

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月24日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02310

研究課題名(和文) バイオミメティクス摺動面アーキテクチャの構築

研究課題名(英文) Biomimetic Surface Architecture for tribology

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、マルチスケール・テクスチャリングの概念をさらに深化させ、表面損傷や摺動環境の変化に自己適応(self-adaptive)する革新的な摺動表面システムを確立することを目標として研究を実施した。生体の皮膚構造を模倣した摺動面アーキテクチャを構築し、数値シミュレーション技術によりその最適化を図るとともに、レーザ焼結型金属用3次元プリンタによる表面創製プロセス技術を応用することにより、3次元微細構造制御により創製した摺動表面の環境適応性能の発現と有用性を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生体皮膚の自己修復機能を模倣し、表面への内部からの物質供給を可能とする自己適用(self-adaptive)表面の創製に取り組んだ。摩擦界面における分子レベルでの吸着構造および化学反応過程と摩擦特性との関係を明らかにするため、動的環境下での新たな分析手法を開発した。また、摺動面アーキテクチャ構築のため、境界・混合潤滑状態の数値解析技術を開発した。さらに、レーザ溶融金属3次元プリンタ技術を機能性表面創製に適用することに成功した。これらの研究成果は、基礎的界面現象の解明に基づく革新的な機能性摺動面を社会実装する上で、学術のみならず産業界へのインパクトも大きく十分に社会的意義のあるものである。

研究成果の概要(英文)：We carried out research aiming to further deepen the concept of multi-scale texturing and establish an innovative sliding surface system that is self-adaptive to surface damage and changes in the sliding environment. A sliding surface architecture imitating the skin structure of a living body is constructed, and its optimization was attempted by numerical simulations, and a three-dimensional microstructure was realized by applying a surface creation process technology by a 3D metal printer. We demonstrated the advantages and usefulness of the environment adaptive performance of the sliding surface and mechanical elements.

研究分野：トライボロジー，機械設計，付加製造技術

キーワード：バイオミメティクス 付加製造技術 トライボロジー 機能性表面 摩擦 自己応答

1. 研究開始当初の背景

摺動表面や機械要素のトライボロジー特性を抜本的に向上させるため、摺動表面の創製に係わる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指摘し、ナノ・マイクロレベルからマクロレベルまでのシームレスな表面構造形成による高機能表面創製に関する研究に取り組んできた。この概念は、ナノからマクロに至るそれぞれのスケールレベルにおいて支配的となるトライボロジー現象を階層的に捉え、それぞれにおいて機能発現に必要なテクスチャを最適化し、これらを統合することによって、トータルでの性能の向上を図るというものである。しかし、実際の摺動表面では、状況によって潤滑状態が変化するとともに、なじみ後に続く安定状態にあってもその表面は変化を免れない。特に混合・境界潤滑状態においてテクスチャリング効果を発現させるためには、予め初期のテクスチャが変化することを織り込んだ設計を行うとともに、表面損傷の進行や摩擦環境の変化に応じ自己適応 (self-adaptive) する機能表面の創製が必要不可欠となる。

構造材料では、結晶構造変化や酸化反応に伴う体積膨張を利用してクラック進展を防止するメカニズムを応用した自己修復材料が実用化されているが、摩耗が進行する摩擦面ではこのようなメカニズムに期待することはできない、また、ナノ積層膜を応用することで初期のナノテクスチャを再生・維持する摺動面の創製を試みたが、表面材料のみに依存した摺動特性改善には限界があり、境界潤滑下での激しい損傷が生じた場合には自己修復機能の発現は期待できない。これらの問題を解決する方法として、生体皮膚の自己修復機能に着目し、これを模倣して表面への内部からの物質供給を可能とする自己適用 (self-adaptive) 表面の創製することを考えた。

このような自己適用表面を実現するためには、経時変化する摺動界面に発現すべき機能に応じて必要な量の分子種を迅速に供給可能とする3次元微細構造が必要になるが、単なる静的な構造ではなく表面化学反応や時間変化も考慮した動的なシステムとして摺動面アーキテクチャを考えなければならない。また、摺動面アーキテクチャの最適化には、境界・混合潤滑下における摺動状態を予測するため、微小接触領域での高精度な変形解析と流体-構造連成解析が必要である。さらに、新しいモノづくり技術として付加製造技術の一つであるレーザ溶融型金属3次元プリンタの展開には大きな期待が寄せられているところであるが、現状ではその利用は形状創製にとどまっており、機能性表面創製プロセスへの適用するための技術開発が必要である。

以上より、表面損傷や摺動環境の変化に自己適応 (self-adaptive) する革新的な摺動表面システムを確立することを目標とし、生体を模倣した摺動面アーキテクチャの基本概念を確立することを目的に、分子レベルでの摩擦メカニズムの解明をもとに、数値シミュレーションによる最適設計とレーザ焼結型金属用3次元造形装置による3次元微細構造表面の創製プロセス技術の開発を通し、軸受要素での自己適応性の発現とその効果を実証する研究を開始した。

2. 研究の目的

地球環境問題を背景に、機械システムの高性能化に加え、摩擦損失低減と耐摩耗性向上によるエネルギー効率ならびに耐久性向上への要求が強まっている。そこで、摺動表面の創製に係わる新しい概念としてマルチスケール・テクスチャリングを提唱し、ナノ・マイクロレベルからマクロレベルまでのシームレスな表面構造形成による高機能表面創製に関する研究に取り組んできた。

本研究ではその概念をさらに深化させ、表面損傷や摺動環境の変化に自己適応 (self-adaptive) する革新的な摺動表面システムを確立することを目的として、生体を模倣した摺動面アーキテクチャの基本概念を確立し、数値シミュレーションによる最適設計とレーザ焼結型金属用3次元造形装置による3次元微細構造表面の創製プロセスの開発を通して自己適応性能の発現を実証する研究を実施した。

3. 研究の方法

マルチスケール・テクスチャリングの概念をさらに深化させ、表面損傷や摺動環境の変化に自己適応(self-adaptive)する革新的な摺動表面システムの実現のため、生体の皮膚構造を模倣した摺動面アーキテクチャを構築し、数値シミュレーション技術によりその最適化を図るとともに、レーザ焼結金属3次元プリンタによる表面創製プロセス技術を応用することによって、3次元微細構造制御した摺動表面の環境適応性能の発現と有用性を実証する課題に取り組んだ。

3. 研究成果

マルチスケール・テクスチャリングの概念をさらに深化させ、表面損傷や環境変化に自己適応(self-adaptive)する革新的な摺動表面システムを確立するため、次の3課題に取り組んだ。

(1) 自己適応性を発現する摺動面アーキテクチャ

自己応答性摺動面の設計にあたり、必要な機能を摩擦面で発現させる基礎メカニズムを解明するため、周波数変調原子間力顕微鏡(FM-AFM)を用い、固液界面における液体分子吸着構造の変化(図1)やトライボ反応膜の形成過程の観察(図2)に成功した。一連の表面分析・計測(SEM-EDX, XPS, TOF-SIMS, AFM, ナノインデンテーション, QCM など)結果をもとに、摩擦界面における潤滑剤分子の吸着構造ならびに反応膜の組成およびそれらの機械的物性がマクロな摩擦挙動に及ぼす影響を解明し、自己応答型摺動表面に供給する目的ごとの潤滑油組成の設計指針を確立した。

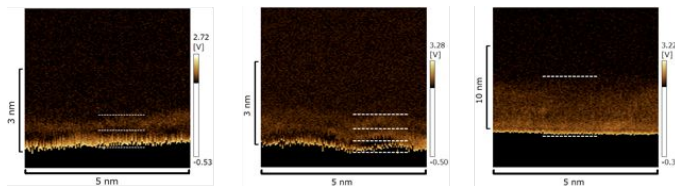


図1 FM-AFMによるステアリン酸添加油中における軸受鋼表面吸着構造の観察
トライボ膜形成過程観察
(a)浸漬7時間後(b)24時間後(c)摺動後

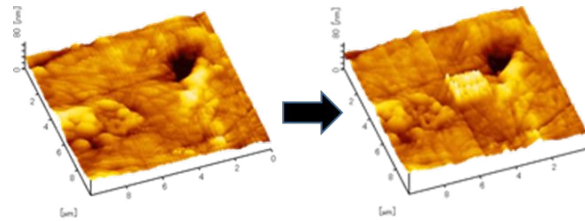


図2 ZDDP添加油中におけるトライボ反応膜形成過程のIn-situ AFM観察

(2) 境界・混合潤滑における摺動特性の数値解析技術

境界・混合滑下における摺動特性を数値解析する上で、3次元微細構造摩擦面の固体接触状態に注目し、潤滑膜を介した真実接触部におけるせん断力を推定するため実験値を活用する独自アルゴリズムの開発し、図3に示すように3次元テクスチャ表面の摩擦挙動における実験値と解析結果の比較により、数値解析手法の高度化を図った。

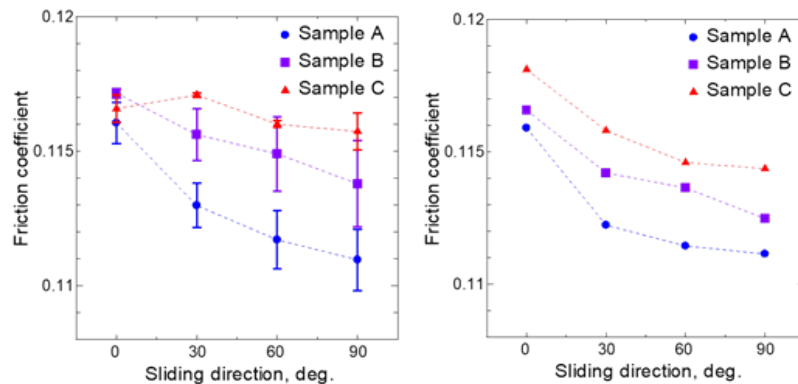


図3 テクスチャ表面の摩擦異方性に関する実験値とシミュレーション結果との比較

(3) レーザ溶融金属 3 次元プリンタによる表面創製プロセス技術

摺動面アーキテクチャに基づき図 4 に示すような 3 次元プリンタにより 3 次元微細構造表面を創製し、摩擦係数の能動制御性を確認した。また、実用に耐える強度と耐摩耗性付与を目的とする熱処理および表面改質を適用し、自己適応性評価試験結果をもとにプロセス条件の改良と最適化を図った。

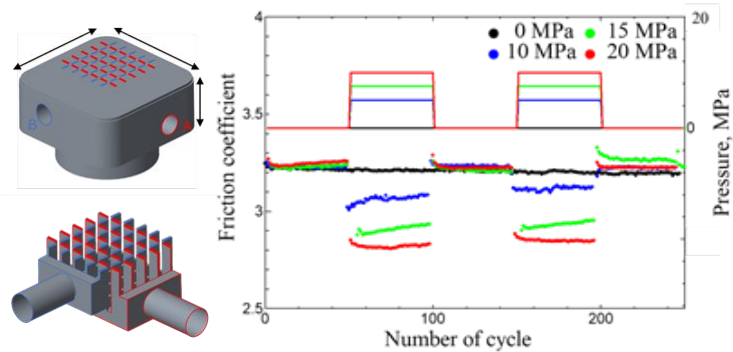


図 4 3 次元微細流路構造を有する摩擦の能動制御

(4) 機械要素への機能性表面の展開とその評価

金属 3 次元プリンタを用い、摺動面アーキテクチャに基づく自己適応性摺動表面や多孔質静圧軸受(図 5, 図 6)を創製し、機能の発現および摺動特性の改善効果を評価・実証(図 7)した。

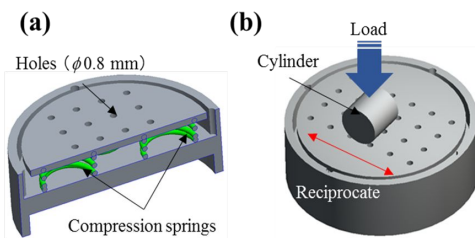


図 5 3 次元微細構造摺動面の創製

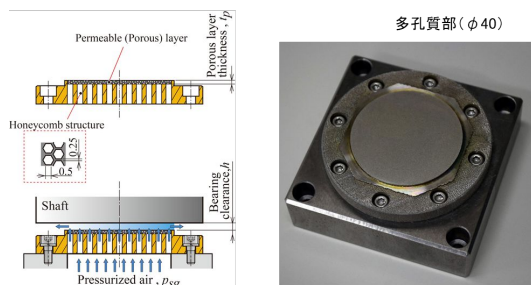


図 6 多孔質静圧軸受の創製

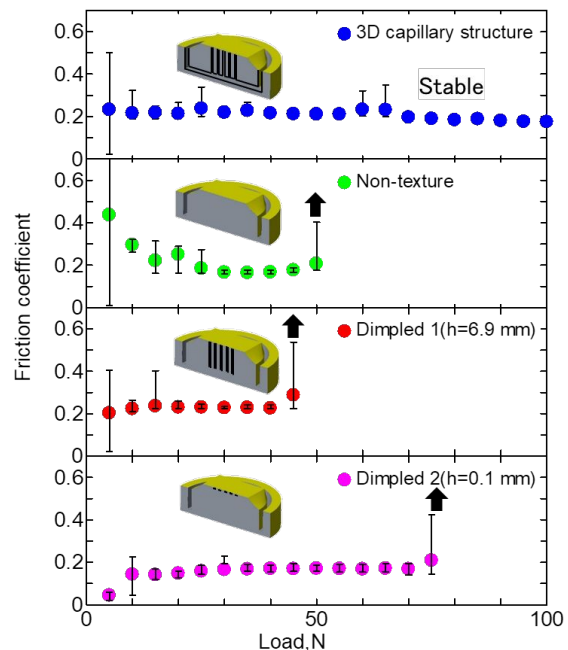


図 7 毛細管現象を利用した自己応答摺動面の摩擦特性

以上より、分子レベルでの摩擦メカニズムを解明することにより生体の皮膚構造を模倣した摺動面アーキテクチャを構築し、数値シミュレーション技術によりその最適化を図るとともに、レーザ焼結型金属用 3 次元プリンタによる表面創製プロセス技術を応用することにより、3 次元微細構造制御した軸受を創製して自己適応性の発現による性能向上効果を実証した。

5. 主な発表論文等

(雑誌論文) (計 55 件)

- 1) K.Sakai, K.Koizumi, Y.Maeda, T.Endo, S.Sasaki, M.Abe, H.Sakai, "Adsorbilization-Induced Structural Change in Adsorbed Surfactant Aggregates: Equilibrium and Kinetics Monitored by AFM and QCM-D", Colloids and Surfaces A, 520, 231-238 (2017) <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.01.078>
- 2) K.Koizumi, M.Akamatsu, K.Sakai, S.Sasaki, H.Sakai, "Real-Time Observation of Solubilization-Induced Morphological Change in Surfactant Aggregates Adsorbed on a Solid Surface", Chemical Communication, 53, 13172-13175 (2017) <https://doi.org/10.1039/>

c7cc08369f

- 3) H.Maeda H.Okubo S.Sasaki, "Frictional Property of a 3D-Capillary-Structured Surface Fabricated by Selective Laser Melting", Journal Tribologi, 20, 87-96 (2018)
- 4) C.Tadokoro, S.Araya, M.Watanabe, H.Okubo, K.Nakano, S.Sasaki, " Synergy of two fatty acids as additives on lubricity of a nematic liquid crystal 5CB", Lubrication Science, 30,83-90 (2018) <https://doi.org/10.1002/ls.1406>
- 5) C.Dipankar, R.David, S.Shinya, H.Pavel, V.Martin, Z.Min, "Enhanced lubricant film formation through micro-dimpled hard-on-hard artificial hip joint: An in-situ observation of dimple shape effects", Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 81,120-129 (2018) DOI: 10.1016/j.jmbbm.2018.02.014
- 6) M.Yonehara, H.Okubo, C.Tadokoro, S.Sasaki, B.Prakash, " Proposal of Biomimetic Tribological System to Control Friction Behavior under Boundary Lubrication by Applying 3D Metal Printing Process", Tribology Online, 13, 8-14 (2018)
- 7) H.Okubo, S.Sasaki, "Frequency-Modulation Atomic Force Microscopic Observation for Ultralow Frictional Solid/Liquid Interface of Diamond-Like Carbon in an Environmentally Friendly Oil", Tribology Letters, 67, 1-7 (2019) 10.1007/s11249-018-1105-z
- 8) Y.Otani, Y.Kusaki, K. Itagaki, S.Sasaki, "Microstructure and Mechanical Properties of A7075 Alloy with Additional Si Objects Fabricated by Selective Laser Melting", Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy,66,109-115 (2019) <https://doi.org/10.2497/jjspm.66.109>
- 9) A.Omachi, K.Ushijima, Y. Nakanura, C.J. Wesley," The effect of micro-architecture on the failure response of multi-layered lattice sandwich panels under three-point loading", Journal of Sandwich Structures & Materials, 12, 1984216 (2019) 10.1177/1099636219842163
- 10) 小池雄介, 牛島邦晴, 加藤準治, "グラウンドストラクチャに基づくサンドイッチラティス梁の最適化設計に関する研究", 20149, 2019006 (2019) 10.11421/jscs.2019.20190006

ほか 45 件

[学会発表](計 195 件)

- 1) 前田寛陽 梁健一 板垣和幸 大久保光 佐々木信也: "金属 3 次元プリンタで創製した 3 次元キャピラリー構造青銅摺動面の摩擦特性", トライボロジー会議秋 2017
- 2) 長倉 祐太, 牛島 邦晴, 佐々木 信也, 向後 保雄, 井上 遼, 山田 浩之: "金属 3D プリンタで造形した軽量 lattice 構造の機械的特性に関する研究", 日本自動車技術会 2018 秋季大会
- 3) 貞弘稜, 中山将太, 宮武正明, 佐々木信也, 川田将平, 吉本成香: "金属粉末焼結 3D プリンタを用いて製作した多孔質静圧空気軸受の軸受特性に関する研究", トライボロジー会議 2018 春 東京
- 4) 高橋健太, 坪井涼, 佐々木信也: "テクスチャ表面における三次元流体-構造連成解析の重要性", 日本トライボロジー学会トライボロジー会議 2018 春 東京
- 5) K Sakai, K Koizumi, M Akamatsu, S Sasaki, H Sakai: "High-Speed AFM Observation of Solubilization-Induced Morphological Change in Surfactant Aggregates Adsorbed on Silica", 22nd International Symposium on Surfactants in Solution (2018)
- 6) R.Ishii, Y.Kusaki, K. Itagaki, S. Sasaki, "Effects of Laser Irradiation Conditions on Surface Roughness by Selective Laser Melting", EuroPM2018
- 7) 山下直人, 伊藤彰太, 高橋健太, 前田寛陽, 板垣和幸, 大久保光, 平田祐樹 佐々木信也: "能動的摩擦制御のための 3 次元微細しゅう動面の開発", 日本機械学会 第 18 回機素潤滑設計部門講演会 (2018)
- 8) 松岡直秀, 高橋健太, 前田寛陽, 渡部誠也, 佐々木信也: "金属 3D プリンタ活用による螺旋状パス潤滑油供給構造を内蔵した新規トライボ表面の開発", トライボロジー会議 2019 春 東京
- 9) 野口昭治: "ラティス構造を持たせた保持器による玉軸受の高速化に関する研究", 日本設計工学会 (2019)
- 10) 宮武正明, 川田将平, 佐々木信也, 吉本成香 : "金属粉末焼結 3D プリンタを用いた空気軸受の開発トライボロジー会議 2019 春 東京 ほか 185 件

[図書](計 4 件)

- 1) 「産業用 3D プリンタの最新技術と先進分野への応用」, 佐々木信也(分担執筆), 技術情報協会, (2018)
- 2) 「数値解析と表面分析によるトライボロジーの解明と制御」, 佐々木信也(監修), テクノシステム, (2018)
- 3) 「Compendium of Surface and Interface Analysis」, S. Sasaki (分担執筆), The Surface Science Society of Japan (監修), Springer, (2018)
- 4) 「薄膜工学」, 佐々木信也(分担執筆), 日本学術会議薄膜第 131 委員会監修, 丸善, (2016)

[産業財産権]

出願状況(計 1 件)

名称: 多孔質静圧空気軸受及びその製造方法

発明者: 宮武正明, 中山将太, 貞弘稜
権利者: 宮武正明, 中山将太, 貞弘稜
種類: 特許
番号: 特願 2018-085277
出願年: 2018
国内外の別: 国内
〔その他〕
ホームページ等
東京理科大学 佐々木研究室 <http://www.rs.tus.ac.jp/tribolab>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 牛島 邦晴
ローマ字氏名: Kuniharu Ushijima
所属研究機関名: 東京理科大学
部局名: 工学部機械工学科
職名: 教授

研究者番号(8桁): 00349838
研究分担者氏名: 田所 千治
ローマ字氏名: Chiharu Tadokoro
所属研究機関名: 埼玉大学
部局名: 理工学研究科
職名: 准教授

研究者番号(8桁): 00736770
研究分担者氏名: 宮武 正明
ローマ字氏名: Masaaki Miyatake
所属研究機関名: 東京理科大学
部局名: 工学部機械工学科
職名: 准教授

研究者番号(8桁): 70434032
研究分担者氏名: 酒井 秀樹
ローマ字氏名: Hideki Sakai
所属研究機関名: 東京理科大学
部局名: 理工学部先端化学科
職名: 教授

研究者番号(8桁): 80277285
研究分担者氏名: 野口 昭治
ローマ字氏名: Shoji Noguchi
所属研究機関名: 東京理科大学
部局名: 理工学部機械工学科
職名: 教授

研究者番号(8桁): 80349836
研究分担者氏名: 坪井 涼
ローマ字氏名: Ryo Tsuboi
所属研究機関名: 大同大学
部局名: 工学部
職名: 准教授

研究者番号(8桁): 90548158

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 酒井 健一
ローマ字氏名: Kenichi Sakai
研究協力者氏名: 川田 将平
ローマ字氏名: Syouhei Kawada

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、研究者個人に帰属されます。