

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03154

研究課題名(和文) 複屈折のオンマシン計測によるガラス・CFRPのdefect-freeな二次加工技術

研究課題名(英文) Defect-free secondary working of glass and CFRP by on-machine birefringent measurement

研究代表者

磯部 浩已 (Hiromi, Isobe)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60272861

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：研削によるガラスの成形加工において、高能率かつ欠陥のない加工技術が要求されている。本研究では、光弾性法の原理に基づいて複屈折情報を高速かつオンマシンで取得し、その情報から応力分布変動や加工状態を追求する技術を開発した。電着砥石でのガラスへの穴加工時における砥粒直下の応力状態やクラック発生時の衝撃的な応力変動について観察した。さらに、切りくず生成現象をより詳細に確認するため、単粒砥粒によるスクラッチ試験での応力変動や加工痕の状態を検証した。その結果、切り込み深さがサブミクロン時には、超音波振動によって微細な破壊を繰り返すことで、過大なクラックに至らないことがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、加工現象を観察・検証する方法は、工具動力計によってワークとテーブル間に作用する力の測定、加工部の温度測定、もしくは加工後の被加工面の観察によるものであった。すなわち、加工状態を推測して、加工条件を最適化してきた。本手法では、これまでに観察が困難であった応力の分布を高速度撮影することに成功した。また、難削材加工に効果のある超音波加工の現象を考察するのに有効な手段であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：In the forming of glass by grinding, high-efficient and defect free working technology is required. In this study, based on the principle of photoelastic method, birefringence information was acquired at high speed and on machine, and the technology which pursues stress distribution fluctuation and processing condition from the information was developed. The stress state just under the abrasive grain in the drilling to the glass by the electrodeposition grinding wheel and the impact stress fluctuation in the crack generation were observed. In addition, in order to confirm chip generation phenomenon in more detail, stress fluctuation and condition of the processing mark in the scratch test by the single grain abrasive grain were verified. As the result, it was proven that it did not come to the excessive crack by repeating the fine fracture by the ultrasonic vibration in the cutting depth submicron.

研究分野：精密加工，精密計測

キーワード：光弾性法 応力分布 超音波加工 脆性材料 研削加工

1. 研究開始当初の背景

航空機への CFRP の適用が実用化され、さらに車両関係への適用が急速に進みつつある。量産対応およびコストダウンのためには、射出成型による熱可塑性 CFRP 製品・部品の量産化が主流となる。しかし、図 1 に示すように、デバリング、トリミングなどの二次加工が不可欠である。また、射出成型品が金型から取り出された後、二次加工に許されるタクトタイムは 30 秒程度と言われている。すなわち、冷却過程にあり、樹脂の状態がドラスティックに変化している状態において、高速かつ安定した加工状態を実現しなければならない。一方、モバイル通信端末においては、FPD のガラス基板やカバーガラスなどに高い意匠性をもつ複雑な加工が要求されている。もちろん、セラミックスなどの硬脆材に対する高精度加工の要求も高い。このような、難削材の高精度微細加工においては、材質、コーティングおよび形状を改良したドリル工具の開発

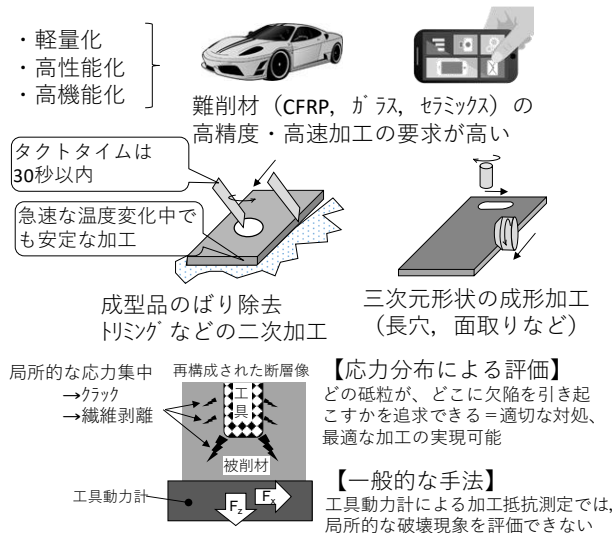


図 1 Research purpose and target

(有澤, 赤間ら: CFRP の高能率加工技術, 三菱重工技報 49,3(2012) 4.), ヘリカル加工やオービタル加工に代表されるようなツールパスによる砥粒切削長さや切りくず排出のコントロール(例えば, 田中, 清水ら: 炭素繊維強化プラスチックを対象としたプラネタリ機構による穴あけ加工に関する研究, 精密工学会誌 79, 8(2013) 761.)や超音波振動を援用した加工技術(例えば, A.H. Huda et al.: Machinability Study of Ultrasonic Assisted Machining of CFRP with multifaceted tool, Proc. CIRP 46 (2016) 488.), 加工雰囲気コントロール(例えば, T.Ishida et al.: Helical Milling of Carbon Fiber Reinforced Plastics Using Ultrasonic Vibration and Liquid Nitrogen, Proc. CIRP 24(2014)13-18)など, 国内外でさまざまな方法が研究開発され, その有効性は主に切削・研削中の工具動力計による加工抵抗, 熱電対やサーモグラフィによる温度測定と実加工結果から検証されてきた。

脆性材におけるクラックや複合材における層間剥離などの欠陥は, 破断の起点となり材料強度を大きく低下させるため, 加工品質が非常に厳しく管理される。一般的に, 研削加工中における加工状態の評価方法としては, 多くの砥粒に起因する切削力の総和を, 時間・空間的な平均値として工具動力計やひずみゲージ等で計測されている(図 1 下)。すなわち, 切削・研削加工によってランダム, 局所的かつ動的に同時多発する材料欠陥の情報を得るには, 欠陥に関連する物理量の分布(例えば, 応力分布)を, 加工領域全体に渡って高速・高分解能で測定する手法が必要である。これまでに, 厚み方向への応力が様な二次元切削応力状態にある光透過性材料に対して, 光弾性法と偏光高速カメラを組み合わせた応力分布撮影手法を開発(磯部, 山口: 超音波振動援用切削における被削材内部の応力分布変動の可視化, 精密工学会誌, 81(5), p.441-p.445 (2015))した。その結果, 数マイクロメートルで超音波振動する切れ刃に起因する被削材内部応力分布の高周波変動を可視化することができた。この撮影技術を応用すれば, 材料欠陥の発生する局所的な情報を実用的レベルで検出できると考えた。

2. 研究の目的

第一の目的は, 光弾性法の原理に基づいて, 偏光を被加工材へ照射した際の透過光もしくは反射光の複屈折情報を高速かつオンマシンで取得し, その情報から応力分布変動や加工状態を追求する技術の開発である。そして, 欠陥に直結する応力分布を評価パラメータとして, 最適化された工具の設計, 最適加工条件の導出および超音波加工技術の適用によって, defect-free な加工技術を開発し, 実用化に結びつけることが最終目的である。

3. 研究の方法

- ・複屈折性を有する加工対象物の内部応力・欠陥などの情報を, 透過光もしくは反射光からの情報を利用してオンマシンで可視化できる技術を開発する。
- ・軸付き砥石でのガラス成形研削加工における 3 次元内部応力分布について, 投影像から CT 処理によって断層像を算出する。この結果, いままでは観察のできなかった穴内部での加工現象に関して, どこに固定された砥粒が, どのように加工に寄与しているのかを追求する。
- ・カケ, クラック, 剥離などの欠陥に直接的に発生する応力分布の変動から, ガラスや CFRP の加工現象について明らかにするとともに, 加工能率・品質を向上させ, 欠陥のない実用的加工技術を開発する。
- ・ガラスの穴あけ加工を例に挙げて, 工具の台がね形状(円柱, 球状, ステップ型, へら型など), 砥粒分布, 砥粒位置(工具中心部, 外周部)が被削材の応力分布, 特にカケやクラックに直結する引張応力を評価基準として, これを最小化する工具を設計する。
- ・ガラス, CFRP 加工において高能率・高品質加工を実現できる一手法として, 超音波加工技術を適用する。超音波の効果を高めるための過剰な振動振幅は, ハンマリングによるガラスの破損, 熱

エネルギーによる CFRP の溶融の原因となると考えられる。振動援用時においても、応力分布を指標として最適な加工条件を短時間で導出する工程を実現する。

4. 研究成果

(1) 切りくず創成時の応力

ガラスやアクリルなどの光弾性体は外力を加えて応力を生じさせると複屈折性を示す。光弾性体の歪みによって複屈折した偏光の位相差を、偏光器を用いて観察することによって光弾性体の内部応力を観測する方法を光弾性法という。本研究では、光弾性法を利用した偏光カメラを用いて被削材を透過した位相差像を撮影し、CT処理を施して再構成し、被削材に加わる応力分布の断層撮影像を得る。図2は実験装置の構成である。LED光源(イマック製 IBF-LXS30AG 波長 530nm)から照射されたコリメート光は、円偏光板を通過して円偏光となり、被削材を透過する。内部応力によって生じる偏光の位相差分布は、ズームレンズ(ライカ製 Z16AP0, 対物レンズ倍率×1, ズーム倍率×4)を取り付けた特殊な偏光高速カメラによって撮影される。撮影後、各検光子からの情報を処理することで、回転工具の発生させる動的な位相差情報(主応力差および主応力方向)を得る。

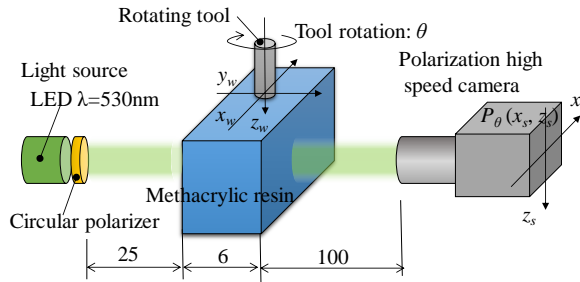


図2 Image capturing device

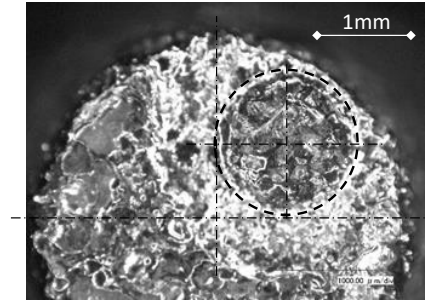


図3 Electro-deposited diamond wheel

軸付きダイヤモンド電着工具による加工では、多くの砥粒が加工に寄与し、それぞれの砥粒の加工点下において複雑な応力状態を発生させる。ここでは、加工に寄与する砥粒を限定し、その砥粒の発生させる応力を評価するために、電着工具の砥粒を放電加工によって一部分を残して除去した。図3に、砥粒を限定した粒度#120のダイヤモンド電着砥石の端面の写真を示す。工具中心から1mmだけオフセットした位置において、直径1mmの範囲にだけ砥粒が残っていることがわかる。また、この領域内には、他よりも突出した砥粒が1つだけ存在しており、この砥粒のみが加工に寄与すると考えられる。次に、この工具を用いて、メタクリル樹脂を加工した際の被削材内部応力について考察する。ここでは、準静的な加工状態とするために、1回転あたりの工具送りを行わずに、初期荷重10Nを作用させた後、工具を微速の回転数 5rpm で回転させた。そして、工具回転によって公転する応力から得られる位相差の投影像を、1回転あたり 730 枚取得した。図4に、取得した位相差像の1枚を例示する。位相差は、0nm~130nm が、色相として青~赤に相当して描かれており、砥粒直下は位相差として 70nm 程度が確認できる。

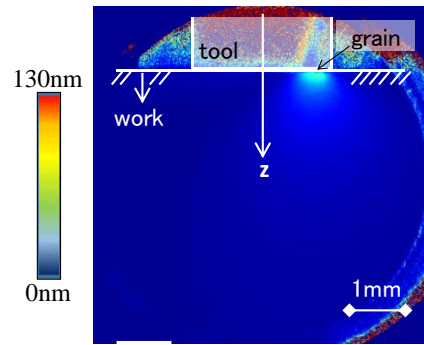
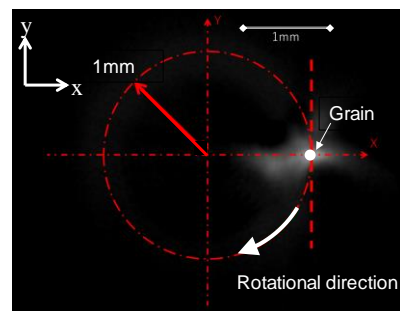
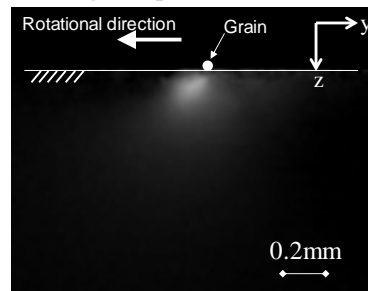


図4 Photoelastic image

工具1回転中にCT処理においてノイズとなるような突発的な応力変動がないと仮定して、投影像にCT処理を適用する。これまでに、鋼球を押しつけた際に発生するヘルツ応力分布の断層像で本手法を検証した。これは、応力点直下から試料表面の法線を対称軸とする軸対称応力分布となるために、応力分布が公転しても、位相差の投影像に変化はない。一方、ここで測定される加工状態の応力分布は、軸対称とはならない。加工点を含みz軸に直交する平面、およびr軸に直交する平面における断層像を図5に示す。応力分布は二次元切削における位相差像²⁾のように、中立軸を挟んで、前面が圧縮応力、後面が引張応力となる分布像が得られた。これより、例えばドリル工具による延性材の加工のように、加



(a) Orthogonal plane to rotational axis



(b) Orthogonal plane to r axis with cutting point

図5 Tomography of single grain cutting

工点が1~2カ所に限定され、かつ工具1回転中の応力変動がないと仮定できる場合には、その応力断層像を得られると考えられる。

(2) 石英ガラスへの穿孔

直径 3mm の軸付きダイヤモンド電着工具(#100)を用いて、石英ガラスへの貫通穴あけ加工を実施する。このときの、被削材側面からの位相差分布と研削抵抗を測定した。加工条件は、工具回転数 5000 min^{-1} 、軸方向送り速度 0.4 mm/min である。加工液として、水道水を加工領域に満たした。撮影条件として、フレームレートは 9300FPS、シャッター速度 $1/20,000 \text{ s}$ であるので、工具1回転あたりに、111枚の位相差分布像を撮影できる。図6は、切り込み深さが2mmに達したときの研削抵抗の時間的変動を示す。超音波振動を重畳した加工の結果を赤線、振動のない慣用加工の結果を黒線で示している。また、工具の1回転毎にON-OFFを繰り返す信号を図中に併記した。特に工具1回転中における変動を拡大して下段に示す。これより、研削抵抗は工具1回転毎に変動しており、その変動成分は、超音波振動によって170Nから34Nまで大きく減少した。そして、工具1回転中の変動に注目すると、支配的な変動成分は2500Hzであった。また、研削抵抗の平均値は、超音波振動によって40Nから3Nまで激減していることがわかる。図7に切り込み深さ2mmにおける超音波振動の有無による位相差分布を示す。位相差は、0nm~130nm~260nmが、色相として青~赤~青に相当して描かれている。上述した研削抵抗の周期的な変動に対して、位相差も同じ周期で変動していた。ここでは、明滅する位相差分布のなかで、大きな位相差が発生している1コマを選んで示した。砥粒直下の位相差が青く見えている部分が複数見られる。これは、複数の砥粒によって加工応力が集中して作用している部分であり、位相差は260nm程度に達した。また、ガラス底面の逃げ部には、軸送り方向の研削抵抗によるガラスの曲げ応力が作用し、大きな位相差変化が確認できた。一方、超音波振動加工においては、ほとんど明滅は生じないので、平均的な位相差分布を例示した。また、空間的な位相差の変化は非常に小さくなり、加工にともなう応力の発生が砥粒直下に限定されていることがわかった。

(3) スクラッチ試験

ガラス加工時の超音波振動による効果を検証するために、加工に寄与する砥粒を1つに限定した単粒砥石(ビッカース硬さ試験の単結晶ダイヤモンド圧子)でガラス表面をスクラッチしたときの内部応力および加工抵抗について測定した。ガラスは、ワークテーブル面に対してわずかに傾斜して取り付けられており、ワーク横送り運動12mmにともなって切り込み深さは連続的に $20 \mu\text{m}$ まで連続的に変化するように設置した。位相差像、光学顕微鏡によるスクラッチ痕および加工抵抗を図8に示す。超音波振動のないスクラッチ試験では、切り込み深さが $3.5 \sim 5.5 \mu\text{m}$ となる範囲を切り出した。スクラッチの送り運動による切りくず創成のため、砥粒の前方に偏った応力分布となり、位相差の値も大きい。切り込み深さが $4.5 \mu\text{m}$ を超えると、加工抵抗の変動が大きくなり、スクラッチ痕には大きな貝殻状のクラックが発生するようになった。一方、超音波振動する砥粒でのスクラッチでは、切り込み深さは $0 \sim 2 \mu\text{m}$ であり、この切り込み

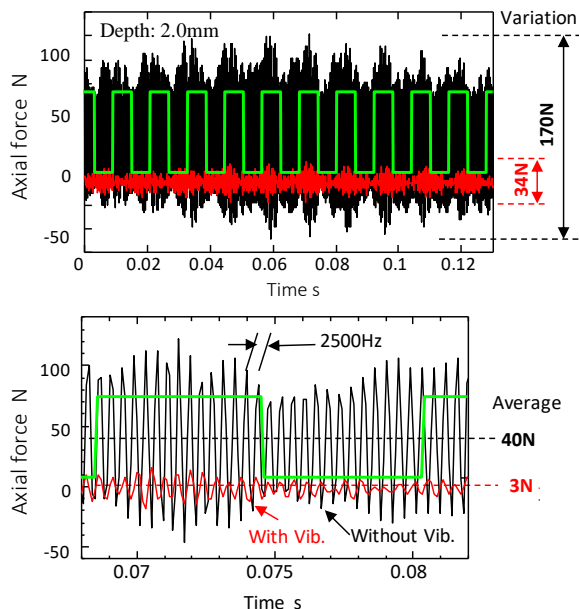


図6 Time varying grinding force with tool rotation

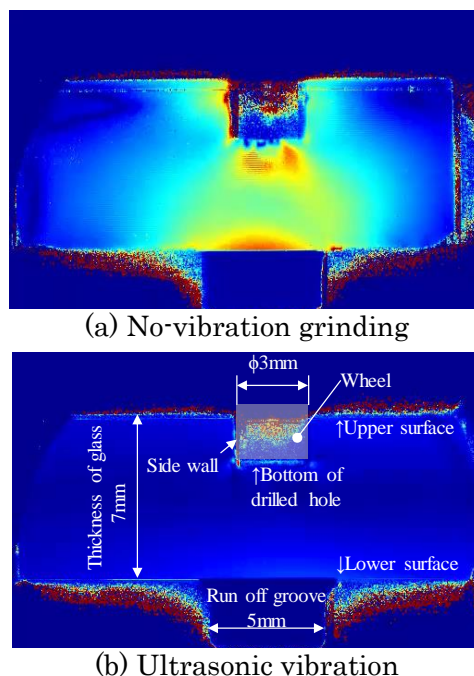
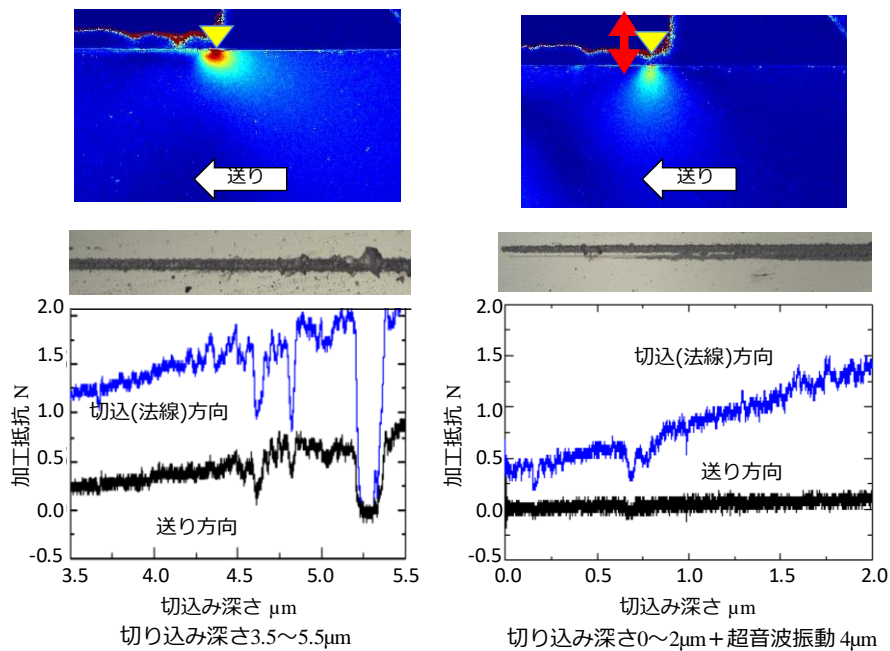


図7 Photoelastic image on quartz glass under grinding



(a) No-vibration scratch (b) Ultrasonic vibration scratch
 図 8 Photoelastic image and cutting force by scratch test with photo of scratch mark

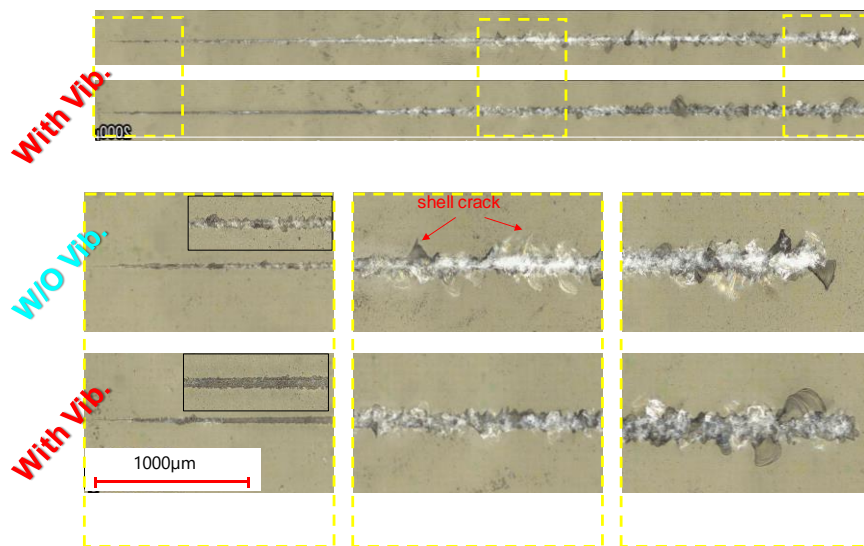


図 9 Micro photo Shell crack

振動振幅 $4\mu\text{m}$ が重畳している。位相差像は、砥粒下方に広がっており、送り運動による加工よりも、法線方向への超音波振動が加工に寄与しており、その結果として加工抵抗の変動は少なくなった。図 9 にスクラッチの工学顕微鏡撮影結果を示す。加工前半における切り込み深さが $0\sim 2\mu\text{m}$ の範囲においては、超音波振動のない加工では、脆性材料の加工で典型的に見られる貝殻状のクラックが確認された。その一方、超音波振動を重畳する加工では、貝殻状のクラックが微細でかつ安定している状態が確認できる。すなわち、超音波振動は微細で安定的な加工を実現できていることがわかった。一方、切り込み深さが数 μm をこえると、両者の差はほとんどみられなくなった。これより、超音波振動加工の効果は、微小切り込みにおける高周波数で繰り返される微細な脆性破壊現象に起因するものと結論づける。今後は、超音波振動の良好な加工状態を穴加工のみならず、回転工具での成形加工等へも適用し、位相差情報による加工の最適化を進めていく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Hiromi Isobe and Keisuke Hara	4. 巻 48
2. 論文標題 Visualization of fluctuations in internal stress distribution of workpiece during ultrasonic vibration-assisted cutting	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 331-337
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.precisioneng.2017.01.003	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 Hiromi ISOBE , Natsuki Sasada, Keisuke Hara, and Jun Ishimatsu	4. 巻 13(6)
2. 論文標題 Visualization of Stress Distribution by Photoelastic Method under Ultrasonically Grinding Condition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 736-742
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/ijat.2019.p0736	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7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Natsuki Sasada, Keisuke Hara and Hiromi Isobe
2. 発表標題 Visualization of Stress Distribution by Photoelastic Method
3. 学会等名 第21回国際先端砥粒加工シンポジウム (ISAAT2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横山聡大、笹田捺生、五十嵐裕哉、原圭祐、磯部浩巳
2. 発表標題 超音波振動研削によるガラス加工の特性改善 第4報 超音波振動する砥粒が内部応力に与える影響
3. 学会等名 2018年度精密工学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長谷川知晃、横山聡大、笹田捺生、五十嵐裕哉、原 圭佑、磯部浩已
2. 発表標題 超音波振動研削によるガラス加工の特性改善 第5報 応力複屈折の計算を用いた砥粒接触応力の検証
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 磯部浩已
2. 発表標題 超音波振動研削によるガラス加工の特性改善 第三報 超音波振動が内部応力分布に与える効果
3. 学会等名 精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 磯部浩已
2. 発表標題 超音波振動研削によるガラス加工の特性改善 第二報 内部応力測定方法の検証
3. 学会等名 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 Natsuki Sasada, Hiromi Isobe, Keisuke Hara
2. 発表標題 Visualization of Stress Distribution by Photoelastic Method under Ultrasonically Grinding Condition
3. 学会等名 ISAAT2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiromi Isobe, Keisuke Hara
2. 発表標題 Capturing of Stress Distribution of Workpiece Under Ultrasonically Assisted Machining Condition
3. 学会等名 International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔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
研究分担者	原 圭祐 (Hara Keisuke) (30515812)	一関工業高等専門学校・その他部局等・准教授 (51201)	
研究分担者	鈴木 厚行 (suzuki atsuyuki) (40450142)	徳山工業高等専門学校・機械電気工学科・准教授 (55503)	
研究分担者	田邊 里枝 (tanabe rie) (70432101)	長岡技術科学大学・工学研究科・助教 (13102)	