

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20560119

研究課題名(和文)

硬質砥粒とメカノケミカル砥粒との複合砥石における研削機構モデルの構築

研究課題名(英文)

Construction of grinding model of a compound stone containing mechanochemical abrasive and hard superabrasive

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

研究成果の概要(和文)：材料表面の仕上げに用いられる砥粒には、力学的除去を行う cBN やダイヤモンドなどの硬質砥粒と化学的除去を行う酸化セリウムや硫酸バリウムなどのメカノケミカル(MC)砥粒がある。従来、砥粒を固定する砥石には硬質砥粒しか使われなかったが、本研究では、MC 砥粒をも硬質砥粒と一緒に固定した複合砥石を開発し、鋼表面の超仕上げ加工に対して、従来の硬質砥石に比べ、加工変質層が薄く残留応力が小さいなどの利点があることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：There are two types of abrasive for surface finishing, namely, mechanochemical (MC) abrasive like cerium oxide and barium sulfate and hard superabrasive like cBN and diamond; the former remove a material chemically and the latter remove it mechanically. Generally, a abrasive stone has been made with only hard abrasive. However, in our study, we have developed a new compound stone containing mechanochemical abrasive and hard superabrasive. The performance of the compound stone was evaluated through the superfinishing of steels and the advantage of reducing both the hardened layer depth and the compressive residual stress in the finished surface is made clear:

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学/加工学

キーワード：超精密加工, 超砥粒砥石, 超仕上げ, メカノケミカル, 複合砥粒砥石, ガラス, 酸化セリウム, 硫酸バリウム

1. 研究開始当初の背景

(1) メカノケミカル砥粒の固定(砥石)化
シリコンやガラス等の硬脆材料の表面を平滑にする有効な方法として、CeO₂, BaSO₄等の軟質砥粒による界面固相反応を利用したメカノケミカル(MC)・ポリシングがある。しかし、この方式は、形状精度、平滑性、無擾乱性(加工変質層の無残留性)の両立が難

しく、自動化が困難であるといった加工技術の問題が従来から指摘されている。そこで、これらの問題を解決するために、MC 砥粒の固定(砥石)による超精密研削技術の開発が行われてきている。しかし、これら MC 砥粒を用いた砥石の場合、表面の鏡面化と無情乱性の両立は可能となる反面、MC 砥粒は軟質であり、かつ、化学的・熱的に不安定なため、

cBN やダイヤモンド等の硬質砥粒と同程度の結合力を得ることは困難であることから、硬質砥粒に比べると砥石損耗が大きく加工能率が非常に低いという問題が発生し、この問題点の克服が大きな課題となっている。そこで、我々は、MC 砥粒を固定化できる結合剤の開発を試み、MC 砥粒単体、あるいはMC 砥粒と硬質砥粒を複合した新たな砥石の実現化に成功した。そして、複合砥石は、鋼の超仕上に対し、従来の硬質砥石に比べ、仕上能率が良いことは明らかになっているが、その他の点において優位性を明らかにするには未だ至っておらず、また、MC 砥粒単体砥石の加工特性も明らかになっておらず、より具体的な性能評価が求められる。

(2) 鋼に対するダイヤモンド砥粒の摩耗

遊離砥粒によるポリシングに取って代わる硬質砥粒砥石として、ダイヤモンド砥粒による超微細砥粒砥石が用いられており、実際、ポリシング並みの平滑加工を実現できている。しかし、周知のとおり、この砥石は、鋼などの鉄系材料の加工に用いると、ダイヤモンド中の炭素が鋼へ拡散し、砥粒が著しく摩耗するため、鋼には適さないとされている。しかし、鋼への炭素拡散を抑制できれば、ダイヤモンド砥石の摩耗は減少すると考えられ、その効果的な方法が求められている。

(3) 砥石の構造モデル

一般に、研磨用砥石の実用化における問題点の一つとして、要求加工性能を実現する砥石の製造条件の見出しが容易でないことが指摘されている。この原因の一つとして挙げられるのが、よく知られているように、砥石構造の複雑さである。我々は、従来の砥石について、フラクタル手法により、実際の砥石に酷似した構造モデルを構築しており、今回新たに開発した複合砥石においても同様のモデル構築が求められる。

2. 研究の目的

(1) CeO₂-cBN 複合砥石の軸受鋼に対する超仕上特性

MC 砥粒の効果は、加工能率のみならず、仕上面表層に生成される加工変質層にも現れると推測される。そこで、CeO₂-cBN 複合砥石の軸受鋼に対する超仕上において、加工硬化層の深さや残留応力を調べ、その他の仕上面特性と合わせて、軸受鋼表面の性能向上に及ぼす効果を検証する。

(2) BaSO₄-SD 複合砥石における鋼に対するダイヤモンド砥粒の摩耗抑制

BaSO₄-SD (ダイヤモンド) 複合砥石による鋼の超仕上において、BaSO₄ 砥粒がダイヤモンドの摩耗を抑制する機構を明らかにし、

実際に効果があることを超仕上実験から検証する。

(3) 複合砥石の構造モデルの構築

先に開発したフラクタル手法による硬質砥粒砥石の凝集モデルおよび焼成モデルをベースにした複合砥石の構造モデルを示し、かつ、このモデルと実砥石における砥粒分布について比較し、本モデルの有用性について検討する。

3. 研究の方法

(1) CeO₂-cBN 複合砥石の軸受鋼に対する超仕上特性

軟質で鋼を酸化させる CeO₂ 砥粒が超仕上面の加工変質層の生成に及ぼす影響を調べるため、開発した CeO₂ 砥粒のみの砥石 (以下 CeO₂ 砥石)、CeO₂ 砥粒を混入した cBN 砥石 (同 cBN/CeO₂ 砥石)、そして従来の cBN 砥石を用いた。実験には芯無平面超仕上加工機 (STK-50FSC, 西部自動機器製) を用いた。WA 砥石 (#1000) による前加工で面粗さを約 0.20μmRa に整えた後、cBN 砥石、cBN/CeO₂ 砥石および CeO₂ 砥石で超仕上を行った。加工後、微小部 X 線応力測定装置 (PSPC, 理学電機製) を用いてフェライトの(211)面の回折角 θ を測定し、 $\sin^2\phi$ 法により超仕上面の残留応力を求めた。また、ダイナミック超微小硬度計 (MCT-W500, 島津製) を用いて、超仕上面表層の硬度を測定し、加工変質層の深さを求めた。

(2) BaSO₄-SD 複合砥石における鋼に対するダイヤモンド砥粒の摩耗抑制

BaSO₄-SD 複合砥石で鋼を加工した場合、ダイヤモンドの損耗は拡散ではなく、BaSO₄ 砥粒が鋼表面を酸化し、その酸化表面をダイヤモンドが除去する際の還元反応により損耗すると考えられる。そこで、摩耗機構を炭素拡散から酸化鉄の還元へ転換することが、ダイヤモンド砥石の摩耗抑制に役立つのかどうかを明らかにするために、耐酸化性に優れた耐熱鋼 SUH 3 の調質材と SUH 3 に比べ酸化し易い軸受鋼 SUJ 2 をそれぞれ BaSO₄-SD 砥石で超仕上した。そして、主に砥石損耗率を求めて、ダイヤモンド砥石のそれと比較した。このとき、BaSO₄ 砥粒の酸化作用を活性化させるために、超仕上液の温度を 40°C と高とした。

(3) 複合砥石の構造モデルの構築

砥石の構造モデルは、砥粒、結合剤、気孔剤の攪拌混合後に圧縮成形した、いわゆる“生砥石”の構造モデルを模した凝集モデルと、その生砥石に焼成工程を施した最終製品である砥石を模した焼成モデルから成る。

複合砥石の構造モデルに関しては、CeO₂-

cBN 複合砥石を対象とし、既に開発している単体砥粒砥石の構造モデルを基本にして、複合砥石の構造上の特徴を現すアルゴリズムを加味することで構築した。具体的には、凝集モデルにおいて、 CeO_2 砥粒がクラスタを形成することから、“セリアクラスタ凝集アルゴリズム”を加え、焼成モデルにおいては、不自然なボンドブリッジを除去するための“砥粒脱落判定アルゴリズム”を加え、複合砥石の構造モデルを構築した。モデルの妥当性については、加工性能を左右する砥粒の分布状態から評価した。具体的には、モデルと実砥石の砥粒分布のフラクタル次元を求め、その近似度を調べた。

4. 研究成果

(1) CeO_2 -cBN 複合砥石の軸受鋼に対する超仕上特性

まず、加工面の残留応力および加工変質層について述べる。

図 1 に CeO_2 -cBN 砥石、 CeO_2 砥石および cBN 砥石で超仕上した軸受鋼表面の残留応力値の比較を示す。図より、 CeO_2 -cBN 砥石は cBN 砥石に比べて残留応力の小さい超仕上面を生成するのがわかる。これは、気孔に目づまりした CeO_2 砥粒が砥石圧力を低下させ、砥石の摩擦作用を抑えることが圧縮応力を減少させたものと思われる。しかし、 CeO_2 砥石は大きな圧縮応力の残る前加工面の除去に長時間を要するため、圧縮応力の減少割合は緩やかであることがわかる。

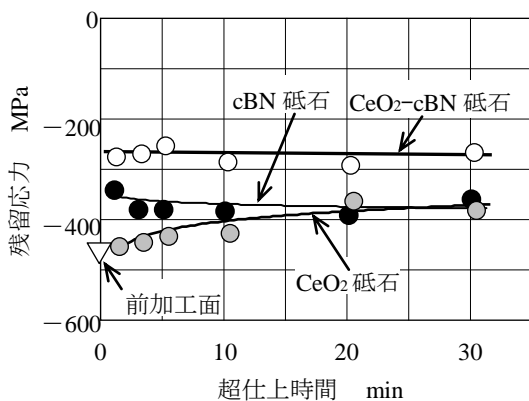


図 1 残留応力の比較

図 2 は 3 種類の砥石による加工変質層深さを比較したものである。図より、 CeO_2 砥石と CeO_2 -cBN 砥石は cBN 砥石に比べて変質層の浅い仕上面を生成するのがわかる。とくに、酸化膜の摩擦摩耗は切りくず生成に比べて鋼表面を硬化させないため、 CeO_2 砥石で長く仕上げるほど、加工変質層は減少する傾向を示す。

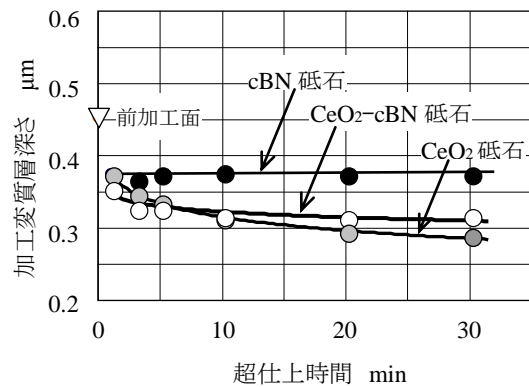


図 2 加工変質層深さの比較

以上の結果より、 CeO_2 -cBN 砥石による超仕上面は、変質層が少ないため耐摩耗性に優れる、圧縮応力が残るため疲労強さが大きい、化学的に安定な酸化膜に覆われるため耐食性がよいものと思われる。

次に、仕上面粗さについて述べる。

図 3 に仕上面粗さを比較した結果を示す。cBN 砥石や CeO_2 -cBN 砥石では、cBN 砥粒の微細な切りくず生成により、前加工面の粗さを非常に能率よく減少させているのがわかる。これに対して、軟質の CeO_2 砥粒は焼入された軸受鋼を切りくずとして変形分離することはできないが、前加工面の突起を選択的に酸化し、擦過することによって、前加工面の粗さを徐々に減少させているのがわかる。そのた

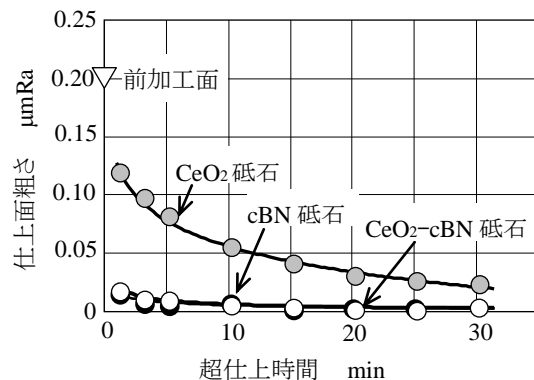


図 3 仕上面粗さの比較

め、それぞれの砥石が生成する仕上面および仕上面の粗さ曲線には大きな違いが見られると考えられるため、これを定量的に比較するために粗さ曲線の歪度を求めた。図 4 に粗さ曲線の歪度を求めた結果を示す。図より、cBN 砥石で仕上げられた表面の粗さ曲線の歪度は 0 に近いことがわかる。これは cBN 砥粒による引っかき痕が集積する仕上面が山と谷から構成されていることを示している。これに対して、 CeO_2 砥石による仕上面の粗さ

曲線はかなり大きな負の歪度をもつ。これは粗さ曲線の確率密度が非対称であることを意味し、 CeO_2 砥粒が前加工面の山を選択的に平坦化して谷を多く残す仕上面を形成することを示している。したがって、 CeO_2 砥粒と cBN 砥粒からなる複合砥粒砥石は、オイルダムの役割を果たす多くの谷部をもつ平滑面を形成することが可能な砥石と考えられる。

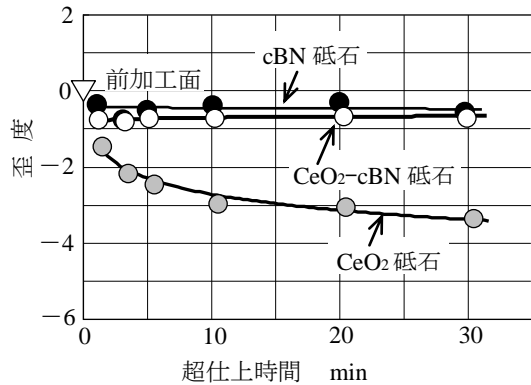


図4 歪度の比較

最後に、材料除去性能について述べる。

図5は、各砥石の仕上能率を比較するものである。図において、切削能力のない CeO_2 砥石でさえも、わずかな量であるが、酸化膜を摩擦によって除去している。したがって、 CeO_2 砥粒の生成する酸化膜を cBN 砥粒で簡単に除去する CeO_2 -cBN 砥石は、cBN 砥石よりも仕上能率が向上する。

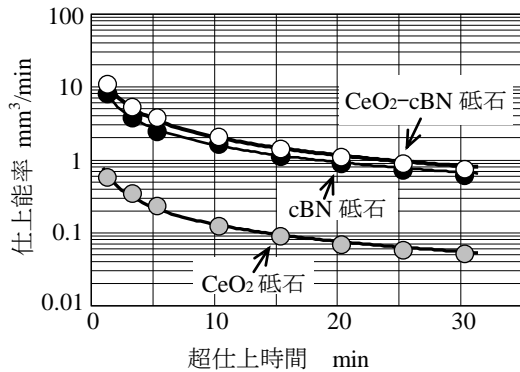


図5 仕上能率の比較

次に、各砥石の仕上比を比較した結果を、図6に示す。 CeO_2 -cBN 砥石の仕上比は cBN 砥石のそれに比べてやや小さい。これは開発した CeO_2 -cBN 砥石の集中度が cBN 砥石に比べて低いことに起因する。集中度を上げることで、仕上比の向上は十分に可能である。

以上のように、軸受鋼の超仕上において、主として仕上面生成の観点から複合砥石の性能を評価した場合、従来の硬質砥粒砥石に

比べても十分に有用性が高いことが明らかになった。

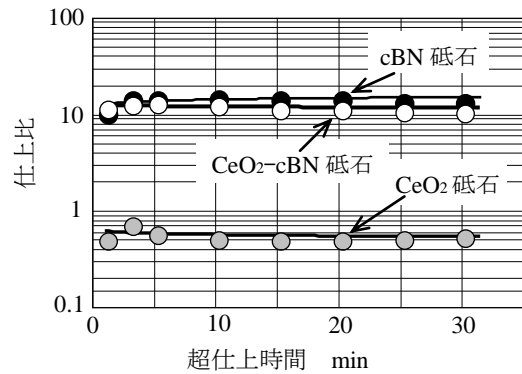


図6 仕上比の比較

(2) BaSO_4 -SD 複合砥石における鋼に対するダイヤモンド砥粒の摩耗抑制

図7は、耐熱鋼 SUH3 を超仕上げしたときの BaSO_4 -SD 砥石の損耗率を SD 砥石のそれと比較したものである。 BaSO_4 -SD 砥石の損耗率は SD 砥石の約2倍と大きい。このことは、酸化膜を形成しない鋼では、 BaSO_4 -SD 砥石も炭素拡散により摩耗するため、摩耗量は過大になることがわかる。また BaSO_4 砥粒を添加すると砥石の集中度と結合度が下がることになり、この点も SD 砥石に比べて砥石損耗率が大きい要因となっている。

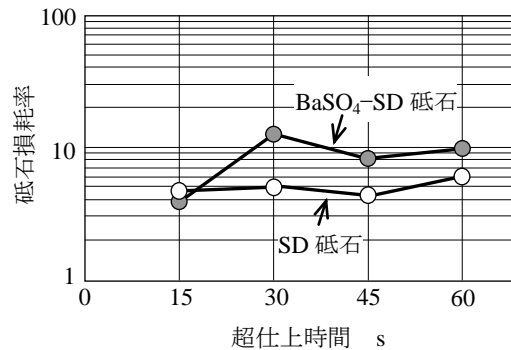


図7 耐熱鋼 SUH3 に対する損耗の比較

これに対して、 BaSO_4 砥粒で酸化される軸受鋼 SUJ2 を超仕上げすると、砥石損耗率は図8に示すようになる。 BaSO_4 -SD 砥石の集中度と結合度がダイヤモンド砥石に比べて低いにもかかわらず、砥石損耗率はダイヤモンド砥石の約1/2となり、 BaSO_4 -SD 砥石が耐摩耗性に優れることを示している。これより、摩耗機構が炭素拡散から酸化鉄の還元に変換すると、ダイヤモンド砥石の摩耗が減少することがわかる。図9は、両砥石の仕上能率を比較した結果である。集中度の高い SD 砥

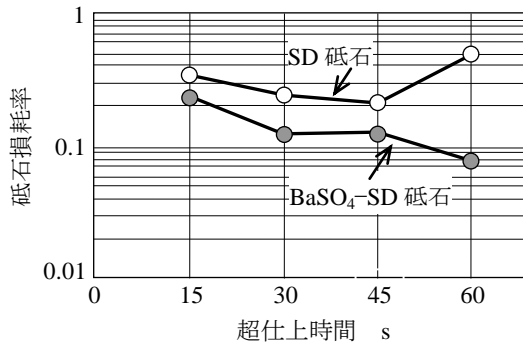


図8 軸受鋼 SUJ2 に対する損耗の比較

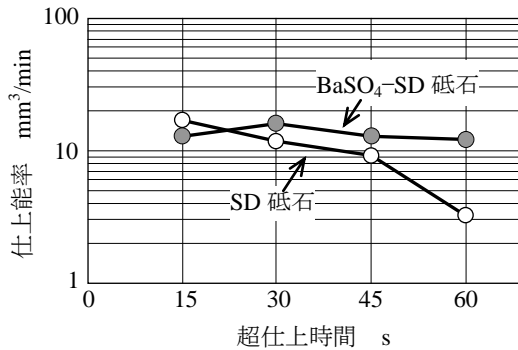


図9 軸受鋼 SUJ2 に対する仕上比の比較

石は作用砥粒数が多いため、SD 砥石の目直し直後の仕上能率は、BaSO₄-SD 砥石よりも高い。しかし、仕上時間 60 s で目直し直後の約 1/5 以下に低下し、切れ味の著しい劣化が認められる。これに対して、BaSO₄-SD 砥石の仕上能率は目直し直後とほとんど変化していない。

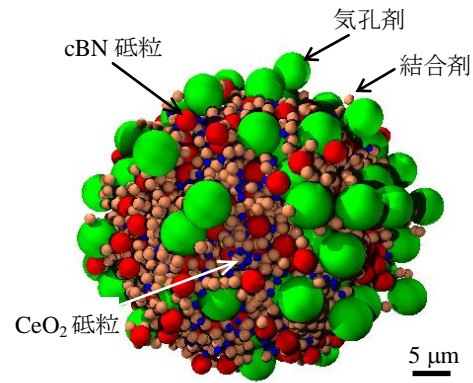
以上の結果から、BaSO₄ 砥粒がダイヤモンド砥石の耐摩耗性を改善させていることが明らかになった。

(3) 複合砥石の構造モデルの構築

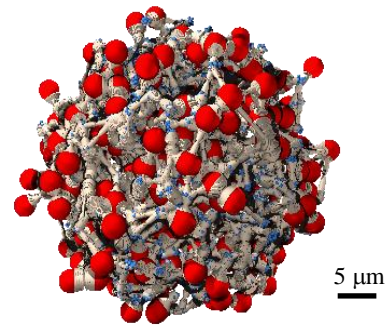
図 10 に、粒子数 6000 個の CeO₂-cBN 複合砥石の凝集モデルおよび焼成モデルを示す。

砥粒分布のフラクタル次元は以下のように求めた。モデルおよび実砥石の砥石作用面内に一辺の長さ a の正方形 (ボックス) を 12 個分任意の位置に置き、その個々のボックス内に存在する砥粒の個数の平均 N を求めた。分布がフラクタルであるならば、 N は a のべき乗に比例し、そのべき数がフラクタル次元と見なせる。焼成モデルにおいては、その形状はほぼ球であるので、中心を通る平面で切った断面を測定面とし、cBN 砥粒、セリアクラスタ各々について調べた。実砥石においては、EDX 分析を用いて、cBN 砥粒に対しては窒素を、セリアクラスタに対してはセリウムのマッピングデータを求め、各原子の強度の高い点を砥粒と見なして測定した。

図 11 にボックスサイズと砥粒数との関係



(a) 凝集モデル



(b) 焼成モデル

図 10 CeO₂-cBN 複合砥石の構造モデル

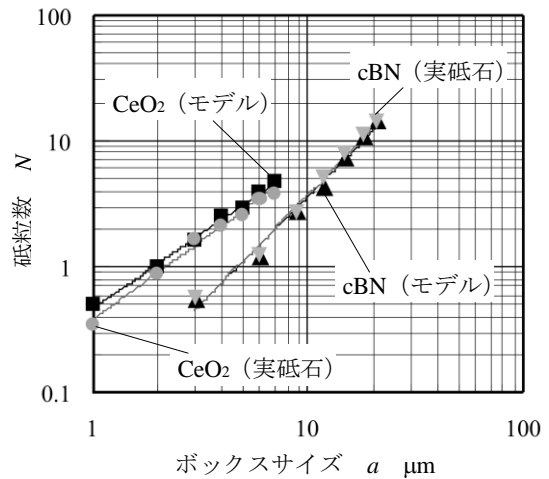


図 11 構造モデルと実砥石のフラクタル次元の比較

を示す。焼成モデル、実砥石ともに cBN 砥粒とセリアクラスタのどちらもほぼ直線の関係になっており、その分布はフラクタルであることを示している。さらに、その直線の傾きからフラクタル次元を求めると、cBN 砥粒では、モデル: 1.71, 実砥石: 1.75 とほぼ一致し、セリアクラスタにおいても、モデル: 1.18, 実砥石: 1.24 と近い値を取った。したがって、

本研究で提案した複合砥粒砥石の構造モデルは、実砥石の構造を非常によく模擬しており、モデルとしての妥当性があると言える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① 山口智実, 古城直道, 樋口誠宏, 島田尚一, 松森 昇, 尾倉秀一, 小田廣和: セリアを含むメカノケミカル超砥粒砥石の構造モデルの構築, 砥粒加工学会誌, 査読有, 54 巻, 9 号, pp.557-561 (2010).
- ② Naomichi Furushiro, Masahiro Higuchi, Tomomi Yamaguchi, Takashi Sugimoto, Noboru Matsumori, Hidekazu Ogura, Shoichi Shimada: Development of Mechanochemical Diamond Stone Containing BaSO₄ Abrasive, Precision Engineering, 査読有, Vol.34, Issue 3, pp.419-424 (2010).
- ③ 古城直道, 樋口誠宏, 山口智実, 杉本隆史, 島田尚一, 寺内俊太郎, 松田茂敬, 松森 昇, 尾倉秀一: 鋼の超仕上におけるダイヤモンド砥石の摩耗抑制, 日本機械学会論文集 (C 編), 査読有, 76 巻, 763 号, pp.777-783 (2010).
- ④ 古城直道, 樋口誠宏, 山口智実, 山野隆章, 松森 昇, 尾倉秀一: セリアを含むメカノケミカル超砥粒砥石の超仕上特性, 砥粒加工学会誌, 査読有, 53 巻, 8 号, pp.499-503 (2009).

[学会発表] (計7件)

- ① 平嶺 雄, 古城直道, 樋口誠宏, 山口智実, 松森 昇, 尾倉秀一: 硫酸バリウムを含むメカノケミカル超砥粒砥石による単結晶シリコンの超仕上特性, 2011 年度精密工学会春季大会学術講演会, 東洋大学 (東京都) (2011.3.15).
- ② 井上善朗, 古城直道, 樋口誠宏, 山口智実, 松森 昇, 尾倉秀一: 軸受鋼の超仕上におけるメカノケミカル砥石の材料除去機構, 2010 年度砥粒加工学会学術講演会, 岡山大学 (岡山県) (2010.8.27).
- ③ Furushiro, N., Higuchi, M., Yamaguchi, T., Matsumori, N., Ogura, H., and Shimada, S.: Mechanochemical Superfinishing of Optical Glass —Scratchless Surface Finishing Process—, ASPE 2009 Annual Meeting, Monterey, California, USA (2009. 10.7).
- ④ Yamaguchi, T., Higuchi, M., Furushiro, N., Oda, H., Shimada, S., Matsumori, N. and Ogura, H.: 3D Structure and Surface Topography Models of the Mechano-chemical Composite Grinding Wheel by Fractal Modeling Technique, ASPE 2009 Annual Meeting, Monterey, California,

USA (2009. 10.7).

- ⑤ 平嶺 雄, 古城直道, 樋口誠宏, 山口智実, 松田茂敬, 土井研児, 寺内俊太郎, 松森 昇, 尾倉秀一: 鋼の超仕上におけるダイヤモンド砥石の摩耗抑制の試み, 2009 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 神戸大学 (兵庫県) (2009.9.11).
- ⑥ 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, 2009 年度精密工学会春季大会学術講演会, 中央大学 (東京都) (2009.3.11).
- ⑦ Masahiro Higuchi, Naomichi Furushiro, Tomomi Yamaguchi, Takashi Sugimoto, Noboru Matsumori, Hidekazu Ogura, Shoichi Shimada: Mechanochemical Diamond Stone Containing BaSO₄ Abrasive, ASPE 2008 Annual Meeting, Portland, Oregon, USA (2008.10.21).

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)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

(2)研究分担者

樋口 誠宏 (HIGUCHI MASAHIRO)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号: 50067732

小田 廣和 (ODA HIROKAZU)

関西大学・環境都市工学部・教授

研究者番号: 30067756

島田 尚一 (SHIMADA SHOICHI)

大阪電気通信大学・工学部・教授

研究者番号: 20029317

古城 直道 (FURUSHIRO NAOMICHI)

関西大学・システム理工学部・助教

研究者番号: 80511716