

学位論文題名

多結晶金属材料のマイクロ構造とマクロ変形の
相互作用を考慮した粘塑性構成式に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、あらゆる産業において地球環境への十分な配慮が求められている。特に化石燃料の枯渇に対して持続可能な工業化を実現するためには、製造、稼働、廃棄に至る全ての過程で消費されるエネルギーを低減させることが不可欠である。その中でも、人工物を構成する材料の高機能化と高精度な変形挙動予測による効率化が与える影響は大きく、確かな信頼を寄せうる設計技術の高度化が期待されている。

本研究の目的は、高精度な材料変形挙動予測の中核を担う強固な基礎を持ったマクロスケールの構成関係を導出することである。従来の構成式は材料試験により得られる巨視的な応力-ひずみ関係を、熱力学に矛盾の無いように定式化する現象論的なアプローチがほとんどであった。しかしながら、現象論的なアプローチでは記述可能な負荷様式が増えると必然的にモデルは複雑化するだけでなく、想定外の負荷に対して信頼性を保証することはできない。それに対して、電子・原子レベルの物理学に基づく手法によるアプローチは、理論の基礎がより強固であるため非経験的な予測を可能とすると考えられるが、現在の計算機能力を最大限に用いたとしても対象とする系の大きさが極めて小さな時空間スケールに限定される。さらに、ミクロな離散性とマクロの連続性の結びつきが未だに解明されていないことから、非弾性変形のような微視的に不均質な現象を、ミクロな素過程を陽に考慮してマクロスケールを記述することは非常に困難である。

以上のことから、本研究ではマクロ構成式を従来の現象論的アプローチにより構築した後、原子レベルと連続体の中間スケールにおける現象を観察し、現象論的構成式をトップダウン的なアプローチにより拡張した。すなわち、非弾性変形に伴う膨大な内部欠陥の相互作用により形成される転位組織を、中間スケールを特徴付ける下部組織と位置づけ、透過型電子顕微鏡による転位組織観察結果から巨視的現象と転位組織発展の関係を検討し、現象論的構成式中の内部関数と転位組織発展を関連付ける手法を提案した。その結果、従来では統一的な記述が不可能であった繰返し塑性変形後の後続変形挙動の記述が可能となった。

本論文は7章で構成されている。以下にそれぞれの章の概要を述べる。

第1章では、固体の変形モデリングに関する最近の動向について述べた後、本研究で構築する構成式の位置づけについて説明した。すなわち、従来の現象論的モデリングや近年盛んに行われている転位論に基づく定式化と本研究で行ったモデリング手法の相違点を明確にすることにより、本研究の意義について述べた。

第2章では、マクロ構成式において重要な役割を担う背応力の特性について実験的観察を行い、

室温下のオーステナイト系ステンレス鋼における背応力が塑性変形とクリープ変形中にはほぼ同様な変化を示すことを明らかにした。

第3章では、前章で得られた塑性変形とクリープ変形における背応力の等価性を考慮し、粘塑性ポテンシャルと累乗則を基に現象論的な粘塑性構成式を構築した。構築した構成式は時間依存性、等方硬化、移動硬化等の様々な特性に関する内部関数を状況に応じて段階的に簡易化可能であることも示した。

第4章では、構築した構成式の適用性を検証するために、室温下におけるオーステナイト系ステンレス鋼の比例および非比例負荷の実験結果を記述した。さらに無酸素鋼を用いた高温変形の実験結果も高精度に記述可能であることを示した。その結果、実験を行った全ての材料、実験条件に対して、本構成式が実験結果を高精度に記述可能であることが分かった。

第5章では、繰返し予負荷を与えた試験片を用いた後続時間依存変形の実験結果について、従来の概念に基づく構成モデルでは記述が困難であることを示した。また、透過型電子顕微鏡を用いた転位組織観察の結果から、後続時間依存変形と転位下部組織発展の関係について考察を行い、巨視的変形と転位の関係は転位密度のみを考慮するだけでは不十分であり、繰返し硬化・軟化と繰返し負荷に伴う後続変形挙動変化を転位組織化を考慮することにより解釈可能であることを示した。

第6章では、材料試験の結果と転位組織観察に基づき、現象論的構成式中に転位組織発展と関連付けた内部変数を導入した。また、改良した構成式の適用性を示すために後続時間依存変形試験の記述を行い、従来の手法では困難であった変形挙動の統一的な予測が可能であることを示した。

第7章では、全体の総括を述べた後、本研究で構築した構成式の有限要素法への導入とその解析例について紹介した。また、本研究で明らかにした微視的構造変化に起因する後続変形特性の変化は、繰返し強変形に伴う結晶粒超微細化による特性変化と類似した点もある。このことから、本研究の成果を拡張することにより、非弾性変形に伴う微視的構造変化が材料特性に与える影響について、より一般的な知見を得ることが期待できることに言及した。

以上のことから、本論文ではオーステナイト系ステンレス鋼の繰返し塑性変形を対象として、巨視的変形挙動と電子顕微鏡観察により得られる材料内部構造変化を結びつけたモデリングを行い、現象論的構成式を拡張し、従来では統一的な説明が困難であった繰返し塑性変形に伴う後続変形挙動変化のメカニズムを解明するとともに、実験結果の定量的な記述を可能にした。

学位論文審査の要旨

主査 教授 成田 吉弘
副査 教授 野口 徹
副査 教授 大貫 惣明
副査 助教授 佐々木 克彦

学位論文題名

多結晶金属材料のマイクロ構造とマクロ変形の 相互作用を考慮した粘塑性構成式に関する研究

近年、あらゆる産業において地球環境への十分な配慮が求められている。特に化石燃料の枯渇に対して持続可能な工業化を実現するためには、製造、稼働、廃棄に至る全ての過程で消費されるエネルギーを低減させることが不可欠である。その中でも、人工物を構成する材料の高機能化と高精度な変形挙動予測による効率化が与える影響は大きく、確かな信頼を寄せうる設計技術の高度化が期待されている。

本研究の目的は、高精度な材料変形挙動予測の中核を担う強固な基礎を持ったマクロスケールの構成関係を導出することである。従来の構成式は材料試験により得られる巨視的な応力-ひずみ関係を、熱力学に矛盾の無いように定式化する現象論的なアプローチがほとんどであった。しかしながら現象論的な理論では、記述可能な負荷様式が増えると必然的にモデルは複雑化するだけでなく、想定外の負荷に対して信頼性を保証することはできない。それに対して、電子・原子レベルの物理学に基づく手法によるアプローチは、理論の基礎がより強固であるため非経験的な予測を可能にすると考えられるが、現在の計算機能力を最大限に用いても対象とする系の大きさが極めて小さな時空間スケールに限定される。さらにマイクロな離散性とマクロの連続性の結びつきが未だに解明されていないことから、非弾性変形のような微視的に不均質な現象を、マイクロな素過程を陽に考慮してマクロスケールを記述することは非常に困難である。

本研究では、非弾性変形に伴う膨大な内部欠陥の相互作用により形成される転位組織を、中間スケールを特徴付ける下部組織と位置づけ、透過型電子顕微鏡による転位組織観察結果から巨視的現象と転位組織発展の関係を検討する。その上で現象論的構成式中の内部関数と転位組織発展を関連付ける手法を提案し、従来は統一的な記述が不可能であった繰返し塑性変形後の後続変形挙動の記述を行うことを目的とする。

はじめにマクロ構成式において重要な役割を担う背応力の特性について実験的観察を行い、室温下のオーステナイト系ステンレス鋼における背応力が塑性変形とクリープ変形中にほぼ同様な変化を示すことを明らかにした。ここで得られた塑性変形とクリープ変形における背応力の等価性を考慮し、粘塑性ポテンシャルと累乗則を基に現象論的な粘塑性構成式を構築した。そして構築した構

成式は、時間依存性、等方硬化、移動硬化等の様々な特性に関する内部関数を、状況に応じて段階的に簡易化可能であることも示した。

構築した構成式の適用性を検証するために、室温下におけるオーステナイト系ステンレス鋼の比例および非比例負荷の実験結果を記述し、無酸素銅を用いた高温変形の実験結果も高精度に記述可能であることを示した。その結果、行った全ての材料、実験条件に対して、本構成式が実験結果を高精度に記述可能であることを明らかにした。

次いで、繰返し予負荷を与えた試験片を用いた後続時間依存変形の実験結果について、従来の概念に基づき提案されている構成モデルでは記述が困難であることを示した。また透過型電子顕微鏡を用いた転位組織観察の結果から、後続時間依存変形と転位下部組織発展の関係について考察を行った。これにより巨視的変形と転位の関係は転位密度のみを考慮するだけでは不十分であり、転位組織化を考慮することにより、繰返し硬化・軟化と繰返し負荷に伴う後続変形挙動変化を解釈可能であることを示した。

さらに材料試験の結果と転位組織観察に基づき、現象論的構成式中に転位組織発展と関連付けた内部変数を導入した。改良した構成式の適用性を示すために後続時間依存変形試験の記述を行い、従来の手法では困難であった変形挙動の統一的な予測が可能であることを示した。

これを要するに著者は、オーステナイト系ステンレス鋼の繰返し塑性変形を対象として、巨視的変形挙動と電子顕微鏡観察により得られる材料内部構造変化を結びつけたモデリングを行い、現象論的構成式を拡張した。それにより従来は統一的な説明が困難であった繰返し塑性に伴う後続変形挙動変化のメカニズムを解明するとともに、実験結果の定量的な記述を可能にする手法を提案しており、固体力学の進歩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。