

令和元年5月29日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05964

研究課題名(和文) 材料の固有寸法を考慮した物理立脚巨視的弾塑性論

研究課題名(英文) Macroscopic elastoplasticity model with intrinsic material length scales

研究代表者

黒田 充紀 (Kuroda, Mitsutoshi)

山形大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：70221950

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、材料の固有寸法因子を考慮した実用塑性理論を実験事実に基づいて開発することを目的とした。巨大ひずみ加工で作製した微細結晶粒材料に着目し、その引張/圧縮反転負荷試験から得られたバウシinger曲線から粒界の役割を推定したところ、粒界は転位運動の大きな障害物ではない可能性が示された。また、同材料の転位密度を測定したところ、巨大ひずみ加工材の強度増大の主要因は転位強化であることが強く示唆された。さらに、巨大ひずみ加工材には著しいひずみ速度依存性が付与されていることも判明した。これらの知見は従来知られていないものであり、本研究により、新しい塑性理論構築の基盤が整備されたとと言える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、材料の固有寸法因子を考慮した実用塑性変形理論を実験事実に基づいて開発することを目的としたものである。研究過程で、粒界の役割、結晶粒微細化過程における強度発現メカニズム、加工による大きなひずみ速度依存性出現などに関する新しい知見が多数得られた。これらは、従来認識されていた知見とは大きく異なるものである。本研究成果は、新しい塑性理論構築の基盤であるとともに、金属の巨視的な力学物性をより深く理解するための新しい研究潮流の端緒となることが期待される。

研究成果の概要(英文)：The present study aims at developing a practical elastoplasticity model with intrinsic material length scales. Metals with fine crystal grains processed by severe plastic deformation (SPD) method are chosen as the target materials. Bauschinger tests (tension/compression tests) were performed to estimate roles of grain boundaries. The test results suggest that grain boundaries in SPD processed metals does not act as strong barriers to dislocation movement. Results of dislocation density measurements suggest that SPD processed metals are mainly strengthened by high density of dislocations rather than grain size or grain boundary effects. Furthermore, it was found that SPD processed metals possesses significant strain rate (or time) dependency. The information obtained in the present study gives foundations for constructing a new practical elastoplasticity theories.

研究分野：材料力学，連続体力学，金属材料

キーワード：塑性構成式 金属材料 強化機構 結晶塑性

## 1. 研究開始当初の背景

機能材料の設計・創成、マイクロフォーミングのシミュレーション、MEMSの機能評価などにおいて寸法効果を考慮した材料力学が求められているが、実用に供されるまでには至っていない。これまで研究代表者が構築・提案してきた結晶塑性論ベースの「ミクロンスケール塑性論」は材料物理学を直接的にモデル化することから精度的には有利であるもののシミュレーションにおいては解析自由度が多いために計算時間上は不利な面が認められる。このような背景の下、本研究開始当初は、実験事実を十分踏まえた上で、研究代表者によるミクロンスケール塑性論をベースとした数理的に簡易な実用的な物理立脚塑性論の構築と提案を目指すこととした。

## 2. 研究の目的

本研究は、上述のように代表者が提案するミクロンスケール塑性論をベースに、それを数理的に簡易化した実用理論を開発し、寸法効果を考慮した材料力学の普及を進める基盤を作ることを当初の目的とした。

第一に、ミクロンスケール塑性論に残っていた問題点（内部界面・粒界の役割の解明）を解決することを目指した。このために、工業用純アルミニウムと無酸素銅の微細結晶粒材料を、巨大ひずみ加工の代表的手法の一つであるECAP (Equal Channel Angular Pressing) 法で作製し、それらの引張/圧縮反転負荷試験から得られたバウシinger曲線を基に、粒界とその付近に発生する内部応力の役割を推定した。

第二に、巨大ひずみ加工材による微細結晶粒材料の強化機構を詳細に調べその巨視的モデル化を行うことを目指した。予備試験的に転位密度を測定したところ、強度増大の主要因は転位による強化であることが強く示唆された。当初は「高強度発現の主要因は微細な粒径である」と予想していた（多くの研究者がそのように認識している）が、一連の実験結果はこれとは異なる知見を与え、当初考えていたモデル化方針の再検討が必要となった。このためモデル構築の前段階として、より詳細な強化機構の内訳について重点的に調べるに至った。

## 3. 研究の方法

### 3.1 粒界（内部界面）の力学的性質の調査

本研究の前段階の研究において開発したミクロンスケール塑性論に残る問題点（内部界面・粒界の役割の解明）を解決するために、まず、工業用純AlとCuの微細結晶粒材料を、巨大ひずみ加工の代表的手法の一つであるECAP (Equal Channel Angular Pressing) 法で作製し、引張り予ひずみ→圧縮、圧縮予ひずみ→引張りの試験を行って、それらから得られたバウシinger曲線を基に、粒界とその付近に発生する内部応力の役割を推定した。

### 3.2 微細結晶粒材料の強化機構の調査

微細結晶粒材料の強化機構を詳細に調べるために巨大ひずみ加工（ECAP法を利用）を受けた工業用純アルミニウムの降伏応力を、線形加算則を仮定して粒径強化分と転位強化分に分離した。

### 3.3 数理モデルの構築

当初の研究計画では、ミクロンスケール塑性論を数理的にさらに簡易化した巨視的モデルまで整備する予定であったが、研究過程で新たな知見が多く見つかったために、数理モデルについては、ひずみ勾配塑性論に基づく3次元解析コード（多結晶塑性論版と巨視的塑性論版の両方）を開発して不均質材料の強化機構を検討する段階に留まっている。

## 4. 研究成果

### 4.1 粒界の力学的性質

実験結果より、ECAP加工を繰り返して粒径が微細化してもバウシinger効果の大きさはほぼ一定であることがわかった（学会発表④⑩⑪で報告）。図1はECAP加工を加えた無酸素銅の引張り/圧縮反転負荷試験の結果である。図中には各ECAP加工パス毎の平均粒径を示した。図2は、バウシinger応力パラメータ $\beta_0$ と粒径の関係をまとめたものである。 $\beta_0$ は反転負荷直前の流動応力と反転後の再降伏応力との差を前者で除した値である。ECAP加工1パスと16パスを比較すると粒径には約30倍の開きがあるものの、 $\beta_0$ は約1.3倍程度の増加に留まっている。この結果より、バウシinger効果と粒径には強い相関はないものと考えられる。当初は、粒界は転位運動の強いバリアであり、粒径微細化とともに内部応力が大きくなって、バウシinger効果も著しく大きくなると予想していたが、実験事実は予想とは異なる結果となった。強ひずみ加工材内の粒界は転位運動の大きな障害物ではなく、力学挙動にそれほど大きな影響を与えていない可能性が示唆された。

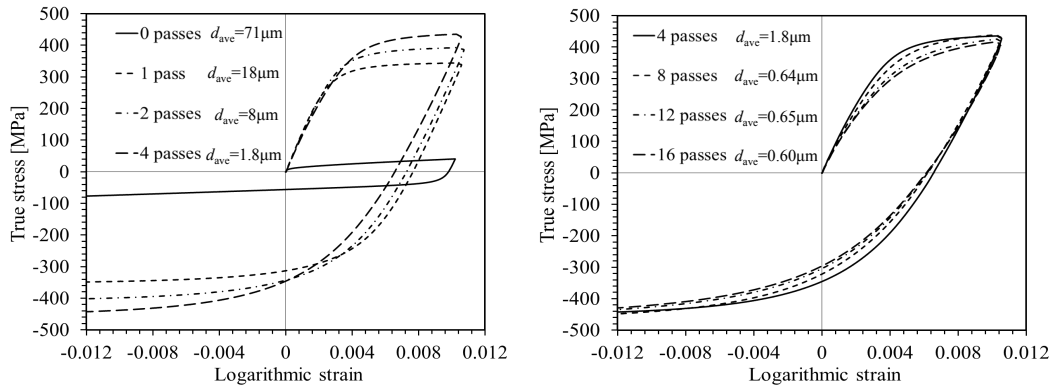


図1 ECAP加工を繰返し施した無酸素銅丸棒の引張り／圧縮反転荷重試験結果

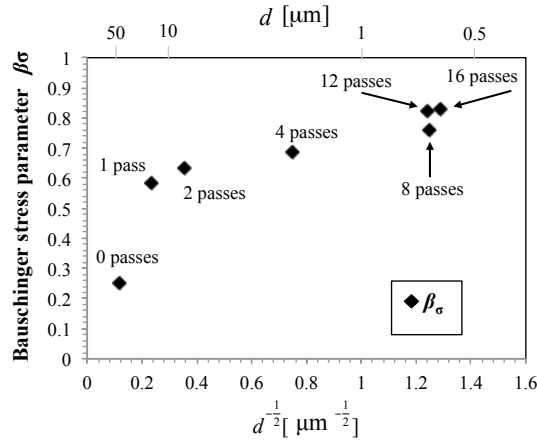


図2 ECAP加工を繰返し施した無酸素銅丸棒のバウシンガー応力パラメータ  $\beta_\sigma$  と粒径の関係.  $\beta_\sigma$  は反転荷重直前の流動応力と反転後の再降伏応力との差を前者で除した値.

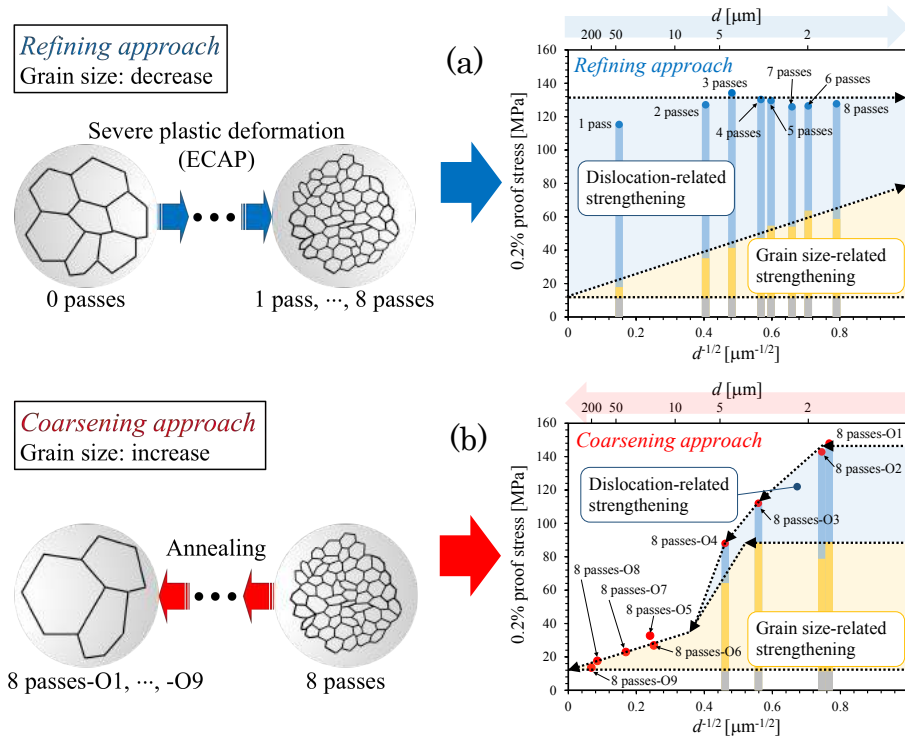


図3 (a) ECAP加工を繰返し行うことにより結晶粒を微細化させる過程(refining approach)における降伏応力(0.2%耐力)を転位強化分と粒径強化分に分離した結果; (b) ECAP加工を8パス施し結晶粒を十分に微細化した材料に段階的に焼鈍を施して粒を粗大化させる過程(coarsening approach)において降伏応力(0.2%耐力)を転位強化分と粒径強化分に分離した結果.

#### 4.2 微細結晶粒材料の強化機構

巨大ひずみ加工（ECAP法を利用）を受けた工業用純アルミニウムの降伏応力（0.2%耐力）を、線形加算則を仮定して粒径強化分と転位強化分に分離した（雑誌論文①に報告）。転位強化を見積もるための転位密度はWilliamson-Hallプロットを用いて算出した。図3(a)は、ECAP加工を繰り返すことにより粒径を微細化させる過程において、降伏応力（0.2%耐力）を転位強化分と粒径強化分に分離して、粒径のマイナス1/2乗との関係をプロットしたものである。これより、粒径強化量は、ほぼ従来知られているHall-Petch関係と同程度であることが分かった。これは結晶粒をマイクロサイズまで微細化しても、従来知られている粒径強化を上回る効果は得られないことを示している。結果として、巨大ひずみ加工を受けたアルミニウムにおいては、粒径強化に比べて転位強化が支配的であることが明らかとなった。図3(b)は、ECAP加工を8パス施し、結晶粒を十分に微細化した材料に段階的に焼鈍を施して粒を粗大化させる過程において、図3(a)と同様に、降伏応力（0.2%耐力）を転位強化分と粒径強化分に分離してプロットしたものである。粗大化過程においては、従来のHall-Petch関係を明らかに上回る粒径由来の強化（粒径強化量と粒径のマイナス1/2乗との関係を表す直線から大きく外れる）が発現することが新たに分かった。

#### 4.3 微細結晶粒材料の応力緩和現象

さらに、巨大ひずみ加工材に変形を与えた後、その変形を固定すると著しい応力緩和（導入された応力の減少）が観察されることも見出した（学会発表⑥⑨で報告）。図4(a)(b)に、ECAP加工を0から8パス施した工業用純アルミニウム(A1070)における応力緩和率と緩和時間の推移を示す。応力緩和率は緩和中の応力を緩和開始時の応力で除することにより算出している。加工前の材料（0パス材）はほとんど緩和しないのに対して、ECAP材は非常に早い速度で応力が減少することがわかる。

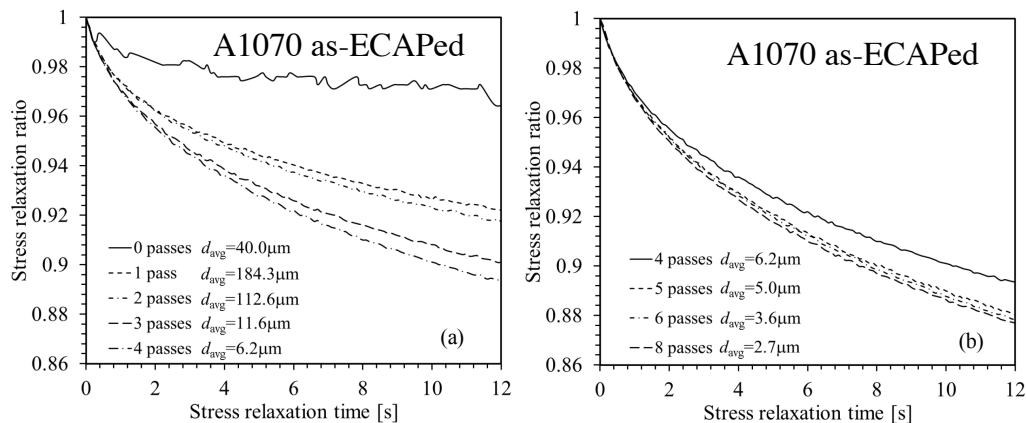


図4 ECAP加工を0から8パス施した工業用純アルミニウム(A1070)の応力緩和の様子

#### 4.4 数理モデルの構築

上記3.1, 3.2で示した実験観察結果に基づき、巨大ひずみ加工材において観察される高い強度は不均一に分布している転位密度の平均値に対応するものとし、粒径によらないほぼ一定のバウシinger効果発現の起源は転位密度の空間分布に求めるモデルを作成し、これにより実験結果を説明できることを示した（学会発表①で報告）。しかしながら、3.3で報告した大きなひずみ速度依存性を表現できるまでには精密化されていない。

当初の目標では、ミクロンスケール塑性論を数理的にさらに簡易化した巨視的モデルまで整備する予定であったが、これについては、ひずみ勾配塑性論に基づく3次元解析コードを開発して不均質材料の強化機構を検討する段階（学会発表②で報告）までに留まり、今後に課題が残った。

今後の研究では、転位密度の平均値による巨視的な意味での強化機構、転位密度の空間分布に起因する挙動（バウシinger効果や交差効果を表現）、大域的な塑性ひずみ勾配に起因する挙動（主に材料の外形寸法・形状の効果を表現）、ひずみ速度依存性を合理的かつ簡易な表現で統合した比較的簡易な実用モデルの構築を目指す。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計1件）

- ① Koizumi T, Kuroda M, Grain size effects in aluminum processed by severe plastic deformation. Materials Science and Engineering A710 (2018) 300-308. Doi:10.1016/j.msea.2017.10.077 (査読有り)

〔学会発表〕（計 11 件）

- ① 森田周・黒田充紀：多結晶金属におけるバウシニング効果の発現機構に関する研究，第 31 回計算力学講演会（日本機械学会）（2018.11.23～11.25 徳島大学 常三島キャンパス），OS19-6.
- ② 仁部絢斗・黒田充紀：高次ひずみ勾配理論を用いた不均一塑性変形の解析，第 31 回計算力学講演会（日本機械学会）（2018.11.23～11.25 徳島大学 常三島キャンパス），OS19-3.
- ③ Kuroda M, Koizumi T, Strengthening Mechanisms in Fine-Grained Metals Processed by Severe Plastic Deformation. IUTAM Symposium on Size-Effects in Microstructure and Damage Evolution, Technical University of Denmark, 2018.5.28～6.1.
- ④ 中田友平，小泉隆行，黒田充紀：超微細結晶粒純銅におけるバウシニング効果と結晶粒径の関係，第 57 回日本銅学会講演大会（日本銅学会）（2017.11.18～11.19 富山大学 五福キャンパス）57-58.
- ⑤ 小泉隆行，鹿勇太，黒田充紀：繰返し重ね接合圧延によって作製した超微細結晶粒純アルミニウムにおける SD 効果，軽金属学会第 133 回秋期大会（軽金属学会）（2017.11.4～11.5 宇都宮大学陽東キャンパス），167-168.
- ⑥ 小泉隆行，車谷安奈，黒田充紀：繰返し重ね接合圧延によって作製した超微細結晶粒純アルミニウムにおける応力緩和挙動，軽金属学会第 133 回秋期大会（軽金属学会）（2017.11.4～11.5 宇都宮大学陽東キャンパス），169-170.
- ⑦ 小泉隆行，島田知弥，黒田充紀：繰返し重ね接合圧延によって作製した超微細結晶粒純アルミニウムにおける結晶粒径効果の検討，軽金属学会第 133 回秋期大会（軽金属学会）（2017.11.4～5 宇都宮大学陽東キャンパス），95-96.
- ⑧ Kuroda M, Strain Gradient Plasticity: An Application to Plastic Flow Localization Analysis. Advances in Engineering Plasticity and its Application XIII (AEPA 2016) (2016.12.4～8 広島大学) (In: Key Engineering Materials, Vol. 725 (2017) 41-46.
- ⑨ 小泉隆行・黒田充紀：超微細結晶粒アルミニウムにおける応力緩和挙動，軽金属学会第 131 回秋季大会（軽金属学会）（2016.11.5～11.6 茨城大学水戸キャンパス），153-154.
- ⑩ 小泉隆行・中田友平・黒田充紀：超微細結晶粒純銅におけるバウシニング効果，第 56 回日本銅学会講演大会（日本銅学会）（2016.10.29～30 東海大学高輪キャンパス），83-84.
- ⑪ 小泉隆行・黒田充紀：バウシニング効果測定を用いた超微細結晶粒材料の粒界効果の推定，第 29 回計算力学講演会（日本機械学会）（2016.9.22～9.24 名古屋大学東山キャンパス），138.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

<http://kuroda.yz.yamagata-u.ac.jp/activity.html>

## 6. 研究組織

(1)研究分担者（なし）

(2)研究協力者

小泉隆行（Takayuki Koizumi；山形大学技術系職員）

中田友平（Yuhei Nakata；山形大学大学院生），島田知弥（Tomoya Shimada；同），森田周（Shu Morita；同），仁部絢斗（Kento Nibe；同），車谷安奈（Anna Kurumatani；山形大学工学部生～山形大学大学院生），鹿勇太（Yuta Shika；同） [所属は全て研究当時].