

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03886

研究課題名(和文) 硬脆基板材料の超平滑化加工のための実用的固定砥粒研磨技術の確立

研究課題名(英文) Establishment of a practical fixed abrasive polishing technique for ultra-smooth machining of hard and brittle substrate material

研究代表者

山口 智実 (YAMAGUCHI, Tomomi)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：10268310

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)：申請者らは、MC(Mechano-Chemical)/MC複合砥粒砥石の超仕上げによる硬脆基板材料の超平滑化実用技術の確立を目的とし、()表面化損傷(SSD)の発生と超仕上げ条件との関係の解明、()砥石の目直し条件と超仕上げ性能との関係性の解明、()サファイアに対する多段超仕上げ工程設計システムの構築、の各課題に取り組んだ。

その結果、()光学ガラス内に発生したSSDの3次元可視化システムの開発、()砥粒軌跡を変化させた目直しが砥石の超仕上げ性能、目直し間寿命に及ぼす影響の解明、()砥石損耗量の増大に関わる要因を調査し、エアークット速度と砥石圧力との関係の解明、を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果の学術的意義は、超仕上げによって固定砥粒研磨での実用的平滑化加工への展開の可能性を示せたところであり、社会的意義としては、従来、工作物表面の平滑化加工の最終仕上げに用いられてきた遊離砥粒方式の研磨加工が抱えてきた、形状精度、平滑性、無擾乱性の両立困難性、自動化の困難性、そして環境面での問題を克服できる新たな研磨加工技術の提示にある。

研究成果の概要(英文)：The applicants aimed to establish a practical technique for super-smoothing hard and brittle substrate materials by super-finishing MC (Mechano-Chemical) / MC composite abrasive grindstones. I) Occurrence of surface damage (SSD) and super-finishing conditions Elucidation of the relationship with () Elucidation of the relationship between the grindstone retouching conditions and super-finishing performance, () Construction of a multi-stage super-finishing process design system for sapphire.

As a result, I) Development of a three-dimensional visualization system for SSDs generated in optical glass, II) Elucidation of the effect of retouching by changing the abrasive grain trajectory on the superfinishing performance of the grindstone and the life between retouching, III) We investigated the factors related to the increase in the amount of wear of the grindstone and clarified the relationship between the air cut speed and the grindstone pressure.

研究分野：加工学

キーワード：超仕上げ メカノケミカル反応 固定砥粒研磨 複合砥粒砥石 サファイア 光学ガラス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

一般に工作物表面の平滑加工の最終仕上げに用いられる遊離砥粒研磨は、形状精度、平滑性、無擾乱性の両立が難しく、自動化が困難であるなど加工技術面の問題に加えて、スラリーやポリシャの使用および廃棄のコスト面の問題、また、酸性やアルカリ性のスラリーに伴う環境面でも問題が多い¹⁾。特に、シリコンやサファイアなど硬脆基板材料の超平滑加工では、上述した問題に加えて加工能率が非常に低いといった問題がある。そこで、この解決策として、固定砥粒による超精密研磨技術の開発が望まれている。

申請者らは、軟質 MC 砥粒を従来の硬質砥粒並みに結合できる砥石であれば、遊離砥粒研磨と同等の加工性能を高効率で実現できると考えた。そこで、砥石メーカーであるミズホと共同で、 CeO_2 、 $BaSO_4$ および SiO_2 等の MC 砥粒を硬質砥粒並みに安定して結合できるビトリファイド結合剤の開発を行い、硬質砥粒砥石並みの結合力をもつ MC 砥粒砥石、および MC 砥粒にダイヤモンドや CBN 等の硬質超微細砥粒を複合した複合砥粒砥石 (MC 複合砥粒砥石) を開発することで、超仕上げによる硬脆基盤材料であるガラス (BK7)、単結晶シリコンおよびサファイアの超平滑研磨加工に適用した。この加工法を用いた従来の研究で、ガラス (BK7) と単結晶シリコンに対しては、従来のラッピング・ポリシング工程に比べ $1/5 \sim 1/4$ の加工時間にて同等の表面粗さを達成できることを示した²⁾³⁾。また、超硬であるサファイアに対しては、複数種のダイヤモンド砥石による多段工程から成る超仕上げにより、従来のラッピングの $1/4$ 程度の 8 分の加工時間で $2.0nmRa$ の超平滑面が得られた⁴⁾。

2. 研究の目的

新たな MC / MC 複合砥粒砥石を用いた超仕上げにより、従来の遊離砥粒研磨と同等の平滑化が実現できることを示したが、同時に、この技術を工業的実用性から見た場合の問題点も明らかになった。そこで、本研究では、以下に示す 3 つの問題点の克服を研究課題とし、2021 年 3 月を達成目標として、我々が研究開発してきた本固定砥粒研磨技術の実用的確立を目指した。

(1) ガラス・シリコンの超平滑化における表面下損傷の発生と超仕上げ条件との関係の解明

本研究の対象である硬脆基板材料の超仕上げでは、硬質砥粒による荒工程で加工表面から数～数十 μm の深部に亀裂が入る、いわゆる表面下損傷が発生する。よって、軟質 MC 砥粒砥石による仕上げ工程では、前工程で生じた表面下損傷が確実になくなる仕上げ量でもって超平滑面を創成する必要があるが、能率面から見て無駄な仕上げ量を避けるためには、前工程の超仕上げ条件と表面下損傷の分布状態との関係を明らかにする必要がある。そこで、本課題では、まずガラス・シリコンにおいて荒工程での超仕上げ条件に対する表面下損傷の分布状態との関係を明らかにし、効率の良い表面下損傷のない超平滑面の実現を目指す。

(2) MC / MC 複合砥粒砥石の目直し条件と超仕上げ性能との関係性の解明

ガラスやシリコンの超仕上げでは、原則、各工程で 1 種類の砥石を一定加工時間毎に目直しを行いながら作業を続けていく。ところが、MC / MC 複合砥粒砥石においては、同条件の目直し後に超仕上げを行っても、仕上げ性能にばらつきが見られた。すなわち、目直し時におけるドレッサの作業面性状と目直し条件が MC / MC 複合砥粒砥石の作業面性状に大きく影響を与えると推察できる。そこで、本課題では、ガラス・シリコンの超仕上げにおいて、MC / MC 複合砥粒砥石の目直し条件と超仕上げ性能との関係性について解明していく。

(3) サファイアに対する多段超仕上げ工程設計システムの構築

サファイアは超硬なので、複数種の砥石による多段工程でないと平滑化は難しい。以前の研究 (科研 No. 26420065) の結果は試行錯誤の結果であり、多段工程にて加工時間短縮の可能性を示しただけで、最適解を求めたわけではない。本課題では、前加工面粗さ・砥石の弾性変化量・加工圧力等を入力することで、加工時間に対する仕上げ量と加工面粗さが出力されるシミュレーションモデルを開発し、これを応用することで、多段工程設計システムの完成を目指す。

3. 研究の方法

(1) ガラス・シリコンの超平滑化における表面下損傷の発生と超仕上げ条件との関係の解明

鏡面仕上げした光学ガラス (SK16) 表面にピッカーズ圧痕を試験荷重 $700mN$ で付与した後、 CeO_2 20000 T 56 V 砥石を用いて表面をおよそ $0.25\mu m$ の深さで除去していき、各加工深さにおける加工表面の画像をデータ化し蓄積する。そして、蓄積した画像データに対し画像処理ソフト V-Cat1.5 を使用して SSD の 3 次元的可視化を行った。

(2) MC / MC 複合砥粒砥石の目直し条件と超仕上げ性能との関係性の解明

砥粒軌跡を変化させた目直しによって、目直し後の砥石表面、シリコンの超仕上げ性能に違いがみられるか調査を行った。表 1 に目直しおよび超仕上げ条件を示す。また、目直しにお

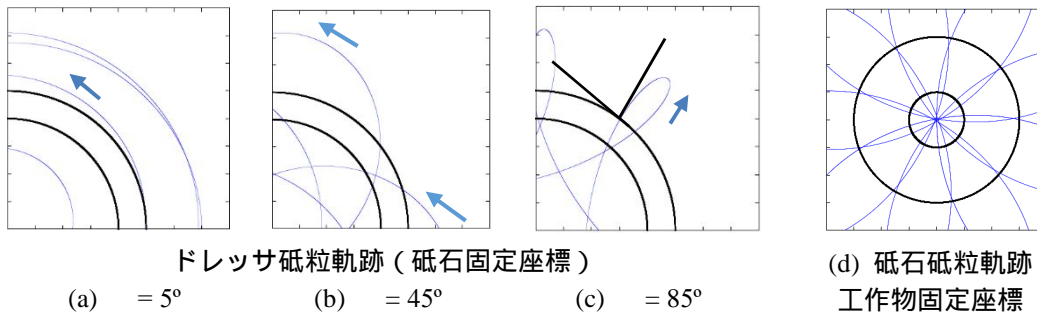


図1 目直し・超仕上げ時の砥粒軌跡

る砥石固定座標でのドレスサ砥粒軌跡を図1(a)~(c)に示し、超仕上げにおけるシリコン固定座標での砥石の砥粒軌跡を図1(d)示す。なお、軌跡において、砥石外径の接線方向とドレスサの運動軌跡のなす角度を傾斜角とする。

本課題では、超仕上げを行った砥石表面を砥石の初期状態とし、表2に示す目直しを行う。その後、目直しを行った砥石を用いて、あらかじめ60nmRa程度に前加工したシリコンの超仕上げを行う。目直しでは、目直し量を測定し、共焦点レーザ顕微鏡を用いて、砥石表面の高さ分布から、目直し前後の砥石作業面積率を求めた。超仕上げでは、仕上げ面粗さおよび仕上げ量から砥石の超仕上げ性能を評価した。

表1 目直し，超仕上げ条件

工程	目直し			超仕上げ
ドレスサ・工作物	DD320MC50MG			シリコン
砥石圧力 [MPa]	0.62			0.40
傾斜角 θ [°]	5	45	85	
砥石速度 v_s [m/min]	69.7	64.9	32.4	63.6
ドレスサ速度 v_w [m/min]	6.83	46.9	65.3	22.0
オシレーション [Hz]				6.67
振幅 [mm]				0.5
加工時間 [s]	60			
加工液温度 [K]	298			
加工液	水 (防錆剤希釈)			
砥石	SD4000 / BaSO ₄ 2000 N 96 V			

(3) サファイアに対する多段超仕上げ工程設計システムの構築

以前の研究 (科研 No. 26420065)

の成果として、砥石圧力 P_s 下での砥石の弾性変形量を求める式 から砥石の作業面積率 を求められた。その と工作物表面の負荷長さ率 tp 、臨界圧力 P_{RC} 、砥石速度 v を用いて、プレストンの式から式 で示される加工時間 t での仕上げ量を推定することができる。前加工面の粗さを完全除去できるだけの仕上げを行った場合、各砥石による仕上げ面粗さは砥石圧力と加工速度に依存するので、前加工面粗さの完全除去を前提とすれば、式 と式 から、計算機上で加工時間と到達仕上げ面粗さを推定できる多段超仕上げ工程を求めるシステムが構築できる。

$$A \cdot P_s = \sum_{h=0}^{h_e} a \cdot f(h) \cdot E \cdot \left(\frac{h_e - h}{l - h} \right) \quad q(t) = k \cdot v \cdot \Delta t \cdot \sum_{i=0}^t \left(\frac{P_s}{\eta_i \cdot tp_i} - P_{RC} \right)$$

本課題では、構築したシステムを適用して求めた多段工程を用いて実際に超仕上げを行い、その加工特性について評価した。

4. 研究成果

(1) ガラス・シリコンの超平滑化における表面下損傷の発生と超仕上げ条件との関係の解明

図2に深さ方向の観察結果を示す。図より、付与した圧痕が(b)の深さ4.5 μ mで除去された後、(c)の深さ5.5 μ mで新しい傷が生じており、SSDの発生が確認できた。その後、除去加工を続けていくと(c)の傷が(d)の深さ8 μ mで除去されたが、(e)の深さ11.2 μ mでまた新しい傷が発生している。(f)の深さ15.3 μ mでその傷が除去された後、再び(g)の深さ16.5 μ mで別の箇所にも傷が発生した。最終的に深さ17.9 μ mで発生したSSDが完全に除去され、新たなSSDが発生することはなかった。これらの画像データを基に可視化した結果をガラス上面から見た図と側面から見た図を図3に示す。図より、SSDは一つの大きな傷として存在しているのではなく、異なる深さに発生しており、一旦SSDが除去された後に傷の無い部分が存在し、再びSSDが発生していることが分かった。

(2) MC / MC 複合砥粒砥石の目直し条件と超仕上げ性能との関係性の解明

図4に目直し量と目直し後の砥石作業面積率について示す。□=5°の目直しでは、目直し量平均が 3.8μm と少なく、砥石表面の作業面積率が目直し前(1.5%程度)より高くなった。□=45°の目直しでは、目直し量平均が 4.8μm と□=5°に比べ多くなり、作業面積率平均 2.5%の作業面が得られた。□=85°の目直しでは、目直し量が 30μm 以上と多くなり、新たな作業面が生成されていることがわかる。作業面積率は目直し前より高くなっているが、切れ刃先端部の高さにばらつきがみられるため、□=5°、□=45°より低くなっていると推察される。

図5に超仕上げにおける仕上げ面粗さと仕上げ量を示す。□=5°、□=45°で目直した砥石を用いて超仕上げを行うと、仕上げ面粗さが 12nmRa 程度と良好になった。一方、□=85°の目直し後は低い作業面積率が得られたため、砥石の単一切れ刃にかかる圧力が大きくなり、切り込み量が増加し、仕上げ量が多くなることによって、仕上げ面粗さが悪化したと考えられる。仕上げ量が 1~15μm の場合、仕上げ面粗さは 15nmRa 以下と良好になる傾向があり⁵⁾、□=5°、□=45°では仕上げ量平均が 13μm、10μm であるため、仕上げ面粗さが良好になったと考えられる。

以上の結果から、□=5°、□=45°で目直しを行うと、砥石の切れ刃が摩耗し、切り込みの少ない超仕上げを行うことができると考えられる。本課題において、砥粒径のばらつきを切れ刃高さのばらつきとすると、切れ刃のばらつきが小さく、表面が摩耗した砥石状態が超仕上げに適した表面であることが明らかになった。

(3) サファイアに対する多段超仕上げ工程設計システムの構築

表2の工程Bの超仕上げ時間で多段超仕上げを行った。図6に各工程での表面粗さ Ra を示す。図5より、変更を行った多段超仕上げ工程の最終的な粗さは従来よりも短時間で目標である 2nmRa を達成できた。

参考文献

- 1) 安永暢男:固定と粒研磨加工方式の動向, 砥粒加工学会誌, 53巻, 7号, pp. 401-404 (2009) .
- 2) 古城直道, 平田崇哲, 樋口誠宏, 山口智実, 松森 昇, 尾倉秀一, 島田尚一:酸化セリウム砥石による光学ガラスの超仕上げ, 2009年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 233-234 (2009) .
- 3) 荒木大秀, 古城直道, 廣岡大祐, 山口智

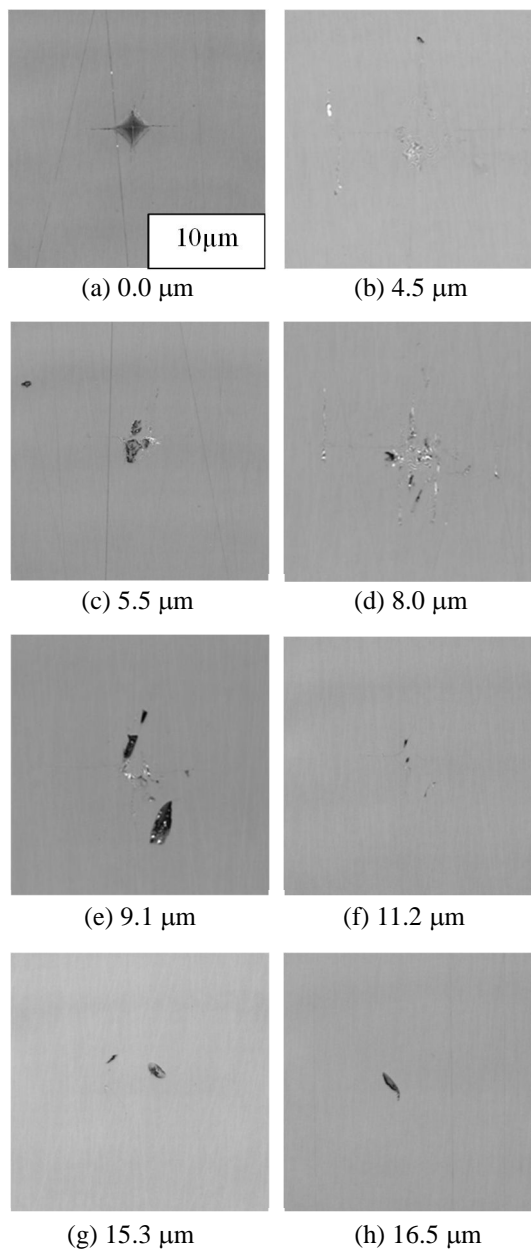


図2 圧痕による表面化損傷

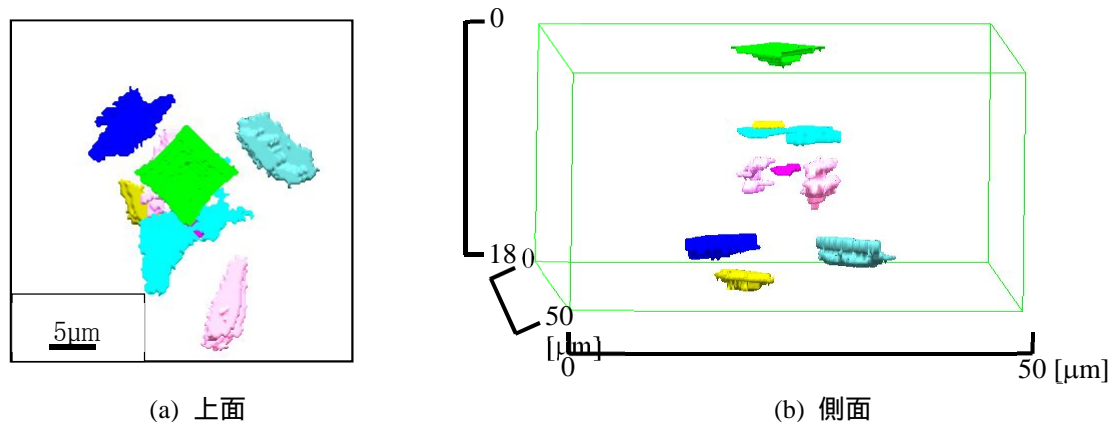


図3 圧痕によってガラスに発生した表面化損傷

実, 松森昇, 尾倉秀一: 硫酸バリウム砥粒砥石による単結晶シリコンの超仕上げ性能, 2013 年度精密工学会春季大会 学術講演会講演論文集, pp. 961-962 (2013).

- 4) 山口雅史, 古城直道, 廣岡大祐, 山口智実, 松森昇, 棚田憲一: ダイヤモンド超砥粒砥石を用いたサファイアの多段超仕上げ, 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 1017-1018 (2015).
- 5) 土肥一輝 他: 単結晶シリコンの超仕上げにおける砥石表面状態の影響, 2018 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2018), 279-280.

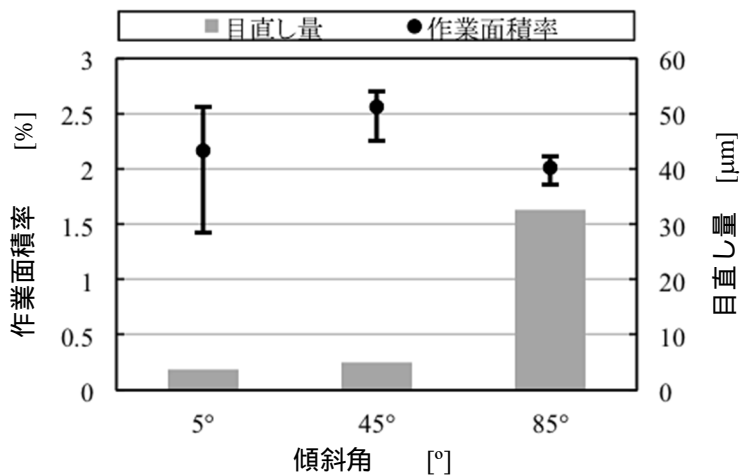


図4 目直し量および目直し前後の砥石作業面積率

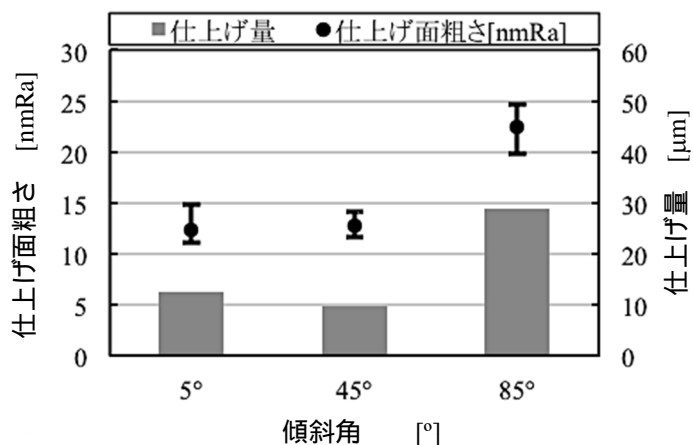


図5 仕上げ面粗さおよび仕上げ量

表2 今回 (Proposed) と従来 (conventional) の多段超仕上げ工程

Proposed					
砥石	SD2000	SD4000	DD12000	SD20000	合計時間
加工時間 [s]	60	60	110	130	360
conventional					
砥石	SD2000	SD4000	SD6000	SD20000	合計時間
加工時間 [s]	60	60	60	300	480

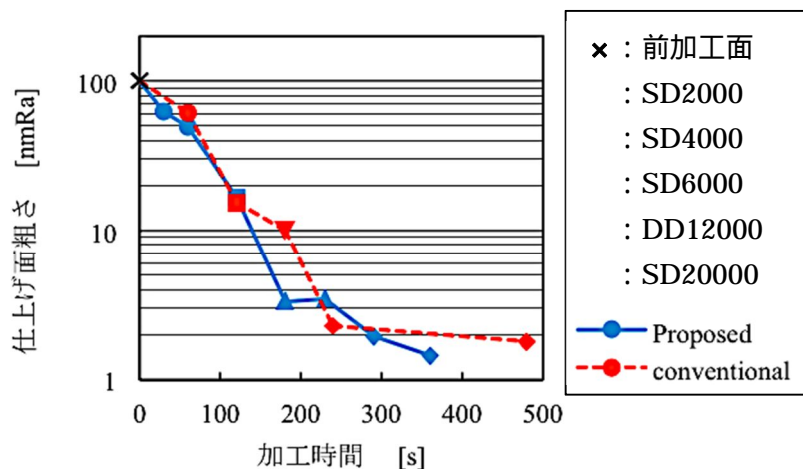


図6 構築した設計システムによる多段超仕上げ工程の改善

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1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 0件）

1. 著者名 仲矢 進悟, 古城 直道, 山口 智実, 廣岡 大祐, 松森 昇, 棚田 憲一	4. 巻 63
2. 論文標題 目直し条件がメカノケミカル砥石による単結晶シリコンの超仕上げ性能に及ぼす影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 砥粒加工学会誌	6. 最初と最後の頁 415-420
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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 仲矢 進悟, 古城 直道, 山口 智実, 廣岡 大祐, 松森 昇, 棚田 憲一
2. 発表標題 目直し条件がメカノケミカル砥石による単結晶シリコンの超仕上げ性能に及ぼす影響（第2報） 砥石作業面の観察に基づく寿命評価
3. 学会等名 2020年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Naomichi FURUSHIRO, Tomomi YAMAGUCHI, Daisuke HIROOKA, Noboru MATSUMORI, Kenichi TANADA
2. 発表標題 Improvement of Multistage Superfinishing of Sapphire with Vitriified-bonded Diamond Superabrasive Stones
3. 学会等名 ASPE 2018 Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 阪口真太郎, 古城直道, 山口智実, 廣岡大祐, 松森 昇, 棚田憲一
2. 発表標題 ダイヤモンド超砥粒砥石を用いたサファイアの多段超仕上げ（第3報） 砥石の弾性変形を考慮した仕上量推定方法に基づく工程改善
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 仲矢進悟, 古城直道, 山口智実, 廣岡大祐, 松森 昇, 棚田憲一
2. 発表標題 メカノケミカル砥石を利用した単結晶シリコンの超仕上げ(第2報) 目直し条件が砥石の超仕上げ性能に及ぼす影響
3. 学会等名 2018年度砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 浜川亮太, 古城直道, 山口智実, 廣岡大祐, 松森 昇, 棚田憲一
2. 発表標題 光学ガラスの表面下損傷の可視化(第2報) 位置合わせ精度向上および線形補間による改善
3. 学会等名 2018年度砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2018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	古城 直道 (FURUSHIRO Naomichi) (80511716)	関西大学・システム理工学部・教授 (34416)	

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