

(論文)

衝突解析における塑性異方性と延性破壊挙動の影響

中島伸吾*¹・幸重良平*¹・井上功之*²

Effect of Plastic Anisotropy and Ductile Fracture Behavior in Crush FEM

Shingo NAKAJIMA・Ryohei YUKISHIGE・Katsuyuki INOUE

要旨

近年の自動車ボデーではアルミ材やホットスタンプ材の利用が進んでいる。アルミ圧延材には塑性異方性があり、プレス成形CAEでは塑性異方性降伏関数の適用が広がっている。そこでハット型試験体による軸圧壊試験と塑性異方性を考慮した軸圧壊解析を行い、その影響について調べた。その結果、塑性異方性を考慮した降伏関数を用いることで軸圧壊の荷重挙動の予測精度が向上することを確認した。また炭素量の異なる三種類のホットスタンプ材を用いたハット型試験体の軸圧壊試験を行い、炭素量が高くなるとエネルギー吸収性能が低下することを確認した。さらに破断モデルを用いた軸圧壊解析から炭素量が高いケースでは座屈変形により試験体が大きく割れ、エネルギー吸収性能が低下することが分かった。

Abstract

Recently, aluminum and hot-stamped materials are increasingly being used in automotive bodies. Rolled aluminum has plastic anisotropy, and the plastic-anisotropy yield function is widely applied in press-forming CAE. Hence, axial crush tests and analyses have been performed using hat-shaped specimens to investigate the effect of plastic anisotropy. The results have confirmed that using a yield function considering plastic anisotropy has improved the accuracy of predicting the load behavior of axial crushing. In addition, axial crush tests of hat-shaped specimens using three types of hot-stamped materials with different carbon contents have confirmed that the energy absorption performance deteriorates with increasing carbon content. Furthermore, axial crushing analysis using a fracture model has revealed that, with high carbon content, the specimens have been significantly cracked due to buckling deformation, resulting in a decline in energy absorption performance.

検索用キーワード

アルミ材, ホットスタンプ材, 衝突解析, 塑性異方性, 降伏関数, 破断モデル

まえがき = 近年の自動車ボデーでは電動化対応のため軽量化が図られており、アルミ材やホットスタンプ材の利用が進んでいる。アルミ材ではパネル系のほかに骨格系部材への採用が広がると考えられ¹⁾、ホットスタンプ材はその強度を活用して骨格系部材に採用が広がっている²⁾。

アルミ圧延材などでは塑性異方性があることが知られており、プレス成形CAE (Computer Aided Engineering) の分野では塑性異方性を考慮した降伏関数の適用が広がっている³⁾。また近年では衝突解析においても適用事例が報告されている⁴⁾。そこでアルミ材の塑性異方性が衝突変形挙動に及ぼす影響を調べるために、軸圧壊試験と塑性異方性を考慮した有限要素法 (FEM:Finite Element Method) による軸圧壊解析を実施した。

ホットスタンプ材においては、曲げ圧壊時の耐割れ性が炭素量と相関があり、炭素量が増加すると耐割れ性は低下することが示されている⁵⁾。ここでは炭素量の異なるホットスタンプ材を用いて軸圧壊試験を行い、エネルギー吸収性能への影響を調査するとともに、破断特性や破壊状況を検討するためFEMによる軸圧壊解析を実施した。

1. アルミ材の軸圧壊挙動の調査

アルミ圧延材のプレス成形においては塑性異方性の影響が確認されており、プレス成形解析では塑性異方性降伏関数を用いることで予測精度の向上が図られている⁶⁾。そこで軸圧壊に対して塑性異方性の影響を確認するため、6000系アルミ圧延材でハット型試験体を作製し、軸圧壊試験を実施した。またFEMによる軸圧壊解析を行い、塑性異方性降伏関数の影響について調べた。

1.1 軸圧壊試験

6000系アルミ圧延材 (板厚2.0 mm) を用いて軸圧壊試験用のハット型試験体を作製した。試験体は断面50 mm × 50 mm, 長さ200 mm, 曲げR5 mmであり、上下板をFSWで接合し、天板地板を試験体端部に溶接接合した。また試験体軸方向を圧延方向0度 (試験体L) および90度 (試験体T) とした二種類を作製した。軸圧壊試験状況を図1に示す。軸圧壊試験では試験速度1 mm/secとして準静的な試験を実施し、荷重とストロークを取得した。

試験により得られた荷重ストローク線図を図2に示す。最大荷重は試験体Lで119 kN, 試験体Tで109 kN とほぼ同等であるが、破断後の荷重挙動がやや異なっ

*1 (株)コベルコ科研 技術本部 計算科学センター *2 (株)コベルコ科研 技術本部 材料ソリューションセンター

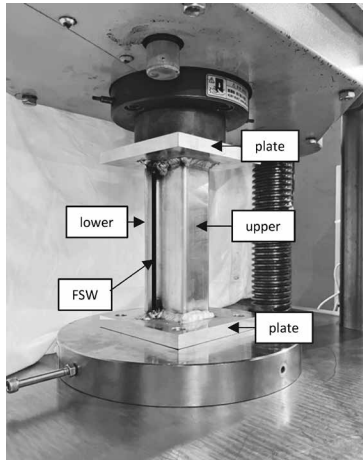


図1 ハット型試験体と軸圧壊試験状況
Fig.1 HAT specimen and axial crushing test condition

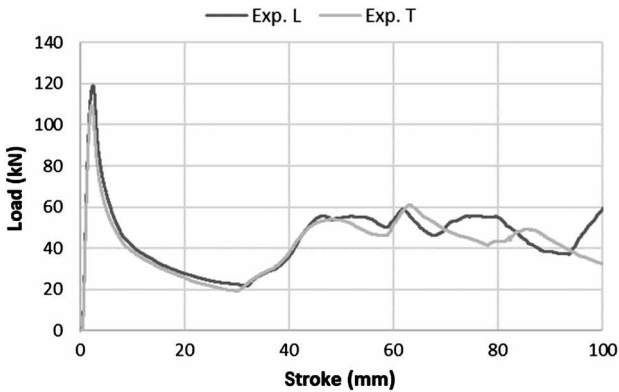


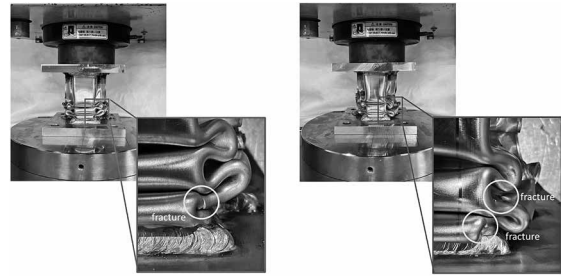
図2 軸圧壊試験の荷重ストローク線図
Fig.2 Load-stroke diagram of axial crushing test

いることが確認できる。これは試験途中でハット部の上下板間が剥離したタイミングの違いによる差が表れたものと考えられる。試験後（ストローク約100 mm）の外観写真を図3に示す。試験体Lと試験体Tともに破断箇所は蛇腹変形部であり、破壊の様子には大きな差は見られなかった。これらのことから、今回作製した試験体においては塑性異方性による最大荷重や破断部位などへの大きな影響は確認されなかった。

1.2 軸圧壊解析

軸圧壊解析で用いるFEMモデルはハット部にはシェル要素を用い、メッシュ寸法は1 mm、弾塑性体でモデル化した。天板地板はソリッド要素を用いて弾性体でモデル化した。また試験機の治具は剛体でモデル化した。使用したソフトはAnsys LS-DYNAであり、解析手法としては動的陽解法を用いた。アルミ板の材料モデルは、等方モデルとしてミーゼスの降伏関数、塑性異方性モデルとして高次降伏関数である吉田6次⁷⁾を用いた。吉田6次では軸方向を圧延方向0度、90度の2ケースとした。吉田6次降伏関数のパラメータについては、単軸引張試験結果と2軸引張試験結果で得られた降伏曲面⁶⁾を用いて、CEM研究所のMATYLDを用いて求めた。2軸引張試験で得られた降伏曲面とミーゼスおよび吉田6次の降伏関数の比較を図4に示す。吉田6次はミーゼスよりも実際の降伏曲面を再現できていることがわかる。

解析により得られた荷重ストローク線図を図5に示



(a) Specimen L (b) Specimen T

図3 軸圧壊試験後の変形破壊状況の比較
Fig.3 Comparison of deformation and fracture after axial crushing test

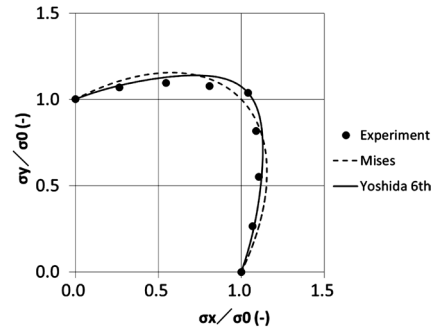


図4 測定した降伏曲面と降伏関数の比較
Fig.4 Comparison of measured stress points and yield function loci

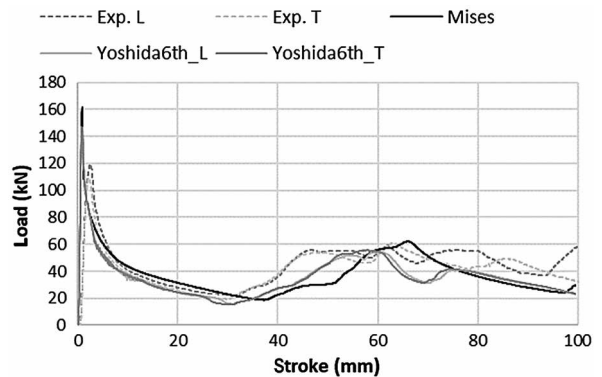


図5 軸圧壊試験とFEMの荷重ストローク線図の比較
Fig.5 Comparison of load-stroke diagrams between axial crushing test and FEM

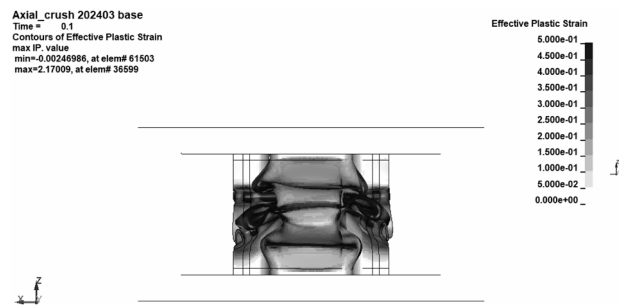


図6 相当塑性ひずみ分布図（ミーゼス）ストローク100 mm
Fig.6 Plastic strain contour at stroke 100 mm (Mises)

す。また圧壊後（ストローク100 mm）の変形状態としてミーゼスの結果を図6に示す。なおコンターは相当塑性ひずみを表している。なおその荷重挙動はミーゼスでも吉田6次でもほぼ同じであり、最大荷重は実験値よりも高めとなっている。その後ストローク40 mm付近から再度荷重が立ち上がる。これはハット部の蛇腹変

形部が重なる時に発生する荷重であり、立ち上がりのタイミングは試験では30 mm、ミーゼスでは50 mm、吉田6次では40 mmであり、吉田6次の方が試験結果に近い。またミーゼスでは70 mm付近で極大値をもつが、吉田6次では60 mmと75 mmで極大値があり、試験の荷重挙動に近い結果となっている。

変形初期（ストローク10 mm）での相当塑性ひずみ分布の比較を図7に示す。ミーゼスでは中央で座屈開始しているが、吉田6次では圧延方向0度、90度のいずれも試験体下側で座屈開始しており、軸圧壊試験の圧壊状況と類似している。塑性ひずみ量はミーゼスでは吉田6次よりも稜線（りょうせん）部で高くなっているが、応力三軸度（ $= -\text{静水圧応力} / \text{ミーゼス相当応力}$ ）分布を確認したところ稜線部の座屈変形は等二軸応力状態であった。図4から等二軸応力状態（応力比1:1）においてミーゼスは実測および吉田6次と比較して降伏応力が低いため塑性ひずみが高くなったと考えられる。

変形中期（ストローク50 mm）での変形状態と相当塑性ひずみ分布の比較を図8に示す。吉田6次では座屈変形部が中央より下側であるため、ハット部の下板が折りたたまれて蛇腹変形の二段目ができつつある。いっぽうでミーゼスでは下板が折りたたまれている状態であり蛇腹変形の一段目途中となっている。この変形状態の差が荷重極大値が表れるストローク量の違いとなったと考えられる。

以上のことから、塑性異方性を考慮すること（吉田6

次）で変形状態が実際に近づいており、アルミ材による軸圧壊挙動の予測精度を向上させるためには、実際の降伏曲面を精度よく再現できる塑性異方性降伏関数を用いることが一つの方法であることが示された。

2. ホットスタンプ材の軸圧壊挙動の調査

一般的にホットスタンプ材では炭素量が増加するほど強度は上がるが、韌性（じんせい）が低下することが知られており、自動車の骨格系部材に採用する場合にはエネルギー吸収性能の確認が重要である。そこで、ホットスタンプ模擬材でハット型試験体を作製し、そのエネルギー吸収性能が炭素量によってどの程度影響を受けるか、軸圧壊試験で確認を行った。また破断特性を考慮した軸圧壊解析を行い、破壊挙動の違いについて比較した。

2.1 ホットスタンプ材の作製

ホットスタンプ材をVIF（真空誘導炉（Vacuum Induction Furnace））溶製し、板厚1.2 mmの冷延鋼板を作製した。炭素量は0.2, 0.3, 0.4% Cの三種類とした。化学成分を表1に示す。ホットスタンプ工法の模擬として、加熱炉により930℃で300秒加熱後にダイクエンチによる冷却を行った。母材組織がほぼマルテンサイト組織となっていることを組織観察により確認している。試作板の機械的特性を表2に示す。単軸引張試験における破断伸びはいずれも同等である。また破断特性を取得するために三種類（せん断、切欠き付き単軸引張、球頭張り出し）の破断特性試験を実施した。

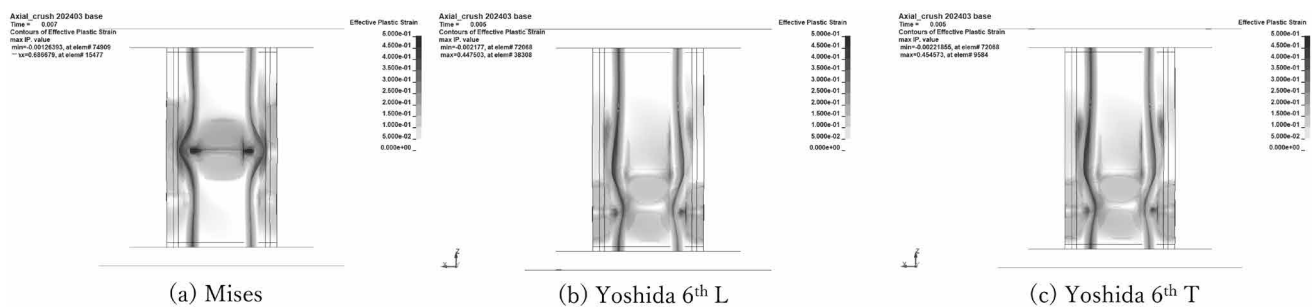


図7 相当塑性ひずみ分布の比較 ストローク10 mm
Fig.7 Comparison of plastic strain contour at stroke 10 mm

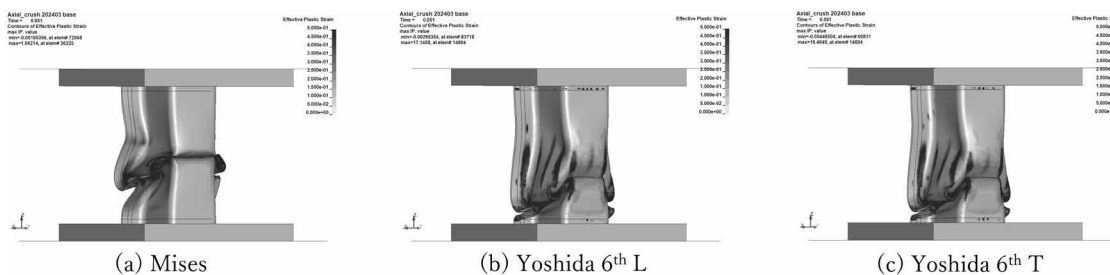


図8 相当塑性ひずみ分布の比較 ストローク50 mm
Fig.8 Comparison of plastic strain contour at stroke 50 mm

表1 ホットスタンプ材の化学成分

Table 1 Chemical composition of hot stamped steel

Material	Composition (wt%)						
	C	Si	Mn	Cr	Al	Ti	B
0.2%C	0.192	0.20	1.21	0.16	0.036	0.020	0.0018
0.3%C	0.290	0.19	1.25	0.17	0.041	0.022	0.0015
0.4%C	0.400	0.20	1.18	0.16	0.036	0.020	0.0017

表2 熱処理後の機械的特性

Table 2 Mechanical properties after heat treatment

Material	0.2%YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)
0.2%C	957	1,349	6.8
0.3%C	1,148	1,698	6.6
0.4%C	1,317	2,087	6.7

2.2 軸圧壊試験

炭素量の異なる三体の軸圧壊試験用ハット型試験体を作製した。ハット部は断面50 mm×50 mm、長さ200 mm、曲げR5 mmとして、上下板をスポット溶接で接合した(図9)。またハット部端部に天板・地板をアーク溶接した。軸圧壊試験では試験速度1 mm/secとして準静的な試験を実施し、荷重とストロークを取得した。

得られた荷重ストロークとエネルギー吸収量の推移を図10に示す。0.2, 0.3%Cではほぼ同等の吸収エネルギー量となるが、0.4%Cでは最大荷重発生後に荷重は低下したままとなり、エネルギー吸収量はほとんど増加していない。ストローク90 mmでの変形状態の比較(図11)からは0.4%Cではハット部が大きく割れていることが確認される。0.2%Cではハット部が蛇腹変形し、0.3%Cでは蛇腹変形の途中でハット上下板の接合部付近で破断している。

蛇腹変形となる部位では平面ひずみ状態と考えられることから、破断特性取得のために実施した切欠き付き単軸引張試験(平面ひずみ状態)における破断伸びと軸圧壊試験でのエネルギー吸収量の炭素量による変化を図12で比較した。エネルギー吸収量は0.4%Cで急激に低下しているが、破断伸びはほぼ直線的に低下してお

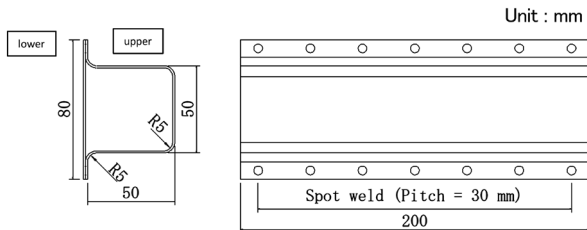


図9 ハット部の形状
Fig.9 Dimension of hat shaped specimen

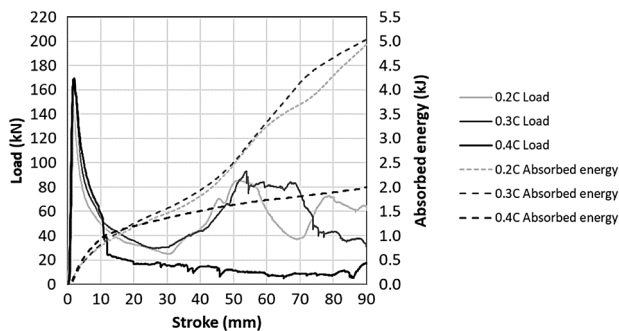


図10 荷重ストロークとエネルギー吸収量の推移
Fig.10 Load-stroke and absorbed energy diagram

り、切欠き付き単軸引張試験で得られた破断伸びとエネルギー吸収量の相関が弱いことが分かる。

2.3 軸圧壊解析

軸圧壊解析のFEMモデルはハット部にはシェル要素を用い、メッシュ寸法は1 mm、弾塑性体でモデル化した。天板地板はソリッド要素を用いて弾性体でモデル化した。また試験機の治具は剛体要素でモデル化した。使用したソフトはSIMULIA Abaqus/Explicitであり、解析手法としては動的陽解法を用いた。三種類のホットスタンプ材の材料モデルは等方弾塑性体を仮定してミーゼスの降伏関数を用いた。延性金属の破断モデルは様々なモデルが提案されており、衝突解析においてはH. Hooputrara⁸⁾やY.Baiら⁹⁾の事例が知られている。ここでは応力三軸度を基準としたY.Baiらのモデルを用いた。破断モデルのパラメータは四種類(せん断、単軸引張、切欠き付き単軸引張、球頭張り出し)の破断特性試験から求めた。軸圧壊解析の結果得られた荷重ストローク線図とエネルギー吸収量の推移を図13に、ストローク90 mmでの変形状態の比較を図14に示す。いずれもほぼ実験での荷重挙動の推移を再現できている。変形破壊状況については、0.2%Cでは蛇腹変形し、0.3%Cでは蛇腹変形の途中でハット部が部分的に破壊し、0.4%Cでは蛇腹変形せずにハット部が大きく破壊し、およそ試験結果と同様となった。

ストローク50 mm付近の変形状態の比較を図15に示す。0.3%Cでは割れは一部にとどまっているが、0.4%Cでは座屈した部位が大きく割れている。そのため0.4%Cでは蛇腹変形せずにエネルギー吸収量が増加しなかったと考えられる。

以上の結果から、軸圧壊でのエネルギー吸収性能を予

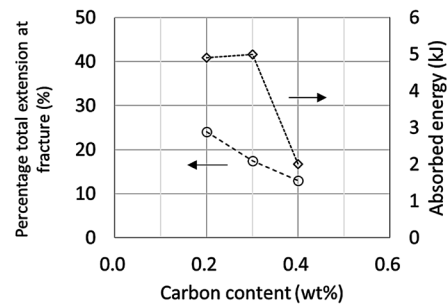


図12 エネルギー吸収量と平面ひずみ状態での破断伸びの炭素量との相関
Fig.12 Absorbed energy and total extension at fracture in plane strain vs carbon contents

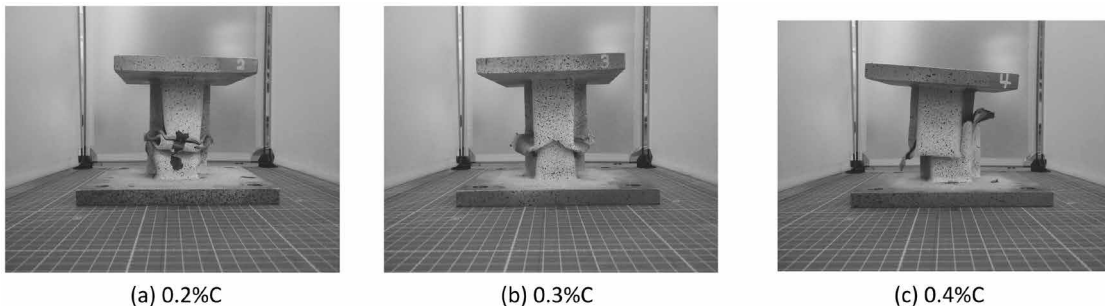


図11 軸圧壊試験後の変形破壊状況の比較 ストローク90 mm
Fig.11 Comparison of deformation and fracture after axial crushing test at stroke 90 mm

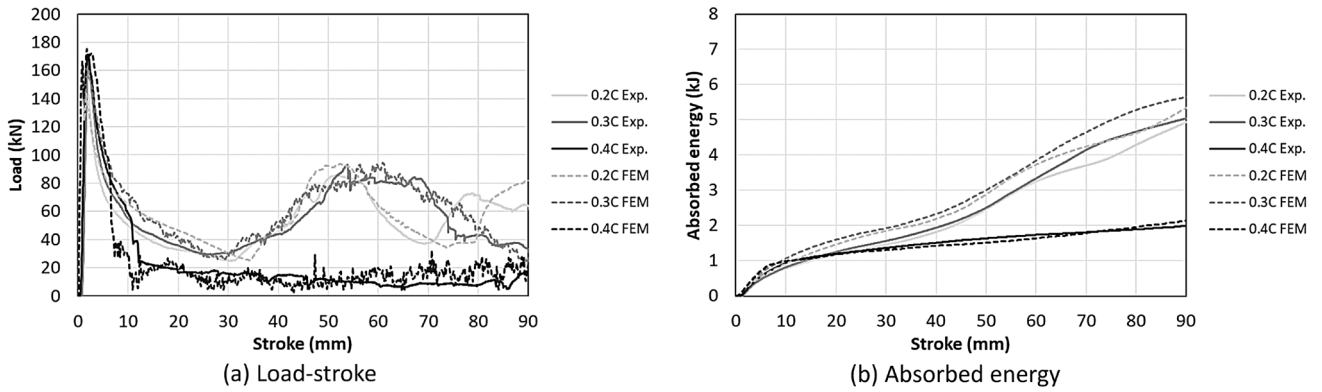


図13 軸圧壊試験とFEMの荷重ストロークおよびエネルギー吸収量の推移
 Fig.13 Load-stroke and absorbed energy in axial crushing test and FEM

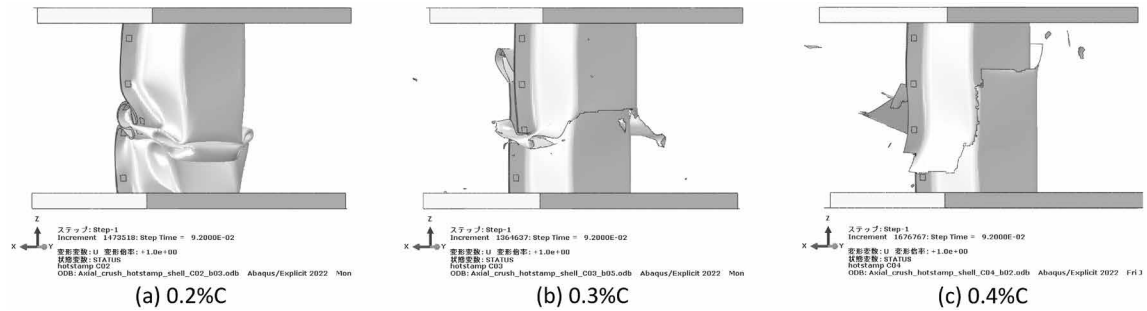


図14 変形状態の比較 ストローク90 mm
 Fig.14 Comparison of deformation at stroke 90 mm

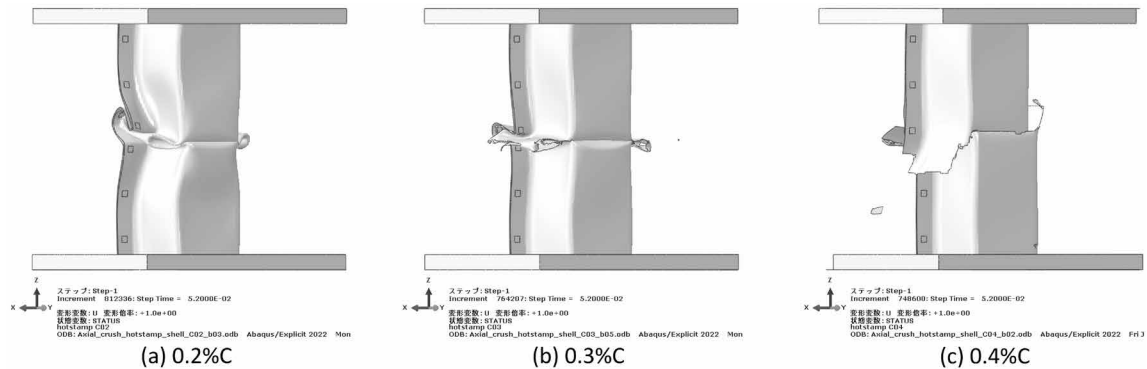


図15 変形状態の比較 ストローク50 mm
 Fig.15 Comparison of deformation at stroke 50 mm

測するには、様々な試験片形状による破断特性試験結果から構築される破断モデルを用いた解析検討が必要と考えられる。またこの解析技術の活用として、必要な性能を満たす機械的特性や破断モデルパラメータをパラメータスタディにより推定し、ホットスタンプ材の炭素量などを試作前に検討することなどが想定される。

むすび=ハット型試験体を用いた軸圧壊試験をアルミ材とホットスタンプ材で実施し、合わせて軸圧壊解析との比較検討を行った。その結果、アルミ材に対しては塑性異方性を考慮することで最大荷重後の荷重挙動の予測精度が向上した。またホットスタンプ材に対しては破断モデルを用いることで、実際の割れ挙動を再現し炭素量が増加したときのエネルギー吸収量の変化を予測できた。今後も衝突解析における変形破壊挙動の予測精度向上のため、材料モデルや破断モデルの精度向上の取り組みを

継続していく考えである。なお本稿は著者らが発表した文献 [10, 11] を基に追加検討したものである。

参考文献

- 1) 櫻井健夫. 軽金属. 2021, 第71巻, 第7号, p.283.
- 2) 齋藤和也. まてりあ. 2014, 第53巻, 第12号, p.584.
- 3) 濱崎洋. 軽金属. 2015, 第65巻, 第11号, p.536.
- 4) C.P. Kohar et al. Int. J. Solids and Structures. 2017, Vol.128, p.174-198.
- 5) 内藤純也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.69.
- 6) 桑原利彦ほか. 軽金属. 2015, 第65巻, 第5号, p.164.
- 7) F. Yoshida et al. Int. J. Plasticity. 2013, Vol.45, p.119.
- 8) H. Hooputra et al. Int. J. Crashworthiness. 2004, Vol.9, No.5, p.449-464.
- 9) Y. Bai et al. Int. J. Fracture. 2010, Vol. 161, No.1, p.1-20.
- 10) 幸重良平ほか. 自動車技術会秋季大会学術講演会予稿集. 2023, No.90-23.
- 11) 井上功之ほか. 自動車技術会秋季大会学術講演会予稿集. 2023, No.89-23.