

令和 2 年 5 月 26 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06005

研究課題名(和文)被削材の脆性的挙動とスライシング特性との関係

研究課題名(英文) Relationship between brittleness behavior of work material and slicing characteristics

研究代表者

坂本 智 (SAKAMOTO, Satoshi)

横浜国立大学・教育学部・教授

研究者番号：90294339

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：材料の微視的な弾性・塑性的挙動および脆性的挙動の動的観察と各種加工実験を行い、硬脆材料の材料特性とワイヤ工具の摩耗特性も含めたスライシング特性との関係を明らかにした。また、ワイヤ工具による加工面生成機構についても検討し、遊離砥粒方式と固定砥粒方式による加工面生成機構の違いを明らかにした。さらに、単純な研磨試験でワイヤ工具による加工状態を推定できることを示唆した。これらの成果は、硬脆材料の高精度・高効率加工の実現に寄与するものと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

材料の微視的な弾性・塑性挙動および脆性的挙動の動的観察と工具の摩耗特性も含めた加工特性との関係を明らかにした。これまで材料の動的挙動観察と加工特性との関係を明らかにした報告例は無く、硬脆材料の精密加工における貴重な資料となり得る。また、ワイヤ工具の摩耗特性も含めたスライシング特性の解明は、半導体ウエハの製造コストを大幅に圧縮し、半導体部品製造技術の国際的な競争力を高めることにもつながるものと期待される。

研究成果の概要(英文)： Dynamic observation of microscopic behavior such as elasticity, plasticity and brittleness of materials and various machining experiments were performed in this study. From the experimental results, the relationship between the material properties of hard and brittle materials and the slicing properties including the wear properties of wire tools was clarified. In addition, the machined surface generation mechanism by the wire tool was also examined, and the difference between the machined surface generation mechanism by the free abrasive grain method and the fixed abrasive grain method was clarified. Furthermore, it was suggested that the machining state of the wire tool could be estimated by performing a simple polishing test with diamond abrasive paper. These results are considered to contribute to the realization of high precision and high efficiency machining of hard and brittle materials.

研究分野：精密加工学

キーワード：マルチワイヤソー 硬脆材料 スライシング 溝加工 ダイヤモンド電着ワイヤ工具 工具摩耗

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我が国は 2006 年頃までは世界最大のウェハ生産量をほこり、世界を牽引してきた。しかし、2007 年には中国・台湾に代表されるアジアの新興地域やドイツなどの欧州にウェハ生産量で抜かれ、日本の生産量も伸びてきてはいるものの相対的地位は低下してきている¹⁾。再び日本が世界のイニシアチブをとるためには、ウェハ自体の高性能化は当然ながら、低コスト製造技術の確立が不可欠である。低コスト製造技術の一つに、スライシング時の「カーフロス (切溝損失) の低減」や「ウェハの薄化」等が挙げられる。しかし、カーフロスを低減させるには極細線工具を用いる必要があり、ワイヤ工具の破断や摩耗の問題が生じる。また、ウェハを薄化するとそのハンドリングが難しくなり、製造工程中でウェハが破損してしまう恐れがある。これは、スライシング時にウェハ表面下に生じる微小き裂が大きな影響をおよぼしているものと考えられ、材料の脆性的挙動が大きな影響をおよぼしている。しかしながら、ワイヤ工具の摩耗等に関する詳細な研究報告や材料の塑性的・脆性的な挙動とスライシング機構との関連性、スライシング面生成機構の詳細については明らかにされていない点も多く残されていた。

2. 研究の目的

Si (シリコン) や SiC (炭化ケイ素) 等の硬脆材料から電子部品用として薄いウェハを切り出す場合、ダイヤモンド電着ワイヤ工具によるスライシングが多用されているが²⁾、加工に伴って生じる微小き裂を生じる場合がある。微小き裂の進展は加工効率・加工精度 (品質) に大きく影響をおよぼす。本研究では、被削材の脆性的挙動がスライシング面生成機構やワイヤ工具の摩耗特性も含めたスライシング特性に与える影響について、各種材料試験および加工実験を行い、詳細に検討する。硬脆材料のスライシング面生成機構を明らかにすることで、高精度 (高品質) ・高効率スライシングの実現を目指す。また、カーフロス (切溝損失) 低減やウェハの薄化技術も加速させる。これらの成果によって各種ウェハの高品質・低コスト製造の実現を試みる。

3. 研究の方法

(1) 材料の弾性的/塑性的挙動および脆性的挙動が各種加工特性におよぼす影響

ダイナミック超微小硬度計を用いて負荷-除荷試験を行い、測定荷重の違いによる各種材料の弾性的/塑性的挙動および脆性的挙動、ダイナミック硬度、弾性係数等を測定する。また、CNC 卓上フライス盤を改造した微小溝加工実験機を用いて、ダイヤモンド電着ワイヤ工具による微小溝加工実験を行う。ワイヤ走行速度、被削材送り速度、加工時間 (加工距離) 等を変化させて溝加工実験を行い、材料の弾性的/塑性的挙動および脆性的挙動と溝加工特性との関連性について検討する。さらに、加工に伴いダイヤモンド電着ワイヤ工具が受けるダメージについても随時ワイヤ工具の観察を行い、詳細な検討を加える。

(2) 材料の脆性や靱性がスライシング特性におよぼす影響

最高線速 1000 m/min が可能なマルチワイヤソー実験機を用いてスライシング実験を行い、材料特性とスライシング特性との関係について検討する。また、遊離砥粒方式と固定砥粒方式によるスライシング面の比較を行い、加工面生成機構についても検討する。

(3) 材料の研磨特性とスライシング特性との関係

ワイヤ工具による溝加工・スライシングと同じ砥粒加工である研磨紙によるラッピング等が挙げられる。卓上研磨試験機を乾式・湿式の両試験が可能のように改造して研磨試験を行い、研磨機によるラッピングの加工機構とワイヤ工具によるスライシング機構について比較検討する。

(4) カーフロスを低減させるスライシング法の検討

カーフロスを大幅に低減させるため、極細線ワイヤ工具の加工特性および極薄ブレードによる加工特性について検討する。卓上研磨試験機を極細線ワイヤ工具や極薄ブレードに対応可能なように改良して溝加工実験を行い、カーフロス大幅低減の可能性について検討する。

4. 研究成果

(1) 被削材の材料特性と加工特性との関係

図 1 に負荷-除荷試験によって得られたダイナミック硬度測定結果の一例を示す。Al₂O₃ (アルミナ) と SiC (炭化ケイ素) では試験力の増加がないにもかかわらず、圧子の侵入深さが増加している点を数カ所確認することができる。圧子の侵入に先行して、き裂を生じているためと考えられ、脆性的挙動を示す材料であることがわかる。一方で、ZrO₂ (ジルコニア) では微小破壊はほとんど確認することができず、比較的靱性が高い材料であることがわかる。実験に用いた材料の硬度は、SiC が最も高く、若干の差異はあるものの Al₂O₃ と ZrO₂ はほぼ同程度である。図 2 にこれらの材料のダイヤモンドペーパー (#400) による乾式研磨面の一例を示す。ZrO₂ の加工面には砥粒による擦過痕が明確に残っていることが確認でき、本研究で用いた Al₂O₃ や SiC に比べて靱性値が高いことが伺える。この時の単位時間当たりの研磨深さ (研磨量に相当) を図 3 に示す。いずれの被削材も研磨時間の経過に伴い、単位時間当たりの研磨深さは減少する傾向にあった。Al₂O₃ の研磨深さが深いのは、Al₂O₃ が脆性的な挙動を示すため、微小な脆性破壊を生じて研磨深さが増大したものと考えられる。SiC は高硬度ではあるが、Al₂O₃ と同様に脆性的挙動を

示すため、研磨初期の研磨深さは深くなる傾向にある。しかし、高硬度であるため加工時間の経過とともにダイヤモンドペーパーに与えるダメージが大きくなり、単位時間当たりの研磨深さは大きく減少していったものと考えられる。

硬度や靱性値の異なる溶射被膜を被削材とし、ダイヤモンド電着ワイヤ工具による溝加工実験を行った。図4に溶射被膜に溝加工を行った時のチップングサイズの比較を示す。被削材にはWC-17%Co（超硬合金系）、 Al_2O_3 -13% TiO_2 （アルミナ系）、 Al_2O_3 -3% TiO_2 （アルミナ系）、 Cr_2O_3 - TiO_2 / SiO_2 （クロミア（酸化クロム）系）を用いた。被削材の靱性値はWC-17%Co > Al_2O_3 -13% TiO_2 > Al_2O_3 -3% TiO_2 > Cr_2O_3 - TiO_2 / SiO_2 の順に小さくなる。本実験では、ワイヤ工具で賽の目状に溝加工を行った後、4角の部分の欠けを測定し、チップングサイズとしている。図より、WC-17%Coの溶射被膜でチップングが小さいことがわかる。これは、他のセラミック系溶射被膜に比べて靱性値が高いためではないかと考えられる。また、 TiO_2 の含有量が多いほどチップングのサイズは小さくなる傾向にある。このことも、溶射被膜の靱性値に影響を受けているものと考えられる。逆に、 Cr_2O_3 - TiO_2 / SiO_2 の溶射被膜では、チップングが大きくなる結果となった。また、チップングサイズのばらつきも被削材が脆性的であるほど大きくなることが明らかとなった。被削材の加工特性は、被削材の硬度および靱性値の両方に大きく影響を受けることが明らかとなった。

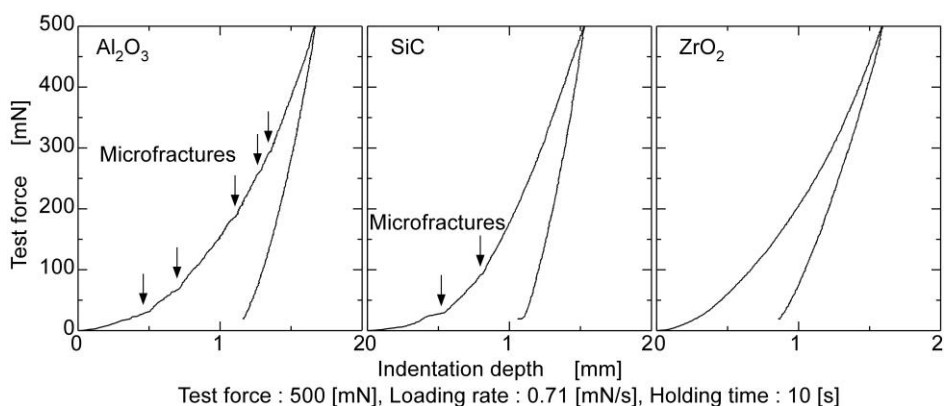


図1 負荷-除荷試験結果

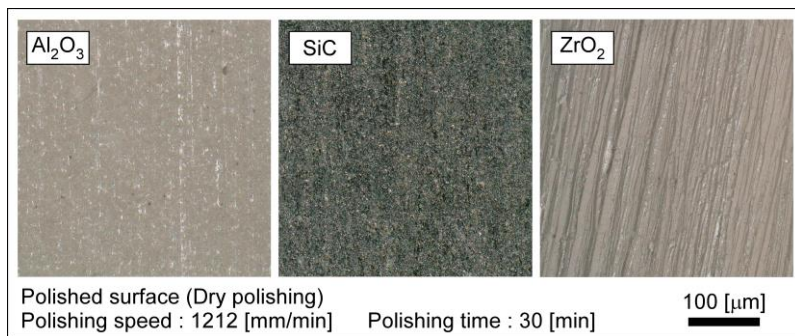


図2 加工面の比較（乾式研磨）

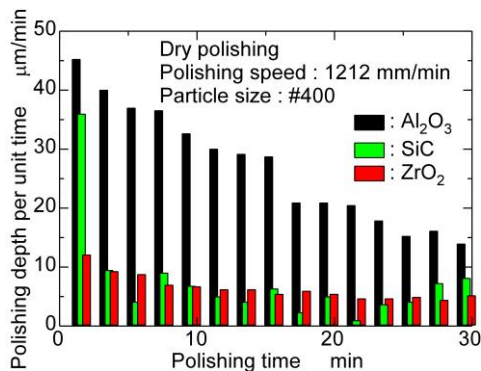


図3 単位時間当たりの研磨深さ

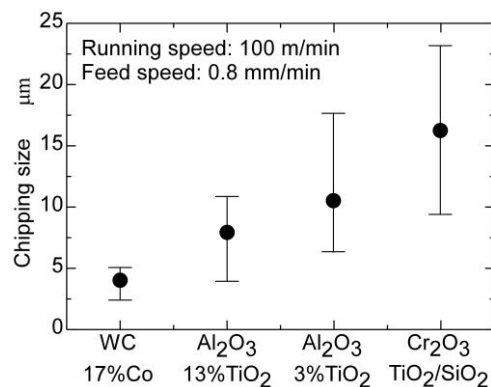


図4 チップングサイズの比較

(2) 遊離砥粒方式と固定砥粒方式による加工面生成機構の比較

ワイヤ工具によるスライシング方式は、スラリー（砥粒懸濁液）を用いる遊離砥粒方式とダイヤモンド砥粒を電着させたワイヤ工具を用いる固定砥粒方式に大別することができる。遊離砥粒方式と固定砥粒方式では加工面生成機構が大きく異なることが推測できる。そこで脆性的な挙動を示すガラス繊維を含有する一方向ガラス繊維強化複合材料のスライシングを行い、加工面の比較を行った。図5にスライシング面の一列を示す。加工面に強化繊維（ガラス繊維）の破断面が大きく露出（理論的には長軸 $50\ \mu\text{m}$ 、短軸 $25\ \mu\text{m}$ の楕円形状）するスライシング角度（ワイヤ工具と繊維配向角度のなす角）が 30° の時の一例である。固定砥粒方式では、強化繊維の破断面にワイヤ工具による擦過痕が確認できる。また、遊離砥粒方式では強化繊維の割れが確認できる。両者の面性状は大きく異なり、スライシング面生成機構は明確に異なることが明らかとなった。固定砥粒方式によるスライシング面生成機構は、延性モードの微小切削主体であると推測できる。一方、遊離砥粒方式による加工面は、強化繊維の微小な破壊が生じており、脆性的に進行するものと推測できる。

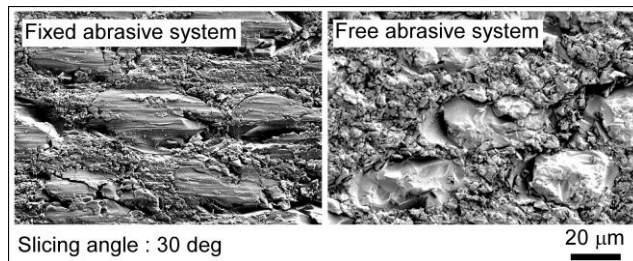


図5 加工面の比較（繊維配向角度 30° ）

(3) 研磨特性とスライシング特性との関係

スライシング状態を簡単な研磨試験で推測可能かについて検討を行った。図6にダイヤモンドペーパー（#400）による研磨試験を行った時の研磨深さ（一定時間）とダイヤモンド電着ワイヤ工具でスライシングした時のスライシングに要した時間の一例を示す。研磨深さが大きいことは加工状態が良好（被削性が良好）であることを示し、スライシング時間が長いことは加工状態が悪い（被削性が悪い）ことを示している。被削材には TEMPAX（硼珪酸ガラス）、Si（シリコン単結晶、多結晶）、サファイア（単結晶）を用いた。図より、TEMPAX、Si（単結晶、多結晶）に顕著な差異がないことがわかる。一方、サファイアでは、研磨深さが浅く、スライシングに要する時間が長くなっている。すなわち、他の材料に比較して被削性が悪いことがわかる。大まかではあるものの、簡単な研磨試験を行うことで、ワイヤ工具によるスライシング状態（被削性）を推定できる可能性があることがわかった。しかし、遊離砥粒と固定砥粒の両方を併用した加工では、スラリーとして添加された砥粒の挙動が大きく異なり、研磨試験とスライシング実験とでは加工特性が大きく異なることも明らかとなった。

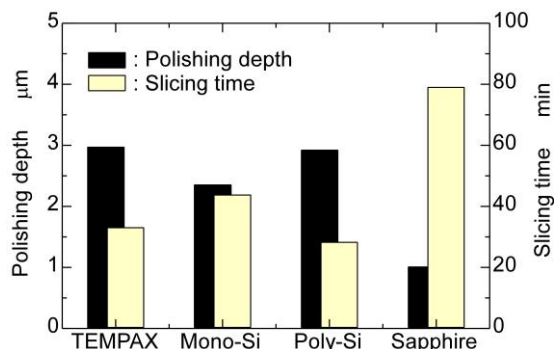


図6 研磨深さおよびスライシング時間の比較

(4) 極細線ワイヤ工具および極薄ブレードによる精密加工の可能性

Pyrex（硼珪酸ガラス）を被削材とし、線径 $100\ \mu\text{m}$ 以下の極細線ワイヤ工具による精密溝加工を行い、溝幅（カーフロスに相当）におよぼす影響について検討した。実験は遊離砥粒方式で行い、使用砥粒は GC（緑色炭化ケイ素）砥粒である。図7にワイヤ径が溝幅におよぼす影響の一例を示す。図中の破線は、絹谷らの実験式から求めた溝幅の計算値である³⁾。図より、溝幅は相対速度に依存せず、使用するワイヤ径に依存することが確認できる。また、ワイヤ径が大きいほど、実験式から得られる計算値よりも大きな値を示していることがわかる。このことは、ワイヤ径が変化するにもかかわらず使用した砥粒径を一定（ $6.7\ \mu\text{m}$ ）としているため、ワイヤ工具が十分な数量の砥粒を加工部へと運ぶことができなかったためではないかと推測される。

線径 $50\ \mu\text{m}$ の極細線ワイヤ工具を用い、使用砥粒径の影響について検討した。図8に使用砥粒径が溝幅におよぼす影響の一例を示す。本実験では、砥粒径の違い、相対速度の違いと溝幅との間に明確な関係性は見いだせなかった。使用砥粒径

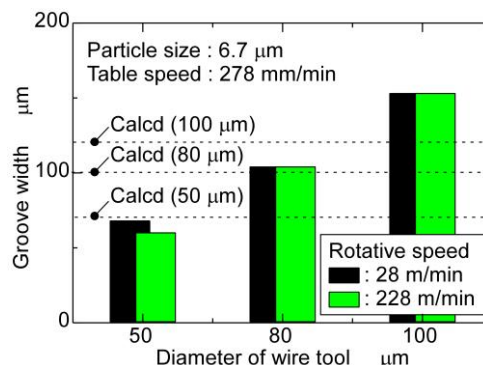


図7 ワイヤ径が溝幅におよぼす影響

6.7 μm の時のみ、実験式より求めた計算値よりも小さな値を示している。このことは、特に相対速度を早くした場合に顕著である。ワイヤ径 (50 μm) に対して使用砥粒径 (6.7 μm) が比較的大きいため、砥粒が加工部へ届く前に脱落し、十分な量の砥粒を運ぶことができなかったのではないかと推測される。本実験では、極細線ワイヤ工具 (ワイヤ径 50 μm) と微小砥粒 (砥粒径 1.2 μm) を用いることで、溝幅 (カーフロスに相当) を 60 μm 程度にまで減少させることが可能であることが明らかになった。

ワイヤ工具を細線化することで、カーフロスを大幅に低減できることは明らかになったが、さらなるワイヤ工具の細線化はワイヤ工具の断線を引き起こすことが懸念され、現実的ではない。そこで、板厚 50 μm 以下の極薄ブレードをワイヤ工具の代わりに用い、精密溝加工を試みた。被削材には TEMPAX を用いた。使用砥粒はダイヤモンド砥粒 (砥粒径 1.0~6.0 μm) である。図 9 に極薄ブレードの厚さが溝幅におよぼす影響の一例を示す。図中の破線は、絹谷らが提案した実験式³⁾ から得られた計算値である。絹谷らの実験式は、本来ワイヤソーによるスライシングに適用されるものであるが、ここでは使用した極薄ブレードの厚さをワイヤ径と置き換えて、計算値を求めている。図より、溝幅は実験式から得られる計算値よりも大きな値を示す傾向にあることがわかる。このことは、装置の運動精度や極薄ブレードの弾性変形等が影響しているものと考えられる。また、溝幅は極薄ブレードの厚さに大きく依存していることが確認できる。

図 10 に板厚 10 μm の極薄ブレードを用い、使用砥粒径が溝幅におよぼす影響を調べた結果の一例を示す。溝幅は使用砥粒径に依存し、砥粒径が大きくなるほど溝幅も広がる傾向にあることがわかる。しかし、10 μm の極薄ブレードに粒径 6 μm の砥粒を用いると、加工不能となった。このことは、極薄ブレードの厚さに対して使用砥粒径が大きくなりすぎ、加工部への供給や砥粒を加工面に十分に押し付けることができず、加工不能となったものと考えられる。良好な加工を実現するには、極薄ブレードの厚さ (押し付け力) と使用砥粒径のバランスを考える必要がある。今回の実験では、極薄ブレードに与える張力の影響に関する実験が行えていない。工具に与える張力はカーフロスや加工精度に大きな影響をおよぼすものと考えられるため、今後の研究で進めたいと考えている。

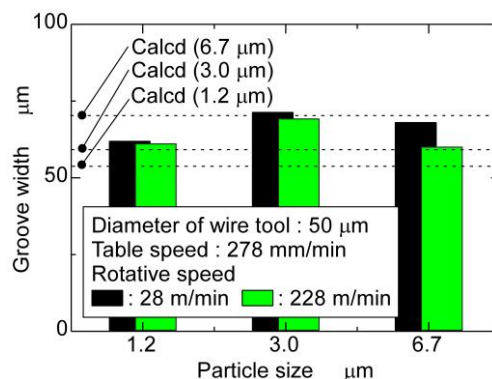


図 8 砥粒径が溝幅におよぼす影響

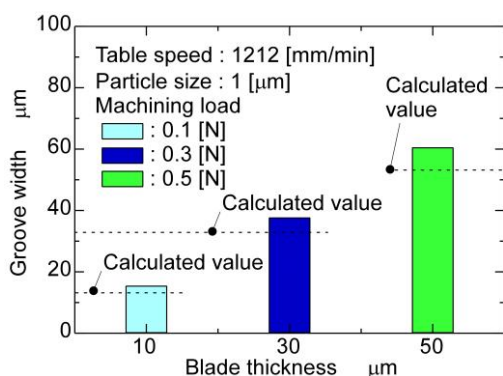


図 9 刃幅が溝幅におよぼす影響

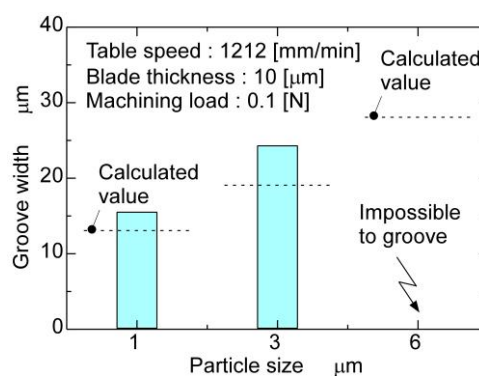


図 10 砥粒径が溝幅におよぼす影響

<引用文献>

- ①新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー技術開発部 2030 年に向けた太陽光発電ロードマップ (PV2030) に関する見直し検討委員会、太陽光発電ロードマップ (PV2030+)
- ②加藤智久、NEDO プロ「低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト」での大口径 SiC ウェハ加工技術開発、精密工学会誌、Vol. 80、No. 1、2014、18-22
- ③絹谷一朝、金道幸宏、大口径ウェハのための次世代加工技術、電子材料、7、1996、29-

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Sakamoto Satoshi、Akaoka Sanshiro、Gemma Masaya、Kondo Yasuo、Yamaguchi Kenji、Yamaguchi Mitsugu、Yakou Takao	4. 巻 221
2. 論文標題 Extremely Thin Metal Foil Blades as Cutting Tools for Hard and Brittle Materials	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 MATEC Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 04006 ~ 04006
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/mateconf/201822104006	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 Sakamoto Satoshi、Gemma Masaya、Kondo Yasuo、Yamaguchi Kenji、Yamaguchi Mitsugu、Yakou Takao	4. 巻 221
2. 論文標題 Influence of the Characteristics of a Workpiece on the Slicing Characteristics Including Tool Wear	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 MATEC Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 04005 ~ 04005
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/mateconf/201822104005	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 Satoshi Sakamoto, Keitoku Hayashi, Masaya Gemma, Yasuo Kondo, Kenji Yamaguchi, Takao Yakou and Susumu Arakawa	4. 巻 229
2. 論文標題 Fundamental Characteristics of Grooving Aiming at Reduction of Kerf Loss Using an Ultrafine Wire Tool	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Materials Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 12004
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1757-899X/229/1/012004	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 Satoshi Sakamoto, Masaya Gemma, Keitoku Hayashi, Yasuo Kondo, Kenji Yamaguchi, Takao Yakou and Susumu Arakawa	4. 巻 229
2. 論文標題 Influence of the brittle behavior of work materials on polishing characteristics	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Materials Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 12031
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1757-899X/229/1/012031	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 Satoshi Sakamoto, Keitoku Hayashi, Masaya Gemma, Yasuo Kondo, Kenji Yamaguchi, Mitsugu Yamaguchi and Tsuyoshi Fujita	4. 巻 719
2. 論文標題 The Wear Characteristics of a Wire Tool in the Microgrooving of Ceramics	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Key Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 132-136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/KEM.719.132	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 Satoshi Sakamoto, Masaya Gemma, Keitoku Hayashi, Yasuo Kondo, Kenji Yamaguchi, Mitsugu Yamaguchi and Tsuyoshi Fujita	4. 巻 703
2. 論文標題 Influence of the brittle behavior of work materials on microgrooving	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Key Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 17-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/KEM.703.17	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 Satoshi Sakamoto, Tomohito Fujioka, Liu Jiayu, Mitsugu Yamaguchi, Yasuo Kondo, and Kenji Yamaguchi	4. 巻 9
2. 論文標題 Sliced Surface Generation Mechanism of Unidirectional Glass Fiber-Reinforced Plastic by Multi-Wire Sawing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research	6. 最初と最後の頁 835-840
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18178/ijmerr.9.6.835-840	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25件(うち招待講演 0件/うち国際学会 5件)

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
連携研究者	近藤 康雄	山形大学・理工学研究科・教授	
	(KONDO Yasuo)		
	(50304241)	(11501)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携 研究者	山口 顕司 (YAMAGUCHI Kenji) (10220261)	米子工業高等専門学校・機械工学科・教授 (55101)	