103 銅多結晶の準微視的応力場と高サイクル疲労におけるすべり挙動

Mesoscopic Stress Field and Slip Behavior in High Cycle Fatigue of Copper Polycrystal

○正 澄川 貴志 (京大院, 現 日立機械研)

大石 和義 (京大院)

正 北村 隆行 (京大院)

Takashi SUMIGAWA, Kazuyoshi OHISHI and Takayuki KITAMURA

Department of Engineering Physics and Mechanics, Kyoto University, Kyoto 606-8501

1 緒 言

工業的に用いられる金属材料の多くは、複数の結晶粒（単結晶）によって構成される多結晶体である。金属単結晶の弾性的性質は異方性を有していることから、一様な外力が負荷された場合であっても多結晶体内部では変形は不均一となり、局所的な応力集中を生じる。近年、方位像顕微鏡（Orientation Imaging Microscope；以下 OIM と記す）などの測定機器の進歩により、多結晶体における粒界形状や結晶方位の特定・解析を容易に行うことが可能になってきた。

著者らは過去に、多結晶体の高サイクル疲労における特有なすべり挙動の発生条件を明らかにするために、銅多結晶試験片に対して OIM 解析を行ったが、OIM 解析は試験片表面のみしか適用することができないことから、個々の結晶粒の三次元的な形状の特定には至らなかった⁽¹⁾。結晶粒の弾性異方性を考慮に入れた準微視的応力場を正確に解析するためには、試験片内部における結晶粒の三次元形状を特定しなくてはならない。そこで本研究では、多結晶試験片を構成する結晶粒の三次元形状を試験片の研磨と OIM 解析の組み合わせにより特定するとともに、その試験片の準微視的応力場を有限要素法を用いて解析した。さらに、高サイクル疲労試験におけるすべり発生挙動と応力場の相関性についても考察した。

Fig. 1: Shape and size of copper polycrystal specimen. Dimensions are in mm.

Fig. 2: Schematic illustration of grains and crystallographic orientation.

2 解析方法

解析対象は、高サイクル疲労試験⁽¹⁾に用いた銅多結晶平滑試験片である（図 1）。試験片は、99.9999% の銅多結晶バルク材から切り出したもので、ゲージ部は 5 mm（長さ）×2.75 mm（幅）×0.89 mm（厚さ）である。また、試験片の一方の側面を Obverse surface、反対側の側面を Reverse surface と称する。試験片内部の結晶粒形状と方位を特定するために、高サイクル疲労試験終了後、試験片厚さ方向に対して 1/10（約 0.09 mm）ずつの研磨と OIM 解析を繰り返し行った。OIM 解析より得られた結晶粒形状を代表的な切断面について図 2 に示す。試験片ゲージ部には 37 個の結晶粒が存在しており、各結晶粒に図中に示す通り番号を付けた。この結果よりそれぞれの結晶粒の三次元形状を特定し、メッシュ分割を行った。メッシュ分割図を図 3 に示す。要素数は 598130 個、節点数は

Fig. 3 FEM mesh for stress analysis.

120919 個であり、応力の集中が予想される粒界近傍領域においては、とくにメッシュ分割を細かくしてある（約 $10 \mu\text{m}$ ）。弾性定数は銅単結晶の結晶基準軸に対する値⁽²⁾ ($C_{11} = 168.4 \text{ GPa}$, $C_{12} = 75.4 \text{ GPa}$, $C_{44} = 121.4 \text{ GPa}$) をそれぞれの結晶粒の結晶基準軸に対して座標変換して用いた。上下端に試験片長手方向に一樣な変位を与え、上下端における垂直応力の平均値を公称応力 σ_0 とした。解析には MSC / visual Nastran for Windows 2001 を用いた。

3 結果および考察

3.1 すべり系に分解したせん断応力 紙面の都合上、Obverse surface に注目して議論を行う。結晶学的なすべりを引き起こす駆動力となるのは、すべり系に分解したせん断応力である。銅は面心立方金属であり、すべり面を $\{111\}$ 、すべり方向を $\langle 110 \rangle$ とする 12 のすべり系を有している。それぞれの結晶粒において、すべり系に分解した 12 のせん断応力の最大値を τ_{mrss} (mrss: maximum resolved shear stress) とし、公称応力 σ_0 で無次元化した $\tau_{\text{mrss}}/\sigma_0$ の分布を図 4 に示す。高 $\tau_{\text{mrss}}/\sigma_0$ 値領域は粒界近傍に集中して発生している。結晶粒 No.6 と結晶粒 No.11、結晶粒 No.23 と結晶粒 No.24 の粒界近傍（図中領域 A）では、とくに大きな $\tau_{\text{mrss}}/\sigma_0$ 値を示しており、これらの結晶粒界はいずれも整合双晶境界であることが OIM 解析より特定された。

3.2 高サイクル疲労におけるすべり挙動との比較 高サイクル疲労試験⁽¹⁾ で発生した固執すべり帯（Persistent Slip Band; 以下 PSB と記す）の場所を図 5 に示す（PSB ①～PSB ⑪）。PSB は粒界近傍に集中して発生しており、図 4 で示した高 $\tau_{\text{mrss}}/\sigma_0$ 値領域と対応している。最も大きな $\tau_{\text{mrss}}/\sigma_0$ 値（約 0.97）を示す結晶粒 No.6 と結晶粒 No.11 の粒界（双晶境界）近傍領域においては、11 個の

Fig. 4: Distribution of maximum resolved shear stress, $\tau_{\text{mrss}}/\sigma_0$ on the Obverse surface ($z/t=1$).

Fig. 5: Location of observed PSBs on the Obverse surface ($z/t=1$).⁽¹⁾

PSB 中最も活動の著しかった PSB ⑥が位置している。

以上の様に、本解析より得られた微視的応力場と高サイクル疲労における PSB 発生挙動は一致する。

4 結 言

多結晶体内部では、結晶粒の弾性異方性に起因して粒界近傍（とくに、整合双晶境界近傍）において高い応力集中が発生する。また、高サイクル疲労におけるすべり発生挙動は、結晶粒の弾性異方性を考慮に入れた準微視的応力場によって規定されており、応力集中が大となる整合双晶境界近傍から PSB が発生する。

文 献

- (1) 北村 隆行, 澄川 貴志, 大石 和義, 機論, **67**-663, (2001), 1819-1824.
- (2) 飯田修一他, 新版物理定数表, 朝倉書店, (1992).