

金沢大院 ○矢ヶ部 洋一, 鈴木 保  
金沢大工 北 和久, 門前 亮一, 北川 和夫

### 1. 緒言

機械、構造物を構成する金属材料は様々な加工ひずみを受けた状態で使用されていることが多い。このような予ひずみを受けた金属材料の疲労特性を知ることが実用上重要であり、これまでに多結晶金属を用いた研究が多く報告されている。しかし予ひずみが疲労特性に及ぼす影響を微視的なレベルで理解するために単結晶を用いた例は少ない。そこで、本研究では引張の予ひずみに注目し、引張変形を与えた銅単結晶にそれとは異なる荷重軸で疲労試験を行いPSBの発生と成長、転位組織の変化について検討した。

### 2. 実験方法

純度99.997%の無酸素銅を用いBridgman法により銅単結晶（親結晶）を作製した。表面観察のため機械研磨及び電解研磨を行って鏡面に仕上げた。最後に1073K、7.2ksの真空焼鈍を行って加工ひずみの除去を行った。図1に親結晶の結晶方位および予ひずみを与えときの引張軸方位（SA1）と疲労試験の軸方位（SA2）を示す。図中の〈〉付きの記号は、それぞれの軸方位における主すべり系を親結晶のすべり系で示している。この親結晶に引張の予ひずみを与えてから放電加工によって疲労試験片（予ひずみ材）を切り出した。予ひずみの大きさは親結晶の主すべり系のせん断ひずみに換算して $\gamma_p = 0.20$ とした。疲労試験は引張-圧縮の一定ひずみ振幅で行った。その大きさは、疲労試験片の主すべり系に換算して $\gamma_c = \pm 0.002$ とした。比較のため予ひずみを与えていない試験片（焼なまし材）についても同様の疲労試験を行った。

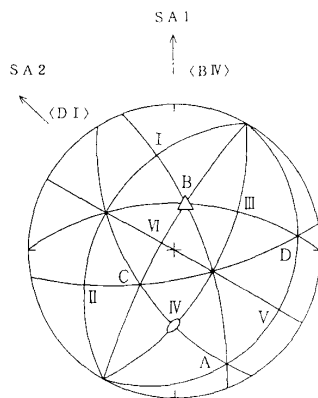


図1 予ひずみの軸方位と疲労試験の軸方位

### 3. 実験結果

**3.1 疲労硬化および軟化曲線** 図2に焼なまし材と予ひずみ材の疲労硬化および軟化曲線を示す。N=1において焼なまし材と予ひずみ材の応力値に差がみられる。これは引張変形による加工硬化、それと、引張試験と疲労試験の荷重軸の相違によって潜在硬化という現象が生じたため予ひずみ材の方が高くなっている。焼なまし材は繰り返し数の増加に伴い応力値は増加し約N=3.0×10<sup>3</sup>で応力値は飽和に達した。飽和応力値は29.5MPaであった。一方、予ひずみ材の場合は減少し約N=2.0×10<sup>3</sup>で飽和応力値に達した。飽和応力値は28.7MPaであった。このことより、予ひずみを与えその後、疲労試験を行っても飽和応力値にほとんど影響を及ぼさないことがわかる。疲労寿命は焼なまし材がN=1.95×10<sup>5</sup>、予ひずみ材がN=2.98×10<sup>5</sup>であった。

**3.2 ヒステリシスループ** 図3は繰り返し数の増加に伴うヒステリシスループの形状の変化をパラメータV<sub>H</sub>を用いて示したものである。V<sub>H</sub>とはヒステリシス

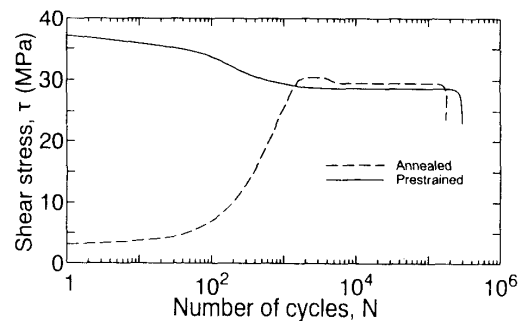


図2 疲労硬化および軟化曲線

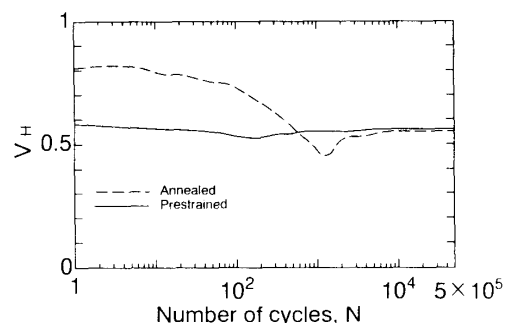


図3 繰り返し数の増加に伴うV<sub>H</sub>の変化

ループを囲む長方形の面積に対する、ヒステリシスループの面積の割合を示している。焼なまし材においては、繰り返し数の増加に伴い $V_H$ の値は減少し約 $N=1.2 \times 10^3$ で最小値をとるが、その後 $V_H$ の値は増加し約 $N=5.0 \times 10^3$ で飽和したといえる。一方、予ひずみ材において $V_H$ の値は目立った変化がみられなかった。

**3.3 PSBの発生と形状**  $N=1.0 \times 10^3$ のとき予ひずみ材の表面にわずかにPSBの発生がみられた。一方、焼なまし材においては $N=1.0 \times 10^3$ においては表面にPSBの発生は認められなかった。 $N=3.0 \times 10^3$ になると焼なまし材においてもPSBの発生が確認された。このことからPSBは約 $N=1.0 \times 10^3 \sim 3.0 \times 10^3$ で発生しているが予ひずみ材の方が焼なまし材に比べPSBが若干早く発生すると思われる。図4は $N=2.0 \times 10^4$ における焼なまし材と予ひずみ材の結晶表面のSEM写真である。焼なまし材と予ひずみ材のPSBの分布形態を比較すると焼なまし材においては、幅の広いPSBと細いPSBが発生しており予ひずみ材では、細いPSBが分散して発生しているのがわかる。銅単結晶の場合、疲労き裂はPSB内またはPSBとMatrixの界面で発生することが知られている。したがって、このPSBの形状の違いが疲労寿命に影響していると思われる。

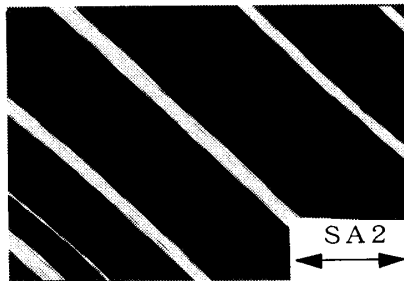
**3.4 転位観察** 焼なまし材においては $N=1.0 \times 10^3$ でいわゆるladder組織はみられずvein組織が観察された。

一方、予ひずみ材においては同じ繰り返し数においてladder組織が観察された。 $N=3.0 \times 10^3$ では焼なまし材においてもladder組織の形成が認められた。また、予ひずみ材の転位組織は $N=1.0 \times 10^3$ のものとほとんど差はみられなかった。このことから、図3に示した焼なまし材の $V_H$ の最小値はladder組織の形成、すなわちPSBが発生する時点と一致しているように思われる。一方、予ひずみ材において $V_H$ の値に変化がみられなかったのは転位組織にほとんど変化がないためだと考えられる。図5に $N=2.0 \times 10^4$ における焼なまし材と予ひずみ材の主すべり面に垂直な断面の転位組織を示す。両者には、明瞭なladder組織の形成が認められるが、Matrixを比べると焼なまし材ではvein組織がみられるのに対し、予ひずみ材ではセル組織が見られる。また、転位組織は両者とも $N=3.0 \times 10^3$ のものとほとんど差はみられなかった。

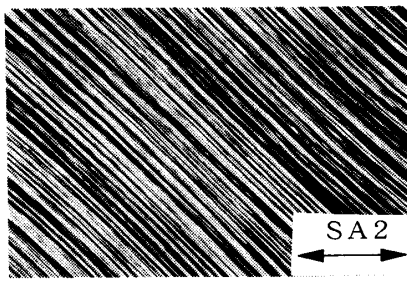
#### 4 結言

引張の予ひずみを与えた銅単結晶にそれとは異なる荷重軸で疲労試験を行った結果、以下の結論が得られた。

- (1) 疲労寿命が約40%増加した。
- (2) 予ひずみの導入によりPSBは細く分散した。
- (3) 予ひずみによって形成されたセル組織は破壊してladder組織とセル組織が混在した転位組織へと変化した。

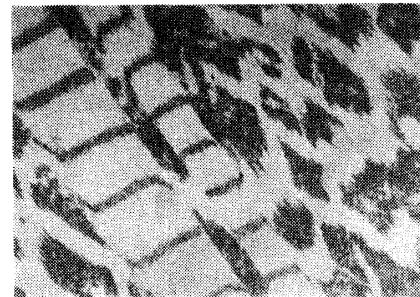


(a) 焼なまし材

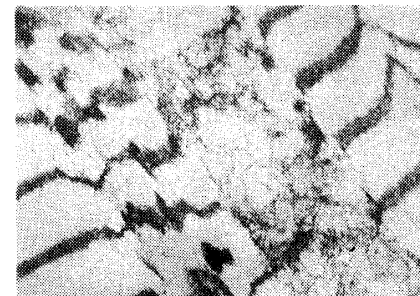


(b) 予ひずみ材

図4 表面のSEM写真 ( $N=2.0 \times 10^4$ )



(a) 焼なまし材



(b) 予ひずみ材

図5 主すべり面に垂直な断面の転位組織 ( $N=2.0 \times 10^4$ )