

令和 2 年 6 月 23 日現在

機関番号：81406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06106

研究課題名(和文)次世代ワイドギャップ半導体向け革新的切断加工を実現する電界スライシング技術の開発

研究課題名(英文)Development of Electric Field-assisted Slicing (EFS) that realizes innovative cutting processing for next-generation wide gap semiconductors

研究代表者

久住 孝幸 (KUSUMI, Takayuki)

秋田県産業技術センター・先進プロセス開発部・主任研究員

研究者番号：40370233

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)：炭化ケイ素基板などの次世代半導体材料は、高硬度かつ化学的に安定な材料が多く、多くの加工時間を費やしており、特にインゴットからのウェーハに切出す切断工程は、全工程中の6～7割を占めることから迅速化への要求が高い。そこで、この切断工程に用いられるワイヤーソーの高効率化並びに高品位化を目的として、ワイヤー工具と試料間に交流高電圧を印加し、切断時の砥粒をワイヤー上に効率的な配置制御する電界スライシングを提案する。本報告では、原理実験による基礎検討において、最大110～130%の切断効率向上効果が得られた結果について述べる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で対象としているワイドギャップ半導体用基板は、省エネに寄与するパワーデバイスとして発展が期待される素子の基板であり、市場規模が現在進行形で拡大している。本研究は、上記基板の加工効率向上・低コスト化に向けた技術を確立することを目的とし、このことは、産業界の基盤となる電気エネルギーの効率向上を図るもので大きな意義を有する。

研究成果の概要(英文)：Next generation semiconductor materials such as silicon carbide are high hardness and chemically stable materials. Thus, it takes a lot of time to manufacture wafers using these materials. In particular, the process of slicing from ingots to wafers accounts for 60 to 70% of the total manufacturing time. Therefore, there is a high demand for high speed slicing process. A wire saw is used for the slicing process. In order to improve the efficiency of this wire sawing, we propose the novel slicing technology, "Electric field-assisted Slicing (EFS)". In this report, we describe the result of cutting efficiency improvement of 110-130% in fundamental study by principle experiments.

研究分野：機械工学

キーワード：ワイヤーソー スラリール 電界 砥粒

1. 研究開始当初の背景

近年の地球温暖化問題の顕在化によって電気エネルギー利用効率向上技術の確立が求められている。特に、電気エネルギーの輸送や変換において電圧・周波数制御に多用されているパワーデバイス半導体の大幅な性能向上が希求されている。現在、多用されているパワーデバイス半導体は、概ね Si 基板を用いて製造されているが、物性に起因する性能限界を迎えており、炭化ケイ素 (以下 SiC) や窒化ガリウム (以下 GaN)、ダイヤモンドを基板とするワイドギャップ半導体の開発に期待が高まっている [1][2]。その中でも SiC パワー半導体は、技術研究組合 次世代パワーエレクトロニクス研究開発機構 (FUPET) [3][4] や様々な研究者 [5][6] が技術課題の抽出や実証実験を通して普及への道筋を立て、2015 年秋より山手線に採用されている。さらに、2020 年には次世代東海道新幹線 N700S に搭載が予定されている。

このように普及し始めている SiC をはじめとしたワイドギャップ半導体は、インゴットからの①切断工程、②研削工程、③ラッピング工程、④ポリッシング工程を経てウェーハとして提供されているが、化学的に安定で高硬度な素材であるため、多くの加工時間を要し、加工コストも高い。特に切断工程は、全工程中の加工時間の 6~7 割を占めることから迅速化への課題を有している。

ウェーハへの切断工程は、図 1 に示すようなマルチワイヤーソーを用いる。メインローラーに複数回巻きつけたワイヤー工具によってインゴットからウェーハ状に切断する。SiC やサファイアのような高硬度材料を切断する際、ダイヤモンドなどの砥粒をワイヤー上に電着固定したワイヤー工具を用いた固定砥粒方式が、切断効率が高いため、有利である。一方、シリコンやガラスなど、前述の材料に比べて比較的軟らかい材料の切断では、ワイヤーに砥粒を分散させたスラリーを滴下しながら切断する遊離砥粒方式が古くから用いられている。固定砥粒方式は、遊離砥粒方式に比べて、切断効率は高いが、電着ダイヤモンドワイヤー工具の単価が高い他、加工変質層などのダメージが高く、後工程の研磨工程への負荷が大きい。

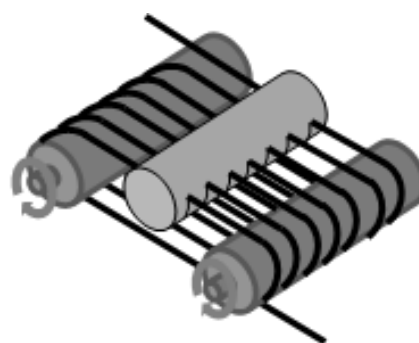


図 1 マルチワイヤーソー模式図

2. 研究の目的

本研究では、切断工程に用いられる遊離砥粒方式のワイヤーソー加工に、「電界砥粒制御技術」[7] を展開導入する。ここで、電界砥粒制御技術とは、共同研究者である赤上らが提案した技術で、具体的には、溶媒に絶縁オイルであるシリコンオイルを分散粒子に砥粒用いた砥粒分散型機能性流体を作製し、この流体に交流高電界を印加することで、砥粒の誘電率の差異によって生じる吸引力による挙動や配置制御を行い、研磨効率を高める技術である。

図 2 は電界下における機能性流体の挙動を示した観察像である。この電界によって砥粒を任意の位置に配置してラッピング工程やポリッシング工程の研磨効率を向上する検討を続けてきた。

本研究では、この電界による配置制御によって図 3 のようにワイヤー工具に遊離砥粒を集め、高い切断速度と良好な表面品位の両立化を図って、後の研磨工程の負荷低減を図る『電界スライシング技術』を創出することを目的とする。

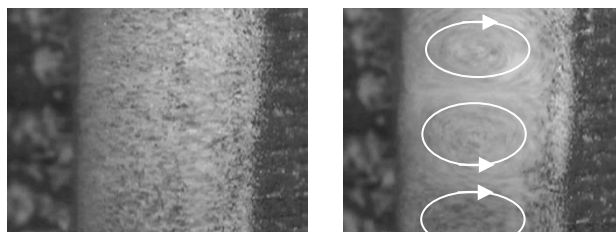


図 2 電界によるダイヤモンド砥粒の動き：
無電界 (左)、電界有 (右)

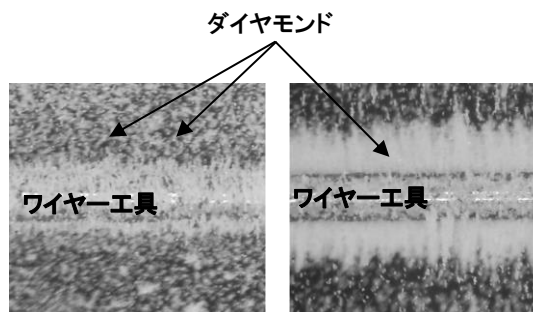


図 3 電界によってワイヤー工具に集まる砥粒：
無電界 (左)、電界有 (右)

3. 研究の方法

(1) 電界スラッシング技術原理実験装置の試作

電界スライシングの切断動作の基礎的な検討を行うために、図4に示す電界スライシング原理実験装置を用いて、原理実験を実施した。ワイヤー工具は、張力計で張力調整後に小型振動発生器の軸上のジグ2点で固定される。被削材としてシリコン材を用い、これをZ軸ステージ上に保持する。被削材を上方方向にZステージで上昇させることによってワイヤー工具と被削材の間に接触させ、加工力を与える。小型振動発生器にてワイヤー工具を左右に往復運動させることによって、ワイヤー工具と被削材間に相対運動を発生させる。ダイヤモンド砥粒を分散させたスラリーを被削材上方より一定量滴下することによって、遊離砥粒方式のワイヤー切断を模擬した配置とした。電界砥粒制御用の給電は、ワイヤー工具と被削材であるシリコン材との間で交番電界を印加した。ここで、交番電圧は、基本信号を発生させるシンセサイザー（アジレント製33120A）で信号を生成し、得られた信号を増幅度2000の高電圧アンプ（トレック製model 20/20B）にて増幅して印加した。この信号の観測には、デジタルオシロスコープ（アジレント製54645A）を使用した。また、電界を印加するときのワイヤー工具と試料間の短絡防止のため、ワイヤー工具には樹脂コーティングワイヤー^[8]を用いた。

(2) 電界スラッシング技術の切断深さの評価指標

図5は、図4の原理実験装置に取り付けたφ10mmのシリコン丸材に10分間の電界スライシング加工を行って得られたワイヤー加工溝を、Zygo社製白色顕微干涉計NewView6300によって観察した観察像である。図中、白線で示した頂点付近の断面プロファイルを測定して、その深さを切断深さとして評価指標とした。

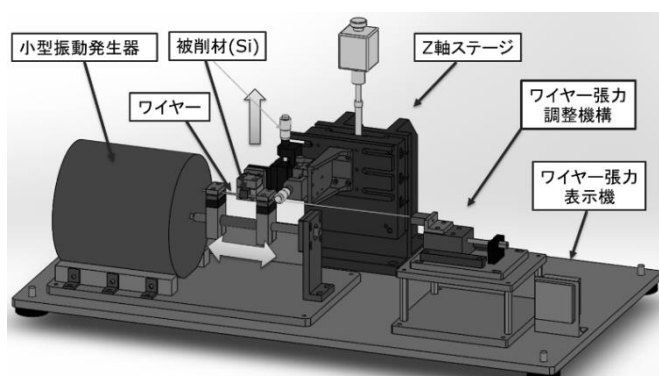


図4 電界スライシング原理実験装置

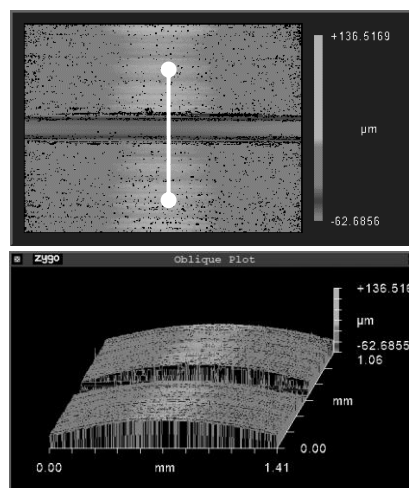


図3 ワイヤー切断深さの評価手法

表1 電界スライシング原理実験条件

Wire	wire	Resin bond diamond wire 120 μ m
	tension	8N
	running speed	2.53m/min
Slurry	solvent	Dimethyl silicone fluid (Shin-Etsu Silicone KF-96)
	abrasive	Single crystal diamond, (TOMEI Diamond, IRM)
	concentration	1.0wt%
	flow rate	50 μ L/min
Workpiece	material	Silicon
	size	ϕ 10 \times 30 mm (OF)
	feed speed	23 μ m/min
Electric filed	amplitude	\pm 0.5kV, \pm 1.0kV
	frequency	1.5-30Hz
	wave shape	Square
Processing time		10min

4. 研究成果

(1) 研究の主な成果

表1に示す実験条件の下、電界スライシング原理実験を行った。試料は、 $\phi 10$ のシリコン丸材（回り止め用オリフラ付き）とし、電界印加によるダイヤモンド粒径及び、粘度依存性について検討した。

① 砥粒径依存性

図6に、電界スライシング原理実験の砥粒径依存性について調べた結果を示す。ダイヤモンド砥粒は、2-3 μm 、5-10 μm 、20-30 μm の3水準粒径を用意し、シリコンオイル分散溶媒は10cStとした。無電界での結果と1.5Hzから30Hzまでの電界周波数にて $\pm 0.5\text{kV}$ の電圧を印加した際の切断深さを比較した。ここで、図4(a)内の無電界(0V)での結果が示す通り、砥粒径によって切断速度も異なることから、それぞれの粒径の無電界の結果で規格化を行った結果を図4(b)に示す。砥粒径2-3 μm と5-10 μm では、電界印加によって50%~110%の切断効率向上効果が得られた。特に、1.5Hz程度の低周波数にて最大効果が得られた。一方、20-30 μm では、一時的に減少する結果が見られるなど、ばらつきは大きい、30Hzにて130%向上効果が得られた。これは、大粒径ゆえに切断界面下の砥粒の有無の影響が結果に大きく影響を及ぼしたと考えられるが、30Hz程度の周波数では、砥粒同士のクラスター化も進み、十分な砥粒集中効果が得られたものと考えられる。

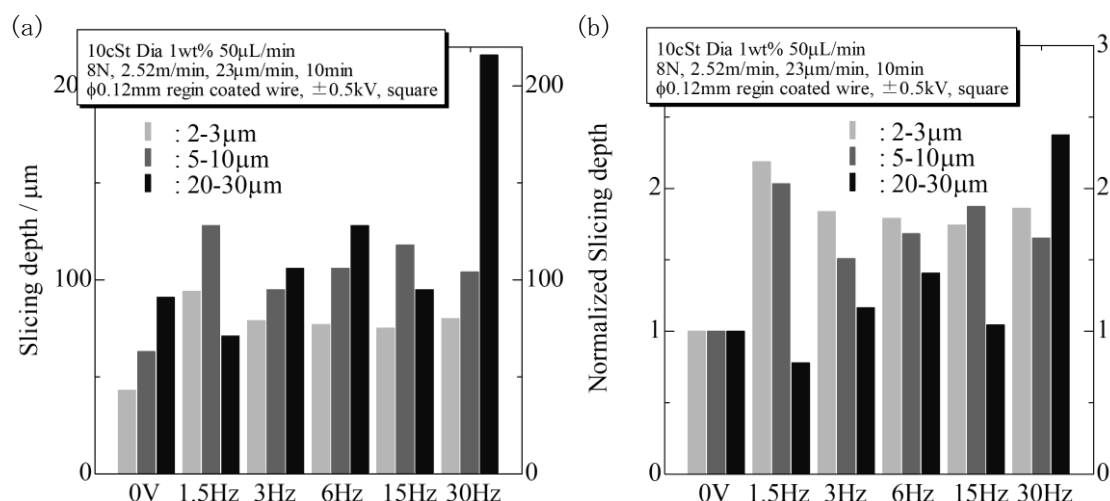


図6 電界スライシング加工に及ぼす砥粒径依存性：(a)切断深さ、(b)規格化切断深さ

② 溶媒粘度依存性

図7に電界スライシング加工に及ぼすラリー分散溶媒粘度依存性を示す。砥粒径は5-10 μm とした。

分散溶媒であるシリコンオイルの粘度10、50、100cStについて、 $\pm 1.0\text{kV}$ 、6Hzの電界を印加した結果、全ての粘度において電界効果が得られたが、100cStでは、37%効率向上程度にとどまり、他の粘度の向上効果と比べて低く抑えられた。これは、100cStの分散溶媒では、粘度が高く、砥粒の集中効果が抑えられたことを示す。

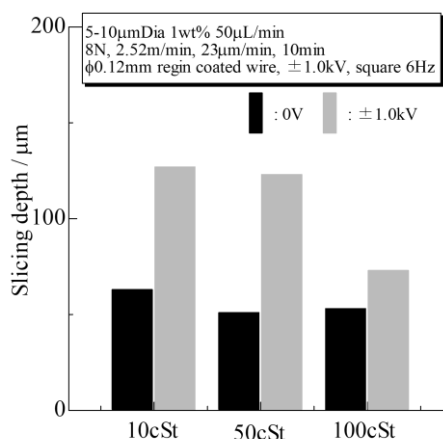


図7 電界スライシング加工に及ぼす粘度依存性

③ まとめ

電界スライシング原理実験を行い、電界印加によるダイヤモンド粒径及び、粘度依存性について検討した。その結果、2-3、5-10、20-30 μm の粒径においてそれぞれ最大110~130%の切断効率向上効果を得た。また、溶媒粘度依存性を調べ、100cSt程度の高粘度溶媒では切断効率向上効果が抑制されることがわかった。

(2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト、

得られた「電界スライシング技術」に関する基礎的な知見は、「切断方法及び切断装置」(特願 2018-243799) として 2018 年 12 月 26 日出願し、翌 2019 年 12 月 17 日に国際出願 (PCT /JP2019 /049487) した。国際出願にあたっての国際調査報告では、すべての請求項で新規性が認められ、3 つの基本請求項において進歩性も認められるという報告が得られている。

これらの成果をワイヤーソーメーカーに開示したところ、以下のコメントが得られた。
「従来の加工方法であるダイヤモンドスラリーを使用した切断方法において、 $\phi 6$ インチ SiC で 120 時間の加工時間を要している。本技術で加工能力がたとえば 1.67 倍となれば、加工時間は 6 割となり、72 時間への短縮が実現する。本技術が実現した場合、既存の遊離砥粒方式の特徴が引き継がれるため、すでに確立している前後の量産工程を変更することなく代替導入できることも競合他技術に対して十分な有効性が期待できる。」

(3) 今後の展望

これまでの成果はあくまで卓上型の原理実験での効果であることから、実際に長尺のワイヤーを用いた加工における知見が必要となる。これにあたって、前述のワイヤーソーメーカーに依頼し、図 8 に示すような、電界スライシング技術が導入可能な絶縁処理を施した装置の試作を行っている。本装置にて今後実機ベースの検証実験を行う予定である。



図 8 電界スライシング技術実証実験用試作装置

<引用文献>

- [1] <http://www.yano.co.jp/press/pdf/1499.pdf>
- [2] 高橋清(監修) 長谷川文夫・吉川明彦(編著), ワイドギャップ半導体 光・電子デバイス 森北出版 (2006)
- [3] <http://www.nedo.go.jp/content/100554528.pdf>
- [4] 河田研治, 平野真也, 浅水啓州, 加藤智久, パワーエレクトロニクス用 SiC ウェハの高エネルギー CMP プロセスの開発, 2015 年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, (2015), pp367-372
- [5] 久住孝幸, 赤上陽一 他 3 名, 炭化ケイ素基板研磨のための電界砥粒分布制御研磨に関する研究 -電界による研磨率向上メカニズムの検討-, 精密工学会誌, 79 巻 1 号(2013), pp. 87-92
- [6] 諏訪部仁, 大久保順平, 松川和平, 石川憲一, マルチワイヤーソーによる SiC の延性モード加工, 2015 年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, (2015), pp287-292
- [7] 赤上陽一他 4 名, 粒子分散型機能性流体を用いた精密研磨方法の開発, 日本機械学会論文集 C 編, 66 巻 649 号(2000), pp. 270-275
- [8] H. SUWABE, A. URATSUKA, T. UENO and K. ISHIKAWA, Study on mirror slicing using resin-coated wire, Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, 55, 12 (2011) 733 (in Japanese).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 久住 孝幸、池田 洋、越後谷 正見、中村 竜太、赤上 陽一	4. 巻 61
2. 論文標題 研磨スラリーの電界活性化技術	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 砥粒加工学会誌	6. 最初と最後の頁 275～276
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.11420/jsat.61.275	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 久住孝幸，赤上陽一	4. 巻 61
2. 論文標題 水ベーススラリーへの電界砥粒制御技術の適用	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 砥粒加工学会誌	6. 最初と最後の頁 639～642
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 千葉翔悟、久住孝幸、赤上陽一、野老山貴行、村岡幹夫	4. 巻 64
2. 論文標題 樹脂パッドと電界砥粒制御技術を適用した先進結晶基板への低ダメージ機械研磨技術	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 砥粒加工学会誌	6. 最初と最後の頁 32～38
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 久住孝幸、越後谷正見、中村竜太、赤上陽一
2. 発表標題 電界スラリー制御技術を用いた小径工具による研磨加工法の開発 -第2報-
3. 学会等名 2018年度砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 池田洋、原田響、久住孝幸、越後谷正見、赤上陽一
2. 発表標題 小型片面研磨装置向け電界スラリー制御システムの開発
3. 学会等名 2018年度砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 池田洋、泉泰秀、久住孝幸、中村竜太、赤上陽一
2. 発表標題 電界印加条件がスラリー分布とSiC基板の研磨特性に及ぼす影響
3. 学会等名 2018年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久住孝幸、越後谷正見、中村竜太、赤上陽一
2. 発表標題 電界スラリー制御技術を用いた小径工具による研磨加工の基礎検討 -第4報-
3. 学会等名 2018年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久住孝幸、越後谷正見、中村竜太、赤上陽一
2. 発表標題 小径工具における電界スラリー制御技術の開発
3. 学会等名 第12回生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 池田洋、泉泰秀、久住孝幸、赤上陽一
2. 発表標題 電界スラリー制御技術における電界条件とSiC基板の研磨特性との関係
3. 学会等名 第12回生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久住孝幸
2. 発表標題 ガラスの研磨加工
3. 学会等名 ニューガラス大学院（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久住孝幸、越後谷正見、中村竜太、赤上陽一
2. 発表標題 電界スラリー制御技術を用いた小径工具による研磨加工の基礎検討-第2報-
3. 学会等名 2017年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 久住孝幸、越後谷正見、中村竜太、赤上陽一
2. 発表標題 電界スラリー制御技術を用いた小径工具による研磨加工法の開発
3. 学会等名 2017年度砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 久住孝幸
2. 発表標題 ガラスの研磨加工
3. 学会等名 ニューガラス大学院（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 久住孝幸、越後谷正見、中村竜太、赤上陽一
2. 発表標題 電界スラリー制御技術を用いた小径工具による研磨加工の基礎検討-第3報-
3. 学会等名 2017年度精密工学会春季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 池田洋、奈良泰七、三浦辰徳、久住孝幸、越後谷正見、赤上陽一
2. 発表標題 電界砥粒制御技術を適用したオイルベーススラリーの砥粒分布挙動について
3. 学会等名 2019年度砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 千葉翔悟、久住孝幸、赤上陽一、野老山貴行
2. 発表標題 電界砥粒制御技術を適用した先進結晶材基板の高効率ラップ技術に関する検討
3. 学会等名 2019年度砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久住孝幸、越後谷正見、中村竜太、大久保義真、赤上陽一、河田研治、加藤智久
2. 発表標題 SiCウエハの高効率研磨における電界スラリー制御研磨を用いた均一研磨の検討
3. 学会等名 2019年度砥粒加工学会 学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久住孝幸、越後谷正見、中村竜太、大久保義真、赤上陽一、河田研治、加藤智久
2. 発表標題 電界スラリー制御技術の均一研磨性の検討
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久住孝幸、越後谷正見、池田洋、大久保義真、中村竜太、赤上陽一
2. 発表標題 電界砥粒制御技術を用いた新たな切断技術の開発
3. 学会等名 2019年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久住孝幸
2. 発表標題 ガラスの研磨加工
3. 学会等名 ニューガラス大学院（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 切断方法及び切断装置	発明者 久住孝幸、赤上陽一、越後谷正見	権利者 秋田県
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018 243799	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 切断方法及び切断装置	発明者 久住孝幸、赤上陽一、越後谷正見	権利者 秋田県
産業財産権の種類、番号 特許、PCT /JP2019 /049487	出願年 2019年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	赤上 陽一 (AKAGAMI Yoichi) (00373217)	秋田県産業技術センター・企画事業部・技術フェロー (81406)	