

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360077

研究課題名(和文) マルチスケールレーザーテクスチャリングによる摺動特性向上に関する研究

研究課題名(英文) Improvement of tribological properties by multi-scale laser surface texturing.

研究代表者

佐々木 信也(sasaki, shinya)

東京理科大学・工学部・教授

研究者番号：40357124

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円、(間接経費) 3,990,000円

研究成果の概要(和文)：摩擦損失の低減を図るための革新的な表面テクスチャリング技術を確立することを目的として、マルチスケールテクスチャリングの概念に基づいて表面構造を設計し、これを摺動表面に創製するため、コーティング技術とレーザー微細加工技術とを融合した複合テクスチャリング技術を開発した。そして、テクスチャリング表面のトライボロジー特性改善効果を実験的に検証することにより、数値流体解析(CFD)手法の改良を行った。その結果、鉛フリー青銅の耐焼付性能を大幅に改善するための、表面テクスチャパターンの設計指針となる指標を見出し、実験的にその効果を実証した。

研究成果の概要(英文)：For the purpose of establishing an innovative surface texturing techniques in order to reduce the friction loss of mechanical systems, the concept of the multi-scale surface texturing have been studied by developing a complex texturing technology that combines a laser micro-fabrication and a coating technique. Computer Fluid Dynamics (CFD) analysis has been applied to optimize the texturing pattern on the sliding surface. By verifying the tribological properties of the textured surface experimentally, CFD tools has been modified to improve the simulation accuracy. As a result, in the lubricating system with low viscosity oils, we have succeeded to improve the seizure properties of copper alloy significantly by promoting the transition of the lubrication state from the boundary to the hydrodynamic according to a novel concept of surface texturing.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：トライボロジー テクスチャリング 摩擦 摩耗 表面改質

## 1. 研究開始当初の背景

地球環境問題を背景に、機械システムのエネルギー効率の向上および省エネルギー化技術の一層の推進が期待されている。機械システムにおけるエネルギー損失の多くは摩擦抵抗に起因するエネルギー消費であることから、その低減が重要な課題になっている。機械要素の摩擦抵抗低減には、摩擦係数の低い流体潤滑領域を摩擦の高い境界潤滑領域に拡大することがもっとも有効である。また、完全流体潤滑状態に遷移しない場合でも、流体潤滑領域の拡大は連続する混合潤滑領域における摩擦低減に効果を及ぼすものと考えられる。

このような潤滑表面の摺動状態の改善を目的として、表面テクスチャリング技術はこれまで、多くの研究者らにより様々な研究開発が行われてきた。報告者は窒化ケイ素セラミックス表面に YAG レーザーを用いて数 10 ミクロンオーダーのディンプル加工を施すことにより、水潤滑下における摺動特性の向上に成功した。これは、表面テクスチャにより、流体潤滑領域が軸受特性数の小さい領域まで拡大したためである。摩擦面の観察結果からは、硬い摩耗粒子がディンプルに捕捉されることでなじみ過程における摺動表面の平滑化が円滑に進み、これが摺動特性の改善に大きく寄与したものと考察した。ただし、複数のディンプルの連成による動圧発生効果については説明が及んでいない。

表面テクスチャリングによるトライボロジー特性向上メカニズムとしては、流体動圧発生効果、油溜効果、アプレシブ粒子捕捉効果が主なものと考えられている。しかしながら、テクスチャリングによるトライボロジー特性への影響に関しては、対象とする機械要素の個々の潤滑条件における対処療法的な対策が先行し、系統的な研究はなされていないために基本メカニズムそのものに不明な点も多い。そのため、摩擦損失の低減を目的として、産業界でも様々な機械要素にテクスチャリングを適用する試みが行われているが、それらの手法は試行錯誤の域を出ず、効果そのものははっきりとしていないものが多い。表面テクスチャによる動圧発生効果が期待され、定性的な部分ではその関与も認められているものの、流体解析に基づいた理論的な検証は十分に行われているとは言えず、テクスチャの最適化は実際の実験結果に頼らざるを得ない状況にある。また、加工法によってテクスチャリングの構造やサイズが制限されるため、個別のテクスチャリングに対する性能評価によって摩擦面で起こる現象の一部のみに着目した研究がほとんどであり、トライボロジー現象の全体を俯瞰した上で体系的に設計指針を論じたものは存在しない。

そこで報告者は、摺動材料の表面改質の新しい概念として、マルチスケールテクスチャリングの重要性を提唱した。これは、表面形

状をナノ・マイクロレベルからマクロレベルまでのマルチスケールで捉え、各スケール領域で支配的となる潤滑メカニズムを明らかにし、それぞれのメカニズムに応じた表面構造をシームレスに形成することで必要な機能を発現させるというものである。この概念に基づいて表面テクスチャを設計するためには、マルチスケールテクスチャ表面での流体解析が必要不可欠となる。ただし、この場合、表面の吸着層や電気二重層による粘度や流れ場の変化、キャビテーションによる気泡の発生とその挙動、さらには表面化学反応などの界面ミクロ現象の影響も取り込んだ上でのマクロ効果を高い精度でシミュレーションしなければならない。これには既存の商用解析コードでは対応が困難であるため、独自の数値流体解析 (CFD) コードの開発が必須となる。なお、本研究で開発する解析コードは、 $\mu$ TAS や MEMS などの界面ミクロ現象の影響が無視できない領域での流体解析への適用が期待されることから、学術的な意義も高いものと考えられた。表面テクスチャの創製には、ナノオーダーからミリオーダーまでの構造に応じて様々な加工プロセスが用いられている。しかしながら、各々の加工プロセスは加工単位があるスケール領域に決まっており、マルチスケールで任意の表面テクスチャリングを形成するためには、これら複数の加工プロセスを組み合わせる必要がある。一方で、実際の機械要素において摩擦損失低減を図る上では、製造プロセスの複雑化は生産性やコスト面から好ましくはない。そこで本研究では、ナノ・マイクロオーダーの構造をナノコンポジットコーティングにより表面材料に予め持たせて置き、これにレーザー微細加工によるメソスケールの構造を付与することで、マルチスケールテクスチャリングの概念に基づいて設計された表面構造を創製するためのプロセス技術を開発する。このような材料と加工プロセスとの組み合わせによりマルチスケール構造を形成するという手法は、先端材料の創製プロセスですでに用いられている例もある。しかし、摺動表面への応用ははじめての試みであり、特に摩耗が進行する摺動表面においてマルチスケールテクスチャリング構造を維持するためには、自己修復機能を有するナノコンポジット材料の開発が重要で、ナノ構造や材料の選択に高い独創性が要求される。

## 2. 研究の目的

マルチスケールテクスチャリングの概念を摺動表面に適用するため、新しく開発する数値流体解析 (CFD) コードを用いてテクスチャ表面における潤滑メカニズムを明らかにし、これに基づいて最適設計した表面テクスチャを創製するためにナノコーティングとレーザー微細加工を融合した複合テクスチャリング技術を開発する。これらの一連の研究成果によって、摩擦損失の低減を図る

ための革新的な表面テクスチャリング技術を確立する。

### 3. 研究の方法

摩擦損失の低減を図るための革新的な表面テクスチャリング技術を確立することを目的として、マルチスケールテクスチャリングの概念に基づいて表面構造を設計し、これを摺動表面に創製するため、ナノコーティング技術とレーザー微細加工技術とを融合した複合テクスチャリング技術を開発する。そして、テクスチャリング表面のトライボロジー特性改善効果を実験的に検証することにより、数値流体解析(CFD)技術の高度化を図る。具体的には、

(1) CFD解析：マルチスケールテクスチャリング表面における物理化学現象を取り込んだ流体解析を可能とする3次元数値流体解析(CFD)コードを開発し、表面テクスチャによる流体潤滑領域拡大のメカニズムを明らかにするとともに、実機械部品サイズにおけるテクスチャリング最適化のための設計支援手法を開発する。

(2) 表面テクスチャ創製プロセスの開発：最適設計されたテクスチャリングを摺動表面に創製するため、ナノ・マイクロスケールの構造形成のためのナノコンポジットコーティングを摺動表面に適用し、これにメソスケール構造を付与するためのレーザー微細加工技術を開発する。

(3) テクスチャリング表面の設計技術：テクスチャリング表面の様々な摺動条件下でのトライボロジー特性評価および表面分析結果をもとに、テクスチャリングによるトライボロジー特性向上効果の検証を行い、その結果をテクスチャ設計技術にフィードバックすることにより、機械要素に適用可能な表面テクスチャリング技術を確立する。

### 4. 研究成果

摩擦損失の低減を図るための革新的な表面テクスチャリング技術を確立することを目的として、マルチスケールテクスチャリングの概念に基づいて表面構造を設計し、これを摺動表面に創製するため、コーティング技術とレーザー微細加工技術とを融合した複合テクスチャリング技術を開発した。そして、テクスチャリング表面のトライボロジー特性改善効果を実験的に検証することにより、数値流体解析(CFD)手法の改良を行った。

その結果、鉛フリー青銅の耐焼付性能を大幅に改善するための、表面テクスチャパターンの設計指針となる指標を見出し、実験的にその効果を実証した。具体的な成果は次の通り。

#### (1) CFD解析：

表面テクスチャによる摩擦特性改善効果としては、ディンプル等の付与による動圧発生が大きな要因であると考えられてきた。しかしながら、動圧が発生するには、ディン

ル内でのキャビテーション発生が前提条件となる。これまでの研究では、キャビテーションの発生は起こるものとして解析が行われてきたが、本研究において開発した摩擦面観察装置を用いた結果では、ディンプル内でのキャビテーション発生は確認できなかった。このことから、キャビテーション発生条件をCFD解析によって明らかにすべく解析コードを開発した。キャビテーションの発生メカニズムとしては、液体からの蒸発、あるいは液体中に溶け込んだガスの気化の2通りが考えられるが、ともに想定される摩擦条件下ではキャビテーションは発生しないことが明らかとなり、観察結果を裏付ける結果が得られた。そして、これまでキャビテーションとして観察されたものは、流体中に巻き込まれた気泡が、負圧部で膨張もしくは複数の気泡が滞留部で一体化したものと結論付けた。したがって、表面テクスチャによる摩擦特性改善は、これまでのような単純な動圧発生効果では説明ができず、別の要因を探る必要があると考えた。

その一つが、摩擦面内の圧力勾配の僅かな変化とこれに伴う相対する2平面間の配置への影響である。図1に計算対象とするディンプル形状を、図2に片方向連成による計算フローチャートを示す。

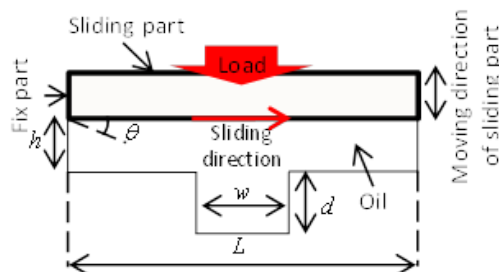


図1 計算対象のディンプル周りの条件

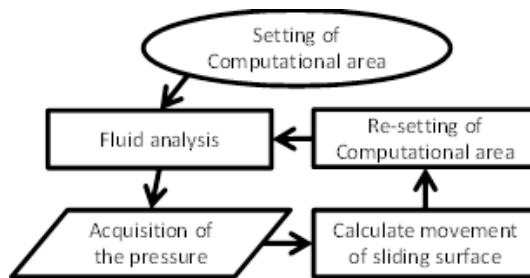


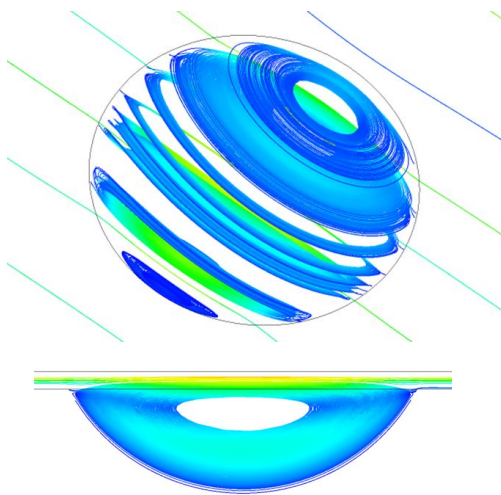
図2 数値解析のフローチャート

計算の結果、ディンプル深さが小さければ膜厚が増加し、良好な摩擦特性が得られると考えられる。また、摺動面に変位が生じたことによって、平行であった平板間に傾きが生じることが確認された。傾きが生じることで、動圧が発生するくさび効果が生じる。迎角が大きければくさび効果の影響が大きくなり、負荷容量が上昇することが確認された。

また、実際のテクスチャ表面は、理想化さ

れた形状でないため、その影響について解析を行った。図3に円柱形状の幾何的なディンプルと実際のレーザー加工ディンプルについて、流線を比較した結果を示す。

(a)幾何的形状



(b)実際の加工形状

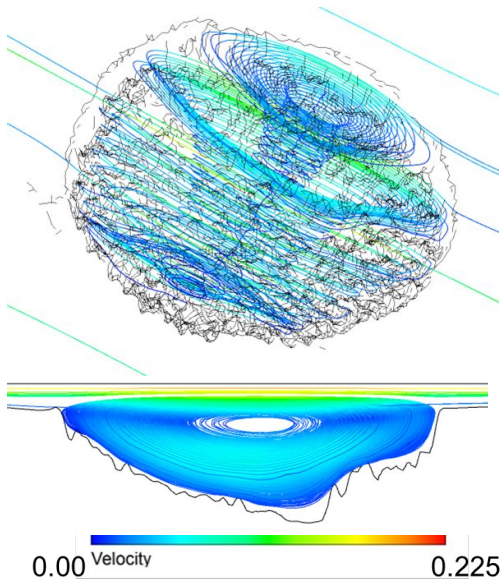


図3 ディンプル内での流線の比較

解析の結果、動圧発生による摩擦係数への影響は実際の複雑形状の場合でもほとんど影響がないことが分かった。一方で、渦や潤滑領域などの流れ場に大きな違いが見られることから、力学効果以外の潤滑メカニズムを考慮する場合には、実形状を用いた解析が必要であると考えられる。なお、様々なテクスチャ形状について解析を行うとともに、複数からなるテクスチャ間の干渉についても検討し、最適形状を検討した。

(2)表面テクスチャ創製プロセス：

ナノ・マイクロスケールの表面構造形成プロセスとして、ナノ積層コーティング、SAM膜、レーザー微細加工、MEMSプロセス(エッチング)、サンドブラスト加工、超精密切削加工等の表面加工プロセスを用い、様々な

テクスチャ表面の作製を行った。中でも、ナノ積層コーティングとレーザー微細加工とを複合したプロセスは、組成分布によるテクスチャの新しい概念を体現したものである。ナノ積層コーティングにはPVD法を用い、2種の金属元素を交互にコーティングすることにより積層膜を作製した。これにメゾスケール構造を付与するためのレーザー微細加工を行った。レーザー微細加工機は、パルスYAGレーザー光(632nm)をガルバノミラーでスキャンして描画するもので、本研究において開発したシステムである。この複合加工プロセス技術を用い、MoとCuの単体膜、Mo/Cuの積層膜(300nm×10層と30nm×100層)を作製し、さらにレーザー微細加工によりディンプル形状を施したサンプルを作製した。図4にモリブデンと銅をそれぞれ膜厚30nm×100層形成した積層膜の断面SEM写真を示す。MoとCuは親和性のない金属同士の組み合わせであるが、積層膜としては、剥離等の問題なく製膜可能であることが確認された。レーザー微細加工により、ディンプル(直径20μm、深さ10μm)を200μm間隔で付与したナノ積層膜表面を図5に示す。

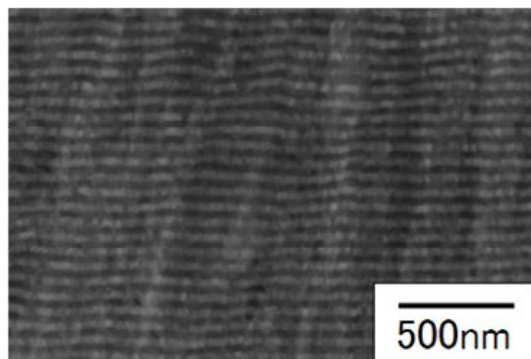


図4 Mo/Cu ナノ積層膜の断面 SEM 像

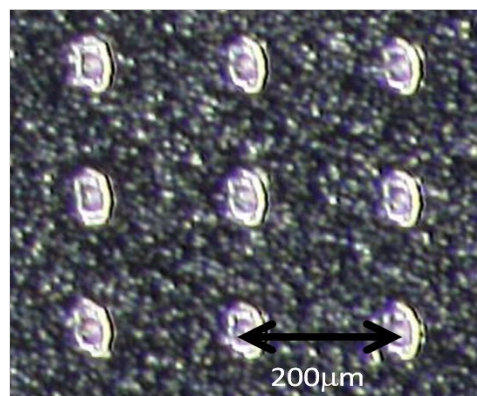


図5 レーザー微細加工によるナノ積層膜へのディンプルの付与

PAO基油やギア油を潤滑油として、作製したサンプルを、往復動摩擦試験機を用いて摩擦特性を調べた。図6にPAO潤滑下における各被膜の摩擦特性を示す。

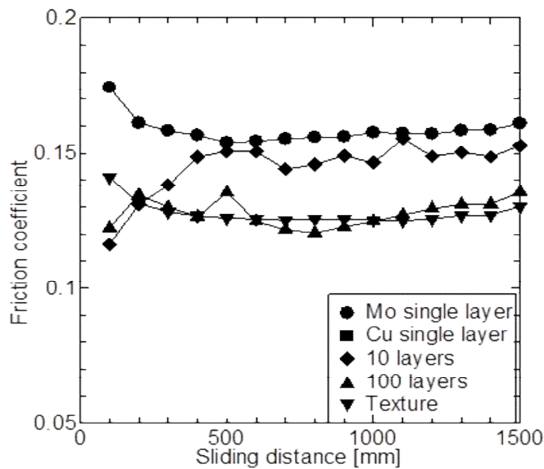


図6 各被膜の摩擦特性

それぞれの単層膜は摩擦係数が高く、Cuは0.4と特段に高い値を示したため、図からは除いてある。膜厚300nmの積層膜でもMoに近い高い摩擦係数を示したが、30nm×100層およびこれにレーザー微細加工を施した被膜は、0.12程度の低い摩擦係数を示した。本摩擦実験条件は、境界潤滑状態での摩擦特性を調べたため、テクスチャ付与による顕著な摩擦低減効果は見られないが、摩擦特性の安定性と耐摩耗性において、向上効果が確認された。

そこで、膜厚が摩擦特性に及ぼす影響を明らかにするため、AFM（原子間力顕微鏡）を用いて、積層膜上の摩擦力および凝着量分布を測定し、組成の違いによるナノテクスチャリングの摩擦特性向上効果を調べた。図3に積層膜(MO/Cu100積層膜)摩擦面のLFM(摩擦力)像を示す。摩擦方向とは垂直方向に摩擦力の違いによる数μm間隔の縞模様が観察された。これはMoとCuのそれぞれの層が表面に現れたためと考えられる。

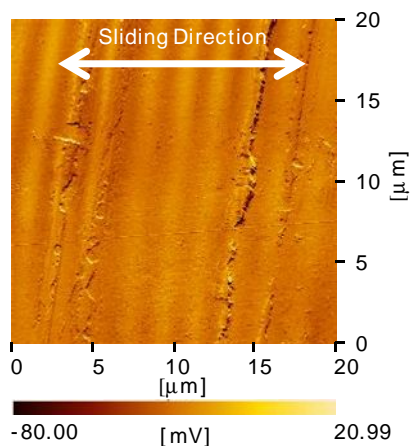


図7 ナノ積層膜摩擦面のLFM像

図5にMoとCuの境界付近を摺動した際の、摩擦挙動を示す。MoのみあるいはCuのみの領域を繰り返し摩擦を行うと、摩擦係数は徐々に増加する傾向を示すが、交互にMoとCu表面を繰り返す場合には、摩擦係数の増加

は見られなかった。これは、短い摩擦距離では十分な凝着が起こらず、また僅かな凝着物が、異種表面では凝着を阻害する働きを示したためと考えられる。すなわち、非凝着性ナノ積層膜の作製に当たっては、摺動表面での組成分布が重要な役割を果たし、その最大間隔は10μm程度であると考察した。

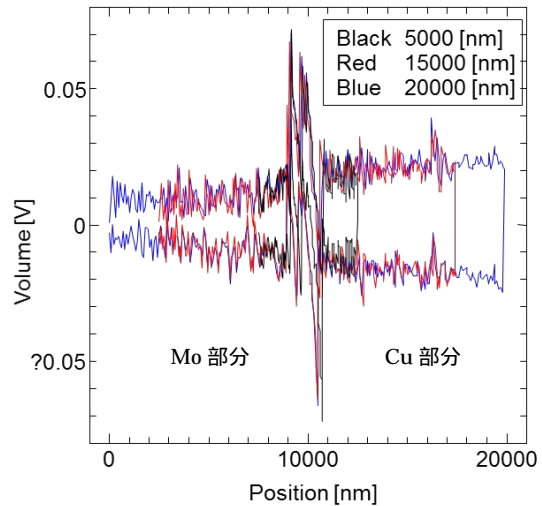


図8 Mo/Cu境界付近の摩擦特性

### (3) テクスチャリング表面の設計技術

実際の機械部品摺動面を模擬し、端面同士を摩擦する表面にテクチャを施すことにより、耐焼付荷重を向上させるための最適パターンを設計した。この場合、テクスチャの役割は摩擦面への潤滑油供給にあるとし、この役割を果たすための最適パターン設計指針を見出した。見出した最適パターンの独創性は、これまでは格子状や円周上にディンプルを配置するところを、回転運動を配慮し、らせん状パターンを考案したところにある。図9に一例を示す。

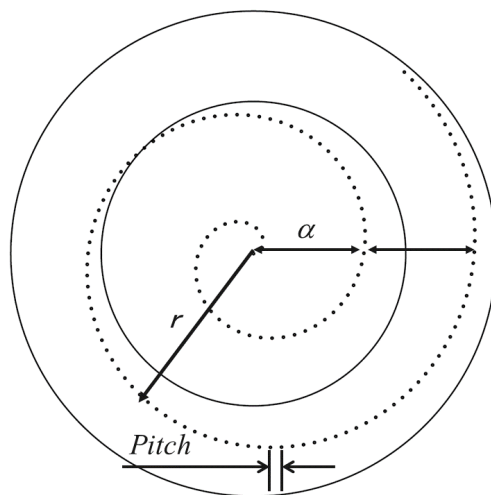


図9 らせん状テクスチャパターン

$$r = \alpha\theta/2\pi, \text{ Pitch} = f\alpha(1 + \theta^2)^{1/2}d\theta$$

はらせん軌道の間隔を示し、ピッチを決め

ることで、らせん上のディンプル数が決まる。また、らせんの本数を決めることで全体のディンプル数と面積率が決定する。この際、あるディンプルから最短距離にあるについて、半径方向に距離を重なり率と定義した。このようなパターン設計指針に則り、面積率を一定として複数のパターンを作製し摺動特性を調べた結果、重なり率が大きくなるパターンにおいて、耐焼付性に大幅な改善効果が確認された。

以上のことから、潤滑状態に応じて、表面テクスチャに求められる役割を明確にし、そのメカニズムを最大限に発揮するためのパターンを設計することが有用であることが示された。

今後は、潤滑状態を分類し、それぞれにおけるテクスチャ効果を発現するための設計指針を体系化することに取り組む。また、本研究では、ナノ積層コーティングやレーザー微細加工技術以外にも、多くの表面加工プロセスを利用したが、これらを複合化することにより、ナノ・マイクロからマクロな特性までをカバーできるマルチスケールテクスチャリング技術の確立を目指す。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 16 件)

- 1) M.Kai, R.Tsuboi, S.Sasaki, A study on in-situ observation of the micro flow of lubricant on the textured surface, *Procedia Engineering*, 68(2014)12-18
- 2) Y.Kuroiwa, A. Amanov, R.Tsuboi, S. Sasaki, S.Kato, Effectiveness of surface texturing for improving the anti-seizure property of copper alloy, *Procedia Engineering*, 68(2014)600-606
- 3) Y. Kuroiwa, A. Amanov, R. Tsuboi, S. Sasaki, S. Kato, Effect of Surface Texturing Arrangement for Improving Anti-Seizure Property of Lead-Free Copper Alloy, *Jurnal Teknologi*, 66, 3 (2014)81-89
- 4) A. Amanov, R. Tsuboi, H. Oe, S. Sasaki, The influence of bulges produced by laser surface texturing on the sliding friction and wear behavior, *Tribol. Int.*, 60 (2013) 216-223
- 5) A. Amanov, S. Sasaki, I.S. Cho, Y. Suzuki, H.J. Kim, D.E. Kim, An investigation of the tribological and nano-scratch behaviors of Fe-Ni-Cr alloy sintered by direct metal laser sintering, *Mater. Des.*, 47 (2013) 386-394
- 6) A. Amanov, T. Watabe, S. Sasaki, The influence of micro-scale dimples and nano-sized grains on the fretting characteristics generated by laser pulses, *J. Nanosci. Nanotech.* 13, 12 (2013) 8176-8183
- 7) 佐々木, “トライボロジー特性改善のための表面テクスチャリング”, *油圧技術*, 52, 3 (2013) 28-33
- 8) 佐々木, “表面テクスチャリングによるトライボロジー特性の改善”, *セラミックス*, 48, 9 (2013) 744-748
- 9) 佐々木, “トライボロジー特性改善のための表面テクスチャリング”, *油圧技術*, 52, 3 (2013) 28-33
- 10) 佐々木, テクスチャリング表面のトライボロジーにおける研究とその動向, *潤滑経済*, 270, 2 (2012) 2-3

〔学会発表〕(計 55 件)

- 1) 古山道生, 坪井涼, 佐々木信也, 摩擦特性向上を目的とした Mo-Cu 系ナノ積層膜の創製とその特性, *トライボロジー会議春*, 2014.5.21(東京)
- 2) 佐々木千明, 坪井涼, 佐々木信也, 超精密切削加工によって形状付与した鋼表面における GPS パラメータと境界潤滑特製との関係について, *トライボロジー会議春*, 2014.5.20(東京)
- 3) 黒岩侑紀, 坪井涼, 佐々木信也, 加藤慎治, ディンプルテクスチャの最適配置に向けた新規パラメータに関する研究, *トライボロジー会議春*, 2014.5.20(東京)
- 4) 長崎博志, 坪井涼, 佐々木信也, FFT 解析に基づく新たなトライボ表面用 GPS パラメータの検討, *トライボロジー会議春*, 2014.5.20(東京)
- 5) Ryo Tsuboi, Yasutsugu Oshima, Akira Nakano, Shinya Sasaki, Investigation of Tribological Properties and Vortex Structures in the Texture by using Computational Fluid Dynamics, *5th World Tribology Congre*, 2013.09.12(トリノ)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

<http://www.rs.tus.ac.jp/tribolab/index.html>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

佐々木信也 (SASAKI, Shinya)

東京理科大学・工学部機械工学科・教授

研究者番号: 40357124

##### (2) 研究分担者

坪井 涼 (TSUBOI, Ryo)

東京理科大学・工学部機械工学科・助教

研究者番号: 90548158

##### (3) 連携研究者

是永敦 (KORENAGA, Atsushi)

(独)産業技術総合研究所・先進製造プロセス

研究部門トライボロジー研究グループ

・研究員

研究者番号: 70344215