

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14856

研究課題名(和文)少結晶金属板材を用いた不均一塑性変形機構の解明

研究課題名(英文)Elucidation of mechanism of nonuniform plastic deformation by using oligocrystalline metal sheets

研究代表者

上島 伸文(Ueshima, Nobufumi)

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：10733131

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)：近年の電子機器の小型化により、配線などに用いられる銅線、端子などは部品中に含まれる結晶粒の数が少なくなっている。そこで、そのような試料の変形予測モデル検討の為、少結晶試験片を用いた引張試験中ひずみ分布の観察と有限要素多結晶モデルによる計算を行い、実験結果と計算結果を比較した。実験結果からは理論から予想される変形挙動と一致した傾向が得られた。計算結果と実験結果を比較したところ、結晶粒の数が少ない場合にはひずみ分布が一致する傾向が得られたが、多い場合は一致しなかった。今回用いた理論や硬化則の限界を示すとともに、今後の少結晶試料の変形予測モデル改善の方向性について知見が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的には流動応力や集合組織などのマクロな変形挙動を予測できるモデルであっても、結晶粒毎のひずみ分布などミクロな変形挙動を予測できない場合があることを示し、モデルの改善につながる成果が得られたと考えられる。社会的には、材料に含まれる結晶の数が少ない場合の変形予測について、予測可能な場合と困難な場合を示し、予測の可否について実例を示し、そのような材料の加工の予測の際の指針を示した。

研究成果の概要(英文)：The number of the grains in copper wires or connectors has been decreasing due to the miniaturization of the products. In this study, the measurements of strain distribution during tensile testing of oligo-crystalline specimen and calculations using finite element polycrystal model have been carried out. The measured and calculated stress-strain curve and strain distributions were compared. The measured deformation behavior well-agreed with the prediction by the theories of plastic deformations. The comparison of experiment with calculation clarified that the calculation can reproduce the strain distribution of the specimen of which the number of grains is a few. On the other hand, the calculation cannot reproduce the strain distribution of the specimen of which the number of grains is relatively many. These results show the limitation of the model and hardening rules and the guideline to improve the calculation model for oligo-crystalline materials was obtained.

研究分野：金属材料学

キーワード：有限要素多結晶モデル 塑性変形

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

これまでの加工では部材の大きさに対して材料の組織が微細であり、材料を均質とみなすことが可能であった。一方で、配線などに用いられる銅線、端子等は微細化が進んでおり、幅方向や厚さ方向に数個～10個程度しか結晶粒を含まない程度になってきている。このような材料を変形させる場合には、これまでの塑性加工計算に用いられてきた、材料が均質体であるという仮定は成り立たず、変形の予測には結晶方位を陽に考慮する必要があり、実際にも、変形は均一ではないことが報告されている。その他にも微細素材の加工の際には、表面荒れなどによる精度の悪化が問題となっている。

金属の結晶方位を陽に考慮した計算手法として、結晶塑性有限要素法(Crystal Plasticity Finite Element Method, CPFEM)が近年注目を集めている。この手法は結晶材料のすべり系を考慮し、変形方向に関して拘束条件を与えるものである。この手法を用いれば、金属材料の結晶方位が変形に及ぼす影響を陽に考慮することができ、せん断帯の形成など不均一な変形や、純銅型の集合組織の形成を再現することができる。

CPFEM 計算では、ホールペッチ則や黄銅型の集合組織を再現できないことが知られていた。これらを再現する為のモデルはこれまでに多く提案されている。その結果について定性的に実際の変形と対応が取れているという報告が多くみられる。しかし、マクロな変形や集合組織との比較は多いものの、定量的に局所的な変形を詳細に検証したものはあまり見られない。このことが、多数のモデルが提案される原因となっていると考えられる。硬化や結晶回転は粒内のひずみの不均一性に起因すると推測されており、粒毎の不均一変形、粒径依存性についてモデルの妥当性検証が必要であると考えられる。本研究では最小すべりの原理に基づいて活動すべり系を計算できる有限要素多結晶モデル(Finite Element Polycrystal Model, FEPM)を用いて実験との比較を行う。

### 2. 研究の目的

#### (1) DIC 解析と EBSD 解析による結晶方位分布と変形の関係の調査

Cu-xAl 合金などの少結晶材料の変形挙動をデジタル画像相関法(Digital Image Correlation, DIC 法)などの実験的手法を用いて明らかにする。計測や計算との比較を容易にするため、粗大結晶粒材料を用い、粒毎の不均一変形に着目し調査を行う。

#### (2) FEPM 計算との比較とモデルの妥当性の検討

FEPM を用いた計算を実施し上述の実験結果と定量的な比較を行う。その結果から、モデルの妥当性を検証する。モデルが妥当でない場合には現象を再現するような新たなモデルを検討する。

### 3. 研究の方法

#### (1) DIC 解析と EBSD 解析による結晶分布と変形の関係の調査

始めに、高周波溶解炉を用いた溶解・鋳造後、徐冷により Cu-xAl 合金を作製した。溶解鋳造条件やその後の冷却条件を調整することで、種々の結晶粒径を持つ合金を作製した。その後、ドッグボーン型引張試験片の形状に機械加工し、EBSD 測定を行い、結晶粒と結晶方位の分布を測定した後、変形を追跡する為のパターンをペイントした試料を、CCD カメラで表面状態を観察しながら引張試験を実施した。DIC 法を用いて局所変形の分布の時間変化を解析し、ひずみ分布と粒径・シュミット因子との関係や、粒毎の不均一変形、結晶回転を解析し、その特徴を調べた。

#### (2) FEPM による計算との比較とモデルの妥当性の検討

FEPM 解析を、実験を模擬するように行い、実験結果と計算結果を比較した。EBSD 測定により得られた結晶方位と粒の分布を、有限要素モデルに落とし込み、実験を模擬した計算条件で解析を行い、ひずみ分布を比較した。逐次累積法によってすべり系毎のせん断ひずみ量を決定した。加工硬化則としては、まずは n 乗硬化則を用いて係数を、実験で得られた応力 ひずみ曲線を再現するように決定した。

### 4. 研究成果

#### (1) DIC 解析と EBSD 解析による結晶分布と変形の関係の調査

得られた試料の引張試験片平行部の結晶方位分布の例を図 1 に示す。様々な結晶方位や粒径をもつ試料を作製できたことが分かる。

ひずみ解析の例として、図 2 に図 1(c)の試料の引張中のひずみ分布の変化を示す。最も大きな粒にひずみが集中していることが分かる。図 3 は図 1(d)の試料の引張中のひずみ分布の変化を示している。この場合も大きな粒の付近にまずはひずみが集中していることが分かる。

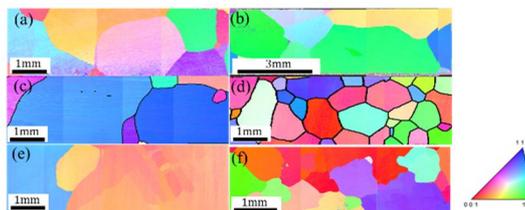


図 1 得られた試料の IPF マップ。  
(a)-(f)まで冷却条件などを調整し種々の粒径・方位が得られた。

シュミット因子を計算し、予想されるシュミット因子最大のすべり系と光学顕微鏡写真から得られるすべり線を比較した結果、ほぼすべての粒でシュミット因子から予想されるすべり線の傾きと一致していた。このことから、転位の活動が主な変形メカニズムであるとして FEPM 解析を行った。

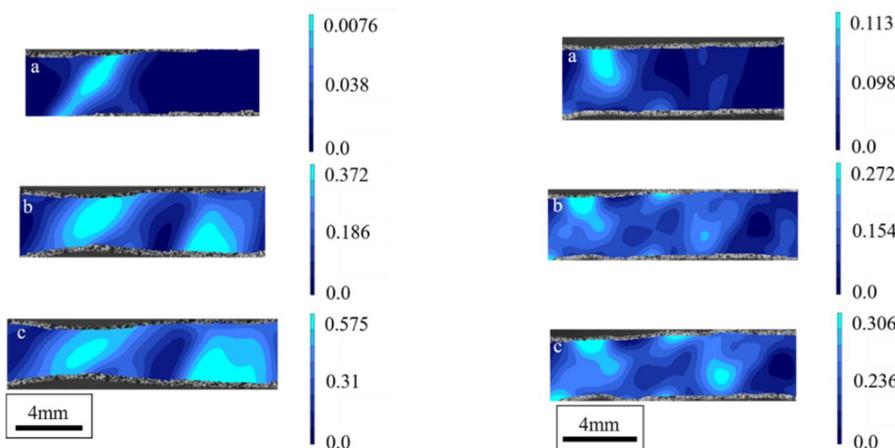


図 2 図 1(c)の試料の引張中のひずみ分布の変化。(a)  $\epsilon=0.0177$ , (b)  $\epsilon=0.183$ , (c)  $\epsilon=0.308$ 。

図 3 図 1(d)の試料の引張中のひずみ分布の変化。(a)  $\epsilon=0.0326$ , (b)  $\epsilon=0.134$ , (c)  $\epsilon=0.205$ 。

## (2) FEPM による計算との比較とモデルの妥当性の検討

図 4 に応力ひずみ曲線の実験結果と計算結果の比較を示す。粒径が大きい図 1(c)の結果が図 4(a)と、粒径が比較的小さい図 1(d)の結果が図 4(b)である。いずれも、真ひずみ 5%程度まで概ね実験結果と計算結果が一致していることが分かる。加工硬化則としてせん断ひずみの最も大きなすべり系のひずみ量を用いた場合が加工硬化則 1、すべり系のせん断ひずみ量の合計を用いた場合が加工硬化則 2 である。いずれも、ほとんど同じ傾向を示していることが分かる。フィッティングパラメータとして用いた  $n$  の値と臨界分解せん断応力を、単結晶の結果と比較すると、加工硬化則 2 の方が近かったことから、加工硬化則 2 を採用し、ひずみ分布の比較に用いた。

図 5、図 6 に真ひずみ 5% 時のひずみ分布の実験結果と計算結果の比較を示す。図 5 が粒径の大きな図 1(c)の試料の結果であり、図 5(b)の実験結果でひずみが集中している粒には、図 5(a)の計算結果でもひずみが集中していることが分かる。一方で、図 6(a)に示した計算結果からはひずみが複数の粒に分散しているのに対して、図 6(b)の実験結果では、図 1(d)と比較すると図中左側にある大きな粒にひずみが集中していることが分かる。以上から、本モデルでは粒数が少ない場合には応力ひずみ曲線とひずみが集中する粒を再現できるが、粒数が多い場合にはマクロな応力ひずみ曲線は再現できるものの、ひずみが集中する粒は再現できないことが分かった。FEPM をミクロな変形予測に適用する際の限界や、モデル化以前の必要性を示すことができたといえる。今後の展望としては、すべり系間の相互作用をより精緻にモデル化することや、このような結晶粒の数が少ない材料の場合には、転位が表面に抜けることが想定されることから、そのような現象のモデル化によって、計算精度を向上させることが考えられる。

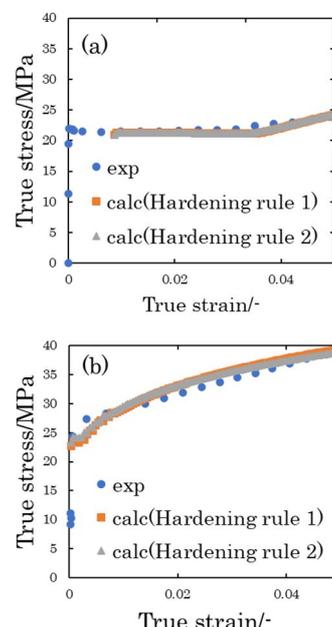


図 4 応力ひずみ曲線の実験値と計算値の比較。(a) 図 1(c)の試料、(b) 図 1(d)の試料。

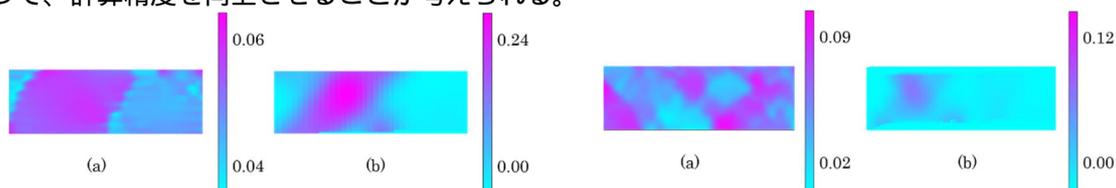


図 5 図 1(c)の試料の引張真ひずみ 5% 時のひずみ分布の(a)計算値と(b)実験値の比較。 図 6 図 1(d)の試料の引張真ひずみ 5% 時のひずみ分布の(a)計算値と(b)実験値の比較。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 久保田健太
2. 発表標題 Cu-Al合金少結晶板材の塑性変形挙動と有限要素多結晶モデリング
3. 学会等名 2019年度 日本塑性加工学会 東北・北海道支部 若手研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 橋本一輝
2. 発表標題 Cu-Al合金少結晶板の変形挙動と有限要素多結晶モデリング
3. 学会等名 2020年度 日本塑性加工学会 東北・北海道支部 若手研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究者の個人ページ <a href="http://www.material.tohoku.ac.jp/~koso/ueshima/index.html">http://www.material.tohoku.ac.jp/~koso/ueshima/index.html</a>
--

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
---------	---------