

平成 30 年 5 月 10 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420069

研究課題名(和文) 揺動機構内蔵スピンドルを有する硬脆ウエハ研削盤の開発

研究課題名(英文) Development of hard and brittle wafer-grinding machine equipped with vibration assisted spindle system

研究代表者

由井 明紀 (Yui, Akinori)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工・システム工学群・教授)

研究者番号：70532000

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：LEDや半導体パワーデバイスなどの広範な実用化に伴い、高品位・低価格な基板用サファイアウエハの高効率生産が求められている。一方、サファイアウエハは高硬度な脆性材料であり、難削材として位置付けられている。そこで、磁気アクチュエータを用いて砥石スピンドルをアキシャル方向に振動させるシステムを開発しロータリ研削盤に搭載した。試作機を用いて、サファイアの振動援用インフィード平面研削加工を試みた。その結果、難削材料であるサファイアウエハに対しては加工時間の短縮と研削比の向上が実現できた。

研究成果の概要(英文)：Consumption of sapphire wafer has been expanding for LED board and/or power device. Due to the excellent mechanical properties, sapphire wafer is hard to grinding. On the other hand, ultrasonic assisted grinding applies to machining of difficult to grind materials and shows the effect of high-efficiency machining. However, because the cup grinding wheel is heavy, it cannot be applied to ultrasonic grinding. The authors, developed a grinding wheel vibration system and applied infeed surface grinding of sapphire and silicon wafer. Although, high efficiency grinding could be realized for sapphire wafer, it cannot realized for silicon wafer.

研究分野：工学

キーワード：研削 振動 サファイア ウエハ 加工時間 研削比 表面性状 ロータリ研削盤

1. 研究開始当初の背景

サファイアは、その優れた機械的特性、熱的特性、化学的安定性、光学特性などからエレクトロニクス産業を支える基板材料として重要性を増している。特に窒化ガリウムなどの半導体材料と容易に格子整合するため、薄膜成長用基板として各方面から市場の発展性が期待されている。特に、高輝度化が期待できるLEDや、高電圧で大電流を扱うことができ高周波動作が可能な半導体パワーデバイス用基板などとして広範な需要が見込まれる。近年では、ウエハの基板サイズは2インチから4インチへ大径化し、今後は6インチウエハの量産技術の確立が急がれている。

一方、硬脆材料であるサファイアウエハは、その優れた機械的特性に起因して難加工材料であり、特に研削工程における加工能率の向上は産業界の大きな課題とされている。硬脆材料の加工能率を向上させる手法の一つとして、振動援用加工が報告されている。工具あるいは工作物に周波数10kHzおよび振幅数 μm ～数 $10\mu\text{m}$ の超音波振動を付与することで、高効率な加工が実現できている。

すなわち、加工面に対し超音波振動を付与することで、工作物の微細な破壊・排除が促進され材料除去が容易になることや、加工領域への研削液の侵入により研削抵抗が低下するなどの利点が報告されている。これを硬脆ウエハ研削盤に応用すれば、研削抵抗が低下することで消費電力が抑制でき、ウエハ製造工程における加工コストの削減が期待できる。

しかし、ウエハの平面研削においてはカップ砥石を必要とするため、可動体の質量が大きくなることに起因して超音波を重畳することが困難であり、振動援用研削に関する研究成果も報告されていない。

2. 研究の目的

本研究では、新たに振動援用砥石スピンドルシステムを開発し、その運動性能を評価すると共に、カップ形ダイヤモンド砥石を搭載してシリコンウエハおよびサファイアウエハのインフィード平面研削加工を行い、振動援用効果について実験的に考察する。

3. 研究の方法

3.1. 振動援用スピンドルシステムの設計

供試砥石スピンドルは、**図1**に示すようにソレノイドタイプの磁気アクチュエータによる切込み機構を内蔵しており、砥石回転中にアキシャル方向にインフィード研削ができる構造になっている。**図2**および**表1**に示すように、高い磁束密度を有する磁気アクチュエータのコイルが、励振磁束(実線)を導く。その結果、電機子の上下表面に生じる磁束密度を変化させアキシャル方向の駆動力 F が生じる。

図3にウエハのインフィード研削加工の状況を示す。ロータリ研削盤のテーブル上面に設置した、真空チャックにより吸着したウエハの高さは、プローブ式定寸装置を用いてチャック基準

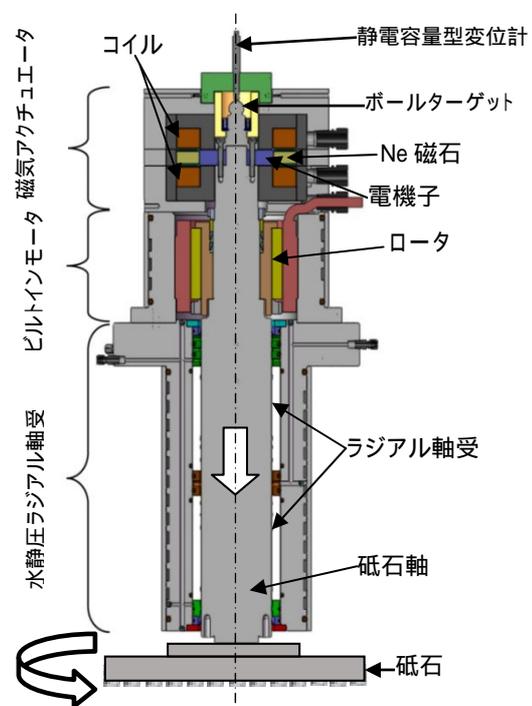


図1 切込機構内蔵砥石スピンドルの構造

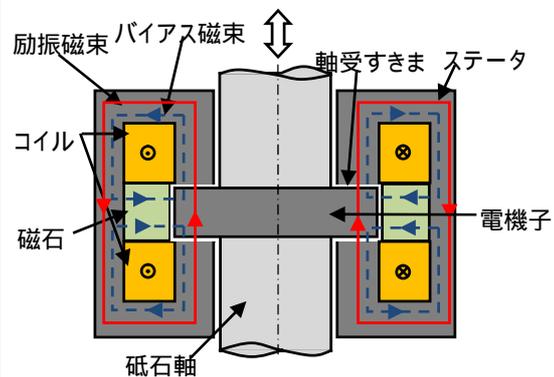


図2 磁気アクチュエータの構造

表1 磁気アクチュエータの仕様

ネオジム磁石の磁束密度	[T]	1.3
砥石(内径×外径×厚さ)	[mm]	129×205×20
コイル巻き数	[巻]	78
コイル数	[個]	32
コイル(内径×外径×厚さ)	[mm]	125×203×2
ステータ内側磁極面積	[mm ²]	7464
ステータ外側磁極面積	[mm ²]	12240
最大軸受すきま	[mm]	1.5
電機子(外径×厚さ)	[mm]	126×25

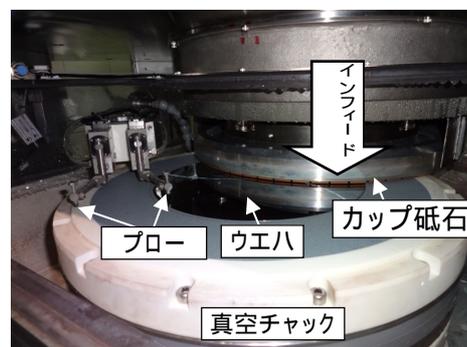


図3 ウエハのインフィード研削加工

面とインプロセス比較測定する。ウエハ高さが定寸値に達した時点でインフィード送りを停止させる。その後、一定時間スパークアウト研削を行い、砥石はリトラクトするシステムとなっている。

3.2 振動機構搭載スピンドルの性能

本研究では、砥石スピンドルにアキシャル方向振動機能を持たせるためのソフトウェア開発を行った。カップ砥石は、一定速度でインフィード切込みを行いながら、アキシャル方向に振動させる。

図4に振動援用研削における砥石先端位置の軌道イメージを示す。砥石軸をアキシャル方向に一定速度で移動させながら、周期 $1\mu\text{s}$ の三角波パルス列を発振させて移動指令を重畳させることで砥石軸の振動制御を行う。指令両振幅 $a\mu\text{m}$ 、指令周波数 $f\text{Hz}$ で砥石軸を振動させた時の三角波振動速度 $a \cdot f\mu\text{m/s}$ とインフィード送り速度 $F\mu\text{m/s}$ から実際の切込み速度 $F_r\mu\text{m/s}$ は(1)式で与えられる。

$$F_r = 2(af + F) \quad (1)$$

すなわち、振動研削における最大切込み速度 F_r は設定した砥石送り速度 F より大きくなる。

3.3 振動援用スピンドルの性能評価

表2に試作した砥石スピンドル振動システムの仕様を示す。図5に示すように、試作したスピンドル先端位置の振動周波数と振幅を変化させて、追従性能を評価する。(a)に示す指令値が高くなると伴に振動周波数の実測値は減衰し、(b)に示す実測値は16Hz以上で追従しなくなる。また、振動周波数15Hzにおける最大振幅は $1\mu\text{m}$ p-p程度に減衰する。

指令周波数に追従しない理由は、本システムの指令クロック($1\mu\text{s}$)に達するまでは反転信号が出力されないことに起因する。また、最大送り速度に制限があるため、指令振幅が $20\mu\text{m}$ p-p以上になると追従できずに減衰してしまう。

3.4 研削加工条件

ウエハの研削加工条件を表2に、カップ砥石の振動条件を表3に示す。粗粒ダイヤモンド砥石による一般的な粗研削の加工条件を選定し、外径150mm高さ100 μm を除去する際の振動援用研削と加工性能を比較する。

ドレッシング後に同一条件で2回研削加工を行い、2枚目のウエハを研削した際の測定値を実験結果として示す。ダイヤモンド砥石の損耗量は、ウエハ1枚研削毎にブロックゲージ(1.5mm)と砥石軸の上下送り機構を用いて、砥石加工面と工作物の隙間を測定することにより比較測定を行う。なお、砥石軸上下送り軸の表示分解能は0.1nmである。

また、加工中の研削抵抗は直接計測することができないため、クランプ電流計(HIOKI電機製、クランプオンパワーハイ

テスト3169-01)を砥石スピンドルに内蔵するビルトインモータの電源部に設置し、消費電力を測定して接線研削抵抗に数値換算する。さらに、研削後のウエハ表面性状は、非接触式表面性状測定装置(Zygo, New View6K)を用い

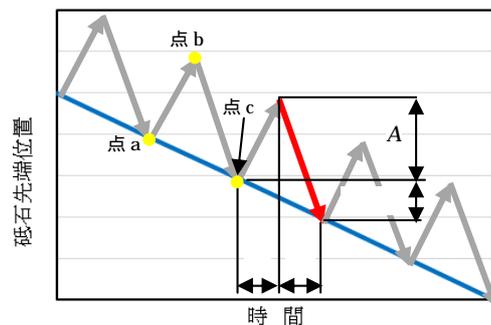
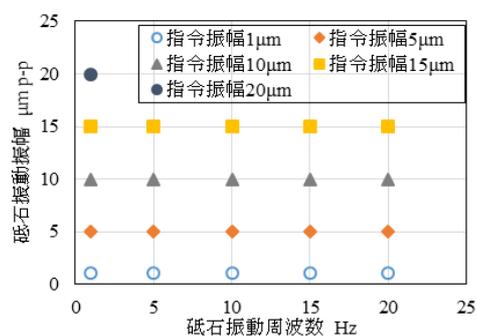
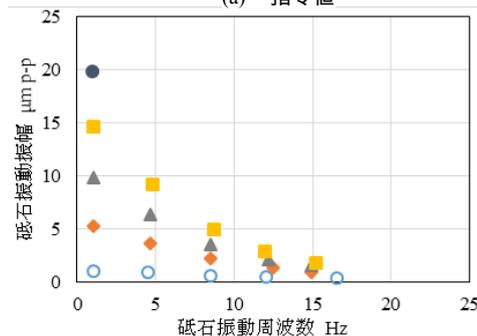


図4 ウエハ揺動研削時の砥石軌道イメージ



(a) 指令値



(b) 測定値

図5 砥石振動周波数と振幅の追従性能の評価

表2 研削加工条件

ウエハ	種類	サファイアウエハ
	外径	150[mm]
砥石	形状	6号ストレート形
	砥粒	ダイヤモンド#325
	種類	SD325MX655GP25 旭ダイヤモンド製
インフィード速度	0.83[$\mu\text{m/s}$]	
除去量	100[μm]	
スパークアウト時間	5[s]	
ドレッシング用砥石	GC280	

表3 カップ砥石の振動条件

条件	A	B	C	D
指令両振幅 [μm]	0	20.26	4.95	1.83
指令周波数 [Hz]	0	0.97	8.69	15.24
切込み速度 [$\mu\text{m/s}$]	0.83	40.13	86.86	56.61

て、外周部 5mm 部の算術平均粗さ Ra を比較測定する。

3.5 砥石振動振幅の影響

サファイアウエハのインフィード平面研削における振動振幅の影響を図 6～図 9 に示す。いずれも指令周波数は 1Hz の条件における測定結果である。図中の中実記号で示す値は砥石に振動を付与した場合で、左軸上の中実記号で示す値は砥石に振動を付与しない場合を示す。

図 6 右軸に砥石振動振幅と砥石切込み速度の関係を示す。砥石振動振幅の上昇に比例して砥石切込み速度は高くなる。左軸に砥石振動振幅と砥石摩耗高さの関係を示す。振動を付与しない条件(振幅 0 $\mu\text{m p-p}$)では、ウエハ上に脱落した遊離砥粒によるラッピング作用により砥石の摩滅摩耗が促進し、砥石摩耗高さが大きくなるものと考えられる。

振幅 5～10 $\mu\text{m p-p}$ の領域では研削油剤の侵入が容易になり、切り屑の排出が促進され、砥石摩耗高さは 1 μm 以下まで小さくなる。これは、砥石の摩滅摩耗と自生発刃のバランスが良くとれている状態だと考えられる。振動振幅 10 $\mu\text{m p-p}$ 以上では、砥石とウエハの衝突速度の上昇に伴い、砥石の自生発刃が活発になり、砥粒が脱落することにより砥石摩耗高さが大きくなるものと考えられる。

図 7 に、砥石振動振幅が正味研削時間に及ぼす影響について示す。振動を付与しない(振幅 0 $\mu\text{m p-p}$)場合と比較して、振動を付与することで正味研削時間は短縮される。これは、研削油剤の侵入性と切り屑排出性、そして砥石の自生発刃に伴い、切れ味が良くなったことに起因すると考えられる。

さらに、振動振幅が大きくなると伴に正味研削時間は徐々に長くなる。これは、振幅が大きくなると砥石と工作物が離れて仕事をしない時間が長くなることにより、正味加工時間が長くなるものと考えられる。本実験の範囲では、砥石の振動振幅 1 $\mu\text{m p-p}$ の条件で正味加工時間は最も短くなる。

図 8 に砥石振動振幅とウエハの算術平均粗さの関係を示す。振動を付与しない(振幅 0 $\mu\text{m p-p}$)時の粗さが 0.22 μmRa と最も小さくなる。これは、砥石が摩滅摩耗して砥粒先端とウエハの間に滑りが発生して粗さが小さくなるものと考えられる。砥石振動振幅の上昇に伴い、砥石の自生発刃が支配的になるため、ウエハ表面の算術平均粗さは大きくなるものと考えられる。

図 9 に、砥石振動振幅と砥石スピンドル消

費電力の関係を示す。前述のように、振動を付与しない場合には、砥石の摩滅摩耗が支配的になるため切れ味が悪く、消費電力は大きく

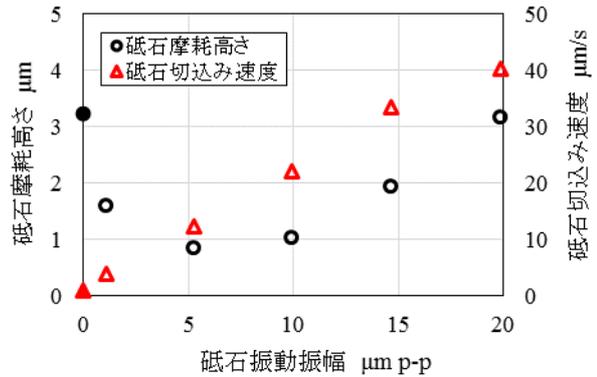


図 6 砥石振動振幅が砥石摩耗高さに及ぼす影響 (指令周波数 1Hz)

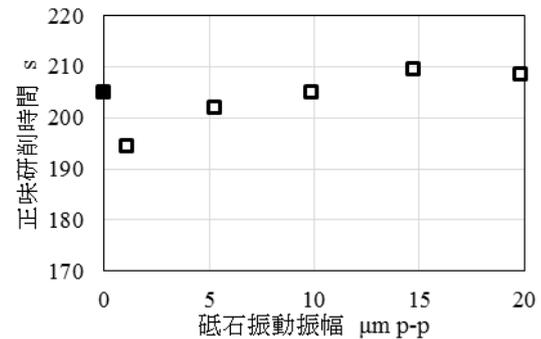


図 7 砥石振動振幅が正味加工時間に及ぼす影響 (指令周波数 1Hz)

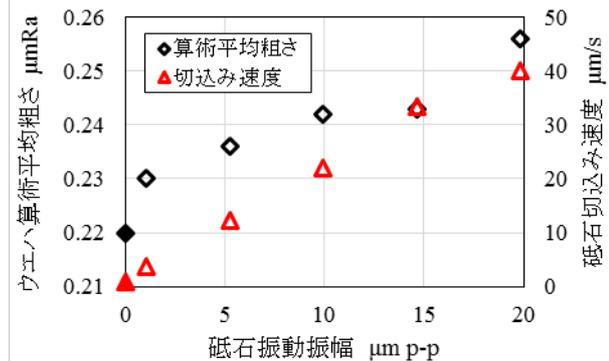


図 8 砥石振動振幅がウエハ算術平均粗さに及ぼす影響 (指令周波数 1Hz)

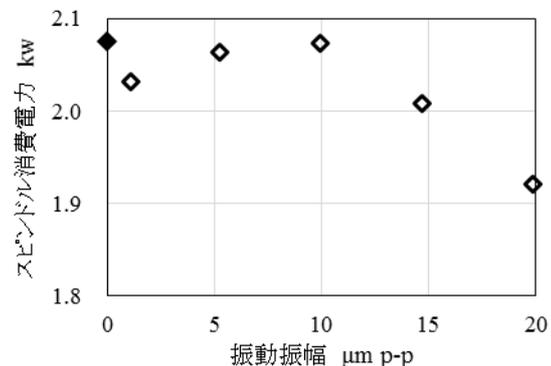


図 9 振動振幅とスピンドル消費電力の関係 (指令周波数 1Hz)

なる。振動を付与することにより消費電力は低下し、振動振幅 1 ~ 10 μm p-p の領域では振動による消費エネルギーの上昇に伴い、消費電力が徐々に上昇する。

振動振幅が 10 μm p-p 付近を超えると、消費電力は振幅の上昇と共に低下する。これは、砥石と工作物が離れている時間が長くなり、切り屑を排出しない時間が長くなる分だけ消費電力量は低くなるものと考えられる。ただし、振幅が大きい領域では、正味加工時間が長くなるため、電力量としては大きくなる。

3.6 砥石振動周波数の影響

サファイアウエハのインフィード平面研削における砥石振動周波数の影響を図 10 ~ 図 13 に示す。いずれも、指令振幅 1 μm p-p の条件における測定結果である。砥粒切込み速度は式(2)より算出した結果であり、周波数上昇に伴う振動振幅減衰の影響も考慮されている。

図 10 右軸に砥石振動周波数と砥石切込み速度の関係を示す。振動周波数の上昇に伴い、砥石切込み速度は上昇するが、振動周波数が 5Hz 付近を超えると、切込み速度は約 9 $\mu\text{m}/\text{s}$ でほぼ一定になる。これは、砥石振動周波数の上昇に伴い振動振幅が減衰することにより、砥石切込み速度の上昇が制限されることに起因する。

左軸に砥石摩耗高さとの関係を示す。振動を付与しない(周波数 0Hz)の場合に砥石摩耗高さが大きくなるのは、前述の通り遊離砥粒によるラッピング作用による砥石の摩滅摩耗によるものと考えられる。振動周波数が 8.7Hz 付近に至るまでは、振動周波数の上昇に伴い砥石摩耗高さも大きくなる。これは、切込み速度の上昇により、砥石の自生発刃が徐々に活発になるためだと考えられる。

振動周波数が 8.7Hz 付近を超えると、砥石摩耗高さは徐々に小さくなる。これは、砥石切込み速度が一定になるため、砥石の自生発刃も一定になる。一方振動の重畳により遊離砥粒や切り屑の排出も活発になり、砥石の摩滅摩耗が抑制され、砥石摩耗高さは徐々に低下したものと考えられる。

図 11 に、砥石振動周波数が正味研削時間に及ぼす影響について示す。振動を付与しない(周波数 0Hz)場合に正味研削時間が 205s と長くなるのは、前述の通り、砥石の摩滅摩耗が進み、切れ味が悪いためだと考えられる。

砥石振動周波数 8.7Hz 付近で正味研削時間は 180s で最小値となり、振動を付与しない場合より約 12% 短縮される。砥石振動周波数が 8.7Hz 付近を超えると、徐々に正味研削時

間は長くなる。これは前述のように、砥石摩耗高さが小さくなることにより、砥石の切れ味が徐々に低下し、正味研削時間が長くなるものと思われる。

図 12 に、砥石振動周波数がウエハの算術平均粗さに及ぼす影響を示す。振動を付与しない(周波数 0Hz 時の算術平均粗さが最も小さく、振動周波数の上昇に伴い粗さは大きくなり、8.7Hz 付近で最大値を示す。前述のように、砥石に振動を付与しない場合は、砥粒の摩滅摩耗による滑りが発生してウエハの表面粗さは小さくなるが、振動周波数の上昇に伴い、砥粒の自生発刃が促進され、ウエハの算術平均粗さが大きくなるものと考えられる。

振動周波数が 8.7Hz 付近を超えると表面粗

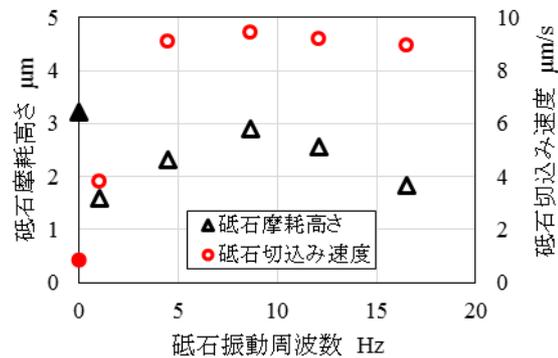


図 10 砥石振動周波数が砥石摩耗高さに及ぼす影響 (指令振幅 1 μm p-p)

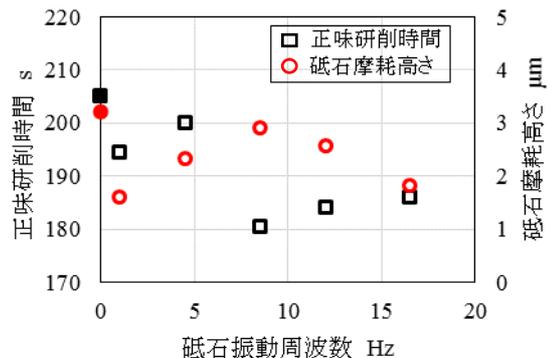


図 11 砥石振動周波数が正味加工時間に及ぼす影響 (指令振幅 1 μm p-p)

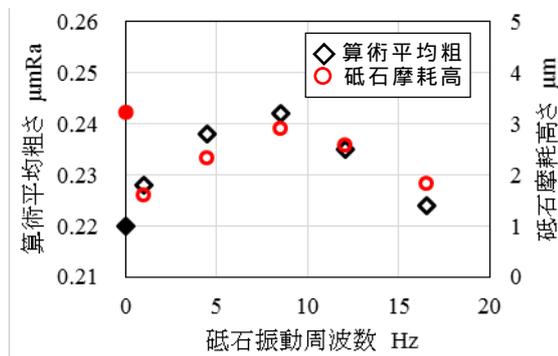


図 12 振動周波数がウエハ表面粗さに及ぼす影響 (指令振幅 1 μm p-p)

さは小さくなるが、これは砥石摩耗高さが抑制されたことに起因するものと考えられる。

図 13 に、砥石振動周波数と砥石スピンドル消費電力の関係を示す。振動周波数の上昇に伴い消費電力は低下する。これは、振動周波数の上昇に伴い砥石が自生発刃することにより新しい切れ刃が現れ、切削抵抗が低くなることに起因するものと考えられる。砥石振動周波数 8.7Hz 付近で砥石摩耗高さが最も大きくなるため砥石の切れ味が良くなり、消費電力は最も低くなる。さらに、砥石振動周波数が高くなると、消費電力は上昇に転じる。これは、砥石摩耗高さが小さくなり、砥石の切れ味が劣化することに起因するものと考えられる。

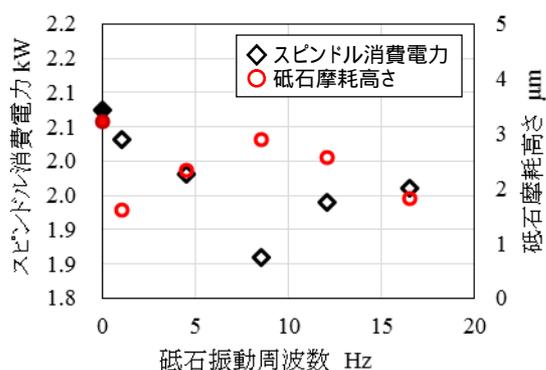


図 13 振動周波数がスピンドル消費電力に及ぼす影響(指令振幅 1μm p-p)

4. 研究成果

インフィード研削中のカップ砥石に、アキシャル方向の振動を重畳できる砥石スピンドルシステムを開発した。本システムを搭載したロータリ研削盤を用い、サファイアウエハの平面ロータリ研削を行い、本実験条件下で以下の結論を得た。

- 1) 砥石振動周波数 1Hz の条件では、振動振幅 1μm p-p において最もスピンドル消費電力が低くなり、正味研削時間も短縮される。
- 2) 砥石振動振幅 1μm p-p の条件では、振動周波数 8.6Hz において最も消費電力が低くなり、正味研削時間も短縮される。
- 3) 砥石摩耗高さは、振動振幅 5 ~ 10μm p-p あるいは、振動周波数 1Hz の条件で最も小さくなる。
- 4) サファイアウエハ表面の算術平均粗さは、振動を付与しない方が小さい。

5. 主な発表論文等

(学会発表) (計 2 件)

- 1) 藪野 真大, サファイアウエハのロータリ研削における砥石揺動効果に関する研究, 砥粒加工学会, 砥粒加工学会学術講演会, 2017.
- 2) 藪野 真大, 切込機構内蔵砥石スピンドルを用いたシリコンウエハの揺動研削に関する研

究, 砥粒加工学会, 砥粒加工学会学術講演会, 2016.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

由井 明紀 (YUI AKINORI)
防衛大学校・システム工学群・教授
研究者番号: 70532000

(2) 研究分担者

北嶋 孝之 (KITAJIMA TAKAYUKI)
防衛大学校・システム工学群・准教授
研究者番号: 5046174

(3) 研究協力者

A.H.Slocum
マサチューセッツ工科大学・教授

X-D.Lu
ブリティッシュコロンビア大学・准教授

楠山 純平 (KUSUYAMA JUNPEI)
防衛大学校・後期博士課程学生