、幾何学的条件としてサブストラクチャを構成する線分の端点が一致しなければならない。このサブストラクチャモデルのデータ構造を図1-17に示す。

図1-17で示した構造は、図1-15で示した構造と比較すると立体と面という概念と構造がなく、そのかわり線に対するサブストラクチャという概念と構造が立体と面という概念と構造にはほぼ等価な記述で付加的に付いている。つまり、構造的には、完全なワイヤフレームモデルであり、サブストラクチャは線という図形要素の拡張情報である。また、幾何モデルで言うユニットは部分構造を表し、グループは幾何モデルの場合と同様、部品を表現する。幾何モデルとサブストラクチャモデルのデータ構造をワイヤフレームのレベルで比較してみると、双方のモデルの違いは線をグルーピングする情報、すなわちサブストラクチャの情報があるかないかである。そして、この情報はワイヤフレーム表現に

関しては独立である。つまり、3次元形状構造物をいくつかのサブストラクチャの集まりとして定義するか、あるいは、幾何モデルをサブストラクチャの集まりとして再定義しなおすかというモデリングの自由度に左右されない。そして、各サブストラクチャを有限要素分割することで、有限要素分割モデルが生成されるのである。

3. 1. 3 サブストラクチャ探索アルゴリズム

利用者が定義した形状を自動的に要素分割するためには、計算機内に生成された形状データを要素分割する領域として把握する必要がある。そこで、要素分割処理を自動化するための手段として、形状データをサブストラクチャモデルという形で計算機内に構築して自動処理する方式を前項までに述べた。本方式において、サブストラクチャモデルを要素分割する領域として把握することは、サブストラクチャをモデルのなかから自動的にその領域を抽出することである。本項では、サブストラクチャモデルからその基本図形であるサブストラクチャを自動的に抽出する方法について述べる。この方法をサブストラクチャ探索アルゴリズムと呼び、その概略手順を図1-18に示す。サブストラクチャの探索機能の外部表現であるコマンドの入力パラメータは、探索次元数と基準図形(Reference element)である。つまり、利用者がこれらのパラメータを入力することにより、サブストラクチャモデルからすべてのサブストラクチャが自動的に抽出されることになる。ここで基準図形とは、一つのサブストラクチャを探索するための基準となるもので、図1-18に示すように1次元の場合は線分の端点、2次元の場合は一つの線分、3次元の場合は3辺または4辺からなるループである。ここで、内容をわかりやすくするため、以下自動探索モードでない場合について図1-18を用いて説明する。

まず最初に、その概要についてふれておく。本アルゴリズムは、最初に入力された基準図形からそれ自身を含んだサブストラクチャを探索することから処理が始まる。基準図形自身を含んだサブストラクチャが見つければ、それを表示し、採用するかどうか対話方式で利用者に尋ねる。採用する場合は、そのサブストラクチャを登録する。そして、これまで探索したサブストラクチャの中から新しく基準図形を自動的に割り出し、新しいサブストラクチャを探索する

処理に戻る。これらの処理ステップを繰り返して行い、サブストラクチャがすべて抽出できたならば、その探索処理を終了する。以下、基準図形からサブストラクチャを探索するアルゴリズムを、次元別に説明するが、その詳細については2次元の場合に留める。なぜならば、3次元の場合は、2次元の処理を3次元に拡張すればアルゴリズム的には容易に可能であるからである。

① 1次元サブストラクチャ

基準図形である端点(Reference vertex)を一つの端点とする線分をサブストラクチャとして探索する。

② 2次元サブストラクチャ

2次元サブストラクチャを探索する手順を図1-20(a)を用いて示す。図1-20(b)で、基準サブストラクチャ(Reference substructure)とは基準図形である稜線(Reference edge) E_i から探索した結果、抽出したサブストラクチャのことである。手順は、以下のステップとなる。

ステップ 1: E_i の両端点 V_1, V_2 を共有する線分群 $EA = \{EA_n\}$, $EB = \{EB_n\}$ を求める。もちろん、基準サブストラクチャが既に存在するときは、その線分は除くものとする。ここで EA, EB は、両端点を含んだ形式($V_1 - EA_n - V_2, V_2 - EB_n - V_1$, $n = 1 \sim m$)となる。 $VA = \{VA_n\}$, $VB = \{VB_n\}$ は各々 EA, EB の V_1, V_2 でない端点群である。

ステップ 2: 端点群 VA, VB に両端点をもつ線分群 $EE = \{EE_n\}$ を求める。

ステップ 3: 線分群 EE の中から、一線分(EE_n , $n = 1 \sim m$)を取り出す。 EE_n が存在すれば、4辺形($E_i - EA_n - EE_n - EB_n$, $n = 1 \sim m$)、存在せず $VA = VB$ ならば3辺形($E_i - EA_n - EB_n$)としてサブストラクチャの抽出を行う。

ステップ 4: 線分群 EE の中のすべての線分についてステップ3の処理を行えば、基準図形 E_i からのサブストラクチャ探索は終了したことになる。

③ 3次元サブストラクチャ

3次元サブストラクチャの探索も2次元と同様、最初に線分群と端点群を求めることから始まる。基準図形である閉ループ(Reference loop)が4辺形(4辺からなる閉ループ)の場合を図1-20(c)に示す。3次元のサブストラクチャ

は、2次元のサブストラクチャが互いに隣接しているものと考えれば、その探索アルゴリズムは2次元のアルゴリズムを拡張することによって可能である。

図1-21に2次元サブストラクチャの探索過程の一部を示す。形状中の番号は、探索したサブストラクチャを明示するためのもので、サブストラクチャを構成する各線分につけた番号である。

このようにしてサブストラクチャの探索は行われるわけであるが、探索形状により、前に探索したサブストラクチャをもう一度探索することが発生する。そこで、今回探索したサブストラクチャがそれまでに探索したサブストラクチャの中に存在するかどうか検査し、同じ物が既に存在する場合には今回探索したサブストラクチャを無視する必要がある。そのために、サブストラクチャを登録するときにその重心座標値も登録し、重心座標値で検査することとした。次に、その方法を示す。

④ サブストラクチャの重心検査法

重心検査法は、同一のサブストラクチャの重複登録を避けるための方法である。一般に図形の重心は、輪郭要素の端点座標値(V_x, V_y, V_z)の総和 X_s, Y_s, Z_s を点の数(S)で割れば求まる。同一サブストラクチャの重複認識を回避するためには、各サブストラクチャの重心間の距離を考えれば、特殊なケースを除き選別できる。ここで特殊なケースとは、例えば図1-22の(a)と(b)に示すような左右対象なサブストラクチャの集合の場合である。このような場合が発生するのは、サブストラクチャの構成線分が直線以外の場合だけである。そこでサブストラクチャの構成線分が直線以外の場合は、その線分が含む点で端点以外の点座標値も用いて重心値を算出することとする。線分が円弧や楕円弧の場合は、その線分の中点の座標値(C_x, C_y, C_z)を輪郭要素の端点座標値(V_x, V_y, V_z)に加え、それらの総和 X_s, Y_s, Z_s を点の数(S)で割って求める。また、サブストラクチャの構成線分が自由曲線(本システムでは自由曲線を3次のBézier曲線により表現している[18])の場合は、線分の第1セグメントの制御点座標値をその線分が含む端点以外の点座標値(T_x, T_y, T_z)として用いる。上記の処理アルゴリズムを式に表すと、式(1-1)のようになる。

$$\begin{aligned}
 G_x &= X_i / S \\
 G_y &= Y_i / S \\
 G_z &= Z_i / S \quad \dots\dots\dots \text{式(1-1)} \\
 D_{x_i} &= G_x - G_{x_i} \\
 D_{y_i} &= G_y - G_{y_i} \\
 D_{z_i} &= G_z - G_{z_i}
 \end{aligned}$$

ここで、G：重心座標値、X、Y、Z：座標値、S：点数、D：二つのサブストラクチャの重心座標値の距離、i：既登録のサブストラクチャ番号(1～n)となり、いづれかのiに対し D_{x_i} 、 D_{y_i} 、 D_{z_i} が各々零になれば、対象とするサブストラクチャiと同一とみなし登録しない。

更に特殊な場合として、図1-23の(a)と(b)のように意図的に接触要素や亀裂部分を定義したい場合は、対話処理により異なる次元のサブストラクチャの混在や重複登録を許すこととする。しかしながら、接触要素や亀裂部分は、プロセッサの要素選択機能で要素の追加や節点の追加を可能としているので、操作性を向上する意味で要素分割時には自動探索を行った方が望ましい。

3. 2 幾何モデルのための有限要素分割手法

現在までの部分領域法による要素分割手法では、分割すべき領域を人間が対話的に指定し有限要素分割を行ってきた。本システムでは、サブストラクチャ方式の導入により要素分割すべき領域あるいは形状を指定しなくてよい。各サブストラクチャに分割数を設定すれば、有限要素分割が自動的に実行できる。この前処理の分割数の設定は、サブストラクチャ単位で行う方式と各エッジ単位で行う方式、および等分割の場合に限りサブストラクチャモデル全体に対して一様な分割数の設定が行える方式がある。分割数の設定が正しいものについては、全サブストラクチャを一括して要素自動分割する全自動モードかサブストラクチャ単位に逐一要素自動分割し、対話方式で確認しながら要素分割を行う半自動モードのどちらかで要素分割を行う。全体モデルの要素分割は、各サブストラクチャごとに次々に要素分割を実行することで完了する。そして、その結果が満足できるものであるならば、ISBFに登録する。要素分割の手法は、

境界表現による曲面補間法を応用したものである[124]-[128]。これは、幾何モデルをワイヤフレームモデルで表現したために生じる課題を解決するための方法である。CADシステムとの親和性を良好に保つためと生成する有限要素の歪みを少なくするために、曲面補間式を用いてサブストラクチャモデルをすべて自動的に要素分割する方法である。曲面補間式としては、Coonsの式を応用している[181]。その特長としては、従来のような等分割だけでなく、不等分割をより一般的に可能としたことである。更に、高次元要素への対応として中間節点の導入も行っている。処理効率の点では、節点サブストラクチャの境界点であるか内点であるかの識別を行い、CPU処理時間の短縮を可能にした。

3. 2. 1 サブストラクチャ方式による要素自動分割方法

サブストラクチャ方式による要素自動分割方法とは、サブストラクチャを有限要素モデルの基本図形と考え、サブストラクチャ単位に自動的に要素分割する方式である。本方法において、有限要素分割の対象となるサブストラクチャは、図2-5に示したものである。サブストラクチャを有限要素分割する方法は、①等分割方法、②特殊分割方法、③不等分割方法の三種類があるが、このうち特殊分割方法と不等分割方法は2および3次元のサブストラクチャを有限要素分割する時のみ有効である。ここで、三種類の方法を準備しているのは、利用者の要求に答えるためと自動化率を向上するためである。サブストラクチャを有限要素分割することによって生成される有限要素の形状とサブストラクチャの対応関係を図1-24から図1-28に示す。等分割方法の場合が図1-24、特殊分割方法の場合を図1-25、26、27に、不等分割方法の場合が図1-28である。ここで、三種の分割方法の必要性を明確にするために、サブストラクチャ方式による有限要素分割手順の流れを図1-29を用いて概略的に説明する。

- ステップ 1：有限要素法によるシミュレーションを行いたい形状の幾何モデルを作成する。
- ステップ 2：ステップ1の幾何モデルをサブストラクチャを基本図形とするサブストラクチャモデルに変更する。
- ステップ 3：計算機がサブストラクチャを要素分割するべき領域として自動抽出する。

ステップ 4: サブストラクチャの各辺に要素分割の要素寸法を決めるためのパラメータとして、分割数を設定する。

ステップ 5: 各サブストラクチャをステップ4で与えられた分割数に従い、サブストラクチャと同相になることを基本として自動的に要素分割する。

ステップ 6: ステップ5で生成された要素分割データをシミュレーションプログラムの入力データに渡して、計算を行う。

これらのステップのうちステップ4では、計算の興味のある部分だけに分割数を詳細に設定するのが一般的である。また、計算の興味のある部分に関して、生成する有限要素の形を規定したいという利用者の要求もある。これらの要求を満足させるためには、上記の三種類の有限要素分割方法は必要不可欠である。なぜならばステップ4で問題となるのは、サブストラクチャを構成する線分群に与えられる分割数の組み合わせに関する自由度と、生成する有限要素の形に関する選択性の自由度があることが、シミュレーションの精度に関係して重要となるからである。その分割数の組み合わせに関する自由度とは、サブストラクチャの対向する線分の分割数が必ず等しくなければならないというような制限がないことであり、要素形状の選択性に関する自由度とは有限要素の形として例えば3角形や4角形を選ぶということである。一般に、サブストラクチャの対辺の分割数が必ず等しい場合の有限要素分割は容易に実現できる。しかしながら、逆に分割数を対辺で一致させるために、隣接のサブストラクチャを更に細分割しなければならないという問題が発生する。このことは、細分割すればするほど操作量が増大し、また形状も複雑化するので操作上の問題となり、更には形状の生成ができなくなることもある。間接分割方式の基本的な考え方からすれば、シミュレーション精度が重要なサブストラクチャ(部分領域)を更に細分割することは問題とならないが、シミュレーション精度が重要な部分について分割数が合わないためにサブストラクチャの細分割を行わなければならないことは問題である。この問題を解決するために幾つかの提案があるが[112]、分割数の設定に関する制限は完全に除去されていない。これら分割手法のうち代表的な方法で図3-10のa)のように分割数が設定されている($l = n - m$)場合を分割すると上手くいくが、b)のような場合($l \neq n - m$)

には上手くいかない。しかし、現状ではこの不等分割手法が最も一般的な手法であり、問題は解決されていない。そこで、この不等分割処理も含めたより一般的に処理できる有限要素分割手法の開発が必要となっている。筆者が提案する有限要素分割手法は、これらの問題を統一的に解決したものである。不等分割手法の基本的な考え方は、分割数の制限があるために利用者が行っていた対話操作を計算機に代行させることである。利用者が行っていた操作とはサブストラクチャを細分割する操作のことで、それを計算機が代わりに行うという自然な発想である。この操作において人間は色々な細分割をおこなうが、本方式では単純な3辺形分割に留める。サブストラクチャの3辺形分割あるいは3角柱分割は、例外処理なく普遍的なアルゴリズムで単純に実現できることがその理由である。以下、図3-11から図3-13を用いて本方式を具体的に説明する。

3. 2. 2 有限要素分割アルゴリズム

図3-28で示したサブストラクチャ方式による有限要素分割手順の流れのステップ5では、サブストラクチャに設定された分割数の組み合わせによって有限要素分割処理アルゴリズムが三つに分かれる。それらは、①等分割処理、②特殊分割処理、③不等分割処理の三種類である。また、このうち特殊分割方法と不等分割方法は、2および3次元のサブストラクチャを有限要素分割するためのものである。等分割処理と特殊分割処理は、図3-14~17にその例を示したようにサブストラクチャに設定された分割数の組み合わせがすべて同じく対向する線分の分割数が等しい場合にのみ有限要素分割処理を実行する。等分割処理と特殊分割処理の違いは、以下の通りである。等分割処理の場合は、図3-14に示すように基本的には対象となっているサブストラクチャをそれと同様に有限要素分割する。特殊分割処理の場合は、図3-15~17に例を示したようにサブストラクチャの形に関係なく指定された有限要素形状の組み合わせパターンで有限要素分割する。但し、特殊分割処理が可能な組み合わせパターンは、あらかじめ登録されているもののみである。一方、不等分割処理は、図3-28のように対向する線分の分割数が異なる場合にのみ有限要素分割処理を実行する。

これら三つの有限要素分割処理は、曲面補間処理を応用して行う。等分割処理

理の場合は、生成する有限要素がサブストラクチャと同相であり、規則的に生成すれば良いので単純な応用で処理できる。しかしながら、特殊分割と不等分割の場合は、生成する有限要素は一樣な形にならない場合が多く、また不規則的に生成するため、処理が複雑になる。図3-31に有限要素分割処理の有限要素生成処理部の流れを示すように、大きな流れではまずステップ1においてサブストラクチャに設定されている分割数から、そのサブストラクチャを細分割する必要があるか判定する。次に、サブストラクチャを細分割する必要がある場合には、細分割し、それらを一時的にサブストラクチャとして記憶領域に保存する。そして、ステップ2で曲面上の節点列を求める順番とその座標値を求める。ステップ3では、求まった節点列のデータから生成する要素の形を決定する。以上の処理ステップにより有限要素分割は終了する。ここで、特殊分割と不等分割の場合は前処理が複雑であるが、有限要素の生成処理はその節点列の生成順を決定すれば後は機械的にその座標値が求まる。ここで、要素分割を行う対象となる形状モデルの形状表現精度に関する考え方を示しておく。設計計算において、対象となる形状モデルの形状表現精度はある程度以上の精度（例えば多面体表現）があれば充分であると考える。なぜならば、要素分割後の結果得られる幾何学的な形状情報は、一般的にNC加工モデルなどの場合に比べて精度の粗いものであるからである。そこで、形状のすべての曲面は境界曲線から表現されているものとし、曲面の特殊な場合として考える平面、2次曲面などの解析的な曲面はすべて近似的に表現する。曲面を境界曲線から表現する方法としては、Coonsの考え方を応用する[18]。次に、各ステップにおける詳細なアルゴリズムの説明をする前に、基本となる要素分割の分割点算出式を各次元別に示す。

まず、1次元サブストラクチャは、直線、円及び円弧、自由曲線、楕円及び楕円弧の四種類のもが要素分割の対象となる。基本的には1次元サブストラクチャの線長を求め、分割点の数で割ることによりその比を求めることで最終的に分割点の座標値を求める方法である。自由曲線、ここでは特に、3次のBézier曲線の分割点算出式の例を示す。式(3-2)は3次のBézier曲線をパラメトリックに多項式表現したものであり、 t は区間 $0 \leq t \leq 1$ をとりうる補助変数で、図3-32にBézier曲線セグメントの例を示すように $P_1, P_2, P_3,$

P_4 は曲線の制御点である。

$$R(t) = (1-t)^3 P_1 + 3(1-t)^2 t P_2 + 3(1-t)t^2 P_3 + t^3 P_4, \dots \dots \text{式(3-2)}$$

この曲線の線長、 L を求める式は、区間 $[a, b]$ において式(3-3)のようになる。

$$L = \int_a^b \sqrt{R'_x(t)^2 + R'_y(t)^2 + R'_z(t)^2} dt \dots \dots \text{式(3-3)}$$

そして、この L を分割数(n)で割れば、 n 等分された曲線の長さ(l)が容易に求まる。この l から、分割点の座標値を算出することで節点座標値を求める。

次に、2次元サブストラクチャは、Coonsにより導かれた双3次の曲面補間式である式(3-4)を応用して求める。式(3-4)は、4辺形の場合の補間式である。式(3-4)では、曲面を表す空間をパラメトリックに2次元の u と v で表現しようとしており、このときの u, v は $[0, 1]$ の範囲をとりうる補助変数である。そして、曲面上の任意の点を $P(u, v)$ としている。基本的な考え方は境界線をそれぞれ平行移動することにより曲面を生成し、境界線ごとに作られた曲面の相加平均をとることにより求めるものである。図3-33に、 U, V 空間での $P(u, v)$ 位置座標関係を示す。3辺形の場合も式(3-4)により、 $P(u, 1)$ が一点に縮退しているものとすれば4辺形の場合と同様に要素を構成する節点として格子点の座標値を求めることができる。

$$P(u, v) = \begin{bmatrix} 0 & P(u, 0) & P(u, 1) \\ P(0, v) & P(0, 0) & P(0, 1) \\ P(1, v) & P(1, 0) & P(1, 1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 \\ F_u \\ F_v \end{bmatrix} \dots \text{式(3-4)}$$

ここで、

$$F_u = 1 - u \\ F_v = v$$

$$F^*_{10} = 1 - v$$

$$F^*_{11} = v$$

2次元サブストラクチャの場合の節点座標値の求め方も、1次元サブストラクチャの場合と同様に分割数からu, vのパラメータを算出することで容易に求めることが可能となる。

3次元サブストラクチャのような立体の場合も上記曲面生成法を3次元的に拡張することにより対応している。この場合補助変数がs, t, uの三つになり、例えば6面体内部の一点P(s, t, u)は、曲面S₀(s, t, u), S₁(s, t, u), S₂(s, t, u)の相加平均で式(3-5)のように表せる。これを図で示すと図3-34のようになる。

$$P(s, t, u) = \frac{[S_0(s, t, u) + S_1(s, t, u) + S_2(s, t, u)]}{3}$$

………式(3-5)

更に、式(3-5)を詳細に示すと式(3-10)になる。以下、式(3-4)の4辺形の曲面補間式から6面体の補間式である式(3-10)を導くまでの過程を式(3-6)から式(3-9)を用いて示す。

式(3-4)を3次元に拡張すると、式(3-6)のように表せる。

$$S_0(s, t, u) = -[-1 F^*_{10}, F^*_{11}] \cdot \begin{vmatrix} 0 & P(s, t, 0) & P(s, t, 1) \\ P(s, 0, u) & P(s, 0, 0) & P(s, 0, 1) \\ P(s, 1, u) & P(s, 1, 0) & P(s, 1, 1) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} -1 \\ F^*_{10} \\ F^*_{11} \end{vmatrix}$$

$$S_1(s, t, u) = -[-1 F^*_{20}, F^*_{21}] \cdot \begin{vmatrix} 0 & P(0, t, u) & P(1, t, u) \\ P(s, t, 0) & P(0, t, 0) & P(1, t, 0) \\ P(s, t, 1) & P(0, t, 1) & P(1, t, 1) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} -1 \\ F^*_{20} \\ F^*_{21} \end{vmatrix}$$

$$S_2(s, t, u) = -[-1 F^*_{30}, F^*_{31}] \cdot \begin{vmatrix} 0 & P(s, 0, u) & P(s, 1, u) \\ P(0, t, u) & P(0, 0, u) & P(0, 1, u) \\ P(1, t, u) & P(1, 0, u) & P(1, 1, u) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} -1 \\ F^*_{30} \\ F^*_{31} \end{vmatrix}$$

………式(3-6)

そして式(3-6)において、P(s, t, 0), P(s, t, 1), P(s, 0, u), P(s, 1, u), P(0, t, u), P(1, t, u)は、6面体を構成する6つの面に対応しており、6面体の12本の稜線と8つの頂点で記述でき、それぞれは式(3-7)のようになる。

$$P(s, t, 0) = -[-1 F^*_{40}, F^*_{41}] \cdot \begin{vmatrix} 0 & P(s, 0, 0) & P(s, 1, 0) \\ P(0, t, 0) & P(0, 0, 0) & P(0, 1, 0) \\ P(1, t, 0) & P(1, 0, 0) & P(1, 1, 0) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} -1 \\ F^*_{40} \\ F^*_{41} \end{vmatrix}$$

$$P(s, t, 1) = -[-1 F^*_{50}, F^*_{51}] \cdot \begin{vmatrix} 0 & P(s, 0, 1) & P(s, 1, 1) \\ P(0, t, 1) & P(0, 0, 1) & P(0, 1, 1) \\ P(1, t, 1) & P(1, 0, 1) & P(1, 1, 1) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} -1 \\ F^*_{50} \\ F^*_{51} \end{vmatrix}$$

$$P(s, 0, u) = -[-1 F^*_{60}, F^*_{61}] \cdot \begin{vmatrix} 0 & P(0, 0, u) & P(1, 0, u) \\ P(s, 0, 0) & P(0, 0, 0) & P(1, 0, 0) \\ P(s, 0, 1) & P(0, 0, 1) & P(1, 0, 1) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} -1 \\ F^*_{60} \\ F^*_{61} \end{vmatrix}$$

$$P(s, 1, u) = -[-1 F^*_{70}, F^*_{71}] \cdot \begin{vmatrix} 0 & P(0, 1, u) & P(1, 1, u) \\ P(s, 1, 0) & P(0, 1, 0) & P(1, 1, 0) \\ P(s, 1, 1) & P(0, 1, 1) & P(1, 1, 1) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} -1 \\ F^*_{70} \\ F^*_{71} \end{vmatrix}$$

$$P(0, t, u) = -[-1 F^*_{80}, F^*_{81}] \cdot \begin{vmatrix} 0 & P(0, t, 0) & P(0, t, 1) \\ P(0, 0, u) & P(0, 0, 0) & P(0, 0, 1) \\ P(0, 1, u) & P(0, 1, 0) & P(0, 1, 1) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} -1 \\ F^*_{80} \\ F^*_{81} \end{vmatrix}$$

$$P(1, t, u) = -[-1 \ F''_x \ F''_y] \cdot \begin{vmatrix} 0 & P(1, t, 0) & P(1, t, 1) \\ P(1, 0, u) & P(1, 0, 0) & P(1, 0, 1) \\ P(1, 1, u) & P(1, 1, 0) & P(1, 1, 1) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} -1 \\ F''_x \\ F''_y \end{vmatrix} \quad \dots \text{式(3-7)}$$

ここで、式(3-6)を式(3-5)に代入すると、式(3-8)を求めることができる。式(3-8)は、式(3-5)が6面体を構成する6つの面と12本の稜線を記述できることを示したものである。

$$P(s, t, u) = \left\{ \begin{array}{l} 2 F''_x P(s, t, 0) + 2 F''_y P(s, t, 1) \\ + 2 F''_z P(s, 0, u) + 2 F''_t P(s, 1, u) \\ + 2 F''_u P(0, t, u) + 2 F''_v P(1, t, u) \\ - F''_x F''_y P(s, 0, 0) - F''_x F''_y P(s, 0, 1) \\ - F''_x F''_z P(s, 1, 0) - F''_x F''_z P(s, 1, 1) \\ - F''_y F''_z P(0, t, 0) - F''_y F''_z P(1, t, 0) \\ - F''_y F''_z P(0, t, 1) - F''_y F''_z P(1, t, 1) \\ - F''_z F''_t P(0, 0, u) - F''_z F''_t P(0, 1, u) \\ - F''_z F''_t P(1, 0, u) - F''_z F''_t P(1, 1, u) \end{array} \right\} / 3 \quad \dots \text{式(3-8)}$$

更に、式(3-8)を式(3-7)に代入すると、式(3-9)が得られる。式(3-9)は、6面体の内部の1点を6つの面と12本の稜線と8つの頂点で表したことになる。

$$P(s, t, u) = \begin{array}{l} F''_x P(s, t, 0) + F''_y P(s, t, 1) \\ + F''_z P(s, 0, u) + F''_t P(s, 1, u) \\ + F''_u P(0, t, u) + F''_v P(1, t, u) \\ - F''_x F''_y P(s, 0, 0) - F''_x F''_y P(s, 0, 1) \\ - F''_x F''_z P(s, 1, 0) - F''_x F''_z P(s, 1, 1) \end{array}$$

$$\begin{array}{l} - F''_y F''_z P(0, t, 0) - F''_y F''_z P(1, t, 0) \\ - F''_y F''_z P(0, t, 1) - F''_y F''_z P(1, t, 1) \\ - F''_z F''_t P(0, 0, u) - F''_z F''_t P(0, 1, u) \\ - F''_z F''_t P(1, 0, u) - F''_z F''_t P(1, 1, u) \\ + F''_x F''_y F''_z P(0, 0, 0) - F''_x F''_y F''_z P(1, 0, 0) \\ - F''_x F''_y F''_z P(1, 1, 0) - F''_x F''_y F''_z P(0, 1, 0) \\ - F''_x F''_y F''_z P(0, 0, 1) - F''_x F''_y F''_z P(0, 1, 1) \\ - F''_x F''_y F''_z P(1, 0, 1) - F''_x F''_y F''_z P(1, 1, 1) \end{array} \quad \dots \text{式(3-9)}$$

また、式(3-9)を稜線と頂点だけで表すと、最終的に式(3-10)となる。すなわち、境界表現から面の場合と同様に立体も要素分割することができる。

$$P(s, t, u) = \begin{array}{l} F''_x F''_y P(s, 0, 0) + F''_x F''_y P(s, 0, 1) \\ + F''_x F''_z P(s, 1, 0) + F''_x F''_z P(s, 1, 1) \\ + F''_y F''_z P(0, t, 0) + F''_y F''_z P(1, t, 0) \\ + F''_y F''_z P(0, t, 1) + F''_y F''_z P(1, t, 1) \\ + F''_z F''_t P(0, 0, u) + F''_z F''_t P(0, 1, u) \\ + F''_z F''_t P(1, 0, u) + F''_z F''_t P(1, 1, u) \\ - 2 \{ F''_x F''_y F''_z P(0, 0, 0) + F''_x F''_y F''_z P(1, 0, 0) \\ + F''_x F''_y F''_z P(1, 1, 0) + F''_x F''_y F''_z P(0, 1, 0) \\ + F''_x F''_y F''_z P(0, 0, 1) + F''_x F''_y F''_z P(0, 1, 1) \\ + F''_x F''_y F''_z P(1, 0, 1) + F''_x F''_y F''_z P(1, 1, 1) \} \end{array} \quad \dots \text{式(3-10)}$$

以上のように形状の境界表現情報から、1次元から3次元サブストラクチャまでを要素分割することが可能である。以下、各ステップの詳細な処理アルゴリズムについて述べる。

3. 2. 3 サブストラクチャの細分割処理

サブストラクチャの細分割処理が必要となる場合は、図1-11の有限要素生成処理の流れにおけるステップ1において、サブストラクチャに設定されている分割数から不等分割処理が必要であると判定された場合だけである。細分割処理は、処理対象となっているサブストラクチャを自動的に二つ以上のサブストラクチャに細かく分割する処理のことである。細分割のパターンは、2次元サブストラクチャの場合はすべて3辺形で行い、3次元サブストラクチャの場合はすべて3角柱で行う。図1-15にその細分割パターンを示す。細分割方法は、図1-15に示すように2次元サブストラクチャの曲面上に擬似的に仮想エッジ ($E_i, i=1\sim 4$) を発生させて行う。図1-15に示すようなパターンにサブストラクチャを細分割すれば、2次元のサブストラクチャを構成する辺 ($e_i, i=1\sim 4$) の分割数 (l, m, n, o) が対辺同志で一致しなくても、細分割された3辺形タイプのサブストラクチャは (e_1, E_1, E_2 , または, $e_1, E_1, e_4; i=1\sim 4, k=1\sim 4, i \neq k$) 分割数の制限事項を満足する。ここで、分割数の制限事項とは等分割のための分割数の設定条件を指す。つまり、新しく生成された線分 (例えば、図1-15の $E_i, i=1\sim 4$) に皆等しい分割数 (j) を与えれば分割数の制限事項を満足する。本方式により実現される機能は、①自動不等分割機能、②対話形不等分割機能の二つである。①の自動機能は自動処理で細分割されたサブストラクチャの要素分割パターンを自動的に決定し要素自動分割する機能である。②の対話機能は、自動処理で細分割されたサブストラクチャの要素分割パターンを対話的に利用者が指定し要素自動分割する機能である。この対話機能を構築することで経験や知識を取り入れた要素分割が可能となる。3次元サブストラクチャの場合も2次元サブストラクチャでの考え方を3次元的に拡張すれば容易に不等分割が可能である。しかし、3次元サブストラクチャの全ての面に対して不等分割を許してしまうと、生成される要素の幾何学的性質を充分保証するために計算時間が大量に必要となる。そのため機能設計上の理由で次の制限事項を設ける。それらは、

- ① 4面体サブストラクチャには不等分割を許さない
- ② 5面体サブストラクチャで不等分割できる面は3辺形面に限定する
- ③ 6面体サブストラクチャで不等分割できるのは一組の対面とする

④ 対面を構成する各辺の分割数は、それぞれ対応する各辺の分割数と一致しなければならない

の4点である。すなわち、3次元サブストラクチャで行われるサブストラクチャの細分割パターンは、3角柱である。これを図で示すと図1-17のようになる。

以上、述べてきた細分割処理は、具体的には①細分割パターンの決定、②曲面補間処理、③仮想曲線生成処理の三つの処理からなる。以下、これら三つの処理方法について詳細に述べる。

まず初めに、①の細分割パターンの決定は、図1-15における線分 e_i の分割数の組み合わせによって行う。3辺形の場合は分割数の組み合わせに係らず全て④のパターンとなる。4辺形の場合は分割数が同じものが一組あれば④のパターンとなり、その他の分割数の組み合わせは④となる。④のパターンを設けた理由は、等分割パターンをなるべく活かすための配慮からである。尚、3次元サブストラクチャの場合は、上記の制限事項付で不等分割することを許している。それゆえに、対応する面の分割数が一致するかどうかの検査処理が追加されるほかは、2次元サブストラクチャの細分割パターン決定方法と全て同じである。以上から細分割パターンが決定されたら、曲面補間処理を行い仮想曲線 (E_i) を生成することになる。

次に、②の曲面補間処理のアルゴリズムについて図1-15の例を用いて述べる。初めに、処理対象となっている図1-15のサブストラクチャから分割数 (l, m, n, o) の制限事項を満足しない4辺形の形状情報を取り出す。次に、その4辺形に対応する写像空間 (U, V 空間) を図1-18のように作成する。その U, V 空間での中心点すなわち u, v パラメータ ($0 \leq u, v \leq 1$) がそれぞれ0.5となる補間点を求める。補間点は、3.1.2項で示した式(1-4)を用いて算出する。式(1-4)は、補助変数を u, v としたときの曲面の補間点 $P(u, v)$ を求めるものである。また、3次元サブストラクチャのような立体の場合も3.1.2項で示したように、上記曲面生成法を式(1-5)へ3次元的に拡張することにより求める。但し、3次元サブストラクチャの場合には、補助変数が s, t, u の三つになる。

最後に③の仮想曲線の生成アルゴリズムは、④仮想エッジ (E_i) を生成す

るための曲面上の補間点を求める。(b)その補間点を結ぶ曲線をBézier表現により求める。(c)で求めた曲線を曲面上の曲線とし細分割されたサブストラクチャを構成するエッジとして仮想的にみなす、の三つのステップからなる。仮想エッジの生成アルゴリズムでは、まず、仮想エッジ (E_i) を生成するための曲面上の補間式、式(3-4)または式(3-5)から図3-33のように補間点列、 $P_i(u, v)$ を求める。図3-35(c)の E_i の場合では、式(3-4)の u, v に 0~0.5の範囲の値を与える。補間点の数はそのまま曲線の表現精度に依存するので、次のようにして決めている。図3-35(c)の分割数、 l, m, n, o の最大値を曲面表現の精度の尺度とする。つまり、 u および v は、 $[0, 1]$ の値をとるから、補間点数 N_p は、

$$N_p = \max(l, m, n, o) \quad \dots\dots\dots \text{式(3-11)}$$

として、その時の u, v パラメータ、 T_p は、

$$T_p = u / \max(l, m, n, o)$$

または、 $\dots\dots\dots \text{式(3-12)}$

$$T_p = v / \max(l, m, n, o)$$

である。但し、4辺形の場合、 $u = v = 0.5$ 、3辺形の場合 $u = 0.5, v = 1/6$ とする。このようにして求めた補間点を式(3-1)を用いてBézier表現により曲線表現する。そして、曲線を曲面上の曲線とし、これを細分割されたサブストラクチャを構成するエッジとして仮想的にみなしデータベースに登録する。以上でサブストラクチャの細分割処理を終了する。この後、3.2.2項で示した曲面補間法による有限要素分割処理を実行することで、不等分割手法による有限要素分割が実現できる。

3. 2. 4 特殊分割手法

3.2.1項で特殊分割の概略に触れた。特殊分割の目的は、(1)3辺形サブストラクチャの頂点に集中するような要素の生成を回避しうる要素分割を行うこと、(2)利用者が要素分割のパターンを任意に選択できること、の二つである。ここで3辺形サブストラクチャの頂点に集中するような要素の生成とは、図3-18の(a)に示すような等分割による要素分割を行ったものをさす。特に、図3-18の(a)のような要素パターンを用いて不等分割を行った時に、中心の1点にたくさん要素が集中してしまい、良い要素分割ができなくなる。その例を図3-18の(b)~(d)に示す。そこで、図3-18の(a)のような分割数 (l, m, n) が与えられたとき、サブストラクチャの頂点の1節点を多くの要素が共有しないような要素生成法を開発する必要がある。その具体例は、図3-28で示した不等分割例である。従来例 (図3-18の(b)~(d)) と比較のために、図3-28の(a)のような特殊なパターンを用いて不等分割した結果を図3-28の(b)~(d)に示す。3辺形サブストラクチャを要素分割した時に、頂点の1節点を多くの要素が共有しないような要素分割パターンとして、図3-40に3辺形サブストラクチャの要素分割パターンを示す。但し、2番目のパターンはその例外である。このパターンは、従来の等分割パターンのひとつであると同時に、分割数に対して最も融通のきく要素分割パターンである。また、図3-41に4辺形サブストラクチャの要素分割パターンを示す。4辺形サブストラクチャにおける要素分割パターンは、経験的なものであり、多種多様な利用者の要求に答えることのみを目的として用意している。ゆえに、図3-41のパターン8や9のように分割数の組み合わせが等分割パターンではないが定型的なものも含まれた。

次に、この特殊分割パターンを用いた不等分割手法の処理方式について述べる。それは、以下に述べるようなステップにより実現される。

- ステップ 1: サブストラクチャの分割数の検査を行い、定型的な不等分割のパターンがそのまま適用できる場合にはその特殊分割を行う。
- ステップ 2: 図3-35に示した細分割パターンが決定したのち、最適な分割数 (j) を決定する。
- ステップ 3: 細分割されたサブストラクチャの幾何情報を検査し、細分割 (3辺形) サブストラクチャの歪み具合を検査する。

ステップ 4: 細分割(3辺形)サブストラクチャの幾何情報と分割数から最適な分割パターンを選択する。

ステップ 5: 要素分割を実行する。

ここで、ステップ1の分割数の検査では、図3-41に示した4辺形サブストラクチャのパターン8, 9が適用可能かどうか調べる。ステップ2では、等分割パターン(図3-44の3辺形サブストラクチャのパターン1, 3, 4)やパターン5, 6が最も優先度の高いパターンとしているので、これらのパターンがなるべく多く現れるように分割数(j)が決まる。ステップ3の幾何情報検査は、図3-42の各頂点N_iを直線で結んだときの交角の角度を検査する処理である。例えば、30°以下または150°以上が発生した場合に4辺形の要素を3辺形にするパターン(7に対して8のように)を選択する。ここで、この角度は経験的な数値である。ステップ4では、ステップ1~3の判定結果をもとに最終的なパターンを決定する。ステップ5の要素分割は、2次元サブストラクチャの場合は式(3-4)を用いて、3次元サブストラクチャの場合は式(3-5)を用いて節点座標を求めてから要素データを図3-28に示したように作成する。このとき2次元サブストラクチャの場合は、P(u, v)を図3-43の(a)に示すように1~N, A~Zの順で節点座標値を求める。更に、3次元サブストラクチャは、P(s, t, v)を図3-43の(b)に示すように1~N, A~Z, そして深さ方向D₁~D_nの順で節点座標値を求める。節点座標が求まった後、パターンに合わせて要素データを作成する。

3. 2. 5 節点座標値の補正処理と節点番号の決定方法

以上述べてきた方法で任意の3次元形状を近似的に要素分割できるが、明確に定義された曲面、例えば2次元曲面に対して大きく近似精度が劣化することがある。それは、図3-44の(a)と(b)に示すように曲面を表現する境界線が相貫線を含む場合などである。このような場合には、曲面の属性が自動的に判別できる場合や曲面の属性が幾何モデルの情報としてある(サーフェイスモデル)場合は自動的に本来の曲面の上に節点座標値を投影して補正する。その他の場合として、フィッティング機能と呼ぶ対話処理による近似精度を確認する機能を用意している。本機能は、図3-44の(c)に示すように、利用者が対話的に曲面

の属性(この場合円筒面)をサブストラクチャに与えて、境界表現から要素分割した節点座標値をその曲面上に投影したものの(破線のメッシュ)と境界表現からのみ生成した節点座標値をグラフィカルに表示して(実線のメッシュ)、その近似精度を確認できるようにしたものである。近似精度が不満足である場合には、サブストラクチャを図3-44の(d)~(f)に示すように対話的に細分割するか曲面の属性を与える必要がある。用意した曲面の属性は、(1)平面、(2)円筒面、(3)円錐面、(4)球面、(5)トーラス面の5種類である。図3-45にこれらの詳細なデータ記述の一覧を示す。また、これらの投影方法は、節点から投影すべき曲面上に重点を求めるものであり、図3-45に図解する通りである。図3-45の(a)は、平面への節点の投影を示すものであり、節点から与えられた平面への重点を単純に求める処理を行う。円筒面や円錐面への投影は、その中心軸に重点を落とすように与えられた2次元曲面上の投影点を求める。図3-45の(b)と(c)に円筒面と円錐面の場合を図解する。トーラス面の場合も、同様である。また、本システムはワイヤフレームモデルを基本としているので、相貫線を求める必要がある時に処理ができなくなる。そこで、この投影手法を用いて便宜的な手段で相貫線らしい線を求める機能を用意した。円筒面の場合を例にとり、図3-45の(d)を用いて説明する。これは投影すべき線(e₁~e₄)を等分割した点列を求めてから、円筒面にそれらの点を投影する。次に、これらの点列を自由曲線で結合することで投影線(e₅~e₆)を求める。これらの投影線は、明らかに相貫線とは異なるが、多面体分割する有限要素分割における近似精度を考えると、その近似精度は十分と考える。

最後に節点番号の決定方法について述べる。節点番号の決定方法とは、分割された全要素のなかで同じ座標をもつ節点群を一つの節点番号とすることである。従来の方法では、節点番号が決まった座標群とこれから決定しようとする節点座標と各々距離を求めて判別していた。この方法では、2節点間の距離計算回数が非常に多くなり、計算時間がかかるという問題点があった。対話システムにおいては、この問題は応答性を著しく劣化させる。そのため本方式では、リスト構造をもったブロック探索法を応用した節点番号の決定方法を用いて処理時間の短縮を図ることにした。

本方法を行うためのデータ構造を図3-47に示す。データ構造は、節点番号

が決定した節点情報を格納する節点テーブル、 \sqrt{N} 節点(N:総節点数)を単位としたブロックを管理する管理テーブルからなる。節点テーブルは、節点座標と節点番号、それに次の節点テーブルのポインタと前の節点テーブルのポインタをもっている。節点テーブルの順番は、節点座標の小さい順とした。ここで、座標の大小の判定方法を述べる。いま、座標を P_1, P_2 とすると、

$$\textcircled{1} P_1 = P_2 : P_{1s} = P_{2s} \quad \& \quad P_{1r} = P_{2r} \quad \& \quad P_{1\theta} = P_{2\theta}$$

$$\textcircled{2} P_1 > P_2 : P_{1s} > P_{2s}$$

$$P_{1r} = P_{2r} \quad \& \quad P_{1\theta} > P_{2\theta}$$

$$P_{1s} = P_{2s} \quad \& \quad P_{1r} = P_{2r} \quad \& \quad P_{1\theta} > P_{2\theta}$$

$$\textcircled{3} P_1 < P_2 : \textcircled{2} \text{と逆の時である。}$$

となる。ここで「:」は、「であるためには」を意味する。管理テーブルは、各ブロックの先頭節点テーブルへのポインタを持つ。これらのテーブルを使用して節点番号を決定する手順を図3-48を用いて示す。図3-48は、先頭ブロックをLS(初期値は1)、最終ブロックをLE、ブロック L_n の先頭節点テーブルの座標をPQとした場合の、対象ブロックの検索の流れを示したものである。まず、決定したい節点の座標値(PP)が大小関係でどのブロックに属するかを検索する。対象ブロックが決定すると、次にそのブロックの先頭節点テーブルからブロック最終節点テーブルまでの中で、座標値(PP)が大小関係でどこに位置づけられるかを調べる。座標値(PP)と同じ座標値であればその節点番号が求まるものとなる。同じ座標値がなければ、新しい節点番号を設け、節点番号テーブルを作成し、ポインタづけを行い、次の節点へ進む。

新方法と旧方法を比較した結果は次のとおりである。総節点数が350の形状に適用した場合、CPU時間が旧方法では4秒かかったが、新方法では2.3秒と33%減となり、1000節点の場合は旧方法で10秒、新方法では3.3秒と50%減となった(IIITAC M-200IIによる)。この例が示すとおり、新方法は節点数の増大に伴いその効果が飛躍的に向上するものである。

3. 2. 6 サブストラクチャ方式における有限要素分割の実験と検討

本手法の検証として二通りの実験を行った。一つはサブストラクチャ一つづつに対して、もう一つは構造物形状での要素分割である。1次元サブストラクチャの要素分割結果を図3-49に示す。2次元サブストラクチャの要素分割結果を図3-50、51、52、53に示す。また、3次元サブストラクチャの分割結果を図3-54、55、56に示す。構造物形状への適用例としては、図3-57に2次元サブストラクチャにより構成されている洗濯機部品のギヤケース上部を、図3-58に3次元サブストラクチャにより構成されている2分岐管の要素分割の例を示す。

実験結果として定量的には、次のようなことが言える。

①特殊分割を行うと節点数と要素数が等分割に比べて増加する。

②不等分割の場合は、節点の生成が等分割に比べて規則的に行えないために処理が複雑となり、CPU処理時間がかかる。

③特殊分割や不等分割を行った場合、①と②からCPU時間が従来方法に比べて2~3倍に増える。

④については、その増加量は分割数に依存するがサブストラクチャ当たり数個のオーダーである。⑤は、等分割の場合で10⁻³秒程度の処理時間であり、さして問題とならない。等分割の場合の計算処理時間(CPU時間)を表3-1に示すが、これは100ケースの平均CPU時間である。これらのテストケースは、直線、円弧、自由曲線、楕円弧をサブストラクチャ自身あるいは境界要素とするサブストラクチャであり、分割数が3~5分割の場合である。

次に、定性的な結果の検討を行う。図3-50~53は、2次元サブストラクチャの要素分割の実験例の一部である。このうち図3-51に3辺形サブストラクチャの特殊分割結果を示したが、各パターンとも1辺の分割数を7として分割したものである。各パターンとも1辺の分割数を変更することにより要素分割の粗密変化による分割状態を検査したが、粗密に推移してもつづれたりすることなく良好な結果を示した。3辺形サブストラクチャの特殊分割は、不等分割手法の基本部の一つである。そこで種々の形状で実験を行い、要素の幾何形状特性(平面性、要素辺の縦横長さの比、要素辺の鈍角の大きさなど)の算出も行ったが、特に問題は見つからなかった。図3-52には、4辺形サブストラク

チャの特殊分割結果を示したが3辺形同様、特に問題はなかった。ただ、図3-51の(g)において、ある1辺に分割数1を与えて分割する場合、分割数1を与えられた辺の長さが大きい時や曲面を分割する時、分割数の粗いところでは要素分割の形状補間精度が著しく劣るので、曲面での利用は十分な考慮を要する。図3-53に不等分割手法による曲面の分割例を示す。色々な曲面に種々の分割数を組み合わせて実験した結果、特に問題はなく、算出した幾何形状特性も良好であった。図3-54~56はソリッド要素の要素分割例で、図3-54は特殊分割の実験例である。2次元サブストラクチャ同様良好な要素分割結果が得られた。図3-55には、その不等分割例を示す。立体の内部も、図3-56の(c)や(d)のように断面図を取り出したりして検査したが、特に問題はなかった。図3-57と58に実際の設計対象物に実験的に適用した場合の要素分割例を示す。これらの構造物の要素分割を行う上での操作でも問題なく、良好な結果が得られた。

以上、実験結果をまとめると次のようなことが言える。

- ① サブストラクチャの細分割と特殊分割を併合した方法により、不等分割や特殊分割を含む有限要素分割機能が実現できた。
- ② 不等分割機能において、自動処理と対話処理機能を具備することにより幅広いニーズに対応できるようにした。
- ③ 特殊分割機能の構築により、不等分割だけでなく要素分割のパターンに選択性を持たせることにより、ユーザ指向の機能改善ができた。

3. 3 コンピュータグラフィックス技術を用いたシミュレーション結果の評価と表示

本節では、対話形構造解析支援システムのポストプロセッサを実現する機能について述べる。ポストプロセッサは、シミュレーションの計算結果として得られる膨大な数値データを図形処理技術を用いて図式化することが主な役割であり、これらのための主な機能を以下に示す。

- ① 隠線処理：図形の座標値データ (x, y, z) や面の法線ベクトルなどから可視あるいは不可視図形を判定し、可視図形のみを表示する技術、モデル図や変形図等を表示する機能

② 等高線表示：解析モデルの節点等にシミュレーション結果として得られた物理量を内挿することで得られる等高線を表示する機能

③ テンソル図表示：流れや方向に関する物理量（1階のテンソル量、すなわちベクトル量）、例えば、流速とその方向や2階のテンソル量である主応力などを図式的に表現する機能

④ 計算結果情報の編集表示：グラフや表、ダイアグラムなどによる計算結果情報の編集結果の表示機能

これらの機能は、モデル形状、応力や温度などの分布、振動挙動などを図形処理技術を用いて表現する手法の基本機能である。細かく微細に渡って機能を列挙すれば他にも多々あげられるが、上記の基本機能が最も重要なものと考えられる。これらを実現するための基本技術は、古くから(1950年代)種々の方法が提案されており[149]、近年ではハードウェアの発展にともない一層の機能拡張が可能となっている。これらの機能の重要な目的は、数値データの羅列情報をいかに利用者に直感的に分かり易い図形情報に変換するかと言うことである。数値データの羅列情報を図形情報に変換することは、さほど難しいことではない。しかしながら、利用者に直感的に分かり易く変換することは容易ではない。なぜならば、数値データを評価して編集しなければならないからである。その簡単な例が、隠線処理による表示や等高線作画である。隠線処理の場合は、どの図形が見えるか否かを評価して作画する。また、等高線作画の場合も同じレベルにある情報を線で結ぶことから、情報の評価と編集を行っていることになる。しかしながら、これらの評価や編集処理だけでは、シミュレーションの結果を利用者に直感的に分かり易い図形情報として提供することにはならない。そこで本節では、特に色彩情報とシミュレーション結果の連携に焦点を絞ってこの問題を考えることにする。具体的には、コンピュータグラフィックス技術を用いた色彩情報の表示方法を開発することにより、シミュレーションの結果を利用者に直感的に分かり易い図形情報として提供する方式について述べる。以下、初めにポストプロセッサにおける表示機能群を概略的に示した後、色彩情報の表示方法について述べる。

3. 3. 1 ポストプロセッサにおける表示機能群

①モデル図表示機能

モデル図表示機能は図1-51と図1-52で示したように、①モデル図または変位図の表面データ表示、②③の隠線表示、④⑤の任意断面表示(CUT MODEL)、⑥⑦の複数断面表示(SLICED MODEL)、⑧⑨のパネル投影表示の五種類である。これらの表示例は、実用性を重視した結果得られたものである。モデル図表示においては、隠線処理技術が重要な意味を持つ。3次元形状の投影図形を、実際には隠線となる線を区別せず表示すると、図形の表裏の解釈は一意に定まらず2通りの解釈ができる。また、隠線処理を行わないならば要素分割された形状のように複雑な形状の把握は困難を極める。一般に、隠面処理の方が隠線処理よりも格段の差で処理速度が速いこととハードウェアの機能であるデプスバッファソートの利用が可能なることから多用されるが、技術的な問題となるのは変形図などによく現れる凹多面体の自己及び相互干渉である。また、節点番号や要素番号の正確な表示も問題となる。更には、等高線表示などにも応用しようとする時輪郭線や等高線の表示が絡んでくるため隠線処理は不可欠である。そこで、本プロセッサでは、通常の線画表示と隠面処理表示に加えて隠線処理表示の機能を持つ。

②等高線表示機能

等高線図の表示は、モデル図表示機能を基本としている。等高線の表示方法は、線表示とシェーディング表示の二種類がある。それぞれの表示例を図1-53と54に示す。シミュレーションの結果として得られる数値データ、例えば応力値や温度値、エネルギーなどが物体の表面や内部にどう分布しているか容易に知る手段として、等高線表示を用いるのはシミュレーション結果の評価において効果的である。本システムにおける等高線表示タイプは、①等高線タイプ、②要素レベルタイプ、③重心分割タイプの三種類である。①では、モデル全体の物理量分布状態が良くわかる。逆に、要素単位に計算値を計算し結果を出す場合には②のように要素単位に物理量が表現させたり、③のように要素の重心で要素を3辺形に分け、各々に対して物理量を表現する方が局所的な分布状態が良くわかる。従って、上記①～③は各々の使われ方によって重要な表示技術となる。図1-51では、①～⑨の表示タイプをそれぞれ示した。

③テンソル図表示機能

モデルの表示は、モデル図表示機能を基本としている。テンソル量を表示するのは、基本的に矢印である。矢印の表示形式としては、①全体表示、②個別表示、③詳細表示の三種類がある。それぞれの例を図1-51、53、54に示す。全体表示は、すべての計算値を表示するものであり、図1-51では主応力の表示例を示した。個別表示は、計算値を複数のレベルに分けて表示した時に、ある特定のレベルのみを取り出して個別に表示するものである。図1-53では全体の計算値を7段階にレベル分けし、そのうち利用者が指定したレベルのみを表示した例を示している。詳細表示は、個別表示と同様にレベル分けした計算値のうち特定のレベルを更に詳細にレベル分けして表示するものであり、図1-54にその表示例を示す通りである。

④アニメーション表示機能

時刻歴にともない状態変化する事象のシミュレーションにより得られる計算値を動画により表示する機能であり、前記①②③の表示機能に対して動画表示することができる。図1-55にモデル図表示の場合の例を示すが、これは振動シミュレーションを行った時の時刻歴ごとの変形図を1コマごとに表示したものである。本表示機能の課題としては表示速度の問題が残っているが、ハードウェアの進歩により近い将来解決されるものと思われる。

⑤計算結果情報の編集機能

シミュレーションの計算結果情報の編集とその表示機能としては、①グラフ表示、②ダイヤグラム表示、③数値情報表示の三種類がある。その表示例をそれぞれ図1-56、57、58に示す。本機能はシミュレーションの結果、その出力として得られる膨大な数値データを利用者にわかりやすい計算機が編集及び整理するものである。これら三種類の機能は、単純な数値データの編集処理を行うものである。

3. 3. 2 等高線表示機能における色彩表示方法の課題

シェーディングによる等高線の作画における課題は、

①プレゼンテーション用としては、滑らかな輝度補間を行わなければならないこと

②物理量(シミュレーションの結果として得られた計算値として定義し、以後

これを用いる)の節点間における変化を、利用者に正しいイメージを与えるように補間する必要があること

③シェーディングにより物理量の分布状態などを表現する場合は、そのカラーパターンの提供方法をシミュレーションの目的や性格に合わせる必要があること

などがあげられる。(1)の課題については、滑らかな輝度補間は一般にハードウェアに依存して行われるので輝度補間方法や色彩テーブルを上手く利用することで解決を図る。しかし、滑らかな輝度補間を実現しても②の問題点である正しいイメージ補間の課題については、根本的な問題は残る。なぜならば、二つの異なる物理量間を現象に適したように補間しなければならないからである。しかしながら、シミュレーションの結果として二つの物理量間がどのように変化するかという情報は、正確にはシミュレーションにより計算しなければ得られない。現在のところ、それは現実的な手段がないので二つの物理量間を線形に補間するのが一般的である。例えば、図3-53の(a)に示す4角形の頂点に各々赤(R)と緑(G)を与えた時、その2点間のちょうど中間が物理量を視覚的に表わしている赤と緑の平均値にするしかないのである。そして、赤と緑の平均値は色彩学的には黄(Y)になる。一方、一般的な現状のハードウェアによる輝度補間は、その中間点において赤と緑の輝度を半減してしまうために図3-53の(b)に示すように黄でなくなる(どす黒い黄色っぽい色となる)。その極端な例を図3-53の(c)を用いて説明する。今、図3-53の(d)のような3角形ABCに各々赤緑青(RGB)を割り当てると、三角形の中心dにおける色は黒になってしまうのが現状である。これでは、ハードウェア的に1688万色の色彩表示を用いて一見の美しさを得ても、利用者に誤った認識を与えることになる。すなわち、物理量を色彩で置換して表示する手法で等高線表示を行うならば、図3-53の(e)のように例えば、赤から緑に滑らかに補間されなければならない。更に、異なる色間の補間方法をシミュレーションの性格に合わせて操作する必要がある。この分布状態の表現については、CG的な意味合いが非常に強い。例えば、シミュレーションの結果、製品形状が破壊するような応力値が算出されたなら、その危険度を利用者に知らせる色表示をするべきである。また、業界では一般的に引張り応力や低温を寒色で、圧縮応力や高温を暖色で表現する

(あるいは、その逆)、引張り応力しか現われないのなら暖色だけで、あるいは室温以下の温度だけが物理量として与えられた時は寒色だけで表示すべきである。ところが、現在の多くのシステムでは物理量を置換する色コードの全ての色を用いて表示している。そのため、利用者に一時的な混乱を与える場合が多々見受けられる。このことは、③の課題であるシェーディングするときの色パターンの提供方法をシミュレーションの目的や性格に合わせる必要があることを意味する。以下、これらの課題を解決する手段を述べる。

3. 3. 3 滑らかな補間とイメージ補間処理

3.1.2項の課題を解決する方法の一つとしては、物理量を置換する色の数を増やすことが考えられる。この方法で処理すると、物理量と色パターンの対応表が非常に大きくなってしまいますので、単純ではあるが操作性の面では著しく劣る。また、人間が一度に識別できる色の分解能を超える場合がありうる。もう一つの方法としては、色の補間式を与える方法である。内部的には、前述の方法と同様なカラーパターンをルックアップテーブルとして保持し、補間する際にそのテーブルの色を用いるのである。図3-70にその補間方法の説明図を示す。図3-70では、3角形の頂点に1-5-9というルックアップテーブルの内にある色が指定された時、辺I II IIIは各、1~5、5~9、9~1の色コードを割り当てることで補間している。この方法を用いると、利用者が要求する大ききの色パターンと物理量対応表をいつでも利用者に提供できるので操作性は高い。つまり、人間が認識できる色の違いには限界があり、滑らかな補間を実現すればするほど物理量の分布のイメージを利用者に提供するのには難しい。しかし、第二の方法のように代表的な色だけに對して、物理量の対応表を提供することでイメージを伝達することが可能になる。

3. 3. 4 物理量分布と色分布

一般的に物理量分布と色彩に置換する場合、多くて15色の異なった色を用いている。しかも、異なる色の間では、何の補間も行っていないので、島分けあるいはベルト分けされたような表示を行っている。また、その色はあらゆる物理量の分布に対して画一的に与えられているので、利用者に誤解を与える可能

性がある。例えば、さほど高温でもないのに高温を意味する色の分布を出現させたり、引張り応力しか出ていないのに15色全てで応力分布が色でられることがある。そのため、後者の例で言えば、あたかも圧縮応力が出現しているかの様なイメージを提供してしまうことが、しばしば見受けられる。そこで、物理量の分布に合わせて色分布を決定する方式を、等高線表示の機能のなかに取り入れた。これは、あらかじめ用意してある物理量色彩置換テーブル（ルックアップテーブルのことではない）の内から、物理量の統計的分布とシミュレーション時の基準値（例えば、静的解析時に応力値=0、温度解析時の基準温度等）をもとにして、置換する色を決定する方法である。つまり、標準値をmeanとして実際の物理量分布を求め、色で置換するのである。例えば、64色あるテーブルから、物理量分布がベルカーブで基準値を中心に広がっているとすれば、12色目を中心に連続する前後8色を抜き出して15色のテーブルで等高線表示するのである。更に、この色彩置換テーブルとして、ベルカーブ用、Skewnessカーブ用、Jカーブ用、Uカーブ用、Bimodalカーブ用、一様分布カーブ用の7種を用意して、物理量分布のfrequencyに合わせて基準となるテーブルを提供することで、より滑らかに利用者を説得しうる表現を可能としている。図3-71~73の検証例で、この補間方法の結果を示す。図3-71の①~④は、同一データを異なる色彩置換テーブルを用いて表現したものを示すが、①が正しくイメージを伝える表示である。図3-72と73にその他の表示例を示す。また、図3-74に振動解析した結果得られた最大応答応力を色彩補間して等高線表示した結果を画像出力し、更に本来のCG技法を取り入れて画像を作成したものである。画面上の文字とイラスト（ガソリン滴と微粒化ガソリン）は、後から画面上で手書き入力（CGペイント）で加えたものである。このような機能の拡張は、今後より密接にポストプロセッサと結合して技術文書や資料作成のために有効な手段となりうるものと考えられる。これらの出力結果が示すように、利用者にとって直感的で分かりやすく、数値の羅列データをイメージ処理してゆくCG技術は、今後のマンマシンインタフェースの主流をなすものと考えられる。

3. 4 解析事例と設計計算支援方法の検討

各種設計業務の実設計計算に本システムを用いることで、本システムの総合

的な評価と個別機能の評価を行った。図3-75に示した製品は、原子力から水力、火力、建設機械、自動車、家庭電機、OA、医療機械などの多岐に渡る製品分野の部品解析例の一部である。本システムの出力結果として、要素分割図や変形図、等高線図などを図3-76から87に示す。図3-76は、原子力発電プラント部品のPLR2次冷却ポンプケーシングである。解析の内容は、ケーシング内の冷却水路から伝導する熱の分布とそれともなう熱応力分布が設計基準を満足するかの検討である。図3-77は、110,000KWの水力発電用水車のケーシングである。要素分割は、対象性を考慮して上側半分のみで行った。解析の目的は安全性を確認するためで、その内容は開口部と渦巻き込み部の変形挙動と応力分布の調査である。図3-78と79は、洗濯機のモータギヤケーシング上部と下部である。これは、洗濯機のモータのシャフト変形からくるケーシングの変形挙動と許容応力に対する安全率を求めることを目的とした。図3-80は、同じく洗濯機の上蓋の強度解析を行ったものである。これは、製品のリップ設計のための解析で、板厚やリップ位置などの配置検討を行う過程の検討である。図3-81は、ワードプロセッサ用のフロピディスク（FD）ドライブユニットの部品で、FDを挿入するためのチャッキング機構部品の一つでコレットと呼ばれるものである。摩擦や接触に関する挙動や挿入力などの検討を行うことにより、その安定性を検討することを目的とした。図3-82は、電気掃除機の金型（メ型）のレジ注入部である。熱伝導により生じる変形精度を確認した。図3-83は、自動車のジュネレータ軸受け部の応力解析を行ったものである。図3-84は、超音波式アトマイザと呼ばれるガソリンの微粒化装置である。これは、自動車のキャブレタの内部に取り付け、燃料を微粒化することで燃焼効率を上げるための装置である。振動解析を行うことにより、製品の振動特性や応答応力などの他に利用環境の検討などを行った。図3-85は、精密機械部品の位置決め装置で、その変形挙動を検討したものである。図3-86は、建設機械の圧力センサである。センサの感知能力を検討した。図3-87は、翼長30inch、1600rpm、径(PCD)85.5inch、8枚仕様のタービンブレード内6枚について遠心力解析を行ったものである。ステー部及びブレード内部の応力分布を検討した。

以上のような実業務へ適用を行うことにより、統計的な結果として以下のようなことが知見として得られた。

①形状データの作成(サブストラクチャモデルまでの作成)から有限要素モデルの作成までは、平均で約13時間、最大44時間、最小2.5時間であった。

②解析モデルの作成は、平均で約2時間、最大6時間、最小0.5時間であった。これらの作業時間は、一つのモデル化あたりの作業時間である。

③シミュレーション結果の評価に関する作業時間は、計算結果の概略的な妥当性を検討したのに要した作業時間とした。それは、平均で約2時間、最大4時間、最小1時間であった。

④省力化の効果は、従来の手作業によるシミュレーション作業と比べると約1/6程度に削減された。しかしながら、従来の手作業ではできなかった複雑な3次元形状の解析などに関しては、定量的な評価はできない。一方、設計業務における解析作業の省力化効果としては、有限要素法を用いたシミュレーションによる解析業務の補間と実験結果のデータ間の補間により実験量の削減と実験パラメータの削減が行われた。この定量的な効果は業務や設計部署ごとに異なるが、全体の設計業務のうち解析業務のなかだけで見ると、そのうちの約1/6程度の時間が短縮できた。

⑤信頼性向上については、これらの解析業務を充実することにより製品の原価低減も行われているので、その分向上したと言える。更には、省力化効果により、その分多くのシミュレーションや実験が行えるようになった。これにより、安全性が重要な製品に関しては、より科学的な設計過程における検討や設計結果の評価が行われるようになり、その分信頼性は向上できたと思われる。

3.5 第3章のまとめ

機械系CAD/CAM/CAE一貫システムの構築のステップとして、工業生産工程のなかで幾何モデルと計算力学、特に有限要素法を用いたシミュレーションを、有機的に結ぶシステムを開発し、多くの形状設計と信頼性設計(強度や性能の評価と確認)を通じて適用とその評価をした。その結果、幾何モデルを中核としたCAD/CAM/CAE一貫システムの中で、形状設計から有限要素法を用いたシミュレーションに至る設計上の必須の手順がサポートできるようになった。本システムの成果をその特徴ごとにまとめると、以下に述べるような結果が得られた。

①自由曲面を含む任意の形状に対応できる守備範囲の広い要素分割アルゴリズムを構成することができた。

②サブストラクチャ自動探索機能の開発により、対話処理による要素分割領域を指示する煩雑さを大幅に軽減できた。

③サブストラクチャ方式によるコマンド体系により、有限要素モデルから解析モデルまでのモデル化作業に関する操作性の向上ができた。

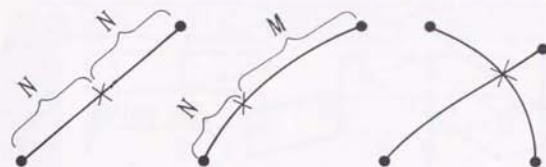
④有限要素分割手法において、統一的なアルゴリズムで不等分割と特殊分割を実現する手法を開発した。

⑤ポストプロセッサの機能として、利用者の直感的な評価を支援する機能群を開発した。具体的には、コンピュータグラフィックスを用いた色彩表示機能をはじめとする、シミュレーションの結果を可視化する機能群を構築した。

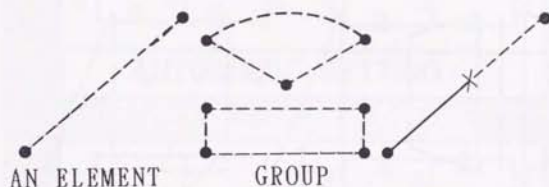
⑥本システムを実務に適用することでその有効性確認するとともに、設計計算業務の信頼性向上と省力化に貢献した。

Function to help defining substructure	Projection and defining surface projected
	Define blending edges
Function to search and recognize substructures	Search and recognize substructures
	Delete substructures
Function to check and test substructures	Check by Fitting
	Check division size
	Test generated mesh
Function to generate Finite Element Mesh	Set division size
	Automatic mesh generation
	Merge Finite Element Models

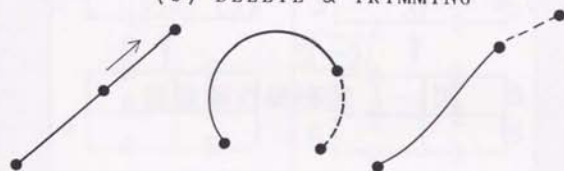
図3-1 サブストラクチャ機能群



(a) INTERSECTION

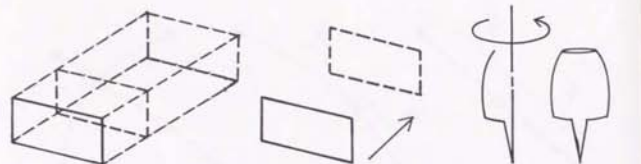


(b) DELETE & TRIMMING

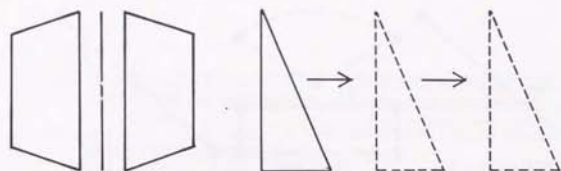


(c) EXTENTION

図3-2 図形編集機能群



(a) SWEEP (b) TRANSLATION (c) REVOLUTION



(d) MIRROR

(e) COPY

図3-3 図形操作機能群

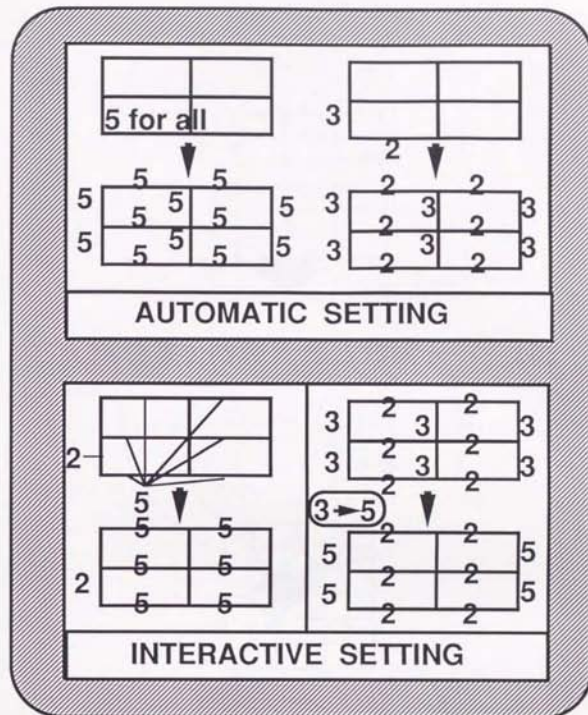


図3-4 サブストラクチャの
分割数設定機能

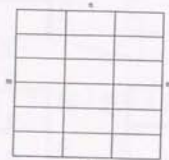


図3-5 分割数と要素分割 (等分割)

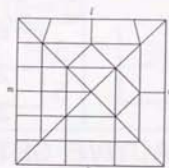


図3-6 分割数と要素分割 (不等分割)

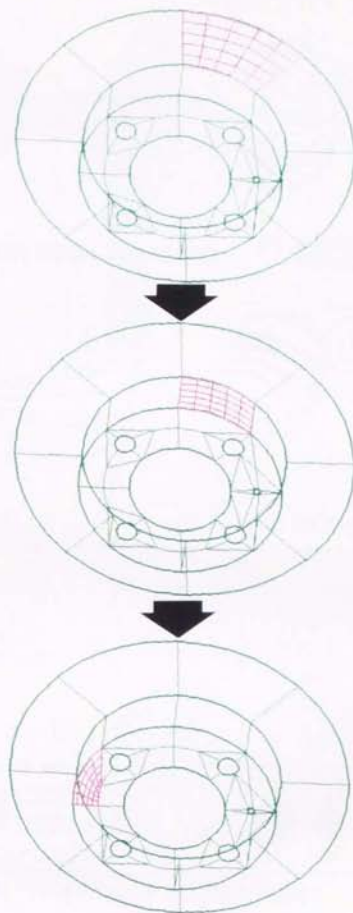
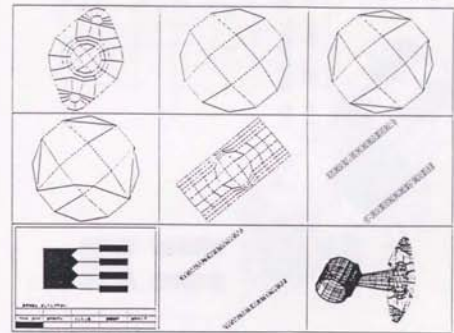
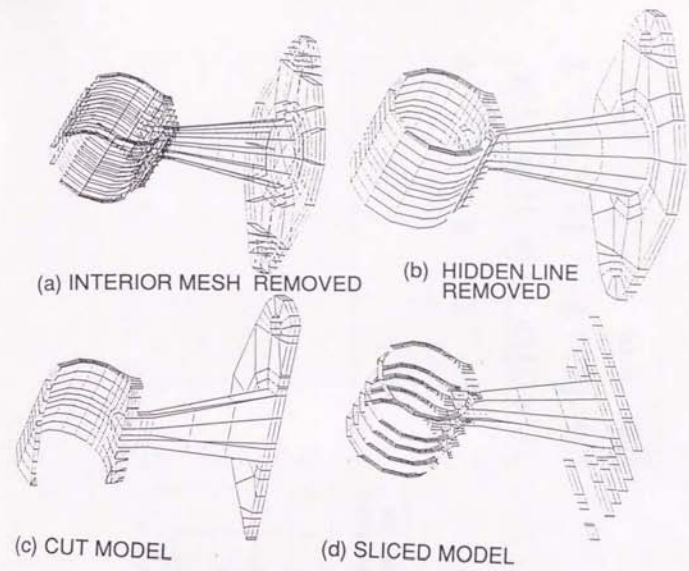


図3-7 要素分割の検査機能-1
(分割チェック)



(e) PROFILES OF SLICED MODEL

図3-8 要素分割の検査機能-2
(隠線消去と断面切断)

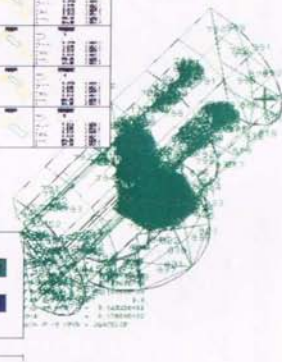
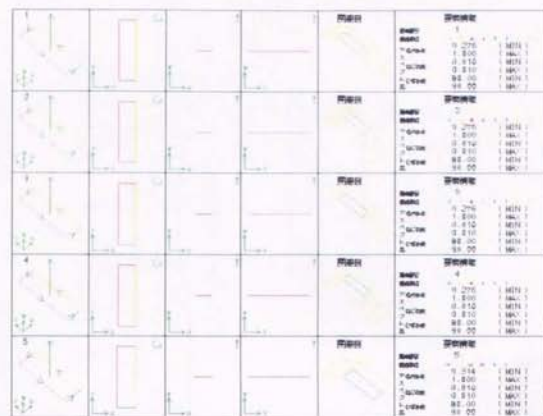
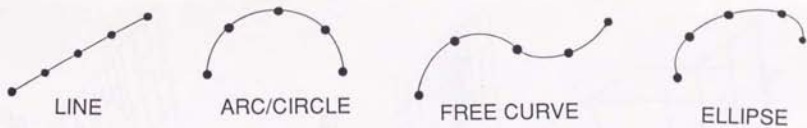


図3-9 要素分割の検査機能-3
(幾何学的検査)



(a) 1D SUBSTRUCTURE

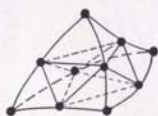


TRILATERAL

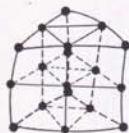


QUADRILATERAL

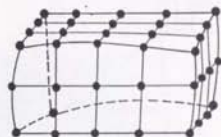
(b) 2D SUBSTRUCTURE



TETRAHEDRON



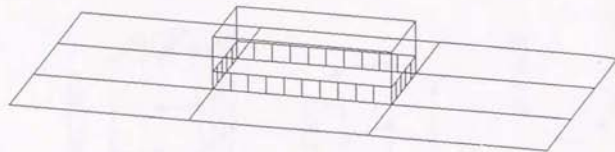
PENTAHEDRON



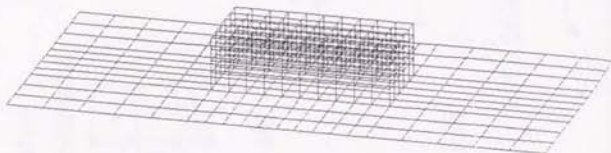
HEXAHEDRON

(c) 3D SUBSTRUCTURE

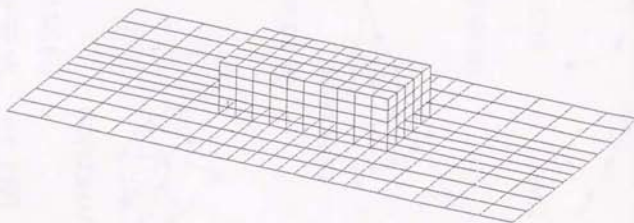
图3-10 次元別有限要素分割例



(a) SUBSTRUCTURE MODEL

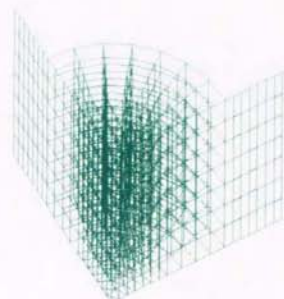
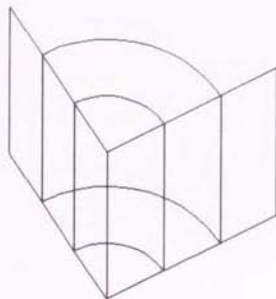


(b) FINITE ELEMENT MESH MODEL

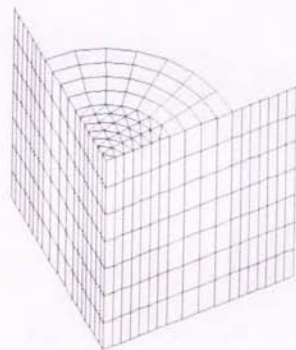


(c) FINITE ELEMENT MESH MODEL
(HIDDEN LINE REMOVED)

図3-11 1 / 2 / 3次元混在時の
一括有限要素分割機能

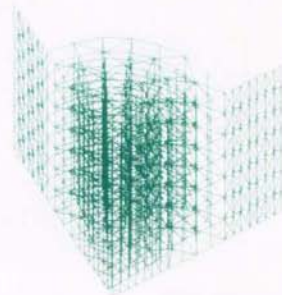
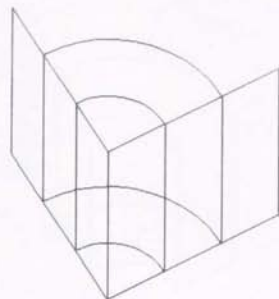


(a) SUBSTRUCTURE MODEL (b) FINITE ELEMENT MESH MODEL

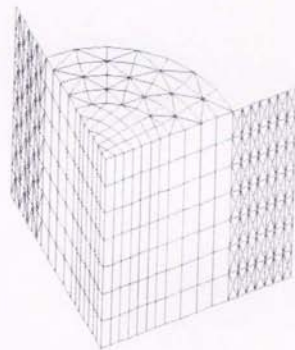


(c) FINITE ELEMENT MESH MODEL
(HIDDEN LINE REMOVED)

図3-12 等分割例

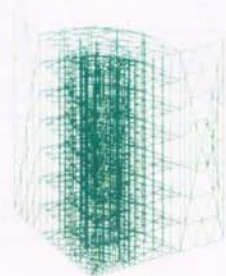
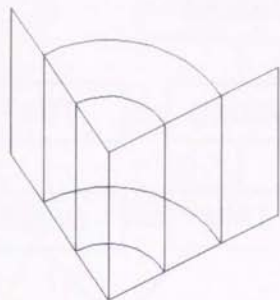


(a) SUBSTRUCTURE MODEL (b) FINITE ELEMENT MESH MODEL

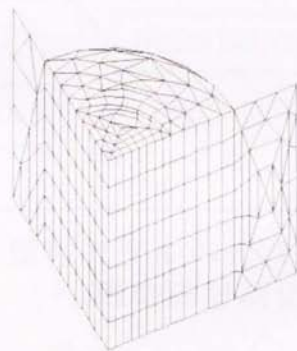


(c) FINITE ELEMENT MESH MODEL
(HIDDEN LINE REMOVED)

图3-13 特殊分割例



(a) SUBSTRUCTURE MODEL (b) FINITE ELEMENT MESH MODEL



(c) FINITE ELEMENT MESH MODEL
(HIDDEN LINE REMOVED)

图3-14 不等分割例

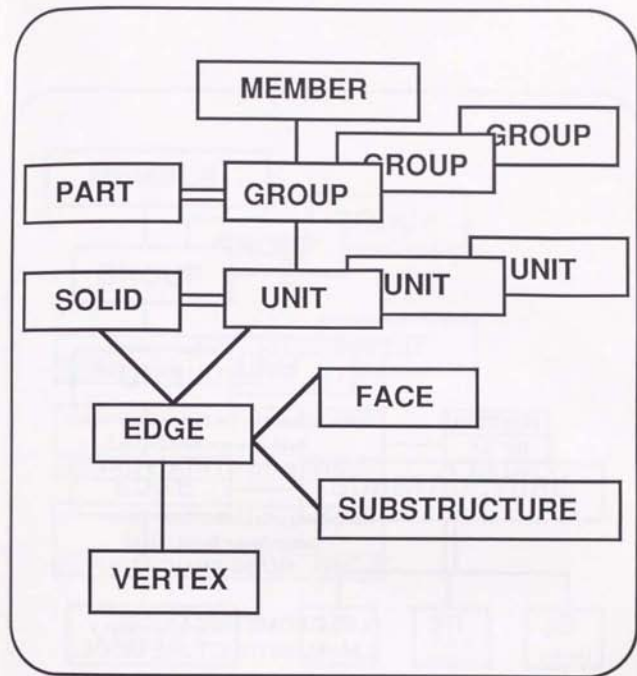
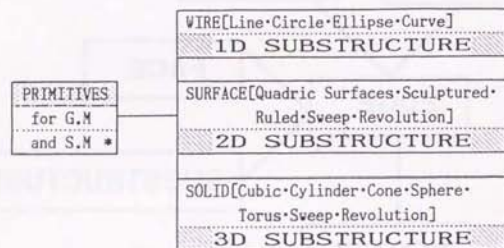


図3-15 幾何モデルの内部表現
(概略階層関係)



G.M=GEOMETRIC MODEL
S.M=SUBSTRUCTURE MODEL

図3-16 基本図形とサブストラクチャ

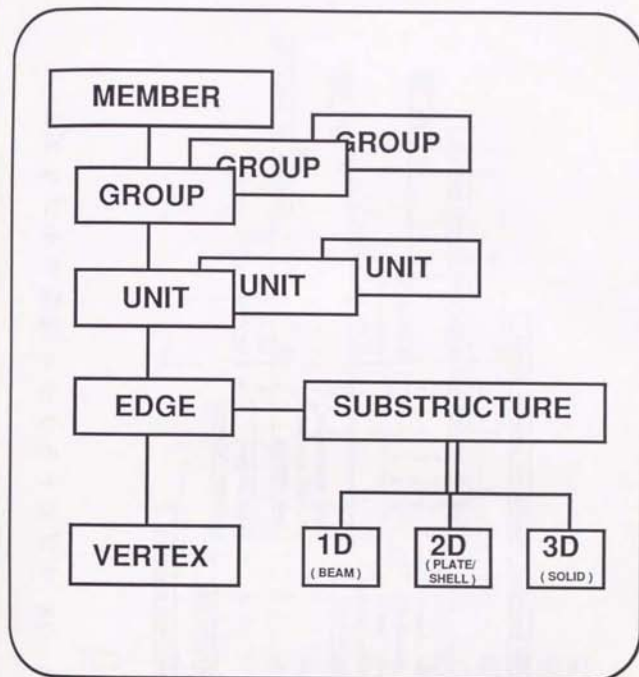


図3-17 サブストラクチャモデルの
内部表現 (概略階層関係)

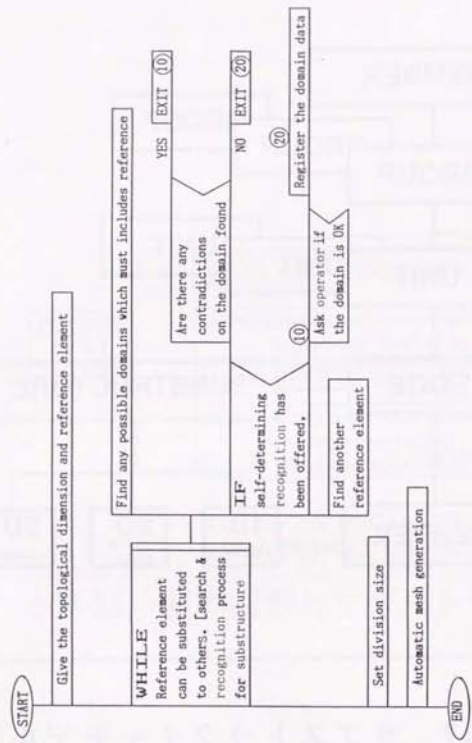


図3-18 サブストラクチャ探索アルゴリズム

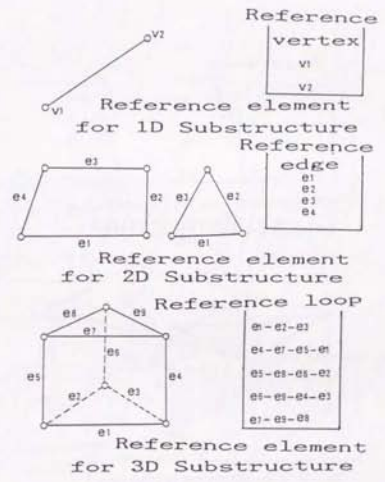


図3-19 サブストラクチャの基準図形

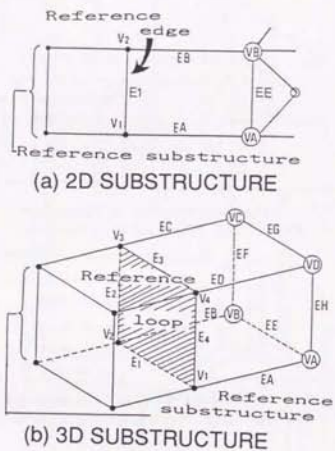


図3-20 基準図形からのサブストラクチャ探索

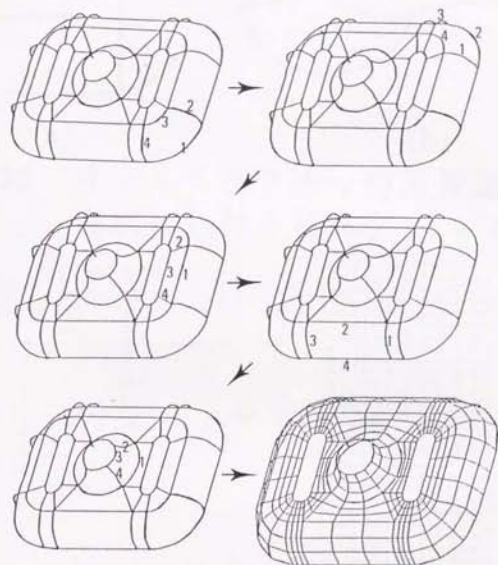
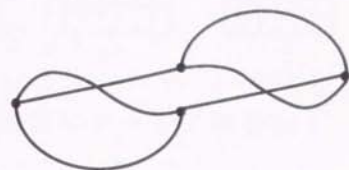


図3-21 2次元サブストラクチャの探索過程

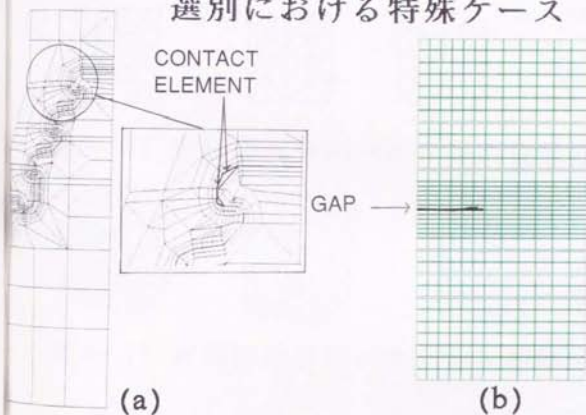


(a)



(b)

図3-22 サブストラクチャの重複認識と選別における特殊ケース (1)



(a)

(b)

図3-23 サブストラクチャの重複認識と選別における特殊ケース (2)

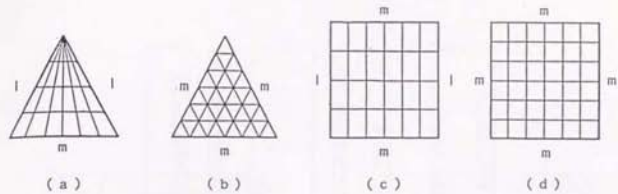


図3-24 有限要素分割パターン（等分割）

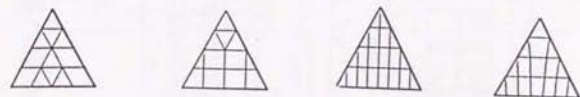


図3-25 有限要素分割パターン（特殊分割1）

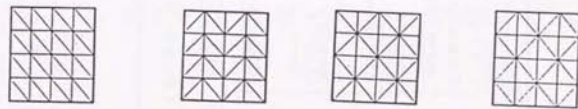


図3-26 有限要素分割パターン（特殊分割2）

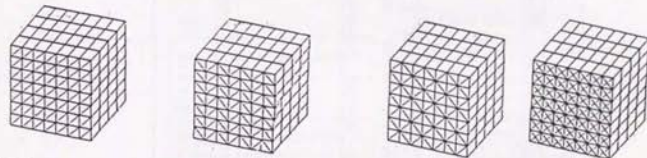


図3-27 有限要素分割パターン（特殊分割3）

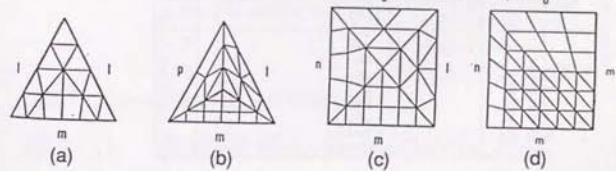


図3-28 有限要素分割パターン（不等分割）

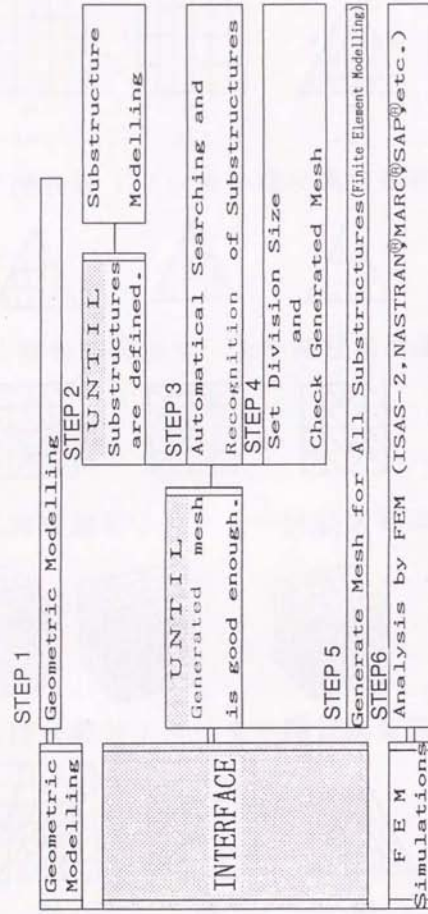


図3-29 サブストラクチャ方式の流れ図

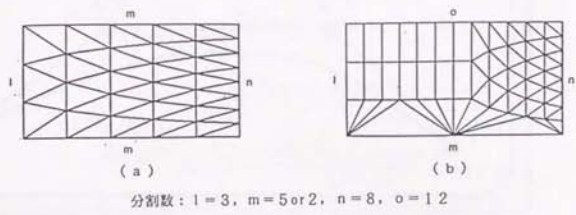
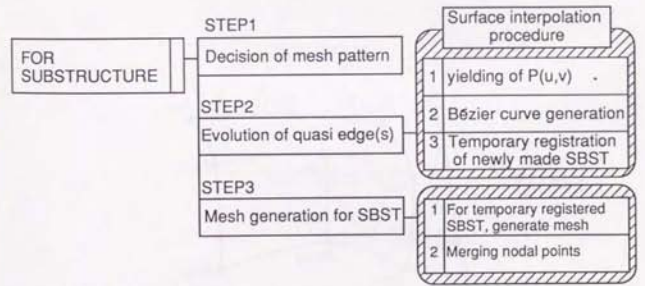


図3-30 現状の不等分割例



SBST : abbreviation of Substructure

図3-31 有限要素生成処理の流れ図

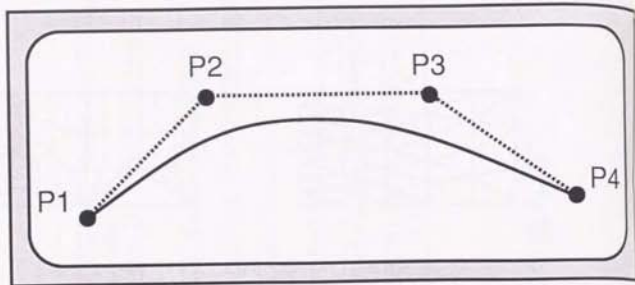


図3-32 BÉZIER曲線のセグメント

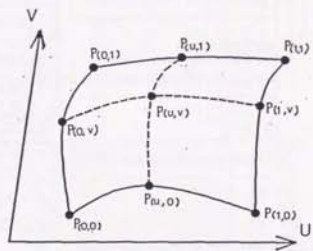


図3-33 曲面の補間

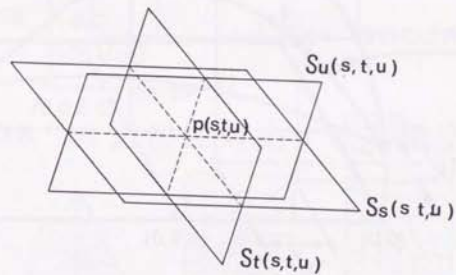
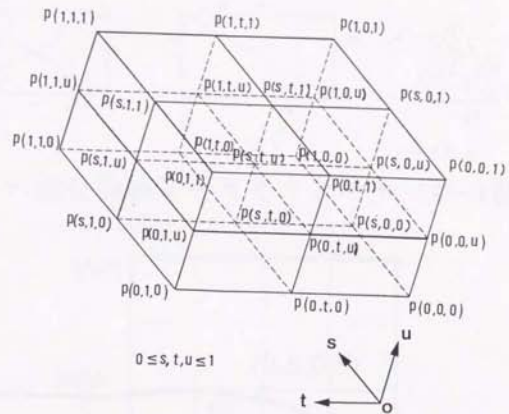


図3-34 立体の補間

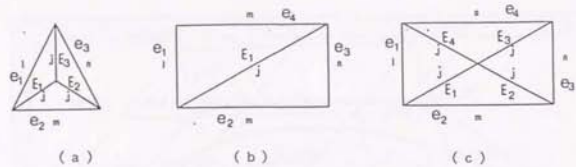


図3-35 サブストラクチャの細分割パターン

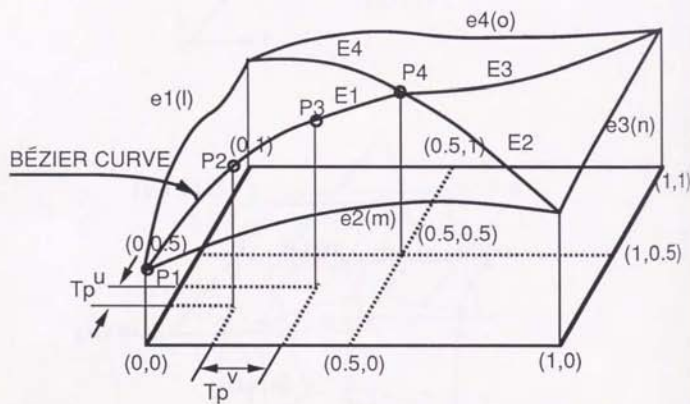


図3-36 仮想エッジの創成

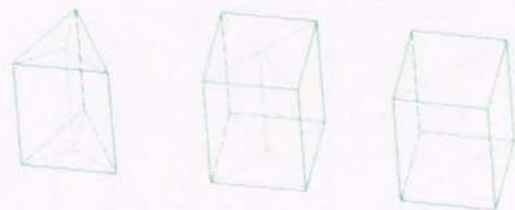


図3-37 3次元サブストラクチャの細分割パターン

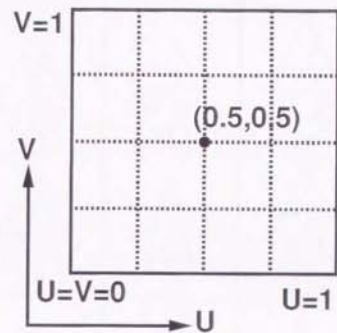


図3-38 4辺形に対応する写像空間

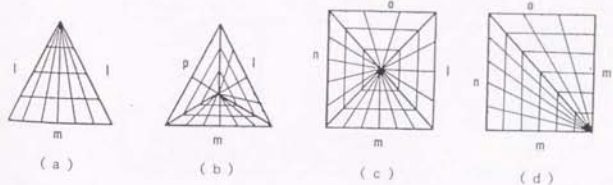


図3-39 等分割パターンによる不等分割 (不都合な例)

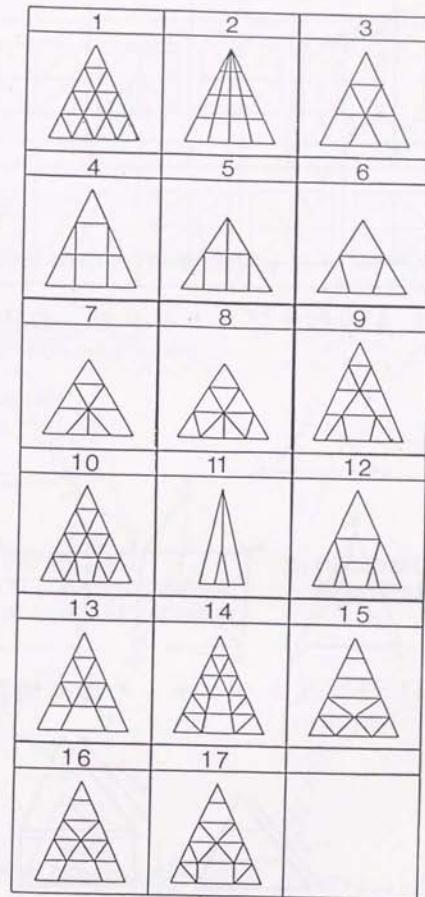


図3-40 3辺形サブストラクチャの特殊分割
パターン

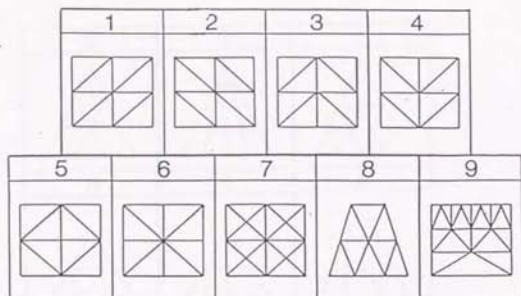


図3-41 4辺形サブストラクチャの特殊分割

パターン

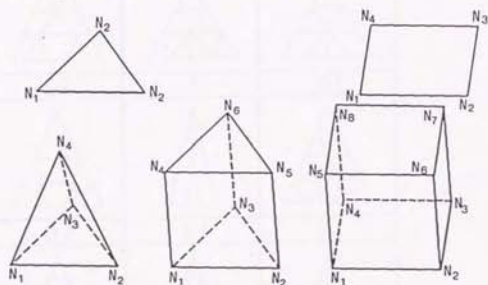


図3-42 サブストラクチャの幾何情報検査

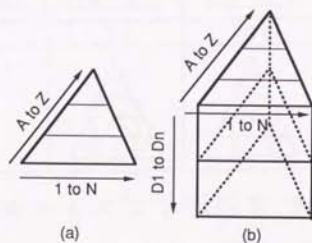
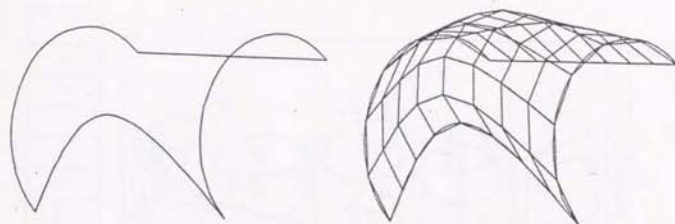
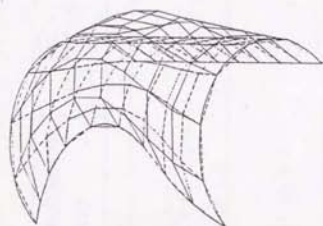


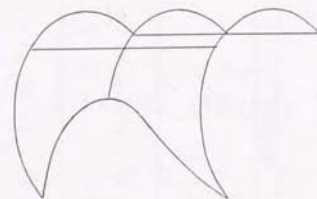
図3-43 特殊分割における節点の生成順序



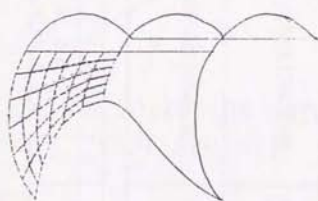
(a) CYLINDER WITH INTERSECTION (b) INTERPOLATION OF FREE FORMED SURFACE



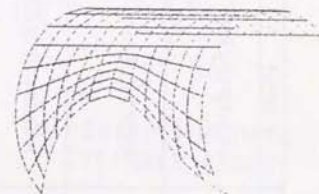
(c) FITTING METHOD (DOTTED LINE:CYLINDER, SOLID LINE:FREEFORMED)



(d) DECOMPOSITION OF SUBSTRUCTURE



(e) CHECK FOR GENERATED MESH



(f) FITTING METHOD(FINAL)

図3-44 節点座標値の補正処理

PROJECTION	ID	INPUT	OUTPUT	EXAMPLE
PLANE	1	POINT(P1,P2,P3)	(1, m, n)	
CYLINDER	2	ARC/CIRCLE(C1)	(x, y, z), (l, m, n), r	
CONE	3	ARC/CIRCLE(C1,C2)	(x, y, z), (l, m, n), θ	
SPHERE	4	ARC/CIRCLE(C1)	(x, y, z), r	
TORUS	5	ARC/CIRCLE(C1,C2)	(x, y, z), r1, r2	

DATA	ID	1	2	3	4	5
DATA 1	6	r	θ	r1	r2	
DATA 2	-	-	-	-	-	r2

DATA	DESCRIPTION	ID	DATA1	DATA2	x	y	z	l	m	n	r
------	-------------	----	-------	-------	---	---	---	---	---	---	---

図3-45 曲面の属性と投影

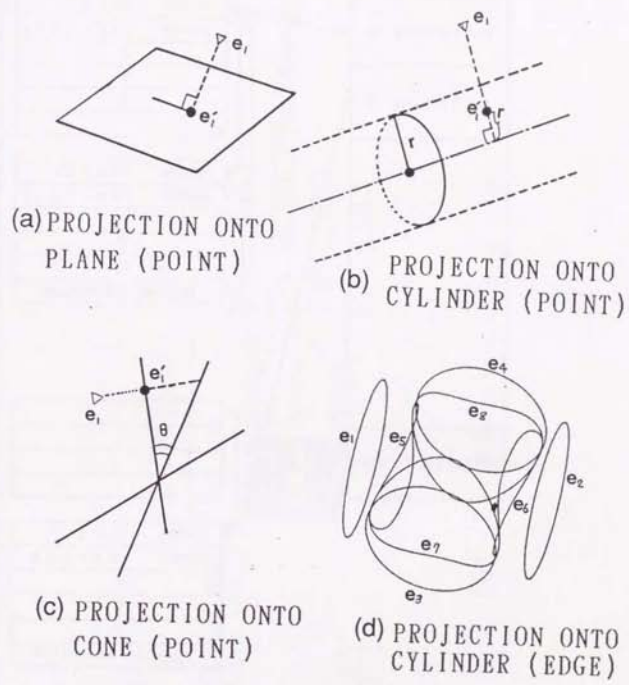


図3-46 曲面への節点座標値の投影方法

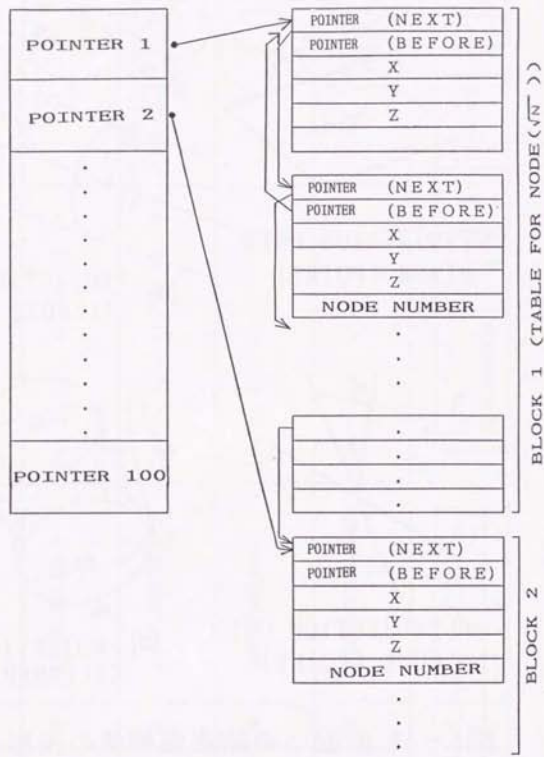


図3-47 節点番号決定テーブル

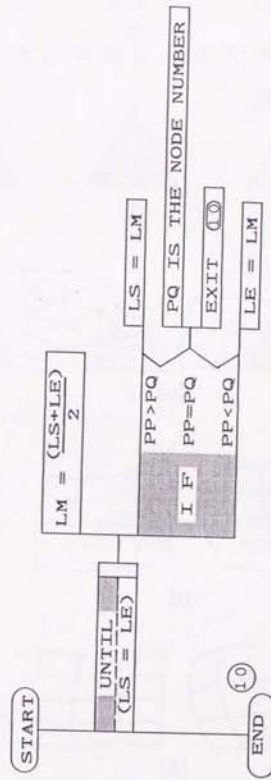


図3-48 対象ブロックのサーチ



図3-49 1次元サブストラクチャの要素分割
実験結果

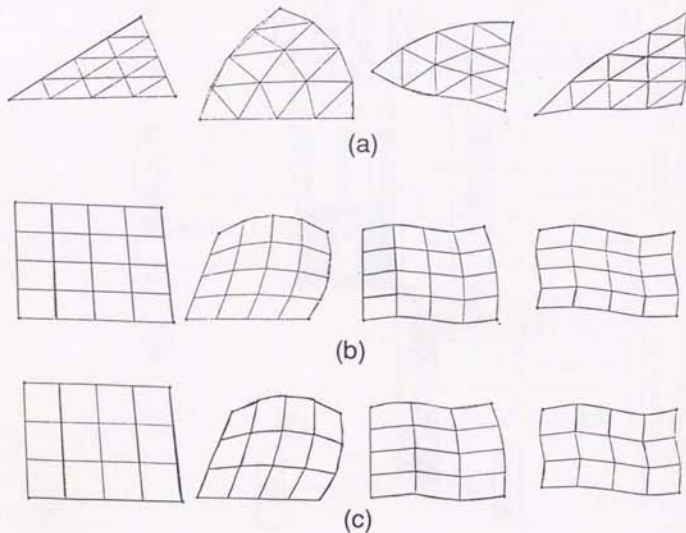


図3-50 2次元サブストラクチャの要素分割
実験結果-1

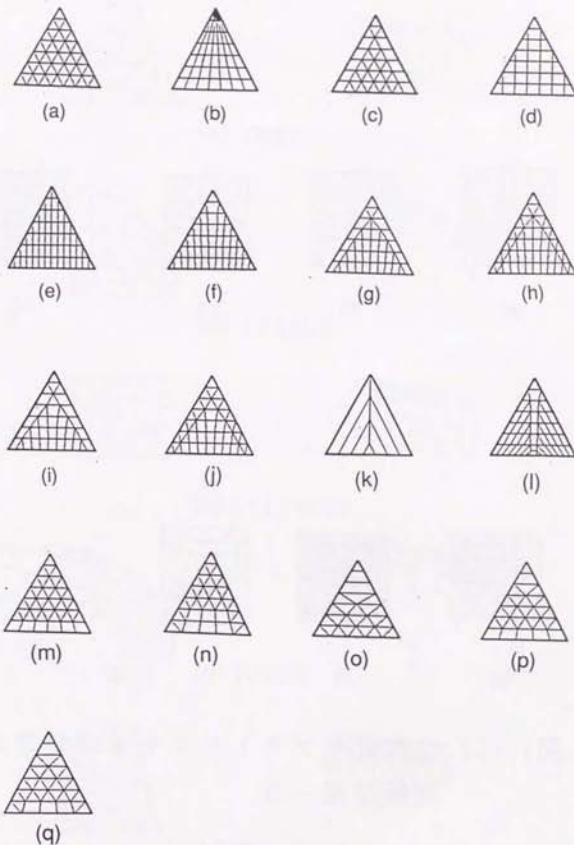
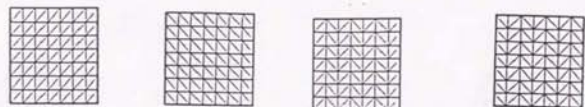


図3-51 2次元サブストラクチャの要素分割
実験結果-2

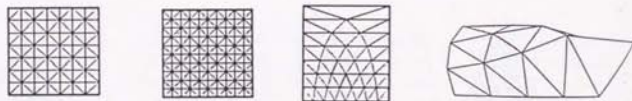


(a)

(b)

(c)

(d)



(e)

(f)

(g)

図3-52 2次元サブストラクチャの要素分割
実験結果-3



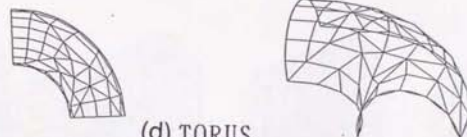
(a) CONE



(b) SPHERE



(c) CYLINDER

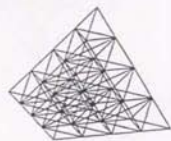


(d) TORUS



(e) FREE FORMED

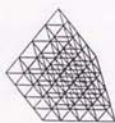
図3-53 2次元サブストラクチャの要素分割
実験結果-4



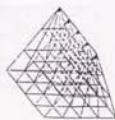
(a)



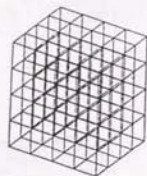
(b)



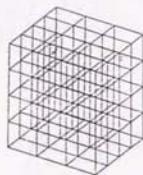
(c)



(d)

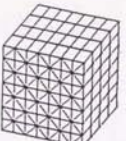
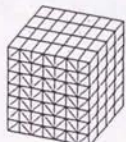
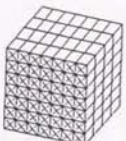
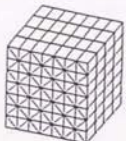
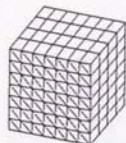
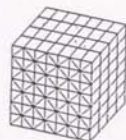
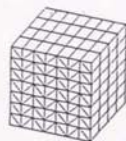
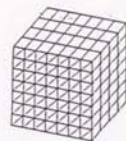


(e)

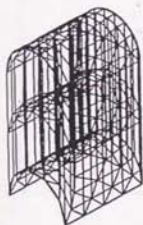


(f)

図3-54 3次元サブストラクチャの要素分割
実験結果-1

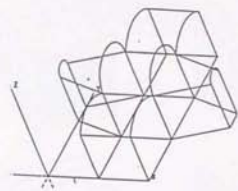


(a)

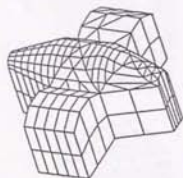


(b)

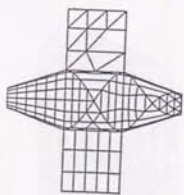
図3-55 3次元サブストラクチャの要素分割
実験結果-2



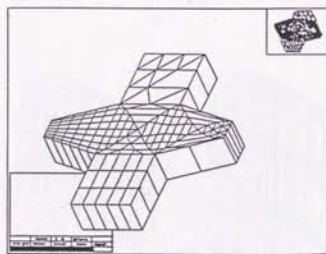
(a)



(b)



(c)



(d)

図3-56 3次元サブストラクチャの要素分割
実験結果-3

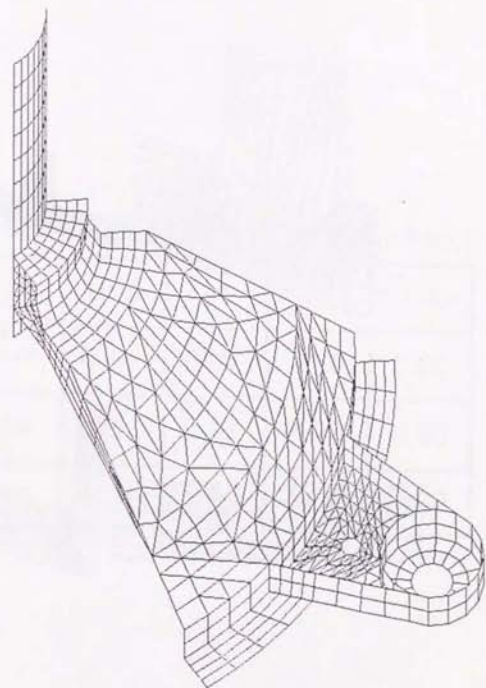


図3-57 2次元サブストラクチャで構成された
3次元構造物の要素分割実験

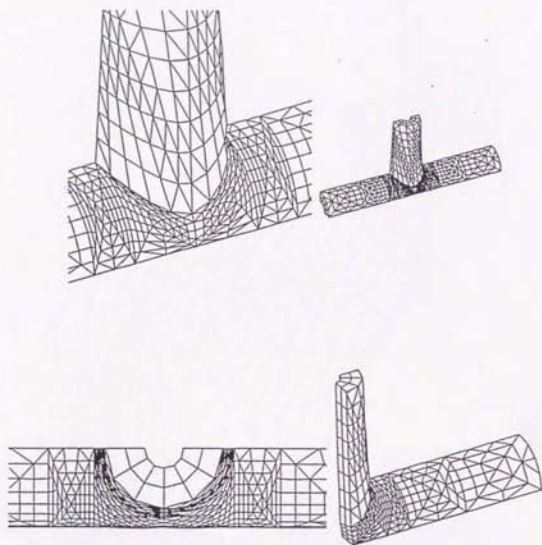


図3-58 3次元サブストラクチャで構成された
3次元構造物の要素分割実験

表3-1要素分割処理時間 [10⁻³SEC]

COMPONENT DIMENSION	LINE	ARC	FREE CURVE	ELLIPSE
1D SUBSTRUCTURE	0.15	0.21	1.50	2.00
2D SUBSTRUCTURE	0.2	0.27	1.90	2.50
3D SUBSTRUCTURE	1.13	1.13	5.90	7.00

(CPU:HITAC M-200H)



(a) PRESENTATION OF MODEL



(b) DEFORMED MODEL



(c) OVERLAPPING

図3-59 モデル図表示機能

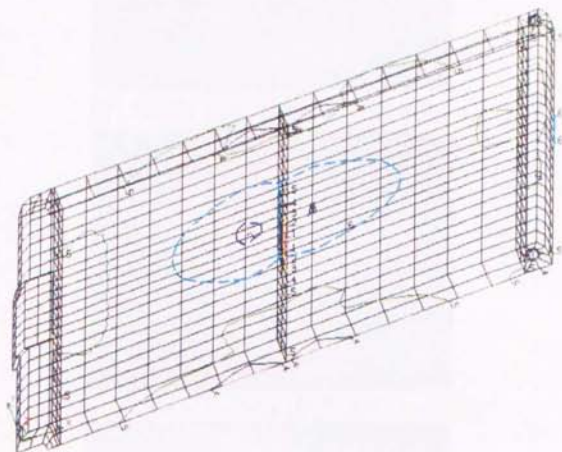
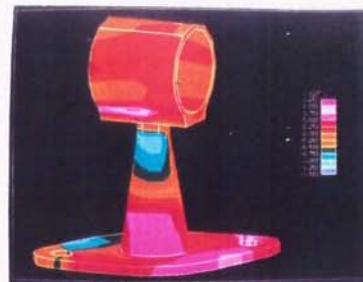
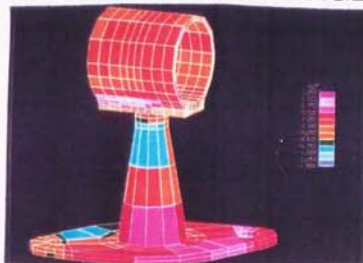


图3-60 等高线表示机能—线表示



(a) CONTOUR LINE IMAGE



(b) TILING IMAGE



(c) TESSELLATED IMAGE
BY DECOMPOSITION

図3-61 等高線表示機能(シェーディング表示)

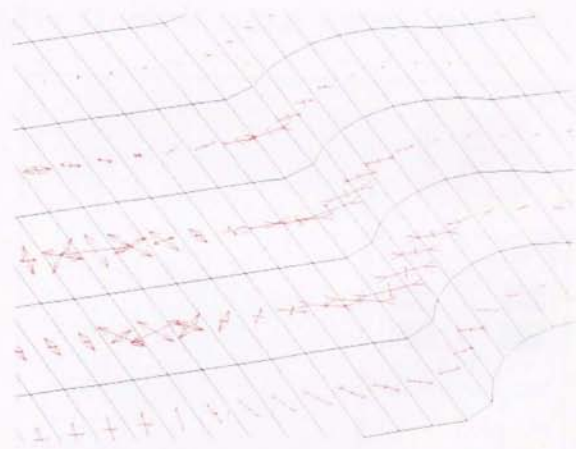
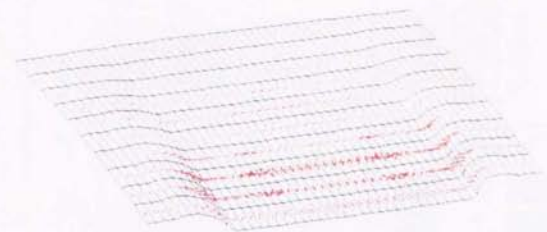


図3-62 テンソル図表示機能（全体表示）

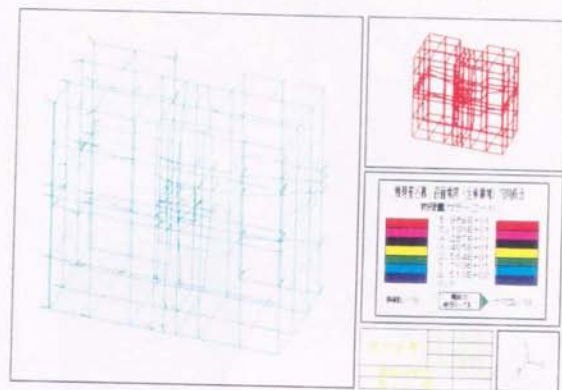


図3-63 ベクトル図表示機能（個別表示）

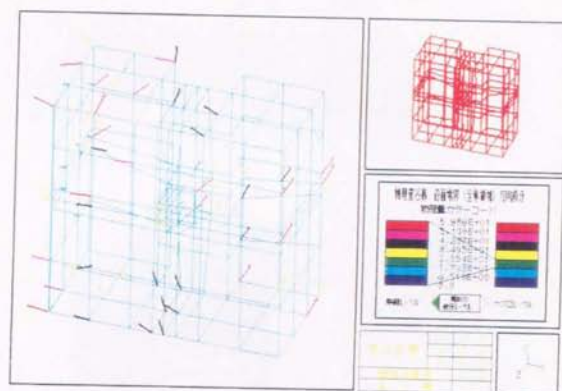


図3-64 ベクトル図表示機能（詳細表示）

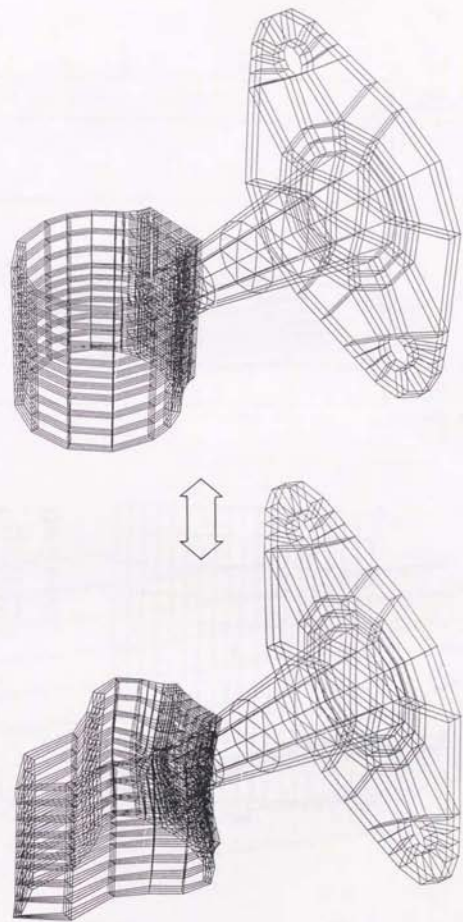


図3-65 アニメーション表示機能

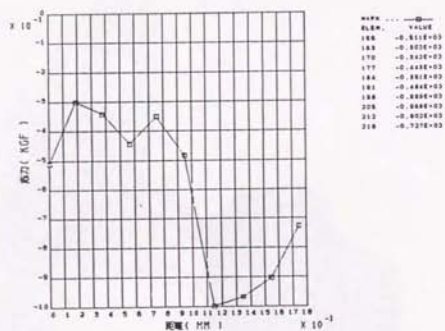
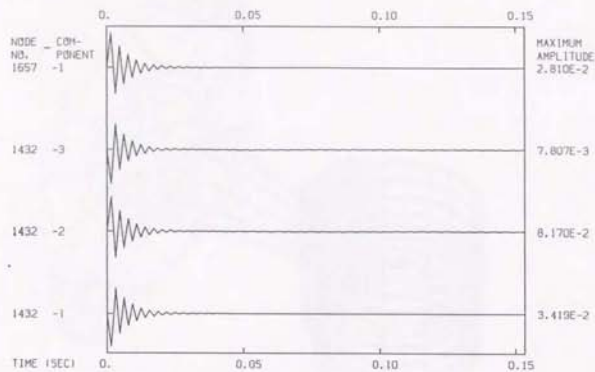


図3-66 グラフ表示機能

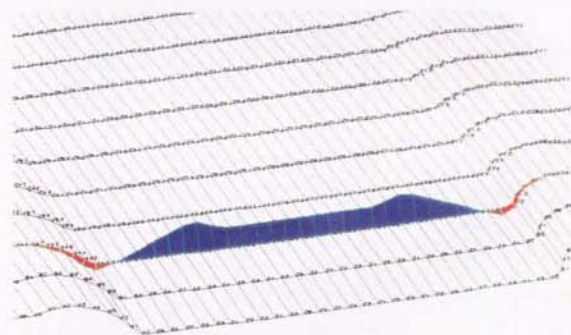
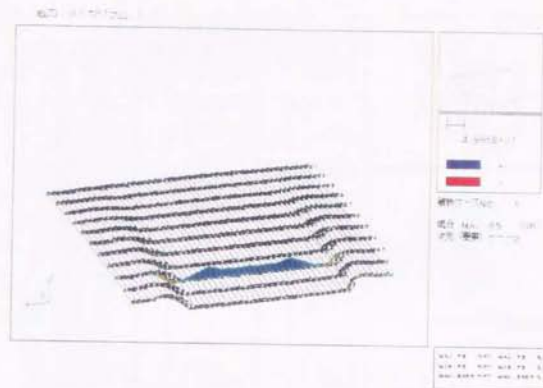
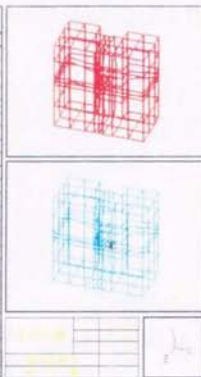


図3-67 ダイアグラム表示機能

任意断面物価検索一覧表

品名	単位	品目番号	標準価格	標準価格	標準価格
1. 小麦 1等	kg	1001	100	100	100
2. 小麦 2等	kg	1002	90	90	90
3. 小麦 3等	kg	1003	80	80	80
4. 小麦 4等	kg	1004	70	70	70
5. 小麦 5等	kg	1005	60	60	60
6. 小麦 6等	kg	1006	50	50	50
7. 小麦 7等	kg	1007	40	40	40
8. 小麦 8等	kg	1008	30	30	30
9. 小麦 9等	kg	1009	20	20	20
10. 小麦 10等	kg	1010	10	10	10
11. 小麦 11等	kg	1011	5	5	5
12. 小麦 12等	kg	1012	2	2	2
13. 小麦 13等	kg	1013	1	1	1
14. 小麦 14等	kg	1014	0.5	0.5	0.5
15. 小麦 15等	kg	1015	0.2	0.2	0.2
16. 小麦 16等	kg	1016	0.1	0.1	0.1
17. 小麦 17等	kg	1017	0.05	0.05	0.05
18. 小麦 18等	kg	1018	0.02	0.02	0.02
19. 小麦 19等	kg	1019	0.01	0.01	0.01
20. 小麦 20等	kg	1020	0.005	0.005	0.005
21. 小麦 21等	kg	1021	0.002	0.002	0.002
22. 小麦 22等	kg	1022	0.001	0.001	0.001



各物理量の最小・最大値一覧表

品名	単位	品目番号	標準価格	標準価格	標準価格
1. 小麦 1等	kg	1001	100	100	100
2. 小麦 2等	kg	1002	90	90	90
3. 小麦 3等	kg	1003	80	80	80
4. 小麦 4等	kg	1004	70	70	70
5. 小麦 5等	kg	1005	60	60	60
6. 小麦 6等	kg	1006	50	50	50
7. 小麦 7等	kg	1007	40	40	40
8. 小麦 8等	kg	1008	30	30	30
9. 小麦 9等	kg	1009	20	20	20
10. 小麦 10等	kg	1010	10	10	10
11. 小麦 11等	kg	1011	5	5	5
12. 小麦 12等	kg	1012	2	2	2
13. 小麦 13等	kg	1013	1	1	1
14. 小麦 14等	kg	1014	0.5	0.5	0.5
15. 小麦 15等	kg	1015	0.2	0.2	0.2
16. 小麦 16等	kg	1016	0.1	0.1	0.1
17. 小麦 17等	kg	1017	0.05	0.05	0.05
18. 小麦 18等	kg	1018	0.02	0.02	0.02
19. 小麦 19等	kg	1019	0.01	0.01	0.01
20. 小麦 20等	kg	1020	0.005	0.005	0.005
21. 小麦 21等	kg	1021	0.002	0.002	0.002
22. 小麦 22等	kg	1022	0.001	0.001	0.001

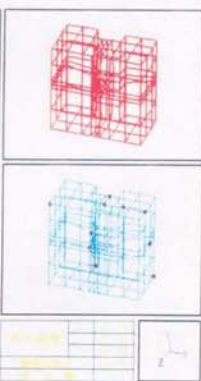
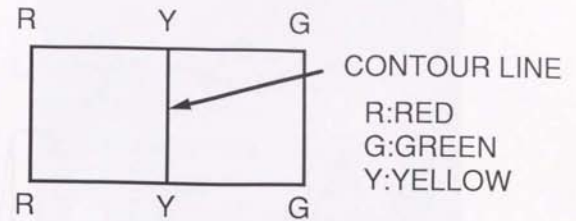
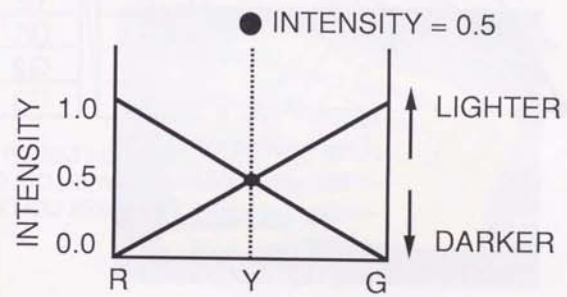


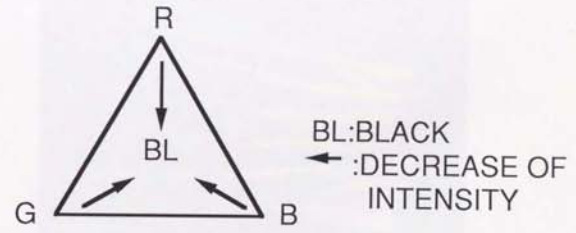
図3-68 数值情報表示機能



(a)

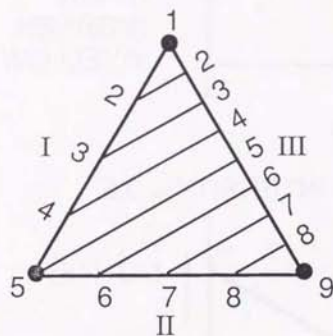


(b)



(c)

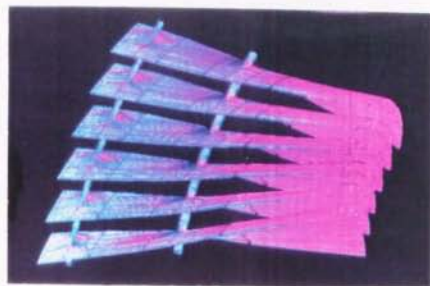
図3-69 物理量の補間と色の補間



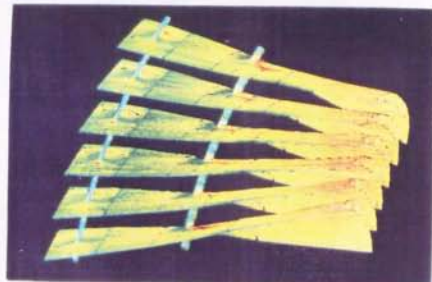
LOOK-UP TABLE	COLOR BAR CODE
1 A	R1
2 B	R2
3 C	R3
4 D	Y1
5 E	Y2
6 F	G1
7 G	G2
8 H	G3
9	

R1-3:REDDISH COLOR
 Y1-2:YELLOWISH COLOR
 G1-3:GREENISH COLOR

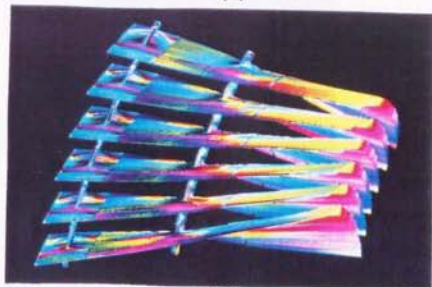
図3-70 イメージ補間



(i)



(ii)



(iii)

図3-71 滑らかなイメージ補間処理の検証例
 (タービンブレード)



図3-72 滑らかなイメージ補間処理の検証例
(超音波式アトマイザ)

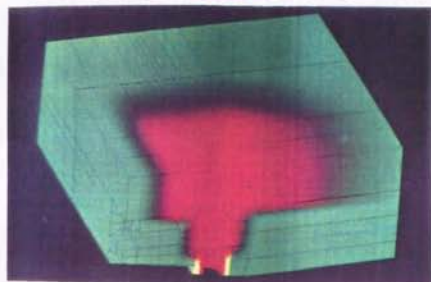
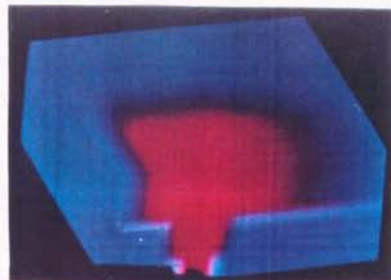


図3-73 滑らかなイメージ補間処理の検証例
(掃除機金型)

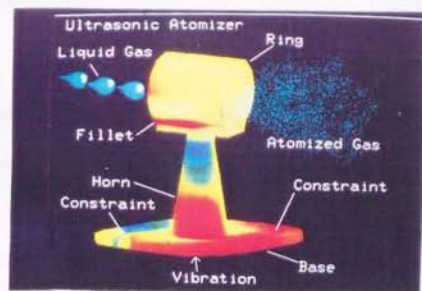


図3-74 CG技法によるプレゼンテーション



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



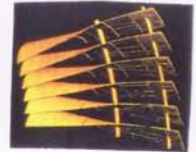
(i)



(j)



(k)



(l)

図3-75 実業務への適用例一覧

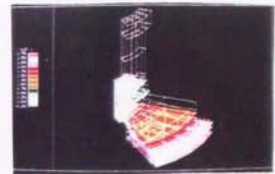
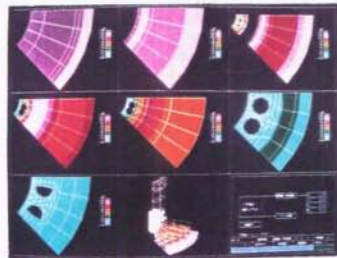
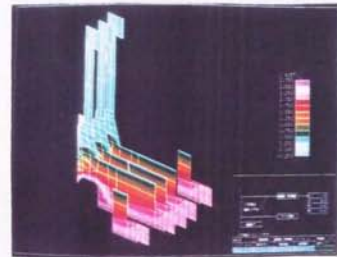
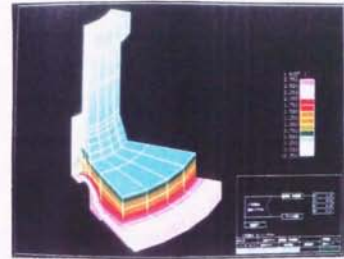
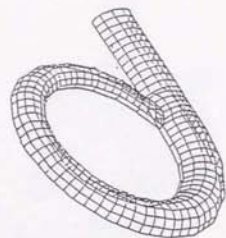
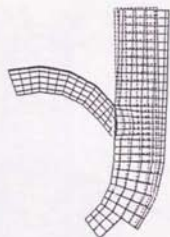


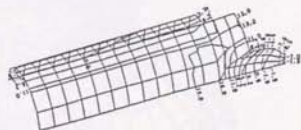
図3-76 PLR 2次冷却ポンプ



要素分割図

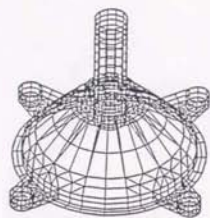


変形図

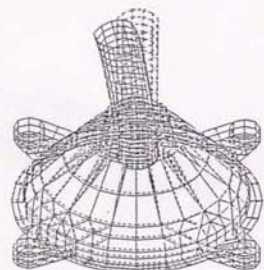


応力分布図

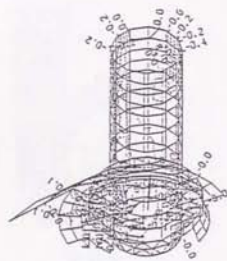
図3-77 水車ケーシング



要素分割図

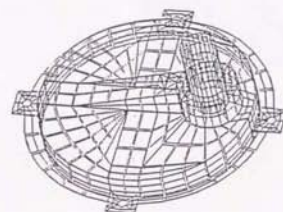


変形図

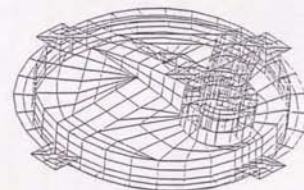


応力分布図

図3-78 洗濯機モータケーシング上部

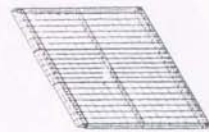


要素分割図



変形図

図3-79 洗濯機モータケーシング下部



要剖分割图

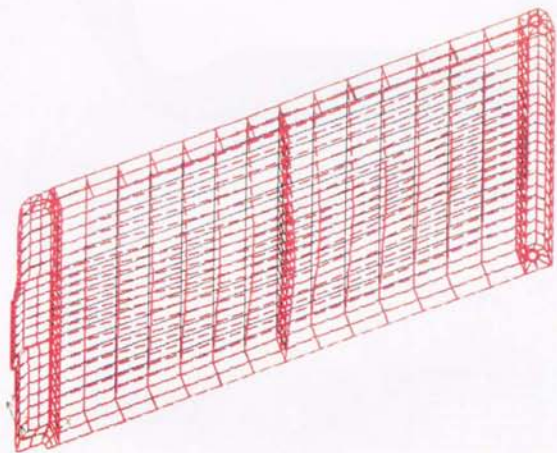
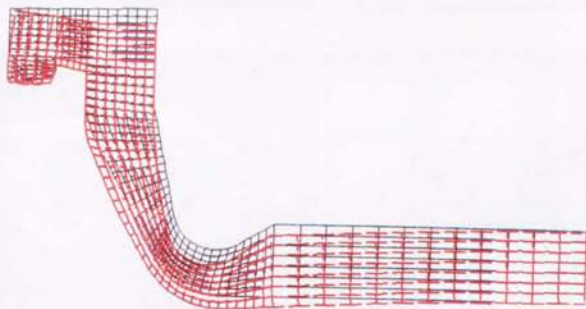
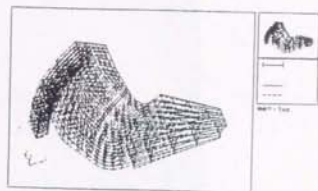
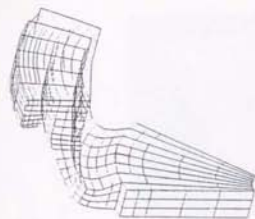


图3-80 洗濯機上蓋



☒3-81 フロッピーディスクドライブ
チャック

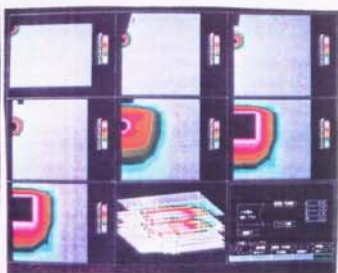
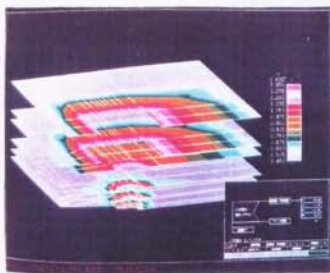
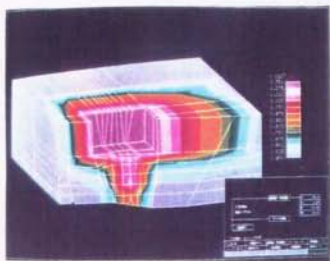
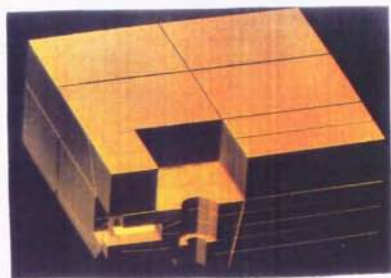
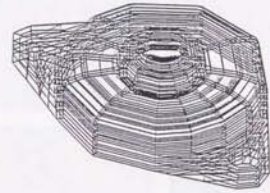
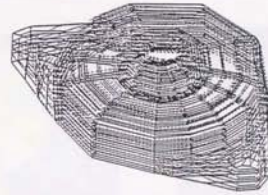


図3-82 電気掃除機金型(×型)



要部分割図



変形図

図3-83 ジェネレータ軸受ケーシング

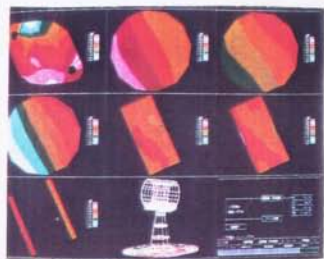
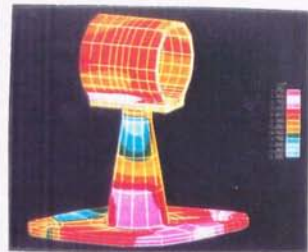
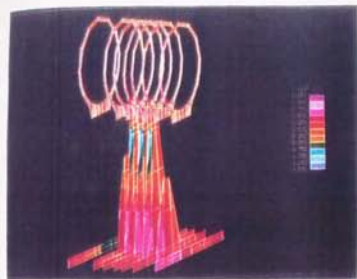
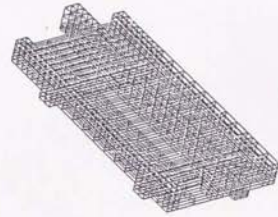
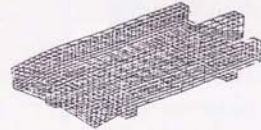


図3-84 超音波式アトマイザ



要素分割図



変形図



応力分布図

図3-85 位置決め装置Y軸テーブル

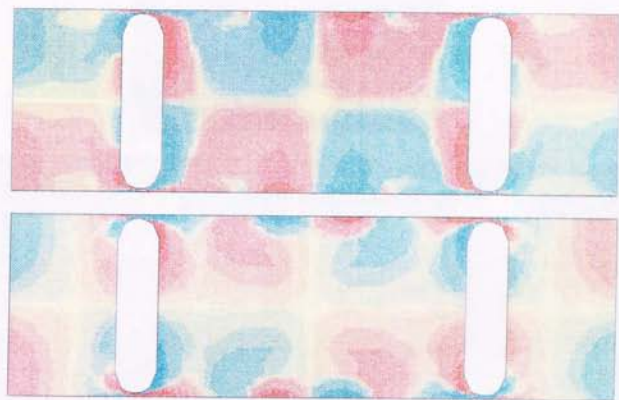
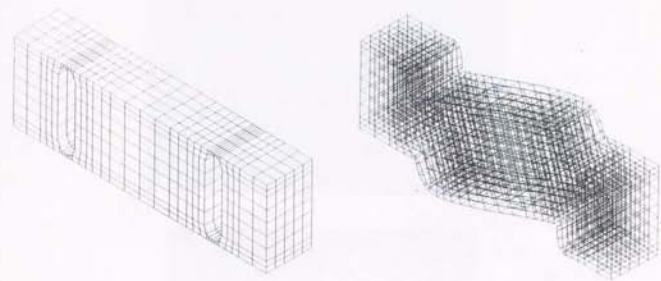


図3-86 圧力センサ

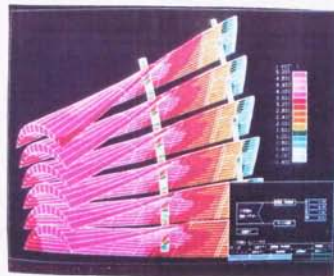
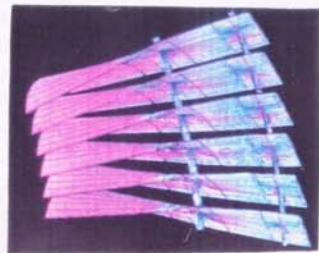
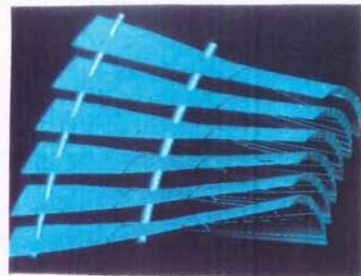


図3-87 タービンブレード

第4章 設計計算モデルを中核とした 設計計算支援技術

第4章では、第2章で述べた幾何モデルを中核とした設計計算支援方式を更に発展させ、プロダクトモデル[165]やフィーチャベースドモデル[167][173]の考え方をCAEの世界に持ち込んだモデルを中核とした設計計算支援方式について論じる。本論では、プロダクトモデルやフィーチャベースドモデルなどのような設計情報を含むモデルを、幾何モデルと区別して設計モデルと呼ぶことにする。また、設計モデルの考え方をCAEの世界に限定したものを設計計算モデルと呼ぶことにする。本節で述べるCAEシステムはこの設計計算モデルを導入することと空間分割方式による全自動要素分割手法により、計算力学の活用範囲を有限要素法から、境界要素法、差分法まで広げるとともにシミュレーションプログラムの入力データを作成する作業の自動化を基本的に可能とするものである。すなわち、この設計計算モデルを中核とした設計計算支援方式は、有限要素法を用いたシミュレーション支援システムだけにCAEシステムを専用化するのではなく、設計計算業務のニーズに応じたCAEシステムの実現を可能とする。有限要素法を用いたシミュレーションだけを支援するシステムでは、一般に有限要素法が得意とする無限領域の流体場や亀裂など特異点を持つ応力場などをシミュレーションするニーズに十分答えられない。有限要素法が得意とするこれらの問題は、逆に境界要素法や差分法が有効な手法だと考えられている。このようなニーズに応じるためには、境界要素法や差分法に関しても構造解析支援システムと同様な支援システムが必要となる。また、シミュレーション方式の拡充に対するニーズとともに、各種シミュレーションを汎用的に支援する道具を利用したいという設計者のニーズも重要と考える。しかし、従来のような有限要素法や境界要素法、あるいは差分法を用いたシミュレーションを専用的に支援するシステムでは、これらを汎用的に支援するのは無理がある。そこで、例えば幾何情報に属性情報を与える方式で見られるように[41][171]、有限要素モデルなどに個別に属性情報を与えるのではなく、データやモデルの概念を上位に引き上げることで、各種シミュレーションのための汎用的なモデルを構築する手法の確立が重要となる。この考え方は、設計業務を一

質して支援していこうと考えるCADによる設計作業の一貫化支援方式やCIMの考え方に相通じるものがある。また、有限要素法や境界要素法及び差分法を用いたシミュレーションを汎用的に支援するためには、要素分割方法もそれぞれの手法に適応できるものでなければならない。これらのニーズを実現するための要素技術を列挙すると、以下の四点にまとめられる。

- ①属性情報と幾何情報などの異種データの組み合わせモデル
 - ②幾何モデルの全自動要素分割と再分割
 - ③計算力学手法を用いたシミュレーションプログラムとの汎用的なデータインタフェース
 - ④計算機と利用者との対話部分における汎用的な対話インタフェース
- 本章では、このうち特に①と②について述べる。そして③と④については、第5章で述べることにする。

4. 1 設計計算モデルを中核とした設計計算支援システム

4. 1. 1 統合形シミュレーション支援システムによる設計計算支援構想

本項では、CAEシステムの今後の展開として単に設計計算業務の省力化だけに留めず、CAD/CAMとの関係による設計業務全般の機械化を指向した取り組みの考え方について触れる。現在までのCAD/CAM/CAEの応用は広範囲に展開しつつあるものの、それらが主として目標とするところは形状の設計や加工情報の作成などであった。しかし、CAD/CAM/CAEによる設計作業全般の機械化が本来目標とするところは、形状設計だけでなく加工や組立て手順の方案作成、性能や機能に関する評価なども含む設計活動全般を計算機を用いて支援することである。この目標を達成することは、現在までの幾何モデルを製品全体の統合モデルとしてとらえてきたシステムによる支援方法では難しく、幾何モデルの情報に加えて機能属性、結合属性、動作属性などを持つ、より広範で統合的なモデルが必要となってくる。このようなレベルのシステムの中でCAEシステムが機能するためには、単にシミュレーションを3章で示したように有機的に活用できる環境を構築しただけでは不十分である。また、設計活動全般のなかでCAEシステムが有機的な役割を果たすためには、シミュレーションの利用環境を現状よりも単純化する必要がある。例えば、設計者がCADで図面化した製

品対象を、シミュレーションのためのモデル化をすることなしにそのまま解析できるようにする環境である。そのためには、統合モデルが持つ属性情報を有効に活用する方式などの確立が重要となる。図4-1に、この統合モデルを持つCADシステムの概略と、CAEシステムとなる統合形シミュレーション支援システムの位置づけを示す。統合形シミュレーション支援システムは、幾何モデルを中核とした設計計算支援方法を発展させ、幾何情報に加えて前述の設計情報を有するモデルを中核として設計計算支援の機械化を達成しようとするものである。このモデルを本論では設計モデルと呼んでいるが、概念的にはプロダクトモデルやフィーチャベースドモデルとはほぼ同等のものであり、設計対象となっている製品に関する種々の設計に係わる情報を幾何モデルと連係させたものと定義する。また、この設計モデルの部分集合として、設計計算モデルを定義する。設計計算モデルは、計算力学の利用に限って必要な設計情報だけを幾何モデルと連係させたものである。ここで設計情報と言うと非常に広範な意味とデータがあるので、本論で取り扱う範囲の情報、すなわち設計情報の部分集合を特に製品情報と呼ぶことにする。設計計算モデルを用いる目的の一つは、解析対象の形状定義以後の複雑なモデル化作業を自動化することにある。複雑なモデル化作業とは、要素分割の粗密付けやシミュレーションのために必要となる境界条件の設定などである。設計計算モデルを用いて、複雑なモデル化作業の自動化を実現しようとするのは、以下に述べるような理由による。過去、モデル化作業の効率的な支援方法開発の手始めとして、3章で述べた幾何モデルを中核とするCAD/CAM/CAE一貫システムのなかで構造解析支援システムを設計計算の補助手段として構築した。これにより、シミュレーション作業の効率化はある程度実現できた。しかしながら、計算力学を用いた設計計算業務の効率化を考えると、幾何モデルを統合モデルとしたシステムによる支援方法では利用上の限界があると思われる。その利用上の具体的な課題や問題としては、例えば次のようなものがあげられる。それらは、要素分割における粗密付けの課題や節点や要素数の制御の問題、更にはシミュレーションの繰り返し作業のなかでの要素分割や境界条件などの変更や修正の課題などである。そして、これらの課題や問題の基本的な原因の一つは、CAEシステムにおいて核となるモデルが幾何や位相だけの情報しかもたない幾何モデルであり、CAEのモデルと

しての情報が十分でないからである。このことは従来のCAD/CAM/CAEにおける支援方式が、幾何モデルを中心に考えていたことに起因している。従来の支援方式では形状データを設計情報の共通データと考えていたために、その他の局所的な設計情報、例えばCAMにおける加工情報やCAEにおける解析情報などは幾何モデルから分離されていた。そのために、CAEではプリプロセッサというサブシステムを用意し、設計における局所情報として解析情報を入力する方式を採用していた。しかしながら、現在では計算機能力もその記憶容量も大きく発展してきており、すべての設計情報を共通データとするまでにはいかないものの、CAEに対象を限定すればこれらの情報を分離して持つ必要性は計算環境例からは問題ない。また、設計情報は3章で述べたエンジニアリングデータベース、ISBFにデータベース化されていれば、CAE専用のモデル化を局所的に行ったとしてもCAD/CAM/CAE一貫システムの枠組みのなかで問題はないと思われる。そこで、本来結合してモデル化されるべきこれらの情報を上位の概念として取り上げ、設計計算モデルとして定義することにした。

システムとしての実現方法は、CAD/CAM/CAE一貫システムの考え方を発展させ、設計作業に密着したより使い易いCAEシステムの実現を図る。その第1レベルとして、設計業務のうち設計計算支援を行うことを対象とし、計算力学手法に基づくCAEのための統合形CAEシミュレーション支援システムを開発することとした。本システムは、シミュレーションのうち特に構造強度や流れなどの設計計算を効率的に支援する道具である。本システムの当面の目標は、設計案の確認を容易に実現し得ることであり、決して設計案を算出しようというものではない。例えば、設計者が助で決めた部品配置における特性確認や評価、及び経験的に決めた肉厚の安全性確認や評価などを効率良く支援することができればとあえず充分であると考えている。以下、設計計算モデルを中核とした設計計算支援方式とこの方式を基本とした設計計算支援システムの要素技術について述べる。

4. 1. 2 設計計算モデルを中核とした設計計算支援方式

第3章で述べてきた従来の構造解析支援システムなどに代表される設計計算支援方式は、解析対象を形状情報と解析情報に分離し、それぞれ独立に考えて

シミュレーションプログラムの入力データを生成する方式をとってきた。その入力作業は図4-2の従来方式に示すように三つの作業過程、①形状入力、②要素分割、③シミュレーションのための問題定義(境界条件などの入力データの作成)、に分けられている。そのため、入力データの作成作業が複雑となる問題があった。また、作業過程②や③では特に設計作業とは別次元の作業が多く、取り扱うデータ量も膨大で多くの労力を費やさなければならなかった。その理由のひとつとして、従来の設計計算支援方式を支える基礎技術である要素分割技術が弱いために、利用者の操作が複雑となることがあげられる。ここで現状の要素分割の自動化技術の課題を列挙してみると、

- ①複雑な形状に対応できるようにすること
 - ②要素の形が歪まないようにすること
 - ③要素数や節点数がむやみに増大することなく、適当な数に制御できるようにすること
 - ④要素分割の修正や変更を容易にすること
 - ⑤シミュレーション精度を制御できる分割(粗密付け分割)を実現すること
- などがある。現在までのところ、この要素分割の手間を軽減し自動化する試みはあるが、上記の課題に対して十分な対応ができていないと言いはる。また、現状の実務では多くの対話処理に頼らなければ上記の課題を克服するような要素分割はできず、そのための作業量は膨大なものとなっている。この対話処理における代表的な操作としては、
- ⑥対象形状を部分領域に分ける操作
 - ⑦分割数の設定による要素数や節点数の調整及び要素分割の粗密付け操作
 - ⑧局所的な図形編集や図形操作などによる要素形状の調整や修正操作
- などである。

上記課題のうち①～④の課題は、主に図形処理技術が弱いことに起因している。その第一の原因は、形状の特徴を把握することが技術的に困難だからである。言い換えると、位相と幾何情報から形状の特徴を把握することは、基本的に不可能である。また、上記⑤の粗密付けの作業は、従来自動処理ができなかったため、これまで人手で処理されてきたものである。すなわち、一般的に利用者が解析情報を意識しながら要素分割の粗密付けを行うことで要求するシ

ミュレーション精度に合わせてきた。それは、粗密付けを行うのに解析情報などが必要であるにもかかわらず、従来の要素分割方法が対象形状の図形情報だけを処理対象としてきたからである。

今回開発した設計計算支援方式では、これらの課題を次に述べるような方法で解決することにした。上記①～⑥課題のうち要素分割方法における図形処理に関する課題は、元来形状表現方法の一つである4分木および8分木表現方法とB reps表現による幾何モデルとを組み合わせて解決する。これは4分木あるいは8分木構造をもった正方格子を用いて形状の定義されている空間を表現し、区分的に形状の広がり把握する方法で対処することにした。更に、その階層木構造を利用して正方格子の大きさを可変に制御することにより、局所的な形状の広がり把握だけでなく粗密付け処理にも利用することにした。しかしながら、粗密付けの課題は、図形情報だけでは解決できない。そこで、この課題を解決するために解析情報も利用することにした。つまり、解析情報が基本的には設計情報の部分集合である点に着目して、活用できる設計情報を有効利用することとする。ここで、4分木あるいは8分木構造をもった正方格子を用いて形状や空間を表現する方法を要素分割処理に応用する利点を列挙する。その利点としては、

- ① 正方格子あるいは立方格子を基本図形としているために、
 - ① 有限要素法、境界要素法、差分法に共通な要素分割が実現できる。
 - ② 4辺形や立方体という位相情報が保持できるため、4辺形要素や6面体要素を容易に生成できること
 - ③ 要素寸法を調整しやすく、要素分割をある程度規則的にできること
 - ④ 節点や要素の数を規定できること
- ② 階層木構造のデータ構造を基本としているために、形状の表現精度の制御が可能であり、
 - ① 階層を操作することにより要素分割の粗密を付けることができること
 - ② 形状の省略による抽象化を行うことができること
- ③ 階層木構造のデータ構造を持っていることから、これを抽象階層構造に見立てて、
 - ① 要素分割の粗密付けを動的に行うことができること

④ 処理や操作の履歴を保存あるいは再生することができること

⑤ 解析情報のデータ継承が上位の階層と下位の階層で行うことができることなどがあげられる。ここで、要素分割処理において解析情報も同時に扱うこととなれば、図4-2で行われていたようなシミュレーションプログラムの入力データ作成作業、すなわち境界条件などを節点や要素に付加する対話処理をも自動化が可能となりうる。この考え方を基本にすると、設計計算モデルを中核とする設計計算支援方式が確立できる。本方式において重要な役割を果たす要素自動分割方法の特長としては、以下に述べる事柄があげられる。それらは、設計計算モデルの財産と4分木および8分木表現方法がもともと持っている性質に基づくものであり、

- ① 形状の表現精度が制御できるので、シミュレーションのためのモデル化として形状の省略などが行えること
- ② 4分木および8分木のデータ構造と設計計算モデルの設計情報を利用することにより、要素分割の粗密付けが自動的に行えること
- ③ このデータ構造を利用することにより、処理あるいは操作の履歴を保存したり再生することができ、設計情報の保存や付加が容易となること
- ④ 有限要素法、境界要素法、差分法に共通な処理で要素分割できることなどである。

これらの考え方をういた設計計算支援方式の考え方を図4-3に示す。図4-3の設計計算モデルとは、図形情報と構造関係情報及び製品情報を持つものであり、要素分割処理を行うときの対象データとなる。このモデルの詳細については4.2節で述べることにするが、その概略構造は図4-4のようになっている。図4-4の①は、幾何モデルのデータ構造を概略的に示したものである。図4-4の②で示す製品情報とは、解析業務に必要と考えられるデータの集合である。なお、幾何モデルデータの項目に付された数字は、この項目に関係付けられる製品情報の番号である。製品情報としては、環境情報、材料情報、機能特性、形状特性の四つを考えた。環境情報とは、シミュレーションの場を与えるデータで例えば応力場であるとか、その製品の利用環境温度などのデータである。材料情報は、その製品に用いられる材料の物性値である。機能特性情報は、幾何や位相データだけでは表現できない形状の役割を表すデータで、例えばねじ

穴であるとかリブなどの機能を表現するものである。形状特性情報は、設計者の意図や指示を表すデータで、例えばデザイン上重要な線であるとか滑らかさに関する指示などのデータを表すものである。図4-4の(a)ではこれらの製品情報と幾何モデルのデータとの関係付けを示しているが、これらの製品情報は幾何モデルのデータ概念に沿って幾何モデルに従属的に関係付けられている。なお、ここで示す幾何モデルの概略データ構造は、一般的なものである。幾何モデルでは部品の集合が製品を表し、部品は立体や面、線、点などから構成される。また部分構造は、面や面と等価な部分領域からなる図形の集合である。部分構造や部分領域は、形状を表現するために便宜的に立体や面などの役割や材料などの違いを表現する時に用いる。この幾何モデルのデータ階層概念に従い環境情報や材料情報、機能特性などのデータは、部分構造や立体図形より大きい単位のデータとして関係付けた。逆に、形状特性などの詳細な製品情報は、面や部分領域などより下位のデータと関係付けた。ここで、機能特性だけが全体のデータと関係付けてあるのは、形状入力における図形表現の抽象化を考慮したからである。例えば、円筒(差の立体)をねじ穴と定義したり、その断面である円(穴面または線)をねじ穴と定義する必要があることを考慮したからである。図4-3における方式では、この設計計算モデルを用いて処理の自動化を行う。図4-3において対話処理の対象となっているのは、この設計計算モデルの定義とシミュレーション結果の評価の部分だけで、要素分割や解析情報の付加は自動的に行われる。設計計算モデルをシミュレーションプログラムの入力データに情報変換する処理手段としては、4分木および8分木表現を用いた全自動要素分割手段と設計情報の情報翻訳手段を用いて行う。これらの手段は、設計計算モデルの情報を有効活用することで作業を自動化し、設計業務における解析作業を単純化するものである。本方式における自動処理手順を概略的に述べると次のようになる。まず設計者が定義した設計計算モデルを計算機内で自動的に要素分割する。次に、製品情報を翻訳してシミュレーションプログラムの入力データに置換し、要素分割情報と関係付けを行い、シミュレーションプログラムの入力データとする。変換後、シミュレーションプログラムを自動的に実行させることでシミュレーション作業が設計計算モデルから直接的に行えるようになる。しかしながら、すべての作業が自動化できるとは限ら

ないので、実用のためのシステム設計という観点から自動処理に対話介入できる手段を補助的に用意することにした。

4. 1. 3 システムの基本設計

今一度繰り返すと従来のCAEシステムのアプローチは、シミュレーションを主体に考えてきたと考えられる。それは、シミュレーションプログラムをメインプロセッサと呼び、その前処理プログラムである入力データ作成機能群をプリプロセッサ、後処理プログラムとして出力データの図形処理による可視化機能群をポストプロセッサと呼ぶ事が一般的になっていることから明らかである。つまり、シミュレーションをするためにモデルを作成するという考え方を基本にしてCAEシステムが成り立っていた。しかしながら、設計業務においてはあくまでシミュレーションそのものをすることが第1の目的ではなく、設計者が作成したモデルすなわち設計案に対して評価や最適設計案の算出ができればよいのである。そして、その評価や最適設計案の算出を支援してくれる道具がシミュレーションプログラムである。そこで本研究では、シミュレーションプログラムは設計計算支援技術のなかで利用可能な要素技術の一つとして扱っていくことにする。そして、統合形CAEシミュレーション支援システムは、製品設計をするためにモデルを作成し、そのモデルはシミュレーションにも利用できるという考え方を基本にする。そのため、シミュレーションのためのモデル作り、例えば要素分割のための領域分けなどは考慮しない方針とする。本システムが対象とする範囲は、そのうち最も一般的な計算力学手法を用いたシミュレーションによる設計計算であり、その結果の評価作業の支援を行うところまでである。以下、本システムが解決しようとする現状のCAEの問題点とその解決策について述べる。まず、現状の数ある問題点のうち主なものは、
①シミュレーション作業には豊富なシミュレーション技術に関する知識と経験が必要不可欠であるにもかかわらず、これらの情報が十分に活用できないこと
②利用するシミュレーション手法や機能によってシミュレーション支援システムを使い分けなければならないこと
③②とも関連してシミュレーションやシステムの利用技術も多種多様化して複雑となり、専門的な利用技術が必要となること

などである。

これらの問題点を解決するための機能として考慮すべき主なものを、本システムの構築における基本方針として次に示す。

- ① シミュレーションプログラムに依存しない環境が提供できること(シミュレーション手法に依存しない/シミュレーション用語に依存しない/ユーザが作成したシミュレーションプログラムを幅広く支援することなど)
- ② 一つのシステムのもので、且つ同じような操作により種々のシミュレーションプログラムが利用できること(但し、計算力学手法を用いたものに限る。)
- ③ 利用者になるべくシミュレーションを意識させないようにすること(例えば、現状のプリプロセッサによる境界条件などの入力手段を変えたり、マンマシンインタフェイスをより設計者向けに改善すること)
- ④ 設計者が設計案を容易に評価できるように支援すること
- ⑤ シミュレーションのためのモデル化作業をできるだけ簡略化すること

次に、本システムの設計の流れにおける位置付けを、図4-5を用いて述べる。CAEシステムは、図4-5に示すように一般的に詳細設計における設計計算の一部を支援するものとして位置付けられる。そして、この設計における解析作業のうち代表的なものとして設計計算などを広範に支援するのが本来のCAEシステムの目標である。しかしながら現状のCAEシステムの支援範囲は、有限要素法を用いたシミュレーションの支援であると言っても過言ではない。本システムは、その支援範囲を計算力学手法に広げることにより、現状の目標と現実との開きを少しでも縮めようとするものである。そして、これにより設計における解析作業の効率化や、信頼性の向上を図ろうとするものである。ここで図4-5は設計作業手順の大局的な手順にも局所的な手順にもとれるので、図4-5を用いて全体における設計計算作業の位置付けを詳細に示す。現実の設計では図4-5の量産製品の設計におけるように、設計作業の上流から下流までに種々の解析作業が現れる。ここで、上流と下流における設計計算の内容は、部品単位であるか構造物全体であるかの違いを含めて、解析する内容も多種多様である。例えば、ワードプロセッサが製品対象であるときは、筐体内の部品配置と強制冷却送風との関係を調べるシミュレーションや重要部品の信頼性評価など

が上流の解析であり、下流では量産用金型の熱荷重に対する耐久性や部品レベルの安全性確認のためのシミュレーションが行われる。これらの設計計算作業において、CAEシステムの果たすべき役割は非常に大きい。しかしながら、従来のCAEシステムは各種計算力学手法のうち一つを専用的に支援するものであった。そのため、現状では種々の設計計算を支援するために複数の専用システムが必要であり、設計業務を一貫して処理する場合、複数のシステム間のデータの互換性や操作性などの問題があった。そこで、作業やデータの一元性を確保し、計算力学手法を用いたシミュレーションによる設計計算を一元的に支援するシステムとして本システムを開発する。そして、これを本論で言う設計計算を統合的に支援するシステムとして位置付ける。また、本システムの開発思想は、計算力学手法を用いたシミュレーションを共通的に支援すること、設計業務のなかで設計者自身が有効活用できる設計計算の支援環境を提供することである。本システムの基本思想を実現するために必要な一連の作業を支援する機能の詳細については、4.2節及び4.3節で述べる。本システムの構成は図4-7に示すように、四つのプロセッサからなっている。ここで、世の中一般ではメッシュプロセッサとプリプロセッサを総称してプリプロセッサと呼んでいるが、本論では属性情報処理を含む形状生成モジュールと要素分割モジュールを合わせたものをメッシュプロセッサと呼び、シミュレーションのための情報設定モジュール群をプリプロセッサと呼ぶ。また、データインタフェイスプロセッサは、シミュレーションプログラムの入出力データを共通化したり、専用化するものである。ポストプロセッサは、3.3節で述べた数値データの可視化方法と同様に、シミュレーション結果として得られる数値の羅列データを図式化する。

4.2 幾何情報と属性情報の取り扱い

4.2.1 設計計算モデルの表現方法とその応用

ここでは、設計計算モデルの詳細な表現方法とその応用方法について述べる。本節で述べる設計計算モデルにおける幾何情報と製品情報の内部表現は、幾何モデルに属性情報を付加する方式により実現することにした。幾何モデルに付加的な属性情報として製品情報を従属させることによる利点は、

- ①設計計算の意図を取り込むことができること
- ②幾何モデルの基本図形やその集合である物の形の物理的な意味を表現できること
- ③図形の配置や結合関係が表現できること
- ④荷重や拘束などに代表されるシミュレーションプログラムの入力データの付加をグループ化して与えることができること

などである。これらの利点を応用面からとらえると、次に述べるようなことが実現可能となる。第一に、上記①の設計計算の意図や②の物の形の意味、更に③の配置や結合関係を取り込むことにより、シミュレーションの入力データとなる境界条件などを生成することができる。第二に、これらの情報を判断材料として、要素分割処理を行う際に粗密付けや形状の抽象化を行うことができるようになる。更にこれらの入力データによるグループ化については、例えば面上の全要素あるいは全節点に荷重情報を与えていたのに対して、本モデルでは幾何情報のレベルで情報を与えることができるようになる。つまり、従来は有限要素モデルなどの個別モデルに対して処理を行っていた、しかし、設計計算モデルを作るということは、その上位のモデル（幾何モデル）に対して解析情報の付加処理を行うことになる。上位のモデルで扱うということは、属性という情報を例えば有限要素モデルのような個別あるいは特有なモデルに固定することなく、一般的な情報として扱うことができる。これにより、例えば複数のシミュレーション手法により設計計算を行いたい場合などに、一度入力した解析情報を共通的に利用することができる。また、一度計算した結果を評価して再度シミュレーションを行う場合にも、要素分割データの大幅な変更にも追従して解析情報を活用できる。

本モデルにおける設計対象物の図形表現は、図3-15に示したような従来通りの方法による幾何モデルにより行う。図形表現は前述の幾何モデルそのままであるが、設計計算モデルの概念的なデータ構造は図4-4の⑥に既に示したように、構造表現について若干の追加修正を行った。構造表現は、部分構造を立体構造の特殊形として許した以外は従来通りである。ここで言う特殊形とは、完全な立体表現とならない図形の集合（閉じていない面の連結状態など）のこと、立体とは区別して図形の集合として扱う。また、部分領域は、サブスト

ラクチャと等価な構造表現である。ここで、本方式を構築する上で設計計算モデルが製品情報として具備すべき情報の内容を以下に示す。

- ①シミュレーションプログラムの入力データを自動的に生成できる様な設計情報
- ②要素分割の粗密付けを行えるような情報
- ③設計計算に関して利用者の経験や知識を反映できる情報
- ④形状の機能や役割、働き、作用などを記述しうる情報

本モデルで扱う製品情報は、前述したように概念的には図4-4の⑥に示したようなもので、四つに分類する。それらは、環境情報、材料情報、機能特性情報、形状特性情報である。製品情報のうち環境情報は、その製品が利用されるときの条件を表現するもので、材料情報は形状の材質を表現するものである。機能特性情報は、その形状が持っている機能や役割を表現するものであり、形状特性情報は設計者のデザイン意図や形状の特徴を表現するものである。そして、これら四種の製品情報のうち、環境情報と材料情報そして機能特性情報により、上述の①の情報を記述する。②については、四種の製品情報すべてを用いて表す。③の情報に対しては形状特性情報を利用することとする。④の情報に関することは、機能特性情報が記述する。本モデルでは、製品情報でグループ化できる範囲の形状を部品という概念でとらえているので、一つの部品という概念のなかで製品情報の異なる形状を混在して定義できない。利用者の操作上から言えば、本方式においては製品情報単位に形状を構築していくことになる。そして、製品情報毎に形状を定義し終わると、4.3節で述べる要素自動分割処理に移る。ここで製品情報毎に形状を定義する方法をマクロストラクチャモデリングと呼び、その詳細は4.2.3項で述べる。

4. 2. 2 設計計算モデルの内部記述

設計計算モデルのデータ構造は図4-4の⑥に示したように、図形と構造データ（幾何モデル）及び属性データ（製品情報）の二つのデータが有機的に結合されている。この二つのデータの関係は、前項で幾何モデルに付加的な属性情報として製品情報を従属させると述べたが、処理によっては幾何と属性のデータの主従関係が転倒する場合もある。しかしながら、基本的には幾何モデルの

果たす役割のほうが大きい。以下、それぞれのデータについて、その内部表現を詳細に示す。

(1) 図形と構造データの内部記述

本論における幾何モデルの内部表現は、8 reps表現方法によりWinged Edge構造[152]を基調として幾何と位相の情報を記述するものであり、ワイヤフレームからサーフェイス、ソリッドモデルまでを同一構造のもとで表現できるようにしている。その構造は、図1-15に示した通りである。ここで、三種のモデル、ワイヤフレーム、サーフェイス、ソリッドモデルが混在するときは、ワイヤフレームを除くモデルだけがWinged Edge構造により幾何と位相の情報が管理される。しかし、サーフェイスモデルの場合にもWinged Edge構造で表現できない場合も生じる。その場合は、図4-8の(a)のように一本の稜線が一つの面しか持たない場合と、図4-8の(b)のように抽象化されたいわゆるリブ構造を表現しようとするときである。前者のような形状を表現する場合は、片Winged Edge構造として表すことで表現可能となる。後者の場合はそのままではWinged Edge構造のなかに納まらないので、設計計算モデルにおける幾何表現では構造を部分化することで表現することにする。このことは次に述べる属性表現の記述とも関わりがあるが、ここでは位相表現についての立場からのみについて述べる。図1-15の幾何モデルのデータ構造で示したように、構造表現としてグループとユニットと言う構造の部分表現ができるようになってきている。そこで、この部分構造表現を用いることにより、リブ構造のようにWinged Edge構造で表現できない形状を表現することにする。リブ構造を表現する場合の例を、図4-9を用いて模式的に示す。図4-9に示したように、ユニット内すなわち局所的にはWinged Edge構造による表現記述に準じているが、大局的には稜線が2本重なることができるためにWinged Edge構造で記述できていない。そのため本モデルは、Winged Edge構造を「基調とした」幾何モデルであると言う。また、本モデルで扱うサーフェイスやソリッドモデルは、ワイヤフレームモデルの拡張として見做すことができる。これは、基本的にすべての形状の定義はワイヤフレームモデルから始まり、面や立体の情報を付加することによりサーフェイスやソリッドモデルを表現できると考えるものである。この考え方は、逆にソリッドモデルにより表現された形状を抽象化していくと、サーフェイス

やワイヤフレームモデルにできると言う特長がある。本設計計算モデルにおいては、すべての図形データは向き付け可能なものでなければならず、ワイヤフレームからサーフェイス、ソリッドまでのすべての図形は向きを持つ。なぜならば、この向きにより有限要素や境界要素の向き付けを行うからである。

以上、大局的な幾何モデルの内部表現について述べてきた。次に図形要素の内部表現について述べる。図形要素の内部表現は、モデルの形状ごとの表現とモデリングにおける処理のための統一表現の二つがある。前者を形状の内部記述、後者を処理の内部記述と呼ぶ。具体的には線要素の場合、モデルの内部では直線、円、自由曲線、楕円の四種類の形状記述があるが、内部処理ではすべて3次のBézier曲線で近似的に記述している。また面要素も同様に、2次曲面(平面、円筒面、円錐面、トーラス面など)、自由曲面(ルールド面を含む)の二種類があるが、内部処理ではすべて近似的に3次のBézier曲面で表現している。立体要素も2次曲面体と自由曲面体の二種類があり、内部処理では他の図形要素と同様に3次のBézier曲線と曲面で表現している。このように二つの記述を持つ理由は、モデリング処理における処理の一元化を行うためである。言い換えれば、これらの図形要素の内部処理における処理記述は、3次のBézier曲面パッチを生成することで実現している。ここで、一般に任意の3次元形状を扱うとすると自由曲面を扱うことは必須な条件となる。そのため、何らかの手段で曲面の内部を明示しておく必要がある。そこで、一旦、設計対象形状が確定した後は、すなわち要素分割処理以降の処理では、この曲面パッチレベルのデータを形状データとして扱うことにする。図4-10の内部処理表現形式を、以降の処理の基本データとして用いる。図4-10に、この内部処理表現形式を図解する。本形式において、ワイヤフレームもセグメント化される。ここで、曲面パッチや曲線セグメントは、もとの基本図形の図形情報や構造関係情報、及び製品情報を図4-10の(a)に例示するように属性データとして保存する。図4-10の(b)の曲線セグメントは、端点とセグメント点の情報を区別して持つし、もとの線要素が持っていた構造関係情報や製品情報を共有する。曲面パッチの場合も図4-10の(c)に示すようにセグメントと同様、稜線上の点列や曲面上の点列は区別される。例えば、図4-10の(d)の曲面パッチAは端点やセグメント点を持つが、曲面パッチBは面上点しかもたない。

② 属性データの内部記述

幾何モデリングにおける図形要素の内部表現には、形状ごとの内部記述と内部処理が持つ処理の内部記述があることを述べた。属性データの場合は、幾何モデルの形状の内部記述に付随するデータとその意味を詳細に記述するデータの二種類の記述形式がある。前者を処理属性データと言い、後者を属性内容データと呼ぶ。本設計計算モデルにおける属性データの内容としては、4.1.2項や4.1.1項で述べたように、①環境情報、②材料情報、③機能特性情報、④形状特性情報の四種類がある。設計計算モデルはグループやユニットにより部分構造化された設計対象物として記述できることを、幾何モデルのところで述べた。部分構造化は本来部品の意味や、機能や材料上部品内部を区別するための意味があり、それらの意味を表現するのがこれら製品情報のデータである。幾何モデルの内部記述で説明したリブ構造の部分構造化(ユニット化)は、本来リブという構造上の機能を持つものが表現されなければ記述は十分でない。もし、その意味が表現されなければ、リブではなくて単に面図形が三つ巴に接続していることになる。そこでこの場合は機能特性情報により、その意味を持たせることにより他の幾何図形と区別して部分構造化する。しかし、幾何モデルに製品情報を付随させるだけでは、CAEシステムの内での役割を果たさない。すなわち、この製品情報を属性として付加した意味付けをどう表すかが課題になる。そして、この意味は解釈される必要があるために、要素分割などの内部処理と密な表現形式でつながりを持たなければならない。しかしながら、製品情報の意味までを設計計算モデルのなかで詳細に記述したならば、そのデータ量や処理機能は膨大となり且つ複雑となる。そこで、処理属性データの記述は、幾何モデルと属性内容データとのポイントとしての役割程度に留める。その理由は、詳細な属性の意味の記述は主に境界条件などのシミュレーションプログラムの入力データを作成するときに必要なだけで、要素分割処理のなかでは詳細な記述を利用した処理体系がかえって処理速度の劣化をもたらす原因になると考えるからである。そのかわり製品情報の意味を重要度と言う形の簡潔なデータ形式で持たせることにより、要素分割処理において効率良く代用できるようにする。そして、この製品情報の内容を詳細に記述するデータすなわち属性内容データは、別途外部記憶に保存しておく。これを属性内容記述ファ

イルと呼ぶことにする。以下、この処理属性データと属性内容データについて述べる。

まず初めに属性内容データについて述べる。属性内容データは属性内容記述ファイルにデータベース化されているもので、そのレコード内容を図4-11に示す。この外部ファイルは利用者が事前に設定しておくもので、その設計部署あるいは個人が必要とするシミュレーションに関するデータを記述してあるものである。極端な言い方をすれば、属性内容データとは製品情報の意味を具体的に記述するデータ、すなわちシミュレーションプログラムの入力データそのものである。

図4-11において、データID(ID)は属性データ番号である。これは、属性データの識別番号としての役割の他に、設計計算モデル内に記述される処理属性データとのポイントの役割も果たす。属性タイプ(TYPE)は、製品属性タイプ(FT:FEATURE TYPE)と基本属性タイプ(BT:BASIC TYPE)の二種類がある。製品属性タイプは、4.1.2項で述べた製品情報の識別フラグである。そして、1~4の整数を用いて、それぞれ順に環境情報、材料情報、機能特性情報、形状特性情報に対応する。製品属性タイプの他に、更に基本属性タイプを用意し、それを三つのタイプに分けた理由は、要素分割における粗密付け処理を効果的に実現するためである。つまり、粗密に分布された節点の配置を意味付けすることも粗密分布を決めることと同じように重要であり、そのためには幾何モデルのデータも十分加味する必要があるからである。具体的には、線や面の上の確に節点を配置できるようにするためである。基本属性タイプは、それぞれ18、20、38のID番号を持ち、それぞれ図形情報、構造情報、製品情報に対応する。属性重要度(DEGREE)は、0~15383の整数値で利用者が自由に設定するものである。これは要素分割をするときの粗密付けをするためのパラメータで、大きい数ほど密に分割される。属性名称(NAME)は、図4-11に例を示すような属性入力における対話コマンドパラメータである。利用者は属性名称を対話的に指定することにより属性を付加したり、モデルの部分構造化を行う。属性内容(DESCRIPTION)は、具体的なシミュレーションの入力データを表すものと要素分割の処理方法を示すものがあり、データタイプ(DT)、キーワード(KW)、数値などのデータ(DA)、キーワードタイプ(KT)からなる。データタイプは、シミュ

レーションプログラムの入力データの内容を示すものが0、要素分割の処理方法を示すものが1そして両用のものが2のフラグを持つものである。キーワードはシミュレーションプログラムの入力データ内容を示すものであるが、一般的にはキーワードタイプを指定してあればこのデータは必要でなくなる。このデータは、例外的に入力データの記述を行うときに用いるもので、可変長の文字列データである。数値などのデータは、荷重や温度などの具体的なパラメータ値のことである。キーワードタイプは、属性内容のタイプを表すもので、コメント、オプション、境界条件、材料データ、要素属性、などのデータの種類を表すものである。具体的には、シミュレーションプログラムの標準入力形式を持つデータベースのデータ識別子である。ここで言うデータベースとは、本システムのプリプロセッサのデータベースのことである。但し、材料情報の場合のキーワードタイプは、材料データベースの材料データへのポインタである。材料データの場合は、材料名を属性データとして付加するだけでその材料に関する定数などが自動的に付加されることになる。材料データについてこのような形式にしたのは、一般的に実際の設計で用いられる材料データは非公開のものがあり、それをシミュレーションのたびに入力するのでは効率が悪いからである。そこで、材料データベースの記述形式を利用者に公開し、利用者あるいは設計部署や事業所単位で独自のデータベースを構築するようにした。

次に、処理属性データについて述べる。処理属性データの内部記述は、図4-13に示すように上述した属性タイプ(ここでは製品属性タイプ+基本属性タイプ)と属性名称、そして属性重要度からなる。処理属性の付加は、利用者が対話処理により属性名称を指定することにより行われる。属性名称が入力されたならば、そのデータIDから属性内容記述ファイルを参照して属性タイプと属性重要度及びデータタイプを取り込み、そして幾何モデルに処理属性データを付加する。このように処理属性データについては、処理効率と記憶量を考慮して必要最小限のデータ記述とした。ここで設計計算モデル内での処理属性データは、その重要度と共に図形情報、構造関係情報、製品情報の三種類のタイプに分類されて保存される。図形情報の重要度は、設計計算モデルの幾何と位相データ及び形状特性情報から導出されるものである。幾何や位相、構造データ自身も、例えば端点、相貫線、ループなどの幾何属性を持っており、これらも

製品属性と同様な情報として属性内容記述ファイルに記述されている。構造関係情報は、設計計算モデルの構造データと材料情報と機能情報から、また製品情報の重要度は、その四種の情報から求める。これらの重要度は、式(4-1)から求める。

$$DOI_i = \frac{\sum_{j=1}^n (FT_j \times FD_{i,j})}{\sum_{j=1}^n FT_j} \quad \dots \dots \dots \text{式(4-1)}$$

DOI_i = 属性データの重要度数

FT_j = 各図形情報、構造関係情報、製品情報の重要度数の総和

$$(FT_j = \sum_{i=1}^n FD_{i,j}, \quad i=1 \sim 3, \quad j=1 \sim n, \quad n=\text{データ数})$$

$FD_{i,j}$ = 各情報の個別重要度数 ($i=1 \sim 3, \quad j=1 \sim n, \quad n=\text{データ数}$)

4. 2. 3 マクロストラクチャモデリング機能

本設計計算支援システムにおけるメッシュプロセッサは、形状を生成する機能と形状を要素分割する機能の二つのモジュールから構成されている。本項では、このうち形状生成機能について述べる。但し、従来通りの幾何モデリングによる形状生成機能についてはふれない。本システムのメッシュプロセッサにおける形状生成機能は、シミュレーションのための形状生成を目的とするのではなく、設計案を生成するためのモジュールである。基本的には、部分構造定義、部品別定義、解析モデルの部分定義、形状の機能別定義などを可能とすると同時に、設計案に関する情報を属性として形状作成と同時に定義できるようにした。従来、境界条件や材料情報などは要素や節点単位に与えるか、節点や要素をグルーピングして与えることが多かった。しかし、このことは、本来形状生成モジュールで定義されるのが良いと考える。なぜならば、シミュレーションプログラム毎に異なっている種々の境界条件などのデータの入力方法は、統一化できるはずのものである。また、これらの境界条件は要素分割を自動化するための情報ともなり、また本来設計情報として初めに与えるべき情報である。それゆえに、これらの境界条件などの情報は形状作成時に与える方が自然であるとする。しかし、これらの方法がすべての設計対象物に対して正しく適用できるようになるにはまだ時間がかかると予想されるので、プリプロセッ

サは補助手段として具備することにする。これは、実用的なシステムを構築することが重要であるからである。

要素分割モジュールからみると、自動処理を進める上で形状の特徴把握が重要となる。それも位相や幾何の情報だけでなく、面と面の接合情報や稜線か単なるモデル化における便宜上の線か否かなどの判断を示唆してくれる情報が必要となる。また、従来の構造解析の自動化のアプローチは部品単体レベルのシミュレーションが中心であり、構造物全体のシミュレーションとなると部分構造法などの方式でないと上手く解けないという問題があるため、部分構造とか部品という考え方が必要となる。4.2.2項で示した設計計算モデルの情報は、次節で述べる全自動要素分割機能で活用され、シミュレーションプログラムの入力データに自動的に変換される。具体的には、全自動要素分割機能において設計計算モデルの情報を粗密付けに利用するとともに、要素分割する際に解析情報として節点や要素に自動的に与える。このことは、設計計算モデルから解析モデルを自動的に生成したことになる。

一方、シミュレーションのための形状生成とは、2.2.3項で図2-4を用いて示したように実形状を抽象化することである。つまり、シミュレーションのために形状を生成するという事は、最初から設計対象の実形状ではなくてシミュレーション専用の目的のために対象物をモデル化した形状を入力することである。あるいは、CADシステムから与えられた製品形状をシミュレーションのために最適な形状に変更することである。しかし、この抽象化や変形操作を考えるとCAD/CAM/CAE一貫システムの思想のなかで形状データの共有化ができなくなってしまい、設計モデルと設計案の確認をするための解析モデルとでデータが異なってしまうという問題が発生する。そこで、抽象化や変形操作の問題は今後の課題として、本論では設計計算の支援のみを考える。

以上、メッシュプロセッサにおける形状生成機能の基本的な考え方を述べてきた。以下では、メッシュプロセッサのなかで重要な役割を果たす設計計算モデル生成の技術について述べる。本論では設計計算モデルを構築する作業をマクロストラクチャモデリングと呼び、これを支援する機能をマクロストラクチャモデリング機能と言う。マクロストラクチャモデリング機能とは、幾何データと属性データを有機的に連係させる処理を行う機能である。具体的には、形

状を製品情報の基本属性の単位で構築していく方法である。これは形状作成時に同時にその属性情報を与え、同一属性の部品を単位とすることである。この同一属性の部品の単位をマクロストラクチャと呼ぶ。図4-14にマクロストラクチャ作成の操作手順を示す。図4-14のステップ1では、各基本属性の内容を定義する。定義できる基本属性の内容は、あらかじめ用意してある属性メニューのなかの属性名称に関するものだけである。属性データを定義したならば、ステップ2では対話処理により通常の幾何モデリングの作業を行う。その例外として、異なる属性データを持つグループやユニット間で図形要素を共有する場合がある。過去に定義済みの図形要素が共有される場合には、その図形要素を現在のグループやユニットにコピーする処理をシステムが行う。また属性データの内容が変わるときには、改めて別のマクロストラクチャを定義することになる。その対話画面を図4-15に示す。図4-15は、マクロストラクチャ入力を行うときの初期入力画面(図4-14のステップ1)である。ここで、まず環境情報や材料情報などの属性データを入力する。また、機能特性や形状特性などのデータも必要に応じて入力できる。属性データの内容でグルーピングした内容を変更したい時には、この入力画面を呼び出し、新しい属性データを定義してから形状の定義や変更や修正などの操作を行う。

この方法によるメリットは、

- ①従来、要素分割をしなすと境界条件などのシミュレーション情報保存ができなかったが、形状にこれらの情報が属性データとして与えられているので保存や再生が可能となること
 - ②グループ処理化を形状生成時に属性単位で扱えるようになるため、操作性が向上すること
 - ③境界条件などプリプロセッサで入力するデータ量が膨大であったが、この方法によりデータ入力作業が簡略化され、場合によってはプリプロセッサが不要となること
 - ④要素分割の際に、その粗密情報などを与える指針となりうること
- などがある。

4.3 設計計算モデルの要素自動分割手法

本節では、メッシュプロセッサにおけるもう一つの重要な機能である要素分割の自動化機能を中心に述べる。設計業務のなかで、CAEを有効に活用できるようにするためには、本質的に設計作業に関係のない作業を機械化なり自動化する必要がある。計算力学手法を用いたシミュレーションによる設計計算を支援する場合には、要素分割作業と解析モデルのモデル化作業（境界条件などのシミュレーションのための問題定義にかかわる入力作業）がその代表である。このうち特に要素分割作業の自動化は古くから盛んに研究開発されてきているものの、ある程度の機械化が達成されたに過ぎず未だ実用レベルの自動化はなされていない[51]-[58]。そこで、この設計作業とは次元の違う二つの作業を自動化する機能を構築することにした。その機能とは、 n 分木表現方法を利用した要素分割機能と、設計計算モデルの属性データをシミュレーションプログラムの入力データに自動変換する機能である（ n は木構造の分岐数で、例えば4または8）。以下の項ではこの二つの機能の詳細について述べる。

4. 3. 1 空間分割方式を用いた要素分割手法

要素分割機能が満たすべき数ある条件のうち、本設計計算支援方式の核となる機能として少なくとも満足しなければならない主な事柄を、本方法を構築するための基本方針として、以下に示す。それらは、

- ①有限要素法、境界要素法、差分法の3種類の手法に適用可能であること
 - ②全自動処理が可能であるとともに、単純な対話操作による介入ができること
 - ③自由曲面を含む任意の3次元形状が扱えること
 - ④シミュレーションに重要でない部分の形状を省略したりする簡単な抽象化ができ、更に要素の形状が歪まないように要素分割の粗密付けが容易に行えること
 - ⑤要素分割作業や処理の過程を保存でき、その再生や過去の履歴を再現できること
 - ⑥分割の粗密付けや過去の履歴の再現などともない、境界条件などの入力データを節点や要素に自動的に付加できること
- の経験や知識を要素分割処理に反映する手段を有することなどである。

これらの条件を満足するために、形状の n 分木表現法と知識処理的な考え方

を利用した要素分割法を構築した。そして、この方法を拡張 n 分木法による要素分割手法と呼ぶ。本手法では、分岐数を4または8に規定した木構造を持つ正方形あるいは立方格子により空間を表現することを基本とする。そして、設計計算モデルが持つデータとこの階層木構造をした空間表現データとを有機的に連携させることで粗密付けを含む要素分割を行う。本手法の機能構成は、図4-16に示すように大きく分けて五つの基本処理部からなる。それらは、①空間分割処理部、②粗密分割処理部、③形状特徴把握処理部、④節点及び要素生成処理部、⑤過程情報処理部、である。④の節点及び要素生成処理部は、有限要素法と境界要素法のための処理系と差分法のための処理系に分れている。更に有限要素法と境界要素法のための処理系では、要素結合処理部と要素平滑化処理部の二つの処理部がある。差分法の処理系は、要素結合処理部だけである。

ここで、4分木表現方法を例にとり本手法の概念的な考え方を簡単に述べておく。4分木表現方法は、相似形で4分割可能な基本図形、例えば3角形、4角形を用いて物体を表現する空間を再帰的に分割して物の形を表現しようとする方法である[182]-[185]。そして、その分割過程を階層木構造により記憶することを特長としている。この時、親の基本図形を分割する基準は、基本図形が表現しようとする形状の内にいるか外にあるか明確に言えない場合である。図4-17に基本図形が正方形の場合に、円を表現する場合の例を示す。図4-17の(a)は、単純に一樣な正方形格子を用いて円を近似的に表現しようとした場合であり、円を精度良く表現しようすると数多くの正方形を必要とする。一方、図4-17の(b)のように4分木表現により円を近似的に表現する場合は、(a)に比べて少ない数の正方形で円を表現できる。この時の4分木表現のデータ構造である階層木構造を図4-17の(c)に示す。図4-17の(c)において木構造の階層が深くなっているところが、円の内か外か明確に言えないところである。そして、この内外が明確でない部分の階層を局所的に深くしていくことにより、近似精度を高めることができる。つまり、4分木表現方法はその解像度を局所的に無限に小さくしていくことで、形状の表現精度を高めていくことができる。

図4-17の(b)の方法を要素分割に応用したのが、網目法と呼ばれる一つの代表的な要素分割手法である[74]-[80]。そして、形状の表現方法と同様に基本

図形の数と近似精度の制御方法に課題が残っている。この基本図形の数と近似精度の制御の課題は、4分木表現方法を用いることによりある程度解決できる[81]-[85]。しかし、そのままでは要素分割処理に適用するわけにはいかない。なぜならば、意味もなく解像度に依存して要素分割を密にすることは、設計計算の観点からは論理的でないからである。今回開発した拡張法はこの問題を解決することにより、任意の3次元形状に対して設計計算上意味のある粗密分割を自動的に行うことを可能とした。ここで、本論ではこの木構造の各階層をクラスと呼び、基本図形を格子要素と呼ぶことにする。また、格子要素の構成成分である点を格子点、そして線を格子稜線と呼ぶ。

4. 3. 2 拡張4分木法を用いた要素分割手法

筆者が提案している設計計算支援方式のなかで、2次元の解析対象とは、主に設計対象モデルのある断面形状(3次元形状のある断面)を想定している。そして、拡張4分木法による要素自動分割アルゴリズムは、任意の2次元形状を対象にしたものである。以下、その詳細アルゴリズムを述べる。

本処理は、一般に複数の穴を持つ有界連結な閉じた平面分の要素自動分割を行う。その時、4辺形要素を基本要素とする。但し、4分木格子の隣接クラスが異なる時と形状の境界周辺部では、3辺形要素による結合を許す。3辺形要素による結合は、隣接する4分木格子のクラス差が1の時のみとする。この要素自動分割処理の基本的な処理の流れを図4-18に示す。以下、図4-18のステップ1からステップ6までの処理を詳細に述べる。但し、ステップ2については、本項ではステップ2-aの全自動処理の場合についてのみ述べる。ステップ2-bの対話処理については、4.3.4項で述べる。

ステップ 1 : 基本座標系の設定処理

2次元要素自動分割アルゴリズムでは、すべて2次元平面上で処理を行う。本アルゴリズムで扱う2次元平面空間は、図4-18の(a)で示すようなU, V, Wで定義する。この時、U, Vが平面を表し、Wがその法線方向を表す。つまり、3次元座標系で定義されている設計計算モデルの図形情報から平面の法線ベクトルを抽出し、これをW軸とする直交座標系(U, V, W)を生成し、図形情報を2次元(U, V)座標系に座標変換する。次に、2次元(U, V)座

標系において、U, V方向に座標値(U, V)の最大値及び最小値を求める。そして、最大値(U_{max}, V_{max})と最小値(U_{min}, V_{min})から形状を包含するような正方形を定義し、最小値が2次元(U, V)座標系の原点となるように座標系の平行移動を図4-18の(b)に示すように行う。次に、この正方形の一边の長さ(D)を $256 (= 2^8 = \sqrt{2^8 \times 2^8} = \sqrt{4^8} = 4^4)$ とするパラメトリックな2次元平面空間として表し、以後の分割処理の基本座標系として用いる。本処理により、形状全体の大きさと広がり方を把握する。また、ここで定義した正方形を4分木構造のクラス0とし、その正方形を四つの正方形に分割したものをクラス1とする。以下同様にクラス数が大きくなるにしたがい4分木構造の階層が図4-18に示すように再帰的に深くなる。その最大深さは、本論では8としている。そして、クラス8の一個の大きさは、長さ 1×1 になる。これら各クラスごとに現れる最小単位の正方形、すなわち格子要素の分割状態は $256 \times 256 (= 2^8 \times 2^8 = 4^8)$ の配列で記憶することとする。

ステップ 2-a : 全自動要素分割処理

① 一様な要素分割状態の設定処理

本処理は、利用者が要求する要素または節点数で要素分割を実現するために必要な前処理である。まず初めに、適切な4分木構造のクラスを与えることで一様な4分木格子を生成し、要素分割の初期状態を設定する。4分木構造のクラスは、式(4-1)のように表されるので、最適なクラスnを見付けることが本処理の目的である。以下、要素数の場合を例にとり本処理について述べる。

$$G = 4^n \quad (= 2^n \times 2^n) \quad (n=0, 1, 2, \dots, 8) \dots \dots \text{式(4-1)}$$

G = クラスnにおける格子要素の総数
n = 4分木構造のクラス(深さ)

利用者が要求する要素数(以下、要求要素数と呼ぶ)に最も近いGの最大値及び最小値を生成しうるnを求める。例えば、要求要素数が1000個の場合、nは4($4^4=256$)及び5($4^5=1024$)となる。次に、ステップ1で求めた形状の最大値及び最小値範囲のなかで、形状と交差する格子要素の総数(N)を

クラス数が小さい4分木格子の場合から(この場合は、 $G=4^*$ を持つ一様な4分木格子の方から)順に求める。ここで言う形状に交差する格子要素とは、格子要素が形状に交差するものから格子要素内に形状が存在するものまでをさす。この場合ならば、クラス数が $n=4$ の場合の形状に交差する格子要素の総数(N)を求めてから、 $n=5$ の場合の N を算出する。そして、式(4-3)を用いて予想要素数(E_{n+1})をそれぞれの場合について求める。式(4-3)において C は、係数であり本論では5.5である。この予想要素数が、要求要素数よりも少なくても最も近い値をとるような n を最適なクラスとして定める。

$$E_{n+1} = C \times N \quad \dots\dots\dots \text{式(4-1)}$$

以上のようにして、 n を求め一様な要素分割状態を設定する。本処理で式(4-1)の係数 C を5.5に設定している理由は、次のステップ3で述べる粗密付け処理において用いているパラメータから算出したからである。ステップ3の処理によれば、平均的に考えると全体の格子要素の半分は、クラスが1または2大きく分けて分割されることになるからである。式(4-1)の係数 C は、 $\{ (25\% \times N \times 4^2) + (25\% \times N \times 4^1) + (50\% \times N \times 4^0) \} = (5.5) \times N$ 。のようにして求めた。また、形状に交差する格子要素の抽出は、形状と格子要素の構成点との包含関係を調べることにより行う。現実的な処理のなかでは、この包含関係の情報をもとに要素を生成するためにその情報を保存する必要がある。具体的には、格子点に包含関係フラグを設定する処理を行う。そして、この処理ステップを包含関係フラグ設定処理と呼ぶ。

格子点の包含関係を調べる方法は、図4-21に示すように格子点から最も近い、向き付けられた外形線を第1ベクトル(v)とし、外形線の始点から格子点に向きを持つベクトルを第2ベクトル(u)とする2つのベクトルから判定する。ここで、形状の外形線は、図形処理の精度内で多角形表現されたものとする。また、外形線の始点と格子点を結ぶベクトルは他の外形線を横切らないものである。そして、形状に交差する点をIN、交差しない点をOUTという包含関係フラグとその座標値を各格子点に与える。また、形状上にある点のフラグはONとする。

② 粗密付け処理

粗密付け処理は、一様な分割状態を局所的に粗くしていく方法と密にしておく方法の二通りが考えられる。本論では後者の方法、すなわち要素分割を細かくしたいところの4分木構造のクラスを深くする方法について述べる。クラスを深くするための判断基準は、式(4-4)に示したような粗密付け関数によって行う。

$$F_i = (A \times a_i + B \times b_i + C \times c_i) / (A + B + C) \quad \dots\dots \text{式(4-4)}$$

$$A = \sum a_i, \quad B = \sum b_i, \quad C = \sum c_i$$

- a_i = 図形情報の重要度
- b_i = 構造関係情報の重要度
- c_i = 製品情報の重要度
- i = 格子要素番号

ここで、図形情報、構造関係情報、製品情報の重要度は、4.2.2項で述べた処理属性データから得られるものである。重要度数(F_i)は、処理属性のなかの重要度データと同様[8, 16383]の整数値で表現されている。本処理は、まず初めに全ての格子要素について、各々の格子要素領域内の基本属性タイプごとにその重要度を抽出する。次に、式(4-4)により、重要度数(F_i)を求める。粗密のレベル付けは、重要度数(F_i)の上位25%に対して2クラス、次の25%に対しては1クラスづつクラスを深くすることにより行う。図形情報、構造関係情報、製品情報の重要度と要素分割の粗密付けとの関係を図4-22を例にとって説明する。図形情報については、図4-22の(a)に示すように穴の境界線の方が外形線よりも重要度が高いと設定すれば、図形としては同じ円であっても穴境界周辺が密に分割される。図4-22の(b)では構造関係情報に関する例を示したもので、幾何モデルでは同じ表現ではあるがその意味は一体物とはめあいとは大きく異なる。本例では、めあい物の方が重要度が高いとした。同様に、図4-22の(c)でもねじ穴の方が抜き穴よりも重要度が高いとした。図4-22の(d)は、製品情報のうち機能情報に関する例を示したものであ

る。以上の処理により粗密がつけられたならば、最終的に隣接する格子要素のクラス差補正処理を行う。クラス差補正処理とは、粗密付け処理によって生じた格子要素のクラスの差を調整する処理のことである。本処理は図4-13に示すように隣接する格子要素のクラス差が2以上ある場合、そのクラス差を1にする処理である。

ステップ 3: 形状特徴の把握処理

粗密分割処理が終了した時点で形状特徴の把握処理を行う。形状特徴の把握処理は、格子による形状表現の不完全性を克服するための処理である。ここでいう形状表現の不完全性とは、一般に網目法により形状把握を行う場合に発現するものである。具体的には次のような場合がある。ステップ2で行われた包含関係フラグ設定処理のフラグ情報を単純に処理すると、図4-24の(a)に示すように形状の包含関係を明確に把握できない場合がある。図4-24の(b)は、包含関係フラグがINのものだけを考慮した場合に発現する形状表現の不完全性の例である。図4-24の(c)は、形状の特徴把握処理を単純に行った場合に発生する問題点を具体的に示したものであり、網目法における頂点の欠落や凹凸部の省略が発生する場合の現象例を示したものである。つまり、このような現象は包含関係フラグが図4-24の(a)のような場合、すなわち隣接する格子点の包含関係フラグが同じ(IN-INまたはOUT-OUTの状態)時に発現する。これは、一般に解像度の問題として片付けられてきているが、無限に解像度をあげても解決できない場合もある。また、要素分割においてはその粗密付けは、理由づけられたものである必要があり、解像度に左右される形状把握方法は不合理となる。この問題を解決するために最終的な粗密分布が決まった後、図4-25の特徴把握処理の流れ図に示すようなアルゴリズムを導入した。本アルゴリズムの特長は、包含関係フラグの同定処理ステップにある。図4-25の流れ図を用いて述べると、その特長は、

①検査対象格子点(OP)とそれに隣接する格子点(NP)のフラグが $OP \neq NP$ であるとき、交点(IP)を求め格子点座標値($OP(x, y, z)$)を交点座標値($IP(x, y, z)$)と入れ替える処理を導入したこと

②隣接する格子点のフラグが $OP = NP$ であるとき、一時的にその格子要素のクラスを深くし新に詳細なフラグ(CP)を求め、CPとOPのフラグの同定を詳細に行

う処理を導入したこと

③設計計算モデルの重要度の高い格子要素内では、節点座標値の再配置を行う処理を導入したこと

の三つである。本アルゴリズムによる処理例を図4-24の(b)、(c)と(c)に示す。図4-24の(b)と(c)は、設計計算モデルの重要度があまり高くない箇所での形状の特徴把握処理を行った例である。それゆえに、意味のある形状の抽象化表現が行われている。図4-24の(c)は、その格子要素内に重要度の高い情報(この場合、端点の座標値が優先)がある場合の例で、形状の抽象化が行われずに形状の特徴を把握した例である。更に、具体的な例として図4-25に形状特徴の把握処理を行った例を示す。図4-25(a)の破線は4分木格子要素を示したものである。もちろん、図4-25(b)に示す小さい丸い穴の場合のように、4分木格子要素のクラスが浅いために形状特徴の把握処理が上手く機能しないかのように見える場合もある。しかし、これはクラスが浅い、すなわち、この部分は余り大切な解析のポイントではないということが言え、3.2節で述べた本方法の基本方針④という抽象化を行ったことになる。つまり、小さい丸い穴は解析上無視してもよいということである。そして、形状特徴の把握処理により、相異なる二つの問題である形状表現の不完全性の克服と解析形状の抽象化を実現できる。同じような例で形状の抽象化が与えられた重要度によって変化する例を、図4-25(c)に示す。図4-25(c)の左図は穴が完全に無視された場合で、中図は本来長円である穴の形が4角形に抽象化されたものである。右図では、長円がより抽象化されずに表現された場合である。

ステップ 4: 節点及び要素データ生成処理

ステップ 4は、有限要素法と境界要素法のための処理と差分法のための処理の2系統に分かれる。図4-18で示したように、前者をステップ4-a、後者をステップ4-bとする。

ステップ 4-a: 有限要素法と境界要素法のための節点及び要素データ生成処理

ステップ2の粗密付け処理より得られた隣接する格子要素間のクラス差0または1の4分木格子に対し、有限要素または境界要素を生成する。要素の生成処理は、ステップ2で付けられた包含関係フラグをもとに3または4辺形のを

素を生成して記憶することである。まず、包含関係フラグから外形線を含む可能性のある格子要素を抽出する。抽出した格子要素に関しては、生成する要素が潰れたり、反転したりしないように要素の生成を行う。また、要素は形状の面の法線に一致させて向き付ける。各格子要素に対して、3または4辺形の要素を生成するか否かは、包含関係フラグによって決める。具体的には、格子点がINのフラグを一つ以上持つ格子要素と全ての格子点がONのフラグを持ち、且つ格子要素の中心点がINとなるような格子要素については、要素を生成する。それ以外の格子要素については要素を生成しない。要素を生成する格子要素として判定されたものでOUTフラグを持つ場合、生成される要素は3辺形となる。また、節点はINまたはONのフラグを持つ格子点とする。また、クラス差 λ をもつ格子要素では、図4-27に示すようにクラスの浅い方の格子要素を3辺形要素で分割する。3辺形要素で分割するのは、歪んだ要素の生成を避けるためである。そのパターンは、クラスの浅い格子要素が格子稜線上に持つ格子点の数によって異なる。図4-27に示したパターンは、本来ならば要素の節点共有関係を考慮して行うべきであるが、本論ではとりあえず図形処理的に結合した。ここで、4辺形要素だけを用いて結合することも可能である。その分割パターン例を図4-27の④に示す。しかし、3辺形要素で結合することは、4辺形要素の場合と比べ歪んだ要素の発現を阻止できる。

ステップ 4-b: 差分法のための節点及び要素データ生成処理

差分法のための要素分割は、直交座標系の分割を例にとり述べる。まず初めに、4分木格子の粗密状態のチェックを行う。粗密状態のチェックは、粗密付けられた4分木格子のU、V方向に対して、最も深いクラスでU、V行列のインデックスを図4-28の④に示すように設ける。そして、各インデックスの行または列に格子点があるか否か検査し、その有無に関するフラグ(0または1)をつける。この時、U、V方向行列のインデックスが共に無(0)でないU、V行列に、図4-28の④に示すように差分格子点を作成する。そして、図4-28の④に示すように各節点を結び事で差分法のための要素分割は終了する。

ステップ 5: 生成した節点及び要素数の検査処理

最終的に、生成した節点及び要素数が定まった段階で再度、節点あるいは要素数の検査を行う。この段階で、例えば生成した要素数が要求要素数よりも多

い場合は、密に分割された部分の重要度が小さいものから粗に分割する。本方法では、処理過程で生成する図4-28に示したような4分木構造(階層木構造)を保存しているので、この木構造の深さを局所的に調整することで再細的に粗密調整ができる。また、要素数が要求要素数よりも少ない場合は、密に分割された部分の重要度が大きいものから更に密に分割する。ここで、要求要素数と生成した要素数を比較する際に必要となる要素数の多少に関する評価基準は、基準値算出式として式(4-5)を用いて定めている。つまり、生成した要素数(E)が、 $E \pm |H|$ の範囲であれば生成した要素数は適正であるとする。ここで、生成した要素数が要求要素数に十分近い値に収束したか否かを判定するために、式(4-5)を用いてその許容範囲を決める。式(4-5)の掛け率(λ)の範囲は ± 25 である。この許容範囲を定めることにより、実践的な処理効率を確保する。掛け率の標準値は、経験的に定めたものである。

$$|H| = n \times \lambda \quad \dots \dots \text{式(4-5)}$$

H = 評価基準値

n = クラス数

λ = 掛け率(標準値=25)

ステップ 6: 要素平滑化処理

ここで言う要素平滑化処理とは、必要に応じて要素の形を修正する処理のことであり、基本的には有限要素分割の場合を想定している。具体的には、要素及びその周辺の要素の面積の大きさが互いに近づいて行くように節点を移動させて要素形状を修正する。但し、移動可能な節点は包含関係フラグがINのものだけである。本処理の目的は粗密付けが滑らかになるようにすることであり、近隣の要素の大きさが唐突に変化しないように隣接格子の大きさを調節する。節点の移動は、移動させたい節点を共有するすべての要素の節点の座標値 P_i ($i=1 \sim N$)を抽出し、これらの節点で構成される多角形を想定し、その重心値を移動させた節点の新しい座標値とすることで実現する(式(4-6))。すべてのINのフラグを持った節点について処理を行ったものを1回の処理とし、

この処理を繰り返すことで平滑化の度が進む。本自動処理においては、繰り返し数を5回とした。処理例を図4-23に示す。図4-23の(a)は式(5)の図解例で、(b)は平滑化を行わない状態のもので、(c)は平滑化処理後のものである。

$$\begin{aligned} \text{新座標値 } (X_{\text{NEW}}, Y_{\text{NEW}}) &= \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N} \quad \dots \text{式(4.6)} \\ P_i &= (X_i, Y_i), \quad i = 1 \sim N \\ N &= \text{節点の個数} \end{aligned}$$

4. 3. 3 拡張8分木法を用いた要素分割手法

前項で述べた拡張4分木法による要素自動分割アルゴリズムは、2次元の要素分割を対象にしたものであった。本項では、3次元の要素分割を行う手法について述べる。これを拡張8分木法による要素分割手法と呼ぶが、基本的には拡張4分木法の場合と同じ考え方で同様な処理を行う。2次元の場合に用いた拡張4分木法による手法との違いは、空間を区分的に表現する要素が正方形(4分木格子要素)から立方体(8分木格子要素)に変わることと形状と格子要素の交差関係が複雑になるために処理が複雑になること、及び有限要素や境界要素の生成方法が異なることの3点である。

本処理は、一般に複数の穴を持つ有界連結な閉面分となる2次元多様体とこの閉面分により閉じた空間領域となる3次元多様体の要素自動分割を行う。本手法では、シェルタイプとソリッドタイプの要素分割がある。シェルタイプの要素分割は有限要素と境界要素及び差分要素に、ソリッドタイプの要素分割は有限要素に用いる。その時シェルタイプの要素分割の場合は4辺形要素を、ソリッドタイプの場合は4面体を基本要素として行う。但し、シェルタイプの場合は4分木格子の時と同様に、8分木格子の隣接クラスが異なる時と形状の境界周辺部では3辺形要素による結合を許す。3次元の要素自動分割処理の基本的な流れも図4-18に示したものと同様である。以下、図4-18のステップ1からステップ6までの処理のうち、3次元特有の処理について詳細に述べる。但し、ステップ2については、本項ではステップ2-aの全自動処理の場合につ

いてのみ述べる。ステップ2-bの対話処理の場合については、4分木法の場合と同様、次項で述べる。また、ステップ3と4-(a)以外は、拡張4分木法の場合と同様であるかまたは単純に3次元的に拡張すればよいので本項ではアルゴリズムの説明を省略するかあるいはその違いを簡単に述べるに留める。

ステップ 1 : 基本座標系の設定処理

3次元要素自動分割アルゴリズムでは、すべて3次元空間内で処理を行う。本アルゴリズムで扱う3次元空間は、図4-10(a)で示すようなU、V、Wで定義する。3次元座標系で定義されている設計計算モデルの図形情報から形状の空間内の広がり把握するために、各軸方向の最大値及び最小値を求める。この全体座標系(直交座標系(XYZ))の原点に最も近い点を、本処理における直交座標系(U、V、W)の原点として定めて処理対象空間を定義する。この時の処理空間は、各軸方向における最大値(U_{MAX}、V_{MAX}、W_{MAX})と最小値(U_{MIN}、V_{MIN}、W_{MIN})から得られる形状を包含するような立方体である。これを図4-10(b)に示す。この立方体の一辺の長さ(D)は、 $156(=2^3 \cdot 3 \cdot \sqrt{2^2 \times 2^2 \times 2^2} = 3\sqrt{8})$ とするパラメトリックな3次元空間として表し、以後の分割処理の基本座標系として用いる。8分木構造のクラスの考え方は、4分木構造の場合とまったく同じである。8分木格子の分割状態は $256 \times 256 \times 256(=8^3)$ の配列で記憶することとするが、実際の配列記憶領域は40,000ワードを上限とした。そこでメモリー量を削減するために、各格子要素の分割情報は図4-31に示すような構造で記憶するようにした。図4-31において、ノード番号(NODE NUMBER = $U \times 257^2 + V \times 257 + W$)とは、直交座標系(U、V、W)における各格子要素の局所原点番号のことであり、8分木格子の配列アドレスで表している。これを8分木格子のクラスが2の場合を例にとって図解すると、図4-32のようにノード番号(A~H)は各格子要素の直交座標系(U、V、W)における局所原点を表し且つ格子要素の識別番号に対応する。その他の分割情報としては、クラス(CLASS)や交差情報データ(CROSS DATA)などを持たせることにした。ソリッド要素とシェル要素の場合で、それぞれ交差情報の記憶方法が異なるのは、包含関係の判定方法が異なるためである。ソリッド要素とシェル要素に共通な情報としては、①格子要素のクラス番号(CLASS)、②交差情報の有無や隣接する格子要素のレベル差の有無を示す四種類のフラグ

データ (IFLAG_i, i=1~4), ㉔格子要素の位置を示す局所位置番号 (LNO), がある。㉑の格子要素のクラス番号は、ノード番号の8分木構造におけるクラスである。㉔の格子要素の局所位置番号とは、格子要素が八つに分割されたときの局所的な格子要素の位置を表す番号である。図4-32を例にとれば、該当するクラスにおける㉑~㉔の局所的な格子要素番号である。ソリッド要素とシェル要素に特有な交差情報データは、格子要素と形状との交差関係を表すフラグデータであるが、その詳細については形状の特徴把握処理のところで述べることにする。

ステップ 2-a: 全自動要素分割処理

① 一様な要素分割状態の設定処理

本処理は、2次元の処理を単純に3次元へ拡張すれば良いので、前項で示した式の違いだけを示す。式(4-7)は、一様な分割を行うためのもので、予想要素数を求める式は式(4-3)である。

$$G = 8^n \quad (n=0, 1, 2, \dots, 8) \quad \dots \dots \text{式(4-7)}$$

G=クラスnにおける8分木格子要素の総数
n=8分木構造のクラス(深さ)

格子点の包含関係を調べる方法は、3次元の場合、外形線だけでなく面をも対象に行うことになる。まず、面と格子要素との包含関係は、幾何モデルの面単位に一面ごとに調べる。ここで言う面とは、4.2.2項で図4-19を用いて述べたように、境界表現により記述されている面が曲面パッチに展開された形式になっているものである。但し、処理の効率上、曲面パッチは三角形の平面パッチの形式にして取り扱うことにする。すなわち、曲面パッチの接ベクトルなどは考慮せずにその位置座標値のみを図形情報として用いる。以下、この平面パッチを単に面パッチと呼ぶ。包含関係の判定は、格子点から最も近い、向き付けられた面パッチの法線を検査することにより求める。そして、形状に含まれる点をIN, 含まれない点をOUTという包含関係フラグとその座標値を各格子点に与える。形状上にある点は、ONとなる。シェルタイプの要素分割の場合は、

INまたはOUTの関係付けが明確にできないので、包含関係の検査を詳細に行う必要がある。しかしながら、この段階では形状と格子要素の概略的な包含関係がわかれば良いのでソリッド要素の場合と同様な検査内容に留めておく。

②粗密付け処理

本処理は、2次元、3次元とも共通のアルゴリズムで処理を行う。

ステップ 3: 形状特徴の把握処理

粗密分割処理が終了した時点で2次元の場合と同様に形状特徴の把握処理を行う。形状特徴の把握処理は、図4-33の本処理の流れ図に示したような手順で行われる。本処理は大別すると二つの処理ステップから構成される。それらは、形状と格子要素との交差関係を明確に検査する処理と隣接する格子要素のクラス差を調整する処理である。交差関係の検査は、2次元の場合と同様に格子点がINかOUTあるいはONとなるかにより包含関係を判定する方法を基本とする。しかし、3次元の場合は交差関係が複雑となり、ここで得られた包含関係から単純に要素を生成しようとするとうまく生成できなくなる場合が多い。特に、シェル要素の生成のときに困難となる。そこで3次元特有の処理として、この包含関係の検査処理のほかには交差情報の整理処理を追加する。また、クラス差の補正処理も2次元の場合のように、単純にクラス差を一つにすれば良いのではなく、クラス差を付けることに十分な考慮が必要である。そこでクラス差を単純に1以下にした後、処理の複雑度を検査する処理を導入してクラス差を補正する処理を行うことにした。

まず最初に、交差関係の検査処理部について述べる。交差関係の検査処理部は、図4-34に示すような処理の流れにより実現した。交差関係の検査は、形状の面と格子要素との交差を調べてから、形状の面の境界線と格子要素との交差を調べる。この二つの交差関係の検査は同じアルゴリズムであり、各々の検査が終了した時点でその交差情報を図4-31の交差情報データ(CROSS DATA)に記録する。交差関係の検査は、面パッチと格子要素の稜線あるいは境界線と格子要素の面との交点計算を行うことである。形状の面と格子要素の稜線との交差関係の検査を例にとり、図4-35の(a)を用いてアルゴリズムの説明をする。まず交点計算の前処理として、面パッチと格子要素の稜線が平行かどうか調べる。平行性の判定は、式(4-8)により行う。式(4-8)が0になる時は

平行である。平行でない場合は、式(4-3)を解き、 t_1 、 t_2 、 f を求める。このとき下記のCASE①の条件を満たすときは格子要素の稜線と面パッチが交差し、CASE②のいずれかの条件を満たすときは格子要素の稜線と面パッチの境界線が交差する。そして、CASE③のいずれかの条件を満たすときは格子要素の稜線は面パッチの頂点と交差する。これら三つの条件を満たさないときは格子要素の稜線と面パッチの交差はない。また、図4-15の④に示した格子要素の面と境界線との交差判定も式(4-8)と式(4-9)により同様に行う。このとき格子要素の面は4辺形であるので、下記の判定条件のCASE①と②のうちCASE①の($0 < t_1 + t_2 < 1$)とCASE②の($t_1 + t_2 = 1$, and, $t_1 \neq 0$, and, $t_2 \neq 0$)は、不要となる。また、CASE③についてはORの条件で($t_1 = 1$, and, $t_2 = 1$)が追加される。

CASE①: ($0 < t_1 < 1$, and, $0 < t_2 < 1$, and, $0 < t_1 + t_2 < 1$)

CASE②: ($t_1 = 0$, and, $0 < t_2 < 1$) or

($t_2 = 0$, and, $0 < t_1 < 1$) or

($t_1 + t_2 = 1$, and, $t_1 \neq 0$, and, $t_2 \neq 0$)

CASE③: ($t_1 = t_2 = 0$) or

($t_1 = 0$, and, $t_2 = 1$) or

($t_1 = 1$, and, $t_2 = 0$)

$$E = \begin{vmatrix} X_A & X_B & X_D \\ Y_A & Y_B & Y_D \\ Z_A & Z_B & Z_D \end{vmatrix} = 0 \quad \dots\dots\dots \text{式(4-8)}$$

$$(PA \times t_1 + PB \times t_2) + PC = PD \times f \quad \dots\dots\dots \text{式(4-9)}$$

PA = 面パッチの第1点(P_1)から第2点(P_2)へのベクトル
または格子要素の第1点(P_1)から第2点(P_2)へのベクトル

$$(PA(X_A, Y_A, Z_A))$$

PB = 面パッチの第1点(P_1)から第3点(P_3)へのベクトル
または格子要素の第1点(P_1)から第3点(P_3)へのベクトル

$$(PB(X_B, Y_B, Z_B))$$

PC = 格子要素の稜線の始点(P_B)から面パッチの第1点(P_1)へのベクトル

または面パッチの稜線の始点(P_B)から格子要素の第1点(P_1)へのベクトル

$$(PC(X_C, Y_C, Z_C))$$

PD = 格子要素の稜線の始点(P_B)から終点(P_E)へのベクトル
または面の境界線を持つ面パッチ稜線の始点(P_B)から終点(P_E)へのベクトル

$$(PD(X_D, Y_D, Z_D))$$

交差関係の検査処理が終了したならば、この交差情報を図4-11に示したような交差情報データの記憶領域に一時的に保存する。この交差情報データにより、正確な形状特徴の把握処理が可能となる。交差情報データの $X+$ 、 $Y+$ 、 $Z+$ は、図4-16に図解するように格子要素の局所座標系における正方向に交点がある場合のフラグエリアであり、 $X-$ 、 $Y-$ 、 $Z-$ は負方向のフラグエリアである。これらを交差方向データと呼ぶ。また交差情報データの $1O_x$ 、 $1O_y$ 、 $1O_z$ は包含関係フラグのことで、交差方向データ($X+ \sim Z-$)に対応するINかOUTのフラグである。ここで言うINかOUTのフラグは、この格子点を基点とした場合の格子要素の各稜線の方向と幾何モデルの面の法線方向により判定するものである。幾何モデルの面の上にある点はONと呼び、2次元の場合のONフラグと同じ意味であり、交差情報データのONがそのフラグエリアとなる。また、EDも2次元の場合のONフラグと同じ意味をもち、幾何モデルの面上にある点のうち、特に幾何モデルの境界線上にある点のためのフラグである。また、属性データからの指示で稜線や線の上のせる必要のある点のためのフラグエリアでもある。WEもまた幾何モデルの面上にある点のためのフラグエリアであり、特に幾何モデルのWinged Edge上にある点のためのフラグである。ACは、処理対象になっているときのための活性フラグで、OEとOWはEDとWEの前の状態を保存するための領域である。これらのフラグデータは上述の交差関係の検査処理で交差があると判定されたならば、これらのフラグデー

タエリアにその状態を表すフラグが設定される。交差情報の保存処理が終了したら、次に座標値データの更新処理を行う。座標値データの記憶領域は図4-17のようになっており、ノード番号と交点情報及び座標値が一組のデータとして保存されている。ここで、交点情報は1Nまたは0Nのフラグで交差情報から得られるものである。座標値データの更新は、まず対象となっている格子点の座標値データを検索して交点情報を調べる。交点情報が設定されていなければ、交差情報を参考に交点情報を設定する。また、交点情報に0Nが設定された時は、格子点の座標値と交点の座標値を入れ替えることにより座標値の更新を行う。座標値の更新は、下記の手順で行う。

①対象となっている格子要素の稜線の始端点と交点との距離を各々求める。
②格子点に交点情報が既に設定されていなければ無条件に交点情報を設定し、交点座標値に近いほうの格子点と交点の座標値を入れ替える。但し、既に交点情報である0Nフラグが設定されている場合、再度交点があるか計算し、交差情報データを新に作成する。そして、他に交点があったならば、以下の処理を行う。前回検出した交点座標値と今回の座標値が等しく、前回と今回の包含関係フラグ(10_x、10_z)が同じ時は、交点情報はそのままとする。しかし、包含関係フラグが前回と異なる時は、格子点に近い座標値のものと交点座標値を入れ替える。

③既に0Nフラグが設定されていて交差方向データが複数の方向に交点があることを示す場合、すなわち各方向に交点が存在する場合、複数の交点のうち格子点に最も近い方を生かすように座標値を入れ替える(2点を1点化する)。

④最後に図形情報の重要度の高い幾何モデルの頂点及び端点などに対して最も近い格子点の座標値と入れ替えることにより、その把握処理を行う。このとき、必ず交点情報(1N/OUT FLAG)のエリアに0Nのフラグを立てる。

一方、ソリッドタイプの場合も同様の処理を行うが、交差情報の保存の方法がシェルタイプの場合と異なる。ソリッドタイプの場合は、交差情報として包含関係フラグだけを図4-31と図4-33に示したように各格子点とその中間点に対して保存する。これはクラス差が必ず1になるという条件を利用して、図4-33に示すように各格子要素の格子点間の中間点(●: F01~F06)を求め格子点と共に包含関係フラグを保存するものである。

以上のようにして交差情報を保存したならば、図4-33の流れ図における第2のステップのレベル差の修正処理を行う。レベル差の修正処理は、2次元の場合と同様に粗密付け処理の最終ステップにおいてレベル差が補正された状態から、交差情報の複雑さを解消することにより要素の生成ができるようになるものである。ここで言う複雑さとは、以下に列挙したものであり、これらの条件に当てはまる格子要素ではその隣接する格子要素間でのレベル差をなくする(0とする)ような修正処理を行う。その複雑さとは、

- ①一本の格子稜線に面が2箇所以上交差している場合
- ②一つの格子要素の面に同一面の境界線が2本以上相交差している場合
- ③格子要素の面に面パッチとの交差があり、しかもその面を取り巻く境界線に交差がない場合(接触しているような場合)
- ④一つの格子要素に同一面の境界線が4本以上上交差をしている場合の四つである。

以上のようにして交差情報データが保存され粗密付けが修正されたならば、すべての格子点について交差関係を明確にすることができる。しかしながら、交差関係を明確にしただけでは格子要素から有限要素や境界要素を単純に生成できない場合がある。例えば、一つの格子点に対して三方向以上上交差方向データが保存された場合などである。そこで、以下に述べるような交差情報の整理を行うことにより、最終的な形状特徴の把握処理を行う。

①対象となる格子点の交差情報データの0Nフラグが0Nのときは、OUTの包含関係フラグを無視して要素の作成を行う。

②格子点が複数の交差方向データ(X+~Z-)を持っていて、且つ包含関係フラグ(10_x、10_z)が1NとOUT共に持つ場合にはOUTである包含関係フラグを考慮せずに要素の作成を行う。

③格子点が3方向に交差方向データ(X+~Z-)を持ち、それらの包含関係フラグ(10_x、10_z)が同じ場合、3点を1点に縮退させる。

④格子要素の一つの稜線を共有する二つの格子点をまとめると三つの方向に交差方向データ(X+~Z-)を持つ場合、③と同様に1点に縮退させる。

ステップ 4: 節点及び要素データの生成処理

ステップ4は、2次元の場合と同様に有限要素法と境界要素法のための処理

と差分法のための処理の2系統に分かれる。差分法のための処理は、2次元の場合の処理を単純に拡張すれば良いのでここでは省略し、有限要素法と境界要素法のための処理についてのみ述べる。また、3次元の場合は生成する要素がシェルタイプのものでソリッドタイプのものであるので、それらの生成方法をステップ4-a①とステップ4-a②にそれぞれ分けて述べる。

ステップ 4-a①：シェルタイプの要素の生成

シェルタイプの要素の生成は、幾何モデルの面単位にその面と交差する最も浅いクラスの格子要素から順に処理していく。まず、処理対象とする格子要素の稜線の交点を結線して閉ループを作成し、次に閉ループを構成する交点が4点以上の時は閉ループを3角形または凸形の4角形に分割することで要素を生成する。この時クラス差のある部分での閉ループの3または4角形分割は、必ずクラス差のある所に発生した節点で閉ループを分割をするようにする。閉ループを構成する交点が3点の時は、単純に3点を連結することでシェルタイプの要素を生成する。また、閉ループを構成する交点が4点以上の場合は、まず交点を持つ格子稜線を共有する二つの格子要素の面を抽出する。次に、この二つの格子要素の面を構成する各格子稜線上の交点と結線とする。この結線処理が一つの格子要素内で次々に連続して可能な場合、閉ループが生成される。ここで閉ループの作成を該当する一つだけの格子要素を対象を絞らず、ONまたはINの交点情報を持つ格子稜線を共有するすべての格子要素群について各々閉ループが作成可能か否か調べる。これにより、要素の生成時における閉ループの3または4角形化の指針を得ることができると同時に、形状の特徴の誤った把握を避けることが可能となる。つまり、ループが閉じない場合には重要度の高い形状情報を探して閉ループ化したり、一時的にその情報をファイルに保存して最後に形状データと要素分割状況とを比較して要素を生成するか否かを決定するようにする。

要素を生成するためには、3または4角形化だけでなく要素の表裏の決定が重要である。次に、要素の表裏の決定方法について述べる。本方法では要素の表裏は要素生成するために作成した閉ループの方向から決定する。閉ループの方向は閉ループを構成する交点番号の並び順で表されているので、その順序に準拠して要素の表裏を決定する。しかし、本ステップの初めのほうで述べたよ

うな単純な方法で閉ループを作成したのでは正しい方向性が得られない。そこで、一度閉ループを作成したあと、該当する格子要素における交差情報(交差方向とIN/OUTのフラグデータ)を用いて交点番号順序を並び換えることにより決定する。この時、交差情報は形状の面の法線方向を正しく表しているので、閉ループの方向は形状の面の法線に対して左回りになるようになる。以上のよう

ステップ4-a②：ソリッドタイプの要素の生成

ソリッドタイプの要素は、すべて4面体である。任意の3次元形状を表現するためには4面体要素が必要不可欠である。本手法では、まず初めに格子要素をすべて4面体化してしまう。4面体化の方法は、図4-11に示すように8分木の格子要素位置によって分割パターンが二つに分かれる。また、クラス差がある所では、図4-11のようにその周辺のクラス差のつき方によって(a)と(b)の二つのパターンに分かれる。二方向以上からクラス差があるような場合は、(a)のパターンとなる。また、一方向からのみクラス差があるような場合は、(b)のパターンとなる。要素の生成は、2次元の場合と同様にOUTの交点情報を持つ4面体は要素として認めない。しかし、単純にOUTの格子点を含む4面体を除去してしまうと4面体の分割パターンの方向性から、2次元の場合と同様な角落ちなどの現象が発生し、形状の特徴が十分良く把握できない。そこで、シェル要素の分割と同様に交差情報を参照してOUTの格子点を含む4面体を除去するか否か審議してから要素を確定する。具体的には、初めにすべて4面体化した格子要素の内、形状の表面と交差する部分に対してシェル要素で要素分割する。そして、シェル要素分割で得られた表面の要素と内部の要素を4面体で結合する。こうしてソリッド要素の分割が正しく完了する。この結合処理は、シェル要素の3角形化を内部のパターンとの整合性をとるように気を付けてやれば、矛盾なく単純に内部の4面体要素と結合できる。

ステップ 5：生成した節点及び要素の検査処理

本処理は、2次元の場合と同じである。

ステップ 6：要素平滑化処理

本処理も2次元の場合と同様な処理であり、その違いは節点の移動が3次元的に式(4-10)のように拡張されることと移動した点を形状の面上に投影す

ることである。節点の投影は、単純に面上に垂点を落とすだけである。

$$\text{新座標値}(X_{\text{NEW}}, Y_{\text{NEW}}, Z_{\text{NEW}}) = \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N} \quad \dots \text{式(4-18)}$$

$$P_i = (X_i, Y_i, Z_i), \quad i = 1 \sim N$$

N = 節点の個数

4. 3. 4 拡張4/8分本法を用いた再分割処理

本項では、拡張4/8分本法を用いた要素分割の再分割方法について述べる。本設計計算支援システムでは、再分割処理は対話処理を基本として行うこととする。その理由は、種々の設計分野で役立つ実際の道具として提供する場合、最も有効な手段と思われるからである。再分割方式では、利用者の判断により直接修正する箇所を指示する方式と、判断の基準及びその方法を指示して後は自動的に再分割を行う方式の二つがある。

前者の方式は、ポストプロセッサの出力結果を表示させ、その情報に従って利用者が密にする部分などを対話的に指示するものである。ここで、本システムのなかで再分割機能をポストプロセッサの一機能として位置付けているのは、設計計算における操作手順を図4-1に示すように考慮したからである。このことは、再分割の基本はシミュレーション結果の評価にあることも意味する。対話処理による粗密付け(図4-18のステップ2-b)は、自動処理において自動判定される処理部(図4-18のステップ2-a)を対話処理に置き換えたものである。つまり、 n 分本格子要素を対話的に指示することによりその n 分本格子要素のクラスを深くすることで粗密付けを行うものである。この対話処理入力方法としては、

①全体の粗きを与える

②設計計算モデルが持つ情報の重要度に従い自動的に粗密付け、それを対話修正する

③領域を指定して、その範囲を粗または密にする

④ n 分本格子要素を指示して、それを粗または密にする

⑤指定したクラスを1クラス浅くする、または深くする

の五つの方法を用意した。図4-41から図4-45までにこれら五つの操作例を、その入力方法について述べた順に示す。対話処理による粗密付けは、初期の要素分割でも有効であるが、シミュレーション後の再分割を行う時が最も有効な手段と考えられる。図4-46にその再分割機能のコマンド画面を示す。再分割の際の粗密付け対象の指示入力手段は、節点または要素を指示する方法と記憶媒体に保存してある n 分本格子構造の深さを調整する手段の二通りがある。

上述の再分割方式における後者の方式は、図4-47のように対話補助画面に判断方法と判断材料及びその基準を入力して、それらの判定により密に分割するなどの処理を行うものである。判断方法としては、物理量の変化量算定方法と相対誤差算定方法及び絶対誤差算定方法の三つを用意した。物理量の変化量算定方法では、節点あるいは要素の比較対象と比較する物理量名称、およびその変化を判断するための基準値となる物理量の差を入力する。システム側では、隣接する比較対象間(例えば節点間)の指定された物理量の差が定められた判断基準値よりも大きく変化する部分に対して密な分割を行う。相対誤差算定方法は、シミュレーションが二回以上行われた時にのみ有効である。これは、定められた記憶媒体内に保存されている前回のシミュレーション結果と現在の結果を節点あるいは要素ごとに比較して、その計算結果の差が基準値以上ならば密な分割を行うものである。この時の入力データは、比較する物理量と基準値、及び節点か要素の比較対象情報である。絶対誤差算定方法は、定められた記憶媒体に節点あるいは要素ごとに理論値または推定値などの絶対的な評価値を入力しておき、その値と計算値の差がある基準値を超える場合に密な分割を行う。この機能を実現する仕組みは、相対誤差算定方法などの場合とまったく同様であり、ポストプロセッサそのものの機能を利用して実現している。

4. 3. 5 設計計算モデルからシミュレーションプログラムの

入力データへの自動変換

4.3.2項や4.3.3項で述べた粗密付け処理により n 分本格子要素と設計計算モデルとの包含関係が明確になったとき、製品情報は格子要素の属性として与えられる。つまり、 n 分本格子から節点や要素が生成されたとき、初めて節点や

要素にシミュレーションのための入力情報としてその製品情報が付加される。ここで、製品情報はn分木格子とともに過程情報処理部において保存されるので、要素分割の修正や変更に対しても追従可能なわけである。この製品情報の保存方法を図4-48に示す。図4-48において、n分木構造はいわゆる抽象階層構造[186]をとっている。つまり、製品情報はデータ構造を属性として含むと同時に、データ構造は製品情報をその内部記述として含むという、相互に絡みあうデータ表現構造が形成されている。これにより、上位から下位への概念やデータの継承やその逆のデータ表現や操作が実現できる。そして、製品情報がシミュレーションの入力データに変換された後、シミュレーションプログラムを自動的に実行させることでシミュレーション作業が設計計算モデルから直接的に行えるようになる。以下、具体的な自動変換処理方法について述べる。

設計計算モデルにおける製品情報の内部記述は、4.1.2項で述べたように図4-4や図4-10、及び図4-11と図4-13のようにになっている。これらの製品情報を具体的な解析データに変換するには、図4-11に示した属性内容データを設計計算モデルから取り出す必要がある。設計計算モデルに付加されているのは処理属性データだけであるが、処理属性データと属性内容データはポイントで関係付けられているので、容易に取り出すことができる。しかしながら、設計計算モデルと要素分割データとの関係付けは、これらのデータだけでは不十分である。一方、要素分割処理において活用するn分木構造データに着目すると(n=4 or 8)、n分木構造データには設計計算モデルと同様な形式で処理属性データが付加されている。そこで、要素分割データと属性データの両方が関係付けられているn分木構造データを用いて、このデータ変換処理を行うことにする。本処理のデータの流れを概略的に図4-49に示すように、まず設計計算モデルを拡張n分木法により要素分割する。要素分割することで、要素分割データ(MESH DATA)と木構造データ(TREE DATA)が出力される。木構造データは図4-48でも示したように、要素分割処理における粗密付けの処理過程情報(PROCEDURE DATA)と設計計算モデルが持っていた処理属性データ(TAGGED DATA (FEATURE))の2種類のデータからなる。次に、この要素分割データと木構造データのうち処理属性データから属性内容データ(FEATURE DATA DESCRIPTION)を検索しその内容を取り出し、対象とするシミュレーショ

ンプログラムの入力データに自動変換する。また要素分割データは、この変換処理の過程で変換対象となっているプログラム特有の形式にされる。つまり、その節点や要素に付加される境界条件や材料データなどは、処理属性データに対応する属性内容データから抽出し、シミュレーションプログラム特有のデータ形式に変換する。この時、データ変換はあらかじめ用意されている変換規則によって処理される。変換規則の作成方法は、第5章で述べる。

要素分割データの形式変換は、図4-50に示す標準データ形式を単純にシミュレーションプログラム特有のデータ形式に変換する。但し、亀裂などの問題や接触問題、あるいは境界要素法を扱うときは、処理属性データを参照して節点を追加したり要素を増やしたりする処理を行う。要素分割データの標準データ形式は、コメントデータ、節点データ、要素データ、サブストラクチャデータやマクロストラクチャデータを含むコントロールデータなどのデータとそれらの識別フラグから構成されている。データ変換規則は、この標準データ形式が持っている識別フラグに対してそれぞれ用意される。属性内容データのデータ変換も同様な形式変換であり、図4-11で示したキーワードタイプ(KT)を識別フラグとしてそれぞれの識別フラグごとに変換規則を用意することでデータ変換を実現する。ここで変換規則は、必要に応じて数値などのデータ(DA)を参照することを指定したり、あるいは特殊な場合としてキーワード(KW)を用いるなどの指示をも与える。つまり、データ変換プログラムは、図4-51に示すように要素分割データと属性内容データを読み込む。次に、データ変換規則をルールファイルから取り出し、解釈部で変換方法を定義する。ここで、解釈部は単純に識別フラグごとにその変換形式を定義するだけである。次にその変換形式に基づいて、標準データ形式から特有の入力データ形式に形式変換する。例えば、キーワードタイプが1であり、その識別フラグの意味が拘束条件であったとする。更に、数値などのデータとして`XYZ`が記されていたとする。変換規則ではキーワードタイプが1のときは、まず先頭8文字にSPCと出力し、次にその節点番号を整数8桁で出力し、そして数値などのデータが`XYZ`であれば123000を整数8桁で出力するというように記述しておく。すると、結果として拘束条件に関する入力データが次に示すように出力される。

コラム数 / 1 2 3 4 5 6 7 8 1 2 3 4 5 6 7 8 1 2 3 4 5 6 7 8
 -----+-----+-----+
 S P C 1 1 2 5 1 2 3 0 0 0

4. 3. 6 拡張4/8分木法による要素分割の実験と検討

今回開発した拡張4/8分木法による要素分割の基礎実験として、図4-52から図4-51に示すような平面形状、曲面形状及びソリッド形状を要素分割してみた。結果は、設計計算モデルの重要度に応じて粗密付けが程よく付けられ、また生成した要素も歪むことなく良好であった。次に、各種設計業務における実問題に今回開発した要素分割機能を用いることで、総合的な評価と個別機能の評価を行った。まず、図4-52から図4-58に2次元形状の各種部品の要素分割結果を示す。図4-52は、フロッピディスクドライブ(図中ではFDDと略す: Floppy Disc Driveの略語)用の磁気ヘッドをのせるジンプルと呼ばれるものである。図4-53は、ヒートシンクの冷却フィンの断面である。図4-54は、ダイヤフラムの断面である。図4-55は、磁気ディスク用ヘッドのアーム部である。図4-56は、補強構造用アーム断面である。図4-57は、冷却路内部の断面で差分メッシュ分割例である。図4-58は、3次元形状(ガス遮断器スペーサ部)の任意断面の要素分割例である。

次に、曲面形状構造物の要素分割例を図4-59から図4-75に示す。図4-59は、図3-77で示した318,000KWの水力発電用水車のケーシングである。図4-70は、図3-78で示した洗濯機のモータギヤケーシング上部の一部分である。図4-71は、ガス遮断器の $\frac{1}{2}$ モデルである。図4-72と73には、その部品である容器、接続棒、インシュレータ部の個別モデルの要素分割結果を示す。図4-74もガス遮断器の一部品でスペーサと呼ばれる接続棒の支持部である。これは、境界要素法を用いた静電場解析を行うために表面だけを要素分割したものである。図4-75には、自動車の車内の差分メッシュ分割例を示す。これは、エアコンディショナの性能解析のためのものである。

最後に、立体形状構造物の要素分割例を図4-76から図4-80に示す。図4-76は、ガス遮断器の一部品であるスペーサ部の接続棒と絶縁部分について要素分割した結果である。これは、接続棒の支持部における応力解析を行うための

ものである。図4-77には、ホイストの吊り上げ用フックである。図4-78も同じく図3-84で示した超音波式アトマイザである。また、図4-79にも図3-85で示した建設機械の圧力センサ部品の要素分割例を示す。図4-80は、圧力容器である。

以上、ここに示した事例を含む要素分割の実験結果として、次のようなことが得られた。

- ① 本要素自動分割手法を用いることにより、作業時間が平均するとサブストラクチャモデリングから要素分割を行う従来方式に比べ平均で約1/50に短縮された。これは設計計算モデルを作成した後、処理実行命令を行った時のTAT(処理待ち時間)と従来の対話作業時間とを比較したものである。短縮された作業時間は、部分領域分けに係わる対話操作時間である。ちなみに、本自動処理によるTATは、BITAC M-580Hのもとで2次元の場合、平均10秒、3次元のシェル要素の場合、平均4分、3次元ソリッド要素の場合、平均12分であった。
- ② 要素数と計算処理時間(BITAC M580HによるCPU時間)の関係は、図4-81の(a)、(b)、(c)に要素の種類ごとに示したように、要素数の増加に伴い計算処理時間も増加する。また、2/3次元共にクラス3とクラス4の要素分割とでは約4倍のCPU時間の差がでる。節点数と要素数の量的関係は比例的な相関関係にあるので、節点数と計算処理時間の関係は省略する。
- ③ 要素分割の質は図4-52から図4-80に示した分割結果からもわかる通り、要素分割が粗密に推移してもつぶれたりすることなく良好な結果を示している。また要素分割の粗密付けについても、巧く処理されている。一方、本手法では要素数が増加すると粗密付けの度合いが強く出る傾向にあることがわかった。
- ④ ソリッド要素による要素分割は可能であるが、4面体要素を基本としているために要素数が膨大となる。計算機運用やCPU性能がこれを問題としない環境ならば有効な手段となりうるが、一般の設計部署においては要素数が増大することが実際の運用上の問題となろう。
- ⑤ 今回の実験では、線形の静的解析、熱伝導解析と固有振動解析(以上、有限要素法)及び静電場解析(境界要素法)、そして流れ解析(差分法)に係わる製品情報のみを属性記述の対象とした。粗密付け処理と共に、製品情報から解析情報の変換結果も良好であった。

以上のような実業務への適用を含めた実験結果をまとめると、以下のようなことが知見として得られた。

- ①設計計算モデルの作成をすることにより、計算力学手法を用いたシミュレーションのための要素分割モデルの作成までは自動化することが可能となった。
- ②解析モデルの作成も同様に自動化できる見通しを得た。現状では、単純な問題の場合はデータ変換率が高いが、複雑な問題では手直しする必要が生じる。また、利用者が設定するデータ変換規則の汎用性を高めるためには、経験的に修正を加えていく必要がある。
- ③シミュレーション結果の評価に関する作業時間は、計算結果の概略的な妥当性を検討するのに要した作業時間とした。それは、平均で約2時間、最大4時間、最小1時間であった。
- ④従来のシミュレーション作業と比べると約 $\frac{1}{6}$ 程度になり、大幅な省力化が達成された。また、再解析においても、木構造と属性情報の保存により従来入れ直さなければならなかった多くのデータが保全されるようになり作業量は、約 $\frac{1}{6}$ 程度に削減された。一方、設計業務における解析作業の省力化効果としては、シミュレーションによる解析結果と実験結果のデータ間の補間により、実験量の大幅な削減が可能となったことである。
- ⑤解析業務が充実した結果、製品の信頼性が向上した。これには省力化効果の裏返しとして、より詳細なシミュレーションが行えるようになったことにも一因がある。すなわち、安全性が重要な製品に関しては設計過程における検討や設計結果の評価がより緻密に行われるようになり、その分信頼性は向上されたと思われる。

4. 4 第4章のまとめ

機械系CAD/CAM/CAE一貫システムの構築のステップとして、設計計算モデルと計算力学手法を有機的に結ぶシステムのうち基本機能である設計計算モデリング機能と要素自動分割機能を開発した。具体的には、幾何モデルに設計情報や形状に付随する情報を図形の属性情報としてもたせたことにより、任意の2ないし3次元の形状を自動的に要素分割し、解析情報を要素分割データに付加するものである。次に、本システムを実際の設計業務（強度や性能の評価と

確認）に適用し、評価をした。その結果、従来のCAEシステムに比べて、設計業務の大幅な効率化に貢献できることを確認できた。実際、計算力学手法を用いたシミュレーションに対して熟知していない利用者にも簡単に利用できるようになり、従来よりも手短かに設計案の確認や検討ができるようになった。以下に、本章で得られた成果をまとめる。

- ①計算力学手法を用いたシミュレーションによる設計計算の支援方式を提案した。
- ②マクロストラクチャモデリング方式により、設計計算モデルを定義できるようになった。これにより、属性単位のグルーピングや要素分割における粗密付けの意味付け、及び解析モデルの自動生成などが可能となる事を確認した。また、有限要素法、境界要素法、差分法に係わるモデル化作業を共通的に支援できると共に、計算機によるモデル化作業の操作性を大幅に向上できる見通しを得た。
- ③有限要素法、境界要素法、差分法に共通な自動要素分割方法を開発すると共に、各種手法を用いたシミュレーションプログラムの入力データを設計計算モデルの属性データから共通的に作成する方法を開発した。これにより、計算力学手法を用いたシミュレーションの利用技術の向上を図るとともに、その有効性を確認した。
- ④上記②と③の要素技術を開発することにより、前記設計計算支援方式を実現した。これにより計算力学を活用した解析作業が設計計算モデルから直接的に行えるようになり、作業時間の大幅な短縮が可能となった。
- ⑤本システムを実務に適用することでその有効性を確認するとともに、設計計算業務の信頼性向上と省力化に貢献した。

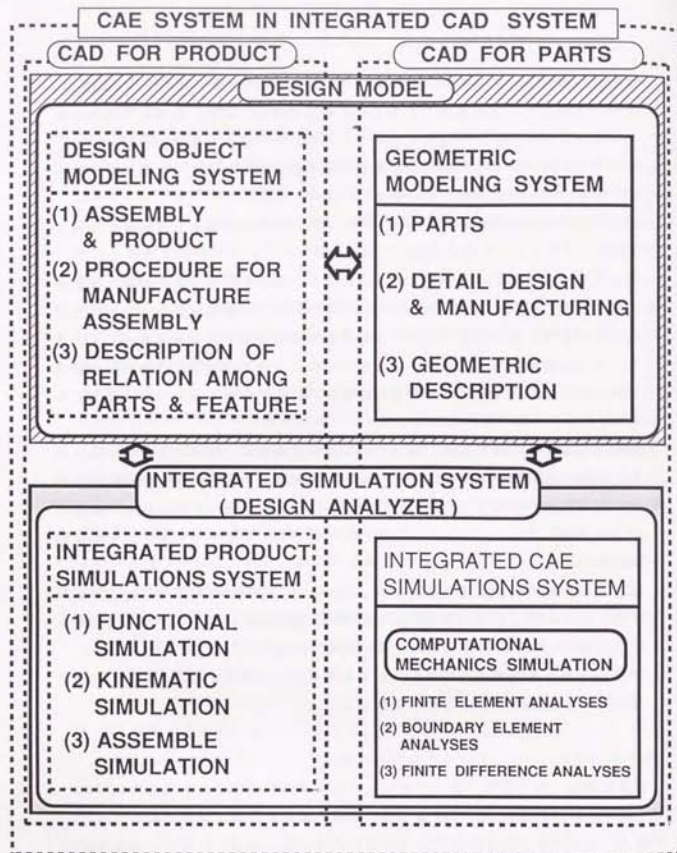


図4-1 統合形シミュレーション支援システムの位置づけ

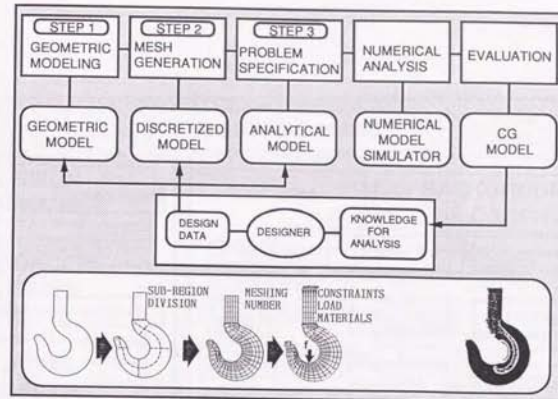


図4-2 現状の設計計算支援方式

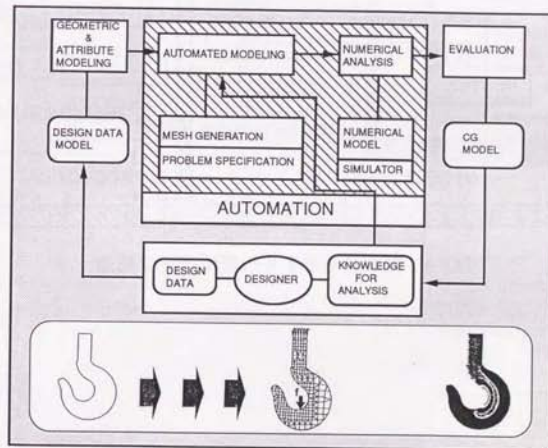
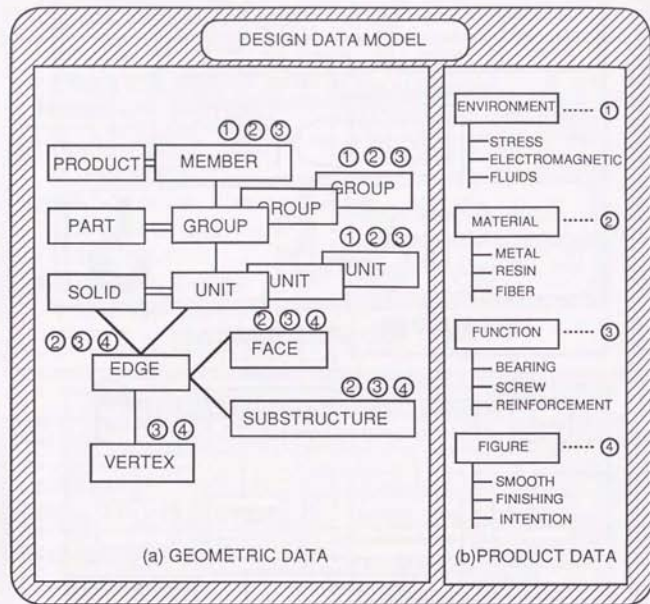


図4-3 設計計算モデルと要素自動分割を核とした設計計算支援方式



(a) GEOMETRIC DATA

(b) PRODUCT DATA

図4-4 設計計算モデルの概略データ構造

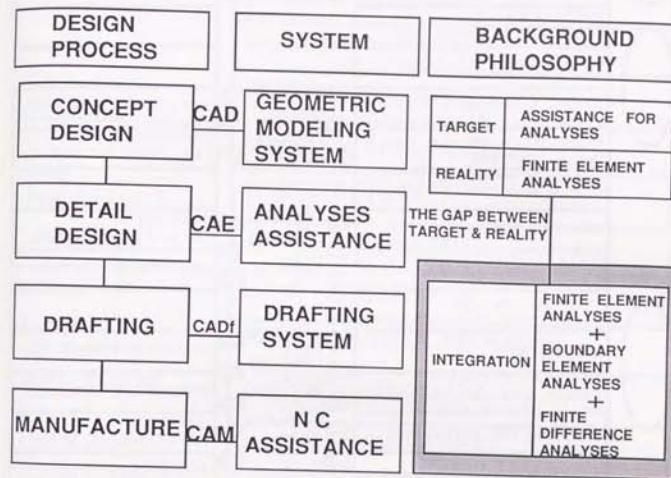


図4-5 設計の流れにおける位置付け

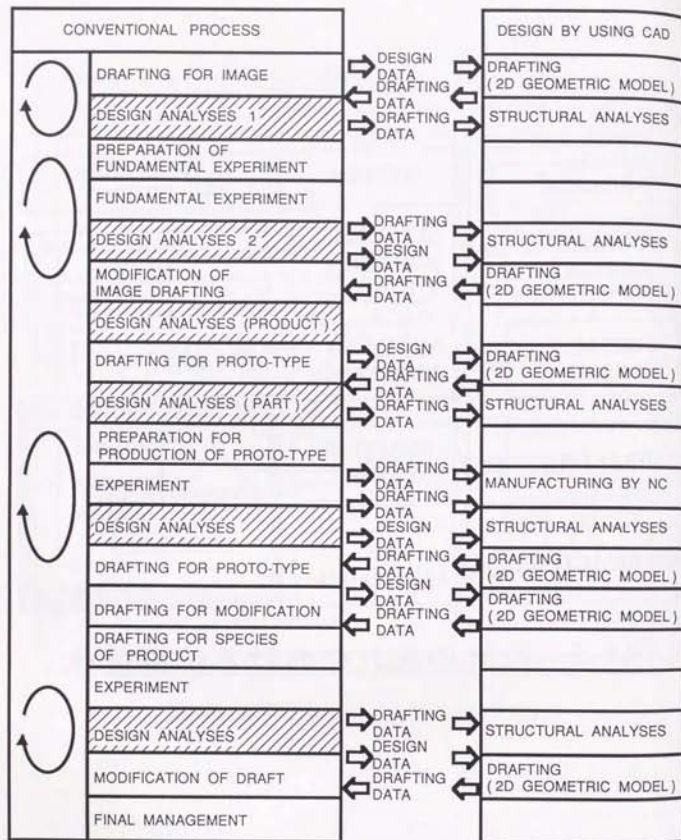


図4-6 量産品における設計の流れとCAE

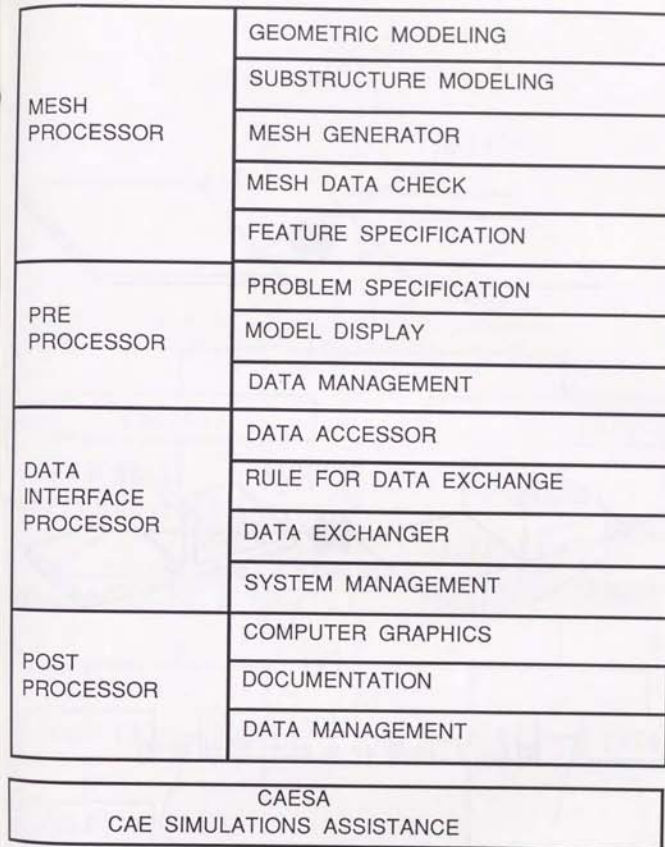
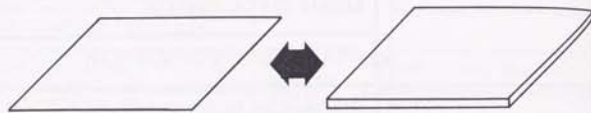
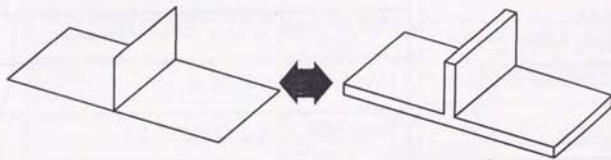


図4-7 本システムの構成



(a)



(b)

図4-8 抽象化された形状表現

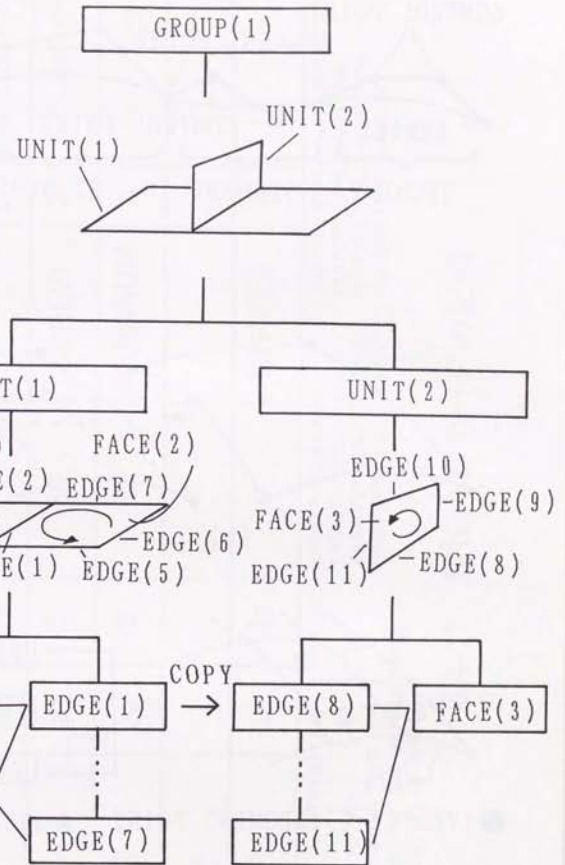
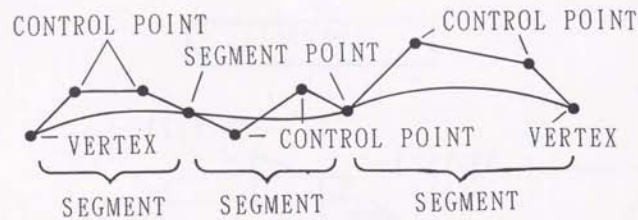
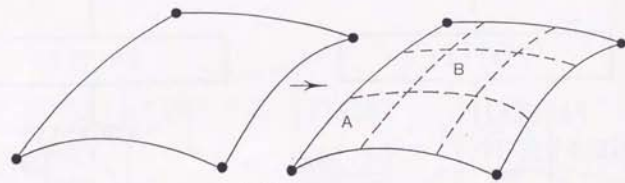


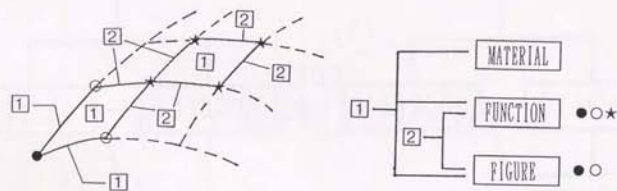
図4-9 抽象化された形状の内部表現



(a)



(b)



●: VERTEX ○: SEGMENT POINT ★: SURFACE POINT

(c)

図4-10 設計計算モデルにおける幾何モデルの詳細記述

FEATURE DATA DESCRIPTION

ID	TYPE		DEGREE	NAME	DESCRIPTION			
	BT	FT			DT	KW	DA	KT
1	30	3	30	SCREW	2		123456	10
2	20	2	5	ALUMINUM	2			20
:	:	:	:	:	:		:	:
n	30	1	0	STRESS	0			1

DT = DATA TYPE (0/1/2)
 DA = DATA
 KW = KEYWORD
 KT = KEYWORD TYPE
 FT = FEATURE TYPE OF PRODUCT DATA
 BT = BASIC TYPE OF FEATURE
 BASIC TYPE (0) = NULL
 BASIC TYPE (10) = GEOMETRY
 BASIC TYPE (20) = STRUCTURE
 BASIC TYPE (30) = PRODUCT
 FEATURE TYPE (1) = ENVIRONMENT
 FEATURE TYPE (2) = MATERIAL
 FEATURE TYPE (3) = FUNCTION
 FEATURE TYPE (4) = FIGURE

図4-11 属性内容データの記述

UNTIL
MODELED

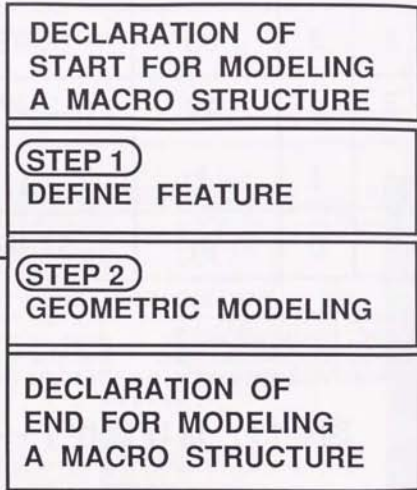


図4-14 マクロストラクチャ作成の
操作手順

MACRO STRUCTURE	ENVIRONMENT	MATERIAL	FUNCTION	FIGURE	SMOOTH LEVELS
ENVIRONMENT DATA	STD CONDITION	F - L C	SCREEN HOLE (CON)	DESIGNS INTENTION	EXPERIMENTALLY FIT
MATERIAL DATA	STRENGTH CHECK	T E	SUPPORT OBJECT		
FUNCTION DATA	HEAT CONDUCTION TEST	N I	SCREEN HOLE (LOAD)		
FIGURE DATA	ELECTRIC FIELD CHECK	C F	DIAMETRY SECTION		
E N D	VIBRATION TEST	N I - C F	H E A T E R		
		C F	ABRABATIC		
		N I - C F	INSULATOR		
		C F - M S	CONDUCTOR (100%)		
		N I - C F - M S	ENCLOSURE		
		E C F	CONDUCTOR (50%)		
			G R O U N D		
			S P A C E R		

MACRO STRUCTURE	ENVIRONMENT	MATERIAL	FUNCTION	FIGURE	SMOOTH LEVELS
ENVIRONMENT DATA	STD CONDITION	F - L C	SCREEN HOLE (CON)	DESIGNS INTENTION	EXPERIMENTALLY FIT
MATERIAL DATA	STRENGTH CHECK	T E	SUPPORT OBJECT		
FUNCTION DATA	HEAT CONDUCTION TEST	N I	SCREEN HOLE (LOAD)		
FIGURE DATA	ELECTRIC FIELD CHECK	C F	DIAMETRY SECTION		
E N D	VIBRATION TEST	N I - C F	H E A T E R		
		C F	ABRABATIC		
		N I - C F	INSULATOR		
		C F - M S	CONDUCTOR (100%)		
		N I - C F - M S	ENCLOSURE		
		E C F	CONDUCTOR (50%)		
			G R O U N D		
			S P A C E R		

図4-15 マクロストラクチャの定義画面例

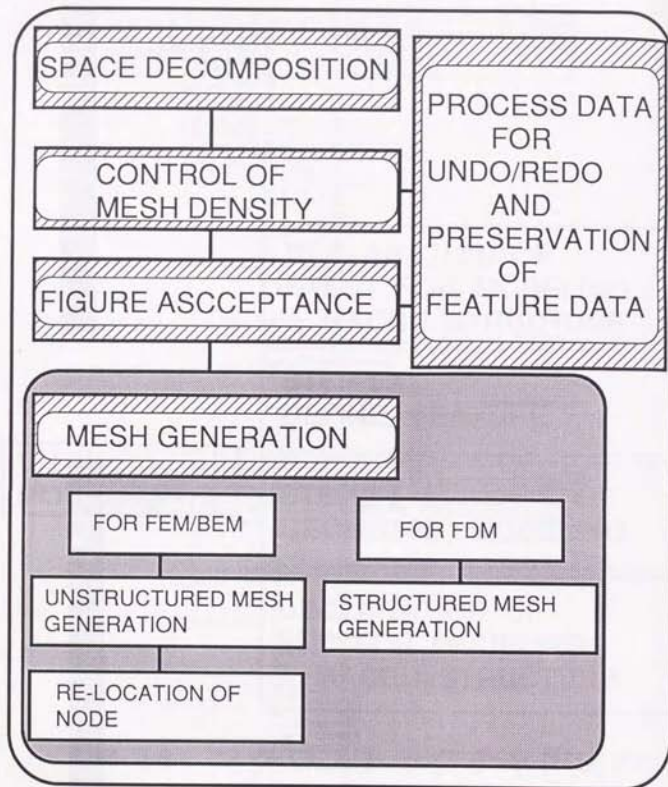


図4-16 拡張n分木法による要素分割
アルゴリズムの機能構成

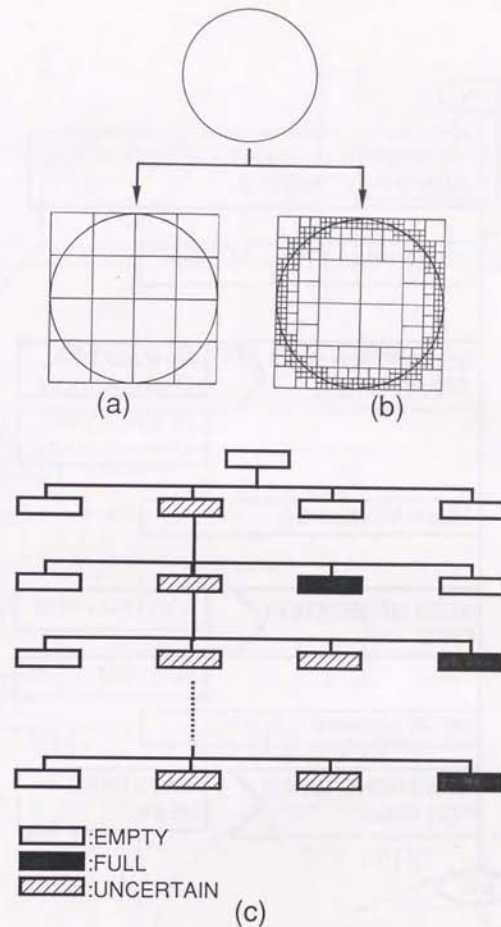


図4-17 4分木表現法による形状表現

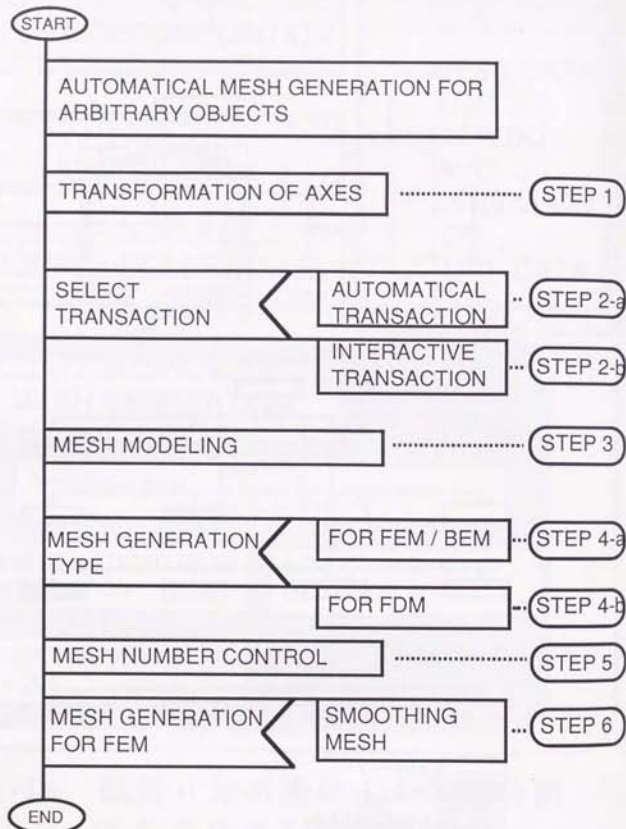


図4-18 拡張n分木法による要素分割処理の流れ図

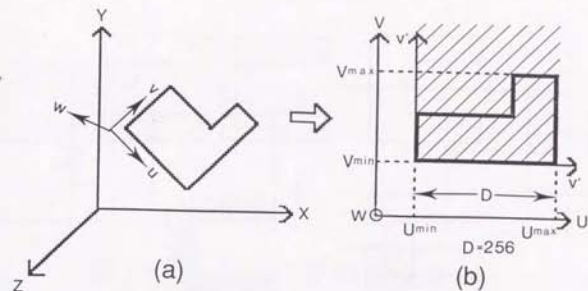


図4-19 基本座標系の設定

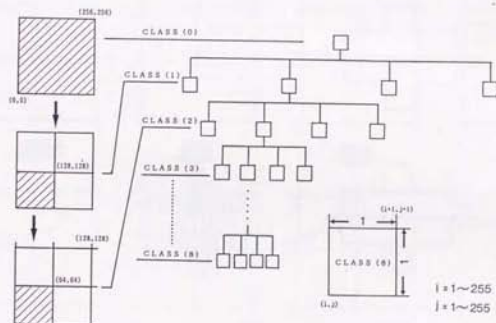


図4-20 4分木構造とクラス

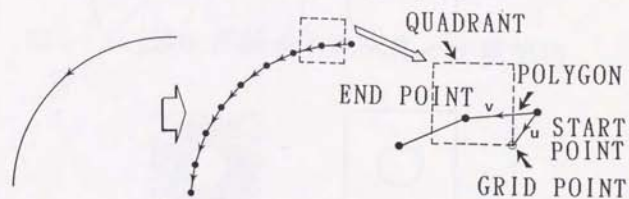


図4-21 包含関係フラグの設定処理

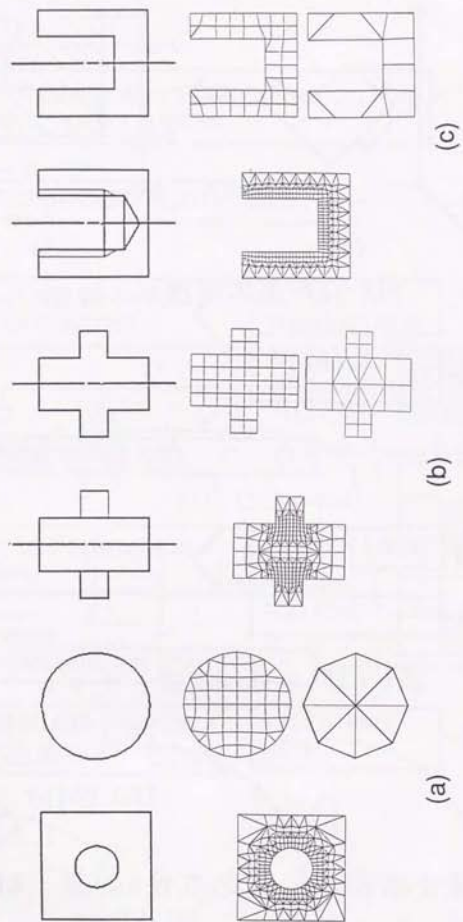


図4-22 粗密付け重要度の設定処理

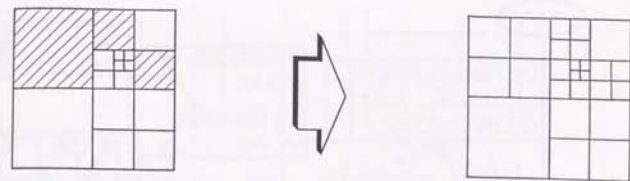


図4-23 クラス差の補正処理

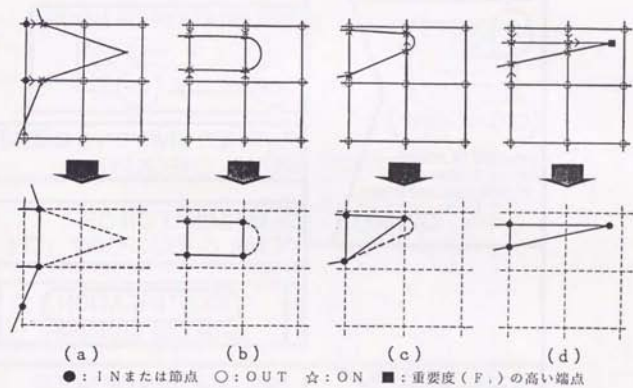


図4-24 形状表現の不完全性と特徴把握

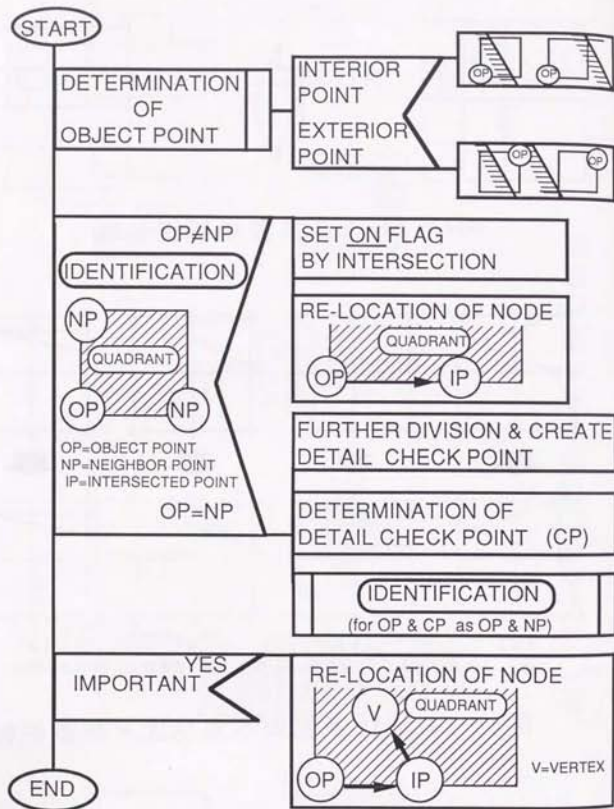
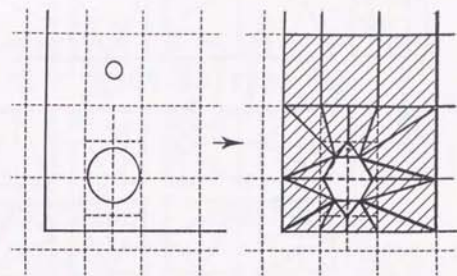
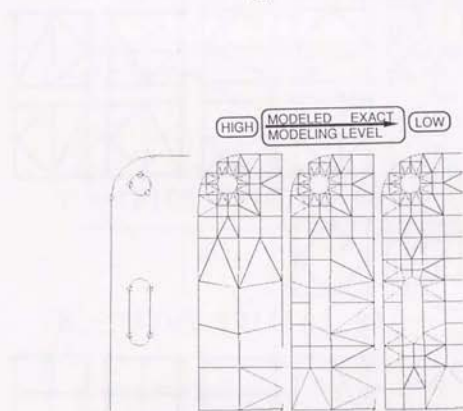


図4-25 形状特徴の把握処理の流れ図



(a)



(b)

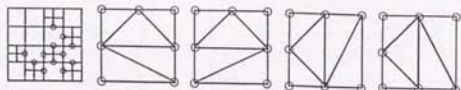
図4-26 形状特徴の把握処理例



(a) LATTICE POINT = 5



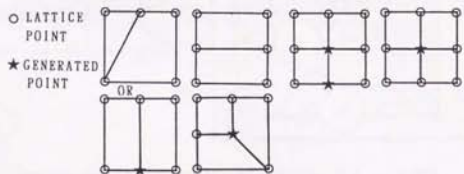
(b) LATTICE POINT = 6



(c) LATTICE POINT = 7



(d) LATTICE POINT = 8



(e) FOR QUADRILATERAL ELEMENT

図4-27 格子要素間の結合パターン

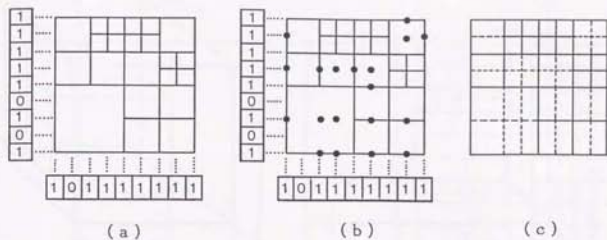
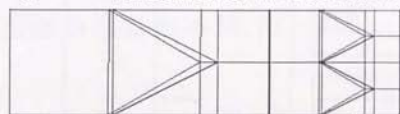
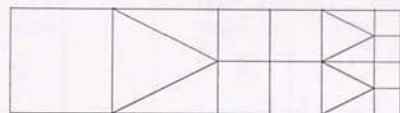


図4-28 差分メッシュの生成処理

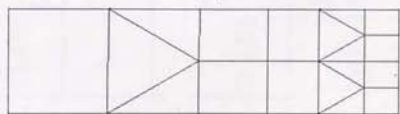
← DIRECTION OF RE-LOCATION



(a)

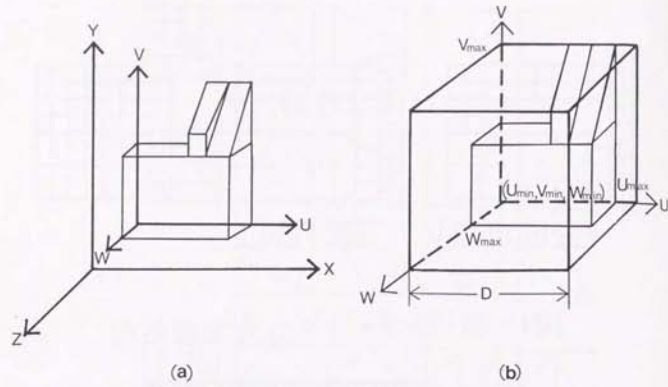


(b)



(c)

図4-29 要素平滑化処理



(a)

(b)

図4-30 基本座標系の設定

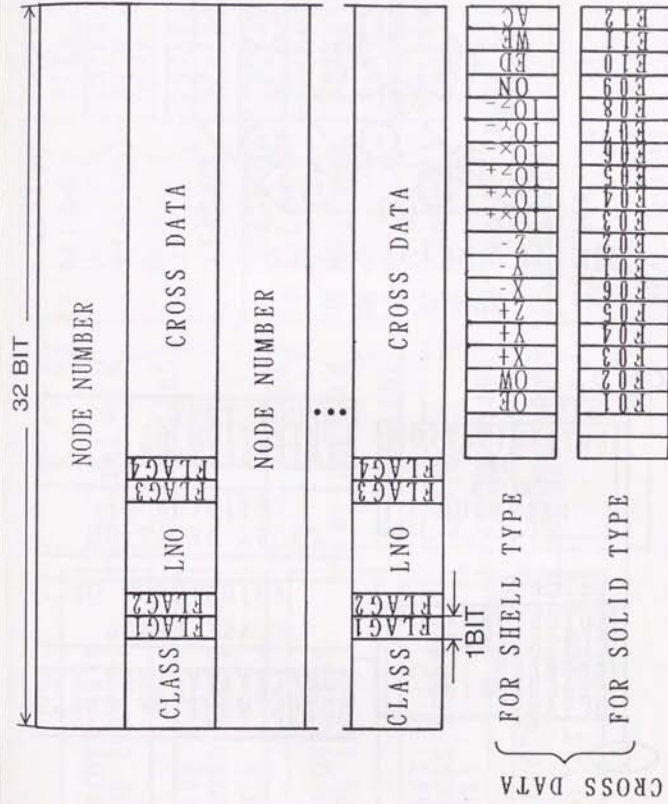


図4-31 分割情報のデータ記述

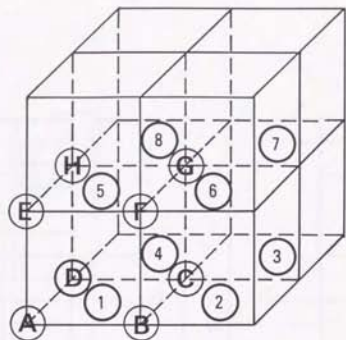


図4-32 8分木格子要素のノード番号と局所位置番号

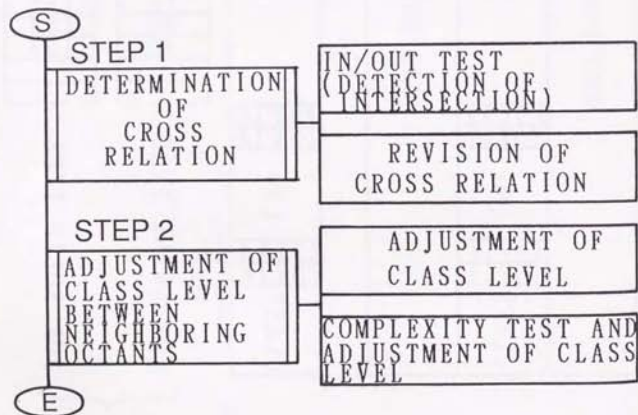


図4-33 形状特徴の把握処理の流れ図

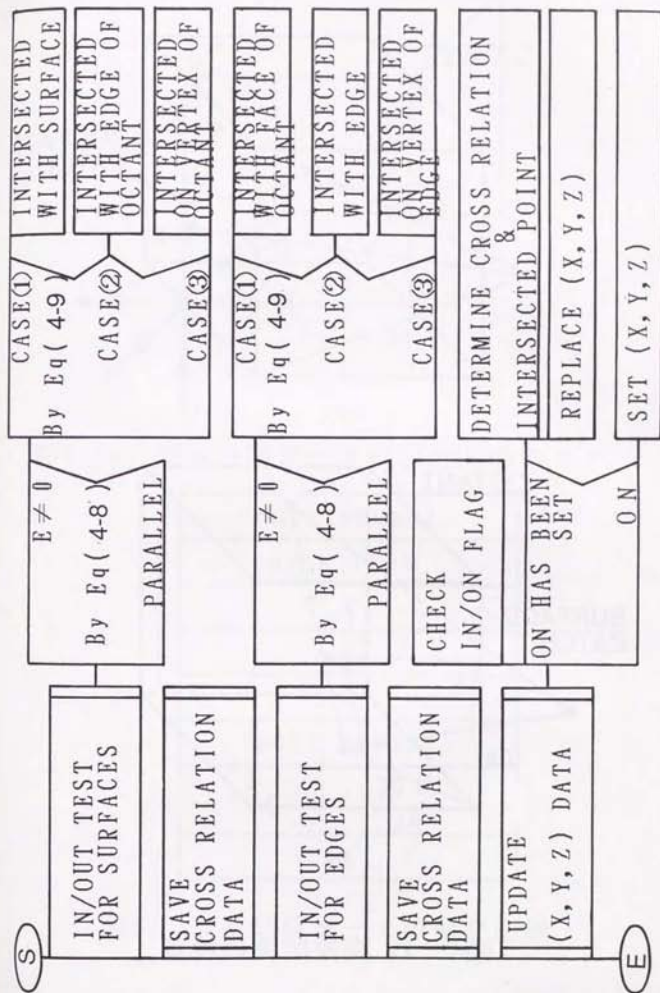


図4-34 交差関係の検査処理の流れ図

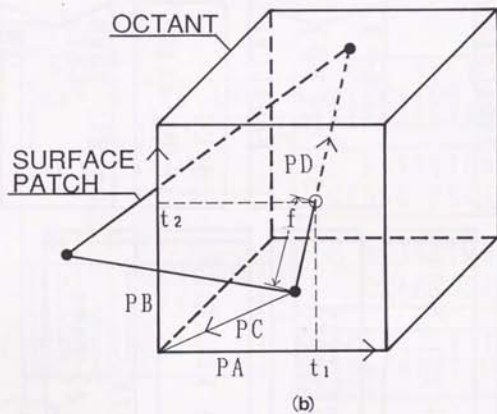
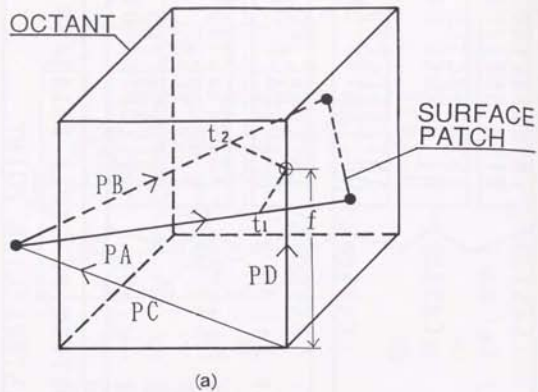


図4-35 交差関係の検査

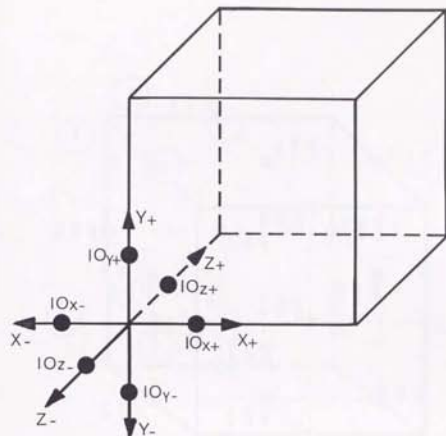


図4-36 交差方向データと包含関係フラグ

}	NODE NUMBER
	IN/ON FLAG
	X
	Y
	Z
	NODE NUMBER
	Z

図4-37 座標値データの保存領域

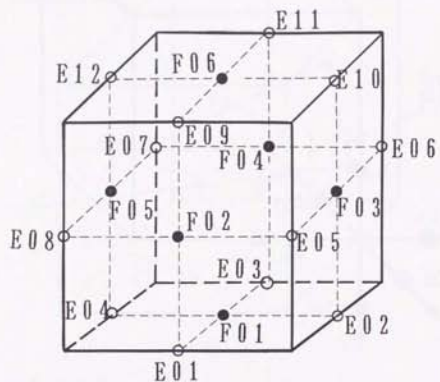
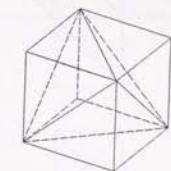
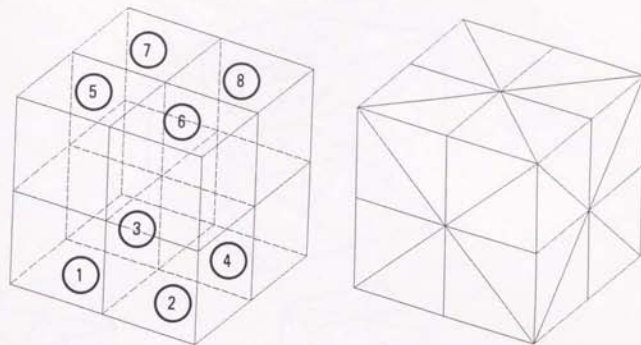
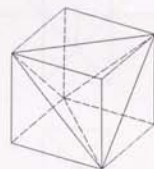


図4-38 ソリッドタイプの交差情報



FOR (1) (4) (6) (7)



FOR (2) (3) (5) (8)

図4-39 ソリッドタイプの要素分割パターン
(クラス差無し)

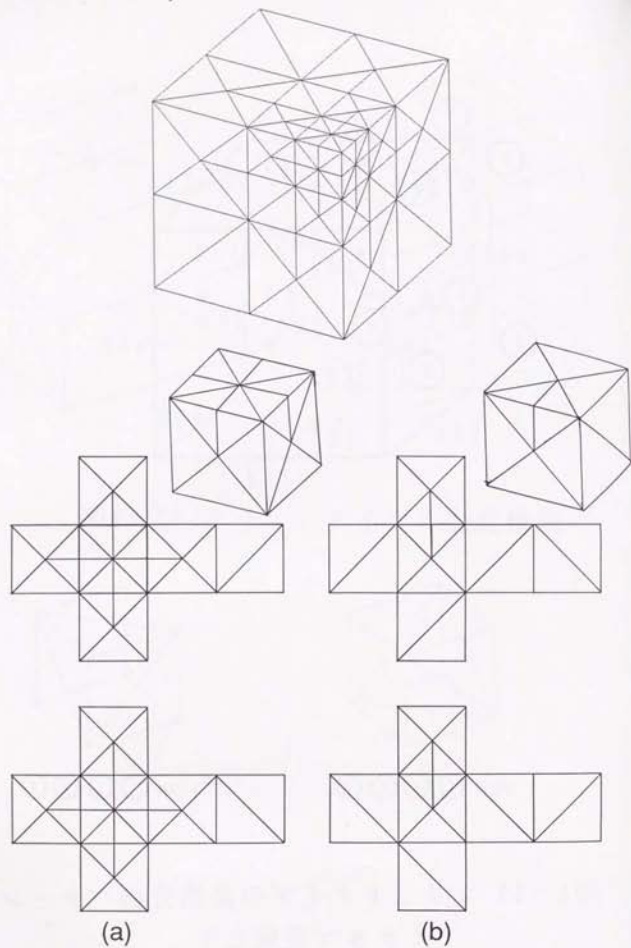


図4-40 ソリッドタイプの要素分割パターン
(クラス差有り)

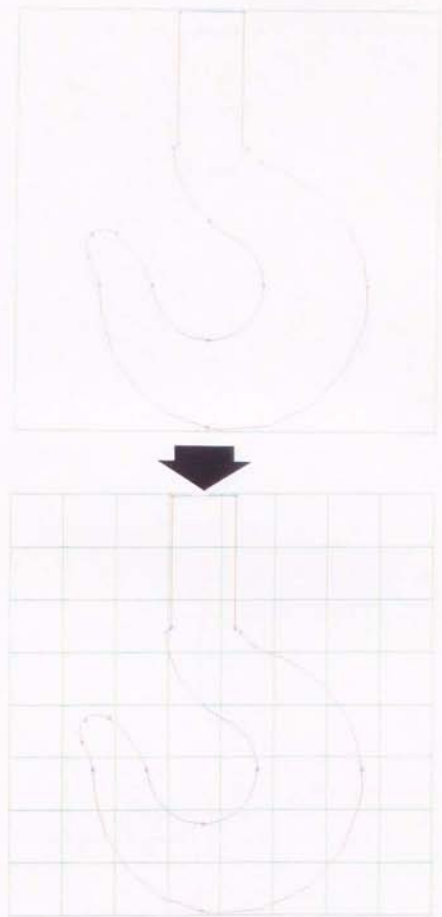


図4-41 対話処理による粗密付け
(全体粗さの指定)

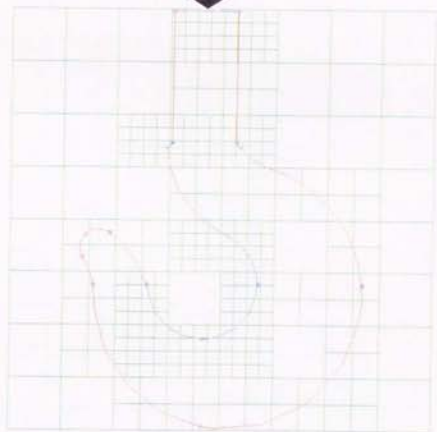
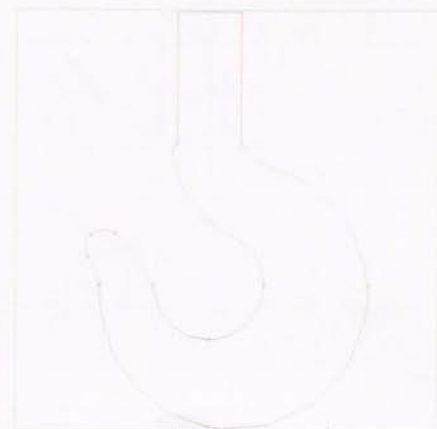


図4-42 対話処理による粗密付け
(自動処理への対話介入)

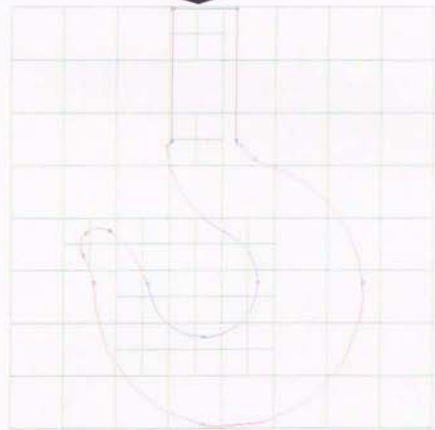
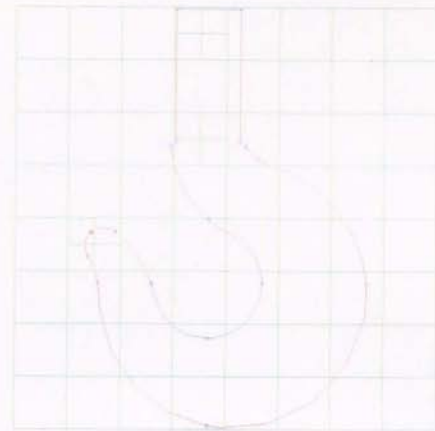


図4-43 対話処理による粗密付け
(領域指定)

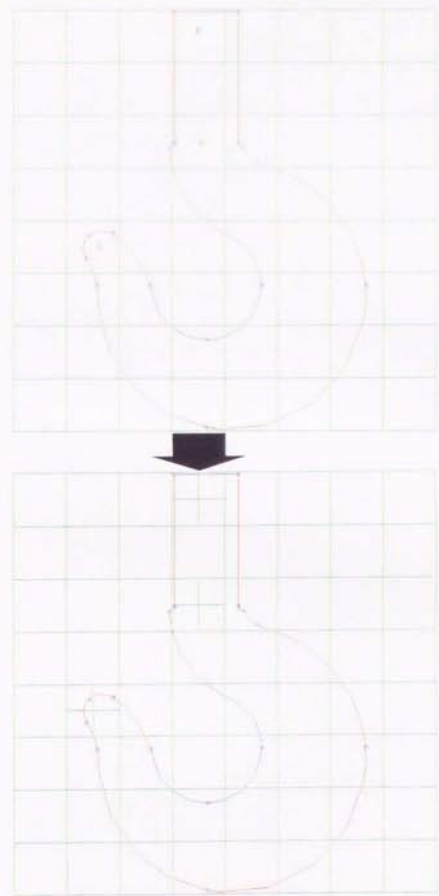


図4-44 対話処理による粗密付け
(格子要素指定)

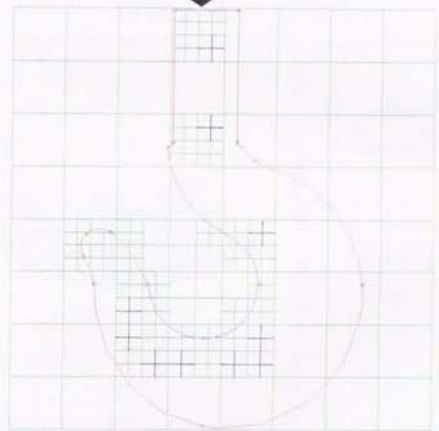
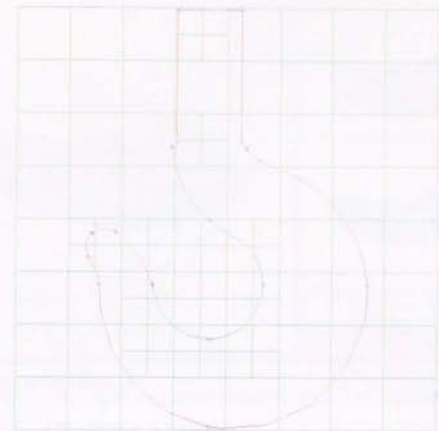


図4-45 対話処理による粗密付け
(クラス指定)

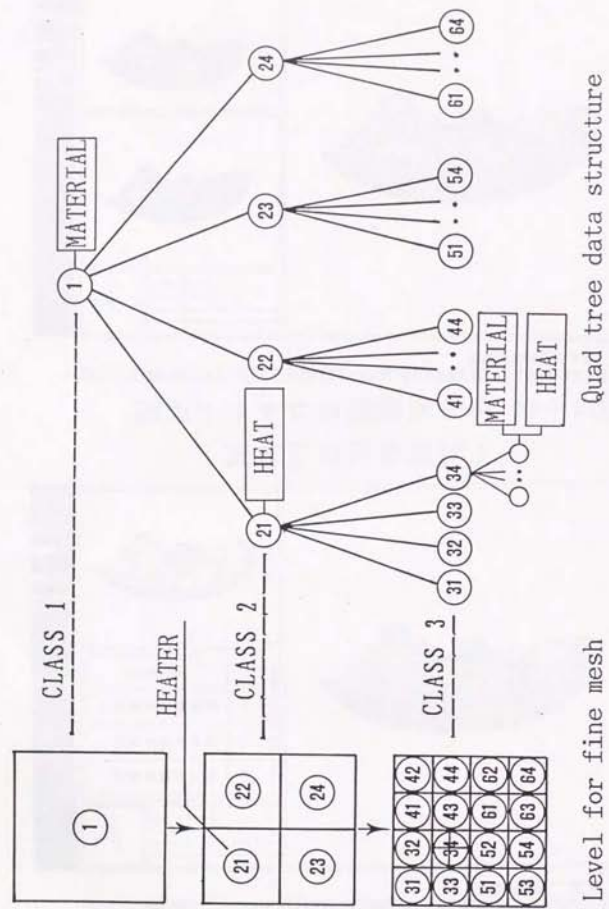


図4-48 過程情報処理部における
製品情報の保存と継承

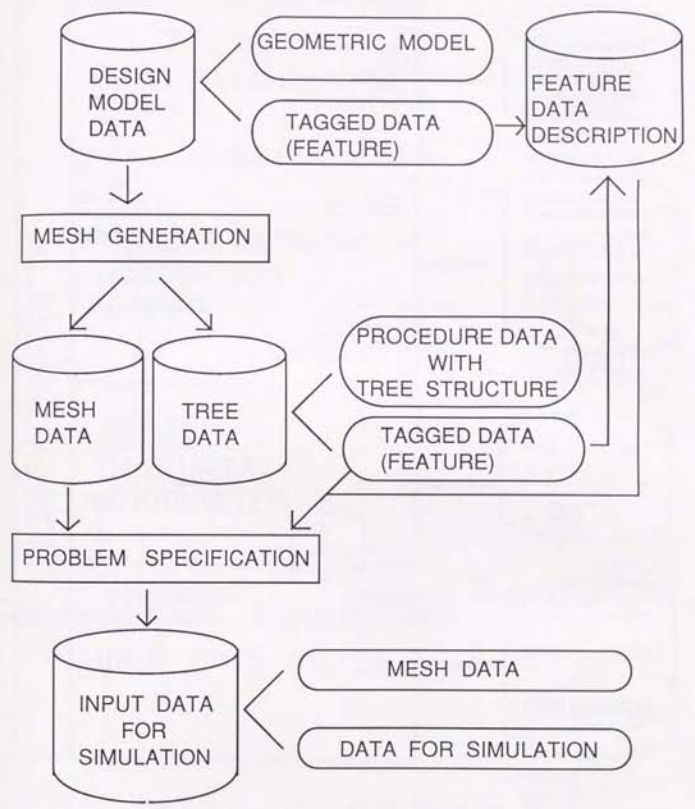


図4-49 シミュレーションプログラムの
入力データ変換処理

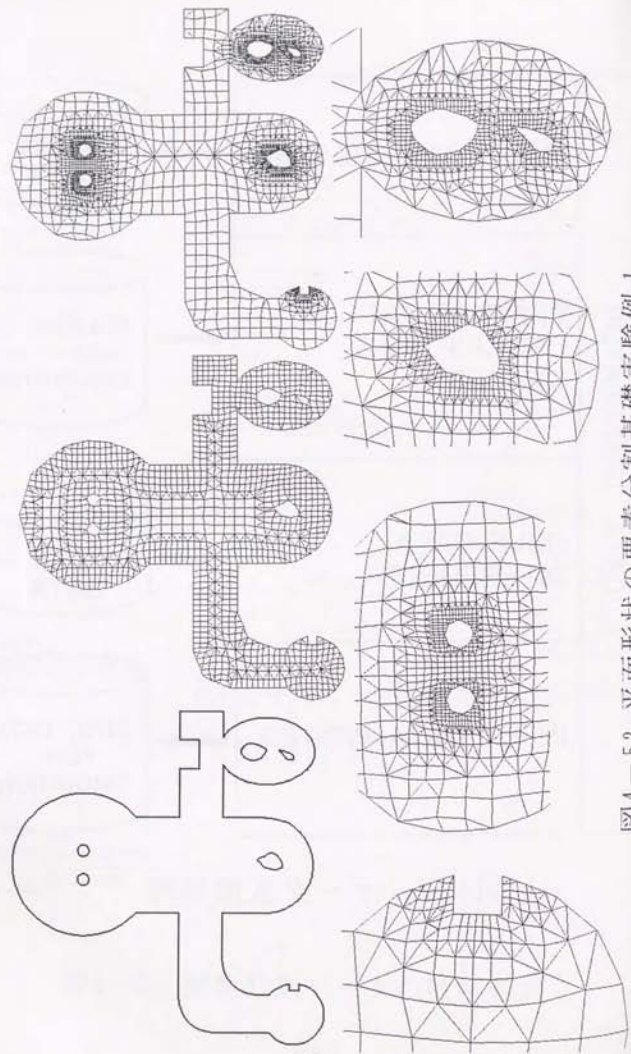


図4-52 平面形状の要素分割基礎実験例1

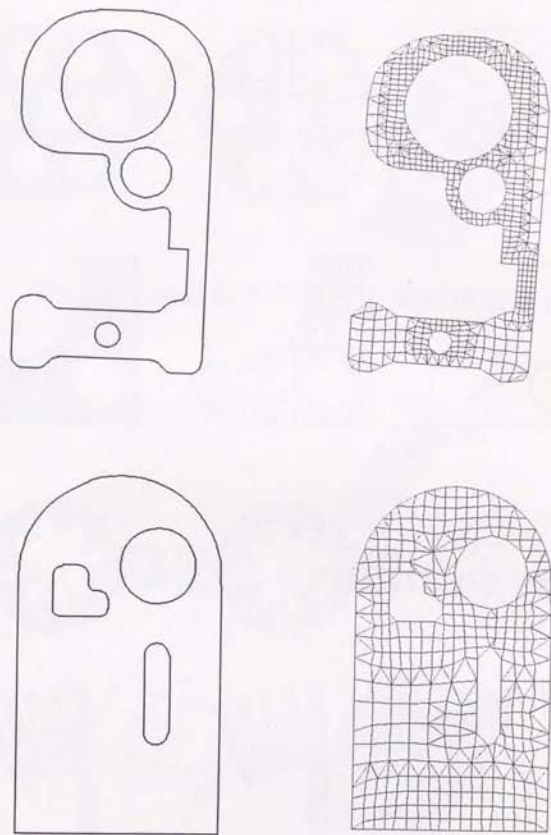


図4-53 平面形状の要素分割基礎実験例2

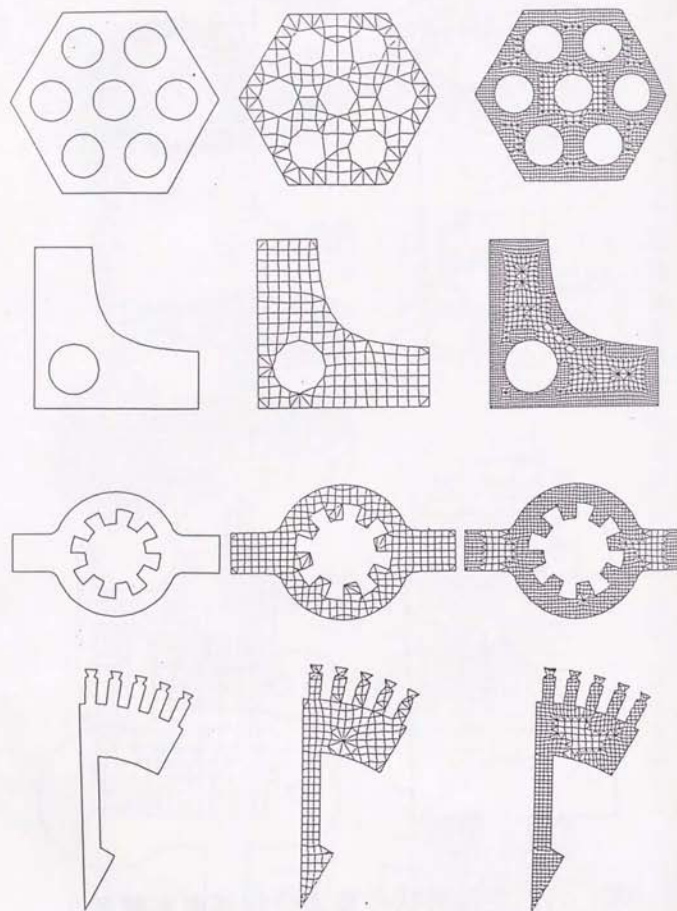


図4-54 平面形状の要素分割基礎実験例 3

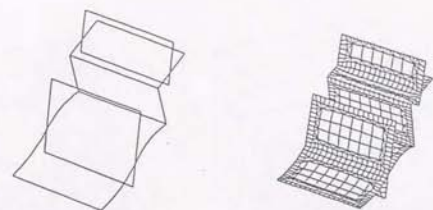


図4-55 曲面形状の要素分割基礎実験例 1

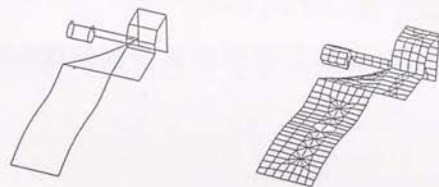


図4-56 曲面形状の要素分割基礎実験例 2

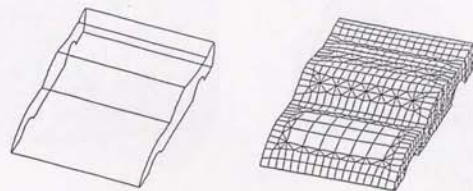


図4-57 曲面形状の要素分割基礎実験例 3

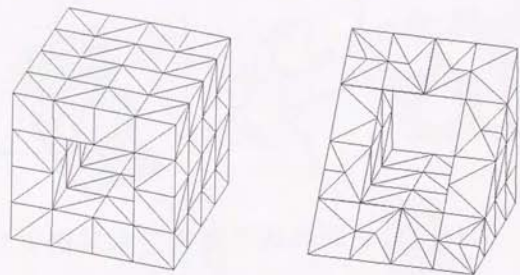


図4-58 立体形状の要素分割基礎実験例 1

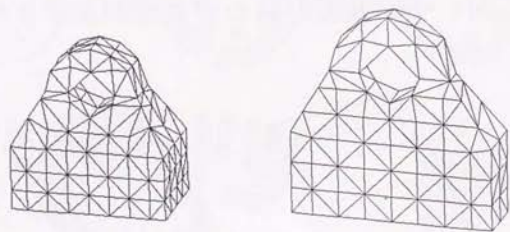


図4-59 立体形状の要素分割基礎実験例 2

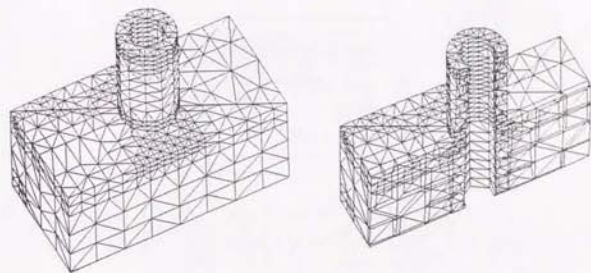


図4-60 立体形状の要素分割基礎実験例 3

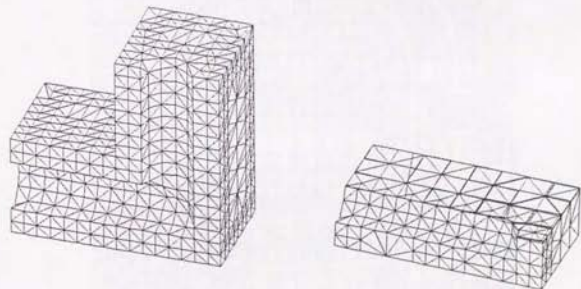


図4-61 立体形状の要素分割基礎実験例 4

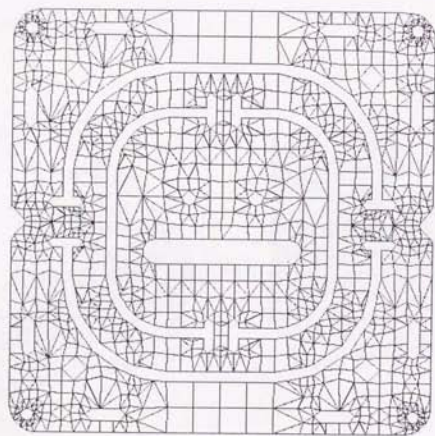
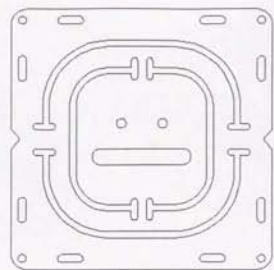


図4-62 F D D ジンバル

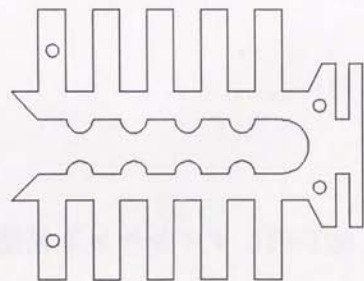
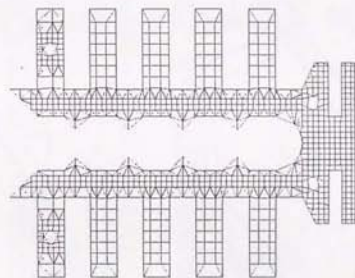
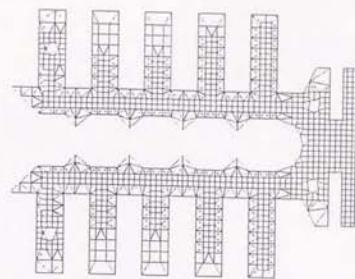


図4-63 ヒートシンク冷却フィン断面

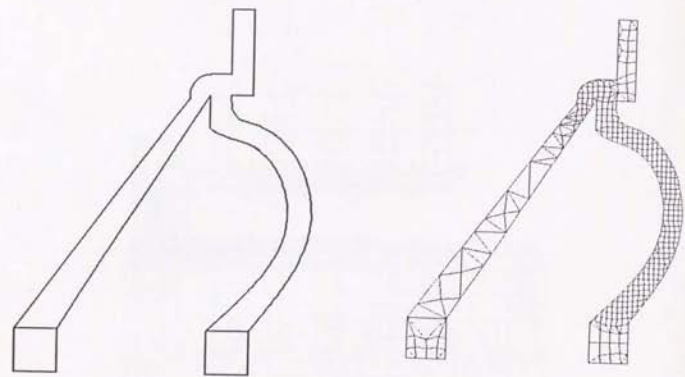


図4-64 ダイアフラム断面

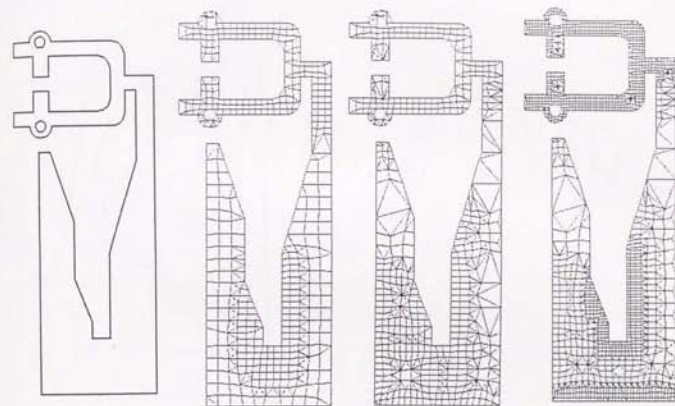


図4-65 磁気ディスクヘッド用アーム

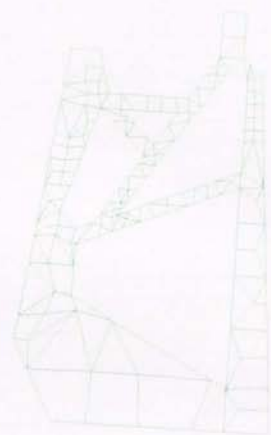
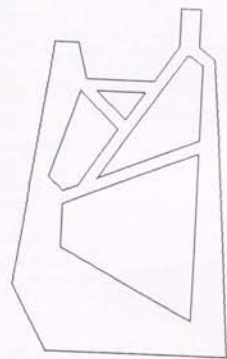


図4-66 補強構造用アーム

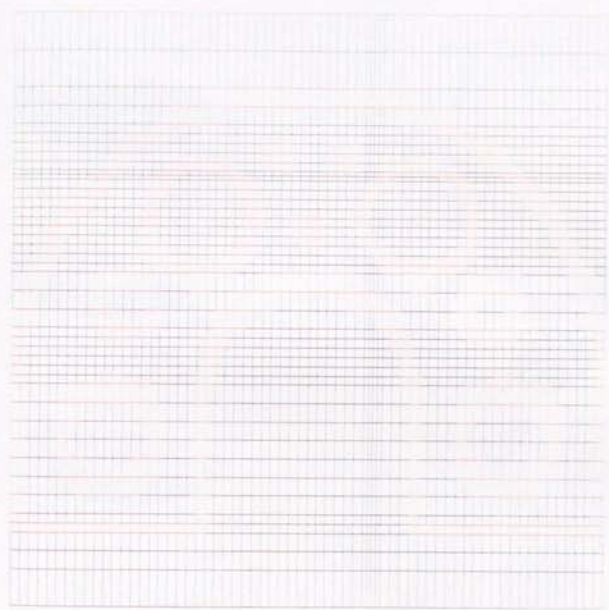


图4-67 冷却路断面

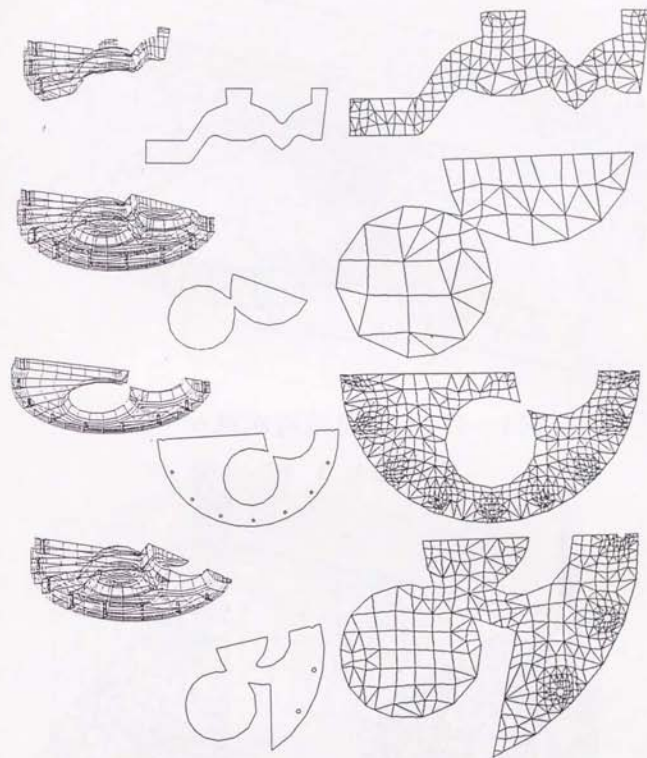


図4-68 ガス遮断器部品スペーサの任意断面

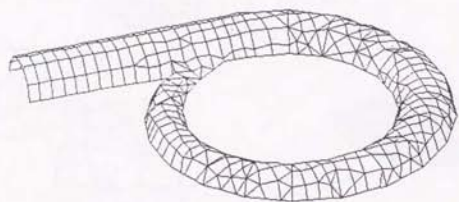


図4-69 水力発電用水車ケーシング

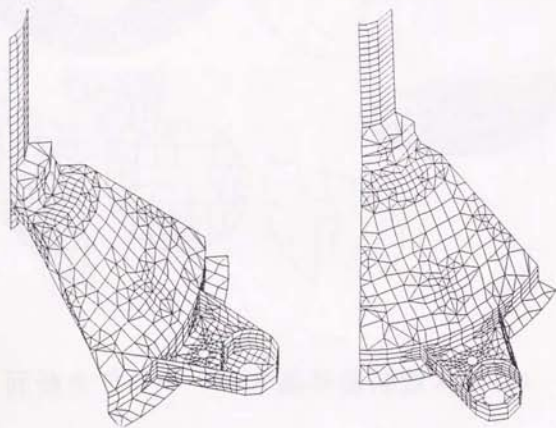


図4-70 洗濯機ギヤケーシング

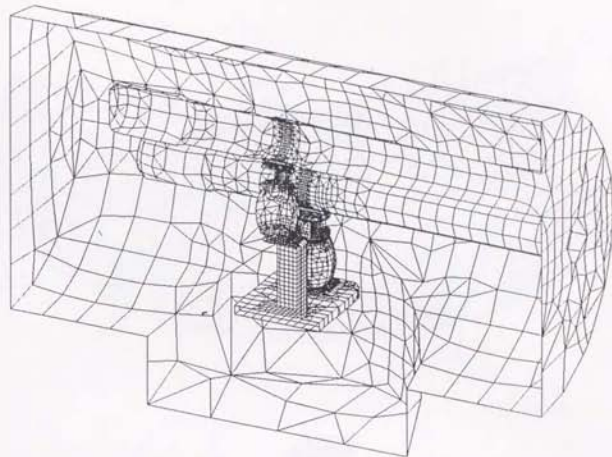


図4-71 ガス遮断器

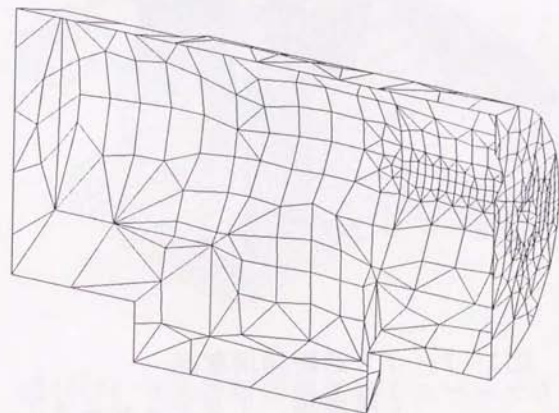


図4-72 ガス遮断器用部品（ケーシング）

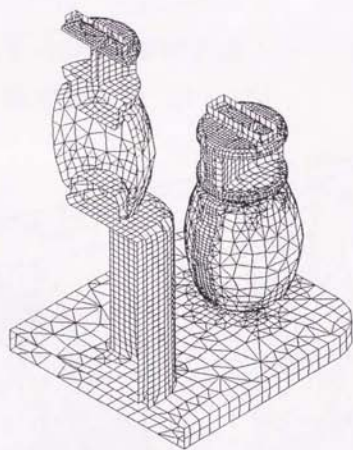
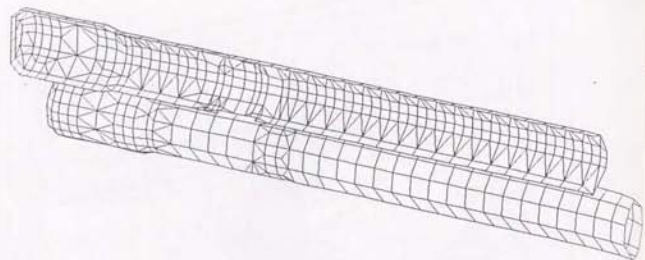


図4-73 ガス遮断器用部品
(接続棒, インシュレータ)

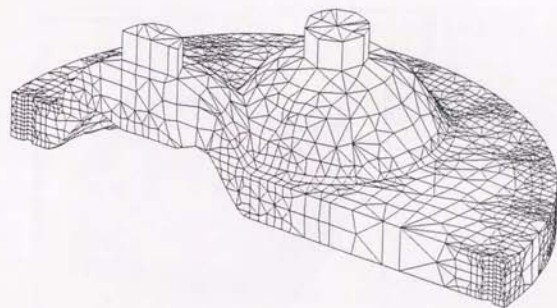
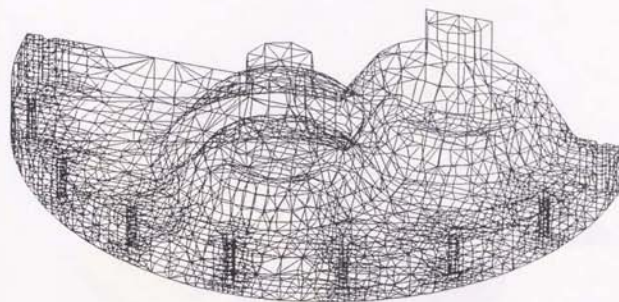


図4-74 ガス遮断器用部品 (スペース)

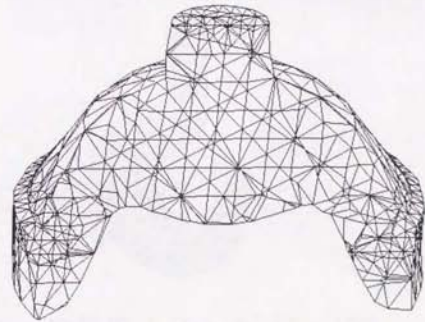
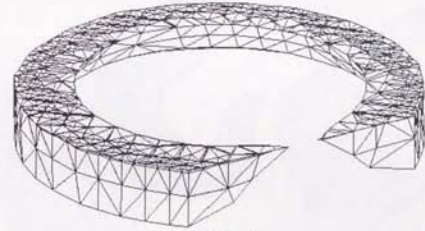
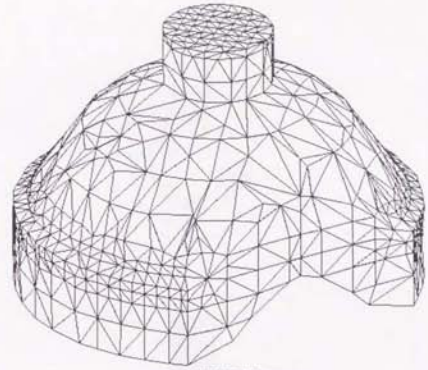


図4-76 ガス遮断器用部品（スペーサ）

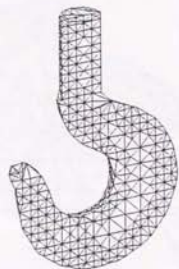
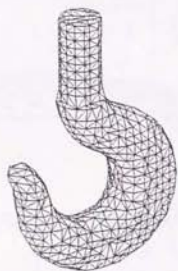
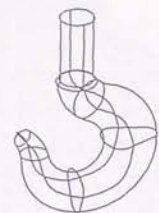


図4-77 ホイスト部品フック

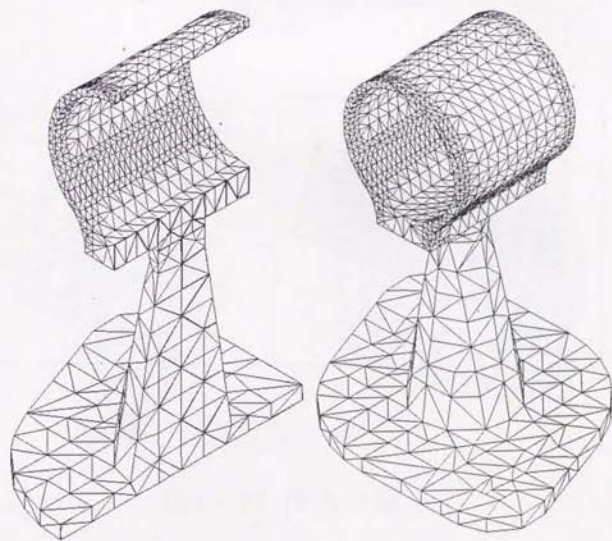


図4-78 超音波式アトマイザ

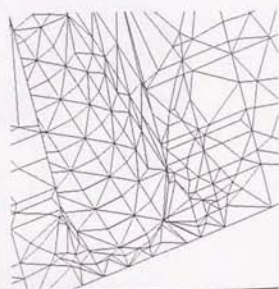
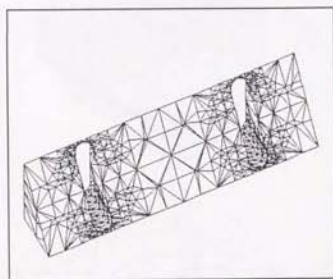
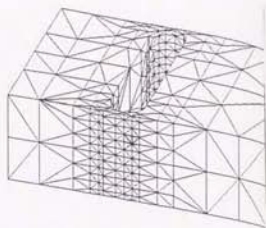
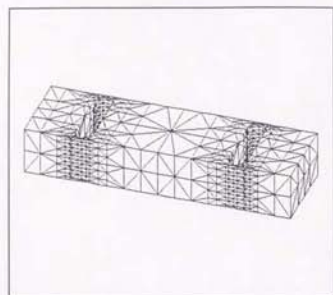


図4-79 建設機械用圧力センサ

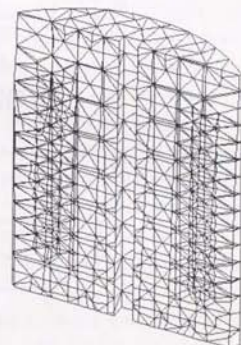
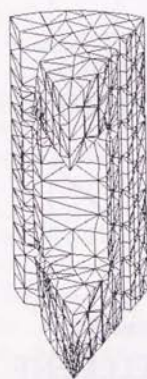
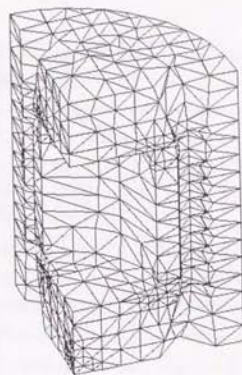
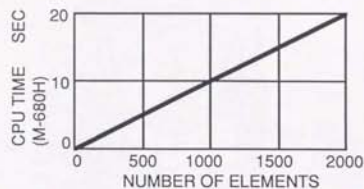
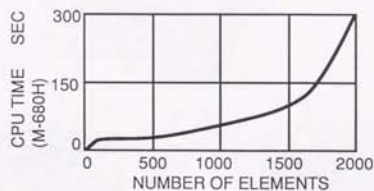


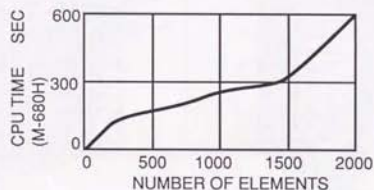
図4-80 圧力容器



(a) 2D PLATE ELEMENT



(b) 3D SHELL ELEMENT



(c) 3D SOLID ELEMENT

図4-81 要素数と計算処理時間
(HITAC M-680HによるCPU時間)

第5章 設計計算支援の周辺技術と 設計計算支援システムの開発

第5章は、設計計算支援システムを構築する上で必要な周辺技術についてその詳細を述べる。本章では、計算力学手法を用いたシミュレーションプログラムをユーザフレンドリィに支援する環境を提供するための仕組みについて述べる。設計業務のなかで計算力学手法を用いた各種シミュレーションプログラムのデータ入力やその結果の表示や評価を共通的に支援できるようにするためには、コマンドやメッセージ、ガイダンス、表示方法などをシミュレーションプログラムにあわせて自由に変更できる方式、すなわち、汎用的でありながら利用者や利用目的によって専用化が図れるようにする機能が必要である。そこでUMS (User Interface Management System, [187])の考え方を用いて、CAEのためのユーザインタフェース管理方式を実現することにした。5.1節では、このCAEのためのユーザインタフェース管理方式について述べる。本方式は、応用プログラム(処理部)とユーザインタフェース部を独立にモジュール化することによって、一方でユーザインタフェースの専用化手段を、他方でこれと対比する汎用化の手段を提供するものである。つまり、ユーザインタフェース部を独立に扱うことにより、内部処理と独立にユーザインタフェースを目的ごとに修正や変更をすることを可能とするものである。これにより、従来各種シミュレーションプログラムごとに、特に各部署特有の設計計算シミュレーションプログラムごとに使い易いユーザインタフェースの個別専用化が可能となる。また他方で、利用者が希望するところの汎用的なシステム、すなわち同じような操作方法で千差万別のシミュレーションプログラムを利用する環境を提供することも可能となる。

5.2節では、シミュレーションプログラムを容易に接続するための方式について述べる。本節で述べる各種シミュレーションプログラムとの入出力データインタフェースの実現方式は、データ変換則とそのインプリタによる処理方式で処理システムを一元化するものである。これらの方式を用いた理由は、メンテナンスビリティの向上や接続方式の一元性などもあるが、何よりも接続の容易さと利用者自身の手による拡張性にある。なぜならば、2.2.5項で述べたよ

うな従来の個別専用プログラムによる接続方式では、プログラミング技術と計算機環境操作の知識が必要不可欠となる。それと同時に、従来の方式だとプログラミング言語や実行環境などに依存するために、これらの環境に左右され易いなどの課題を含んでいるからである。

5.3節では、4章と5章で述べた要素技術を基本としたシステムを用いて実務に適用した例を示し、5.4節で本章のまとめを述べる。

5. 1 CAEのためのユーザインタフェイス管理システム

5. 1. 1 CAEにおけるユーザインタフェイスの課題

近年、対話処理を有する計算機を利用したシステムでは、利用者の嗜好に合わせたユーザインタフェイスが重視されている。現実的にも、購入者の好みにうまくマッチするか否かで製品の販売台数も左右されると言うことである[18]。それゆえに近年、利用者の嗜好を追従する傾向が強く、ユーザインタフェイスの改良は必至となっている。また、利用者の嗜好は、流行と同様に変化しやすく、十分な即応は困難である。そこで、これらの課題、すなわち、利用者の嗜好にあったユーザインタフェイスの構築や変更などを容易にするユーザインタフェイスの管理方式が重要となる。このことは、CADやCAEなどの設計業務を支援するシステムでは更にその傾向が強い。なぜならば、これらのシステムは業種や分野、部門ごとに微妙にあるいは大きく異なる作業を汎用的に支援すると同時に、他方でそれを利用する多くの設計者のスタイルに対応する必要があるからである。CAEにおいては、この問題が次第に顕著に具体的な問題として現れてきている。それは計算力学手法を用いたシミュレーションによる設計計算業務が日常的な設計計算手段として定着すればするほど、この問題が顕著に現れてきているようである。具体的には、以下のような事柄が現状の問題点としてあげられる。

①CAEシステムとして提供されている道具は、設計案の確認を行うという作業よりも、シミュレーションプログラムの入出力データを作成するという作業を支援する道具となってしまっている。そのためシミュレーションプログラムの特長や利用方法に関する知識や経験が必要であると同時に、システム操作なども含めた学習量が膨大であるなどの問題がある。更には、シミュレーション

プログラムを支援するシステムがシミュレーションの手法や種類ごとに存在し、運用上及び管理上問題がある。

②設計者は一般にシミュレーションプログラムの入力データを作成することを不慣れとしているため、現状のCAEシステムは設計者自身には利用しづらいところがある。そのためCAE専任者を育成しなければならず、本来の省力化や効率化を目的とした効果があげられないという問題が考えられる。

これらのCAEシステムの実際の利用や運用における問題を解決するためには、各種シミュレーションを統合的に支援できるCAEシステムを構築する必要がある。具体的には、有限要素法、境界要素法、差分法などの手法別、または構造、熱、流体などの分野別に異なる解析条件や出力情報などに対応する必要性や個人の好みによる表示や入力手段の違いに対応する要求を満足させなければならない。そして、これらの基礎技術として第4章でモデル化方法や要素分割方法について述べた。しかしながら、基礎技術だけでは実際の設計業務への応用は難しい。そこで、これらの基礎技術を補足するために、ユーザインタフェイス部分に柔軟性を持たせることで各種シミュレーションを統合的に支援できる環境を構築することにした。つまり、設計者と計算機の接点である表示画面の定義部分をユーザインタフェイス情報としてシステム外部で別途定義できるようにして、その情報、例えばメニュー情報を利用者の嗜好に合わせて変更、改造することのできるCAEのためのユーザインタフェイス管理方式を構築する。本ユーザインタフェイス管理方式は、メニューの内容や表示情報の提示方法などをシステムの操作中にでも動的に変更、修正、削除、追加などの作業を行うことができることを特長とするものである。

5. 1. 2 ユーザインタフェイス管理方式

従来のCAEにおけるユーザインタフェイスは、システム側が提供するコマンド群と表示形式が固定化されたものであった。そのため、有限要素法を用いたシミュレーション支援システムなどのように特定の手法か、または特定の分野を専用的に支援するシステム構築方法しか実現できなかった。そこで、ユーザインタフェイス部分をCAEシステムの処理部本体から独立させることで、ユーザインタフェイスの内容を応用プログラム実行中にでも変更、修正、削除、追

加できるようにすることにより、入力や出力操作に依存してシステムの内部処理の変更をしなくても良くする事と、同一のユーザインタフェイスのもとで種々のシミュレーションプログラムが利用できる統一環境を構築することにした。これらのことを達成するために、以下に述べるような機能を用いて図5-1に示すようなCAEのためのユーザインタフェイス管理システムを構築する。図5-1に示すシステムにおいて主な役割を果たす機能は、

①外部記憶装置内に保存されているユーザインタフェイス情報すなわちユーザインタフェイス定義体を取り出ししたり、あるいは、書き換えたりしうるユーザインタフェイス定義体の入出力処理機能

②コマンドなどの入力処理と図形やメッセージなどの表示や出力処理などの入出力処理を行う機能

③上記①と②の入出力機能を制御し、これらの入出力情報を管理する機能の三つである。ここでユーザインタフェイス定義体の記述内容は、以下に示すデータからなる。

①コマンドデータ：コマンド名称、コマンドガイダンスと入力パラメータからなるコマンドの外部仕様に関するデータである。名称とガイダンスは文字数の制限はあるが自由に変更可能である。入力パラメータは、文字列入力と図形要素指示入力そして画面上点入力の三種類からのみ選択可能である。入力パラメータにおいてもこれら三つのうち任意の入力形式が選べる。

②メッセージデータ：システムからのメッセージに関するデータである。コマンドデータの名称やガイダンスと同じく、文字数の制限はあるが自由に設定及び変更可能である。

③表示制御データ：文字色、線色、塗り潰し色、カラーパターンやカラーパレットなどの表示色や表示モードに関するデータである。表示モードとは、アニメーション時のコマ数や時間ステップなどモデルの表示方法などに関する設定値データである。

④プロシージャデータ：バッチ処理のためのJCL (Job Control Language) などに代表される定形的な処理や操作を記述するデータである。

⑤メニューデータ：コマンドの呼び出し順序や入力パラメータの変更に伴うサブメニューの定義を行ったりするためのデータである。

本方式においては、上記ユーザインタフェイス定義体に記述したデータについて変更、修正、削除、追加などの操作を行うことができる。その具体的な例を以下に簡単に述べる。前記①のコマンドデータにおける名称やガイダンスを変更することにより利用者に分かり易い用語に置換することができる。具体的には、設計計算モデルの属性名称や解析条件の名称などをその設計部署特有のものに変えたりすることが可能となる。また、類似したコマンドでありながら手法別に異なるコマンドの名称や機能を統一することも可能となる。②のメッセージデータも同様に、利用者に分かり易い用語に置換することができる。③の表示制御データを変更、修正、削除、追加するとにより、目的にあったドキュメントの作成が容易になると同時に操作性の向上が図れる。④のプロシージャデータは、定形処理や操作あるいは特有の処理を行うときに有効となる。最も簡単な例がシミュレーションプログラムの実行JCLの記述である。⑤のメニューデータを定義することにより、利用者特有のコマンド体系や操作手順を作成できる。

5. 1. 3 ユーザインタフェイス管理システムの構築と実験

本項では前項で述べたユーザインタフェイス管理方式を具体的に構築し、実験した結果について述べる。まず初めに、ユーザインタフェイス定義体の具体的な内容を図5-2に示す。図5-2の(a), (b), (c), (d), (e)は、それぞれコマンドデータ、メッセージデータ、表示制御データ、材料データ、そしてメニューデータの記述例の一部である。また、それぞれの表示画面上でのイメージを図5-3の(a)から(c)と図5-4の(a)と(b)に順に対応させて示す。図5-2と図5-3及び図5-4に示すようにユーザインタフェイス定義体と表示されているユーザインタフェイス情報は平易な形式で対応している。それゆえにユーザインタフェイス定義体の記述内容を変更したりすることで、ユーザインタフェイス部分を専用化したり各種シミュレーションを統合的な環境で支援することが容易になる。以下、このユーザインタフェイス管理方式の処理概要とユーザインタフェイス定義体の記述内容の変更方法について述べる。

本CAEシステムにおけるユーザインタフェイス管理方式は、図5-5に示した流れ図のようにになっている。図5-5において、本体であるCAEシステムが起動

されるとユーザインタフェース定義体に記述されている内容を、ユーザインタフェース定義体入出力機能 (UI DATA ACCESSOR) がユーザインタフェース管理機能 (UI DATA MANAGER) の内部情報として取り込む。この状態でCAEシステムは通常の処理が可能な状態となる。以下、ユーザインタフェース提示機能 (UI DATA PRESENTER) が表示装置にユーザインタフェース情報を提示していくことによって、対話処理が可能となる。利用者がユーザインタフェースに関する情報を更新する場合は、システムが常時提示している基本コマンドのうちユーザインタフェースの更新に係わるコマンドの選択をする。ユーザインタフェースの変更、修正、削除、追加に係わるコマンドが選択されると、選択された機能が稼働する。例えば、利用者が具体的にメニューのコマンドガイダンスを変更したいとすると、利用者は変更したい内容を入力する。すると、ユーザインタフェース定義体入出力機能は、ユーザインタフェース定義体の変更すべき部分を修正する。以上のような方式で、ユーザインタフェース定義体の内容を保守管理する。ここで、より具体的な例を用いて、ユーザインタフェースを変更する例を示す。図5-6は、静電場解析における電圧の等高線図表示画面である。図5-6のカラーバーは、電圧の分布を色で示すためのスケールである。この場合利用者が電圧分布の色を変更したいとした時、利用者は表示情報変更コマンドを指示する。するとシステムは、図5-7のような変更可能なユーザインタフェース情報を表示し、利用者にどの部分を変更するのか指示待ち状態となる。そこで利用者が図5-7の等高線図用カラーバーを指示すると、システムは図5-7のカラーバーの色コードを指示入力可能な状態にする。そして、利用者が図5-7において、カラーバーの色コードのうち一色と色パレットのうち一色を指示入力する操作を行い、カラーバーの色コードを変更する。すると、図5-7のカラーバーの色コードのうち指示されたもののみが、図5-8のように変更される。最後に、利用者が、ユーザインタフェースの更新を終了させるコマンドを指示入力する。変更されたユーザインタフェースデータは、外部記憶装置に記憶されているユーザインタフェース定義体の内容を記述変更する。以後、変更されたデータがユーザインタフェース定義体の内容として扱われることになる。続いてシステムは、ユーザインタフェース変更処理前の状態、すなわち、図5-6で示す電圧の等高線図表示画面に戻り、変更されたユーザインタフェース

定義体の内容に従って、図5-6のカラーバーとモデルの表示を再度行う。その結果は、図5-9に示す通りである。以上で変更処理が終了する。

他の実験例として、コマンドガイダンスを修正する例を図5-10と図5-11に示す。図5-10において、利用者がコマンドガイダンスを修正したい時、表示制御コマンドを指示して修正操作を行う。この場合、コマンドガイダンスの面分布荷重をプレス圧力と修正すると、システムは図5-11のユーザインタフェース定義体内容を(a)から(b)のように書き換え、図5-10のコマンドガイダンスを(a)から(b)に修正する。

以上のように本方式によれば、入力したユーザインタフェースの更新を容易に行うことができる。

5. 1. 4 プリプロセッサにおけるユーザインタフェース管理システム

本システムにおけるプリプロセッサの位置付けは、基本的に補助入力手段としている。つまり、4章で述べた設計計算支援方式による全自動処理を補う場合が発生した時の補助入力手段として具備する。それゆえにプリプロセッサの役割は、従来のものと何ら変わらない。すなわちその役割は、要素分割モデルにシミュレーションのための入力データを付加することであり、具体的には節点や要素に境界条件などのデータを付与することである。この時の課題となるのは、有限要素法、境界要素法、差分法などの手法別、及び構造、熱、流体などの分野別に異なる解析条件や個人の好みによる表示手段の違いに統一的に対応できるようにすることである。この入力データの付加処理は、手法や分野が異なっても、それぞれのプリプロセッサのなかでは基本的に同じ処理が行われている。それゆえにプリプロセッサの処理は、情報処理的には統一的に行うことが可能である。手法や分野などが異なることにより問題となるのは、節点や要素に与えるデータの名称や形式がそれぞれ異なっていることである。ここで単に言葉の違いと言っても意外と安易に考えられがちだが、言葉の違いに関する学習 (新しい知識の習得) の効果は無視できないことに注意すべきである。そして、それは単なる単語変換や暗記ではない。例えばねじ止めしてある部分を構造解析の拘束条件として入力するとき、全拘束とするか、2方向変位固定の圧着拘束とするかなどの拘束条件に関するモデル化を考えなければなら

らない（設計者はねじ止め、構造解析者は拘束条件と言う言葉を使う）。だから外部仕様である言葉は内部処理を正確に表現する必要があり、言葉の違いに対応することが重要となる。単純な例を用いてプリプロセッサにおける本機能について具体的に述べると、全拘束するというコマンドをねじ止めであるというコマンド名称に変更する操作が可能となる。更には、ねじ止めの意味として、全拘束であるとか荷重を加えるという意味を与えることができる。このことは、各利用者ごとにシステムのコマンド群などを個人用に専用化したり、各種シミュレーションに対して汎用的にコマンド群を構築したりすることが可能となる。図5-11から図5-14に各種手法別の分野の異なるシミュレーションプログラムのユーザインタフェースの画面例を示す。図5-11は、有限要素法で応力解析の場合のもの[177]、図5-13は境界要素法による静電場解析を目的とするシミュレーションプログラムのものを示す[189]。そして、図5-14に差分法による流れ解析を行うプログラムの入力画面を示す[180]。それぞれの画面が示すようにVIMSをサブシステムとして包含する本CAEシステムでは、統一的な環境で各種手法や分野別シミュレーションを支援することが可能である。

5. 1. 5 ポストプロセッサにおけるユーザインタフェース管理システム

ポストプロセッサにおいてもプリプロセッサと同様に、VIMS機能を持つ必要がある。例えば、物理量名称を固定化して表示コマンドを構築したのでは種々のシミュレーションプログラムに対応しきれない。そこで本プロセッサでは、物理量名称を独立に扱うことにした。まず、物理量は、①ベクトル量と②スカラー量と③2階のテンソル量の三つに機能分けする。また、物理量の固有名称はVIMSのシステムファイルに登録しておく。表示機能は①等高級表示、②テンソル（ベクトルを含む）量表示、③グラフ表示、④数値情報表示、⑤ダイアグラム表示、のように分ける。そして、これらの表示機能を一単位としてコマンド化することで、CAEシステムとユーザインタフェースシステムの有機的な結合を図った。各コマンドでは表示処理可能な物理量名称の一覧表をシステムファイルから取り出して表示させ、利用者の指示に従いその物理量の表示処理を行う。ここで、表示処理可能な物理量名称とは、ベクトル量を持つものあるいはスカラー量を持つもの、及びその両方の場合などがある。ここで、計算力学手法

を用いたシミュレーションで扱う物理量は、一般に多種に渡り数多くあることから、システムとして利用者に物理名称の一覧表を提供する場合、その扱いには注意を要する。例えば、応力という物理量は主応力、垂直応力、剪断応力などの詳細な物理量に分解する。更にそれらは、各成分（最大、最小、X方向、Y方向、Z方向など）を持つ。そのため、すべての物理量を一度に利用者に提示し選択させようとする、その量は一般に膨大となる。結果的に、利用者は選択のために物理量名称を検索する必要にせまられ、操作性が低下することになる。そこで、これらを効率良く利用者に提供するために、物理量をグルーピングできるようにした。本システムではグルーピングの階層は2階層とし、その上位を大局名称、下位を局所名称と呼ぶことにする。また、このグルーピングは利用者にとって任意である。例えば応力の場合、大局名称を応力として局所名称をX方向垂直応力、8面体剪断応力などとする方法もあるし、大局名称として主応力を用い、その局所名称として最大X方向主応力などとすることも可能である。図5-15と図5-16に物理量名称の表示例を示す。本例は、境界要素法を用いた静電場解析の場合のものである。図5-15は物理量名称の大局名称のリストであり、図5-16は指定された大局名称の中の局所名称である。この例で言えば、大局名称である沿面電界値の詳細情報として沿面電界方向成分などの局所名称を持つ物理量があることを表している。

一方、ポストプロセッサでは、コマンドだけでなく表示方法に関する細かい指定ができることも重要である。その一つの例として5.1.3項でカラーパターンの修正の例をあげた。その他にも木目の細かい表示方法の指定が可能となることが利用者の要求としてあるが、そのすべてに対応することは困難である。そこで、本ポストプロセッサが持つ表示機能について、オプション性をシステムの制御可能な範囲で設置した。

5. 2 シミュレーションプログラムとのデータインタフェース手法

5. 2. 1 データインタフェースの基本方針

CAEシステムの利用の範囲が拡大してくると、当然のことながら目的ごとに適したシミュレーションプログラムを用いて解析するニーズが増えてくる。そして、シミュレーションプログラムとCAEシステムのデータの授受を取り扱う

データインタフェイスプログラムをシミュレーションプログラムの数だけ作成する必要が生れる。しかしながら、目的ごとに適したシミュレーションプログラムを用いるというニーズに対して、シミュレーションプログラムとのデータインタフェイスを個別プログラムにより対応していくのは限界がある。その理由は、以下に示す五つの条件を最低満足する人材が数少ないからである。その条件とは、

- ① 計算力学手法に関する基礎的及び応用技術を習得していること
 - ② データインタフェイスの一方の側であるシミュレーションプログラムを熟知していること
 - ③ データインタフェイスの他方の側であるCAEシステムを熟知していること
 - ④ プログラミング技術を習得していること
 - ⑤ CAEシステムが稼働する計算機環境を把握していること
- などである。しかしながら、設計作業の効率化や省力化を実現するためにはこれらの条件を満足する人材がいなくても、設計者自身が容易にデータインタフェイスがとれるようにする必要がある。そこで、その実現手段としてデータ変換則を定義するだけでデータインタフェイスが自動生成される方式を構築することにした。以下、このデータインタフェイス方式について述べる。

接続対象とするシミュレーションプログラムは、汎用的なシミュレーションプログラムだけでなく利用者が特定の設計計算のために特に作成したものも対象とする。例えば、ある製品特有の設計計算をするために作成されたシミュレーションプログラムなどである。もちろん、流通ソフトウェアとして市販されている一般的な汎用シミュレーションプログラムや個別ソフトウェアパッケージ、または利用者が開発した汎用シミュレーションプログラムなども十分有効に利用できるようにする。ここで、シミュレーションプログラムの入力データの作成を例にとり、本データインタフェイス方式の概略について述べる。まずシステムは、対話画面に対してメッシュプロセッサやプリプロセッサで定義した入力データ内容を表示し、利用者に指示を仰ぐ。利用者はこの入力データ内容と変換したいデータ形式を指示することにより、それらの変換すべき規定の書式と内容を与える。そしてシステムは、これらのデータからデータ変換則を自動的に作成する。すなわち、指示入力されたデータ内容とその規定の書式

は、変換則としてルール化されデータベースに登録される。データベースに登録されたデータ変換則は、インタプリタにより解釈され変換処理モジュールが生成される。そして、この変換処理モジュールが、標準データ形式として記憶されているデータ内容を規定の書式に書き換える。以上の処理をすべしの変換則について行うことで、シミュレーションプログラムの入力データを作成することができる。出力データの作成は、種々のシミュレーションプログラムの出力データ形式をポストプロセッサが持つ標準データ形式に変換するためのデータ変換則を作成することで、入力データの場合と同様に実現される。

5. 2. 2 データインタフェイスシステムの構築

データインタフェイスシステムは大別して二つの部分からなり、その一つが5.2.1項で述べた各シミュレーションプログラムごとに必要となる入出力データの変換則の作成を支援する対話処理部である。もう一つがこのデータ変換則を解釈し、シミュレーションプログラムのための入出力データを作成する部分である。実際に入出力データを作成する部分は、インタプリタ仕様のデータ変換処理モジュールにより行う。そして、このモジュールはバッチ処理形であり、シミュレーションプログラムの実行に合わせて順次処理を行うものである。ここで、シミュレーションプログラムのための入出力データとは、次に述べるようなものである。入出力データは、一般的に①文字情報、②数値情報、③形式情報の3種類のデータから構成されている。文字情報は、コメントのような文字データとポイントのような役割をするキーワードデータの二つの種類のデータがある。数値情報も同様に、座標値のような数値データとキーワードデータと同じような役割をするデータの二つがある。ここで、文字データや数値データを総称してディスクリプションデータと呼び、文字あるいは数字によるキーワードデータのことをインデックスデータと呼ぶことにする。形式情報は、データの並び方とその順序及びその位置に関するデータであり、これらのデータを総称してロケーションデータと呼ぶ。この入出力データとCAEシステムのデータベース情報の相互変換を行うための規則がデータ変換則である。そして、このデータ変換則を作成する作業を対話的に支援するのが対話形データインタフェイス支援システムである。

対話形データインタフェイスシステムの概要を示す機能構成図を、図5-17と図5-18に入力インタフェイスと出力インタフェイスに分けて示す。本システムは図5-17と図5-18の両図に示すように、①データ読み込み機能、②データ変換則作成機能、③データ変換則処理機能、④データ変換機能、⑤データ出力機能の五つの機能から構成されている。①のデータ読み込み機能は、CAEシステムのデータベースやシミュレーションの出力結果に対してその変換処理モジュールを用いてデータ検索を行い、必要な情報を格納する。②のデータ変換則作成機能は、指定されたシミュレーションプログラムに関するデータ変換則を作成するものである。③のデータ変換則処理機能は、指定されたシミュレーションプログラムに関するデータ変換則をデータ変換則データベースから取り出し、その変換則の解釈を行うものである。ここで言うデータ変換則とは、次の四種類のデータの組み合わせで構成されている。それらは、

①インデックスデータ：文字や数値で構成され、ポインタのような役割をするキーワードデータ

②ディスクリプションデータ：文字や数値で構成されるシミュレーションプログラムの入出力データ

③ロケーションデータ：入出力時にインデックスデータやディスクリプションデータの読み込み、あるいは書き込みを開始する位置やその並び、順などを示すデータ

④ハンドリングデータ：インタフェイスモジュール内で①～③のデータを管理制御するためのデータであり、①～④のデータの対応関係などを示すデータの四つである。

データ変換則の解釈処理は、図5-18のデータ変換則の解釈処理仕様に基づき行う。データ変換則の解釈処理はハンドリングデータの内容に従い処理を行なうことであり、次に述べる通りである。まず、ハンドリングデータから変換処理手順を取り出す。変換処理手順とは、上記①～④のデータの処理順序のことである。例えば、ハンドリングデータのフラグデータが入力データ変換モードでプリプロセッサのデータベースを読むようになっており、上記のデータを④-①-③の順で処理するように手順が記述してあるとする。この場合だと、まず④のロケーションデータからデータを読み込む順序や形式を取り出す。次

に、この順序や形式に従いプリプロセッサのデータベース内に記述されているインデックスデータを検索し、そのディスクリプションデータを取り出しディスクリプションデータの記憶領域にデータを保存する。そして再び、ハンドリングデータに戻り次の処理を行う。一般的にデータ変換則の解釈処理は以上のような方法で処理が進むが、節点と要素データの交換則の解釈処理は必ず優先的に行われるものとする。つまり、一番最初に節点と要素データを変換する。また、節点と要素では節点の方が優先される。そして、その他の情報（境界条件や物理量など）に関するデータ変換則について変換処理が行われるが、その処理順は利用者が定義した変換則の定義順となる。最後に特殊な場合として、演算と呼ぶデータ変換則に関して解釈を行う。演算とは、次項で示す通常の変換則で記述しきれない例外処理の手続きである。このようにインタプリタ方式でデータ変換則を解釈していくのは、メモリ上の都合からである。コンパイラ方式による変換則解釈方法は、処理時間においてインタプリタ方式に比べて短くて済むが、幾つかのデータを用いて試算してみた結果内部メモリ量は約40倍になる。ここでCAEの扱う情報量は、一般に膨大であるのでメモリ効率の良いインタプリタ方式を採用することにした。④のデータ変換機能は、データ読み込み機能によって格納されたデータを変換処理モジュールを用いて、メモリ内にディスクリプションデータの並べ換えや付加などの変換処理を行う。⑤のデータ出力機能では、データ変換機能によって変換されたデータを変換処理モジュールを用いてデータを書き出す。

5. 2. 3 データ変換則の作成方法

本項では、シミュレーションの入出力データを変換するために必要となるデータ変換則の作成方法を具体的に説明する。図5-20に対話形データインタフェイスシステムの基本画面構成を示す。基本画面は、インタフェイス画面、システム主画面、システム副画面の三つの画面から成る。これらの画面については、図5-21を用いて具体的に説明する。図5-21の⑥の画面例は、シミュレーションプログラムの入出力データを表示するインタフェイス画面である。入力データの場合は、CAEシステムの指定されたメンバのデータベース内容(プリプロセッサのデータベース内容)が表示され、出力データの場合はリスト出力イ

メージ (Formatted Block, 1行133列)である。図5-21の(a)の画面はシステム主画面の例で、入力インタフェイスモードの場合はカードイメージ (Fixed Block, 1行80列)の表が表示される。出力インタフェイスモードの場合は指定されたシミュレーションプログラムの名称とシミュレーションタイプ、例えば静的解析の出力可能な物理量名称 (例えば、主応力や変形量など) をシステム主画面に表示する。図5-21の(c)は、特殊な場合の例外処理のためのシステム副画面である。以下、シミュレーションの出力データを変換するためのデータ変換則の作成方法を例にとり具体的に説明する。

図5-22は、操作の流れを示すものであり、次に述べるような手順で作業を進める。また、図5-23から図5-27に各操作ステップごとの具体的な画面例を示す。

ステップ 1: 図5-23はCAEシステム全体の基本画面であり、この画面情報から入力データか出力データのインタフェイスモジュールの選択を行う。

ステップ 2: 処理対象とするシミュレーションプログラムの名称とそのタイプを指定する。指定するプログラム名がない時は、新規にプログラム名称やその解析タイプを指定する。すると、図5-24が初期画面として表示される。図5-24は出力データインタフェイスの場合で、シミュレーションの出力リストの第一ページが表示されている。

ステップ 3: 画面上のページをスクロールしながら必要な情報が現れるまで対話的に検索するか、インデックスデータを与えて自動検索する。

ステップ 4: 変換対象とする情報が見つかったら変換則を定義する。例えばインデックスデータの場合は、インデックスデータ指示コマンドを選択してから、図5-25の①、②、③などのように複数個のインデックスデータを指示して与える。ロケーションデータの場合同様にロケーションデータ指示コマンドを選択してから、例えば図5-26の①のようにデータの存在する領域を指示しその形式などを入力する。ディスクリプションデータの場合も同様であり、例えば図5-26の②のように画面上に表示されたデータの列や桁数を指示する。そして、このデータに対応する物理量名称をシステム主画面から選択する (図5-26の③)。入力処理が完了すると、インタフェイス画面に図5-27のように変換則が表示される。

ステップ 5: 表示された変換則に対して修正が必要であるならば、修正を行う。また、特別な処理により変換則を例外的に定義したいときは、システム副画面からフォートラン (Fortran) によるコーディングデータまたは数式を入力することができる。

以上の操作を繰り返し行うことで変換則の定義が終了する。

変換則が定義された後は、バッチ処理となる。変換処理は、変換則を定められた処理順で順次解釈し、データ変換することで完了する。

5.3 設計計算支援システムの開発と適用

以上、第3章と第4章及び第5章で述べてきた要素技術を組み合わせることにより、対話形の計算力学手法を用いた設計計算支援システムを開発した。本システムを用いて実際の設計業務で適用したシミュレーション例を図5-28から図5-42までに示す。

本システムにより解析した事例を手法別に示すと、図5-28から図5-34は、有限要素法によるシミュレーション例である。使用したシミュレーションプログラムは、ISAS-Ⅱ [179]、NASTRAN [175]、MARC [176]、ADINA [177]、SAP [178]、ユーザ作成プログラム [188] などである。図5-28は、2槽式洗濯機の脱水籠の遠心力解析例である。図5-29は、レーザービームプリンタ (LBP) のヒートローラの熱伝導解析から熱応力解析を行った例である。図5-30は、FDDのジンプルの振動解析例で固有モード図である。図5-31は、蒸気タービンブレードのダブテール部の接触問題を扱った例である。図5-32は、ガス遮断器の接線棒とスペース部の強度解析を行ったもので、図5-33は磁気ヘッドの熱応力解析を行ったものである。図5-34は、ガス遮断器の導体支持部の強度解析例である。図5-35から図5-40は、境界要素法によるシミュレーション例である。使用したシミュレーションプログラムは、ユーザ作成プログラム [188] である。図5-35は、ガス遮断器のメタルクラッチ部の静電界場解析例である。図5-36は、ガス遮断器のリード部での静電界場解析例である。図5-37は、絶縁開閉装置支持部の静電界場解析例である。図5-38はガス遮断器のスペース部の静電界場解析例であり、更に一度解析した後任意断面を切断し自動的に内部を解析した例を示す。図5-38も図5-38と同様な解析例として、型式の異なる

ガス遮断器のスペーサ部について示す。図5-40は、自動車用のジェネレータ内部における電磁場解析例を示す。図5-41と図5-42は、差分法によるシミュレーション例を示す。使用したシミュレーションプログラムは、ユーザ作成プログラム[198]である。図5-41は、ワードプロセッサの筐体内部の強制空冷シミュレーションの例である。図5-42は、LBPの筐体内部の熱による空気の流れシミュレーションの例である。

これらの適用結果から、以下に示すようなことが得られた。

- ①設計計算業務において、計算力学手法を用いたシミュレーションを共通的に利用することが可能となり、従来に比べ詳細な設計案の検討や評価ができるようになった。
- ②設計部署ごとに専用化したシステムを構築できるようになると共に、シミュレーションを行うために必要となる対話入力作業が、従来に比べて大幅に削減された。
- ③新規にシミュレーションプログラムを本CAEシステムと接続する場合、従来1~3カ月要していた作業時間がその検証も含めて約7日程度で可能となった。また、データ変換も確実に実行することも確認できた。
- ④解析モデルの自動生成についても、その手法などに左右される事なく可能であることが確認できた。詳細には、2次元の場合にその自動化率が高く、特に図5-13で示したような断面形状のシミュレーションでは日常的な実務レベルで自動的に計算できることを確認した。また、対話形による再解析の有効性も実務レベルで確認できた。3次元の場合は、要求要素数に対する要素数の制約の問題が生じた。具体的には、設計者の要求要素数内で生成した要素分割結果が、設計者の予想した結果と異なった。そのため、シェル要素に分割する問題では、実務レベルでの自動化の成功率が約7割の確率となった。このときの要素数の制約範囲は問題により異なるが、150~3500である。しかしながら、再分割における対話方式を併用することにより、ほぼ満足のゆくデータに修正できることを確認した。そして、対話方式との混在方法が、実務において十分活用できることが確認できた。また、この混在方式を用いても、サブストラクチャ方式による従来方式に比べてその省力化効果が大いことも確認できた。ソリッド要素に分割する問題では、簡単な問題を除くと要素数が実用範囲に収ま

らず、本システムを適用した計算機環境では(HITAC M280H, M680H)実務レベルに達しえなかった。その実用範囲とは、多くのシミュレーションプログラムの要素数の上限をそのメモリ制限から、5000以下に抑える必要があったからである。これは、4面体要素で要素分割するため、節点数に比べて要素数が膨大となるからである。計算機環境とシミュレーションプログラムの要素数の上限が許せば、6000要素程度でシェル要素の問題と同様な効果が得られることは確認した。また簡単な実用問題では、300~3500要素ぐらいの範囲で要素分割できることを確認した。

⑤解析モデルからシミュレーションプログラムの入力データへのデータ変換は、今回の適用範囲では問題がなかった。しかしながら、微妙な経験的判断を要する場合、例えば非線形なパラメータを用いる場合は、プリプロセッサにおいて対話的介入が不可欠と思われる。

5.4 第5章のまとめ

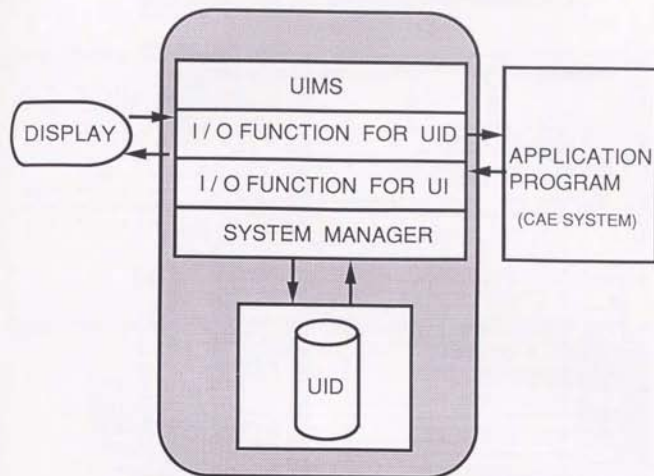
対話形の計算力学手法を用いた統合的な設計計算支援システムを構築し、実業務に適用することによりその有効性を確認した。まず、CAEのためのUIMSを構築し、第3章と第4章で述べた要素技術をまとめることで全体をシステム化した。更に、シミュレーションプログラムとのデータインタフェース方式もシステムとして実現し、統合形CAEシステムの周辺環境を整備した。次に本システムを実際の設計業務(強度や性能の評価と確認)に適用し、その有効性を評価をした。その結果、従来のCAEシステムに比べて、大幅な設計業務の効率化が達成された。すなわち、計算力学手法を用いたシミュレーションに対して熟知していない利用者にも簡単に利用できるようになり、従来よりも手軽に設計案の確認や検討ができるようになった。これにより設計者は設計案の確認、改良が容易に行えるようになった。

以下に、本システムの成果をその特徴ごとにまとめる。

- ①有限要素法、境界要素法、差分法などの手法別、及び構造、熱、流体などの分野別に異なる設計計算を統一的に活用できるCAEシステムを構築した。
- ②本システムを実務に適用することでその有効性確認するとともに、計算力学に基づく設計業務において、従来に比べ省力化が実現できることを確認した。

③ UIMSの機能を用いることで、その設計部署や個人単位に専用の環境を整備できるようになり使い勝手の向上ができた。

④ シミュレーションプログラムとCAEシステムとのデータインタフェースについては変換規則による接続方式を提案し、その変換規則の作成を支援するシステムを構築した。これにより、従来困難であった作業を簡略化できた。また、変換規則による接続方式の有効性を確認できた。



UIMS : USER INTERFACE MANAGEMENT SYSTEM

UID : USER INTERFACE DATA

UI : USER INTERFACE

図5-1 ユーザインタフェース管理システム

材 料 名 リ ス ト		材料タイプ名リスト 等 方 性 線 形 弾 性	
アルミコ質			
軟鋼	焼なまし		
硬鋼	焼なまし		
ハネ鋼	焼入れ焼もどし		
Ni鋼	焼なまし		
Cr鋼	焼入れ焼もどし		
Ni-Cr鋼	焼入れ焼もどし		
Cr-Mo鋼	焼入れ焼もどし		
Ni-Cr-Mo鋼	焼入れ焼もどし		
B-Cr鋼	焼入れ焼もどし		
鋳鋼			
鋳鉄	ねびみ鋳鉄		
アルミニウム	焼なまし		
ジュラルミン			
Mg合金鋳物	焼入れ焼もどし		
黄銅	軟鋼		
チタン			
チタン合金			

視感座標数	X座標	1.0
	Y座標	2.0
	Z座標	3.0
座標軸線数	0.0	
座 標 軸	Y	

(a)

解 析 プ ロ グ ラ ム 名		
解 析 要 素 法	境 界 要 素 法	法 則
ADINA	ATLAS	THERVIS
MARC		
MSC/NASTRAN		
ISAS II		
SAP		

```

<解析プログラムリスト>の<解析プログラム名>を、ピクセルして下さい。>00000003
<解析プログラム名>の<境界要素法>を、ピクセルして下さい。>00000003
(ESC) 終了:
MENU DATA LIST#.#:
PROGRAM NAME PICKED
(ANALYSIS PROGRAM LIST).

```

(b)

図5-4 ユーザインタフェース表示例-2

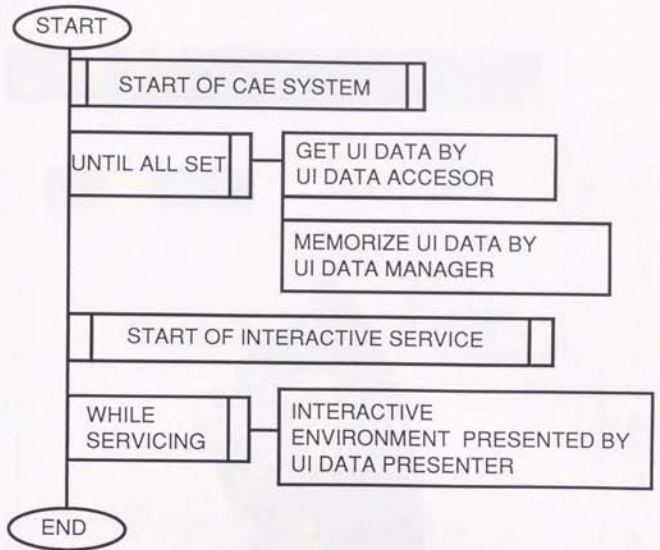


図5-5 ユーザインタフェース管理処理の流れ

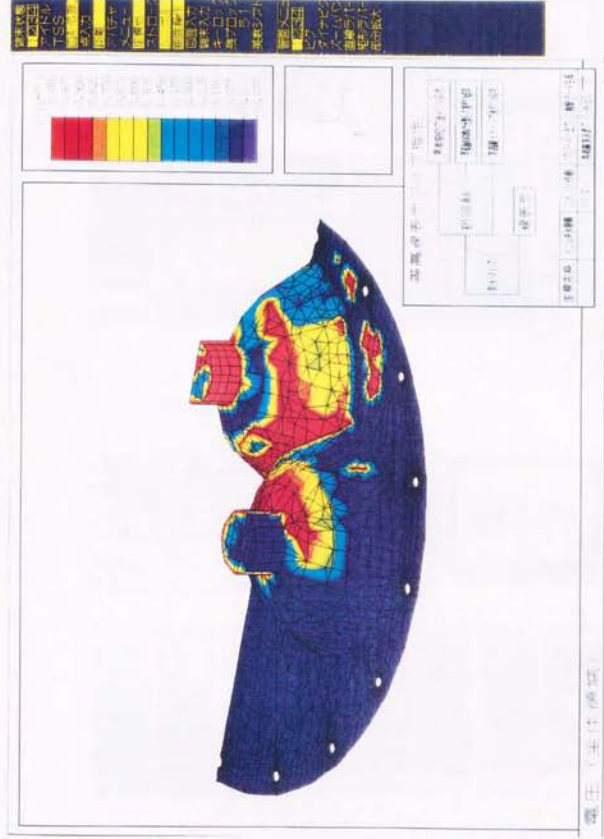


図5-6 等高線図表示における変更(前)処理



図5-7 表示に関するユーザインタフェース
情報画面

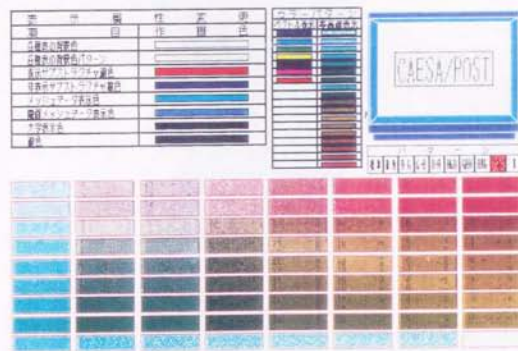


図5-8 ユーザインタフェース定義体の更新

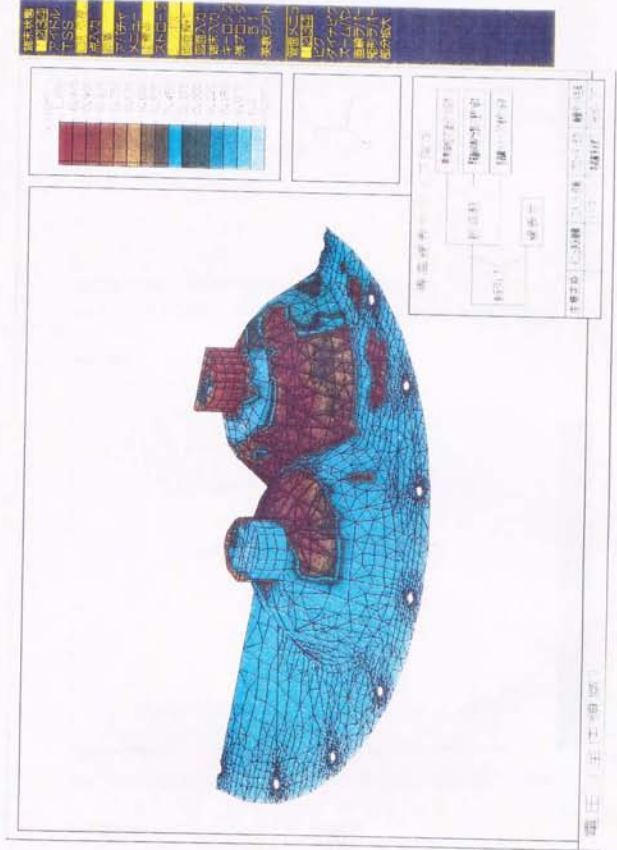


図5-9 等高線図表示における変更（後）処理


```

EE ***** D S 名 ('N0320.UIMSFIL.DATA(UIMS001)') *****
目盛行 1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----
001830
001840 荷重タイプデータ
001850 YLOADING
001860 タイトル [荷重タイプリスト]
001870 サブタイトル数 [ 0]
001880 サブタイトル [#荷重タイプ]
001890 荷重タイプ数 [ 7]
001900 荷重タイプ [180] [集中荷重]
001910 [181] [辺分布荷重] ←
001920 [182] [面分布荷重]
001930 [183] [遠心荷重]
001940 [184] [重力荷重]
001950 [185] [強制変位]
001960 [186] [熱荷重]
001970
001980 処理ジャンプデータ
001990 YJUMP
002000 タイトル [処理ジャンプリスト]
002010 サブタイトル数 [ 0]
002020 ジャンプ項目数 [22]
ページマップ 1 . . . . . 18 現在ページ ( 9 )
コマンド ( )

```

(a)

```

EE ***** D S 名 ('N0320.UIMSFIL.DATA(UIMS001)') *****
目盛行 1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----
001830
001840 荷重タイプデータ
001850 YLOADING
001860 タイトル [荷重タイプリスト]
001870 サブタイトル数 [ 0]
001880 サブタイトル [#荷重タイプ]
001890 荷重タイプ数 [ 7]
001900 荷重タイプ [180] [集中荷重]
001910 [181] [辺分布荷重]
001920 [182] [プレス圧力] ←
001930 [183] [遠心荷重]
001940 [184] [重力荷重]
001950 [185] [強制変位]
001960 [186] [熱荷重]
001970
001980 処理ジャンプデータ
001990 YJUMP
002000 タイトル [処理ジャンプリスト]
002010 サブタイトル数 [ 0]
002020 ジャンプ項目数 [22]
ページマップ 1 . . . . . 18 現在ページ ( 9 )
コマンド ( )

```

(b)

図5-11 ユーザインタフェイス定義体の更新

新 形 タイ プ リ ス ト

- 形状解析
- 弾性応力解析
- 弾性熱応力解析
- フリー変形解析
- 大むわみ解析
- 有限変形解析
- 接触応力解析
- 粘性圧縮解析
- 固有値解析
- 弾震伝音解析 (モード重畳法)
- 弾震伝音解析 (高次元積分法)
- 剛震伝音解析
- スベクトル応答解析

見出し: <新形タイプリスト中の新形タイプを、ピックアップしたい。>00000004

見出し: <新形タイプリスト中の新形タイプを、ピックアップしたい。>00000004

コマンド: 27200:

NEW DATA LIST#: #1

ANALYSIS PROGRAM LIST#: #1

TYPE NAME PREFIX

ANALYSIS TYPE LIST:

		荷 重 系 列 リ フ ト									
N	0	X	Y	Z	R	X	R	Y	R	Z	
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	

FREEFF X Y Z R X R Y R Z

見出し: <制約条件を、指定して下さい。>00000005

見出し: <制約条件を、指定して下さい。>00000005

BOUNDARY TYPE LIST#:

BOUNDARY LIST#:#1

BOUNDARY LIST#:#1

BOUNDARY LIST#:#1

BOUNDARY LIST#:#1

図5-12 有限要素法を用いたシミュレーションプログラムの入力支援画面例

境界要素リスト			
元	動	質	力
自由表面変動	動位準	静電位・磁位	粘滯力
圧力伝達	磁位	定電流電	粘滯力
水撃	相変化	電位・分極	
カルマン渦列			

境界要素 <境界要素リスト中の境界要素名を、ピクセルして下さい。>

境界要素リスト中の境界要素名を、ピクセルして下さい。
 (C=C+272)X;
 OESH DATA LIST#:#;
 ANALYSIS PROGRAM LIST#:#;
 TYPE NAME FIX(0);
 ANALYSIS TYPE LIST.

境界条件リスト			
N	O	I	P
1	2	3	4

境界条件 <境界条件を、定義して下さい。>

境界条件リスト中の境界条件を、ピクセルして下さい。
 (C=C+272)X;
 OESH DATA LIST#:#;
 ANALYSIS PROGRAM LIST#:#;
 ANALYSIS TYPE LIST#:#;
 COMPONENT FIX(0)(C=C+272)X(1)X;
 BOUNDARY LIST.

図5-13 境界要素法を用いたシミュレーションプログラムの入力支援画面例

境界条件リスト	
OBSTACLE	- X
OBSTACLE	- Y
OBSTACLE	- Z
GAMMA	- V (体積多相系)
GAMMA	- X (密度多相系)
GAMMA	- Y
GAMMA	- Z
U	- FREE (自由流出)
V	- FREE
W	- FREE

境界条件 <境界条件リスト中の境界条件名を、ピクセルして下さい。>

境界条件リスト中の境界条件名を、ピクセルして下さい。
 (C=C+272)X;
 SELECT DISPLAY MODEL#:#;
 COMPONENT FIX LIST#:#;
 PACTR, PACTR, E LAYER(4-5) 4 5
 COMPONENT FIX(0)(C=C+272)X(1)X;
 BOUNDARY LIST.

境界条件リスト			
Q	T	U	V
FIX	FIX	FIX	FIX

境界条件 <境界条件リスト中の境界条件を、ピクセルして下さい。>

境界条件リスト中の境界条件を、ピクセルして下さい。
 (C=C+272)X;
 PACTR, PACTR, E LAYER(4-5) 4 5
 BOUNDARY LIST#:#;
 COMPONENT FIX LIST#:#;
 TYPE NAME FIX(0)(C=C+272)X(1)X;
 BOUNDARY LIST.

図5-14 差分法を用いたシミュレーションプログラムの入力支援画面例

物理量名称表 (マフロ名称)			
群	名	群	名
1	電	正	電
2	電	電	電
3	電	電	電
4	電	電	電
5	電	電	電
6	電	電	電
7	電	電	電
8	電	電	電
9	電	電	電
10	電	電	電
11	電	電	電
12	電	電	電
13	電	電	電
14	電	電	電
15	電	電	電
16	電	電	電
17	電	電	電
18	電	電	電
19	電	電	電
20	電	電	電
21	電	電	電
22	電	電	電
23	電	電	電
24	電	電	電
25	電	電	電
26	電	電	電
27	電	電	電
28	電	電	電
29	電	電	電
30	電	電	電
31	電	電	電
32	電	電	電
33	電	電	電
34	電	電	電
35	電	電	電
36	電	電	電
37	電	電	電
38	電	電	電
39	電	電	電
40	電	電	電
41	電	電	電
42	電	電	電
43	電	電	電
44	電	電	電
45	電	電	電
46	電	電	電
47	電	電	電
48	電	電	電
49	電	電	電
50	電	電	電
51	電	電	電
52	電	電	電
53	電	電	電
54	電	電	電
55	電	電	電
56	電	電	電
57	電	電	電
58	電	電	電
59	電	電	電
60	電	電	電
61	電	電	電
62	電	電	電
63	電	電	電
64	電	電	電
65	電	電	電
66	電	電	電
67	電	電	電
68	電	電	電
69	電	電	電
70	電	電	電
71	電	電	電
72	電	電	電
73	電	電	電
74	電	電	電
75	電	電	電
76	電	電	電
77	電	電	電
78	電	電	電
79	電	電	電
80	電	電	電
81	電	電	電
82	電	電	電
83	電	電	電
84	電	電	電
85	電	電	電
86	電	電	電
87	電	電	電
88	電	電	電
89	電	電	電
90	電	電	電
91	電	電	電
92	電	電	電
93	電	電	電
94	電	電	電
95	電	電	電
96	電	電	電
97	電	電	電
98	電	電	電
99	電	電	電
100	電	電	電

図5-15 物理量名称の表示例 (大局名称)

物理量名称表 (通常名称)			
群	名	群	名
1	電	電	電
2	電	電	電
3	電	電	電
4	電	電	電
5	電	電	電
6	電	電	電
7	電	電	電
8	電	電	電
9	電	電	電
10	電	電	電
11	電	電	電
12	電	電	電
13	電	電	電
14	電	電	電
15	電	電	電
16	電	電	電
17	電	電	電
18	電	電	電
19	電	電	電
20	電	電	電
21	電	電	電
22	電	電	電
23	電	電	電
24	電	電	電
25	電	電	電
26	電	電	電
27	電	電	電
28	電	電	電
29	電	電	電
30	電	電	電
31	電	電	電
32	電	電	電
33	電	電	電
34	電	電	電
35	電	電	電
36	電	電	電
37	電	電	電
38	電	電	電
39	電	電	電
40	電	電	電
41	電	電	電
42	電	電	電
43	電	電	電
44	電	電	電
45	電	電	電
46	電	電	電
47	電	電	電
48	電	電	電
49	電	電	電
50	電	電	電
51	電	電	電
52	電	電	電
53	電	電	電
54	電	電	電
55	電	電	電
56	電	電	電
57	電	電	電
58	電	電	電
59	電	電	電
60	電	電	電
61	電	電	電
62	電	電	電
63	電	電	電
64	電	電	電
65	電	電	電
66	電	電	電
67	電	電	電
68	電	電	電
69	電	電	電
70	電	電	電
71	電	電	電
72	電	電	電
73	電	電	電
74	電	電	電
75	電	電	電
76	電	電	電
77	電	電	電
78	電	電	電
79	電	電	電
80	電	電	電
81	電	電	電
82	電	電	電
83	電	電	電
84	電	電	電
85	電	電	電
86	電	電	電
87	電	電	電
88	電	電	電
89	電	電	電
90	電	電	電
91	電	電	電
92	電	電	電
93	電	電	電
94	電	電	電
95	電	電	電
96	電	電	電
97	電	電	電
98	電	電	電
99	電	電	電
100	電	電	電

図5-16 物理量名称の表示例 (局所名称)

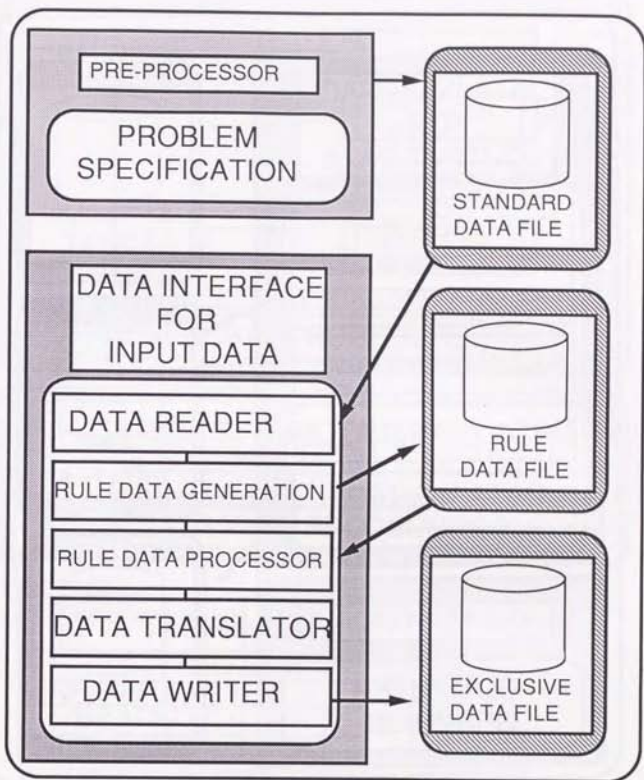


図5-17 データインタフェースシステムの概要 (入力インタフェース側)

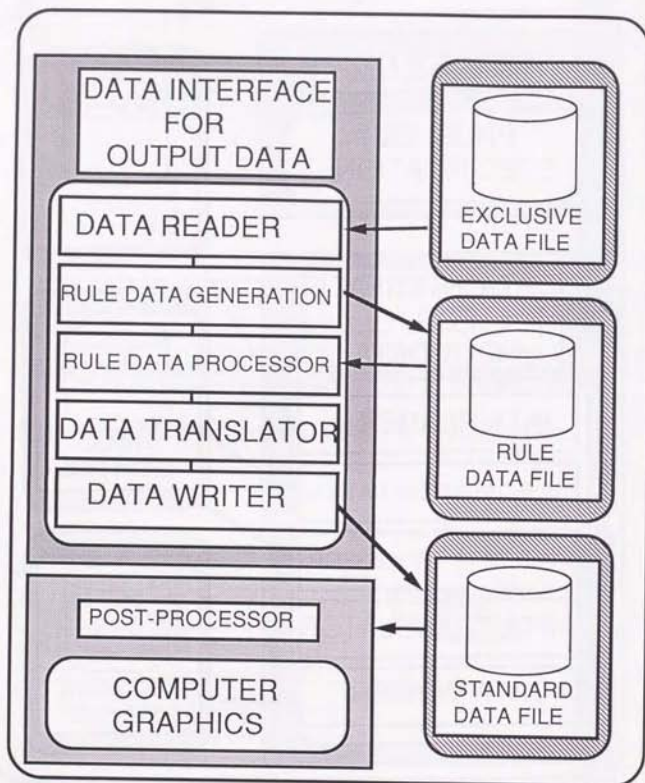
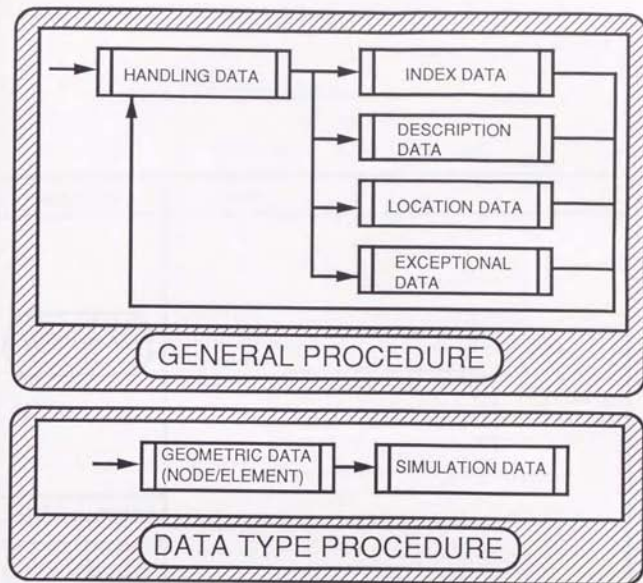


図5-18 データインタフェースシステムの概要
(出力インタフェース側)



HANDLING DATA

NO	PROCEDURE	POINTER	FLAG	
			I/O	R/W
1	L I D	1 5 9	PR	R
2	I N D	7 3 36	PR	W
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
N	L ---- E	25 --- 1	PR	W

I : INDEX DATA
 D : DESCRIPTION DATA
 L : LOCATION DATA
 E : EXCEPTION DATA
 PR: FOR INPUT DATA
 PO: FOR OUTPUT DATA
 R : READ DATA
 W : WRITE DATA
 C : CHARACTER
 N : NUMBER

INDEX DATA

NO	C/N	DATA
1	C	NODE
2	N	12356
⋮	⋮	⋮
N	C	MATERIAL

DESCRIPTION DATA

NO	DATA
1	1,2,3,4,----,1521
2	x,y,z,ry,rz
⋮	⋮
N	2100,0.3,----,8.1

LOCATION DATA

NO	R/W	DATA
1	R	N(I5)
2	W	N(A2)
⋮	⋮	⋮
N	W	N(F15.6)

図5-19 データ変換則の解釈処理仕様

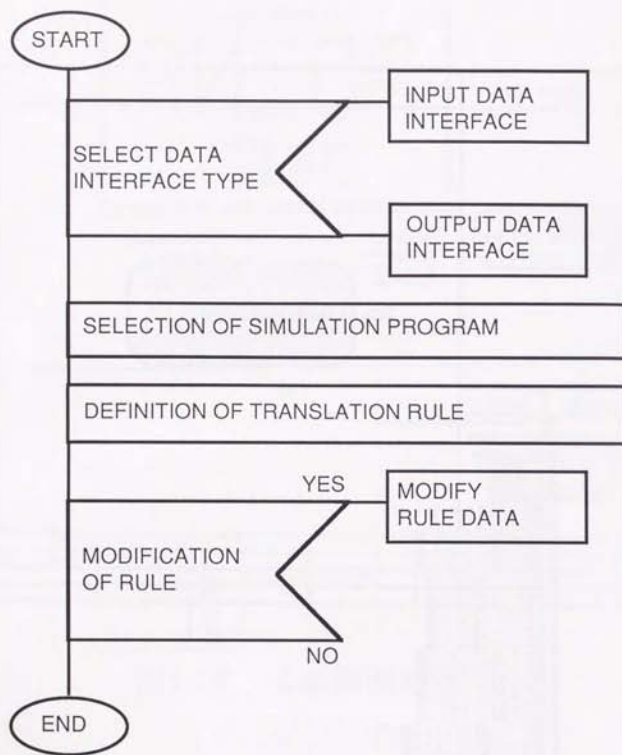


図5-22 データ変換則の作成操作の流れ

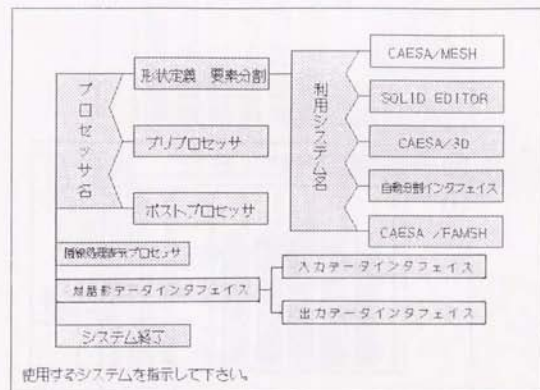


図5-23 基本画面

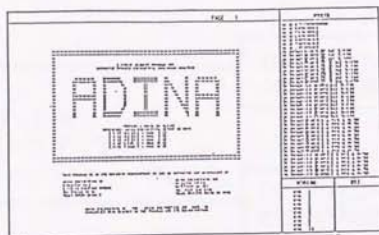


図5-24 初期画面

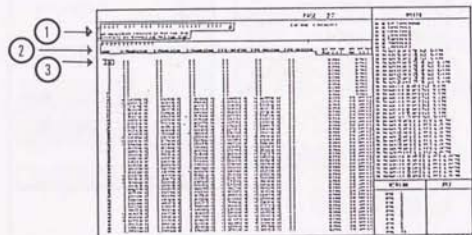


図5-25 変換則の定義操作例1

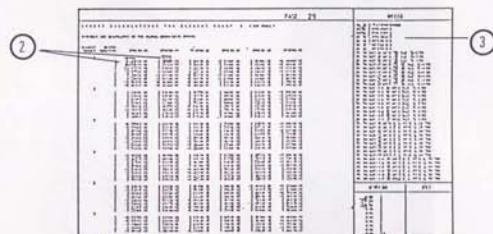
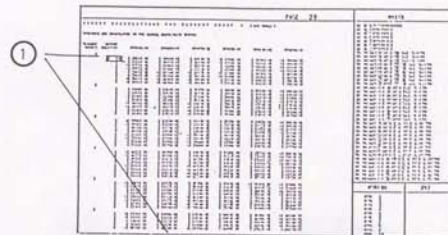


図5-26 変換則の定義操作例2

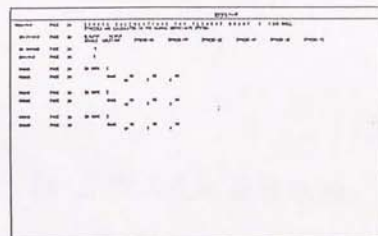


図5-27 変換則編集画面

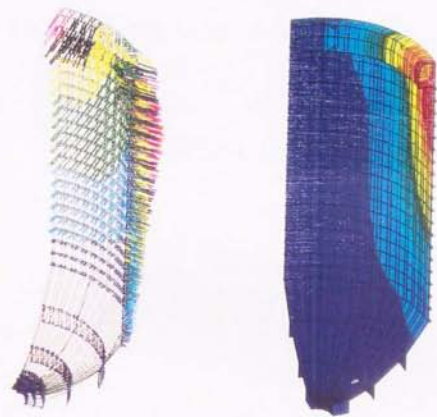


图5-28 2槽式洗濯機脱水槽

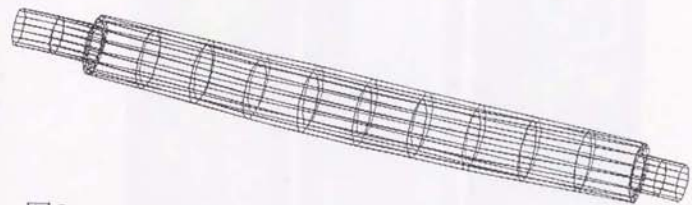


図5-29 レーザビームプリンタのヒートローラ

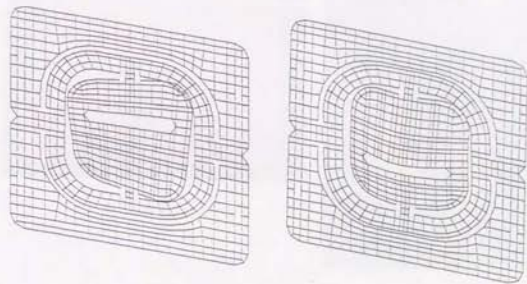
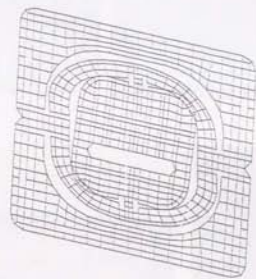


図5-30 FDDジンバル

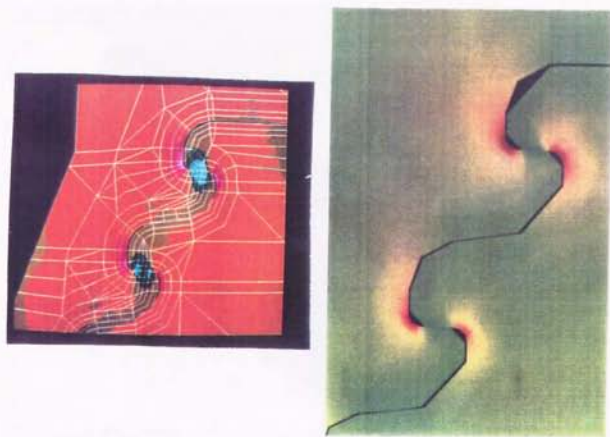
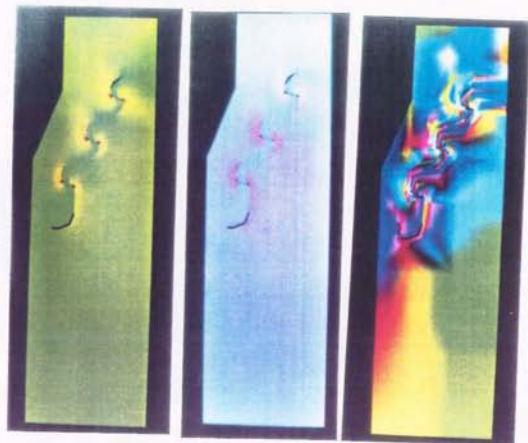


図5-31 蒸気タービンプレードダブテール部

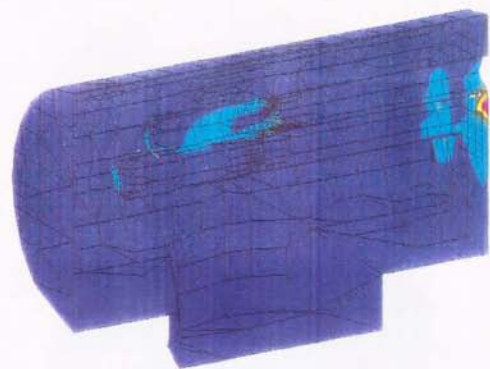


図5-32 ガス遮断器接続棒とスペーサ部

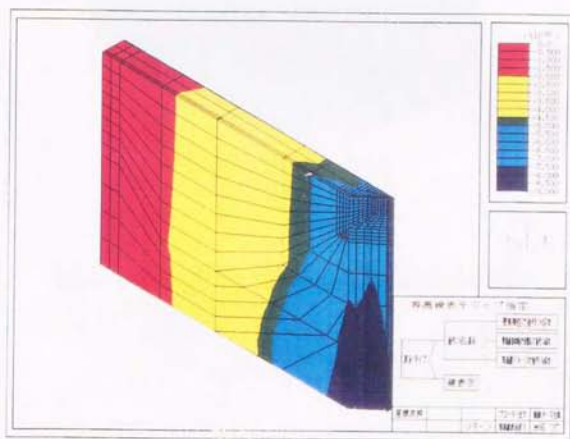


図5-33 薄膜磁気ヘッド

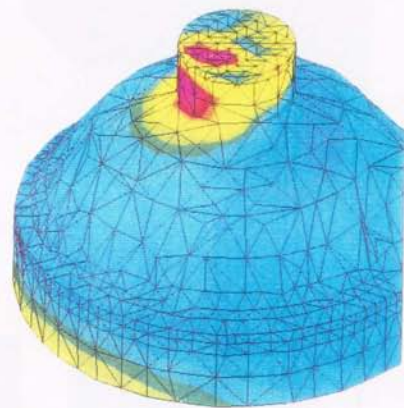


図5-34 ガス遮断器導体支持部

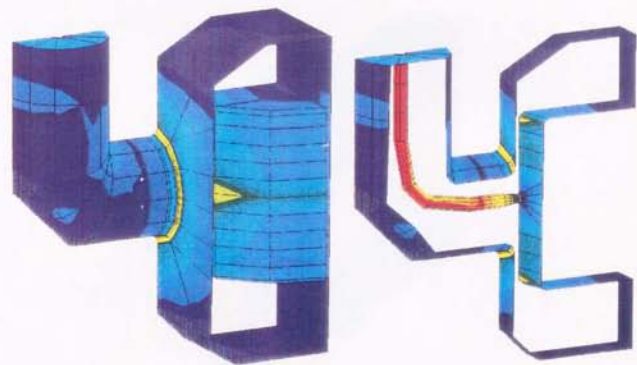
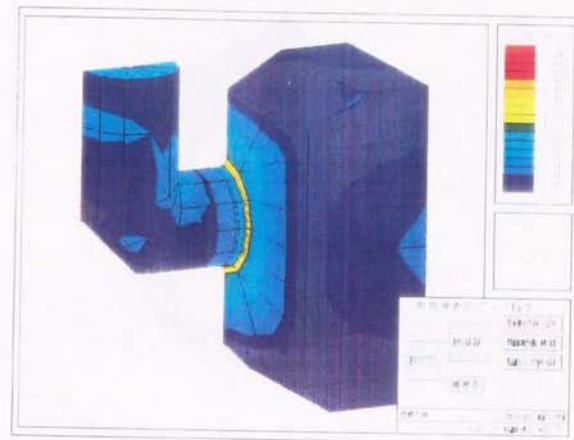


図5-35 ガス遮断器メタルラッチ部

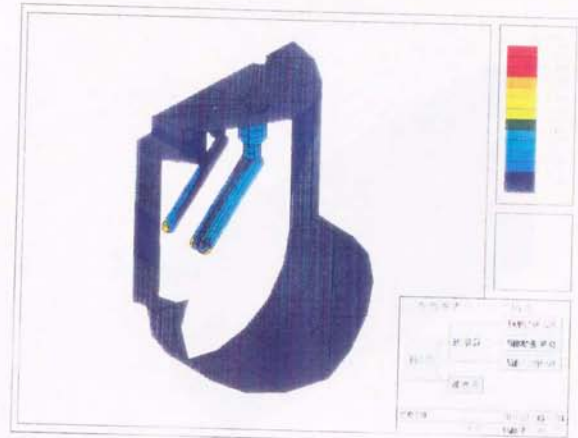


図5-36 ガス遮断器リード部

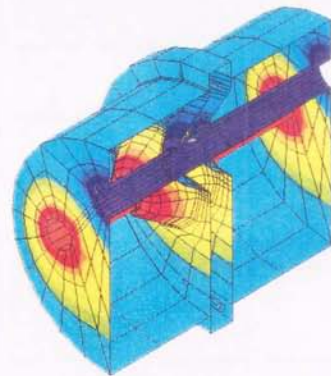


図5-37 ガス遮断器絶縁開閉装置支持部

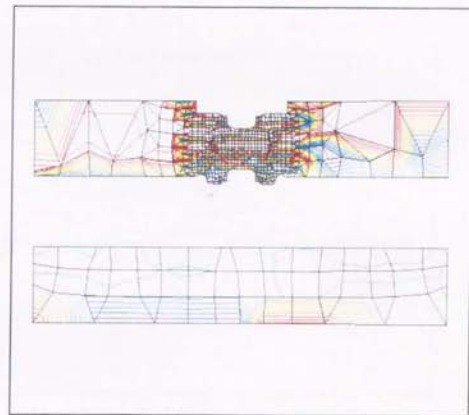
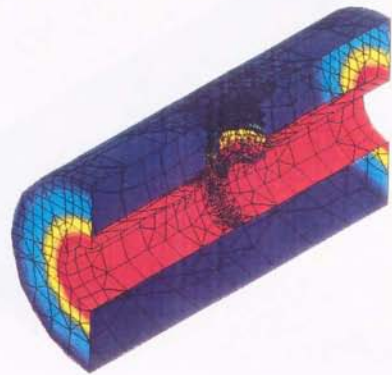


図5-38 ガス遮断器(1/2モデル)

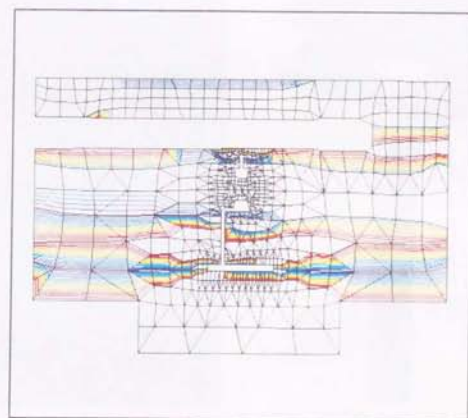
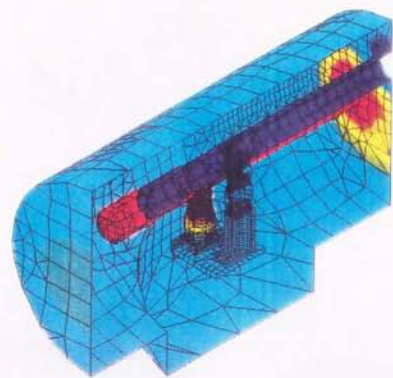


図5-39 ガス遮断器(1/2モデル)

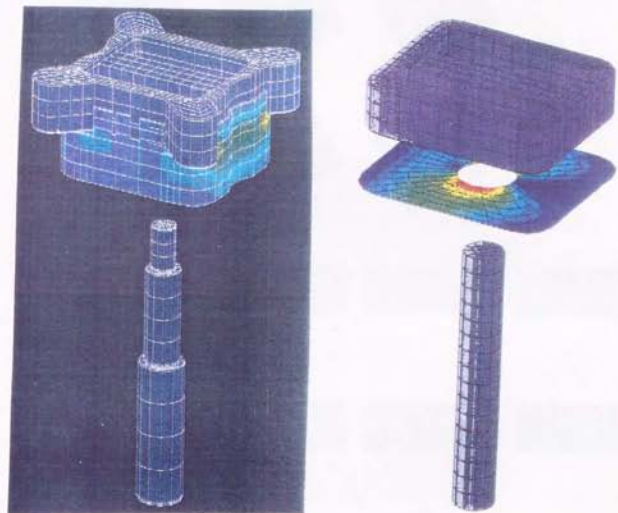


図5-40 自動車ジェネレータ

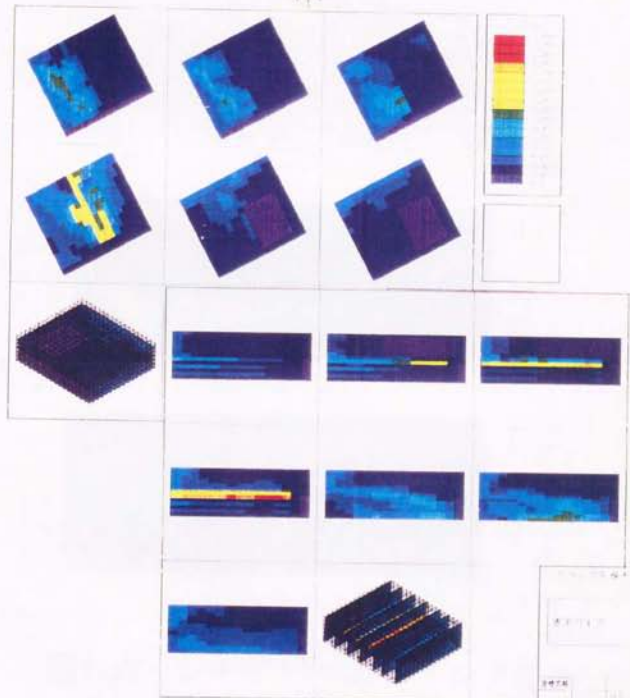
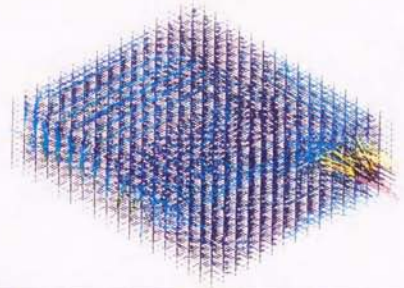


図5-41 ワードプロセッサ筐体



図5-42 レーザビームプリンタ筐体

第6章 結 言

機械設計における設計計算において、計算力学手法を用いたシミュレーションを有効活用することにより、設計計算を支援する方式の一つを提案した。本論では、初めに有限要素法を用いたシミュレーションによる設計計算支援システムについて述べ、次に計算力学手法のうち有限要素法、境界要素法、差分法を用いたシミュレーションプログラムを共通的に活用し、設計者の設計案の確認を容易にすることを第一目的とする設計計算支援システムについて述べた。これらのシステムについては、そのアーキテクチャを示すと共に具体的なシステムを構築し、更に実業務に適用することによって評価し、その有効性を確認した。これらの設計計算支援システムに必要な要素技術としては、以下に示すようにそれぞれのシステムごとに述べた。前者の設計計算支援システムに関しては、まずシステムの基礎となるCAEのためのモデルと部分領域の自動抽出について述べ、次に部分領域の自動有限要素分割手法について、そしてコンピュータグラフィックス(CG)による表示技術について述べた。後者の設計計算支援システムの要素技術としては、設計計算モデルの記述及びそのモデリング法と計算力学のための要素自動分割手法について述べ、それから設計計算モデルの属性情報からの解析モデルの定義技法、CAEのためのBIMS、及びデータインタフェイス技法などの周辺技術について述べた。

第2章では、有限要素法を用いたシミュレーションを用いて設計計算を支援するシステムの基礎検討とその構想について述べた。本システムは、①メッシュプロセッサ、②プリプロセッサ、③ポストプロセッサ、④データインタフェイスプロセッサの4つのサブシステムからなる。①のメッシュプロセッサは、形状の定義と有限要素分割を行うものである。入力容易さとCADシステムとの形状データの共有性を考慮して、ワイヤフレームモデルと曲面補間法による要素自動分割を用いてシステム構築することにした。②のプリプロセッサは解析条件や材料データを入力することでシミュレーションプログラムの入力データの作成支援を行うものである。シミュレーションの範囲としては、有限要素法による静的解析、動的解析、熱的解析、流体解析までとした。③のポストプロセッサは、シミュレーション結果の可視化を行うもので、CG処理部、数値

データ処理部そしてグラフ表示部からなる、具体的な機能としては、等高線図、変位図、アニメーション、グラフ表示、ダイアグラムなどの表示機能を持つ。

④のデータインタフェースプロセッサは、プリ及びポストプロセッサとシミュレーションプログラムのデータの授受を行う部分である。本システムでは、個別プログラムによりデータインタフェースをとることにした。そして、本システムのプロトタイプを構築し、実際の製品を用いて数値実験を行った。各プロセッサにおいて、何らかの支障もなく順調にデータの作成及びシミュレーションの実行から評価までが行えた。シミュレーション結果も実際の実験と良く一致した。具体的には、以下に述べるような結果が得られた。

- ①一連の計算作業が滞りなく支援できることが確認できた。
- ②設計業務のなかで、幾何モデルのわずかな変更操作で解析作業が支援できる見通しが得られた。
- ③従来の手作業によるシミュレーションプログラムのデータ作成時間に対して、大幅な効率化を実現できる見通しが得られた。
- ④有限要素法を用いたシミュレーションに関する知識や経験の少ないユーザでも、短い期間のトレーニングでこれらのシミュレーションを利用可能となる見通しが得られた。

第3章では幾何モデルと有限要素法を用いたシミュレーションを有機的に結ぶシステムの要素技術について述べた。また、多くの形状設計と信頼性設計（強度や性能の評価と確認）を通じて実務に適用した結果についても述べた。これらの要素技術開発とシステム化の結果、幾何モデルを中核としたCAD/CAM/CAE一貫システムの中で、形状設計から有限要素法を用いたシミュレーションに至る設計上の必須の手順がサポートできるようになった。本システムは、第2章で述べたシステム構想を実用システムとして具体化したものである。

以下に、本システムの成果をその特徴ごとにまとめる。

- ①自由曲面を含め任意の形状に対応できる守備範囲の広い要素分割アルゴリズムを構成することができた。
- ②サブストラクチャ自動探索機能の開発により、対話処理による要素分割領域を指示する複雑さを大幅に軽減できた。
- ③サブストラクチャ方式によるコマンド体系により、有限要素モデルから解析

モデルまでのモデル化作業に関する操作性の向上ができた。

④有限要素分割手法において、統一的なアルゴリズムで不等分割と特殊分割を実現する手法を開発した。

⑤ポストプロセッサの機能として、利用者の直感的な評価を支援するCGを用いた色彩表示機能をはじめとするシミュレーションの結果を表示する機能群を構築した。

⑥本システムを実務に適用することでその有効性を確認するとともに、設計計算業務の信頼性向上と省力化に貢献した。

第4章では生産工程のなかで設計計算モデルと計算力学手法を有機的に結ぶシステムのうち、その基本機能となる設計計算モデリング機能と要素分割機能について述べた。設計計算モデルは、幾何モデルに設計情報や形状に付随する情報を図形の属性情報としてもたせることでモデル化した。そして設計計算モデルのデータを活用することで、任意の2ないし3次元の形状を自動的に要素分割する手法を開発した。更に設計計算モデルの属性情報を、シミュレーションの入力データに自動変換する機能も開発した。これらの機能により、設計計算モデルを定義するだけで要素分割から問題定義までの対話処理を自動化できることを確認した。また実際の設計業務を通じてこれらの機能を適用し、その評価を行った。その結果、従来の対話形構造解析支援システムなどに比べて、大幅な設計業務の効率化が達成できることがわかった。これらのことから、計算力学手法を用いたシミュレーションに対して熟知していない利用者にも簡単に利用できるようになり、従来よりも手短かに設計案の確認や検討ができるようになった。これにより設計者は設計案の確認、改良が容易に行えるようになった。本章で得られた成果と開発した機能の特徴をまとめると、以下に述べるようなことが言える。

- ①計算力学手法を用いたシミュレーションによる設計計算の支援方式を提案した。
- ②マクロストラクチャモデリング方式により、設計計算モデルを定義できるようになった。これにより、属性単位のグルーピングや要素分割における粗密付けの意味付け、及び解析モデルの自動生成などが可能となる事を確認した。また、有限要素法、境界要素法、差分法に係わるモデル化作業を共通的に支援で

きると共に、計算機によるモデル化作業の操作性を大幅に向上できる見通しを得た。

㉔有限要素法、境界要素法、差分法に共通な全自動要素分割方法を開発すると共に、各種手法を用いたシミュレーションプログラムの入力データを設計計算モデルの属性データから共通的に作成する方法を開発した。これにより、計算力学手法を用いたシミュレーションの利用技術の向上を図るとともに、その有効性を確認した。

㉕上記の㉔と㉓の要素技術を開発することにより、①の設計計算支援方式を実現した。これにより計算力学を活用した解析作業が設計計算モデルから直接的に行えるようになり、作業時間の大幅な短縮が可能となった。

㉖本システムを実務に適用することでその有効性を確認するとともに、設計計算業務の信頼性向上と省力化に貢献した。

第5章では対話形のシステムにおいて重要な要素であるユーザインタフェースとCAEの実用化で重要なデータインタフェースの方式について述べた。更に第3章と第4章及び本章で述べた要素技術をシステム化し、計算力学手法を用いた統合的な設計計算支援システムを構築し実業務に適用し、その有効性を確認した。具体的には本章においてCAEのためのVIMSを構築し、第3章と第4章で述べた要素技術をまとめることで発展的にシステム化した。更に、シミュレーションプログラムとのデータインタフェース方式もシステムとして実現し、統合形CAEシステムの周辺環境として整備した。次に、本システムを実際の設計業務に適用しその有効性を評価した。その結果、従来のCAEシステムに比べて、大幅な設計業務の効率化が達成された。すなわち、計算力学手法を用いたシミュレーションに対して熟知していない利用者にも簡単に利用できるようになり、従来よりも手短かに設計案の確認や検討ができるようになった。これにより設計者は設計案の確認、改良が容易に行えるようになった。

以下に、本システムの成果をその特徴ごとにまとめる。

①有限要素法、境界要素法、差分法などの手法別、及び構造、熱、流体などの分野別に異なる設計計算を統一的に活用できるCAEシステムを構築した。

②本システムを実務に適用することでその有効性を確認するとともに、計算力学の利用と設計計算業務において、従来に比べ省力化が実現できることを確認

した。

㉗VIMSの機能を用いることで、その設計部署や個人単位に専用の環境を整備できるようになり、使い勝手の向上ができた。

㉘シミュレーションプログラムとCAEシステムとのデータインタフェースについて変換規則による接続方式を提案し、その変換規則作成を支援するシステムを構築した。これにより、従来困難であった作業を簡略化できた。また、変換規則による接続方式の有効性を確認できた。

以上、本研究では計算力学手法を用いたシミュレーションの利用技術において、設計業務とシミュレーション技術との有機的な連携を設計計算支援という立場で考え、設計業務の省力化と効率向上を目的とするシミュレーション支援方式を提案した。また、本方式に基づいてシミュレーションの支援システムを構築し、実験と評価をすることでこの方式の妥当性を確認した。本研究の結果から得られた知見は、シミュレーション作業の自動化または機械設計における自動化や機械化のための基礎を提供するものである。

本論文は、日立製作所、日立研究所の一研究開発者である著者が約8年の研究開発結果をまとめたものである。本研究開発を遂行するにあたり、多くの方々にお世話になった。

東京大学工学部の矢川元基教授からは、論文の構想の段階から最後まで全般に渡ってきめ細かいご指導と暖かい励ましをいただいた。同学部の吉村忍助教授からは、学会なども通して有益な助言とご討論をいただいた。同学部の中島尚正教授からは、設計自動化研究会(C&D)にお招きいただき専門委員会での発表の場を与えていただくと共に、有益な助言とご討論をいただいた。同学部の三好俊郎教授と大坪英臣教授からは、各論において有益な助言とご討論をいただいた。先端科学技術研究センタの木村文彦教授と教養部の鈴木宏正講師、先端技術研究所の乾助手からは、日立研究所に來所いただき筆者の研究開発内容について2時間以上の討論にご参加いただき、有益な助言とご討論をいただいた。また、現在東京理科大学の川井忠彦(東京大学名誉教授)教授からは日立研究所の研究指導を古くからいただき、本研究開発にも数多くのご助言をいただいた。

日立研究所においては、入所当時から越智利夫博士からは研究の醍醐味を教わり、徳増眞司博士には一からご指導を受け、育てていただいた。明神昭紀氏、村川英二博士(現大阪大学工学部助教授)と大橋鉄也博士からは計算力学について細かくご指導いただくと共に、助言をいただいた。当社エネルギ研究所の宇多村元昭博士(現在、本社研究開発推進部)からは、境界要素法についてご指導いただくと共にシステムの普及に協力いただいた。日立エンジニアリング主任技師麻生哲夫氏、日立日本プロセス遠山 真氏には、システム開発にご協力いただいた。また、本研究開発の過程においては、本開発のスポンサでありユーザである日立製作所の多くの工場の現場の方々には本研究開発のサポートとご助言をいただいた。

以上の方々を始めとし、本論文と研究開発をまとめる過程においてお世話いただいた方々に深く謝意を表す次第である。

参考文献

- [1] I. E. Sutherland: Sketchpad a man-machine graphical communication system: Proceedings of Spring Joint Computer Conference, p329-346, 1963
- [2] I. C. Braid, C. A. Lang: Computer-Aided Design of Mechanical components With Volume Building Bricks: Proceedings of PROLAMAT '73, p173-184, 1973
- [3] N. Okino, Y. Kakazu, H. Kubo: TIPS-1: Technical Information Processing System for Computer Aided Design, Drawing and Manufacturing: Proceedings of PROLAMAT '73, p141-150, 1973
- [4] 田中 豊喜, 須賀 康男: 射出成形製品と金型の設計にCAEプラスチック製品開発の戦力に: 日経メカニカル別冊CAD/CAM/CAE, 1985
- [5] 武田 俊男: 現代人のコンピュータ CAE: 朝倉書店, 1986
- [6] 日本情報処理開発協会発行: CAEに関する調査研究報告書: 1982
- [7] 相澤 龍彦, 前川 佳徳 編著: CAE-新製品開発・設計支援コンピュータ・ツール-: 共立出版, 1988
- [8] 圓佛 誠孝: CAE-新しい設計思想とそのツール: 図形と画像, 秋号(Sept-Nov), 1982(PIXEL, Vol. 3, No. 3, 1982)
- [9] 矢川 元基, 金山 寛: 機械設計における有限要素解析の最新動向: PIXEL, No. 66, p99-104, 1988, 3
- [10] 川井 忠彦: 計算シミュレーションの世界: PIXEL, No. 73, p152-159, 1988, 10
- [11] 川井 忠彦: 技術計算テクノロジーの将来: 機械設計, 33巻, 10号, p54-56, 1989, 9
- [12] H. C. Martin: Introduction to Matrix Methods of Structural Analysis: McGraw Hill Inc., N.Y., 1966
- [13] 鷲津 久一郎, ほか4名共編: 有限要素法ハンドブック I 基礎編: 倍風館, 1981
- [14] T. Kawai, N. Takeuchi, Y. Kamio: A New Discrete Limit Analysis of

- Underground Structures: Proceedings of ASME (Invited Lecture), San Francisco, p1-11, 1980. 8
- [15] 麻生 哲夫, ほか3名: 固体接触問題の離散化極限解析: 第3回シミュレーションテクノロジーコンファレンス講演論文集, p209-212, 1983. 5
- [16] 浅野 悦男: プリ/ポスト・プロセッサの最新技術動向: PIXEL, No.71, p112-121, 1988. 8
- [17] 嘉味田 清: CAEシステムにおけるプリ/ポスト・プロセッサ: CAD/CAM, CG年鑑88(PIXEL別冊No.7), p61-63, 1989
- [18] 藤田 祐二, 牧 登, 平田 昌信: 第1回CADユーザ利用実態調査: 日経CG, p21-61, 1987.10
- [19] 中島 憲宏: CAEモデルと要素分割 —現状のCAEの問題点—: 第8回設計自動化講演会講演論文集, p40-42, 1988.7
- [20] 早川 光春, 他3名: CAD/CAMシステムとエンジニアリングワークステーションの動向: 日立評論, 69巻, 2号, 1987. 2
- [21] 日本機械学会編: CADシステムの機能と構成: 技報堂出版, 第2.5巻, 1987
- [22] 特集2: ユーザの考えるCAD/CAM, CAE: PIXEL, No.48, p128-142, 1986. 1
- [23] 藤田 祐二, ほか3名: 第2回CADユーザ利用実態調査: 日経CG, p27-59, 1988.10
- [24] A.M.Lounti, S.H.Simmonds: An integrated system for the production of joists: 6th ASCE Conference of Electronic Computation, 1974
- [25] V.A.Tischler, L.J.D.Bernier: Considerations for developing a general finite element pre-and postprocessing system: International Symposium on Structural Mechanics and Software, 1974
- [26] L.D.Hofmeister: A drafting program for isoparametric finite elements: International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.12, No.3, p585-529, 1978
- [27] 佐々木 貴, 他4名: 構造解析効率化システム“KSSA”の開発:

川崎技報, 66号, p1-6, 1978. 4

- [28] D.Lorenz: Interactive use of ICES: Proceedings of 22th IUG- Conference, p29-45, 1979.10
- [29] K.E.Buck, U.V.Bodisco, K.Winkler: Finite element data generation and presentation of results: Proceedings of 3rd International Conference on Computers in Engineering and building design, CAD 78, UK, p723-733, 1978. 3
- [30] 米長 治男, 馬場 亘, 大西 忠博: 対話方式による有限要素法の形状データの作成: 情報処理, Vol.18, No.1, p50-57, 1977. 1
- [31] N.Nakazawa, S.Tokumasu, et al(4): Interactive design system for structure analysis and strength evaluation:HIDESS: Proceedings of Computers in Engineering, ASME, Vol.3, p55-61, 1982
- [32] R.Perucchio, A.R.Ingraffea: Interactive computer graphics preprocessing for three-dimensional boundary-integral element: Computers & Structures, Vol.16, No.1-4, p153-166, 1983
- [33] H.M.Johnson, R.J.Pomares: Finite element modeling analysis using distributed processing: Proceedings of Computers in Engineering, ASME, Vol.3, p39-42, 1983
- [34] M.Mishkin, I.Zeid: Interactive finite element analysis on a commercial turnkey CAD/CAM system: Proceedings of Computers in Engineering, ASME, Vol.3, p167-171, 1983
- [35] J.Collins: Finite element modeling:Pre and Post-processing on a desktop computer: Proceedings of Computers in Engineering, ASME, Vol.3, p21-27, 1983
- [36] 結城 皓暁, 他5名: 構造解析プリプロセッサ:SANA/MESHの機能: 石川島播磨技報, 24巻, 5号, p330-335, 1984. 9
- [37] 中島 憲宏, 他3名: 有限要素法のためのインタフェイスシステムの開発: 日本機械学会論文誌(C編), 52巻, 474号, p806-812, 1986. 2 (日本機械学会講演論文集, 論文番号85-0350B, 1985.11)
- [38] P.Spanti: SUPERTAB:modellazione ed analisi ad elementi finiti:

PIXEL, No. 6, p57-59, 1986

- [39] A.Kela, R.Perucchio, H.Voelcker: Toward automatic finite element analysis: Computers in Mechanical Engineering, Vol.5, No.1, p57-71, 1986. 6
- [40] 堀 吉晴, 他3名: スーパーコンピュータを利用したCAEシステムの構築: 日産技報, 22号, p174-181, 1986. 12
- [41] 中島 憲宏, 他3名: 対話形構造解析支援システム "H I C A D / F E M": 日立評論, 69巻, 2号, 1987. 2
- [42] 小野 修一郎, 山内 由美, 小堀 研一: シミュレーション支援システム Kernel-Prepostの開発: シャープ技報, 37巻, p45-59, 1987
- [43] 松永 康二, 他5名: 海洋構造物の波浪中性能解析システム: SEA-PASSの開発: 石川島播磨技報, 27巻, 1号, p13-17, 1987. 1
- [44] 永瀬 純, 兼井 敏彰: 設計者が簡単に使えるFEM解析システム CAD-FEM連動システム: PIXEL, No. 87, p47-51, 1987. 5
- [45] 山崎 幸雄, 他3名: カラー図形表示機能をもつ構造解析前後処理システムの開発とその適用: 石川島播磨技報, 28巻, 2号, p69-74, 1988. 3
- [46] CAE構造分科会: 有限要素解析ブリ・ポストシステム "SCOPE" の開発: 住友重機技報, 36巻, 108号, p32-37, 1988. 12
- [47] 日野 正人: 構造解析におけるMESH3Dシステム: 住友重機技報, 36巻, 108号, p32-37, 1988. 12
- [48] 住本 正, 梶島 武文: 新製品を支援するCAE: 安川電機, 52巻, 280号, No. 3, p248-254, 1988
- [49] 長谷川 勝利, 他6名: 機械系CAEシステムCAE-2D[E], CAE-TM: NEC技報, 41巻, 12号, p135-145, 1988
- [50] 森田 隆一, 堤 健一: プラスチック製品設計のためのCAEシステム: 機械設計, 33巻, 3号, p93-98, 1989. 3
- [51] 中島 憲宏, 他3名: 統合形CAEシミュレーション支援システム-CAESAの開発-: 電気学会論文誌, Vol.109-D, No.3, p153-160, 1989 (電気学会, 産業システム情報化研究会資料, IIS-88-6, p1-10, 1988. 6)
- [52] 中島 憲宏, 徳増 鏡司: 計算力学手法を用いた設計計算の支援方式:

: 日本機械学会論文誌 (C編), 第55巻, 518号, p2649-2656, 1989. 10 (日本機械学会講演論文集, 論文番号88-1564A, 1989. 7)

- [53] 日立製作所編: 構造解析システムHICAD/FEMマニュアル: 8890-7-038, 1984. 5
- [54] J. Puig-Pey, C.A. Brebbia (Editors): Computer Aided Engineering Systems Handbook Vol.1, II: Computational Mechanics Publications, Springer-Verlag, 1987
- [55] シリーズ企画: 機械設計用CAEと構造解析: PIXEL, No. 66, p105-115, 1988. 3
- [56] 高張 研一: 統合化CAEシステム: ファクトリ・オートメーション, 原稿No. F01-36, p72-78, 1989. 8
- [57] 矢川 元基, 吉村 忍: 人工知能と計算力学①: 機械の研究, 39巻, 11号, p1175-1180, 1987
- [58] 矢川 元基, 吉村 忍: 人工知能と計算力学②: 機械の研究, 39巻, 12号, p1307-1311, 1987
- [59] 矢川 元基, 吉村 忍: 計算力学への知識工学利用: 日本機械学会誌, 92巻, 847号, p25-30, 1989. 6
- [60] 吉村 忍, 矢川 元基, ほか2名: オブジェクト指向による汎用構造解析コード支援システムの開発: 第8回シミュレーションテクノロジーコンファレンス講演論文集, p73-75, 1989. 6
- [61] W.R. Buell, B.A. Bush: Mesh Generation - A Survey: Transactions of ASME, Series B, Journal of Engineering for Industry, Vol. 95, p332-338, 1973. 2
- [62] W.C. Thacker: A brief review of techniques for generating irregular computational grids: International Journal for Numerical Methods in engineering, Vol. 15, No. 9, p1335-1341, 1980
- [63] 横山 正明: 有限要素解析のための自動要素分割技法: 精密機械, 48巻, 12号, p116-122, 1982. 12
- [64] 尾田 十八: 有限要素自動分割法の現状とその利用法①: 機械の研究, 37巻, 6号, p26-30, 1985

- [65] M.S. Shephard: Finite element modeling within an integrated geometric modeling environment: Part 1-Mesh generation: Engineering with computers, No.1, p61-71, 1985
- [66] 大坪 英臣: F.E.M.の最近の動向(その4): 日本船舶学会誌, 702号, p37-48, 1987, 12
- [67] 中橋 和博: 計算流体力学における格子生成: 情報処理, 30巻, 7号, p767-774, 1989, 7
- [68] N. Sapidis, R. Perucchio: Advanced techniques for automatic finite element meshing from solid models: Computer-Aided Design, Vol.21, No.4, p248-253, 1989, 5
- [69] J.C. Cavendish, D.A. Field, W.H. Frey: An Approach to Automatic Three-dimensional Finite Element Mesh Generation: International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.21, p329-347, 1985
- [70] D.N. Shenton, Z.J. Cendes: Three-dimensional finite element using Delaunay tessellation: 1985
- [71] J.C. Sabonnadiere, et al(3): Finite element pre-processing in electro-magnetics: Proceedings of IMACS, 1986
- [72] W.J. Schroeder, M.S. Shephard: Geometry-based fully automation mesh generation and the Delaunay Triangulation: International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.26, p2503-2515, 1988
- [73] 宮下 賢一, 木下 英生, 中前 栄一郎: 3次元電界境界解析のための四面体要素自動作成の一方法: 電気学会論文誌D, 109巻, 6号, p431-438, 1989
- [74] 徳増 眞司, 明神 昭紀: 図形処理における自動分割法について: 情報処理学会第12回大会講演論文集, 論文番号No.42, p83-84, 1971
- [75] J. Shihara, J. Fukuda: Automatic Mesh Generation For Finite Element Analysis: Advance in Computational Methods in Structural Mechanics & Design, University of Alabama Press, Alabama, p607-624, 1972
- [76] J.C. Cavendish: Automatic triangulation of arbitrary planar domains for the finite element method: International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.8, p679-696, 1974
- [77] R.D. Shaw, R.G. Pitcher: Modifications to the Sahara-Fukuda method of network generation: International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.12, p93-98, 1978
- [78] 横山 正明, 辺見 直樹: 機械運転時に発生する物理現象の自動シミュレーション(第1報, 二次元応力および変形問題): 日本機械学会講演論文集, 論文番号800-12, p198-200, 1980
- [79] 鈴木 敏之, 他4名: 薄肉リム歯車の歯元応力に関する研究: 日本機械学会論文集(C編), 47巻, 422号, p1366-1374, 1981
- [80] Y.T. Lee, A.D. Pennington, N.K. Shaw: Automatic finite-element mesh generation from geometric models- a point-based approach: ACM Transactions on Graphics, Vol.3, No.4, p287-311, 1984, 10
- [81] 城 道介, 舟田 邦彦: 有限要素法のための可変メッシュ生成プログラム: 精密機械, 47巻, 4号, p399-404, 1981
- [82] M.S. Shephard, M.A. Yerry: An approach to automatic finite element mesh generation: Proceedings of Computers in Engineering, ASME, Vol.1, p21-28, 1982
- [83] M.A. Yerry, M.S. Shephard: A Modified Quadtree approach to finite element mesh generation: IEEE CG&A, No. Jan/Feb, p39-46, 1983
- [84] M.A. Yerry, M.S. Shephard: Automatic three-dimensional mesh generation by the Modified-Octtree approach technique: International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.20, p1965-1980, 1984
- [85] M.S. Shephard: Automatic and adaptive mesh generation: 1985
- [86] M.A. Yerry, M.S. Shephard: Trends in engineering software and hardware - automatic mesh generation for three-dimensional solids: Computers & Structures, Vol.20, No.1-3, p31-38, 1985
- [87] P.L. Baehmann, et al(4): Robust, geometrically based, automatic two-dimensional mesh generation: International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.24, p1043-1078, 1987

- [88] R.A.Ludwig, et al(4): Adaptive solutions of the Euler equations using finite quadtree and octree grids: Computers & Structures, Vol.30, No.1/2, p327-336, 1988
- [89] M.S.Shephard, et al(3): Trends in automatic three-dimensional mesh generation: Computers & Structures, Vol.30, No.1/2, p421-429, 1988
- [90] M.S.Shephard: Approaches to the automatic generation and control of finite element meshes: Applied Mechanics Review, ASME, Vol. 41, No. 4, p169-185, 1988
- [91] 相澤 龍彦, 松田 神一: 4分木モデルによる三角形分割アルゴリズム: 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 10巻, p70-75, 1986. 7
- [92] D.P.Young: A Locally Refined Rectangular Grid for Arbitrary Geometries (PART I): Proceedings of SIAM Annual Meeting, pA31, 1988
- [93] N.Nakajima: New technique for finite element mesh generation by using Coons and Bezier's interpolation: Proceedings of SIAM Annual meeting, pA24, 1988
- [94] 中島 憲宏: 拡張4分木法による要素自動分割手法: 機械学会論文集 (C編), Vol., No., 1990 (掲載予定)
- [95] 中島 憲宏: 計算力学手法を用いたシミュレーションのための要素自動分割システム: 第8回シミュレーションテクノロジーコンファレンス講演論文集, p61-64, 1989. 6
- [96] M.Saxena, R.Peracchio: Element extraction for automatic meshing based on recursive spatial decomposition: Proceedings of Computers in Engineering, ASME, Vol.1, p151-161, 1989
- [97] A.Bykat: Automatic generation of triangular grid:1-subdivision of a general polygon into convex subregions. 11-triangulation of convex polygons: International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.10, p1329-1342, 1976
- [98] E.D.Sadek: A scheme for the automatic generation of triangular

finite elements: International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.15, p1813-1822, 1980

- [99] 城 道介, 秋元 芳夫: 有限要素法のための整合分割プログラム: 精密機械, 46巻, 3号, p288-291, 1980. 4
- [100] 尾田 十八, 木戸 雄二, 西河 雅宏: 陣取り法を利用した新しい有限要素自動分割法: 日本機械学会講演論文集, 論文番号807-2, p69-71, 1980. 9
- [101] C.O.Frederick, Y.C.Wong, F.W.Edge: Two-dimensional automatic mesh generation for structural analysis: International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.2, p133-144, 1970
- [102] F.A.Akyuz: Natural coordinate systems an automatic input data generation scheme for a finite-element method: Nuclear Engineering and Design, North-Holland Publishing Co., Amsterdam, Vol.11, p195-207, 1970
- [103] O.C.Zienkiewicz, D.V.Phillips: An automatic mesh generation scheme for plane and curved surfaces by isoparametric coordinates: International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.3, p519-528, 1971
- [104] 林 泰道: 有限要素法のための自動要素分割手法(平面構造): 三菱重工技報, Vol.9, No.5, p73-79, 1972. 9
- [105] T.Fujii, T.Yuki: Automated data generation and large matrix operation for 3-dimensional plate structure analysis: Theory and Practice in Finite Element Structural Analysis, University of Tokyo Press, p671-686, 1973
- [106] K.Sagawa: Automatic mesh generation for three dimensional structures based on their three views: Theory and Practice in Finite Element Structural Analysis, University of Tokyo Press, p687-703, 1973
- [107] 加藤 広: 有限要素法における自動分割とその応用: 日産技報, 9号, p51-61, 1974. 2
- [108] R.D.Leick, A.B.Potvin: Automated mesh generation for tubular

- joint stress analysis: Computers & Structures, Vol.7, p73-91, 1977
- [109] J.F.Thompson, C.F.Thames, C.W.Mastin: TOMCAT-A Code for Numerical generation of Boundary-fitted Curvilinear Coordinate Systems on Fields Containing Any Number of Arbitrary two-dimensional Bodies: Journal of Computational Physics, 24, p274-302, 1977
- [110] 戸田 剛雄: ヒューリスティックサーチ法の平面構造物自動分割への応用: 日本鋼構造協会第11回大会研究会マトリックス解析法研究発表論文集, p535-542, 1977. 6
- [111] 福田 順子, 栢原 二郎: Interactive Graphicsによる有限要素の自動分割: 日本鋼構造協会第11回大会研究会マトリックス解析法研究発表論文集, p543-548, 1977. 6
- [112] 今福 一英, 河野 誠: 有限要素法における一般的な自動要素分割法(三次元体を除く構造について): 日本鋼構造協会第11回大会研究会マトリックス解析法研究発表論文集, p549-554, 1977. 6
- [113] 小寺 洋一, 原 平八郎: 重み付き自動要素分割法の一検討: 日本鋼構造協会第11回大会研究会マトリックス解析法研究発表論文集, p555-560, 1977. 6
- [114] 安川 度, 植西 正裕, 谷沢 正: F.E.M.3次元板構造物自動分割プログラム "MESH/3D" について: 川崎技報, 63号, p29-35, 1977. 3
- [115] A.Denayer: Automatic generation of finite element meshes: Computers & Structures, Vol.9, No.4, p359-364, 1978
- [116] 福田 順子: 対話形式による有限要素メッシュの自動生成と修正: 情報処理学会論文誌, Vol.20, No.6, p494-500, 1979.11
- [117] A.J.G.Schoofs, L.H.Th.M.van Beukering, M.L.C.Sluiser: A general purpose two-dimensional mesh generator: Engineering Software, PENTECH London, p3-17, 1979
- [118] M.L.C.Sluiser, D.L.Hansen: A general purpose automatic mesh generator for shell and solid finite elements: Proceedings of Computers in Engineering, ASME, Vol.1, p29-34, 1982
- [119] R.Baber, et al(4): A general two-dimensional, graphical finite

- element preprocessor utilizing discrete transfinite mappings: International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.17, p1015-1044, 1981
- [120] 成田 隆, 金沢 義昭, 河辺 盛男: パターン式自動分割と回転機への応用: 沖鋼電気, 27巻, 2号, p64-69, 1982
- [121] S.Hinduja, K.Sadeghipour, J.R.Murthy: An interactive program for generating an optimum mesh within a structure: Proceedings of Computers in Engineering, ASME, Vol.3, p117-123, 1983
- [122] 三木 一克: Boundary-fit曲線座標変換法による流体・電磁解析: 情報処理, 30巻, 7号, p782-788, 1989.7
- [123] W.J.Gordon, C.A.Hall: Construction of curvilinear co-ordinate systems and application to mesh generation: International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.7, p461-477, 1973
- [124] W.A.Cook: Body oriented(natural) co-ordinates for generating three-dimensional meshes: International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.8, p27-43, 1974
- [125] S.C.Wu, J.F.Abel: Representation and discretization of arbitrary surfaces for finite element analysis: International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.14, p813-836, 1979
- [126] F.Ghassemi: Automatic mesh generation scheme for a two- or three-dimensional triangular curved surface: Computers & Structures, Vol.15, No.6, p613-626, 1982
- [127] 相澤 龍彦: 3次元境界要素自動分割法について: 境界要素法研究会第1回境界要素法シンポジウム, p133-138, 1984.11
- [128] 太田 吉美, 中島 憲宏: 幾何モデル要素分割手法の研究: 日本機械学会論文誌(C編), 52巻, 484号, p3221-3228, 1986.12
(日本機械学会講演論文集, 論文番号85-116A, 1986.10)
- [129] T.H.Richards, G.C.Onwubolu: Linking plate/shell finite-element analysis and engineering drafting by meshed surface modelling: computer-aided-design, Vol.18, No.6, p327-336, 1986.7/8

- [130] G.C. Onwubolu: Finite element mesh generation of 3D-surfaces in CAD: Computers & Structures, Vol.32, No.1, p31-36, 1988
- [131] A.M. Winslow: Numerical solution of the quasilinear poisson equation in a nonuniform triangle mesh: Journal of Computational Physics, Vol.2, p149-172, 1967
- [132] E.R.A. Oliveira: Optimization of finite element solutions: Proceedings of the 3rd conference on Matrix methods in structural Mechanics, 1971.10
- [133] D.J. Turcke, G.M. McNeice: Guidelines for selecting finite element grids based on an optimization study: Computers & Structures, Vol.4, p499-519, 1974
- [134] C.A. Felippa: Optimization of finite element grids by direct energy search: Applied Mathematics and Modelling, Vol.1, p93-96, 1976. 9
- [135] R.J. Melosh, P.V. Marcal: A energy basis for mesh refinement of structural continua: International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.11, p1083-1091, 1977
- [136] M.S. Shephard, R.H. Gallagher, J.F. Abel: The synthesis of near-optimum finite element meshes with interactive computer graphics: International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.15, p1021-1039, 1980
- [137] 大坪 英臣: 有限要素法の最近の動向(その1) - 誤差評価と順応型要素分割 - : 日本造船学会誌, 683号, p21-32, 1986. 5
- [138] 関くいんと発行: 第4回OPTIMESHセミナーテキスト: 1987. 6
- [139] A.R. Diaz, N. Kikuchi, J.E. Taylor: A method of grid optimization for finite element methods: Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.41, p29-45, 1983
- [140] I. Babuska: Advances in the P and h-P versions of the finite element method. A survey: p1-12, 1988. 7 (Given by mail after the annual meeting of SIAM, 1988)
- [141] 瀧口 靖幸, 田中 正夫, 根津 順一: 動的計画法による最適有限要素分割: 日本機械学会論文集(A編), 第49巻, 第438号, p247-257, 1983. 2
- [142] 川面 恵司, 他3名: 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, 14巻, 5号, p334-340, 1973. 5
- [143] R.J. Melosh, P.V. Marcal, L. Berke: Structural analysis consultation using artificial intelligence: p175-194, 1978
- [144] J.S. Bennett, R.S. Englemore: SACON: A knowledge-base consultant for structural analysis: Proceedings of 6th IJCAI, p47-49, 1979
- [145] 新石川島播磨エネルギー事業本部第3開発部: 構造解析システム: COSMOSの開発: 石川島播磨技報, 第25巻, 第6号, p383-387, 1985.11
- [146] 曾根田 直樹, 吉村 忍, 矢川 元基: 自動要素分割へのあいまい知識処理手法の応用: 第37回応用力学連合会議演習稿集, p303-304, 1987.12
- [147] T.D. Blacker, et al(4): Automated quadrilateral mesh generation: A knowledge system approach: Proceedings of Winter annual meeting of ASME, 1988.12
- [148] 堀田 廣嗣, 清水 正巳, 小林 栄一: 最近のCAEシステムとその活用: 明電時報, 185号, 1985. 6
- [149] G.J. Peters: interactive computer graphics application of the PARAMETRIC BI-CUBIC SURFACE to engineering design problems: COMPUTER AIDED GEOMETRIC DESIGN, Edited by R.E. Barnhill & R.F. Riesenfeld, Academic Press, New York, p259-299, 1974
- [150] G. Belic: Flow visualization in the space shuttle's main engine: Mechanical Engineering, Vol.107, No.9, p27-33, 1985. 9
- [151] 中前 栄八郎: シミュレーションの可視化: 情報処理, Vol.28, No.3, 1987. 3
- [152] R. Baumgart: Winged edge polyhedron representation: Technical report CS-320 Stanford Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University(CA, USA), 1972
- [153] R.E. Barnhill, R.F. Riesenfeld(Editor): COMPUTER AIDED GEOMETRIC DESIGN, Academic Press, New York, 1974

- [154] M. Hosaka, F. Kimura: An interactive geometrical design system with handwriting input: Proceedings of IFIP Congress(Toronto), p167-172, 1977. 8
- [155] F. Kimura: Geomap-III: Designing Solids with Free-form surfaces: IEEE Computer Graphics & Applications, p58-72, 1984. 7
- [156] A. Baer, C. Eastman, M. Henrion: Geometric modelling: a survey: computer-aided-design, Vol.11, No.5, p251-272, 1979
- [157] Y. E. Kalay: The hybrid edge: a topological data structure for vertically integrated geometric modelling: computer-aided-design, Vol.21, No.3, p130-140, 1989. 4
- [158] 徳増 眞司, ほか4名: 幾何モデリングシステム "H I C A D" の開発: 日立評論, Vol.65, No.3, p177-182, 1982. 3
- [159] S. Tokumasu, Y. Ohta, N. Nakajima: Implementaion of Geometric Modeling System:HICAD: Computer Graphics, Springer-Verlag, p111-126, 1983
- [160] S. Tokumasu, et al(4): Solid model in Geometric Modeling System: HICAD: IEEE Proceedings of the 20th Design Automation Conference, p360-366, 1983
- [161] N. Nakajima, et al(3): Direct generation of solid model from wire-frame model in CAD system: IEEE Proceedings of International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON'86), p61-66, 1986.10(Industrial applications of mini, micro & personal computers)
- [162] 相沢 民王: C A E データベースのためのデータの複包体積モデル: 第5回設計自動化工学講演会講演論文集, p49-52, 1987. 7
- [163] 増田 宏, 嶋田 憲司, 川辺 真嗣: 設計作業に適した3次元モデリングシステム(第1報) - 非多様体幾何に基づく形状モデリング - : 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, p445-446, 1988
- [164] N. Nakajima, Y. Kunitomo: An approach to automate CAE modeling by automatic mesh generation with a knowledge based problem specification

- technique: Proceedings of the 9th International Conference on the CAD/CAM, CG and CAT(MICAD'90(France)), p232-246, 1990. 2
- [165] F. Kimura, et al: A study on product modelling for integration of CAD/CAM: Computers in industry(North-Holland), Vol.5, No.3, p239-252, 1984
- [166] N. Okino: O/O dualism for CAD/CAM software architecture: Annals of CIRP, Vol.34, No.1, 1985
- [167] 中島 尚正: 製品の形状入力, データ構造, 解析: PIXEL, No.40, p31-96, 1986. 1
- [168] 伊藤 公俊: 設計者の心理プロセスに基づく機械部品モデリングの試み: PIXEL, No.40, p97-105, 1986. 1
- [169] 木村 文彦: CAD/CAM統合化のためのプロダクトモデリングと知識情報処理: 日本機械学会誌, 第89巻, 第815号, p47-53, 1986
- [170] 小島 俊雄, 今村 聡: F A における C A D システム技術: 計測と制御, Vol.26, No.7, p19-24, 1987. 7
- [171] 若原 剛人, ほか4名: 加工向きプロダクトモデルに基づくマシンニングセンタ用加工命令の自動生成: 精密工学会誌, 第53巻, 第7号, p74-79, 1987
- [172] D. Daiz: The power of parametrics: Mechanical Engineering, p58-62, 1989. 1
- [173] S. Drake, S. Sela: A foundation for feature: Mechanical Engineering, p66-73, 1989. 1
- [174] T. Smithers: AI-based design versus geometry-based design or why design cannnot be supported by geometry alone: computer-aided-design, Vol.21, No.3, p141-150, 1989. 4
- [175] McNeal-Schwendler Corporation: MSC/NASTRAN User's Manual:
- [176] MARC Analysis Research Corporation: MARC User Information Manual:
- [177] K. J. Bathe: ADINA-A finite element program for automatic dynamic incremental nonlinear analysis: Report No.82448-1, Mechanical

- Engineering Department, MIT, 1978
- [178] 大坪 英臣:汎用構造解析プログラムSAP-IVの紹介:東京大学大型計算機センターニュース, Vol.12, No.5, p102-117, 1980. 5
- [179] 朝日製作所編:ISAS-I ユーザマニュアル機能編第1, 2分冊:
- [180] P.E.Bézier: Numerical control - Mathematics & applications:, John Wiley and Sons, London, 1972
- [181] S.A.Coons: Surfaces for computer-aided design of space forms: Project MAC, Massachusetts Institute of Technology, MAC-TR-41, 1967. 6
- [182] J.H.Clark: Hierarchical geometric models for visible surface algorithms: Communications of the ACM, Vol.19, No.10, p547-554, 1976.10
- [183] H.Samet: Region representation:Quadrees from boundary codes: Communications of the ACM:Graphics and image processing, Vol.23, No.3, p163-170, 1980.3
- [184] C.L.Jackins, S.L.Tanimoto: Oct-tree and their use in representing three-dimensional objects: Computer Graphics and Image Processing, Vol.14, p249-270, 1980
- [185] T.Kunii: Generation of topological boundary representations from octree encoding: IEEE Computer Graphics & Applications, 1985. 3
- [186] 大須賀 節雄:次世代CAD/CAMのための知識処理の応用:マグローヒルブック株式会社, 1985
- [187] D.J.Kasil: A user interface management system: Computer Graphics, Vol.16, No.3, p99-106, 1982. 6
- [188] 佐川 健:応力解析汎用プログラム“HISTRAN”の概要と適用例:日立評論, 第57巻, 第12号, p1051-1056, 1975. 12
- [189] 宇多村 元昭, 小泉 真, 狩野 泰信:境界要素法による一般三次元電界解析手法の開発:電気学会 回転機/静止器合同研究会資料, RM-85-35/SA-85-44, p43-52, 1985.11
- [190] 大塚 雅哉, 山川 正剛:ナトリウム温度成層化実験:第21回日本伝熱シンポジウム講演論文集, p37-38, 1984. 5

