

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	Kim Byungwoon
論文題目	マイクロ銅の引張圧縮疲労に関する基礎的研究		
(論文内容の要旨)			
本論文は、各種電子デバイスの電極材料として使用されるミクロンサイズの銅を対象とし、その特有の疲労挙動を実験的に明らかにした結果をまとめたもので、5章からなっている。 第1章は緒論で、金属疲労に関する背景を説明するとともに、疲労き裂発生の基礎的なメカニズムを紹介している。繰り返し負荷に伴う塑性ひずみの局在化と自己組織化転位構造の形成に関する記載がなされており、疲労き裂が発生するためには、材料寸法には依存しない数 μm サイズのはしご型転位構造と表面における入り込み/突き出しの形成が必要であることが述べられている。一方、電子デバイスに用いられているミクロンサイズの銅電極は、寸法上の制限からバルク材において疲労き裂発生原因となるはしご型転位構造や入り込み/突き出しを内包することができず、特有の疲労挙動を示す可能性があることを指摘している。本論文では、ミクロンサイズの銅を対象とし、その疲労挙動を実験的に明らかにすることを目的としている。 第2章では、マイクロ銅の疲労に関する基礎的な理解を行うためには、両振りでの引張圧縮繰り返し変形試験を実施する必要があることを指摘している。これを実現する試験方法を開発し、単一すべり方位に配向された一辺 $2\mu\text{m}$ の正方形断面を有する銅単結晶試験片に対して、引張圧縮繰り返し変形を与えることに成功している。最初の引張負荷では、試験片は弾性変形した後、不安定に変位が急増するひずみバースト現象を示し、続く圧縮負荷では、引張時よりも降伏応力が低下するバウシinger効果が現れた。このとき、試験片表面にはすべりの局在化が起これ、繰り返し数の増加に伴って試験片長手方向に伝ばする様子が観察された。また試験後の試験片の表面には、すべりの不可逆的な活動による入り込み/突き出しが形成されており、入り込み底でのすべり帯分離によって疲労き裂が発生していた。この入り込み/突き出しは、厚さ十数 nm のすべりプレートの単純なずれによって生じており、バルク材で発生するものとは大きく異なったものであることを明らかにしている。 第3章では、二重すべり方位を持つマイクロ銅単結晶を対象としている。引張圧縮繰り返し変形によって試験片は著しく複雑なすべり挙動を示し、最終的に疲労き裂の発生に至った。その場観察の結果から、疲労き裂発生までの過程を①初期すべり段階、②陥没段階および③損傷段階に分類し、各段階における挙動のメカニズムについて議論を行っている。また、疲労き裂を発生させた入り込み/突き出しの形成応力振幅が $5\text{ MPa}\sim 7\text{ MPa}$ であることを特定し、バルク銅単結晶の疲労き裂発生限界 (28 MPa) より著しく低い疲労強度を有することを明らかにしている。この原因は、ミクロンサイズの材料では表面からの力学的作用 (鏡像力) が試験片全体に影響することで、内部の転位が外部へ容易に射出されるためであると結論付けている。 第4章では、ミクロンサイズの銅の疲労に及ぼす $\Sigma 3(111)$ 整合双晶境界の影響に着目してお			

り、引張圧縮繰返し変形によって、双晶境界近傍で優先的に入り込み/突き出しが発生することを特定している。入り込み/突き出しの発生箇所およびその発達に寄与したすべり系は、有限要素法解析によって得られた応力集中箇所および高分解せん断応力を有するすべり系とそれぞれ一致していた。しかし、入り込み/突き出しは、試験片の対向する表面近傍の応力緩和箇所にも到達していた。この結果は、応力集中部に限定して疲労損傷が発生するバルク材の結果とは異なっており、表面間の距離が短く鏡像力によって転位が容易に抜け出すミクロンサイズの試験片特有の挙動であると結論付けている。

第5章においては、最終的に本研究で得られた知見を要約し、今後の研究展望について述べている。

以上のように、本論文では、ミクロンサイズの銅を対象とし、世界初の引張圧縮繰返し変形試験に成功するとともに、複数のすべり系が活動する場合の疲労挙動や、粒界（双晶境界）が存在する場合の疲労挙動を明らかにした。未解明であったマイクロ銅の基礎的な疲労現象の特定に成功したこれらの成果は、新しい学術分野を切り開く重要なものである。また、次世代電子デバイスの信頼性向上に資するものであり、産業的にも有益な成果である。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、各種電子デバイスの電極材料として使用されるミクロンサイズの銅について、その疲労挙動を実験的に研究した結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

(1) ミクロンサイズの試験片に対する引張圧縮繰り返し変形試験に世界で初めて成功した。単一すべり方位を有する銅単結晶試験片を対象として実験を行い、初期サイクルにおける不安定な変位の急増や逆方向負荷時のバウシinger効果を特定するとともに、不可逆的且つ局所的なすべりが生じることで、表面に突き出し/入り込みが形成され、疲労き裂発生に至ることを明らかにした。また、発生した突き出し/入り込みの構造は、バルク材とは大きく異なるものであることを指摘した。

(2) 二重すべり方位に配向されたミクロンサイズの銅単結晶試験片の疲労挙動を明らかにした。単一すべり方位を有する試験片とは異なる複雑なすべり挙動を示すことを特定し、初期すべり段階、陥没段階および損傷段階におけるメカニズムの解明を結晶学的な観点から行うことに成功した。さらに、疲労き裂発生限界がバルク材よりも著しく低下することを明らかにし、この原因は、ミクロンサイズの材料では表面からの鏡像力が材料全体に影響を及ぼし、内部の転位が外部へ容易に射出されることであるとした。

(3) 疲労損傷において重要な粒界とされる $\Sigma 3(111)$ 整合双晶境界を対象とし、この境界を含むミクロンサイズの双結晶試験片を作製して疲労試験を実施した結果、双晶境界近傍で疲労き裂が発生することを示した。しかし、バルク材の場合とは異なり、その疲労損傷挙動は双晶境界上での変形の不マッチに起因した力学場には従わないことを示した。透過型電子顕微鏡を用いた内部観察により、双晶境界近傍では著しく転位密度が低下しており、転位が容易に移動し射出されるマイクロ銅特有の挙動であることを明らかにした。

以上のように、本論文では、ミクロンサイズの銅を対象とし、世界初の引張圧縮繰り返し変形試験に成功するとともに、複数のすべり系が活動する場合の疲労挙動や、粒界（双晶境界）を有する場合の疲労挙動を実験的に明らかにした。未解明であったマイクロ銅の疲労現象の特定に成功したこれらの成果は、今後の新しい学術分野を切り開く重要なものである。また、デジタル社会に欠かせない電気・電子デバイスの信頼性向上に資する結果であり、産業的にも有益な成果である。よって、本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年8月21日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降