

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02486

研究課題名(和文)超音波振動援用ナノインデンテーションによる微細形状の高精度テキスチャリング

研究課題名(英文)High precision texturing of micro shape with ultrasonic vibration assisted indentation

研究代表者

鈴木 浩文(SUZUKI, HIROFUMI)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：20282098

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：高能率加工を行うために変形加工である「ナノインデンテーション」に着目し、レーザ加工を応用した単結晶ダイヤモンド等のマイクロ圧子を創成し、超音波振動援用のナノインデンテーションシステムを開発し、超音波振動を付加することによる無電解Ni-Pなどのアモルファス金属材料の高精度・高能率塑性変形特性を明らかにし、微細で構造的な超精密形状の創成の高精度・高能率加工を実現することを検討した。その結果、無酸素銅、黄銅、無電解Ni-Pなどの精密金型材料に対して、高精度で高能率に微細加工できるを示した。最後に、テキスチャリングの効果について評価実験を実施し、光学的な効果と生体的な効果について示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

表面にナノ・マイクロメートルレベルのテキスチャリング創成のニーズが増大し、光学レンズの回折効果の付加・色消し効果の付加、歯科用Tiインプラントの生体細胞融合性の向上、表示パネルの反射防止機能の付加、ソーラパネルの吸収率の向上、撥水性の向上など様々な効果が期待されている。従来の切削加工に比べて効率の悪い、量産性が期待できるため、テキスチャリング基板や金型の高精度で高能率な加工が実現できるなど、実用面の意義が深い。

研究成果の概要(英文)：An ultrasonic vibration-assisted indentation system/method is proposed and developed to fabricate structured or textured surfaces more precisely and efficiently than the conventional micro-cutting process. Indenters made of single crystalline diamond (SCD) were fabricated by laser fabrication and polishing with diamond abrasives on a cast iron plate. In the experiments, the microarray molds of four-corner cone and semi-sphere shapes were generated precisely on the electroless Ni-P substrate with ultrasonic vibration-assisted indentation using the SCD indenters. From the indentation experiments, it is clear that the microtextured patterns were formed precisely and effectively by using the developed indentation system. Finally, the effects of the textured patterns were evaluated experimentally, and their effects were clarified in the optical devices and medical devices.

研究分野：精密加工

キーワード：マイクロインデンテーション 超音波振動援用 アモルファス金属 テクスチャリング ダイヤモンド圧子 レーザ加工

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、研究者個人に帰属します。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

近年、表面にナノ・マイクロメートルレベルの微細なパターンを創成するテキスチャリングのニーズが増大している。これにより、光学レンズの回折効果の付加・色消し効果の付加、歯科用 Ti インプラントの生体細胞融合性の向上、表示パネルの反射防止機能の付加、ソーラパネルの吸収率の向上、撥水性の向上など様々な効果が期待でき、下記の様に超精密・微細テキスチャリングの需要が増大している。

(1) 光学系レンズの成型型：回折レンズ、赤外レンズ等の車載センサ、内視カメラ、マイクロカプセル等の医療デバイス等において、素子の形状のテキスチャリング化、ガラス化、マイクロ（微小）化、高精度化が求められ、量産成形するための「テキスチャを創成した成型型の超精密微細加工」が不可欠である。

(2) 歯科用 Ti インプラント：生体細胞と適合性が優れるチタン (Ti) は既に人工骨にも用いられ、最近の研究では歯科 Ti インプラント表面に 10 $\mu$ m 幅程度の微細溝を設けると生体融合性が高まるとの報告がある。Ti は難削材であり微細加工が困難である。

(3) 表示デバイス用反射防止機能表面：スマートフォン、液晶パネルや車載表示パネルに、光の波長レベルの段差の微細なパターンを創成することにより、表示パネルの反射光を防止する効果が付加できる。

(4) その他、撥水性の向上、光の吸収率の向上、汚れの付着の防止機能などが有るが割愛する。このように様々なテキスチャリング付加の効果があるが、多くは量産成形するため、高精度・高能率のテキスチャリングがキー技術となっている。

これまでは「切削加工」などの機械的除去加工で実施されているが、効率の悪い、量産性が劣るなど実用化に大きな課題が有る。そこで、レーザ加工法よりダイヤモンド圧子を作製し、超音波振動援用インデンテーションシステムを開発し、高能率にテキスチャを創成することを提案した。

### 2. 研究の目的

従来は「切削加工」などの機械的除去加工で実施されるが、効率が悪い、量産性が劣るなど実用化に大きな課題が有る。一方、本提案の「超音波振動援用ナノインデンテーションによる微細形状の高精度テキスチャリング」では、超音波振動を援用しながらインデンテーション（圧入）を行うため、小さな押し込み圧力で金属やアモルファス材料の微細形状の高精度・高能率転写加工が可能であることが予備実験の結果から明らかとなっている。単純な圧子による押し込み加工では微細形状の高精度高能率加工が困難であるが、それに反して、(1) なぜ超音波を付加することにより低圧力で材料の塑性流動が生じるのか、(2) 高精度・高能率転写加工ができるのかを、塑性流動解析、実験的検証により、明らかにすることを本研究の目的としている。実験では様々な形状のインデンテーション圧子をレーザ加工により試作し、超音波インデンテーションシステムにより微細なテキスチャ成形金型などを創成し、その効果を明らかにした。

### 3. 研究の方法

(1) レーザ光走査装置の設計・試作：パルス・ファイバーレーザ (V-GEN Electro Optics 社) に集光光学系を含むレーザ走査システムの仕様を策定し、光学設計を行い、設計・試作したパルス・ファイバーレーザとレーザ集光光学系を、既存の 4 軸制御・超精密加工機（同時 4 軸制御）に搭載し、加工機上で工具を微細加工できるレーザ光スキャンシステムを試作した。

(2) レーザ光による単結晶ダイヤモンドの加工特性の評価：構築したレーザ光走査装置を用い、単結晶ダイヤモンドに対する基礎的加工特性を評価した。一定時間、レーザ光を単結晶ダイヤモンドに照射すると、エネルギー密度分布により凹面形状に加工され、「単一加工痕」が形成される。この形状が最も良好な粗さ分布が得られるレーザ照射条件を解明した。この単一加工痕の分布形状から、デコンボリューション理論によりレーザ走査軌跡と速度分布を計算し、レーザの 3 次元軌跡を逆算する方法を確立した。滞留時間制御レーザ加工システムを構築し、 $\phi$ 0.5~2mm 程度の単結晶ダイヤモンドの形状誤差分布を最小にするための形状修正手法、レーザ走査条件を明らかにした。

(3) 超音波振動援用ナノインデンテーションシステムの設計・試作：ANSYS を用いて超音波振動解析を行い、システムと最適な振動ホーンの形状を設計した。3 軸制御 NC 駆動装置（高島産業製）に圧電素子型の超音波振動装置（多賀電気製）を取付け、コレットチャックを介して単結晶ダイヤモンド圧子を超音波装置に取付け、プレス力測定のため、金型・ワークジグを動力計（キスラー製）に取り付け、押し付け荷重、圧子の位置を制御するシステムを構築した。

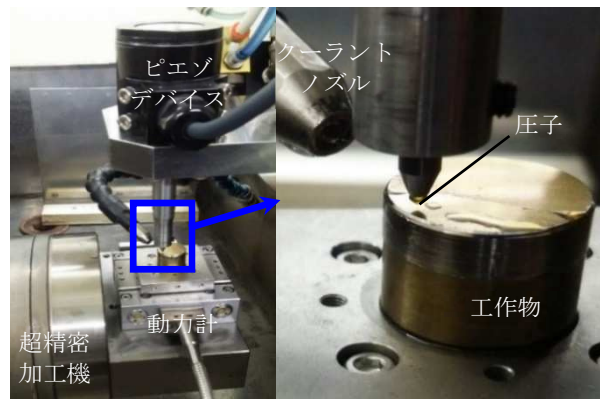
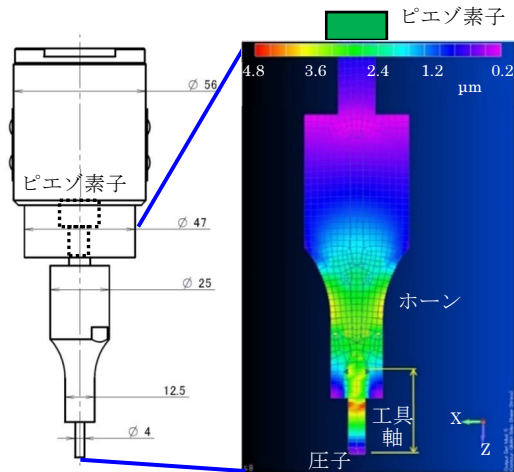
(4) 弾塑性解析による転写性の解析：弾塑性解析モデルを作成し、変形解析を行う。スプリングバックを含む形状の転写性、周辺の盛り上がり量を解析し、押し込み荷重、押し込み速度による押し込み深さ、実加工条件を設定し、基礎インデンテーション実験を行い、押し込み荷重、押し込み速度、超音波振動の振幅を、パラメータとして、押し込み実験を行い、形状精度、転写性、表面粗さ、周辺の盛り上がり量を、レーザプローブ式非接触形状測定器を用いて計測し、評価し、解析値と比

較検討した。

(5) 微細矩形形状のテキスチャリング型の試作：テキスチャリング用の単結晶ダイヤモンド製インデンテータ（圧子）を試作し、微細矩形形状のテキスチャリングの評価を行い、反射防止効果などの光学特性、生体親和性など機能創成の効果を評価した。

#### 4. 研究成果

(1) 開発した超音波振動援用ナノインデンテーション装置を図1に示す。ランジュバン型の圧電素子を用いて超音波振動を創成する。縦方向の超音波振動の振幅はホーンにより増大し、先端のダイヤモンド圧子に伝達する構造である。超音波振動システムを開発するにあたり、図1(b)に示すようにANSYSを用いて超音波振動解析を行い、システムと最適な振動ホーンの形状を設計した。図2に示すように3軸制御NC駆動装置（芝浦機械㈱製 UVM350B）に圧電素子型の超音波振動装置を取付け、単結晶ダイヤモンド圧子はコレットチャックを介して超音波装置に取付けた。また、プレス力測定のため、金型・ワークジグを動力計（キスラー製）に取り付け、押し付け荷重、圧子の位置を制御するシステムを構築した。超音波振動装置の振動数は39kHz、振幅は2~6.2 $\mu\text{m}$ となるようにした。

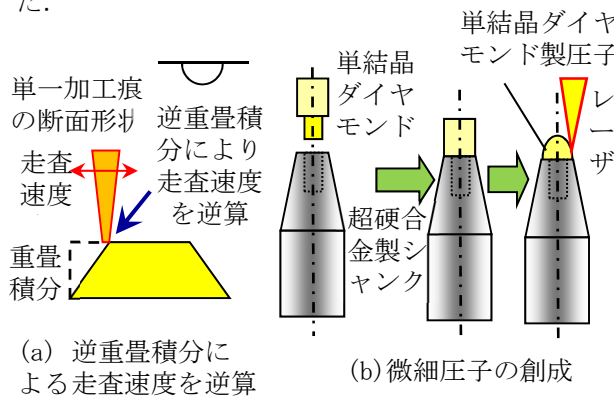


(a) 超音波振動装置 (b) 超音波振動解析

図1 開発した超音波援用インデンテーションシステム

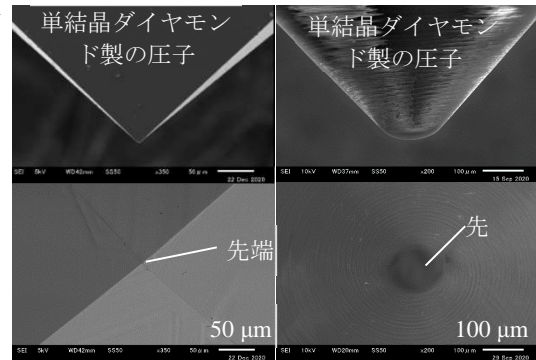
図2 超音波援用インデンテーション装置

(2) 単結晶ダイヤモンド製の圧子は、図3のように滞留時間制御を応用したレーザファブリケーションシステムを構築し試作した。その結果、レーザ光を走査し自由曲面を創成することが出来た。レーザとしてIR YV04 ( $\lambda=1.064\mu\text{m}$ )を使用し、例えば図4に示すような2種類の単結晶ダイヤモンド製の圧子（先端が90度の四角錐形状と曲率半径100 $\mu\text{m}$ の円弧形状）を試作できた。



(a) 逆重畳積分による走査速度を逆算

(b) 微細圧子の創成



(a) 四角錐 (90度) (b) 円錐 (先端100 $\mu\text{m}$  R)

図3 滞留時間制御を応用したレーザファブリケーションシステムによるダイヤモンド圧子の創成

図4 試作した単結晶ダイヤモンド製の圧子

(3) 超音波援用インデンテーションの基礎的特性を把握するために、無電解Ni-P、無酸素銅、6-4黄銅を材料に対して、インデンテーション荷重、インデンテーション深さを変化させて特性を評価した。インデンテーション実験の条件を表1に示す。超音波振動装置の振動数は39kHz、振幅は2~6.2 $\mu\text{m}$ とした。駆動テーブルはX、Y、Z軸同時制御で、位置決め精度は10nmである。押し込み量は5~80 $\mu\text{m}$ とし、インデンテータの動きとインデンテーション時間は超精密機械のNCシステムにより制御した。工作物は、6-4黄銅、無酸素銅、無電解Ni-Pを用いて実験した。

インデンテーション荷重はキスラー社の動力計によりインプロセスで計測した。インデンテーション加工はドライでも可能であるが、ダイヤモンド圧子の摩耗と破損を防止するため、白灯油を掛けながら潤滑して加工を行った。無電解Ni-Pに対するインデンテーション深さの変化によるインデンテーション荷重の変化を図5に示す。超音波振動の振幅が大きいほど変形に必要な荷重が小さくなり、設定したインデンテーション深さに対する実際の加工深さは超音波振動の振幅が大きいほど大きくなり、超音波により転写性が向上することが示された。

表1 インデンテーション実験条件

工具	単結晶ダイヤモンド		
形状	四角錐	円錐	
先端形状	90度	0.1 mm R	
超音波装置	ピエゾ素子		
振動数	39 kHz		
振幅	0, 2.0 - 6.2 μm		
工作物	6-4 銅	無酸素銅	無電解 Ni-P
硬度	HV 153	HV 100	HV 565
押し込み深さ	5, 10, 20, 40, 80 μm		
送り速度	100 mm/min		
押し込み時間	0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6 s		
クーラント	白灯油		

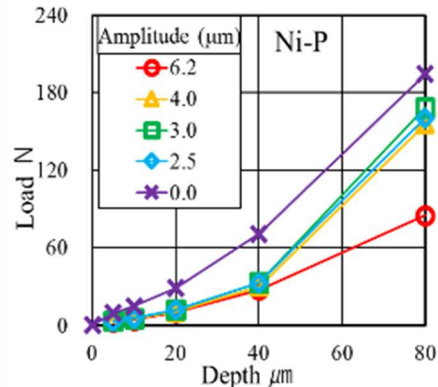
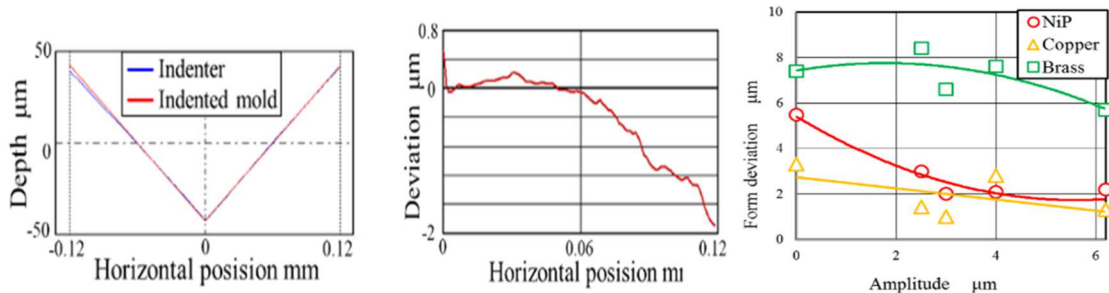


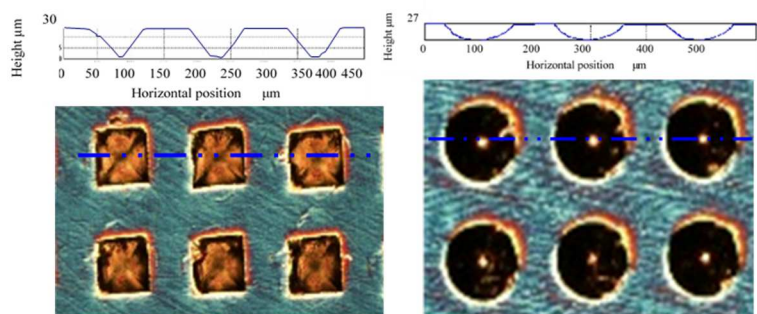
図5 超音波振動のインデンテーション深さに対する荷重の変化

(4) 次に圧子に対するインデンテーションの転写性を評価した。90度の四角錐のインデンテータを用いて、超音波振動の振幅に対する転写性を評価した結果を図6に示す。四角錐の圧子を用いて加工したアレイ金型と成形したアレイの比較図を図6(a)に示す。その差の分布、すなわち転写性の分布を図6(b)に示す。このようにして得られた各金属における転写誤差を図6(c)に示す。比較的硬度が低い黄銅が最も悪かったが、無電解Ni-Pは最も硬度が高いにもかかわらず転写性は比較的良好であった。超音波振動の振幅が大きいほど転写性が優れていることがわかる。同様に、球形状の圧子を用いて加工したアレイ金型を用いた場合も同様の結果になった。



(a) 圧子と加工形状の比較 (b) 圧子と加工形状の差の分布 (c) 振幅に対する転写性の評価  
図6 超音波振動の振幅に対する加工の転写性

(5) 最後に、四角錐および球形状の無電解Ni-P製アレイ金型を圧子により超音波援用インデンテーションを行った。インデンテーション後に金型はバリを除去するために、平面切削を行った。四角錐の圧子を用いて加工したアレイ金型を図7(a)に示す。同様に、球形状の圧子を用いて加工したアレイ金型を図7(b)に示す。エッジ先端も転写され、良好に成形された。



(a) 四角錐アレイ金型 (b) 球面アレイ金型

図7 無電解Ni-P基板上のアレイ金型

(6) 本研究では、高能率加工を行うために変形加工である「ナノインデンテーション」に着目し、レーザ加工を応用した単結晶ダイヤモンド等のマイクロインデンテータ(圧子)を創成し、超音波振動援用のナノインデンテーションシステムを開発し、超音波振動を付加することによる無電解Ni-Pなどのアモルファス金属材料の高精度・高能率塑性変形特性を明らかにし、微細で構造的な超精密形状の創成の高精度・高能率加工を実現することを検討した。その結果、無酸素銅、黄銅、無電解Ni-Pなどの精密金型材料に対して、高精度で高能率に微細加工できることが示された。

最後に、テクスチャリングの効果について、同法によりテクスチャ基板を試作し、その効果の評価実験を実施した。フラットパネルディスプレイに対してアクリル樹脂に微細なアレイ構造を与え、その反射防止効果機能が確認された。さらに、水中ソーラパネルに対して、フジツボの付着の防止効果を検証するために海中実験を実施した結果、50 $\mu$ m程度の周期と深さのテクスチャにより生体生物の付着防止効果があることが示された。純Tiに対してテクスチャを与えて、歯科インプラントに対する生体融合効果(付着性の増大)について検討したが、その効果は十分に明らかにはならなかったため、引き続きテクスチャパターンを変化させて実証実験を実施する予定である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8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 5件）

1. 著者名 M. Sakaida, T. Furuki, H. Suzuki, T. Fukuda	4. 巻 9
2. 論文標題 Aspheric Cutting of CVD-SiC Molds by PCD milling tool	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceeding of the 9th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 552-555
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 渡辺 剛, 鈴木浩文, 高田 亮, 深見信吾, 毛利茂樹, 竹下朋春	4. 巻 65
2. 論文標題 ウルトラファインパブルクーラントを用いた高精度・高能率研削技術の開発 第1報: 気泡が超硬合金の研究特性に及ぼす影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 砥粒加工学会誌	6. 最初と最後の頁 248-253
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11522/pscjspe.2019S.0_672	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 H. Suzuki, T. Nakagawa, A. Suzuki, M. Okada, S. Hamada	4. 巻 70
2. 論文標題 Fabrication of textured surface with ultrasonic vibration-assisted indentation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 CIRP Annals	6. 最初と最後の頁 321-324
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cirp.2021.04.087	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 A. T. H. Beaucamp, K. Nagai, M. Okada, H. Suzuki, Y. Namba	4. 巻 73
2. 論文標題 Elucidation of material removal mechanism in float polishing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 64-69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.precisioneng.2021.10.004	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 T. Nakagawa, A. Goto, T. Sakai, H. Suzuki, A. Yui	4. 巻 23
2. 論文標題 Machining of electroless Ni-P plated micro lens allay mold by ultrasonic vibration assisted indentation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The 23rd International Symposium on Advances in Abrasive Technology	6. 最初と最後の頁 64-69
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 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 -

1. 著者名 M. Sakaida, S. Higuchi, A. Suzuki, H. Suzuki, T. Furuki	4. 巻 23
2. 論文標題 Precision cutting of CVD-SiC by PCD milling tool	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The 23rd International Symposium on Advances in Abrasive Technology	6. 最初と最後の頁 7-12
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 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 -

1. 著者名 鈴木浩文, 岡田 睦	4. 巻 68
2. 論文標題 単結晶Siレンズの非球面レンズ創成研磨	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 機械技術	6. 最初と最後の頁 28-31
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 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 鈴木浩文, 森田晋也, 山形 豊	4. 巻 59
2. 論文標題 非球面レンズ成形用セラミック型の超精密加工技術	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 光技術コンタクト	6. 最初と最後の頁 19-25
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 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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 M. Sakaida, S. Higuchi, H. Suzuki, A. Suzuki, T. Furuki, T. Fukuda
2. 発表標題 Precision cutting of CVD-SiC aspheric mold by PCD milling tool
3. 学会等名 Proceeding of the 22nd International Conference & Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. Goto, H. Suzuki, T. Sakai, A. Yui, T. Nakagawa, T. Moriizumi, T. Makino
2. 発表標題 Highly efficient texturing of electroless Ni-P plate for optical mold surface by ultrasonic vibration assisted indentation
3. 学会等名 Proceeding of the 22nd International Conference & Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Suzuki, A. Yui, T. Nakagawa, T. Makino, T. Moriizumi
2. 発表標題 Highly efficient generation of anti-reflection surface by ultrasonic vibration assisted indentation
3. 学会等名 Proceeding of the 31st International Conference on Diamond and Carbon Materials (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中川恒裕, 鈴木浩文
2. 発表標題 無電解Ni-Pめっきにおけるめっき浴温度が表面粗さに与える影響
3. 学会等名 2022年度砥粒加工学会学術講演会ABTEC2022
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 鈴木浩文, 後藤 晃, 古木辰也, 三浦勝弘, 由井明紀, 中川恒裕, 牧野俊清, 上原純一, 森泉利之
2. 発表標題 超音波振動援用インデンテーションによるテキスチャリング マイクロアレイ金型の精密加工
3. 学会等名 2022年度砥粒加工学会学術講演会ABTEC2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Nagai, A. Beaucamp, A. Matsubara, Y. Namba, H. Suzuki
2. 発表標題 Elucidation of levitation principle in float polishing method
3. 学会等名 2020年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 鈴木浩文	4. 発行年 2021年
2. 出版社 電気加工学会誌	5. 総ページ数 6
3. 書名 レーザ加工によるダイヤモンド切削工具の製作 - 複雑形状のダイヤモンド工具のマイクロ加工 -	

1. 著者名 鈴木浩文, 渡辺 剛	4. 発行年 2022年
2. 出版社 砥粒加工学会誌	5. 総ページ数 4
3. 書名 ファインバブルの実加工への応用事例 ファインバブルクーラントによる超硬合金の高精度・高能率研削	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 金型、中間金型、及び金型の製作方法	発明者 浜田晴司, 上山 崇, 鈴木浩文	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-147750	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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