

# 有限要素法の取り組み

## — 身近になったCAE —

北陸ポリテクカレッジ 生産技術科  
 (北陸職業能力開発大学校)

増川 一郎

### 1. はじめに

近年、有限要素法解析の取り組みが数多くの企業で行われるようになった。ハードウェアの高性能化と低価格化に伴い、数多くのCAEユーザが誕生した。とりわけパソコンの高機能化と低価格化およびオペレーションシステムのMS-Windowsの普及が利用者の拡大を押し進めた。

かつてCAEは、時間と費用が高くつくものとされ、CAEを使いこなすには特別な知識と技能が必要であった。要素の分割法や境界条件設定、解析結果の評価法など、有限要素法特有の難解さのため設計技術者とは別に解析を専門に行う解析技術者が存在していた。

コンピュータの発達に伴い、CAEは、設計技術者自身が使用することを意識し、使い易さに重点を置いたソフトウェア開発が行われ、簡単な操作方法で時間を掛けずに解析が可能となるものも登場している。たとえ有限要素法の理論を知らなくても、マニュアルに従ってパラメータを入力し、計算を実行すれば変位や応力などの何らかの出力結果を得ることができるようになってきている。

しかし、これは適切な解析を実行し、信頼性のある解析結果を得た保証まで行う訳ではない。いかにえるならば、CAEユーザ自身が解析条件の設定から結果の判断までの責任を負うことになり、CAEユーザの抱える問題の答えを予言するものではないことを意識しなければならない。そのため、CAEユー

ザは、有限要素解析を適切に実行し満足する解答を得るための能力を養う必要があり、有限要素解析の理論、数学、コンピュータ、各種力学など多岐の分野にわたる知識やノウハウの習得が要求される。

通常、上記の知識やノウハウの習得には、多くの時間を要する。そのため当校では、段階的かつ効果的に有限要素法の理論の習得や、ノウハウの習得を目的としたセミナーや専門課程訓練を実施している。

本報では、これから有限要素法解析プログラムを導入しようと考えている方を対象として、比較的簡単に有限要素法解析に慣れ親しむことができ、低価格で購入しやすい商用汎用有限要素法プログラム(MSC/NASTRAN for Windows評価版(以下、MSC/NASTRANと示す))を使用して行った線形構造解析例を紹介し、これから有限要素法解析に取り組もうと考えている方の一助となれば幸いと考え、報告を行う。

### 2. MSC/NASTRANの特徴

NASTRANは、30年以上前NASAにより誕生し、現在もなお汎用構造解析プログラムとして中核的な役割を果たしている。稼働するコンピュータ環境も時代とともに変化し、大型汎用コンピュータ、スー

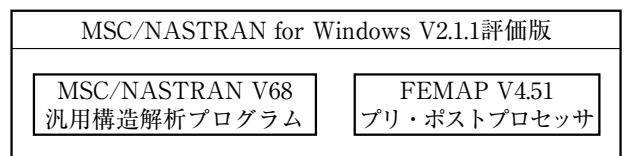


図1 MSC/NASTRANのシステム構成

パーソナルコンピュータ、ワークステーションなどで利用されてきた。現在、MSC/NASTRANへと発展し、パソコン上のWindows環境のもとで稼働し、解析計算機能とともにプリ・ポストプロセッサを統合させた解析環境を実現している。そして、解析モデルの作成から解析計算や解析結果の表示までの一連の作業を連続的に実行することが可能である。図1には、MSC/NASTRANのシステム構成を示す。

### 3. 使用機器

当校の機械系で使用可能なコンピュータシステムには、ワークステーションとパソコンの2つのタイプがある。

時代の流れは「ダウンサイジング」ということで、パソコンが主流となっている。そしてパソコン上で稼働する応用ソフトウェアは、マイクロソフト社のWindowsに準拠したユーザインターフェースを備え、統一した操作環境を実現している。

構造解析用ソフトウェアに関しても上記事項があたりはまり、使いやすさに重点を置き、簡単な操作方法で時間を掛けずに解析が可能となるものまで出現

表1 解析環境

<p><b>ハードウェア</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 本体：HP Vectra VL 6/333</li> <li>・ CPU：Pentium® Pro 233 MHZ</li> <li>・ メモリ：128MB</li> <li>・ ハードディスク：内蔵IDE8GB</li> <li>・ モニタ：21インチ</li> <li>・ グラフィックス：OpenGL</li> </ul> <p><b>ソフトウェア</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ OS：Windows NT Ver.4.0</li> <li>・ モデラー：AutoCAD LT97</li> <li>・ 汎用構造解析ソフトウェア：MSC/NASTRAN for Windows V2.1.1 評価版</li> </ul> <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding-left: 5px;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>プリプロセッサ：FEMAP V4.51</li> <li>ソルバー：MSC/NASTRAN V68</li> <li>ポストプロセッサ：FEMAP V4.51</li> </ul> </div>
--

している。表1には、MSC/NASTRANを使用した解析環境を示す。

### 4. 解析の対象と解析作業の流れ

今回の例では、有限要素法解析に慣れ親しむことを目的として、MSC/NASTRANを使用し身近な製品の強度解析を行うものとする。一般になじみが深い製品であり、日常的に力を繰り返し受けた状態となっており、時として壊れてしまう場合もあるものを対象とする。また、当校のMSC/NASTRANは評価版の構造解析ソフトウェアであるため、ソフトウェアの制約条件により使用できる節点数と要素数が限定されている。上記事項を満足する条件より鍵

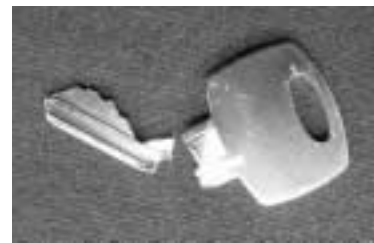


図2 解析対象の鍵

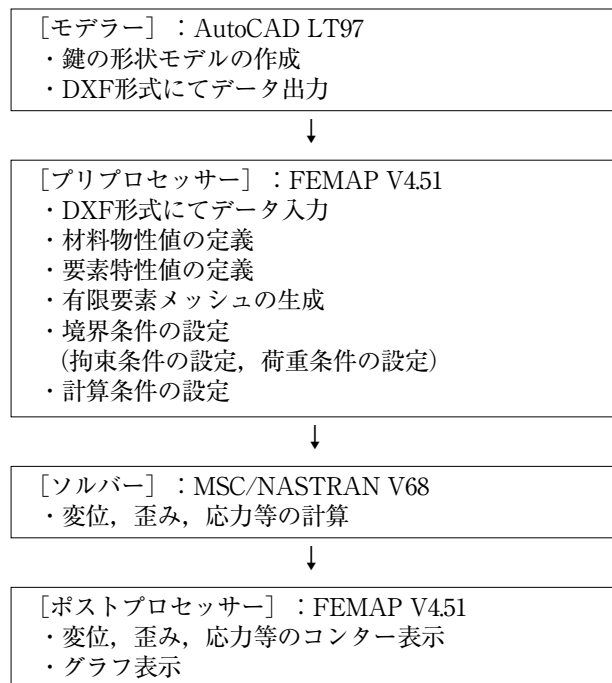


図3 解析作業の流れ

(キー) を解析の対象とする。読者のなかには、開けにくい鍵を無理にこじ開けようとして鍵をねじ切った経験のある方もいらっしゃるのではないだろうか。図 2 には、解析対象とする鍵を示し、図 3 には MSC/NASTRAN を使用した解析作業の流れを示す。

## 5. 解析作業の詳細

### 5.1 形状モデルの作成

鍵の形状作成は、2次元CADのAutoCADにより行う。鍵の特徴を最も表している正面図を、直線と円弧およびスプラインコマンドにて作図する。通常、解析で使用する形状モデルは、解析コストを削減することを目的として、フィレット部や面取り部、穴などを省略した簡略単純形状で解析を行うことが多い。しかし、今回の解析では、初心者にもわかりやすく説明を行うことを目的としているため、鍵の形状そのものを扱うことにする。また、寸法線や注釈などもCAD機能により入力可能であるが、CAEでは、寸法や注釈などは不必要となるので鍵の形状のみを作図する。形状作成後、プリプロセッサのFEMAPでこのCADデータを読み込ませるために、パソコンCAD界でデータ交換に数多く使用されている中間ファイルのDXFフォーマットにより鍵の形状データを出力する。図 4 に、AutoCADで作成した鍵のモデル形状を示す。

### 5.2 有限要素法モデルの作成

#### (1) DXF形式にて形状データ入力

有限要素法モデルの作成は、DXFによるデータの読み込みから始まる。CADで作成した鍵の形状データより有限要素法解析用データを作成するために、プリプロセッサのFEMAPにCADデータを読み込ませる。FEMAPは、数多くのCADソフトウェアやCAEソフトウェアへのインターフェースを備えている。図 5 には、CADデータを読み込んだ様子を示す。

#### (2) 材料物性値の定義

材料物性値の定義では、縦弾性係数 (206GPa)、



図 4 CADで作成した鍵モデル形状

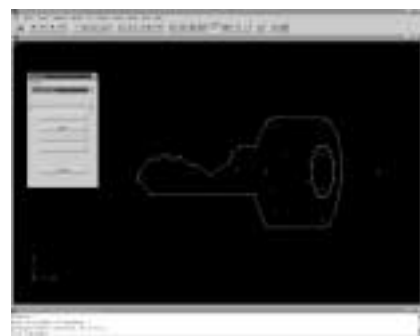


図 5 CADデータの読み込み



図 6 材料物性値の設定

表 2 材料物性値

材料		アルミニウム	鋼	銅
YoungsModulus	E 縦弾性係数	0.65~0.8	2.0~2.15	0.9~1.1
ShearModulus	G 横弾性係数	0.27	0.81	0.39
Poisson'sRatio	nu ポアソン比	0.34	0.28~0.3	0.33
ExpansionCoff	a 線膨張係数	23.9	9.58~11.6	16.5
Conductivity	k 熱伝導率	190.5	38~52	338
SpecificHeat	Cp 比熱	0.215	0.11~0.124	0.092
MassDensity	質量密度	2.7	7.85	8.89

ポアソン比 (0.3) および密度 ( $7.8 \times 10^6 \text{kg/mm}^3$ ) の設定を行う。解析計算が弾性範囲のみの線形解析計算となるため設定する項目は少ない。表 2 には、代表的な金属材料のアルミニウム、鋼、銅の材料物性値のなかから線形解析で必要とされる値のみを示す。また図 6 には、MSC/NASTRANによる材料物性値を設定する様子を示す。

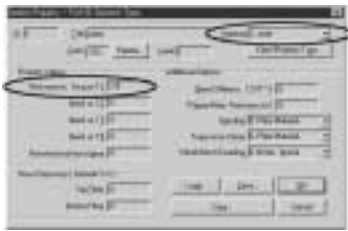


図7 要素特性値の設定

表3 要素の特徴

分類		特徴
線要素	ロッド要素 (Rod)	引張り,圧縮,ねじりの剛性をもつ,曲げ,せん断の特性持たない
	ビーム要素 (Beam)	引張り,圧縮,ねじり,曲げ,せん断の剛性をもつ
面要素	膜要素 (Membrane)	面内力にのみ抵抗を示す (平面応力要素)
	曲げ板要素 (Bending)	面外曲げのみ抵抗を示す
	板要素 (Plate)	面内曲げ,せん断,面外曲げに抵抗を示す (シェル要素)
	平面ひずみ要素 (Plane Strain)	奥行方向の非常に厚いモデルに使用,奥行方向にひずみが増えない
体要素	軸対称要素 (Axisymmetric)	ある軸に断面を回転して得られるソリッド構造物を断面のみの2次元要素でモデル化する
	ソリッド要素 (Solid)	3次元のソリッド構造をモデル化する

### (3) 要素特性値の定義

MSC/NASTRANで使用可能な要素タイプは、線要素、面要素、体要素、その他の要素がある。これらの要素タイプは、さらに保有剛性や使用範囲などの特徴ごとに複数の要素に分類することができる。

また、有限要素モデル内の各要素は、要素特性値をもつ。要素特性値とは、各要素の特徴を示す値であり、線要素であれば、断面二次モーメントや、断面積等、面要素であれば、板厚や荷重の方向による使用範囲が例としてあげられる。図7には、シェル要素の要素特性値を設定する様子を示す。シェル要素は面で構成されるため厚みに関する情報は要素特性値で持ち、鍵の板厚が2mmの要素特性値をThicknessで定義する。また、表3には代表的な要素の特徴をまとめる。

### (4) 有限要素メッシュの生成

有限要素メッシュの生成では、プリプロセッサの機能により、節点と要素からなる有限要素法モデルを作成する。モデル内に存在する要素の数は、解析精度と解析時間に影響を及ぼす。要素数が多いほど解析精度は高くなる反面、解析コスト（解析時間とディスク容量）を費やしてしまう。そこで、要素のサイズはモデル全体で一様ではなくモデル内の重要部分は細かく要素分割し、そうでない部分では大きめのサイズの要素として分割を行い、モデルの総自由度を少なくする。ここで自由度とは、有限要素分割された節点の内、1つの節点を取り得るXYZ方向の移動とXYZ軸回りの回転であり、モデルに含まれる自由度に2乗して解析コストを費やしてしまう。そのため作業者は、モデル中の総自由度を抑制し、解析コストを抑えつつ解析精度を保つ必要がある。

また、要素形状の品質も解析精度に影響を与える。要素の形状には理想形状があり、その理想形状より外れるにつれて、要素の品質は低下し、解析精度が悪くなる。極端に品質が悪い場合には、解析計算が途中でエラーを起こしストップしてしまう場合があり、要素の品質を表す項目として、歪み、ストレッチ、アスペクト比、そり等がある。

節点と要素は1つ1つ作成することもできるが、今回の例では、手間を掛けずに解析を行う目的のため、自動メッシング機能により有限要素メッシュを生成する。通常形状モデルは直線と円弧で構成される閉じた境界 (Boundary) を持ち、MSC/NASTRANは、その境界 (Boundary) 内に節点や要素を自動生

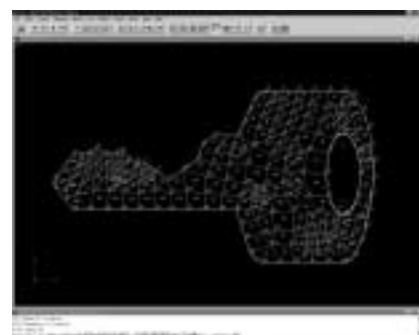


図8 有限要素分割



図9 拘束条件設定



図10 荷重条件の設定

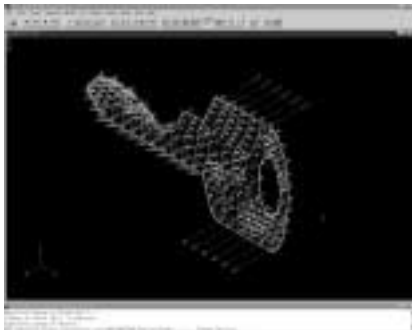


図11 有限要素法モデル

成させる機能を持つ。図8には、自動分割機能により要素分割を行った様子を示す。

#### (5) 境界条件の設定

境界条件の設定では、拘束条件と荷重条件の設定を行う。拘束条件は、モデル内に存在する節点の自由度を拘束し解析対象物が荷重を受けたことにより移動してしまう剛体移動（エラー）を抑制する。通常、節点は最大6自由度を持ち、XYZ方向の並進自由度と、XYZ軸回りの回転自由度を持つ。そして拘束条件により、すべての方向の自由度がモデル全体のいずれかの節点で拘束されている必要がある。図9には、拘束条件の設定を行った様子を示す。拘束条件は、拘束を行う節点を選択した後、6自由度の内のどの自由度を拘束するかを設定する。図中のTYのチェックマークは、Y軸方向の並進自由度を、RXとRZのチェックマークは、X軸とZ軸回りの回転の自由度を拘束する状態を作り出す。

荷重条件の設定では、現実の荷重を有限要素法特有の節点荷重に置き換え鍵をひねる状態を作り出す。

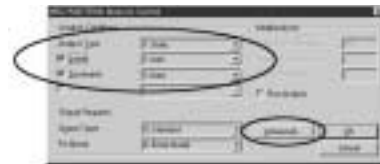


図12 計算条件の設定

鍵の取っ手部分の上部と下部に同一な大きさで力の向きが正反対となる荷重を設定する。今回の例ではZ方向（紙面に対して垂直方向）に180Nずつの荷重を定義する。図10には、荷重条件の設定を行った様子を示す。図中のTZのチェックマークと値の3は、鍵取っ手部辺上の6つの節点に対して、3kgfの荷重をZ方向に負荷する状態を作り出す。また、図11には、要素分割および境界条件設定後の有限要素法モデルを示す。

### 5.3 解析の実行

MSC/NASTRANは、標準で線形解析ソルバーを装備している。線形解析ソルバーでは、線形静解析・正規モード動解析・定常熱伝導解析・線形座屈解析・ポテンシャルフロー解析を実行することができる。

今回の鍵の解析では線形静解析を選択する。通常の鍵の使用条件下では、弾性範囲内に収まると想定される。図12には、計算条件の設定の様子を示す。解析結果のデフォルトの出力では、応力と変位、ひずみエネルギーのみが選択されている。出力される計算結果は膨大なデータとなるため、ひずみなどのデフォルト以外の解析結果をポストプロセッサーで表示したいときには、この計算条件により明示的に指示しなければならない。

### 5.4 結果の評価

解析結果の評価は、解析結果を表示させるプログラムであるポストプロセッサーで確認する。解析結果は、節点の変位、応力、ひずみ等で出力される。そして、この解析結果のなかから何をどのように表示するかを選択する。表示の種類としては、XYグラフ、

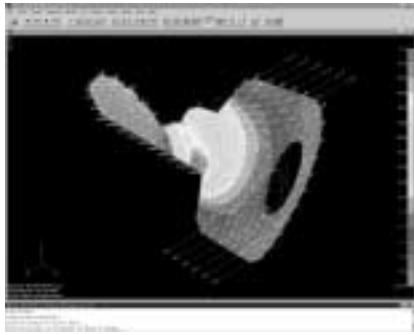


図13 フォン・ミーゼスの応力

表4 各種応力説

	対応材料	特徴
最大せん断応力説 「トレスカの説」 (Maximum Shear)	・比較的伸びの大きい材料	・ある点に働く最大せん断応力が、その材料の固有の値に達したとき降伏が生じるとする
最大主応力説 (Maximum Principal)	・脆性材料 (鋳鉄, コンクリート, ガラス)	・ある点に働く最大応力が、その材料の固有の値に達したとき降伏が生じるとする
せん断ひずみエネルギー説 「フォン・ミーゼス説」 「相当応力説」 (Von Mises)	・延性に富む材料 (金属材料)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ある点に働くせん断ひずみエネルギーが、その材料の固有の値に達したとき降伏が生じるとする</li> <li>・相当応力は降伏判定に適している</li> <li>・応力値は全て+値となるので引張応力と圧縮応力の区別がつかない</li> </ul>

変形図, コンター図等がある。今回の例題のような強度解析では、変位と応力が重要となり、変位結果はXYZの各軸での並進変位と回転変位で表される。また応力計算結果の表示は、最大せん断応力説, 最大主応力説, せん断ひずみエネルギー説 (フォン・ミーゼス説) より選択して表示でき、また各座標軸方向の応力に分解した表示も可能である。図13には鍵に作用するフォン・ミーゼスの応力を示す。鍵が荷重によって変形する状態を、変形図に倍率を掛けて拡大表示させることにより、どのような変形が起こるのかわかりやすく表示される。今回の解析結果では、鍵の付け根の部分に応力が一番集中していることが判明し、この部分が破壊すると予想できる。そして、図2に示すように実際の鍵もこの部分より破

壊している。また、表4には各種応力説をまとめる。

## 6. まとめ

本報では、低価格で購入しやすい商用構造解析プログラムを使用して、鍵 (キー) の強度・剛性解析を例題に有限要素法を用いた構造解析手法と解析教育の1つの取り組みについて報告した。

有限要素法にみられるコンピュータシミュレーションを用いた手法は、当初、試作や実験が不可能に近い、航空宇宙や造船の分野で用いられていた。

そして現在は、あらゆる製造業において製品の強度や振動、熱や流体の流れ、電場や磁場などの問題が従来の手計算に置き換わりつつある。有限要素解析を中心とした解析手法が数多く導入されており、設計・開発の場においては、無視することができない不可欠なツールとなっている。

読者のなかには、有限要素法解析手法の有効性と重要性を認識してはいるが、構造解析用ソフトウェアの価格は一般に高額であり、容易に購入するわけにはいかないと考えていらっしゃる方も多いのではないだろうか。当校で一部試験的に購入し使用しているMSC/NASTRANは、評価版であり使用できる節点数や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が全く変わらない仕様となっている。価格も5万円くらい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られようと考えられる方にとって良い教材である。これにより解析の練習と経験を積み、有限要素法解析手法のノウハウをマスターした後、本格的な解析を行う体制を整えることも良い方法ではないかと考える。

### 〈参考文献〉

- 1) 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。
- 2) 『MSC/NASTRAN for Windowsアプリケーションマニュアル解説書』, 日本エムエスシー株式会社。
- 3) 川井忠彦ほか：『機械技術者のための有限要素法入門』, オーム社。
- 4) 三好俊郎：『有限要素法入門 改訂版』, 培風館。
- 5) 西村尚：『ポイントを学ぶ材料力学』, 丸善株式会社。