

衝突性能最適化のための高速変形特性評価技術

Material Characterization at High Strain Rates for an Optimization of Car Body Structure at Crash Events

上西 朗 弘^{*(1)} 吉田 博 司^{*(2)} 栗山 幸 久^{*(3)} 高橋 学^{*(4)}
 Akihiro UENISHI Hiroshi YOSHIDA Yukihiisa KURIYAMA Manabu TAKAHASHI

抄 録

自動車の衝突安全性が大きな注目を集めている。軽量かつ衝撃吸収特性に優れた車体構造の開発のためには高強度鋼板の適用が有効であると考えられるが、その最適使用のためには正確な材料評価が重要である。薄板の高速変形特性の評価方法を概観するとともに最近の改良について報告した。併せてこのような材料データをFEM解析に用いるための留意点についても述べた。

Abstract

The demand for increased vehicle safety has become a matter of considerable concern of users. The use of high strength steel is beneficial for the realization of a light weight body with enhanced vehicle safety. An optimum combination of body structure and material is highly required and thus an exact evaluation of high strain rate properties of materials has been also demanded. In this report, the methods for testing the high strain rate tensile properties of sheet materials were reviewed and the recent improvements made for our testing machine, one bar method, were presented. In addition, the points that should be taken into accounts in applying the experimental material data at high strain rates to FEM analysis, which is a key tool for an optimization, were discussed.

1. 緒 言

地球温暖化防止を始めとする環境問題は21世紀の大きな課題であり、各分野において取組がなされているが、CO₂排出の20～30%を占める自動車の排気低減は重要であり、2008年から欧州ではCO₂排出140g/km以下(1995年比25%削減)が法規制化され、日本でも改正省エネルギー法で1995年比22.5%の燃比向上を定めている。一方、種々の対策はなされているものの、国内の2001年の交通事故による死傷者は119万人であり、大きな課題である。自動車の衝突安全対策は、1995年前後における日米欧での法規制化、情報公開(NCAP)が契機となって進展した。日本においても、この時期に衝突安全性は飛躍的に向上した。衝突に対する車体構造の最適化と高強度鋼板の使用により、衝突安全性と軽量化(排出ガス低減)は両立されたが、歪速度依存性を考慮した衝突FEM解析に基づく設計は、ここ数年の進展である。これらは今日的な問題、取組ではあるが、その基礎となる研究の歴史は古く19世紀に端を発している¹⁾。

本報告では、このような研究の歴史にも触れながら材料、構造最適化の基礎となる薄板高速引張試験およびその適用状況を概括することを試みたい。

2. 自動車の衝突安全性に対する材料の寄与

衝突事故が発生した場合でも乗員を傷害から保護するため、実際の事故の分析に基づき事故を再現する衝突実験が検討され、衝突実験による法規制が日²⁾米³⁾欧⁴⁾で制定されている。また法規制よりも厳しい条件での衝突実験に基づいた衝突安全性がNCAP: New Car Assessment Programとして日米欧で公開されている。これらの衝突実験での評価は、人体を模擬したダミーを搭載し、頭、胸、骨盤、下肢などの加速度、荷重、変位、速度などにより、人体の傷害の程度を評価するが、上記のパラメータと傷害の程度は、事故調査などに基づいて対応が取られている。このような人体の傷害は、シートベルト、エアバッグといった人体の拘束装置、緩衝装置により大きく緩和されるが、これらの乗員保護装置の装着を前提として、自動車構造の最適化により乗員の傷害を軽減する検討がなされている。

自動車構造の最適化による乗員の傷害軽減には、

- ・前面衝突: 車の前部を潰し、その塑性変形により衝突エネルギーを吸収する。車室部分は剛とし、変形が車室内に及ばないようにする。
- ・側面衝突: 車の側面の変形を極力押さえ、車室内への侵入を抑止する。

^{*(1)} 加工技術研究開発センター 主任研究員
 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-3113

^{*(2)} 加工技術研究開発センター 主任研究員 工博

^{*(3)} 加工技術研究開発センター 所長 工博

^{*(4)} 鋼材第一研究部 主幹研究員 PhD

といった対策が主に採られている。

鋼により衝突安全性と軽量化を両立させる国際プロジェクト (ULSAB-AVC : Ultra Light Steel Auto Body-Advanced Vehicle Concept) では, Porsche Engineering Service社に設計を委託したが, Porscheは衝突安全のための自動車構造体の変形指標として, US-NCAP (前面フルラップ衝突), Euro-NCAP (前面オフセット衝突), SINCAR (側面衝突) の条件下での構造最適化を達成している⁵⁾。

衝突安全性を自動車の構造面で成立させるためには上記のような検討がなされるが, 大まかには前面衝突ではフロントサイドメンバーなどを軸圧潰させて衝突エネルギーを吸収し, 側面衝突ではBピラーが曲げ折れないようにし, ロッカーなどを曲げ圧潰させながら衝突エネルギーを吸収するのが一般的な対応と考えられる。これらの衝突時の基本的な変形に対して材料材料強度を上げる, 即ち, 高強度化は, 曲げに対しては塑性屈服を抑えるのに有利であり, 軸圧潰に対しては吸収エネルギーを向上させることができる⁶⁾。

3. 薄板の高速変形特性の測定

自動車衝突安全に対し材料の高強度化が有効であるが, 鋼には歪速度依存性があり, 変形速度が速いと変形抵抗が上昇することが知られている。従って材料置換を考える場合には衝突時相当の高速変形特性の評価が必要となる。FEMを用いた検討によると, 自動車のフロントサイドメンバーを模した角筒 (70mm角, 板厚2.0mm) を55km/hで剛体壁に衝突させた場合, 変形が集中するコーナ部では歪速度は1000/s超であり, 通常材料評価が行われる歪速度の100万倍にも達することが判明している⁶⁾。このような高歪速度での変形特性は通常の試験法では行えないため, 高歪速度での試験方法が必要になる。

通常の引張試験では荷重を測定するロードセルは均一に変形するものと考えることができ, ロードセル内の所定の場所の歪の計測から荷重を測定することができる。ところが歪速度が増加してきてロードセル中の弾性変形が均一化するのに必要な時間と荷重計測時間のオーダが近付き始めると, ロードセル内の弾性波の伝播を考慮する必要が生じる。通常の試験機で試験した場合, 一般に歪速度が10~100/sを越えはじめると, 真の荷重にロードセル中を多重反射した弾性波の影響が重畳するため測定波形が乱れ始める。

このような問題を克服するためには両極端の方法がとられることが多い。一つはロードセルの長さを短くして, ロードセル内の弾性変形の均一化にかかる時間を短縮する方法, もう一つはロードセルを十分長くとり他端からの反射が戻ってくる前に測定を終える方法である。前者は通常自動車の衝突試験の際の荷重測定に使用されることがあるが, その機構上完全に反射波の影響を避けることは困難であるため, 材料の変形特性のような高い精度の要求されるものに対しては後者の方法が採用されることが多い。

B. Hopkinsonはこのような試験方法: Split-Hopkinson Pressure Bar Methodの原理的装置を提案⁷⁾した。さらにH. Kolskyが1949年に小さな円柱状の試験片を2本の長い棒の間にセットし, 一端から圧縮波を与える方法で高歪速度下での圧縮試験法を確立した⁸⁾。このHopkinson棒法は, 高歪速度まで計測可能であるが, 基本は圧縮試験である。自動車を構成する材料は大部分薄板であり, 圧縮試験は座屈の問題から困難であるため, Hopkinson棒法を改良した引張試験法が開発されてきている。近年, 日本では自動車の衝突安全性の課題に応えるべく, ニューマテリアルセンターが中心となって金

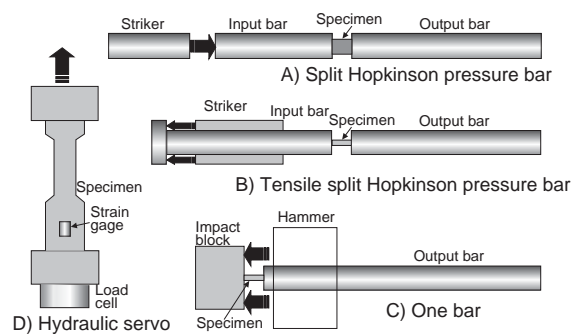


図1 各種の高速変形試験方法

属材料の高速変形特性評価方法の研究開発委員会を組織し, 図1に示す各種の高速試験法の比較も含め体系的な研究を行った⁹⁾。また, これと呼応する形で日本鉄鋼協会では「自動車用材料の高速変形に関する研究会」を組織し1997年から4年間に亘り研究が行われた¹⁰⁾。

図1のD)は油圧サーボ方式と呼ばれるものであり, チャックを所定の速度まで助走させて引張試験を行う方法であり, 荷重計測はロードセルないし掴み部に貼付した歪ゲージにより測定するものである。この方法ではチャック部などからの反射波によるノイズが大きくなるため200~300/s以上の歪速度では計測に限界があるとされている。

A)は元々のHopkinson棒法であり, 打撃棒で入力棒に応力パルスを与え, 試験片を通過して出力棒に現れる応力波と入力棒の応力波から試験片の応力, 歪を測定する方法である。B)はHopkinson棒法で引張が行えるようにしたもので原型同様, 入力棒と出力棒が同軸上に配置された共軸型Hopkinson棒法であるが, 入力棒にヨークをつけ, このヨーク部を入力棒に被さる管状の打撃棒で打撃し, 引張を行うものである。この方法は共軸型のHopkinson棒方式のため高歪速度まで良好な計測が可能であるが, 入力エネルギーが限られるため, 板材の破断までの応力~歪特性を測定することが困難である。

C)は河田により提案されたone bar法¹¹⁾であり, 筆者らが採用している方法である。この方法では出力棒の先端に取り付けた試験片の先のブロックをハンマーで打撃することで引張を行うため, 高強度鋼板のような高強度材でも破断までの計測を行うことができる。one bar法では棒が一本で済むため同一の設置スペースで長い出力棒を適用できる。棒の他端からの反射波が戻ってくるまではノイズなく測定できるが, 鋼の縦弾性波速度が $c_0 = \sqrt{E/\rho} = 5100\text{m/s}$ であるので, 長さ5mの出力棒により2m/s程度の時間が確保できる。

材料の公称応力 $\sigma_n(t)$ および公称歪 $\epsilon(t)$ は,

$$\epsilon(t) = \frac{1}{L_0} \int_0^t [V(\tau) - c \epsilon_g(\tau + a/c)] d\tau$$

$$\sigma_n(t) = \left(\frac{A_{bar}}{A_0} \right) E_{bar} \epsilon_g(t + a/c)$$

のように与えられる。ここに, $V(\tau)$ はブロックの速度, $\epsilon_g(t)$ は出力棒端から距離 a だけ離れた位置での出力棒の歪であり, A_0, L_0 は試験片の断面積および平行部長さ, A_{bar}, E_{bar}, c は出力棒の断面積及びヤング率, 弾性波速度である。

試験法の標準化を視野に入れた前記に示すような検討の中で, one bar方式では他の方法に比べて変形初期の応力ピークが大きい傾向があることが分かってきた。このピークは歪速度の増加に伴い変形初期に十分な可動転位を生成できないため降伏応力が高くなるとの解釈が可能である一方, one bar方式では直接打撃を与えること

から、試験片、出力棒の同軸度の影響を受け易いため本試験方法特有の現象である可能性も否定できなかった。

そこでこの初期応力ピークに及ぼす試験機レイアウトの影響についてFEMを用いて検討を行った¹²⁾。初期の出力棒の自重撓みを入れたFEM解析の結果、ブロックをハンマーで打撃した瞬間に出力棒先端で数10 μm程度の微小な振動が発生していることが分かった。この棒先端の振動により発生した軸方向の伸縮が弾性波となり伝播して行き、荷重を測定している場所で真の測定波形に重畳するため、応力の見掛けの初期ピークが生じることが分かった。従って大きな初期ピークは試験片、出力棒の同軸度のずれに起因する出力棒先端の振動により生じているものと考えられる。この防止策として、出力棒先端と打撃ブロックの同軸度を確保するため出力棒先端に固定治具を設けて実際に試験を行った。

その結果、図2に示すように見掛けのピークの除去が可能となり、もともと反射ノイズのないことと併せて、非常に明瞭な測定波形を得ることができるようになり¹²⁾、図3に示すような静的変形特性と動的変形特性の比較も正確に行えるようになった。試験機起因のピークを取り除いた状態で改めていくつかの強度水準の薄鋼板の高速引張を行った結果を図4に示す。改良後でも軟鋼では大きな

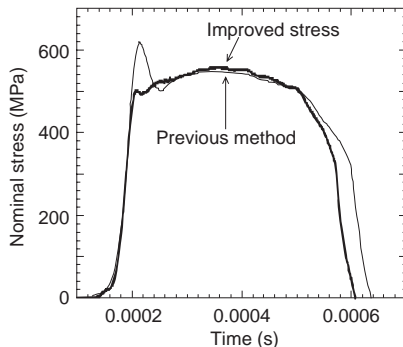


図2 改良前後での初期応力ピークの比較

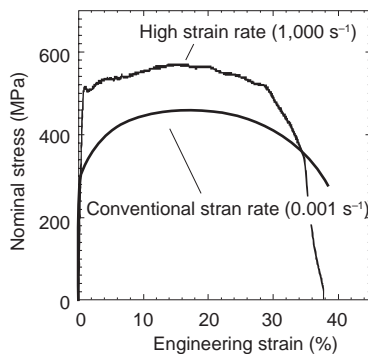


図3 静的特性と動的特性の比較(440MPa級鋼)

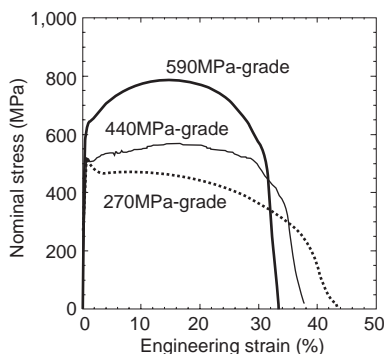


図4 改良法により測定された応力 - 歪関係(歪速度 $10^3/s$)

ピークが見られるが、一方590MPa級DP鋼ではほとんど見られない¹²⁾。これは初期可動転位密度と関係しており、可動転位の増殖の難しい材料では大きなピークが生じ、初期に可動転位密度の高い(例えばDP鋼)かあるいは転位の増殖源をたくさん持つ材料ではピークは生じ難いものと理解できる。

4. 衝撃吸収特性に優れた材料

前章で述べたように共軸型ホプキンソン棒による高速引張により、自動車の衝突時に達する歪速度である1000/sのオーダーまで正確に薄板材料の変形特性が測定できるようになった。図3は、440MPa鋼材の通常の引張試験で得られた応力 - 歪線図と、この試験法により測定した応力 - 歪線図であるが、鋼材ではここに示すような歪速度依存性がある。これはbcc金属の特徴であり、Peierls-Nabarro機構により転位運動に対する摩擦抵抗が歪速度とともに増加することに対応している。Peierls-Nabarro機構の寄与の大小は結晶構造により支配されることが知られており、fcc金属では摩擦抵抗の絶対値が小さく、また歪速度依存性もほとんど示さない。そのため、自動車衝突時の歪速度で変形抵抗が上昇する鉄鋼材料の方がアルミニウムのようなfcc金属に比べ有利である。

先に述べたように材料の高強度化は部材の衝撃吸収特性に有利であるが、変形応力の歪速度依存性は高強度化により低下することが知られている¹³⁾。しかしながら、同一の強度クラス(引張強さ)の材料でも強化機構によりその変形応力の歪速度依存性は異なる。図5にいくつかの鋼種の変形応力を示すが、鋼種によっては大きな変形抵抗の上昇を示すものがある^{6,14,15)}。また、自動車では薄鋼板はプレス成形され、焼付け塗装されるので、衝突時には予歪 + 焼付け硬化(BH)した状態で高速変形特性で評価すべきである。

図5は、自動車でのプレス成形で加わる平均的な歪量として5%の予歪を加え、焼付け塗装と同じ170 × 20分の熱処理を行ったものについても示してある。軟鋼に比べ440MPa鋼板では動的効果による変形抵抗の上昇は小さくなり、590MPaの析出強化鋼では更に小さくなるが、590MPaでもTRIP、DPは動的効果による変形抵抗の上昇は軟鋼と同程度である。自動車での使用の実用的な評価指標として、プレス成形性は5%歪時の変形抵抗、衝突吸収エネルギーは角筒の軸圧潰での吸収エネルギーを取った鋼材の評価を図6に示す。複合組織鋼と総称されるTRIP・DP鋼は従来鋼材に比べて衝突安全用に適した鋼材であることが分かる¹⁵⁾。このような特性はこれらの鋼種に共通に含まれる比較的清潔なフェライト相に起因すると考えられる。

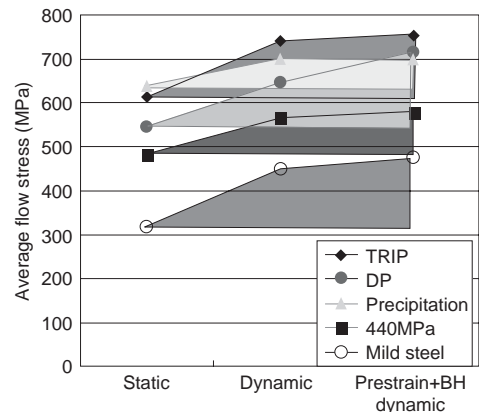


図5 各薄鋼板の動的特性、予歪 + BH効果

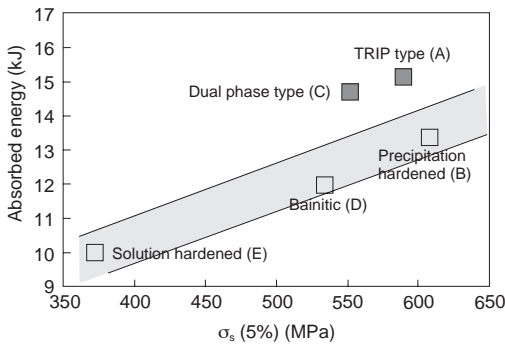


図6 各種薄鋼板の成形性と衝突特性

5. 衝突解析上の留意点, 連成解析

自動車の衝突解析は、これまでに述べた高歪速度での正確な材料特性の把握により精度が向上してきた。衝突時に単に部材の反力が異なるだけでなく、車全体で見た潰れモードが変わってしまう¹⁶⁾ので、正確に歪速度依存性を考慮する必要がある。正確な歪速度依存性をを用いた部材レベルの解析では実験と解析で良い一致が得られている¹⁵⁾。

さらに実際の衝突を考えた場合、プレス成形による予変形や塗装焼付け処理(BH)の影響も無視することができない。従来から報告されている通り、予変形やBHにより材料の変形応力は上昇する⁶⁾。正確な衝突挙動の把握のためにはプレス成形による板厚変化、予変形量を考慮した解析が必要であり、近年はプレス成形解析と衝突解析を連成させ、この問題を解決しようとする試みが行われている。

この場合重要となるのが予変形後の高速での材料挙動の解析への取り込みである。実際は部位ごとに予変形モードや方向が異なり複雑である¹⁷⁾が、メンバー類で典型的に見られるように変形方向が90度変化する場合を想定して、圧延方向に対して直角に予引張を加え、BH相当の熱処理を加えた後、圧延方向に高速引張試験を行っ

た結果を図7に示す。予変形を加えることにより変形開始直後の応力が増加し、またその増加量が予変形0%の材料の応力 - 歪関係に沿って変化していることが分かる。従って第一次近似としては、素板の応力 - 歪関係を予歪量に応じてシフトさせて(図8)連成解析を行うことができる¹⁸⁾。しかしながら、実際の材料は加工硬化特性や焼き付け硬化特性がそれぞれ異なるため、適切な材料データベースを用いて材料毎の特徴を踏まえた上でこのような解析を行うことが重要である。

6. 結 言

衝突安全性の向上と車体軽量化という互いに矛盾する目標を高いレベルで達成するためには、優れた材料の開発とそれら材料の適切な使用が重要となってきている。自動車の衝突解析が適用され始めた1980年代の中頃では車体モデルは7000要素程度で構成されていた。最近のコンピュータ能力の急激な進展と計算技術の進歩はモデルの急速な精緻化を促し、現在では100万程度の要素数にも迫るようになってきている。ますます進むデジタル開発を支えるためには、ここに紹介したような高精度な材料評価技術が必須であり、さらにそれらを解析の中に適切に取り込むことが重要である。

今後の高度化する要求に応えるためにはさらに優れた材料の開発と、その材料を適用する際の技術開発も重要である。鋼の持つ可能性を追求する中で軽量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) Hopkinson, J.: Collected Scientific Papers. Vol. II. 1872, p.316
- 2) 道路運送車両の保安基準第18条
- 3) FMVSS 208. p.314
- 4) EC Directive 96/79/EC. 96/27/EC
- 5) 栗山ら:自動車技術会 材料フォーラム. 2002, p.16
- 6) Uenishi, A., et al.: Proc. of IBEC, Interior & Safety Systems. 1996, p.89
- 7) Hopkinson, B.: Collected Scientific Papers, Cambridge University Press, 1921
- 8) Kolsky, H.: Proc. Phys. Soc. B62. 676 (1949)
- 9) 大阪科学技術センター附属ニューマテリアルセンター 知的基盤創成・利用技術研究開発 金属材料の高速変形特性評価方法の研究開発 委員会:業務成果報告書 2000, 2001, 2002
- 10) 自動車用材料の高速変形に関する研究会成果報告書 .日本鉄鋼協会 2001.3
- 11) Kawata, K., et al.: Mechanical Properties at High Rates of Strain. Conference Series. 1979, Institute of Physics
- 12) 吉田ら:自動車技術会 学術講演会前刷集. No.71-02, 20025235, 2002, p. 9
- 13) 中西栄三郎 板橋正章 河田幸三:日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集. No920-72, 1992, p.519
- 14) Takahashi, M., et al.: Proc. of IBEC, Auto Body Materials. 1997, p.1
- 15) Uenishi, A., et al: Proc. of IBEC, Auto body Materials. 1997, p.59
- 16) 栗山ら:自動車技術会 材料フォーラム, 2000, p.17
- 17) 樋渡ら:第52回塑加連講論, 2001, p.171
- 18) 米村ら:第52回塑加連講論, 2001, p.173

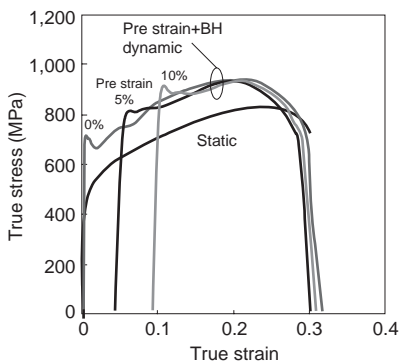


図7 予変形 + 焼き付け硬化 (BH) 後の特性

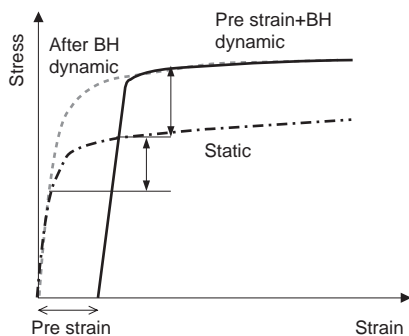


図8 成形・衝突連成解析のための材料特性