

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01346

研究課題名(和文)ワイヤ変位センサを援用した高精度ワイヤ放電加工シミュレーションの研究

研究課題名(英文) Study on High Precision Wire EDM Simulation using Wire Displacement Measuring Sensor

研究代表者

國枝 正典(Kunieda, Masanori)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：90178012

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：ワイヤ放電加工では、加工中に放電反力、静電力、電磁力、流体抵抗などの力がワイヤ電極に作用し、ワイヤ電極が振動したりたわんだりして加工精度に影響を及ぼす。そこで、ワイヤ電極の振動やたわみを計算し、加工形状を予測できるシミュレーションを開発した。具体的には、光学式センサを用いてワイヤ変位を測定し、計算されたワイヤ変位と比較することによって、放電反力や流体抵抗などの未知のパラメータを同定した。また、これらのパラメータが、切込量や工作物板厚の変化によって加工中に変動することを見出し、パラメータを随時更新することにより、板厚が変動する工作物の切断加工のシミュレーション精度が向上することを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ワイヤ放電加工は金型製作や、航空機、医療部品などの高精度加工に広く使用され、その加工精度は±1ミクロンの水準に達する。ただし、ワイヤ電極は直径が0.2mm以下の黄銅ワイヤなので、加工液を噴流するだけで数十ミクロンの振幅で振動する。しかも、放電による気泡の爆発的な膨張や、静電力、電磁力などの作用により、ワイヤは大きくたわみ、かつ振動する。従って、高精度加工の達成には、経験に基づく加工条件設定に頼らざるを得ない状況である。よって、計算したワイヤ挙動から加工形状を予測するシミュレーションを開発できれば、従来は経験と試し加工の繰返しに頼っていた条件設定を自動化し、さらなる加工精度の向上が可能となる。

研究成果の概要(英文)：During wire electrical discharge machining (WEDM), various forces like discharge reaction force, electrostatic force, electromagnetic force, and drag force due to fluid flow cause vibration and deflection of the wire electrode, exerting a large impact on machining accuracy. Therefore, a WEDM simulation was developed to calculate the behaviors of the wire electrode to obtain the workpiece shape. Parameters which are difficult to measure directly, such as the discharge reaction force and drag force, were obtained from the inverse problem method so that the vibration and deflection of the wire electrode measured using an optical sensor coincided with the calculated ones. Since these parameters may change during machining depending on the cutting depth and workpiece thickness, the parameters should be changed adaptively based on the wire displacement measurement. This method was applied to the machining of a stepped workpiece and the accuracy of the simulation was evaluated.

研究分野：放電加工、電解加工などの電氣的加工法の研究

キーワード：ワイヤ放電加工 シミュレーション ワイヤ変位センサ 加工精度 加工反力 ワイヤ振動 イン
プロセス測定

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

ワイヤ放電加工は金型製作や、航空機、医療部品などの高精度加工に広く使用され、その加工精度は±1ミクロンの水準に達する。ただし、ワイヤ電極は直径が0.2mm以下の黄銅ワイヤなので、加工液を噴流するだけで数十ミクロンの振幅で振動する。しかも、放電による気泡の爆発的な膨張や、静電力、電磁力などの作用により、ワイヤは大きくたわみ、かつ振動する。従って、高精度加工の達成には、経験に基づく加工条件設定に頼らざるを得ない状況である。よって、計算したワイヤ挙動から加工形状を予測するシミュレーションを開発できれば、従来は経験と試し加工の繰返しに頼っていた条件設定を自動化し、さらなる加工精度の向上が可能となる。

そこで、筆者らは図1に示すワイヤ放電加工のシミュレーションを考案した¹⁾。放電位置を探索しながら放電ごとにルーチンを繰り返す。ワイヤ電極のたわみや振動を計算し、ギャップ長が短い箇所に放電を生じさせ、放電点で工作物を除去する。同時に、放電遅れ時間中は静電力を印加し、放電が生じた時点で放電点に放電反力を作用させる。そして、流体から受ける流体抵抗を考慮してワイヤ振動を計算する。また、放電遅れ時間に基づきワイヤ電極の工作物に対する相対位置を変化させ、加工送りを行う。以上のルーチンを加工軌跡に沿って繰り返す。

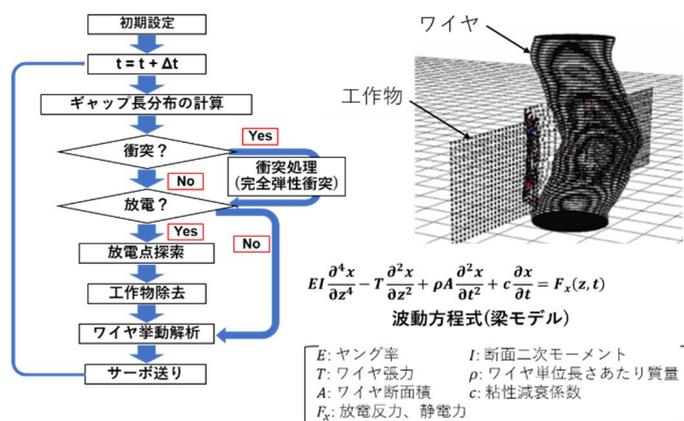


図1 ワイヤ放電加工のシミュレーション方法

ワイヤの波動方程式を解くには、加工反力、流体の粘性力の計算に必要な粘性減衰係数、静電力の計算に必要な加工液の誘電率が必要だが、多くの気泡が存在するギャップ中で運動するワイヤに関して、それらのパラメータの値を知ることは困難である。そこで、シミュレーションで求めた工作物形状と、実際の加工形状とを比較して、誤差が最小になるようにパラメータを探索した。この逆問題法から求めたパラメータを使えば、比較的正確なシミュレーションが可能である。しかし、ファーストカット(荒加工)のように、ワイヤが工作物に切り込んでいくような場合、切断溝のワイヤ挙動に対する拘束が強くなり、パラメータが変化していく可能性がある。また、工作物によっては、板厚が場所に異なる場合があり、板厚が変動するとパラメータも更新する必要がある。そのような場合は、ワイヤ挙動を光学式センサで測定し、シミュレーションで得られたワイヤ変位と比較すれば、パラメータ更新可能な高精度シミュレーションが行える。

2. 研究の目的

自作の光学式センサ²⁾で測定されたワイヤ変位を用いて逆問題解法によりパラメータ同定を行い、切込量や工作物板厚の変化に伴うパラメータの変化を取得する。こうして求めたパラメータを用いて、加工軌跡に沿ってパラメータの値を更新することにより、ワイヤ放電加工シミュレーションの精度を向上させることを目的とする。

ワイヤ放電加工では板厚の変化する段差形状の工作物を加工した際、板厚の変化に応じてカーブ幅(切断幅)が変化するため加工表面に筋が入ってしまい、所望の加工面の形状精度が得られないという問題が報告されている。澤田ら³⁾はこのような段差のある工作物を加工する場合のシミュレーション精度を評価したが、そのシミュレーションでは加工中に変化すると考えられているパラメータを一定と扱っていた。そこで、本研究では、工作物の板厚や加工進度に応じてパラメータ更新を行い、段差形状の工作物のファーストカットシミュレーションを行った。そして、実加工による加工溝形状をシミュレーションによる計算結果と比較することでシミュレーション精度を評価した。

3. 研究の方法

板厚20mmと60mmの段差工作物(SKD11)を加工対象とした。まず、表1に示す加工条件で、図2に示すように工作物に垂直に切り込む加工を行い、その際のワイヤ変位を光学式センサ²⁾によって測定した。工作物は板厚が20mmと60mmの2種類、別々に加工した。また、図3に示す

ように、工作物端面とワイヤガイド位置が一致した時を位置 $0\mu\text{m}$ とし、 $-50\mu\text{m}$ から $200\mu\text{m}$ まで $50\mu\text{m}$ ごとの位置でワイヤ変位を測定した。加工を開始し、それぞれの位置に達した直後の 100ms の光学式センサ取り付け位置でのワイヤ変位測定データに対し、X座標とY座標の平均位置および標準偏差を求めた。平均位置はワイヤのたわみ量、標準偏差はワイヤの振動の量を表す。

表 1 加工条件

放電持続時間 ()	$0.3\mu\text{s}$, $0.2\mu\text{s}$
放電休止時間 ()	$7.5\mu\text{s}$, $8.0\mu\text{s}$
サーボ電圧 / 開放電圧	35V / 80V
ワイヤ	0.2mm , 黄銅
ワイヤ張力	12N
噴流量	15L/min
ワイヤ巻き取り速度	13m/min
最大送り速度	6.5mm/min

：放電遅れ時間が $1.8\mu\text{s}$ 以上の時， ：放電遅れ時間が $1.8\mu\text{s}$ 未満の時

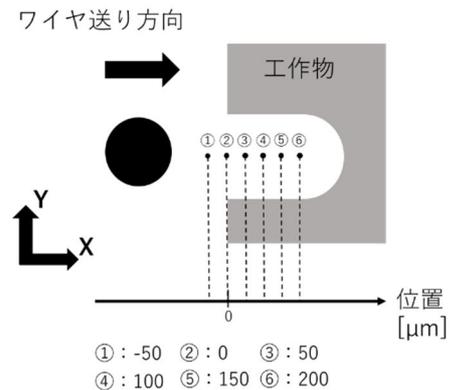
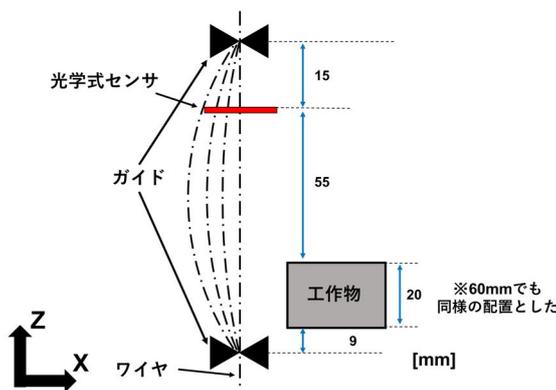


図 2 工作物の配置および光学式センサ設置位置

図 3 ワイヤ変位測定時のワイヤ位置

そして、この測定結果とシミュレーション上のセンサ位置でのワイヤ変位の計算結果が等しくなるように比誘電率、放電反力、粘性減衰係数、の 3 つのパラメータを同定した。具体的には以下の式のように誤差を定義し、誤差が最小となるような(比誘電率、放電反力、粘性減衰係数)の組をパラメータ探索法⁵⁾により求めた。

(センサ上の X 平均位置, X 標準偏差, Y 標準偏差) = (T_1, T_2, T_3)

(シミュレーション上の X 平均位置, X 標準偏差, Y 標準偏差) = (S_1, S_2, S_3)

$$\text{誤差} = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 \left(\frac{S_k - T_k}{T_k} \right)^2}$$

また、シミュレーションでの放電一回当たりの工作物除去量に関しては、放電回数と除去体積の関係調べる加工実験を行うことで事前に求めておいた。

4. 研究成果

4.1 パラメータ同定

板厚 20mm の工作物でのパラメータ同定結果を表 2 に、板厚 60mm でのパラメータ同定結果を表 3 に示す。板厚に関わらず、切込みが大きいほど放電反力は大きく同定される傾向にあった。また、板厚が大きいほど、放電反力は小さく、粘性減衰係数は大きく同定された。

表 2 板厚 20mm の工作物でのパラメータ同定結果

位置 [μm]	比誘電率	放電一回の放電反力の力積 [N · μs]	粘性減衰係数 [N · s / m]
-50	148	1.08	0.68

0	223	1.40	0.50
50	243	1.42	0.45
100	265	1.36	0.40
150	330	1.44	0.50
200	357	1.58	0.38

表3 板厚 60mm の工作物でのパラメータ同定結果

位置 [μm]	比誘電率	放電一回の放電反力の力積 [$\text{N} \cdot \mu\text{s}$]	粘性減衰係数 [$\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}$]
-50	205	0.74	0.83
0	245	1.04	0.75
50	270	1.18	0.85
100	305	1.20	1.03
150	320	1.28	0.85
200	340	1.28	1.14

4.2 加工シミュレーション結果

図4に示すような板厚 20mm と 60mm の段差を持つ工作物の形状モデルをシミュレーション上に用意し、表1と同様の条件でファーストカットするシミュレーションを行った。今回はパラメータ更新を行う場合とパラメータ更新を行わない場合の2種類でシミュレーションを行った。この場合、各パラメータは表2、表3をもとにワイヤの工作物への切り込み量によって連続的に変化させた。この場合、各パラメータは表2、表3のデータの平均値を常に用い、変化させなかった。また、シミュレーション上での工作物の長さは500 μm であり、後節で述べる実際に加工した工作物とは長さが異なる。加工は板厚 20mm 側から 60mm 側への方で行った。図4に示すような工作物の高さ 19mm での水平断面のシミュレーション結果について、この場合を図5に、この場合を図6に示す。

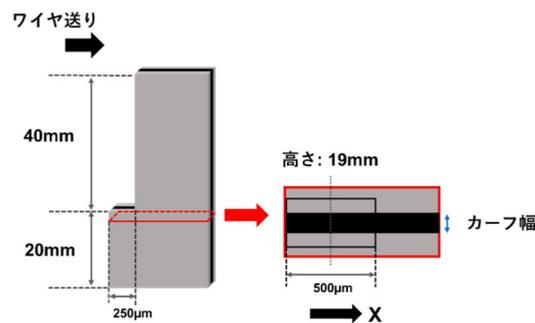


図4 シミュレーションした工作物形状と注目した断面位置

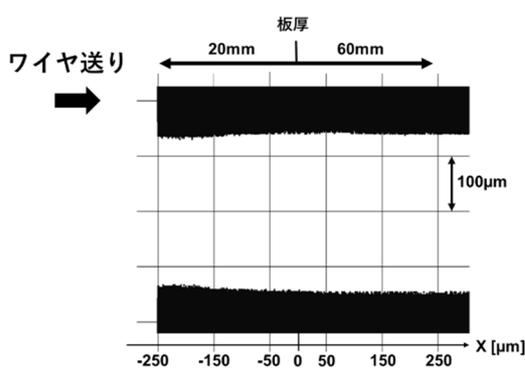


図5 パラメータ更新を行う場合

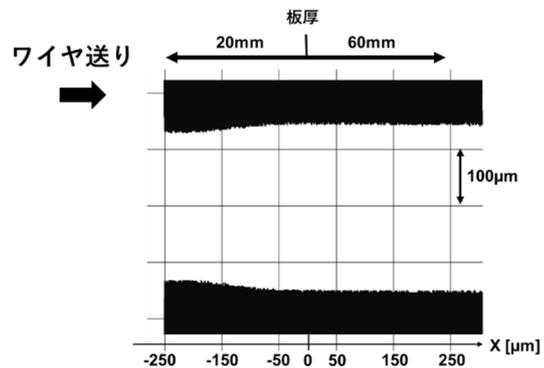


図6 パラメータ更新を行わない場合

図5、図6ともに、 $X = 0\mu\text{m}$ を境に左側が板厚 20mm、右側が板厚 60mm の部分となっている。加工溝を見ると、 $X = -150\mu\text{m}$ 付近からカーフ幅が変化し、板厚 60mm 側で広がる傾向となった。これは板厚変化により放電点分布が変化し、ワイヤ振動が変化したことが原因と考えられる。

4.3 実際の加工結果

シミュレーションの精度を調べるため、表1と同様の条件で実際に SKD11 の段差形状の工作物を加工した。そして、その水平面上の断面形状を測定しシミュレーション結果と比較した。図7に工作物形状と測定した断面を示す。図7のように高さ 19mm の断面における板厚が変化する位置の前後 $\pm 250\mu\text{m}$ の範囲の加工表面を、形状測定機を用いて形状測定した。その結果をもとにワイヤによる切断溝を再現した結果を図8に示す。また、図9に高さ 19mm の断面のカーフ幅について、シミュレーション結果と実際の加工結果を合わせて示す。

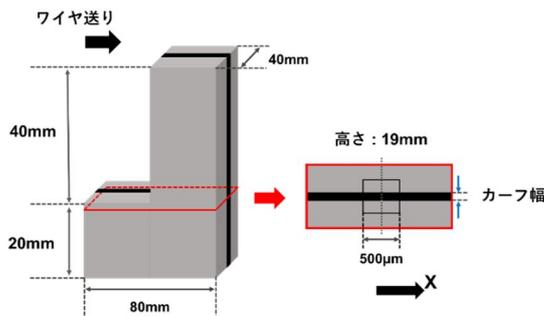


図7 実加工した工作物形状

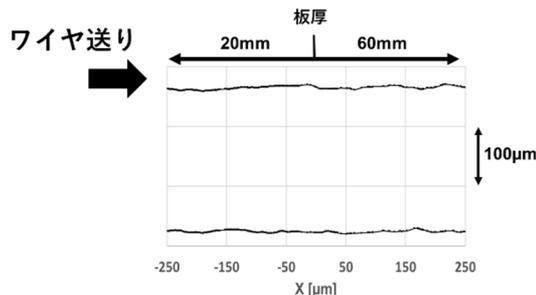


図8 実加工の高さ 19mm での水平断面

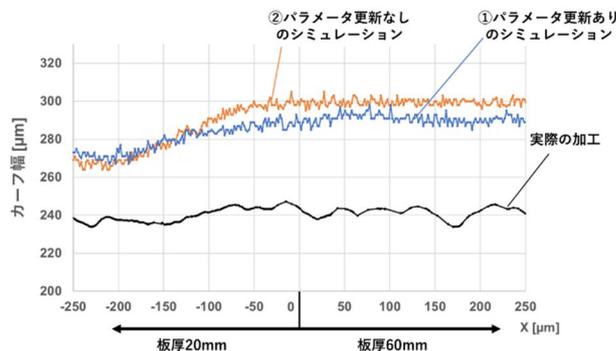


図9 高さ 19mm での加工溝のカーフ幅変化

図9に示すように、実際の加工はカーフ幅が $240\mu\text{m}$ 程度であるのに対し、シミュレーションでは $260\mu\text{m}$ 以上となった。また、実際の加工ではカーフ幅が $X = -150\mu\text{m}$ 付近から $10\mu\text{m}$ 程度増加するが、シミュレーションではそれよりも大きいカーフ幅の増大となった。パラメータ更新ありの場合となしの場合で比較すると、パラメータ更新ありの場合の方がカーフ幅の変化量が小さい結果となった。カーフ幅の変化量が実際の加工に近いという観点では、パラメータ更新ありの場合の方が実際の加工に近い変化をしていると考えられる。これはパラメータ更新を行ったことにより実際のワイヤ挙動に近い振動がシミュレーションでも再現できたからだと考えられる。ただし、シミュレーションでは、カーフ幅が総じて実際の加工より大きく計算されたということについては課題が残った。これは工作物とワイヤの衝突の際、完全弾性衝突として処理していることと流体によるスクイズ効果の影響が考えられていないことによりワイヤ振動が大きく計算されている可能性があることや、計算に使用しているギャップと放電遅れ時間の関係式が実際と異なっていることなどが考えられる。この課題を解決し、カーフ幅を実際に合わせていくことが求められる。

- (1) F. Han, M. Kunieda, T. Sendai, Y. Imai, High Precision Simulation of WEDM Using Parametric Programming, Annals of the CIRP, 51, 1, (2002) 165-168.
- (2) 西川正昭, 国枝正典: ワイヤ電極挙動のインプロセス測定によるワイヤ放電加工面形状の予測, 精密工学会誌, (2009), 75, 9, 1078-1082.
- (3) 澤田智寛, 国枝正典, 松浦紘平, 埴智仁: 段差のある工作物のワイヤ放電加工シミュレーション, 電気加工学会講演論文集, (2020), 29-32.
- (4) Kazuki Shibata, Masanori Kunieda, In-Process Simulation of Wire Electrode Displacement in WEDM using Optical Sensor, J. JSPE, 85, 10 (2019) 879-884
- (5) 機械工学辞典, 一般社団法人日本機械学会ほか.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kazuki Shibata, Masanori Kunieda	4. 巻 85, 10
2. 論文標題 In-Process Simulation of Wire Electrode Displacement in WEDM using Optical Sensor	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. JSPE	6. 最初と最後の頁 879-884
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2493/jjspe.85.879	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 国枝正典	4. 巻 53, 133
2. 論文標題 ワイヤ放電加工現象の可視化とシミュレーション	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気加工学会誌	6. 最初と最後の頁 87-93
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 無
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 国枝正典	4. 巻 56, 141
2. 論文標題 放電加工プロセスのシミュレーション	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気加工学会誌	6. 最初と最後の頁 2-9
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 無
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 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 柴田一貴、国枝正典
2. 発表標題 ワイヤ変位センサを用いたワイヤ放電加工のインプロセスシミュレーション
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 柴田一貴、国枝正典、山田邦治
2. 発表標題 光学式センサを用いたワイヤ放電加工のインプロセスシミュレーション
3. 学会等名 電気加工学会全国大会(2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柴田一貴、国枝正典
2. 発表標題 光学式センサを用いたワイヤ放電加工におけるファーストカット時のワイヤ挙動測定
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 Kazuki Shibata, Masanori Kunieda
2. 発表標題 In-process simulation of wire electrode displacement in WEDM using optical sensor
3. 学会等名 The 17th International Conference on Precision Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柴田一貴、国枝正典
2. 発表標題 光学式センサを用いたワイヤ放電加工におけるワイヤ電極挙動測定
3. 学会等名 電気加工学会全国大会(2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 青山高至、柴田一貴、国枝正典
2. 発表標題 光学式センサを用いたワイヤ放電加工におけるセカンドカット時のワイヤ電極挙動測定
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澤田智寛、国枝正典、松浦紘平、埴 智仁
2. 発表標題 段差のある工作物のワイヤ放電加工シミュレーション
3. 学会等名 電気加工学会全国大会(2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤田智寛、国枝正典、松浦紘平、埴 智仁
2. 発表標題 ワイヤ放電加工における工作物への接近時のワイヤ電極挙動について
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Wenting Gu, Tomohiro Sawada, Masanori Kunieda, Wansheng Zhao
2. 発表標題 Measurement of Discharge Reaction Force in Wire Electrical Discharge Machining using Hopkinson Bar Method
3. 学会等名 LEM21 (2021) in Kitakyushu (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 澤田智寛、国枝正典、松浦紘平、埴 智仁
2. 発表標題 加工中のパラメータ更新によるワイヤ放電加工シミュレーション精度の向上
3. 学会等名 電気加工学会全国大会(2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 澤田智寛、国枝正典、松浦紘平、埴 智仁
2. 発表標題 ワイヤ放電加工における流体力がカーフ幅に及ぼす影響について
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomohiro Sawada, Masanori Kunieda, Kouhei Matsuura, Tomohito Hanawa
2. 発表標題 Development of WEDM Simulation with Parameters Adaptively Changed using Wire Electrode Displacement Sensor
3. 学会等名 ISEM XXI in Zurich (国際学会)
4. 発表年 2022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
研究協力者	柴田 一貴 (Shibata Kazuki)	国立大学法人東京大学・大学院工学系研究科	修士課程

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	澤田 智寛 (Sawada Tomohiro)	国立大学法人東京大学・大学院工学系研究科	修士課程
研究協力者	松浦 紘平 (Matsuura kouhei)	株式会社ソディック	
研究協力者	埴 智仁 (Hanawa Tomohito)	株式会社ソディック	

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