

## 衝突安全車体設計のための材料・構造最適化技術

Advanced Technologies of Materials and Structure Optimization  
for Design of Car Body with Enhanced Crash Safety上 西 朗 弘\*  
Akihiro UENISHI米 村 繁  
Shigeru YONEMURA広 瀬 智 史  
Satoshi HIROSE吉 田 博 司  
Hiroshi YOSHIDA樋 渡 俊 二  
Shunji HIWATASHI野 村 成 彦  
Naruhiko NOMURA伊 藤 泰 則  
Yasunori ITO河 野 一 之  
Kazuyuki KAWANO

## 抄 録

衝突安全性の向上と軽量化のため自動車車体への高強度鋼の適用が拡大している。多様な材料を使いこなすためには、部材や構造の衝突性能の数値解析技術と実験技術が重要となる。エネルギー吸収性能や破断の予測に関する開発技術を紹介することで、材料・構造最適化のための総合的取り組みについて概説を行った。

## Abstract

The application of high strength steels to car body structure has been accelerated for improved crashworthiness and light weight body. In order to use effectively diversified materials, the importance of numerical simulation and experimental techniques for crash properties of parts and structures has been increased. Here, an overview of a comprehensive approach for materials and structure optimization is presented, by introducing developed technologies for energy absorbing property evaluation and failure behaviour prediction.

## 1. 緒 言

衝突安全性の向上と燃費の改善を両立させるため、車体構造や材料に関する検討が盛んに行われている。薄鋼板は車体を構成する主要な材料であり、1990年代半ば以降に軟鋼から高強度鋼への置換が進み、さらに近年では1 GPaを超える超高強度鋼が適用されるようになってきた。このような高強度化は車体性能の向上や軽量化を期待してのものであるが、実際には素材の引張強さのみで性能が決まるわけではなく、鋼板が出荷されて以降の加工、組立や、構造体として衝突した際の各部材毎の変形様式に至るまでの全ての過程が影響する。このような影響を取り込んだ性能設計は数値解析技術を活用して進められており、数値解析上で材料挙動を正確に表現することの重要性が高まっている。

材料性能を最大限に引き出すためには、材料因子を明確にしなが部材、構造の衝撃吸収特性を評価する技術が必要になる。本報告では数値解析技術の観点から、自動車製造プロセスの影響を衝突性能評価に取り込む手法と、衝突

時に懸念されるスポット溶接部および材料(母材)の破断予測技術について述べる。さらに、実験技術の観点から、部材および構造体の衝撃吸収性能を実際の自動車衝突実験に則した条件で高精度に計測するための技術と衝突試験機の紹介を行う。

## 2. 部材、構造としての衝撃吸収特性

自動車車体に適用した際の衝撃吸収特性向上のためには材料と構造の両面からのアプローチが必要である。このうち材料の高速変形特性の詳細については別に述べた。ここでは主に部材、構造としての衝撃吸収性能向上を行うことを目的として、変形モード制御技術と自動車製造工程により変化する材料特性を考慮した部材性能評価技術について述べる。

## 2.1 軸圧潰変形モード制御と衝撃吸収特性

薄板材で構成された部材は座屈変形を起こすことで衝突エネルギーを吸収している。自動車の前面(または後面)衝突のように部材長手方向が衝突方向と一致した状態は通常

軸圧潰と呼ばれている。また、側面衝突時には部材長手方向が衝突方向と垂直に近い状態で衝撃吸収が行われるが、この場合の変形形態を曲げ圧潰と呼んでいる。いずれの圧潰形態でも部材の幾何因子等に応じて変形モードが決まることが知られており、その変形モードによって衝撃吸収特性は大きく異なる。ここでは軸圧潰において変形モードの制御により衝撃吸収特性の向上を検討した結果を報告する。

多角形の断面を有する部材の軸圧縮荷重の作用下での座屈変形モードには、非周期的に座屈する① non-Compactモードと周期的に座屈するCompactモードがあり、Compactモードには、非拡大型の② Type Iモードと拡大型の③ Type IIモードがある(図1)<sup>2,3)</sup>。衝撃吸収特性は①<②<③の順に優れる。

自動車部材で一般的に使用される矩形断面部材の場合、ある断面を見るとType Iモードでは向かい合う二辺同士は常に同じ方向(内側または外側)に変形し、座屈の進展とともに内側に変形した辺が次の座屈では外側という形で無理なく変形が進行していく(図2(a))<sup>4)</sup>。一方、Type IIモードは四辺ともに内側または外側に同時に変形することが必要であり、全周で縮小(内側に変形する場合)または拡大(外側に変形する場合)を繰り返しつつ変形が進行していく(図2(b))。Type IIモードではこのような断面拡大と縮小の繰り返しにより稜線部近傍に大変形が加わるため衝撃吸収性能に優れるが、その発現は難しく、たとえ発現したとしてもすぐに変形の容易なType Iモードに遷移し易い。

FEM解析および実験を用いて軸圧潰変形モードを詳細に観察した結果、Type IIモードが発現する状況では稜線部が反時計回りに同じ方向を向いて倒れこんでいることが分かった(図2(b))。従って、稜線部の倒れ込みがこのような回転対称を持った形で生じればType IIモードでの座

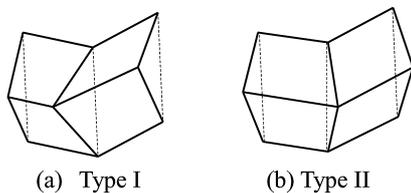


図1 軸圧潰時の変形モード  
Collapse modes of axial crush

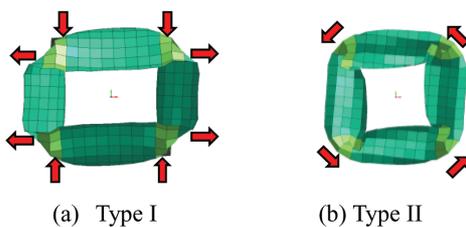


図2 角筒の変形モード<sup>4)</sup>  
Collapse modes of square column<sup>4)</sup>

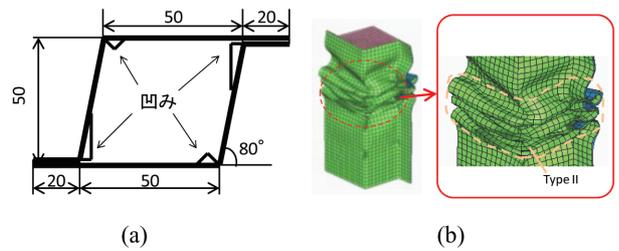


図3 提案部材の断面形状と解析結果<sup>4)</sup>  
Cross sectional shape and analysis result of proposed member<sup>4)</sup>

屈進展を安定化させることができる。そこで、そのための方法として、稜線の近傍へのエンボスまたはビード等の凹み部の配置と、同じ断面内でフランジ部の配置の最適化、の二つの方法を考案した<sup>4)</sup>。

この二つの方法を組み合わせた形で、プレス成形による作製が可能な部材(板厚1.4mm、長さ300mm、エンボスピッチ50mm)を考えた(図3(a))。稜線部周辺の凹み部の配置とフランジの配置が稜線部の回転対称的な倒れ込みを誘発するような形状とした。衝突解析を行った結果、本部材はType IIモードで安定的に座屈進展することが分かった(図3(b))。さらに衝撃吸収特性を通常の矩形断面部材と比較すると単位質量当たり22%の向上効果があることが分かった<sup>4)</sup>。

本検討は変形モードを制御することで衝撃吸収特性を向上させた一つの例である。部材の配置空間を大幅に変更することなくいくつかの形状付与により変形モードを制御することが可能であり、このような技術の適用は材料性能を最大限に引き出すために有効であると考えられる。

## 2.2 自動車製造工程を考慮した衝撃吸収特性の解析技術

実際の自動車車体を考えた場合、それを構成する材料は素材ままの状態とは異なっている。プレス加工、塗装焼付けの工程を経て、材料の微視的な組織が変化するため、衝突時にはその変化を考慮する必要がある。

材料に加工を行うと組織中に転位が生成し、相互作用し合うことで硬化が生じる。この現象は加工硬化と呼ばれる。さらに塗装焼付けの工程では加工により導入された転位が塗装焼付け温度下で拡散する炭素により固着されるため後続の変形に必要な応力が増加する。この現象は焼付け硬化と呼ばれている。加工硬化量の絶対値は1次変形(=プレス加工に相当)と2次変形(=衝突変形に相当)の組合せにより変化し、強い変形異方性が生じる<sup>5)</sup>。しかしながら、焼付け硬化はこの加工硬化により生じた異方性を緩和する形で生じるため、加工硬化+焼付け硬化後の衝突変形時の材料特性としては等方性を仮定した素材特性に塗装焼付け相当の硬化を上乗せしたものをを用いることで精度の高い解析が可能になることは既報で述べた通りである<sup>1)</sup>。

ここでは実際に塗装焼付け相当の熱処理を行った部材の軸圧潰試験を行うことで、その仮定の妥当性を検証した結果を報告する。

供試材は板厚1.2mmの980MPa級Dual Phase型複合組織鋼(降伏強さ785MPa, 引張強さ1007MPa, 全伸び15%, 焼付け硬化量61MPa)であり, 50×70mmのハット型部材と背板を30mm間隔のスポット溶接にて締結した長さ300mmの部材を作製して落重試験(落錘質量260kg, 高さ3m)を行った<sup>6)</sup>。前述のような自動車の塗装焼付け工程の影響を調査するため, 塗装焼付け工程での熱サイクルに対応する170℃で20分間の焼付け処理を施したものとその処理を行っていないもので試験を実施した。

また, FEM解析については成形と衝突を連成させた解析を行った。まず成形解析を行いハット型部材各部の変形状態を把握した。この結果を衝突解析の初期条件として用いることでプレス加工の影響を取り込むことができる。さらに焼付け硬化の影響を考慮する場合には, 塑性異方性は素材と同じと仮定し, 加工硬化曲線は素材の加工硬化曲線にJIS-G3135に従って測定した焼付け硬化量を一律に加算したものをを用いた。またひずみ速度依存性に関しては, 0.001~1500s<sup>-1</sup>での引張試験から求めたCowper-Symonds型ひずみ速度依存則を用いた。

図4に実験および解析で得られた軸圧潰距離70mmでの吸収エネルギーの評価結果を示す<sup>6)</sup>。まず実験結果を見ると焼付け処理後の吸収エネルギーはプレス加工ままのものに比べて約10%増加していることが分かる。これは本検討で用いた供試材が大きな焼付け硬化を示す材料であったためであると考えられる。一方FEMによる解析結果を見ると, 加工ままおよび焼付け処理後含めて実験結果を良く再現しており, 提案した解析手法が加工および塗装焼付け工程での強度上昇にともなう部材の衝突性能変化の予測に有効であることが確認できた。

本提案手法は, 新たな材料構成則などのモジュールを追加することなく既存の機能だけで高精度な予測が可能であり, 自動車車体の開発へ適用することで大きな効果を発揮することが期待できる。

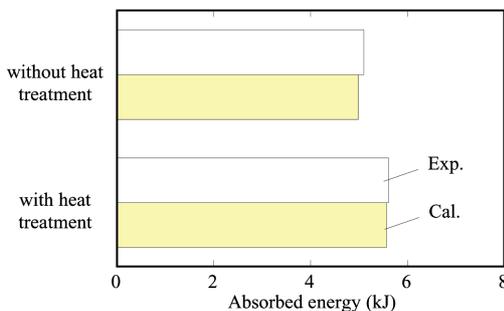


図4 熱処理有無での衝撃吸収エネルギーの比較<sup>6)</sup>  
Comparisons of absorbed energy during crush with and without heat treatment<sup>6)</sup>

### 3. 衝突変形時の破断挙動の予測

高強度鋼の車体への適用は自動車車体の軽量化に貢献してきた。今後さらに高強度の材料が適用され, 軽量化が進展していくものと想定される。一般に材料の高強度化は延性の低下を伴うことが多く, 軽量化は薄板材料の場合には素材厚の低下を意味するため, 従来に比べると衝突変形の際の破断発生の懸念は高まる方向にあると考えられる。このような状況を正しく制御するためには衝突変形時の破断発生を予測する技術が必要になる。ここでは自動車の接合に多く使用されるスポット溶接部と母材(材料)の破断予測技術について述べる。

#### 3.1 スポット溶接部破断予測

スポット溶接部の継手強度の指標としては引張せん断強さ(TSS)と十字引張強さ(CTS)が用いられることが多い<sup>7)</sup>。前者はスポット溶接部のせん断方向の, 後者は剥離方向の強度の指標と考えられており, 衝突時のスポット溶接部に対しても溶接要素に生じる力がこれらの強度を超えた際に破断すると考えることが多い。しかしながら, 車体に使用される各種の板厚, 強度の材料の膨大な組合せで継手強度試験を行い, それらを解析モデルの中に設定することは現実的には難しい。またさらに言えばTSSやCTSの試験においては試験片の回転やたわみが発生しており<sup>8)</sup>, 純粋なせん断または剥離状態での破断強度とは考え難いことにも注意が必要である。

そこで, 材料, スポット溶接条件, 試験片幅を変化させた実験を行い, その際の試験片の回転やたわみを計測することで破断時にスポット溶接部に作用するせん断方向, 剥離方向のそれぞれの力とその合力を評価した。その結果, 供試材やスポット溶接条件が同じでも, 試験片幅を変えると破断強度(合力から評価)が変化することが分かった。

図5中に模式的に示したように観測される破断強度は試験片端部の平均応力( $\sigma_{ave}$ )に断面積を乗じたものである<sup>8)</sup>。一方, 実際に破断が生じる溶接部(ナゲット)近傍ではそれより大きな応力( $\sigma_{max}$ )が作用している。この $\sigma_{max}$ は

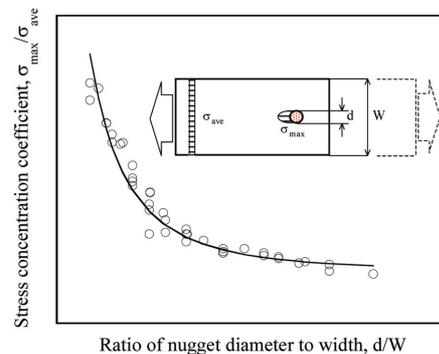


図5 応力集中( $\sigma_{max}/\sigma_{ave}$ )とd/Wとの関係<sup>8)</sup>  
Relationship between stress concentration coefficient ( $\sigma_{max}/\sigma_{ave}$ ) and d/W<sup>8)</sup>

試材やスポット溶接条件が同じ場合には同等の値となると考えられる。試験片幅によって破断強度は変化するがこれは  $\sigma_{ave}$  が変化したためと考えられる。そこで二つの応力の比 ( $\sigma_{max}/\sigma_{ave}$ ) と、試験片の幾何学的因子である溶接部径  $d$  と試験片幅  $W$  との比 ( $d/W$ ) との関係性を調査した。その結果が図5である<sup>8)</sup>。図中にはTSS及びCTSの継手強度試験のデータがあるが、試験種別や溶接部径に関わらず単一の曲線で表現できることが分かった<sup>8)</sup>。

図5の関係を利用して汎用の衝突解析コードと連成してスポット溶接部の破断予測を行えるソフトウェア (NSafe®-SPOT) を開発した。このソフトウェアでは材料の種別と有効幅 (図5の試験片幅  $W$  に相当、実構造では対象のスポット溶接部が負担している領域の幅となる) を与えることで、比較的簡便に精度の高い破断予測が可能となる。図6に軟鋼から超高強度材 (ホットスタンプ材) の引張せん断継手強度 (TSS) の実験結果と本ソフトウェアによる予測結果を比較したものを示す。幅広い強度範囲の材料で精度の高い予測が出来ることが分かった。

ハット型断面を持つ単純部材の軸圧潰試験結果を用いて、スポット破断予測精度の検証を行った<sup>9)</sup>。素材は980MPa級鋼板 (板厚  $t = 1.4\text{mm}$ ) とし、フランジの中心部に40mm間隔で  $4\sqrt{t}$  の溶接部径となるようにスポット溶接を行った条件での結果を図7に示す。部材は落錘が接触する上端側から座屈を開始したが、それと同時に上方からスポット溶接部の破断が順次生じていった。この様子は

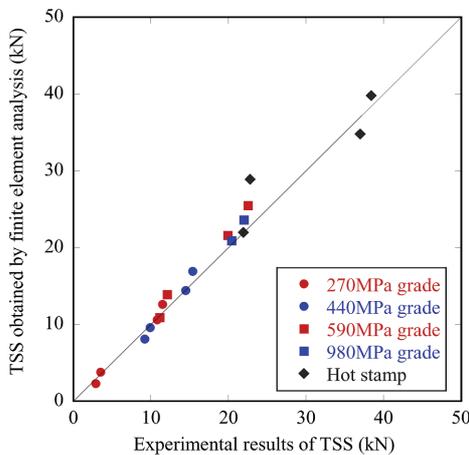


図6 TSS継手強度の実験結果と解析結果の比較  
Comparison of experimental and analysis results of TSS



(a) FEM analysis (b) Experimental result

図7 軸圧潰部材の変形形状の比較<sup>9)</sup>  
Comparison of deformed shapes of axially crushed parts<sup>9)</sup>

FEM解析でもよく再現された。一方、 $6\sqrt{t}$  の溶接部径となるようにスポット溶接した条件では実験、解析ともにスポット溶接部破断は生じず、 $4\sqrt{t}$  の条件に比べて軸圧潰時の吸収エネルギーが10%程度高くなることが分かった。これは  $4\sqrt{t}$  の条件ではスポット溶接部の破断に伴って変形拘束が減った結果であると考えられる。本破断予測技術を用いることでスポット溶接部の破断現象と、それに伴う変形モードや吸収エネルギーの変化まで含めて予測することが可能となることが分かった。

### 3.2 材料 (母材) 破断

大変形を受ける板材の破断に対する余裕度の判定には一般に板厚減少率や成形限界線図 (FLD: Forming Limit Diagram) が用いられることが多い。特にプレス成形時の破断判定にはひずみ空間上で表記されたFLD (ひずみFLD) が用いられることが多い。しかしながらこのFLDは変形経路に依存して変化することが知られており、多工程でのプレス加工やその後の衝突変形のように変形経路の変化が起こる場合にはその経路に応じた破断限界線を多数準備する必要がある。

図8に変形経路を変えた場合の破断限界の変化を示す<sup>10)</sup>。供試材は590MPa級析出強化鋼板 (板厚1.2mm) で、①予変形なし、②1次変形として大型引張試験片により圧延方向に10%の引張を施した後、その引張方向が最大主応力方向となるようにした場合 ( $\alpha = 0^\circ$ )、③1次変形として大型引張試験片により圧延方向に10%の引張を施した後、その引張方向の直交方向が最大主応力方向となるようにした場合 ( $\alpha = 90^\circ$ )、での破断限界の計測を行った結果である。この図から分かるようにひずみFLDでは、変形経路に依存し破断限界が大きく変化している。すなわち、(a) ひずみの主軸が同一の場合、2次変形が等二軸変形の時破断限界は増加する、(b) ひずみの主軸が  $90^\circ$  回転した場合、単軸引張りりと平面ひずみ引張りの破断限界は大きく減少する、ことが分かった。これは過去の報告と同じ傾向であった。すなわち、変形経路が大きく変化する場合にはひ

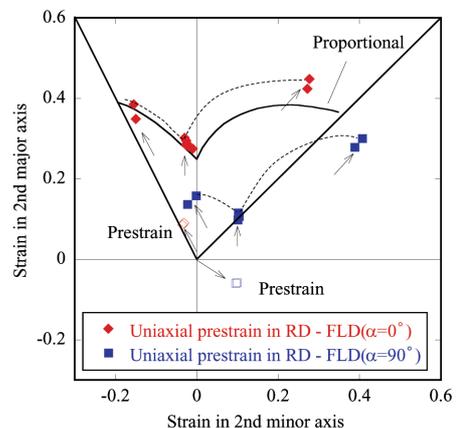


図8 比例および複合経路における成形限界の実験結果<sup>10)</sup>  
Experimental FLDs for proportional and combined loadings<sup>10)</sup>

ずみ空間上で表記した予変形なしの破断限界を用いただけでは良好な予測精度が得られない。

そこで、実験により測定したひずみ FLD を応力空間へ変換し、ひずみ FLD と応力空間内の FLD (応力 FLD) との対応を検討した<sup>10)</sup>。ひずみから応力への変換は、(1) 体積一定則、(2) von Mises の降伏関数、(3) 相当応力と相当塑性ひずみの関係を一定とする等方硬化、(4) 降伏曲面と相当塑性ひずみ増分の垂直則、(5) 平面応力、を仮定して行った。その結果を図 9 に示す。ひずみ FLD 上では変形経路に依存して破断限界線が大きく変化するが (図 8)、応力 FLD を用いると、今回の実験範囲内では経路によらず単一の破断限界線となることが分かった。

一般に板材の破断限界は塑性不安定の発現と結び付けて理解される。変形進展とともに材料の加工硬化能が低下していくが、その値がある条件を満たしたときに変形の局所化が発生し破断に至ると考えられる。通常の金属材料の場合、加工硬化能は相当応力-相当(塑性)ひずみの関係で記述されるが、破断限界がひずみ空間と応力空間とで挙動が異なるのは、相当応力と相当ひずみの性質の違いに起因する。すなわち相当応力の場合は、その値が現在の応力成分のみに依存して決まるのに対して (= 応力空間上の位置が相当応力と対応)、相当ひずみの場合は現在のひずみ成分が同じであっても変形の経路が異なれば異なる値を持つこと (= ひずみ空間上の位置だけでは相当ひずみの値は分からない) が影響している。

相当応力と相当ひずみの関係が変形経路に依存しない場合は応力空間上で表記した破断限界は単一の曲線となる。軟鋼の場合には交差効果と呼ばれるような形で相当応力-相当ひずみ関係が経路依存することが知られている<sup>11)</sup>。このような場合には応力空間で表記しても破断限界は単一の曲線とならない。しかしながら 590MPa 級以上の高強度鋼では交差効果が小さいため、応力空間での破断限界は一意に定まると考えられる<sup>11)</sup>。

応力空間上で表記した FLD (応力 FLD) が単一の曲線

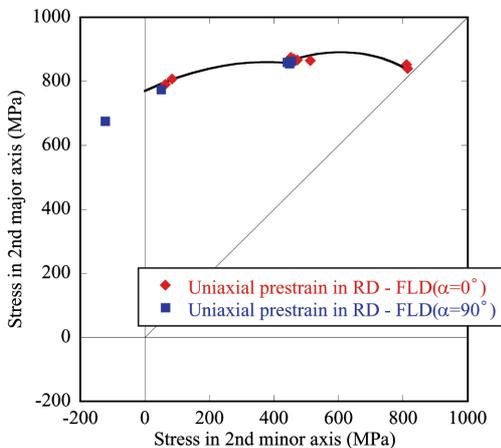


図 9 比例および複合経路下の応力空間での成形限界<sup>10)</sup>  
Stress based FLD for proportional and combined loadings<sup>10)</sup>

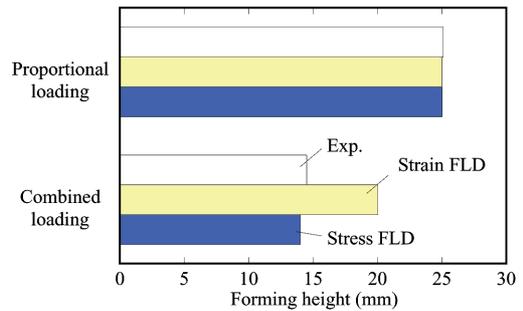


図 10 比例および複合経路下での成形高さ<sup>10)</sup>  
Forming height in proportional and combined loadings<sup>10)</sup>

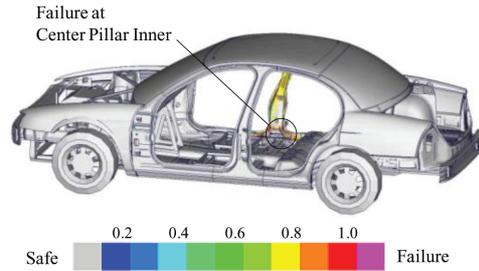


図 11 成形-衝突連成解析による破断予測<sup>6)</sup>  
Failure prediction in stamp-crash coupling simulation<sup>6)</sup>

になるという性質を活用すれば、複雑な変形経路変化が予想される衝突時の破断予測に有効であると考えられる。そこで汎用の衝突解析コードと連動して応力 FLD に基づく破断の予測が可能なソフトウェアを開発した (NSafe<sup>®</sup>-MAT)。590MPa 級析出強化鋼板の球頭張出し試験 (板厚 1.2mm) を用いて、精度検証を行った結果が図 10 である。これは素材ままおよび 10% 引張予ひずみを与えた材料での成形高さを比較したものであるが、予変形を加え変形経路変化のある場合は成形高さが低くなっていることが分かる。解析結果を見ると、変形経路変化のない素材ままの場合にはひずみ FLD、応力 FLD のいずれを用いても実験結果を再現した。一方、変形経路変化のある場合には、ひずみ FLD では過大な成形高さの予測となるのに対して、応力 FLD を用いるとほぼ実験結果を再現し、本ソフトウェアが変形経路変化がある場合にも有効であることが分かった。

さらに、フルビークルを用いた解析も行った<sup>6)</sup>。One Step ソルバーを用いることで加工履歴の影響を考慮し、側面衝突の解析を行った。破断危険度をコンター表示した結果を図 11 に示すが、980MPa 級鋼板 1.2mm からなるセンターピラーインナー下部の開口部近傍が破断の危険性が高いという予測結果が得られた。

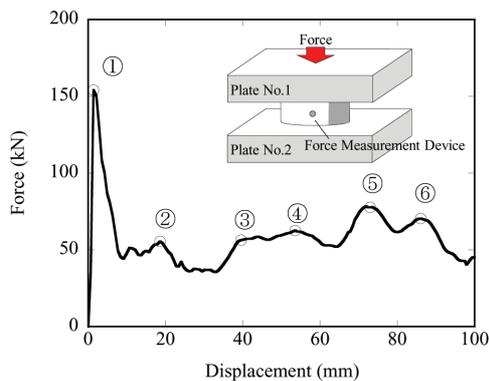
#### 4. 部材変形挙動の実験・観察技術

材料特性と実際の構造としての性能とを結び付けるものとして数値解析技術の重要性は高まってきている。一方、部材あるいは構造の衝突挙動の実験技術は実際の性能を把握することで、数値解析には未だ反映されていない因子の

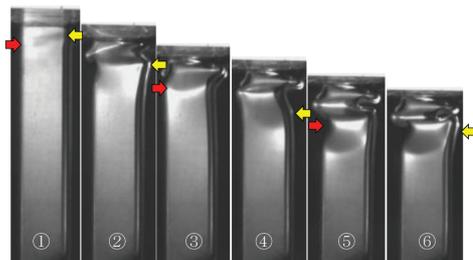
影響の見極めや、数値解析による種々の検討結果の検証を行うために重要である。ここでは動的荷重の高精度計測技術と、近年設置した現行の自動車衝突試験の速度領域を網羅できる衝突試験機の紹介を行う。

衝突のような動的荷重の計測の難しさは荷重が弾性波として伝播するという性質にある。従来手法では試験機中の様々な場所を伝播し多重反射する弾性波が激しい振動として重畳し、真の荷重の観測が難しくなることが多い。このような振動を回避するため荷重計測部に工夫を加えた<sup>12)</sup>。図12中にその模式図を示すが、計測装置は2枚のプレートと1つの中実円柱で構成される。プレートNo.1は試験体の固定部を兼ねており、プレートNo.1を介して荷重が円柱に伝わる。荷重はこの円柱中央部の弾性ひずみをひずみゲージ等を用いて計測される。ここで重要なのは円柱の断面積と2枚のプレートの断面積に大きな差を付けること、及び(高さ/断面積)比の小さい円柱を用いることである。このような構造とすることで中実円柱部での弾性変形の均一化にかかる時間が短縮でき、振動波形の発生が抑制できる。

図12(a)はハット型部材(590MPa級析出強化鋼板、1.4mm、60×60mm断面)の軸圧潰試験を本装置を用いて計測した結果である。荷重波形にいくつかのピークが見られるが、同時に測定した変形形状と比較すると(図12(b))、上端から順次座屈が進展していく際にそれぞれ背板側とハット側が面外に変形を開始するタイミング(図中に矢印で記載)と合致しており、高い精度で動的荷重の計測が可能であることが分かった。



(a) Force-displacement curve



(b) Collapse mode

図12 軸圧潰での動的荷重の計測例  
Example of dynamic force measurement in axial crush

表1 衝突試験機の概要  
Overview of impact testing machine

Method	Hydraulic type, horizontal impact
Impact velocity range	2-100km/h
Measurement equipment	High-speed camera, Force, etc

表1に衝突試験機の主な仕様を示す。本装置は部材単体から大型構造までの衝突試験を行える装置である。油圧による水平打ち出し方式を採用しており、多様な形態での衝突評価が可能となっている。またその衝突速度は最高100km/hであり、現行のすべての自動車アセスメントの衝突試験の速度領域を網羅した評価が可能である。また、種々の高精度計測装置を備えることで部材や構造の衝突変形時の挙動を詳細に観察でき、衝撃吸収性能の評価と変形メカニズムの検討が可能である。

## 5. 結 言

衝撃吸収特性に関して材料性能を引き出すための基礎的検討技術として、変形モード制御や自動車製造プロセスの影響の考慮手法、破断回避検討のためのスポット溶接部および母材破断予測技術、高精度な実験評価手法と衝突試験機について紹介した。今後もこのような技術開発を進め、ますます高度化するニーズに対応できる材料とその最適利用技術の提供を可能としていきたい。

### 参考文献

- 1) 広瀬智史, 上西朗弘, 米村 繁, 樋渡俊二: 新日鉄技報. (393), 25-31 (2012)
- 2) Reid, S. R.: Int. J. Mech. Sci. 28, 295 (1986)
- 3) Abramowicz, W., Jones, N.: Int. J. Impact Engineering. 2, 179 (1984)
- 4) 広瀬智史, 上西朗弘: 第62回塑性加工連合講演会講演論文集. 563 (2011)
- 5) 米村 繁, 樋渡俊二, 上西朗弘, 白田松男: 鉄と鋼. 92 (8), 516 (2006)
- 6) 米村 繁, 樋渡俊二, 広瀬智史, 上西朗弘, 鈴木規之, 吉田博司: 自動車技術会学術講演前刷集. No.15-09, 20095404, 2009
- 7) 及川初彦, 村山 元, 崎山達也, 高橋靖雄, 石川 忠: 新日鉄技報. (385), 36 (2006)
- 8) 吉田博司, 上西朗弘, 栗山幸久, 野村成彦: 自動車技術会学術講演前刷集. No.8-04, 20045205, 2004
- 9) 吉田博司, 上西朗弘, 野村成彦: 自動車技術会学術講演前刷集. No.49-05, 20055062, 2005
- 10) 米村 繁, 吉田博司, 上西朗弘, 樋渡俊二: 自動車技術会学術講演前刷集. No.21-07, 20075066, 2007
- 11) 米村 繁, 上西朗弘, 樋渡俊二, 鈴木規之, 白田松男: 鉄と鋼. 93 (4), 317 (2007)
- 12) 特許第4741272号, 特許第4741273号



上西朗弘 Akihiro UENISHI  
鉄鋼研究所 薄板材料研究部 主幹研究員  
博士  
千葉県富津市新富 20-1 〒 293-8511



樋渡俊二 Shunji HIWATASHI  
名古屋技術研究部長 主幹研究員  
Ph.D.



米村 繁 Shigeru YONEMURA  
君津技術研究部 主任研究員  
博士（工学）



野村成彦 Naruhiko NOMURA  
鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター  
主任研究員



広瀬智史 Satoshi HIROSE  
鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター  
主任研究員 Ph.D.



伊藤泰則 Yasunori ITO  
名古屋製鐵所 品質管理部  
鋼材利用加工技術グループ  
グループリーダー



吉田博司 Hiroshi YOSHIDA  
鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター  
主任研究員 博士（工学）



河野一之 Kazuyuki KAWANO  
名古屋製鐵所 品質管理部 次長