

vol. 2008-3

Mech D & A News

Mechanical Design & Analysis Co.

November 2008



長崎・亀山社中, 2008年11月

【特集】自動車衝突解析への樹脂材料特性同定
システムの適用

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

自動車衝突解析への樹脂材料特性同定システムの適用

【1】はじめに

自動車の衝突安全性能は、交通事故による負傷者の低減に寄与するものであり、各国の法規制の強化や安全性能の情報公開(1)等を背景に、ますます重要視されている。日本国内では、交通弱者である歩行者への被害を軽減する歩行者保護の法規制が2005年から始まった。2007年における日本国内での交通事故は、交通事故件数が約83万件、交通事故による負傷者数が約103万人、死者数が5587人という状況である(2)。

近年は、自動車の安全性能の向上による効果があらわれ、死者数は年々減少傾向にあるが依然として事故件数や負傷者数は多く、交通事故の状況は、憂慮すべき事態である。一方、環境問題を背景に資源の有効活用や燃費の向上の観点から自動車の軽量化が注目されている。そのため、自動車の開発では、衝突安全性能だけではなく軽量化を達成させることが重要である。

この目的のために、現在ではコンピュータによる衝突解析技術が必要不可欠になっており、解析精度及び運用方法の2つの側面から向上が望まれている。本報では、材料のモデル化の運用方法に着目し、樹脂材料モデルを自動的に同定するシステムを紹介する。さらに、そのシステムの妥当性及び自動車の衝突解析へ適用した事例を述べる。

【2】自動車の樹脂部品解析の紹介と課題

2.1 自動車の樹脂部品に求められる性能

自動車部品では、車室内の内装部品、バンパー、エンジン関連部品等へ樹脂材料が使用されている。さらに、フェンダーパネル(3)へも樹脂材料が適用されてきており、樹脂部品の適用範囲の拡大にともない、樹脂部品に対する衝突解析技術への要求も高くなってきた。とくに歩行者保護性能や室内衝撃性能では、樹脂部品の特性が人体の傷害へ大きな影響を与える。昨今では法規制や情報公開の面から定量的な評価が求められるため、これらの性能開発には衝突解析技術を活用した事例も多い(4)。

歩行者保護の試験は、Fig.1に示すように歩行者の頭部や脚部を模擬したインパクターを自動車へ速度40km/hで衝突させる方法である。インパクターの加速度データなどから傷害値を算出し、性能を評価する。歩行者事故の多い日本や欧州において重要度が高まっている。またFig.2に示す室内衝撃の試験では、衝突時の乗員と内装部品の干渉を想定し、乗員の頭部を模擬したインパクターを速度24km/hで車室内のピラーやルーフ等に衝突させる。インパクターの加速度から算出される頭部傷害値(HIC)を用いて性能評価される。本評価法は、米国の法規制である。



Fig.1 歩行者保護試験の概要 (欧州情報公開)

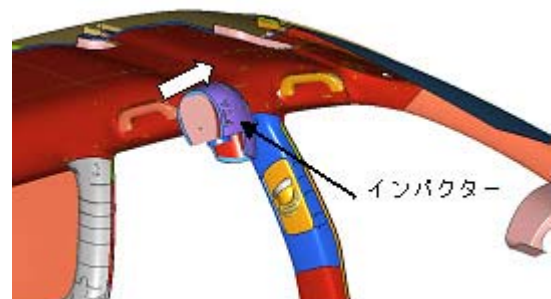


Fig.2 室内衝撃試験の概要

※本稿は、株式会社メカニカルデザイン第1回ユーザ会における富士重工業殿・講演原稿に加筆いただいたものである。

「自動車衝突解析への樹脂材料同定システムの適用」、菅沼浩、伊澤直(富士重工業)、金井大(富士テクノサービス)、藤川正毅、三上貴央(メカニカルデザイン)、Mechanical Design 2008, p.79

2.2 衝突解析における運用上の課題

自動車の内装部品や外装部品等の樹脂部品は、衝突時に、大変形及び破断現象を起こす。さらに樹脂材料は、温度の影響、経年変化等により強度が変化するため、コンピュータ上で衝突時の変形現象を正確に再現することは非常に難しい。現在の解析技術は、精度や速度の面で発展段階にはあるものの、適切な運用方法を適用することで、製品設計に役立つツールとして活用されている。

衝突解析におけるモデル化の基本要因には、『形状』、『接触』、『拘束条件』、『材料』が挙げられる。このうち『形状』のモデリングについては、大規模な3次元CADの一般化が進んだ結果、その表現能力は著しく高精度化されてきた。『接触』についても、3次元CADにより部品の形状だけでなく相互の距離を厳密にモデルへ反映できること、また汎用ソフトの接触解析の機能が向上してきたことにより、精度向上が図られてきた。

『拘束条件』に関しては、たとえば溶接モデルの場合、従来は剛体結合モデルだったが、現在は溶接部の荷重特性を再現したモデルも採用されている。しかし『材料』のモデリングに関しては、高速引張試験によって速度依存性を考慮した材料特性をモデル化する^⑤、^⑥試みはあるものの、試験機の運用、結果の精度と解釈、FEMへの適用などの実務面で多くの課題を残している。

一方、自動車メーカーでは、組織として解析技術を実行しているので、モデルの質の均一化や安定した解析環境の構築が重要な意義をもっている。また商品開発のプロセスのなかでFEM解析を活用できる期間は限定されているため、個々の解析モデルの管理と並行して、総合的な技術開発を進める必要がある。本報では、樹脂の材料モデリングの向上という命題に対して、樹脂材料モデルを自動的に同定するシステムの開発を行った。

【3】樹脂材料モデルの同定システム

樹脂材料の変形の挙動は、速度・温度などの条件だけでなく配向や結晶化、発熱などを含むきわめて複雑な挙動である。しかし設計的な見地からは、引張試験の結果にもとづき弾塑性のモデル化を行うことが当面の課題と考えてよい。このとき引張りによって試験片にネッキングを生じ、変形の一様性が崩れるために応力とひずみを簡単に定められないこと、またその挙動に無視できないひずみ速度依存性を有することが妨げとなっている。

本システムは、ネッキングの発生を予め想定したうえで、引張試験によって得られた荷重と変位のデータから、弾塑性の応力-ひずみ曲線（加工硬化特性）を推定することを目的としている。汎用FEMソフトであるLS-DYNA^⑩を用いて引張試験を再現し、遺伝的アルゴリズム（GA）^⑦～^⑨による最適化を組み合わせ、荷重-変位曲線をトレースできるように材料モデルを修正しながら反復計算する方法を採用した。

3.1 同定システムの概要

引張試験によって得られる代表的な荷重-変位曲線をFig.3(a)に示す。これはポリプロピレン(PP)の例であるが、極大値の付近でネッキングを生じ、以降の領域では試験片の断面積の減少によって耐荷力が落ちるために荷重が低下している。ネッキングを生じない、すなわち断面変形の一様性が維持された状態であれば、(1)式を用いて公称応力と公称ひずみから簡単に真値を求め、応力-ひずみ曲線を与えることができるが、Fig.3(a)の例ではそのような通常の操作を用いることができない。

$$\begin{cases} \sigma_{true} = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom}) \\ \varepsilon_{in}^{pl} = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) - \frac{\sigma_{true}}{E} \end{cases} \quad \dots (1)$$

本システムでは、Fig.3(c)のような3次曲線からなる加工硬化をもった材料モデルを想定してFig.3(b)のモデルによるFEM解析を行い、得られた荷重-変位関係が実測値に合致するまで材料モデルの修正を行いながら反復計算を繰り返すような手法を採用した。反復計算における最適化演算には、遺伝的アルゴリズム（GA）を用いた。

システムのフローチャートをFig.4に示す。まず初期条件として何らかの加工硬化特性（Fig.3(c)の3次式の係数）を与

える。この初期値は実績があれば適当な値を設定できるが、後述のように任意の値であってもかまわない。与えられたこの材料定数を用いて、Fig.3(b)のメッシュにより試験片の引張試験に対応する FEM 解析を実行する。本システムで同定される材料モデルは、最終的に自動車の衝突解析への適用を想定しているため、現状の衝突解析で使用されていると同等のメッシュサイズを試験片にも適用し、ソルバーも同じ LS-DYNA を適用した。要素タイプはシェルである。

FEM 解析からは試験片の荷重-変位関係が出力される。この結果と Fig.3(a)にあるような試験結果の残差を計算し、これが判定値を満足しない場合は GA によって新たな材料定数を設定し、FEM 解析を再実行する。以上のフィードバックを繰り返すことにより、試験片の加工硬化の特性を決定することができる。すなわち本システムは、解析条件を修正しつつ LS-DYNA を反復的に自動実行するシステムであると理解してよい。

弾塑性の材料構成則としては一般的な Mises の降伏条件を採用した。またヤング率は、Fig.3(a)の弾性領域の実測値を参考に指定するものとした。異方性、粘塑性などの高度なモデリングの適用は今後の課題である。

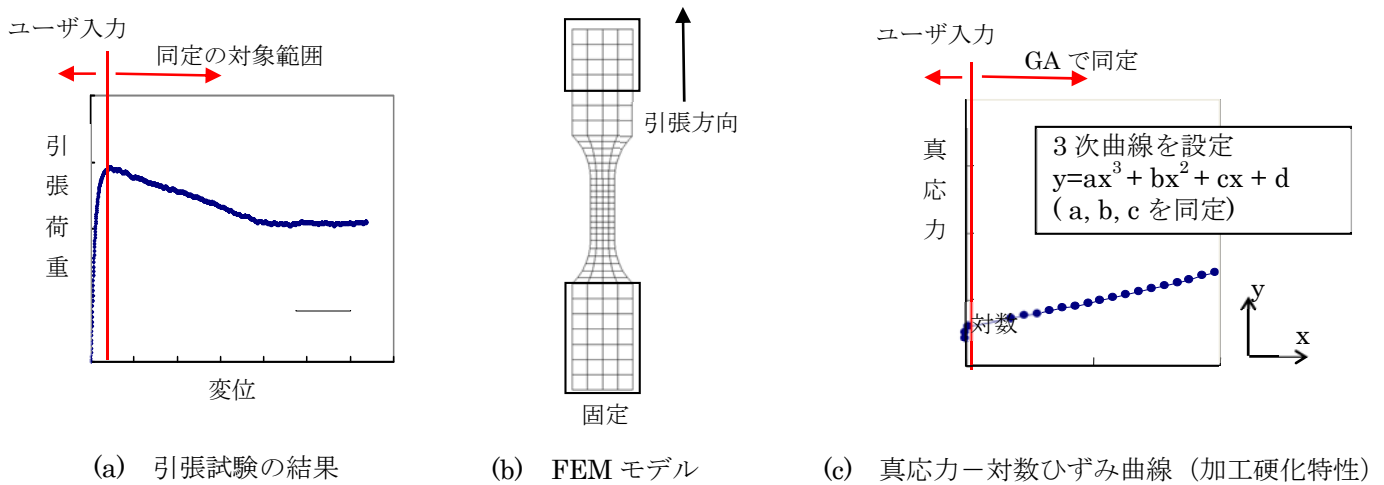


Fig.3 同定システムの概要

3.2. 実数値 GA について(7)・(8)・(9)

GA は、最適化問題の解を生物の個体に見立て、個体群と複数の個体群の情報を組み合わせる交叉を用いつつ、探索を進める最適化手法である。解の評価値のみを用いて大域的に最適解の探索を行うことができるため、探索の初期値が適切でなかった場合にも局所解に陥りにくい特徴がある。

今回のシステムは、多数の FEM の試行を含む自動システムであるため、確実に収束解に至ることが期待できるアルゴリズムを利用することが望ましい。ここでは、GA 中でも特に収束性に優れるとされているシンプレックス交叉 (SPX) を用いる実数値 GA を採用した。

なお GA は演算時間を必要とする不利がある。本報の例では、引張試験片のモデルが小規模なため、実用上問題にならない時間であったが、1本の荷重-変位曲線に対応する材料モデルを特定するために数時間程度の実行を必要とした。今後、本システムの運用を通じて改修してゆく余地がある。

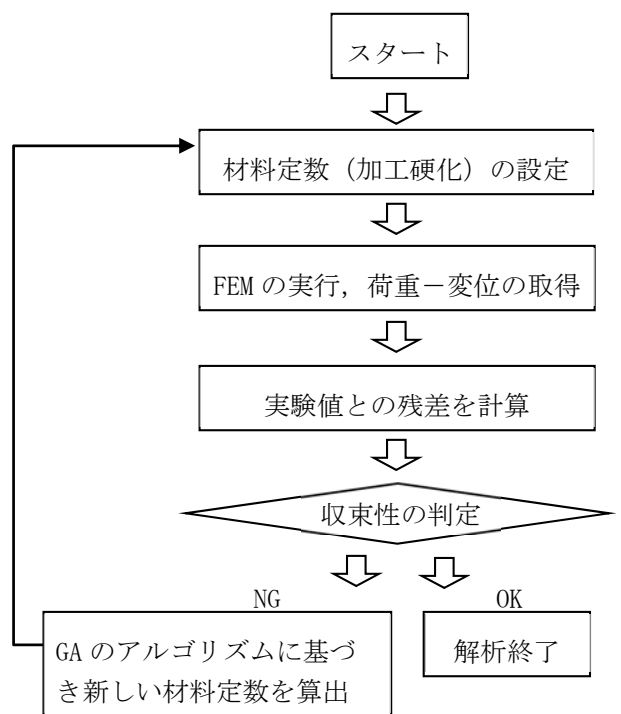


Fig.4 同定システムのフローチャート

【4】 同定システムの検証

4.1. 引張試験の概要

Fig.5(a)に示す試験片を用いて、4水準の速度 0.1, 10, 1000, 10000 mm/s により引張り試験を行った。それぞれの速度は、ひずみ速度 0.002, 0.2, 20, 200 /s に相当する。試験の様相を Fig.5 (b)に示す。ここでは、材料としてポリプロピレン (PP) を用いた例を示す。引張試験によって得られた荷重-変位曲線を Fig.5(c)に示す。

PP の荷重-変位特性は明らかなひずみ速度依存性を示し、ひずみ速度が大きいほど高い応力を示すという一般的な傾向になっている。なおひずみ分布の履歴を可視化するために、試験片にはスプレー塗料を用いてランダムパターンを描き、高速度カメラによる撮影を行った。画像処理の結果については後述する。

4.2. 同定システムによる荷重-変位特性の検証

本同定システムを用い、Fig.5(c)に示す荷重-変位特性をもとに、材料モデルを自動生成した。同定の作業そのものは、各引張速度における荷重-変位曲線の1本ずつに対して行う必要がある。Fig.6 に得られた応力-ひずみ特性を示す。同定の妥当性を評価するため、この同定結果を引張試験用の FEM モデルに入力し、試験を再現する計算を実施した。FEM モデルは、実機衝突解析にならないサイズ 2mm のシェル要素でメッシュ分割されている。LS-DYNA では材料の速度依存性を考慮した解析を行うために、複数のひずみ速度に対する応力-ひずみ特性を与えることができる。今回は Fig.6 に示す4種類の同定結果を入力データとして与えた。

Fig.7 に解析結果を示す。FEM によって得られた荷重-変位特性は試験結果をよく再現していることがわかる。この結果、巨視的な側面から同定システムによる材料モデルの妥当性を確認できた。なお Fig.7 の試験結果においては試験片の破断による荷重の喪失が見られるが、計算モデルでは破断を考慮していない。

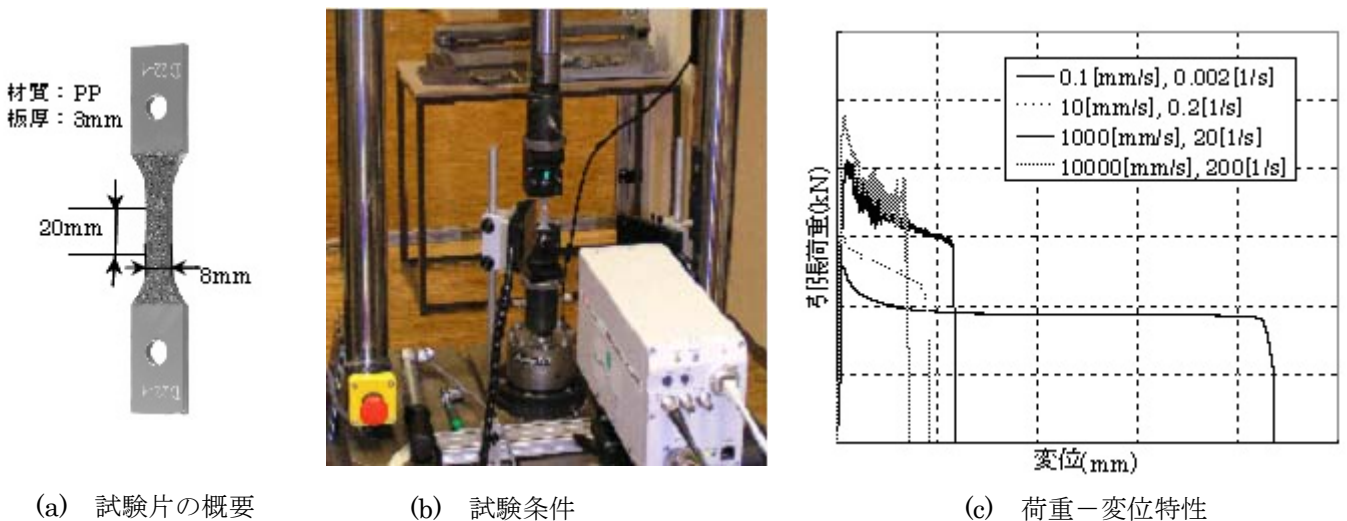


Fig.5 引張試験の概要

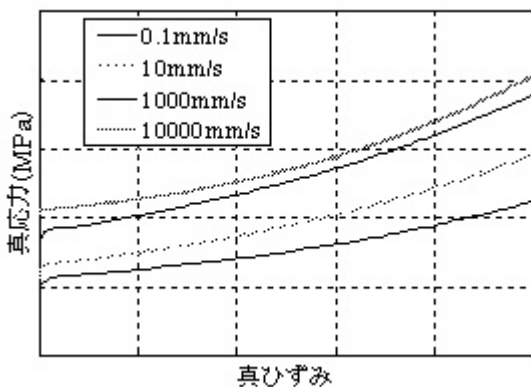


Fig.6 同定された応力-ひずみ特性

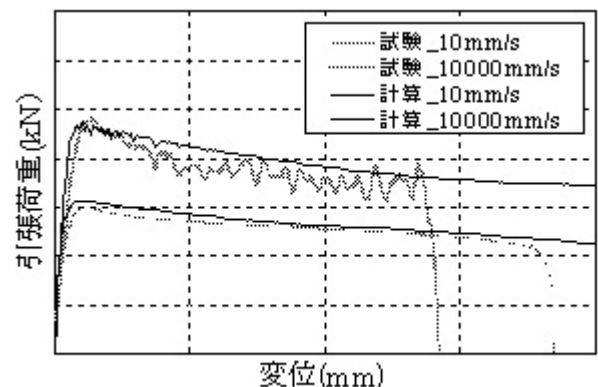


Fig.7 同定された材料モデルの検証結果

4.3 同定システムによるひずみ分布の検証

微視的な側面から材料モデルの妥当性を確認するために、ひずみ分布の比較を行った。対象とする引張速度の条件は10000mm/sである。引張試験においては、試験片の挙動を高速カメラで撮影し、得られた動画にデジタル画像相関法を適用した。デジタル画像相関法では、試験片を2mm×2mmの領域で分割し、ひずみ分布を算出した⁽¹¹⁾。

FEMモデル及びデジタル画像相関法の評価領域をFig.8に示す。Fig.9に示すように、ネッキング後の変位量5mmにおけるひずみ分布を比較し、両者が良い一致を示すことを確認した。これらの結果から、今回のシステムによる同定の結果は、荷重-変位特性及びひずみ分布とも精度良く再現できることが確認できた。

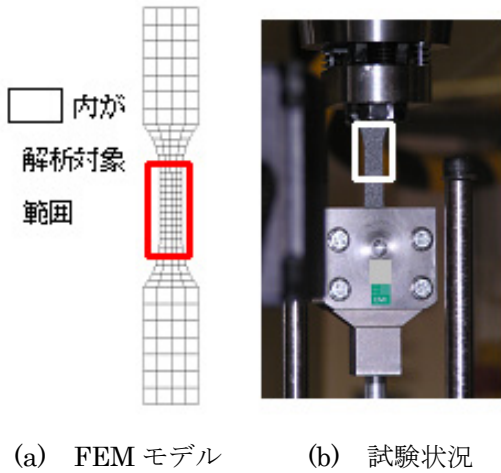


Fig.8 解析対象領域

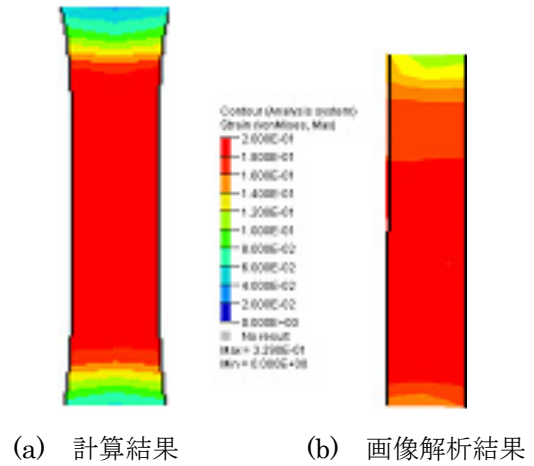


Fig.9 ひずみ分布の比較 (5mm 引張時)

【5】 自動車の衝突解析への活用事例の紹介

5.1. 樹脂部品の衝突解析

リブ構造を持つ箱型部品への衝突解析例を紹介する。試験方法は、Fig.10に示すように部品の端部を固定して、反対側に球状のインパクターを衝突させるものである。インパクターの加速度を計測し、実験と計算の加速度-変位特性を比較した。材料モデルの破断ひずみは、メッシュサイズを考慮したうえで、他の試験結果との検証結果を考慮して決定した。実験と計算の加速度-変位特性を比較すると、Fig.11に示すように計算結果は試験をよく再現していることが確認できる。なお、樹脂部品モデルのメッシュサイズは、現象の再現性を考慮して、2~3mmメッシュを用いた。

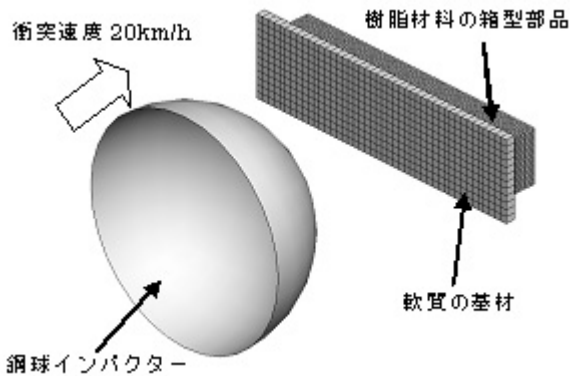


Fig.10 箱型部品の FEM モデル

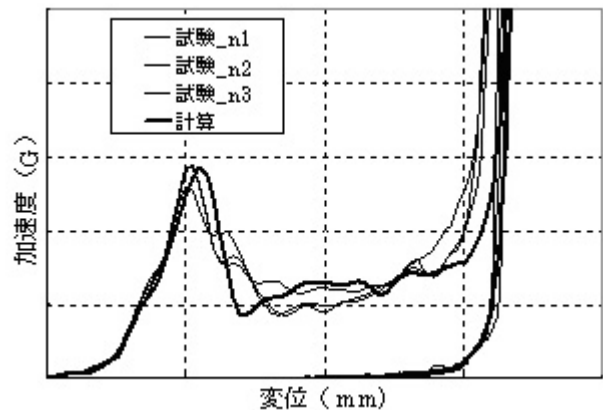


Fig.11 インバーター化速度-変位特性の比較

5.2. 自動車の内装部品に対する衝突解析

車の衝突・横転時に乗員の頭部が内装部品に干渉することを想定し、内装部品の設計では衝撃緩和特性を考慮している。例えば、米国の法規制では、2節で紹介した内装部品の衝撃試験がある。ここでは、内装部品の衝撃試験に対応した衝突解析例を紹介する。

Fig.12 に示すように、樹脂材料からなる内装部品へ頭部を模擬したインパクターを衝突させ、インパクターの減速度から頭部傷害値を算出する。3つの異なる打撃位置の傷害値を用いて、Fig.13のように試験と計算結果を比較した。計算結果より、打撃位置の違いすなわち部品の形状差・構造差などが傷害値の大小に及ぼす影響を評価できることがわかった。

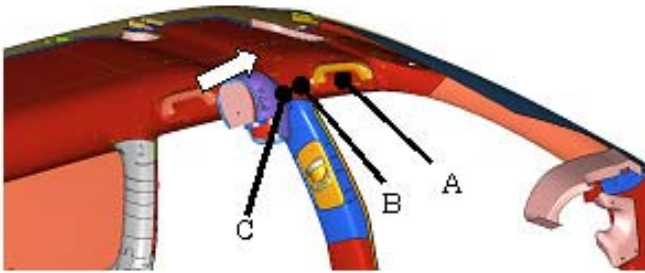


Fig.12 室内衝撃性能の FEM モデル

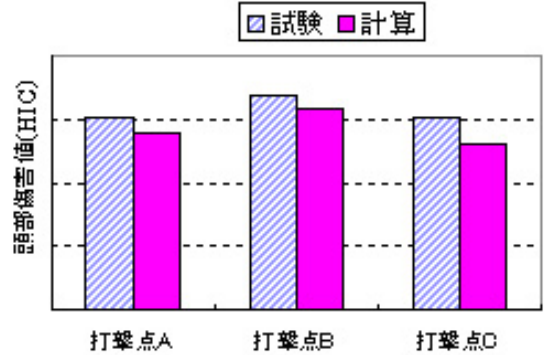
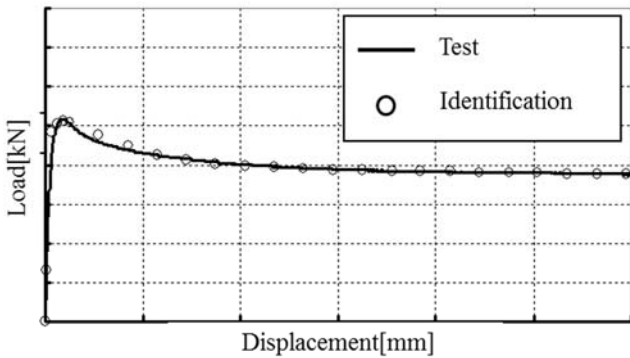


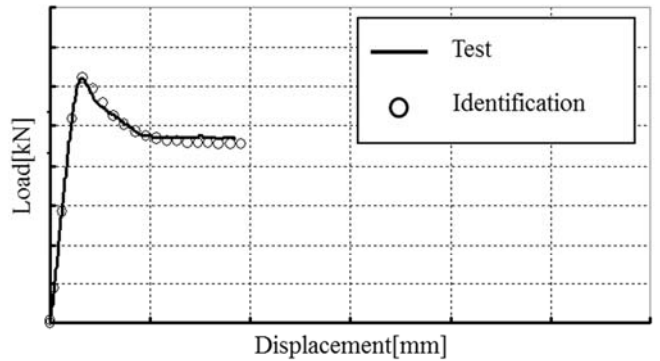
Fig.13 傷害値に対する試験と計算の比較

【6】 他の材料に対する応用

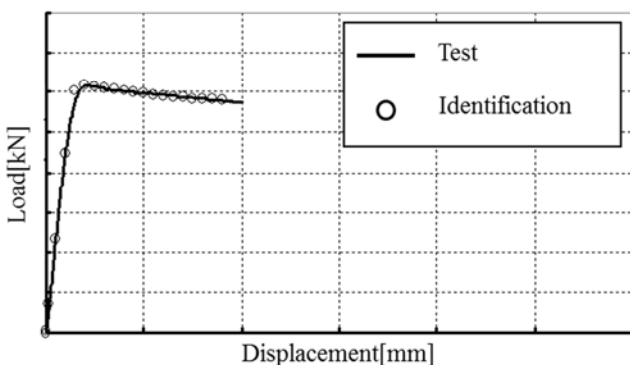
ここまでは、Fig.14 (a) に示すようなポリプロピレン (PP) に関する同定の手順を示してきたが、現在、他の材料についても今回のシステムの適用を試みている。Fig.14 (b) は ABS 樹脂、Fig.14 (c) はポリアミド (PA) に関する荷重-変位の同定結果である。これらの材料についても今回のシステムを使用して加工硬化の材料モデルを特定することができた。



(a) ポリプロピレン



(b) ABS 樹脂



(c) ポリアミド (PA)

Fig.14 他の材料に対する荷重-変位曲線の同定結果

【7】 まとめ

樹脂部品の衝突解析環境の改善のため、材料モデル同定システムを構築した。引張試験による検証及び自動車の衝突解析への適用結果から、同定システムの有効性を検証できた。本システムにより、材料モデル生成から性能解析・評価までのプロセスを効率良く運用できるようになった。今後は、コンピュータによる解析技術への要求レベルがますます高くなっていくと予想される。解析技術の精度向上及び運用・評価方法の改善という2つの側面からアプローチして行く。

参考文献

- (1) 例えば, <http://www.nasva.go.jp/mamoru/car/clash/list.html>
- (2) 警察庁交通局, 平成19年中の交通事故の発生状況(2008)
- (3) 伊藤繁ほか, 歩行者保護対応樹脂フェンダーの開発, 自動車技術会学術講演会前刷り集 No.50-07, (2007) p1-5
- (4) Suganuma,H., et al., Development of Pedestrian Protection Analyzing Technologies and its Applications, FISITA World Automotive Congress(2004)
- (5) 前博行ほか, 樹脂材料の常温での非線形・ひずみ速度依存性挙動について: 実験と計算結果の考察, 自動車技術会学術講演会前刷り集 No.45-04, (2004) p1-4
- (6) 金井大ほか, 樹脂部品の衝突解析技術の開発, 日本機械学会関東支部ブロック合同講演会 2006 桐生 講演論文集, (2006)p217-218
- (7) 樋口隆英, 筒井茂義, 山村雅幸, 人工知能学会論文誌, 16(1), (2001) p147
- (8) 小野功, 佐藤浩, 小林重信, 人工知能学会論文誌, 14(6), (1999) p1146
- (9) 佐藤浩, 小野功, 小林重信, 人工知能学会論文誌, 12(5), (1997) p734
- (10) LS-DYNA User's Manual
- (11) Bruck, H.A., McNeill, S.R., Sutton, M.A. and Peters III, W.H., Exp. Mech.,29(3),(1989) p261

表紙: Beatificatio Martyrii Petri KIBE Kasui et 187 Sociorum, Nagasaki, November 24,2008.

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/>