

ISSN 0452-2982
UDC 519. 6. 681. 3

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-628

構造解析用プリ／ポストプロセッサシステム の開発について

奥村 秀人 ・ 大竹 邦彦 ・ 峯尾 真一
望月 治 ・ 小島 邦彦 ・ 篠原 健司

1990年10月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

構造解析用プリ／ポストプロセッサシステムの開発について*

奥村 秀人*¹ 大竹 邦彦*² 峯尾 真一*³
望月 治*³ 小島 邦彦*⁴ 篠原 健司*⁴

1. はじめに

今日、有限要素法を主体とした設計・解析システムは大型で複雑な形状をした構造物の設計・解析の強力なツールとして確立している。このような設計・解析システムには、航空宇宙分野の構造物の大型化および実用化に伴い、多量のデータを迅速にかつ視覚的に処理を行なうことができる有効なプリプロセッサとポストプロセッサを装備したCAE (COMPUTER AIDED ENGINEERING) システムが不可欠である。また研究者、技術者が結果の分析や理解を容易にするためにシステムがグラフィックス端末を利用した会話型の操作になっていることも必須である。すでに機械設計などにおいては個々に特徴ある汎用的なプリプロセッサやポストプロセッサが多く存在しているが、航空宇宙分野においては、汎用有限要素解析プログラムを組込んだ設計解析者の立場に立った有効なCAEシステムは少ないようである。このような現状を鑑み、本研究所の構造研究開発サブシステムでは、汎用構造解析プログラムADINAなどの構造解析プログラム群を中枢とした航空宇宙分野の設計解析に優れたCAEシステムの構築を行なっている。

本CAEシステムにおけるプリプロセッサは主に有限要素法による解析プログラムの入力に関するデータ作成および各プログラムへの出力のためのデータ変換を行なう3次元形状モデリングシス

テム(CAE-3D/MA)とFEMメッシュモデリングシステム(CAE-FINE/3D, CAE-FINE/PRE)から成りまたポストプロセッサには計算結果のグラフィック処理システム(CAE-FINE/POST, ISAP/GRAPHIC V2)から構成されている。これらのシステムは各インターフェースおよびコミュニケーションファイルによりCAEシステムの総合的なプリ／ポスト・プロセッサを構成し、構造物のモデル化および結果の評価における一連の作業をグラフィックス端末により、大型構造物の各部分構造に至るまで正確に把握することができる。

本報告では、構造研究開発サブシステムのCAEシステムにおけるプリ／ポスト・プロセッサの構成・機能および性能について述べることにする。

2. プリ／ポスト・プロセッサの概要

構造研究サブシステムにおけるCAEシステムは図1のように構成されている。汎用構造解析プログラムADINAなどの有限要素法を主体としたプログラム群を使用して、一連の処理の過程では、グラフィックス端末により多量の入力および計算結果の出力データを高速にしかもユーザが会話的にプリ／ポストの処理ができるようになっている。プリプロセッサには、線や面による対象物体の3次元形状モデリングを行なうCAE-3D/MAと梁、板、シェル、立体などの有限要素分割を行なうFEMメッシュモデリングのためのCAE-FINE/3Dおよび各要素の物性値、荷重条件、拘束条件、節点・要素に関するテーブルを生成するCAE-FINE/PREから構成されている。またポストプロセッサはグラフィック処理をするCAE-FINE/POST, ISAP/GRAPHIC-V2により構成されている。プリプロセッサにおける一連のフローは図2

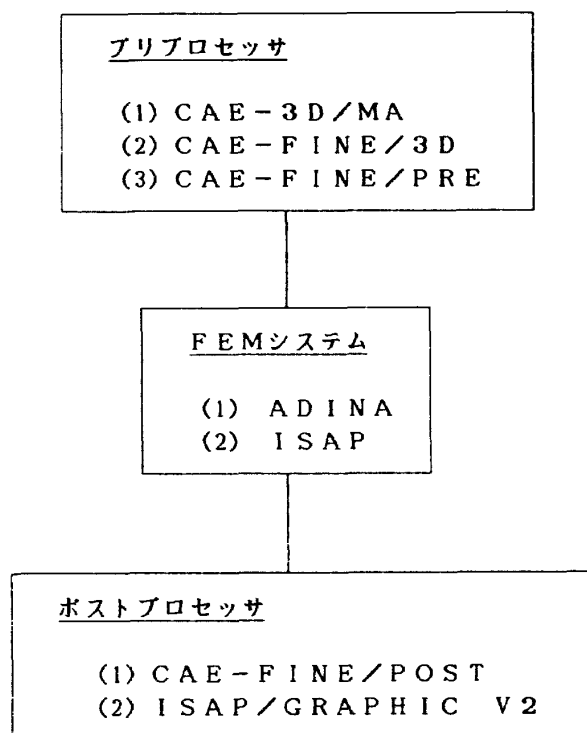
* 平成2年7月17日受付

*1 数理解析部

*2 構造力学部

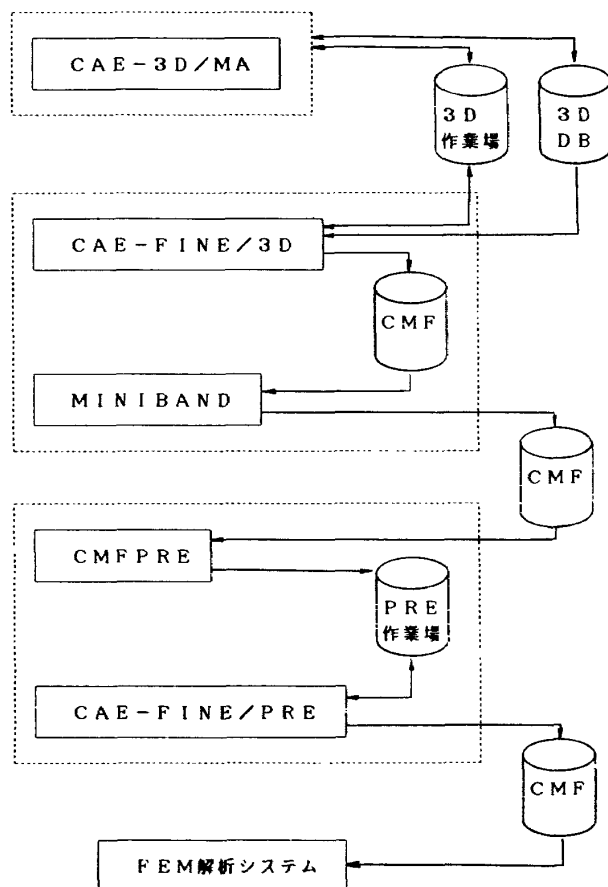
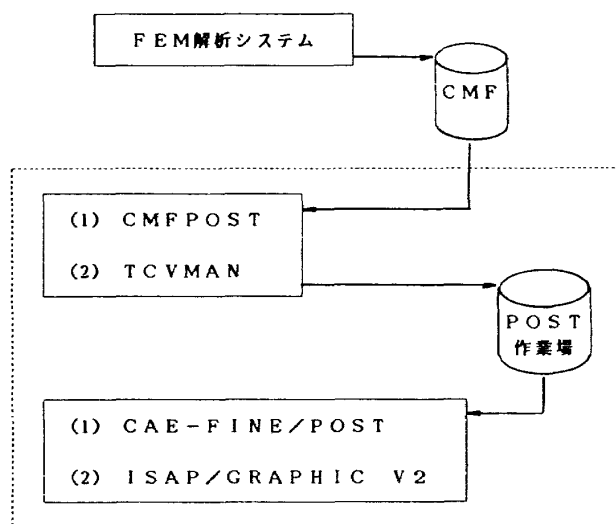
*3 日本電気㈱

*4 現日本電気航空宇宙システム㈱

図1 プリ/ポストプロセッサシステムの構成図⁶⁾

のようにまず CAE-3D/MA により対象とする構造物を線、面等により 3 次元の幾何学的形状モデルを作成する。生成された形状データは 3D-DB 形状ファイルに格納する。格納された形状ファイルを用いて CAE-FINE/3D により有限要素分割を行なう。生成された有限要素の分割データをコミュニケーションファイル (CMF; 以下 CMF と略す) に格納する。さらにデータトランスレータにより CMF のメッシュデータを CAE-FINE/PRE の作業場にデータ変換をして格納する。CAE-FINE/PRE により構造モデルに対し各要素の物性値、境界条件、荷重条件の設定をおこなってデータを CMF に格納する。最後にデータトランスレータにより CMF に格納された有限要素データを汎用構造解析プログラム ADINA の入力用などにデータを変換する。

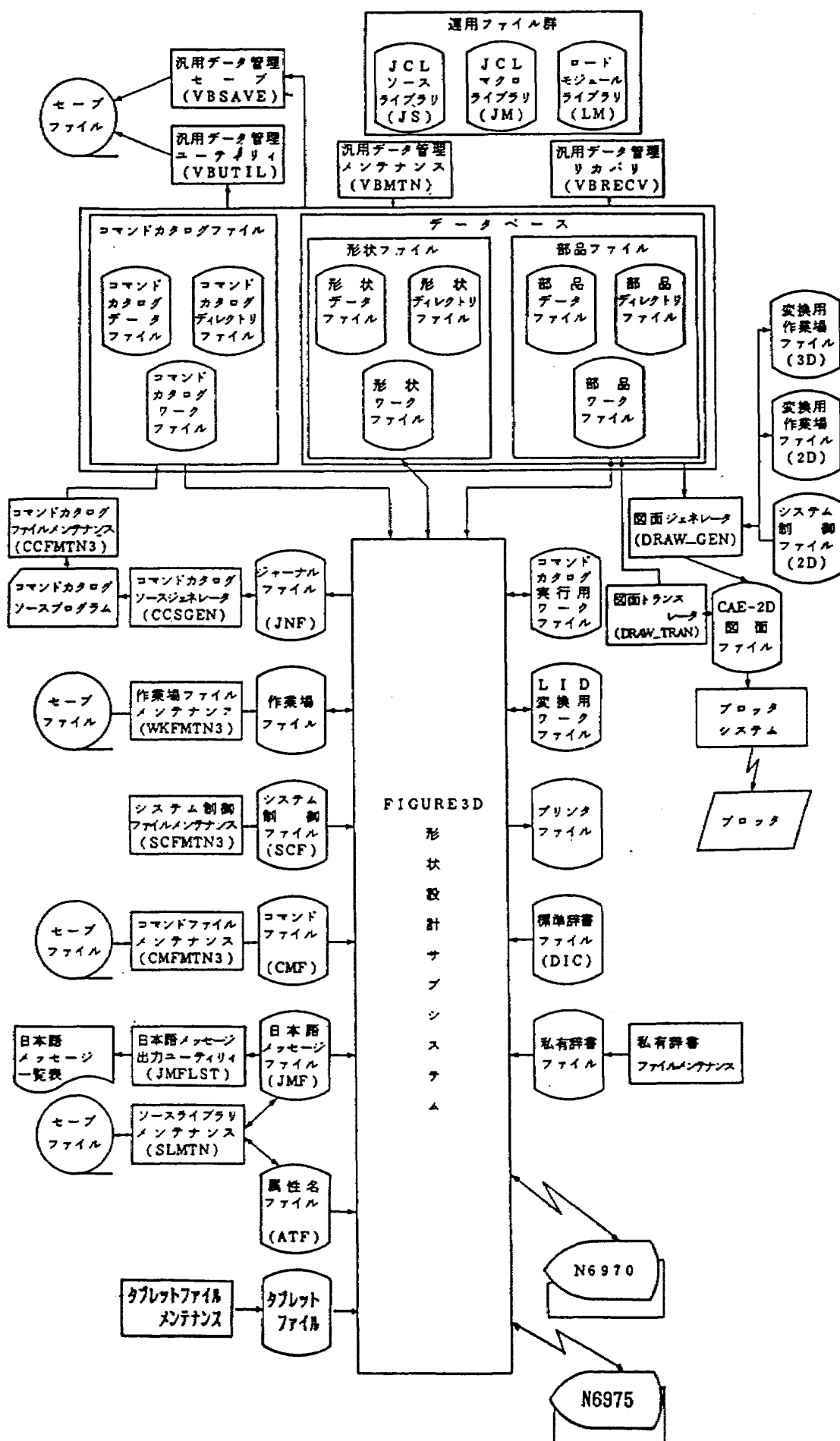
つぎにポストプロセッサにおける一連のフローは図 3 に示す。構造解析プログラム群で解析した出力結果をもとに CAE-FINE/POST, ISAP/GRAPHIC V2 用の入力に対応する CMF を作成して格納する。この CMF を用い、CAE-FINE/POST, あるいは ISAP/GRAPHIC V2 によってグラフィック処理をする。

図2 プリプロセッサのフロー⁶⁾図3 ポストプロセッサのフロー⁶⁾

3. システム構成要素の機能と性能

3.1 3次元形状モデリングシステム (CAE-3D/MA)²⁾

3次元形状モデリングシステム (CAE-3D/MA) は、大型で複雑な形状をした構造物の 3 次元形状

図4 CAE-3D/MA システムの構成図²⁾

を各部分構造の結合状態にいたるまで正確にモデル化することができる。またCAE-3D/MA システムのグラフィックス機能により、グラフィック端末を用いてモデル化に伴う多量のデータを迅速にかつ視覚的に扱うことができる。

図4に CAE-3D/MA のシステム構成図を示す。

3次元形状モデリングシステムは、主につぎのような機能を有している。

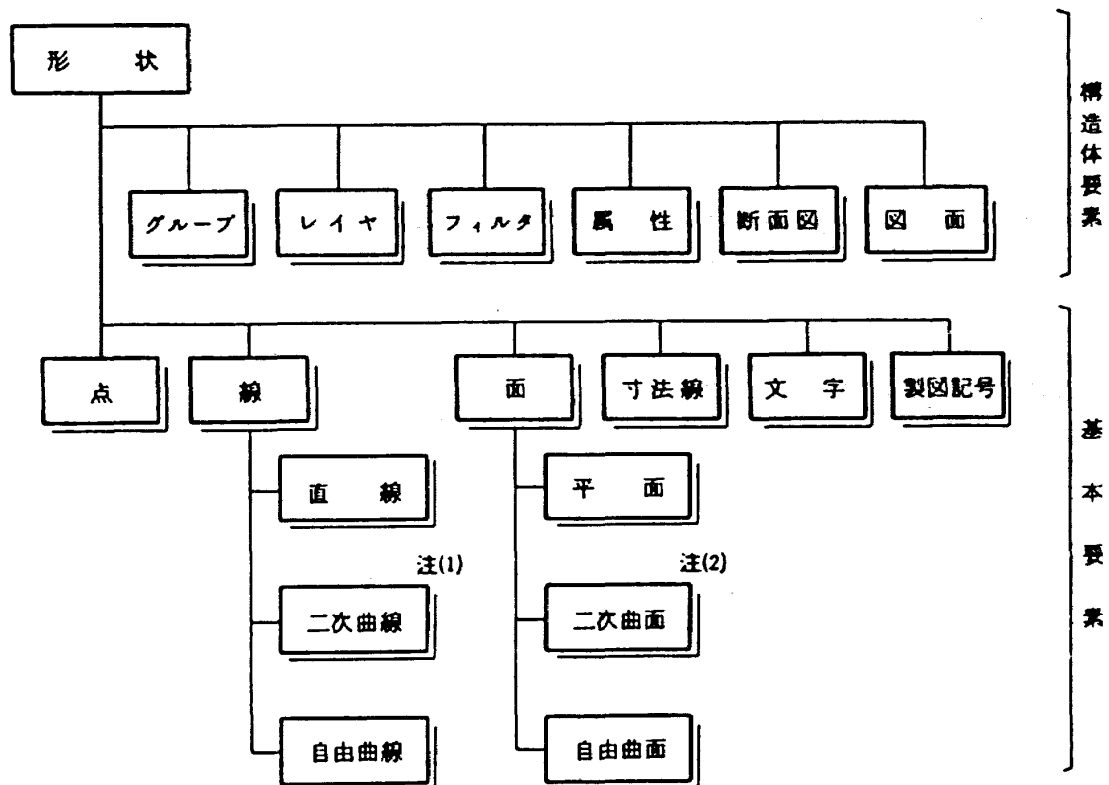
- (1) 線（直線，二次曲線，自由曲線），面（平面，二次曲面，自由曲面）および立体により対象とする構造物の稜線，表面，内部の3次元形状モデルを生成することができる。
- (2) 3次元形状の表面積，体積，重心などの計算機能を有し，さらに部分構造間の干渉も視覚的のみならず数値的にも確認できる。
- (3) 3次元モデリングデータを有限要素プログラムに引渡すことおよび隠線消去処理やビューイング処理を施して図面データとして引渡しインターフェイス機能を有する。

- (4) 部分構造モデルの合成，分解が容易であり，また3次元形状の投影図を複数枚画面に割り付けることができる。
- (5) 複数のコマンドを組合せて実行するコマンドカタログを作成して，会話処理の効率化，自動化を促進することができる。

3次元形状モデルに関するデータ構造は図5のような基本要素と構造体要素が属する階層構造になっている。

- (1) 基本要素……点，線（直線，二次曲線，自由曲線），面（平面，二次曲面，自由曲面）などの曲面上に表示するデータ。
- (2) 構造体要素……グループ，レイヤ，フィルタ，属性，断面図などの基本要素の集合体または基本要素間の関連，性質を表現するデータ。

本システムで使用するコマンドは処理指示コマンドと操作指示コマンドに分けられ，それぞれレベル1とレベル2の2階層の構造になっている。



注(1) 二次曲線には，円（弧），楕円（弧）がある。

(2) 二次曲面には，球面，円錐面，円柱面がある。

図5 CAE-3D/MA のデータ構造図²⁾

各コマンドの機能と各レベルの状態は次のようになっている。

(1) 処理指示コマンド

各種の処理の実行を指示するコマンドである。

(a) レベル 1 のコマンド

点の生成や表示の制御などのまとまった機能を指示するコマンドである。

(b) レベル 2 のコマンド

レベル 1 のコマンドの機能の中でさらに詳細な機能を処理するコマンドである。

(2) 操作指示コマンド

コマンドの処理の流れに関して制御を行なうコマンドである。

(a) レベル 1 のコマンド

全コマンドで共通な操作の指示をしたり、またコマンドから独立した機能も有する。

(b) レベル 2 のコマンド

レベル 1 のコマンドの中で共通な操作の指示をするコマンドである。

3.2 FEM メッシュモデリングシステム

(CAE-FINE/3D)²⁾, (CAE-FINE/PRE)⁴⁾

FEM メッシュモデリングシステムのフローは図 6 のようになっている。はじめに CAE-3D/MA で生成されたデータファイルを基本データとして、CAE-FINE/3D の線要素、面要素および立体要素などの有限要素によって、3次元形状モデルを有限要素分割することができる^{7,8)}。また CAE-FINE/3D システムは独自のグラフィックス機能を内蔵しているため、他のシステムの助けなしに画像の作成表示を行なうことができる。

CAE-FINE/3D システムで生成したメッシュモデルは、CAE システムの共通インターフェイスファイルであるコミュニケーションファイル(CMF)に出力する。さらにこのファイルをデータトランスレータにより CAE-FINE/PRE システムのための PRE 作業場ファイルに出力する。次にこの PRE 作業場ファイルを基にして、有限要素モデルに対して要素の物性値、境界条件、荷重条件等の設定を行ない、このデータを CMF に出力する。

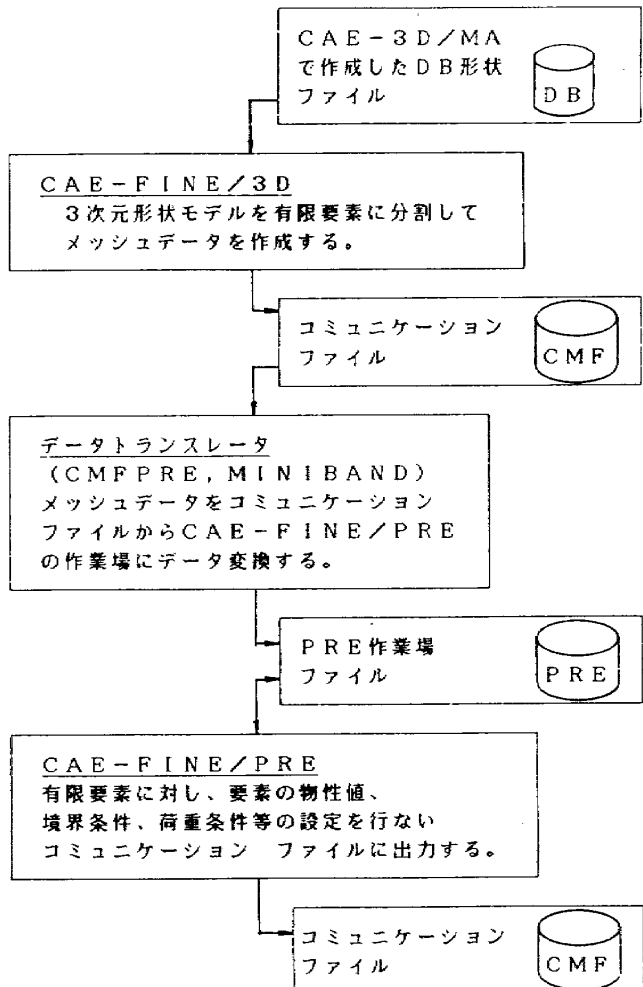
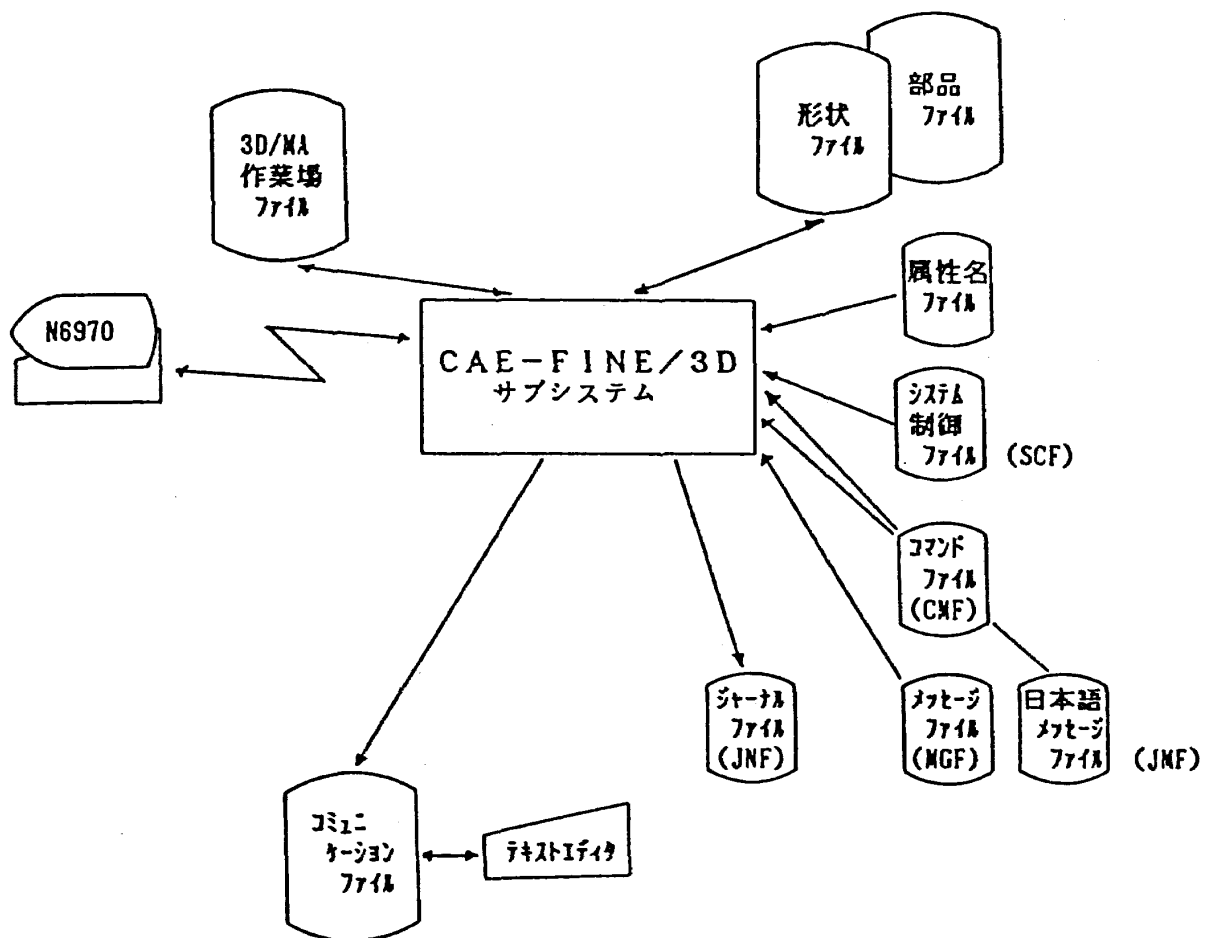
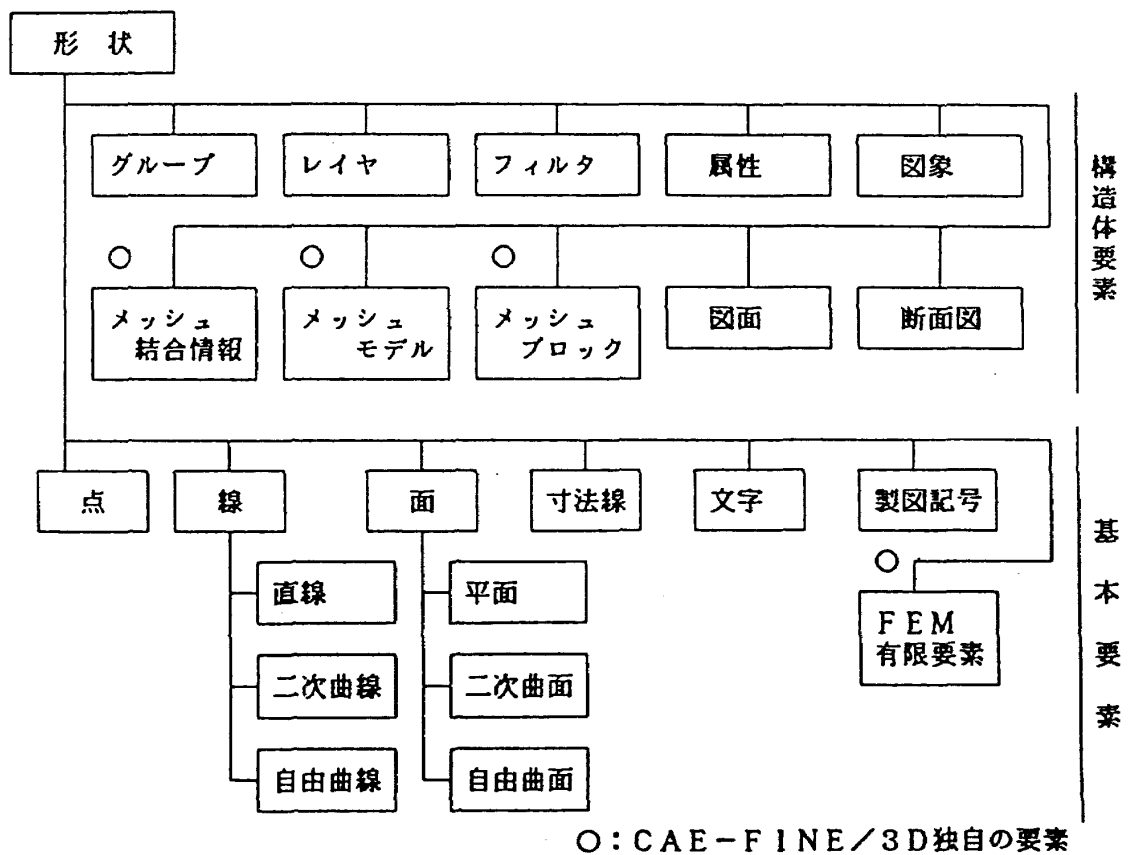


図 6 FEM メッシュモデリングシステムのフロー

CAE-FINE/3Dの構成を図7に示す。CAE-FINE/3Dは、コマンド体系やデータ構造が3次元形状モデリングシステム(CAE-3D/MA)と系統的に共通性を持っており、CAE-FINE/3Dで生成する全てのメッシュモデルは、CAEシステムの標準インターフェイスファイルである CMF に出力されるために、CAE-FINE/PREは言うまでもなく、その他のシステムにおいても容易に扱える特徴を有している。

CAE-FINE/3Dのデータ構成は図8のように CAE-3D/MA と同じく基本要素と構造体要素が属する階層構造になっている。ただし基本要素に属する FEM 有限要素と構造体要素のメッシュ結合情報、メッシュモデルおよびメッシュブロックは CAE-FINE/3D システム独自の要素データである。

- (1) 基本要素……点、線、面、などの曲面上に表示するデータと有限要素のデータ。ここ

図7 CAE-FINE/3D システムの構成図³⁾図8 CAE-FINE/3D のデータ構造図³⁾

で有限要素はメッシュモデルにおける低次から高次の線要素，面要素，立体要素を表現する。

- (2) 構造体要素……グループ，レイヤなどの基本要素の集合体または基本要素間の関連，性質を表現するデータとメッシュ結合情報，メッシュモデルおよびメッシュブロックのデータ。ここでメッシュ結合情報，メッシュモデルおよびメッシュブロックはそれぞれ次のようなデータである。

(a) メッシュ結合情報

同一直線上に異なる節点を生成しないようにするためと形状モデルから外形線上節点を検索するために，形状モデルの外形線上の節点に対応した線分単位の形状モデルデータ。

(b) メッシュモデル

グループの下に作られるメッシュモデルの処理を行なう最上位の形状モデルデータの単位である。ただし複数のメッシュモデルにまたがる処理は行なうことができない。

(c) メッシュブロック

メッシュモデルの下に作られる FEM メッシュの集合を扱うデータの単位である。

次にCAE-FINE/PRE システムの構成図を図 9 に示す。CAE-FINE/PRE システムは主に次のような機能を有している。

- (1) 9種類の要素形状により複雑な形状も容易に表現できる。
- (2) スイープ法によりガイドライン(移動軌跡)を定義し，連続的にメッシュを生成することができる。
- (3) 3次元のメッシュ結合では，結合手法として位置結合を用いている。
- (4) 特性値(材料定数，物理定数，断面性能)，拘束条件(傾斜支持も可能)および荷重条件(節点集中荷重，分布荷重)の設定ができる。
- (5) 構造解析システム ISAP, NASTRAN については，標準トランスレータがある。
- (6) 他の解析システムとの連動を目的として汎用インターフェイスファイルの CMF へのデータ出力ができる。

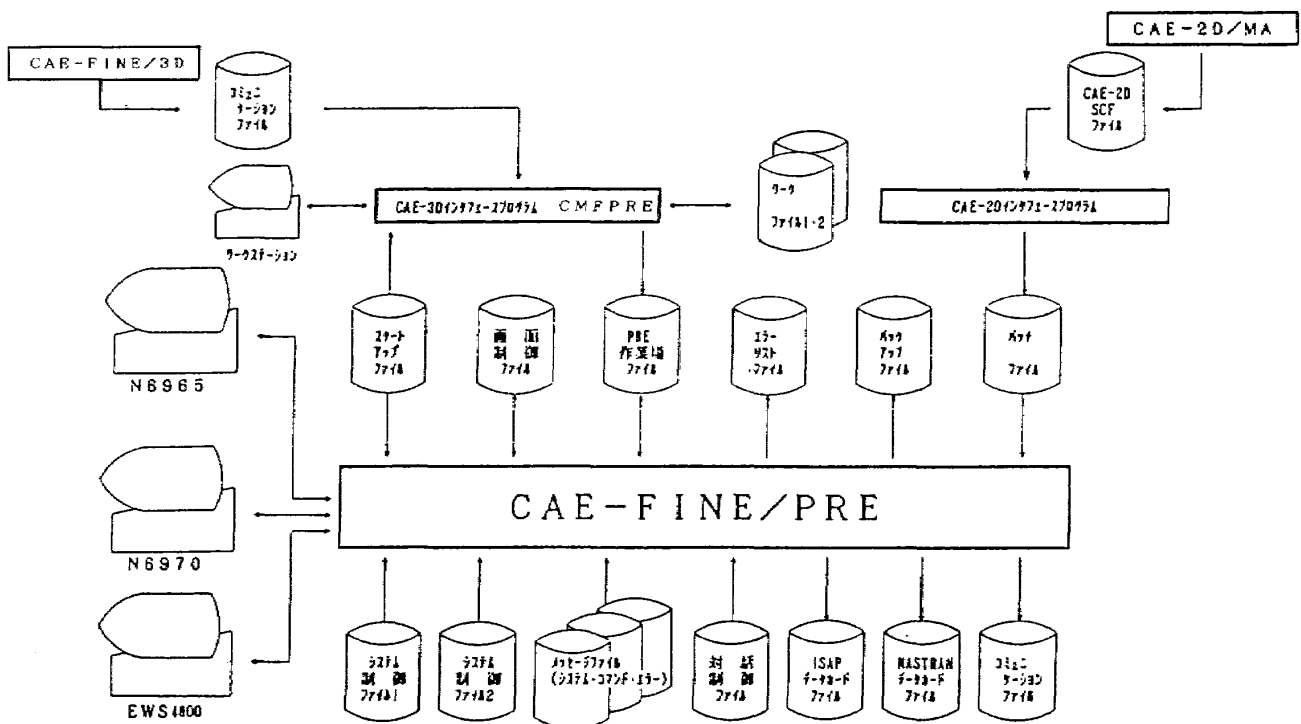
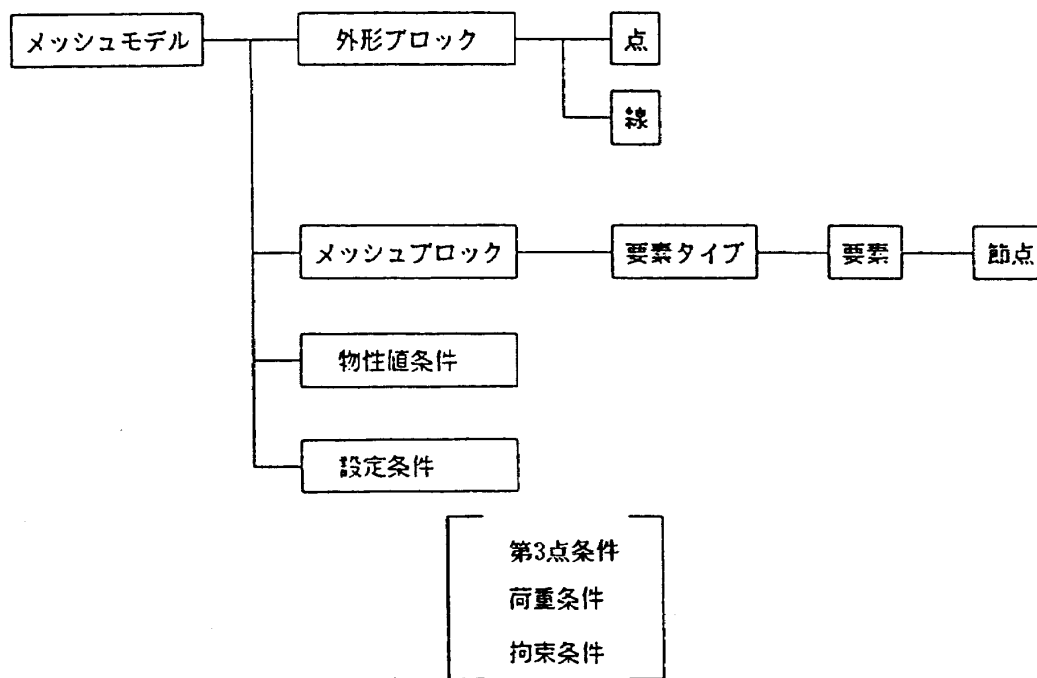


図 9 CAE-FINE/PRE システムの構成図⁴⁾

図10 CAE-FINE/PRE のデータ構造図⁴⁾

CAE-FINE/PRE のデータ構造を図10に示す。解析対象となるメッシュモデルの下にメッシュモデルの形状を構成線により定義する外形ブロック、外形ブロックにメッシュを生成したメッシュブロック、解析モデルの材料定数、物理定数、断面性能を設定する特性条件および第3点条件（はり要素座標系を決定する第3点を設定する）、荷重条件（節点集中荷重および分布荷重を設定する）、拘束条件（節点6自由度の拘束または傾斜支持を設定する）の3条件からなる設定条件が属する階層構造になっている。またコマンドとしては処理指示コマンド、共通処理指示コマンド、操作指示コマンドの3種類があり、次のような機能を有している。

(1) 処理指示コマンド

有限要素法による解析プログラムの入力データの作成を行なうための処理を指示するコマンドで、レベル1、レベル2、レベル3の3段階に階層化されている。

(a) レベル1処理コマンド（L1コマンド）

L1コマンドは、本システムの処理をいくつかの主要なグループに分けた場合の各グループの処理内容（外形定義、メッシュ生成、解析条件の設定など）を示す

コマンドである。L1コマンドは13種類用意されている。

(b) レベル2処理コマンド（L2コマンド）

L1コマンドから呼び出されるコマンドで基本となる機能の具体的な処理を指示することおよびレベル3のコマンドが配下に属しているときは呼び出すことができる。L2コマンドは55種類用意されている。

(c) レベル3処理コマンド

L2コマンドから呼び出されるコマンドで具体的な処理を指示する。L3コマンドは84種類用意されている。

(2) 共通処理指示コマンド

オートスケール、モデルの回転・移動、節点番号・要素番号の表示などの処理指示コマンドの指示を容易にしたり、補助したりするコマンドであり各レベルの処理指示コマンドに共通に使用できる。

(3) 操作指示コマンド

処理指示コマンド、共通処理指示コマンドから共通に使用できるコマンドで主として処理の制御、操作環境の制御や特定コマンドの補助等を行なうことができる。

3.3 グラフィック処理システム

(CAE-FINE/POST)⁵⁾, (ISAP,
GRAPHIC V2)^{1,6)}

一般に有限要素法による汎用構造解析等の大規模構造解析においては膨大な量の出力結果が生成される。このためCAE-FINE/POSTはグラフィック端末を利用して視覚的にかつコマンドメニュー方式による会話型で解析結果のグラフィック化を行なうことができる。

本システムの主なグラフィック処理は次のようなものがある。

- (1) 構造図表示……解析モデルの構造を隠線消去図または簡易隠線消去図で表示する。さらに材料ごとの要素パート別表示、構造モデルの拡大・縮小・反転複写などの機能がある。
- (2) 変形図表示……静的解析、固有値解析の結果を変形図として隠線消去図または簡易隠線消去図で表示する。さらに構造図との重ね描き、変位のスケール変更が容易にすることができる。
- (3) ベクトル図表示……矢印で表示した変位ベクトルや主応力ベクトルのベクトル図を表示することができる。ここで矢印のスケール変更が容易にできる。
- (4) グラフ図表示……静的解析、固有値解析において任意線分上の変位、応力等のグラフ図を表示することができ、また変位、応力等の時刻歴図、周波数応答図の表示をすることができる。さらに複数の結果を同時に表示をすることができ、横軸と縦軸のスケールが容易に変更することができる。
- (5) はり、トラス図表示……はりまたはトラス要素の要素力の表示をすることができる。
- (6) 数値図表示……応力・要素力値を構造図の外面上の数値として表示することができる。また指定範囲内の数値にはアンダーラインを付けたりすることができる。

CAE-FINE/POSTのコマンドは大別して処理指示コマンド、共通処理指示コマンドおよび操作指示コマンドの3種類に分けることができ、主に

次のような機能がある。

(1) 処理指示コマンド

有限要素解析プログラムの解析結果のグラフィックスを行なうための処理を指示するコマンドで、レベル1、レベル2、レベル3の3段階に階層化されている。

(a) レベル1処理コマンド(L1コマンド)

L1コマンドは、本システムの処理をいくつかの主要なグループに分けた場合の各グループの処理内容(構造図表示、変形図表示、コンター図表示など)を示すコマンドである。L1コマンドは16種類用意されている。

(b) レベル2処理コマンド(L2コマンド)

L1コマンドから呼び出されるコマンドでモデルの表示処理などを指示することおよびレベル3のコマンドが配下に属しているときは呼び出すことができる。L2コマンドは55種類用意されている。

(c) レベル3処理コマンド(L3コマンド)

L2コマンドから呼び出されるコマンドでモデルの表示処理などを指示する。L3コマンドは40種類用意されている。

(2) 共通処理指示コマンド

モデルの回転、視点位置の変更などの処理コマンドの指示を容易にしたり、補助したりする機能を有している。このコマンドは各レベルの処理コマンドに共通に使用することができる。

(3) 操作指示コマンド

処理指示コマンド、共通処理指示コマンドから共通に使用できるコマンドで処理の制御を行なうことができる。

4. CAEシステムにおけるインターフェース

4.1 コミュニケーションファイル(CMF)^{1,11)}

有限要素法を主体とする構造解析プログラム群を中心に構成されているCAEシステムにおいて、プリ / ポスト・プロセッサとのデータの受渡しを

行なうために共通インターフェースファイルとしてコミュニケーションファイル (CMF) がある。この CMF によりユーザの一連の処理に対して最適なシステムを選択して組合せることができる。本 CAE システムにおける FEM システム、振動解析システムおよびプリ / ポスト・プロセッサと CMF の関連を図11に示す。

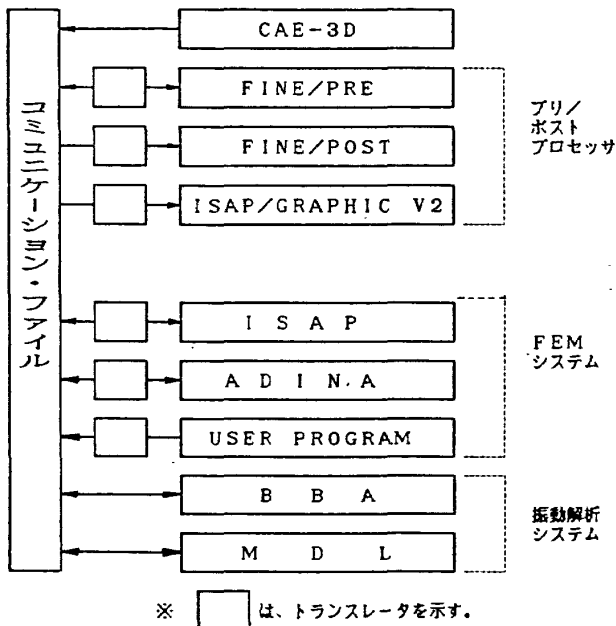


図11 コミュニケーション・ファイルとCAEシステムの関連図⁷⁾

また CMF の構成を図12に示す。図12のように構成は1レコード80バイトの書式付きレコードのファイル (カード・イメージ) であり、複数のグループと呼ばれるデータの集合体となっている。それぞれのグループは図のように「#GROUP」で始まり、「##END」で終了している。

本 CAE システムにおいては次のような場合に CMF を利用している。各フェーズにおけるCMFの内容は文献1) に示されている。

- (1) CAE-FINE/3Dでメッシュモデルを作成し、CAE-FINE/PREの作業場ファイルへのデータ変換を行なうデータトランスレータにデータを引渡す場合。
- (2) CAE FINE/PREで有限要素に対し、要素の物性値、境界条件、荷重条件の設定を行ない、ADINA 等へのデータ変換を行なうデータトランスレータにデータを引渡す場合。
- (3) ADINA 等の構造解析プログラムのためにCAE システムのプリプロセッサで作成した入力データを CMF に格納する場合。
- (4) 構造解析の出力結果を CAE-FINE/POST によって処理を行なうためにデータをCMFに格納する場合。

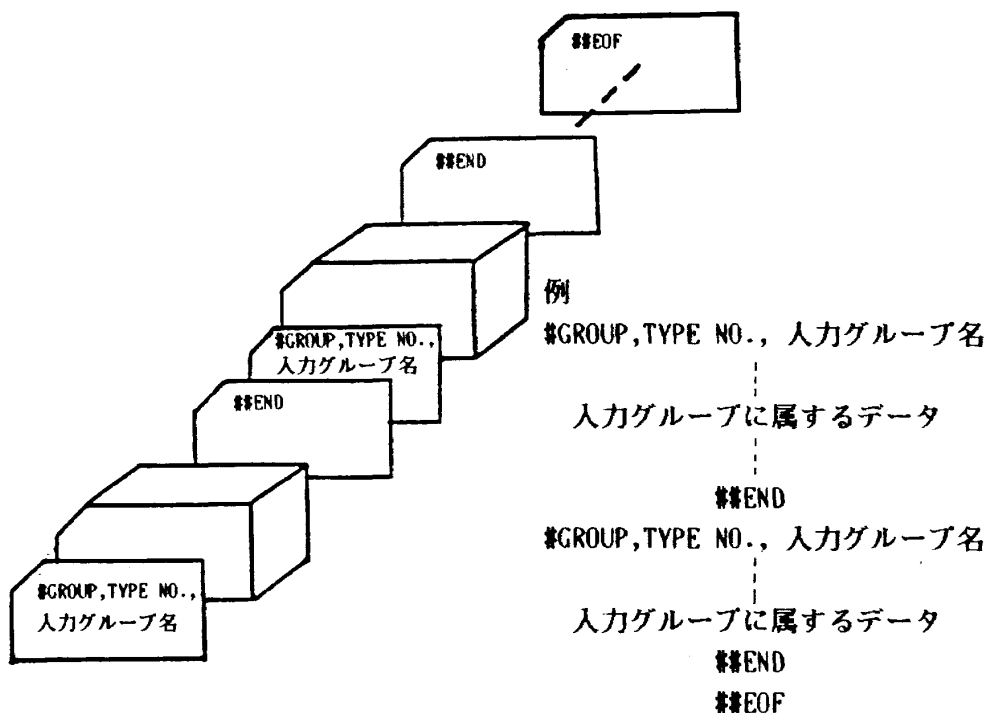


図12 コミュニケーション・ファイルの構成⁷⁾

- (5) 実験において計測したデータをCAE-FINE/POSTを使ってグラフィック処理するために実験データ、構造データを結合するためのテーブルデータを用いてCMFを作成する場合。

解析プログラムとして本CAEシステムのFEMシステムを使用する場合には、CMFをあまり意識しなくても一連のプリ/ポストの処理を行なうことができる。

また他の解析プログラムおよび実験データの処理についても各フェーズにおけるCMFのフォーマットに対応させてデータを変換するトランスレータを作成することにより容易に本CAEシステムを利用することができる。具体的には実験データをグラフィック処理する場合を例として示すと次のようになる。CMF作成プログラムCMFTRNのフローチャートを図13に示す。まず構造データをファイル10より読み込み、さらに構造データと計測データを結合するためのテーブルデータをファイル13より読み込む。つぎに、荷重ケース番号を入力するとファイル14の計測データの中から指定された荷重ケースに対応するデータを探し出して読み込む。3種類のデータを読み込んだ後にCMFの書式にしたがってファイル11に出力する。ファイル11にCMFが作成される。

4.2 バンド幅縮小化プログラム(MINIBAND)とデータ変換プログラム(CTAMAN, ATCMAN)

4.2.1 MINIBAND¹²⁾

有限要素解析におけるソルバーの重要な演算部分に $n \times n$ の正方行列の LDL^T 分解等のマトリックス演算がある。これは連立一次方程式の直接解法において、剛性マトリックスを対象としたときである。剛性マトリックスの LDL^T 分解を例にとると、 LDL^T 分解に必要な演算数は近似的に $1/8 \times (\text{方程式の次数}) \times (\text{バンド幅})^2$ であり、大規模な構造計算においてはバンド幅の影響が大きいことになる。一方でバンド幅は節点の番号付けによって変化するため有限要素メッシュモデルにおいてはバンド幅が最小になるように節点番号付けを

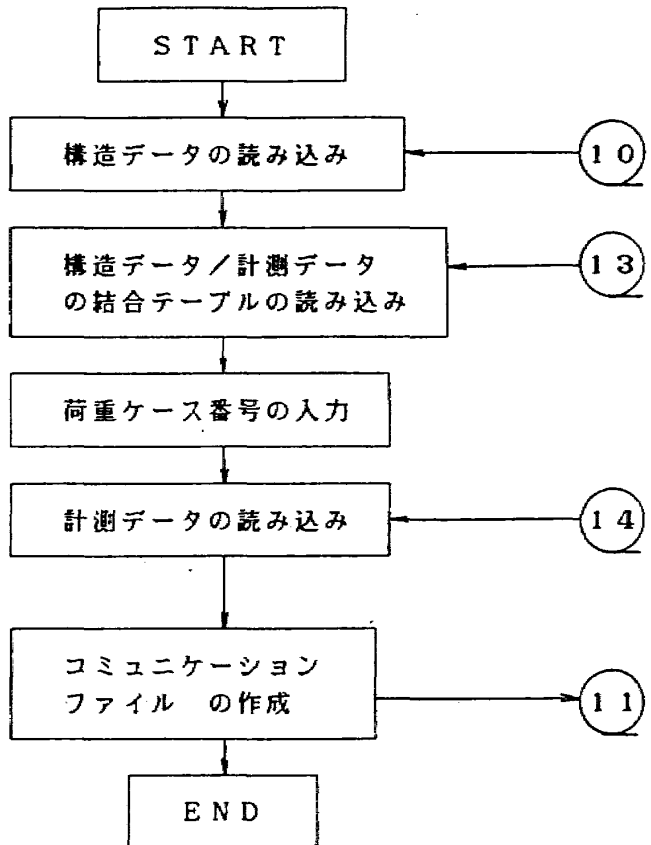


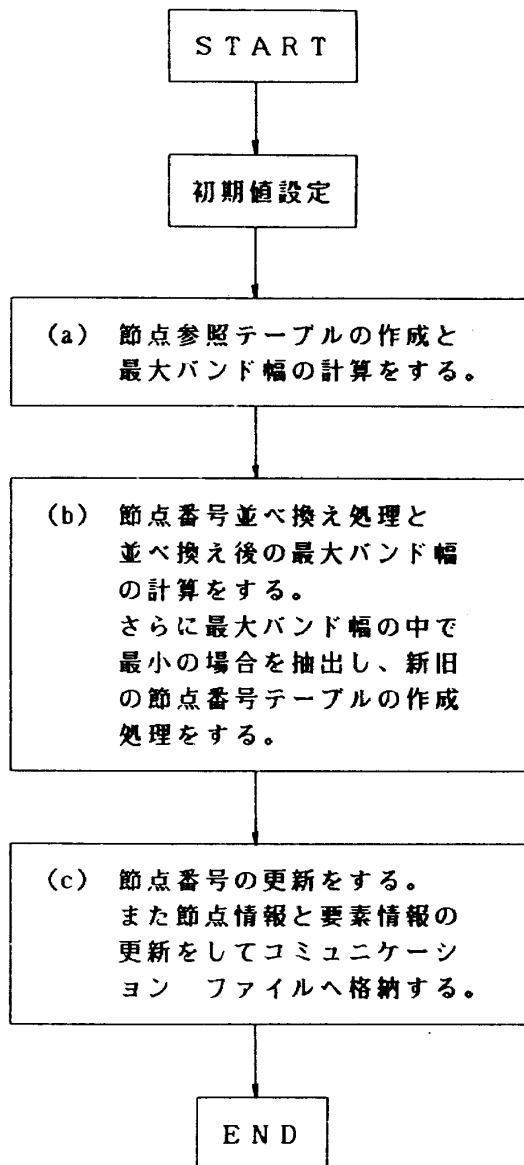
図13 CMFTRN のフローチャート

しなければならない。

本システムにおいてプログラムMINIBANDは、CAE-3D/MAとCAE-FINE/3Dによって作成された有限要素モデルに関してバンド幅を縮小する機能を有している。この機能はCuthill-McKeeのアルゴリズム^{9,10)}を使用している。

プログラムMINIBANDの処理フローを図14に示す。図中のステップ(a)ではコミュニケーションファイル(CMF)の節点情報データを読み込み、節点番号テーブルを作成する。またCMFの要素情報を読み込み、最大バンド幅を計算する。

つぎに要素タイプごとに節点参照テーブルの作成および更新を行なう。ステップ(b)では、節点参照テーブルの参照節点数について最小の節点(参照節点数ゼロを除く)を第1節点(最小の節点が複数ある場合は節点番号最小の節点とする)として、節点番号テーブル<1>へ登録する。次に第1節点の参照節点の中で、それぞれの参照節点数の少ない順に節点番号テーブル<2>へ登録する。すべての参照節点のテーブル<2>への登録が終了した時点で、参照節点の中の節点を順に第1節

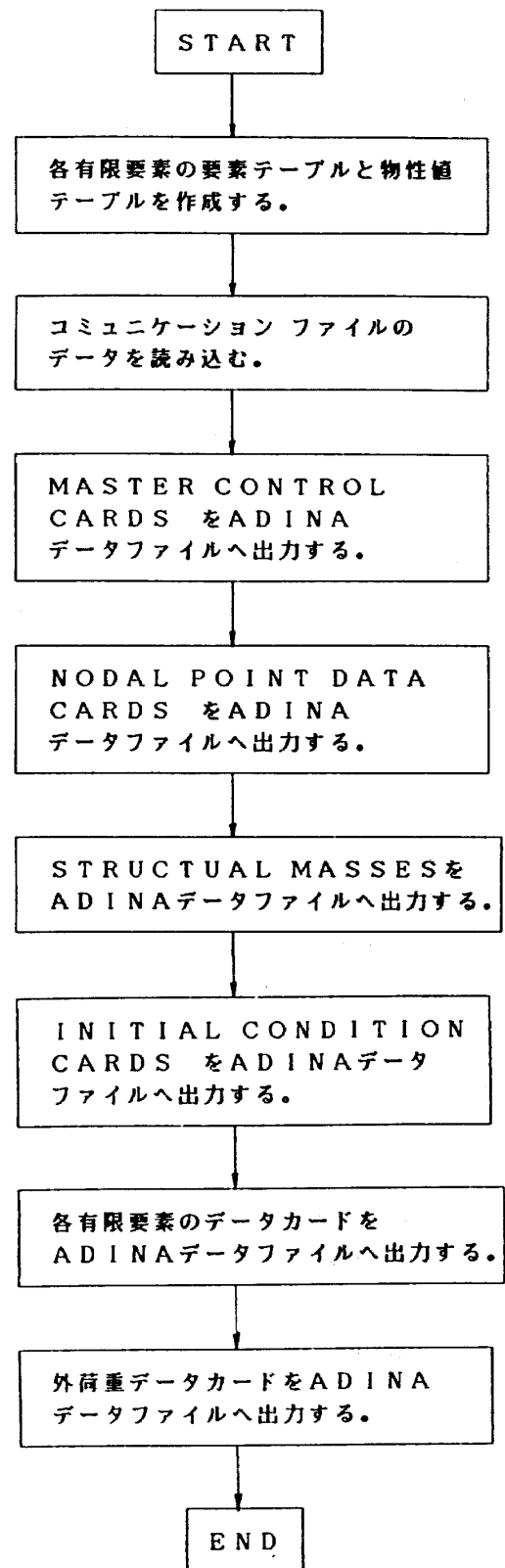
図14 MINIBAND の処理フロー⁹⁾

点として同じ手順でテーブル<2>を作成する。参照節点がゼロ以外の節点をすべてテーブル<2>に登録するまでこの操作を続ける。次にテーブル<2>によりバンド幅を計算してステップ(a)のバンド幅より小さくなった場合のみ並べ換えした新しい節点番号を採用する。

ステップ(c)では、CMF から節点情報を読み込み、並べ換えた新しい節点番号に関するテーブル<2>を調べて昇順に並べ換えて新しい CMF に格納する。次にワークファイルより要素情報を読み込み、要素の新しい構成節点を調べて CMF に格納する。

4.2.2 CTAMAN¹³⁾

トランスレータプログラム CTAMAN はコミュ

図15 CTAMAN の処理フロー⁹⁾

ニケーションファイルのデータを構造解析プログラム ADINA のデータフォーマットに変換するプログラムである。したがってプリプロセッサ側に存在して CAE-3D/MA, CAE-FINE/3D, CAE-

FINE/PREによって作成されたデータをADINAに引渡すためにデータの変換を行なう。CTAMANの処理フローを図15に示す。

4.2.3 ATCMAN¹³⁾

トランスレータプログラムATCMANは構造解析プログラムADINAの解析結果をCAE-FINE/POST等でポスト処理を行なうためのデータ変換とコミュニケーションファイル(CMF)への格納を行なう。したがってポストプロセッサ側に存在してADINAからCMFを介してポストプロセッサにデータを引渡す。ATCMANの処理フローを図16に示す。

5. プリ/ポストプロセッサシステムの適用例⁶⁾

ここでは、本研究で開発・整備したプリ/ポストプロセッサシステムを航空宇宙構造物の研究開発における解析および実験データの処理に適用した。

はじめにATP (Advanced Turbo-Prop) と呼ばれ、ときにUDF (UnDucted Fan) と呼ばれる高速ターボプロップのブレードを例として、プリプロセッサを用いた、ブレードと支持軸が一体化になった構造のモデリング過程を示す。またATPブレードの振動および衝撃の解析結果をポストプロセッサにより作成したグラフィックスの例を紹介する。

つぎにH-IIロケットの衛星フェアリングにおける変形および座屈解析の結果を例として、ポストプロセッサの適用について説明する。

さらに、フェアリングの座屈試験データをポストプロセッサによって可視化したので、そのグラフィックスの例を紹介する。

なお、プリ/ポストプロセッサシステムを各ユーザが利用される場合には、文献2~5)の操作マニュアルを参考にしていきたい。

5.1 ATPブレードの構造解析

航空機の高速化のために、かつてジェットエンジンに取って代わられたプロペラが複合材などの新素材の適用によりATP推進システムとして甦

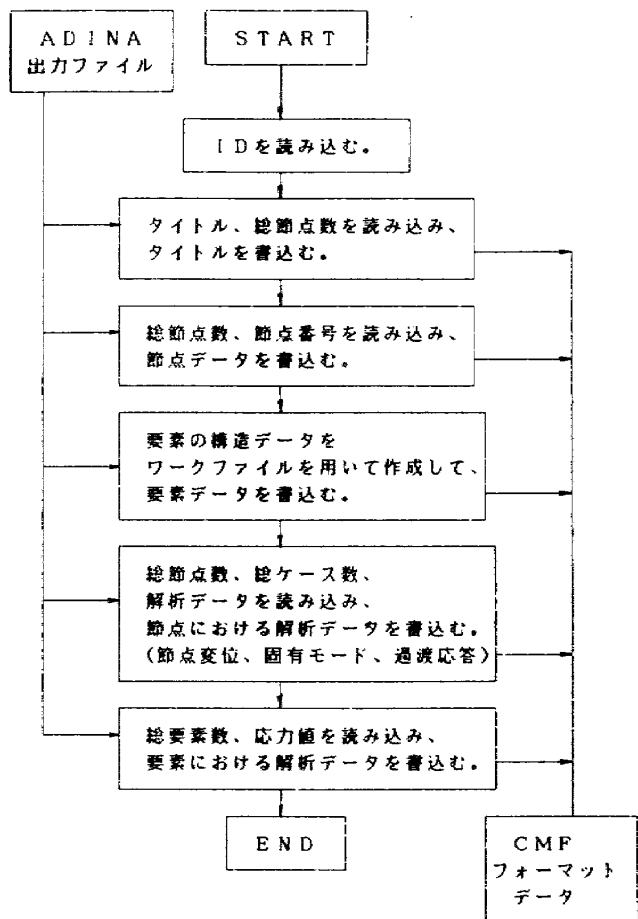
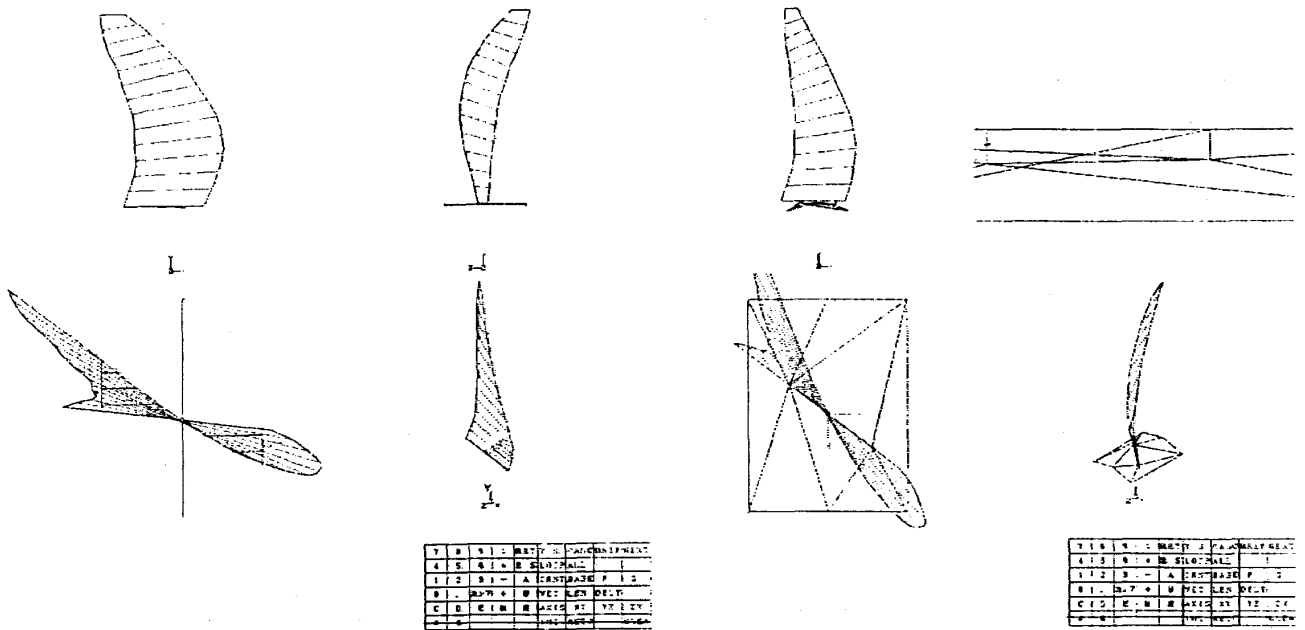


図16 ATCMANの処理フロー⁹⁾

りつつある。ターボプロップ機においては飛行マッハ数0.65程度から急激に推進効率が低下するため、プロペラの枚数を増やし、さらにプロペラの先端部分に後退角をつけたATPはプロペラというよりは船のスクリューのような形状をしている。このようなATPブレードの振動および衝撃解析に本研究で開発したプリ/ポストプロセッサシステムを適用した。

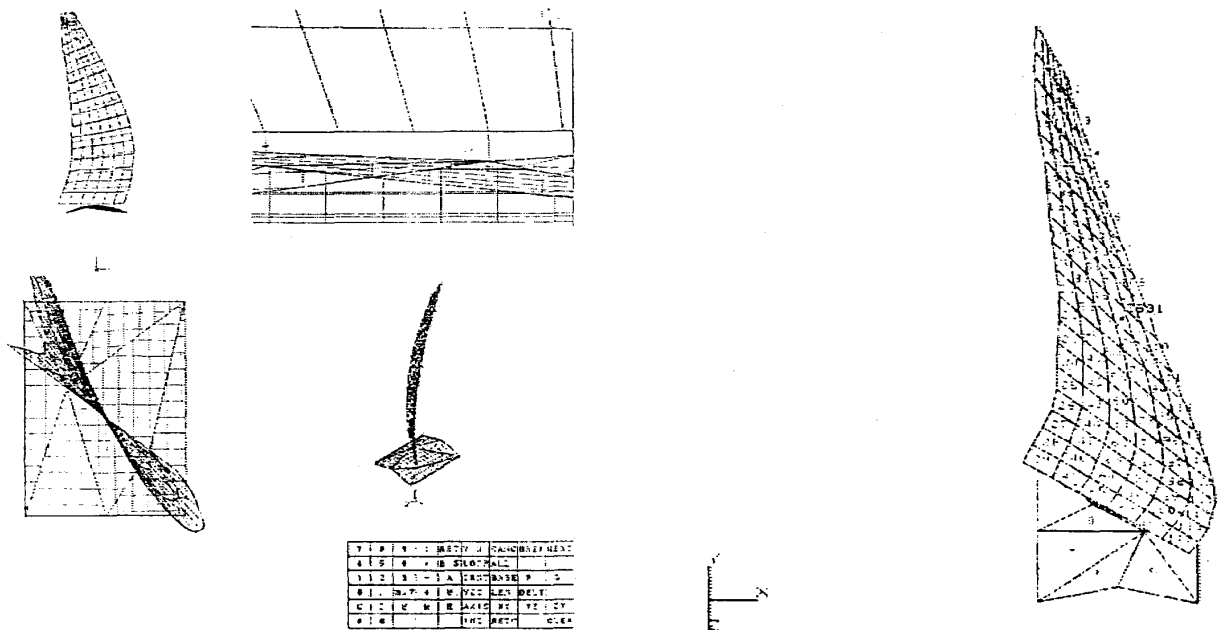
図17は、ATPブレードについてFEM解析するための入力データ作成手順を示したものである。図(a)と(b)においてはCAE-3D/MAにより3次元の幾何学的形状である翼面を作成し、つぎに支持軸部分をつくる。図(c)においてはCAE-FINE/3Dにより有限要素分割を行なう。最後にCAE-FINE/PREによってATPブレードに対して要素の物性値、境界条件、荷重条件の設定を行なった結果を図(d)に示している。

つぎに、このプリプロセッサシステムによりADINAの入力データとして自動生成されたFEM



(a) 翼面を作図する

(b) 支持軸部分を作る



(c) メッシュを生成する

(d) 完成した入力メッシュ図

図17 ATP ブレードの FEM 入力データ作成手順⁶⁾

入力データの例を図18に示す。ただし、ここではメッシュ部分の一部を省略している。

図19は、一連のプリ / ポストプロセッサシステムを総合的に使用して作成した二重反転式プッシャー型の ATP エンジンのイメージモデルである。

図20は、ATP ブレードの振動モードの解析結果を CAE システムによって一組の ATP プロペラに合成したものである。ATP ブレードの振動特

性の把握が容易にできる。

また ATP ブレードの前縁に小石相当の異物が衝突した場合の変形を等高線分布図として表したものを図21に示す。

5.2 H-II ロケット衛星フェアリングの構造解析

H-II ロケットは宇宙開発事業団 (NASDA) が開

```

ACOS-4/MVP XE   VER. R2.11   INTEGRATED LIBRARY MAINTENANCE REV.054   DATE: 88-09-14
DATA OF ADINA ..... (HEAD CARD)
141000000 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
C*** MASTER CONTROL CARD
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
C*** TIME FUNCTION
0 0
C*** NODAL POINT DATA
1 0 0 0 0 0 0 0 -80.36 1005. -194.0 0 0 0
2 0 0 0 0 0 0 0 -88.34 1005. -213.3 0 0 0
3 0 0 0 0 0 0 0 -64.17 977.0 -151.0 0 0 0
4 0 0 0 0 0 0 0 -96.31 1005. -232.5 0 0 0
5 0 0 0 0 0 0 0 -76.14 974.3 -177.5 0 0 0
6 0 0 0 0 0 0 0 -47.86 948.6 -108.3 0 0 0
7 0 0 0 0 0 0 0 -104.3 1005. -251.8 0 0 0
8 0 0 0 0 0 0 0 -86.69 971.8 -200.9 0 0 0
9 0 0 0 0 0 0 0 -63.50 942.9 -141.3 0 0 0
10 0 0 0 0 0 0 0 -31.06 918.7 -66.91 0 0 0
11 0 0 0 0 0 0 0 -112.3 1005. -271.0 0 0 0
12 0 0 0 0 0 0 0 -97.21 969.4 -224.2 0 0 0
13 0 0 0 0 0 0 0 -76.42 938.5 -168.6 0 0 0
14 0 0 0 0 0 0 0 -49.30 911.0 -104.0 0 0 0
139 0 0 0 0 0 0 0 68.55 240.4 51.66 0 0 0
140 0 0 0 0 0 0 0 -61.23 242.4 -46.14 0 0 0
141 0 0 0 0 0 0 0 125.0 216.5 152.5 0 0 0
C*** INITIAL CONDITIONS
0 0 0 0
C*** PLATE SHELL ELEMENTS (TRIA)
6 216 0 0 0 0 0 0 1 1 4
10.7800E+10
6000. 0.3000
1 0 1 00.0000E+00 1.000 0.0000E+00 0
1 2 5 3
2 0 1 00.0000E+00 1.000 0.0000E+00 0
2 4 8 5
3 0 1 00.0000E+00 1.000 0.0000E+00 0
4 7 12 8
4 0 1 00.0000E+00 1.000 0.0000E+00 0
7 11 17 12
5 0 1 00.0000E+00 1.000 0.0000E+00 0
11 16 23 17
6 0 1 00.0000E+00 1.000 0.0000E+00 0
16 22 29 23
122 126 130 127
215 0 1 00.0000E+00 1.000 0.0000E+00 0
126 129 132 130
216 0 1 00.0000E+00 1.000 0.0000E+00 0
129 131 133 132
STOP

```

図18 モデラにより自動生成された FEM 入力データの例
(メッシュデータ部分の一部を省略してある)

発を進めているロケットである。全長約48m、直径約4m、2トン強のペイロードを静止軌道に打ち上げることのできる国際水準の大型ロケットである。

先端部分に位置する衛星フェアリングは、全長12m、直径4mの積層構造物であり、積層一次構造物としてはわが国で初めて開発されるものである。このため飛行中の空気力荷重による座屈については、NAL/NASDA 共同で検討を進めてきた。その中で将来のフェアリングの大型化、軽量化に貢献すると期待される炭素繊維強化複合材(CFRP)

を表面板とするハニカムサンドイッチ構造を有するフェアリングの解析にプリ/ポストプロセッサシステムを適用した。

図22に CAE-FINE/POST および ISAP/GRAPHIC V2 によるフェアリングの変形モードを示す。図(a)は CAE-FINE/POST によりフェアリングの変形をカラーの等高線分布図として表したものであり、図(b)は ISAP/GRAPHIC V2 により端末上に表示させたものである。これは研究者および技術者が多量の解析データを迅速にかつ視覚的に処理できる特徴を有している。

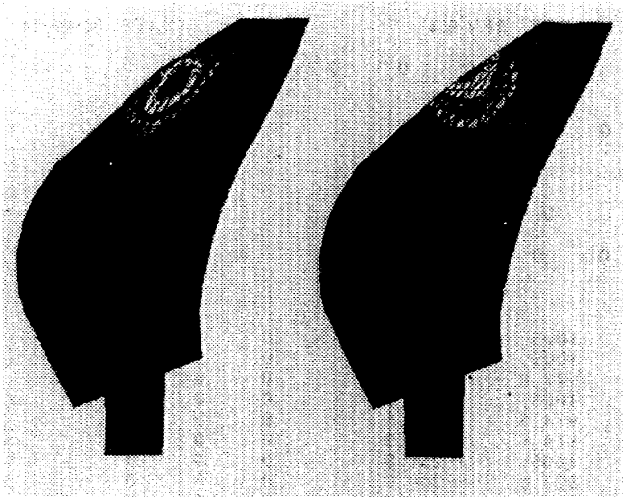
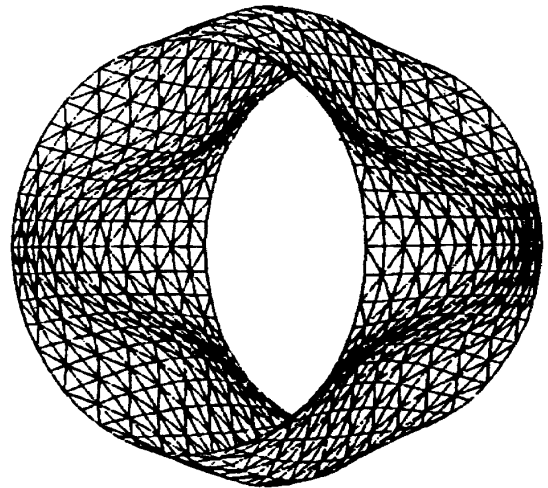
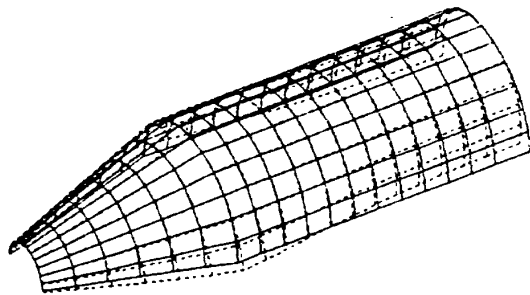


図21 ATP ブレードの衝撃変形状態を示す等高線図

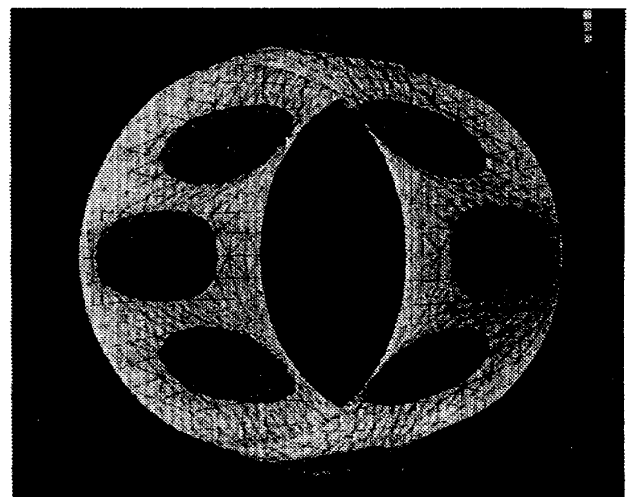


(a) 変形モードのワイヤフレーム図形表示



THE ILC NR R PLAS AT M BY PD PI F C NR SRN RNM
ON FM S O OUTL NPI PP 12 DI S NEN RIN

(b) ISAP/GRAPHIC V2によるワイヤフレーム図形処理

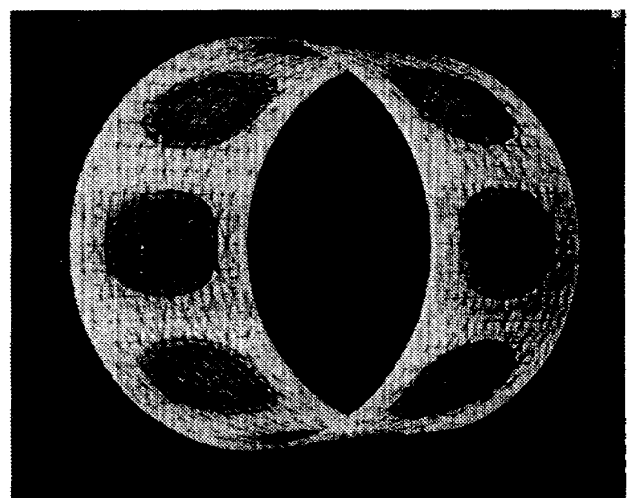


(b) 変形モード図上でのコンタの画像表示

図22 CAE-FINE/POST および ISAP/GRAPHIC V2によるフェアリングの変形モード処理

図23はCAE-FINE/POSTによるCFRP積層面板のハニカムサンドイッチ構造を有する直径1m、長さ1mの円筒殻の座屈変形モードを示している。図(a)は変形モードのワイヤフレーム表示であり、図(b)は変形モード図の上に描いた等高線分布図を表示したものである。これは図(c)のように構造図の上に描いた従来の等高線分布図と比較すると実用的な表示方法である。

また図24は図23と同じ構造の座屈試験において計測されたひずみをCAE-FINE/POSTによって処理したものである。ひずみは供試体の表裏に貼りつけた326点のひずみゲージにより測定された破壊直前のデータである。これは有限要素法にお



(c) 構造図上でのコンタの画像表示

図23 座屈変形モードのCAE-FINE/POSTによる処理

ける要素のひずみ計算と同程度の密度レベルで測定しているため、従来のように貴重な試験にもかかわらず、数十点のデータで評価していたのと比べると長足の進歩といえるであろう。

6. おわりに

本研究所の構造研究開発サブシステムにおける CAE システムは、航空宇宙用構造物の設計・解析の研究に対する強力なツールとして現在利用されているが、さらに多くの研究者が利用されることを希望し、この報告書がその時の一助となれば幸いである。また本研究においてはポスト処理システムのうち、静的処理の部分を取りまとめることとし、動的処理部分については別の機会にとりまとめることとした。

最後に報告書をまとめるに当たり日本電気株式会社の資料を引用させて頂いたことに対し感謝の意を表します。また CAE システムにおけるプリ/ポスト処理の作業と使用手引書の作成に協力をしていただいた(株)コルバックの若森美佐子さんとプログラム CMFTRN の作成に協力をしていただいた元(株)コルバックの佐藤泰博氏に感謝いたします。

7. 参考文献

- 1) 航空宇宙技術研究所 構造研究開発サブシステム利用説明書。
航空宇宙技術研究所 技術資料 N-37.
 - 2) CAE-3D/MA システム説明書(操作編), 第4版, NEC日本電気株式会社, 1988年11月.
 - 3) CAE-FINE/3D システム説明書(操作編), 第3版, NEC日本電気株式会社, 1988年10月.
 - 4) CAE-FINE/PRE システム説明書(操作編), 第4版, NEC日本電気株式会社, 1988年3月.
 - 5) CAE-FINE/POST システム説明書(操作編), 第2版, NEC日本電気株式会社, 1988年3月.
 - 6) 大竹邦彦, 航空宇宙計算構造力学のための入出力データ処理システム, C & C SYSTEM REVIEW, Vol.12, pp.6-14, 1988.
 - 7) W. J. Gordon and C. A. Hall, Construction of curvilinear co-ordinate systems and applications to mesh generation, Int. J. Num. Methods Engng., Vol.7, pp.461-477, 1973.
 - 8) R. Haber, M. S. Shephard, J. F. Abel, R. H. Gallagher and D. P. Greenberg, A general two-dimensional, graphical finite element preprocessor utilizing discrete transfinite mappings, Int. J. Num. Methods Engng., Vol.17, pp.1015-1044, 1981.
 - 9) E. Cuthill and J. Mckee, Reducing the bandwidth of sparse symmetric matrices, Proc. 24th Nat. Conf. of the ACM, ACM Publ P-69, Association for Computing Machinery, New York, pp.157-172, 1969.
 - 10) W. H. Liu and A. H. Sherman, Comparative analysis of the Cuthill-Mckee and the reverse Cuthill-Mckee ordering algorithms for sparse matrices, SIAM J. NUMER. ANAL., Vol.13, No.2, April 1976.
- 以下内部資料
- 11) CAEシステム共通インターフェイスファイル
コミュニケーションファイル 説明会資料,
1987年6月.
 - 12) バンド幅を考慮した節点番号の再番号付けプログラム MINIBAND 説明書, 1987年9月.
 - 13) トランスレータ プログラム サブルーチン
トリー構造についての説明, 1988年11月.

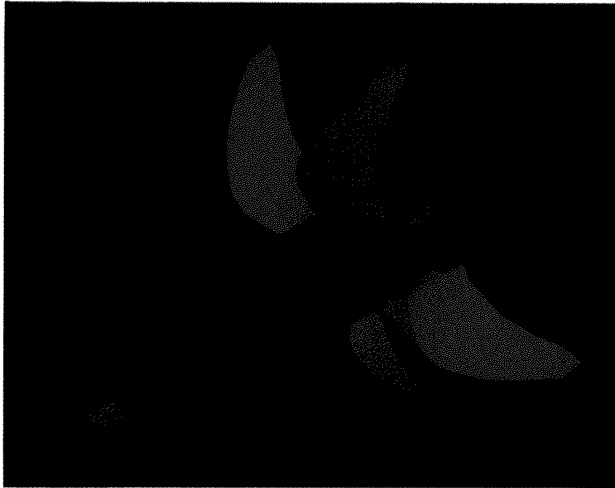
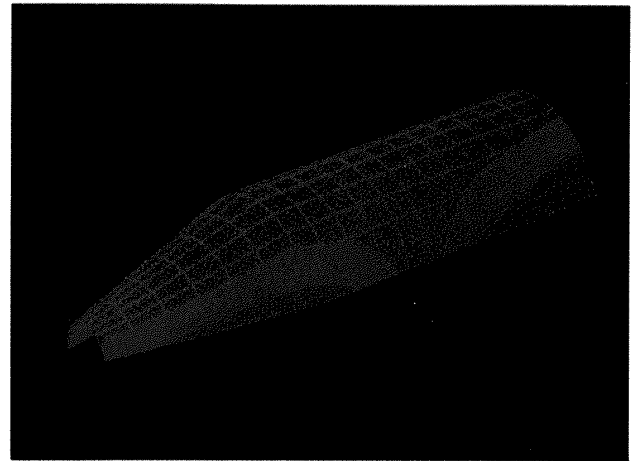


図19 二重反転プッシャー型の ATP エンジン
イメージ⁶⁾



(a) CAE-FINE/POST による画像処理

図22 CAE-FINE/POST および ISAP/GRAPHIC
V2 によるフェアリングの変形モード処理

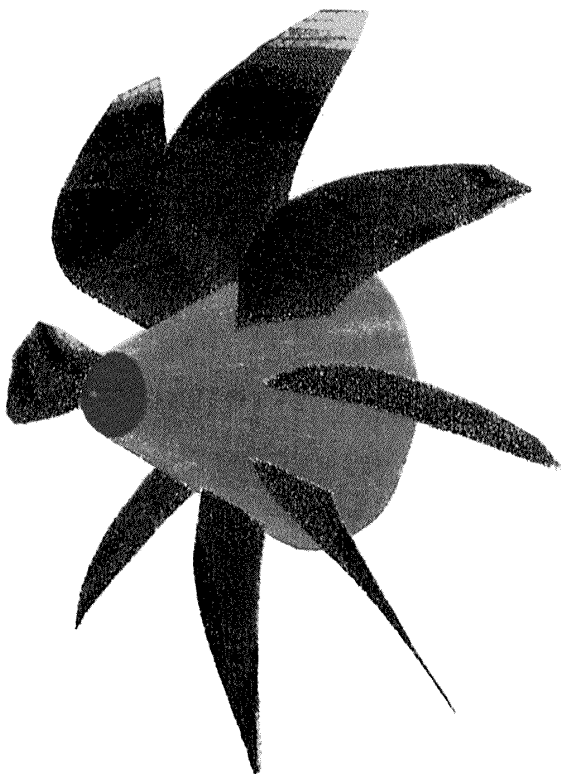


図20 ATP ブレードの振動モード合成図⁶⁾

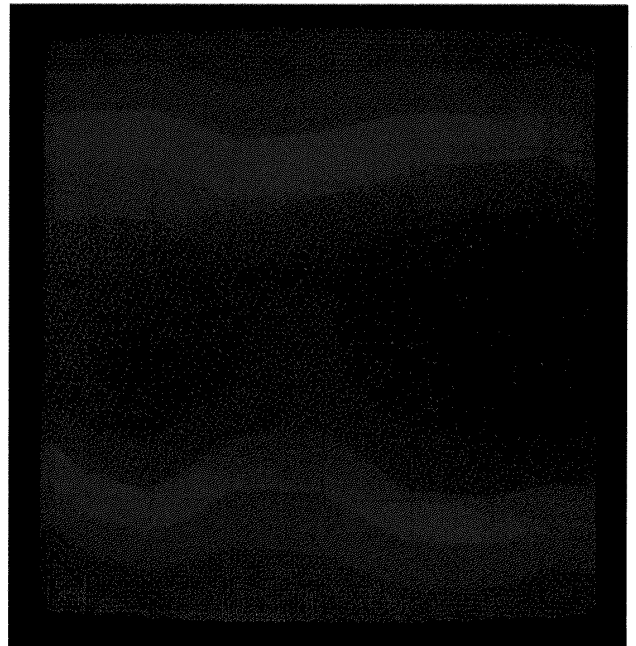


図24 画像処理した座屈破壊直前の供試体の
ひずみ分布（荷重930kN 時）

航空宇宙技術研究所資料 628号

平成 2 年 10 月 発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町 7 丁目 44 番地 1
電話三鷹 (0422) 47-5911 (大代表) 〒182
印刷所 株式会社 三興印刷
東京都新宿区西早稲田 2-1-18
