

令和 2 年 7 月 14 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06112

研究課題名(和文) 表面テクスチャリングによる安定かつ高摩擦な表面創製

研究課題名(英文) Surface texturing for stable and high-friction surface

研究代表者

月山 陽介 (Tsukiyama, Yosuke)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：00533639

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：機械の損傷や精度を悪化させる原因になるため、結合部や締結部の確実な固定が必要であり、一般産業機械から医療用のインプラントまで、摩擦による固定部が存在する箇所は多い。そのような箇所においては金属表面の汚れなどが摩擦を下げてしまうために、高い摩擦を安定して発現する表現が必要であった。そこで、微小凹凸を表面に付与することにより、高い摩擦を安定して発現する表面を開発し、その効果やメカニズムを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題では、限られた条件において高い摩擦を発現しなければならない場合に効果的な摩擦係数の増加技術を開発した。例えば、医療用インプラントの小型化では、締結トルクが規定されており、新たな機構を追加することが難しい場合がある。そのような条件下では固定力を向上させるためにはなるべく安価に表面の摩擦係数を増加させることが肝要である。本課題では、安価な工業用レーザ加工装置を用いた摩擦係数向上技術を開発した。

研究成果の概要(英文)：Since it causes damage to the machine and deteriorates accuracy, it is necessary to securely fix the joint and the fastening part. And in general, there are many parts which are fixed by friction in various mechanical elements used in general industrial machines to medical implants. In such a friction interface, the dirt on the metal surface lowers the friction, so that it is necessary to stably express high friction. Therefore, we have developed a surface that stably develops high friction by providing minute unevenness to the surface, and clarified its effect and mechanism.

研究分野：トライボロジー

キーワード：高摩擦 トライボロジー テクスチャリング

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

種々の機械において熱サイクル等で連結部や締結部に生じる微小すべりなどを防止する必要がある。例えば、人工衛星に用いられる大型展開アンテナは高い鏡面精度が必要であるが、熱サイクルによりその精度が悪化し高い観測分解能を損なわれることが問題となる。これを防止するための高摩擦係数表面の創製が喫緊の課題であった。表面には酸化膜や加工変質層、汚染層などが存在し一般に清浄面に比較して低い摩擦係数を発現する。このような表面層が高摩擦の発現を妨げている。例えば酸化膜は除去してもすぐに大気中の酸素により再形成されるため大気環境下では完全に除去することは不可能である。また、摩耗粉や摩耗による表面形状の変動により摩擦係数は大きく変動するが、これらは予測不能な因子である。そこで本課題では、金属表面を安定的に高摩擦化させるためにレーザー加工により表面に微小突起を無数に配列し、その効果により高摩擦係数発現技術を開発した。これは例えば締結部の確実な固定などにつながる適用先の広い技術であり、種々の金属材料に対しての効果を実証することが必要であった。

2. 研究の目的

本課題では、アルミニウム剤、鋼材およびチタン材における本技術の効果を実験によって明らかにし、そのメカニズムを考察した。また、大気中および真空中での摩擦試験の結果を比較しテクスチャの効果を対照実験により検証した。また、加工した表面に対する種々の分析により、高摩擦の発現メカニズムを明らかにした。

3. 研究の方法

レーザー加工はレーザーマーカ装置にも用いられる加工装置を使用した。レーザー光は1064nmのYAGレーザーであり、Qスイッチパルス発振の照射間隔と走査速度を制御して、最適なレーザー照射ピッチにより各金属における最大の摩擦係数発現条件を明らかにして摩擦実験に使用した。また、レーザー加工の繰り返し回数により微小突起の高さが大きくなるため、摩擦係数が飽和する最小限の照射回数などの条件も明らかにした。図1はレーザー照射回数と形成された突起の一例である。20回照射により約60 μm 、3回の照射で約10 μm の高さの突起が形成された。これらの表面と相手材金属との摩擦係数をボール・オン・ディスク型の摩擦試験機によって計測した。

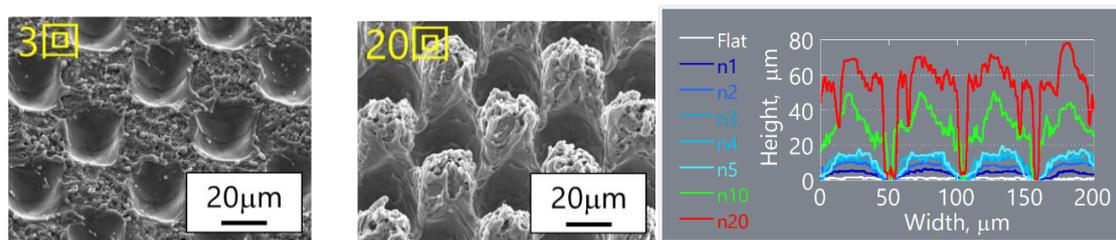


図1 レーザ加工により形成された微小凹凸表面の一例と突起高さ

4. 研究成果

4.1 レーザテクスチャの効果およびメカニズム

図2は、脊椎インプラントに用いられる生体親和性の高いチタン材料にテクスチャを施した時の摩擦係数である。この図から、照射回数の増加に伴い静止摩擦係数が増加し、その効果は3~5回でほぼ頭打ちになることが分かる。摩擦係数は照射回数0回に比べて最大で約2.8倍に増加することが明らかとなった。レーザー加工によってチタン合金同士の摩擦において大幅な摩擦係数の増加が明らかとなった。

この高摩擦化の効果に及ぼす材料組織の影響について明らかにするためにEBSD測定のパラメータマップを図3に示す。この図から、熱影響は微小突起の上部にのみ存在し、これはレーザー加工により熔融した金属が再凝固した部分に多く見られた。突起先端部はレーザー加工により除去された金属の一部が再付着して形成されたものである。それ以外の部分は除去されずに熔融し再凝固した層だと考えられ、その厚みは1~2 μm であった。これがテクスチャ表層の熱影響層の厚さであると考えられる。このサンプルは20回照射条件のサンプルであり再付着して形成した突起上部の熱影響層が多いが、照射回数3回から5回の場合ではほとんど形成しないので1~2 μm の厚さで存在する熱影響層のみを考えればよいが、突起の高さに比べて表層に発生した熱影響層の高さは小さいことが分かった。

図4は摩擦後の表面を電子顕微鏡で観察したものであり、上側は形状像、下側は元素分析により相手材の凝着部を濃青色で示している。この画像から摩擦面において突起が存在することで摩擦初期から凝着が促進されていることが分かる。また、テクスチャ付与側の表面に相手材料が凝着することによって高い摩擦が発生していることがこの画像から分かる。

以上から、微小突起を形成することによる材料組織上の影響は表層のわずかに1~2ミクロンであり微小突起を形成した表面上に相手材が凝着を引き起こすことによって高い摩擦係数が発現していることが明らかとなった。

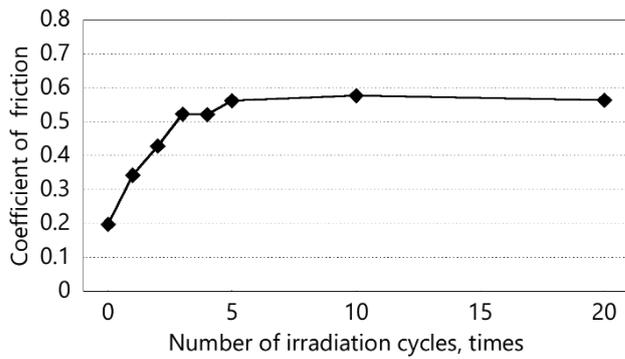


図2 チタン合金 Ti-6Al-4V 対 純チタンの静止摩擦係数レーザ照射回数の影響

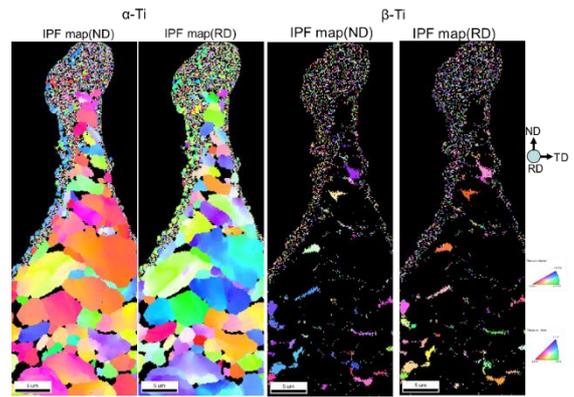


図3 突起断面のEBSDマップ

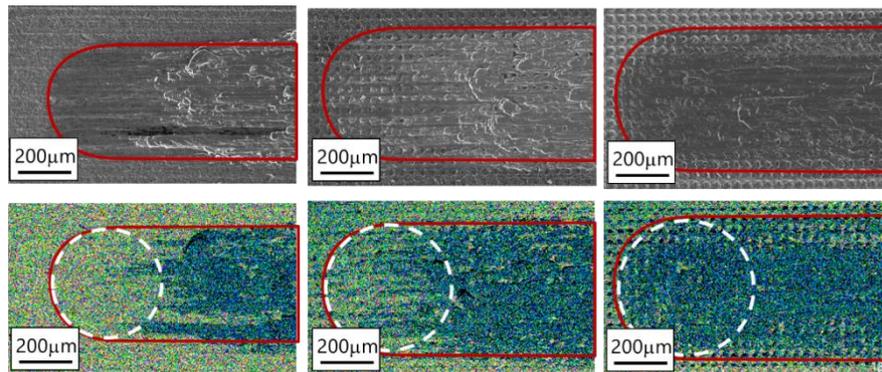


図4 摩擦試験後の表面観察画像と元素分析マッピング画像 (Al 元素)
左: 照射0回, 中: 照射3回, 右: 照射20回

4.2 アルミニウム材料および鋼材における検討結果

アルミニウム材料として、A6061-T6 材と A6063-T5 材を用いた場合の摩擦実験結果を図5に示す。この図から静止摩擦係数がレーザ照射により3~4倍に増加したことが分かる。アルミニウム材料においてこのように効果が高かった理由は表面の酸化膜が緻密で薄いことや、変形のしやすさなどが考えられ、微小突起の変形による新生面の表出が起きやすい可能性がある。鋼材においても図6のように摩擦係数が約2~3倍に増加し、チタン合金に近い増加比であった。

また、一定の照射回数を超えると、テクスチャの効果により摩擦係数が安定すること分かった。これは、柱状突起が塑性変形しやすいことと、谷部の存在が影響すると考えられる。前者については、摩擦力は摩耗による接触面状態の変動の影響を受けるが、柱状突起が積極的に塑性変形することで摩耗による変動の影響が相対的に小さくなった可能性がある。後者については、同じく摩擦の変動要因である摩耗粉が柱状突起間の谷部に待避できることなどによりその影響が抑えられたと考えられる。以上の効果により摩擦係数が安定したと考えられる。

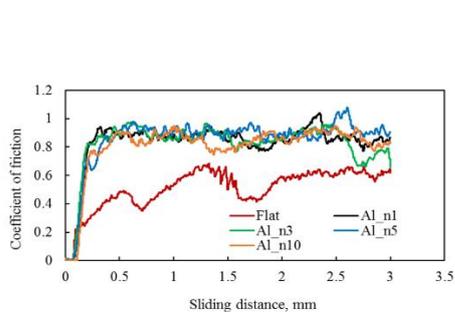


図5 アルミニウム材における摩擦実験

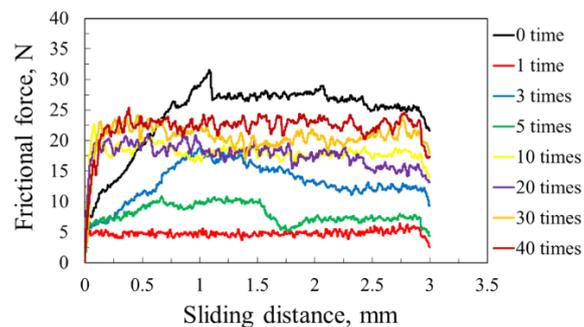


図6 鋼材における摩擦実験

4.3 真空中の摩擦試験

試験条件

大気・真空中でボール・オン・ディスク式の往復動摩擦試験を行った。真空中試験の真空度

は 10^5Pa 台である。ボール材質は A1070 と A6061, A7075 の 3 種類, ディスク材質は A1070 を用いた。表面テクスチャはディスク試験片に付与した。テクスチャは円柱形状で直径は $20\mu\text{m}$, 高さは tex1 が $8\mu\text{m}$, tex3 が $24\mu\text{m}$, tex5 が $40\mu\text{m}$, tex10 が $80\mu\text{m}$ 程度であった。

4.3.1 静止摩擦の測定

20 回実施した試験の結果から, その典型例を図 7 に示す。0.24 秒付近ですべりが生じ, その後はスティックスリップを繰り返している。0.5 秒までの初期静止摩擦係数と試験期間全体の最大静止摩擦係数に分けて評価する。図 8 に 20 回行った試験のうちの奇数回の結果を示す。図 8(a) が初期静止摩擦係数でいずれも 1 を超える高い値が測定されている。テクスチャがある方が初期静止摩擦係数は小さい。図 8(b) は最大静止摩擦係数であり同図(b)と同様の傾向にある。試験回数の増加に伴い, テクスチャを付けた試験では摩擦係数が徐々に増加し, 特に(b)の最大静止摩擦係数の結果では, テクスチャがある場合の摩擦係数が, ない場合より高くなっている。

4.3.2 ボール材質によるテクスチャ効果

テクスチャを付与するディスク材には前節と同様の A1070 を用い, ボール材質を A6061, A7075 の 2 種類を用いて実施した結果を図 9(a) と (b) にそれぞれ示す。A6061 と A7075 のストローク中の最大摩擦係数の試験回数に対する推移を A6061 と A7075 を比較すると最大摩擦係数は A6061 のボールの方が A7075 のボールに比べて高くなっている。一方で, テクスチャの有無をボール材質ごとに比較すると, A6061 ではテクスチャの有無による最大摩擦係数、平均摩擦係数共に差はないが, A7075 ではテクスチャがあると最大摩擦係数は大きくなっている。ブリネル硬さが A1070 が 20, A6061 が 30, A7075 が 150 であったことを考えると, 塑性流動が主に生じるディスク試験片の硬度よりも若干大きい硬さを有するボール試験片を用いた場合に摩擦が大きくなると推察される。

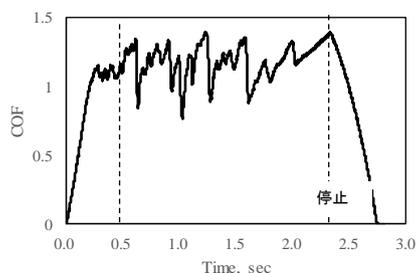


図 7 典型的な摩擦波形

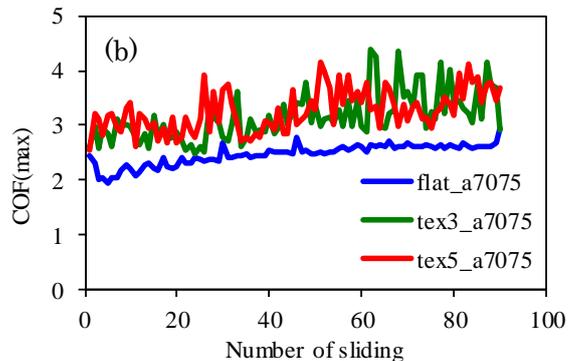
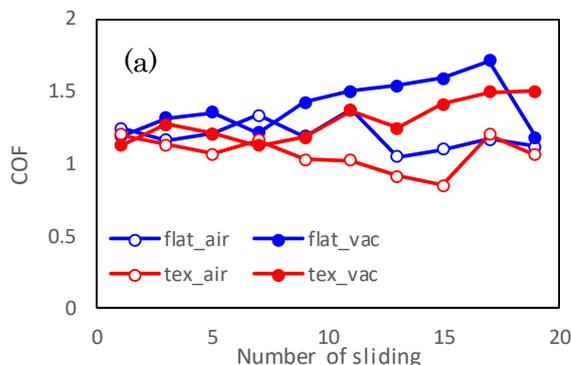
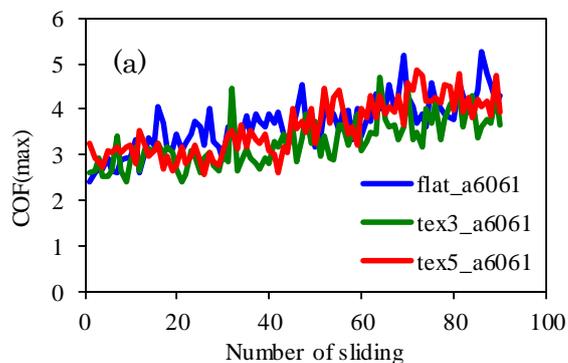


図 9 最大摩擦係数の推移(a)A6061 ボール, (b)A7075 ボール

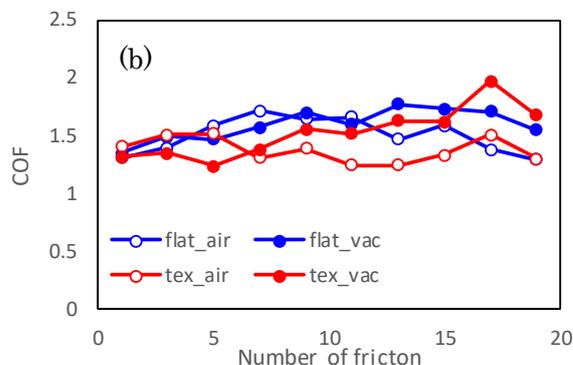


図 8 摩擦係数の推移(a)初期静止摩擦係数: 上, (b)最大静止摩擦係数: 下

4.3.3 テクスチャの効果と今後の展望

高摩擦を得るために、容易に塑性流動を起こし、新生面が露出し、高い凝着力が期待される A1070 に対して、表面テクスチャを付与した際の効果を確認した。本研究で評価したのは (1) A1070 同士で摩擦した場合の大気・真空中での効果、(2) 相手材の硬度を変えた場合の真空中でのテクスチャの効果である。(1) の効果については、大気中・真空中ともにテクスチャを付与することで、若干の摩擦係数の低下が生じる結果となったが、摩擦回数の増加に伴い、テクスチャを付与した場合にテクスチャがない場合の摩擦係数を超えるケースも見られた。テクスチャが摩滅することを考えると、テクスチャの効果とすべきかは今後も検討が必要であるが、興味深い結果を得た。(2) については、図 9 に示したように相手材の硬さが固い場合に、テクスチャにより高摩擦化が生じる結果となった。図 10 に試験後のボール表面の光学顕微鏡像を示す。図の左右が摩擦方向にあたる。図 10 の結果をみるとテクスチャの効果が出た A7075 の結果では、摩擦方向に直交する上下方向の摩擦痕径が相手材にテクスチャがある場合に大きくなっていることがわかる。一方で、摩擦相手材のテクスチャの有無で差が生じなかった A6061 の結果では、摩擦に直交する摩擦痕径は同程度であるが、一方で摩擦方向の径は相手材にテクスチャがある場合に大きくなっている。これらの結果から、テクスチャによる摩擦の増加は摩擦痕の面積の増加ではなく、摩擦直交方向の径の増加によると考えられる。すなわち、凝着摩擦が支配的ではなく、相手材や相手材上の摩耗粉を塑性変形させる掘り起し効果の増大で摩擦が大きくなったと示唆される。

母材をアルミに限定せず、より多くの母材で高摩擦を実現するために、金メッキを用いた高摩擦化を検討した。図 11 に真空中での導電性固体潤滑膜として用いられる Ni 含有の Au めっき (AuNi) を付与したディスク試験片と Cu 含有の Au めっき (AuCu) を付与したボールとを摩擦した結果を、ディスクの母材である C1020 とボールの母材であるベリリウム銅 (BeCu) を摩擦した結果と合わせて示す。母材同士の摩擦係数に比べて、金メッキを付与した場合の摩擦係数が非常に高く、10 を超えていることがわかる。一方で摩擦の変動が大きく、その安定性に課題がある。テクスチャを付与することで、この安定性を改善するために金メッキへのテクスチャ加工を検討したが、本研究期間中にはテクスチャ加工法を確立するに至らなかった。今後、金メッキなどの薄膜へのテクスチャの加工法を検討し、より高摩擦で安定な摩擦面の創成を検討したい。

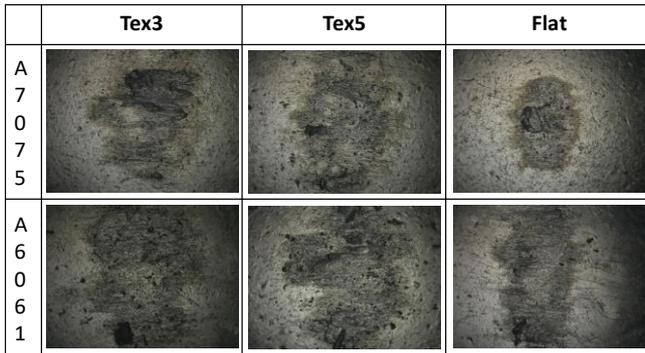


図 10 試験後のボール試験片の光学顕微鏡

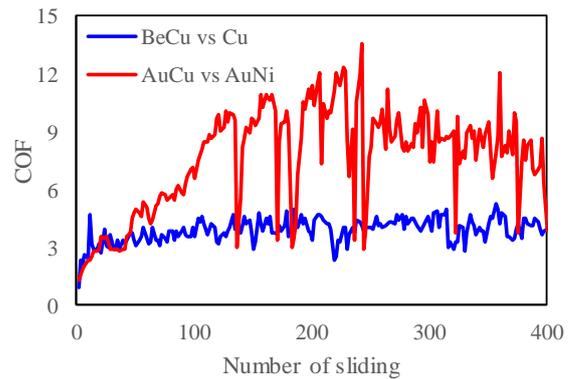


図 11 金メッキ同士の最大摩擦係数の推移

4.4 得られた主な結論をまとめる。

- (1) 金属材料同士の摩擦においてテクスチャの役割は相手材の凝着を促進するおよび摩耗粉の塑性変形を促進することが影響すると考えられる。また、テクスチャが積極的に変形することで摩耗による接触面の変動が相対的に抑制され摩擦係数が安定した。
- (2) チタン材および鋼材ではテクスチャ付与したチタン合金側に対する軟質な相手材純チタンの凝着が促進されることが主な摩擦係数増大のメカニズムであった。
- (3) アルミニウム材の真空中と大気中の摩擦係数比較した結果、繰り返し摩擦回数後にテクスチャによる最大摩擦係数が向上することおよび材料硬度を適切に選択することによって摩擦係数増加効果が得られることが明らかとなった。
- (4) アルミニウム材におけるテクスチャの効果は、摩耗粉の塑性変形が促進され摩擦係数を増大させることが示唆された。また、その際に凝着ではなく掘り起し効果が増大した可能性がある。
- (5) 追加実施として、Au めっき同士の摩擦により 10 を超える高い摩擦係数を達成できた。しかし摩擦係数が不安定であり、安定性に関する検討を今後も継続したい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 月山陽介, 鳥谷部翔平, 間悠介, 垣内侃, 新田勇 |
| 2. 発表標題 レーザ加工による高摩擦表面の創製 |
| 3. 学会等名 日本機械学会2017年度年次大会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 佐藤祐基, 豊崎弘也, 月山陽介, 新田勇 |
| 2. 発表標題 レーザマイクロテクスチャリング技術を用いたAl材料における高摩擦係数の発現 |
| 3. 学会等名 日本機械学会 第18回機素潤滑設計部門講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 佐藤祐基, 金藤航, 月山陽介, 新田勇, 塩見裕 |
| 2. 発表標題 レーザマイクロテクスチャリングによるAl材料の高摩擦化におけるメカニズム解明 |
| 3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yuki Sato, Yosuke Tsukiyama, Isami Nitta, Hiroshi Shiomi |
| 2. 発表標題 Mechanism of High Friction of the Aluminum Surface Textured by Laser Micro Texturing |
| 3. 学会等名 International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2019 |
| 4. 発表年 2019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 | 塩見 裕 (Shiomi Hiroshi) (20578794) | 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究開発員 (82645) | |