

シミュレーション評価・予測技術を活用した 自動車会社との共同開発活動 (EVI) への JFE スチールの取り組み

JFE Steel's Early Vender Involvement Activities in Collaboration with Automotive Manufactures Using Computer Aided Evaluation and Prediction Technologies for the Weight-Reduction of an Automotive Body

吉武 明英 YOSHITAKE Akihide JFE スチール スチール研究所 薄板加工技術研究部長・工博
比良 隆明 HIRA Takaaki JFE スチール スチール研究所 薄板加工技術研究部 部長
平本 治郎 HIRAMOTO Jiro JFE スチール スチール研究所 薄板加工技術研究部 主任研究員(副部长)

要旨

JFE スチールでは車創りの基本設計段階から参画し車体軽量化、衝突安全性維持・向上などに対する材料提案、部材形状提案、成形可能性予測などの提案を自動車メーカーと共同で行う EVI 活動を積極的に展開している。この活動を行うために、JFE スチールはプレス成形技術、衝突特性評価技術、耐久性評価技術、車体・部材の剛性評価技術などの解析技術・評価技術を総合的に整備しており、その一部を紹介する。

Abstract:

JFE Steel has been collaborating with automotive manufactures at the early stage of design for a new car and proposing optimum steel products, shapes and press-formabilities for an each automotive part in order to contribute to the development of a light-weight automobile. Evaluation and prediction technologies using simulation have been developed and integrated in view of press forming, crashworthiness, durability and stiffness. In this paper, these technologies for automotive use are introduced.

1. はじめに

環境保護の観点から自動車を取り巻く環境は年々厳しくなっており、地球温暖化の原因とされる CO₂ 抑制対策のための車体の軽量化が求められている。一方、衝突安全性の向上や車載部品の増加により車体重量は増加傾向となっている。この車体軽量化と衝突安全性の両立のため、車体への高張力鋼板の適用が増えてきており、最近では自動車の主要構造部材に引張強度 590 MPa ~ 980 MPa の高張力鋼板が使用され始めている¹⁾。

以上のような自動車創りの環境変化の中で、JFE スチールでは車体の基本設計段階から自動車会社と共同開発する EVI (Early Vender Involvement) 活動を積極的に展開している。この EVI 活動の目的は、鉄鋼材料のもつ性能を最大

限に生かして、車体性能向上、車体軽量化に貢献するものであり、最適材料選定に始まり、部材形状、自動車構造、成形可能性などの提案を行う。

この EVI 活動を行うために、JFE スチールでは以下の 3 つの柱を設けて活動を行っている。

- (1) CSL (Customers' Solution Laboratory) を利用した自動車メーカーとの「協創」
- (2) 自動車構造調査とデータベース整備
- (3) 衝突特性評価、耐久性評価、車体・部材の剛性評価、プレス成形などの解析技術・評価技術の整備

本報告では、この中の解析技術について、JFE スチールが独自に開発した手法について紹介する。

2. スプリングバック評価技術

高張力鋼板の自動車への適用は、自動車の衝突性能向上と軽量化を同時に実現する最も効果的な方法である。高張

力鋼板を使いこなすには、スプリングバックの予測を正確に行うことが重要となる。JFE スチールでは、CAE (computer aided engineering) のスプリングバックの予測精度を向上させる方法として、新しい解析手法である「マルチステップスプリングバック解法」を開発、さらに材料モデルについても検討を加えている²⁾。

一般的に、スプリングバックの解析は以下の手順によっ

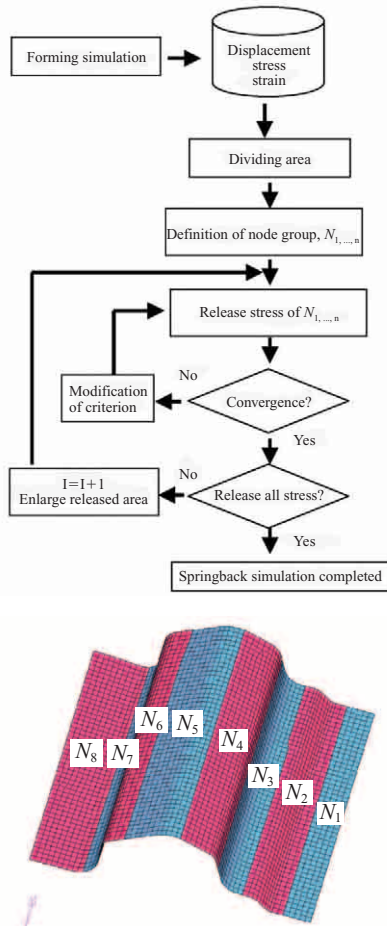


Fig. 1 Simulation procedure for springback simulation using Multi-Step-Springback algorithm

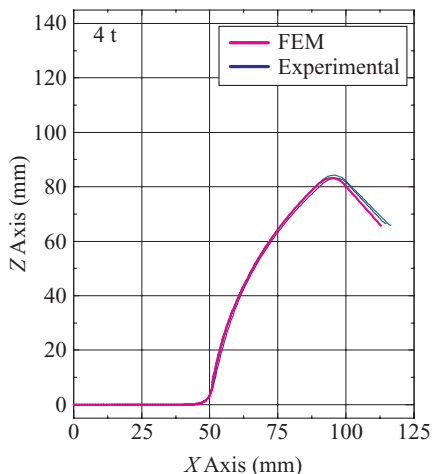


Fig. 2 Result of springback analysis comparing with experiments

て行われる。(1) プレス成形解析を動的陽解法により行い、部材に発生する残留応力を求める。(2) 静的陰解法を用いて残留応力を解放し、スプリングバック量を求める。

しかし、大型で複雑な形状をしている自動車部材のスプリングバックを計算する場合には、スプリングバック計算における収束条件を緩めなければ計算が終了しない場合があり、スプリングバックの精度が悪くなる原因となっている。JFE スチールが開発した「マルチステップスプリングバック解法」は、スプリングバック計算時にプレス品をいくつかの領域に分割して、この領域を順番に応力開放していく方法である (Fig. 1)。この方法によれば、静的陰解法の収束条件を緩めることなく、大型複雑形状モデルにおいても、安定して精度の良い解を得ることができる。Fig. 2 は、ダイ肩 R が 5 mm のハット型形状部材のスプリングバックを実験と解析を比較したものであり、本手法によれば精度の良いスプリングバック予測が可能となる。

さらに、スプリングバックの解析精度を向上させるために、スプリングバック解析時の材料モデルについても検討を加えている。たとえば、ダイ肩 R が小さい場合のハット型部材のスプリングバックは、通常 FEM (有限要素法) 解

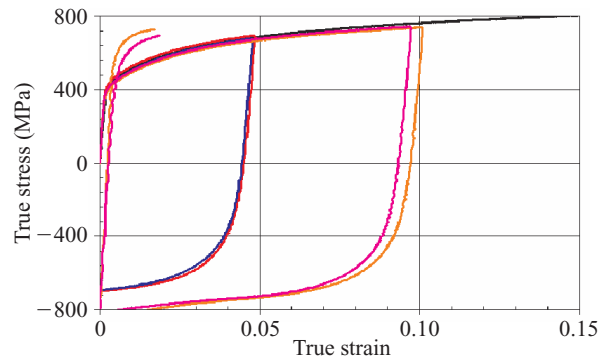


Fig. 3 Result of tension-compression test (590 MPa grade steel)

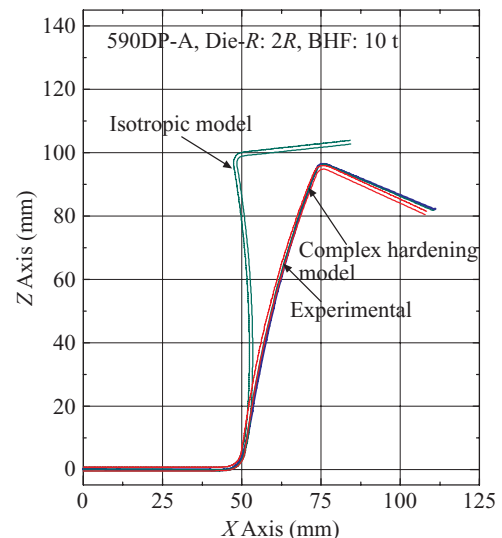


Fig. 4 Result of springback simulation with isotropic and complex hardening models

析で使用されている等方硬化則を用いて解析を行うとスプリングゴウするのに対し、実際のプレスではスプリングバックが発生することがある。この問題を解決するため、引張、圧縮を繰り返して応力-ひずみ曲線を測定し（Fig. 3）、この挙動を CAE 解析に反映させた。Fig. 4 は、ハット型部材においてダイ肩 R が 2 mm の場合のスプリングバック解析結果と実験結果を比較したものである。等方硬化則を使用した場合にスプリングゴウが発生したが、複合硬化則を適用することにより解析結果と実験結果とよく一致した。このように、JFE スチールでは精度の良いスプリングバック予測が可能である。

3. シートハイドロフォーミング技術

自動車の車体軽量化を進める上で、外板パネルに高張力鋼板を適用することは非常に有効である。しかし高張力鋼板は軟質材に比べ成形性が悪く、高張力鋼板の外板パネルへの適用は TS（引張強度）340 MPa 鋼までしか進んでいないのが現状である。そこで、JFE スチールでは高張力鋼板であっても成形を可能にするシートハイドロフォーミング技術に注目し、ThyssenKrupp Stahl AG と共同で自動車ドア外板形状部品（Fig. 5）を用いて高張力鋼板適用を検討した³⁾。

シートハイドロフォーミングは液体を用いる成形技術であり、成形工程は Fig. 6 に示すように、ブランクホルド工程、液体による逆張出成形工程およびパンチによる成形工程からなる。逆張出成形でパンチ成形後形状に近い張出高さを与えることにより、ドアパネル中央部を加工硬化させるとともにパンチ成形時の材料成形余裕量を与える。Fig. 7 に TS590 MPa 鋼板の逆張出成形後およびパンチ成形後の板厚減少率分布を示す。シートハイドロフォーミング技術を使用すれば、TS590 MPa 鋼であっても実車サイズのドアアウターの成形が可能となった。なお、ドアパネルのパネル中央部付近は、逆張出成形後とパンチ成形後との板厚減少率に差はなく、ドアパネル中央部のひずみは逆張出成形時に付与されたものであることが分かる。通常のプレス成形では TS340 MPa 鋼であってもドアパネル中央部に 1% 以上のひずみを付与することは極めて困難であるが、シートハイドロフォーミングは逆張出成形工程により大き

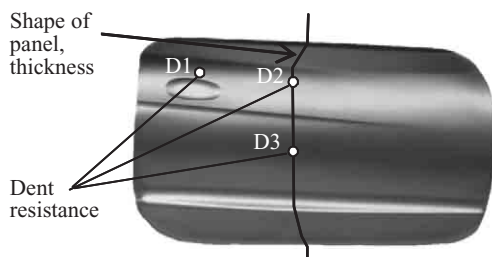


Fig. 5 Out-look of door panel and the measurement position of evaluation

な加工硬化を付与することが可能である。Fig. 8 に耐デント性に及ぼす材料強度の影響を示す。材料強度の上昇にもないデント深さは減少しており、鋼板の高強度化によりアウターパネルに必要な耐デント性が大きく向上したことが分かる。

一方、JFE スチールではシートハイドロフォーミングの FEM 解析技術も確立している。Fig. 9 にシートハイドロフォーミングにより成形したパネルの板厚測定結果と CAE 解析との比較を示す。両者は良く一致しており、JFE スチールの CAE の有効性を示すことができた。これにより、最適なシートハイドロ成形条件設定が可能である。

以上のように、シートハイドロフォーミングにより高張

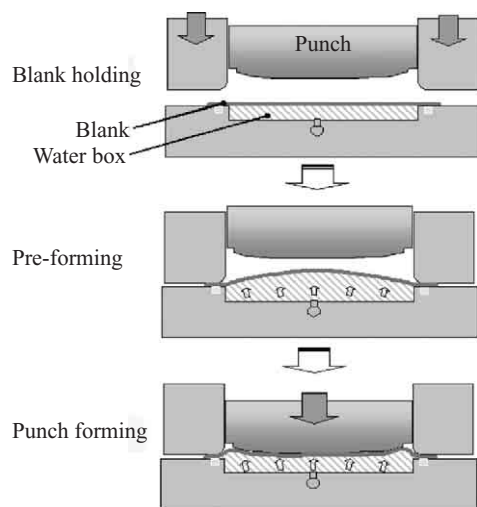


Fig. 6 Process of sheet hydro-forming

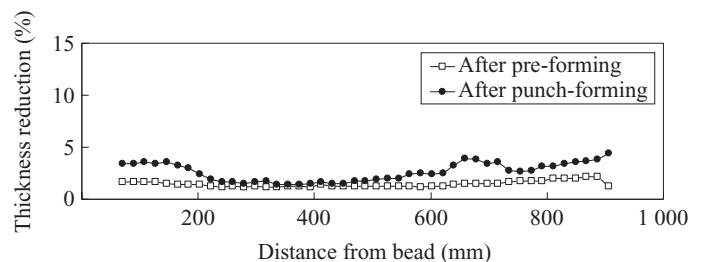


Fig. 7 Thickness reduction profile after pre-forming and after punch-forming under the pre-forming pressure

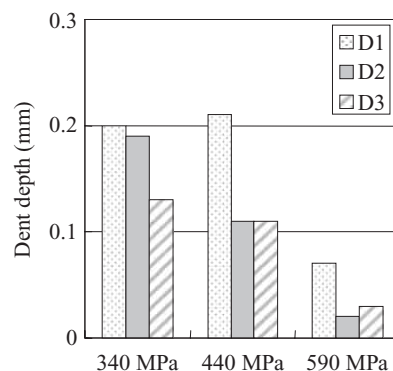


Fig. 8 Influence of the strength to dent resistance

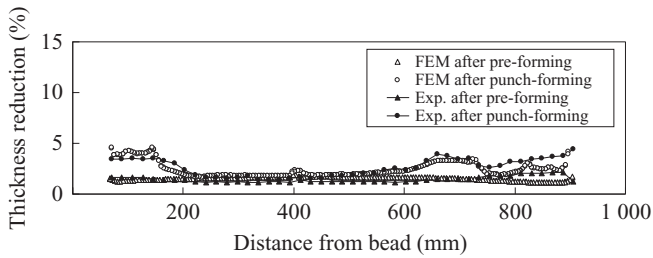


Fig.9 Thickness reduction profile of 590 MPa grade steel by experiment and FEM analysis

力鋼板を用いた薄肉化が可能となり、アウターパネルの軽量化が達成できる。

4. 衝突解析における スポット溶接部強度評価技術

JFE スチールでは精度の高い衝突解析を行うために、さまざまな工夫を行っている。一つはひずみ速度依存性を考慮した材料データの測定であり、JFE スチールでは高速引張試験機を用いてひずみ速度 10^3 s^{-1} までの応力-ひずみ曲線を測定、データベース化し衝突解析に適用している (Fig. 10)。また、プレス成形時に部材に発生するひずみおよび板厚変化を反映させた衝突解析も行っており、これにより精度の高い解析結果を得ている。(Fig. 11)⁴⁾。

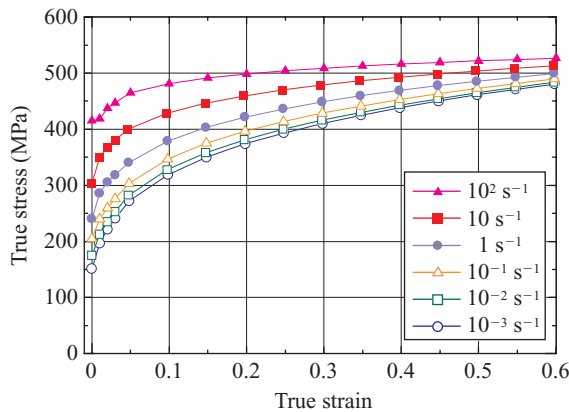


Fig. 10 Stress-strain curves for crash analysis

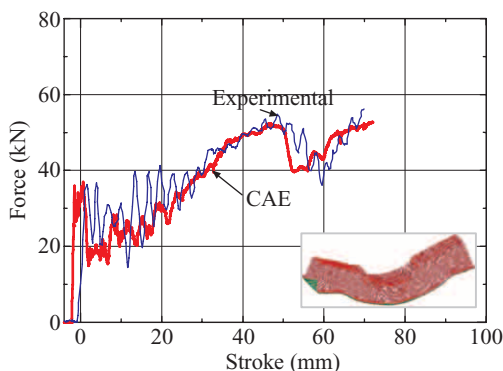


Fig. 11 Force-stroke curves and deformation shapes under dynamic bending crash

しかし、自動車の衝突解析において、さらなる解析精度の向上を図るにはスポット溶接部での破壊の考慮が重要な課題となってきている。JFE スチールでは、スポット溶接部に発生する剪断/十字引張の複合的な応力状態での破断限界を測定し、この結果を汎用 FEM コードへ適用することにより、スポット破断予測を FEM 解析で予測可能としている⁵⁾。まず、複合応力下でのスポット溶接部の破壊を明らかにするために、十字引張時の方向を 0° 、剪断引張の方向を 90° とし、 22.5° 、 45° 、 67.5° の方向について、種々の板組で破壊試験を行った。Fig. 12 に軟鋼板の同一板厚同士を溶接した場合の試験結果を示す。Fig. 12 において横軸および縦軸は、測定された荷重のスポット溶接の軸方向と剪断方向のそれぞれの方向分力であり、これより破断限界は楕円式で表現できる。この破断限界を示す楕円の大きさは、鋼板の板厚が厚くなる、あるいは鋼板の引張強度が高くなるとともに大きくなる。また、同鋼種異板厚組み合わせの破断限界は薄い板の供試材同士の破断限界と等しくなり、異鋼種異板厚の組み合わせの破断限界は、溶接される 2 つの供試材各々同士の組み合わせの破断限界の小さい方と等しいと推定される。

以上のようにして求めた破断限界を汎用コードの LS-DYNA に適用するため、JFE スチールではユーザサブルーチンを作成した。なお、衝突解析におけるスポット溶接のモデルはソリッド要素により表現し、鋼板を表現するシェルモデルとは接触により接続を表現するタイプを用いる。以下に、ハット型部材を用いて破壊試験を行った結果と本手法による解析結果の比較について述べる。スポット溶接を施したハット材の破壊試験外観写真および FEM モデルを Fig. 13 に示す。本破壊試験は、フロアパネルとメンバ間でのスポット溶接の破壊を模擬したものであり、ハット材は 590 MPa-2 mm であり、平板は 270 MPa-0.7 mm である。実験および FEM 解析の破壊荷重と治具のストロークの関係を図 14 に示す。CAE 解析結果と実験結果では、破断荷重がよく一致した。このように JFE スチールが開発した衝突解析におけるスポット溶接の破断予測精度は高く、

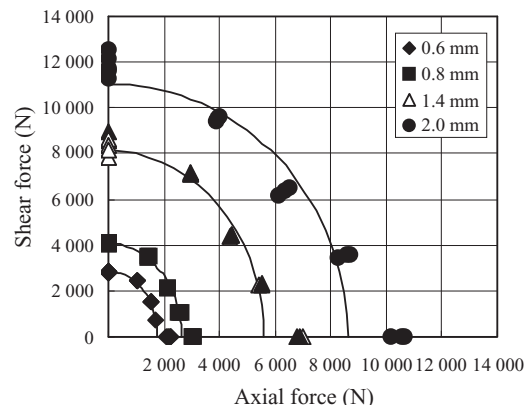


Fig. 12 Effect of thickness on the fracture strength of spot-welded joint (270 MPa grade steel)

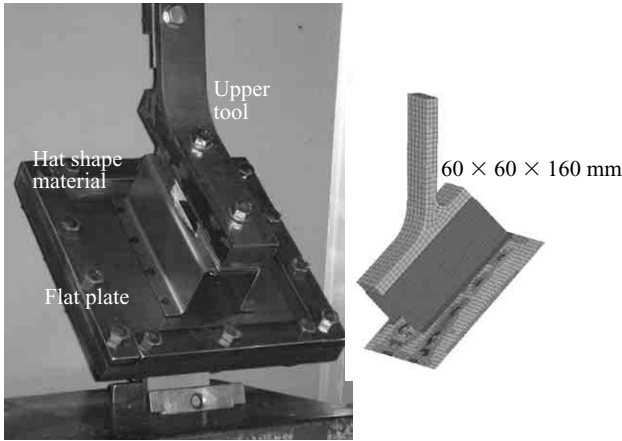


Fig. 13 The destruction test of hat shaped material

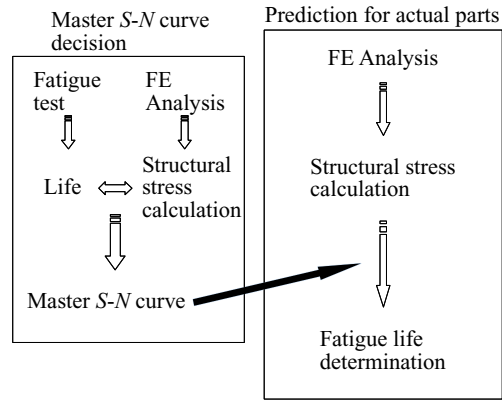


Fig. 15 Fatigue life prediction process

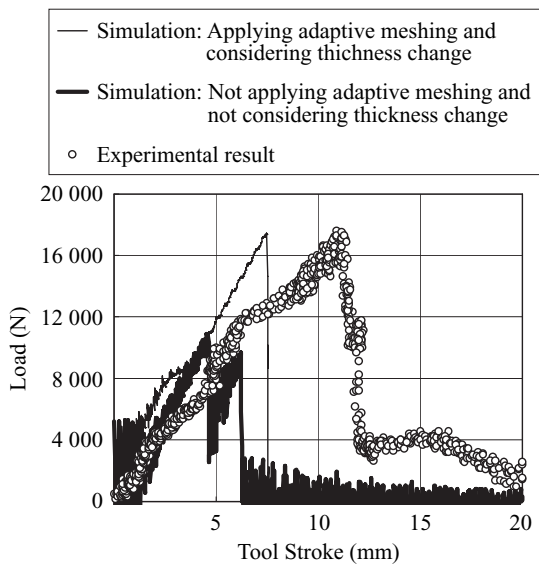


Fig. 14 Comparison of simulation results and an experimental result

また、解析モデルに特殊な要素を必要としないため、車両全体の大きな衝突解析モデルにも適用が可能である。

5. 自動車部材の溶接部疲労寿命予測

JFE スチールでは、プレス成形解析や衝突解析以外に、CAE による自動車構造部材の疲労寿命予測技術も確立している。JFE スチールの疲労寿命予測解析の特徴は、溶接部の細かいメッシュ分割を必要とせず、比較的粗い要素の FEM モデルで精度良く疲労寿命を予測できることである⁶⁾。以下に、スポット溶接部評価手法について説明する (Fig. 15)。スポット溶接のモデルはナゲット径と同等以上のメッシュサイズを有するシェル要素で鋼板をモデル化し、スポット溶接部はバー要素でモデル化する。まず、せん断、はく離などの種々の単純な疲労試験により疲労寿命を求める。次に、この疲労試験の FEM 解析を行い、スポット溶接部の評価指標として「構造応力」を定義し、これを利用する。この「構造応力」はバー要素と共有するシェル要素

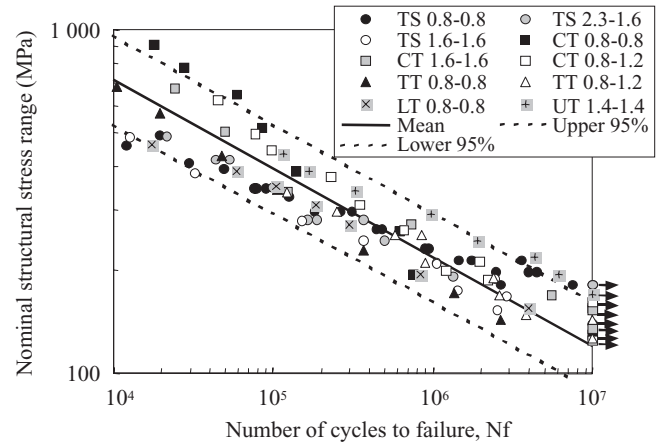


Fig. 16 Nominal structural stress range-life plot for various simple spot welded specimens

の節点に働く面外方向力、せん断力および曲げモーメントを用いて求める。ここで、先に実験で求めた疲労寿命と FEM 解析から得られた構造応力に対応付け、構造応力-疲労寿命のマスターカーブを作成する (Fig. 16)。この手法によると、鋼板の継ぎ手形式や板厚が異なっても小さなバンド幅でマスターカーブを作成することができる。実部材の疲労寿命予測をする場合は、実部材の FEM モデルを作成し、得られた「構造応力」とマスターカーブから、疲労寿命を導き出すことができる。

実部材の寿命予測として、Photo 1 に示す 2 つのハット断面部材を T 字型に結合した構造モデル部材を用いて、疲労試験と FEM による疲労寿命予測を行った。Photo 2, Fig. 17 は、X 方向に負荷を与えた時の試験結果と寿命予測結果である。バー要素の節点に働く力とモーメントを用いて評価していた従来法では疲労破断危険部および疲労寿命の予測は実験と大きく異なっていたが、本手法によれば疲労破壊危険部の位置、さらに疲労寿命の予測結果は試験結果と良く一致した。本手法は、複雑な自動車実部品への適用もすでに行っており、疲労寿命の予測が可能となっている。また、この「構造応力」を利用した疲労寿命予測手法はアーク溶接に対しても適用が可能であり、アーク溶接の薄板溶接構造部材においても、精度良く疲労寿命予測が

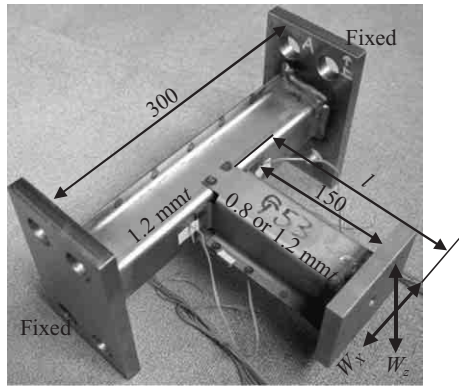


Photo 1 The geometry of T-joint specimens and the loading conditions

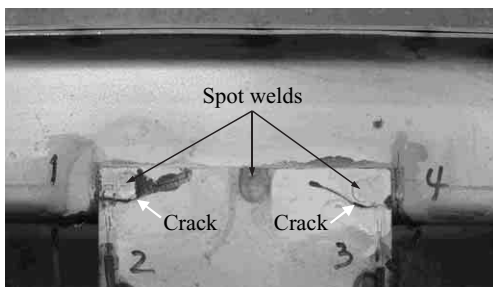


Photo 2 Appearance of fatigue cracks

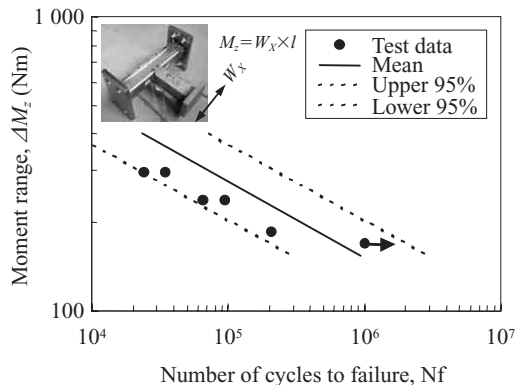


Fig. 17 The predicted life curves compared to the test data

可能である。

6. おわりに

JFEスチールで進めているEVI活動を支えるCAE技術の例として、JFEスチールが独自に開発したプレス成形解析、衝突解析、疲労寿命解析に関する技術について解説を加えた。紹介した技術は複雑な大型自動車部品あるいは車両全体のCAEに特殊なモデルを作ることなく、簡便に適用できることが大きな特徴である。JFEスチールでは、これらの技術を適用して、自動車会社と共同で新たな自動車創りに貢献していくとともに、さらなる技術開発を進めていく。

参考文献

- 1) 吉武明英, 小野守章, 占部俊明. 軽量・小型化に寄与する金属材料の現状と将来. 自動車技術. vol. 59, no. 11, 2005, p. 4.
- 2) Sato, K. et al. Techniques to improve springback prediction accuracy using finite element analysis. IDDRG20040220. 2004.
- 3) Saito, T. et al. A study of sheet hydro-forming using high strength steel sheets. SAE Technical Paper 2006-01-0546. 2006.
- 4) Sato, K. et al. Crashworthiness of automotive stamped parts using high strength steel sheets. SAE Technical Paper 2002-01-0641. 2002.
- 5) Ishiwatari, A. et al. Fracture criteria of spot welded joint for car crash FE analysis. SAE Technical Paper 2006-01-0534. 2006.
- 6) Shiozaki, T. et al. FE-based fatigue life prediction techniques for welded automotive structure. SAE Technical Paper 2006-01-0980. 2006.



吉武 明英



比良 隆明



平本 治郎