

高張力鋼板の衝撃吸収特性

High-strength Steel Sheets Offering High Impact Energy-absorbing Capability

上西 朗 弘^{*(1)}
Akihiro UENISHI

栗山 幸 久^{*(2)}
Yukihisa KURIYAMA

高橋 学^{*(3)}
Manabu TAKAHASHI

抄 録

自動車の衝突安全性向上が急務の課題となっているが、高張力鋼板の適用は軽量化との両立を図る上で有効な手段の一つであると考えられる。そこで、自動車の衝突時相当の高速での引張試験とFEM解析の組合せにより、590MPa級までの高張力鋼板の衝撃吸収特性を調査した。優れた部材衝撃吸収能を得るためには、高い動的強度を示すこと、及び座屈進展の安定化に寄与する加工硬化能を高めることが重要であることを解析により明らかにした。TRIP (transformation-induced plasticity) 鋼、DP (dual phase) 鋼がこれらの特性に優れており、衝撃吸収部材用の材料として相応しいことを明らかにした。

Abstract

Demand for increased impact safety as well as weight reduction of automobiles has increased the use of high-strength steel sheets. The impact energy absorbing capability of high-strength steel sheets up to 590 MPa was investigated by finite element method (FEM) analyses in combination with tension tests at speeds comparable to those of automobile collisions. The FEM analyses show that high dynamic strength and high work hardenability that improves the stability of the buckling process are advantageous in enhancing the impact energy absorbing capability of automobile parts. TRIP (transformation-induced plasticity) and DP (dual-phase) steels are superior in these properties and suitable for impact energy absorbing components.

1. 結 言

世界的な環境保護の動きに呼応して、米国のPNGV (Partnership for New Generation of Vehicle: 80mile/gallon車の開発)や欧州の100km/31車の開発に代表されるような、抜本的な自動車の燃費改善が大きな目標となってきた。燃費改善のためには車体の軽量化が不可欠であるが、一方では衝突安全に関する法規制の強化や商品性能として衝突安全性が注目されるようになったこと等を背景として、車体重量は増加の傾向にある。

このような状況の中、世界18か国35の鉄鋼会社は共同で鋼製超軽量車の開発プロジェクトULSAB(Ultra Light Steel Auto Body)を1994年から開始し、昨年春には衝突規制を満足し、かつ25%軽量化を達成する鋼製ホワイトボディを試作することで、鉄鋼材料の最適利用による大幅な軽量化の可能性を示した^{1,2)}。その主な技術要素は、高張力鋼板の大幅な適用、テーラードブランク-ハイドロフォーム-レーザー接合などの先端的な製造技術の適用であり、材料置換による衝撃吸収能向上が重要な位置を占めている。

高張力鋼板の使用による衝突安全性向上については従来より多くの検討がなされているが³⁾、通常の引張試験の100万倍以上にも達する⁴⁾衝突時の高ひずみ速度下での変形特性については未解明の部分が多く残されていた。また、実際の衝突時に部材は様々な応力・

ひずみ状態にあり、しかも各部位でひずみ速度も異なるため素材での評価だけでなく部材として組み立てた際の衝突特性の評価も必要である。そこで、薄鋼板の高速変形特性を詳細調査するとともに、その結果を取り込んだFEM解析により部材として衝撃吸収能を調査した。

本報では主に自動車の前面衝突の際に主要な変形モードとなる軸圧潰について、部材衝撃吸収能に及ぼす材料特性の影響を検討した結果を報告する。

2. 実験・解析方法

供試材には種々の強度の高張力鋼板を用いた。その成分及び機械的特性値を表1に示す。衝突変形時相当の高ひずみ速度域での変形特性はone bar method^{5,6)}を用いた高速引張試験機により行った。一般に高速引張では、通常の引張試験機で使用される短いロードセルを用いて荷重計測した場合、ロードセル中を高速で反射、伝播する応力波の影響により荷重が振動して正確な測定が行えない。

このような応力波の影響を回避するために種々の方法が提案されているが、one bar methodではこの問題を避けるため長い出力棒をロードセルとして用いることを特徴としており、図1に示すようにハンマを衝撃ブロックに衝突させ、材料を引張る際に出力棒を長くすることで他端から応力波が反射して戻ってくるまでの時間を確

*⁽¹⁾ 鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター 研究員
千葉県富津市20-1 ☎293-8511 ☎(0439)80-2245

*⁽²⁾ 鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター 主幹研究員

*⁽³⁾ 鉄鋼研究所 鋼材第一研究部 主任研究員, Ph.D.

表1 供試材の成分(mass%)及び機械的特性値

鋼種	C	Si	Mn	Ti	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)
A 軟鋼	0.05	0.01	0.24	-	241	348	43
B 固溶強化鋼	0.08	0.02	1.46	-	370	487	30
C DP鋼	0.05	0.89	1.25	-	432	618	27
D 析出強化鋼	0.09	0.01	0.80	0.07	539	636	22
E TRIP鋼	0.15	1.48	0.99	-	510	644	37

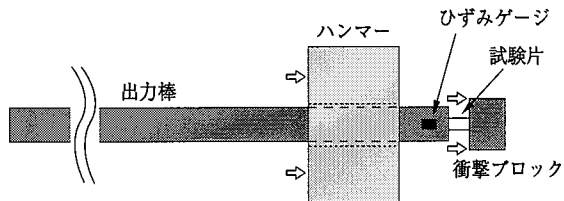


図1 one bar方式高速引張試験機(模式図)

保し、反射波が正規の測定波形に干渉するのを防止する。この方法を用いることでひずみ速度 $10^3/s$ での測定を可能とした。試験片は図2の形状のものを用いた。アタッチメントの直径は出力棒径と同じとし、出力棒との接合部での応力波の反射を防止した。アタッチメントと試験片本体との接着にはエポキシ系接着剤を用い、その硬化処理のために $170^{\circ}C \times 30min$ の熱処理を行った。この熱処理は自動車の製造工程における塗装焼き付け処理とほぼ同等である。

また、低速側引張は通常のインストロン型試験機を用いて 10^{-1} 、 $10^{-3}/s$ での測定を行った。試験片はすべてのひずみ速度で同一形状のものを用いた。

部材としての衝撃吸収能を評価するために動的陽解法FEMを用いた解析を行った。材料モデルは加工硬化をSwift型の式で、ひずみ速度の影響をCowper-Symondsの式⁷⁾を用いて式(1)としたものを用い、高速引張試験により得た材料特性を近似して使用した。

$$\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}) = F \cdot (\epsilon + \epsilon_0)^n \cdot \{1 + (\dot{\epsilon}/D)^{1/p}\} \quad (1)$$

ここで、 σ は塑性応力、 ϵ は塑性ひずみ、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度、 F 、 ϵ_0 、 D 及び p は定数である。解析モデルの要素分割には4節点シェル要素を用いた。

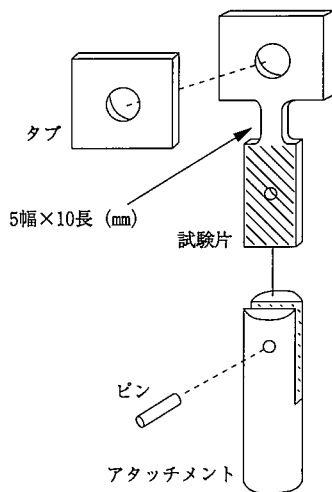


図2 高速引張用試験片形状

3. 高張力鋼板の衝撃吸収特性

3.1 高張力鋼板の衝撃吸収能

高速引張試験の一例として、図3、4にひずみ速度 10^3 、 $10^{-3}/s$ での供試材B及びEの公称応力-公称ひずみ線図をそれぞれ示す。高ひずみ速度下では変形応力は急速に上昇した。この傾向は他の供試材でも同一であった。

各供試材の低ひずみ域(3~10%)の平均変形応力の変化を図5に

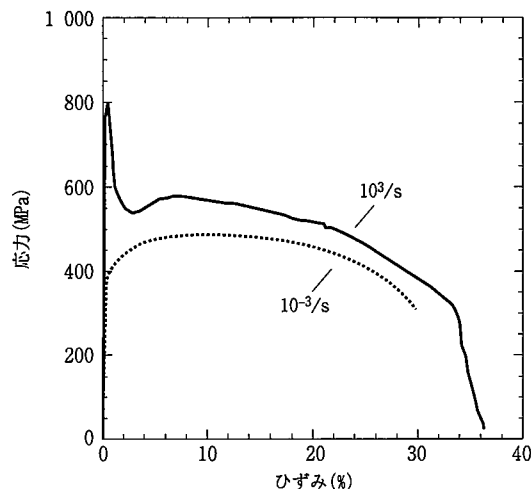


図3 公称応力-公称ひずみ線図(供試材B)

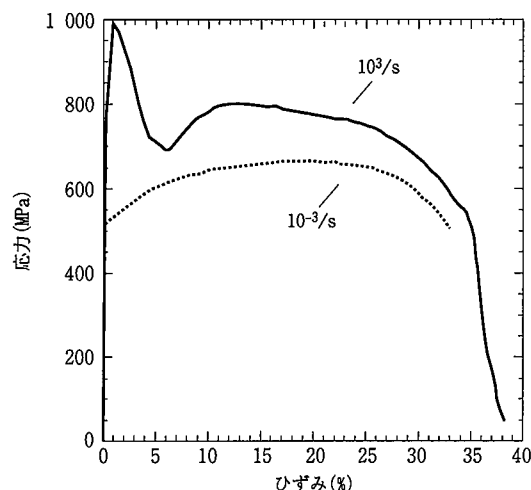


図4 公称応力-公称ひずみ線図(供試材E)

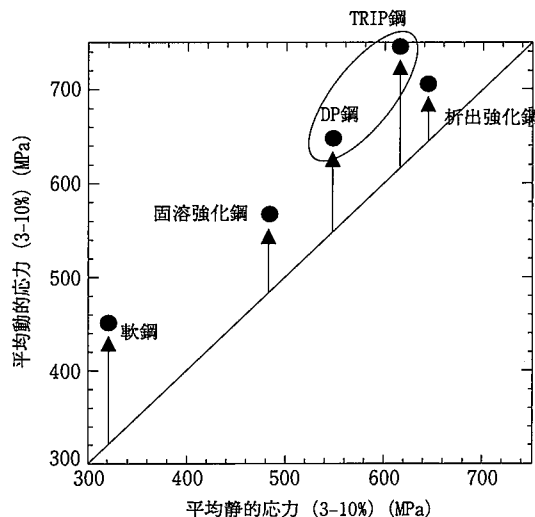


図5 変形応力のひずみ速度依存性

示す。横軸はひずみ速度 $10^{-3}/s$ での、縦軸はひずみ速度 $10^3/s$ での値である。素材の静的強度とともに動的強度は増加しているが、その上昇量は静的強さの増加と共に小さくなる傾向が見られる⁶⁾。しかしながら590MPa級の中で、TRIP(Transformation Induced Plasticity)鋼及びDP(Dual Phase)鋼の変形応力は、ひずみ速度上昇により析出強化鋼に比べ大きく増加した。これは両鋼種に共通に含まれる比較的清浄なフェライト相が寄与したものと考えられる。また更にTRIP鋼の場合は残留オーステナイト相の変態が母相であるフェライト相の変形抵抗の上昇に伴い促進される効果も加算されたものと考えられる。

素材は構造部材として使用される際にはプレス成形によるひずみを受けた後、塗装焼き付けのための熱処理を経るため、衝突時の実性能を把握するためには同等の条件で材料評価を行う必要がある⁴⁾。そこで5%の予ひずみと熱処理(170℃×30min)を加えた後の引張試験もあわせて行った。その測定結果を図6に示す。590MPa級鋼の中で比較すると、TRIP鋼、DP鋼は、実使用時の特性を示すと考えられる予加工+熱処理後の動的強度が析出強化鋼に比べ高いことが分かった。また、特にDP鋼では予加工+熱処理が動的強度の上昇に対し大きく寄与することが分かった。

これらの引張試験結果を用いて、部材としての衝撃吸収能の評価をFEM解析により行った。解析モデルは前衝突の際の主たる衝撃吸収部材であるフロントサイドメンバーを単純化した角筒モデルを用いた。角筒は板厚1.8mmで、一辺70mmの正方形断面、軸方向長さ320mmの形状とした。圧潰は台車試験を想定して、部材の端部節点に計400kgの質量と初速度15m/s(54km/h)を付加して反対側の剛体壁に衝突させた。

図7に100mm軸圧潰した時点での部材吸収エネルギーを示す。各素材についてそれぞれ予ひずみ0、5%のものを示す。衝撃吸収能は材料置換により向上し、軟鋼板から590MPa級への置換により40%程度の吸収エネルギーの増加が見られた。また、同じ590MPa級材でも強化機構による差が現れ、実際の部材衝撃吸収能に相当すると考えられる5%予ひずみ材の吸収エネルギーはTRIP鋼、DP鋼が析出強化鋼に比べて大きくなった。これは図6の結果を反映するものであり、同等の静的強度を示す材料であっても、変形応力のひずみ速度依存性及び予ひずみによる効果を高めることによって、部材としてより優れた衝撃吸収能を付与することができることを示している。TRIP鋼、DP鋼はこれらの特性に優れているため、このような材料の部材への適用は従来鋼に比べ大きな衝撃吸収能の向上を期待できることが分かった。

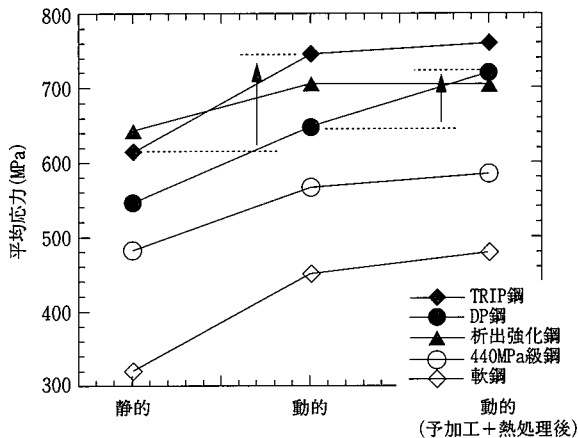


図6 予加工による変形応力の上昇

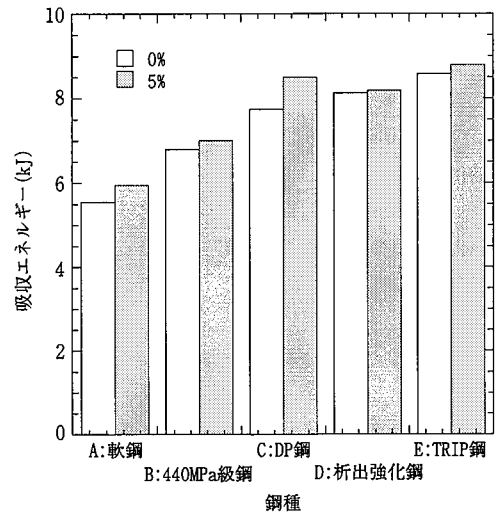


図7 角筒部材の衝撃吸収能(板厚1.8mm)

3.2 座屈形態に及ぼす材料特性の影響

前節では材料の衝撃吸収特性を調べるために、安定した座屈モードを示す領域での材料比較を行った。しかし、部材の断面に対して板厚が薄い場合には不安定な座屈モードが生じる可能性がある^{8,9)}。図8に異なる板厚を持つ材料の動的圧潰試験結果を示す¹⁰⁾。板厚の薄い場合にはnon-compact modeと呼ばれる⁸⁾側壁に直辺部の生じるモードが見られる。これは板厚の減少による曲げモーメントの低下により変形が局所化することに起因するものと考えられるが、素材特性の影響は明確ではない。

そこで、降伏強度及び塑性域での加工硬化能の影響を調査するために図9に示す仮想的な材料特性値を用いて解析を行った。解析はnon-compact modeが起こる領域とされる(板厚)/(辺長)=0.8/70=0.011の条件下で行った。図10にそれぞれの場合の衝突開始後7ms経過時点での圧潰形態を示す。加工硬化能の高いV1ではnon-compact modeが抑制されているのに対して、加工硬化能の小さな

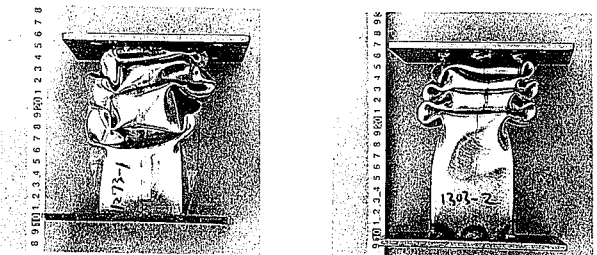


図8 板厚による座屈形態の変化(左0.75mm, 右1.8mm)

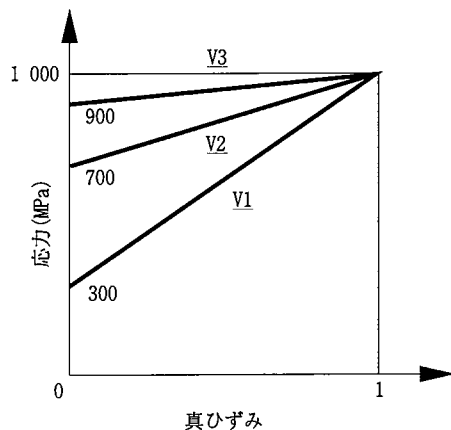


図9 解析に使用した仮想的な材料特性

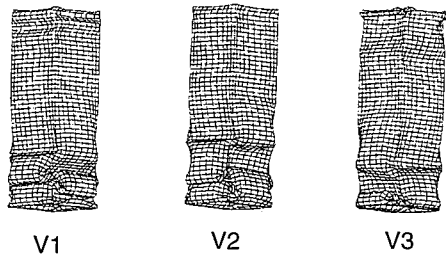


図10 部材変形状

V3ではnon-compact modeが生じている。従来、non-compact modeが生じる際の局所的な座屈荷重は材料の降伏強度以下であり、その発現には主に幾何学的因子(板厚/辺長比)が関与するものとされ、材料特性(特に塑性域での挙動)の影響はほとんど考慮されてこなかった。しかし本解析で材料の加工硬化特性の高いものほどnon-compact modeが抑制されることが明らかとなった。

更にこのような領域での座屈進展の安定性を見るために、荷重の荷重方向をわずかに(2度)傾けて解析を行った。その結果を図11に示す。non-compact modeにより座屈する部材では、荷重方向を傾けた解析では軸方向座屈から曲げ座屈への移行を起こす。一方non-compact modeが抑制される部材ではそのような挙動は見られない。

自動車部材の中には断面寸法に対して板厚の薄い筒所があり、かつ実際の衝突では鉛直方向の荷重荷役が起こることは稀である。曲げ座屈は軸方向座屈と比較してエネルギー吸収能が劣るため、曲げ座屈への移行による部材衝撃吸収能の早期の低下は系(車両)全体のクラッシュ挙動を予測できない形へと変えてしまう恐れがある。それを防止するためにはnon-compact modeの発生を抑制し、座屈進展の安定性を高めることが重要である。そのための一つの方策が加工硬化能の高い材料を用いることであると考えられる。図12に動的引張試験時のn値の変化を示すが¹¹⁾、590MPa級材の中ではTRIP鋼、DP鋼の加工硬化能が大きいことが分かる。従って、これらの

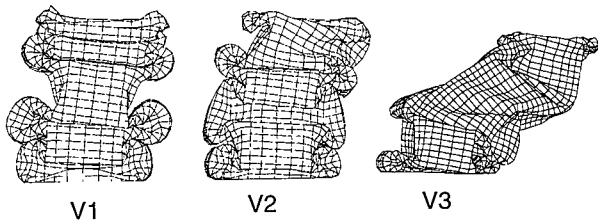


図11 荷重負荷方向を変えたときの変形状

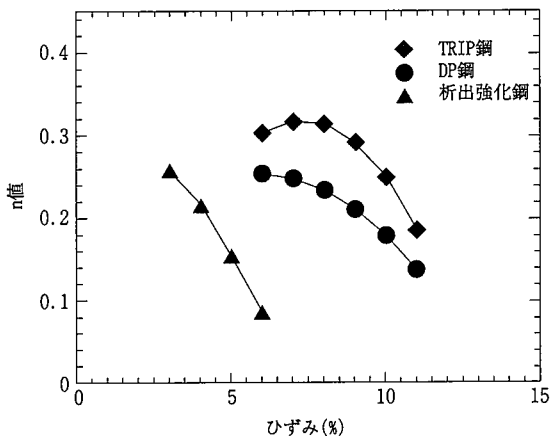


図12 動的引張時のn値のひずみ量依存性

材料の使用は座屈進展の安定性を高める上でも有用であると考えられる。

3.3 高張力鋼板の使用による軽量化効果の試算

高張力鋼板は同板厚の低強度材に比べ高い衝撃吸収能を示すことが分かったが、軽量化を達成するためには板厚を減じたときにもその優位性が保たれなければならない。そこで衝撃吸収能に及ぼす板厚の影響を検討した。図13に圧潰により生じた塑性ひずみの正方形角筒の一辺70mm内の分布(供試材B)を示す。各位置での塑性ひずみは座屈部の塑性ひずみを圧潰軸方向に平均化することにより求めた。この図から部材板厚の増加は、(1)角部の拘束が大となる、(2)曲げひずみが増加する(辺中央)、の二つの効果を持つことが分かった。また圧潰時に部材に加わる平均ひずみは10~15%程度であり、比較的低ひずみ域の変形抵抗が重要であることが分かった。

図14に板厚を0.8~2.0mmまで変化させた解析を行い、100mm圧潰時点の吸収エネルギー(予ひずみ5%の材料特性値)の板厚依存性を求めたものを示す。板厚小の領域ではその差は小さくなるものの、優れた材料の使用により板厚減の可能性があると分かった。角筒の吸収エネルギーの板厚依存性に関しては次のような式が知られている^{12,13)}。

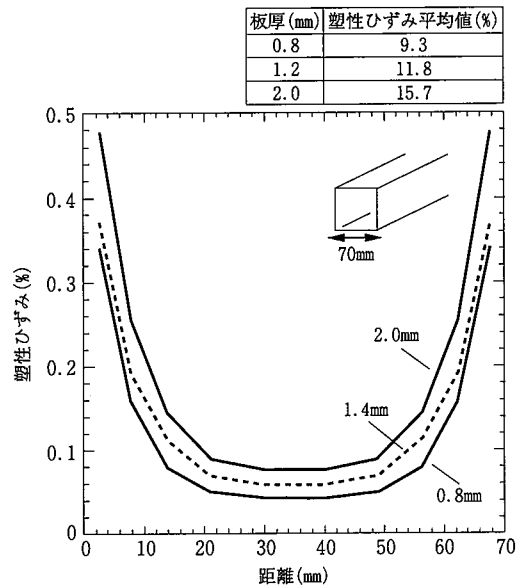


図13 角筒圧潰時のひずみ分布

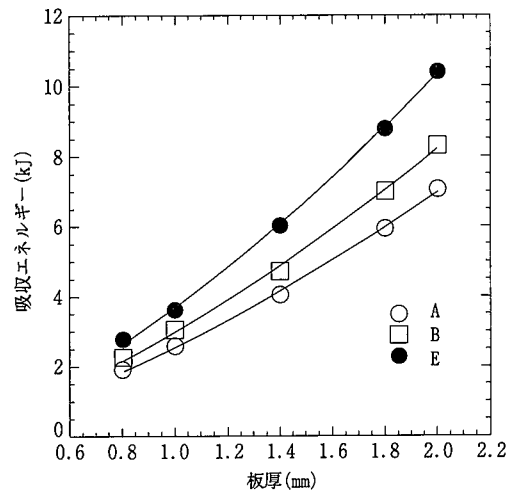


図14 衝撃吸収能の板厚依存性(予ひずみ5%部材の特性)

$$E_{ab} = C\delta L^{1/3} t^{5/3} \quad (2)$$

ここに、Lは辺長、 δ は圧潰距離、 t は板厚、Cは定数である。この式に従い吸収エネルギーの板厚依存性を表した結果を図14に実線で示す。解析結果をほぼ再現しており、吸収エネルギーは式(2)の形で表せることが分かった。また、定数Cは動的強度に比例する値であることが分かっており¹³⁾、高い動的強度を示す高張力鋼板の使用が重要であることを示している。本部材形状の場合、590MPa級TRIP鋼(供試材E)を使用することにより、2.0mm軟鋼(供試材A)を1.6mm(20%減厚)に、2.0mm440MPa鋼(供試材B)を1.8mm(10%減厚)に軽量化が可能であることが分かった。

4. 結 言

環境問題、特に地球温暖化防止のためのCO₂の排出削減の重要性が認識されており、自動車に対する燃費改善の要求が激しくなっている。衝突安全性向上は燃費改善のための必須条件である軽量化と相反する一面を持つが、このような状況下では材料置換による軽量化は大きな意味を持つと考えられる。ULSABでは世界調達性を前提とし、材料選択の幅が限られ、高強度化に伴う成形性の劣化を克服できなかったため、590MPa級以上の高張力鋼板の採用は比較的成形の容易な部位に留まっていた。しかしながら、本報で紹介した衝撃吸収能に優れたTRIP鋼、DP鋼は同時に優れた成形性をも具備しており¹⁴⁾、従来の高張力鋼板では成形できなかった部材への適用拡大が期待される。

今後の益々厳格化する要求を満たすためには、更に優れた材料の開発は必須であり、またその材料を車体に適用する際の技術開発も重要である。鋼の持つ軽量化の可能性を極限まで追求する中で、従来以上に軽量でなおかつ衝突安全性の高い車体を実現することを期待する。

参考文献

- 1) 栗山幸久: 塑性と加工, 39 (453), 1009 (1998)
- 2) 橋本浩二 ほか: 自動車技術会1998年春季大会, 材料フォーラム予稿集, 1998, p.1
- 3) Takechi, H. et al.: Int. J. of Vehicle Design, IAVD Congress on Vehicle Design and Components, Z1 (1984)
- 4) Uenishi, A. et al.: International Body Engineering Conference, (23), 89 (1996)
- 5) Kawata, K. et al.: Mechanical Properties at High Rates of Strain 1979, ed. J. Harding, Institute of Physics, Conference Series
- 6) Nakanishi, E. et al.: Structural Failure, Product Liability and Technical Insurance, 1992, p.423
- 7) Cowper, G.R. et al.: Brown Univ. Div. of Applied Mech. Report No.28, 1952
- 8) Reid, S.R. et al.: Int. J. Mech. Sci. (28), 295 (1986)
- 9) 上西朗弘 ほか: 日本機械学会第74期全国大会講演論文集(II), 96-15, 1996, p.449
- 10) Uenishi, A. et al.: International Body Engineering Conference, No.29, 1997, p.59
- 11) Takahashi, M. et al.: International Body Engineering Conference, No.29, 1997, p.26
- 12) Wierzbicki, T. et al.: J. Apl. Mech., (50), 72 (1983)
- 13) 上西朗弘 ほか: 平成9年度塑性加工春期講演会講演論文集, 1997, p.179
- 14) Hiwatashi, S. et al.: 26th International Symposium on Automotive Technology and Automation, 1993, p.263