

刃状転位と層状介在物の相互作用に関する研究

学位論文内容の要旨

金属結晶をすべりによって塑性変形させるのに必要な応力を原子間に作用する力から理論的に求めた理論せん断強度は、実測したせん断強さよりも 1000 倍ほど大きくなる。そのため、結晶が塑性変形するとき、すべり面上下の原子が一度にすべる並進すべりではなく、転位が順次受け渡されていくことによって比較的小さな応力ですべりが生じる転位すべりを考えることにより、結晶内すべりの理論値と実測値との相違が説明される。

これより、金属が示す塑性変形挙動あるいは破壊挙動は転位の運動と関連して理解することができる。また、転位の運動を妨げ、あるいは拘束することができれば、金属は塑性変形しずらくなり、材料は強化される。このとき、結晶の強度は様々な運動障害により決まる。このような考え方から金属を強化させる方法として、例えば、17-7-PH ステンレス鋼では、析出硬化により通常のステンレス鋼の約 2 倍の 1000MPa 以上の引張り強さが得られる。このように、材料の高強度化という巨視的な結果を、微視的な転位の増殖機構、転位と介在物との相互作用などにより定量的に説明することが、転位論の目的の一つである。

このような観点から、転位そのものの力学特性や、材料中の種々の介在物と転位との相互作用に関する研究が行われており、異相界面、無限長の層状介在物、表面被膜、円形介在物、楕円形介在物などと刃状転位の相互作用について、介在物内外での転位に働く力の分布や、転位に働く力が 0 となるつり合い位置の特定、さらに、介在物の寸法、弾性係数、ポアソン比によるそれらへの影響が検討されている。しかしながら、これらの解析は理論解析に基づいているため、解析対象や条件が変わるたびに弾性論により解を求めなければならず、多大の労力を要する。また、条件が複雑になるにつれて、解析がより困難になる。

以上のような背景から、複雑な形状の介在物や境界条件に対しても転位に働く力の解析が可能な新たな数値的手法を開発することが本論文の第一の目的である。そこでまず、初期ひずみを用いた刃状転位の有限要素モデルを提案する。Vollertmann による数学モデルにおいて、食い違いが生じている部分に対して同様の効果を生じる初期ひずみを当該要素に与えることによりモデル化した。次に、外力あるいは内部応力により生じている応力場中の転位に働く力を、転位の移動に伴う系のポテンシャルエネルギーの減少率により数値的に求める手法を提案し、従来の解法の結果との比較により、本

解析法の有用性を示す。これにより、有限要素法により再現可能な条件下での転位のまわりの応力場および転位に働く力を求めることが可能となる。

さらに、従来解析が困難であった、界面上に存在する介在物と刃状転位との相互作用に関する問題に対して本解析法を適用し、新たな知見を得ることが本論文の第二の目的である。材料強化の一手法である析出強化の一例として、析出物が粒界上に析出する場合を考える。ここでは、一般性をもたせるため、析出物を介在物、結晶粒界を界面として取り扱う。介在物の形状は、無限長または有限長の層状介在物とする。そして、刃状転位と異相および層状介在物との相互干渉問題として解析を行い、転位に働く力の分布やつり合い位置の特定、介在物寸法の有限性や各領域の弾性係数の変化によるそれらへの影響について検討を行った。

本論文は以下のように全6章により構成されている。

第1章では、有限要素モデルによる転位に働く力の数値的導出法の開発と、界面上の無限長または有限長の層状介在物と刃状転位の相互作用に関する研究の意義を述べている。

第2章は、初期ひずみを用いた刃状転位の有限要素モデルの提案と、刃状転位のまわりの応力場の数学モデルによる結果との比較、転位に働く力を数値的に求める解法の説明である。

第3章は、外力および内部応力により転位に働く力や異相界面近傍の転位に働く力の解析結果である。本結果を従来の解法による結果と比較することにより、本解析法の妥当性・有用性を示した。

第4章は、界面上の無限長の層状介在物と刃状転位との相互作用に対しての解析結果である。介在物内外での転位に働く力の分布やつり合い位置の特定、および介在物の厚さ、各領域の弾性係数の変化によるそれらへの影響について検討した。

第5章は、界面上の有限長の層状介在物と刃状転位との相互作用に対しての解析結果である。介在物近傍での転位に働く力の等高線分布、および介在物の長さ、転位のバーガーズベクトルの方向、各領域の弾性係数の変化によるそれらへの影響について検討した。さらに、転位に働く力を2次元的にベクトル表示することにより、その分布傾向の分類を行った。

第6章は結言であり、本研究で得られた結果を要約している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 佐々木 一 彰
副 査 教 授 鍵和田 忠 男
副 査 教 授 野 口 徹
副 査 助教授 加 藤 博 之

学 位 論 文 題 名

刃状転位と層状介在物の相互作用に関する研究

金属結晶の塑性変形は原子間のすべりがその主要因である。この場合、すべり面上下の原子が一度にすべる並進すべりを想定して原子間に作用する力から求めた理論せん断強度は、実測されるせん断強度より、1000 倍のオーダーで大きな値となる。そのため、結晶中に存在する線欠陥である転位の概念が提案され、転位が順次受け渡されることによってすべる転位すべりを考えることにより、結晶内すべりの理論値と実測値との相違が説明できるようになった。

金属が示す組成変形挙動や破壊挙動は転位の運動と関連して考えることができる。また、転位の動きを妨げることにより、金属の塑性変形が阻害され、材料は強化される。例えば、17-7-PH ステンレス鋼では、析出物により転位の動きを阻害する、いわゆる析出硬化により強度を高めている。結晶粒を極細粒化し、粒界により転位の運動を拘束することで強度を高めている材料も開発されている。

このような観点から、転位そのものの力学特性のみならず、材料中のさまざまな介在物と転位との相互作用に関する研究が重要であり、多くの研究が以前より行なわれている。例えば、異相界面、層状介在物、表面被膜、円形・だ円形介在物などと刃状転位の相互作用について解析が行なわれ、介在物内外に存在する転位に働く力、転位に働く力が零となる転位のつり合い位置の特定、さらには、介在物寸法や弾性係数の変化に伴うそれらへの影響が検討されている。しかし、これらの解析は転位近傍の理論的な応力解析結果と Peach-Koehler の解により求められるため、解析対象が変わるたびに理論応力解を求めなければならず、また、解析対象や条件が単純なものに限られる。例えば、自由表面近傍の転位については、鏡像転位を用いるため、無限半平面のみ扱われており、条件が複雑になるにつれて、その解析はより困難になる。

以上のような背景から、本論文では、先ず、複雑な形状の介在物や境界条件に対しても転位との相互作用を解析することが可能な数値解析手法を提案している。ここでは、Vollterra によって提案された転位の数学モデルに基づき、初期ひずみを用いた転位の有限要素モデルを示している。次に、外力や転位同士の相互作用による応力場中

の刃状転位に働く力を、転位の移動に伴う系のポテンシャルエネルギーの減少率により数値的に求める手法を提案し、従来の理論解との比較により、本解析法の妥当性と有用性を示している。

さらに、従来の手法では解析が困難である、界面上に存在する介在物と刃状転位との相互作用問題に対して本手法を初めて適用した。ここでは、析出物が粒界上に析出する場合を考え、刃状転位と異相及び有限層状介在物との相互干渉問題として解析し、転位に働く力やつり合い位置の特定などについて検討を行なった。

本論文の構成は以下のである。

第1章は緒言であり、転位と介在物との相互作用解析の重要性、それに関する従来の手法の問題点について触れ、本論文の意義を述べている。

第2章は、初期ひずみを用いた刃状転位の有限要素モデルの提案と、刃状転位近傍の応力場の数学モデルとの比較による本解析法の妥当性の検証、および転位に働く力を数値的に求める手法の提案を行なっている。

第3章は、外力および転位の相互作用に起因する内部応力により転位に働く力、異相界面近傍の転位に働く力を解析し、従来の理論解析結果との比較により本解析法の妥当性を検討している。

第4章は、界面上の無限長の層状介在物と刃状転位との相互作用を取り上げ、介在物内部や近傍に存在する転位に働く力を求め、つり合い位置の特定、介在物厚さおよび弾性係数の影響を示している。

第5章は、界面上の有限長の層状介在物と刃状転位との相互作用を取り上げ、転位に働く力の等高線を求め、介在物長さ、転位の方角および弾性係数の影響を示している。また、転位に働く力を2次元的に表示することにより、いくつかのパターンに区別できることを示している。

第6章は結言であり、本研究で得られた結果を要約し、将来の展望について述べている。

これを要するに、著者は、刃状転位と層状介在物との相互作用解析に対する新たな数値解析手法を提案し、従来解析の困難であった界面上の有限な介在物との相互作用問題に適用し、転位に働く力やつり合い位置に関して新たな知見を示すなど、機械工学ならびに材料工学、特に金属の塑性変形に関わる転位の運動解析に貢献するところ大なるものがある。よって著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。