

平成 29 年 5 月 28 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26289021

研究課題名（和文）導電性ナノ結晶ダイヤモンド工具を用いた電磁場での単結晶シリコンの超精密切削

研究課題名（英文）Ultraprecision cutting of single-crystal silicon using electrically conductive nano-crystal diamond tools under electromagnetic fields

研究代表者

閻 紀旺（YAN, JIWANG）

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：40323042

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：車載ナイトビジョン装置や夜間防犯カメラ、サーモグラフィーなどの赤外線光学デバイスの開発において単結晶シリコンを基板とする複雑形状レンズの超精密加工が強く求められている。しかし、シリコン切削時にダイヤモンド工具の摩耗が非常に激しく、それによる加工精度低下そして生産コスト増加が大きな問題となっている。本研究では、導電性をもつダイヤモンド切削工具を使用し、通電切削およびシリコンへの光照射と電磁場内での超精密切削法を提案した。その結果、シリコン工作物からダイヤモンド工具へ微弱な電流を発生させることによりダイヤモンド工具のバックボンド電子の損失を防ぎ、ダイヤモンド工具摩耗への低減効果を確認した。

研究成果の概要（英文）：Single-crystal silicon is required as the substrates for complex-shaped infrared lenses which are used widely in car night-vision systems, security systems, and thermography systems. However, when cutting silicon using a single-crystal diamond tool, the tool wear is extremely severe, which causes the degradation of form accuracy and the increase in production cost. In this research, an electrically conductive diamond tool was used to cut silicon under electrical voltage and light irradiation in electromagnetic fields. By inducing a small electrical current between the tool and the workpiece, the back-bond electron flow from diamond was suppressed, and the life of the diamond tool was extended.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：超精密加工 切削 ダイヤモンド工具 摩耗 電磁場 光照射

### 1. 研究開始当初の背景

単結晶シリコン (以下 Si) はその優れた赤外線光学特性から、赤外線光学レンズとして暗視野カメラや温度センサなどに用いられるため、今後さらに需要が高まると考えられる。単結晶 Si の加工法として、ダイヤモンド工具を用いた超精密延性モード切削が行われているが、工具の急激な摩耗が大きな問題となっている。工具摩耗は工具取替え周期を早めるだけでなく、工作物の表面品質の悪化にも繋がるため、生産性の観点から工具摩耗低減が求められる。ダイヤモンド工具の摩耗の要因として、ダイヤモンドと単結晶 Si の熱化学反応が挙げられている。超精密切削中の高温高圧下においてダイヤモンドと単結晶 Si の熱化学反応が起こり、ダイヤモンド表面の原子結合が弱くなり、炭素が Si に拡散すると考えられている。類似の拡散反応は鉄系材料の切削にも起こる。鉄系材料の切削における工具摩耗の問題に対して、ダイヤモンド表面の原子結合を構成するバックボンド電子の流出を抑制するため、通電切削という手法が提案されている。例えば、島田らはステンレス鋼に対して通電切削を行うことで、工具摩耗の抑制の可能性を示した。一方、単結晶 Si は半導体材料であり、鉄系材料に比べて導電率が低いため、通電切削が可能かどうかは不明である。また、工具摩耗低減のためのほかの手法も探索する必要がある。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、まず単結晶 Si に対して通電切削を行い、工具摩耗への抑制効果を確認する。Si の通電切削の原理を図 1 に示す。工作物を負極に、工具を正極に接続して電圧を印加することで、バックボンド電子流出を抑制し、工具摩耗を低減させる。また、通常工具に用いられる単結晶ダイヤモンドは絶縁体のため、通電切削が困難であるため、ドーピングによって導電性が付与された単結晶ダイヤモンド工具を用いて工具と被削物を導通させることで通電切削を実現する。

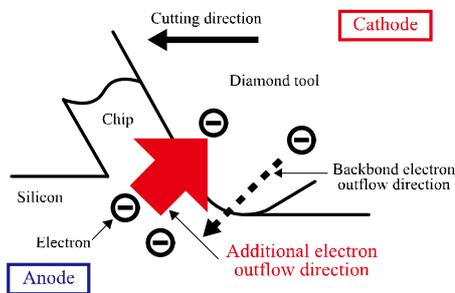


図1 単結晶 Si の通電切削の模式図

また、本研究の新たな試みとして、導電性ナノ結晶ダイヤモンドを工具材料として採用し、特定波長の光を Si 工作物へ照射し、光電効果を利用して工作物表面へ電子を放出させ、さらに工作物へ電磁場を印加することで工作物・工具間に電流を発生させる。この

電流によりダイヤモンド工具表面の電子損失を完全に防ぎ、工具摩耗を抑制することを目指す。これらの提案技術を成功させることにより、ダイヤモンドバイトの使用寿命が向上され、従来困難とされてきた大口径 Si フレネルレンズの超精密切削が可能となると考えられる。

### 3. 研究の方法

本報告書では、単結晶 Si の通電切削実験について詳細に述べる。実験では、3軸同時制御超精密加工機 ASP-15 ((株) 不二越製) を用いて切削を行った。工具にはノーズ半径 2 mm、すくい角 $-20^\circ$ 、逃げ角 $6^\circ$  でホウ素がドーピングされたダイヤモンド R バイトを用いた。試料には単結晶 Si ウェハ (N 型, Cz 法, Sb ドープ, (100) 面, 体積抵抗率  $0.0108 \Omega \cdot \text{cm}$  以下) を縦横  $50 \text{ mm} \pm 5.0 \text{ mm}$  にカットして用いた。試料を黄銅製ジグにカーボンテープで接着することで、試料とジグの間に導電性を持たせた。工具とジグは絶縁テープにより、それぞれ工具台とスピンドルから絶縁させた。直流安定化電源 PAS 160-2 (菊水電子工業 (株) 製) を用いて、図 2 に示す直流回路に 10 V の低電圧を印加した。工具摩耗を抑制すると考えられる工具から試料へ向かう電流の方向を正方向、逆方向を負方向、電圧を印加しない切削を無通電切削と定義した。実験中に回路を流れた電流値はデジタルマルチメータで測定した。工作物 1 回転あたりの送り量は  $2.0 \mu\text{m}$ 、切込み量は  $5.0 \mu\text{m}$ 、主軸回転数は 1500 rpm で切削を行った。

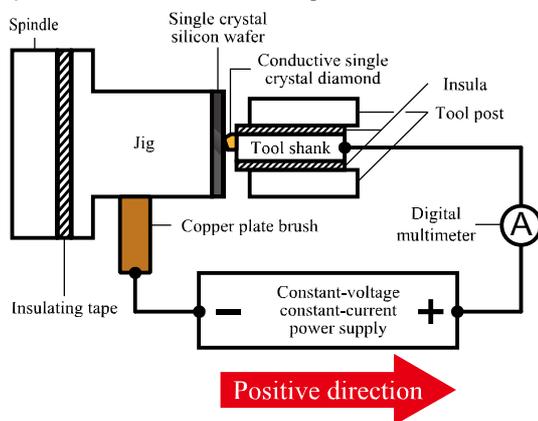


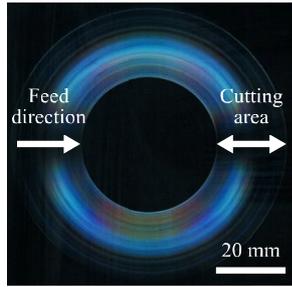
図2 実験装置の概略図

### 4. 研究成果

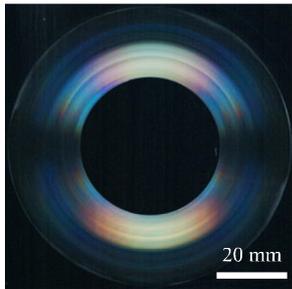
#### (1) 加工面の形態

実験後に得られた加工面をスキャナにより取得した画像を図 3 に示す。画像における黒い部分が未加工面である。無通電切削と正方向の通電切削では、内周部はどちらも光沢面となり、設定した切削域で延性モード加工が行われた。一方、負方向の通電切削では切削開始時の外周部のみ切削されたが、中心部は加工されていない。これは負方向の通電切削では、電子を制御する方向がバックボンド電子の流出する方向と同じであるため、切削開始直後に炭素拡散反応が促進され工具摩

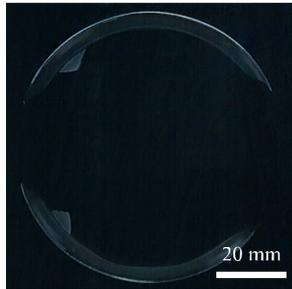
耗が進行したことで切削が継続できなかったと考えられる。



(a) 無通電

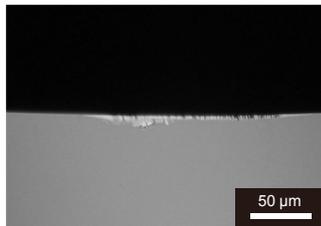


(b) 正方向通電

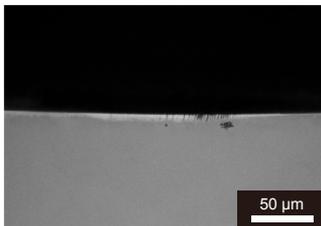


(c) 負方向通電図

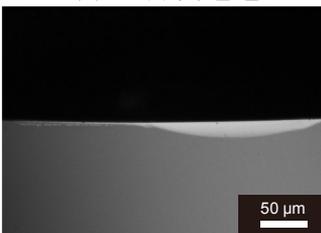
図3 加工面のスキャン画像



(a) 無通電



(b) 正方向通電



(c) 負方向通電図

図4 工具逃げ面のマイクロスコップ画像

## (2) 工具摩耗形態の変化

実験後の工具摩耗部をデジタルマイクロスコップにより観察した結果を図4に示す。無通電切削と比較して、正方向の通電切削では工具摩耗が小さくなり、負方向の通電切削では大きくなったことがわかる。

工具摩耗面の縦方向の最大摩耗幅を逃げ面摩耗幅と定義して定量的に工具摩耗量を測定した。各通電条件による逃げ面摩耗幅を図5に示す。正方向の通電切削では無通電切削と比較して、逃げ面摩耗幅が37%低減した。これは正方向の通電によりバックボンド電子の流出が抑制され、工具摩耗が抑制されたためであると考えられる。一方、負方向の通電切削では無通電切削と比較して、逃げ面摩耗幅が57%増加した。これは、負方向の通電では炭素拡散反応を促進する方向に電場がかかるため、バックボンド電子の流出が進み、炭素拡散反応により工具摩耗が促進されたと考えられる。

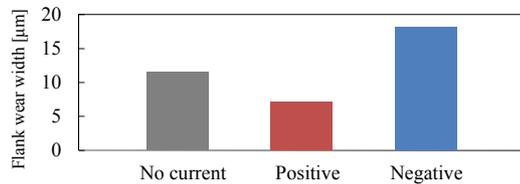


図5 各通電条件での工具逃げ面摩耗幅

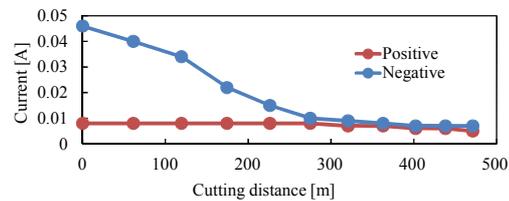


図6 切削距離による電流値の変化

## (3) 切削距離による電流値変化

切削距離と、切削実験中に流れた電流値の関係を図6に示す。負方向の通電切削において、275 m付近まで電流値が初期値の20%まで減少したことがわかる。図3(c)から測定される切削面外周径と内周径を用いて、負方向の通電切削における実質の切削距離を算出すると、241 mとなった。この計算値が電流の減少していった切削距離に近い値となったため、工具摩耗量の増加と電流値の減少が対応していると考えられる。

工具摩耗の増加による電気抵抗の増加の原因として、単結晶Siよりも体積抵抗率が高いとされるアモルファスシリコン(a-Si)の生成が考えられる。正方向の通電切削では、工具摩耗が進行して工具切れ刃が丸みを帯びて、実効すくい角が負に大きくなり、高い静水圧応力によりa-Siが多く発生する。そのため、アモルファス層が増加したことで抵抗が増加したと考えられる。一方、負方向の通電切削では、切削初期にバックボンド電子の流出が促進されることで正方向の通電切削よりも電流値が高くなり、激しい工具摩耗

が生じたと考えられる。その後、切れ刃の後退により工具と工作物の有効接触面積が減少していくことで、工具-工作物間の電気抵抗が増加することにより、電流値が減少したと考えられる。

#### (4) Si の通電切削の効果

以上の実験結果から、単結晶 Si の通電切削では、通電方向の選択が重要であることがわかった。負方向の通電切削では切削初期に工具摩耗が進行し、継続的な切削ができなかったが、正方向の通電切削によりダイヤモンド工具の逃げ面摩耗幅が 37% 低減した。このことから、通電により工具・工作物間に電流が発生し、単結晶 Si 切削時のダイヤモンド工具摩耗を抑制できることが検証された。

#### (5) 光照射と電磁場の効果

通電切削と同様な効果をもたらすために、光照射時の光電効果を利用し Si 工作物表面へ電子を放出させ、そして磁場作用を利用し工作物・工具間に微弱な電流を発生させて切削実験を行った。その結果、光電効果による微弱な電流を利用してダイヤモンド工具のバックボンド電子損失と Si-C の界面拡散を抑制し、単結晶 Si 切削時のダイヤモンド工具摩耗を抑制できることも確認できた。現在、この微弱な電流をより強くするための装置改良を行っており、工具摩耗の抑制効果のさらなる向上を目指している。

#### (6) Si 延性モード切削の応用展開

上記研究の延長と応用として、赤外線用の単結晶 Si マイクロレンズアレイやポーラス Si ウエハの超精密平坦化などの実験も平行に行ってきた。本研究の提案手法をこれらの部品加工へ応用することにより Si 切削時のダイヤモンド工具摩耗を低減することを目指して研究を行っている。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

- (1) M. Heidari and J. Yan: Ultraprecision surface flattening of porous silicon by diamond turning, Precision Engineering, 49 (2017) 262-277. 査読有  
<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.02.015>
- (2) M. Mukaida and J. Yan: Ductile machining of single-crystal silicon for microlens arrays by ultraprecision diamond turning using a slow tool servo, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 115 (2017) 2-14. 査読有  
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.11.004>
- (3) 楠 雄策, 閻 紀旺: 単結晶シリコンの超精密切削における元素ドーピングの影響, 砥粒加工学会誌, 58, 11 (2014) 699-704. 査読有  
<http://doi.org/10.11420/jsat.58.699>

〔学会発表〕(計 7 件)

- (1) M. Mukaida, J. Yan: Ultraprecision machining of single-crystal silicon using a slow tool servo for infrared microlens arrays, ASPEN/ASPE 2017 Spring Topical Meeting on Manufacture and Metrology of Structured and Freeform Surfaces for Functional Applications, 2017/03/15, Hong Kong (China).
- (2) 奥内拓海, 閻 紀旺: 単結晶シリコンの通電切削によるダイヤモンド工具摩耗の低減, 砥粒加工学会先進テクノフェア (ATF2017) 卒業研究発表会, 2017/03/03, ホテルプラザ勝川 (愛知県春日井市) .
- (3) 向田 菜央, 閻 紀旺: 単結晶シリコンのスローツールサーボ旋削によるマイクロレンズアレイ加工, 日本機械学会第 11 回生産加工・工作機械部門講演会, 2016/11/22, 名古屋大学 (愛知県名古屋市) .
- (4) 向田 菜央, 奥内拓海, 閻 紀旺: 単結晶シリコンの超精密切削による赤外線マイクロレンズアレイの加工, 第 17 回国際工作機械技術者会議, 2016/11/20, ビッグサイト (東京都江東区) .
- (5) 閻 紀旺: 硬脆材料の超精密切削における工具摩耗とその抑制技術, 精密工学会切削専門委員会, 2016/06/24, 東京電機大学 (東京都足立区) .
- (6) J. Yan: Ductile machining of hard brittle materials-applications and challenges, The 2nd International Forum on Modern Optics Manufacturing Engineering and Science, 2015/09/01, Shenzhen (China).
- (7) 楠 雄策, 閻 紀旺: 単結晶シリコンの超精密切削における元素ドーピングの影響, 2014 年度砥粒加工学会学術講演会 (ABTEC2014), 2014/09/11, 岩手大学 (岩手県盛岡市) .

### 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
閻 紀旺 (YAN JIWANG)  
慶應義塾大学・理工学部・教授  
研究者番号: 40323042
- (2) 研究分担者 なし
- (3) 連携研究者 なし