

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：13903

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2021

課題番号：21K20397

研究課題名（和文）極微細配向化組織制御と相安定性制御の融合による革新的超高強度Ti合金の創製

研究課題名（英文）Development of Ti-based super-high strength alloy by combination of fine and oriented microstructure control and phase stability

研究代表者

徳永 透子（Tokunaga, Toko）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：30767299

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、硬質・軟質複相合金中の層状組織の微細化と配向化による超軽量・高強度新規耐熱Ti合金の開発を目指した。Ti-Fe系およびTi-Co系共晶合金を一方向性凝固により作製し、光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡による微細組織観察を実施したところ、Ti-Co共晶合金において著しく微細なナノレベルの層状組織が観察された。また、室温圧縮試験においては両合金において2 GPaに迫る高い降伏強度が得られた。当初目指していた新たな局所変形モードの誘起による高強度・延性の発現は実現できなかったが、さらなる力学特性の向上には今回発見されたナノレベル微細層状組織の形態制御が重要であることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の環境負荷問題の深刻化に伴い、耐熱性に優れる高強度・高延性軽量材料の開発が社会的に強く求められてきたが、強度と延性がトレードオフの関係にあることなどから実現が困難であった。本研究では、強度と延性をそれぞれ別の相に担保させる複相化に着目した。極微細組織制御による高強度化を達成しつつ、複相化による界面拘束効果と組織配向化を通じた局所変形を誘導することで、新たな変形モードの誘起による延性の確保を試みた。本研究の成果は、極微細組織制御による高強度材料の開発を達成するとともに、さらなる高強度・高延性の誘導には層状組織の形態制御が重要であることを示唆しており、社会的・学術的に高い意義を有している。

研究成果の概要（英文）：To develop new light-weight high-strength heat-resistant Ti alloys by refinement and orientation of the hard and soft lamellar microstructures in eutectic alloys, the microstructure and mechanical properties of the directionally-solidified eutectic Ti-Fe and Ti-Co eutectic alloys were investigated. In the Ti-Co eutectic alloys, a remarkably fine nano-lamellar microstructure was observed, and in both alloys, high yield strengths approaching 2 GPa were obtained in compression tests at room temperature. Although strengthening by the introduction of a new local deformation mode due to the interface constraint effect between layers could not be achieved, the present work suggests that control of the morphology of the lamellar microstructure is essential for further strengthening.

研究分野：材料科学

キーワード：Ti合金 組織制御 力学特性 配向組織

1. 研究開始当初の背景

近年、環境負荷問題の深刻化に伴う CO₂ 削減の要請に対して、軽量超高強度材料の開発による輸送機器の軽量化が強く望まれている。また、これを耐熱材料としてエンジンやタービンプレード等にまで適用できれば、熱効率の向上により更なる CO₂ 排出量の削減が実現できる。しかしながら、金属材料の実用化において強度と延性の確保は必須である一方、両者は常にトレードオフの関係にある。したがって、軽量高強度・高延性材料の実現には、材料の本質的な特性を乗り越えるための学問的ブレークスルーが必須である。

その一つの方策として結晶粒微細化が挙げられるが、この効果は温度上昇に伴い急激に失われるため、耐熱材料への適用は期待できない。また、他の可能性として超急冷による結晶構造の消失（金属ガラス化）による高強度化があるが、この場合転位の運動が不可能であるため延性が得られない。つまり、耐熱性に優れる高強度・高延性材料の開発が社会的に強く求められているものの、その実現方策がないのが現状である。

そこで本研究では、軽量・高強度でありながら、高温組織安定性も有する共晶合金系である Ti 合金に着目した。強度と延性を共晶合金特有の層状組織に含まれる別の相に担保させることにより、強度と延性を両立できる可能性がある。本研究では、高強度化・延性化の可能性を存分に高めるため、適切な高冷却速度を選択することで、層状組織を微細化・配向化する「極微細配向化組織制御」を提案した。また近年、層界面に平行な方向にせん断方向を限定することで、層状構造がキンク変形を誘発し、すべり変形等の他の変形機構の活動を抑制することで強度と延性の両方を向上させることが知られている[1]。ただしここで、このキンク変形帯は転位運動を素過程として導入されることが知られている。本研究では、さらなる強化を目指し、「材料力学的」にキンク変形が生じる状況下で転位運動を抑制し、他の変形双晶等の新たな変形モードを誘起することで変形機構の変化を促し、それによる力学高機能化に挑戦した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、具体的に Ti-Fe 系、Ti-Co 系共晶合金において、実用的観点から、「2 GPa を超える超高強度と 10% を超える引張延性を併せ持つ新材料の開発」と学問的観点から、「Ti 基合金における新たな局所変形モード発現誘導の実現とその形成機構の解明」という 2 点である。

また近年、キンク帯形成とそれに伴う変形挙動について、材料力学的・材料組織学的観点から様々な考察がなされつつある。しかし現在、このキンク帯が着目されている合金系は、Mg 合金や一部の Al 合金のみである。さらに、それら合金系においても、変形機構の概要は徐々に明らかになりつつあるものの、キンク帯の形成・発達機構の支配因子は未だ十分には解明されていない。本研究では上述の極微細配向化組織制御により高強度化を達成しつつ、キンク帯変形に固執するのではなく、より包括的な観点から、局所変形の発現、特徴と、微細組織、活動変形モードの相関を解明することで、高力学特性を有する新たな Ti 合金の開発指針を確立できると期待できる。

3. 研究の方法

本研究では、Ti-Fe 系および Ti-Co 系共晶合金系に着目し、一方向性凝固による組織配向化を行い、成長速度等の凝固条件が及ぼす共晶組織への影響を調査した。具体的には、Ti-Fe 系、Ti-Co 系の共晶合金をブリッジマン法による一方向性凝固により作製した。一方向性凝固は Ar 雰

囲気中で行い、溶融温度は Ti-Fe 合金では 1400°C、Ti-Co 合金では 1150°C とし、いずれの合金においても育成速度は 100 mm/h とした。光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡による組織観察、XRD 解析、EDS による構成相の評価を行った。力学特性の評価として、結晶成長方向が荷重軸方向と一致するように圧縮試験片を切り出し、ひずみ速度 $1.67 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、試験温度 室温、600°C における圧縮試験を実施した。変形前後の合金に対して光学顕微鏡とレーザー顕微鏡により組織を観察し、塑性変形を担う変形モードを明らかにした。

4. 研究成果

図 1 に一方向性凝固により作製した(a-b) Ti-Fe, (c-d) Ti-Co 共晶合金の組織写真を示す。図から、Ti-Fe 合金では層状組織が結晶成長方向に配向している様子が確認できるが、Ti-Co 合金においては層状組織の向きはランダムであり、組織は配向化していなかった。しかしながら、Ti-Co 合金においては層間隔が約 0.1 μm の非常に微細な層状組織が確認され、本研究で提案した「極微細配向化組織制御」による層状組織の微細化が達成できた。

図 2 に(a) Ti-Fe 系および(b) Ti-Co 系共晶合金の圧縮試験で得られた応力-ひずみ曲線を示す。Ti-Fe 合金においては、室温で約 1600 MPa もの高い強度を示し、600°C の試験においても、約 740 MPa の降伏応力を示すとともに、約 5% の塑性伸びを示した。Ti-Co 合金においては、室温で Ti-Fe 合金よりわずかに高い約 1630 MPa の高強度を達成し、600°C の試験では、約 630 MPa の降伏強度を示し、約 6% の塑性伸びを示した。Ti-Co 合金においてより高い強度を示した理由としては、ナノレベルの微細な層状組織の存在が有効に働いたことが考えられる。

圧縮試験後の組織観察においては、Ti-Co 合金では Ti(β)相内に

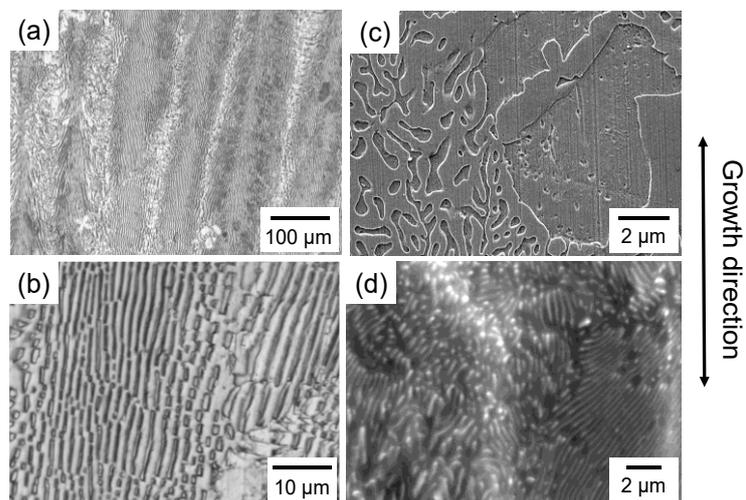


図1 一方向性凝固した(a-b) Ti-Fe 合金, (c-d) Ti-Co 合金。(b), (d)はそれぞれ(a), (c)の拡大図。

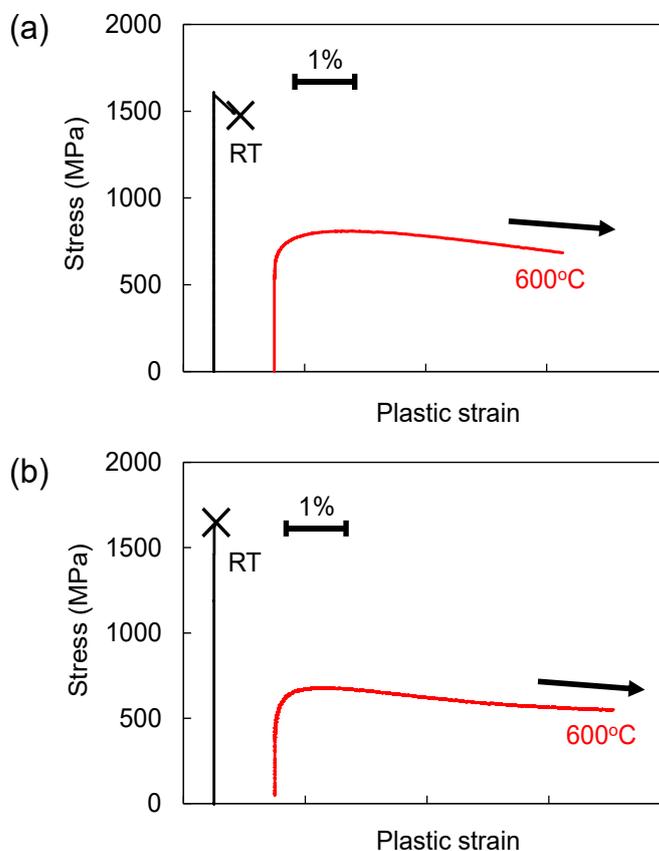


図2 (a) Ti-Fe, (b) Ti-Co 共晶合金の室温および 600°C での圧縮試験における応力-ひずみ曲線。

においてすべり線が見られ、新たな局所変形等は見られなかった。すべり線以外の新たな局所変形が発現しなかった理由としては、層状組織の配向性が悪かったこと、また組織形態が完全な板状ではなく、多くの部分で棒状であったことなどが考えられる。一方、Ti-Fe合金においては、室温においてはTi-Co合金と同様にすべり線が観察されたのみであったが、600°Cの試験後の組織では、層状組織が湾曲した部分や層状組織の途切れた部分において、細かい変形帯の導入、すなわち、局所変形の誘導が期待通り達成された。現在、この変形帯の特徴、形成メカニズムについて、さらに考察を進めている。

以上のように本研究では、極微細組織制御による高強度材料開発の達成が示された。当初目指していた新たな局所変形モードの誘起は大規模には実現できなかったものの、一部ではその可能性が示唆され、また延性を伴う著しい高強度化が達成された。これら合金のさらなる力学特性の向上には今回発見されたナノレベル微細層状組織の形態制御が重要であることが示唆された。

参考文献

- [1] M. W. Barsoum, T. Zhen, A. Zhou, S. Basu, S. R. Kalidindi, Microscale modeling of kinking nonlinear elastic solids, *Phys. Rev. B* 71 (2005) 134101.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 上道 捷平, 徳永 透子, 萩原 幸司
2. 発表標題 組織制御によるAl基新規ミルフィーユ材料の高強度化
3. 学会等名 日本金属学会2021年秋期第169回講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 萩原幸司, 徳永透子, 上山椋平, 中野貴由, 山崎倫昭, 河村能人
2. 発表標題 ミルフィーユ型マグネシウム合金単結晶が示す特異な力学特性
3. 学会等名 日本機械学会M&M2021 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	萩原 幸司 (Koji Hagihara)	名古屋工業大学・物理工学専攻・教授 (13903)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------