

衝突安全車体設計のための材料性能評価技術

Advanced Evaluation Technologies of Material Properties for Design of Car Body with Enhanced Crash Safety

広瀬 智史*
Satoshi HIROSE

上西 朗弘
Akihiro UENISHI

米村 繁
Shigeru YONEMURA

樋渡 俊二
Shunji HIWATASHI

抄 録

自動車車体の衝突安全設計の実現のため、車体の衝突解析精度が重要となる。衝突解析精度は活用される材料特性に大きく依存するため、特に衝突解析において、変形応力のひずみ速度依存性と、自動車車体の塗装焼付けプロセスで生じる焼付け硬化現象が重要な材料特性となる。開発したそれらの評価技術を紹介した。

Abstract

The accuracy of crash analysis is important for design of car body with crashworthiness and depends on some properties of applied material. Strain rate dependency of flow stress and bake hardenability caused by painting process of car body are of particular significance to crash analysis. Here, developed technologies for evaluation of their properties were introduced.

1. 諸 言

衝突安全とCO₂排出削減を両立するために、ホットスタンピング等の引張強さが1500MPaを超える超高強度の鋼板が車体構造に多用されつつある。しかし、衝突性能は引張強さのみで決まるわけではなく、鋼板が製造・出荷されてから、加工、組立、塗装を経て、構造体として衝突に至るまでの全てのプロセスに関わるため、衝突性能設計上も単なる材料置換とはいえない様々な配慮が必要になる。

設計段階での衝突安全性評価のため、汎用的な有限要素ソフトウェア（以降、FEMと呼称）を利用した衝突解析が広く行われており、最近では、衝突時の車体変形挙動の予測に留まらず、母材^{1,2)}および溶接部破断^{1,3)}をもシミュレーションにより予測し、衝突安全性の予測精度を向上させる取り組みがみられる。一般的な破断予測手法^{4,5)}は、予測される応力やひずみ等の状態変数に基づき破断可否が判断されるため、その予測精度は、入力データの一つである材料特性、すなわち応力-ひずみの関係の測定精度に依存する。さらに、測定したデータは材料モデルを介して衝突解析で考慮されるため、実際の材料特性や種々の測定技術の特徴に基づいた材料モデルを選定する必要がある。

そこで、本報では、衝突解析で特に重要な材料特性の一

つと考えられる、変形応力のひずみ速度依存性と、プレス成形時の加工硬化と塗装プロセスによる焼付け硬化現象に注目した基礎的な検討結果を報告したい。まず、2章ではひずみ速度依存性の高精度評価のための最適な高速引張試験片形状の検討結果について、続く3章ではひずみ速度依存性の発現メカニズム、および衝突解析で妥当と考えられる材料モデルの検討結果について、4章ではプレス・塗装工程による鋼板の降伏応力の異方性について述べる。

2. 超高強度鋼の高ひずみ域での材料特性評価技術

自動車車体の衝突安全性能を解析により高精度に評価するためには、材料特性値、特に通常の引張試験のおよそ100万倍の高ひずみ速度域（1000 s⁻¹）での引張試験結果（応力-ひずみの関係）が重要である⁶⁾。この高ひずみ速度を達成するため、油圧サーボ方式等により引張速度を上げる必要があるが、それだけでは良好な測定精度は確保できない⁷⁾。

試験片に生ずる応力を高精度に評価するため、試験片の弾塑性変形やその他の部位の弾性変形により、変形の波として伝播すること⁸⁾を考慮した、例えば弾性棒方式のような荷重計測手法を採用する必要がある^{9,10)}。なお、計測荷重を試験片の初期断面積で除したものが応力となる。ま

* 鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター 主任研究員 Ph.D. 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

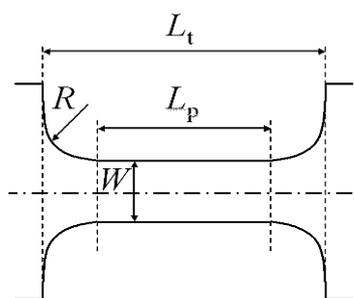


図1 試験片形状
Specimen geometry

た、ひずみの評価方法は試験方式の制約により異なり、例えば弾性棒方式では通常計測される棒端変位の差により試験片に生じる伸びが計測され、ひずみが算出される¹⁰⁾。

一方、測定・算出される高ひずみ速度域での応力・ひずみ値は試験片形状により変化する¹¹⁾。さらに高ひずみ速度域では低ひずみ速度域で無視できた変形の波の伝播、すなわち応力波の伝播の影響を無視できなくなる¹²⁾。そこで、著者らは薄鋼板を対象に、シミュレーションにより高精度応力-ひずみ評価のための試験片形状を検討し、具体的な試験片形状（試験片長さ L_t 、平行部長さ L_p 、幅 W 、肩半径 R （図1））を見出した¹³⁾。さらに、応力波の伝播速度は材料特性により変化することから、材料特性の影響について検討した¹⁴⁾。

2.1 解析条件

汎用的な動的陽解法FEM¹⁵⁾により、弾性棒方式の高速引張試験シミュレーションを実施した。試験片形状として、主要部長さ（図1）を複数変更したモデルを用いた（表1）。また、実際の弾性棒方式での高速引張試験の再現のための境界条件を付与した^{13,14)}。また、Swift + Cowper - Symonds型の構成方程式（式(1)、 σ ：応力、 ϵ_p ：塑性ひずみ、 ϵ_v ：ひずみ速度（ s^{-1} ））を採用した。材料として引張強さにして980MPa級相当の鋼板（表2中の α ）に加え、加工硬化能に大きな差のある590MPa級相当の鋼板（表2中の高加工硬化能材： β 、および低加工硬化能材： γ ）を対象とした。さらに、見出した試験片形状の最適性の確認のため、超高強度鋼相当材（表2中の δ ）での同様な引張試験シミュレーションを実施した。なお、材料 δ で想定される引張強度および一様伸びは、それぞれ約1640MPa、0.05である。

$$\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon_p)^n \left(1 + \left(\frac{\epsilon_v}{X} \right)^{\frac{1}{Y}} \right) \quad (1)$$

ここで K, ϵ_0, n, X, Y は材料定数（表2）である。

表1 試験片形状
Specimen geometries

Thickness (mm)	L_t (mm)	W (mm)	R (mm)
1.4	10 ~ 90	3 ~ 12.5	0.5 ~ 25

表2 材料定数
Material parameters

Material	K (MPa)	ϵ_0	n	X (s^{-1})	Y
α	1650	0.0004	0.14	3.40×10^{11}	6.4
β	1050	0.0020	0.22	5.00×10^6	4.0
γ	900	0.0020	0.12	6.00×10^7	5.0
δ	2000	0.0001	0.05	5.00×10^{12}	7.0

2.2 高速引張試験片が満たすべき条件

弾性棒方式の高速引張試験で試験片形状の満たすべき条件として以下の条件I～条件IVが考えられる。

- 条件I：単軸応力状態の維持
- 条件II：早期平衡状態の達成
- 条件III：試験片中央部以外の早期くびれの回避
- 条件IV：肩半径 R 部を考慮したひずみ評価

条件Iは、低ひずみ速度域での引張試験でも満足すべき条件であり、福井らにより最適条件が検討されている^{16,17)}。本研究の解析による検討の結果、高ひずみ速度域でも同様に重要であり、平行部長さ L_p と幅 W が式(2)の関係を満たすとき、幅方向の応力がほぼ無視でき、軸方向のみの単軸応力状態となることが確認された¹⁴⁾。その他の条件は、高ひずみ速度域での引張試験で特有の条件である。特に条件II、条件IIIはそれぞれ応力波の一つである弾性波、塑性波¹⁸⁾の伝播速度に依存する条件であり、応力波の伝播現象を考慮すべきものである。

前者は弾性波の透過、反射を促進し、試験片内で引張荷重をほぼ均一にさせる条件であり、弾性波の伝播距離、すなわち試験片長さ L_t が小さいほど良好と考えられるが、解析による検討の結果でも同様の傾向が見られた。すなわち式(3)の関係が重要である¹⁴⁾。後者は、変形初期に試験片形状の制約から不可避である試験片中央部以外で生じる変形集中部を、変形中に試験片中央部に移動させる条件である。移動が遅れた場合、そのまま変形集中部が成長し、くびれが試験片中央部以外で発生し、極端に一樣伸びを小さく評価してしまう^{12,19)}。

図2は試験片平行部長さと幅の比（ W/L_p ）がそれぞれ3.4、5.7の場合の引張試験シミュレーションによる相当塑性ひずみ分布の推移であり、不適切な試験片形状の場合、試験片端部付近にくびれが発生してしまうことがわかる¹⁹⁾。

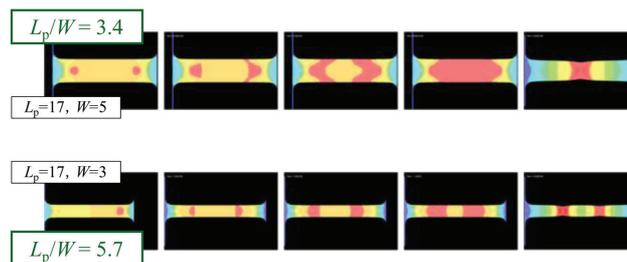


図2 試験片形状および相当塑性ひずみ分布履歴
History of specimen geometry and distribution of equivalent plastic strain

したがって、弾性波と比べ塑性波の伝播速度は極めて小さいことを考慮し、初期の変形集中部を極力試験片中央部に近づける必要がある。解析による検討の結果、条件Iと符合が異なる条件式(4)が、条件IIIの達成のために必要であることが確認された¹⁴⁾。条件IVは弾性棒方式の引張試験特有のものである。伸び計の追従性の問題から²⁰⁾、通常、肩半径R部を含む棒端変位を伸びとして扱うことが多い。したがって、R部に起因したひずみの不均一分布の影響を工学的には無視できるような試験片形状の工夫が必要である。解析による検討の結果、式(5)を満たすとき、実際の材料特性と測定し評価された材料特性がほぼ一致することが確認された¹⁴⁾。

$$\text{条件 I : } L_p / W \geq C_I \quad (2)$$

$$\text{条件 II : } L_t \leq C_{II} \quad (3)$$

$$\text{条件 III : } L_p / W \leq C_{III} \quad (4)$$

$$\text{条件 IV : } C_{IVa} \leq R / L_t \leq C_{IVb} \quad (5)$$

なお、条件I, II, IVの閾値 $C_I, C_{II}, C_{IVa}, C_{IVb}$ は本研究の検討の範囲の材料(α, β, γ)では共通であり、材料特性に大きく依存しないが、条件IIIは異なる閾値 C_{III} となった。条件IIIは塑性波の伝播速度に依存する条件であることから、加工硬化能の相違が影響したものと考えられる¹⁴⁾。近年、適用の進む超高強度鋼は加工硬化特性が小さい場合が多いため、超高強度鋼の高ひずみ速度域での引張試験では条件IIIを満足するような試験片形状を選定する必要がある。

2.3 最適な高速引張試験片形状と超高強度鋼板への適用性

第2.2節の条件式(2)~(5)の閾値 $C_I, C_{II}, C_{III}, C_{IVa}, C_{IVb}$ をそれぞれ1.4, 10, 2, 0.07, 0.12とすると、最適試験片形状範囲は図3の網掛け部で示される。なお、上記閾値はR部の加工限界値を1.0mmと仮定し、かつ加工硬化能が極めて乏しい鋼板と仮定した場合の閾値であり、近年適用の進むホットスタンプ材で十分適用可能な範囲を想定している。

また見出された最適試験片形状の超高強度鋼板への適用可否を確認するため、超高強度相当材(表2中の δ)の高

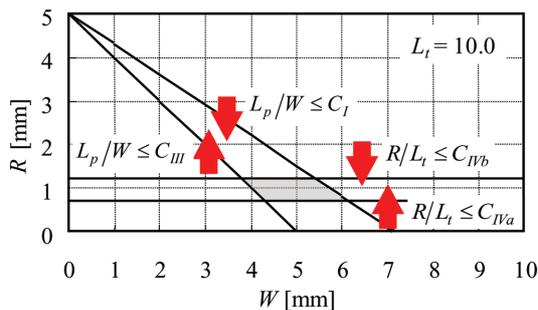


図3 最適試験片形状範囲
Area of appropriate specimen geometry

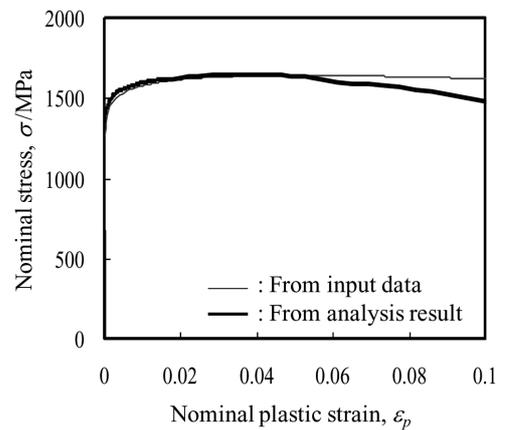


図4 応力-ひずみ関係図
Stress-strain curves

速引張試験シミュレーションを実施した。なお、試験片形状は図3の網掛け部の範囲内のもの、具体的には($L_t (= L_p + 2R), W, R) = (10.0, 4.0, 1.0)$)とした。図4は解析により予測された応力-ひずみ曲線である。出力結果は一樣伸びまで入力された応力-ひずみの関係と一致しており、上記試験片形状は超高強度鋼板に十分適用可能であることが確認できる。

3. 衝突解析での適切な材料モデルの検討

近年、衝突安全性とCO₂排出量低減を目的に、自動車車体の適材適所に軟鋼から引張強さにして980MPaを超える超高強度鋼等、様々な強度の鋼板が適用されてきている。自動車車体の衝突解析精度向上のためには、第2章で述べたようにひずみ速度依存性を高精度に評価しておく必要があるため、まずは種々の鋼板を対象に変形応力のひずみ速度依存性を調査し、さらにひずみ速度依存性のメカニズムの抽出を目的に、材料強化機構との関係を考察した。一般に高強度化は材料への不均質の導入により達成され、固溶強化や析出強化、結晶粒の細粒化、第二相による組織強化など様々なものが利用されているが、本研究では自動車用鋼板の主相であるフェライト相に着目してひずみ速度依存性と材料強化との関係を検討した。

また、車体の衝突変形により部材各部に大ひずみがかかるため、解析条件として入力する材料特性は、広いひずみ速度範囲かつ大ひずみ域までのものを採用する必要がある。通常広く利用されている単軸引張による材料特性評価では一樣伸び以降くびれにより早期破断に至るため、大ひずみ域の加工硬化特性の評価が難しい。そこで、くびれの生じ難い単純せん断試験²¹⁾やFEM解析を援用した単軸引張試験の補正²²⁾という手段を用いて大ひずみ域の加工硬化特性の評価を試みた。加えて、それらの実験・解析結果をもとに変形メカニズムについて検討し、衝突解析において材料挙動の適切な表現が可能な材料モデルについて考察した²³⁾。

3.1 高速引張試験によるひずみ速度依存性評価

3.1.1 供試材のひずみ速度依存性評価

ひずみ速度依存性発現メカニズムの解明を目的に、モデル材料として0.2 mass%Tiを添加しIF (Interstitial Free) 化した鋼をベースに、1 mass%または2 mass%のMn, Siを添加した固溶強化鋼を用いて検討を行った(表3)。供試材は板厚2.0mmまで熱間圧延した後、600℃で60分焼鈍を施した。これらの材料は粒径に若干の相違はあるものの材料強度の上昇はMnまたはSiによる固溶強化が主要因である²⁴⁾。

まず通常の引張試験と、One-bar方式の高速引張試験²⁵⁾により、低ひずみ速度(0.001s⁻¹)域と高ひずみ速度(1000s⁻¹)域の応力-ひずみ関係を測定・算出した。図5にひずみ5%時のひずみ速度1000s⁻¹での変形応力とひずみ速度0.001s⁻¹での変形応力の差をとったものと、ひずみ5%時のひずみ速度0.001s⁻¹での変形応力との関係をまとめたものを示す。変形応力のひずみ速度依存性は準静的な変形応力の増加とともに減少することが分かった。このような挙動は結晶構造に由来するPeierls-Nabarro障壁が固溶原子により生じたひずみ場の影響で変化し、転位の移動を容易化したためと考えられる²⁴⁾。

3.1.2 種々の鋼板のひずみ速度依存性評価

前節と同様に軟鋼から引張強さにして1180MPa級鋼までの種々の実用鋼に対し引張試験を実施し、同様にひずみ速度依存性を整理した(図6)。図中には固溶強化鋼を丸(●)で、硬度測定の結果²⁶⁾から単相鋼と考えられるものを四角(■)で、また複相鋼と考えられるものを三角(▲)で示す。この図から分かるようにほぼフェライト単相鋼と

表3 固溶強化鋼の化学成分
Chemical compositions of solution hardened steels (mass%)

	C	Si	Mn	Al	Ti
IF	0.0016	—	0.10	0.003	0.015
+1at.%Mn	0.0013	0.014	0.97	0.003	0.014
+2at.%Si	0.0014	0.98	0.10	0.003	0.019
+4at.%Si	0.0012	1.97	0.10	0.004	0.023

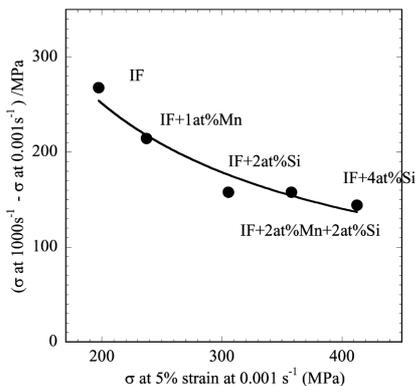
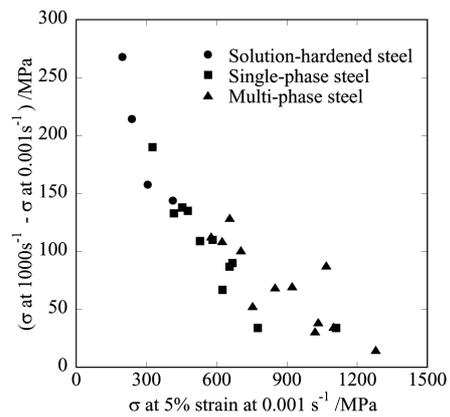
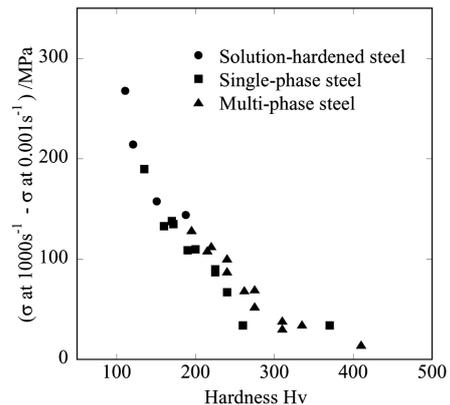


図5 各鋼種のひずみ速度依存性
Strain rate sensitivity of some steels



(a)



(b)

図6 各鋼種のひずみ速度依存性
Strain rate sensitivity of some steels

考えられる変形応力が600MPa未満の鋼では変形応力のひずみ速度依存性と準静的な変形応力とがよく相関するのに対して、いくつかの相からなる高強度鋼では準静的な変形応力は変形応力のひずみ速度依存性の良い指標となりえないことが分かった。

そこで硬度測定の結果を基に複相鋼については軟質相の硬度の平均を見積もった。その硬度は、検討した材料の範囲ではフェライト相の硬度と対応するものと考えられる。このようにして見積もった軟質相硬度を横軸にとり図6(a)のデータを再整理したところ(図6(b))、変形応力のひずみ速度依存性と軟質相の平均硬度との相関が高いことが分かった。この結果はいくつかの相が含まれる複相鋼であってもその高速変形特性を支配するのは第一義的には母相であるフェライト相であることを示している。また同時に複相鋼板は同等の準静的強度を示す単相鋼に比べてひずみ速度依存性が優れることを示しており、DP(Dual Phase)鋼やTRIP(Transformation Induced Plasticity)鋼のような軟/硬質相を用いた組織強化は衝撃吸収部材に適した材料強化手法であると考えられる。

3.2 大ひずみ域の加工硬化特性評価

3.2.1 単純せん断試験による評価

次に、単純せん断試験²¹⁾により大ひずみ域の材料特性評

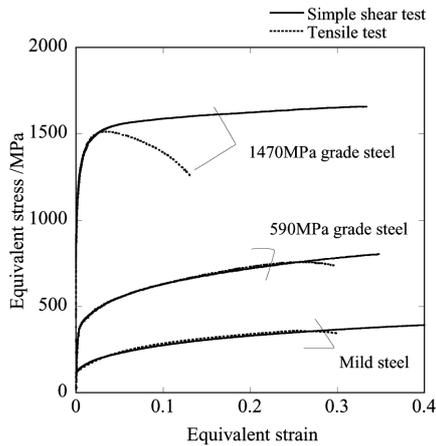


図7 相当応力-ひずみ関係図
Equivalent stress-strain curves

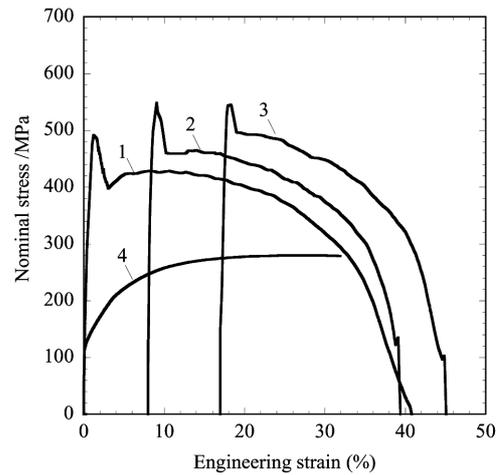
価を行った。3種の材料(軟鋼, 590MPa級鋼, 1470MPa級鋼)について, 単軸引張試験と単純せん断試験を行った後, 単純せん断試験結果については等方硬化の仮定(von Mises 則)の下で相当応力-相当ひずみ関係に変換した。その結果を図7に示す。引張で評価したものに比べ, 単純せん断で評価した物は一般的に一樣伸びの小さい1470MPa級の鋼でも急激な応力低下は見られず単調に応力増加することが分かる。すなわち, 引張試験で評価された材料特性はくびれ等による見かけの応力低下を含むため, 衝突解析に引張試験結果をそのまま入力する方法は実際の材料特性を反映しておらず精度を損なうおそれがあることがわかった。

3.2.2 FEM解析を援用した単軸引張試験の補正による評価

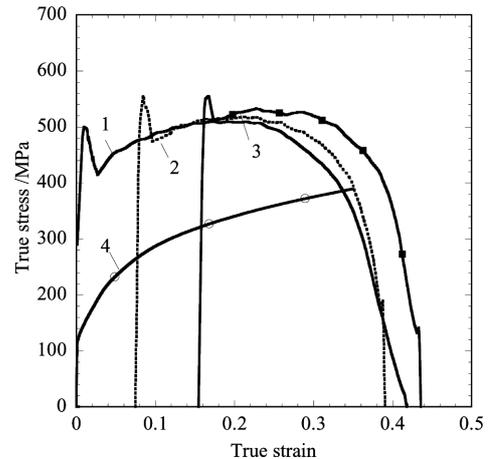
高速引張試験では塑性変形を起因とする発熱²²⁾による試験片内の相対強度変化が生じるため, くびれを早期に誘発し易い。図8(a)に軟鋼の準静的および高速引張試験結果を示す。高速引張については準静的に8%および16%の予ひずみを与えた場合の結果も示してある。変形初期からひずみ速度 $1000s^{-1}$ で変形させた場合, 初期ピーク後すぐに応力が低下している。一方, 予ひずみを与えた場合の曲線は全体として予ひずみがないものに比べて応力が高い側に位置している。このような現象は高ひずみ速度下での早期のくびれの発生による見掛けのものである可能性が高い²⁷⁾。

そこで, 高速引張試験の熱連成解析を援用し, 応力-ひずみ関係へのくびれの影響による見かけの応力低下現象を除いたところ²²⁾, 図8(a)で見られた予ひずみ後の曲線が予ひずみなしの曲線に比べて高い側に位置する挙動はなくなり, 予ひずみの有無に関わらず一つの曲線に漸近していく傾向が見られた(図8(b))。すなわち高速変形においても, くびれの影響を取り除けば変形とともに応力は増加していくことが分かる。

以上の検討結果から, 鋼板の変形特性として, ①材料



(a)



(b)

図8 応力-ひずみ関係図
Stress-strain curves

の高強度化に用いる強化機構に応じて変形応力のひずみ速度依存性は変化する, ② $0.001 \sim 1000s^{-1}$ までのひずみ速度範囲において変形応力はひずみとともに増加する, ことをその特徴として挙げるができる。したがって, 衝突解析に使用する材料モデルには種々のものが提唱されているが, 現状の解析コードの制約や試験方法の実用性を考慮すると, 加工硬化特性としてSwift則を, ひずみ速度依存性としてCowper-Symonds則を用いた式(1)で近似することが衝突解析に用いる材料モデルとして妥当と考えられる。

4. 車体の塗装焼付けプロセスでの材料特性変化

プレス加工による材料の加工硬化と板厚変化が衝突性能に影響をおよぼすことはすでによく知られており, それを反映させるための成形-衝突連成解析に関する報告も数多くなされている²⁸⁾。さらに, 塗装焼付け硬化が期待できる鋼板については, それを衝突解析に反映させる手法が必要である。塗装焼付け硬化とは, プレス加工によって導入された可動転位に, 鋼中の炭素が塗装焼付け温度で拡散し, 可動転位を固着することで再降伏に必要な応力が上昇する

現象と考えられている。従来、外板パネル部品の耐デント性を向上させる技術として、焼付け硬化型鋼板が利用されているが、車体骨格用高強度鋼板でも、鋼種、製造方法によっては高い焼付け硬化を示すことがある。自動車車体の高強度化や軽量化のための設計を効率的に進めるには、プレスによる加工硬化や塗装による焼付け硬化 (BH: Bake hardening) のような材料の硬化挙動を高精度に予測することが必要である。

一般に、完全に焼鈍された多結晶単相金属の初期異方性は結晶方位分布が主要因であるが、ある程度大きなひずみを導入した材料の塑性異方性は結晶方位の変化よりも変形とともに結晶粒内部に生成する転位組織の影響が主要因であることが知られている²⁹⁾。そこで、Teodosiuら³⁰⁾は、ひずみ経路変化下での粒内セル組織の観察を基に、半現象論的ながら転位組織に基づく異方性硬化モデルを開発し、直交経路での交差硬化やBauschinger効果の高精度な予測を可能にした。さらに、鈴木ら³¹⁾は工業的に広く用いられている汎用有限要素コードにTeodosiuモデルを導入し、板材成形シミュレーションの精度が改善された事例を得ている。

一方、BH量のひずみ経路依存性に関する過去の知見は、時効による成形性の変化を念頭に置いた現象論的な報告にとどまり³²⁾、ひずみ経路変化ともなう加工誘起異方性とBHの異方性の特徴を関連づけて検討がなされていない。そこで、ここではBH性を示す鋼板に単軸引張り予ひずみを加え、その単軸引張り降伏応力の面内異方性が熱処理前後でどのように変化するか調査し、プレス時の加工履歴と塗装工程での焼付け硬化を考慮した衝突解析手法について検討した³³⁾。

供試材は、板厚0.7mmの340MPa級BH鋼板で、図9のとおり1次変形として圧延方向に2%、6%の引張りを施した後、2次変形として1次引張方向から15°おきに0°~90°までの引張試験を実施した(図9中の α)。さらに、1次変形後に170°Cで20分間の熱処理を施してから15°おきの2次引張試験を実施することにより変形経路変化下でのBH特性を調査した。

単軸引張りによる予変形後の降伏応力の面内異方性を図10³⁴⁾に示す。その結果、加工により鋼板の降伏応力は全体的に増加し、かつ強い異方性を示すようになるが、焼付け処理後のBHは予変形材の降伏応力の異方性を等方化することが明らかになった。したがって、塗装焼付け後の自動車車体の衝突解析においては、材料構成則とし新たな材料

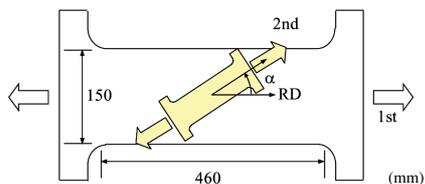


図9 実験方法
Experimental procedure

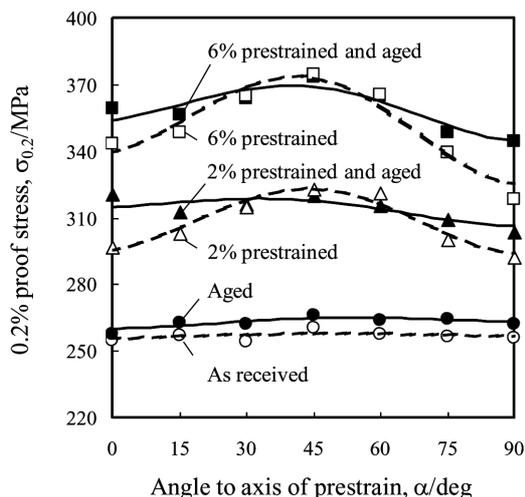


図10 2段階ひずみ経路変化下での加工硬化と焼付け硬化の異方性³⁴⁾
Anisotropy of proof stress in a prestrained and aged bake-hardenable steel

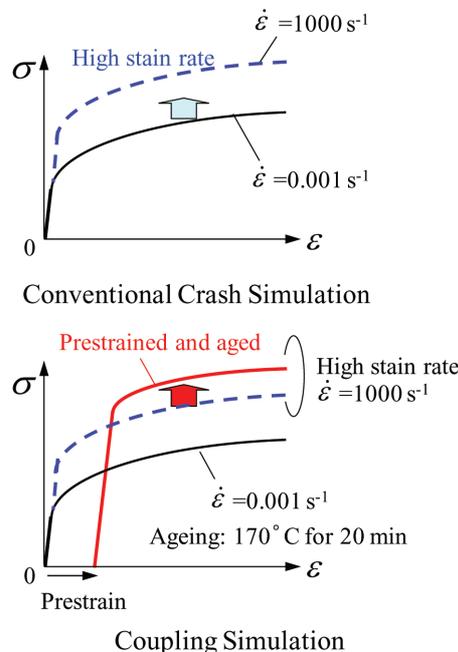


図11 加工履歴と焼付け硬化を考慮した衝突解析手法
Crash analysis method for prestrained and aged steel structure

構成則を展開することなく、これまで工業的に広く用いられてきた等方硬化則を用いて、一般的な方法で測定した焼付け硬化量を素材の加工硬化曲線に一律に加算するだけでより高い近似精度が期待できる(図11)。ただし、焼付け硬化量が少ない軟鋼板では、ひずみ経路変化により塑性異方性が顕著に表れるため、例えば、Teodosiuモデル³⁰⁾のように異方硬化挙動を表現できる材料構成則の必要性が高まることを付言しておく。

5. 結 言

本報では、自動車車体の衝突安全設計に不可欠な衝突解

析での予測精度向上に向けた材料の視点からの取り組みとして、引張強度が1 500MPaを超える超高強度鋼での正確なひずみ速度依存性評価のための試験片形状の最適化、ひずみ速度依存性の発現メカニズムと衝突解析に適用できる近似精度の高い材料モデル、および塗装工程による焼付け硬化特性の異方性、について紹介した。

今後もこのような材料の視点からの取り組みを継続し、破断予測等、高度化していくと予想される衝突安全設計に関するニーズに対応していきたい。

参考文献

- 1) 横山敦士 ほか:自動車技術. 65 (1), 59 (2011)
- 2) 米村 繁 ほか:自動車技術会講演前刷集. 21 (07), 1 (2007)
- 3) 吉田博司 ほか:材料の衝撃問題シンポジウム講演論文集. 8, 65 (2005)
- 4) Marciniak, Z. et al.: Mechanics of Sheet Metal Forming. Edward Arnold, 1992, p. 62
- 5) Lemaitre, J.: A course on damage mechanics. Berlin, Springer-Verlag, 1992
- 6) Uenishi, A. et al.: IBEC'96 Interior & Safety Systems. 1996, p. 89
- 7) 上西朗弘 ほか:塑性加工シンポジウム. 258, 31 (2007)
- 8) 林 卓夫 ほか:衝撃工学. 東京, 日刊工業新聞社, 1988
- 9) Kolsky, H.: Proc. Phys. Soc. B62, 676 (1949)
- 10) Hopkinson, B.: Phil. Trans. A. 213, 437-452 (1914)
- 11) Rodriguez, J. et al.: J. De Physique IV, 4 (8), C8-83 - C8-88 (1994)
- 12) 作井誠太 ほか:日本金属学会誌. 28 (9), 537 (1964)
- 13) 広瀬智史 ほか:塑性加工春季講演会講演論文集. 141, (2008)
- 14) 広瀬智史 ほか:塑性加工連合講演会講演論文集. 59, 413 (2008)
- 15) JRI Solutions Ltd: LS-Dyna ver.971 User's Manual. Volume I. 2007
- 16) 福井伸二 ほか:理研報告. 41 (1), 5 (1965)
- 17) 吉田清太 ほか:理研報告. 39 (3), 137 (1963)
- 18) von Karman, T., Duwez, P.: J. Appl. Phys. 21 (8), 987 (1950)
- 19) 福井伸二 ほか:東京大学航空研究所集報. 3 (6), 361 (1963)
- 20) ISO 26203-1:2010, Tensile testing at high strain rates — Part 1: Elastic-bar-type systems
- 21) 鈴木規之 ほか:塑性と加工. 46 (534), 636 (2005)
- 22) Uenishi, A. et al.: Int. J. Plasticity. 20, 915 (2004)
- 23) 上西朗弘 ほか:自動車技術会講演前刷集. 15 (9), 17 (2009)
- 24) Uenishi, A. et al.: Acta Materialia. 51, 4437 (2003)
- 25) Kawata, K. et al.: Institute of Physics, Conference Series. 1979
- 26) 上西朗弘 ほか:塑性と加工. 46 (534), 646 (2005)
- 27) Kuroda, M. et al.: Int. J. Solids and Structures. 43, 4465 (2006)
- 28) 樋渡俊二 ほか:自動車技術会講演前刷集. 21 (7), 13 (2002)
- 29) Rauch, E.F. et al.: Mater. Sci. Eng. 113, 441 (1989)
- 30) Teodosiu, C. et al.: Proc. Numiform'95. 1995, p. 173
- 31) 鈴木規之 ほか:塑性と加工. 46 (534), 636 (2005)
- 32) Jun, G., Hosford, W.F.: Metall. Trans. A. 17A, 371 (1986)
- 33) 米村 繁 ほか:自動車技術会講演前刷集. 15 (9), 17 (2009)
- 34) 米村 繁 ほか:鉄と鋼. 92 (9), 516 (2006)



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.
千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511



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



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



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