

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420059

研究課題名(和文) サファイア基板の高効率高品位加工を実現するためのスパイラル超音波援用研削法の開発

研究課題名(英文) Development of a Spiral Ultrasonic Assisted Grinding Technique for High Efficiency and High Quality Machining of Sapphire Wafer

研究代表者

呉 勇波 (WU, YONGBO)

秋田県立大学・システム科学技術学部・教授

研究者番号：10302176

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：スパイラル超音波援用研削法を提案し実験装置の試作とサファイアのスクラッチング試験と研削実験を行った。その結果、超音波を援用すると(1)臨界切込み深さが約30%増大し研削抵抗が30%以上減少する；(2)レジンボンド砥石は砥粒切れ刃の微細化と分布密度の向上、ビトリファイト砥石は良好な作業面の維持と耐摩耗性の向上及び加工面品位の改善が確認された；(3)加工面形成機構のフラクタル解析を行い面粗さ、表面欠陥、材料除去モードなどをフラクタル次元で評価できることを示した；などの知見が得られた。また、本技術の実用化に向けて真空チャック付き超音波ユニットを設計・製作しその動作を確認することができた。

研究成果の概要(英文)：A spiral ultrasonic assisted grinding technique was proposed and an experiment setup was constructed. Then, scratching tests and grinding experiments of sapphire material were performed followed by fractal analysis on work-surface formation. The results showed that with ultrasonication (1) the critical depth of cut increases by around 30% and the grinding force decreases by more than 30%; (2) with the resin-bond diamond wheel the grain cutting edge becomes small and its number increases, whilst with the vitrified-bond wheel good working surface is maintained and the wheel wear is reduced followed by the improvement in work-surface quality; (3) the fractal analysis demonstrated that the surface roughness and the material removal mode can be characterized by fractal dimension. In addition, for the practical use of the proposed technique, a new ultrasonic unit with the vacuum mechanism for fixing the workpiece was successfully produced and its performance was confirmed.

研究分野：工学

キーワード：機械工作 生産工学 研削 超音波 サファイア LED

1. 研究開始当初の背景

サファイアは、熱的・機械的特性や化学的安定性などに優れることから、青色 LED 基板、SOS デバイスや圧力センサなど、用途が広い。しかし極めて硬くて脆いため、加工が非常に難しい。従来の加工は、インゴットの切断、ラッピング、ポリシングといった工程で行われるが、最近には特に長時間を要するラッピング工程を短縮または削減して製作コストを低減するため、研削工程の導入が強く求められている。

サファイアの研削に関する最初の研究報告が 1998 年にアメリカの Zhou らによって発表された。その後、関連研究は継続的に進められているが、進展が小さく、研究報告は数件しか見当たらない。また工業界でも積極的に取り組んでいるが、実用化に至るまでまだ道のりが長い。したがって、サファイアを高能率で高品位に研削する技術の開発が急務となっている。

サファイアの研削加工が難しい主な理由は、非常に硬くて脆い材料であるため、ダイヤモンド砥石を用いても研削抵抗が大きく研削温度も高い。これらの点では、工作物側か砥石側に超音波微振動を与えながら研削を行ういわゆる超音波援用研削は、抵抗の低減、粗さの減少、熱の抑制、砥石のセルフドレッシングなどの好効果があることから、サファイアの高能率高品位加工への適用に対する期待がますます高まっている。

従来の超音波援用研削では、超音波振動を (a)加工面に垂直な単方向; (b)加工面上の単方向に付加するといった 2 方式があるが、一長一短がある。慣用研削と比べ方式 (a) は研削抵抗の低減効果が著しく加工能率が大きく向上するが、加工面品位が低下する。方式 (b) は研削抵抗の低減効果、そして加工能率の向上効果がそれほど高くないが、加工面品位が大きく向上する。そこで研究代表者は、YZ 平面 (Y 軸は砥石軸に平行、Z 軸は加工面に垂直) 内の超音波楕円振動を付加しながら研削を行う新しい超音波援用研削法を提案した。従来 2 方式の特長を併せ持ちながら各自の問題点を克服するいわゆる高能率高品位を両立させたものである。

2. 研究の目的

上に述べたような背景で超音波微振動を 2 方向に同時に援用するいわゆるスパイラル超音波援用研削法を考案したが、それを実現するために工作物に超音波楕円振動を与えるユニットの製作と材料除去機構の解明及び研削加工特性の体系的調査を行う必要がある。本課題研究では、実用化を念頭に置いてサファイア試料の着脱が容易な真空チャッキング機構付きの超音波ユニットの設計・製作、また単粒スクラッチ試験によるスパイラル超音波作用下の材料除去機構の検討、さらにスパイラル超音波研削加工特性 (研削抵抗、加工面粗さと性情、砥石の摩耗)

の体系的把握を行うことによってサファイア基板の高能率高品位研削加工を実現するためのスパイラル超音波援用研削法の確立を研究目的とする。

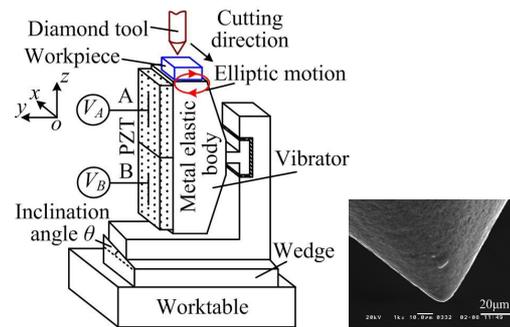


図 1 スクラッチ試験加工概念図と単粒工具

3. 研究の方法

上述目的を達成するために次の各項目についてそれぞれの手法で研究を進めた。

(1) 単粒スクラッチ試験

図 1 に、スパイラル超音波援用単粒スクラッチ試験の加工概念図と単粒工具切れ刃の SEM 写真を示す。超音波楕円振動子を中心要素とした研削ユニットを製作し、既設のマシニングセンタ(ヤマザキマザック(株)、VTC-160C)のワークテーブル上に設置する。この振動子は 2 極に分極された圧電素子(PZT)を金属(SUS304)弾性体上に接着させ、形状と寸法を縦 1 次(L1)と屈曲 2 次(B2)の振動数 f_{L1} f_{B2} が同じになるように決めたものである。PZT に位相差が ψ で周波数 f がともに f_{L1} か f_{B2} の近傍にある 2 相の超音波域電圧を印加すると、振動子の縦 1 次と屈曲 2 次振動が縦振幅 A_L と横振幅 A_B で同時に引き起こされ、両者の合成で振動子端面が楕円振動する。このとき、工作物の送りに伴い砥粒が空間的にスパイラル運動をするため、スパイラル超音波振動援用研削が実現される。

ここで、研削ユニットを下部に楔型スペーサを介して傾斜角度 θ を与えて設置する。工具として砥粒切れ刃を模した単粒ダイヤモンドスクライバ(先端半径 $6\mu\text{m}$ 、先端角度 85°) を取付け、切込み深さ a_p を与えてから x 方向に一定の送り速度 V_s で送ることにより、過渡的切削過程となる。工作物として $112 \times w15 \times t0.5 \text{ mm}$ に切り出した単結晶サファイアウエハ(C 面)の薄片を接着した。 a_p 値は $0\text{-}2 \mu\text{m}$ へ変化するように $\theta=0.15^\circ$ を与えて研削ユニットを設置した。実験は $f=21.95\text{kHz}$ 、 $\psi=90^\circ$ 、 $V_s=3.6 \text{ m/s}$ を一定とし、印加電圧 V_{p-p} を 0 V 、 50 V ($A_L = 0.25\mu\text{m}$ 、 $A_B = 0.22 \mu\text{m}$)、 100 V ($A_L=0.4\mu\text{m}$ 、 $A_B=0.38\mu\text{m}$) と変化させて行い、加工後の工作物表面を SEM と AFM よりそれぞれ比較しながら観察・評価した。なお、試験は乾式で行った。

(2) ダイヤモンド砥石による研削実験

図 2 に研削実験装置の構成概略と加工概念図を示す。スクラッチ試験に使用した研削ユニットを既設の CNC 平面研削盤のワークテーブル上に設置する。実験条件を表 1 に示す。

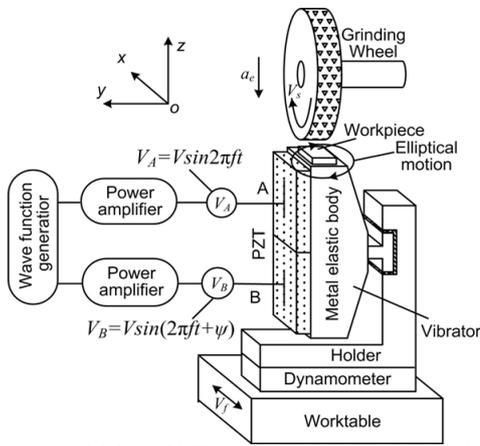


図2 研削実験装置の構成概略と加工概念図

表1 研削実験条件

超音波振動	周波数 f	21.95 kHz
	印加電圧 V_{p-p}	50 V
	位相差 ψ	90°
研削砥石	・SD800N75B(レジン, φ180×t15mm)	
	・SD800S150V(ビトリ, φ180×t15mm)	
加工パラメータ	砥石周速 $V_g=20\text{m/s}$ (レジン砥石)	
	$V_g=15\text{m/s}$ (ビトリ砥石)	
	工作物送り速度	
	$V_s=0.2\text{ m/min}$ (レジン砥石)	
	$V_s=0.5\text{ m/min}$ (ビトリ砥石)	
切込み深さ a_p	$a_p=2\ \mu\text{m}$ (レジン砥石)	
	$a_p=2\ \mu\text{m}$ (ビトリ砥石)	
加工液	無し	

工作物とその固定方法は、スクラッチ試験と同じにした。振動子端面上に固定した工作物の超音波振動軌跡をレーザドップラ振動計で測定し、 $A_L=0.25\ \mu\text{m}$, $A_B=0.22\ \mu\text{m}$ 程度の楕円振動が得られる f , V_{p-p} , ψ を設定した。なお、本研究で使用したダイヤモンド砥石は、外周の一部が着脱可能になっており、砥石作用面を直接観察することができる。したがって、連続研削における任意の研削パスでSEM(株)TOPCON, SM-200)を用いて砥粒切れ刃挙動について測定・評価した。

(3) 加工面のフラクタル解析

加工面トポグラフィは一種の複雑な3D幾何学構造であり、その定量的評価は面粗さだけでは不十分でフラクタル次元 D を用いて定量的に示すことが求められている。フラクタルとは、何分割してももとの図形と似た形が現れる自己相似性を持った幾何学構造を指す。図3にフラクタル次元の計算によく用いられている3D box-counting法を示す。図示のように、寸法 r がカバーする範囲において $N(r)$ 個の box があるとすると、次の関係が成り立つ。

$$\ln N(r) = D \ln \left(\frac{1}{r} \right) + B$$

すなわち、 $\ln N(r)$ が $\ln(1/r)$ と直線関係にあり、その傾きがフラクタル次元となる。任意の3Dフラクタル体のフラクタル次元は次の3ステップで求められる：(1)寸法 r の立方体を多数選

んで積み重ねて1つの3Dフラクタル体にする；(2)フラクタル体が完成されるのに必要な立方体の数 $N(r)$ を求める；(3)寸法 r を小さくして(1)と(2)を繰り返す。異なる加工条件で得られた加工面についてフラクタル次元と粗さの対応関係を求めサファイア試料の新しい面形状評価手法を検討することにした。

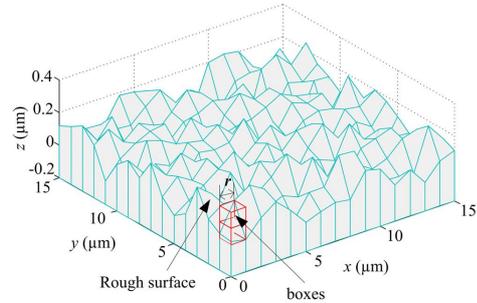


図3 3D box-counting法の概念図

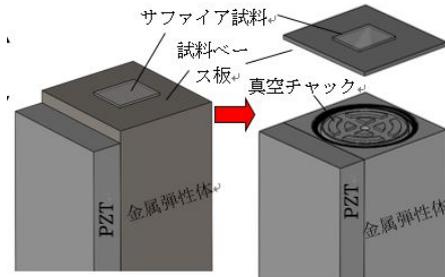


図4 真空チャック付き振動子の基本構造

(4) 真空チャック付き超音波振動子の試作

上述の実験検討で使用した超音波振動子は、試料の脱着機構がないため、サファイア試料を接着によって固定するため、実用化に向かない。そこで、本研究では図4に示すような構造を有する真空チャック付きの新しい振動子を設計・製作することにした。

この新しい振動子は、既設品と同じようにL1B2型で2分極されたPZTを金属弾性体上に接着させてあるが、その一端に真空チャックを設けた構造となる。そのため、試料ベース板が別途必要となり、その上に試料を接着・固定したまま真空中で振動子上端面に強く吸着され楕円振動する。形状と寸法を両モードの振動数 f_{L1} f_{B2} が同じになるように決める。

4. 研究成果

(1) スクラッチ試験の特性

図5(a)と(b)にそれぞれ超音波無しと有りて形成されたスクラッチ痕のSEM観察例を示す。超音波無しでは直線状溝が形成された。このとき、 a_p の減少に伴い溝側部や底面に脆性破壊が見られる領域から、溝底面が延性的に形成される領域へ遷移し、溝が見られないラビング・プラウイング領域となる。それに対して、超音波有りでは正弦波状の溝が形成される。また、ラビング・プラウイング領域においても、縦振動の効果により断続的に材料が除去されていることが分かる。溝が形成されてから脆性破壊が生じる領域までの溝長さは、図5(b)では210 μm で図5(a)での65 μm

の約 3.2 倍になり、超音波有りで延性モード領域が増加した。また、延性/脆性モード遷移点付近を AFM で詳細に観察し、断面形状を測定したところ、臨界切込み深さ a_c は超音波有りでは $1.146\mu\text{m}$ で超音波無しでの $0.312\mu\text{m}$ の約 3.7 倍になった。以上の結果から、スパイラル超音波援用研削では、慣用型研削と比較して、高能率の条件下においても延性モード研削がしやすく、高品位の表面創成が容易であると考えられる。

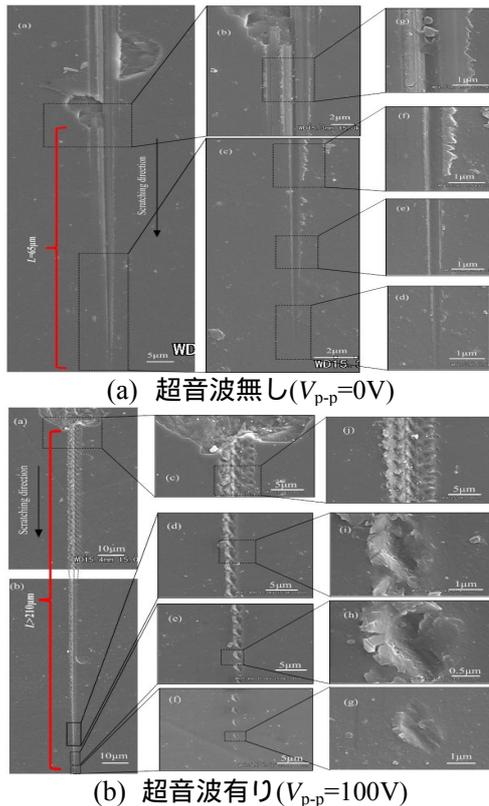


図 5 スクラッチ痕の SEM 観察結果

(2) 研削加工特性

まずレジンボンドダイヤモンドを用いた際の研削中法線研削抵抗 F_n' の変化を図 6 に示す。超音波無し時と比べ超音波有り時は F_n' が小さく、その上昇率もゆるやかであった。その原因を探るため、研削中砥粒切れ刃密度の変化を調べ、図 7 のような結果になった。超音波有では、研削中この密度の減少が少なく、超音波無しと比べ常に多くの切れ刃が維持されている。さらに、砥粒切れ刃も詳細に観察した。超音波無しでは切れ刃先端が摩滅摩耗し、それに伴い抵抗が増大して大きな破砕が起こることがわかった。一方、超音波有りでは、摩滅摩耗がほとんどなく、微小破砕による微細なステップ状の切れ刃が形成されている。これらの結果が超音波有りでは安定した研削状態を保つ要因の一つであると考えられる。

図 8 に研削中ビトリ砥石の半径摩耗 ΔR の変化を示す。超音波の有無にかかわらず ΔR 値は研削中上昇するが、超音波有での上昇率が低い。超音波有での研削比 G_s は無しでのそれより約 50% 高い。すなわち、超音波援用で砥石摩耗が大きく抑制される。

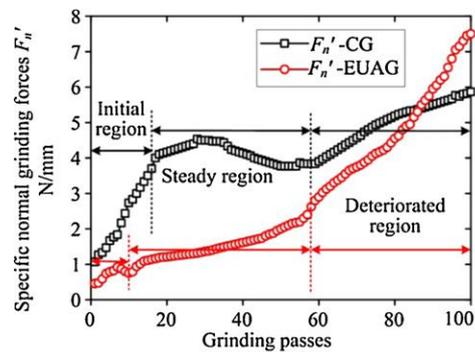


図 6 研削中超音波無(CG)・有(EUAG)における法線研削抵抗の変化(レジン砥石)

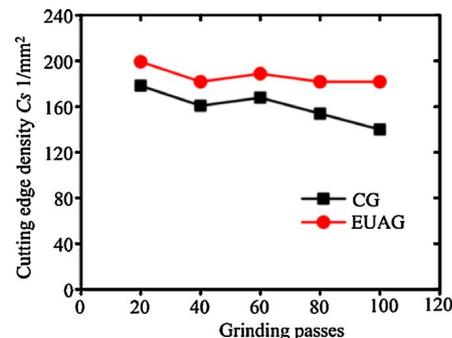


図 7 研削中超音波無(CG)・有(EUAG)時の砥粒切れ刃分布密度の変化(レジン砥石)

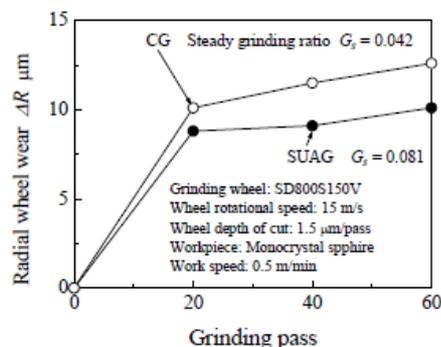


図 8 研削中砥石摩耗量の変化(ビトリ砥石)

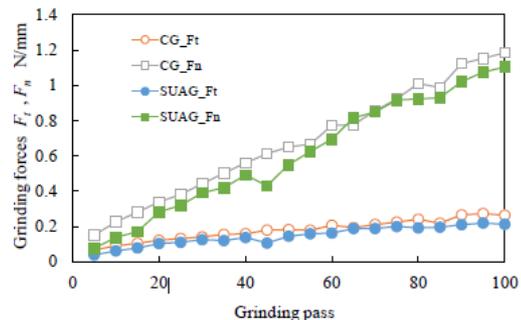
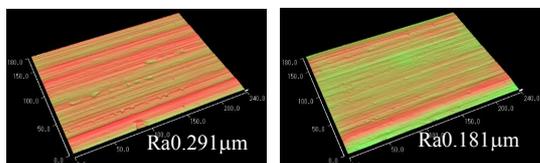


図 9 研削中研削抵抗の変化(ビトリ砥石)

図 9 に、ビトリ砥石を用いた際の研削中研削抵抗の変化を示す。研削中超音波の有無にかかわらず抵抗がほぼ直線的に増えるが、超音波有りのほうは増加率が小さい。その結果、超音波援用すると法線抵抗と接線抵抗がそれぞれ約 15% と 19% 減少した。また図 10(a) と (b) にそれぞれ超音波有りとし無し時の 100 パス研削後工作物表面の 3D レーザ顕微鏡写真を示す。超音波有りのほうは、面粗さが小さく、



(a) 超音波無し (b)超音波有り
 図 10 超音波有り・無しにおける工作物加工面 3D レーザ顕微鏡写真 (100 パス研削)

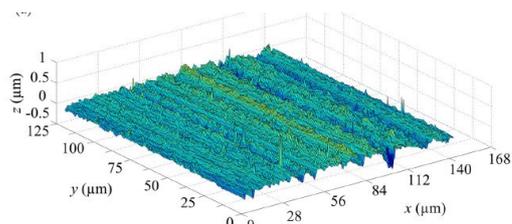


図 11 加工面 3D プロファイルの一例

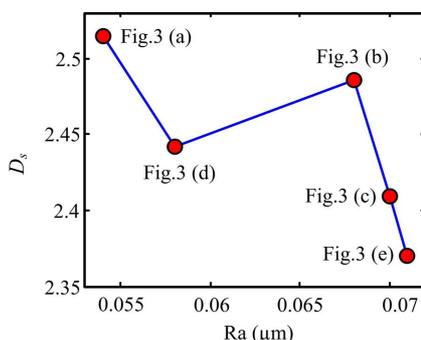


図 12 3D フラクタル次元と面粗さの関係

クラックや脆性破壊などの表面欠陥が大分抑制されていることがわかる。

(3) 加工面のフラクタル解析結果

スパイラル超音波援用研削で生成されたサファイア試料表面は図 11 に示すように顕著なフラクタル挙動を示す。そこで、5 つの加工条件で得られたサファイア試料表面の面粗さ Ra と 3D フラクタル次元 Ds との対応関係は図 12 のように求めた。明らかに、Ds が Ra と負の相関性を持ち、その値が面欠陥に敏感で品位の良い面は Ds 値が大きい。また図示していないが、研削断面形状の 2D フラクタル次元の分布から材料除去モードを推測できることとサファイア研削面の性状は 3D と 2D フラクタル解析によって評価でき、高い D2 と Ds の値は延性モード加工で高品位面が形成されることも明らかになった。

(4) 真空チャック付き振動子の動作試験

図 13 に試作した新しい振動子とその周辺装置を示す。真空ポンプをバルブを介して振動子に接続し、ポンプの作動で試料ベース板を吸着させたまま、周波数特性と振動軌跡を測定した。その結果、共振周波数が設計値に近い 22.48kHz と分かった。また図 14 に試料の楕円運動軌跡の測定例を示す。22.5kHz で長径 0.55μm、短径 0.45μm の楕円運動が発生していることが確認された。



図 13 試作した真空チャック付き超音波振動子と周辺装置

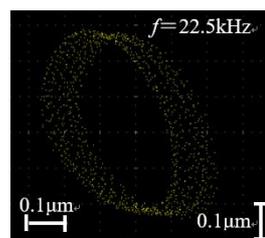


図 14 楕円運動軌跡の測定例

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 10 件)

Zhiqiang Liang, Xibin Wang, Yongbo Wu, 他 3 名, Grinding force characteristics in Elliptical Ultrasonic Assisted Grinding (EUAG) of Monocrystal Sapphire, Int. J. of Abrasive Tech., 査読有、in press.

Qiuyan Wang, Zhiqiang Liang, Xibin Wang, Tianfeng Zhou, Wenxiang Zhao, Yongbo Wu, Li Jiao, Investigation on surface formation mechanism in elliptical ultrasonic assisted grinding (EUAG) of monocrystal sapphire based on fractal analysis method, Int. J. of Advanced Manuf. Tech., 査読有、in press 4/2016; DOI: 10.1007/s00170-016-8700-7.

Qiuyan Wang, Zhiqiang Liang, Xibin Wang, Wenxiang Zhao, Yongbo Wu and Tianfeng Zhou, Fractal analysis of surface topography in ground monocrystal sapphire, Applied Surface Science, 査読あり、327 (2015) pp.182-189.

野村光由, 呉勇波, 二次元(楕円)超音波微振動を援用した高能率研削, 超音波テクノ, 査読無、Vol. 27, No.5, 2015, pp. 27-31.

Wang Qiuyan, Liang Zhiqiang, Wang Xibin, Zhao Wenxiang, Wu Yongbo, Jiao Li and Xie Lijing, A three-dimensional Fractal Analysis Method for Ground Monocrystal Sapphire Surface, Advanced Materials Research, 査読有、Vol. 1017, 2014, pp.187-192

Wang Qiuyan, Zhao Wenxiang, Liang Zhiqiang, Wang Xibin, Jiao Li and Wu Yongbo, Research on Fractal Characterization in Grinding of Monocrystal Sapphire, Materials Science Forum, 査読有、Vols. 800-801, 2014, pp.186-190.

Zhiqiang Liang, Xibin Wang, Yongbo Wu, 他 3 名, Grinding force characteristics in Elliptical Ultrasonic Assisted Grinding (EUAG)

of Monocrystal Sapphire, Int. J. of Abrasive Tech., Vol.6, No.4, 2014, pp.286-297

Zhiqiang Liang, Xibin Wang, Yongbo Wu, 他 3 名, Experimental Study on Brittle - Ductile Transition in Elliptical Ultrasonic Assisted Grinding (EUAG) of Monocrystal Sapphire using Single Diamond Abrasive Grain, Int. J. of Machine Tools and Manuf., 査読有, Vol. 71, 2013, pp.41-51

呉 勇波, 単結晶硬脆材料のスパイラル超音波援用研削, 砥粒加工学会誌, 査読無, Vol.57, No.7, 2013, pp.43-49

Zhiqiang Liang, Xibin Wang, Yongbo Wu, 他 3 名, An experimental investigation on effective friction coefficient in Elliptical Ultrasonic Assisted Grinding (EUAG) of monocrystal sapphire, Int. J. Nanomanufacturing, 査読有, Vol.9, Nos.5/6, 2013, pp.477-485

〔学会発表〕(計 10 件)

Takuya Miura, Yongbo Wu, Masakazu Fujimoto, 他 2 名, Grinding performance of spiral ultrasonic assisted grinding for monocrystal sapphire using vitrified diamond wheel, 2015'LEM21, 2015.10.18-22, Kyoto, Japan

三浦拓也, 呉勇波, 野村光由, 単結晶サファイアのスパイラル超音波援用研削—超音波振動がダイヤモンド砥石に及ぼす効果—, 2015 年度 JSPE 秋季大会学術講演会, 2015.9.4-6 in 東北大学川内キャンパス

Qiuyan Wang, Zhiqiang Liang, Yongbo Wu, 他 4 名, Research on surface formation mechanism in elliptical ultrasonic assisted grinding (EUAG) of monocrystal sapphire using structure function fractal method, 10th ASME Manufacturing Science and Engineering Conference, 2015.6.5-12, Charlotte, North Carolina, USA.

三浦拓也, 呉 勇波, 藤本正和, 他 2 名, サファイアのスパイラル超音波援用研削の研究—ビトリファイドダイヤモンド砥石の加工特性—, JSME 東北学生会第 45 回学生員卒業研究発表講演会, 2015.3.10 in 八戸高専

藤本正和, 呉勇波, 他 3 名, サファイアウエハのスパイラル超音波援用研削における砥石摩耗特性—ビトリファイドダイヤモンド砥石の作業面トポグラフィ—, JSME 第 10 回生産加工・工作機械部門講演会, 2014.11.15-16 in 徳島大学常三島キャンパス.

藤本正和, 呉勇波, 他 3 名, サファイアウエハのスパイラル超音波援用研削に関する基礎研究—レジンボンドダイヤモンド砥石における砥石切れ刃挙動—, 2014 年度砥粒加工学会学術講演会, 2014.9-9-11 in 岩手大学工学部

藤本正和, 呉勇波, 他 2 名, サファイアウエハのスパイラル超音波援用研削における材料除去機構—単粒スクラッチ試験による

延性 / 脆性モードの遷移について—, 2014 年度 JSPE 春季大会学術講演会, 2014.3.18-20 in 東大本郷キャンパス

J. Cao, Y. Wu, H. Guo, M. Fujimoto and M. Nomuran, Experimental investigation of material removal mechanism in ultrasonic assisted grinding of SiC ceramics using a single diamond tool, 2013' LEM21, 2013.11.7-8, Matsushima, Miyagi, Japan.

M. Fujimoto, Y. Wu, M. Nomura, H. Kanai and M. Jin, Surface topography of small diameter diamond wheel in ultrasonic assisted grinding, 2013' LEM21, 2013.11.7-8, Matsushima, Miyagi, Japan

藤本正和, 呉勇波, 他 2 名, 単結晶材料のスパイラル超音波援用研削における材料除去機構, 2013 年度砥粒加工学会学術講演会, 2013.8.27-29 in 日本大学理工学部

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

〔その他〕
ホームページ
http://www.akita-pu.ac.jp/system/mise/material_structure/PrecisionMachining/index.htm

6. 研究組織

(1) 研究代表者

呉 勇波 (WU YONGBO)
秋田県立大学・システム科学技術学部・教授
研究者番号: 10302176

(2) 研究分担者

藤本 正和 (FUJIMOTO MASAKAZU)
青山学院大学・理工学部・助教
研究者番号: 00581290