

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04102

研究課題名(和文) 微小振動援用切削テクスチャによるきさげ加工の置換可能性の検討

研究課題名(英文) Examination of replaceability of scraping with texturing by micro-vibration assisted cutting

研究代表者

山本 武幸 (Takeyuki, Yamamoto)

茨城大学・理工学研究科(工学野)・技術職員

研究者番号：40396594

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)：切削工具として三角錐ダイヤモンド圧子を切込み深さ方向へ振動させつつ微小切削する方式により、しゅう動表面上に圧痕状パターンの周期的な配置によるテクスチャを製造する方法を開発した。本方式において、オンマシンの微小切削を追加すると、圧痕状パターン周囲に生じた塑性盛りを除去することができる。本方式により製造されたテクスチャ表面に対し、乾・湿式ボールオンディスクすべり試験を試みた結果、面積密度が比較的に高いテクスチャ表面において、平面や単純切削溝によるテクスチャ表面に比べ、摩擦係数は低くなるとともに、なじみ状態に到達する時間も短縮されることが明らかになり、本テクスチャ製造方式の有用性が実証された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

エネルギー問題や機械・装置類のメンテナンス問題の低減にも関連する、摩擦・摩耗を低減させる方法として、圧痕状パターンの周期的配置によるテクスチャ表面を開発した。開発した表面が、摩擦・摩耗の低減のみならず、なじみ時間の短縮に有用なことを明らかにし、工作機械などのしゅう動面の製造において用いられている、きさげ作業という職人技に対する代替技術となり得ることを示した。

研究成果の概要(英文)：A method was developed to fabricate surface textures with periodic arrangement of indentation patterns on sliding surfaces by means of micro-cutting while oscillating a triangular pyramidal diamond indenter as a cutting tool in the depth-of-cut direction. In this method, the addition of on-machine micro-cutting enables to remove the pileups generated around the indentation patterns. Ball-on-disk sliding tests under dry and wet conditions on textured surfaces fabricated by this method revealed that the friction coefficient is lower on textured surfaces with relatively high area density than on mirror surfaces or textured surfaces with simple cutting grooves, and that the time required to reach the running-in state is shorter on textured surfaces with relatively high area density. This demonstrates the usefulness of this surface texturing method.

研究分野：加工学および生産工学関連

キーワード：表面テクスチャ きさげ 振動援用切削 摩擦 境界潤滑 なじみ

1. 研究開始当初の背景

きさげは、工作機械のベッド - 可動部間のように、重量物の運動を支えるしゅう動面や案内面において良好な潤滑状態を得るのに用いられる表面加工である。スクレーパにより金属しゅう動面に対し、数 μm の深さの溝(幅と長さは mm レベル)を極力等間隔に手作業で掘り、面同士をすり合わせ、あたり(上下面どうしの接触状態)を確認するという作業を繰り返し、なじみ状態(理想的な接触状態)のしゅう動面を得るという職人技である。きさげ作業からなじみ状態に至るまでは長時間を要し、また機械化・自動化されておらず(電動きさげ加工機でさえ職人が手で持って扱う製品)個人差も大きく、技術伝承が課題となっている。

きさげ面性状の分析や、なじみ過程のしゅう動特性に関する研究がなされ、なじみ過程の面性状やしゅう動特性はある程度はわかってきており(堤・久曾神・福田: きさげ仕上げされたすべり案内面のトライボロジー特性評価, 日本機械学会論文集(C 編), 72, 721 (2006) 3009-3014.)。テクスチャが微細になるにつれ潤滑特性は改善する傾向がある。きさげ作業自体を自動化させる試みもあるが(堤・山田・久曾神・中村: 当たり面認識装置を含む自動きさげ盤の開発(第3報) 自動きさげ盤の構成, 精密工学会誌, 71, 3 (2005) 358-362.) 研究過程で課題も多い状況にある。

一方、きさげ工具先端の寸法とヒトによる作業であることから、きさげ加工による溝幅と長さは小さくともせいぜい mm レベルとなる。よって、深さ数 μm で数十 μm オーダの面内周期の微細溝が、しゅう動特性をより向上させるとしても、それを製造することは難しい。しかし、前述の文献やきさげ職人達の経験、案内面の等級、動圧効果などから総合的に考えると、従来より小さい面内周期・寸法の微細溝によるテクスチャパターンが創成できれば、潤滑特性の改善のみならず、より高剛性・高精度の工作機械が実現できると期待される。しかもそれが、スキルレスかつ短時間で可能なら、ブレークスルーとなり得ると考えられる。

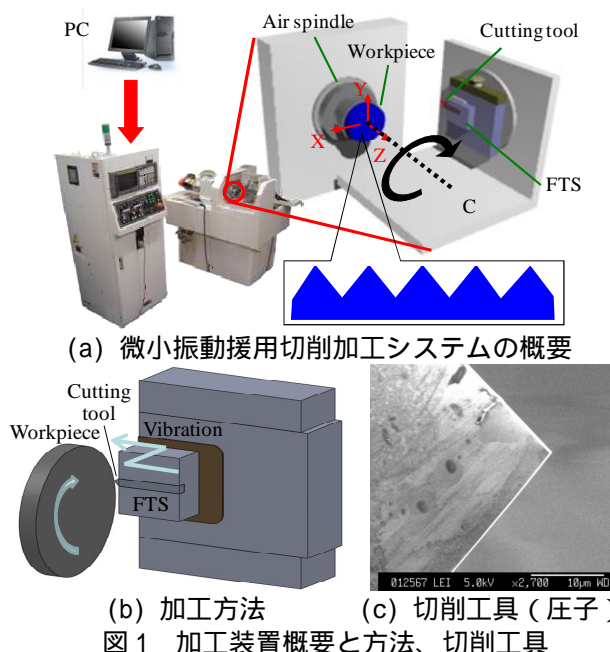
2. 研究の目的

本研究では、きさげ加工の置換候補技術として、NC 加工機に振動アクチュエータを搭載した装置上での切込み深さ方向への振動を利用した微小振動援用切削により、スキルレスで従来のきさげより面内寸法の小さい溝を短い周期で加工することで、従来よりも高い潤滑性能(微小な油だまりによる油膜切れ防止と摩耗粒子の一時退避による摩耗抑制)を示すテクスチャ表面を比較的短時間で製造する技術を開発することを目的とする。研究では、微小振動切削条件を変化させて検討し、深さ数から数十 μm の微小圧痕状パターンの周期的な配置による、ゼロから数十%の面積密度のテクスチャ表面を製造する。その際に、オンマシンで鏡面切削を追加して各テクスチャパターン周囲に生じるバリ(塑性盛り)を除去し、理想的なプラトー構造表面の獲得を目指す。得られた各テクスチャ表面に対し、乾式・湿式すべり試験を試み、各テクスチャ表面の摩擦特性を評価する。そして、優れた摩擦・摩耗・潤滑性を呈すテクスチャ表面をスキルレスに得ることを目標とする。

3. 研究の方法

(1)微小振動援用切削によるテクスチャ表面の製造

表面テクスチャ加工に用いる切込み深さ方向への微小振動を利用した振動援用切削には、X、Z、C 軸に NC 制御(数値制御)可能な精密三軸同時制御加工装置に FTS(ファスト・ツール・サーボ)を搭載したものをを用いる。図 1(a)は加工システムの概要である。図 1(b)に示すように、FTS を用い工作物表面に対し垂直な方向に微小振動を与えながら切削することにより、正弦波状に切込み深さが変化する正面旋削によりテクスチャを設ける。 μm ないし mm オーダの寸法を有する圧痕状パターンの周期的配置によるテクスチャ表面を創成するために、図 1(c)の電子顕微鏡写真に示すように、切削工具には微小硬度計に用いられる鋭利な先端を持つ三角錐形状(キューブコーナ)の単結晶ダイヤモンド圧子を用いる。テクスチャ加工をする前に、同じ工具を用い鏡面創成のための微小切削を施すことから、三角錐圧子の面側をすくい面として加工する。テクスチャ創成後に



機上で微小切削を追加することにより、テクスチャ創成時に生じたバリ（塑性盛り）を除去することが可能なため、本方式は追加の研磨を必要としない利点を有している。乾式すべり試験には黄銅（c2680）平板を、湿式すべり試験用にはアルミニウム合金（A6061）平板をテクスチャ表面の製造対象として用いる。製造した各種テクスチャ表面は、レーザ顕微鏡を用いて計測する。

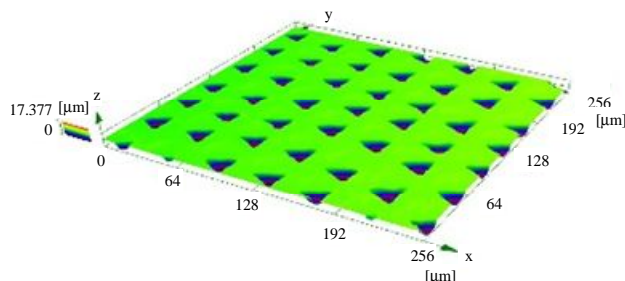


図2 テクスチャ表面の製造結果例

図2は黄銅（c2680）を対象として、 μm オーダの三角錐状の圧痕状パターンを周期的に配置したテクスチャ表面を製造した後にレーザ顕微鏡観察した一例である。平均切込み深さ $0\ \mu\text{m}$ 、振動周波数 $50\ \text{Hz}$ 、振幅 $9\ \mu\text{m}$ （工具の振動により最大 $9\ \mu\text{m}$ 、最小 $-9\ \mu\text{m}$ の切込みが付与）、切削速度 $2\ \text{mm/s}$ 、送り $40\ \mu\text{m/rev}$ で潤滑しつつ振動援用切削加工した結果である。微小送りで切込み深さゼロによるスパークアウト微小切削を追加し、各圧痕状パターン周囲に創成したバリを除去したため、平坦部と各パターンとの境界に突起はみられず、最大深さが $7\sim 8\ \mu\text{m}$ の圧痕状パターンが $40\ \mu\text{m}$ 程度の間隔で規則的に配置されていることがわかる。テクスチャの面積密度（設定値）は 40% である。

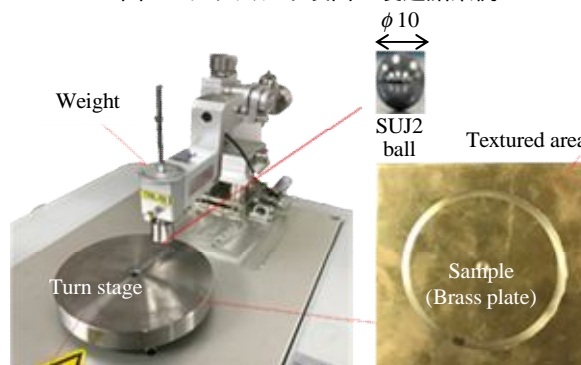


図3 ボール・オン・プレートすべり試験の概要

平坦部と各パターンとの境界に突起はみられず、最大深さが $7\sim 8\ \mu\text{m}$ の圧痕状パターンが $40\ \mu\text{m}$ 程度の間隔で規則的に配置されていることがわかる。テクスチャの面積密度（設定値）は 40% である。

(2) ボール・オン・プレートすべり試験による乾式・湿式摩擦特性の評価

すべり試験装置として、静・動摩擦測定器（ターンテーブル仕様）を用いる。すべり試験の概要を図3に示す。試験荷重は錘により与え、摩擦力はロードセルにより計測する。乾式および湿式環境において直径 $10\ \text{mm}$ のSUJ2鋼球により、製造した各種テクスチャ表面に対してすべり試験する。荷重は黄銅やアルミニウム合金がヘルツ接触時に降伏しない程度の $0.5\ \text{N}$ とする。図にあるように、平板上のリング状に光って見える領域にテクスチャが設けられており、その上をターンテーブル上においてしゅう動させることによってすべり試験する。

4. 研究成果

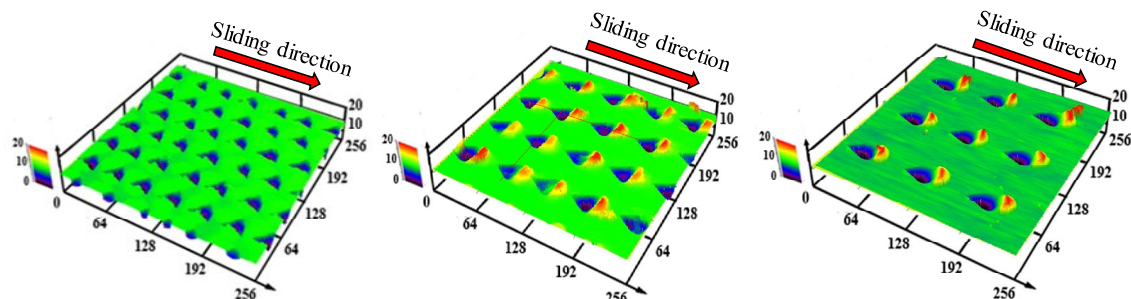
(1) 黄銅平板上へのテクスチャの製造結果

所望する面積密度が得られるように切削速度（周速）と送り速度を適宜制御し、平均切込み深さ $0\ \mu\text{m}$ 、振動周波数 $50\ \text{Hz}$ 、振幅 $9\ \mu\text{m}$ で切込み深さ方向の振動を用いた振動援用切削により、黄銅平板上に製造されたテクスチャ表面の代表的な観察結果を図4に示す。図4(a)にはオンマシンでバリを除去した面積密度 40% の場合の結果、図4(b)、(c)は面積密度を 25% と 10% に設定しバリを除去しなかった場合の結果をそれぞれ示している。なお、ここでいうテクスチャの面積密度は設定値である。

図4より、いずれの場合も、深さ $8\ \mu\text{m}$ 程度の圧痕状のパターンが周期的に配置され、(b)と(c)では各パターンの切削時の出口側において高さ $7\ \mu\text{m}$ 程度のバリが生じている様子が把握できる。また、(a)ではオンマシン鏡面切削によって、バリが除去されていることがわかる。

(2) 乾式すべり試験による黄銅平板上に設けた表面テクスチャの摩擦評価結果

図5は、図4に示した3種類のテクスチャ表面に対する乾式すべり試験（すべり速度 $0.45\ \text{m/s}$ ）により得られた摩擦係数の経時変化を示している。図6と図7は、乾式すべり試験後に得られたテクスチャ表面とボールの観察結果をそれぞれ示している。



(a) 面積密度 40% （バリなし） (b) 面積密度 25% （バリあり） (c) 面積密度 10% （バリあり）

図4 乾式すべり特性評価に用いたテクスチャ表面（各軸の単位は μm ）

図5において、(a)の面積密度40%でバリなしの場合、すべり当初から0.27程度の低い摩擦係数を示し、その後の摩擦係数も極めて緩やかに増加する程度であることがわかる。これは、すべり初期からなじみ（定常すべり）状態になっていることを示すためである。また、図6(a)から圧痕状パターンが摩滅せずに摩耗粒子のトラップによる摩耗促進を防いでいること、図7(a)からボール側の摩耗も最小となっていることがわかる。

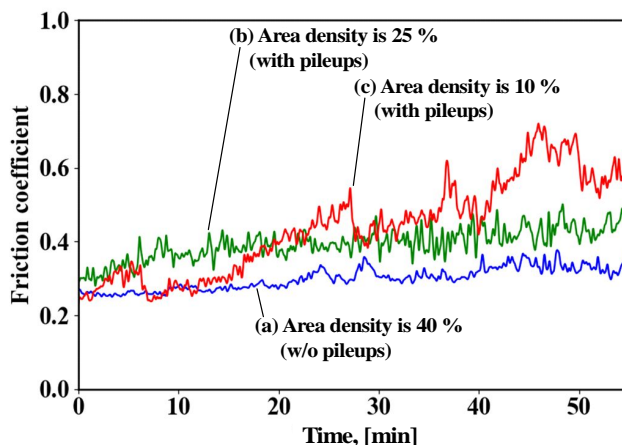


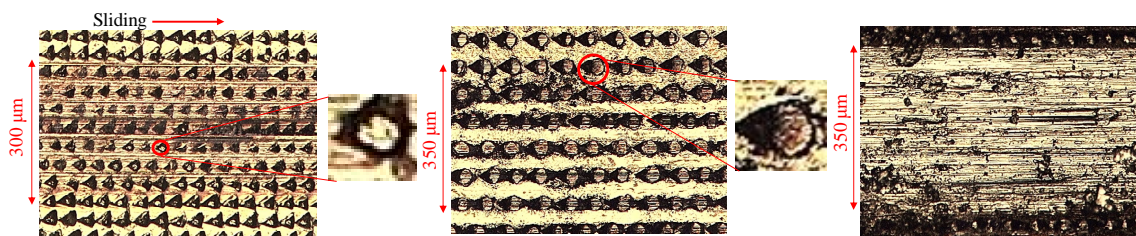
図5 乾式すべりにおける摩擦係数の経時変化

それに対し、図5(b)、(c)の面積密度25%と10%でバリありの場合、摩擦係数は図5(a)よりも全般的に高く、また、面積密度が低くなるほど摩擦係数は高くなる

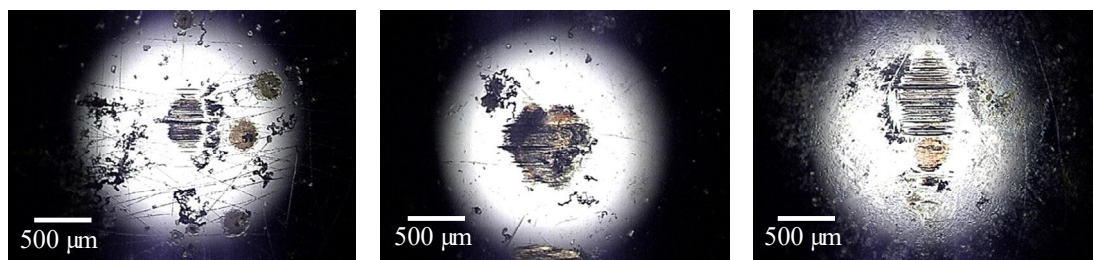
ことがわかる。これは、図6(b)、(c)の残存テクスチャ、図7(b)、(c)のボールの摩耗と比べても明らかである。これらの結果は、比較的高いテクスチャ面積密度と鏡面加工によるバリ除去による摩擦・摩耗低減となじみ促進の効果が高いことを実証するものである。

(3)アルミニウム合金平板上へのテクスチャの製造結果

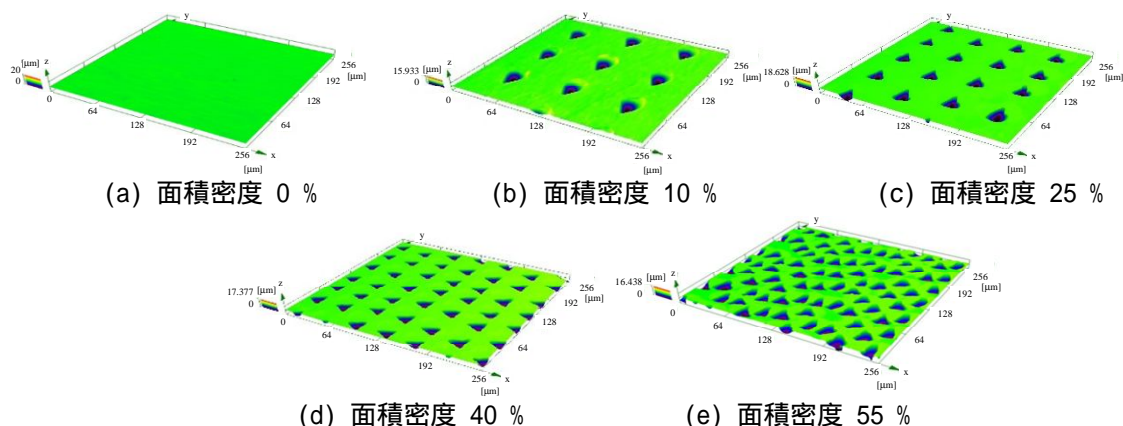
切削速度（周速）と送り速度を適宜制御し、平均切込み深さ0 μm、振動周波数50 Hz、振幅9 μmで切込み深さ方向の振動を用いた振動援用切削により、アルミニウム合金平板上に製造されたテクスチャ表面の代表的な観察結果を図8に示す。乾式試験でバリ除去の優位性は確認されたため、いずれもオンマシンでバリを除去している。図8より、いずれの場合も、深さ7~8 μmの圧痕状のパターンが周期的に配置され所望の面積密度（設定値）が得られていることがわかる。



(a) 面積密度40%（バリなし） (b) 面積密度25%（バリあり） (c) 面積密度10%（バリあり）
図6 すべり試験後のテクスチャ表面の観察結果



(a) 面積密度40%（バリなし） (b) 面積密度25%（バリあり） (c) 面積密度10%（バリあり）
図7 すべり試験後のボール表面の観察結果



(a) 面積密度0% (b) 面積密度10% (c) 面積密度25% (d) 面積密度40% (e) 面積密度55%
図8 湿式すべり試験に用いたA6061平板上のテクスチャ

(4) 湿式すべり試験によるアルミニウム合金平板上に設けた表面テクスチャの摩擦評価結果

図9は、図8に示した鏡面と4種類のテクスチャ表面に対する湿式(市販のエンジンオイル5 μ l)すべり試験(すべり速度0.057 m/s)により得られた摩擦係数の経時変化を示している。

面積密度(a)0%の摩擦係数が最大となり、次いで(b)10%、(c)25%、(e)55%の順に低くなっている様子が把握できる。そして、面積密度(d)40%の場合は、2分程度で摩擦係数が0.055程度の一定の値に落ち着くという、きわめて短時間でなじみ、また最低の摩擦係数を示している。この結果から、乾式の場合と同様に、40%程度という比較的に高いテクスチャ面積密度で、オンマシン鏡面切削によってバリを除去したテクスチャ表面において、短時間のなじみと最低の摩擦を得られることがわかった。しかしながら、すべり速度を少し高くした場合は、面積密度55%の場合に摩擦係数が最低を示したことから、さらに広範囲のすべり速度に対してすべり特性を調査することが重要なことも明らかになった。

(5) まとめ

切削工具として三角錐ダイヤモンド圧子を切込み深さ方向へ振動させつつ微小切削する方式により、金属しゅう動表面上に圧痕状パターンの周期的な配置によるテクスチャを製造する方法を開発した。本方式において、オンマシンの微小切削を追加すると、圧痕状パターン周囲に生じた塑性盛りを除去することができる。本方式により製造されたテクスチャ表面に対し、乾式および湿式環境下においてボールオンディスクすべり試験を試みた結果、面積密度が比較的に高いテクスチャ表面において、平面や単純切削溝によるテクスチャ表面に比べ、摩擦係数は低くなるとともに、なじみ状態に到達する時間も短縮されることが明らかになった。よって、本テクスチャ製造方式が、きさげ作業の置換技術に十分なり得ることを示せたといえる。

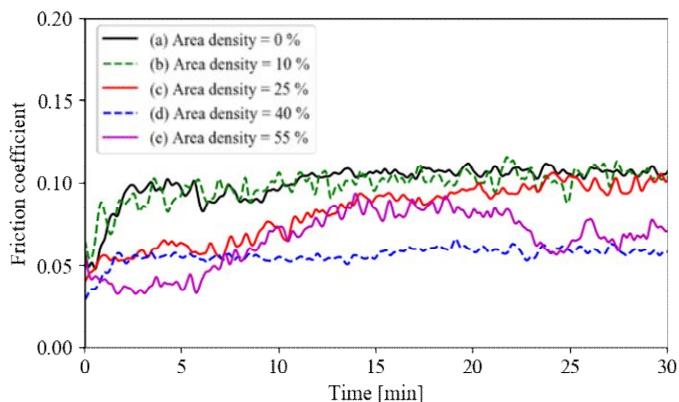


図9 湿式すべり試験における摩擦係数の経時変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1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 Jun Shimizu, Tomotaka Nakayama, Kouta Watanabe, Takeyuki Yamamoto, Teppei Onuki, Hiroataka Ojima, Libo Zhou	4. 巻 149
2. 論文標題 Friction Characteristics of Mechanically Microtextured Metal Surface in Dry Sliding	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Tribology International	6. 最初と最後の頁 105634
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.triboint.2019.02.042	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 清水 淳	4. 巻 85
2. 論文標題 砥粒による原子スケール材料除去過程の分子動力学シミュレーション	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 精密工学会誌	6. 最初と最後の頁 314-317
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2493/jjspe.85.314	査読の有無 無
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 清水 淳	4. 巻 67
2. 論文標題 微小振動援用切削加工を用いた表面テクスチャリング加工技術	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 トライボロジスト	6. 最初と最後の頁 337-342
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18914/tribologist.67.05_337	査読の有無 無
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9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 山本武幸, 清水 淳, 周 立波, 小貫哲平, 尾島裕隆, 菊池晃太
2. 発表標題 振動援用切削による表面テクスチャの摩擦特性（第4報） - 境界潤滑条件下における検討 -
3. 学会等名 精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清水 淳, 山本武幸, 周 立波, 小貫哲平, 尾島裕隆, 菊池晃太
2. 発表標題 振動援用切削によるテクスチャ表面の乾式すべり特性
3. 学会等名 砥粒加工学会学術講演会 (ABTEC2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清水 淳, 中山智隆, 山本武幸, 周 立波, 小貫哲平, 尾島裕隆
2. 発表標題 微小振動援用切削テクスチャ表面のなじみ特性に関する検討 (第4報) - 容積と面積密度の影響 -
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 秋 別府
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菊池晃太, 山本武幸, 清水 淳, 周 立波, 小貫哲平, 尾島裕隆
2. 発表標題 振動援用切削による表面テクスチャの摩擦特性 (第5報) - 境界潤滑における油量の影響 -
3. 学会等名 精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jun Shimizu, Tomotaka Nakayama, Takeyuki Yamamoto, Hirotaka Ojima, Teppei Onuki, Libo Zhou
2. 発表標題 Friction Characteristics of Textured Metal Surfaces by Vibration-assisted Microcutting in Dry Sliding
3. 学会等名 18th International conference on Precision Engineering (ICPE2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清水 淳, 中山智隆, 渡辺康太, 山本武幸, 周 立波, 小貫哲平, 尾畠裕隆
2. 発表標題 微小振動援用切削テクスチャ表面のなじみ特性に関する検討 (第3報) - 塑性盛り除去と被覆率の効果 -
3. 学会等名 日本トライボロジ 学会トライボロジー会議2019春
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本武幸, 中山智隆, 清水 淳, 周 立波, 小貫哲平, 尾畠裕隆
2. 発表標題 振動援用切削による表面テクスチャの摩擦特性 (第2報) - テクスチャ面積密度の影響 -
3. 学会等名 精密工学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jun Shimizu, Tomotaka Nakayama, Takeyuki Yamamoto, Libo Zhou, Teppei Onuki, Hirotaka Ojima
2. 発表標題 Friction Characteristics of Textured Surfaces by Vibration-Assisted Microcutting in Dry Sliding
3. 学会等名 International Tribology Conference (ITC 2019), Sendai (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清水 淳, 山本武幸, 中山智隆, 周 立波, 小貫哲平, 尾畠裕隆
2. 発表標題 振動援用切削による表面テクスチャの摩擦特性 (第3報) - 塑性盛上りの除去による効果 -
3. 学会等名 精密工学会春季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

NANO-ENGINEERING LAB. (nLab)
<https://sites.google.com/site/nlabibarakiuniv/>

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	清水 淳 (Shimizu Jun) (40292479)	茨城大学・理工学研究科(工学野)・教授 (12101)	
研究分担者	小貫 哲平 (Onuki Teppei) (70400447)	茨城大学・理工学研究科(工学野)・准教授 (12101)	
研究分担者	周 立波 (Zhou Libo) (90235705)	茨城大学・理工学研究科(工学野)・教授 (12101)	
研究分担者	尾嶌 裕隆 (Ojima Hirotaka) (90375361)	茨城大学・理工学研究科(工学野)・准教授 (12101)	

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