

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20408

研究課題名（和文）A novel method for overcoming the strength-ductility trade-off of titanium and titanium alloys by high-density pulsed electric current

研究課題名（英文）A novel method for overcoming the strength-ductility trade-off of titanium and titanium alloys by high-density pulsed electric current

研究代表者

顧 少杰（Gu, Shaojie）

名古屋大学・工学研究科・特任助教

研究者番号：00966830

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は、高密度パルス電流処理技術を利用して、純チタンおよびチタン合金の強度と延性を同時に向上させることに成功した。一般に、材料の力学性能は強度と延性のトレードオフの自然法則に従い、一方を向上させると必然的にもう一方が損なわれる。本研究では、高密度パルス電流処理を用いて材料を瞬時に加熱し、迅速に冷却する熱プロセスを実現し、化学成分および微細構造の不均一性を含む異質構造を形成することで、このトレードオフを打破した。将来的には、本研究で提案した方法を他の材料にも応用し、力学性能を向上させることが可能である。これにより、持続可能な材料設計やカーボンニュートラル社会の実現に貢献することが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、加熱速度が 10^6 °C/sに達する高密度パルス電流処理によって、二相 / チタン合金材料が条状相、残存相、マルテンサイト'相、及び残存相を含む混合異質微細構造を形成することを初めて発見した。これは、従来の熱処理方法では実現が難しいものである。この混合構造は、材料の微細構造を強区と弱区に分け、それらの協働作用によって強度と延性のトレードオフを打破した。この研究成果は、高密度パルス電流処理法を用いて他の類似した二相構造材料を処理するための基礎と根拠を提供する。

研究成果の概要（英文）：This study successfully utilized high-density pulsed current treatment technology to simultaneously enhance the strength and ductility of pure titanium and titanium alloys. Generally, the mechanical properties of materials follow the natural law of the strength-ductility trade-off, meaning that improving one inevitably compromises the other. In this study, the use of high-density pulsed current treatment enabled the rapid heating and cooling of the material, forming a heterogeneous structure that includes chemical composition and microstructural inhomogeneities, thereby overcoming the strength-ductility dilemma. In the future, the method proposed in this study can be applied to other materials to enhance their mechanical properties. This is expected to contribute to sustainable material design and manufacturing, as well as the realization of a carbon-neutral society.

研究分野：材料力学および機械材料関連

キーワード：マルテンサイト変態 ヘテロ構造 高密度パルス電流 純チタンとチタン合金 強度と延性の向上

1. 研究開始当初の背景

材料の強度と延性は構造設計に不可欠である。強くて延性のある材料は、構造物の寿命を延ばし、省エネ上で重要な役割を果たす。ただし、材料の力学性能は強度と延性のトレードオフの自然法則に従い、一方を向上させると必然的にもう一方が損なわれる。したがって、材料の強度と延性を同時に向上させる方法を研究することが、材料科学において最も重要な課題の一つとなった。何十年にもわたる研究の結果、研究者たちは金属材料の強度と延性を同時に向上させる2つの主要な方法を発見した。それは、変形誘起塑性 (TRIP) および双晶誘起塑性 (TWIP) 効果を利用する方法と、ナノ整合双晶境界 (TB) を利用する方法である。高 Mn 鋼の強度と延性を向上させるために、TRIP/TWIP 効果が使用されており、これにより新世代の高強度鋼が生まれた [G. Frommeyer, et al., ISIJ Int., 43 (2003) 438-446]。その後、変形および分配 (D&P) 中 Mn 鋼と階層的ナノ構造中 Mn 鋼も製造され、これらの材料は前述の TWIP および TRIP 効果を利用して強度と延性を同時に向上させた [B. B. He, et al., Science, 357 (2017) 1029-1032; Y. Li, et al., Science, 379 (2023) 168-173]。しかし、D&P 鋼とナノ構造中 Mn 鋼の製造方法には、温間圧延、臨界相変態焼鈍、冷間圧延、低温焼戻しなどが含まれており、煩雑で複雑である。一方、ナノ結晶 Cu における整合 TB の形成は、転位と TB の相互作用により可動転位を生成するため、延性を犠牲にすることなく超高強度を実現する [L. Lu, Science, 304 (2004) 422-426]。しかし、電着による製造が必要なため、この材料の工学的応用は制限される。したがって、これらの方法は圧延および焼戻しなどの機械的変形を伴い、新しい微細構造やナノ構造の形成を必要とするため、潜在的な応用は制限される。複雑な製造方法は、準備された材料が節約できるエネルギーよりも多くのエネルギーを消費し、材料設計の本来の目的を損なうことになる。

近年、電流処理は、金属材料の微細構造を低コストで効率的に最適化する方法として導入されて、材料の機械的特性を向上させる [S. Zhao, et al., Nat. Mater., 20 (2021) 468-472]。本研究では、高密度パルス電流 (HDPEC) を適用することで、純チタンとチタン合金における強度-延性トレードオフを克服できる新しい方法を実証する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高密度パルス電流処理法を用いて純チタンおよびチタン合金材料を調整および改質し、それらの力学的性能を向上させることである。また、本研究では電流処理法、特にその中に含まれる熱および非熱効果が材料の微細構造に及ぼす変更のメカニズムを探究する。上記の電流処理による微細構造変更のメカニズムを把握した上で、本研究で提案する高密度パルス電流処理法を他の材料にも応用し、微細構造の最適化と力学性能の向上を期待する。これにより、材料の製造および設計が改善され、最終的にはカーボンニュートラル社会の実現に貢献する可能性がある。

3. 研究の方法

上記の研究目的に基づいて、本研究の研究方法は主に 3 つの部分から構成される。

(1). まず、大量の力学性能分析 (例えば引張試験) を通じて、材料の力学性能を向上させることができる電流条件の範囲を選定した。この中には、電流密度と持続時間が含まれた。また、直流電や交流電など、電流のモードについても調査の範囲に含まれた。

(2). 次に、力学性能が最適化される電流条件を選び、電流処理前後の微細構造の特性評価を行い、電流の作用下で微細構造がどのように変化するかを正確に把握した。さらに、電流処理過程における熱効果と非熱効果を解明および区別するために、電流の流れを阻止しつつ熱の伝導を妨げない予微細加工構造を設計した。この微細加工構造は、基体と同じ熱効果を受けるものの、非熱効果を受けない。微細加工構造と基体領域の微細構造の差異を比較分析することで、熱効果と非熱効果、特に非熱効果が材料の微細構造に与える影響を区別することができた。

(3). 最後に、異なる電流が材料の微細構造と力学性能に及ぼす影響を比較分析し、電流-微細構造-性能の関係を確立した。これにより、電気による材料の最適化原理を十分に把握した。

4. 研究成果

(1). 材料の強度と延性を同時に向上

図 1 に示すように、電流処理が純チタンおよびチタン合金材料の機械的性能に与える影響

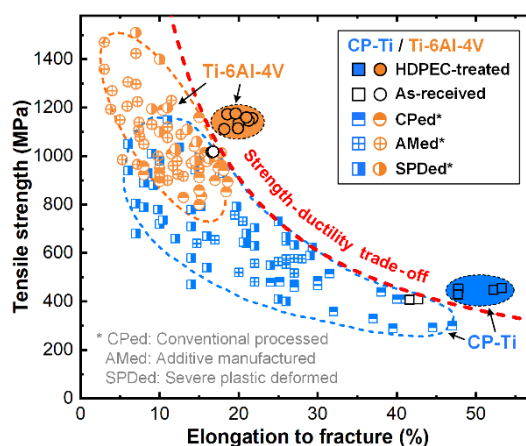


図 1. 電流処理による純チタンおよびチタン合金材料の力学性能の強度-延性のトレードオフを打破した。CPed、AMed、SPDed はそれぞれ、従来の処理方法、積層造形方法、および大塑性変形方法で製造された材料を示す。

を、従来の処理方法（CP：熱処理、熱機械処理など）、積層造形方法（AM）および大塑性変形方法（SPD）と比較して体系的に研究した。通常、材料の機械的性能は強度と延性のトレードオフの自然法則に従う傾向があり、両者を同時に向上させることは困難である。図1に示すように、CP、AM、およびSPD方法で加工された材料の機械的性能の大部分は、強度-延性トレードオフ曲線の下側に位置している。本研究で使用した元の純チタンおよびチタン合金の機械的性能もこの線以下であった。しかし、さまざまな電流処理を施した後、材料の性能はこの曲線を越えた。これらの電流条件により、材料は瞬時に800～1150の温度に達し、相変態温度に近づくかそれを越え、材料の微細構造を効果的に調整し、その機械的性能を向上させた。

(2). 電流処理による材料の微細構造の変化

微細構造の特性評価分析には走査電子顕微鏡とエネルギー分散型X線分析装置（SEM-EDS）を使用し、収束イオンビーム法（FIB）を用いて透過型電子顕微鏡（TEM）試料を作製し、TEM分析と走査TEM（STEM）分析を行った（図2、文献および）。電流処理前のTi-6Al-4V材料は均一な α/β 二相構造を呈し、Vは相安定化元素として相内に集積していた。しかし、電流処理後、相内のV元素は周囲へ拡散する傾向を示し、相内に多数の α' マルテンサイト相が析出した。さらに、元の β 相領域は β 相構造を保持しましたが、いくつかの板条状の α 相も析出した（図2b3）。

(3). 電流-微細構造-性能の関係の確立

電流処理の後、チタン合金材料の微細構造は2つの領域に分けられた。一つは相安定化元素（例えばV）が集積する領域であり、もう一つはVが乏しい領域であった。Vが集積する領域では、多量の α' マルテンサイト相が析出し、微細構造の強区を形成した。一方、Vが乏しい領域では、いくつかの板条状の α 相が析出し、大量の β 相が残存して、微細構造の弱区を構成した（図3参照）。引張試験において、これらの強区と弱区の協働作用により、材料の強度と延性が同時に向上し、強度と延性のトレードオフを打破した。上述の電流-微細構造-性能の関係に基づき、この電流処理法を同様に二相構造を持つ材料に応用することで、力学性能の向上を実現できる。これにより、材料の設計と製造に貢献し、最終的にはカーボンニュートラル社会の実現に寄与することが期待される。

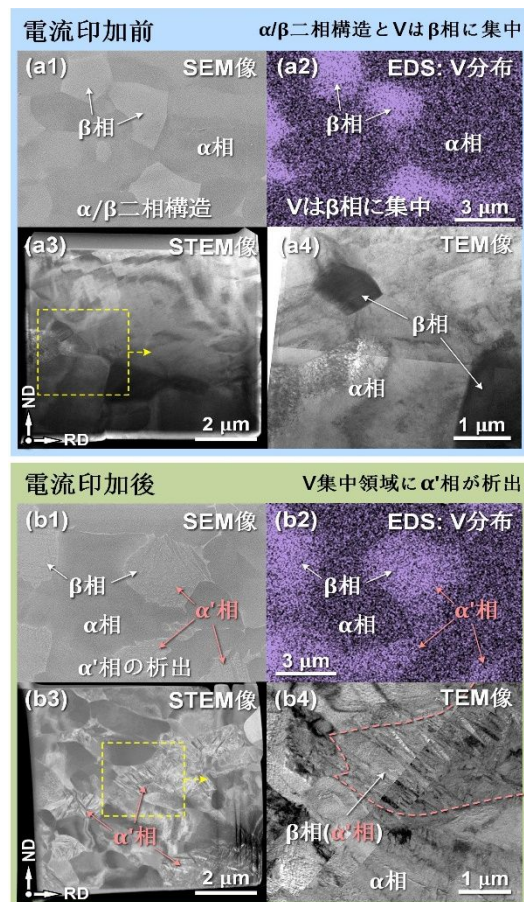


図2. 電流処理前後のTi-6Al-4V材料の微細構造の変化。

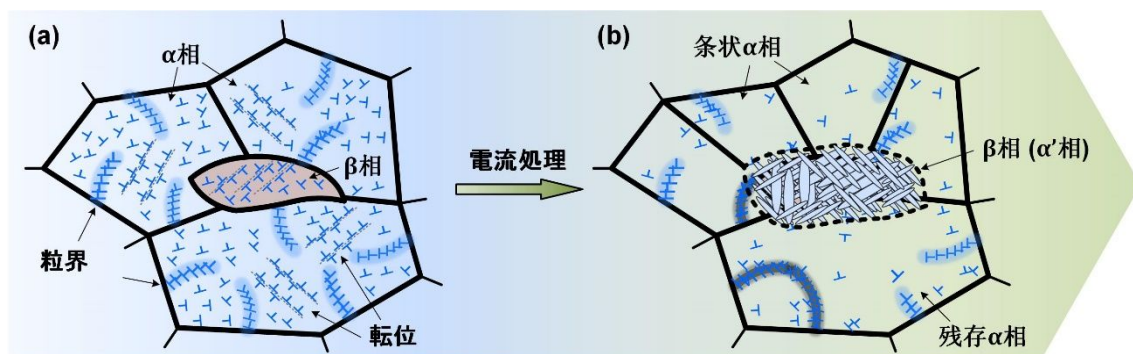


図3. 電流処理によりTi-6Al-4V合金の微細構造の進化の概略図。

<引用文献>

- ① Shaojie Gu, Chang Liu, Yuhki Toku, Yasuhiro Kimura, Sungmin Yoon, Shaoli Li, Yi Cui, Yang Ju, *Journal of Alloys and Compounds*, **973** (2024) 172892.
- ② Shaoli Li, Shaojie Gu, Sungmin Yoon, Yasuhiro Kimura, Yuhki Toku, Bin Liu, Yang Ju, *Materials Today Communications*, **37** (2023) 107082.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 4件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Gu Shaojie、Liu Chang、Toku Yuhki、Kimura Yasuhiro、Yoon Sungmin、Li Shaoli、Cui Yi、Ju Yang	4. 巻 973
2. 論文標題 Ultrahigh deformability of Ti-6Al-4V assisted by high-density pulsed electric current treatment	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Alloys and Compounds	6. 最初と最後の頁 172892 ~ 172892
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jallcom.2023.172892	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tang Yongpeng、Ju Yang、Gu Shaojie、Wang Qing、Kimura Yasuhiro、Toku Yuhki、Iikubo Satoshi	4. 巻 891
2. 論文標題 Microstructural modification and mechanical improvement of ultrafine-grained Ti alloy through electron wind force: An innovative approach	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Materials Science and Engineering: A	6. 最初と最後の頁 145845 ~ 145845
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.msea.2023.145845	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Li Shaoli、Gu Shaojie、Yoon Sungmin、Kimura Yasuhiro、Toku Yuhki、Liu Bin、Ju Yang	4. 巻 37
2. 論文標題 Effect of high-density pulsed electric current on residual stress relief and microstructural modification of cold-bent commercially pure titanium	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Materials Today Communications	6. 最初と最後の頁 107082 ~ 107082
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.mtcomm.2023.107082	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Gu Shaojie、Liu Chang、Kimura Yasuhiro、Yoon Sungmin、Cui Yi、Yan Xinming、Ju Yang、Toku Yuhki	4. 巻 883
2. 論文標題 Realizing strength-ductility synergy in a lean duplex stainless steel through enhanced TRIP effect via pulsed electric current treatment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Materials Science and Engineering: A	6. 最初と最後の頁 145534 ~ 145534
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.msea.2023.145534	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1 . 発表者名 S. Gu, S. Yoon, C. Liu, X. Yan, Y. Kimura, Y. Toku, Y. Ju
2 . 発表標題 Exploring the healing effects of electric current treatment on cracks: a comprehensive analysis of crack-scale factors
3 . 学会等名 ATEM-iDICS '23 (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 X. Yan, S. Yoon, S. Gu, Y. Kimura, Y. Toku, Y. Ju
2 . 発表標題 Inhibiting fatigue crack initiation in Nickel-based superalloys GTD-111 by high-density pulsed electric current treatment
3 . 学会等名 ATEM-iDICS '23 (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 S. Yoon, Y. Kimura, S. Gu, Y. Toku, Y. Ju
2 . 発表標題 Damage-healing induced enhancement of fatigue properties of austenitic stainless steel by high-density pulsed electric current: A continuum damage mechanics-based assessment
3 . 学会等名 ATEM-iDICS '23 (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 R. Iwase, Y. Marumoto, S. Gu, Y. Kimura, Y. Toku, Y. Ju
2 . 発表標題 Microstructural Modification and Mechanical Properties Improvement of Titanium and Titanium Alloys through High-Density Pulsed Electric Current
3 . 学会等名 4th International Conference on Materials Science & Engineering, Houston, USA (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Iwase, S. Gu, Y. Kimura, Y. Toku, Y. Ju
2. 発表標題 Enhancement of Mechanical Properties of Ti-6Al-4V through High-Density Pulsed Electric-Current
3. 学会等名 3rd International Conference on Materials Science & Engineering, Boston, USA (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 金属の機械特性向上方法	発明者 巨陽、丸本裕貴、顧少杰、尹盛文、岩瀬累	権利者 国立大学法人東海国立大学機構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-049181	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>ホームページ https://profs.provost.nagoya-u.ac.jp/html/100012346_ja.html</p>
--

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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------