

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05078

研究課題名（和文）転位を考慮した結晶塑性モデルによる圧延板の異方性予測技術の開発

研究課題名（英文）Development of dislocation-density based crystal plasticity model for predicting the anisotropy in rolled sheet

研究代表者

吉田 健吾（Yoshida, Kengo）

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：70436236

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではアルミニウム合金板を対象として、転位密度に基づく結晶塑性モデルによる塑性異方性の予測精度を検証した。また、結晶塑性モデルを汎用の有限要素法ソフトウェアに組み込むことで、円筒深絞りの成形シミュレーションを実施した。転位同士の相互作用行列を全て等しく設定することで実験結果を最もよく予測できることが分かった。さらに、結晶方位を微修正することで、さらに予測精度を向上できる方法を提案した。これらの結果は従来の巨視的塑性論によるシミュレーションよりも精度が高いことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

結晶塑性モデルを用いた塑性加工シミュレーションを実現したことは、技術の適用範囲の拡大ならびに産業界への技術移転を容易にするものであり、その価値は高い。結晶塑性モデルによる予測精度が巨視的塑性論よりも高いことは重要な結論である。つまり、本手法を適用することで、従来の解析精度よりも一段階精度の高い解析を実現できることを示した。本研究の成果によって、結晶塑性モデルに基づく成形シミュレーションが広く普及することが期待できる。

研究成果の概要（英文）：A dislocation density-based crystal plasticity model was used to predict the plastic anisotropy in aluminum alloy sheets. The crystal plasticity model was implemented into a commercial finite element software, and the cup drawing process was simulated. The equivalent strength of the dislocation interaction coefficients resulted in the predictions that agree with the experimental results. A procedure to modify the crystal orientations was proposed in order to improve the prediction accuracy further. These results were in good agreement with the experimental data and are better than the predictions based on a conventional macroscopic theory of plasticity.

研究分野：塑性加工

キーワード：結晶塑性 塑性加工

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

金属円板から円筒容器を深絞りすると、容器の縁に山と谷ができる。これは異方性が部品形状に悪影響を及ぼす典型的な例であり、世界中で活発に研究されている。この現象を数値シミュレーションによって予測するために、圧延方向から15°毎に7方向に対して単軸引張を行って異方性を測定し、それらを塑性加工シミュレーションに反映することが行われている。しかし、7方向もの多くの単軸引張を行ったにもかかわらず、山と谷の予測精度は不十分でないことが多い。ここまで多くの実験を実施しても、異方性の予測精度が低いことは極めて深刻な問題であり、新たな視点でのアプローチが必要である。

これまで、研究代表者は、アルミニウム合金を用いて多軸応力実験ならびに結晶塑性解析を実施し、有限要素均質化法を用いて個々の結晶粒の変形を解析すれば、多軸応力状態の異方性を十分に予測できることを立証してきた。さらに、転位密度を考慮した結晶塑性によって、ひずみ進展に伴う強度の異方性の発達を再現できることを解明している。

そこで本研究では、これまで開発してきた結晶塑性モデルに対し、転位の蓄積と切り合いの相互作用を新たに組み込むことで、より一層精密に異方性を予測できるように改良する。実用アルミニウム合金板を対象として、実験および数値シミュレーションの両者から検討する。まず、力学的な材料試験を実施して異方性を測定する。転位密度に基づいて結晶塑性モデルにおいて適切な相互作用行列を同定する。その後、円筒深絞り加工へ適用して、その有用性を確認する。さらに、深絞り加工後の容器の側壁の山と谷をより正確に予測するための解析手法を検討する。

2. 研究の目的

本研究では、結晶塑性モデルを用いた数値シミュレーションによって実用アルミニウム合金板の異方性を正確に予測する技術を確立する。そして、それを活用して深絞り加工シミュレーションの解析精度を向上させることを目指す。

力学的な実験として、単軸引張試験と二軸引張試験を実施し、様々な応力状態における供試材の異方性を実験的に明らかにする。特に、変形の異方性と強度の異方性の両者を解明する。その後、有限要素均質化法に転位の発達ならびに相互作用をモデル化した結晶塑性を組み込む。転位の蓄積は強度・変形の異方性の要因である。このように材料科学に立脚したモデルによって異方性を予測する。本モデルによる解析結果と力学的な実験結果とを比較することで、解析モデルの精度向上を図る。

深絞り実験を行い円筒容器の縁に発生する山・谷形状を計測する。また、確立した結晶塑性モデルを用いて円筒深絞りのシミュレーションを実施して、塑性加工解析における開発手法の有効性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 実験方法

圧延方向から様々な方向に単軸引張を行い、降伏応力およびR値を測定する。負荷方向は、圧延方向から圧延直角方向までを15°毎として、合計7通りの試験を実施した。材料の組織の影響を確認するために、納入材のT4処理の試験片と焼鈍を施したO処理の試験片を準備した。二軸引張は圧延方向と圧延直角方向の2方向の荷重比を $F_x : F_y = 4:1, 2:1, 4:3, 1:1, 3:4, 1:2, 1:4$ の7通りとした。

X線回折を用いて板材の極点図を測定し、その後、結晶方位分布関数を同定することで、集合組織を測定した。板厚方向の集合組織の変化を考慮するために、板材を40枚積層して圧延方向と板厚方向からなる面を創製し、その面を用いて極点図を測定した。

(2) 解析方法

本研究では転位密度に基づく結晶塑性モデルを用いた。すべり系のすべり速度は粘塑性モデルに対するべき乗則を適用した。

$$\dot{\gamma}^{(\alpha)} = \dot{\gamma}_0 \operatorname{sgn}(\tau^{(\alpha)}) \left| \frac{\tau^{(\alpha)}}{g^{(\alpha)}} \right|^{1/m} \quad (1)$$

すべり抵抗 $g^{(\alpha)}$ の発展則は、転位密度 $\rho^{(\alpha)}$ を基にしたKocks–Mecking型を適用した。

$$g^{(\alpha)} = \tau_0 + a\mu \sqrt{\sum A^{\alpha\beta} \rho^{(\beta)}}, \quad \dot{\rho}^{(\alpha)} = \frac{1}{b} \left(\frac{\sqrt{\sum B^{\alpha\beta} \rho^{(\beta)}}}{k_1} - k_2 \rho^{(\alpha)} \right) \dot{\gamma}^{(\alpha)} \quad (2)$$

ここで、 $A^{\alpha\beta}$ と $B^{\alpha\beta}$ はすべり系 α の転位の運動に対するすべり系 β の転位の抵抗力を表す相互作用行列である。

材料の力学的特性の評価においては、均質化有限要素法に上式を組み込んで解析した。8節点1次要素を用いて、選択低減積分を使用した。円筒深絞り解析においては、上記の構成式を汎用有限要素法ソフトMarcに組み込んで、成形シミュレーションを実施した。

4. 研究成果

(1) 単軸引張における異方性の実験と解析結果

Al-Mg-Si合金板より、納入材のT4材および焼鈍処理を施したO材の試験片を作製した。両試験片に対してX線回折を用いて極密度を測定し、その結果より結晶方位分布関数を同定した。同定した結晶方位分布関数より求めた{111}極点図を図1に示す。図1より、両試験片の集合組織はおおよそ同じであることが分かった。ただし、極密度の最大値はT4材の方が大きく、より強く配向していることを示している。

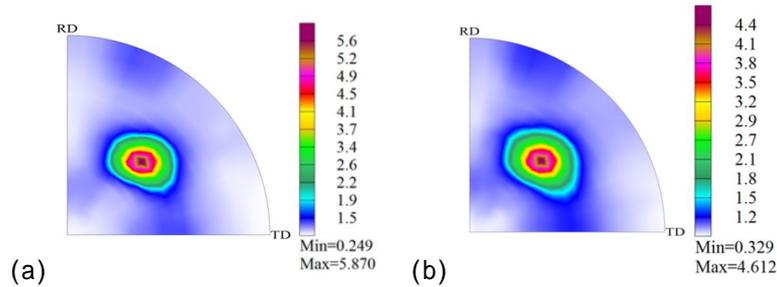


図1 {111}極点図 (a)T4材, (b)O材

T4材に対して単軸引張を実施して、既定の塑性ひずみ ϵ_i^p に対する流動応力, R 値を同定した。流動応力は圧延方向の値で正規化した。それらの結果を図2に示す。ここで、 θ は圧延方向からの角度を示す。流動応力は圧延方向が最も高く、 60° において最も低くなる挙動を示した。その傾向は、塑性ひずみの大きさに依存しなかった。 R 値は 45° 方向で最も小さくなる傾向を示した。O材に対しては、流動応力は 45° 方向で最も高くなった。一方、 R 値は 45° で最も小さかった。すなわち、T4材とO材において流動応力の異方性は変化するが、 R 値の異方性は同じであることが分かった。

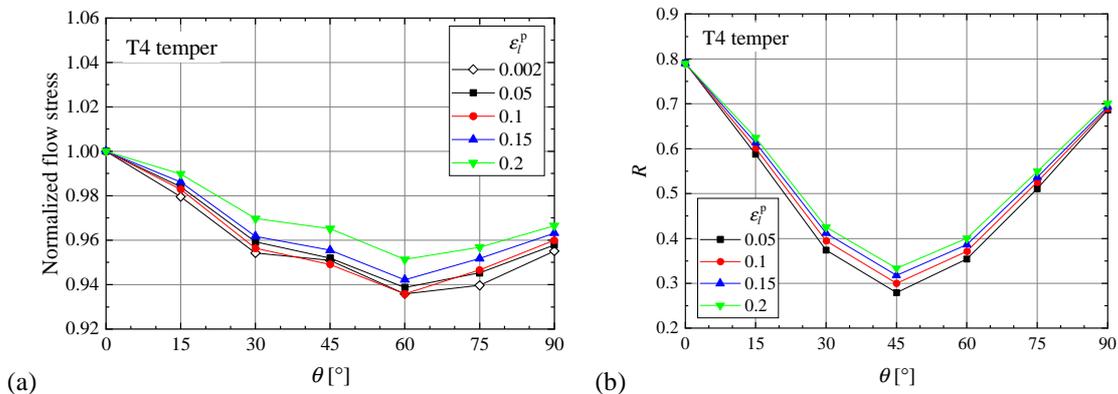


図2 T4材の単軸引張試験の結果 (a) 正規化流動応力, (b) R 値

転位密度に基づく結晶塑性モデルを用いた均質化有限要素法によって単軸引張を解析した。まず、相互作用行列の $B^{\alpha\beta}$ は共面作用は0、非共面作用は1とした。T4材に対して、相互作用行列を全ての $A^{\alpha\beta} = 1$ とした場合をT4-1と記す。一方、転位力学の解析によって導出された相互作用行列を用いる場合はT4-2と記す。両モデルによる解析結果を図3に示す。T4-1の解析結果は、ひずみが0.1以上の範囲においては実験に類似した傾向を予測できている。一方、T4-2はいかなるひずみ範囲においても実験結果と異なる予測結果であった。その他の相互作用行列の組み合わせ(それらをT4-3, T4-4とする)を用いて解析したが、T4-1よりも実験結果をよく予測できる結果は無かった。T4材に対する結果と異なり、O材に対しては転位力学から導出された相互作用行列を用いることで実験結果の挙動を予測できることが分かった。 R 値の解析結果は、T4材、O材どちらにおいても、実験結果を再現することができた。図4にはT4材の R 値をT4-1~T4-4のモデルで解析した結果を示す。どの結果も実験値の傾向を表しており相互作用行列の影響がないことを確認した。

以上の結果より、実用アルミニウム合金板であるT4材の塑性変形挙動を予測するには、T4-1の相互作用行列を用いることが適していることを明らかにした。さらに、その結果は熱処理によって内部の微細析出の状態が変化すると、それに伴って適切な条件が変わることも分かった。

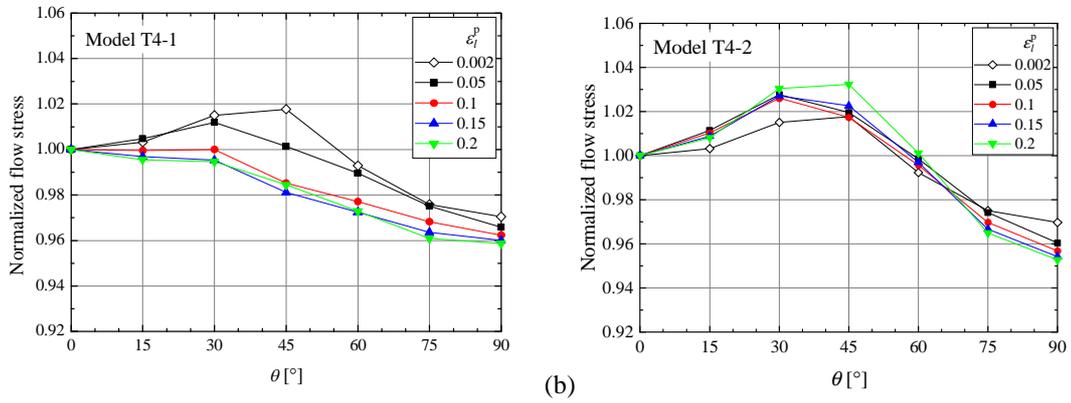


図3 T4材の単軸引張における流動応力の予測結果 (a) T4-1モデル, (b) T4-2モデル

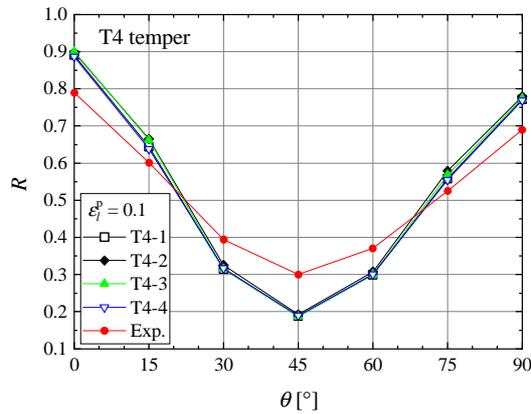


図4 T4材のR値の実験値と予測結果の比較

(2) 円筒深絞り実験と解析

円筒深絞りの実験および結晶塑性モデルを組み込んだ有限要素法による成形シミュレーションを実施した。図5には実験と解析で使用した金型形状およびブランク形状を示す。シミュレーションは1/4モデルで実施した。上型と下型の隙間は1.25mmで一定に保持した。

結晶塑性解析は、前節で同定した結晶塑性モデル (T4-1) を用いた。しかしながら、図4に示す通り、T4-1は45°方向のR値を過小評価する。相互作用行列の変更では、実験値を精密に予測できないことは分かっている。そこで、集合組織データを微修正することで、R値の予測精度を改善させる方法を構築した。実験値と結晶塑性シミュレーションの結果の2乗誤差を最小化するように、Newton法を用いて集合組織の結晶方位データを微修正した。図6には実験値に基づく離散化した極点図とNewton法によって微修正した極点図を示している。Cube方位の集積が若干弱くなっているが、おおむね同じ集合組織データであった。この2つの集合組織データを用いて円筒深絞り解析を実施した。

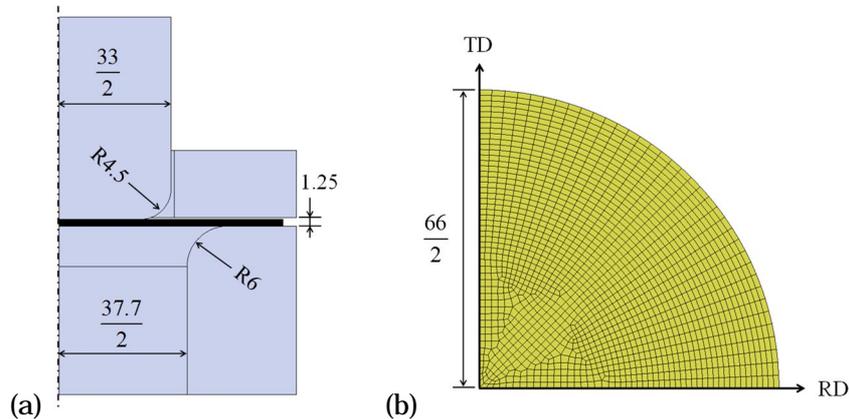


図5 円筒深絞り試験および解析の条件 (a) 金型形状, (b) ブランク形状

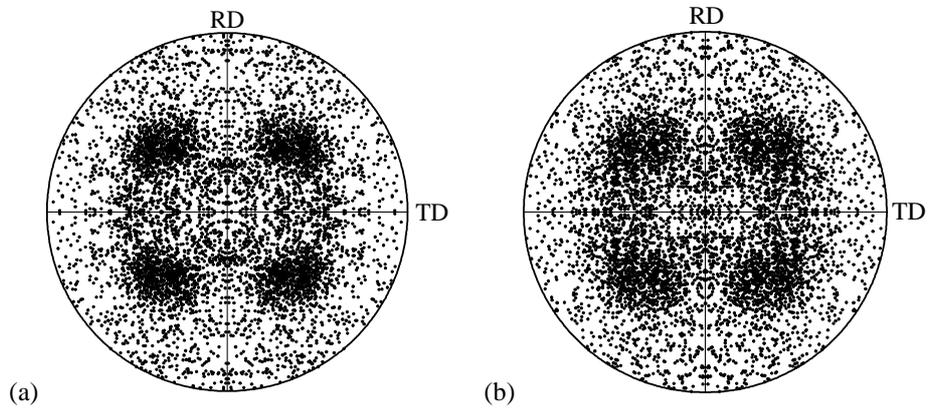


図6 離散的に表示した{111}極点図

円筒深絞りの実験および結晶塑性解析によって得られた側壁の高さ分布を図7に示す。実験結果に対して、実験的に求めた集合組織を用いた結果は 0° 、 90° 方向で高さを大きく見積もり、 45° 方向では小さく予測している。それに対して、集合組織を微修正した結果は、 0° 、 90° 付近では、実験値と一致する予測結果となった。 45° 方向においてはわずかに高さを小さく予測したものの、実験値の集合組織を用いた結果よりも良い予測結果である。このように集合組織の微修正によって成形解析の精度を向上させられることが分かった。また、比較のために巨視的塑性論としてYld2004降伏関数を用いた解析を実施した。結晶塑性解析の結果と比較すると側壁高さの予測精度が低いことが分かった。すなわち、本研究で構築した転位密度を基にした結晶塑性モデルを用いた板成形シミュレーション技術は、既存の技術よりも精度が良い結果を与えることを示した。

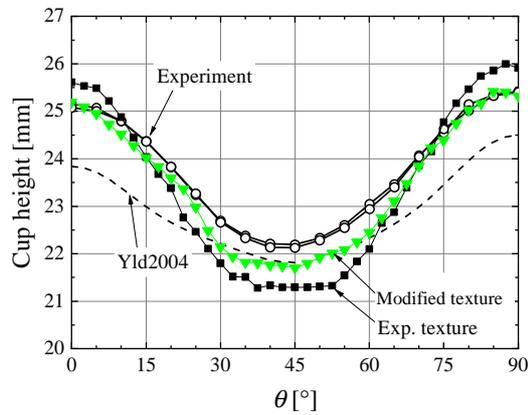


図7 円筒深絞り試験における側壁の高さの予測結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yoshida, K., Yamazaki, Y., Nakanishi, H	4. 巻 11
2. 論文標題 Experiments and Crystal Plasticity Simulations on Plastic Anisotropy of Naturally Aged and Annealed Al-Mg-Si Alloy Sheets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Metals	6. 最初と最後の頁 1979
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/met11121979	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 吉田健吾
2. 発表標題 集合組織データの微修正および塑性変形挙動の解析
3. 学会等名 第72回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田健吾, 本家智久
2. 発表標題 結晶塑性解析を用いて同定した異方性降伏関数による深絞り成形シミュレーション
3. 学会等名 第71回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田健吾, 山崎康人
2. 発表標題 Al-Mg-Si合金板の塑性異方性に関する実験および結晶塑性モデリング
3. 学会等名 第71回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田健吾, 山崎康人
2. 発表標題 多結晶塑性解析に硬化係数が与える影響
3. 学会等名 第70回塑性加工連合講演会講演論文集
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------