

# 厚手鋼板の材料特性と成形性評価技術

## Material Properties and Evaluation of Formability of Thick Sheet Steel for Sheet Forging

佐藤 浩一\*  
Koichi SATO

橋本 浩二  
Koji HASHIMOTO

吉田 博司  
Hiroshi YOSHIDA

### 抄 録

自動車は環境問題を背景とした軽量化という課題に直面しており、これらを解決するために車体のみならず、ミッション・パワートレインに使用される鋼材の高強度化およびニアネットシェイプ化が進展している。そのため、従来の棒鋼材の冷間鍛造による製法だけでなく厚板材を主体とした、いわゆる板鍛造加工による成形が近年増加している。厚手鋼板の材料特性及び基礎的な機械特性を紹介するとともに、板厚変動を伴う厚手鋼板の加工性評価に対し、3次元局所分岐理論を導入し、その有効性について述べた。

### Abstract

Automotive industry has been facing the challenge of body-lightweight against the background of environmental issues. Near-net-Shape and High-Strength-Steel has been progress in order to solve these problems, for which are being deployed the mission and power train as well as Body-in-white. Therefore, thick steel plate is used for cold forging process not only by the steel bar and rod, so called the "Sheet Forging" which has been an increase in recent years. In this paper, it will be introduced the mechanical properties and the basic material properties of thick steel plate, the evaluation of formability of thick steel plate with thickness variation plate, and also introduced the three-dimensional local bifurcation theory with its effectiveness.

## 1. 諸 言

自動車は環境問題を背景とした軽量化という課題に直面しており、これらを解決するために車体のみならず、ミッション・パワートレインに使用される鋼材の高強度化およびニアネットシェイプ化が進展している。近年、従来の棒鋼材による冷間鍛造による製法だけでなく厚板材を主体とした、いわゆる板鍛造加工による部品が増加している。板鍛造加工は、ニアネットシェイプによる切削しろの低減や増減肉による材料歩留まりの向上などのコスト削減効果に加え、高精度・高付加価値化が図られる<sup>1,2)</sup>。

厚手鋼板の鍛造成形においては、材料、金型形状、工程設計の各検討時に、FEM解析を用いた評価が非常に有効である。しかし、破断限界評価および対策を実施する際には、破断のタイミングのみならず、破断形態、破断方向を含む評価が必要であると考えられる。

本報では板厚4mmを超える厚手鋼板に対し、鍛造加工に要求される材料特性及びその選定に当たって留意する点などについて述べる。さらに、複雑な変形形態となる鍛造

成形にも対応可能な3次元局所分岐理論を用いた成形限界評価技術についても紹介する。

## 2. 板鍛造加工に要求される材料特性

板鍛造加工の工法によっては従来の深絞り加工に加え、圧縮加工、張り出し加工、伸びフランジ加工、バーリング加工、曲げ加工などが組み合わされることになり、適用材料には加工法に応じた特性が要求される<sup>3,4)</sup>。

表1に材料に要求される重要な材料特性を簡便にまとめて示す。また、材料に要求される特性は加工法ごとに異なる

表1 板鍛造における重要な材料特性  
Important factor of material properties in sheet forging

Material property	Effectiveness
Hardness-reduction	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduction of tool damage and press force</li> <li>• Hardness after quenching</li> </ul>
Reduction of in-plain anisotropy	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improvement of yield and roundness</li> <li>• Eccentricity, scatter-reduction in quenching</li> </ul>
Elongation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improvement of formability</li> </ul>
Stretch flange-ability	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improvement of formability</li> </ul>

\* 名古屋技術研究部 主任研究員 博士(情報科学) 愛知県東海市東海町5-3 〒476-8688

り、深絞り加工では伸びや $r$ 値（ランクフォード値）、圧縮加工では材料の塑性流動性、張り出し加工では伸びや $n$ 値（加工硬化指数）、伸びフランジ性やバーリング性では $\lambda$ 値（穴広げ率）や局部伸び、曲げ成形では局部伸びが重要となる。

部品強度が必要な部品には、比較的強度の高い材料を用いていた鍛造加工を施し、そのまま用いるか、または難加工部品の場合には、低炭素鋼系の加工性の優れた材料を用いて加工を行い、加工後に浸炭や窒化処理を施すこともある。さらに焼入れ処理が必要な場合には高炭素鋼板を用いて加工後に熱処理を施すことも行われる。

## 2.1 中厚板の高加工性熱間圧延鋼板及び高強度熱間圧延鋼板

板鍛造工法は、自動車用駆動系部品やトランスミッション部品など、さまざまな部品の加工に適用されている。従来の深絞りや張り出しに対して、板鍛造成形では素板の増減肉を行うために、“据込み”や“押し出し”、“しごき”といった工法が適用される。加工も、多工程による順送加工<sup>1)</sup>や多軸プレス機を用いて工程省略を目指した工法<sup>2)</sup>など、多岐に渡る。

これら工法に対して、適用される材料はさまざまであるが、最も成形性が要求される難成形部品に対しては表2に示す自動車用加工用高強度熱間圧延鋼板が用いられる。これらの材料は、化学成分の炭素量が少ないほど延性が優れ、厳しい加工にも耐えられるが、製品強度が低いため、浸炭処理や窒化処理を施す場合もある。

浸炭処理は、表層の鋼に炭素を浸入させる熱処理法で、900℃以上に加熱し表層に浸炭させてオーステナイト領域から急冷させることで表面層のみ硬くして内部は柔軟な組織のままとするため、表層は耐摩耗性に優れ、かつ韌性にも優れた部品とすることができる。

ただし、浸炭処理では900℃以上に加熱する必要があるが、熱ひずみの影響を受ける場合もあることに留意する必要がある。また、熱処理コストもかかるため、最近では熱間圧延鋼板を加工に用いたり、さらに強度の高い高強度熱間圧延鋼板を板鍛造やファインブランピングに適用し、材料強度や加工時に加わる加工硬化で製品強度を持たせるようにすることも行われている。

これらの材料は、強度が高くなるにつれて延性が低下していくため、加工時の材料流動性は低下していく。また、部品によっては高強度熱間圧延鋼板を用いても強度が不足する場合もあり、その場合には、以下に述べる高炭素熱間

表2 供試材の化学成分(mass%)  
Chemical compositions of test materials

C	Si	Mn	P	S
0.45	0.22	0.73	0.020	0.026

圧延鋼板を用いると良い。

## 2.2 中厚板の高炭素鋼板

板鍛造加工は、もともと熱間鍛造などで製作されていた部品の工程省略やニアネットシェイプ化で切削代の低減によるコスト削減が主目的で、さらに冷間加工による表面性状の高付加価値化などが期待できる。板鍛造加工に用いられる材料は、部品の耐久性や強度、耐摩耗性、耐ピitting性などが要求されるため、板鍛造加工による冷間加工後に、焼入れなどの熱処理を施す必要のある部品も多数存在する。

こうした用途には、高炭素鋼が用いられる。図1に鋼の含有炭素量と焼入れ最高硬さの関係を示すが、鋼の焼入れ後硬さは材料の含有炭素量と密接な関係があり、一般に含有炭素量が高いほど焼入れ硬度は高くなる。また、焼入れ温度の影響も深く、図2の焼入れ温度と硬さの関係で示すように、鋼種によって焼入れ後の最大硬さに達する温度が異なっているため、鋼に応じた焼入れ温度にするよう留意する必要がある。

また、高炭素鋼は用途に応じて表面性状が異なり、黒皮材や酸洗材などの熱間圧延鋼板に加え、冷間圧延鋼板のかたびき材やなまし材なども提供しているが、板鍛造用には酸洗熱間圧延材が用いられることが多い。

製品としての強度を確保するために材料を選定するが、

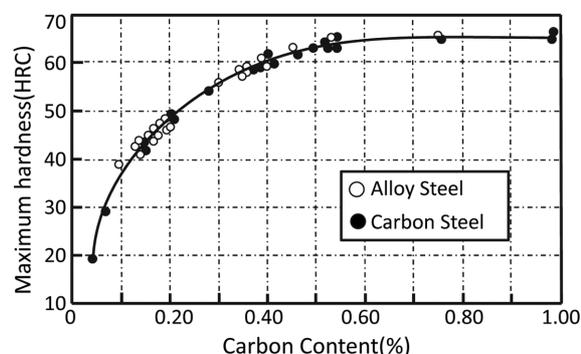


図1 鋼の炭素量と焼入れ最高硬さの関係  
Relationship between carbon content and quench hardness

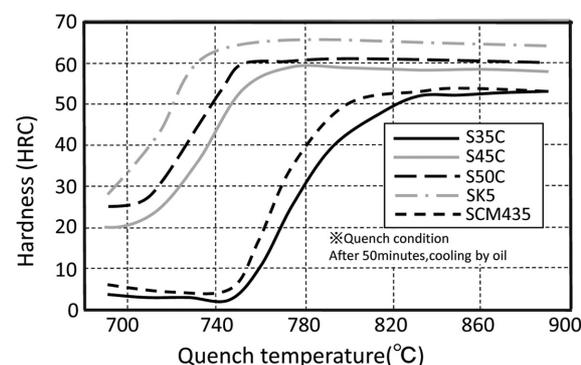


図2 焼入れ温度と硬さの関係  
Relationship between quench temperature and hardness

一般に焼入れ強度が高いほど含有炭素量が増え、材料の延性が低下する傾向がある。従って、板鍛造加工時には材料の塑性流動性が劣化して据え込み加工などの増肉加工で材料欠損を引き起こしたり、材料強度上昇による加工力の増大で成形荷重が高くなったり、金型の耐久性に影響することもあるので、一般的にはS35Cが用いられることが多い。材料の選定には、FEM解析などで十分加工性を検討することが望ましい。

### 2.3 中厚板のクロム鋼及びクロムモリブデン鋼

浸炭処理と同じように、加工後の雰囲気熱処理で材料表面の硬度を高くする方法として、窒化処理も一般的に用いられる。こちらは窒化物を形成させるためにクロムやアルミニウム、モリブデンを含むクロム鋼 (SCR) やクロムモリブデン鋼 (SCM) を用いる必要がある。クロム鋼とクロムモリブデン鋼は、通常の焼入れのみならず、上記の窒化処理を行うことができるのが特徴で、アンモニアもしくは窒素雰囲気中でおよそ470℃～580℃程度に熱処理することで表面のみ硬く (HV1 000以上も可能)、内部は比較的軟質のままにすることができる。このため、耐摩耗性と靱性を併せ持つ部品を得ることが可能となる。熱処理温度も浸炭処理や焼入れに比べて低いため、板鍛造加工後の熱処理としては、熱ひずみの少ない方法の一つである。

### 3. 厚手鋼板による FEM 解析及び破断限界評価

板鍛造加工の工法及び工程設計のために、FEM解析が有効であるが、このとき重要となるのは、板鍛造に適した材料特性をFEMシミュレーションに適用し、適切な成形限界評価を行うことである。

通常のプレス成形でのFEM解析では、図3に示す実線のように、引張り試験により材料の均一伸びまでの実験結果から応力-ひずみ線図を外挿することが多い。プレス成形ではFEM解析で扱うひずみ領域がせいぜい0.5程度であるため、この方法により求めた応力-ひずみ線図で十分な解析精度を得られるが、板鍛造加工の増肉加工では、塑性ひずみが2.0程度に達することもある。この場合、引張り試験で求めた応力-ひずみ線図は高ひずみ域で高い加工硬化を示すこととなり、実際の材料の変形挙動とのかい離を生じやすい。

そこで板鍛造加工のFEM解析では、増肉加工 (圧縮変形) に対応した材料変形挙動を求めるために、圧縮試験により高ひずみ域まで求めた図3の破線で示す材料特性を用いると良い。圧縮試験により求めた材料特性を用いることにより、板鍛造加工における増肉加工工程のFEM解析精度の向上が期待できる。

一方、板鍛造加工の破断限界評価についても、いくつか留意すべき点があると考えられる。たとえば、薄板材の破断は一様変形から拡散くびれが発生し、ついには板厚くびれ部

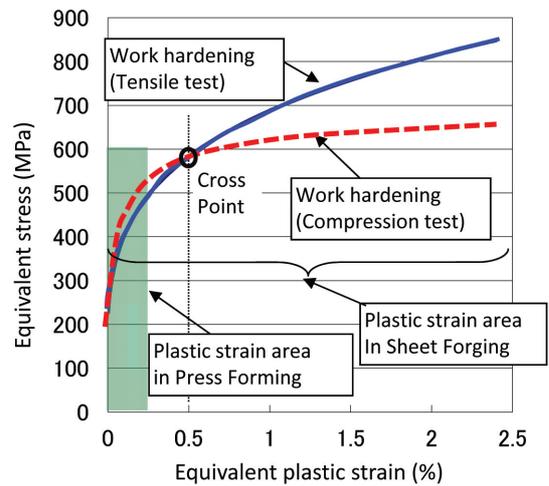


図3 板鍛造での熱間圧延鋼板の機械的特性  
Mechanical properties of hot rolled sheet in sheet forging

において板厚方向の変形を伴うせん断帯が形成され、破断に至る。ところが厚板材を用いた板鍛造加工の場合、板厚くびれは発生せず、せん断帯の形成から局所変形が開始される。そこで、板厚方向も含んだ形式での3次元局所分岐理論モデル<sup>5-8)</sup>を用いることで、せん断帯の形成がどのような状態 (モード) において起こるのか、さらにそれらのモードは実際の材料において発生の可能性があるのかを検証することが可能となる。

3次元局所分岐理論モデルにおいては板厚方向を考慮したくびれ面を仮定し、局所くびれ面に垂直な方向ベクトル (n) とくびれ速度方向ベクトル (m) がそれぞれ独立に決定される (図4)。ここで、くびれ面内でかつ板表面に平行な方向を持ったせん断モードを Mode SH (Horizontal Share)、同様にくびれ面内でかつ板厚方向に沿った方向を持つせん断モードを Mode SV (Vertical Share) と表現する。また薄板のプレス成形では効果は小さいと考えられてきた理論上はくびれ面に直行する方向のモード Mode N (Normal) も板鍛造解析においては考慮する必要がある。各モードにおいて  $\phi$ ,  $\psi$  を用いて各方向ベクトルを表現すると次式のようなになる。

$$n = (\cos \phi \cos \psi, \sin \phi \cos \psi, \sin \psi) \quad (1)$$

$$\dot{m}_{SV} = (-\sin \phi, \cos \phi, 0)$$

$$\dot{m}_{SH} = (-\cos \phi \sin \psi, -\sin \phi \sin \psi, \cos \psi)$$

$$\dot{m} = \frac{v_1 \dot{m}_{SV} + v_2 \dot{m}_{SH}}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}} \quad (2)$$

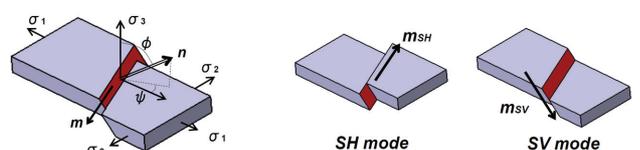


図4 3次元局所分岐理論  
3D localized bifurcation theory

$v_1, v_2$  は Mode SV, Mode SH の寄与度を示すパラメータである。

### 3.1 試験及び解析結果と考察

われのモードと表面のわれ発生タイミングを調べるために、円柱型試験片の直径Dと高さHのアスペクト比 (H/D)を変えた条件で、軸圧縮試験を実施した<sup>9)</sup>。材料はS45Cを用い、その成分は表2に示す。

試験片は図5に示す直径D=3mmの円柱状圧縮試験片であり、高さH=1.5~7.5mmの間で変化させている。アスペクト比 (H/D) は、0.5~2.5となる。軸圧縮試験はインストロン型試験機を用いて試験速度1mm/minで実施し、荷重-ストローク計測と同時にマイクロスコープを用いて表面でのわれ発生挙動をin situに観察した。

軸圧縮試験と対応するFEM解析は動的陽解法LS-DYNA (軸対称要素)にて実施し、機械特性は引張試験から測定し、解析に適用するSwift型パラメータ(K値, n値)を同定した。一方、破断限界の評価は、FEM計算結果を用いたポスト処理で行い、3D局所分岐理論に加えて局所分岐帯の劈開作用の不安定条件も適用している。また3D局所分岐理論に必要な応力増分依存性構成式<sup>9)</sup>における、応力増分依存性パラメータ (Kc 値) も引張試験から決定した。

アスペクト比H/D=2.5での軸圧縮試験の表面のわれ観察とFEM解析のわれ評価との比較を図6に示す。なお、

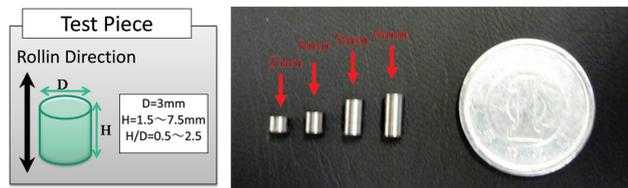


図5 軸圧縮試験片  
Specimens for axial compression test

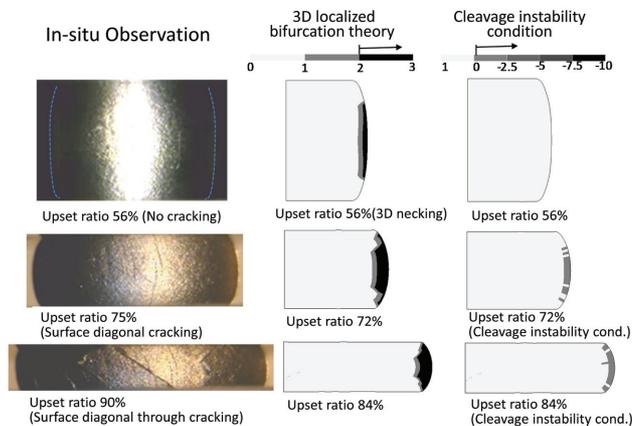


図6 軸圧縮試験のわれ観察とFEM解析結果の比較  
(アスペクト比H/D=2.5)  
Comparison with the fracture at the compression test

図中の3D局所分岐限界はコンタ図で2以上の指標に対応し、劈開不安定条件はコンタ図の0未満の負値に対応する。実験では、軸圧縮で樽状に膨らんだ表面からのわれ発生は約75%の据え込み率となる一方で、解析の3D局所分岐限界では約56%と早めの予測で、劈開不安定条件では72%とほぼ実験に対応する傾向となった。これは前項で述べたように、円柱軸圧縮での表面われ発生は、表面とは言え内部側からの変形拘束を受けるため3D局所分岐限界ではわれ発生に至らず、劈開不安定条件になることでわれが発生したと考えられる。また、われのモードについても分岐界面の方向と対応して斜めわれとなり実験と対応する。

従来のわれ評価で混合われモードとなるアスペクト比H/D=1.0での軸圧縮試験の表面のわれ観察とFEM解析のわれ評価との比較を図7に示す。表面の3D局所分岐限界は約60%で到達するが、実験での表面われは約72%程度で観測され、劈開不安定条件の約76%に近い傾向となる。また、われモードは図5の実験結果から分かるように表面のジグザグのき裂となって混合モードとなり、解析での予測と対応することが分かった。

上記以外のアスペクト比の実験・解析結果も含めて、アスペクト比によるわれ発生の据え込み率を整理して図8に示す。3D局所分岐条件については、H/D>1.8では表面斜めわれ、H/D=0.5~1.7で混合われ、H/D<0.5で縦われの傾向になることが示された。全体として、実験で観

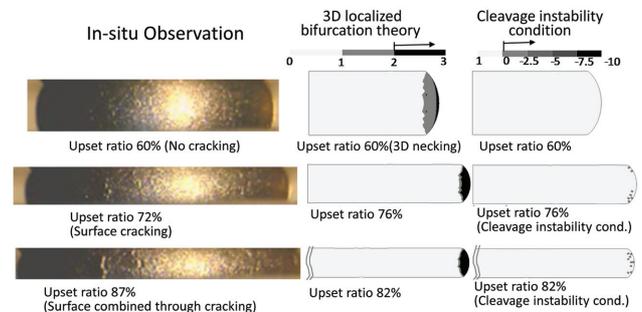


図7 軸圧縮試験のわれ観察とFEM解析結果の比較  
(アスペクト比H/D=1.0)  
Comparison with the fracture at the compression test

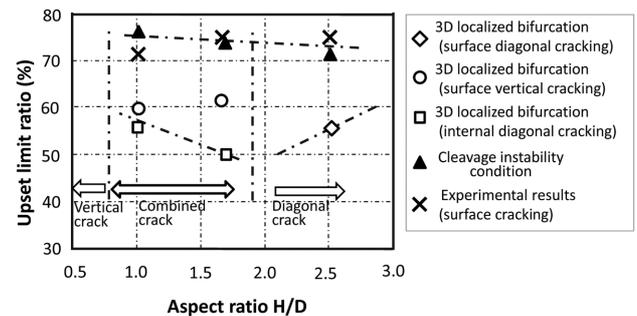


図8 各アスペクト比でのわれ発生挙動の実験・解析比較  
Comparison experiment and analysis of crack initiation behavior at each aspects

測される表面われは、3D局所分岐限界より据え込み率が10%程度高い条件で発生し、劈開不安定条件での予測と近いことが分かった。

### 3.2 異方性を考慮した加工解析と破断限界予測

前章までの実験結果により、3次元局所分岐理論の妥当性を確認することができた。一方、材料の特性によっては、変形後の形状が楕円化していることが分かる。これは材料の塑性異方性の影響であると考えられる。楕円化する条件(圧延と直角の方向採取材, アスペクト比=2.00)でのわれ状態を図9に示す。本アスペクト比では外側で斜めわれが発生している。さらにわれ位置は楕円化した短軸側2か所で斜めわれが発生していることが分かる。

このように、円柱据え込みにおいて材料の塑性異方性が要因と思われる楕円化が破断限界に影響する可能性があることから、本章においては、異方性を考慮した3次元FEM解析を実施し、その影響を評価する。

#### 3.2.1 解析条件及び結果と考察

解析モデルは特性を考慮し、1/4対称条件とした。また解析要素は塑性異方性を考慮できる3次元ソリッド要素を用いた。詳細条件を図10に示す。アスペクト比が2.00

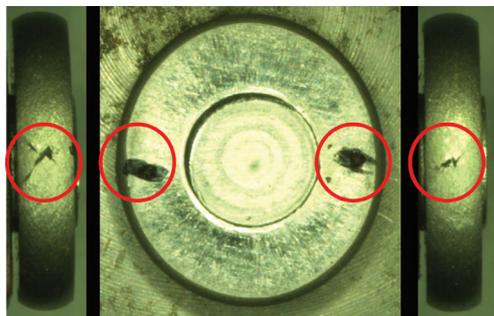


図9 楕円化破断状態  
Ovalized specimen after cracking

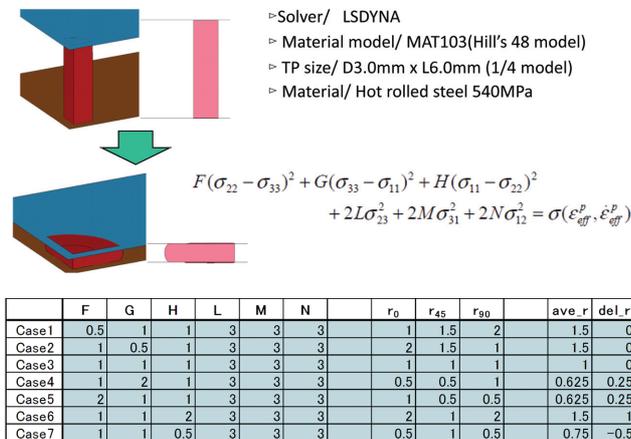


図10 異方性を考慮した円柱据え込み解析  
Analysis of cold upsetting of circular cylinder in consideration of material anisotropy

であることから(図1), 外表面にて斜めわれが発生する条件となる。

解析結果および3D分岐理論による評価結果について、r<sub>0</sub>, r<sub>90</sub>, r<sub>45</sub>それぞれの大小および平均r値の大小にて整理した結果を図11に示す。r<sub>0</sub>, r<sub>90</sub>については、平均r値が大きいくほど破断の危険性が大きく、また塑性異方性により楕円化が進み、短軸側でわれが発生することが分かる。平均r値の増加は、材料全体の応力を高める効果があり、結果として破断発生を促進する効果がある。一方、短軸側でのわれについての予測は、実験によるわれを裏付ける結果となった。

楕円化による破断限界を評価するため、短軸側、長軸側での応力状態を調査した結果を図12に示す。長軸側では周方向の引張応力に加え、軸圧縮応力も大きく、破断限界の大きな“純粋せん断状態”となっている。一方、短軸側では円周方向の引張応力が大きい、長手方向の軸圧縮応力が小さく、結果として純粋せん断状態よりも成形限界の低い“単軸引張状態”となっていることが分かる。このこ

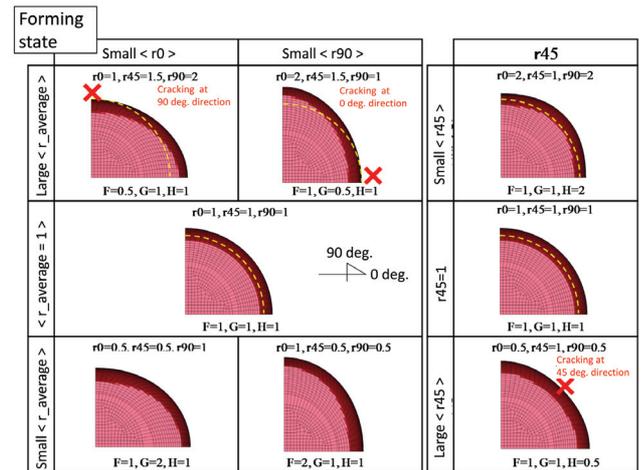


図11 FEM解析結果(異方性考慮, 破断予測位置にX印)  
Results of finite element analysis in consideration of material anisotropy (marking X on the predicted fracture point)

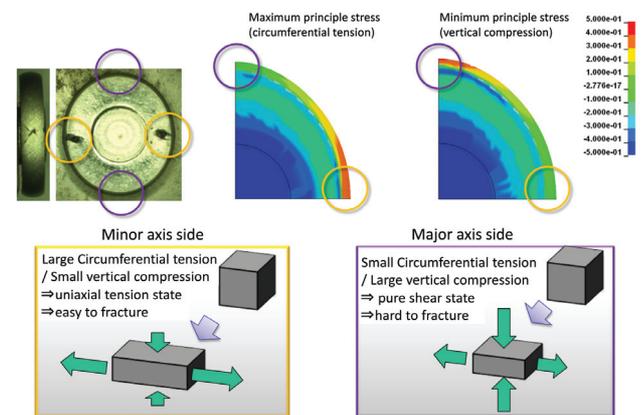


図12 短軸・長軸側での応力状態評価  
Evaluation of stress state at long and short axis side

とから、楕円化による形状効果が、短軸・長軸側における外表面の応力状態に差を与え、結果として短軸側での破断を発生しやすくしていることが分かった。

#### 4. 結 言

本論では3次元局所分岐理論を用いた破断限界評価を行うことで、板厚変化を伴う複雑な破断限界評価及び破断形態の同定を行うことが可能であることを示した。今後、当該分野における適切な材料の提供及び成形限界評価並びに工程検討を進めていく。

#### 参考文献

- 1) 平林健吾:第241回塑性加工シンポジウム“自動車産業における最先端の板鍛造技術”. 2005, p. 41-45
- 2) 鈴木 敬:塑性と加工. 51 (549), 633-637 (2010)
- 3) 橋本浩二:プレス技術. 2012年12月号
- 4) 工藤英明 ほか:塑性と加工. 8, 17 (1967)
- 5) Ito, K. et al.: Int. J. Mech. Sci. 42, 2233 (2000)
- 6) 佐藤 ほか:第60回塑性加工連合講演会講演論文集. 2009, p. 105
- 7) 佐藤 ほか:第61回塑性加工連合講演会講演論文集. 2010, p. 351
- 8) 伊藤 ほか:第61回塑性加工連合講演会講演論文集. 2010, p. 403
- 9) 吉田 ほか:第62回塑性加工連合講演会講演論文集. 2011, p. 93

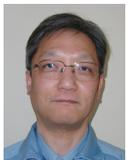
1) 平林健吾:第241回塑性加工シンポジウム“自動車産業にお



佐藤浩一 Koichi SATO  
名古屋技術研究部 主任研究員  
博士 (情報科学)  
愛知県東海市東海町 5-3 〒476-8688



吉田博司 Hiroshi YOSHIDA  
鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター  
主任研究員 博士 (工学)



橋本浩二 Koji HASHIMOTO  
鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター  
主幹研究員 博士 (情報科学)