

研究報告

Excelを用いたボデー構造の初期設計ツールFOA

西垣英一

First Order Analysis for Automotive Body Structure Design Using Excel

Hidekazu Nishigaki

要 旨

本報では、詳細CAEを補完する技術として、ボデー設計者自らが概念設計段階で容易に利用できる新しいCAEであるFirst Order Analysis (FOA) を提唱する。

このFOAの基本概念は、(1)手軽で容易に扱える、Microsoft/Excelをフロント・エンドとするグラフィカルなユーザ・インターフェース、(2)想定する設計の妥当性を簡便に検討するのが目的のため、材料力学的な基礎知識で十分理解できる手法、(3)新規構造のヒントや補強部材配置に示唆を与える、梁要素を用いたトポロジー最適化機能、の主に3項目から構成されている。

まず、FOAを構成し、Microsoft/Excelをイン

ターフェースとして動作する解析ツールについて述べる。

次に、車両設計の概念設計への適用可能性を示すため、FOAの概念に基づくプログラムのひな形を示し、その有効性を示す。

さらに、有限要素モデルのメッシュデータから、FOAで用いる断面形状を作成する機能を紹介し、力やモーメント分布のみならず、降伏関数値や断面応力分布などが容易に求められることを示す。

最後に、FOAから汎用CAEのマクロ言語を自動生成することで、FOAの容易な操作性を維持したまま、汎用CAEの解析機能が利用可能なことを示す。

キーワード

CAE, 自動車, 設計, トポロジー最適化, 有限要素法

Abstract

CAE numerically estimates the performance of automobiles and proposes alternative ideas that lead to higher performance. However, most automotive designers cannot directly utilize CAE since specific well-trained engineers are required to achieve sophisticated operations. Moreover, CAE requires a huge amount of time and many modelers to construct an analysis model. In this paper, we propose a new CAE concept, First Order Analysis (FOA), in order to overcome these problems and to quickly obtain optimal

designs. The basic ideas include (1) graphic interfaces using Microsoft/Excel, (2) use of sophisticated formulations based on the theory of mechanics of material, and (3) the topology optimization method. Further more, some software prototypes are presented to confirm the FOA method. Moreover, the cross-section generation tool is added to easily create the FOA model from FEM data and to easily evaluate the yielding state. Also a trial study of interaction between FOA and CAE is performed.

Keywords

CAE, Automotive, Design, Topology optimization, Finite element method

1. 緒言

近年のCAE (Computer Aided Engineering)¹⁾の普及とその機能向上により、試作車を作る前段階で車両性能がある程度定量的に予測可能となり、より性能の良い構造が提案できるまでに至ってきた。しかし、他に多くの業務を抱えるボデー設計者が日常業務で取り扱えない程、CAEは高度化されてきているのが現状である。さらに、解析モデル作成に多大な時間・人を要する上、専門知識も必要とされるため、解析専門家に委託せざるを得ない状況となっている。

そこで、このような従来の詳細CAEを補完する技術として、筆者らは、ボデー設計者自らが概念設計段階で容易に利用できる新しいCAEであるFirst Order Analysis (FOA)²⁾を提唱している (Fig. 1)。

このFOAの基本概念は、以下に示すものとする。

(1) ボデー設計者が特別な訓練なしに手軽で容易に扱えるように、Microsoft/Excel³⁾をフロント・エンドとするグラフィカルなユーザ・インターフェースを用意する。

(2) 想定する設計の妥当性を簡便に検討するのが目的のため、材料力学的な基礎知識で十分理解できる手法 (要素としては、梁要素とパネル要素) で構成する。

(3) 新規構造のヒントや補強部材配置に示唆を与えるための、梁要素を用いたトポロジー最適化機能も用意する。

ただし、定量的な評価は、従来の詳細CAEによらなければならないことは、言うまでもない。

ところで、CAD・CAEツールの発達・浸透により、各メーカーでは有限要素モデルのメッシュデータが数多く蓄積されてきているため、旧モデルのデータなどは、社内で比較的容易に利用可能な状態になっているものと思われる。

ここで、旧モデルの有限要素メッシュデータからのFOAモデル構築が容易になれば、設計者は容易に、

骨格部材への力やモーメントの伝達経路と発生機構や降伏関数値などを把握し、構造変更に伴う検討などを行うことのできるツールを手にするができる。

そこで、有限要素モデルのメッシュデータから、FOAで用いる断面形状を作成する機能も用意する。有限要素解析結果との比較により、境界条件設定の指針も得られる。FOAでは、おおよその力やモーメント分布のみならず、断面特性値や降伏関数値も容易に求められるため、対策案を導く上で多くの示唆を与えることができる。その上、応力状態や降伏関数値などを見ながら、形状変更や板厚変更などが容易に行えるため、詳細CAEを行う前の事前検討にも有効である。

さらに、形状データ作成やFOA検討結果の設計への反映の効率化を考えると、CADやCAEとのデータ変換などの連携が、FOAに必要な重要項目として浮かび上がってくる。また、市販の詳細CAEは多くの解析機能や要素を備えているため、様々な対象物へFOAを展開する上で、有効な解析エンジンに成り得ると考えられる。

例えばANSYSは、ANSYS Parametric Design Language (APDL) と呼ばれるマクロ言語を有しているため、操作を自動化することが可能である。すなわち、FOAからAPDLコマンドを自動生成することにより、汎用CAEでのモデル作成 / 解析 / 結果出力が自動化されるため、FOAの容易な操作性を維持したまま、高度な機能が利用できることになる。

本報ではまず、FOAを構成し、Microsoft/Excelをインターフェースとして動作する解析ツールについて述べる。

次に、車両設計の概念設計への適用可能性を示すため、FOAの概念に基づくプログラムのひな形を示す。

さらに、有限要素モデルのメッシュデータから、FOAで用いる断面形状を作成する機能を紹介し、力やモーメント分布のみならず、降伏関数値や断面応力分布などが容易に求められることを示す。

最後に、FOAからANSYSのAPDLコマンドを自動生成することで、FOAの容易な操作性を維持したまま、汎用CAEの解析機能が利用可能なことを示す。

2. 梁要素とパネル要素を用いた静解析と固有値解析

FOAでは、想定する設計の妥当性を簡便に検討するのが目的のため、梁要素とパネル要素を用いた、線形の静解析と固有値解析に注目する。

梁要素は、通常の線形弾性梁の定式化に従うが、車両構造を扱う上で重要な結合部の結合剛性を表現

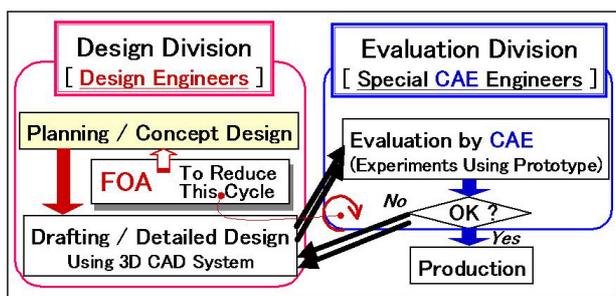


Fig. 1 Flow diagram of structure development.

するため、一端に3自由度の回転ばね（残り3自由度の並進成分は剛結合）を与えることも可能とする（Fig. 2）。

なお、詳細な結合剛性が必要な場合には、結合部をシェル要素で詳細に表現した有限要素モデルを、Guyan Reduction⁴⁾により自由度縮小して求めた剛性マトリクスを用いることもできる（Fig. 3）。

パネル要素は、粗いモデル化により要素がねじれることを想定し、ゆがみに強く精度が良い応力仮定に基づく定式化⁵⁾を用いる（Fig. 4）。

3. 梁要素を用いたトポロジー最適化

梁要素を用いたトポロジー最適化は、新規構造のヒントを与え、補強部材の配置を決める時などに役立つ。

構造物の剛性を最大化するためのキーとなる概念は、(a) グランドストラクチャアプローチと、(b) 平均コンプライアンスの最小化である⁶⁾。

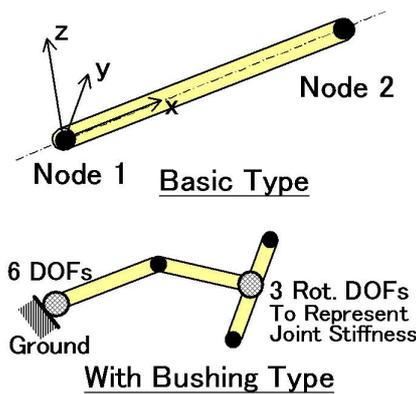


Fig. 2 Beam element.

(a) グランドストラクチャアプローチでは、まず、Fig. 5に示すように、多数の固定節点を予めセットし、これら節点間のすべての組合せに対して梁要素を配置する。そして、最適化手法を用いて設計変数（今回は中実円筒断面の直径）を更新し、不要な梁要素を取り除いていくことにより、最適な梁構造形態を見つけ出していくものである。

(b) 平均コンプライアンス L は式(1)の形で定義⁶⁾され、ひずみエネルギー $(u^T K u)$ と等価である。

$$L = F^T u \tag{1}$$

ここに F は荷重、 u は変位、 K は全体剛性マトリクスである。そこで梁構造の総重量を制約条件として、平均コンプライアンス L を最小化することにより剛性最大化が図られる。なお多目的問題を扱う上で、次式(2)で示されるMin-maxアプローチに基づく目的関数を採用する。

$$\text{minimize max } L^k \tag{2}$$

4. FOAの概念に基づくプログラムのひな形

Microsoft/Excel³⁾には、Visual Basic for Application (VBA)と呼ばれるマクロ言語が組み込まれている。

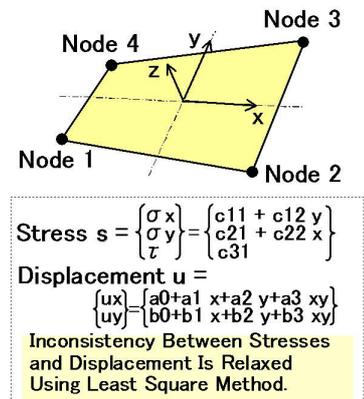


Fig. 4 Panel element (stress assumed).

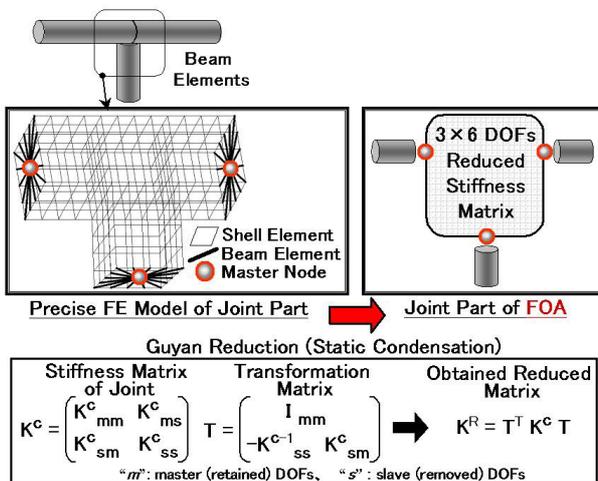


Fig. 3 Modeling of flexible joint.

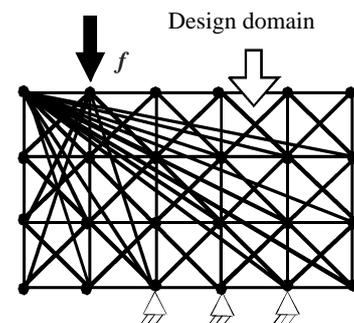


Fig. 5 Ground structure approach.

このVBAの機能を用いることで、マウスクリックにより(a) セルデータの読み書き、(b) 他のシートへの移動、(c) 数値演算、(d) 外部ファイルとの入出力、(e) 外部プログラムの起動などを行うことができる。

Fig. 6 ~ Fig. 8は車両全体を対象とした非常に簡単なFOAの例題を示したものである。例えば、Excelシート上に埋め込まれた車両の客室部を示すボタンをクリックすることで、客室部のシートに移ることができる。この客室部のシート上でスライダバーを操作することにより、客室形状を瞬時に変更することができる。部材をクリックすることにより、断面形状を表示する画面が現れ、その形状を容易に修正することができる。また静解析結果は、変形図とともにひずみエネルギーや部材力分布を円の大きさなどで表示できる。部材断面の応力分布も表示可能である。

Fig. 9は、穴の空いた板構造物に対する、補強部材の最適配置問題を対象とした簡単なトポロジー最適化の例題を示したものである。設計領域とその初期形状をFig. 9(a)に示す。白色の線は最適化対象の梁要素、薄い白色の部分は最適化から除外されるパネル要素を示している。Fig. 9(b)に示すような境界・荷重条件を与え、前述した梁要素を用いたトポロジー最適化を実施したところ、図に示すような形状が得られた。

不要な梁要素はとても細くなって無視できるようになり、必要な要素が太くなっている様子が見られる。このように、設計領域と設計者が想定する境界・荷重条件を設定するだけで、容易に骨格レイアウトの指針が得られることが確認できる。

5. 有限要素モデルからの断面形状作成機能

有限要素モデルのメッシュデータから、FOAで用いる断面形状を作成するプログラムをFig. 10に示す。カット断面の座標情報などを入力すると、自動的に下側に示したようなFOAで用いる断面形状が作成されるものである。

このようにして求められたFOAモデルの例をFig. 11に示す。上記手法で求められた梁要素の断面形状を、図中に重ね描きして表示したものである。節点の座標は、同じ手法で求められた断面形状の図心から得られたものである。

Fig. 11に示す境界条件下で剛性解析を実施して得られる力やモーメントと、

断面形状から得られる断面特性値を用いて求められた、降伏関数値の分布や代表位置の断面応力分布をFig. 12に示す。ここで降伏関数は、力とモーメントをそれぞれ対応する全塑性軸力・モーメントで正規化し、力成分は二乗、モーメント成分は絶対値を取って重ね合わせたものである。断面応力は、軸力による軸応力と曲げモーメントによる曲げ応力を組み合わせたものである。

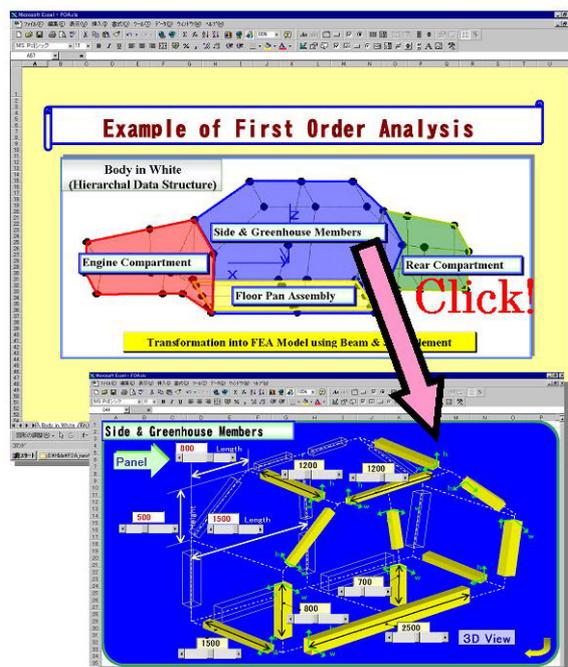


Fig. 6 Simple example_1 of FOA.

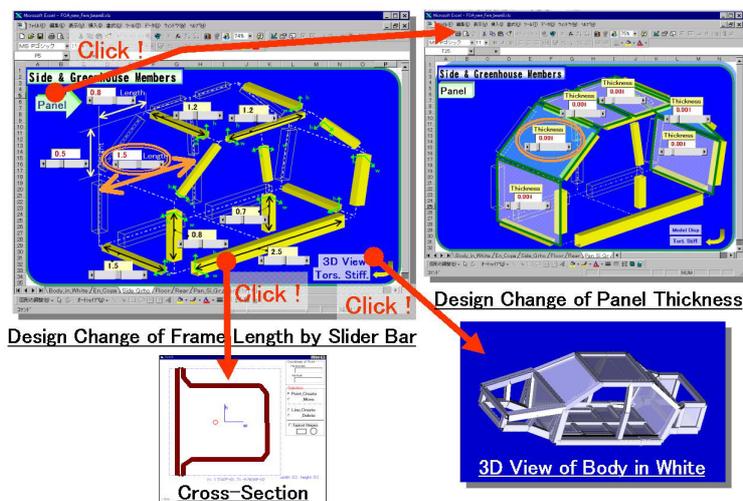


Fig. 7 Simple example_2 of FOA.

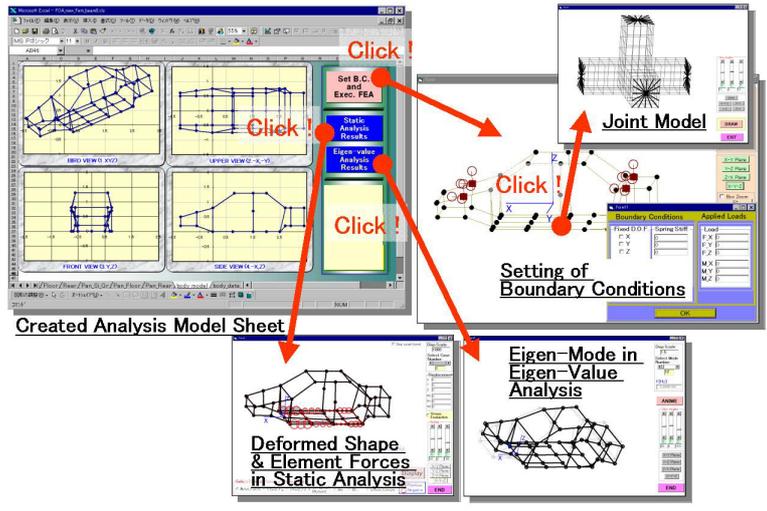


Fig. 8 Simple example_3 of FOA.

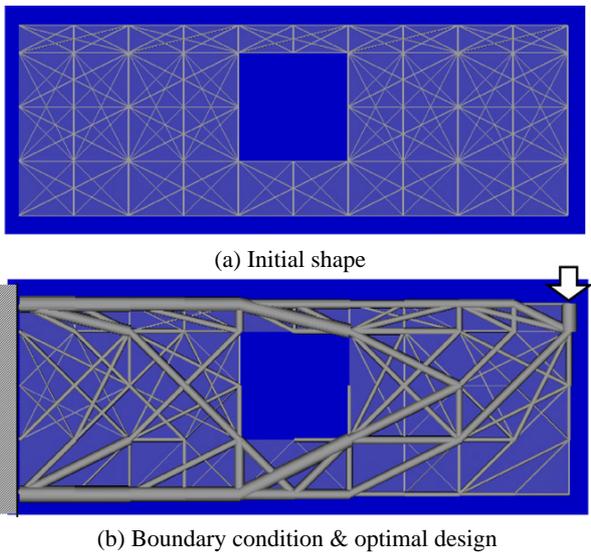


Fig. 9 Simple example of topology optimization.

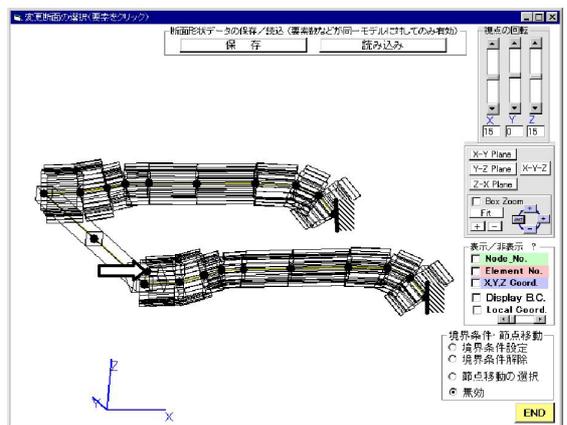


Fig. 11 Example of generated FOA model from FEM data.

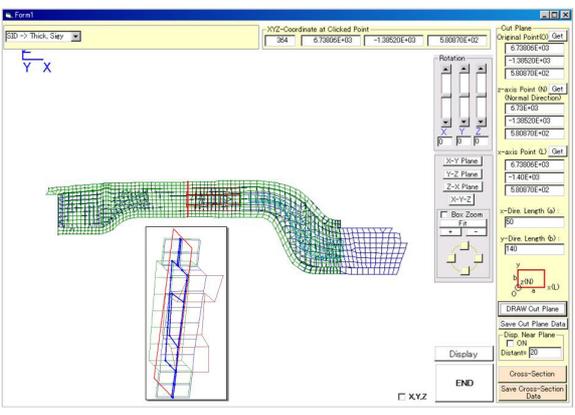


Fig. 10 Cross-section generation tool from FEM data.

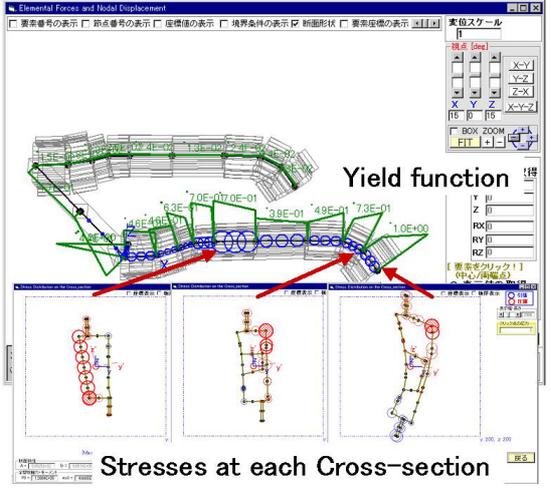


Fig. 12 Obtained yield function distribution and stresses at each cross-section from FOA.

6. 汎用CAEとの連携

今後FOAを展開していく上で、CAD / CAEとのデータ授受や、まだ組み込まれていない要素や解析機能を汎用CAEに移管する必要性が生じるものと考えられる。そこで従来のFOA機能のうち、線形の静解析と固有値解析を汎用CAEに移管・連携することを試みる (Fig. 13)。

Fig. 14に示す境界条件の設定までは、従来のFOAと全く共通なものとする。

線形の静解析か固有値解析かを選択した後、「ANALYSIS」ボタンを押すことで、ANSYSのマクロ言語であるAPDLコマンドを自動生成する。

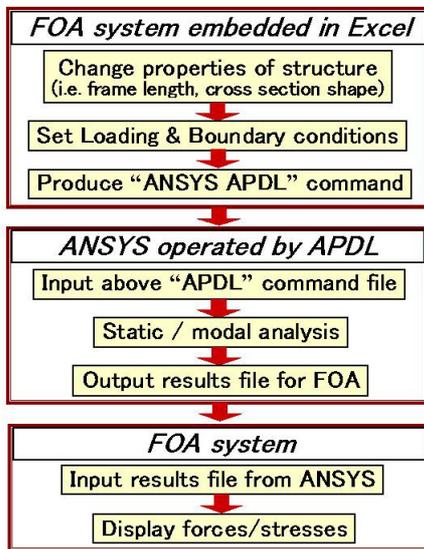


Fig. 13 Flow diagram of interaction between FOA and CAE (ANSYS).

その後、汎用CAEにおいてマクロ言語のファイルを読み込むことで (Fig. 15)、モデル作成 / 解析 / 結果出力が自動的に行われる (Fig. 16)。

後は、従来のFOAと同様に計算された部材力分布や断面の発生応力などを見ることが出来る (Fig. 17)。

このように、FOAの容易な操作性を維持したまま汎用CAEの解析機能が利用できることが確認できた。

7. まとめ

以上、本報では、詳細CAEを補完する技術として、ボデー設計者自らが概念設計段階で容易に利用できる新しいCAEであるFirst Order Analysis (FOA) を提唱した。

そしてまず、FOAを構成し、Microsoft/Excelをインターフェースとして動作する解析ツールについて述べた。

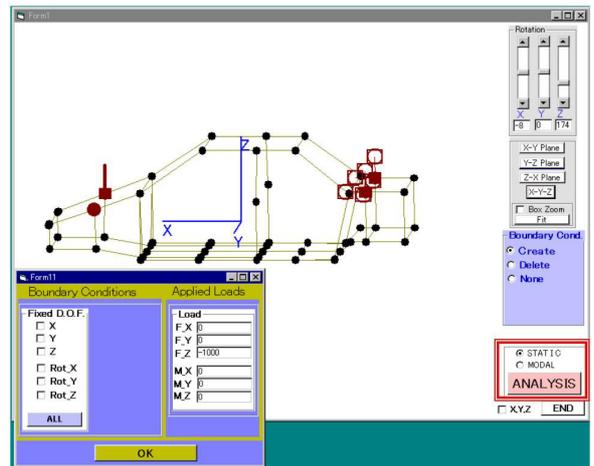


Fig. 14 Boundary condition setting frame.

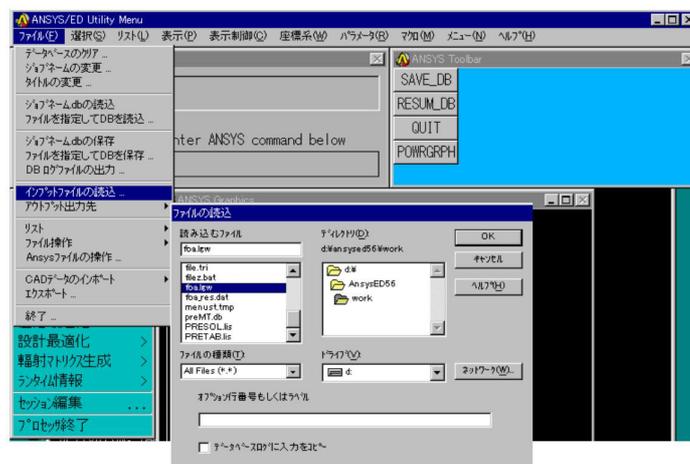


Fig. 15 Input APDL command file.

次に、車両設計の概念設計への適用可能性を示すため、FOAの概念に基づくプログラムのひな形を示し、その有効性を示した。

さらに、有限要素モデルのメッシュデータから、FOAで用いる断面形状を作成する機能を紹介し、力やモーメント分布のみならず、降伏関数値や断面応力分布などが容易に求められることを示した。

最後に、FOAから汎用CAEのマクロ言語を自動生成することで、FOAの容易な操作性を維持したまま、汎用CAEの解析機能が利用可能なことを示した。

参考文献

- 1) Lemon, J. R., Tolani, S. K. and Klosterman, A. L. : "Integration and Implementation of Computer Aided Engineering and Related Manufacturing Capabilities into Mechanical Product Development Process", Gi-Jahrestagung, (1980)
- 2) Nishigaki, H., Nishiwaki, S., Amago, T. and Kikuchi, N. : "First Order Analysis for Automotive Body Structure Design", ASME DETC, 2000/DAC-14533, (2000)
- 3) Microsoft Corporation : Microsoft Excel/Visual Basic Reference Second Edition, (1998), Microsoft Press
- 4) Guyan, R. J. : "Reduction of Stiffness and Mass Matrics", AIAA Journal, 3-2(1965)
- 5) Sekiguchi, M. and Kikuchi, N. : "Remark on the Mixed Formulation of a Finite Element Stiffness Matrix Based on Clough's Paper in 1960", Proc. of the Conf. on Comput. Eng. and Sci., JSCES, Tokyo, Japan, 4-1(1999), 131-134
- 6) Suzuki, K. and Kikuchi, N. : "A Homogenization Method for Shape and Topology Optimization", Compt. Methods Appl. Mech. Eng., 93(1991), 291-318

(2001年12月6日原稿受付)

著者紹介



西垣英一 Hidekazu Nishigaki

生年：1961年。

所属：第14研究領域。

分野：ボデー構造の初期設計法に関する研究。

学会等：日本機械学会，自動車技術会会員。

工学博士。

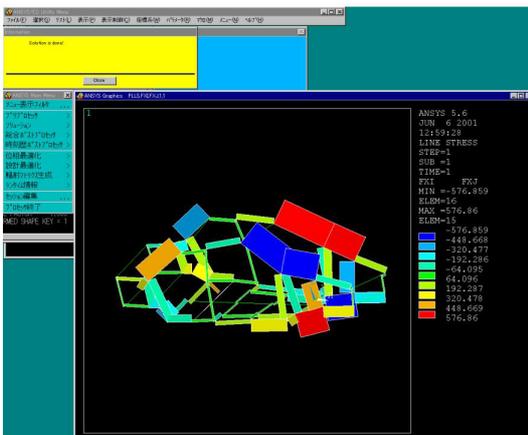


Fig. 16 Result of analysis.

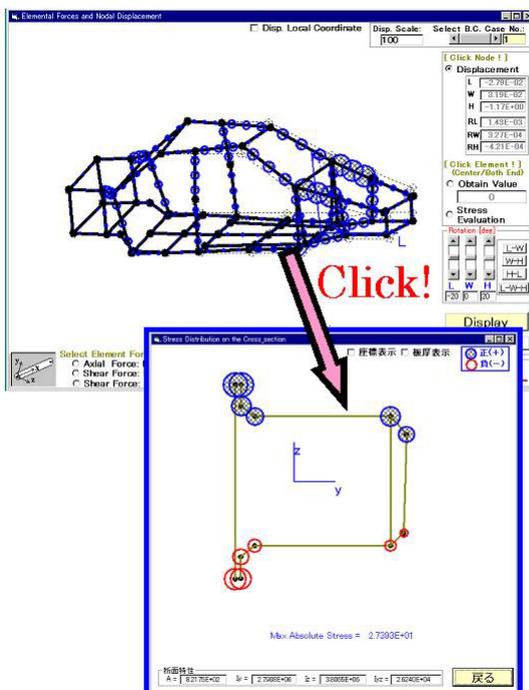


Fig. 17 Post process at FOA.