

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06120

研究課題名(和文) レーザー改質による耐久性と潤滑性を両立させる接触表面の創成

研究課題名(英文) Creation of contact surface that achieves both durability and lubricity by laser-assisted modification

研究代表者

藤井 正浩 (FUJII, Masahiro)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：80209014

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：ショットレスでトライボ機素表面に、表面粗さの上昇を抑えつつ圧縮残留応力の付与ならびに表面硬度の向上を実現するレーザーピーニングを利用し、ピーニングと同時に表面形状を制御することで潤滑性にも優れた表面を創成することを目的とした、YAG レーザ発振器を用い、電動ステージとレーザー発振を同期制御するピーニング装置を製作し、高強度トライボ機素を想定した試験片を用いて表面耐久性へレーザーピーニングの効果を調べた。また、レーザーピーニングにより表面にディンプル形状のテクスチャを施し、ピーニング条件ならびにピーニングパターンと摩擦特性の関係を調べ、耐久性と潤滑性の向上を両立する表面創成技術の基礎となる成果を得た。

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、トライボ機素ひとつひとつ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ブレークスルー技術の開発が求められている。本研究では、トライボ機素の表面強度向上にレーザーピーニングを適用し、同時に表面潤滑性を向上させるために必要な事項を明らかにし、耐久性向上と潤滑性向上を両立す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)：A laser peening without shots could achieve compressive residual stress and increase in surface hardness while suppressing increase in surface roughness on the tribo-element surface. The purpose of this study was to create an excellent surface with high durability and high lubricity with the same surface modification. Using a YAG laser oscillator, a peening device that synchronously controlled the motorized stages and the laser oscillation was manufactured, and the effect of laser peening on the surface durability was investigated using a test specimen assuming a high strength tribo-element. In addition, the surface was dimple-shaped by laser peening, and the influence of the peening condition and the peening pattern on the frictional characteristics was investigated. Then the results were found to be the basis of the surface creation technology that achieves both improved durability and lubricity.

研究分野：機械要素設計・トライボロジー

キーワード：機械要素 トライボロジー 表面改質 ピーニング レーザー 転がり疲れ テクスチャ 摩擦

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ショットピーニングは、無数の高硬度の鋼球などのメディアを高速で金属表面に衝突させることで、塑性変形による加工硬化ならびに圧縮残留応力の付与を図る表面改質処理である。この方法は高強度が期待される歯車では広く用いられており、曲げ疲労損傷に対しては効果が高い。一方、硬質メディアの衝突により表面粗さが概して大きくなるため、適切な条件を選ばなければ選んで面圧疲労強度が低下する。本研究で取り上げるレーザーピーニングはショットレスピーニングの一種で、固体の直接接触がないピーニング法であるため、表面粗さを大きくすることなく、圧縮残留応力の付与と表面硬度向上が期待できる。レーザーピーニングは、原子力プラントの材料の応力腐食割れを抑制する目的を中心に適用されているが、複雑な応力場で運転されるトライボ機素の接触表面への適用はほとんど進んでいない。しかし、レーザー技術の開発により適用障壁が低くなっており、比較的小規模の設備でもレーザーピーニングが可能な環境が整いつつある。このため、近い将来にトライボ機素への適用が進められることが予想される。

トライボ機素の摩擦低減のための表面テクスチャが注目されており、種々の方法によるテクスチャリング法が提案され、それによる摩擦制御が検討されている。高速回転(高周速)で運転される航空機や大型減速機の歯車装置では、転動疲労強さの向上に加えて耐焼付き性の向上も求められ、種々の表面テクスチャリングによる耐焼付き性(潤滑性)の良好な表面創成が求められる。レーザーを用いた微細加工によるマイクロテクスチャリングやショットピーニングを用いたテクスチャリングなどが試みられているが、程度の差はあっても凹形状のエッジ部に凸形状(盛り上がり)が形成されるため除去加工が必要である。レーザーピーニングでは凸部の形成がないため、後加工が不要であり、転動疲労強さ向上と潤滑性の向上を両立させる総合的に高強度のトライボ表面を創成することが期待される。

2. 研究の目的

本研究は比較的低出力のレーザー装置によるレーザーピーニングにより、ショットレスでトライボ表面に高耐久性を持たせると同時に表面テクスチャを制御して、転動疲労強さ向上と潤滑性の向上を両立させるトライボ表面を創成することを目的とした。

3. 研究の方法

YAG レーザ発振器を用いたレーザーピーニング装置を製作し、JIS SCM420H 製、ガス浸炭・焼入れ焼戻しを行った試験ディスクにピーニング処理し、レーザーピーニングにより得られる圧縮残留力、硬さ、表面粗さ等の表面性状の評価を行うとともに、ヘルツの最大圧力 $p_{\max}=5.0\text{GPa}$ および $p_{\max}=4.5\text{GPa}$ の高負荷条件での転動疲労試験により表面耐久性を調べた。また、レーザーピーニングでディンプルの間隔およびディンプルの深さの異なるテクスチャリングを付与し、しゅう動試験によって摩擦係数を調べた。その結果に基づき、転動疲労強さと潤滑性を向上させる接触表面創成技術の開発を進めた。

4. 研究成果

(1) ディンプル形成

ディスク試験片の表面に1~5パルスのレーザーを重ねて同箇所照射し、その形状を観察した結果を図1に示す。1パルスで約 $0.6\mu\text{m}$ 、5パルスで約 $1.3\mu\text{m}$ の深さのディンプルが形成できた。同一箇所にピーニングを重ねているが、水面の揺れなどの影響によって照射箇所が微妙にずれたため、ディンプルの直径はパルス数が増えるとき少しずつ大きくなった。表面は塑性変形によって下に凸の変形となっており、ショットピーニングなどで生じるようなディンプル周辺の盛り上がりは見られず、摩擦の低減に有利な表面であることが示唆された。

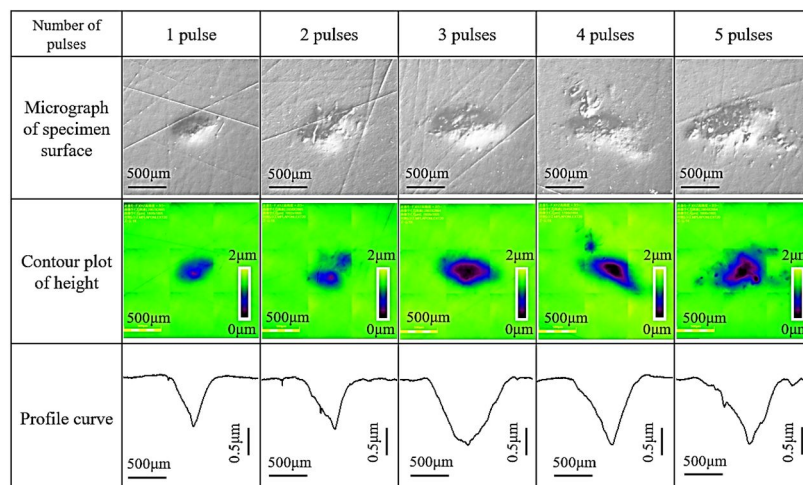


Fig.1 Specimen surface after laser irradiation

(2) 表面形状と表面粗さ

トライボ機素を想定して、一定の範囲にピーニングしたときの表面を図2に示す。隣り合うスポットのオーバーラップを直径の30%とした。同一か所にレーザーパルスが照射された回数をピーニング回数と定義している。ピーニング前(NP), 10回および15回ピーニング後(LP)のディスク表面を比較してもピーニングによる明らかな凹部は観察されず、ピーニングによる粗さの上昇が抑えられた。

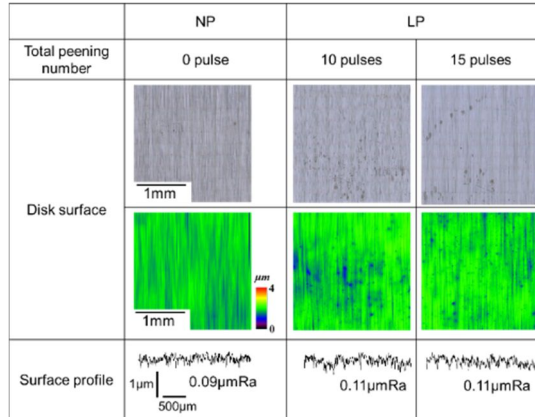


Fig.2 Surface observations of test specimens

(3) 残留応力と表面硬度

図3にピーニング回数と試験ディスク表面の残留応力の関係を示す。ピーニング回数の増加とともに試験ディスク表面の圧縮残留応力も増大しており、最大で-900MPa~-1000MPaの残留応力が得られた。図4は深さ方向の残留応力分布を示す。ピーニングにより表面から深さ300μm程度まで圧縮残留応力が付与できた。ピーニング前後の硬さ分布も測定したが、表面および深さ方向の硬さの変化はほとんどみられなかった。

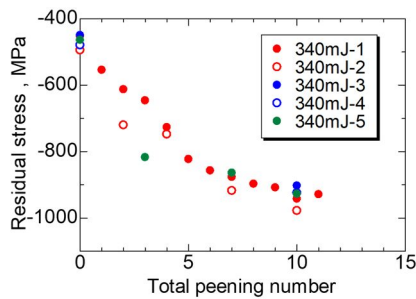


Fig.3 Surface residual stress

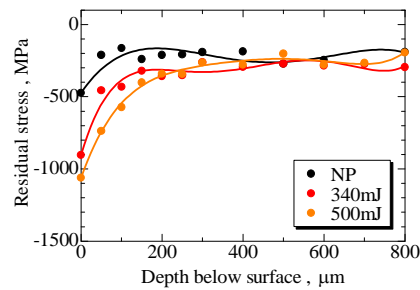


Fig.4 Residual stress distribution

(4) 摩擦

図5はすべり距離500mmのしゅう動試験における摩擦係数を示す。縦軸は摩擦係数、横軸はテクスチャリング条件を示し、縦棒は各条件での平均摩擦係数を示している。エラーバーは500mmしゅう動する間の摩擦係数の変動幅の最大値と最小値を示す。Nは未処理を示す。p (pulses) の前の数字が同箇所へのレーザーの照射回数、pの後の数字はディンプルの間隔 (mm) を示す。レーザーピーニングでテクスチャリングを付与すると潤滑性が向上し摩擦係数が低い。テクスチャリングの条件による摩擦係数の差は小さいが、ディンプルの深い場合で効果が大きかった。

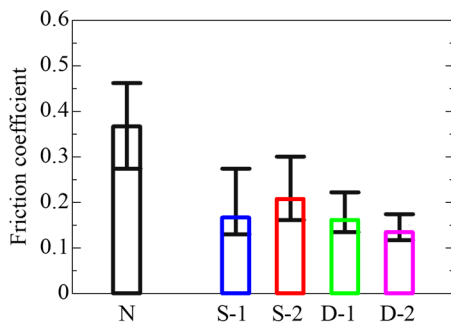


Fig.5 Average friction coefficient

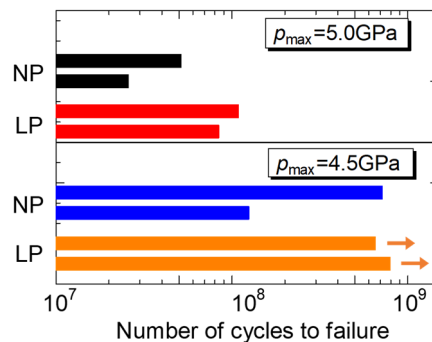


Fig.6 Rolling contact fatigue life

(5) 耐久性

転走面に損傷が発生して試験機が停止するまでの繰返し数を図 6 に示す。レーザピーニングにより転動疲労寿命は向上した。とくに $p_{max}=4.5\text{GPa}$ では 10^9 近くの繰返し数まで損傷が生じていない。損傷は主として表面き裂発生に起因するピッチング損傷であったが、図 7 の損傷部の断面曲線を見ると、未処理の NP に比べてレーザピーニングした LP では損傷深さが小さい。測定した残留応力を考慮して表面下の最大せん断応力 τ_{max} および直交せん断応力 τ_{yz} を用いて硬さで除した比の振幅の深さ方向の分布を図 8 に示す。残留応力の影響のある $A(\tau_{max}/HV)$ では、最大となる深さが表面近傍に近づき、また、より大きな圧縮残留応力を付与された LP では最大値が小さい。ピーニングによって付与された残留応力により、表面き裂の発生を抑制されるとともに、表面下のせん断応力が緩和され、寿命が向上している。

図 9 は、 $p_{max}=4.5\text{GPa}$ の転がり疲労過程中的転走部の深さの変化を示す。繰返し数の増大に伴い塑性変形および一部の摩耗により深さが大きくなるが、LP では 10^7 以降ほとんど変化していない。転走部の幅も同様の結果を示しており、レーザピーニングによる表面耐久性向上の要因であることが示唆された。

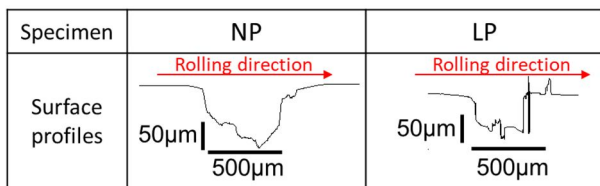


Fig.7 Surface profiles of the damage parts

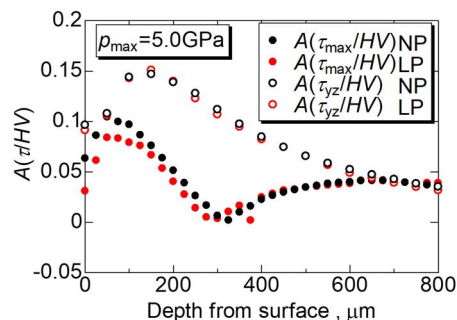


Fig.8 Distributions of $A(\tau/HV)$

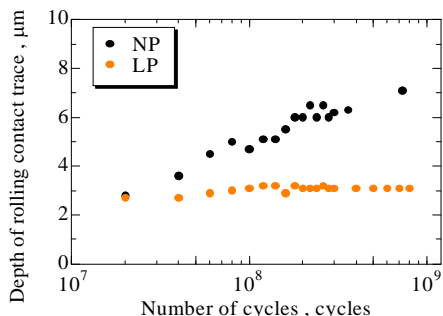


Fig.9 Depth of rolling contact trace

なお、高エネルギーで表面下の深い位置まで圧縮残留応力を付与した場合、転がり疲れ過程に表面下の深い位置で圧縮残留応力が引張側に緩和されることで、ピーニングを施すことで転がり疲れ寿命が低下することがあり、その損傷形態は表面下深い位置のき裂発生に伴う大規模な離損傷である、スポーリング損傷であった。転動疲労の場合、レーザピーニングにおいても適切な強度と圧縮残留応力の付与範囲があることが示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yuya Omiya, Masahiro Fujii, Ryo Ochiai, Koshi Ishimoto, Akihiro Ueda	4. 巻 8
2. 論文標題 Influence of Surface Properties Modified with Fine Shot Peening on Scuffing	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology	6. 最初と最後の頁 58-69
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4236/jsemat.2018.83006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Koku Ishida, Masahiro Fujii, Jun Hwi Cho, Kevin Pittel	4. 巻 2018-01
2. 論文標題 Effects of the Metal Surface Profile to the Sliding properties between Rubber and Metal and Applying that to Wheel Bearing Seals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 SAE Technical Paper	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

1. 著者名 Y Omiya, M Fujii, H Sekishita, K Ishimoto, A Ueda	4. 巻 2355
2. 論文標題 Effect of Surface Characterization Induced by Fine Shot Peening on Scuffing of Steel Roller	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 VDI-Berichte	6. 最初と最後の頁 37-46
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 羽原祐也 藤井正浩 影山大恩 野際公宏 三津石大貴 山西 利幸
2. 発表標題 滑り転がり接触機械要素の表面性状に及ぼすレーザーピーニングの影響
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部第56期総会・講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹野清太郎 藤井正浩 森口秀樹 石塚浩 藤井慎也
2. 発表標題 DLCコーティングした歯車の剥離挙動と面圧強度
3. 学会等名 日本トライボロジー学会2017秋 高松
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮明直輝 藤井正浩 石田浩規
2. 発表標題 硬度の異なるNBRを用いた油潤滑下における摩擦特性
3. 学会等名 日本トライボロジー学会2017秋 高松
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 河淵紗英子, 影山大恩, 大宮祐也, 藤井正浩
2. 発表標題 レーザーピーニングによる表面テクスチャリングに関する研究
3. 学会等名 日本設計工学会中国支部講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 影山大恩, 河淵紗英子, 塩田 忠, 大宮祐也, 藤井正浩
2. 発表標題 レーザーピーニングが浸炭硬化鋼の転動疲労寿命に及ぼす影響
3. 学会等名 日本機械学会中国支部第58期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤井正浩, 栗原拓也, 一宮克行
2. 発表標題 ピーニングで付与した圧縮残留応力分布が浸炭硬化鋼ローラの転がり疲れに及ぼす影響
3. 学会等名 日本機械学会中国支部第58期総会・講演会
4. 発表年 2020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