

令和 5 年 5 月 24 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04122

研究課題名(和文) 極間雰囲気が微小径深穴加工用電極工具の成形精度へおよび影響の解明

研究課題名(英文) Effect of Gap Atmosphere on the Forming Accuracy of Electrode Tools for Deep Hole Drilling of Micro Diameter

研究代表者

平尾 篤利 (Hirao, Atsutoshi)

新潟大学・人文社会科学系・准教授

研究者番号：70455111

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、同一機上における微小径軸の成形および成形した軸を工具電極として用い、微小径の深穴加工を実現することである。工具電極を回転させながら被加工物側へと走査放電加工する微細軸成形法を提案し、直径 $10\mu\text{m}$ 、 $L/D25$ の軸成形を実現した。また、成形軸の直径精度向上を図るため、電気エネルギーの違いによる放電痕の直径および放電極間距離を計測し、最適な電気エネルギー条件を選択することで、より高精度な軸成形を実現した。また、軸直径と共振の関係をシミュレーションし、実際の結果と比較した。軸の共振しない条件を用いることで軸の成形精度向上を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

エンジン燃料噴射ノズルの噴射穴は、金属材料に対してアスペクト比(深さ/穴径の比： $L/D$ )が5を越え、かつミクロンオーダの精度を必要とする。また最近では、多様化するエンジン燃焼方式の影響で、斜め穴、異形穴など、穴形状に対する要求も多様化している。成形した工具電極を用いることで微細な高アスペクト比の深穴加工を実現することは、工業的な価値は大きい。例えば、直径 $0.2\text{mm}$ 以下の加工穴やノズル穴の複雑形状加工が実用化すれば、工業的にも計り知れない価値があり、社会的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to realize Deep hole drilling of small diameter by forming a micro-axis on the small machine and using the formed axis as an Electrode. We proposed a micro shaft forming method in which the electrode is rotated while scanning electrical discharge machining is performed toward the work piece, and achieved shaft forming with a diameter of  $10\mu\text{m}$ ,  $L/D25$ . In order to improved the accuracy of formed shaft diameter, the diameter of the discharge trace and the distance between discharged gaps were measured for different electrical energies, and by selecting the optimum electrical energy conditions more accurate shaft forming was achieved. The relationship between shaft diameter and resonance was simulated and compared with actual results.

By using a condition where the shaft does not resonate, the accuracy of shaft forming was improved.

研究分野：加工学

キーワード：放電加工 深穴加工 微細加工 軸成形

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、工業製品(マイクロ金型やダイ金型)はますます微細化・高精度化が要求されている。このマイクロ加工分野を担う重要な技術のひとつとして、微小径穴加工がある。代表的な適用事例として、エンジン燃料噴射ノズル穴が挙げられる。また、半導体製造装置や医療機器分野において、真空吸着部や小径ノズルに対して直径0.5 mmに満たない穴が必要とされている。これら微小径穴加工技術には、微小径ドリル工具を用いたドリル加工法、超短パルスを用いたレーザ加工法、放電加工法が挙げられる。加工効率の点からドリル加工法が広く利用されているものの、直径0.1 mm以下の微小径穴や高アスペクト比(L/D 10以上)の微小径深穴加工において、放電加工法が適用されている。放電加工法は、加工反力が小さいため微細加工の分野に適している。しかし、放電加工法による微細加工は、微細加工領域に合わせた電極が必要となる。ワイヤ直径で0.01 mmのワイヤ電極が市販されているものの、ワイヤ電極を高精度に把持できる主轴チャックが存在しない。そのため、微細加工用の電極は丸棒電極を機上で微細化する方法が採用されている。一般的に、放電加工法を用いた微小径穴加工用の電極の成形には、WEDG法(図1参照)が用いられている。一方で、著者らは、図2に示した、電極を回転させながら被加工物側へと走査放電加工する微細軸成形法を提案している。成形軸を回転させながら成形プレート側へ走査放電加工することで、電極直径は時間の経過に伴って、急激に減少する。本手法は、放電面積が広いこと他加工方法に比べ効率のよい加工を実現している。これまで、本方法によって直径10 μm、L/D 25の軸を成形した。しかし、直径10 μmの軸を再現性高く得ることは難しい。理由として、軸の微細化限界には、(1)放電条件、(2)軸材料の粒径および結晶粒径、(3)軸材料内部の残留応力などが影響しているためである。

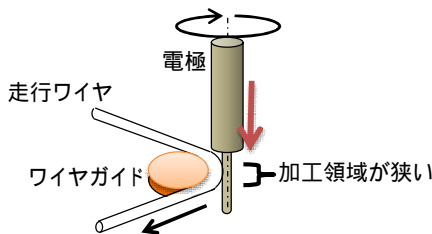


図1 WEDG法

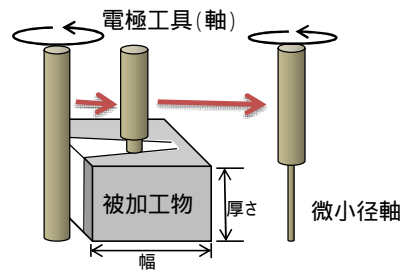


図2 走査放電加工を用いた微細軸成形法

2. 研究の目的

本研究は、微小径軸の成形精度の向上、成形軸を電極として用いた微小径の深穴加工および成形軸の形状加工の実現を目的としている。走査放電加工法によって微細軸を成形する際、微細化限界を考察するため、微小径軸の成形精度の要因を詳細に調査する。

3. 研究の方法

研究期間において、以下の内容を実施した。

- (1) 走査放電加工法における微小径軸の成形精度向上を確立
- (2) 極間の各雰囲気軸成形におよぼす影響を解明

- (1) 走査放電加工法における微小径軸の成形精度向上を確立

既に製作している走査放電加工機の改良および加工システムを構築する。これまでの微小径の軸成形において、走査(移動)距離によって軸直径が決定されることが明らかとなっている(図3参照)。そこで、高精度ステージを用いることで、より微細かつ高精密な軸成形を試みる。最終的には、微細軸成形および同一機上における成形軸を工具電極に用いた微小径穴加工システムを構築する。

・微小径軸の成形精度要因の調査

図3の結果から、走査距離は放電頻度(抵抗値R)や軸の長さ(l)によって変化することはない。このため、成形プレートを厚くすることで、より長い軸が走査距離のみによって直径制御することが可能となる。成形する軸の直径精度向上を図るため、次の3点を詳細に調査する。「電気エネルギーの影響」

「材料特性の影響」

「回転軸の共振現象の影響」

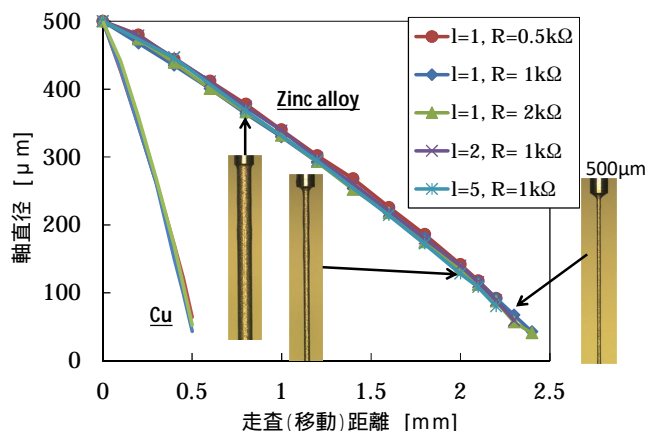


図3 走査距離と軸直径の関係

### 「電気エネルギーの影響」

電気エネルギーの違いによる放電痕の直径および放電極間距離を計測し、最適な電気エネルギー条件を選択することで、より高精度な軸成形を実現する。

### 「材料特性の影響」

微細な粒子径の WC-Co を用い、粒子径が軸の成形精度におよぼす影響を調査する。材料特性によって成形精度が改善するか調査し、より最適な材料を使用する。

### 「回転軸の共振現象の影響」

軸直径と共振の関係をシミュレーションし、実際結果と比較する。軸の共振しない条件を用いることで軸の成形精度向上を実現する。

## (2) 極間の各雰囲気気軸成形におよぼす影響を解明

ここでは、極間雰囲気気軸成形に与える影響を解明するため、放電加工中における側面ギャップの気泡挙動および加工屑をハイスピードマイクロスコープによって観察する。図4に観察装置の概略を示す。側面ギャップを観察するために、被加工物と透明アクリル板を重ね合わせる。電極には  $\phi 2\text{ mm}$  を用い、被加工物には鋼材を用いる。放電ギャップを考慮し、前もってエンドミルで  $\phi 2.2\text{ mm}$ 、深さ  $6\text{ mm}$  の穴を加工する。本観察装置によって、底面部および側面からの放電が可能となる。

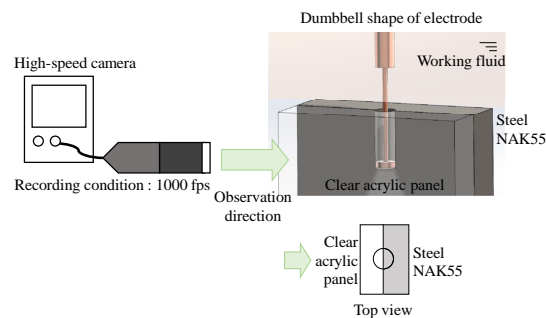


図4 側面ギャップ観察装置

## 4. 研究成果

### (1) 走査放電加工における微小径軸の成形精度向上を確立

#### ・電気エネルギーの影響

ここでは、微細化限界の電気エネルギーについて検討するため、放電条件の違いによる放電痕直径および放電極間距離を計測した。図5に各無負荷電圧におけるコンデンサ容量と放電痕直径の関係を示す。また、各加工条件に対応した極間距離を記している。無負荷電圧、コンデンサ容量を小さくすると、極間距離も小さくなる。極間距離が小さくなると、容易に短絡する。この短絡状態を放置すると条件によっては線爆現象に至ることも予想される。図6に無負荷電圧  $45\text{ V}$ 、コンデンサ容量  $40\text{ pF}$  および無負荷電圧  $100\text{ V}$ 、コンデンサ容量  $47000\text{ pF}$  の加工表面 SEM 像を示す。放電痕直径はコンデンサ容量に大きく依存していることが確認できる。放電痕直径の拡大は、加工反力の増大を意味する。そのため、放電痕直径が大きいと、軸の折損に影響することとなる。

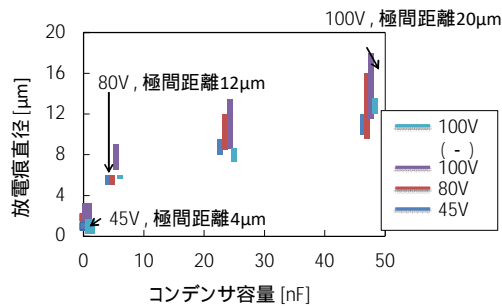


図5 放電痕直径とコンデンサ容量の関係

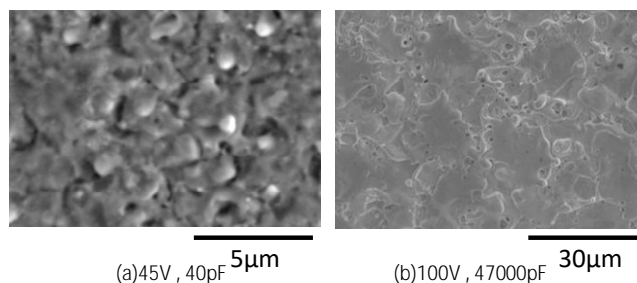


図6 加工表面SEM像

・材料特性の影響

微細化限界の軸材料の粒径および結晶粒径について検討した。図7に使用した軸(WC-Co)断面のSEM像を示す。断面SEM像からWの粒径(直径1μm程度)が確認できる。焼結体電極は、粒径が軸の微細化限界の要因となる。そのため、本粒径の軸を電極として用いた場合、直径1μm以下の軸を成形することは困難であると予想される。

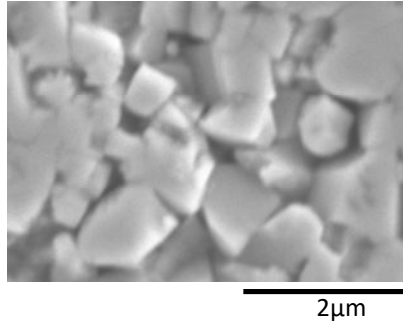


図7 WC-Co電極の断面SEM像

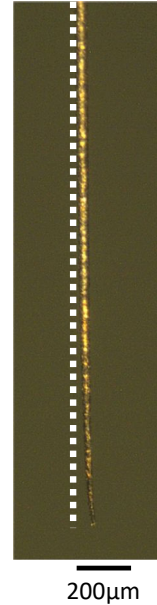


図8 W電極の軸成形

また、放電加工が軸材料内部へ与える残留応力について検討した。電極の残留応力の影響を確認するため、W電極を使用した。CCDカメラから取得した軸先端部の画像を図8に示す。初期の電極直径は500μmであった。この軸を走査放電加工法によって微細化したところ、直径約100μmまでは、真直ぐな成形軸を得ることができた。しかし、直径約70μmより細くなると、軸先端が徐々に曲がってしまうことが確認された。軸先端が曲がってしまうと、短絡などが発生するため、微細化には適さない。このため、軸の微細化において、残留応力の影響しない材料を選定する必要がある。

・回転軸の共振現象の影響

ここでは、軸の共振現象が微細化限界に及ぼす影響について検討した。軸を回転させた場合には、必ずある回転数で共振現象が観察される。共振現象は、加工の継続が難しくなり、危険速度で軸は根元で折損する。特に仕上げ条件における極間距離は小さくなるため、容易に短絡してしまう。

軸の直径は走査放電加工法によって徐々に細くなっていく。軸の一次固有振動数は式で表される。

$$f = \frac{1.875^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} = \frac{1.875^2}{2\pi} \frac{1}{l^2} \frac{d}{4} c \dots\dots$$

(I=断面二次モーメント, l=軸の長さ, d=軸直径, c=音速)

式から、材料(WC-Co)の音速を5000 m/sとし、軸の長さに対する軸直径と回転数の関係を図9に示す。軸の回転数を4000 rpmとし、軸の長さlを5 mmとした場合、理論上約2.5 μmで共振する。軸は共振点に至る前に振れまわりが起こるため、実際の加工における軸直径の限界は共振を示す直径よりもさらに大きい。このことから、より微細な軸成形を可能にするためには、回転数を下げるか、成形軸長さを短くする必要がある。

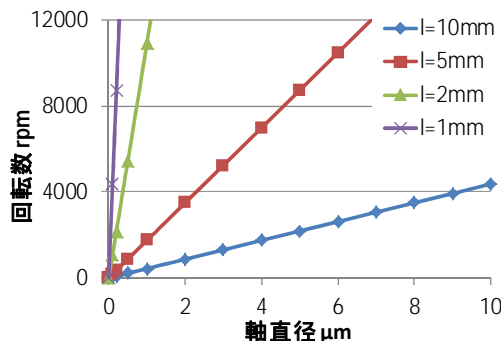


図9 軸直径における限界回転数

(2) 極間の各雰囲気軸成形におよぼす影響を解明

側面ギャップ観察装置を用い、放電加工時の極間を観察した。側面ギャップを観察した結果、気泡は、気泡の合一により膨張しながら動き、加工屑をより外側に押し出すことが確認された。



また、加工屑は気泡の境界に多く存在することが分かった。気泡上部において、気泡が加工穴から排出されるのと同時に加工屑が排出される。このことから、加工屑の排出に気泡の排出が大きな役割を担っているものと考えられる。深穴加工 (L/D 5) において側面ギャップを観察した結果、ハイスピードマイクロスコップで観察可能な時間 20 s 内において気泡排出は確認されなかった。アスペクト比が大きい深穴放電加工は、側面ギャップに気泡が滞留してしまい、加工が進行しないものと考えられる。

そこで、側面ギャップの加工液攪拌効果を狙った電極（マドラー型）を提案した。マドラー型電極は、電極の先端直径を維持した状態で、他の領域を細くしている。細くした領域は楕円形状であり、加工液を効果的に攪拌させる。図 10 にマドラー型電極を用いた側面ギャップの様子を示す。側面ギャップ内の気泡は大きく合一されながら排出されている。また、気泡の排出に伴い加工屑が穴外部まで押し上げられていることが確認された。本手法によって、加工屑および気泡が効果的に排出されることが分かった。

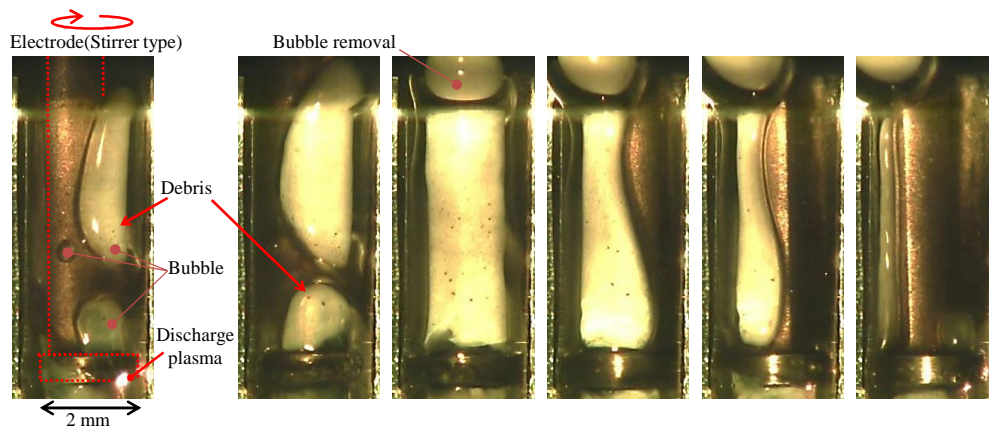


図10 側面ギャップの気泡および加工屑観察

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 Atsutoshi HIRAO, Hiromitsu GOTOH, Takayuki TANI	4. 巻 95
2. 論文標題 Micro-pin Forming under Consideration of Vibrational Frequency	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Procedia CIRP	6. 最初と最後の頁 560-565
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.procir.2020.03.133	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 Atsutoshi HIRAO, Hiromitsu GOTOH, Takayuki TANI, Naotake Mohri	4. 巻 24
2. 論文標題 Relationship between electrode diameter and wear ratio in scanning electrical discharge machining	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Electrical Machining	6. 最初と最後の頁 7-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2526/ijem.24.7	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32件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 後藤啓光, 明松佳昭, 谷貴幸, 平尾篤利, 毛利尚武
2. 発表標題 CFRPクロスプライ積層板に対する研削援用放電加工の試み
3. 学会等名 2021年度電気加工学会全国大会全国大会講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平尾篤利, 後藤啓光, 谷貴幸
2. 発表標題 単発放電加工における材料除去現象観察～アーク柱および材料除去の同期観察～
3. 学会等名 2021年度電気加工学会全国大会全国大会講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辻田容希, 谷貴幸, 後藤啓光, 平尾篤利, 毛利尚武
2. 発表標題 放電加工における放電痕形成過程およびカーボン付着の関係
3. 学会等名 2021年度電気加工学会全国大会全国大会講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林昂生, 平尾篤利, 谷貴幸
2. 発表標題 放電加工における工具振幅が加工特性におよぼす影響
3. 学会等名 2021年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中龍太郎, 平尾篤利, 谷貴幸
2. 発表標題 深穴放電加工における工具電極形状の検討
3. 学会等名 2021年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 後藤恭兵, 平尾篤利, 谷貴幸
2. 発表標題 単発放電加工における重畳パルスが加工におよぼす影響
3. 学会等名 2021年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林昂生, 平尾篤利
2. 発表標題 形彫電加工機の放電加工特性
3. 学会等名 日本産業技術教育学会 第32回北陸支部大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 後藤恭兵, 平尾篤利
2. 発表標題 単発放電加工の観察システムの構築
3. 学会等名 日本産業技術教育学会 第32回北陸支部大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中龍太郎, 平尾篤利
2. 発表標題 自作の深穴放電加工機の開発
3. 学会等名 日本産業技術教育学会 第32回北陸支部大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsutoshi HIRAO, Hiromitsu GOTOH, Takayuki TANI
2. 発表標題 Micro-pin Forming under Consideration of Vibrational Frequency
3. 学会等名 Proceedings of the 20th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年



1. 発表者名 後藤啓光, 明松圭昭, 谷貴幸, 平尾篤利, 毛利尚武
2. 発表標題 超音波振動を付与した針状工具を用いた熱可塑性CFRPに対する穿孔加工
3. 学会等名 電気加工技術
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 平尾篤利, 後藤啓光, 谷貴幸
2. 発表標題 放電加工における加工穴側面の気泡挙動
3. 学会等名 電気加工技術
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 今井皓斗, 平尾篤利
2. 発表標題 放電加工における気泡挙動の直接観察
3. 学会等名 日本産業技術教育学会 第31回北陸支部大会学術講演会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 鈴見泰河, 平尾篤利
2. 発表標題 磁気継手を用いた切削加工機の開発
3. 学会等名 日本産業技術教育学会 第31回北陸支部大会学術講演会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 今井皓斗, 平尾篤利, 谷貴幸
2. 発表標題 超音波振動を援用した深穴放電加工
3. 学会等名 2020年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 鈴見泰河, 平尾篤利
2. 発表標題 非接触動力伝達機構を用いた工具寿命の自動判別
3. 学会等名 2020年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 平尾篤利, 長谷川拓海, 後藤啓光, 谷貴幸
2. 発表標題 工具電極の形状が深穴放電加工におよぼす影響
3. 学会等名 2020年度電気加工学会全国大会全国大会講演論文集
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 後藤啓光, 明松圭昭, 谷貴幸, 平尾篤利, 毛利尚武
2. 発表標題 CFRPに対するコンデンサ放電加工の試み
3. 学会等名 2019年度電気加工学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平尾篤利, 宮阪優希, 後藤啓光, 谷貴幸
2. 発表標題 深穴放電加工における超音波振動付与効果の考察
3. 学会等名 2019年度電気加工学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 土屋京輔, 平尾篤利
2. 発表標題 微小径エンドミル工具を用いた技術科教育
3. 学会等名 日本産業技術教育学会 第30回北陸支部大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 千葉匠貴, 平尾篤利
2. 発表標題 技術教育を意識した加工現象の直接観察
3. 学会等名 日本産業技術教育学会 第30回北陸支部大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 明田川哲史, 平尾篤利
2. 発表標題 添加剤付与効果の技術的観察
3. 学会等名 日本産業技術教育学会 第30回北陸支部大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平尾篤利, 鈴木正樹
2. 発表標題 防災教育を通じた技術科科目における役割
3. 学会等名 日本産業技術教育学会 第30回北陸支部大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮阪優希, 平尾篤利
2. 発表標題 超音波振動の応用技術に関する研究
3. 学会等名 日本産業技術教育学会 第30回北陸支部大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長谷川拓海, 平尾篤利
2. 発表標題 微小径穴加工への応用技術の研究
3. 学会等名 日本産業技術教育学会 第30回北陸支部大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 土屋京輔, 谷貴幸, 平尾篤利
2. 発表標題 非接触伝達機構を用いた微小径エンドミル工具の折損回避の検討
3. 学会等名 2019年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 明田川哲史, 谷貴幸, 平尾篤利
2. 発表標題 化学機械的研磨におけるBTAのおよぼす影響
3. 学会等名 2019年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮阪優希, 谷貴幸, 平尾篤利
2. 発表標題 超音波振動付与放電加工における気泡挙動の直接観察について
3. 学会等名 2019年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 千葉匠貴, 谷貴幸, 平尾篤利
2. 発表標題 単発放電加工における加工現象の直接観察
3. 学会等名 2019年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長谷川拓海, 谷貴幸, 平尾篤利
2. 発表標題 燃料噴射ノズル穴加工用の工具電極成形法に関する研究
3. 学会等名 2019年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 後藤啓光, 明松圭昭, 谷貴幸, 平尾篤利, 毛利尚武
2. 発表標題 熱可塑性CFRPの加工に関する研究-超音波孔加工における部材強度低下-
3. 学会等名 第13回生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷貴幸, 後藤啓光, 平尾篤利, 毛利尚武
2. 発表標題 気中単発放電加工による材料除去過程の観察-材料の違いが除去過程に及ぼす影響-
3. 学会等名 第13回生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2019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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関