

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289271

研究課題名(和文) 結晶塑性解析による金属板の高精度な加工硬化特性予測とそのプレス成形解析への応用

研究課題名(英文) Accurate prediction of work-hardening behavior of metallic sheets using crystal-plasticity analysis and its application to sheet metal forming simulations

研究代表者

浜 孝之 (Hama, Takayuki)

京都大学・エネルギー科学研究科・准教授

研究者番号：10386633

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、プレス成形部品への活用が期待されている金属材料の塑性変形挙動を高精度に予測するための数値解析技術の開発と、開発した技術をプレス成形解析へ応用する枠組みの構築である。研究の結果、鉄鋼材料やマグネシウム合金、純チタンといった金属材料が種々の負荷を受けた際の塑性変形挙動を、高精度に予測できる数値解析技術を開発した。また開発した技術を用いることで、塑性変形挙動のメカニズムを結晶レベルの微視的な変形挙動に基づいて明らかにした。さらに、プレス成形解析で必要となる入力パラメータを、開発した解析技術を用いて同定する手法について検討を行った。

研究成果の概要(英文)：The purposes of the present study were to develop crystal-plasticity models for prediction of deformation behavior of metallic sheets that are expected to be used for structural components and to apply the developed models to press forming simulations. We proposed new models that could predict deformation behaviors of various metallic materials, such as steels, magnesium alloys, and commercially pure titanium, under different loading paths accurately. The underlying deformation mechanisms were also revealed on the basis of crystalline microscopic deformation behavior using the proposed models. Moreover, we also examined a framework to utilize the proposed models for determining material parameters used in sheet metal forming processes.

研究分野：塑性力学

キーワード：結晶塑性有限要素法 加工硬化特性 プレス加工 環境調和型加工

1. 研究開始当初の背景

近年、環境負荷の低減を目的として輸送機器の軽量化が喫緊の課題となっている。薄板のプレス成形部品の分野では、高張力鋼板やアルミニウム合金板、マグネシウム合金板といった軽量化を促進しうる素材の利用が求められている。しかしながら、これらの軽量化材は従来から用いられて来た軟鋼板に比べて加工が困難であるため、数値シミュレーションによる成形性予測と工程設計支援が不可欠となっている。

一方、新素材を想定したプレス成形シミュレーションを行うためには、引張試験や圧縮試験、反転負荷試験、二軸引張試験などにより素材の塑性変形特性を体系的に明らかにした上で、数値シミュレーションで用いる入力データを同定する必要がある。しかしながら、これらの材料試験を行うためには種々の実験装置が必要であり、プレス成形を行う全ての企業・研究機関でこれらの実験を十分に行うことは困難である。また、仮に塑性変形特性を明らかにできたとしても、それを数学的に表現できる材料モデルの整備が不十分な場合も多い。その結果、素材固有の特性が適切にシミュレーションへ反映できない問題にしばしば直面する。

ところで最近、金属材料の変形に伴う集合組織発展や加工硬化挙動を数値的に予測できる結晶塑性解析技術が注目を集めている。結晶塑性解析は、結晶粒レベルの情報を入力値とすることで、結晶粒レベルのミクロな変形挙動に基づいて巨視的な変形挙動を予測する技術である。結晶塑性解析により反転負荷試験や二軸引張試験をはじめとする各種材料試験を計算機上で数値的に行うことができれば、専用の実験設備を用いることなく簡便に材料特性を取得できる可能性がある。また、結晶塑性モデルを材料構成式として用いれば、予測された情報を直接プレス成形シミュレーションに応用することも可能である。そこで本研究では、種々の金属板に対する実用的な結晶塑性解析システムを構築するという着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、種々の金属板を対象として、結晶塑性解析により加工硬化特性を計算機上で高精度に予測する技術を開発することを目的とする。さらに、開発した技術をプレス成形シミュレーションへ応用する枠組みの構築を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、主としてマグネシウム合金板、鋼板、純チタン板に注目して、これら金属板の変形特性を予測できる結晶塑性解析技術の確立を目指す。具体的には、結晶塑性解析で用いる材料パラメータを的確に同定した上で、種々の負荷条件における変形特性を高精度に予測できる技術を構築する。材料ご

の詳細については、次節で説明する。

4. 研究成果

(1) マグネシウム合金板の成果

① 二段階負荷挙動

筆者らの過去の研究により、マグネシウム合金板については、既にパラメータ同定法が提案され、また引張、圧縮、および反転負荷時の挙動を高精度に予測できる技術が確立されている。本研究では、より複雑かつプレス成形でもしばしば見られる変形モードである二段階負荷を対象として、これまでに確立された解析技術の適用可能性を調査した。

供試材には、AZ31 マグネシウム合金板 (板厚 1mm, 大阪富士工業) を用いた。図 1(a) に、供試材の初期極点図を示す。実験手順は以下のとおりである。

(a) 圧延方向に切り出した大型試験片 (図 1(b)) に対して、所定のひずみまで引張あるいは圧縮の予負荷を加える。

(b) 予負荷を加えた大型試験片から種々の方向に小型試験片 (図 1(c)) を切り出す。図 2 に示すように、一次経路と二次経路の角度差を θ と定義する。

(c) 小型試験片に対して 10% まで引張ひずみを与える。

一方、結晶塑性有限要素法解析は、以下の手順で行った。

(a) EBSD 測定により得られた供試材の初期方位情報を、有限要素モデルの各積分点に割り当てる。このとき、圧延方向と有限要素モデ

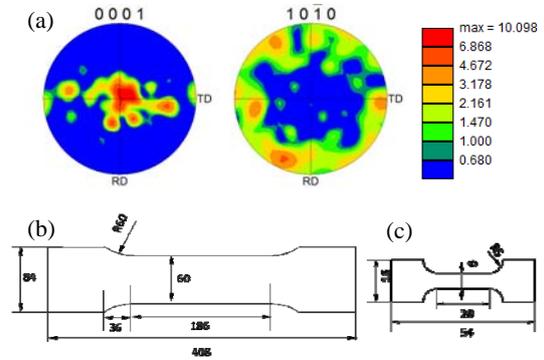


図 1 供試材. (a) 初期極点図, (b) 大型試験片, (c) 小型試験片. [雑誌論文③]

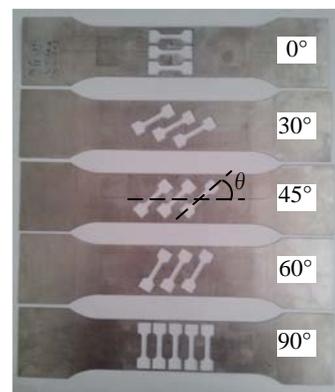


図 2 二段階負荷試験の様子. [雑誌論文③]

ルの x 方向を一致させる. また, 既に確立された方法により材料パラメータを同定する. (b) 圧延方向 (x 方向) に予負荷を加え, 所定のひずみに到達後, 除荷する.

(c) 小型試験片の方向と x 軸が一致するように, 各積分点の結晶方位および応力テンソルを θ だけ回転させる. また, 有限要素モデルの形状を初期化する.

(d) x 方向へ 10% の引張ひずみを与える.

一例として, 6% の予ひずみを与えた材料を二段階目負荷に供した際の応力-ひずみ曲線を図 3 に示す. 引張の予ひずみを加えた場合, 角度によらず上に凸の曲線を示すが, 角度差 $\theta=0^\circ$ の時が最も応力が高く, 90° に近づくにつれて応力レベルが徐々に低下する. 一方, 圧縮の予ひずみを加えた場合, $\theta=0^\circ$ では顕著な S 字状曲線が生じるが, 角度が大きくなるにつれて S 形状は弱まり, $\theta=60^\circ, 90^\circ$ では見られない. 一方, 引張後期の応力レベルは, $\theta=90^\circ$ が最も大きく, 次いで $\theta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 45^\circ$ という順である. このように, 予ひずみの方向によって, 二段階目の応力-ひずみ曲線は顕著に異なることが明らかとなった. また, 以上の実験結果は, 結晶塑性解析でも良好に予測された.

図 4 に, 6% の圧縮予ひずみを与えた場合の, 二段階目負荷前後の極点図を示す. 初期 (図 1 (a)) には強い底面集合組織が見られるが, 圧縮予ひずみを付与すると圧延方向に強いピークが発現する. その後二段階目負荷を受けると, $\theta=0^\circ$ では圧延方向のピークが消失し, 初期に近い集合組織が得られているのに対して, θ が大きくなるにつれて圧延方向のピーク強度変化が小さくなり, $\theta=90^\circ$ では二段階目負荷前からほぼ変化していない. 以上の実験結果は, 解析でも良好に予測された.

以上の結果から, 巨視的な応力-ひずみ曲線および微視的な情報である極点図のいずれも結晶塑性解析により良好に再現できることが示され, これまで構築してきた手法はこのような複雑なプロセスにも適用可能であることが明らかとなった. 詳細な結果は省略するが, 図 3, 図 4 で見られる強い面内異方性は, 二段階負荷時の双晶活動が θ によって大きく異なることが主要因であることが, 解析結果から明らかにされている.

② 鋳造材への変形挙動

これまでの研究では, 底面集合組織の発達した圧延板を対象としていた. 一方, よく知られているように, 集合組織によって巨視的な変形挙動は大きく異なる. そこで, ほぼランダムな結晶方位分布を持つ材料を対象として結晶塑性解析を行うことで, 異なる初期方位分布を持つ材料に対しても開発した技術が適用できるか検討した.

実験では, AZ31 マグネシウム合金のインゴットから板状試験片を切り出して, 種々の負荷経路に供した.

解析では, ランダムな初期方位分布を作成

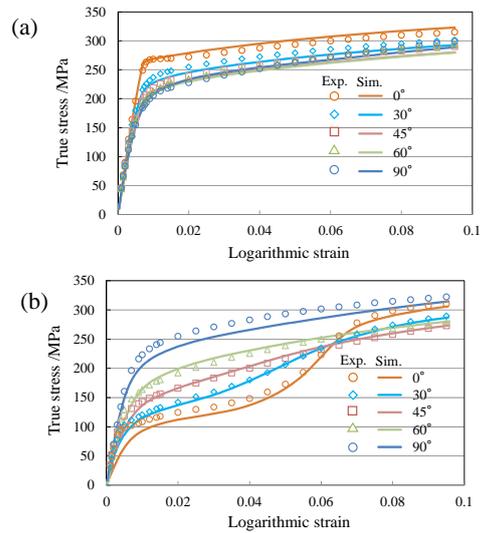


図 3 予ひずみを受けた材料における二段階目負荷時の応力-ひずみ曲線. (a) 6% の引張予ひずみ, (b) 6% の圧縮予ひずみ. [雑誌論文③]

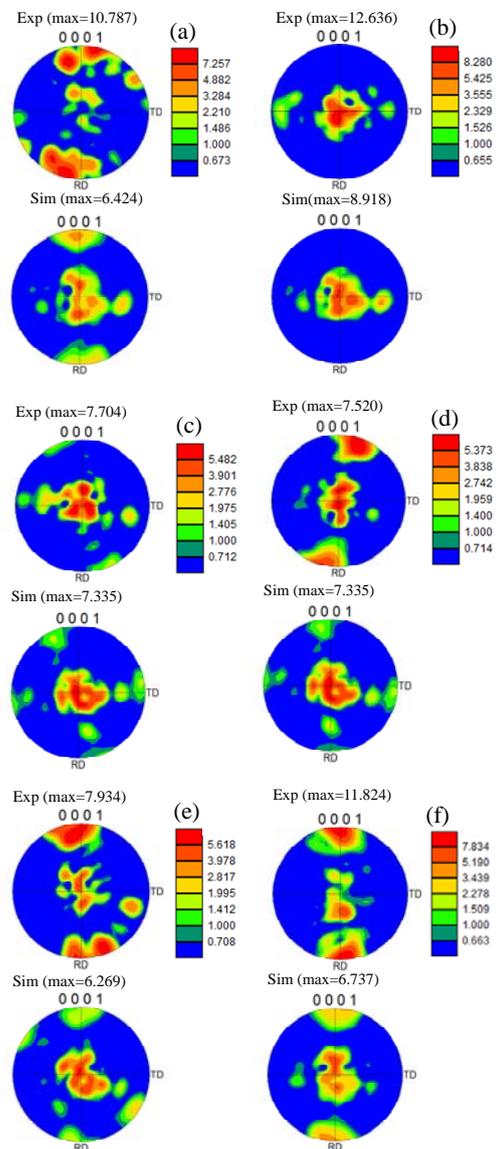


図 4 予圧縮材の引張変形後の極点図. (a) 引張前, (b) $\theta=0^\circ$, (c) $\theta=30^\circ$, (d) $\theta=45^\circ$, (e) $\theta=60^\circ$, (f) $\theta=90^\circ$. [雑誌論文③]

し、有限要素モデルに与えた。一方、これまでに提案した材料パラメータ同定法は圧延板に特化した手法であるため、鋳造材に対して適用することができない。また、結晶方位がランダムなため、すべり系/双晶系ごとで個別に同定することは極めて困難である。そこで本研究では、これまで AZ31 マグネシウム合金圧延板に対して同定された材料パラメータが、本供試材に対しても適用可能と仮定した。ただし、これまで用いてきた圧延板に比べて、本供試材では結晶粒径が著しく大きい。そこで、結晶粒径が材料強度へ及ぼす影響を考慮するため、臨界せん断分解応力に対して Hall-Petch 則が成り立つと仮定して、臨界せん断分解応力のみを結晶粒径に応じて調整した。

一例として、反転負荷試験により得られた応力-ひずみ曲線を図 5 に示す。反転前の引張時と圧縮時を比較すると、明らかに引張時の方が応力レベルが高く、また加工硬化も顕著である。また反転後の挙動を比較すると、圧縮-引張の場合は引張へ反転後に緩やかな S 字状曲線が発現している一方で、引張-圧縮ではそのような傾向は見られない。以上の結果は、結晶塑性解析により良好に予測できており、解析技術の妥当性が示された。また、結晶方位をランダムにしても引張-圧縮の非対称性やひずみ経路依存性が発現することがわかった。詳細は省略するが、鋳造板における変形異方性は双晶活動に起因することが解析結果から明らかとなった。

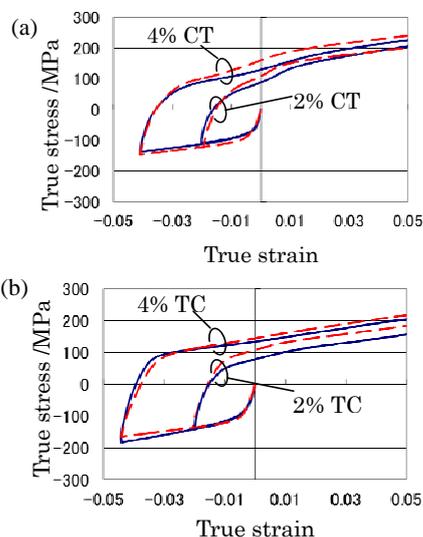


図 5 反転負荷を受けるマグネシウム鋳造板の応力-ひずみ曲線。(a) 圧縮-引張、(b) 引張-圧縮。(b) の図では、両軸ともに正負を逆転させている。

(2) 鋼板の成果

一般的な単相鉄鋼板は体心立方金属である。体心立方金属の結晶塑性解析では、 $\{110\}$ すべり系と $\{112\}$ すべり系が活動すると仮定される場合が多いが、両すべり系の活動には不明な点が多い。一般に、 $\{112\}$ すべり系は

$\{110\}$ すべり系に比べて活動が小さいと考えられているが、その詳細は明らかではなく、結晶塑性解析では簡便のため両すべり系に対して同じ材料パラメータを用いることが多い。そこで本研究では、フェライト単結晶の単純せん断変形特性を実験と解析で比較することで、 $\{110\}$ すべり系と $\{112\}$ すべり系の活動度の違いについて検討した。

表 1 に、せん断試験で用いた結晶方位条件を示す。これらの結晶方位を持つ単結晶材を単純せん断試験に供した時の応力-ひずみ曲線を検討した。また、実験では、ほとんどの方位条件において顕著な転位壁の発達を観察された。そこで、結晶塑性解析では転位壁の発達を直接予測できるモデルを用いることで、方位条件による転位壁の発達の違いを実験と解析で比較した。材料パラメータは、 $\{110\}$ すべり系と $\{112\}$ すべり系で同一とした。なおこのモデルでは、転位壁は $\{110\}$ 面上でしか形成しないと仮定しているが、その妥当性は明らかではない。そこで本研究では、転位壁は $\{110\}$ 面上でしか形成しないオリジナルのモデルのほか、 $\{112\}$ 面上でも形成するとして修正モデルの二つで解析を行い、 $\{112\}$ すべり系の活動について考察した。

図 6 に、単純せん断試験により得られたせん断応力-せん断ひずみ曲線を示す。方位条

表 1 結晶方位条件。

Test conditions	Normal direc.	Shear direc.
A $\{100\}\langle 011\rangle$	(001)	$[1\bar{1}0]$
B $\{100\}\langle 001\rangle$	(001)	$[0\bar{1}0]$
C $\{110\}\langle 557\rangle$	$(\bar{1}10)$	$[55\bar{7}]$
D $\{110\}\langle 112\rangle$	$(\bar{1}10)$	$[11\bar{2}]$
E $\{111\}\langle 112\rangle$	(111)	$[\bar{1}\bar{1}2]$
F $\{110\}\langle 001\rangle$	(110)	$[001]$

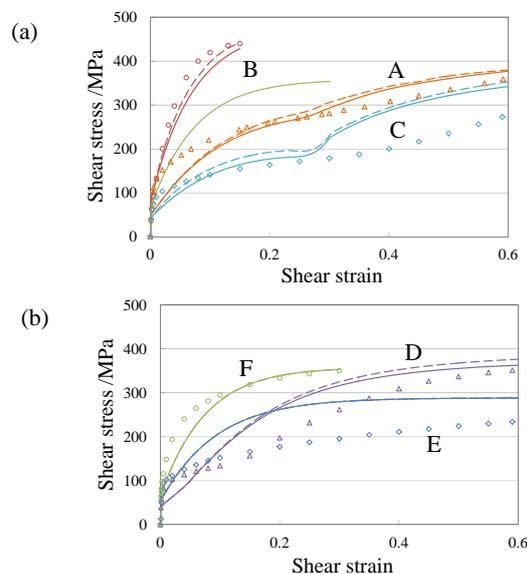


図 6 せん断応力-せん断ひずみ曲線。(a) A, B, C, (b) D, E, F. [雑誌論文①]

件によって挙動が大きく異なることがわかる。条件Bでは応力が最も高い一方で、早期に破断している。条件A, C, Dでは二段階の加工硬化挙動が発現している。結晶塑性解析では、定量的にはずれが見られるものの、いずれのモデルでも以上の加工硬化挙動が定性的に予測できている。

詳細は省略するが、条件A, B, D, Eについて試験後の転位壁の発達を実験と解析で比較した結果、次のことが明らかとなった。

- ・条件A, Eでは{110}面に沿った転位壁の発達が観察された。解析では、いずれのモデルでも良好に予測できた。

- ・条件Dでは{110}面および{112}面に沿った転位壁が観察された。修正モデルを用いた解析ではいずれの転位壁も良好に予測できたが、オリジナルモデルを用いた場合は、{112}面に沿った転位壁を予測できなかった。

- ・条件Bでは、転位壁は形成されなかった。これは、変形初期から4つのすべり系がほぼ同じ程度で活動していたためと考えられる。

以上の結果から、{112}面でも転位壁が形成されると考える方がより妥当なことが示唆された。転位壁の発達は潜在硬化に大きな影響を及ぼすため、この知見は潜在硬化係数の決定に対して有益な知見となる。一方、条件Bの結果から、4つのすべり系が同時に活動するケースでは、潜在硬化よりも等方硬化が卓越することが示唆された。

(3) 純チタンの成果

①はじめに

前節までに示した成果により、マグネシウム合金における種々の変形挙動を高精度に予測できる解析技術を確立した。そこで本節では、開発した技術を同じ六方晶金属である純チタンへ適用することを試みた。一方、純チタンでは、種々の負荷経路における加工硬化挙動がほとんど明らかにされていない。そこで、詳細な実験もあわせて行うことで、加工硬化挙動の体系的な理解も目的とした。

②実験および解析方法

実験では、JIS1種工業用純チタン板(板厚1mm, 神戸製鋼所)を供試材として用いた。初期の極点図を図7に示す。圧延直角方向に二分した底面集合組織が形成されている。

解析では、マグネシウム合金を対象として開発したプログラムを用いた。ただし、マグネシウム合金と純チタンでは活動すべり系および双晶系が異なり、また各すべり系の活動度も異なる。そこで、まず文献に基づいて、純チタンで考慮すべき新たなすべり系および双晶系を特定し、プログラムに導入した。また、マグネシウム合金の場合と同様に、強い底面集合組織が発達している特性を活かして、各すべり系/双晶系の材料パラメータを的確に同定しうる方法を新たに提案した。

③結果と考察

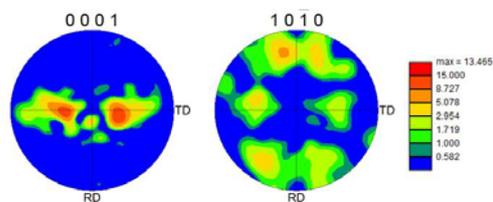


図7 純チタンの初期極点図。[雑誌論文②]

図8に、引張および圧縮試験で得られた応力-ひずみ曲線を示す。加工硬化挙動は、圧延方向と圧延直角方向で大きく異なり、また引張と圧縮でも顕著な違いが見られる。このことから、純チタンは極めて強い変形異方性を示すことが明らかである。これらの傾向は、結晶塑性解析により良好に予測できている。

続いて、圧延方向に反転負荷試験を行った結果を比較した(結果は省略する)。圧縮から引張へ反転した場合、強いバウシinger効果が発現するとともに、その後わずかにS字状の加工硬化挙動を呈した。一方、引張から圧縮へ反転した場合は、同様にバウシinger効果が顕著に見られる一方で、その後のS字状の挙動は見られず、ほぼ線形に硬化した。以上の変形挙動は、結晶塑性解析でも良好に予測できた。

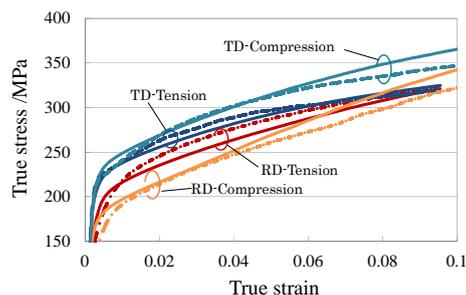


図8 純チタンの一軸引張/圧縮時の応力-ひずみ曲線。実線は実験結果、破線は解析結果を示す。[雑誌論文②]

圧縮から引張へ反転した場合の集合組織の発展も調査した。圧縮直後には、初期(図7)には見られなかった圧延方向の強いピークが発現している。一方、負荷方向を反転すると、変形の進行に伴ってこのピークが消失し、逆に板厚方向のピーク強度が高まる。そしてさらに引張変形が進行すると、再び圧延方向にピークが生じている。以上の結果は、結晶塑性解析でも良好に予測できている。

なお、解析結果を分析したところ、上記の集合組織発展および加工硬化挙動は以下のメカニズムで生じることが明らかとなった。すなわち、圧縮時には引張双晶が活動するため、圧延方向に強いピークが生じる。その後応力反転すると、圧縮時に活動した引張双晶が回復するため、圧延方向のピークが消失する。そしてそれに伴い、応力-ひずみ曲線にはS字状の硬化挙動が生じる。その後、今度は圧縮双晶が活動するため、再び圧延方向にピークが生じる。このことから、引張時に見

られるS字状の加工硬化挙動は、マグネシウム合金の場合と同様に、双晶の活動と回復に起因する現象であることが明らかとなった。

図9に、結晶塑性解析により得られた等塑性仕事面の発展を示す。なお、両軸ともに圧延方向へ一軸引張を与えた場合の応力で割って無次元化している。初期の等塑性仕事面は、圧延方向と圧延直角方向での非対称性が顕著である。一方、塑性変形の進行とともに無次元化された等塑性仕事面は急速に収縮し、且つ等方的な形状に近づく。そしてひずみ8.5%では、ほぼ等方的な形状に帰着している。以上の結果は、文献で示された実験結果と良好に一致している。また解析結果から、この顕著な異方硬化挙動は、応力比によって支配的に活動するすべり系が異なるためであることが示された。

以上より、マグネシウム合金を対象として開発されたプログラムを拡張することにより、純チタンの塑性変形挙動を良好に予測するとともに、その変形メカニズムをすべり系/双晶系の活動に基づいて明らかにすることに成功した。

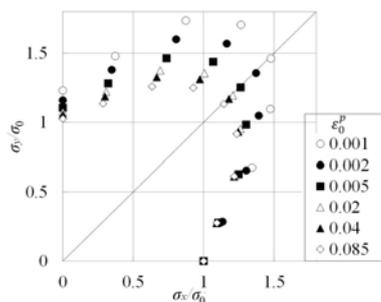


図9 純チタンの等塑性仕事面。凡例は、圧延方向へ一軸引張を与えた際のひずみを表す。〔雑誌論文②〕

(4) プレス成形解析への応用

結晶塑性解析技術をプレス成形解析へ応用する方法として、(a)プレス成形解析で必要となる入力パラメータを結晶塑性解析により決定する方法や(b)結晶塑性モデルを直接プレス成形解析で用いる方法などが考えられる。本研究ではこのうち、相対的にみて実用に近いアプローチである(a)の方法に取り組んだ。すなわち、結晶塑性解析で得られた応力-ひずみ曲線や等塑性仕事面から、変形抵抗式や降伏関数で用いるパラメータを同定する方法を検討した。この取り組みにより、専用の装置で材料試験を行うことなく、計算機によりプレス成形解析で用いる材料パラメータを同定する道筋を示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 18 件)

① Hama, T., Kojima, K., Kubo, M., Fujimoto, H., and Takuda, H., Crystal plasticity finite-element simulation on development of dislocation

structures in BCC ferritic single crystals, ISIJ International, 57-5 (2017), 866-874.

<http://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-011>

② Hama, T., Kobuki, A., and Takuda, H., Crystal-plasticity finite-element analysis of anisotropic deformation behavior in commercially pure titanium Grade 1 sheet, International Journal of Plasticity, 91 (2017), 77-108.

<https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2016.12.005>

③ Hama, T., Tanaka, Y., Uratani, M., and Takuda, H., Deformation behavior upon two-step loading in a magnesium alloy sheet, International Journal of Plasticity, 82(2016), 283-304.

<https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2016.03.009>

④ Yi, Ning, Hama, T., Kobuki, A., Fujimoto, H., and Takuda, H., Anisotropic deformation behavior under various strain paths in commercially pure titanium Grade 1 and Grade 2 sheets, Materials Science & Engineering A, 655 (2016), 70-85.

<https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.12.081>

〔学会発表〕(計 25 件)

① 浜孝之, 畠山真一, 鈴木智貴, 内田壮平, 藤本仁, 宅田裕彦, 予圧縮を受けたマグネシウム合金板における引張変形時の応力挙動, 第24回機械材料・材料加工技術講演会, 2016年11月25日-26日, 早稲田大学(東京都・新宿区)。

② 浜孝之, 小吹晃弘, 藤本仁, 宅田裕彦, 反転負荷を受ける純チタン板における加工硬化挙動, 第67回塑性加工連合講演会, 2016年10月21日~23日, 日本工業大学(宮代町・埼玉県)。

③ 浜孝之, 小吹晃弘, 内田壮平, 藤本仁, 宅田裕彦, 種々の負荷経路における純チタン板の変形挙動に関する結晶塑性解析, 日本機械学会 M&M2016 カンファレンス, 2016年10月8日-10日, 神戸大学(神戸市・兵庫県)。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浜 孝之 (HAMA, Takayuki)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・准教授

研究者番号：10386633

(2) 研究分担者

宅田 裕彦 (TAKUDA, Hirohiko)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・教授

研究者番号：20135528

高村正人 (TAKAMURA, Masato)

国立研究開発法人理化学研究所・研究員

研究者番号：00525595