

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289014

研究課題名(和文) 被削材内部応力の高速度偏光撮影に基づいた超音波振動切削加工の現象究明と最適化

研究課題名(英文) Investigation of phenomenon of ultrasonic vibration cutting by using internal stress distribution based on high-speed polarization capturing

研究代表者

磯部 浩己 (ISOBE, Hiromi)

長岡技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60272861

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：メタクリル樹脂の二次元切削における光弾性法における編次数から算出される切削分力を推定可能にした。その結果、超音波振動援用切削における断続切削下においては、切削応力が消失する期間が観察された。さらに短時間での応力変動の有無を確認するために、発光時間15nsのパルスレーザー光源を切れ刃の振動に同期させて発光させ、極短時間での応力変動を可視化した。そして、超音波振動1周期 36.2 μ sを360コマで撮影するシステムを構築した。切れ刃の振動による応力分布変動が振動振幅や送り速度から受ける影響を調査するとともに、被削材の弾性変形による切り残しについて着目し、超音波切削加工現象について検証した。

研究成果の概要(英文)：The visualization system of stress distribution under ultrasonic vibration-assisted cutting condition is constructed to investigate the cutting phenomenon. The instantaneous stress distribution on workpiece was visualized by photoelastic method in combination of pulse laser emission synchronized with vibration of cutting edge. Orthogonal cutting test was carried out at low cutting speed relative to vibration speed. The photographic system divided the ultrasonic vibration period of 36.2 μ s into 360 frames. It was experimentally confirmed that the stress distribution under vibration-assisted condition showed the periodical change synchronized with insert vibration. The imaging system is able to show the periodic change of stress distribution in ultrasonic frequency band. Remnants formed due to elastic deformation of the workpiece were examined. The vibration cutting dramatically reduced the elastic deformation and the vibration amplitude had effect on the amount of remnant thickness.

研究分野：工学

キーワード：超音波切削加工 光弾性法 ストロボ撮影 応力分布

1. 研究開始当初の背景

切削・研削加工は、古典的な機械加工の一つであるが、加工能率や加工精度の観点から最重要な加工技術である。一方、産業界では、航空・宇宙産業、医療関連産業、各種プラント等で、性能向上のためにニッケル基合金、チタン合金、超硬合金、セラミックスなど「難削材」に分類される素材に対する高精度微細加工の要求が非常に高い。これらは、レーザー加工や放電加工が適用されるが、コスト、生産性、精度の観点から、切削・研削加工の適用が望まれている。

超音波切削加工の研究(隈部淳一郎: 振動切削—基礎と応用—, 実教出版社(1979))が始まって以降、多くの研究者が、超音波加工時の切削抵抗低減効果や加工精度向上について報告している。しかし、周波数特性が数kHz以下と超音波帯域よりも非常に低い切削工具動力計による測定では、超音波加工における動的な切削現象を捉えることは不可能であり、あくまで時間平均的な参照値によって、加工特性が評価されてきた。

2. 研究の目的

超音波帯域で繰り返される動的かつ短時間な加工メカニズムは、いまだに明らかになっていない。そのために、加工機的设计、加工条件の設定等は試行錯誤的なものであった。そこで、超音波帯域で変動する被削材内部応力を可視化する高速度偏光撮影手法を開発し、直接的に加工状況を評価・検証することで加工メカニズムを明らかにする。そして、超音波振動の効果を最適化する振動状態、工具形状を提案し、光透過性のある難削材としてガラスに対して加工実験を行い、開発した最適化手法を検証することを目的とする。

1. 被削材内部の応力変動の動的撮影手法の確立

偏光高速度カメラによって、透明部材の内部応力変動を高速度撮影する。さらに、超音波帯域での応力変動を高画素数で撮影するために、超音波振動と同期発光するレーザー光源を導入して、ストロボ撮影を行う。

2. 超音波加工の原理究明

振動加工の原理としては、切れ刃、切りくずおよび被削材間に振動変位による間隙が生じることによる断続的な切削現象と説明されてきたので、加工原理を究明する。

3. 加工条件導出プロセスの確立

提案した加工条件の最適化手法を実加工にて検証する。

3. 研究の方法

(1) 光弾性法による応力分布撮影

透明で均一な物質に外力を加えて応力を生じさせると複屈折性を示すことが知られている。この複屈折性を用いて物体内の応力状態を実験的に求める方法を光弾性法とい

う。切削されている被削材の応力分布を光弾性法に基づいて観察するため、光源、円偏光板、加工点、バンドパスフィルタおよび複屈折の分布を高速度で計測できる偏光カメラを図1のように設置した。本構成は、透過光弾性法の中では半円偏光器に分類され、最大主応力方向と最小主応力方向に分かれた2つの偏光の位相差の情報が得られる。すなわち、弾性変形内で主応力差と複屈折によって生じた光の位相差は比例関係となる。被削材を弾性体と仮定したとき、切削力によって厚さ方向に均一な線荷重のみをインサートの刃先から受けている被削材に生じる応力分布は、単純円形応力分布となることが Flamant によって示されている。したがって、被削材内部の応力分布は単軸応力状態となり、観察される主応力分布から切削分力を算出できることを確認している。

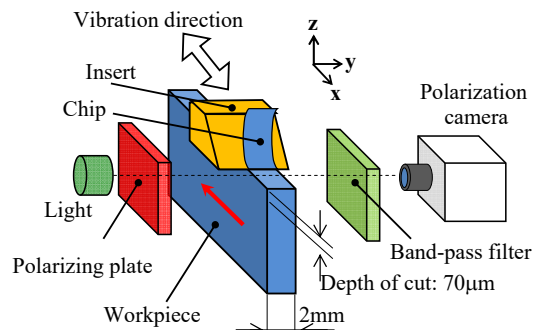


Fig.1 Configuration of photoelastic experiment

(2) ストロボ撮影方法

微細な超音波振動に伴う応力変動を撮影するカメラには、高いフレームレートと空間分解能に直結する画素数が必要であり、高速度カメラを用いても要求を同時に満たすことは困難である。そこで、本研究では、切れ刃の振動の位相に同期して、パルスレーザー光源を振動周期よりも非常に短い時間で発光させる。導入したレーザー光源は、QスイッチNd:YVO4レーザーで、仕様上のパルス発光時間は15nsec、時間的安定性は3%(σ)である。高速度カメラのフレームレートは6000fpsで、撮像素素数は896×752ピクセルとし、シャッター開放時間は1/25000sとする。カメラの開始トリガに従って、任意タイミングで撮影が開始されると、カメラからは1フレームの撮影ごとにCamera sync out信号が出力される。一方、超音波振動アクチュエータであるボルト締めランジュバン振動子には、周期36.2μsのExcitation signalに基づいて、発振電源から交番電圧が印加される。Camera sync out信号のダウンエッジを検出した後、Excitation signalのダウン信号を検出すると、ロジックデバイスからは0.1μsにフレーム番号Nを乗じた時間だけ遅延させた後、レーザー発振器へLaser irradiation trigger信号を送る。このトリ

ガ信号により、一定時間(0.35 μ s)の後に、レーザが加工点に照射される。したがって、超音波振動のある特定の位相において、レーザは15nsだけ照射される。各フレームの最後にシャッターが超音波振動の1周期の時間だけ解放されている間に、1ショットの照射によって露光される。また、2フレーム目以降では、レーザ照射のタイミングが、超音波振動の位相に対して0.1 μ sずつ遅れることになり、全362枚の撮影によって超音波振動一周期分の撮影となる。

(3) 切削装置

応力分布から切削力ベクトルや切削現象の理論との比較検討を簡便に行うことのできる二次元切削を採用した。送り方向と振動方向が同一方向となる主分力振動切削とする。すなわち、被削材と切れ刃の相対運動によって、両者が分離する断続切削状態となる。振動切削ユニットはホーンの先端に取り付けられたインサートをボルト締めランジュバン型振動子で励振する構造で、ホーンの縦振動モードにおいて共振周波数27.8kHzとなるように設計、製作した。加工点を撮影エリアに保持し、定常観察するために、偏光カメラと超音波切削ユニットは固定され、ワークがカメラ視野内に送られる。切削ユニットの振動の節部が装置に固定されているので、静止座標系に設置されたカメラからは、刃先の振動や応力分布の変動が観察されることになる。インサートの振動振幅は、振動子へ印加する交番電圧の振幅によって調整した。

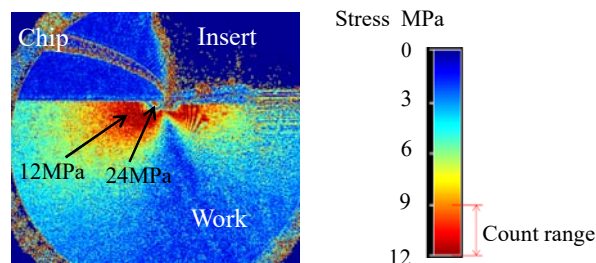
被削材のメタクリル樹脂には、押し出し材に比べて等方で均一な機械的・光学的特性を有するキャスト材を用いた。切削幅(被削材板厚さ)は2mmである。

4. 研究成果

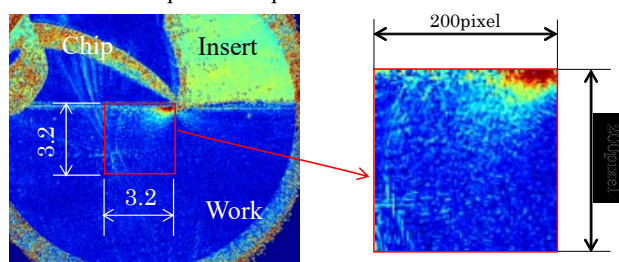
(1) 応力分布の評価方法

くびれ部の長さ4mm、幅1mmで、厚さは被削材と同じ2mmのメタクリル樹脂を圧縮試験片として、工具動力計にて荷重を測定しながら静的に圧縮した。その結果、くびれ部の公称応力60MPaにて、三次の縞がカウントできた。すなわち、位相差からの応力値へは校正できることが確認された。次に構築した撮影システムを用いて、被削材を透過する偏向光の位相差分布を撮影する。二次元切削状態下においては、位相差は主応力値に比例する。一例として、最も応力の範囲が広がった瞬間の1フレームを図2に示す。応力の増加とともに位相差の変化は、0(青色) \rightarrow $\pi/2$ (赤色) \rightarrow π (青色) \rightarrow $3\pi/2$ (赤色) \dots と連続的な色相変化として表現される。縞次数として12MPaに相当する赤色の一次縞、および36MPaに相当する赤色の二次縞が確認できるが、三次以上の縞は不明瞭である。一方、LED光源を用いた前報においては、メタクリル樹脂の降伏応力である75MPa

とほぼ同程度の四次縞は明確に確認できることから、レーザ光源を用いたことによるスペckルノイズが、空間分解能を低下させていると考えられる。今後、加工点近傍での切削状態を論じる場合には対策が必要となる。一方、レーザ照射時間15ns、照射回数1ショットでの撮影でも応力分布の広がりを撮影できており、光量は十分であることが確認された。



(a) Relationship between phase difference and stress



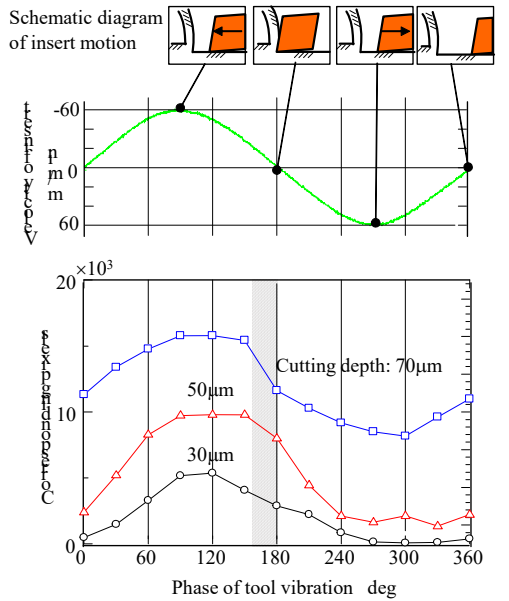
(b) Stress evaluation for 1st. fringe

図2 Instantaneous phase difference map

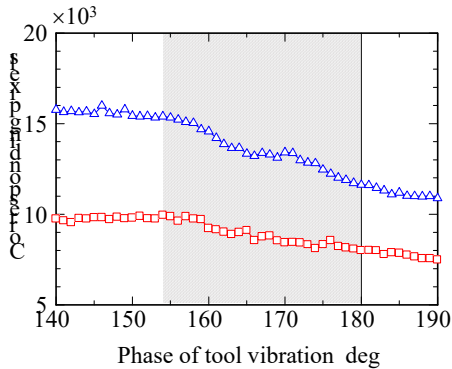
切削力の大きさおよび方向については、単純円形応力分布を仮定すれば、観察される主応力分布から、幾何学的に算出できる。前報においては、応力分布が十分に広がり、縞次数として三〜四次縞が明確に確認できるような最大応力分布状態における切削力を評価した。しかし、切れ刃と被削材が接触し始めや、離れる直後での応力分布の範囲は狭く、等応力円を幾何学的に描画できないために、切削力変動を評価することができない。そこで、対象となる領域の範囲を3.2mm \times 3.2mm(200 \times 200pixelに相当)とし、縞次数1次において作用応力と位相差の関係の線形性が強い応力範囲、すなわち11.25MPa(オレンジ色)から15.0MPa(赤色)の画素数を参照画素数と呼び、その時間変化を応力分布の変化として考察する。

(2) 刃先振動と応力分布変動の関係

これまでの切れ刃と被削材の相対運動に基づく理論と、被削材内部応力の変動の実験的に検証した。超音波振動の効果を明らかにするため、被削材送り速度(慣用加工における切削速度に相当)は臨界送り速度よりも十分に遅い1.0m/minとした。すなわち、理論的には超音波振動援用によって、超音波振動するインサートの刃先が被削材と接触・非接触を繰り返す断続切削状態となる。振動周波数27.6kHz、振動振幅6 μ mである。図3(a)にLDVで測定した加工点近傍部の切れ刃の振動速度と参照画素数の変動を示す。切込量は、30、50および70 μ mである。切れ刃の

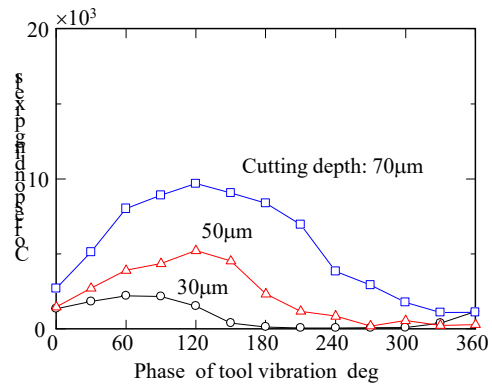


a) Relation between tool motion and stress distribution

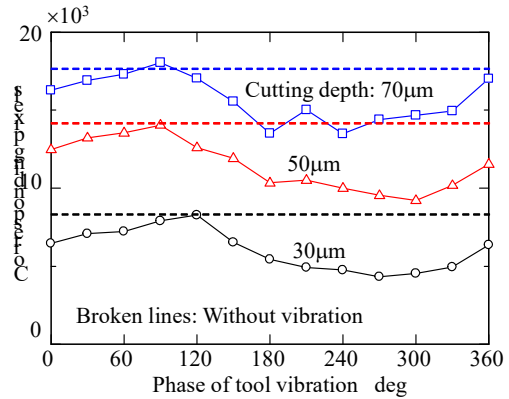


b) Magnified graph for theoretical contact period
Fig. 3 Time varying stress distribution: $a_0=6\mu\text{m}$, $F=1.0\text{m/min}$

振動速度を基準として、切れ刃が最後退位置を位相 0° 、最前進位置を 180° とした。これより、切れ刃は最後退位置である速度ゼロから切りくずにアプローチしていき、参照画素数は振動速度に対して位相遅れを示しながら、増加し続ける。速度が最大となる振動中立位置に達した後、 45° 程度の位相遅れで参照画素数は最大値に達した。すなわち、理論的には断続切削状態であるにもかかわらず、被削材内部応力は振動速度変動に同期して発生していることがわかった。また、切れ刃の後退にともなって、参照画素数は減少するが、切り込み深さ $70\mu\text{m}$ では参照画素数は消失することなく、最後退位置に達する前に再び増加し始める。一方、切り込み深さ 30 および $50\mu\text{m}$ では、位相 240° 以降では、参照画素数がほぼ消失した状態を位相 330° まで維持している。これは、逃げ面と切削面との擦過によるものと思われる引張応力もカウントされているため、参照画素数はゼロにはならないが、刃先と切りくずは離れている期間が存在すると考えられる。すなわち、臨界送り速度以下であっても、切り込み深さが大きくなると、断続切削状態から連続切削状態に移行す



(a) $a_0=6\mu\text{m}$, $F=0.5\text{m/min}$



(b) $a_0=3\mu\text{m}$, $F=1.0\text{m/min}$

Fig.4 Effect of cutting parameters on stress distribution

ると考えられる。

(3) 接触直後の応力変動

切れ刃の超音波振動と被削材の送り運動の相対運動を考える。断続切削において切れ刃と被削材が接触した瞬間は、切れ刃は振動による速度を有して被削材に衝突するため、切れ刃と被削材が接触した衝撃力による突発的な応力変動が発生すると考えられる。本実験においては、相対運動から導出される切れ刃と被削材の接触時間は理論的に $2.6\mu\text{s}$ となる。超音波振動の1周期は $36.2\mu\text{s}$ なので、接触期間を超音波振動の位相角で表すと 26° となる。図 3(a)中に理論的な接触期間 26° をハッチングして示した。さらに、図 3(b)は、サンプリング周期を $0.1\mu\text{s}$ 、すなわち超音波振動の1周期あたり約 360 点として測定した結果である。メタクリル樹脂における縦波の伝播速度は、 2730m/s であり、サンプリング1周期中の伝播距離は 0.27mm となる。本撮影システムにおける視野内で弾性波の伝播現象を観察できるはずであるが、突発的な変動は確認できなかった。すなわち、切れ刃と被削材の相対的な変位のみで述べられる断続切削の理論では、加工現象を説明できないことがわかった。

(4) 切削条件による超音波振動の効果の変化

前節での加工条件から送り速度および振動振幅を半分にした場合の参照画素数の時間変化を示し、加工条件が超音波振動の効果に及ぼす影響について考える。図 4(a)では送り速度を 1.0m/min から 0.5m/min にすることで、送り速度に対する

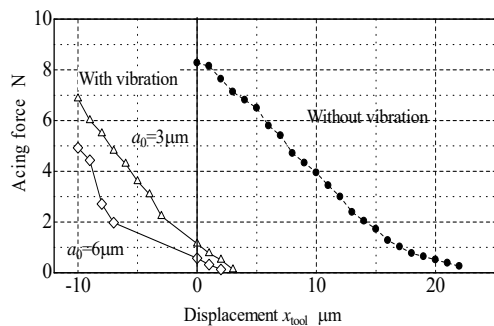


Fig.5 Remaining uncut

超音波振動速度の割合が大きくなる。その結果として、すべての切り込み深さにおいて、参照画素数の変動曲線が低下している。具体的には、切り込み深さ $30\mu\text{m}$ では、送り速度 $1.0\text{m}/\text{min}$ (図 4(a)) においては、位相角 270° から 360° の期間で参照応力値を超える画素が消滅しているのに対し、送り速度 $0.5\text{m}/\text{min}$ においては、消滅期間は振動周期の半分以上を占めるようになる。工具とワークの接触時間が相対的に短くなり、消滅期間が増加したと考えられる。一方、図 4(b)では振動振幅を $6\mu\text{m}$ から $3\mu\text{m}$ に小さくした。また、図中の破線は、振動を停止した場合の参照画素数であり、言い換えると振動振幅が $0\mu\text{m}$ の結果である。これより、超音波振動切削中に変動する参照画素数の最大値は、振動がない場合の画素数とほぼ一致している。すなわち、超音波振動の振幅を増やすことは、超音波振動一周期間すべてに渡って応力を低下させるのではなく、ある特定期間での応力を低下させることがわかった。

(5) 弾性回復による切り残し量の測定

これまでの実験から、超音波振動において理論的には断続切削条件にもかかわらず、応力分布の変動からの観点からは断続切削状態が確認できなかった。その理由として、被削材の弾性回復による切り残しを考える。本実験での超音波振動加工においては、切れ刃が送り方向に振幅 a_0 で振動している。そのため、切れ刃の振動変位と振動停止後の位置をレーザ変位計で測定した結果、振動の中間位置で静止することが確認された。そこで、切り残し量測定における切れ刃位置の原点は、振動する切れ刃の振動中心位置とする。切削熱による応力の影響を避けるために、切削急停止後に二分間ほど応力分布の変化がないことを確認した後で実験を開始した。切れ刃の移動量に対して、被削材が切れ刃から受けている力(ここでは、作用力と呼ぶ)を図 5 に示す。切り込み深さ $50\mu\text{m}$ で、被削材送り速度 $0.1\text{m}/\text{min}$ の極低速で切削後、切れ刃を微小送りさせた。横軸は切れ刃の移動量で、マイナス方向は切れ刃が送り停止後に更に押し込まれたことを意味している。また、作用力の算出は、前報と同様に LED 光源によるスペクトルノイズの少ない撮影方法を用いて、位相差マップから求めた。振動をさせない場合の送り運動停止後の作用力は 8.2N であり、作用力は切れ刃が

逃げるとともに減少し、 $22\mu\text{m}$ まで逃がすとほぼ消滅した。これに対して、振動切削における停止直後の作用力は、振幅 $3\mu\text{m}$ で 1.2N 、振幅 $6\mu\text{m}$ で 0.6N であった。また、振動切削において切り残しがないとすれば、切れ刃が振幅分だけ押し込まれるまでは作用力は発生しないと考えられる。しかし、実際は振動停止直後に存在する作用力は、押し込まれる変位にほぼ比例して増加することから、振動停止時には未切削点と切れ刃は接触しているものと考えられる。また、振動振幅 $3\mu\text{m}$ においては、切れ刃を $3\mu\text{m}$ ほど逃がすと作用力は消失する。すなわち、この状態における超音波切削においては、切れ刃は未切削領域と常に接触していることから、断続切削ではないと考えられる。一方、振動振幅が $6\mu\text{m}$ においては、切れ刃を $2\mu\text{m}$ ほど逃がすと作用力は消失することから、断続切削になると考えられる。これらの結果から、前節において振動振幅 $3\mu\text{m}$ では超音波振動 1 周期中に参照画素数が消滅する期間が存在しなかった理由は、被削材の弾性変形だと考えられる。また、断続切削でない条件下においても、振動のない切削に比べて参照画素数が減少するのは、切削加工における弾性変形領域が切れ刃の振動によって減少するため、より少ないエネルギーで塑性変形に遷移するためだと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

1. Hiromi ISOBE and Keisuke Hara : Visualization of Fluctuations in Internal Stress Distribution of Workpiece During Ultrasonic Vibration-assisted Cutting, Precision Engineering, 48, p.331-p.337 (2017)
2. H.N.Trung, J. Ishimatsu and H. Isobe : Effects of grinding fluid excited by ultrasonic vibration, Materials Science Forum Vol.874, Advances in Abrasive Technology XIX, p.308-312 (2016)
3. Hiromi ISOBE and Keisuke Hara : High-speed capturing of stress distribution of workpiece under, Advanced Material Research 806, p.520-p.525 (2015)
4. 磯部浩巳, 山田和也, 原圭祐 : 超音波振動するドリルによる加工特性向上 第 1 報 : 食い付き性の改善と振動モードの影響, 砥粒加工学会誌, 59(6), p.328-p.333 (2015)
5. 磯部浩巳, 山口千尋 : 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)
6. Hiromi ISOBE and Keisuke Hara : High-speed capturing of stress distribution of workpiece under ultrasonically assisted cutting condition, Advanced Materials Research, 1017, p.747-p.752 (2014)

[学会発表] (計 10 件)

1. 磯部浩巳, 原 圭祐: 超音波振動研削によるガラス加工の特性改善-第一報 光弾性法による内部応力分布の測定と CT による再構成-, 2017 年度精密工学会春季大会 (慶應義塾大), 2017 年 03 月 13-15 日
2. 木村正孝, 磯部浩巳: 超音波カッターによる樹脂素材切断時に生じる加工応力の可視化, 2016 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会 (新潟大), 2016 年 11 月 12 日
3. 志村喬史, 高野心平, 磯部浩巳: 光弾性法によるガラスへの穴加工における応力分布変動の可視化 -CT 法による応力分布の再構成, 2016 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会 (新潟大), 2016 年 11 月 12 日
4. 佐々木涼, 小堺陽太, 磯部浩巳: 超音波振動切削における加工現象の究明 -動的な切削抵抗に対する振動振幅の効果-, 2016 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会 (新潟大), 2016 年 11 月 12 日
5. ISOBE and Keisuke Hara : High-speed capturing of stress distribution of, ISAAT2015 (Ramada Plaza Hotel, Jeju, Korea), 2015 年 10 月 04 日~2015 年 10 月 07 日
6. NGUYEN TRUNG HIEU, Hiromi Isobe : 超音波振動研削液による研削熱と研削抵抗の低減効果, 2015 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会 (金沢工大), 2015 年 11 月 14 日
7. 磯部浩巳: 超音波切削における被削材内部応力分布の可視化 (第五報) 弾性変形を考慮した超音波振動切削現象, 2016 年度精密工学会春期大会学術講演会 (東京理科大 野田キャンパス), 2016 年 03 月 15 日~2016 年 03 月 17 日
8. 磯部浩巳, 渡部弘樹, 原圭祐: 超音波切削における被削材内部応力分布の可視化 (第三報) -弾性変形と応力分布の時間的変化-, 2015 年度精密工学会春期大会学術講演会 (東洋大), 2015 年 03 月 17 日~2015 年 03 月 19 日
9. 渡部弘樹, 飯野剛, 磯部浩巳: 超音波帯域で変動する被削材内部応力分布の高速撮影, 2014 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会 (富山大), 2014 年 11 月 22 日
10. 磯部浩巳, 飯野剛, 原 圭祐: 超音波切削における被削材内部応力分布の可視化 第二報 時間分解能の向上, 2014 年度精密工学会秋期大会学術講演会 (鳥取大), 2014 年 09 月 16 日~2014 年 09 月 18 日

6. 研究組織

(1)研究代表者

磯部浩巳 (ISOBE, Hiromi)
長岡技術科学大学・工学部・准教授
研究者番号: 60272861

(2)研究分担者

伊藤義郎 (ITO, Yoshiro)
長岡技術科学大学・工学部・教授
研究者番号: 60176378

丸山耕一 (MARUYAMA, Kouichi)
秋田工業高等専門学校・その他部局等・准教授
研究者番号: 90302934

原 圭祐 (HARA, Keishuke)
一関工業高等専門学校・その他部局等・准教授
研究者番号: 30515812