

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K05099

研究課題名(和文) 塑性変形に伴う結晶方位変化を考慮した降伏曲面による金属材料のスプリングバック解析

研究課題名(英文) Springback analysis of metallic materials by yield surface taken into into consideration crystal orientation changes with plastic deformation

研究代表者

上森 武 (Uemori, Takeshi)

岡山大学・自然科学学域・准教授

研究者番号：70335701

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、Taylor理論に基づいた結晶塑性解析の結果を考慮可能な巨視的塑性理論に必要な降伏関数の提案を行った。この提案はFEM解析においてメゾ領域からマクロ領域への変形をスムーズに橋渡しすることが可能な枠組みを示している。本理論を使用した解析も実行した。アルミニウム合金を対象に85%圧下における変形集合組織の予測とその後の降伏曲面の計算を行った。変形集合組織を考慮した降伏曲面については、von Misesの降伏関数とは異なり、初期塑性異方性を有する形状になった。今後は他材料においても同様の検討を行い、本解析手法の有用性について継続して検討する予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

結晶塑性理論の昨今の研究では、材料パラメータの決定をより困難にする更に微視的な因子の導入(設定が困難な多くの材料パラメータを使用した複雑な構成方程式の提案)が主に行われてきた。結晶塑性理論研究のほとんどが盲目的にTaylorモデルとPan-Rice型実験式をもとにした複雑な材料構成式の提案による材料パラメータ数の増大が試みられているだけであり、精度改善に関する抜本的な改善はここ数年試みられていない。そこで、上記枠組みではない根本的な結晶塑性理論の改善とそれをマクロ塑性に適用可能な高速計算が可能な枠組みを提示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, A yield function for macroscopic plasticity theory considered the results of crystal plasticity theory based on Taylor theory was proposed. This proposal provides a framework that can share the deformation between the meso region and the macro region for FEM analysis. Analyses using the above-mentioned theory were performed. The finite element calculations of deformation texture and the subsequent yield surface were carried out for aluminum alloys under over 85% thickness reduction of sheet metal. The yield surface considering the deformation texture shows an initial plastic anisotropy which is quite different from von Mises' yield function. In the future, similar approaches for other materials will be conducted to examine the usefulness of this analysis method.

研究分野：弾塑性力学

キーワード：有限要素法 弾塑性力学 結晶塑性理論 巨視的塑性理論

## 1. 研究開始当初の背景

金属材料のバウシング効果を高精度に再現する材料構成式の開発・提案・ソフトウェア実装により、国内外のあらゆる自動車部品の高精度加工解析が可能になってきたが、有限要素法に代表される数値シミュレーションにおいて、更なる高精度化をマクロ塑性理論で行うには限界が存在し、それを行うためには結晶塑性理論が必要である。しかしながら、結晶塑性理論研究のほとんどが盲目的に Taylor モデルと Pan-Rice 型実験式をもとにした複雑な材料構成式の提案による材料パラメータ数の増大が試みられているだけであり、精度改善に関する抜本的な改善はここ数年試みられていない。そこで、上記枠組みではない結晶塑性理論とそれをマクロ塑性に適用可能な高速計算が可能な枠組みについて検討する。

## 2. 研究の目的

本研究では、自動車部品成形過程において重要となる、金属材料残留応力と変形形状を結晶塑性理論に基づいて高精度に逐次計算するマクロ CAE (FEM) の構築とその実験検証を目的とする。本研究の特徴は、材料モデルが①バウシング効果と②降伏曲面形状変化を結晶塑性理論に基づき再現でき、結果として得られる③残留応力値が定性・定量的に正確かつ、ユーザーフレンドリーなプレス成形システムを構築する。

## 3. 研究の方法

結晶塑性理論を利用することで現在の理論では到達できない高精度塑性加工解析を行えるツールを開発するために、以下に示す4つのフェーズ(1年1フェーズに従って、4年間でのシステム完成を目指し、研究を進めた。以下に具体的な研究方法を提示する。

- 1) フェーズ1: Taylor 理論に基づいた高速な結晶塑性計算ツールの開発を行う。
- 2) フェーズ2: 汎用 FEM との連携を行い、変形の進行に伴い変化していく降伏曲面形状から計算される塑性ひずみ増分ベクトルについて検討する。
- 3) フェーズ3: アルミニウム合金の材料試験や成形加工を実験的に実施し、スプリングバック変形量などを上記開発手法と比較・検討する。
- 4) フェーズ4: 更なる解析高精度化のための Taylor 理論改善や他材料(例えば BCC 金属)への適用を試みる。

## 4. 研究成果

結晶塑性有限要素解析は、従来の巨視的塑性有限要素法と同様に様々な加工プロセスに対応可能な高い汎用性があるため、材料開発の高効率化を担うことができる手法、そして圧延集合組織形成過程を明らかにする手法として期待が高まっている。しかしながら、コンピュータ演算速度が成熟した現在に至っても、短期間での圧延集合組織計算の実行が難しく、その計算精度にも問題がある場合が多々存在する。その理由の1つとして挙げられるのが、ひずみ一定仮説に基づく圧延集合組織の計算を行っていることである。

その問題を克服するため、圧延集合組織に関する従来の研究として、関根ら<sup>1)</sup>は、変形集合組織の予測および制御を行うのに必要となる結晶粒内部の変形状態(格子スピンやすべり速度)を Taylor 理論に基づいた制約付き最適化問題として定式化および検討した。また、大久保<sup>2)</sup>は、特定の結晶方向へすべり変形する立方晶の拘束条件下での塑性変形の問題を、Taylor 理論の最小せん断和の原理に基づく制約付き線形最小化問題として初めて定式化し、種々の場合に適用可能にした。本報告では、塑性加工を受けた金属材料の圧延集合組織とそれに基づく材料特性を高速かつ高精度に予測することを目的として、上記手法を用いたアルミニウムの圧延集合組織予測を行ったので、それについて報告を行う。

### 結晶塑性理論

本報告で使用する結晶塑性理論には Taylor 理論を基礎としている。この理論は「変形を受けるそれぞれの結晶粒の速度勾配テンソル  $L_{ij}$  は試料全体が受ける巨視的速度勾配テンソル  $\langle L_{ij} \rangle$  と同一である」であり、また、結晶塑性解析で使用される「塑性ストレッチングテンソル  $D_{ij}^p$  は、すべり系上のせん断ひずみ速度の重ね合わせで決まる」理論である。FEM などの数値解析ツールで一般的に採用されている Taylor モデルなどでは、実際の結晶方位(集合組織)の予測には限界がある。例えば、FCC 金属の圧延解析では、仮に高い圧下率を材料に付与したとしても示す Taylor 方位と呼ばれる圧延集合組織しか得られないが、この理論を用いると、そのような問題点は無く、圧延集合組織形成に対し、より高い解析精度が期待できる。そこで、本報告では上記せん断ひずみ速度  $\dot{\gamma}^{(\alpha)}$  を決定する際に最小すべりの原理を適用した。この理論に従えば「各結晶粒の塑性ストレッチングテンソル  $D_{ij}^p$  を満足する全てのすべり系の組み合わせの内、すべり系の活動によってなされた仕事が最小となるせん断ひずみ速度(増分)の組み合わせが選択される」こと

で、結晶塑性変形を再現する。そのために以下に示す 2 モデルを用いた数値シミュレーションを試みた。

### 結晶塑性計算モデル

FC モデル (Full constraint model) は、前述の Taylor 理論における基本的仮定に従い、多結晶全体に付与される巨視的速度勾配テンソル  $\langle L_{ij} \rangle$  と多結晶を構成するそれぞれの結晶粒に付与される速度勾配テンソル  $L_{ij}$  を全て等しいと仮定し、各結晶粒の結晶方位回転を計算する。

Taylor 理論と最小すべりの原理より、与えられた変形拘束条件のもとで内部エネルギー  $\dot{E}_r(\dot{\gamma}^{(\alpha)})$  を最小化する一般化 Taylor 問題として定式化できる。

$$\dot{E}_r(\dot{\gamma}^{(\alpha)}) = \sum_{\alpha=1}^N \tau_c^{(\alpha)} \cdot |\dot{\gamma}^{(\alpha)}| \rightarrow \text{minimize} \quad (1)$$

$$\text{subject to } D_{ij}^p = \frac{1}{2} \sum_{\alpha=1}^{N_{slip}} (m_{ij}^{(\alpha)} + m_{ji}^{(\alpha)}) \dot{\gamma}^{(\alpha)} \quad (2)$$

ここで、 $N$  はすべり系総数、 $m_{ij}^{(\alpha)}$  は  $\alpha$  番目のすべり系の Schmid テンソル、 $\tau_c^{(\alpha)}$  はすべり系の臨界分解せん断応力 (CRSS) である。本研究では、上記 FC モデルとは異なり、結晶粒界近傍では、不均一変形を引き起こすため、実際の多結晶の塑性変形がマクロ速度勾配テンソルとミクロ速度勾配がすべて等しいと設定しないことを考えた結晶方位回転の計算を行うモデルである。緩和されるべき速度勾配成分  $L_{ij}$  のせん断面とせん断方向は基準座標系に対し任意に設定できるように考え、その単位法線ベクトルと単位方向ベクトルをそれぞれ  $b^{(s)}$  と  $d^{(s)}$  とする。微視的な塑性ストレッチングテンソル  $D_{ij}^p$  は、緩和によって生じるせん断ひずみすべり速度  $\dot{\gamma}_p^{(s)}$ 、テンソル積  $g_{ij}^{(s)} = b_i^{(s)} d_j^{(s)}$ 、巨視的塑性ストレッチング  $\langle D_{ij}^p \rangle$  により表される。 $\dot{\gamma}_p^{(s)}$  を考慮した一般化 Taylor 理論に従うと、以下に示す  $D_{ij}^p$  の制約条件下で、 $\dot{\gamma}^{(\alpha)}$ 、 $\dot{\gamma}_p^{(s)}$  が唯一最適解として得られる非線形最適化問題として定式化される。

$$D_{ij}^p = \langle D_{ij}^p \rangle + \sum_{s=1}^3 \frac{1}{2} (g_{ij}^{(s)} + g_{ji}^{(s)}) \dot{\gamma}_p^{(s)} \quad (3)$$

$$\dot{E}_T(\dot{\gamma}^{(\alpha)}, \dot{\gamma}_p^{(s)}) = \tau_0 \left( \sum_{\alpha=1}^N |\dot{\gamma}^{(\alpha)}|^{m+1} + \sum_{s=1}^M |\alpha^{(s)} \dot{\gamma}_p^{(s)}|^{m+1} \right)^{1/(m+1)} \rightarrow \text{minimize} \quad (4)$$

$$\text{subject to } \langle D_{ij}^p \rangle = \frac{1}{2} \sum_{\alpha=1}^N (m_{ij}^{(\alpha)} + m_{ji}^{(\alpha)}) \dot{\gamma}^{(\alpha)} - \frac{1}{2} \sum_{s=1}^M (g_{ij}^{(s)} + g_{ji}^{(s)}) \dot{\gamma}_p^{(s)}$$

アルミニウム合金 A5182 に対する本研究提案モデルの平面ひずみ圧縮解析

上記ランダム方位を用いた解析に適用した提案モデルを小西<sup>3)</sup>の 85% 圧下率を有する 5000 系アルミニウム合金 A5182 の圧延集合組織実験に適用し、その結果の比較検討を行った。今回提案モデルにより計算された圧延変形を付与した集合組織の極点図を図 1 に示す。

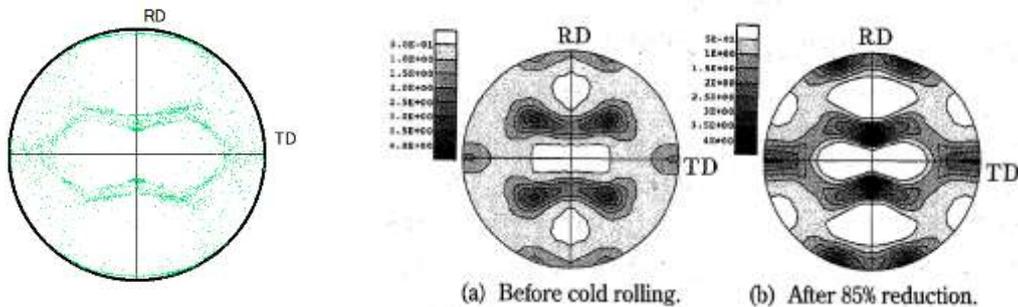


図 1 85% 圧延されたアルミニウム合金 A5182 の  $\{111\}$  極点図

解析結果は精度よく実験結果を再現していることが分かる。また、アルミニウム合金で重要な指標となるβファイバーについても、本手法提案モデルで検討した。検討結果を図2に示す。適切な圧延集合組織計算が、アルミニウム合金においても可能であることが確認できる。また、本計算を有限要素解析で実施可能とするための降伏関数としてF. Montheilletらによって提案された降伏関数を改良した。本研究で使用した降伏関数を以下に示す。

$$F(S) = \alpha \left\{ |S_{11} - S_{22}|^n + |S_{22} - S_{33}|^n + |S_{33} - S_{11}|^n \right\} + 2\beta \left\{ |S_{12}|^n + |S_{23}|^n + |S_{31}|^n \right\} \quad (5)$$

$$= (\sqrt{6}\tau_c)^n$$

ここで $S_{ij}$ は理想方位の結晶座標系での偏差応力テンソル成分である。また、指数 $n$ は巨視的塑性理論で使用する降伏関数の凸性を満足するために1以上としている。なお、係数 $\alpha, \beta$ は結晶方位に依存した変数、 $\tau_c$ は臨界分解せん断応力である。この降伏関数を使用した降伏曲面の計算結果を図3に示す。図3に示す赤線が上記降伏関数にて計算した結果、青線がこの結果の比較対象として、本降伏関数に使用した結晶方位と同じ結晶方位情報を使用した結晶塑性有限要素解析により得られた計算結果である。本結果より、提案した降伏関数は結晶塑性有限要素法から計算されたアルミニウム合金の変形集合組織の降伏曲面を概ね再現できていることが確認できる。しかしながら本降伏関数の材料パラメータ決定には、数多くの数値解析や実験を必要としており、未だにユーザーフレンドリーなシステム環境を構築したとは言い難い。今後は、降伏関数の更なるブラッシュアップを図る予定である。

#### 参考文献

- (1) 関根和喜, 井上博史, “結晶塑性に関する Taylor-Bishop-Hill 理論の一般化とひずみ速度依存型結晶塑性モデル”, 鉄と鋼, Vol.85, No.5(1999), pp.42-46.
- (2) 大久保忠恒, “すべり変形する立方金属の拘束条件下の塑性変形”, Vol.93, No.9(1968), pp.681-690.
- (3) 小西晴之, 北川浩, 中谷彰宏, 安永繁信, “f.c.c.多結晶金属の平面ひずみ圧縮変形下における集合組織の発達”, 材料, Vol. 46 No.8 (1997), pp. 880-886.

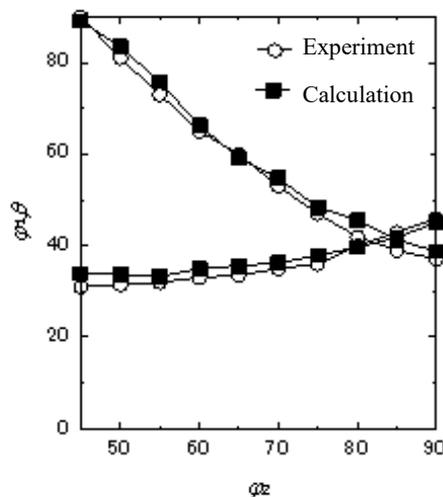


図2 実験結果と本研究提案手法のβファイバー計算結果の比較

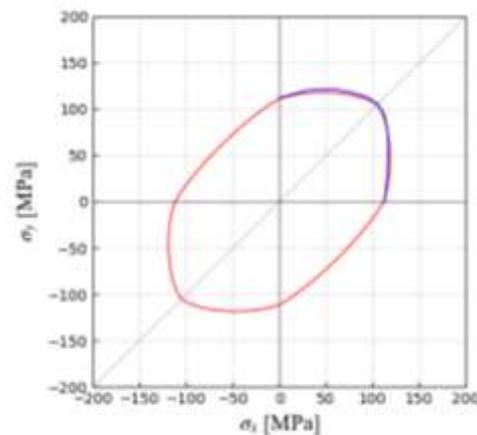


図3 結晶塑性有限要素法による計算結果と提案手法の計算結果の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 土居 雅利, 上森 武, 多田 直哉, 坂本 惇司
2. 発表標題 結晶塑性有限要素解析による多結晶純チタン薄膜の活動すべり系予測
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 稲毛俊介, 上森武, 多田直哉, 坂本惇司
2. 発表標題 二相組織材料に発生する不均一応力が等塑性仕事曲面に与える影響に関する均質化有限要素解析
3. 学会等名 日本塑性加工学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 土居 雅利, 上森 武, 多田 直哉, 坂本 惇司
2. 発表標題 修正シュミット因子による多結晶純チタン薄膜の活動すべり系予測に関する解析的検討
3. 学会等名 軽金属学会中国四国支部
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田邊 拓也, 上森 武, 多田 直哉, 坂本 惇司, 三井 孔佑, 小野寺 光輝
2. 発表標題 結晶塑性理論を用いたアルミニウム圧延集合組織の解析的検討
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部 第 5 9 期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田邊 拓也, 上森 武, 多田 直哉, 坂本 惇司, 三井 孔佑, 小野寺 光輝
2. 発表標題 結晶塑性理論を用いたアルミニウム圧延集合組織の解析的検討
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国支部 第59期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三井 孔佑, 上森 武, 多田 直哉, 坂本 惇司
2. 発表標題 面内反転負荷を受ける Ti-6242 合金の結晶塑性均質化有限要素解析
3. 学会等名 日本機械学会 2020年度年次大会
4. 発表年 2020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
---------	---------