

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02046

研究課題名（和文）金属接触面における変形挙動の直接測定による接触モデルの再構築と接触面形状の設計法

研究課題名（英文）Reconstruction of contact model and design method of contact surface geometry by direct measurement of deformation behavior on metal contact surfaces

研究代表者

河野 大輔 (Kono, Daisuke)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80576504

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,100,000円

研究成果の概要（和文）：マイクロX線CTによる変位測定，光弾性法による応力測定，有限要素法を用いた弾塑性変形のシミュレーションを組み合わせることで，金属-金属間の接触面の変形状態を3次元的に解析した．接触剛性における微小突起の変形と応力集中領域の変形の寄与を明らかにした．接触減衰における弾塑性変形とスリップの影響を明らかにした．切削加工痕を交差させて接触面を形成するCutter Mark Cross法にもとづいて，接触面を設計するためのモデルを構築した．接触剛性を低下させずに接触剛性を増大させる方法として，微小隙間に減衰材を充填する方法と，加工痕高さに差を設けてスティック・スリップの割合を変化させる方法を提案した．

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来は現象論的なモデルを用いて推定していた接触剛性と接触減衰を決定論的なモデルで推定できることが明らかになったことは接触面形状の設計において大きな意義を持つ．また，接触面の微小隙間の利用や真実接触面のスティック・スリップの割合を変化させる方法は剛性と減衰性の設計だけでなく，把持部などの滑りが許容されない接触面の設計においても有用であり，これからの発展が期待できる．荷重を負荷した状態のIn-situなX線CT測定と有限要素法を組み合わせることで3次元的な変形を詳細に解析する技術は，一般的な機械部品の変形解析に広く応用できる技術であり，可視化の難しい内部の変形解析の発展に寄与できる．

研究成果の概要（英文）：The deformation of metal-metal contact surfaces was analyzed in three dimensions by combining displacement measurements using micro X-ray CT, stress measurements using the photoelastic method, and simulations of elasto-plastic deformation using the finite element method. The contribution of the deformation of microscopic asperities and the deformation of the stress concentration region to the contact stiffness was clarified. The effects of elasto-plastic deformation and slip on contact damping were clarified. A model for designing contact surfaces was constructed based on the Cutter Mark Cross method, in which contact surfaces are formed by intersecting machining marks. Two methods were proposed to increase the contact stiffness without decreasing the contact stiffness: one is to fill the small gap with damping material, and the other is to vary the ratio of stick-slip by setting a difference in the height of the machining marks.

研究分野：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：接触剛性 接触減衰 X線CT 光弾性法 弾塑性変形 滑り

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

工作機械には組み立てや運搬の理由から、ボルト結合部などの結合部が多くある。結合部における金属接触面の剛性と振動の減衰特性(減衰係数)は工作機械全体の特性にしばしば大きな影響を与える。特に、接触面の振動エネルギー減衰は機械全体の減衰において50%以上を占めるといわれており、重要である。

しかし、接触面の变形挙動の観察に基づいたモデルによる系統的な接触剛性・減衰係数の設計は行われていない。接触面の剛性と減衰係数のモデル化は古くから研究されている。しかし、これらのモデルは、実験的なパラメータが必要、真実接触面の分布の不均一さの影響を考慮しておらず、剛性と減衰係数の推定精度が悪い、そもそも接触面での振動の減衰メカニズムが明らかでなく信頼性が低い、という理由から、機械設計では応用されない。

従来の剛性モデルでは、微小突起の弾性変形のみを考慮している。しかし実際には、接触面近傍では真実接触面積の局所化によって応力集中が生じており、応力を負担している部分の体積が見かけよりも減少することで、剛性の低下に寄与していると考えられる。接触面における減衰係数に関しては、未解明なことが多い。接触面全体がマクロに滑らない状態でも、接触面内で幾つかの真実接触部が局所的に滑る(マイクロスリップ)、もしくは塑性変形することが振動の減衰に寄与すると考えられている。しかし、接触中の接触面内部の变形挙動を3次元かつ μm スケールで観察するのは難しいため、振動の減衰メカニズムを実験的に検証することは困難であり、これまでに検証した例はない。

2. 研究の目的

本研究では、直接測定に基づいて接触面の变形挙動を明らかにし、剛性と減衰特性の目標仕様に対する接触面の設計方法を確立する。具体的には、以下の(A)~(C)に取り組む。

- (A) 接触面の变形挙動の直接測定に基づいて接触部の变形モデルを構築する。マイクロ X 線 CT と光弾性法による応力測定によって、接触中の鉄鋼材料同士の变形状態を、非破壊かつ3次元的に観察・測定する。
- (B) 接触剛性の再現性を向上させ、かつ剛性を増大させる方法を提案する。接触剛性の低下と低い再現性の主原因は真実接触部が偏って分布すること(片当たり)と考えられる。研究代表者は、真実接触部が均一に、かつ決まった位置で生じるための接触面形状の設計法である Cutter Mark Cross 法(CMC 法)を提案している。本方法では、片当たりの状態と比較して剛性の再現性が向上し、剛性が増大する。(A)で明らかにした变形モデルに基づき、接触面近傍での応力集中の剛性への寄与を考慮して表面形状を最適化することで、CMC 法の効果を最大化する。
- (C) 剛性と減衰係数のトレードオフを打破する方法を提案する。本方法により、剛性と減衰係数のある程度の範囲で独立に設計することを可能にする。真実接触部以外の空隙部に機能性材料を充填し、減衰係数を増大させる。この充填によって真実接触部は影響を受けないため、剛性の低下は起こらない。

3. 研究の方法

(3-1)接触面の变形挙動の直接測定に基づいた接触部の变形モデル構築

接触剛性のモデル構築のために、まず变形測定と応力測定に対応付けが可能な金属-ガラス接触面の变形挙動解析を、光弾性法を用いて行う。測定結果と有限要素法を用いたシミュレーション結果を比較し、接触剛性に対する微小突起の弾性変形と応力集中領域の弾性変形の寄与を明らかにする。また、マイクロ X 線 CT を用いて、接触中における金属-金属接触面の3次元的な変形を測定する。減衰モデルの構築のため、マイクロ X 線 CT を用いて接触部の3次元の变形挙動を観察し、局所的なスリップと塑性変形の調査を行う。接線方向の荷重を徐々に大きくした場合の接触面形状を測定・比較することで、局所的なスリップや塑性変形がどのように生じるかを調べる。さらに、測定結果と有限要素法を用いたシミュレーションを組み合わせて、局所的なスリップと塑性変形が減衰性にどの程度の寄与をもつか明らかにする。

(3-2)接触剛性の増大と再現性向上のための接触面設計法

CMC 法において、接触剛性を最大化できる切削痕形状を設計する。微小突起の弾性変形と応力集中領域の弾性変形の寄与に基づいて、どちらの要因をどの程度重視するべきかを決定する。設計した表面形状を持つ試験片を製作し、剛性の増大と再現性の向上効果を実験によって検証する。また、光弾性法を用いた応力測定によって、表面形状の最適化によって応力集中領域の大きさがどの程度低減できるかを検証する。

(3-3) 剛性と減衰係数のトレードオフを打破する方法の提案

接触面における真実接触部以外の空隙部に機能性材料を充填することで、減衰係数を増大させる方法の効果を検証する。材料には、高減衰性エラストマが好適と考える。また、接触面における局所的な滑りを積極的に生じさせる方法を提案する。

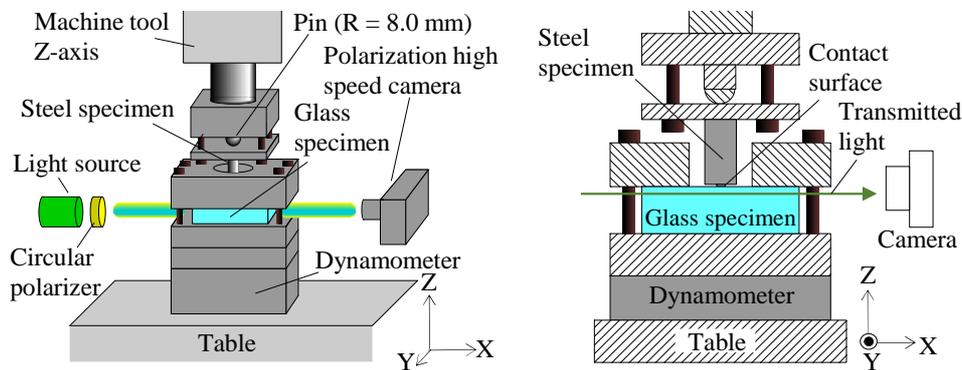
4. 研究成果

(3-1) 接触面の変形挙動の直接測定に基づいた接触部の変形モデル構築

光弾性法を用いた金属 - ガラス接触面近傍の応力測定実験と有限要素法を用いた弾性解析を組み合わせることにより、接触面近傍における応力集中領域の変形が接触剛性に与える影響を調査した。応力測定実験は図1に示す測定セットアップを構築して実施した。図2に示した測定結果と解析結果の例のように、有限要素法を用いて応力分布をよく再現することができた。真実接触部の分布が均一な場合と不均一な場合で応力集中領域の変形を調査したところ、同変形は接触面の突起の変形の50%~100%の大きさとなる場合があり、接触剛性の推定において無視できないことが分かった。

金属 - 金属接触面に垂直荷重および接線荷重を負荷した場合の変形解析を、X線CTを用いた実験と有限要素法を用いたシミュレーションの比較により行った。図3に測定のために開発した荷重負荷装置を用いたセットアップを示す。本装置は接触面の接線方向にX線を透過させ、接触面の垂直方向周りに回転させながらX線スキャンするための装置であり、予圧のための垂直荷重を負荷した状態で、接線荷重を負荷することができる。

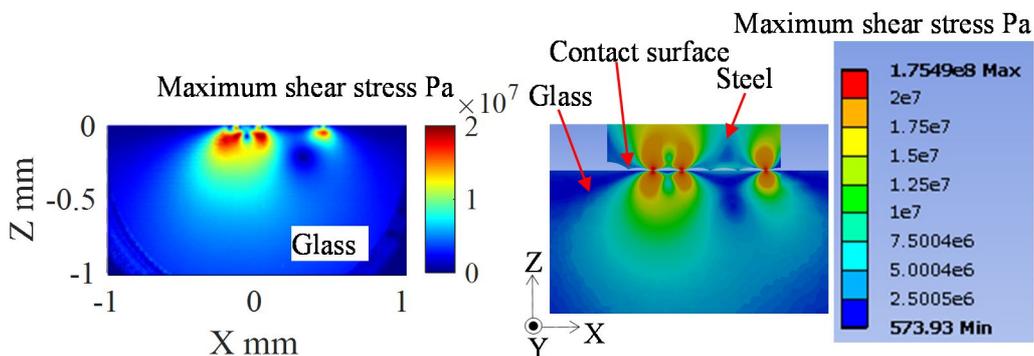
図4に示すように、X線CTを用いることで、静的荷重負荷下にある接触面の変形挙動を、材料の内部に至るまで三次元的かつマイクロメートルスケールで観察することができた。また、図5に示すように、有限要素法を用いた弾塑性解析において摩擦力の働くスリップを考慮することで、シミュレーションの結果はX線CTによる観察の結果と定性的、定量的によく一致した。このため、接触面の三次元モデルを作成することができれば、接触面における剛性と減衰性をシミュレートすることができると言える。接線荷重 - 接線変位の関係におけるヒステリシスループから接触面で散逸されるエネルギーを求め、散逸エネルギーにおける弾塑性変形と滑りの寄与をシミュレーションにより調べた。すると、 $1\mu\text{m} \sim 15\mu\text{m}$ の接線変位の範囲では、両者の寄与は同程度であることが分かった。



(a) 全体図

(b) 断面図

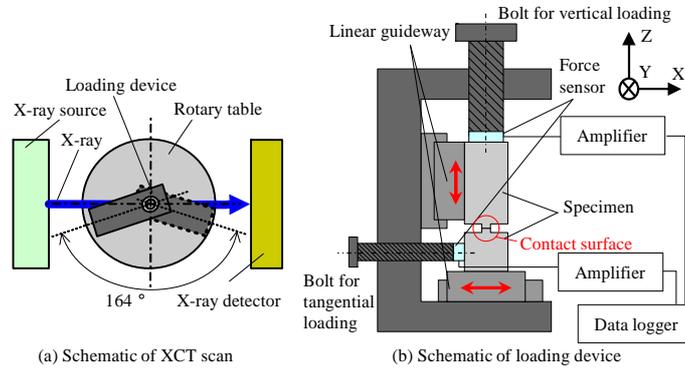
図1 接触面近傍の応力分布を測定するための実験セットアップ[1]



(a) 測定結果

(b) シミュレーション結果

図2 接触面近傍の応力分布[1]



(a) X線CTにおけるスキャンの様式図 (b) 荷重を負荷するためのセットアップ

図3 接触面に荷重を負荷した状態でのX線CT測定のセットアップ[2]

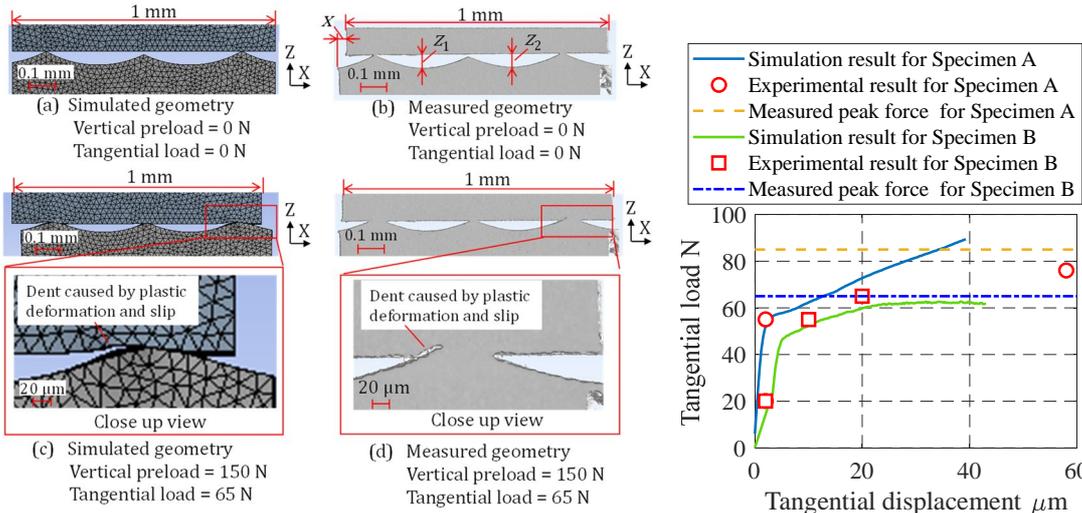


図4 接触面の変形の測定結果とシミュレーション結果[2] 図5 接線変位と接線荷重の関係[2]

(3-2)接触剛性の増大と再現性向上のための接触面設計法

Cutter Mark Cross 法を適用した接触面において、マルチスケールモデルを用いて接触面を設計する方法を構築した。Cutter Mark Cross 法では、図6に示すように切削痕を交差させて接触させることで真実接触点での大きな塑性変形を生じさせる。この塑性変形によって、接触面になりががあっても真実接触点を均一に分布させる。このため、片当たりによる応力不均一層での変形を低減し、かつ接触剛性の再現性を高めることができる。接触面の設計では、図7に示すようにカスプ2つ分の微小領域の剛性を有限要素法で求め、求めた剛性をばねとして接触面に均一に分布させて接触面全体の剛性を求める。片当たりがあり得る状況では、例えば均一な接触を想定した場合と比較して剛性が半分程度に低下してしまふことがあり得るため、剛性の推定誤差が大きくなる。実験での検証において、提案する設計法を用いて接触剛性を15%以下の誤差で推定できた。また、カスプのピッチと応力不均一層の厚さは比例しており、カスプピッチを小さくすることで接触剛性を高めることができる。しかし、カスプピッチを小さくした場合は真実接触点の増加によって、各接触点での塑性変形量が小さくなるため、許容できるうねりが小さくなってしまふ。

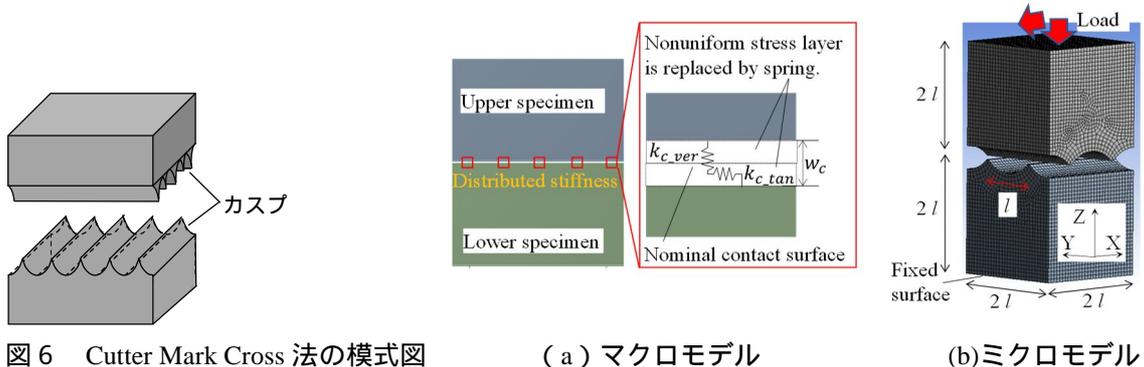


図6 Cutter Mark Cross 法の模式図

(a) マクロモデル

(b) ミクロモデル

図7 接触面設計のためのマルチスケールモデル[1]

(3-3) 剛性と減衰係数のトレードオフを打破する方法の提案

図8に示すように、接触面の微小突起に高さ差を設け、高い突起では強い接触、低い突起では弱い接触を生じさせることで、強い接触部で剛性を保ち、弱い接触部でスリップによって減衰性を向上させる方法を提案した。切削加工面を対象とし、カスプ高さに差をつけることを想定したシミュレーションを行い、 $5\mu\text{m}$ のカスプ高さ差を設けることで、カスプ高さ差を設けない場合と比較して、約2倍の減衰性が得られた。このとき、剛性は低下するが、その低下率は20%程度にとどまっており、剛性と減衰性の間のトレードオフをある程度解消できると言える。シミュレーションと同様のカスプ高さ差をもつ試験片を作製し、実験にて接触面の剛性と減衰性を評価した。実験では、シミュレーションと異なり、全体的にはカスプ高さ差が大きくなるほど剛性・減衰性の両方が低下する傾向が見られた。しかし、カスプ高さ差を $10\mu\text{m}$ とした場合は20~30%減衰性が向上できた結果も得られており、提案手法が有効である可能性が示された。シミュレーションと実験で結果が異なる原因は、加工誤差によって想定したカスプ高さ差が得られていないことであると考えられる。

接触面間の隙間に高い減衰性を持つ粘弾性体を充填することで、接触減衰を向上させる方法を提案した。具体的には、粘弾性体の変形に伴って生じる材料減衰や、粘弾性体と金属の境界面で発生する滑りによる減衰によって、接触減衰が向上する。この手法では、粘弾性体の充填によって金属接触面の微小突起同士の接触状態は変化しない。したがって、接触剛性を低減させずに接触減衰を向上させることができる。接触面接線方向の剛性と減衰性を評価した実験結果を図9に示す。提案法により、接線方向の剛性変化を14%以内に抑えつつ、接線方向の減衰性を最大で119%向上させることができた。

<参考文献>

[1] Kono D, Jorobata Y, Isobe H. Holistic multi-scale model of contact stiffness considering subsurface deformation. CIRP Ann. 2021;70: 447–450.

[2] Kono D, Yamazaki T, Ishii T, Kimura M. Analysis of tangential contact damping mechanism by direct observation using X-ray computed tomography. CIRP Ann. 2022;71: 485–488.

[3] Saito S, Kono D, Investigation on damping properties of contact surfaces with different asperity heights, Euspen's 23rd International Conference & Exhibition, accepted, Copenhagen, Denmark, June 12-16, 2023.

[4] 山崎太資, 河野大輔. 接触面間の隙間を利用した接触面での剛性を低減させずに減衰性を向上させる手法. 精密工学会学術講演会講演論文集. 2020;2020A: 95-96.

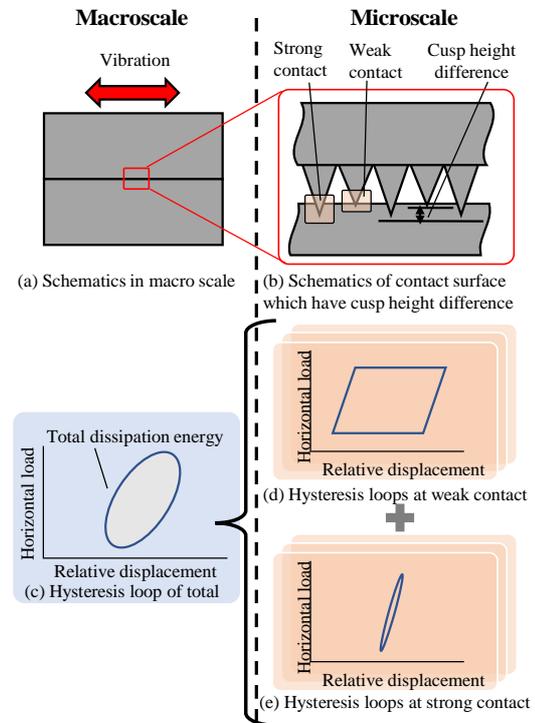
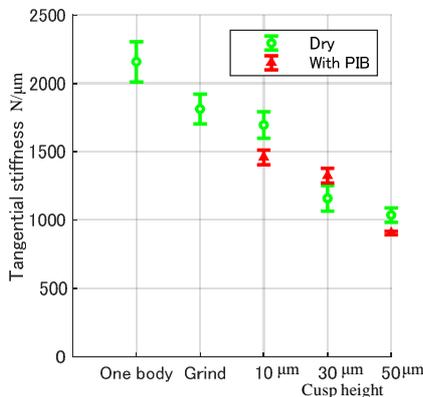
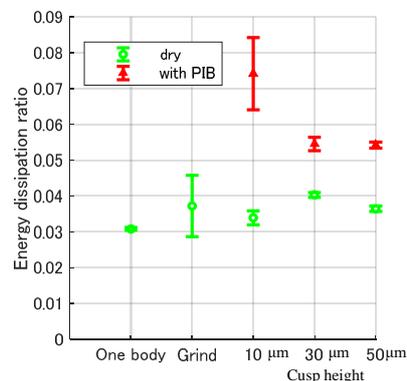


図8 接触面の微小突起に高さ差を設けて剛性と減衰性を両立させる方法[3]



(a) 剛性の比較



(b) 減衰性の比較

図9 イソブチレン(PIB)を挿入した接触面の剛性と減衰性の比較[4]

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Kono Daisuke, Yamazaki Taisuke, Ishii Tomohiro, Kimura Masao | 4. 巻 71 |
| 2. 論文標題 Analysis of tangential contact damping mechanism by direct observation using X-ray computed tomography | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 CIRP Annals | 6. 最初と最後の頁 485 ~ 488 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cirp.2022.04.027 | 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 Kono Daisuke, Jorobata Yuki, Isobe Hiromi | 4. 巻 70 |
| 2. 論文標題 Holistic multi-scale model of contact stiffness considering subsurface deformation | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 CIRP Annals | 6. 最初と最後の頁 447 ~ 450 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cirp.2021.04.030 | 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 Jorobata Yuki, Kono Daisuke | 4. 巻 63 |
| 2. 論文標題 Cutter mark cross method for improvement of contact stiffness by controlling distribution of real contact area | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Precision Engineering | 6. 最初と最後の頁 197 ~ 205 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.precisioneng.2020.03.001 | 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 木村 正雄 | 4. 巻 64 |
| 2. 論文標題 構造材料のき裂・劣化のその場観察 ~ 放射光によるX線顕微法および時分割計測法 ~ | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 表面と真空 | 6. 最初と最後の頁 206 ~ 211 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/vss.64.206 | 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17件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shimpei Saito, Daisuke Kono |
| 2. 発表標題 Investigation on damping properties of contact surfaces with different asperity heights |
| 3. 学会等名 euspen 's 23rd International Conference & Exhibition (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 齋藤慎平, 河野大輔 |
| 2. 発表標題 接触突起高さに差を設けた試験片における水平方向荷重負荷時の突起変形挙動の調査 |
| 3. 学会等名 2023年度精密工学会春季大会学術講演会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 齋藤 慎平, 河野 大輔 |
| 2. 発表標題 異なる突起高さを持つ接触面での減衰性に関する研究 |
| 3. 学会等名 日本機械学会第 14 回生産加工・工作機械部門講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shimpei Ssaito, Daisuke Kono, Hiromi Isobe |
| 2. 発表標題 Study on stress distribution variation near contact surface in sliding of contact asperities |
| 3. 学会等名 The 19th International Conference on Precision Engineering (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 木村正雄 |
| 2. 発表標題 マルチスケール&マルチモーダルX線顕微鏡による計測とそのビッグデータ解析 |
| 3. 学会等名 学振R026先端計測技術の将来設計委員会 (2022.7.4 東京) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 高島孝太, 亀ヶ谷尚志, 櫻田陽, 原圭祐, 河野大輔, 田浦裕生, 辻尚史, 磯部浩己 |
| 2. 発表標題 超音波振動切削により創成された表面テクスチャにおける真実接触状態の可視化 |
| 3. 学会等名 2022年度精密工学会秋季大会学術講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kota TAKASHIMA, Akira SAKURADA, Keisuke HARA, Daisuke KONO, Hiroo TAURA, Naofumi TSUJI, Hiromi ISOBE |
| 2. 発表標題 Evaluation of Tribological Properties of Surface Textures Generated by Ultrasonic Vibration Cutting |
| 3. 学会等名 The 19th International Conference on Precision Engineering (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 高島孝太, 櫻田陽, 河野大輔, 辻尚史, 川村拓史, 原圭祐, 磯部浩己 |
| 2. 発表標題 超音波振動切削により創成された表面テクスチャにおける真実接触状態の可視化 (第2報) - 3次元有限要素法による内部応力の解析 - |
| 3. 学会等名 2023年度精密工学会春季大会学術講演会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 山崎 太資, 石井友弘, 木村正雄, 河野大輔 |
| 2. 発表標題 X線CTによる直接観察に基づく接触面変形挙動の解析 |
| 3. 学会等名 公益社団法人精密工学会2021年度精密工学会秋季大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Taisuke Yamazaki, Tomohiro Ishii, Masao Kimura, Daisuke Kono |
| 2. 発表標題 Direct observation of contact surface deformation |
| 3. 学会等名 The 10th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 日向寺 柁, 櫻田陽, 原圭祐, 河野大輔, 田浦裕生, 辻尚史, 磯部浩己 |
| 2. 発表標題 超音波振動切削による表面テクスチャ創成技術と有用性の評価 (第2報) 起動摩擦の評価 |
| 3. 学会等名 公益社団法人精密工学会2021年度精密工学会秋季大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 高島孝太, 櫻田陽, 原圭祐, 河野大輔, 田浦裕生, 辻尚史, 磯部浩己 |
| 2. 発表標題 超音波振動切削による表面テクスチャ創成技術と有用性の評価 (第3報) -外周面へのテクスチャ創成と摺動特性の評価- |
| 3. 学会等名 2021年度精密工学会北陸信越支部学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 寺林雅将, 石毛雅樹, 丸山智義, 辻尚史, 河野大輔, 磯部浩己 |
| 2. 発表標題 光弾性光学系における撮影距離および被写界深度が位相差分布におよぼす影響 |
| 3. 学会等名 2021年度精密工学会北陸信越支部学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 高島孝太, 櫻田陽, 原圭祐, 河野大輔, 田浦裕生, 辻尚史, 磯部浩己 |
| 2. 発表標題 超音波振動切削による表面テクスチャ創成技術と有用性の評価(第4報)ー加工条件とトライボロジー特性の関係評価ー |
| 3. 学会等名 公益社団法人精密工学会2022年度精密工学会春季大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山崎太資, 河野大輔 |
| 2. 発表標題 接触面間の隙間を利用した接触面での剛性を低減させずに減衰性を向上させる手法 |
| 3. 学会等名 2020年度精密工学会秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山崎 太資, 石井友弘, 木村正雄, 河野大輔 |
| 2. 発表標題 X線CTを用いた静的荷重負荷下における接触面の变形観察 |
| 3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 磯部浩己, 田浦裕生, 近藤礼皇, 原圭祐, 宮脇和人, 櫻田陽, 辻尚史, 河野大輔 |
| 2. 発表標題 超音波振動切削による微細テクスチャの高速創成 第一報 加工装置の構築と機能性評価 |
| 3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会 |
| 4. 発表年 2021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 | 木村 正雄 (Kimura Masao) (00373746) | 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授 (82118) | |
| 研究分担者 | 磯部 浩己 (Isobe Hiromi) (60272861) | 長岡技術科学大学・工学研究科・教授 (13102) | |

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 |
|---------|---------|