

最適化設計教育のためのFEMプログラムと 解析課題の作成

近畿職業能力開発大学校
附属京都職業能力開発短期大学校 長 嶋 喜一郎

Preparation of FEM Programs and Analytic Exercise for Structural Optimum Design Education

Kiichiro NAGASHIMA

要約 設計経験の少ない若年技術者に最適化設計作業は難しい。製品開発の際、強度計算を疎かにしたことが不具合発生の大きな原因の1つになっている。FEM解析技術の手法を簡易強度計算ツールとして活用できれば、強度計算をしないことに伴う不具合の多くは抑制できると考えられる。さらに、FEM解析技術の活用はコンピュータ上での試行錯誤を容易にし、未経験分野の製品開発をも手がけるきっかけを作ることができる。しかし、中小企業において自由にFEM技術を活用するには未だ解決すべき問題が存在する。その問題を解決する一例として、教育用FEMプログラムを開発し、簡易強度計算ツールとして活用できるよう教育用課題を作成したので報告する。

I はじめに

機械は強度的、構造的な最適化を初め、予算的な最適化、納期的な最適化など、顧客ニーズに合わせて最適化される。これらの複雑に絡み合った最適化情報を適正に検討し製品とする。設計作業は製品の持つ1つの機能的側面を条件に合わせて最適化する作業である。一般に、最適化は技術者が過去の経験や設計資料などを検証しながら行われるものであり、長い設計経験が技術者の技術力として活用される。しかし若年技術者にはその経験が少ないため、決定した1つの設計値は必ずしも合理的であるとは言えない。

有限要素法（FEM）解析技術は設計情報を簡易に抽出できる有用な方法の1つである。正しく解析すれば明確な結果が得られ、従来型の強度計算、経験に基づく最適化へのアプローチのかなりの部分を置き換えることができると考えられる。

製品の開発においては、ときには強度計算を軽視し、初歩的な設計ミスを犯す危険性を抱えている⁽⁵⁾。中小

企業においても、機械設計に対する若年技術者と熟練技術者の技術力格差が問題になってきている。両者の格差を解消するため、若年技術者に教育・訓練を実施し、早期戦力化を図っている。しかし製品開発サイクルの短時間化などの理由により、局所的、断片的な教育が多くなり、設計能力の低下も生じてきている⁽⁶⁾。また教育手法上の問題点も指摘されている⁽⁷⁾。製品開発には、企画力、機構の構想力とそれを検証できる計算力が必要になる。著者らも計算力の充実が技術者を一層創造的にすることを指摘してきた⁽⁵⁾。

強度計算上とくに問題になるのは断面変化に伴う応力集中であり、そこに発生する応力値の算定である。FEM解析技術は応力集中の理解に最適技術と考えられる。FEMを用いた強度解析教育によって、若年技術者の強度計算上の弱点を補うことができ、強度計算への理解が飛躍的に進むと考えられる。また簡易強度計算ツールとしてFEM解析技術の手法を導入できれば、強度計算をしないことに伴う不具合発生の危険から技術者を解放することができる。強度的な最適化

が一義的に決定されるため、機械の構想や計画に重点を移せるようになる。このことで設計期間はより効果的に活用され、一層目的に適合した設計ができると考えられる。

一般に大企業や巨大プロジェクト等で使用されるFEM解析ソフトは広範な解析作業に対応している。しかし、これを活用するまでに修得すべき事柄も多く、膨大な能力開発の実施が要求される。

こうした中、市販FEM解析ソフトの学習前段として、とくに設計経験の少ない若年技術者には最適化作業の理解を促進するためのソフト、FEM解析技術の手法が容易に理解でき、また単純な計算であれば応力値の概数が算出できるソフトが強く求められている。たとえば、市販図書⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾に記載されたFEM学習用のプログラムなどを簡易強度計算ツールとして活用できれば強度設計ミスによる不具合は飛躍的に減少すると考えられる。同様にこのソフトの活用によって、最適化作業の理解の促進にとどまらずノウハウの蓄積も可能になる。本報ではこれらの要求に対処するため、計算の本質が理解しやすい教育用プログラムと課題を作成したので報告する。

II 中小企業へのFEM解析技術の導入

FEM解析技術の第1の利点は、複雑形状の設計対象物に力が作用したとき、その変形状態を解析し、迅速に結果を出せることにある。すなわち正しく解析すればコンピュータ上の試行錯誤で、製品が開発でき、未経験分野の製品開発においても強度的、構造的な最適化作業が可能となる。同時に、時間短縮やそれに伴うコスト削減にも貢献できる。

中小企業がFEM解析技術を製品開発に活用するための導入初期条件として、

- (1) 解析システムが安く導入できること
 - (2) 高度な解析技術を要しないこと
- FEM解析技術導入後の効果として、
- (3) 総合的な技術力の不足が補えること

などが挙げられる。すなわち、中小企業にとって最も必要なFEM解析技術は、電卓代わりに取り扱え、単純で明快に強度や剛性が評価できるツールである。

またこれを実現するための具体的作業として、①よく使う機械要素を解析し、その結果をデータベース化すること、②その応力分布からこれらを設計要素のパーツとして活用すべく、設計上の観点を抽出すること、

なども必要になる。その結果FEM解析技術の手法を強度計算の下敷きツールとして位置づけることができるようになる。

さらにFEM解析技術を有効活用するためには、モデルの精緻さと解析精度の関係が明確になること、解析上のノウハウが蓄積されること、などが必要になる。これらはFEM解析技術を有効活用するための条件となる。

III 開発プログラム概要

今回開発した教育用FEMプログラムは、中小企業においても専門技術者の育成をすることなくFEM解析技術を活用するためのものであり、2次元の設計要素に適用するものである。設計における強度最適化作業の位置づけは解析結果の詳細を知ることよりも、設計上安全に使えるかどうかを判断するためのデータの提供にあり、そのレベルの解析精度が要求される。その意味で教育用FEMプログラムは、機械を構造化するためのソフトとして、機械要素を最適化し、また手軽な方法で求めた応力値の概数を確認するためのツールとして使い、厳密な解析結果を要求する場合は市販のFEM解析ソフトの利用を念頭に開発した。

また市販図書に記載されているプログラムは解析用であり、解析を実行すると、解析結果を数値データとして示されるのが一般的である。このため、FEM教育用プログラムあるいは簡易強度計算ツールとして活用するには、解析状況が逐次確認できること、目視による応力状態の確認ができること、なども重要な作成要素であるとして着目し、プログラムを解析プログラムと図形表示プログラムで構成した。解析プログラムは計算過程ごとに構造化し、また解析の逐次実行もできるようにした。このことで、プログラム言語が分かる人であれば、FEMの計算手法が明瞭に理解できる構造になっている。その解析容量は、2次元トラス問題解析プログラムでは節点数30、要素数30、2次元弾性問題解析プログラムでは節点数100、要素数150であり、市販図書に掲載されたプログラムを参考にして作成した。また図形表示プログラムは解析容量に合わせ解析結果を図形化できるものとした。この容量で、解析部材の構造を単純化することにより多くの解析作業に合理的な設計資料（設計値・精度）を提供できると考えている。

1 解析プログラムの特徴

図1に2次元弾性応力問題の解析プログラムのフローチャートを示す。プログラムは、「解析実行図面の作成」、「解析条件の入力」、「計算の実行・保存」の3部分からなり、解析実行図面の変更によって解析精度の変更、解析条件の変更によって解析対象物の変形及び応力値の変化が確認できる。

解析プログラムの特徴として、市販のFEM解析ソフトと同様に、以下の点が挙げられる。

①解析実行図面の作成に当たり、図形が対称であり荷重も対称である場合は、対称な解析ができるようにx、y軸方向の固定条件を考えて図形を省略してもよい。

②解析の際、構成する三角形平面要素の大きさは、形状の変化が大きいところほど細かくすると解析結果が正確にでる。

③平面応力弾性問題か平面ひずみ弾性問題かを定めることができる。

また、教育用プログラムであることを考慮し、解析の実行方法として以下の特徴を持たせた。

④入力データファイルの読み込みによる一括解析、もしくは手入力による逐次解析の選択ができる。

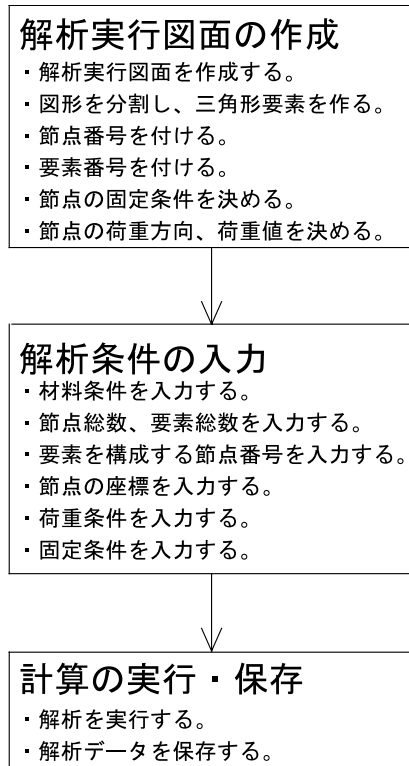


図1 解析実行フローチャート

2 図形表示プログラムの特徴

図2に2次元弾性応力問題の図形表示プログラムの

フローチャートを示す。プログラムは「図形表示用データ入力」、「解析図形の表示」、「再表示及び保存」から構成され、次の特徴がある。

①伸び、縮みの変位倍率を指定し、表示応力の種別(x方向応力： σ_x 、y方向応力： σ_y 、せん断応力 τ_{xy} 、フォンミーゼス応力： σ_V)を選択できる。

②解析実行図面が対称形状による省略図面である場合は図形全体も表示できる。

③入力図形と変位図形が表示され、入力図形とその変形状態が確認できる。各平面要素は選択した応力の最大応力値に対する割合により色別され、応力値の概数が判断できるようになっている。

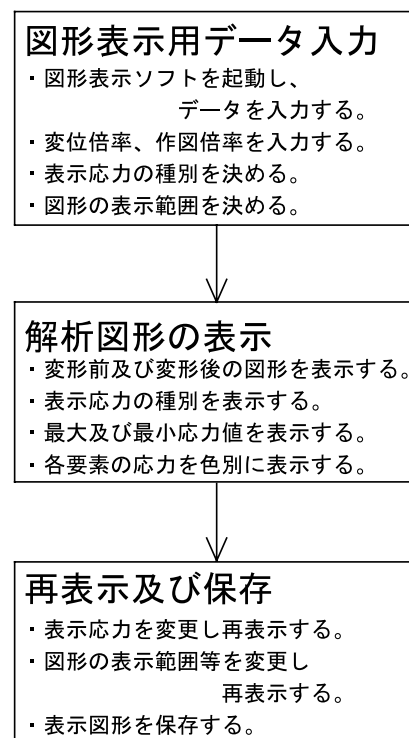


図2 図形表示フローチャート

IV 教育用FEMプログラムに適した解析課題例

以下、トラス問題及び2次元弾性問題の最適化解析課題の一例を示す。いずれも問題が単純で物理現象として理解しやすい。そのため最適化へのアプローチが明確にでき、最適化の学習を理解しやすいと考えている。

1 トラス問題の解析課題例

図3のように、断面積 100mm^2 長さ 1000mm の部材Aと、断面積 100mm^2 最大長さ 2000mm の部材Bの2本で構成されたトラス構造体を作り、部材に作用する

応力が最小になる角度 θ と部材長を求める。ただし、部材Aが壁となす角は 30° とする。

1) 最適化へのアプローチ

部材Aの長さや壁からの角度は変わらない。部材Bの長さや取付け角 θ は部材Bの壁への取付け位置が変わることで異なる。最適化へのアプローチとしては、最も応力が低くなるBの取付け位置を探せばよいことになる。部材Bの取りうる長さは、最大2000mm、最小500mmになる。部材Bの最適位置を求めるために、

- ① $l = 2000$ 、 $\theta = 14.48$ 、
- ② $l = 1000$ 、 $\theta = 30$ 、
- ③ $l = 568$ 、 $\theta = 60$ 、
- ④ $l = 500$ 、 $\theta = 90$ 、
- ⑤ $l = 800$ 、 $\theta = 141.3$ 、

の5条件について計算した。ただし、①から順に部材Bの取付け位置が下方へ移る。

2) トラス問題の計算結果

計算結果を図4に示す。

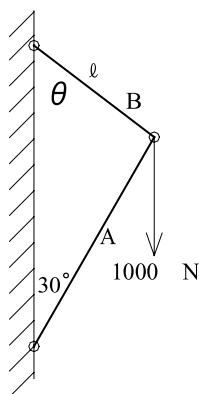


図3 トラス構造体

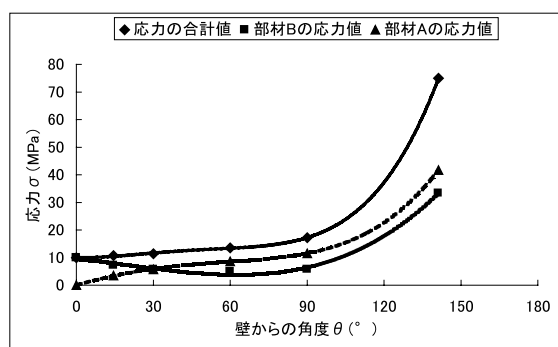


図4 部材Bの壁からの角度と応力の関係

部材Aの応力は、部材Bが無限大の長さのとき0MPaになり、また、部材Bと壁とのなす角 θ が大きくなるにしたがい角度が90度まではほぼ直線的に大きくなる。

部材Bの応力は、部材Bが無限大の長さのとき10MPaであるが、部材Bと壁とのなす角 θ が大きくなるとしだいに応力値を下げ、角度が60度付近で最小応力値になる。

また、部材Aと部材Bの応力の合計値は部材Bの壁からの角度 θ が大きくなるにしたがい大きくなること分かる。すなわち最小応力値は各部材あるいは部材の応力合計のどちらを重視して最小化するかの設計思想によって変わることも分かる。

3) 解析結果の表示

図5は、③ $\theta = 60$ 度で解析したトラス構造体の表示例である。例図では荷重作用前と荷重作用後の変形図形が表示され、各トラスは発生した応力によって色別されている。すなわち部材Aには、最大応力値の90%以上の応力が発生し、部材Bには、50%以上70%未満の応力が発生していることが分かる。

またコメント部には、部材のヤング率、伸び、最大軸力及び応力が表示されている。



図5 トラス構造体の図形表示例

2 2次元弾性応力問題の解析課題例

図6は、外径200mm、厚さ1mmに内径100mmの穴の開いた円板の1/4図面である。y軸上上向きに

荷重が作用したとき、x方向、あるいはy方向の応力が最小になる穴の形を求めることにする。ただし、荷重はF=100 N、穴の形は、長円とし、穴断面積は内径100mmの穴と変えないものとする。

1) 最適化へのアプローチ

解析範囲を4分円にするため、拘束条件は以下のようになる。円板のx軸境界の拘束条件はx方向の変形に対し自由であり、y方向の変形に対し拘束されている。またy軸境界の拘束条件はy軸方向の変形に対しては自由でありx軸方向の変形に対しては拘束されている。円板は荷重によってy方向へ伸び、x方向へは縮むと考えられる。すなわち応力が最大になるのは穴のx軸境界点になると考えられる。この応力を緩和するために、x、y方向に伸びた長円について考察することにする。

そこで、x軸境界点Aの位置を示す寸法が30、40、50、60mmになる長円について応力計算し、最適位置を探すことにする。

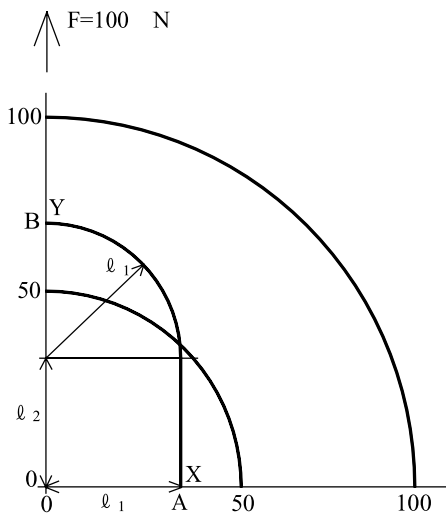


図6 穴あき円板

x軸境界点Aのx座標値をx=l₁とすると、y軸境界点BはY=l₁+l₂で計算できる。ただし、l₁とl₂の関係は、半径50mmの4分円の面積が、四角形の面積l₁l₂と半径l₁の4分円の面積との和になるとして定義する。

すなわち、y軸方向に長円の場合は、

$$\frac{1}{4} \pi 50^2 = l_1 l_2 + \frac{1}{4} \pi l_1^2$$

x軸方向に長円の場合は、

$$\frac{1}{4} \pi 50^2 = l_1 l_2 + \frac{1}{4} \pi l_2^2$$

で計算できる。

2) 2次元弾性応力問題の計算結果

図7の実線は円板外形と円板にけられた穴形状の4分円を示す。また記入した数値は応力であり、それぞれの最大値と場所を示す。

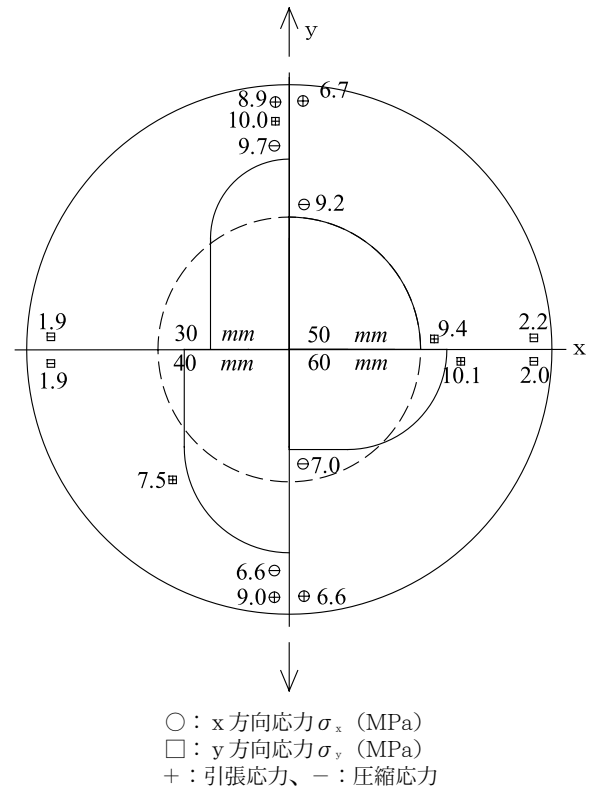


図7 穴あき円板最大応力値の分布

円板に円形穴をあけた場合の応力は、-9.2~+9.4 MPaである。これを緩和するために横長の長穴(l₁=60mm)をあけた場合の応力は-7.0~+10.1MPaとなりx方向応力は低下するもののy方向応力は増加する。逆に縦長の長穴(l₁=30mm)をあけた場合の応力は-1.9~+10.0MPaでありy方向応力は低下するが、最大値はx、y方向とも増加する。結局、幾分縦長の長穴(l₁=40mm)の応力が-1.9~+9.0MPaとなり全体的に低下していることが分かる。すなわちこの穴形状に近い穴において最適化された穴形状が得られると考えられる。

3) 解析結果の表示

図8は、穴あき円板に横長の長穴(l₁=60mm)をあけた場合のσ_yの応力分布を示す。作図データの入力は、4分の1図形分であったが、表示図形では、解析図形全体を表示している。また、コメント行には、円板材料のヤング率及びポアソン比と計算結果である応力の種別及びその最大値、最小値、応力最大値の絶対値が表示されている。なお、図形の色別は、各平面要素に作用する応力の応力最大値の絶対値に対しての

割合であり、応力の分布が一目瞭然として分かる。

σ_y の最大値は長穴の長軸端部に発生し、短軸端部にはほとんど発生していないことが分かる。

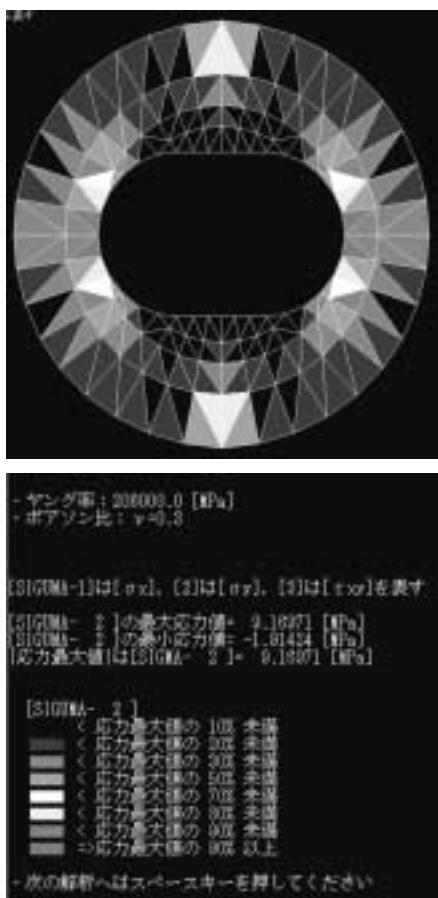


図8 穴あき円板の図形表示例

V おわりに

コンピュータシミュレート技術は、試作の省略、問題点の早期解決、が図れると期待されるなど、導入することによる設計簡略化への有用性が認められる。

中小企業においては、解析設備の導入とほぼ同時に成果が求められる。したがって中小企業の製品開発に向けた最大の問題点は、①汎用機械要素の解析結果がデータベース化されていないこと、②これらの設計上の観点が抽出されていないこと、などである。これらを明らかにするために、解析図面の単純化手法あるいは単純化のレベルと解析精度の関係を知ることが重要になる。また、ノウハウの蓄積も不足している。

今回開発した教育用FEMプログラム及び課題は、中小企業において上記問題点を克服しFEM技術を効果的に活用するための、教育用あるいは簡易強度計算

ツール用FEM技術を提供するためのものである。そしていつでもどこでもブラックボックスとして簡易に使えることが肝要である。解析精度は単純な部材の応力計算においてほぼ材料力学による計算結果結果と一致している。すなわち最適化のために概数を求める簡易強度計算ツールとして線形静解析の範囲で十分その役割を担えるものと考えている。

将来的にはFEMのきわめて広範な解析条件に対応できることを活用するため、線形静解析ばかりでなく、非線形解析、熱変形、振動問題など、解析条件を充実していくことも必要になろう。すなわち汎用性の高い市販ソフトの役割は重要である。教育用プログラムはその前段としての活用が期待される。

最後に、開発したプログラムの大部分はS型研修「有限要素シミュレーション技術」において作成したものである。研修に際し総合大学校生産機械科教授小川秀夫氏には資料の提供と暖かい助言をいただいたことを記し、感謝の意を表す。

【参考文献】

- (1) 三好俊郎、有限要素法入門、培風館、1986年
- (2) 水本久夫、原平八郎、FORTRANによる数値計算法入門、近代科学社、2001年
- (3) 吉野利男、長崎孝夫、計算力学の基礎、オーム社、1994年
- (4) 戸川隼人、有限要素法へのガイド、サイエンス社、1979年
- (5) 長嶋喜一郎、岡安繁樹、段秀二、企業と職業能力開発施設の連携による設計技術者教育システムの提案、報文誌、1998年、第10巻、第1号、p15-21
- (6) 西村薫、企業サイドより見た設計技術教育、日本機械学会関西支部、第69期定時総会講演会、1994年
- (7) 伏信一慶、大竹尚登、大河誠司、足立忠晴、平林敬二、安井位夫、福島、E.文彦、中嶋久嘉、上野広、塚本美弥子、古田基、吉井昌一、白松修、大熊政明、新しい設計教育のひとつの試み、日本機械学会〔No.01-35〕第11回設計工学・システム部門講演会講演論文集、2001年、p286-288
- (8) 秋富勝、菊池道彦、菅原彪、中村征壽、中村隆一、若山芳三郎、学生のためのFORTRAN、電機大学出版局、1990年