

# 線形・非線形構造解析

## - 有限要素法の活用 -

北陸ポリテクカレッジ 機械システム系 増川 一郎  
 (北陸職業能力開発大学校)

### 1. はじめに

近年、「ものづくり」は第三世代に入って、コンピュータの支援なくしては語れない状況になっている。CAD/CAMを中心とした設計・生産分野の急速な進歩により、高精度化と高速化が着実に進行している。それに伴い、製品開発段階における試作・実験に費やされる時間とコストの比重がますます大きくなっている。トライアルで費やされる試作品の製作と修正に莫大な時間とコストを要しては、CAD/CAM化による高効率化が無意味なものになってしまう。

この問題に対処する切り札として、有限要素法解析を中心としたCAEの導入が急速に進展しつつある。これは、コンピュータ上で仮想実験（計算機実験ともいう）を行い、製品の企画・設計段階で不具合が発生しないかどうか見だし、その修正を繰り返し行うことにより、あらかじめ想定される不具合を取り去ることで、試作実験にかかる時間とコスト

を大幅に削減させようとするものである。

しかし、このCAEは導入さえすればすぐに効果を出せるというものではない。その理由の一つとして「人材・教育不足」があげられている。有限要素法を使った数値解析手法はこれまでなかった新しい生産技術であり、各職場において専門家がないのが一般的である。また解析技術者には、専門的かつ広範囲な知識、技能・技術が求められ、数学、各種力学、機械設計、コンピュータ、有限要素法理論、各種加工法等に精通していることが要求される。

このような厳しい現実の中、当大学校における有限要素法解析の効果的な活用の習得を目的とした、専門課程のカリキュラムと在職者を対象としたセミナーの概要、およびいくつかの解析を行った事例について報告する。

### 2. システム構成

#### 2.1 CAEソフトウェア

表1は、平成10年度にリース物件として納入され

表1 CAEソフトウェア

ソフトウェア名	機能・用途	数量(台)	稼動機種
I-DEAS ms6	線形構造解析, 熱伝導解析, 振動解析	11	WS, PC
PAM-STAMP Ver98	プレス絞り加工解析(動的陽解法)	1	WS
AITAS Ver1.1	プレス曲げ加工解析(静的陽解法)	1	WS
ABAQUS Ver5.7	汎用非線形構造解析(静的陰解法)	1	WS
ADAMS Ver9.1	機構解析	1	WS
MOLD-FLOW Rel.9.5.1	樹脂流動解析	1	WS
MSC/NASTRAN V2.1.1	線形構造解析, 熱伝導解析, 振動解析(評価版買取ソフト)	1	PC

注) PC: パソコン WS: ワークステーション

たCAD/CAMシステムにインストールされているCAE関連のソフトウェアを、機能・用途別に分類したものである。台数のそろっているI-DEASを中心として授業を展開し、1台しかないソフトウェアはローテーションで使用するようにしている。また総合制作実習においては、より専門的に有限要素解析の内容を習得できるように考慮している。

ソフトウェアの選定に際しては、非線形構造解析プログラムに特徴を持たせた。現在の非線形構造解析理論で使用されている静的陰解法、静的陽解法、動的陽解法の中より、解析したい対象に合った解法を選択できるようになっている。

## 2.2 ハードウェア

機械系CAD/CAMシステムとして納入されたハードウェアの構成を示す。コンピュータ本体は以下

に示す構成であり、図1にネットワーク構成、図2にはフロアレイアウトを示す。

### ワークステーション

本体：HP9000/C200  
 メモリ：128MB  
 ハードディスク：内蔵SCSI 9 GB  
 外付け 4 GB  
 モニタ：21インチ  
 OS：HP-UX 10.20

### パソコン

本体：HP VectraVL6/333  
 メモリ：128MB  
 ハードディスク：内蔵 8 GB  
 モニタ：21インチ  
 OS：Windows NT Ver4.0

## 3. カリキュラム

表2に、機械システム系における履修科目の中で有限要素法およびCAEに関連する授業科目と概要に関して記載する。表3は、在職者を対象とするセミナーの中からCAEおよび有限要素法解析の関連した講習のみ抜粋した。

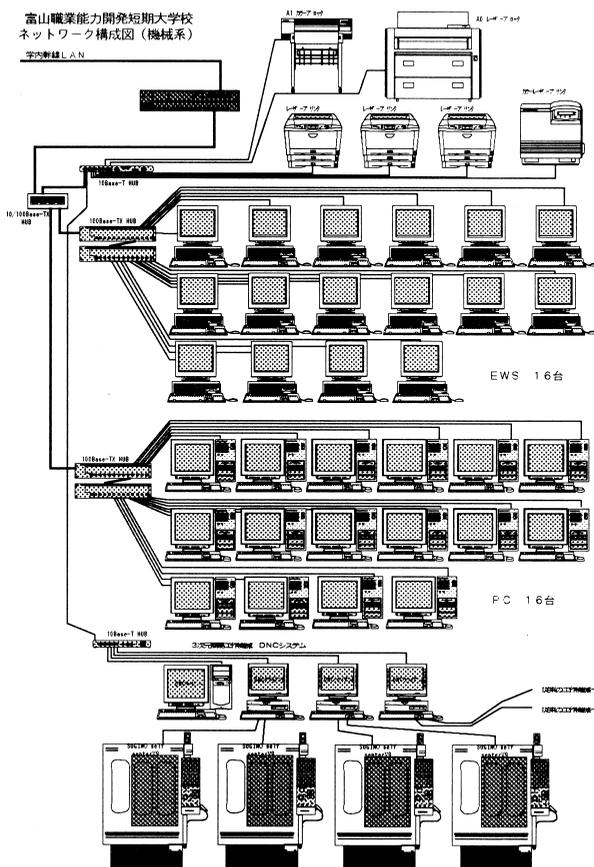


図1 ネットワーク構成

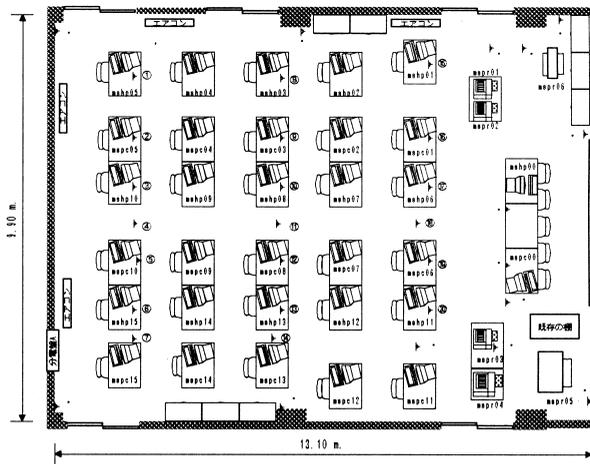


図2 フロアレイアウト

## 4. 解析事例

### 4.1 I-DEASを使用した解析例

I-DEASは、主に線形静解析、熱伝導解析を行う

ときに使用している。特に3次元製品のモデリングが容易であり、モデラー、プリ・ポストプロセッサ、ソルバーを兼ね備えた統合型CAEソフトウェアである。当大学における構造解析ソフトウェアの主力である。

表2 専門課程講義内容

科目名	講義内容	単位
構造解析	2次元弾性体の有限要素法の理論を講義し、パソコンによる演習によって構造解析および設計の強度計算ツールとしての活用法を習得する。 有限要素法の基礎理論 プログラムの概要説明 データ作成の実際 有限要素法解析の手順 解析例題	2
構造解析実験	有限要素法解析におけるモデル化から結果の評価までを、実物での強度測定実験と併せて行うことにより理解を深め、CAEを活用した最適設計について学習する。さらに振動構造解析に役立つ基礎理論を体系的に講義し、パソコンを利用したCAI学習を行う。 構造解析手法 有限要素法解析と強度測定実験結果の評価・検討 最適化設計 調和振動 周期運動とフーリエ解析 振動のモデル化と解法 自励振動 2自由度系の振動 減衰振動と強制振動	4
総合制作実習	生産技術に関する総合的な要素が含まれる課題を設定し、設計から制作までの一連のプロセスを通じて、ものづくりについて総合的な技術を習得する。 グースネックパンチの設計・製作 プレス成形シミュレーション 箱形構造物における振動減衰波形の特性	12

表3 セミナー概要

セミナー名	セミナー対象者・概要	時間
3Dモデリング技術	3次元CADデータの効率的な作成手法を習得しようとする方 モデリング概要 3次元ソリッドモデラー・システム構成 ソリッドプリミティブの作成と編集 フィーチャーの作成 モデリング手法 形状作成・修正コマンド パラメトリック機能とその活用法 例題・練習問題	24
機械技術者のためのFEM解析技術	CAEによる構造解析手法を習得しようとする方 有限要素法の概論 形状データの作成 材料データの入力 要素特性の入力 拘束条件設定 荷重条件設定 解析問題(対称問題, 逆対称問題, 非対称問題) 構造解析問題の演習	24
FEM解析と機械設計	製品を開発するうえでCAEの効果的な活用を考えられている方 構造解析理論について 理論値による応力・ひずみの計算 CAEによる応力・ひずみの解析 実験による応力・ひずみの測定 理論値・CAE解析値・実験値の比較検証 練習問題[スパナ] (構造解析, データ作成, レーザー加工, 強度測定, レポート作成, 発表)	24
振動モード解析の理論と実際	振動モード解析法とモーダル解析法の理論を習得したい方 振動モード解析の理論 有限要素法による固有値解析 ワイヤフレーム形状定義 実験的モーダル解析の実技 カーブフィット手法 モーダルパラメータの同定 モード・アニメーション	24
2次元弾性体の有限要素法解析	有限要素法の理論と構造解析を設計のツールとして活用したい方 有限要素法の理論 プログラムの概要説明 メッシング作成の実際 平面応力解析(熱応力解析を含む) 軸対称解析	24
パソコンによる振動解析	振動の理論と解析法を体系的に学習したい方 振動のモデル化と解法 自励振動 強制振動 動吸振器の設計 固有振動数と固有モード	24

図3はI-DEASを使用したグースネックパンチの構造解析の例である。強度・剛性を維持しながら、軽量化を図ることを目的として最適な形状を模索している。

#### 4.2 PAM-STAMP解析例

PAM-STAMPは、主に板材のプレス絞り加工の解析に使用している。特に生産設計時における絞り加工の不具合や行程設計、金型設計（ダイ形状、パンチ形状の設計）において威力を発揮する。

図4はPAM-STAMPを使用したプレス絞り加工シミュレーションの例である。板厚1.0mmSPCC材を板押さえなしで、円筒+角筒形状を持つ金型を使って成形する過程を解析したものである。シミュレーションの結果より、材料の異方性、金型との接触による摩擦を考慮された材料の流れ込み具合、しわの発生具合が見てとれる。

#### 4.3 AITASを使用した解析例

AITASは、主に板材の曲げ加工の解析に使用している。当大学で使用しているCAEソフトウェアの中で、唯一日本で開発されている。取り扱いが非常に簡単（機能不足ではない）で、容易に非線形構造解析が可能となり、スプリングバックを含む複数行程の成形過程の解析が可能である。

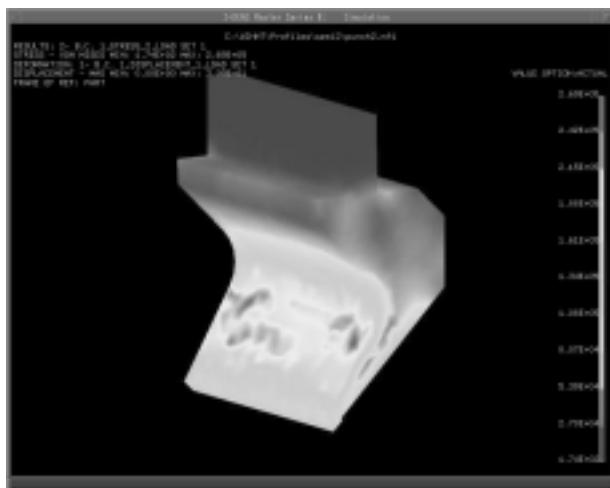


図3 I-DEASでの解析例

図5はAITASを使用したプレスV曲げ加工シミュレーションの例である。板厚1.0mmSPCC材の加工を解析したもので、加工途中のミーゼスの応力を示している。ダイ肩部のRが小さすぎるため応力が集中し、製品にキズが発生することが予想される。

#### 4.4 ABAQUSを使用した解析例

ABAQUSは汎用の非線形構造解析プログラムである。専用のプリ・ポストプロセッサを備えているが扱いにくいので、I-DEASをモデラー、プリ・ポストプロセッサとして使用している。ABAQUSの持つ強力なソルバーの機能に重点を置いており、弾

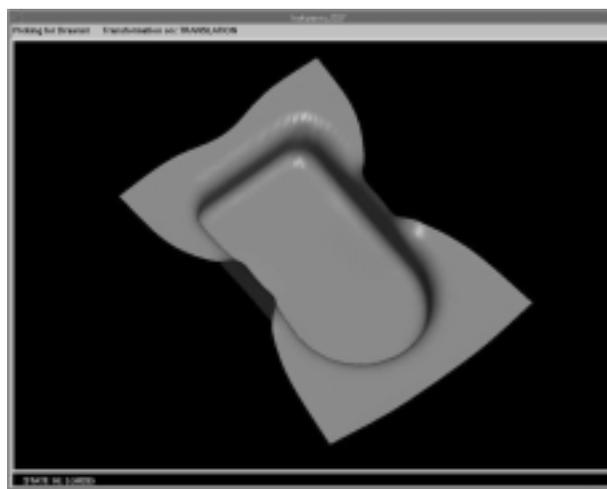


図4 PAM-STAMPでの解析例

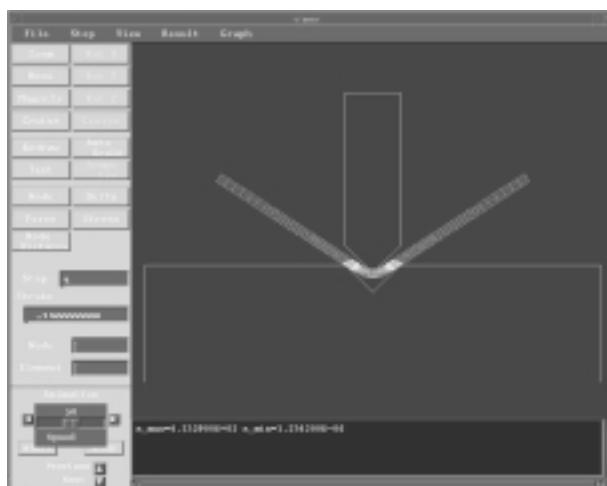


図5 AITASでの解析例

性範囲の解析のみならず，塑性範囲をも精度よく計算できる。汎用プログラムであるため，ほとんどのものの構造解析が可能であるが，高機能な反面それを使いこなすことが難しい。

図6はABAQUSを使用した引っ張り試験の解析例である（1/4モデル）。材料の持つ塑性を考慮して解析を行っており，試験片にかかっている応力状態，ならびに試験片中央部がくびれていく様子を示している。

#### 4.5 ADAMSを使用した解析例

ADAMSは主に機構解析に用いる。3次元の機構

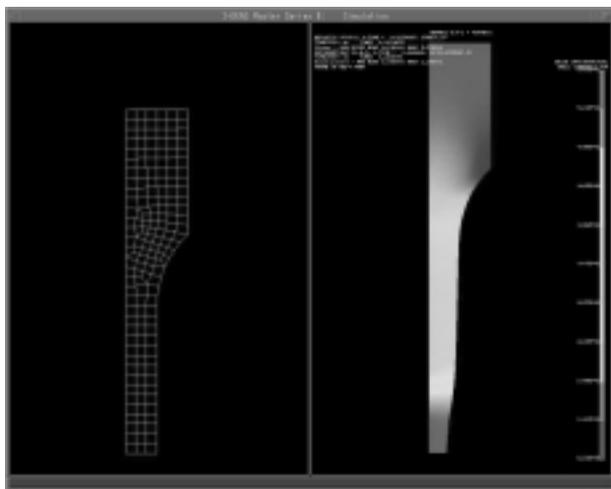


図6 ABAQUSでの解析例

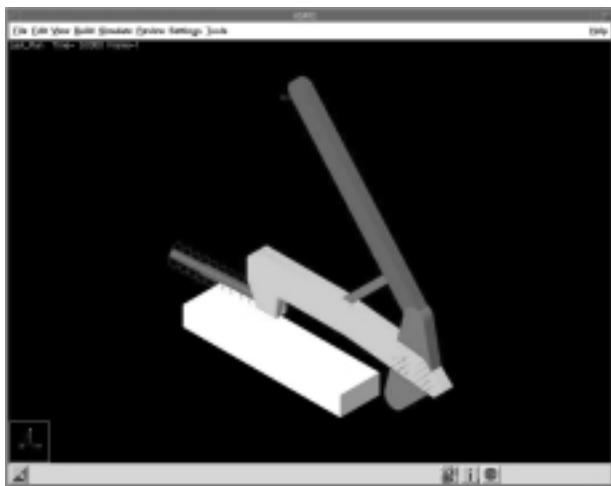


図7 ADAMSでの解析例

の運動およびそれに働く力，速度，加速度，変位等を解析することができる。

図7はADAMSを使用したハンドラッチの解析例である。ハンドラッチは2つのコンテナを構成する部品同士を確実に締め付けるもので，指定のレバーの移動量により，所要の締結力を発生できるか解析したものである。

#### 4.6 MOLD-FLOWを使用した解析例

MOLD-FLOWは主に樹脂流動解析に使用している。射出成形加工時における樹脂温度，射出圧力，射出速度の違いによる流動パターン，充填時間，配向，冷却温度等の重要なファクターをあらかじめ求めることができ，ウエルドライン，ガス焼け等の成形不良を未然に防ぐ手だてをとることが可能となる。

図8はMOLD-FLOWを使用した樹脂流動解析の例である。4角の板厚がそれぞれ異なる薄板に，4つの穴がある製品の解析を行ったもので，樹脂の流動パターンを示している。画面の手前左側の充填が最後になっており，この部分にガス抜き穴を設けると良いことがわかる。

#### 4.7 MSC/NASTRANを使用した解析例

MSC/NASTRANは主に線形静解析，熱伝導解析

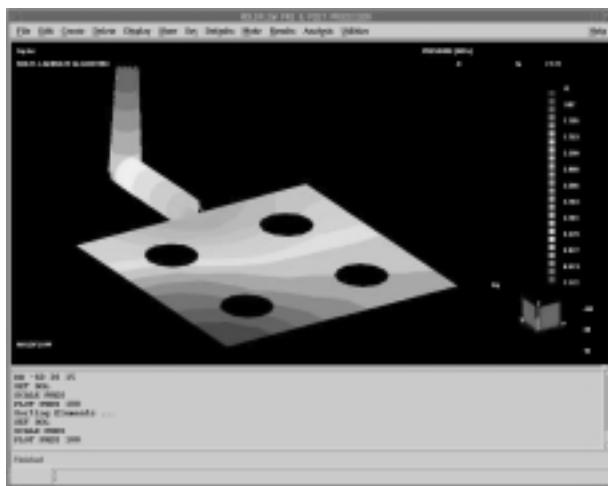


図8 MOLD-FLOWでの解析例



図9 MSC/NASTRANでの解析例

を行うときに使用している。NASTRANはNASAにより開発され、MSC社などにより商用ベースの製品となった。60年代から70年代にかけて誕生したが、現在もなお汎用有限要素法プログラムの中核的役割を果たしている。非線形問題はABAQUS、線形、振動問題はNASTRANと使い分けしている企業が数多くみられる。

当大学で使用しているMSC/NASTRANは評価版である。使用できる節点数、要素数に制限があるものの、それ以外は何ら正式版と機能は全く変わらないものとなっている。価格も5万円と購入しやすくなっており、これから有限要素法解析を始めようとする方にとっては良い教材ではないかと考える。

図9はMSC/NASTRANを使用したスパナの構造解析の例である。組み立て式のラックについてくるスパナの強度を解析したものである。形状の最適化を図ることを目的として構造解析を行ったもので、形状を決定した後に、CAD/CAM(Unigraphics)によりNCデータを作成し、レーザー加工機での切断を経て、ひずみゲージによりひずみと応力測定し、

解析結果と実物実験との比較検証を行っている。

## 5. おわりに

本稿では、当大学における有限要素法の効果的な活用法の習得を目標とした専門課程の授業とセミナーについて報告した。

専門課程においては、設置機器の台数やカリキュラム等に多くの問題点があろう。セミナーにおいても、さらなる講習内容の充実が求められるであろう。

有限要素法による解析手法では、それが持つ特有の操作の煩雑さにより、オペレーションの習得に終始しがちになり、また有限要素法解析理論の難解さにより、理論の習得に没頭しまいがちになる。

しかし、忘れてはならないことがある。有限要素法解析により、何らかの解析結果を得ることができるが、この結果を得た時点が終わりではないということである。むしろこの時点が真の始まりともいえ、有限要素法解析では、この得られた解析結果より、いかに多くの情報を読み取り、それを有効に適用できるかが、真の求められている技術であるということである。

なお、講習を進めるに当たっては、以上のことを意識しながら行うように心がけている。

### 参考文献

- 1) 日本塑性加工学会：『非線形有限要素法』、コロナ社。
- 2) 素形材センター：『平成8年度 型技術に関する動向調査研究報告書』。
- 3) 川井忠彦：『機械技術者のための有限要素法門』、オーム社。
- 4) 『機械技術者のための3次元CAD, CAE導入・活用ガイド』、日刊工業新聞社。
- 5) 岸正彦・岩崎博：『パソコンによる有限要素法解析技術』、三井造船システム技研株式会社。