



特集記事・5

ここまで来た計算科学の鉄鋼への応用

材料・構造最適化のための衝突解析技術

Advanced Technologies Related to Crash Simulation for Optimum Combination of Structure and Material

新日本製鐵(株) 鉄鋼研究所
加工技術研究開発センター

同上

上西朗弘 Akihiro Uenishi

吉田博司 Hiroshi Yoshida

同左 栗山幸久 Yukihisa Kuriyama

1 緒言

地球温暖化防止を初めとする環境問題は21世紀の大きな課題であり、各分野において取り組みがなされているが、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140 g/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法で1995年比22.5%の燃費向上を定めている。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、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。このような状況の中で重要性を増しているのが、衝突変形の数値解析技術である。現在使用されている手法は1970年代の基礎的な取り組みに端を発しているが、計算機能力の急速な進展とともに1980年代後半から広範な問題への実適用が開始された。とりわけ近年では計算モデルの高度化・大規模化が進み衝突実験を代替する手段として定着しつつある。一方、材料面でも先進的な高強度材料が開発されその適用拡大は優れた車体開発を行うための急務の課題となっている。斬新な構造と材料との組合せによる車体開発は、従来の多数の衝突実験に基づく経験的手法の範疇を越えつつあり、ますます解析の重要性が増している。本報告では、解析手法そのものの発展の歴史に触れながら、材料の最適使用を検討するために発達してきた周辺基盤技術を紹介し、材料側から見て手法の今後の発展について概括することを試みたい。

2 衝突解析手法発展の歴史

衝突安全性の向上と車体軽量化という目標を高いレベルで達成するためには、材料・構造を極限まで最適化していく必

要がある。従来の車体開発は多数の実車衝突試験を基礎として行われてきたが、現在では仮想空間の中で車体を構成し衝突実験を行い、それを設計に反映するということが行われるようになってきている。車体の衝突は大ひずみ大変形を伴う複雑な問題であり、その解析手法も独自の発展を遂げてきている。

衝突解析が基礎とするのは有限要素法(FEM)である。衝突現象は材料の弾性と塑性挙動の双方を考慮し(弾塑性問題)、かつ、大ひずみ・大変形問題(有限変形理論)であるため、高度な材料非線形性と幾何学的非線形性を取り扱う必要がある。このような要請を満足するために開発された手法が動的陽解法である。通常のFEMでは仮想仕事の原理に基づいた釣り合い式(連立方程式)を解くことを基本とし(=静的)、非線形性を取り扱うため最終的な変位やひずみの決定に幾度かの反復計算を行い収束させる(=陰解法)ことが行われている。一方、動的陽解法とは運動方程式を基礎として、連立方程式を解く手順を踏まずに逐次的に解析を行い、時間増分毎に変形、ひずみ、応力を求める手法である。

動的陽解法有限要素法の起源はアメリカで軍需目的に開発されてきた差分法を基礎とした衝撃解析手法に遡ることができる。その後1970年代の後半にBelytschkoやHallquistらにより基礎となる数値解析手法の提案がなされ¹⁾、さらにアメリカの国家プロジェクトとして3次元解析コードの開発が行われた。その成果はDYNA3Dとして完成し、そのソースコードが一般に公開された。現在一般に使われている商用コードはこのソースコードを基に種々の機能やユーザーインターフェイスを追加して発展させたものである。

動的陽解法の特徴は大規模かつ大変形の問題に適しているということである。一般に静的解法では連立方程式を解くのに要する計算時間が要素数の増加と共にその2乗で増加するのに対して、動的解法では計算時間は要素数に比例するのみで大幅な短縮が期待できる。また動的解法であるため、座屈

現象のような根本的に収束解を求めるのが難しい問題でも適切な条件設定により工学的に有益な結果が得られることも特徴である。一方、動的陽解法では有限要素の節点間の応力伝播を追跡する必要があるために、時間増分ステップは最小の要素中を応力波が通り抜けないように設定する必要がある(Courant条件)、任意に設定することはできない。その結果、現象時間の長い問題では増分ステップ数が膨大となり、誤差の蓄積の危険性が増すとともに、積分法に起因して解の発散を招く場合もある。衝突問題はその現象時間の短さや通常使用される要素サイズの特徴から、動的陽解法での解析に適し、またそれが最も成功を収めている分野の一つである。

このような手法の現実的車体構造への適用はやはり計算機能力の飛躍的な向上に負うところが大きい。1980年代からのベクトル型スーパーコンピュータの民生利用の拡大がその普及を後押しした。その後ワークステーションの能力が拡大し比較的安価に計算機を保有することが可能になった1990年代にはさらに適用拡大が進んだ。近年はパラレル化のアルゴリズム開発が進み、動的陽解法の手法がそれに適していることもあってモデルが急速に精緻化している。車体全体の衝突解析においても1980年代の中頃にはモデルは7000程度の有限要素から構成されていたのに対して、現在では100万の要素数にも迫るようになってきている。このような発展は、前述したように衝突の数値解析技術が車体設計の中で重要な位置を占めることを促し、構造と材料を高度に最適化する設計が仮想空間の中だけでも可能となる時代が到来しつつあることを示していると考えられる。以降、世界の鉄鋼メーカーが共同で次世代の鋼性車体構造開発に取り組んだプロジェクトを例にとって、このような解析技術を支える基盤を材料側から眺めてみたい。

3 自動車車体の衝突安全性向上方法

自動車構造の最適化による乗員の傷害軽減には、車室部分を剛にしつつ衝突エネルギーを吸収・分散させる必要がある。前面衝突の場合には車体の前部に位置する部材の座屈を制御してその塑性変形により衝突エネルギーを吸収している。側面からの衝撃に対しては十分な衝撃吸収ゾーンが取れないため難しいが部材の車室内への突出した侵入を防止し、側面全体で入力を受け止めかつその変形量を極力抑えるような対策が採られている。しかしながら車体の重量増を抑えた上で種々の要件を満足させる車体開発の難易度は高まってきている。

鋼により衝突安全性と軽量化を両立させる取り組みはIISIを中心として世界の鉄鋼会社の共同プロジェクト(ULSAB: Ultra Light Steel Auto Body)として1994年から1998年にかけて行われた²⁾。ULSABは車体の設計から試

作までを対象として行われたが(図1)、その成果として衝突安全基準を満たしつつ25%軽量の鋼性車体が可能であることを明らかにした。ここで衝突解析技術はその性能設計検討の中核を占め、新しい車体コンセプトの提案における優位性を示した。新しい車体構造や新工法(ハイドロフォーム、テイラードブランク、レーザ接合)が取り込まれ、材料に関しても高強度鋼板が大幅に採用されたことがULSABの特徴である。さらにその後、次世代の鋼性自動車の提案を行うべくULSAB-AVC (Ultra Light Steel Auto Body-Advanced Vehicle Concept)プロジェクトが1999年から実行された³⁾(図2)。このプロジェクトはまさに仮想空間の中だけで設計検討が行われ、斬新な車体構造の提案がなされた例であり、最終的に車全体で約20~30%の軽量化を達成した。材料との関連で言えば、ULSABでは成形性の問題もあり440 MPa級(TS(=引張強さ)クラス)の材料が中心であったが、ULSAB-AVCではさらに高強度な先進的高強度鋼板の適用が検討された。結果としてほぼ100%高強度鋼板が採用された。

図3に投影面積当りの車体(Body In White)重量とハイテン化率の変遷を示す³⁾。1970年のマスキー法(厳しい自動車排ガス規制)の提案やその後のCAFE(Corporate Average Fuel Economy;自動車メーカー毎の平均燃費)規制からハイテン化率が増加し自動車の車体重量は減り続けていたが、1990年を境に横這い傾向となり90年代の半ば以降は逆に増

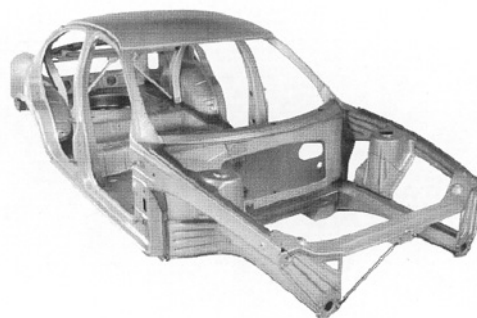


図1 ULSABプロジェクトで提案された車体構造

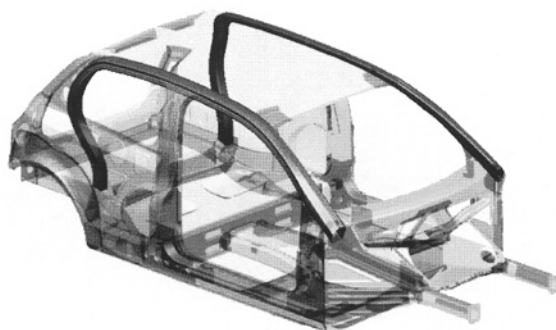


図2 ULSAB-AVCプロジェクトで提案された車体構造

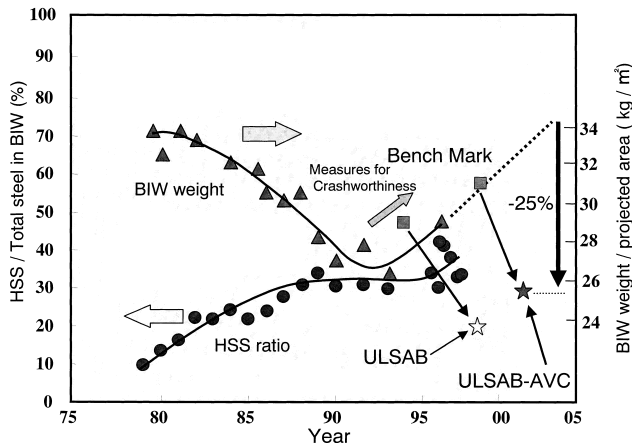


図3 車体骨格重量とハイテン化率の変遷

加傾向にある。この増加の要因は衝突安全規制の強化である。日本では1995年に自動車の前面フルラップ衝突時の安全性能の情報公開が始まり、最近では側面衝突、前面オフセット衝突を含め、広範な情報が提供され、消費者の行動を左右する力を持つようになった。

以上のような経緯も踏まえると今後のさらなる衝突安全規制の強化と軽量化を両立させるためには高強度材をまさに適材適所に使用していく必要がある。今後のこのような検討の中で重要性がますます高まるのが衝突安全の解析技術である。車体各部（車体前部、後部、車室）にはそれぞれ異なる挙動が要求され、またそれらが高度にバランスしている必要がある。1980年代初頭には図3に示したようにハイテン化率は低く車体骨格は基本的に軟鋼（TSクラス300 MPa級）により構成されており、材料の影響を考慮する必要はほとんどなかったが、現在では使用できる材料強度の幅は飛躍的に増加しており（TSクラスにして300 MPa級から1500 MPa級程度）、経験的手法のみでは構造を含めた最適配置は非常に困難である。逆に言えばULSAB-AVCで示されたように軽量かつ衝突安全性に優れた車体構造の実現が解析技術の構築に依存していくものと考えられる。

鋼にはひずみ速度依存性があり、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⁴⁾。また、通常部材として使用される以前にはプレス等による成形加工が施されており、衝突変形時の変形応力は変形履歴の影響を受ける。従って材料の最適配置を考える場合には衝突時相当の高速変形特性と変形履歴の評価が必要である。衝突解析技術の高度化が材料評価技術の進展を促したとも言えるが、以降、衝突解析技術の基礎となる材料変形挙動について述べる。

4 材料の高速変形特性評価技術

FEMを用いた検討によると、前面衝突の際に衝撃エネルギーの大部分を吸収するフロントサイドメンバーを模した角筒（70 mm 角、板厚2.0 mm）を55 km/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ひずみ速度は $1,000 \text{ s}^{-1}$ 超であり、通常材料評価が行われるひずみ速度の100万倍にも達することが知られている⁴⁾。このような高ひずみ速度での変形特性は通常の試験機では計測できないため、高ひずみ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ひずみの計測から荷重を測定することができる。ところがひずみ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ーが近付き始めると、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を行った場合、一般にひずみ速度が $10 \sim 100 \text{ s}^{-1}$ を越え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という方法である。前者は通常自動車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は長いロードセルを用いた試験方法（Split-Hopkinson Pressure Bar Method）の原理的装置を提案した⁵⁾。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という方法で高ひずみ速度下での圧縮試験法を確立した⁶⁾。このホプキンソン棒法は、高ひずみ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、ホプキンソン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⁷⁾。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年間にわたり研究が行われた⁸⁾。

図4のA) は元々のホプキンソン棒法であり、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・ひずみを測定する方法である。B) はホプキンソン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ホプキンソン棒法であるが、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。この方法は高ひずみ速度まで良好な計測が可能であるが、入力エネルギーに限られることが多く、板材の破断までの応力～ひずみ特性を測定することは通常困難である。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ひずみ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⁻¹以上のひずみ速度では計測に限界があるとされている。

C) は河田らにより提案されたone bar法であり、筆者らが採用している方法である⁹⁻¹¹⁾。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、高張力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 $c = \sqrt{E/\rho} = 5100 \text{ m/s}$ であるので、長さ5 mの出力棒により2 msec程度の時間が確保できる。材料の公称応力($\sigma_n(t)$)および公称ひずみ($e(t)$)は、

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

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

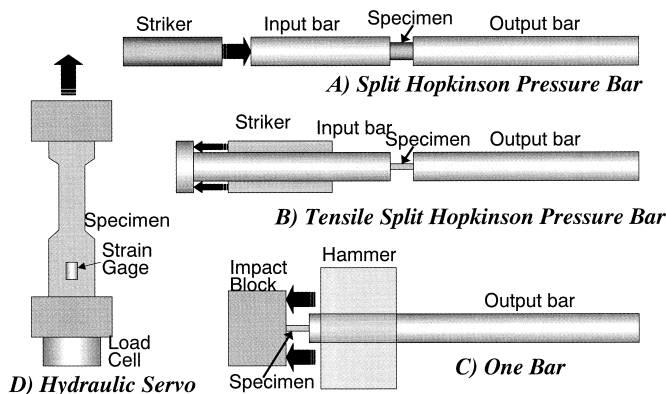


図4 各種の高速変形試験方法

のように与えられる。ここに、 $V(t)$ はブロックの速度、 $\epsilon_g(t)$ は出力棒端から距離 a 離れた位置での出力棒のひずみであり、 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。

5 衝撃吸収特性に優れた材料

前章で述べたようにホプキンソン棒方式を応用した高速引張により、自動車の衝突時に達するひずみ速度である1,000 s⁻¹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5は440 MPa鋼材 (TSクラス) の通常の引張試験で得られた応力～ひずみ線図 (ひずみ速度0.001 s⁻¹) と、この試験法により測定した応力～ひずみ線図 (ひずみ速度1,000 s⁻¹) であるが、鋼材ではここに示すようなひずみ速度依存性がある。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ひずみ速度とともに増加することに対応している¹²⁾。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、またひずみ速度依存性もほとんど示さない。そのため、自動車衝突時のひずみ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、変形応力のひずみ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。しかしながら、同一の強度クラス (TS) の材料でも強化機構によりその変形応力のひずみ速度依存性は異なる。図6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^{4, 13, 14)}。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、衝突時には予ひずみ+焼付け硬化 (BH) した状態での高速変形特性で評価すべきである。そこ

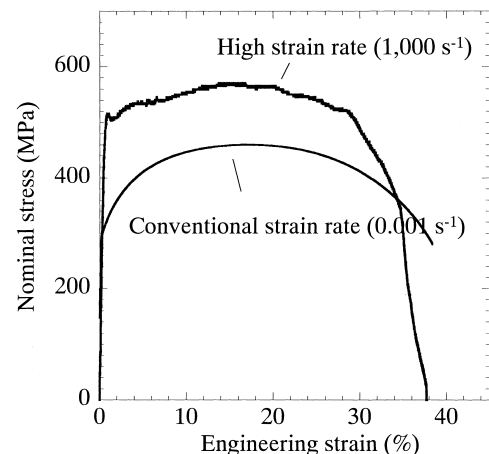


図5 準静的特性と動的特性の比較

で、図6は、自動車でのプレス成形で加わる平均的なひずみ量として5%の予ひずみを加え、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440 MPa鋼板では動的効果による変形抵抗の上昇は小さくなり、590 MPaの析出強化鋼では更に小さくなるが、590 MPaでもTRIP鋼 (Transformation Induced Plasticity)、DP鋼 (Dual Phase) 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%ひずみ時の変形抵抗、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7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¹⁴⁾。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浄なフェライト相に起因すると考えられる。

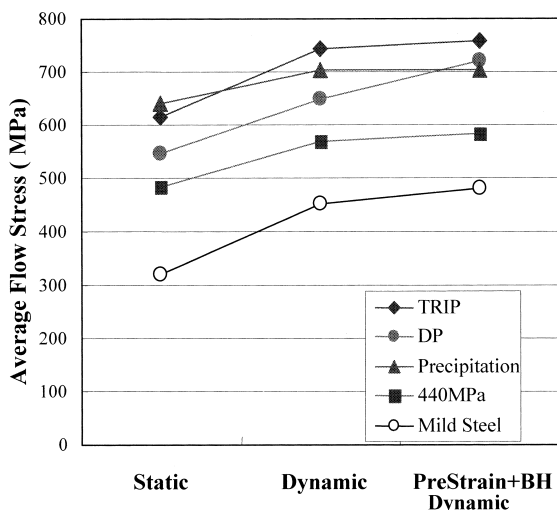


図6 各薄鋼板の動的特性、予ひずみ+BH効果

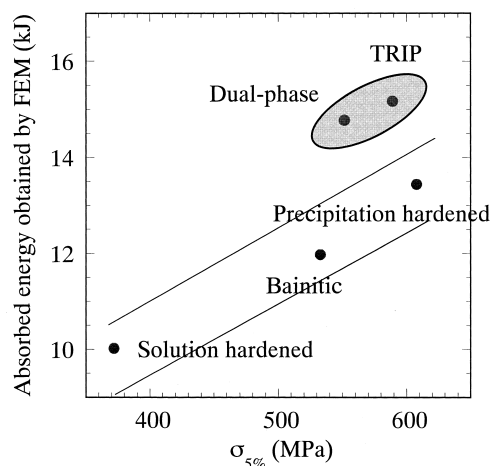


図7 各種薄鋼板の成形性と衝突特性

6 衝突解析での材料挙動取り込みの際の留意点

自動車の衝突解析は、これまでに述べた高ひずみ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ので、正確にひずみ速度依存性を考慮する必要がある。正確なひずみ速度依存性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。

さらに実際の衝突を考えた場合、前述したプレス成形による予変形や塗装焼付け処理の影響 (BH) も無視することができない。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¹⁵⁾。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8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-ひずみ関係に沿って変化していることが分かる。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。

実際の部材成形から衝突に至る過程に当てはめて考えると、成形方法にもよるが成形予ひずみによる加工硬化で強度上昇が起きると共に、板厚減少が発生する。部材の軸圧潰時の荷重や吸収エネルギーは、部材を構成する材料の強度と板厚に依存するが、軟鋼板で板厚1.2 mmを基準としてそれらの

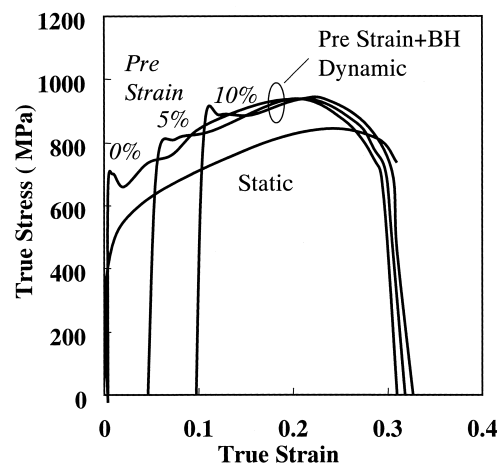


図8 予変形+焼き付け硬化 (BH) 後の特性

変化がどのように吸収エネルギーに影響するかを簡便な方法により見積もった結果を図9に示す¹⁵⁾。材料強度の上昇・板厚の増大とともに吸収エネルギーは上昇することは当然であるが、実際の部材成形過程を考慮すると成形予ひずみが小さいときは加工硬化により吸収エネルギーは増大するが、あるひずみ以上で板厚減少の影響が加工硬化の効果を上回り、吸収エネルギーが減少することが予想される。図9中のプロットは板厚1.6 mm、590 MPa級鋼で、この過程を示したもので予ひずみ・加工硬化によるエネルギー上昇と、板厚減少によるエネルギー下降の様子がわかる。

この現象は、同じ材料強度でも、加工硬化特性やひずみ速度依存性が異なる材料で違った傾向を示す。図10は、同じ590 MPa級の鋼材で、DP鋼のような加工硬化が大きく低降伏比型の鋼材と、析出強化鋼のような加工硬化が小さい高降伏比型の鋼材で、成形予ひずみ量を変えたときの吸収エネルギー変化の割合を示したものである。予ひずみがない状態では、高降伏比型の方が吸収エネルギーが高い。予ひずみによる加工硬化が大きい低降伏比型の方が予ひずみによる吸収エネルギー

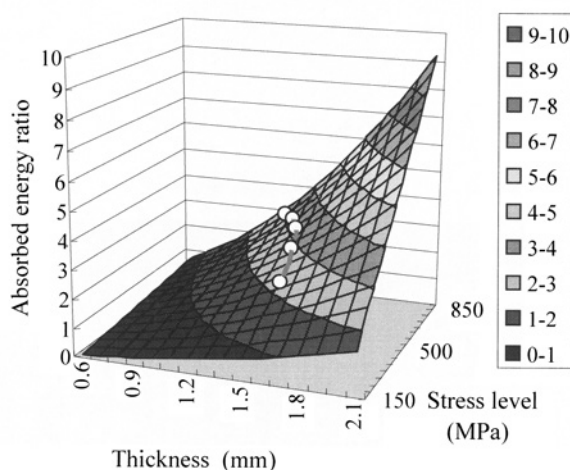


図9 部材吸収エネルギーに及ぼす材料強度、板厚の影響

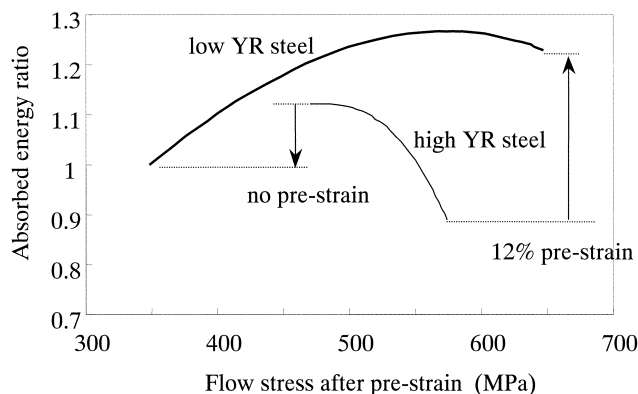


図10 成形による予ひずみが衝撃吸収能に及ぼす影響
(高降伏比材および低降伏比材)

上昇が大きいのにに対し、高降伏比型は、予ひずみによる板厚減少の影響が大きく吸収エネルギーは減少してしまう。結果として、実用の成形予ひずみの約10%程度では、低降伏比型の鋼材の方が吸収エネルギーが高くなることがわかる。

以上のように衝突に関する材料挙動と言っても多岐にわたり、それぞれの現象も複雑である。計算技術の進歩とともにこのような挙動の取り込みが可能になってきているが、高強度材を用いた衝突安全設計には必須の項目である。また更なる挑戦として、部材の破断の考慮がある。有限要素法では本質的に要素の破断現象を取り扱うことができないため、外部から破断のクライテリアを導入してやる必要がある。これはまさに材料と構造の両面からのアプローチが必要であり、今後の発展が待たれる。将来の基礎となるべきいくつかの取り組みがすでになされている¹⁶⁻¹⁹⁾。

7 結言

衝突安全性の向上と車体軽量化とを高いレベルで達成するための有望な手段である衝突変形解析技術について概括した。このような手法は解析そのものの高度化が重要であることはもちろんであるが、実際の構造に適用するための十分な計算機能力の発展が欠かせない。逆に言えば計算技術の進歩が従来考慮することができなかった様々な因子を取り込み、手法の完成度を高めつつある。自動車の衝突解析が適用され始めた1980年代の中頃には取り扱えるモデル規模は小さいものであり近似精度が粗く、材料置換の効果を定量性を持って議論することはほとんど不可能であった。しかしながら昨今では様々な材料の変形挙動を取り込み、構造との相乗効果を考慮できるレベルにまで達しつつある。このような発展は周辺分野である材料の評価技術の進展も促している。本報告では特に材料、構造両面の最適化という観点から衝突変形解析を支える材料関連の技術について詳しく述べた。今後ますます車体に対する要求は高度化してくるが、解析技術およびその周辺の技術の発展が促されるとともに優れた材料の開発が重要になってくるものと考えられる。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の実現することを期待する。

参考文献

- 1) T. Belytschko, J. S. Ong, W. K. Liu and J. M. Kennedy : Comput. Meth. Appl. Eng.43 (1984), 251.
- 2) 滝田道夫, 栗山幸久, 橋本浩二:自動車技術会, 材料フォーラム, (1998), 1.
- 3) 栗山幸久, 山崎一正, 橋本浩二, 大橋浩:自動車技術会, 材料フォーラム, (2002), 16.

- 4) A. Uenishi, M. Suehiro, Y. Kuriyama and M. Usuda : Proc. of International Body Engineering Conference, 23 (1996), 89.
- 5) B. Hopkinson : Collected Scientific Papers, Cambridge University Press, (1921)
- 6) H. Kolsky : Proc. Phys. Soc. B62 (1949), 676.
- 7) 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)
- 8) 日本鉄鋼協会, 自動車用材料の高速変形に関する研究会成果報告書, (2001.3)
- 9) K. Kawata : Mechanical Properties at High Rates of Strain, (1979), Institute of Physics, Conference Series.
- 10) 吉田博司, 栗山幸久, 上西朗弘, 高橋学 : 自動車技術会, 学術講演会前刷集, 71-02, (2002), 20025235, 9.
- 11) A. Uenishi and C. Teodosiu : Int. J. Plasticity, 20 (2004), 915.
- 12) A. Uenishi and C. Teodosiu : Acta Mater., 51 (2003), 4437.
- 13) M. Takahashi, A. Uenishi and Y. Kuriyama : Proc. of International Body Engineering Conference, Auto body Materials, 29 (1997), 1.
- 14) A. Uenishi, M. Suehiro, Y. Kuriyama and M. Usuda : Proc. of International Body Engineering Conference, Auto body Materials, 29 (1997), 59.
- 15) 吉田博司, 上西朗弘, 栗山幸久, 高橋学 : 自動車技術会, 学術講演会前刷集, 73-03 (2003) 20035601, 13.
- 16) 蟹江智文, 宅田裕彦, 磯貝栄志, 吉田亨 : 第54回塑性加工連合講演会講演論文集, (2003), 7.
- 17) A. Kamoulakos : PAM Users Conference in Asia '03 Proceedings, (2003), 63.
- 18) 井上輝明, 中西栄三郎 : 自動車技術会, 学術講演会前刷集, 88-00 (2000) 20005509, 5.
- 19) 吉田博司, 上西朗弘, 栗山幸久, 野村成彦 : 自動車技術会, 学術講演会前刷集, 8-04 (2004) 20045205, 1.

(2004年10月19日受付)