

氏 名	や 八 高 隆 雄
授 与 学 位	工 学 博 士
学位 授 与 年 月 日	昭 和 57 年 2 月 10 日
学位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 48 年 3 月 東京電機大学工学部機械工学科（第二部）卒業
学 位 論 文 題 目	二、三の面心立方金属におけるバウシinger 効果と その発生原因に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 辛島 誠一 東北大学教授 須藤 一 東北大学教授 和泉 修

第 1 章 緒 論

一方的に塑性変形した金属材料にそれとは反対方向の応力を加えた場合には、同一方向に再変形した場合に比べて、降伏応力や変形応力が低下する。この現象はバウシinger 効果とよばれ、面心立方金属、体心立方金属および桐密六方金属の多結晶および単結晶においても認められており、応力反転の繰り返しである疲労現象や塑性加工材の強度異方性などと関連して基礎的にも実用的にも重要である。

ところが従来の多くの研究は、予ひずみや変形温度等の狭い範囲でのものが主であり、特に単結晶試料を用いた基礎的な研究に至っては、Stage I および Stage II の領域におけるものがほとんどである。またバウシinger 効果の大小を評価するために用いられているパラメーターについても、研究者によりまちまちであり、時には同一の結果から異なる結論が導かれる可能性さえある。さらにまた、バウシinger 効果の発生原因については、結晶粒界の存在、不規則に分布した林転位のような障害物、およびローマー・コットレルの不動転位による長範囲応力場などが考えられているが、これらにしても上述の限られた狭い予ひずみ領域における特定のパラメーターを説明するためのものであり、予変形時に明瞭なセル組織やサブグレイン組織が形成されるような場合までも含んだ広範囲の変形条件において、転位組織変化とバウシinger 効果の関係を結びつけて論じている例はほとんど見当たらない。

このような観点から、本研究では変形機構が単純な面心立方金属の単結晶および多結晶試料を用いて、変形条件を広範囲に変化させ、予変形時の加工硬化挙動および転位組織と応力反転後の変形挙動の関係を調べ、これらの結果からバウシinger効果の発生原因について検討した。

第2章 実験方法の概要

本研究では積層欠陥エネルギーの異なるアルミニウム、銅および銅固溶体合金の単結晶および多結晶試料を用いた。機械試験には室温から723Kまでの範囲で引張—圧縮繰り返し変形が可能ないように改造したインストロン型の試験機を用いた。そして、このような試験機によって得られた荷重—伸び曲線は、室温においても高温においても、予変形時および応力反転後もなめらかに連続しており、十分な精度を備えていることが判断された。

なお本研究では、溶質原子と転位の相互作用によって機械的性質が変形温度とともに特異な変化をする α 黄銅やCu—Al合金の高温変形については扱っていない。

第3章 バウシinger効果と加工硬化との関連性

単一すべり系および二重すべり系の働きやすい結晶方位をもつ銅（純度99.99%）およびCu—10at%Al合金単結晶を用いて、加工硬化のStage I、Stage IIおよびStage IIIのそれぞれの領域まで引張変形後応力荷方向を反転し、その後の圧縮変形挙動を調べた。得られた結果は次のとおりである。

1)逆方向変形の小さい段階で測定されたパラメーターは、予変形時の加工硬化量に対して直線的に増加した。このことから、加工硬化と逆変形初期のバウシinger効果の間には1対1に対応する関係が存在することが示唆された。

2)ほぼ予応力レベルまで逆変形したCu—10at%Alの結果を除けば、逆方向変形後期のバウシinger効果（予応力の0.5～0.75倍まで以上に逆変形した段階）は、予ひずみに対しても加工硬化量に対しても、その増加率がStage Iに比べてStage IIにおける方が小さく、さらに銅単結晶ではStage IIIで再び増加率が大きくなる傾向が認められた。

3)Cu—10at%Al単結晶は引張変形時にリュース帯的不均一変形が認められ、変形応力がほぼ一定の下にすべり帯の幅広がりが生じ、このような領域で応力反転した場合には、ほぼ予応力レベルまで圧縮した段階でのバウシinger効果は予ひずみや加工硬化量が増すに従って減少した。このことは、予変形時に未変形であった部分に、逆変形時にすべり帯の幅広がりが生ずるためであることが明らかにされた。

第4章 バウシinger効果に及ぼす金属学的因子（積層欠陥エネルギー、結晶粒径および結晶方位）ならびに変形温度等の影響

アルミニウム、銅および α -黄銅多結晶を用い、応力反転後の応力—ひずみ曲線を予変形時の加工硬化量で規格化した結果、逆変形初期のバウシinger効果は、予ひずみ、積層欠陥エネルギー、結晶粒径および変形温度が高い（または大きい）ほど小さいことが分った。

また、アルミニウム多結晶試料を用い室温および室温以上の高温領域で $\sigma_p/E = 1.44 \times 10^{-4}$ (σ_p : 予応力レベル, E : 各変形温度におけるヤング率) まで引張変形後圧縮試験を行ない、逆変形初期のバウシinger効果は変形温度が高いほど小さくなることを明らかにした。

さらに、種々の結晶方位をもつアルミニウム単結晶を用いて主すべり面上の分解せん断応力が2.94 MPa まで引張変形後圧縮変形を行ない、逆変形初期のバウシinger効果は予変形時に単一のすべり系のシュミット因子が大きくそれが働きやすい方位ほど小さいことを明らかにした。これらの結果をもとに、予変形時の転位組織とバウシinger効果の関係について検討した。

第5章 応力反転に伴なう転位組織変化

バウシinger効果の発生原因を微視的に解明するため、アルミニウム、銅および α 黄銅多結晶を用い応力反転に伴う転位組織変化を調べ、次の結果を得た。

- 1) 少なくとも予応力の0.75倍の応力までの逆変形に対しては、全転位密度はほとんど変化せず、転位の分布状態もほとんど変化しない。
- 2) アルミニウムや銅多結晶において、予変形時に形成されたセル組織は応力反転に対して不安定であり、予応力レベル近くまでの逆変形によって一度均一分布をとった後再び新しいセル組織へと組み直す傾向が認められた。一方 α -黄銅多結晶における多くの多重極子を含む組織は、予応力レベル近くまでの逆変形によってわずかにほつれる傾向は見られるが、それらの中の強固な多重極子はほとんど変化しないことが分った。
- 3) アルミニウム多結晶を高温で応力反転した場合には、その逆方向変形時の応力-ひずみ曲線上に応力が一定の下に変形が進行する"水平部"が現れ、この水平部においては予変形時に形成されたサブグレイン組織が一度均一な分布を取った後、新しいサブグレイン組織へと組み直すことが明らかになった。

第6章 応力反転に伴なう加工硬化率の異常低下

応力反転に伴う応力-ひずみ曲線の形状を、その加工硬化率の変化に重点を置いて調べ、次の結果を明らかにした。

- 1) アルミニウム、銅、 α -黄銅ならびに比較のために行なった体心立方金属の鉄多結晶においても、応力反転時に加工硬化率が異常に低下する現象が認められた。
- 2) この応力反転に伴い加工硬化率が異常に低下する現象は、アルミニウムや銅多結晶においては予変形時に形成されたセル組織が応力反転によりほつれることと、また α -黄銅や鉄多結晶においては動的ひずみ時効と結びついていることを明らかにした。

第7章 転位組織の安定化とバウシinger効果

室温において形成されたセル組織も高温で形成されたサブグレイン組織も、いずれも応力反転に対して不安定であった。ところがアルミニウム多結晶を用いて高温で繰り返し変形を行なった結果、

1) 応力反転時に現れる水平部は繰り返し変形が増すにしたがって減少しやがて消失した。この変化に対応して、最初の引張変形によって形成された多くの孤立転位を含む比較的粗な転位配列をもつサブバウンダリーからなる転位組織は、水平部が現れなくなるに従い孤立転位をほとんど含まない非常に規則的な転位配列をしたサブバウンダリーからなる組織へと変化することが分った。

2) 逆変形初期および後期いずれのバウシinger効果も、繰り返し変形とともに減少した。

一方く111>軸方位をもつアルミニウム単結晶を用いて熱回復とバウシinger効果の関係を調べ、逆変形初期のバウシinger効果は熱回復によって減少し、後期のバウシinger効果は増加すること、さらにこれらの原因は、逆変形初期においては孤立転位密度および逆応力が減少したこと、後期においては熱回復によって全転位密度が減少したことであることを明らかにした。

第8章 総合考察

第9章 総括

以上述べてきたような結果を総合し、面心立方金属のバウシinger効果に対してつぎの結論を得た。

1) バウシinger効果は、その大小を判断するためのパラメーターおよびその発生原因から考えて、逆変形初期と後期とに分けて扱うべきである。さらに逆変形初期と後期とは予応力レベルの0.5～0.75倍の応力まで逆変形した段階を境に区別される。

2) 逆変形初期のバウシinger効果は予変形時の加工硬化量によってほぼ決まる。しかし加工硬化量によって一義的に決まるのではなく、同一加工硬化量の下で比較するならば、結晶粒径、積層欠陥エネルギー、変形温度および主すべり系のシュミット因子それぞれが大きい（または高い）場合ほど小さい。

3) 逆変形初期のバウシinger効果は、予変形時に試料内に導入された孤立転位（恐らく可動転位）が応力反転に伴って、逆応力に助けられて逆運動することが原因である。

4) 予変形時にセル組織やサブグレイン組織が形成される場合の逆変形後期のバウシinger効果は、応力反転し逆方向の応力が増加するに従い、それまで互いに拘束し合っただけなかったセル壁やサブバウンダリー等を構成していた転位がその拘束を打ち切り均一分布をすることにより、可動転位の密度が増すことが原因である。

5) 予変形時にリュース帯的な不均一変形が生ずる場合におけるほぼ予応力レベルまで逆変形した段階でのバウシinger効果は、予変形時に未変形であった部分に、逆変形時にすべり帯の幅広がりが生ずることが原因である。

6) 上記4)および5)以外の場合におけるバウシinger効果は、逆変形初期と同じように、可動転位が逆運動することがその原因である。

7) セル組織やサブグレイン組織をもつ試料に繰り返し変形や熱回復を与えることにより、応力反転に対して安定な転位組織が得られた。さらにこれらの場合におけるバウシinger効果の変化も、逆変形初期および後期とに分けて扱うことにより上記3)および4)の考え方で矛盾なく説明できる。

したがって、本研究の目的であった“バウシinger効果に及ぼす金属学的因子（結晶粒径，積層欠陥エネルギー，結晶方位）および変形条件（予ひずみ，加工硬化量，変形温度）の影響，バウシinger効果の大小とバウシingerパラメーターの関係，ならびにバウシinger効果の発生原因を明らかにすること”は，ほぼ達成されたものと考えられる。

審 査 結 果 の 要 旨

ある方向に変形した金属材料を逆方向に変形すると降伏応力が低下する現象は、バウシinger効果として古くから知られている。これは疲労現象や塑性加工材の強度異方性などに関連した重要な問題である。ところが従来その評価には種々のパラメーターが用いられていて、互いに矛盾するような報告も少なくない。またその発生原因も必ずしも明らかでないのが現状である。本論文は面心立方金属のアルミニウム、銅およびその固溶体合金の単結晶、多結晶試料を用い引張一圧縮変形を行い、バウシinger効果に関する種々のパラメーターを求めると共に、バウシinger効果の発生原因を明らかにした一連の研究結果をまとめたもので、全編9章からなっている。

第1章は緒論で、第2章では試料および試験機の概要について述べている。

第3章では、バウシinger効果は逆方向変形が小さい段階では予変形時の加工硬化量によって決められるが、それが大きくなるとその関係が成立しなくなることを明らかにしている。これはバウシinger効果を逆方向変形の初期と後期に分けて議論する必要のあることを示唆する重要な知見である。

第4章では予ひずみ、積層欠陥エネルギー、結晶粒径、および主すべり系に対するシュミット因子が大きいほど、また変形温度が高いほど初期のバウシinger効果は小さいことを示している。

第5章は透過電子顕微鏡観察結果を述べたものである。逆方向変形初期においては予変形時に形成された転位組織はほとんど変化しないが、後期の段階ではセル組織が崩壊して均一に近い転位分布となったのち、再び新しいセル組織への組直しがおこることなどが明らかにされた。これらはバウシinger効果を初期と後期に分けて考察する必要があるという提案を裏付ける興味深い結果である。

第6章では、逆方向変形時に加工硬化率が低下する現象は、前述のセル組織の崩壊と密接に関連することを明らかにしている。

第7章では、セル組織が形成された試料に繰り返し変形や熱回復を与えて可動転位密度を低下させ、また転位組織を安定化するとバウシinger効果が小さくなることを見出し、前章までの考え方に対する裏付けとしている。

第8章では以上の結果をもとに、初期のバウシinger効果は予変形時に活動した転位がセル壁などによる逆応力に助けられて逆方向に運動することが、後期のそれはセル組織が崩壊することがその主要因であると結論している。

第9章は総括である。

以上要するに、本論文は面心立方金属におけるバウシinger効果について系統的に検討して、初期と後期とを区別して取り扱う必要があることを提案すると共に、転位組織観察結果からその発生原因を明らかにしたもので、金属工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。