氏　　名	KIM, KYONG MIN
学 位 の 種 類	博 士 (工学)
学 位 記 番 号	博 甲 第 9382 号
学位授与年月日	令和2年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審 査 研 究 科	数理物質科学研究科
学 位 論 文 題 目	

Alloy design and texture control of metastable β-Ti alloys with low modulus and high strength
（低弾性率と高強度を備えた準安定β-Ti 合金の合金設計と集合組織制御）

主	査	筑波大学 教授	工学博士 金　熙榮
副	査	筑波大学 准教授	工学博士 古谷野 有
副	査	筑波大学 准教授	工学博士 谷本 久典
副	査	筑波大学 特命教授	工学博士 宮崎 修一
副	査	物質・材料研究機構 グループリーダー	博士(工学) 御手洗 容子

論　　文　　の　　要　　旨

審査対象の論文は、β型チタン合金を対象として、低ヤング率と高強度を併せ持つ生体用チタン合金の設計指針の構築および組織制御指針の確立を目的としている。

本論文は全5章から構成されている 。第1章では、生体用インプラント材料の開発経緯、およびステンレス鋼、コバルトクロム合金、チタン合金などの金属系インプラント材料の特徴とそれらの合金が抱える問題点について論じている。また、金属系生体材料として最も多く使われているチタン合金の特性について解説している。チタン合金のヤング率を支配する因子として結晶方位と相安定性の重要性が述べられている。低ヤング率β型チタン合金の設計概念として重要な相安定性の判断指標として、Mo 当量、平均価電子濃度(e/a)、d 電子合金理論のパラメーター(共有結合の大きさを表す結合次 Bo、構成原子の d 軌道エネルギーレベル Md)などの重要な概念に関する説明が記述されている。さらに、ヤング率と e/a、Bo、Md との関連性および従来の合金設計法の限界について論述されている。

第2章では、研究の手法と実験装置について詳細に記述されている。研究対象合金の原料およびアーク溶解法を用いた合金の作製方法について、また合金インゴットの加工熱処理条件、試験片の作製条件など実験のプロセスが記述されている。力学特性評価、相同定、微細組織解析、相変態特性解析に用いられた各実験装置(引張試験機、XRD、SEM、TEM、EBSD、DSC)と測定条件について記されている。

第3章では、生体適合性の良い Ti-Nb-Zr 合金に着目し、相安定性、変形挙動およびヤング率に及ぼす組成の効果を系統的に調査し、β型チタン合金のヤング率を支配する因子を明らかにしている。Nb 濃度および Zr 濃度を広い範囲で系統的に変化させ、室温での相構成およびマルテンサイト変態温度の組成依存性を解析し、Ti-Nb-Zr 合金系においてマルテンサイト変態を抑制しβ相単相になる臨界の Nb 濃

度が Zr 添加量の増加に伴い減少することを明らかにしている。また、ヤング率は Nb 濃度の減少に伴い低下し、β相単相になる臨界組成で最小値を示した後、Nb 濃度がさらに減少しマルテンサイト相が形成すると上昇することを実証し、マルテンサイト変態誘起応力とヤング率は強い相関があることを明らかにしている。また、Zr 濃度の増加に伴いヤング率が最小になる Nb 濃度が低下すること、およびそのヤング率の値が Zr 濃度の増加に伴い低下することを明らかにしている。その結果、Zr の添加はβチタン合金のヤング率低下で有効であることを実証し、Nb と Zr 組成の最適化により 40 GPa 以下の非常に低いヤング率が得られることを明らかにしている。合金のヤング率と e/a の関係について考察し、β相下限組成(β相単相になる臨界組成)であること、e/a が小さい組成であることを同時に満たす合金で低ヤング率が発現することを見出し、新たな合金設計指針を提案している。また、Zr 添加によるヤング率低下の起源がβ相下限組成の e/a を減少させるためであることを提案している。さらに、既存の Bo-Md マップの相境界線について修正を提案し、ヤング率と Bo-Md の関係について新たな知見を得ている。

第4章では、第3章で提案した合金設計指針に基づき、低ヤング率と高強度を併せ持つ新規合金を開発している。固溶強化のため Mo を、e/a を低下させるため Sn を添加した Ti-Nb-Zr-Sn-Mo を設計し、力学特性、変形挙動、集合組織に及ぼす Mo 濃度の影響について調査した結果が記されている。Ti-Nb-Zr-Sn-Mo 合金は、Ti-Nb-Zr 三元合金に比べ最大強度が上昇することを実証し、Mo および Sn の添加が強化手法として有効であることを明らかにしている。再結晶集合組織が組成および加工熱処理条件により大きく変化することを示し、Mo 添加量、圧延率、焼鈍時間の調整により集合組織が制御できることを示している。圧延方向に<100>方向が配向する Goss 集合組織の形成によりさらなる低ヤング率化が可能であることを明らかにしている。合金の e/a、マルテンサイト変態温度および集合組織の制御により低ヤング率と高強度を併せ持つ新合金開発が可能であることを提案している。また、電気化学測定と接触角測定を行った結果から、開発した合金が耐食性および親水性にも優れ、生体用インプラントとして有望であることを示している。最後に5章で、本研究の総括としてまとめおよび結言を述べている。

審　　査　　の　　要　　旨

〔批評〕

Ti-Nb 基βチタン合金は生体・医療材料として有望であり、多くの論文が報告されているが、相安定性および集合組織の観点から添加元素の効果を系統的に調査した論文は少ない。従来、βチタン合金の設計指針として、平均価電子濃度(e/a)および分子軌道計算(d 電子合金理論)のパラメーターが用いられているが、相安定性との関連性についての定量的な検討が不十分であり、ヤング率との相関についても明確ではなかった。本論文は、生体に安全な元素のみで構成されている Ti-Nb-Zr 合金系を中心に、マルテンサイト変態温度、微細組織、結晶構造、変形挙動、力学特性に及ぼす組成の効果を系統的かつ定量的に調査し、ヤング率と相安定性に関係を詳細に示すことに成功している。平均価電子濃度(e/a)および分子軌道計算のパラメーターとヤング率との関連性について考察し、低ヤング率の合金設計指針を提案した。また、独自に提案した合金設計概念を適用し、高強度と低ヤング率を併せ持つ新合金の開発に成功している。さらに、低ヤング率化には相安定性と再結晶集合組織を同時に最適化することが重

要であることを見出した。これらの成果は、生体用低ヤング率合金の材料設計指針および組織制御指針として非常に有用であると判断できる。今後注目を集めることが期待される重要な内容であり、新規性および優れた成果が認められる。

〔最終試験結果〕

令和　2年　2月　18日、数理物質科学研究科学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（　　工学　　）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。