

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03837

研究課題名（和文）レーザーピーニングを援用したナノコーティング膜の創成とトライボ性能の評価

研究課題名（英文）Development of nano-coating film using laser peening and evaluation of tribo performance

研究代表者

藤井 正浩（Fujii, Masahiro）

岡山大学・環境生命自然科学学域・教授

研究者番号：80209014

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：動力伝達機械要素の動力損失を低減するためには、さまざまな表面コーティングや表面テクスチャリングが試みられている。しかし、特に歯車のような高負荷・高滑り条件下で使用されるトライボ機素において、これらの方法が長期間にわたって動力損失低減効果を発揮することは難しい。本研究では、レーザーピーニングを用いてトライボ機素表面にディンプルを形成し、同時に低摩擦が期待できるグラファイト粒子を強固に付着させることで、総合的に低摩擦な表面を創成することができた。また、レーザーピーニングによって形成されるテクスチャの効果が得られる滑り転がり接触条件下での負荷条件を検討し、テクスチャ形状の最適化についての指針を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年ますます要求が高まっている機械システムの小型化・省力化のためには、それぞれのトライボ機素の表面耐久性の格段の向上と動力損失の低減が必須であり、その実現には従来技術を凌駕する技術の開発が求められる。本研究では、レーザーピーニングを援用してトライボ機素の表面強度向上に加えて、表面テクスチャの形成と低摩擦粒子の付着を同時に行い、表面強さと表面潤滑性の両者を向上させ得る表面創成技術の基礎となる成果を得た。

研究成果の概要（英文）：To reduce power loss in power transmission mechanical elements, various surface coatings and surface texturing methods have been attempted. However, it is difficult for these methods to maintain power loss reduction effects over a long period, especially in tribological elements used under high load and high sliding conditions, such as gears. In this study, dimples were formed on the surface of tribological elements using laser peening, and graphite particles, which are expected to reduce friction, were firmly attached simultaneously. This created an overall low-friction surface. Additionally, the load conditions under which the texture formed by laser peening would be effective in sliding rolling contact conditions were investigated, and guidelines for optimizing the texture shape were presented.

研究分野：機械要素設計・トライボロジー

キーワード：表面改質 レーザーピーニング テクスチャー グラファイト 機械要素 トライボロジー 摩擦

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

トライボ表面にテクスチャを形成し、低摩擦化を図る研究は、滑り接触条件下での基礎的な試験を中心に数多く行われ、テクスチャの凹部へのオイル溜まりによる潤滑性向上や凹部への摩擦消耗のトラップの効果、さらにディンプルによる潤滑膜形成メカニズムが明らかになりつつあるが、高負荷での滑り転がり接触条件下では十分な検討は行われていない。トライボ表面の微細なテクスチャは、高面圧や高滑りの条件では、所謂なじみに伴い消失することがあるが、その場合でも摩擦低減や耐焼付き性向上の効果が得られる場合があり、基礎試験での結果だけでは十分な説明ができない。すなわち、テクスチャリングの効果として、形状そのものの効果のみでなく、運転に伴いトライボ表面に効率的に低摩擦面を創成することが考えられ、創成面の形成メカニズムを解明することが、歯車のような高負荷・高滑り条件下で用いられるトライボ機素への応用では重要といえる。

一方、固体潤滑剤やナノカーボン材料などの摩擦低減を期待できる微細粒子を潤滑油や水に分散することで、摩擦低減や耐焼付き性向上が図られている。ここでは、接触の負荷と滑りによる、所謂トライボケミカル反応により、固体潤滑剤やナノカーボン材料が接触表面に移着膜あるいは反応膜を形成し、低摩擦が発現するとされている。しかし、幅広い負荷や速度範囲で運転されるトライボ機素では、必ずしもトライボ反応膜を形成することができない場合もあって、固体潤滑剤やナノカーボン材料などの効果が疑問視されている。

本研究では、レーザピーニングを援用してトライボ機素表面にナノ潤滑剤を強固にコーティングすることを目指す。レーザピーニングを研削面に施した場合、ピーニング前後の表面粗さの変化はわずかで、且つディンプルを形成でき、ショットピーニングなどで問題になる盛り(凸部)を形成することなく、圧縮残留応力の付与と表面硬度向上が可能である。歯車などのトライボ機素表面では表面粗さが大きくなることや盛り(凸部)の形成が潤滑性の悪化に繋がるため、レーザピーニングはトライボ機素表面のテクスチャ形成にも有効な方法である。本研究では、レーザピーニングの際の高い圧力を利用して、微細粒子をトライボ機素表面に強固に付着させる。微細粒子として、ナノカーボン材料を用いれば、摺動によるトライボケミカル反応で生成される低摩擦の反応膜と同様の効果が期待できる。この方法は、レーザアブレーションを利用する従来の方法とは異なり、微細粒子およびトライボ機素表面の溶融再凝固がなく、表面に引張残留応力が生じないため、表面の疲れ耐久性にも悪影響がない。

2. 研究の目的

レーザピーニングの第一の応用目的は、表面の耐久性、すなわち疲労寿命の向上であるが、ピーニングと同時に表面プロファイルのコントロールを同時にできれば、転動疲労寿命の向上のみならず、耐焼付き性(潤滑性)の向上も可能となり、総合的に高強度なトライボ表面の創成が可能となる。本研究では、レーザピーニングにより、トライボ機素表面の表面耐久性を上げつつ、適切なテクスチャを付与すると同時に低摩擦を期待できるカーボンを強固に付着できる表面改質法を開発し、運転初期から低摩擦であり、かつ長期の運転でも低摩擦を維持できるトライボ機素表面を創成することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究で用いたレーザは Nd: YAG(Yttrium Aluminum Garnet) Q-Switched Laser で波長 1064nm、パルス幅 6ns、パルスエネルギー 500mJ とした。レーザピーニングの際に表面が溶融すると引張の残留応力が付与されたり、表面粗さが増大したりするため、表面の溶融を防止するためにアルミニウム箔などの保護層が用いられるのが一般的である。本研究ではグラファイトそのものを保護層として用いることを試みた。試験片は、焼入れ焼き戻し後、研削仕上げした HV800、0.005 μ mRa の SUS440C 製のディスクとし、グラファイトをスプレーすることでグラファイトの層を設けた。スプレーしたグラファイト粒子は約 1~2 μ m である。グラファイトの吹きかけ回数を変えることでグラファイト層の膜厚を 2~20 μ m の範囲で変えた。

4. 研究成果

(1) 保護層としてのグラファイトの役割

レーザピーニング前のグラファイト層には、乾燥に伴う微細な亀裂が生じ、そのき裂部の膜厚は小さい。図 1 はスプレーしたグラファイト層の様相を、図 2 はグラファイト層の膜厚とき裂部の膜厚の関係を示す。膜厚が薄いほど亀裂部の膜厚が薄く、膜厚がおよそ 5 μ m 未満では、き裂部の膜厚はグラファイトの粒子径 2 μ m より小さい。後述するように、本試験では膜厚 5 μ m 以上であればレーザピーニングの保護層としての役割を果たした。

レーザを照射した後のグラファイト層の表面写真と断面曲線を図 3 に示す。表面はアセトン中で 10 分間超音波洗浄を行った後十分にふき取っており、レーザピーニングによって基材に強く付着したグラファイトのみを示している。レーザピーニング前のグラファイト層の膜厚が 2.3 μ m のものでは、き裂様の形状で溶融した後が見られ、その部分は大きく荒れている。一方、グラファイト層の膜厚が 6.8 および 13.0 μ m では荒れている箇所が見られず、試験片表面が保護できている。また、強固に付着している黒い斑点上の部分は、ラマン分光分析によりグラファイトであることが確認できた。

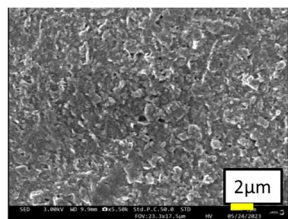


Fig.1 Overview of graphite film

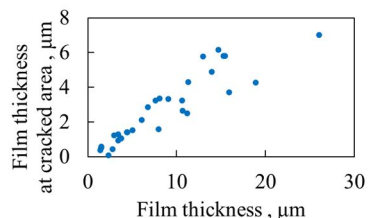


Fig. 2 Relationship between film thickness and film thickness at cracked area

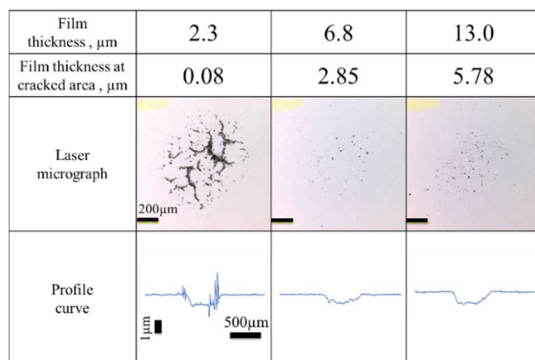


Fig.3 Micrograph and profile curve of specimen after laser peening

(2) グラファイトの付着とディンプル

図4にグラファイトの付着量を示す。グラファイトの付着面積は、レーザピーニング前のグラファイト層の膜厚によらず約 0.02mm^2 であった。

図5にグラファイト層の膜厚とレーザ照射後のディンプルの深さと直径の関係を示す。グラファイト層の膜厚はディンプルの深さや直径にほとんど影響を及ぼしておらず、ディンプルの深さは約 $1\mu\text{m}$ 、直径は約 $600\mu\text{m}$ であった。

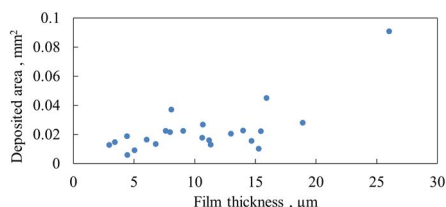


Fig. 4 Relationship between deposited area and film thickness

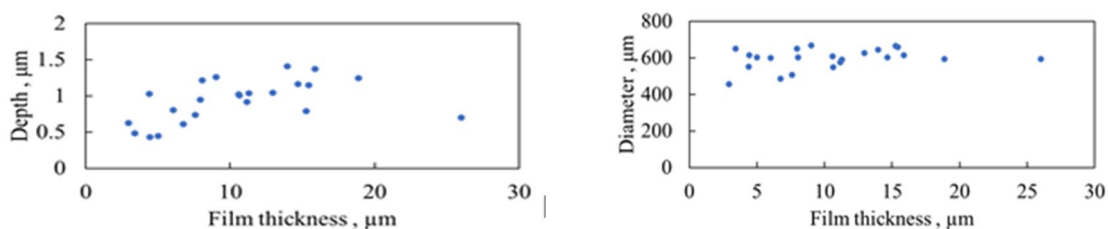


Fig.5 Relationship between dimple depth, diameter and film thickness

(3) すべり転がり接触条件下での摩擦

すべり転がり接触下での摩擦を評価するため、円周方向に仕上げ研削した SUJ2 鋼のローラにレーザピーニングによりディンプルを形成した。ディンプルの深さを一定として、ディンプルの間隔を変えてテクスチャを形成した。レーザピーニングのスポット径は約 $800\mu\text{m}$ とし、スポット径とディンプルの間隔の比であるディンプル面積率を 50%、および 100% の試験片を作製した。図6は、レーザピーニングを施した試験片 LP-50-a (ディンプル面積率 50%) と LP-100-a (ディンプル面積率 100%) の様相を示す。

図7に、すべり率 30% における LP の摩擦係数を示す。540N で摩擦係数はほとんど差がなかったが、2220N では LP-100-a の摩擦係数が小さく、さらに高荷重の 2700N、3180N においては LP-50-a の摩擦係数が LP-100-a と同程度にまで下がり、負荷によりテクスチャが摩擦係数に及ぼ

す影響が異なった。

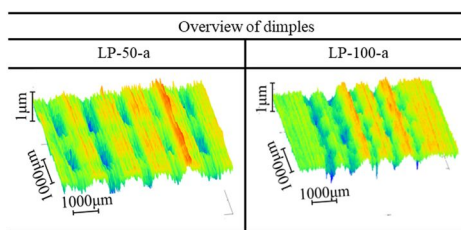


Fig.6 Overview of dimples in LP-50-a and LP-100-a

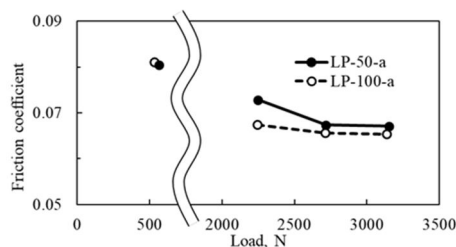


Fig.7 Friction coefficient at a specific sliding of 30%

図8に、各LP試験片のディンプル直径および試験荷重と円周方向の接触幅(ヘルツ接触の幅)の関係を示す。2220N 荷重時の接触幅 $750\ \mu\text{m}$ に対して、LP-50-a のディンプル直径の平均はその接触幅より大きく、一方、LP-100-a は接触幅より小さい。2700N および 3180N 荷重時には、いずれの LP でも接触幅に対して直径が小さいディンプルが大半を占めている。すなわち、ディンプル直径より円周方向の接触幅が大きい場合には、ディンプルによる油溜り効果が表れ、摩擦係数が低減したと考えられ、荷重に応じてディンプル径をコントロールすることが低摩擦に有効である。

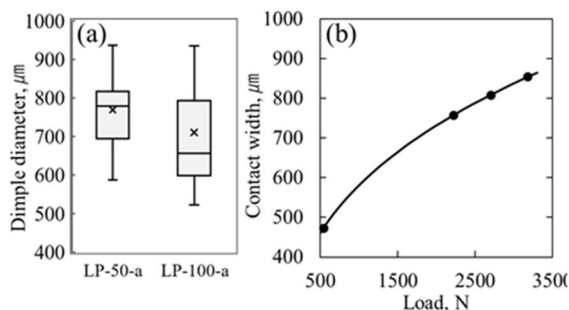


Fig.8 Relationship between normal load and (a) Dimple diameter of LP specimen and (b) circumferential contact width

(4) すべり転がり接触条件下でのスカuffing

高速側ローラのすべり率 60% で、初期荷重 540N から荷重増加幅を 120N/step で増加させるステップロード法でスカuffing試験を行った。各荷重段階の運転時間は 600s とした。図9にスカuffing OK 荷重を、図10にスカuffing発生直前の表面温度を示す。LP-50-b はNP よりも早期にスカuffingが発生し、一方、LP-100-b は最大荷重の 3420N に至ってもスカuffingが発生しなかった。図9に示すようにスカuffing OK 荷重は異なるものの、総じてLP ではNP よりも高い温度までスカuffingは発生しておらず、レーザピーニングにより形成されたテクスチャの低摩擦の効果が伺える。

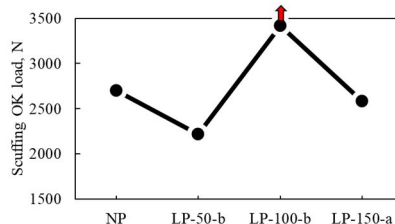


Fig.9 Scuffing OK load

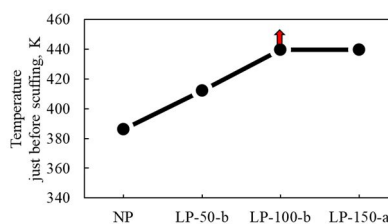


Fig.10 Temperature just before scuffing

レーザピーニングによりディンプルの形成とグラファイトの付着を同時に行うことを目的に、保護層としてスプレーしたグラファイト層を用いて検討した。その結果、本研究のレーザ条件では、 $5\ \mu\text{m}$ 以上のグラファイト層を設ければ、レーザピーニングの保護層としての役割を果たした。また、ディンプルの形成と同時にグラファイト粒子が付着でき、低摩擦表面が得られることが示唆された。また、レーザピーニングによって形成されたディンプルが潤滑性向上による摩擦低減や耐スカuffing性に及ぼす影響をすべり転がり接触下で検討した結果、ディンプル直径より円周方向の接触幅が大きい場合には、ディンプルの効果により摩擦係数が低減し、耐スカuffing性が良好となるテクスチャの指針が得られた。すなわち、ディンプル内の接触が生じるような比較的軽荷重では付着したグラファイトによる摩擦低減が、また、ディンプル内の接触がほとんどない高荷重ではディンプルそのものの効果による摩擦低減が得られる表面創成が期待できる結果が得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山縣充紀, 大宮祐也, 塩田忠, 藤井正浩
2. 発表標題 レーザピーニングを用いた表面テクスチャが潤滑性と耐スカuffing性に及ぼす影響
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部第62期総会・講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 真鍋泰史, 塩田忠, 藤井正浩
2. 発表標題 グラファイト保護層を用いたレーザピーニングの表面性状
3. 学会等名 日本設計工学会中国支部講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 藤井 一輝、藤井 正浩、栗原 拓也、一宮 克行
2. 発表標題 浸炭硬化鋼ローラの面圧疲労強度に及ぼす ピーニングで付与した圧縮残留応力の影響
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
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
---------------------------	-----------------------	----

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