

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

|                   |                                                                                                                                                                                                |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 題目(和文)            |                                                                                                                                                                                                |
| Title(English)    | Formation mechanism of dislocation cell structures during fatigue in multiple-slip-oriented copper single crystals                                                                             |
| 著者(和文)            | WANGBohan                                                                                                                                                                                      |
| Author(English)   | Bohan Wang                                                                                                                                                                                     |
| 出典(和文)            | 学位:博士(工学),<br>学位授与機関:東京工業大学,<br>報告番号:甲第12871号,<br>授与年月日:2024年9月20日,<br>学位の種別:課程博士,<br>審査員:藤居 俊之,小林 寛,村石 信二,小林 郁夫,LEI XIAOWEN                                                                   |
| Citation(English) | Degree:Doctor (Engineering),<br>Conferring organization: Tokyo Institute of Technology,<br>Report number:甲第12871号,<br>Conferred date:2024/9/20,<br>Degree Type:Course doctor,<br>Examiner:,,,, |
| 学位種別(和文)          | 博士論文                                                                                                                                                                                           |
| Category(English) | Doctoral Thesis                                                                                                                                                                                |
| 種別(和文)            | 論文要旨                                                                                                                                                                                           |
| Type(English)     | Summary                                                                                                                                                                                        |

# 論文要旨

## THESIS SUMMARY

|                                            |            |          |                                                       |        |
|--------------------------------------------|------------|----------|-------------------------------------------------------|--------|
| 系・コース：<br>Department of, Graduate major in | 材料<br>材料   | 系<br>コース | 申請学位(専攻分野)： 博士<br>Academic Degree Requested Doctor of | ( 工学 ) |
| 学生氏名：<br>Student's Name                    | WANG Bohan |          | 審査員主査：<br>Chief Examiner                              | 藤居 俊之  |

### 要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters )

疲労き裂の発生と進展は疲労に伴って発達する転位セル組織と密接な関係があるため、セル組織形成の研究は疲労挙動を理解する上で重要である。しかし、疲労の基礎研究が豊富な銅単結晶においても、セル組織の形成機構に関する統一的な説明はなされていない。そこで本研究では、多重すべり方位 ([001], [011]および $\bar{1}11$ ) の銅単結晶の疲労によって形成されたセル組織を走査型電子顕微鏡 (SEM) と超高压走査透過型電子顕微鏡 (HV-STEM) を用いて詳細に調査した。観察結果に基づき、活動すべり系との関連性においてセル組織の形成機構を明らかにした。

#### 第 1 章 General introduction

銅単結晶の応力軸方位に依存した繰り返し変形挙動と塑性ひずみ振幅に依存した転位組織の特徴を既往研究から概観し、高塑性ひずみ振幅域でのセル組織形成に関しての応力軸方位依存が未解明となっていることに加え、多重すべり方位でのセル形成機構の統一的理解がなされていないことを指摘した。この課題に基づいて本論文の目的および構成を述べるとともに、疲労分野における本研究の意義について言及した。

#### 第 2 章 Characterization of dislocation microstructures in near- $\bar{1}11$ single crystal copper using high-voltage scanning transmission electron microscopy

共面すべり系が活動しやすい $\bar{1}11$ 近傍に応力軸を持つ銅単結晶を用いて、室温大気圧下で、せん断塑性ひずみ振幅  $\gamma_{pl}$  が  $2.0 \times 10^{-4}$  から  $2.0 \times 10^{-3}$  までの疲労試験を実施し、超高压走査透過型電子顕微鏡で転位組織を観察した。せん断ひずみ振幅の増加に伴い、転位組織はペイン状組織から $\bar{1}11$ 面に平行な転位ウォール組織へと発達した。 $\gamma_{pl} \geq 1.0 \times 10^{-3}$  の高塑性ひずみ振幅域では、変形帯 (DB) が不均一に形成され、その中にはセルバンド (CB) が発達した。応力軸方位の結晶対称性および活動すべり系の組み合わせを考慮すると、DB はすべり面に平行なものと垂直なものの 2 種類が存在し、CB は $\{211\}$ に平行に形成されることが説明できた。

#### 第 3 章 Formation mechanism of dislocation network of cell structure in cyclically deformed near- $\bar{1}11$ copper single crystals

第 2 章で得た結果に基づき、本章では  $\bar{1}11$  銅単結晶の繰り返し変形により形成された CB の形成機構を明らかにするため、よりミクロな視点から CB を構成するセル境界に着目して、その境界に含まれる転位のバーガースベクトル解析を行う目的で電子顕微鏡観察を行った。バ

バーガスベクトル解析には新規の virtual-STEM 法を用いた。この手法では、HV-STEM 観察から取得した電子線回折図形に対して、計算機上で特定の回折波に対して仮想的な検出器を適用して、暗視野像を得ることが可能となる。解析の結果、主すべり面に平行に形成されたセル境界には、3種の完全らせん転位( $\mathbf{b} = a/2[\bar{1}01], a/2[\bar{1}10]$ , および  $a/2[01\bar{1}]$ )が六角形状にネットワークを作って配列していた。また、繰り返し変形の進行につれて、セル境界を構成する転位密度が増加し、転位ネットワークは3種の完全転位はショックレー部分転位 ( $\mathbf{b} = a/6[11\bar{2}], a/6[2\bar{1}\bar{1}]$ , および  $a/6[\bar{1}2\bar{1}]$ )へと変化した。これらの転位ネットワーク構造は、すべり面上での共面すべり系の活動に加えて、ジョグの運動を伴った転位反応によって形成されることを明らかにした。

#### 第4章 Cell structure evolution during cyclic deformation of near-[001] and near-[011] copper single crystals

多重すべり系の活動が予想される [001]および[011]近傍の応力軸方位で、銅単結晶の塑性ひずみ振幅制御の疲労試験を行い、応力ひずみ応答とともに転位組織を調査した。[011]銅単結晶では、単一すべり方位に類似して、特定の塑性ひずみ振幅域において ( $\gamma_{pl} \leq 7.5 \times 10^{-3}$ ) 繰り返し応力ひずみ曲線にプラトーが現れた。プラトー領域内の塑性ひずみ振幅では、主すべり系の固執すべり帯から形成される( $\bar{1}01$ )転位ウォールを母相として、局所的に主すべりに垂直なDBが観察された。DB内では共面すべり系も活動して(111)セル境界が形成された。プラトー領域から外れた高塑性ひずみ振幅域では、多重すべり系の活動が顕著となり、DBの占める割合が増加した。[001]方位の高塑性ひずみ振幅では、ラビリンス組織に変わって主すべり面に平行な(111)セル境界がほぼ均一に形成された。また、二次すべり系の活動から臨界すべり面に平行な( $\bar{1}11$ )セル境界も形成された。[001]および[011]方位における(111)セル境界を構成する転位のバーガスベクトルを前章と同様に virtual-STEM 法により解析したところ、 $[\bar{1}11]$ 方位の観察結果と一致した。よって、(111)セル境界の形成機構は、応力軸方位には依存せず、主すべり系と共面すべり系の活動を主として形成されると結論した。

#### 第5章 General conclusions and future perspectives

本章では、本研究で得られた結果を総括するとともに、今後の研究の方向性と展望について述べた。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

|                                            |            |          |                                                       |        |
|--------------------------------------------|------------|----------|-------------------------------------------------------|--------|
| 系・コース：<br>Department of, Graduate major in | 材料<br>材料   | 系<br>コース | 申請学位(専攻分野)： 博士<br>Academic Degree Requested Doctor of | ( 工学 ) |
| 学生氏名：<br>Student's Name                    | WANG Bohan |          | 審査員主査：<br>Chief Examiner                              | 藤居 俊之  |

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words )

The initiation and propagation of fatigue cracks are closely associated with the dislocation cell structures, making the study of cell formation crucial for understanding fatigue behavior. However, the studies on the cell structures of multiple-slip-oriented copper single crystals are still insufficient. This study systematically investigated the cell structures formed during fatigue in multiple-slip-oriented copper single crystals. The main findings are summarized below.

Chapter 2 characterizes the evolution of dislocation structures in fatigued near- $[\bar{1}11]$  copper single crystals over a wide range of strain amplitudes ( $\gamma_{pl}$ :  $2 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3}$ ). With increasing shear strain amplitude, the matrix dislocation structure developed from a vein-like structure into a wall structure. When  $\gamma_{pl} \geq 1 \times 10^{-3}$ , three types of cell bands (CBs) parallel to  $\{211\}$  formed inside the DBs. The state of CBs development affected the softening rate of the fatigued specimens.

In Chapter 3, the formation mechanism of the cell boundary in near- $[\bar{1}11]$  copper single crystals was investigated. The cell boundary evolved from the dislocation network. The dislocation network comprised of three types of perfect screw dislocations, which corresponded to the primary slip system, coplanar slip system, and new dislocations formed by their interactions. As the dislocation density increased, these three perfect dislocations dissociated into Shockley partial dislocations.

Chapter 4 characterized the dislocation structures of near- $[011]$  and near- $[001]$  copper single crystals at high strain amplitudes. For  $[011]$  crystals, in the plateau region, the  $(111)$  cell structure formed within single-slip DBs. Beyond plateau region, multiple-slip DBs formed, and cell structures preferentially developed in multiple-slip DBs. In  $[001]$  copper single crystals, the  $(111)$  and  $(\bar{1}11)$  cell structure uniformly formed in the matrix without the formation of DBs. The formation mechanism of the  $(111)$  cell boundary was independent of the stress axis and resulted from the interaction between the primary and coplanar slip systems.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).