

氏 名	熊 谷 淳 一
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成元年 3 月 24 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 材料物性学専攻
学位論文題目	高純度鉄の機械的性質とそれに及ぼす炭素の影響
指 導 教 官	東北大学教授 木村 宏
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 木村 宏 東北大学教授 須藤 一 東北大学教授 及川 洪 東北大学教授 松井 秀樹

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 序 論

BCC 金属単結晶の加工硬化挙動は、一般的には、既に十分明らかにされていると考えられている。しかしその加工硬化のメカニズムについては不明な点が山積みされている。たとえばその一つが、巨視的降伏に続いておこる加工硬化の大きな段階すなわちステージ 0 の原因である。また、低温型の加工硬化挙動から高温型の加工硬化挙動への移り変わりのメカニズムを含めて、BCC 金属における加工硬化挙動の温度依存性を統一的に説明できるモデルがない。そこで、この低温型から高温型の加工硬化挙動へ移り変わるメカニズムを詳しく探り、さらに加工硬化挙動の温度依存性を全温度範囲にわたって統一的に説明できるモデルを提案することを目的として本研究を行った。

この様な加工硬化の機構を調べるためには、極めて高純度の試料を用いなければならない。この高純度という観点で従来の結果を見ると、驚いたことに鉄鋼材料の基本である鉄の加工硬化挙動を調べる研究で、高純度の鉄を用いた研究が極めて少ないということがわかった。そこで現在の最高純度クラスの鉄を用いて単結晶を作成し、鉄単結晶本来の加工硬化挙動を詳しく調べることを第一の目的とした。さらに、その結果から低温型から高温型への加工硬化の遷移の機構を究明し、高純度鉄単結晶における加工硬化挙動の温度依存性を、ほぼ全温度範囲にわたって統一的に説明しうるモデルを提案することを第二の目的とした。また、鉄に関する従来の研究結果には不純物の影響をうけてと思われるものが多い。その不純物としては侵入型不純物がまず第一に重要である。よって本研究では侵入型元素の代表として炭素を選び、その影響も調べた。炭素は鉄鋼材料中には必ず

含まれている元素であり、その意味ではこの研究は工業的にも重要な問題である。よって、高純度鉄単結晶の加工硬化挙動に及ぼす炭素の影響を、広範囲な試料軸方位について調べ、その影響の機構も明らかにすることを第三の目的とした。また、鉄の機械的性質に及ぼす炭素の影響としては、低温での脆性破壊の問題と関連して、すべり変形や双晶変形に対する影響も調べる必要がある。しかし従来の研究では、高純度の鉄を用いて炭素の影響を調べた研究はない。そこで本研究では、高純度鉄中に加えた炭素の状態を種々に変えて、低温での機械的性質、特に双晶変形との関係を調べることを第四の目的とした。

## 第2章 実験方法

ここでは、以下の実験に共通する実験方法について示してある。その中で、単結晶作製方法については、従来からの方法と原理的には同じであるが、高純度鉄の場合には特に困難であるので、注意しなければならない点について詳しく述べてある。

## 第3章 高純度鉄単結晶の加工硬化

ここでは高純度鉄単結晶の加工硬化挙動を詳しく調べ、まずBCC金属特有のステージ0について、既存の機構を否定し、転位の直接観察などの結果にもとづいて、低温型の加工硬化と同じであることを示した。さらに、低温型から高温型加工硬化への遷移機構を詳しく考察し、加工硬化挙動の温度依存性を統一的に説明できるモデルを提案した。つまり、温度の上昇に伴って刃状成分とらせん成分の易動度の差が小さくなり、巨視的変形前の微少歪の段階で導入される二次系らせん転位の数が減少する。その結果、二次系らせん転位線上に形成されるジョグの数が一次系らせん転位上に形成されるジョグの数よりも増加して、二次系らせん転位は若干働いた後に動けなくなる。加えて、温度上昇に伴い、ジョグの引きずり抵抗の減少と対消滅頻度が増加し、ステージ0での加工硬化率が減少する。よって、変形途中に二次系転位の活動が停止し、ステージIが現れるとした。

さらに温度が高くなると、巨視的変形前の微少歪の段階で導入される二次系らせん転位の数が一次系らせん転位の数に対してさらに少なくなる。したがって二次系らせん転位はいっそう動きにくくなり、二次系らせん転位は導入されるけれども長距離運動せず、その数は増加しなくなる。したがって、ジョグの形成頻度と対消滅頻度がつり合い、加工硬化率は零となる。このような加工硬化率零のステージIの出現は、Moなど他のBCC金属でも見いだされており、ステージIの加工硬化率が零になる温度が存在するのはBCC金属単結晶の加工硬化挙動の特徴であると結論した。

さらに温度が上昇すると刃状成分とらせん成分の易動度の差は完全になくなり、一次系だけで変形が開始し進行する。この段階では転位の交差すべり頻度が上昇して、その結果一次系らせん転位は転位双極子を形成しながら運動するため、ステージIで加工硬化が見られるようになる。この加工硬化が大きくなると、二次系転位の活動を誘発してステージIは短くなる。その結果、ステージIの長さが最も長くなる温度（本論文では、この温度を $T_c$ とした。）が存在することになる。この $T_c$ が存在するという事は、BCC金属単結晶の加工硬化挙動の温度依存性における特徴である。

以上のようなモデルにおいて、ジョグの引きずり抵抗や消滅速度は金属によって異なるであろうが、このモデルそのものは他のBCC金属にも応用しうるものである。

さらに加工硬化挙動に対する種々の方位依存性が見いだされた。この依存性の原因のほとんどは、すべり面の違いによるものと考えられる。よってBCC金属単結晶特有の性質と言える。つまりFCC金属ではすべり面は一種類だけであるが、BCC金属では三種類あり、試料軸方位や変形温度によってすべり面が決まることがわかっている。ここでは、 $\chi$ が $30^\circ$ の(112)面すべりでは、一次系転位の運動が二次系転位の活動を誘発させる可能性があり、かつ二次系転位の長距離運動もおこり易いことが幾何学的に示される。これによって加工硬化挙動の方位依存性が生じるのである。この結論は、一次系と二次系のらせん転位の幾何学的関係を、その運動方向も合わせて考察することによって得られた。

以上得られた結果は、高純度鉄単結晶の加工硬化挙動をその温度依存性及び方位依存性について、広く、詳しく調べたものであり、鉄本来の加工硬化挙動を明らかにした結果としては初めてのものである。また、それらの結果を一貫して説明できるモデルを提案した。

#### 第4章 高純度鉄単結晶の加工硬化に及ぼす炭素の影響

ここでは高純度鉄単結晶の加工硬化挙動に及ぼす炭素の影響を示した。固溶炭素の影響としては低濃度と高濃度の場合で若干機構が異なると考えられ、概ね変形が主すべり系の優先した機構になるということである。その結果ステージ0が消失し、ステージIが長くなった。原因は固溶炭素が刃状転位の易動度を低下させるため、巨視的変形前の微少歪の段階に導入される二次系らせん転位の数が減少し、かつ巨視的変形が開始するとき、一次すべり系の活動が優先するようになるためである。更に、高濃度の場合は二次系転位の活動を抑制するようになる。これは、固溶炭素濃度が高くなると、刃状転位だけではなくらせん転位の易動度も低下すると考えられ、その結果一次系転位が活動し始めてから二次系転位が活動し始めるまでに要する加工硬化量が大きくなるためとした。つまり、固溶炭素は二次系転位の活動量を減少させる効果を持っていると言える。本実験で用いた固溶炭素濃度の内では、濃度増加に伴いこの効果は顕著になった。

この様な固溶炭素の影響は加工硬化挙動に対してだけではなく、転位組織に対しても明瞭に見られた。すなわち、転位の刃状成分が安定化され、転位の双極子が形成され易くなる。この様な転位組織は、従来純鉄の転位組織としてしめされていたものであるが、それは炭素の影響をうけた鉄の転位組織であることが明らかとなった。また、固溶炭素によって、転位の刃状成分が安定化され転位組織が均一になるために、二重すべりの段階において加工硬化率が大きくなることもわかった。

以上のような固溶炭素の効果には方位依存性があることを示した。これは、高純度鉄単結晶の場合と同様な方位依存性であり、やはりすべり面の違いによって生じる現象であると結論された。

さらに、以上のような固溶炭素の影響はわずか10mass ppm程度の濃度で顕著であり、よって従来の鉄の加工硬化挙動や転位組織の研究結果には、炭素を初めとする侵入型元素の影響があると考えられることを指摘した。

一方、炭化物の効果としては変形応力レベルを上昇させるのみであり、活動すべり系への影響は

ないことがわかった。

この様な「高純度鉄単結晶の加工硬化挙動に及ぼす炭素の影響」という問題は、鉄鋼材料の加工集合組織の問題と関係するものであり、今後より深く研究されるべきものである。

## 第5章 高純度鉄の双晶変形に及ぼす炭素の影響

77Kでの変形に及ぼす炭素の影響について述べてある。ここでは破壊の問題と関係しているため、データに若干のばらつきもあり、未だ十分な数のデータを得ていない。しかし大まかな傾向として、固溶炭素が存在すると双晶が発生し易くなり、析出物として存在すると双晶は発生し難くなることがわかった。

また、双晶変形が関与したへき開破壊として、従来は起こらないとされていた様式で破壊した結果が得られた。これは最初に発生した双晶によって試料表面にクラックが発生し、続いて発生した双晶がそのクラックに衝突することによって生じたものであった。つまり、かなり偶発的な現象である。よって、この様な現象が、破壊現象のばらつきの原因の一つであることを指摘した。

## 第6章 総 括

得られた結果をまとめて示し、かつ今後の課題について簡単に述べてある。

## 審査結果の要旨

鉄の機械的性質は微量の不純物によって大きく影響される。それにも拘らず従来の鉄の機械的性質の研究においては、不純物をかなり含んだ試料が用いられている場合が多く、鉄本来の機械的性質や、それに対する炭素の影響はいまだ十分明らかにされたとは言い難い。また金属の機械的性質のうちで加工硬化はもっとも基本的な性質の一つであるが、鉄の加工硬化挙動はいまだその全貌が明らかにされていない。さらに鉄も含めて体心立方金属の加工硬化全般、とくにその温度依存性を説明する理論は提案されていない。

本論文は、高純度鉄単結晶を用いて鉄の加工硬化を詳しく調べ、体心立方金属中の転位の動特性を考慮してこれらの結果を統一的に説明するモデルを提案し、さらに高純度鉄-炭素合金について加工硬化と双晶変形を調べた結果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論で、本研究の背景と目的が述べられている。

第2章では実験方法について述べている。

第3章は本論文の中核であり、高純度鉄単結晶の高温型加工硬化を詳しく調べた結果と、転位の動特性を考慮した新しい加工硬化のモデルが述べられている。ステージ0の加工硬化については、従来の説を否定し、これが低温型加工硬化と同一の機構によるものであることを、実験的に明らかにした。ステージ0のあとステージIが現れるのは、変形温度の上昇とともに刃状転位とらせん転位との易動度の差が小さくなり降伏以前に導入される2次系らせん転位の数が少なくなるために、変形が進むにつれて2次系らせん転位の活動が困難になってついには1次系らせん転位のみで変形が進むようになるためであるとした。さらに変形が進むと、試料軸の回転と加工硬化によってふたたび2次系らせん転位が活動するようになり、加工硬化率の大きいステージIIが現れることを示した。加工硬化の結晶方位依存性についても、上述のモデルを基礎として統一的に説明した。

第4章では、鉄の加工硬化に対する固溶炭素の影響について述べている。炭素を添加するとステージ0が消滅しステージIが伸びるが、これは炭素によって刃状転位が動き難くなりらせん転位が動きやすくなるためであるとした。

第5章では、固溶炭素は鉄の双晶変形応力を低下させる可能性のあることを示している。

第6章は総括である。

以上要するに本論文は、不純物の影響を極力抑えるために、従来にない高純度の鉄単結晶を用いてその加工硬化挙動を実験的に明らかにし、体心立方金属全般の加工硬化に対するモデルを提案し、さらに鉄の加工硬化と双晶変形に対する炭素の影響を調べた結果を述べたもので、材料物性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。