HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	振動圧縮負荷によるチタンの常温窒化メカニズムと表面改質技術への応用
Author(s)	舩木, 優大
Description	この博士論文の全文は利用可能日以降に公開されます。
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16838号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16838
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99683
Type	doctoral thesis
File Information	Yuta_Funaki_review.pdf, 審査の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (工学)　　氏名　舩木　優大

審査担当者　主　査　准教授　高橋 航圭
副　査　教　授　佐藤 太裕
副　査　特任教授　佐々木 克彦
副　査　教　授　大沼 正人

学位論文題名

振動圧縮負荷によるチタンの常温窒化メカニズムと表面改質技術への応用
(Mechanism of room-temperature nitriding in titanium induced by cyclic compressive loading and its application to surface modification techniques)

チタンは比強度、耐食性に優れた軽金属であり、機器の軽量化を目的として幅広い分野で用いられている。しかし、耐摩耗性に乏しいため、摺動部材へ適用する際には対策が必要になる。チタンの耐摩耗性を向上させる方法の 1 つとして、試料の表層に高硬度の TiN や Ti2N といった窒素化合物を形成させる窒化処理が挙げられる。しかし、チタンの窒化処理には一般に高温と長時間を要するため、熱による強度特性の劣化が懸念される。このため、より低温かつ短時間で処理が可能な窒化手法が求められている。金属材料の表面改質手法としては、表層への圧縮負荷による加工硬化や結晶粒の微細化による機械的負荷による手法も挙げられる。本研究室ではこれまで、材料表面への繰返し圧縮負荷による組織の微細化技術として cyclic press(CP) という表面改質技術に取り組んできた。微細化の進行と雰囲気の関係を調べるために窒素環境下で純チタンに CP を施したところ、常温にもかかわらず試料表層に窒素が取り込まれることが偶然発見された。常温での窒化物形成は、従来の窒化処理が抱える熱劣化を解決する革新的な表面改質技術となりうる。そこで、試料に対してインデンタを相対的に走査させて CP の改質範囲を広げるため、CP に回転と送り機構を加えた scanning cyclic press(SCP) を開発した。

本論文では、SCP による純チタンの常温窒化の実証とそのメカニズム解明に向けた研究を報告する。本研究の目的は、SCP によってチタンの表層における常温での窒化物層の形成可否を検証し、常温窒化現象のメカニズムを解明することで、新しい表面改質技術を開発するための基礎を確立することである。

本論文は 7 章から構成されており、第 1 章, 第 7 章は緒言と総括である。第 2 章から第 6 章の概要は以下のとおりである。

第 2 章では、SCP による純チタンの常温窒化の可否を検証した。まず、表面分析により改質部の色が TiN 特有の金色に変化したことを確認した。ナノ硬さ試験の結果からは、試料最表層の硬さが試料中央と比較して著しく上昇したことを確認した。さらに、結晶構造解析の結果から試料表層に TiN が形成されていることを確認し、SCP によって純チタンの常温窒化が可能であることを示した。

第 3 章では、SCP による常温窒化機構を明らかにするために、収差補正走査透過型電子顕微鏡を用いて表面改質層における窒素分布および結晶組織の特徴を調べた。結果、試料表層には TiN 粒子が

凝集した層が形成されていた。また、SCP 後に回収された摩耗粉に対して XRD による結晶構造解析を行ったところ、TiN が検出された。これらの分析結果より、振動圧縮負荷によって露出した新生面への窒素の化学吸着によって TiN クラスターが生成され、これらが転位のピン止め効果によって grain subdivision を促進することで超微細な TiN ドメインが作られると考えた。こうして作られた TiN ドメインが周辺組織とともに摩耗粉として脱離し、振動圧縮負荷によって細分化されながら試料表層に堆積していくことで、窒化層が形成されるという一連のプロセスを提唱した。

第 4 章では、3 章で提唱した窒化層の形成プロセスを検証するために、大気環境、真空環境、ヘリウムガス環境下で純チタンに SCP を施した。元素分析の結果、大気環境では試料表層に酸素が取り込まれることが明らかになった。各試料の微視組織を比較することで、酸素や窒素が試料内部に取り込まれる場合に、数 nm レベルまでの結晶組織が微細化されることを示した。

第 5 章では、結晶構造が異なる β 単相チタン合金に SCP による常温窒化が適用可能かを検証するために、Ti-18Mo 合金に対して窒素環境下で SCP を施した。結晶構造解析の結果、Ti-18Mo 合金についても常温窒化が可能であることを明らかにした。

第 6 章では、気体元素の導入に伴う SCP 表面改質が鉄鋼材料にも適用できるのかを確かめるために、S25C に対して様々な条件で SCP を施した結果を示した。改質部への分析によって、S25C についても SCP によって常温で窒化物層や酸化物層の形成が可能であることを明らかにした。また、SCP による金属化合物層の形成には一定以上の負荷繰返し数と負荷周波数が必要であることを明らかにした。

これを要するに、本研究は、scanning cyclic press(SCP) による常温窒化現象の実証とそのメカニズム解明を通して、新しい表面改質技術を確立するための基礎を築いた。本成果は従来の窒化処理技術が抱えていた熱劣化を解決しうる表面改質技術の確立につながるため、機械材料学の発展に貢献するところが大なるものである。よって、著者は北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。