

vol. 2004-2

Mech D & A News

Mechanical Design & Analysis Co.

September 2004



Monet, Le pont d'Argenteuil, 1874.

【特集】 最適化ソフトウェアを用いた 弾塑性材料モデルの同定

*FEM Consulting Services for Engineering Practice
Find Innovation in Tradition 2008-2019*

【1】はじめに

CAD/CAE の市場では、この 10 年間で製品の急激な淘汰が進みました。ユーザの需要や研究の動向がソフトウェアの流れを形成してきたのは勿論ですが、潜在的により大きな支配力を持つのはソフトウェアベンダーの経営方針であることに注意しなければなりません。

最近 50 年の構造解析の足どりを見ても、ソフトウェアが設計ツールとして定着するためには、商業ベースの汎用システムとして製品化されることが重要なポイントでありました。単品のハードウェアと異なり、ソフトウェアは常にメンテナンスを施すことが必要であるからです。

メンテナンス契約を解除してしまったソフトウェアは、3 年もすると使いものにならなくなります。単にハードウェアのバージョンアップに追従できないといった理由もさることながら、3 年の間には設計の環境が変化し、ソフトウェアと設計者を結ぶインターフェースの部分が時代遅れになってしまうからです。

ソフトウェアの進化に追い立てられるようにして、解析業務のフロントエンドに立つ人材の維持も非常に難しい課題でありましょう。計算機によって支援された「設計最適化」は、このような背景に希求された技術と考えられます。

今回は、汎用の最適化ソフトウェアである AMDESS^①と非線形 FEM を組み合わせ、材料モデルの同定に利用した例を示します。

【2】弾塑性材料モデルの同定：ソニー殿における知見

塑性変形に至るような大きなひずみを伴う構造を FEM で解析する場合、ヤング率やポアソン比といった弾性定数に加えて、降伏応力や加工硬化などの材料定数が必要となります。これらの材料定数は、単軸引張試験から得られる荷重-伸び線図を利用して求めることが大半です。しかし引張試験では、ひずみの大きい領域では試験片にくびれを生じ、大変形の解析に適用することが難しいのが実情です。



製品



内圧による変形

背景) 過充電時に内圧が上昇し、筐体が変形

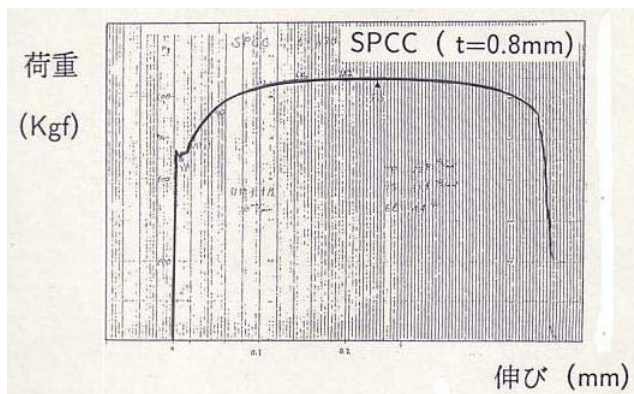
目的) 内圧と変位の関係を正確に予測し、

a) ケース形状と肉厚を最適化する。

b) 安全弁の解放圧力を設定する。

問題発生：計算結果と実験が合わない。

Fig.1 ソニー製バッテリーケースの内圧による変形^③



引張試験 (JIS-Z-2241)

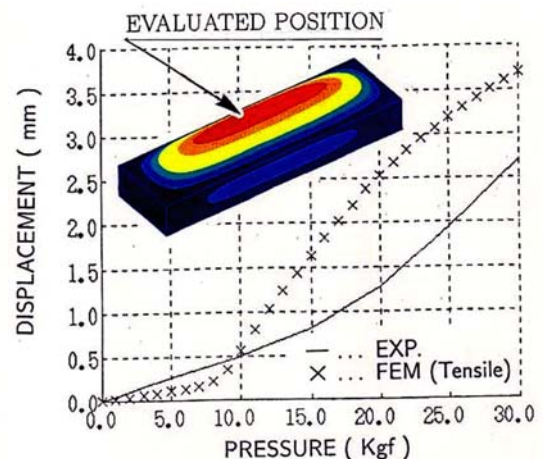
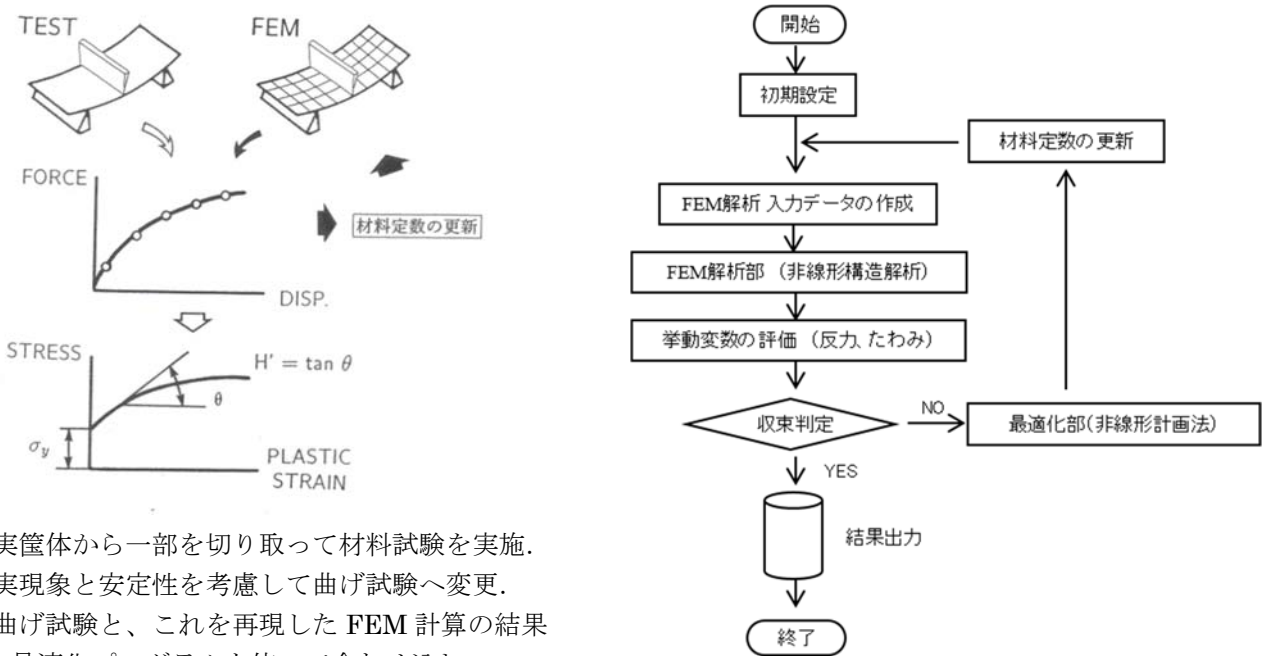


Fig.2 SPCC 処女材の引張試験結果を用いた解析^③ (成形後の変形挙動を表現できない)

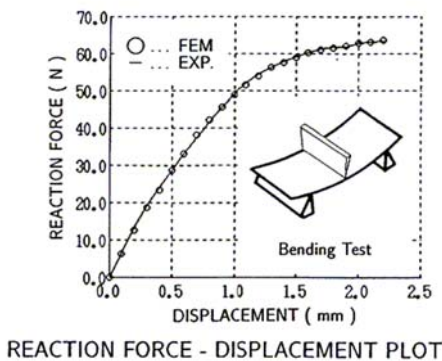
Fig.1 に解析の対象としたソニー殿製のバッテリーケースを示します。過充電によってバッテリー内部にガスが発生し、ケースが膨満する不具合を防止するため、一連の検討が行われました^{(2),(3)}。FEM によって内圧とケースの変形の関係を正確に予測し、適切なケースの形状と肉厚を決定すると共に安全弁の開放圧力を設定するのが目的とされています。

ケースの材質は SPC 材（冷間圧延鋼板）の一種であり、Fig.2 に示すように事前に引張試験の結果が与えられています。ところがケースの成形時に絞り加工と焼鈍の工程を経るため、加工前の材料を用いた引張試験のデータを用いて FEM 解析を行うと、図中に示すように実際の変形量と大きく異なる結果しか得られないことが明らかとなりました。

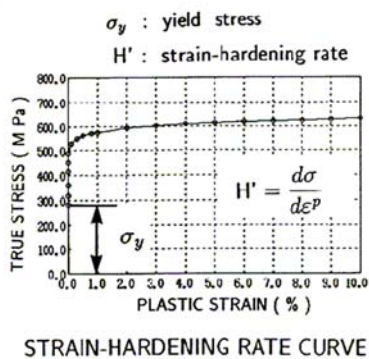


- 1) 実筐体から一部を切り取って材料試験を実施。
- 2) 実現象と安定性を考慮して曲げ試験へ変更。
- 3) 曲げ試験と、これを再現した FEM 計算の結果を最適化プログラムを使って合わせ込む。

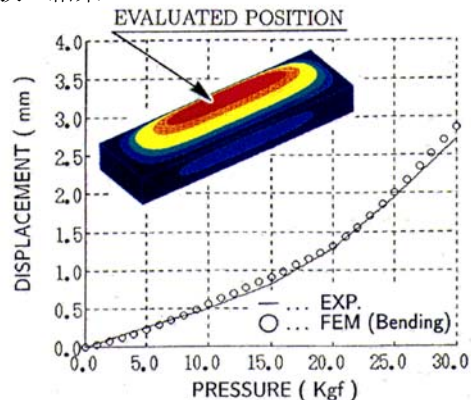
Fig.3 ケースからの切り出し材を用いた 3 点曲げ試験による材料定数の同定⁽³⁾



同定に使われた曲げ試験の結果



最終的に同定された塑性域の材料特性



同定された材料特性による実機の解析結果

Fig.4 ケース切り出し材の曲げ試験結果を用いた解析⁽³⁾ (成形後の変形挙動を表現できた)

そこで、Fig.3 に示すようにケース現品から板状の試験片を切り出し、3 点曲げ試験が行われました。成形後の材料に残留している応力やひずみの状況が明らかではないので、実際の製品への負荷形態に合わせて曲げ試験によって評価するのは順当な判断であると考えられます。しかし弾塑性の材料定数を、曲げ試験の結果から直接求めることは困難です。

そこで Fig.3 に示すように対応する FEM モデルを作成し、そのモデルに適当な降伏応力と加工硬化特性を与えて荷重-変位曲線を求め、それが実測値と一致するまで試行を繰り返す手順が採用されました。ソニー殿の元々の検討^②では、自製の最適化プログラムが使用されました。今回の弊社の検討ではこの部分を汎用の最適化ソフトウェア AMDESS で置き換え、一連の解析を Windows マシン上で自動実行できるようにしています。

Fig.4 にソニー殿における評価結果を示します。曲げ試験の結果に合致するように材料特性を同定した結果、バッテリーケース実機の内圧と膨張変位の関係を正しく予測できたとされています。

【3】 AMDESS の近似モデル⁽¹⁾

一般に設計を行う場合には、変更しうるパラメータ（設計変数）と着目する結果（応答）があり、その関係を評価するためにコンピュータプログラムを用いたり、実験を行ったりします。設計変数と応答の関係をより定量的に吟味することができれば、設計の水準を向上させることが可能になります。

AMDESS は複数の設計変数と応答の関係に近似モデルを用いることで、設計者に設計のヒントを提供することを目的として開発されました。例えば Fig.5 に示すように、N 個の設計変数に対して M 個の応答がきまってくるようなシステムを考えます。

このシステムで、複数の設計変数の組み合わせについて、既に複数の応答（実験あるいは解析結果）が得られているものとします。この結果を用いて未知の設計変数の組み合わせに対する応答を予測することができれば、有益な知見を引き出すことが可能になります。特に実験や解析に多大な工数が必要である場合には効果が大きくなります。最適化ソフトウェアでは、Fig.6 に示すように設計変数を入力して応答の近似解を与えるような近似モデルを作成することが手はじめの目標となります。近似モデルとしては、応答曲面近似が広く使用されています。最も簡単な応答曲面モデルは線形近似モデルで、次の式で表されます。

$$\tilde{r}(x_1, x_2, \dots, x_N) \approx a_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_N x_N \quad \dots (1)$$

この形のモデルは (N+1) 個の係数だけで定義されます。例えば線形解析を近似の対象とする場合は、解析の一部として各変数についての応答の感度を求めることが出来るので、一回の解析（感度解析を含む）でこの近似モデルの係数が定まります。すなわち解析結果から a_0 が決まり、感度解析から $b_i, i=1, 2, \dots, N$ が決まります。

しかし、線形解析以外では感度解析が出来ることは少なく、その場合は、差分法によって一つずつ係数を計算するか、または最小二乗法を使って (N+1) 回以上の解析の結果をもとに、この係数を決めることとなります。

このように線形モデルは簡単ですが、設計変数と応答の関係の非線形性を無視しているため、適用の範囲は限られます。最近では一般的な曲面近似モデルとして、定数項、1 次項、2 次項、および相互作用の項を含めたものを指すことが多くなってきています。すなわち

$$\begin{aligned} \tilde{R}(x_1, x_2, \dots, x_N) \approx & a_0 + (b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_N x_N) \\ & + (c_1 x_1^2 + c_2 x_2^2 + \dots + c_N x_N^2) + (d_1 x_1 x_2 + d_2 x_1 x_3 + \dots + d_{N(N-1)/2} x_{N-1} x_N) \quad \dots (2) \end{aligned}$$

(2)式では係数の総数は $(N+1)(N+2)/2$ 個となります。一般の設計で扱う設計変数と応答の関係に対しては、設計変数の領域が比較的限られる場合、この2次の多項式が近似的に成立する場合が多いと言われています。AMDESSはこのような近似モデルに対して最適化を行います。

【4】AMDESS と汎用 FEM のカップリング

今回は、Fig.7 に示すシェルの3点曲げのモデルを用意し、汎用の非線形 FEM により弾塑性曲げ解析を行いました。前述のように、このときの荷重-変位特性が実測値に合致するように AMDESS の最適化機能を適用して材料の弾塑性特性を調整しました。今回は FEM ソルバーとして Marc を使用しています。

Fig.8 は AMDESS が外部とのデータのやり取りのために必要とする入出力のファイルの例を示します。まず solvein.txt は AMDESS が行った最適化計算の結果を FEM ソルバーに引渡すためのファイルです。今回は弾塑性特性として手始めに以下のような Ludwik の構成則を採用し、その係数である Y , C , n を設計変数としました。Fig.8 の左図に示す3つの数値はこれらの設計変数に相当します。

Ludwik 型 弾塑性構成則

・・・(3)

FEM ソルバーは与えられた弾塑性特性を用いて3点曲げを解析し、荷重-変位曲線を与えます。Fig.9 はその例を示します。図中には2本の曲線が描かれており、試験によって得られた実測値と、FEM ソルバーによる解析結果を示します。この2本の曲線の二乗誤差和を求め、AMDESS に引渡してそれが最小となるまで以上の手順を繰り返し、最適化計算を行わせました。Fig.8 の右図に示す数値はこの二乗誤差和に相当します。

これら一連のファイルのやりとりとプログラムの反復実行は、AMDESS が提供する支援環境の下で構成したシェルにより自動実行させました。Fig.10 に最適化によって求められた弾塑性特性の例を示します。先の Ludwik 型の構成則ではなく、より一般的な多直線近似を想定した結果を Fig.10 は示しています。以上、簡単な例ですが、AMDESS を利用して実用的な設計環境を実現することができました。

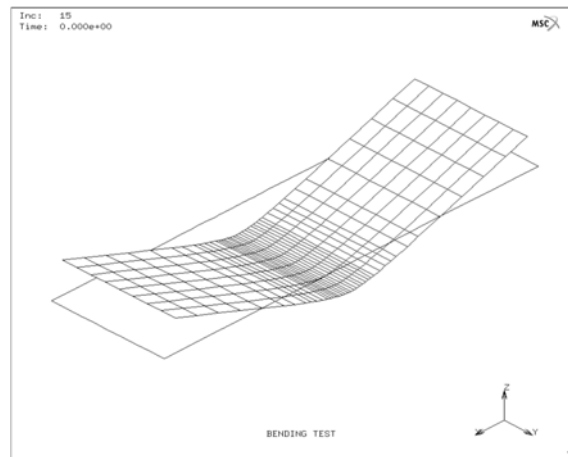


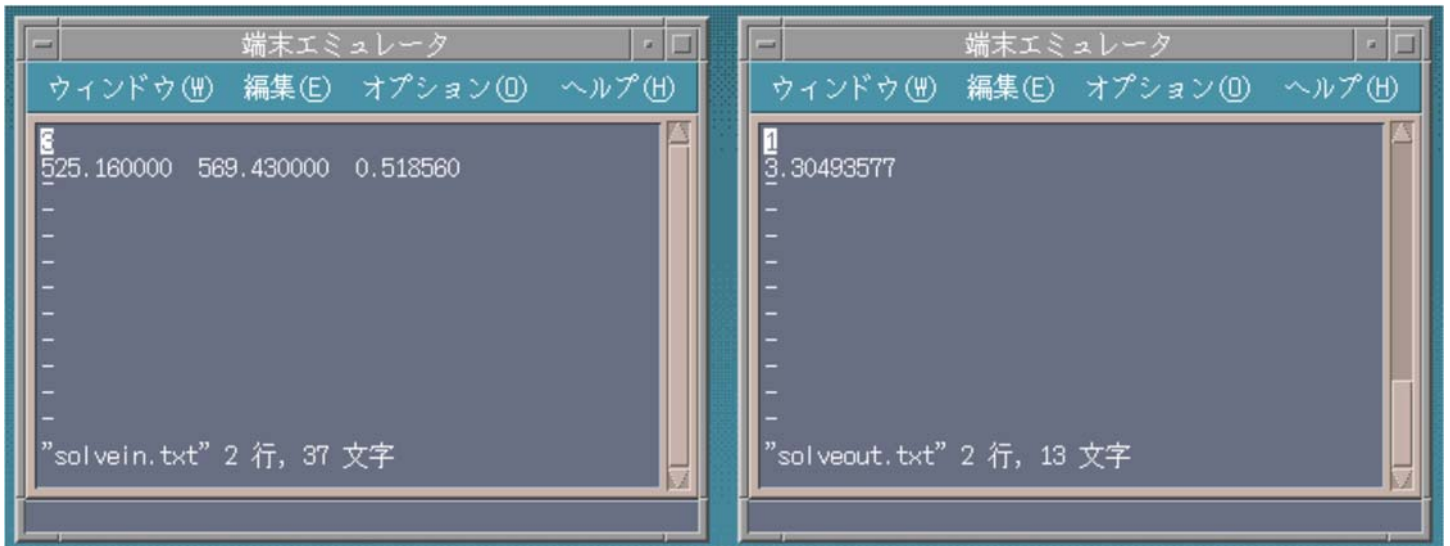
Fig.7 汎用 FEM による弾塑性 3 点曲げモデル

謝辞

今回の内容は、ソニー株式会社・井戸浩登氏による先行例をトレースした結果である。最適化ソフトウェア AMDESS は株式会社くいんと・石井恵三氏の好意により使用させていただいた。また使用にあたっては、同社・今宿芳明氏の指導を仰いだ。日頃の御支援に厚く御礼を申し上げる。

参考文献

- (1) 株式会社くいんと, AMDESS Version4 ユーザーズマニュアル, 2001.
- (2) 井戸, 堀松, 平板の曲げ試験を用いた材料特性の同定システム, 第14回 MARC ユーザーズミーティング資料, 日本マーク株式会社, 1994.
- (3) 井戸, 小林, 解析結果のベンチマーク, 第4期非線形 CAE 勉強会テキスト, 特定非営利活動法人・非線形 CAE 協会, 2003.
(<http://www.jancae.org/>)



Solvein.txt

solveout.txt

Fig.8 AMDESS の入出力ファイル

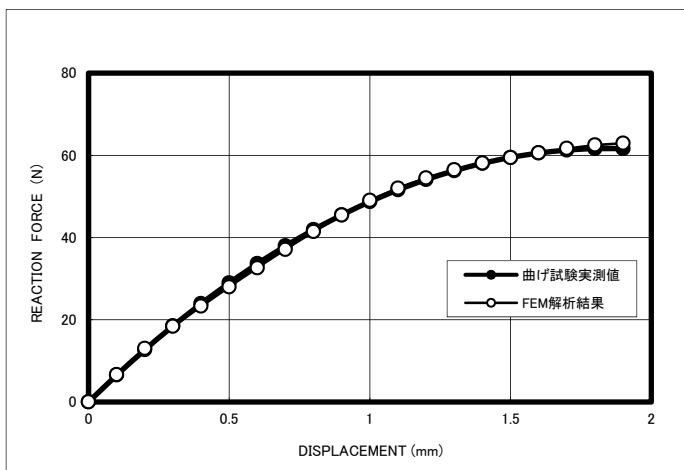


Fig.9 3点曲げの荷重—変異曲線

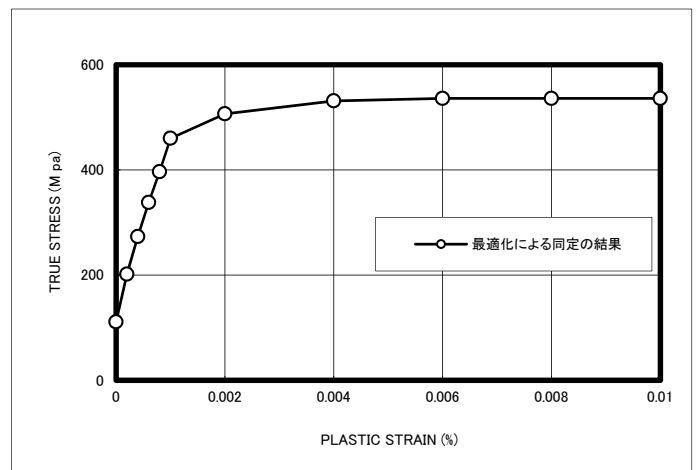


Fig.10 最適化により求められた弾塑性特性
(15点による多直線近似)

表紙 : Claude Monet, Le pont d'Argenteuil, Orsay, 1874.

photoRMN/Herve Lewandowski/distributed by Sekai Bunka Photo

*AMDESS は株式会社くいと殿の製品です.

*.Marc はエムエスシーソフトウェア株式会社殿の製品です.

株式会社 メカニカルデザイン

〒182-0024 東京都調布市布田 1-40-2 アクシス調布 2階

TEL 042-482-1539 FAX 042-482-5106

E-mail:comm@mech-da.co.jp <http://www.mech-da.co.jp/>

