

令和元年6月3日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06018

研究課題名(和文)次世代半導体基板の超音波振動を応用した精密研削/研磨技術に関する研究

研究課題名(英文) Study on precision polishing method applied ultrasonic vibration for next-generation semiconductor wafers

研究代表者

神 雅彦 (Jin, Masahiko)

日本工業大学・基幹工学部・教授

研究者番号：80265371

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：SiC、サファイアなどの次世代半導体ウエハーの超音波振動研磨法を開発した。主な効果は、効率的で環境負荷が小さいということである。具体的には、実質研磨距離の延長、砥粒切れ刃の有効利用、サブサーフェスダメージの低減、目詰まりの低減、切りくずの微細化などが明らかになった。超音波振動砥石として、直径107mm、共振周波数 $f=38.3\text{kHz}$ で、粒度#800および#1,000のダイヤモンド砥粒のものを開発した。実験の結果、研磨効率が最大11倍に向上し、表面粗さが1/3程度に低減し、切りくずが微細化し、サブサーフェスダメージが低減し、研磨面には特有のクロスハッチマークが形成されることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

次世代半導体ウエハーは、高硬度で科学的に安定しているため研磨加工が非常に難しいといった課題がある。現状では、酸化剤、UVやプラズマ援用加工法などが提案されている。それに対して、本手法は純粋な力学的加工法であるため、低コスト、低環境負荷となる手法を提案した。この学術的研究成果は、国内の関連学会、国際会議での発表、および論文投稿を予定している。

一方、社会実装に関しては、直径400mm、振動数20kHzでシリカの遊離砥粒用ラップを開発した。実験ではSiCに対して効果が得られることが明らかになっており、今後の半導体基板材料への展開が期待される。その成果は適当な時期に公表したい。

研究成果の概要(英文)：The author has developed an ultrasonic vibration polishing method for next-generation semiconductor wafers such as SiC and sapphire. The main effects are efficiency and low environmental impact. Specifically, the extension of the grinding distance, the effective use of abrasive cutting edges, the reduction of subsurface damage, the reduction of clogging, and the refinement of chips were clarified. The author has developed an ultrasonic vibration stone for experiments, with a diameter of 107 mm, a resonance frequency  $f$  of 38.3 kHz, and diamond abrasive grains of grain sizes # 800 and # 1,000. The experimental results show that the polishing efficiency is improved up to 11 times that of conventional polishing, the surface roughness is reduced to about 1/3, chips are refined, and subsurface damage is reduced. And, it was clarified that a unique cross hatch mark was formed on the polished surface.

研究分野：機械工作

キーワード：超音波振動 研磨 半導体基板 SiC サファイア 超硬

### 1. 研究開始当初の背景

現在、様々な分野で省エネルギー化が進められており、特に電気エネルギーの高効率利用が重要な課題となっている。その中でも、電気の変換や供給、制御を行う次世代半導体には、より一層の高効率化や高性能化が求められている。しかしながら、次世代半導体基板は、従来のシリコン(Si)単結晶の材料物性値の限界まで向上していることから、より基板としての特性に優れているサファイア( $Al_2O_3$ )、炭化ケイ素(SiC)あるいは窒化ガリウム(GaN)などの単結晶材料に変わりつつある<sup>1),2)</sup>。しかしながら、これらの材料はいずれも高硬度脆性材料であり、化学的にも安定しているため、基板の平面、端面、およびノッチ部などの研削/研磨加工が非常に困難であるといった問題点がある。

現状、これらの研磨に対しては、さまざまなアプローチにより研究されている。平面研磨に対しては、酸化剤の利用<sup>3)</sup>、固定砥粒や半固定砥粒パットの検討、固定砥石の利用、紫外線やプラズマによるアシスト研磨<sup>4),5)</sup>などが検討されている。しかしながら、研磨効率、環境負荷、加工コストなどの観点で、それぞれに課題をも有している。本研究では、それらの課題の解決を目指す。

### 2. 研究の目的

本研究では、次世代半導体基板材料の高効率で高精度な研磨法に関して検討する。すなわち、基板研磨に対し超音波振動を援用した研削および研磨法について提案する。この方法は、純粋な力学的手法であり、従来の回転による相対研磨運動に超音波による往復運動を重畳する。効果の検証は、基本的な平面研磨において、研磨機構の解析、基礎実験装置を開発し、それによる基本的効果の解析と検証を行って、提案法の有効性を検討する。

### 3. 研究の方法

半導体基板の研磨工程には、基板平面形成研磨、外周やノッチ研磨、最終のCMPなどの各種工程があるが、本研究では、主としてCMPに至るまでの前工程における高効率、高精度化を目的とする。すなわち、この工程は、基板製造工程の効率化に大きく関与するからである。

そのために、基礎的な実験装置を製作(開発)し、基礎実験を行って、研磨機構の解析、効果の検証を行っていく。

#### (1) 基礎実験装置の開発

設計した砥石の振動モードを **Fig. 1** に示す。砥石はプリハードン鋼製台金上に、ダイヤモンド砥粒およびcBN砥粒を電着して製作した。ステップホーンは砥石軸を兼ねフランジ部が定在波の節となるようにし、砥石台金は半径方向に1次の円板呼吸振動モードとなるようにFEM解析を利用して設計を行った。加振は砥石軸から縦振動により与えた。

設計・製作した実験装置を **Fig. 2** に示す。超音波振動は38kHzボルト締めランジュバン型振動子(BLT)により供給し、振動系全体で周波数  $f=38.7\text{kHz}$ 、および最大振幅  $a=9\mu\text{m}$ (0-p)で振動することを発振テストにより確認した。砥石に回転運動を与えるために実験装置をマシンングセンタ(池貝 TV-4)に取り付けた。ステップホーンはフランジ部で固定し、カバーを取り付けられるように設計してあり、超音波振動子に電気を供給するためにスリップリングを用いた。被削材はホルダに入れ、ボルトで保持できるように設計した。また、研削/研磨機構解析のため被削材が回転しないようボールガイドを用い、その上から重りで定荷重  $P=5.3\text{N}$  を与えた。

**Table 1** に実験条件を示す。被削材には、基本的効果を検証するために超合金 K10 およびクロムモリブデン鋼(SCN415)を用い、次世代半導体基板としては、サファイア( $Al_2O_3$ )およびSiC単結晶を用いた。研磨砥粒には、ダイヤモンド

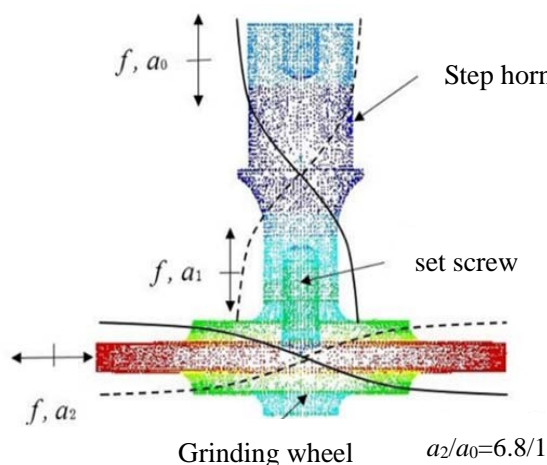


Fig. 1 Wheel vibration mode (FEM data)

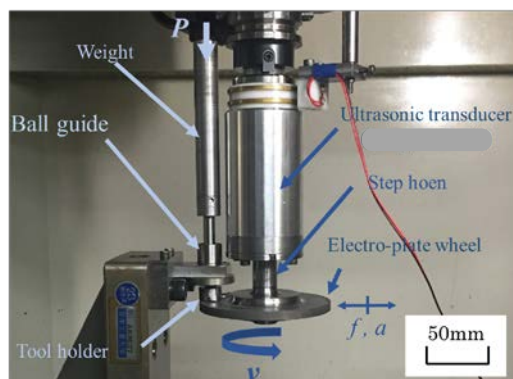


Fig. 2 Actual ultrasonic-vibration grinding/polishing equipment

ド電着砥石(#800, #1000), cBN 電着砥石(#325), およびセレンを使用した. 実験は慣用研削/研磨と超音波振動研削/研磨の振幅による加工量の違い, 砥粒の摩耗形態, 研削/研磨面性状, 切りくず形状について行った.

#### 4. 研究成果

(1) 超音波振動研削/研磨による効果の解析

##### ① 実加工距離の延長

本研究における振動方向は, すべて研削/研磨方向  $v$  に対して加工面内で直交する方向に固定砥粒に超音波振動  $f, a$  を作用させる方法による. **Fig. 3(a)**は慣用研削/研磨の場合であり, 研削/研磨速度  $v$  の方向のみに加工が行われる. それに対して, **Fig. 3(b), (c)** は超音波振動を作用させた場合であり, 振動数  $f$  と振幅  $a$  に応じて加工軌跡が長くなる. すなわち, 単位時間当たりの実質加工距離が延長される

##### ② 砥粒切れ刃の有効利用

振動軌跡が砥粒に与える作用を考察してみる. **Fig. 3(a)**の慣用研削/研磨においては, 砥粒の進行方向の面のみで研削/研磨が行われる. すなわち, 摩耗はその箇所だけに集中する. それに対して, 超音波振動研削/研磨では, **Fig. 3(b), (c)**に示すように軌跡が変化することから, 砥粒の広範な箇所で行われる. すなわち, 摩耗が一箇所に集中せず砥粒が有効利用されるものと推察できる. この効果は砥石寿命の向上に結びつくものと考えられる.

##### ③ クロスハッチ軌跡の形成

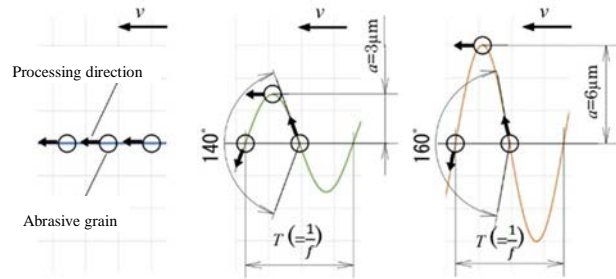
**Fig. 4** に超音波振動研削/研磨機構を示す. 従来の慣用研削/研磨では主き裂の進展方向は加工面深さ方向に入り, 材料内部の応力がその破壊強度を超えたときに, 第2き裂の進展方向が表面方向に向き, 比較的大きなぜい性破壊を起こして切りくずとなる. このとき, 加工面にクラックなどのサブサーフェイスダメージを残し, 加工変質層を生成する. これに対し, 超音波振動研削/研磨では砥粒の無数の交差軌跡により **Fig. 4(b)**B-B断面のようにクロスハッチ状の突起が形成される. そのため, 突起を除去するように断続的に研削/研磨が行われる. これにより, 主き裂の進展方向は研削/研磨面深さ方向に深く入る前に材料の破壊強度に達するため, き裂進展方向は水平方向へと変化し, 比較的小さなぜい性破壊を起こして切りくずとなる. よって, 超音波振動を付与しない場合と比べて, 小さなぜい性破壊が断続的に発生する機構となり, 研削力の低下につながり, サブサーフェイスダメージの低減, 表面粗さの向上が期待できる.

##### ④ 弾性ひずみと加速度による目づまり防止

**Fig.5** に振動ひずみと加速度による目づまり防止効果を示す. 超音波振動は研削/研磨砥石や台金を弾性振動させることにより与える. そのため, 砥石と台金には弾性ひずみと

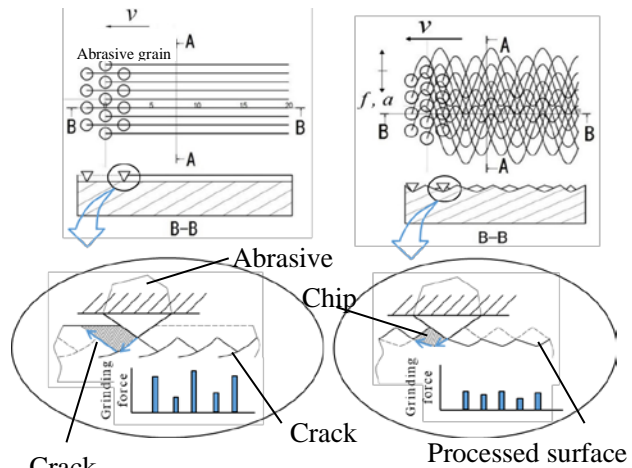
Table 1 Experimental conditions

Frequency $f$	38.7kHz
Amplitude $a$	0(Conventional grinding), 3, 6, 9 $\mu\text{m}$ (0-p)
Grinding/polishing rate $v$ (Rotation speed $n$ )	15m/min (52rpm)
Weight $P$ (Surface pressure)	5.3N(33kPa)
Grinding/polishing time $t$	60min
Work material	Cemented carbide (K10), Sapphire ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), SiC Chrome molybdenum steel (SCM415)
Abrasive grain (Grain size)	Diamond electro-plated (#800, 1000), cBN electro-plated (#325)



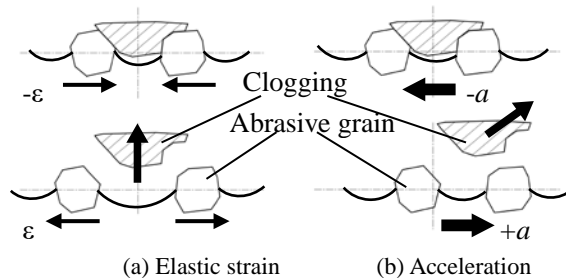
(a)Conventional process (b) Vibration( $a=3\mu\text{m}$ ) (c)Vibration ( $a=6\mu\text{m}$ )

Fig. 3 Grain locus by ultrasonic grinding/polishing ( $v=15.5\text{m/min}$ )



(a) Conventional grinding (b)Ultrasonic vibration grinding

Fig. 4 Ultrasonic-vibration grinding/polishing mechanism



(a) Elastic strain (b) Acceleration

Fig. 5 Clogging prevention mechanism by ultrasonic-vibration grinding/polishing

振動加速度の両方を生じさせる。その分布は設定した振動モードにより決定されるが、それを考慮して砥石を設計あるいは利用することにより、切りくずの目づまり防止に有効に作用させることができるものと考えられる。Fig. 5(a)のように、振動変位が小さい定在波の節の箇所では、弾性ひずみにより砥粒間隔が変化することで目づまりを排出する。Fig. 5(b)のように、振動変位が最大となる腹の箇所では、振動の加速度により目づまりを振り払うことができると考えられる。

⑤ 切りくずの微細化

超音波振動研削/研磨では無数の砥粒交差軌跡により、Fig. 4(b)B-B 断面のようにクロスハッチ状の突起を形成する。その突起を除去するように研削/研磨が行われることから、切りくずが微細化されると考えられる。これにより、研削/研磨面の表面粗さが向上し、かつ砥石への目づまり抑制効果が期待できる。

(2) 実験結果および考察

① 加工量

Fig. 6 に各被削材における研削/研磨時間  $t$  と除去体積  $V$  との関係を示す。Fig. 6(a)の超硬合金(K10)の場合は、超音波振動研削/研磨では慣用研削/研磨に対して振幅  $3\mu\text{m}$  では2.2倍、 $6\mu\text{m}$  では3.2倍、 $9\mu\text{m}$  では4.5倍に除去体積が増加し、研削/研磨効率が向上することがわかった。Fig. 6(b)のサファイアの場合は超音波振動研削/研磨では慣用研削/研磨に対して、振幅  $3\mu\text{m}$  では4.32倍、 $6\mu\text{m}$  では11.14倍、 $9\mu\text{m}$  では11.32倍に除去体積が増加した。また、サファイアは超硬合金に比べて、サファイアの方が慣用研磨では振幅  $3\mu\text{m}$  では1.76倍、 $6\mu\text{m}$  では6.35倍、 $9\mu\text{m}$  では15.79倍に除去体積が増加した。

Fig. 6(c)のクロムモリブデン鋼では、振幅  $3\mu\text{m}$  では2.67倍、 $6\mu\text{m}$  では8.53倍、 $9\mu\text{m}$  では22.60倍に除去体積が増加した。振幅が  $3\mu\text{m}$  ごと増加するに伴い、2~3倍の倍率で除去体積が増加した。

どの被削材においても振動による実質研削/研磨距離の増加および弾性ひずみと加速度による目づまり防止効果により、除去体積が増加したのと考えられる。

② 研削/研磨面

Fig. 7 にSEM観察による各被削材の研削/研磨面を示す。Fig. 7(b)より、超音波振動研削/研磨の砥粒軌跡から砥粒切れ刃領域を測定した結果、 $165^\circ$ であった。Fig. 7(d), (c)に示すように、サファイアおよびクロムモリブデン鋼においても同様に超音波振動研削/研磨の砥粒軌跡が形成された。このことから、砥粒1刃あたりの加工軌跡は、解析した通りの正弦波形を描いて研削/研磨が行われており、加工距離が増加していることを目視で確認した。さらに、砥粒軌跡が交差し、クロスハッチ状の軌跡を形成していることが確認できた。

③ 砥粒摩耗

Fig. 8 に超硬合金を超音波振動( $a=9\mu\text{m}$ )研削/研磨後のSEM観察画像を示す。超音波振動研削/研磨の砥粒の摩耗痕から、砥粒切れ刃領域角度を計測した結果、 $130^\circ$ であることがわかった。加工方向が変化し、砥粒切れ刃領域が拡張していることが確認できた。サファイアおよびクロムモリブデン鋼も同様の摩耗形態が確認できた。

④ 切りくず

各被削材の超音波振動研削/研磨における切りくずの微細化についてSEMを用いて観察した。超硬合金におけるSEM観察結果をFig. 9に示す。慣用研削/研磨に対して、超音波振動研削/研磨では切りくずが微細化していることがわかる。どの被削材においても振幅が大きくなるにつれ、切りくずが微細化していることが確認できた。これは上記で述べたよう

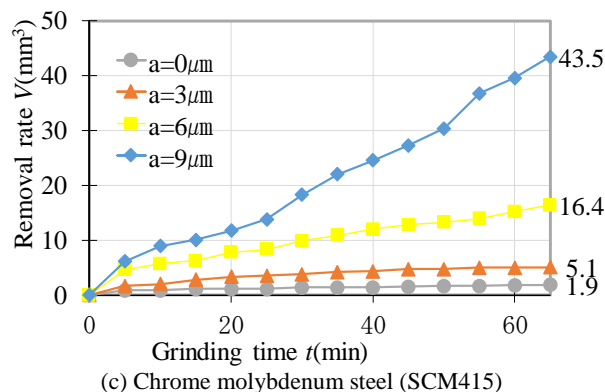
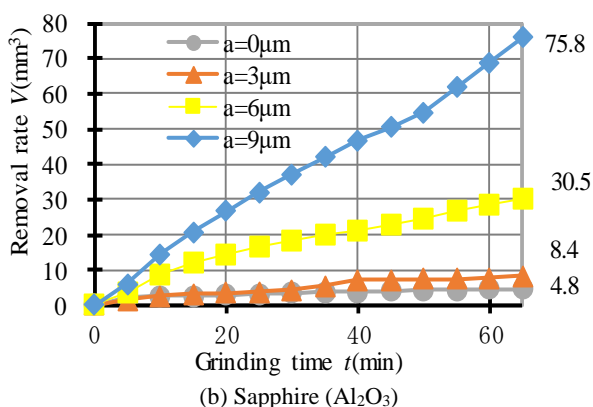
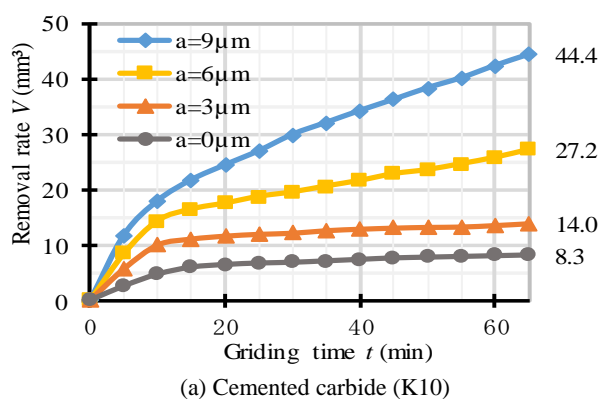


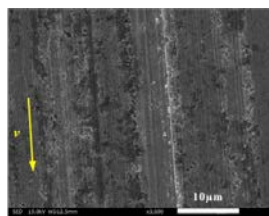
Fig.6 Relationship between grinding time  $t$  and removal rate  $V$

に、クロスハッチ軌跡の形成により切りくずが微細化されたと考えられる。

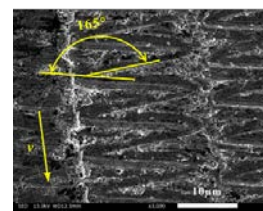
### (3) 実用化装置の開発

本研究では、前述の基礎研究の他に、この研磨法を実際実現するための超音波振動砥石の開発も行った。砥石の設計には、円板の呼吸振動モードを規準振動とし、直径 $\phi$ 400 mm、振動数38kHz および 20kHz で半径方向に超音波振動し、シリカの遊離砥粒用および砥粒を半固定保持できるものの2種類の研磨パットを有する超音波振動砥石を開発した。

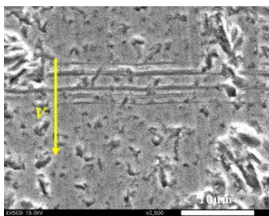
実験では、SiC に対して基礎実験の場合と同様に研磨効率が向上すること、切りくずが微細化すること、超音波振動の振幅を増加させるほど研磨効率が向上することなどを明らかにした。この研究成果は、提案した研磨法が有効であることを示しており、今後の半導体基板材料への展開が期待されている。4 (1) および (2) で述べた研究成果は、国内の関連学会にて発表し、かつ現在、国際会議での発表、論文投稿を予定している。(3) における実用的装置による成果は、今後適当な時期に公表したい。



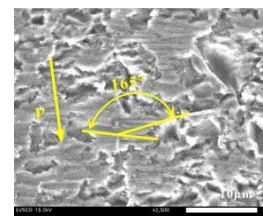
(a) Conventional grinding (K10)



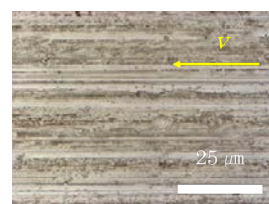
(b) Vibration (K10,  $a=9\mu\text{m}$ )



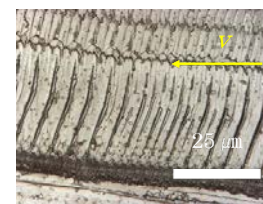
(c) Conventional grinding ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )



(d) Vibration ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $a=9\mu\text{m}$ )



(e) Conventional grinding (SCM415)



(f) Vibration (SCM415,  $a=9\mu\text{m}$ )

Fig. 7 Ground surface conditions

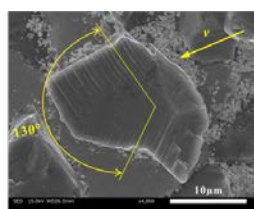
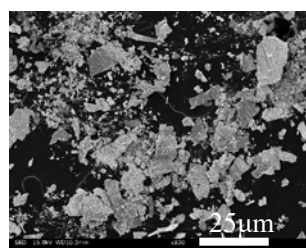
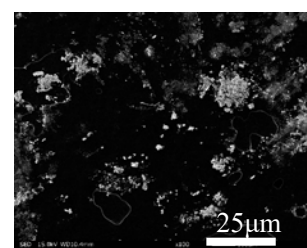


Fig. 8 Grain wear condition by ultrasonic-vibration grinding ( $a=9\mu\text{m}$ )



(a) Conventional grinding



(b) Vibration ( $a=9\mu\text{m}$ )

Fig. 9 Chip formation

### 参考文献

- 1) 菅原良孝：進展著しい SiC パワーデバイスと適用装置の開発，電気学会誌，Vo.125，No.1，2005，pp.25-2.
- 2) 滝修：サファイア・SiC 基板と MEMS ウェハの研削・研磨技術，THE CHEMICAL TIMES，Vol.227，No.1，2013，pp.3-6.
- 3) 八木圭太：触媒表面基準エッグ法を利用した窒化ガリウム基板研磨技術，エバラ時報，No.244，2014，pp.8-9.
- 4) 坂本武司 他：2 インチ SiC 基盤の紫外光支援研磨に関する研究，砥粒加工学会誌，Vol.57，No.8，2013，pp.34-39.
- 5) 坂本武司 他：4 インチ SiC 基板の UV アシスト研削/研磨に関する研究，砥粒加工学会誌，Vol.58，No.4，2014，pp.24-29.

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

- ① Hiroyasu Iwabe, Mitunori Hiwatashi, Masahiko Jin, Hidenari Kanai : Side Milling of Helical End Mill Oscillated in Axial Direction with Ultrasonic Vibration, International Journal of Automation Technology, 査読有, Vol.13, 2019, pp.22-31.
- ② 神雅彦：超音波を利用した材料加工技術，機能材料，査読無，39 巻，2019，pp.20-27.
- ③ 神雅彦：高硬度半導体基板材料の超音波研磨，工業材料，査読無，Vol.65，No.5，2017，pp.10-11.
- ④ 神雅彦：超音波振動を応用した生産加工技術，精密工学会誌，査読無，82 巻，2016，pp.403-406.

〔学会発表〕（計7件）

- ① 佐藤隼太郎, 菊地正人, 白石博康, 佐藤真堯, 神雅彦: 高硬度脆性材料の超音波研磨に関する基礎的研究 (第4報) -cBN ホイールによる焼入鋼の研磨-, 2019年度精密工学会春季学術講演会, 2019.
- ② 神雅彦: 現場で活かせる・使える ~超音波振動を活用した生産加工技術~, 振動援用による加工技術高度化研究会第1回研究会, 2018.
- ③ 佐藤隼太郎, 菊地正人, 白石博康, 佐藤真堯, 神雅彦: 砥粒切れ刃形状と研削機構との関係に関する基礎的研究-第1報-, ABTEC2018 in 金沢, 2018.
- ④ 神雅彦, カスリアピラポン, 佐藤隼太郎, 高硬度脆性材料の超音波研磨加工に関する基礎的研究 (第3報) -切れ刃形状と切削機構との関係-, 2018年度精密工学会春季大会学術講演会, 2018.
- ⑤ 神雅彦, 金井秀生: 高硬度脆性材料の超音波研磨加工に関する基礎的研究-第2報: サファイアの研磨-, ABTEC2017 砥粒加工学会学術講演会, 2017.
- ⑥ 神雅彦, 金井秀生, 高橋一彰, 渡辺健志, 後藤隆司: 高硬度脆性材料の超音波研磨加工に関する基礎的研究 (第2報) -サファイアに対する加工特性-, 2017年度精密工学会春季大会学術講演会, 2017.
- ⑦ 神雅彦: 超音波振動を利用した材料加工技術の開発, Colloquium2017「技術科学と生産技術の交流-9」, 2017.

※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、研究者個人に帰属されます。