

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2023

課題番号：18K03917

研究課題名(和文) 過酷なしゅう動条件下で摩擦低減をもたらす物理的かつ化学的な表面テクスチャの創製

研究課題名(英文) Fabrication of Physically and Chemically Textured Surface toward Friction-reduction under Extreme Contact Condition

研究代表者

亀山 雄高 (Kameyama, Yutaka)

東京都市大学・理工学部・准教授

研究者番号：20398639

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：微粒子ピーニングを利用した物理的テクスチャ創製手法として、斜投射FPPによって生じる微細うね構造の創製に着目した。テクスチャ創製領域の面積化を図るとともに加工パラメータと形成されるうね構造の関連性について明らかにした。適切な寸法のうね構造は、流体潤滑領域がより低速・高面圧条件にまで拡大していた可能性が示唆された。

微粒子ピーニングを利用した化学的テクスチャとして、アルミ材への鉄移着に着目した。移着した鉄成分は、アルミ基材との間で元のアルミ材のバルク強度をもしのぐ強度で強固に接合されていることを示した。この鉄成分は潤滑油添加剤と反応し、有益なトライボフィルムの生成に寄与していた可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

微粒子ピーニングによって粒子成分の移着が生じることは従来から明らかになっていたが、移着物と母材とが強固に接合されていることを、本研究を通して世界で初めて明らかにできた。

付加した移着成分が油剤と反応し、摩擦摩耗特性の変化につながる可能性を示せた。従来テクスチャリング加工という幾何学的な三次元構造を作り替えるという概念であったが、今回、素材の成分を作り変えるというアプローチとその有用性を示せたことに基づき、「化学的テクスチャ」という新たなコンセプトを提唱したい。

物理的テクスチャとして着目した微細うね構造については、系統的な摩擦摩耗試験を行うことで、その工学的意義へ一定の検討を加えることができた。

研究成果の概要(英文)：Fabrication of physically textured surface was attempted by conducting angled-FPP (Fine Particle Peening). Nozzle scan condition was investigated to fabricate wider area of the textured surface. It was suggested that an appropriate ridge texture formed by angled-FPP extended the fluid lubrication regime toward low sliding speed conditions. Chemically textured surface was fabricated by utilizing material transfer effect induced by FPP. Iron was transferred onto aluminum substrate to enhance an adsorption of a lubricant additive. The transferred elements were bonded to the substrate with extremely high strength. Tribological testing revealed that the transferred iron elements reacted with lubricant additives and contributed to the formation of a beneficial tribofilm.

研究分野：加工学，表面工学，トライボロジー

キーワード：ピーニング テクスチャ 移着 微細周期構造 トライボロジー トライボフィルム 微視的接合強度

## 1. 研究開始当初の背景

省エネルギー化への要請を背景に、機械部品の摩擦低減を図る技術が重要性を増している。しゅう動面へ nm~ $\mu$ m スケールの溝や窪みなどの構造を設けることによる低摩擦化技術が注目されており、これは部分的に固体接触が発生する混合潤滑状態における潤滑条件の改善に特に有効である。一方、より接触状態が過酷な境界潤滑状態では、潤滑油中の添加剤が反応して得られるトライボフィルムが潤滑性担保に寄与する。汎用的なエンジン油に含まれる有機モリブデン化合物系添加剤 (MoDTC)、リン酸化合物系添加剤 (ZnDTP) は、しゅう動面を構成する金属と反応して、最表面に二硫化モリブデン ( $\text{MoS}_2$ ) 被膜を生成することが知られている。このように、メカニズムの異なる潤滑改善機構を同時に発現可能なテクスチャリング手法を提案することで、多くのしゅう動部材が実稼働時に直面する広範な速度域の使用に対して幅広く低摩擦化を図れるものと考えた。

## 2. 研究の目的

本研究では、低すべり速度・混合潤滑下で摩擦低減をもたらす周期的微細構造の形成と、極低すべり速度・境界潤滑下で潤滑性発現を担う成分を表面近傍に付加することを、一挙に行いうる表面加工プロセスとして微粒子ピーニング (Fine Particle Peening; FPP) に着目した。FPP は、微細な粒子を投射することを特徴とした噴射加工法であり、従来は機械部品の強度向上目的で実用化されてきた。これに加え、本研究では、斜め ( $15\sim 45^\circ$ ) から粒子を投射すると、連続的な山と谷が周期配列した「うね」状構造が形成される作用を「物理的テクスチャ」、粒子の成分を被加工面へ残存させられる作用 (これを移着と呼ぶ) を「化学的テクスチャ」と位置づけ、特に着目した。うね構造の創製とそれを利用した摩擦摩耗特性の改善、移着現象の基礎的検討、および潤滑油添加剤と反応して有益なトライボフィルム生成に寄与する物質を移着させることを通した摩擦摩耗特性改善を図ることを、本研究の目的とした。

## 3. 研究の方法

### (1) 斜投射 FPP によるうね構造形成とそれを利用した摩擦摩耗特性の改善

本研究では、ノズル走査機構を具備した斜投射 FPP 装置を構築し、実験を行った。まず、ノズル送り速度を系統的に変化させながら、A6061 アルミ材へ斜投射 FPP を施し、形成されるうねの形状や寸法との関連性を調べた。作製した試験片に対しピンオンディスク摩擦摩耗試験を実施した。試験は市販エンジンオイルを用いた潤滑下で行い、うね構造の有無や形状の違いによる摩擦係数の比較を行った。

### (2) 移着物の接合強度の解明

本研究で扱うアルミ材に対し、化学的テクスチャリングで着目する鉄を移着させた試験片を準備した。この試験片を切断し、断面上 FPP 加工面近傍から、集束イオンビーム加工によって FPP 処理部材から微小引張試験片を採取し、電子顕微鏡内で引張試験を行い、破断応力を調べた。

### (3) アルミへの鉄移着による潤滑油添加剤の作用増進

潤滑油添加剤のなかでも、摺動部材に吸着する ZnDTP に着目した (ZnDTP 自体はりん酸系耐摩耗性皮膜を生成すると同時に、MoDTC 由来の固体潤滑皮膜の下地として機能する)。

ZnDTP の吸着を生じやすいとされる鉄を FPP によってアルミ表面へ移着させた．この表面に対し，ZnDTP を添加した潤滑油を供給して摩擦試験を行い，摩擦摩耗特性やトライボフィルム形成に及ぼす移着鉄の効果を調べた．

#### 4．研究成果

##### (1) 斜投射 FPP によるうね構造形成とそれを利用した摩擦摩耗特性の改善

斜投射 FPP によって形成されたうね構造の例を図 1 に示す．うね構造は粒子の流れ方向に対して直行方向に現れ，粒子噴流の下流側（A が上流側，C が下流側）になるにつれ小さくなった．次に，様々なスキャン条件の下で形成されたうね構造の寸法を図 2 に比較して示す．あるスキャン速度において，ピーニング時間の累計が長くなるようにすると，うね構造が形成される領域は下流方向に広がるがその寸法には明確な変化が認められなかった．一方，スキャン速度を低くするとうね構造の寸法は増大した．ピーニング時間を一定にした場合，スキャン速度が低いほどノズル往復動の周波数が低くなるため，1 サイクルあたりのピーニング時間は長くなる．このような条件がうね寸法の増大を促すことが解った．以上の結果より，うね構造の形成挙動にはノズル走査速度の影響が大きいことが示唆された．

次に 斜投射 FPP で作製された種々のうね構造試験片に対して同様の摩擦試験を行った．その結果の代表的な例を図 3 に示す．高さ約 3.5 $\mu\text{m}$ ，ピッチ約 60 $\mu\text{m}$  のうね構造を持つ Ridge-S 試験片では平滑材と比べて摩擦係数の変動が小さいが，その平均値は平滑材と同等であった．一方，高さ 6.8 $\mu\text{m}$ ，ピッチ 110 $\mu\text{m}$  のうね構造を有する Ridge-L 試験片では，摺動距離の増加とともに摩擦係数の変動幅は大きくなっていくが，摩擦係数の平均値は緩やかに減少していく様子が見て取れる．Ridge-L 試験片に存在したうね構造が，なじみ過程後に潤滑特性を改善する作用が呈していた可能性がうかがわれた．

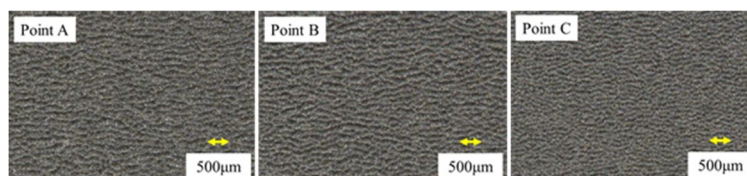


図 1 斜投射 FPP によって形成されたうね構造の例

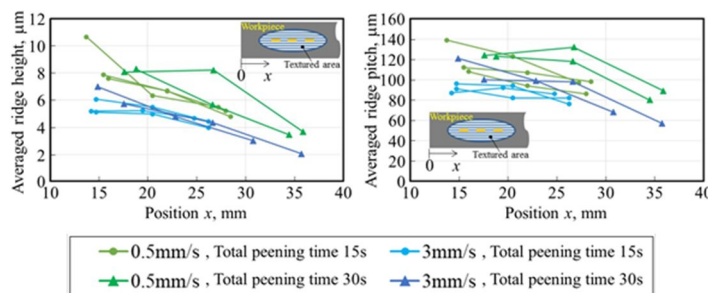


図 2 種々のノズルスキャン条件のもと形成されたうね構造の寸法

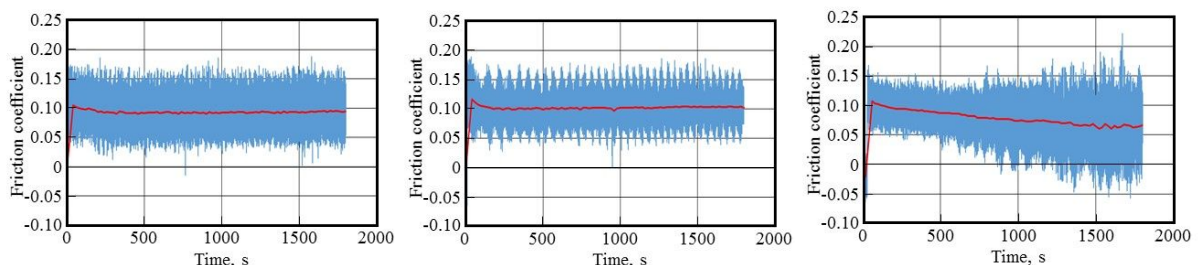


図 3 異なる表面テクスチャを持つ表面の摩擦係数 左：平滑面 中：Ridge-S 右：Ridge-L

## (2) 移着物の接合強度の解明

本研究では、二種類の FPP 試験片を対象に、移着物の微小引張試験を実施した。すなわち、A1070 純アルミ材へ炭素鋼粒子(粒径 70 $\mu\text{m}$ )で FPP を施したもの(以下 S 材), および銅めっきした炭素鋼粒子で同様に FPP を施したもの(以下 Cu/S 材)である。図 4 はそのうち、Cu/S 材の断面を観察・元素分析した結果である。FPP によって移着した Cu, Fe の各元素が、断面上に分布していることが解る。S 材の場合には Fe 成分(実際には、酸化を伴っている)が Al 母材中に分散していた。このような特異的な微視組織をラメラ状組織と呼称する。各組成がなす相の間には無数の界面が存在しており、この界面をまたぐように FIB 加工によって微小試験片を採取し、引張試験を行った。その結果を図 5 に示す。S 材では FeO/Al 界面で破断が生じた。また Cu/S 材では Fe 相の内部や、Fe/Cu 界面において破断が生じた。その際の破断応力を算出して比較したところ、いずれの破断応力も約 300 MPa 以上と非常に高い値であった。FeO/Al 界面は移着物とアルミ母材とがなす界面であり、強固な接合が成し遂げられていることが明らかになった。また、破断は試験片の最弱部で生じると考えられるので、Fe 材内部や、Fe/Cu 界面で破断した試験片においては、移着 Fe と Al 母材との界面や、移着 Cu と Al 母材との界面はさらに高い強度で接合していることが示唆された。また、そもそも接合界面が約 300MPa で破断したということは、その周囲の Al 母材部はそれを上回る強度を有していることを意味している。これは、FPP 時の強加工によって結晶粒の微細化などが生じた結果であると推察され、ナノインデンテーション試験によってラメラ状組織部の硬さを評価した結果からもそのことがうかがわれた。このような強加工が界面の強固な接合に寄与していたことが示唆される。以上の結果より、FPP でアルミ母材へ付加した移着物は、アルミ母材と極めて強固に接合されていることが実験的に明らかにされた。このような高い強度ゆえに、移着物は母材からはく離する心配が少ないと言え、例えばコーティングを施した場合と比べた優位性があることが実証できた。

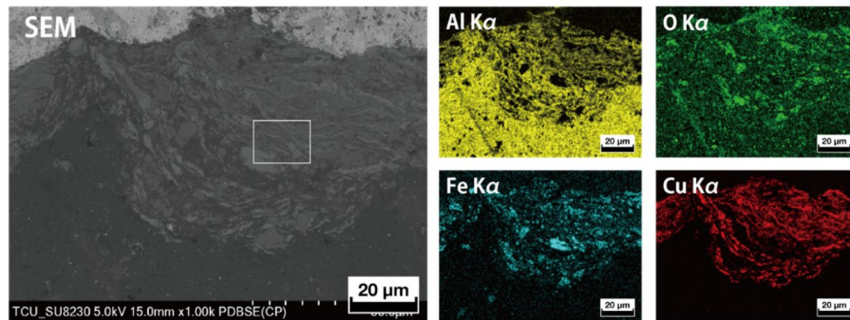


図 4 Cu/S 材の断面 EDS 分析結果

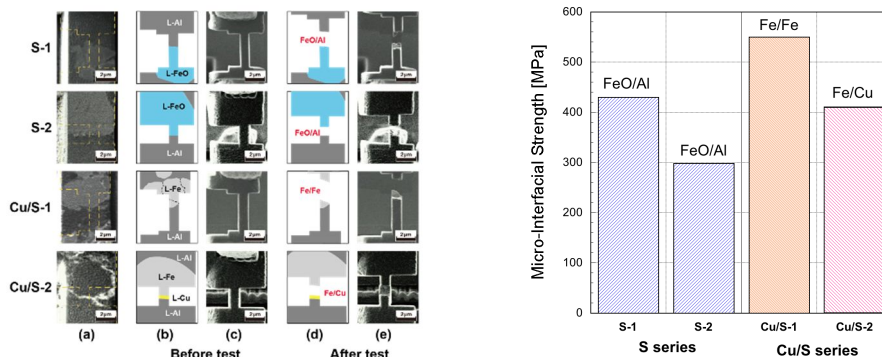


図 5 移着物界面の引張試験結果 左：試験片および破断位置 右：引張強さ



### (3)アルミへの鉄移着による潤滑油添加剤の作用増進

本研究では、アルミ鑄造合金 AC8A に対し、炭素鋼粒子を用いて FPP を施した試験片を作製した。母材の硬さの関係上、実験(2)で見られたものよりは顕著でないが、移着鉄成分がラメラ状組織を形成していることを確認している。この試験片に対し、ZnDTP を添加した油剤で潤滑を行って摩擦摩耗試験を実施した。摩耗面の EPMA 分析の結果、移着させた Fe や母材がもともと含む Si の分布する位置から P が検出された(図6)。このことは、P の吸着が Fe や Si の部位で生じやすいことを意味している。また、図7は PZ 油供給による Fe 材摩耗痕を XPS で分析した結果であり、ピークフィッティングの結果酸化鉄の他にリン酸鉄が存在している可能性が示された。このリン酸鉄は、移着した Fe と ZnDTP とが反応して生成したものと考えられるため、FPP によって導入された鉄移着物は ZnDTP がその機能を発揮するうえで寄与を有していたことが示された。このように、Fe 移着面において、ZnDTP の吸着とそれに伴うトライボフィルム形成が行われた場合には、摩耗が抑制されるという結果になった。ただし一方で、同じ条件であっても、Fe 移着試験片において摩耗が顕著に生じる場合も、しばしば認められた。そのような摩耗挙動を示す場合、摩擦係数も比較的高い値を取っていることも解った。

一連の実験結果から、FPP が ZnDTP の作用に及ぼす影響として以下が明らかとなった。まず、FPP によって導入された Fe 相は ZnDTP のリン酸皮膜形成に関与している。次に、Fe の存在は ZnDTP 吸着とその後の耐摩耗皮膜形成の必要条件ではない。Fe を含まない試験片では、Smooth 材の場合は Si 相が、また GI 材の場合は凹凸による面圧の増大が、ZnDTP 吸着にそれぞれ寄与していた可能性がある。鉄ラメラ組織を含む表面が顕著に摩耗している場合、ZnDTP 由来の皮膜も失われるか、その量が大きく減少する。耐摩耗皮膜の喪失が摩耗を増大したのか、反対に摩耗が進行した結果として耐摩耗皮膜が消失するののかについての明確な結論には至らなかったが、いずれにせよ鉄移着面において ZnDTP の吸着と皮膜生成が十分に行われれば、摩耗抑制効果が高くなる可能性を見出せたといえる。以上で述べた摩耗メカニズムを模式的に図8に示した。

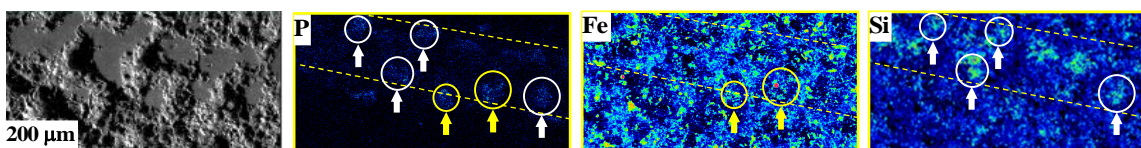


図6 FPP によって鉄を移着させた表面における ZnDTP 吸着の様子

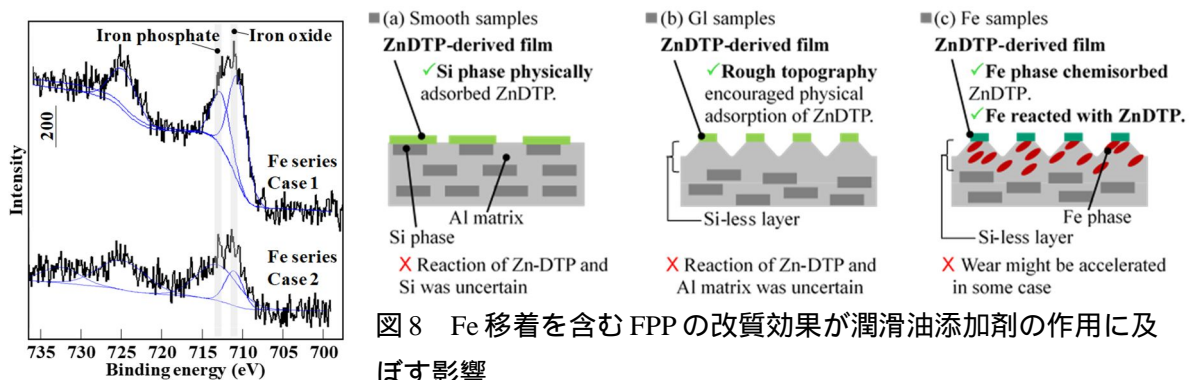


図8 Fe 移着を含む FPP の改質効果が潤滑油添加剤の作用に及ぼす影響

図7 摩耗面 XPS 結果

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 Ichikawa Yuji, Tokoro Ryotaro, Kameyama Yutaka	4. 巻 84
2. 論文標題 Microscale Bonding Strength of Cu-Fe-Al Transferred Lamellar Microstructure Formed by Copper-Coated Seel Fine Particle Peening	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Institute of Metals and Materials	6. 最初と最後の頁 28 ~ 35
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2320/jinstmet.J2019033	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 Kameyama Yutaka, Sato Hideaki, Shimpo Ryokichi	4. 巻 13
2. 論文標題 Ridge-Texturing for Wettability Modification by Using Angled Fine Particle Peening	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 765 ~ 773
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/ijat.2019.p0765	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 Nagano Yusuke, Ito Akemi, Okamoto Daisuke, Yamasaka Kiyonari	4. 巻 2019-01-0177
2. 論文標題 A Study on the Feature of Several Types of Floating Liner Devices for Piston Friction Measurement	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 SAE Technical Paper	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4271/2019-01-0177	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.Kameyama, S.Tohyama, H.Sato, R.Shimpo, T.Kato and H.Ohmoi	4. 巻 8
2. 論文標題 Effect of Nozzle Scan in Angled Fine Particle Peening Process on Ridge-texture Formation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Micro-Fabrication and Green Technology, Transactions of MIRAI	6. 最初と最後の頁 60-64
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 Yutaka Kameyama, Jun-ya Tachizawa, Kazuki Seo, Ryota Shimazaki, Hideaki Sato and Ryokichi Shimo	4. 巻 -
2. 論文標題 Effect of an iron-enriched aluminum surface fabricated via fine particle peening on tribological behavior under oil lubrication	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 International Journal of Abrasive Technology	6. 最初と最後の頁 -
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19件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 亀山雄高, 島崎椋太, 立沢隼弥, 佐藤秀明, 眞保良吉
2. 発表標題 微粒子ピーニングによって化学組成を改質したアルミ合金表面におけるトライボフィルム形成と摩耗挙動に関する検討
3. 学会等名 日本トライボロジー学会 トライボロジー会議 2022 春 東京
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 亀山雄高
2. 発表標題 日本刀は槌で鍛える。機械部品は粒で鍛える? ~金属を鍛え接合する微粒子ピーニング技術~
3. 学会等名 砥粒加工学会 砥粒の日オープンセミナー (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 立沢隼弥, 亀山雄高, 佐藤秀明, 眞保良吉
2. 発表標題 微粒子ピーニングによる化学組成の改質が潤滑油添加剤の効果発現に果たす寄与
3. 学会等名 日本トライボロジー学会 トライボロジー会議 2021 春 東京
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 亀山雄高, 宮崎隼, 佐藤秀明, 眞保良吉
2. 発表標題 微粒子ピーニングによって生じる鋼粒子・アルミニウム母材間の移着現象に及ぼす粒子酸洗い処理の影響
3. 学会等名 砥粒加工学会2021年度学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 亀山雄高
2. 発表標題 微粒子ピーニングによって生じる成分付加およびテクスチャ創製を利用した微細表面加工
3. 学会等名 日刊工業新聞 東京産学交流会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yutaka Kameyama, Sara Tohyama, Hideaki Sato, Ryokichi Shimpo, Teruko Kato and Hitoshi Ohmori
2. 発表標題 Effect of Nozzle Scan in Angled Fine Particle Peening Process on Ridge-texture Formation
3. 学会等名 The 13th MIRAI Conference on Microfabrication and Green Technology（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 立沢隼弥, 亀山雄高, 佐藤秀明, 眞保良吉
2. 発表標題 FPPによるFeの移着がAC8A鋳造アルミ合金表面のトライボロジー特性に及ぼす影響
3. 学会等名 2020年度砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 市川裕士
2. 発表標題 固相粒子積層プロセスにおける接合メカニズム
3. 学会等名 日本溶射学会 特別企画講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y.Kameyama, H.Yamanishi, M.Ito, H.Sato, R.Shimpo
2. 発表標題 Tribological Characteristics of Peened Surface by Using Aged Zinc Fine Particle
3. 学会等名 Proceedings of the 3rd Czech-Japan Tribology Workshop（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuji ICHIKAWA, Kazuhiro OGAWA
2. 発表標題 Effect of the Surface Oxide Film in Metallic Solid Phase Particle Deposition
3. 学会等名 第36回日韓国際セラミックスセミナー（J-K Ceramics 36）（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永野裕介, 三井敦, 鈴木秀和, 山川直樹, 石間経章, 伊東明美
2. 発表標題 ピストンバターンコーティングが摩擦に影響を及ぼすメカニズムの検討
3. 学会等名 第30回内燃機関シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 亀山雄高
2. 発表標題 斜投射微粒子ピーニングによる微細周期構造形成期項に関する考察
3. 学会等名 砥粒加工学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 亀山雄高
2. 発表標題 斜投射微粒子ピーニングによる周期的テクスチャ形成のメカニズムおよび応用
3. 学会等名 日本トライボロジー学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 亀山雄高
2. 発表標題 微粒子ピーニングを用いた成分付加による表面改質とテクスチャリング加工
3. 学会等名 化学工学会化学装置材料部会表面改質分科会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yutaka Kameyama, Jun-ya Tachizawa, Kazuki Seo, Ryota Shimazaki, Hideaki Sato and Ryokichi Shimpo
2. 発表標題 Effect of Topographical and Microstructural Changes in Aluminum Casting Alloy Substrate Treated with Fine Particle Peening on ZnDTP-derived Tribofilm Formation
3. 学会等名 24th International Conference on Wear of Materials (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yutaka Kameyama, Jun-ya Tachizawa, Kazuki Seo, Ryota Shimazaki, Hideaki Sato and Ryokichi Shimpō
2. 発表標題 Effect of iron-enriched aluminum surface fabricated with fine particle peening on tribological behaviour under oil lubrication
3. 学会等名 The 25th International Symposium of Advances in Abrasive Technology (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 亀山雄高, 立沢隼弥, 佐藤秀明, 眞保良吉
2. 発表標題 硫黄/銅複合粒子で微粒子ピーニングを施した鋳造アルミ合金が MoDTC存在下で示す潤滑挙動
3. 学会等名 砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 亀山雄高
2. 発表標題 微粒子ピーニングによる移着現象と微細凹凸形成を利用した表面改質 ~ 「粒を付ける加工」と「粒がつかなくする加工」~
3. 学会等名 精密工学会ナノ精度機械加工専門委員会 第11回ナノ精度チャンネル(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 亀山雄高, 宮川拓也, 草刈拓己, 奥田真司, 市川裕士
2. 発表標題 微粒子ピーニングによる移着現象 ~ 微視的接合機構解明と表面改質への応用の試み~
3. 学会等名 日本溶射学会第3回合同支部講演会(招待講演)
4. 発表年 2023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
研究 分担者	伊東 明美  (Ito Akemi)  (40574041)	東京都市大学・理工学部・教授   (32678)	
研究 分担者	市川 裕士  (Ichikawa Yuji)  (80451540)	東北大学・工学研究科・准教授   (11301)	

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