

## 論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 13595 号
------	---------------

氏 名 石黒 雄也

### 論文題目

組織制御によるTiおよびMg合金の力学特性発現に対する計算および実験的研究

(Computational and Experimental Microstructure Designs to Control Mechanical Properties of Ti and Mg Alloys)

### 論文審査担当者

主査	名古屋大学	教授	小山 敏幸
委員	名古屋大学	教授	小橋 眞
委員	名古屋大学	客員教授	千野 靖正
委員	愛媛大学	教授	小林 千悟

## 論文審査の結果の要旨

石黒雄也君提出の論文「組織制御によるTiおよびMg合金の力学特性発現に対する計算および実験的研究」は、Ti合金とMg合金の材料内部組織形成と力学特性との関連性を、理論計算・シミュレーション、ならびに実験の両面から追求した研究である。各章の概要は以下のようにまとめられる。

第1章では、本研究の背景ならびに目的と論文の構成について述べている。本論文は、“Ti-Nb-O系合金の特異な変態と力学特性の関連性”、“および”Mg合金の集合組織と成形性の関連性”の研究に大別される。まず前者のTi-Nb合金では、O添加によりナノドメインが形成し、このナノドメインによって、ヒステリシスループの小さな非線形擬弾性応答が発現することがすでに実験的に報告されている。しかしナノドメイン形成メカニズムおよび力学応答との関連性の詳細は明らかとされていない。本研究では、微細組織（ナノドメイン）の形成に $\beta$ 相の相分離が関与していると考え、フェーズフィールド（PF）法による解析に基づき当該現象を解明することを目的としている。一方、後者のMg合金においては、集合組織が力学特性に大きく影響することが知られている。本研究では、集合組織の極がTD（板幅方向）に傾斜したTD-split texture形成への寄与が指摘されている粒界偏析に関して、各種Mg合金を対象に、粒界相モデルを用いた解析を行うとともに、RD（圧延方向）-split textureおよびTD-split textureを有したMg-Zn-Ca合金に対して曲げ引張加工を実施し、集合組織と成形性の関連性を解明することを目的としている。

第2章では、本論文の解析に用いた計算理論の詳細をまとめている。具体的には、計算状態図（CALPHAD）法、マイクロメカニクス理論、フェーズフィールド（PF）法、および粒界相モデルについて、その概要と計算理論が示されている。

第3章では、Ti-Nb-O合金において、 $\beta$ 相の相分離が関与した拡散・変位型のナノドメイン形成機構を提案し、PF法を用いて、1073 Kでの $\beta$ 相SD（スピノーダル分解）と300 Kでの $\beta \rightarrow \alpha''$  MT（マルテンサイト変態）に関するシミュレーションを行っている。Ti-23Nb-(2.5)O (at.%)合金では1073 Kで $\beta$ 相SDが生じナノスケールの $\beta_1 + \beta_2$ 組織が形成され、続いてMTシミュレーションでは、 $\beta$ 相安定化元素であるNbが少ない $\beta_1$ 相が優先的にMTし、 $\beta_1 + \beta_2$ 組織を反映したナノスケールの $\alpha''$ 相が形成することを確認している（ $\beta_2$ 相はMTの進行に対して障壁として作用する）。1073 Kでの $\beta$ 相SDによって、MTの優先サイトとMTの障壁がナノスケールで混合した組織が形成され、それが力学応答に影響を与えることを明確に示した重要な知見である。

第4章では、PF法に基づきTi-Nb-O合金の $\beta$ 相の相分離に要する時間を定量化し、溶体化熱処理後の冷却過程における相分離を計算することによって、水冷時においても $\beta$ 相SDが進行する可能性があることを解明している。具体的には、Ti-23Nb-1O (at.%)合金では、冷却中（冷却速度：100~1000 K s<sup>-1</sup>）の $\beta$ 相SDにてナノスケールの濃度変調が生じ、さらに連続冷却中に生じる相分離は不完全であり、等温SDで形成する組織とは異なった不均一な濃度プロファイルを有した組織が形成されることを明らかにしている。Ti-Nb-O合金の特異な変態挙動と力学応答に、水冷中の相分離が関与している可能性を指摘した興味ある結果である。

第5章では、Mg-Zn-Ca合金の粒界偏析と集合組織形成・成形性の関係について検討している。Mg-Ca合金、Mg-Zn-Ca合金、Mg-Al-Ca合金、およびMg-Zn-Sc合金について、Hillertの粒界相モデルに基づき粒界偏析を数値計算し、いずれの合金においても、CaならびにScの粒界偏析量と集合組織強度の間に負の相関が存在する点を明らかにしている。特にMg-Zn-Ca合金の最大集合組織強度がCa偏析量（圧延温度）との間に高い相関を示すことを見出しており、本成果は粒界偏析と成形性との関連性を理解する上で有用な知見である。

第6章では、曲げ引張加工による圧延Mg合金板材の集合組織改質に注目し、他の集合組織改質プロセスによって、RD-split texture（AZ31B合金高温圧延材）あるいはTD-split texture（ZEK100合金）を導入したMg合金に対する曲げ引張加工の成形性への影響を実験的に追究している。特にTD-split textureとRD-split textureの混合組織の形成によって、試料全体での底面すべりに関するシュミット因子の異方性が低減し、ZEK100合金では曲げ引張加工によって、Mg合金で最高レベルの非常に優れたエリクセン値（9.6 mm）が得られている。また曲げ引張加工材の試料表層部に形成される粗大粒領域に着目し、集合組織の改質への寄与および破壊の起点の問題について考察を行い、曲げ引張加工条件の最適化に対し、曲げ引張加工時に導入される不均一な集合組織の空間分布を考慮する必要性を提唱している。

第7章では、本研究で得られた主要な知見と今後の展望をまとめ、本論文の総括としている。

以上のように本論文では、近年注目を集めている各種のTi合金とMg合金の材料内部組織形成と力学特性との関連性を、理論計算・シミュレーションならびに実験の両面から解明している。これらの解析手法ならびに得られた

## 論文審査の結果の要旨

結果は、高強度・高力学特性のTi合金およびMg合金を活用した移動体の軽量化実現に不可欠であり、工学の発展に寄与するところが大きいと判断できる。よって、本論文の提出者である石黒雄也君は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格があると判断した。