

補助事業番号 2022M-220

補助事業名 2022年度 革新的な強靱性・高延性を實現する α' マルテンサイト型チタン合金の新合金設計 補助事業

補助事業者名 香川大学 創造工学部 先端材料科学領域 松本研究室 代表者 松本洋明

1 研究の概要

本研究では、革新的な強靱性・高延性を實現する α' マルテンサイト型チタン合金の新合金を開発する事を大目標として、組成を変化させたTi-V-Al合金系において α' マルテンサイト組織を含む合金の機械的特性について、従来の平衡な($\alpha+\beta$)組織を呈す合金と比較した”違い”を体系的に評価し、基礎的に α' マルテンサイト組織で発現する塑性機構を推定するとともに、従来とは異なる優位性(強度-延性バランスの高度化)を示す可能性(ポテンシャル)を評価している。

2 研究の目的と背景

これまでTi合金(例: Ti-6Al-4V)における α' マルテンサイトの脆性の起源は競合する拡散 β 相がナノオーダーで双晶界面に生成するため、それが突発的な破壊の起点となる事を見出した。言い換えれば、焼入れ過程で競合する拡散 β 変態を如何に抑制するかが鍵であり、本研究では α' マルテンサイト(非平衡相)を主相とした新合金設計に挑戦する。世界的に α' マルテンサイトを主役とした構造用展開は皆無であり、本研究は世界初の挑戦的研究である。これまでの合金種・組成の最適化は平衡相である($\alpha+\beta$)で実施され、 α' マルテンサイトに適した合金種・組成の研究開発は皆無である。本研究では、汎用なTi-V-Al系において焼入れ過程で拡散 β の競合変態・析出を抑制した(焼入れ性の向上) α' マルテンサイト組織の基礎特性(組織・機械的特性)の体系的評価を行う。具体的にTi-V(0~10wt%)-Al(0~6wt%)系において、組成を変化させた合金を製造し800°C~1100°Cの範囲で溶体化焼入れ処理を施す事で α' マルテンサイト組織を生成する。その後、組織($\mu\text{m}\sim\text{nm}$)の評価・引張試験・破壊靱性試験から強度・延性・靱性の力学特性の体系的評価を行う。それによりTi合金における α' マルテンサイトの“ポテンシャル”を評価する。特に組成とマルテンサイト生成の相安定性(拡散 β の出現)・マルテンサイトの特徴(バリエーション選択)を基礎的(金属組織学)に明らかとして、力学特性を体系的に評価して、従来[平衡($\alpha+\beta$)]と比較した優位性を見出し、新規な合金・相設計の指導原理を創出する。申請者は既にその突破口となる可能性(強靱化・高延性化)を見出している。本研究では、より体系的に組成・合金の影響を評価する事でTi合金における α' マルテンサイトのポテンシャル(力学特性)・基礎原理を真に見出す。

3 研究内容

強靱性・高延性を実現する α' マルテンサイト型チタン合金の新合金の開発
(https://www.eng.kagawa-u.ac.jp/~matsu_h/research1.html)

- ① Ti-(0~10mass%)V-(0~6mass%)Al合金(計20~30)の製造と圧延・熱処理(α' マルテンサイト形成)
- ② 機械的特性の体系的評価
- ③ 弾塑性機構の解明(特異な双晶形成と高強度・高延性化機構)

これまでTi合金(例: Ti-6Al-4V)における α' マルテンサイトの脆性の起源は競合する拡散 β 相がナノオーダーで双晶界面に生成するため、それが突発的な破壊の起点となる事を見出した。言い換えれば、焼入れ過程で競合する拡散 β 変態を如何に抑制するかが鍵であり、本研究では α' マルテンサイト(非平衡相)を主相とした新合金設計に挑戦する。世界的に α' マルテンサイトを主役とした構造用展開は皆無であり、本研究は世界初の挑戦的研究である。これまでの合金種・組成の最適化は平衡相である($\alpha+\beta$)で実施され、 α' マルテンサイトに適した合金種・組成の研究開発は皆無である。本研究では、汎用なTi-V-Al系において焼入れ過程で拡散 β の競合変態・析出を抑制した(焼入れ性の向上) α' マルテンサイト組織の基礎特性(組織・機械的特性)の体系的評価を行う。具体的にTi-V(0~10wt%)-Al(0~6wt%)系において、組成を変化させた合金を製造し800°C~1100°Cの範囲で溶体化焼入れ処理を施す事で α' マルテンサイト組織を生成する。その後、組織($\mu\text{m}\sim\text{nm}$)の評価・引張試験・破壊靱性試験から強度・延性・靱性の力学特性の体系的評価を行う。それによりTi合金における α' マルテンサイトの“ポテンシャル”を評価する。特に組成とマルテンサイト生成の相安定性(拡散 β の出現)・マルテンサイトの特徴(バリエーション選択)を基礎的(金属組織学)に明らかとして、力学特性を体系的に評価して、従来[平衡($\alpha+\beta$)]と比較した優位性を見出し、新規な合金・相設計の指導原理を創出する。申請者は既にその突破口となる可能性(強靱化・高延性化)を見出している。本研究では、より体系的に組成・合金の影響を評価する事でTi合金における α' マルテンサイトのポテンシャル(力学特性)・基礎原理を真に見出す事を目標としている。

【成果のポイント】

- ・ Fig. 1は製造した合金インゴットおよびその後熱間圧延した圧延材の外観である。アーケ溶解・熱間圧延により良質な合金板材を製造する事が出来た事が分かる。
- ・ Ti-V(0~10wt%)-Al(0~6wt%)合金系において、 α' マルテンサイトを呈す組織にて最適な合金組成域にて強度・延性・絞りのバランスが優れる事を明らかとした
- ・ Fig. 2は本JKAの補助事業で導入した詳細な弾塑性ひずみ解析のためのビデオ式伸び計の外観である。Fig. 3は代表的にTi-6Al-4V合金の α' マルテンサイト組織および等軸状の平衡($\alpha+\beta$)組織の繰り返し変形における塑性流動特性である(ビデオ式伸び計により計測)。これより、平衡($\alpha+\beta$)組織の塑性域にて繰り返し変形(荷重の負荷・除荷)で線形的でヒステリシス挙動は観察されない。一方で、 α' マルテンサイトの塑性挙動では繰り返し負荷・

除荷の過程での弾性は非線形挙動を呈し、ヒステリシスひずみが観察される(荷重の負荷・除荷時の応力—ひずみ挙動が一致しない挙動)。これは、平衡($\alpha+\beta$)組織および α' マルテンサイト組織にて塑性機構が異なり、観察されたヒステリシスひずみは α' マルテンサイト組織にて双晶が活動した可能性を示唆している。以上より、本研究では組成を最適化し、 α' マルテンサイト組織を呈すTi-V-Al合金系にて特異な塑性機構(平衡 α 相では活動しない双晶が活動)を呈し、優れた強度・延性バランスを示す事を実験的に明らかとした。



Fig.1 製造した合金インゴットと熱間圧延材(引張試験片切り出し)



Fig.2 導入設置したビデオ式伸び計TRView 外観図

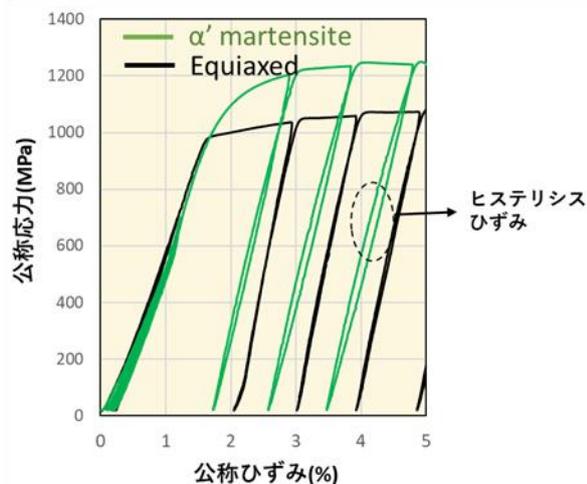


Fig.3 Ti-6Al-4V合金繰返し変形挙動 (α' マルテンサイト, 等軸平衡($\alpha+\beta$)組織)

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

構造用Ti合金は軽量・高比強度・高耐食性・高耐熱特性の利点から航空機用途を中心として、建材・生体医療に至るまで幅広く実用化されている。このTi合金の欠点として、塑性加工性が極めて悪い点があり、これが加工コスト高の大きな要因となり、そのために“コスト”の観点から代表的な軽金属材料であるアルミニウム(Al)合金と比較して、一般産業用には広く普及されていないのが実状である。これを打破するために、Ti合金にて高強度を維持して如何に塑性加工性を向上させるか(材料として高延性化させるか)？が大きな課題であり、本研究では新規に α' マルテンサイトに着眼し、それ由来で高延性化できるのか？に挑戦した。先述した通り、最適な合金組成を有すTi合金(α' マルテンサイト組織を含む)では従来の平衡($\alpha+\beta$)組織を呈すTi合金と比較して優れた高強度・高延性を示すポテンシャルが示された。今後は、実際の素形材(板材・棒材・線材・プレス成形品)に塑性加工が出来るかが重要な課題となり、これが達成されれば(従来の($\alpha+\beta$)組織と比較して、開発した α' 組織を呈す新Ti-V-Al合金の方で良好な塑性加工性を示す事が出来れば)、実用化はより現実的となる。今後は、開発した新Ti合金にて塑性加工性評価試験(圧延性・棒材加工性・プレス成形性(張出性・絞り加工性)等)を実施するとともに、チタンメーカ・素

材加工メーカーに新合金を提案して、新合金の実用化を図る。まずは、一般民生品用（スポーツ用品・自転車等）から始動し、将来的にはエネルギー効率化に寄与する航空機用部品に展開できる事を大目標としている。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

これまで、代表者は既存Ti合金(Ti-6Al-4V, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-Si合金等)における α' マルテンサイトを起点とした室温・高温特性に及ぼす影響を詳細に評価してきた。今回の研究を契機として、新たに組成を最適化した新合金に着眼する事ができる。更に学術的な面においても、本研究では α' マルテンサイト由来で特異に双晶変形が活動する事が示され、その発現機構については不明であり、今後基礎的に解明していく予定である。本研究を契機として、”Ti合金における α' マルテンサイトと双晶変形”を新たな学術的キーワードとして、Ti合金（一般産業用・航空機用）における新たな設計指針を創出・構築する。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

学会発表：

- ・吉岡遼太, 松本洋明, ($\alpha + \alpha'$) duplex組織を呈すTi-6Al-4V合金の機械的特性と時効処理の影響, 日本金属学会 第171回春期講演大会(福岡工業大学) (2022年9月)
- ・松本洋明, 宇民直将, α' マルテンサイト組織を呈すTi-V-Al合金系の機械的特性: 合金組成の影響, 日本金属学会 第171回春期講演大会(福岡工業大学) (2022年9月)
- ・松本洋明, 宇民直将, α' マルテンサイト組織を呈すTi-V-Al系合金の機械的特性に及ぼす組成の影響, 軽金属学会 秋期講演大会(東京工業大学) (2022年11月)

7 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの

JKA補助事業成果報告書

(https://www.eng.kagawa-u.ac.jp/~matsu_h/research1.html)

<p style="text-align: center;">JKA補助事業成果 概要 『2022年度革新的な強靱性・高延性を実現するα'マルテンサイト型タンタル合金の新合金設計 補助事業』</p> <p style="text-align: right;">研究代表者： 松本洋明</p> <p>【社会的課題・現状】 「カーボンニュートラル」の環境問題から輸送機器の低炭素化・エネルギー代償化が強く要請され、航空機業界では「水素航空機」の実現を目指す研究開発が進展している。これは、本業向け技術の導入で、エンジン等の動的挙動化を図っており、併せてこれを支える機体の軽量化・高強度化が益々要請されている。使用される材料の中で、軽量・高強度な炭素繊維強化材料(CFRP)が注目され、併せて軽量・高強度・高耐食性に優れたチタン(Ti)金属材料の需要が増加・適用の拡大が期待されている。</p> <p>【目指す課題】 本研究ではTi合金に着目し、新規な設計指針で高強度・高延性に挑戦する。Ti合金は優れた比強度特性を示すが、航空機に代表される輸送機器の更なる軽量・高強度化の要求で、既存の組成・組織制御では限界が顕在化されている。現在、高強度化だけでなく、高延性を備えた高強度化が要請されている。では如何に実現するか新規(ゲームチェンジン)なアプローチによる展開が要請されている。ここでは構造的で実用化されていないα'マルテンサイトを主軸とした新戦略で高延性・高強度を実現(既存の1.2倍以上)する新合金設計に挑戦する。</p> <p>【研究目的】 これまで、Ti合金は平衡相であるα(BCC)相(α相(BCC))相を中心に展開され、本研究では新たにα'マルテンサイト(HCP)相を主軸とする新展開を図る。α'マルテンサイトは「強」以上の相から構造的で世界的に要請された相であったが、申請者はこの強さは本質的に起因するのではなく結合する炭素β析出が要因である事を突き詰め、その影響を排除する事で高延性が相保される事を見出している(合金系・組成に依存)。本研究ではこれを基盤に最適化・高延性を実現するTi-V-Al合金系を開発する。</p> <p>【事業内容】 これまでTi合金(例: Ti-6Al-4V)におけるα'マルテンサイトの脆性の懸念は結合する炭素β相が析出オーダーで双晶変形に生成するため、それが突発的な破壊の起点となる事を見出した。言い換えれば、脆い環境で結合する炭素β相を如何に抑制するかが鍵であり、本研究ではα'マルテンサイトを(非平衡相)を主軸とした新合金設計に挑戦する。世界初のα'マルテンサイトを主軸とした高強度高延性は皆無であり、本研究は世界初の創発的研究である。これまでの合金種・組成の最適化は平衡相であるα(HCP)相で実施され、α'マルテンサイトに達した合金種・組成の研究開発は皆無である。本研究では、汎用なTi-V-Al系において脆入環境でβ相の析出を抑制した脆い環境のα'マルテンサイトを主軸としたα'マルテンサイトの高強度・高延性の特性の体系的評価を行う。具体的にTi-V(10wt%)Al(0-6wt%)系にお</p>	<p>いて、組成を変化させた合金を製造し、800°C-1100°Cの範囲で溶体化処理後冷却することでα'マルテンサイト組織を生成する。その後、組織(μm-1mm)の評価・引張試験・破壊靱性試験から強度・脆性・靱性の力学特性の体系的評価を行う。それによりTi合金におけるα'マルテンサイトの「ポテンシャル」を評価する。特に組成とマルテンサイト生成の相安定性(炭素βの出現)・マルテンサイトの特性(90°引張試験)を基礎的(金属組織学)に明らかにし、力学特性を体系的に評価して、従来(平衡α相)と比較した優位性を見出し、新規な合金・相設計の指針を導出する。申請者は既にその突破点となる可能性(高強度・高延性化)を見出している。本研究では、より体系的に組成・合金の影響を評価する事でTi合金におけるα'マルテンサイトのポテンシャル(力学特性)・基礎原理を真に見出す。</p> <p>【成果の概要】 ・Fig.1は製造した合金インゴットおよびその後に熱間圧延した圧延材の外観である。アーク溶解・熱間圧延により良質な合金材料を製造する事が出来た事が分かる。 ・Ti-V(0-10wt%)Al(0-6wt%)合金系において、α'マルテンサイトを呈す組織にて最適な合金組成にて強度・脆性・靱性のバランスが優れる事を明らかにした。 ・Fig.2は本JKAの補助事業で導入した詳細な弾塑性ひずみ解析のためのピボット型押印の外観である。Fig.3は代表的にTi-6Al-4V合金のα'マルテンサイト組織および平衡相のα(HCP)組織の繰返し変形における弾塑性特性である(ピボット型押印により計測)。これより、平衡α(HCP)組織の塑性域にて繰返し変形(荷重の負荷・除荷)で線形的にヒステリシス挙動が観察されない。一方で、α'マルテンサイトの弾塑性域では繰返し負荷・除荷の過程での弾性ひずみ非弾性挙動を呈し、ヒステリシスひずみが観察される(荷重の負荷・除荷時の応力ひずみ挙動が一致しない挙動)。これは、平衡α(HCP)組織およびα'マルテンサイト組織にて異なる機構が異なる。観察されたヒステリシスひずみはα'マルテンサイト組織にて双晶が活動した可能性を示唆している。以上より、本研究では組成を最適化し、α'マルテンサイトを主軸としたTi-V-Al合金系にて特異な弾塑性特性(平衡α相では活発しない双晶)の活動を呈し、優れた強度・脆性・靱性のバランスを示す事を実験的に明らかにした。</p> <p style="text-align: center;">Fig.3 Ti-6Al-4V合金の繰返し変形挙動(弾塑性特性)の比較(平衡α相・α'マルテンサイト)。</p> <p style="text-align: center;">実験の補助事業 この報告書は、実験の補助により作成しました。 https://jka-cycle.jp</p>
--	---

(2)(1) 以外で当事業において作成したもの
該当なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 香川大学創造工学部（カガワダイガクソウゾウコウガクブ）

住 所： 〒761-0396

香川県高松市林町2217-20

担 当 者： 教授 松本洋明（キョウジュ マツモトヒロアキ）

担 当 部 署： 松本研究室（マツモトケンキュウシツ）

E - m a i l： matsumoto.hiroaki@kagawa-u.ac.jp

U R L： https://www.eng.kagawa-u.ac.jp/~matsu_h/