

## 電極消耗予測を用いた形状創成放電加工による 金型加工の高精度化

研究報告者 吉川 浩一

### プロフィール



最終学歴 平成5年3月  
東京大学大学院 工学系研究科  
精密機械工学専攻 博士課程修了  
専門分野 生産工学  
学 位 博士(工学)  
所属団体 九州工業大学 大学院工学研究院  
機械知能工学研究系  
役 職 名 准教授

### 今後の抱負

本研究では、工具電極の消耗形状を予測し、その消耗した電極形状を前提とした加工経路を用いることで加工精度の向上を目指した。曲面加工の例として、円筒面を創成する加工を行った結果、工具電極の消耗を考慮した加工経路を用いることによって、切込不足が解消できた。しかし、実験精度が不十分であり、電極消耗予測の基礎となる電極消耗率を支配する要因は明確にできなかった。今後は、本手法の有効性が確認できる範囲を明確にするために、電極消耗率の変動幅を実験的に明らかにしていくとともに、消耗率を決める因子の検討に取り組んでいきたい。

## はじめに

金型加工においてよく用いられる形彫り放電加工では、金型形状を反転した総形工具電極を用いる。したがって、加工する金型ごとに複数の電極を用意しなければならない。また、放電加工では、加工が進むにつれて工具電極も消耗することから<sup>1),2),3)</sup>、許容値以上に消耗した工具電極は交換しなければならない。さらに、工具電極の消耗量は部位によって異なるため、電極形状を再整形するためには、工具電極全体を加工しなければならない。そのため、粗加工用と中仕上げ加工用など、通常は複数の工具電極を準備する。

これに対して、本研究で対象としている形状創成放電加工とは、円柱など単純な形状の工具電極を用いる放電加工法であり、工具電極を加工形状にそって走査することにより任意の形状を加工できる加工法である<sup>4)</sup>。図1に形彫り放電加工と形状創成放電加工の概念図を示す。形状創成放電加工で用いる工具電極は、その形状が単純でよいことから：

- (1) ドリルやエンドミルのように工具電極を規格化することができるため、金型形状によらず同じ電極を使うことができる。
- (2) 複数の電極を準備することや消耗形状の把握が比較的容易である。
- (3) 再整形が簡単である。

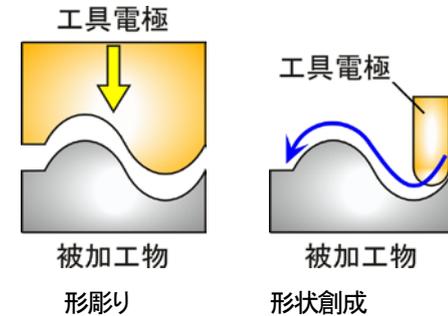


図1 形彫り放電加工と形状創成放電加工

などの利点を持つ。この結果、形彫り放電加工よりも工具電極を準備するコストの低減が期待できる。

本研究の目的は、工具電極の消耗に起因する加工誤差の排除による金型加工の高精度化である。本研究で採用する形状創成放電加工においても、工具電極の消耗は避けられない<sup>5),6)</sup>。したがって、電極消耗を考慮せずに加工経路を決めると、図2に示すように工具電極の消耗に起因する加工誤差が発生する。これに対し本研究では、工具電極の消耗を予測しながら加工経路を算出する。工具電極の消耗形状を予測することができれば、工具電極の消耗形状を考慮した加工経路を算出することができる<sup>7),8)</sup>。その結果、本手法を用いれば、図3に示すように電極消耗に起因する加工誤差を排除できるため、より高精度な金型加工が期待できる。

このように、本手法では工具電極の消耗率形状予測が重要である。また、工具電極の消耗形状は電極消耗率を用いて予測可能であることを仮定している。電極消耗率は式(1)に示すように、加工速

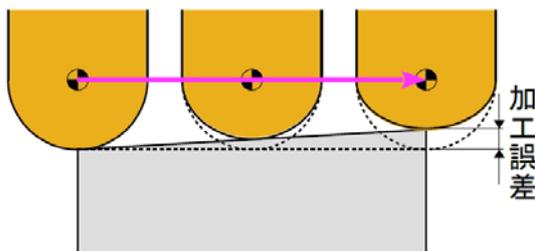


図2 電極消耗による加工

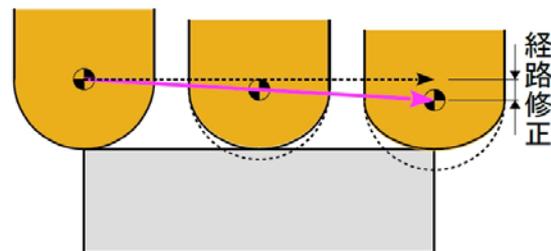


図3 電極消耗を考慮した加工経路

度（単位時間当たりに除去される工作物の体積）に対する電極消耗速度（単位時間当たりに除去される電極の消耗体積）の比、と定義する。本報告では、主に電極消耗率を高精度に測定する手法について述べる。電極消耗形状を高精度に予測するためには、電極消耗率の高精度な測定が必要になるからである。

$$(\text{電極消耗率}) = (\text{電極消耗速度}) / (\text{加工速度}) \quad \dots (1)$$

## 2. 電極消耗予測と電極消耗率の測定

### 2-1 電極消耗の予測

本研究では、加工中の電極消耗率は一定であることを前提にして、加工過程をシミュレーションしながら工具電極の消耗形状を求める。電極消耗率の定義式（式(1)）における「速度」は、「単位時間当たりに除去される体積」として定義されている。したがって、図4に示すように、電極消耗率は「電極消耗体積と工作物除去体積の比」とみなすことができる。このことから、工作物を除去する体積がわかれば、その除去体積と電極消耗率の積から、その加工過程に対応する電極消耗体積を求めることができる。

### 2-2 電極部位別消耗率の定義

図5に電極部位別消耗率の概念図を示す。本研究では、回転工具電極で加工することから、回転軸に垂直な平面で工具電極を微小厚さごとに分割し、円盤で近似する。本研究では、これを「円盤積層モデル」と呼ぶ。工具電極を加工時の位置に配置し、工具電極の分割面と同じ分割面で、工作物の除去領域も層状に分割する。これを「層状加工領域」とする。これらの層状の領域に対して、電極部位別消耗率を次のように定義する。添え字の*i*は、対応する層ごとに定義することを表わす。

$$(\text{電極部位別消耗率 } i) = (\text{円盤消耗体積 } i) / (\text{層状加工領域除去体積 } i) \quad \dots (2)$$

図4に示すように、本研究では電極消耗率を、電極消耗体積と工作物除去体積の比ととらえなおして測定している。式(1)に示した定義式に従えば、これらの体積は「加工前後の体積の差」を意味しており、例えば電極消耗体積は「加工前の工具電極体積と加工後の体積の差」で求めることができる。

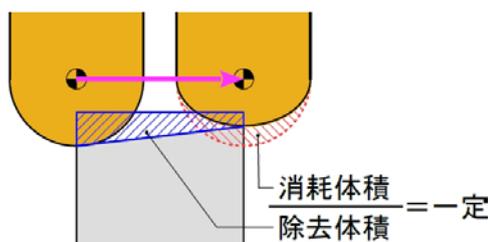


図4 電極消耗率の体積比による定義

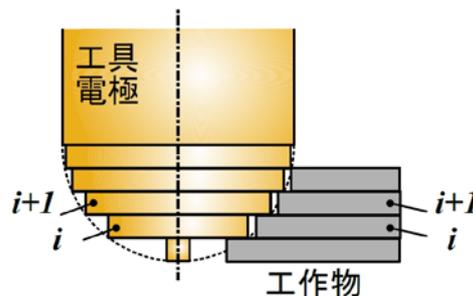


図5 電極部位別消耗率の概念図

このようにして求めた電極消耗率は、工具電極のどの部分を用いて加工しても同じ値の電極消耗率を適用することになる。この場合でも、消耗した工具電極形状の概略を予測することは可能である。しかし、実測値を詳細に分析すると、電極消耗体積と工作物除去体積の比は、工具電極の場所によって異なることがわかってきた。そこで、より高精度な消耗後の形状予測を実現するために、本研究では「電極部位別消耗率」を考える。

### 2-3 2次元変位センサによる表面形状の高密度測定

本報告では、非接触式2次元変位センサを用いた工具電極の表面形状の高密度測定手法を開発する。非接触式2次元変位センサは、1回の測定で測定直線上の変位を測定することができる光学式のセンサである。すなわち、1回の測定で1断面の輪郭線が得られる。本研究で用いるセンサの主要な仕様を表1に示す。放電加工機に工具電極を取り付けたまま加工機の主軸を移動し、工具電極表面上の測定部位を走査することにより、工具電極先端部の表面形状を測定する。図6に測定法の概念図を示す。

本センサは、センサヘッドからレーザー光を測定対象に照射し、その反射光を検出して照射点の位置を測定する。したがって、反射光を得にくい面の測定は困難である。例えば、図7に示すように、工具電極の下にセンサを配置し鉛直上向きにレーザー光を照射すると、電極の側面付近は測定できない。また電極の横にセンサを配置し水平方向にレーザー光を照射すると、電極先端部が測定できない。これらの問題を回避するために、本研究ではセンサヘッドを傾斜して設置し、約45°方向にレーザー光を照射する。センサヘッドの設置傾斜角は、主軸に真直度が保証されたテストバーを取り付け、この測定結果から正確に求める。

本手法に対し、従来は非接触式寸法測定器を用いて工具電極形状を計測していた。非接触式寸法測定器では、発光

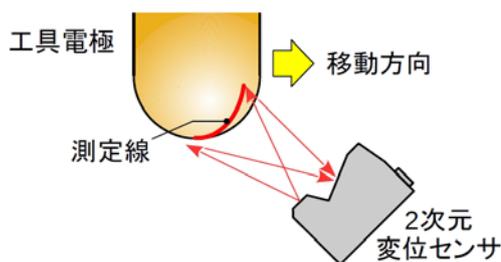


図6 電極表面形状の高精度測定法概念図

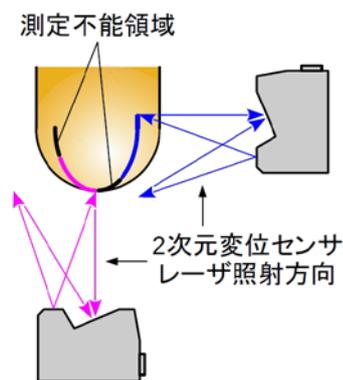


図7 測定方向の選択方法

表1 非接触式2次元変位センサの仕様

光源	青色半導体レーザー (波長 405nm)	スポット形状	21mm×45 μm
繰り返し精度		測定範囲	高さ: ±8mm, 幅: 15mm
高さ方向	0.4 μm	サンプリング周期	最速 16 μs (高速モード)
幅方向	5 μm		

部と受光部の間に測定対象を置き、発光部から平面状に照射したレーザー光線を、測定対象が遮った境界の位置を測定することにより、測定対象の寸法を非接触で得られる。図8に輪郭測定による電極形状測定法の概念図を示す。この方法では、レーザー光に対して垂直な方向の最大寸法が必ず得られる特徴がある。また、1回の測定では、工具電極輪郭線上の1点の位置が得られる。したがって、輪郭全体を測定するためには、工具電極を移動して測定しなければならない。このように、工具電極輪郭線の1断面測定に要する時間がある程度必要なため、工具電極形状は回転対称形状であることを仮定して、従来は1断面の輪郭線を回転して工具電極形状としている。

このような従来法に対し、本報告の手法では1回の測定に要する時間がごく短いため、短時間で数多くの断面について輪郭線を測定することができる。測定精度の設定にもよるが、前項で示した従来の測定法で1断面の輪郭線を測定する時間内に、400倍程度の測定点数について測定値を得ることが可能である<sup>9)</sup>。このように測定点数が多いことから、本手法の方が従来法よりも高密度な測定値を得られる。さらに、加工後の工作物形状もこの変位センサを用いて測定することにより、従来法よりも高密度な測定値を得ることができる。従来は、接触式変位センサを走査して加工後の工作物形状を測定しており、時間的な制約から走査間隔を小さくすることができなかった。

### 3. 電極部位別消耗率の実測

前節で述べた測定方法を用いて実際に工具電極形状を測定し、電極部位別消耗率を求める。

#### 3-1 実験方法

本研究では、電極部位別消耗率をあらかじめ実験で求めておくことを前提としている。そのために、傾斜面の等高線方向に直線経路で加工し、この加工結果から電極部位別消耗率を求める。実際の形状創成放電加工では曲面加工を想定しており、傾斜面を曲面の局所的な近似面とみなす。図9に加工実験装置の概観を示す。

本実験では、直径14mmの工具電極を使い、電極先端の半球形状部分のみで加工するように、工作物の傾斜角を $0^{\circ}$ ～ $55^{\circ}$ の範囲で変更し、工作物表面の法線方向の切込量を1mmとして、図9に示す方向に直線経路を加工する。加工条件の詳細を表2に示す。

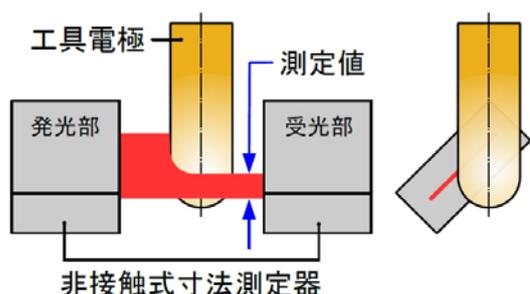


図8 輪郭測定による電極形状測定概念図



図9 加工実験装置の概観

表2 放電加工条件

工作物材種	SKD11	極性	逆極性
電極材種	C1020	電流ピーク値	48A
加工経路長	30mm	無負荷電圧	120V
切込量	1.0mm	パルス幅	150 $\mu$ sec
加工面傾斜角	0, 10, 15, 30, 55°	Duty Factor	60%

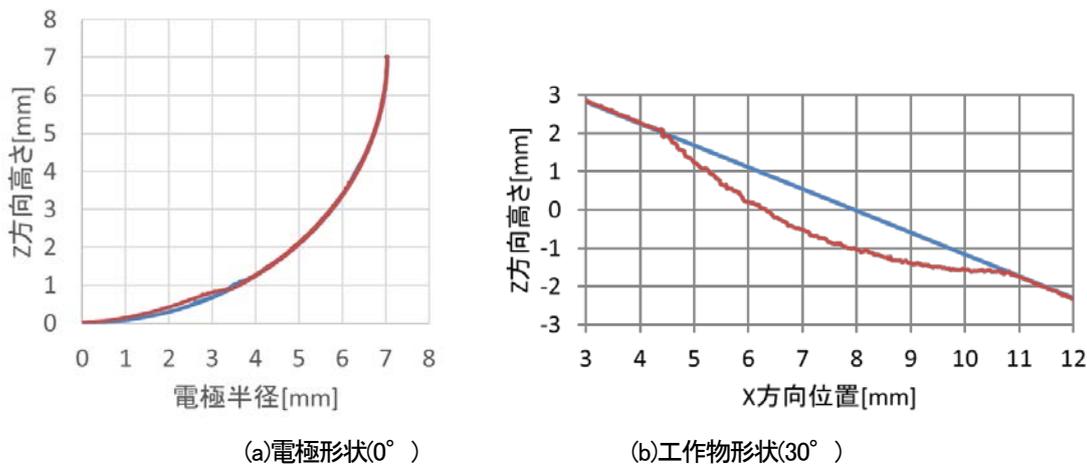
### 3-2 実測結果

図10に加工前後の工具電極を、図11に工具電極の回転軸を通る断面輪郭線の測定結果例と、工具送り方向に垂直な工作物断面輪郭線の例を示す。青の実線で加工前の形状を、赤の実線で加工後の形状をそれぞれ示す。電極が消耗していることと加工後の工作物形状がわかる。ただし、工具電極の断面輪郭線は、電極表面上の全測定点を電極回転軸回りに回転移動して求めている。

3次元的な配置のまま測定点を扱う場合、近傍3点の測定値と電極先端球の中心からなる三角錐の体積を積算することで、近似的に電極の体積を求めることができる。しかし、この算出方法では、本研究で採用している円盤積層モデルの各円盤体積は直接的には求めることができない。円盤の体積を求めるためには、さらに回転軸に垂直な平面で切断した立体の体積を求めなければならず、幾何的な計算が複雑になる。このため、本研究では体積を算出する前に回転軸を通る断面に全ての測定点を移



図10 加工前後の工具電極



(a)電極形状(0°)

(b)工作物形状(30°)

青:加工前形状, 赤:加工後形状

図11 電極と工作物の実測形状例

動した後に、各円盤の体積を求めている。

図12に、加工面の傾斜角ごとに求めた部位別電極消耗率を示す。本実験は同一条件で5回行い、5回の実験値から得られた平均値をプロットしている。エラーバーは5回の実験から得られた電極消耗率の最大と最小の範囲を表わす。グラフから明らかなように、加工に関与する範囲の境界部における電極消耗率の変動幅が極端に大きい結果となった。

この原因として、各測定値の位置合わせの誤差が考えられる。本手法では、図6に示す測定線の位置を一定間隔で移動しながら測定する。これらの測定線の相対的な位置関係は、工具電極に設けた段差部を基準にして合わせる。電極先端の半球部は消耗することから、条件によっては位置合わせに使うことができないからである。この段差部は加工には関与しないため、その位置は一定の精度で得られることを想定していたが、実際には100 $\mu$ m程度の変動があった。このような工具回転軸方向の偏差は、幾何的に電極先端付近の測定値に与える影響が大きい。また、傾斜面の上側の層状加工領域は、図5に示すように区分けすることから除去体積が小さい。その結果、電極側の消耗体積の変動が同じであっても、消耗率の変動は相対的に大きくなると考えられる。

#### 4. 電極消耗予測の効果検証

##### 4-1 工具電極の消耗予測と加工経路生成の手順

電極消耗率の実測結果のうち変動幅の少ない部分を採用し、これらの近似式を求めて部位別消耗率とする。この結果を用いて、工具電極の消耗予測と加工経路の生成は、次の(1)から(4)の各段階を繰り返して行う。

- (1) 工作物除去体積を算出する。
- (2) 工具電極の消耗体積を算出する。
- (3) 工具電極の消耗形状を算出する。
- (4) 消耗後の工具電極形状を用いて次の工具電極位置を算出する。

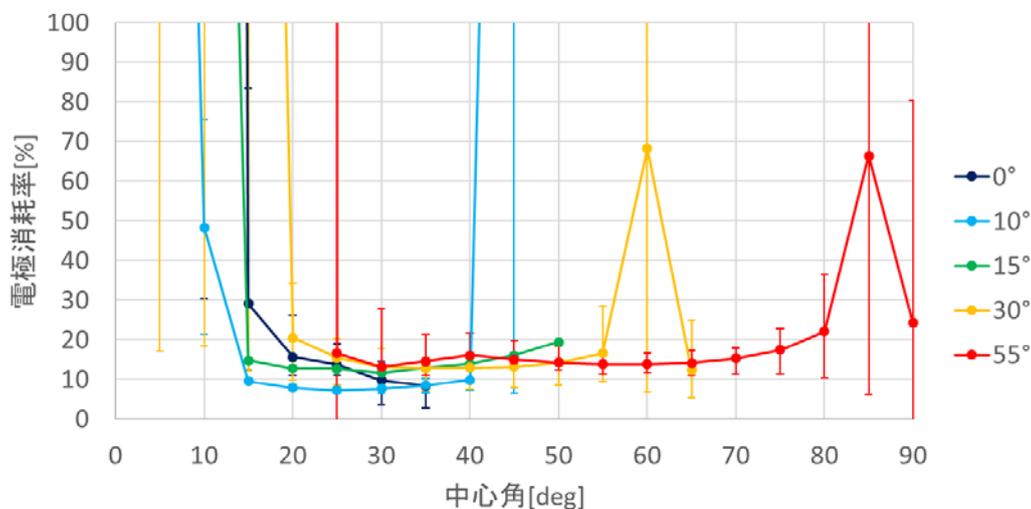


図12 部位別電極消耗率(傾斜角別)

## 4-2 検証実験と結果

本手法の有効性を検証するために、円筒面の創成を想定した円弧経路による溝加工を行う。本実験では、1回の加工で1経路のみ加工するため円筒面にはならない。しかし、十分小さな経路間隔での加工を繰り返せば円筒面を創成することができる。電気的な加工条件は表2に従い、加工経路のみ半径37mmの円筒面を創成する円弧経路に変更して加工する。

工作物形状の実測値を図13に示す。工具電極は図の左から右に進む。したがって、グラフの右端が加工終了点である。図から明らかなように、工具電極の消耗を考慮した経路で加工することにより、加工終了点における加工深さが浅くならず済んでいる。ただし、加工誤差自体は、消耗を無視した場合：最大229 $\mu\text{m}$ 削り残しであったのに対し、消耗を考慮した場合：最大397 $\mu\text{m}$ 切込過ぎであった。いずれも加工経路の原点は円筒中心軸上としており、この原点位置の設定誤差が原因であると考えられる。

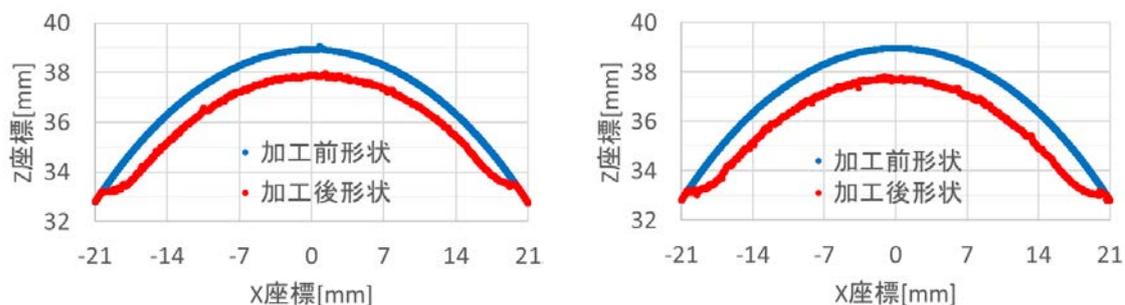
## 5. まとめ

本研究の目的は、工具電極の消耗を考慮した加工経路を用いることにより、消耗に起因する加工誤差を低減する方法の開発であり、特に本報告では、電極消耗率を高精度に測定する手法について示した。具体的には、非接触式2次元変位センサを用いて電極と工作物の表面形状を測定し、その測定値から電極部位別消耗率を算出する方法を開発した。さらに、この測定結果を用いて工具電極の消耗を予測し、さらに予測した電極消耗形状を考慮した加工経路を用いて加工を行った。

加工結果から、消耗を無視した場合は加工終了点において加工深さが明らかに浅くなるのに対し、本研究の方法を用いれば加工深さが維持されることが確認できた。ただし、最大加工誤差は、消耗無視：229 $\mu\text{m}$ 、消耗考慮：-397 $\mu\text{m}$ となり、本手法の方が大きくなった。加工経路の原点位置設定の誤差が原因であると考えられることから、電極消耗率の実測と合わせて、各実験の設定精度や繰り返し精度の向上が今後の課題である。

## 謝辞

本研究は、公益財団法人三井金型振興財団研究助成の補助を受けて行ったものであり、関係各位に謝意を表す。



(a)電極消耗を無視した場合

(b)電極消耗を考慮した場合

図13 工作物の断面形状実測値

## 参考文献

- 1) 国枝正典, 森正裕: 形彫り放電加工における形状創成過程の逆方向シミュレーション, 電気加工学会誌, Vol. 33, No. 72, pp. 9-19 (1999).
- 2) Segon Heo, Young Hun Jeong, Byung-Kwon Min, Sang Jo Lee: Virtual EDM simulator: Three-dimensional geometric simulation of micro-EDM milling processes, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 49, pp. 1029-1034 (2009).
- 3) Masanori Kunieda, Atsushi Kameyama: Study on decreasing tool wear in EDM due to arc spots sliding on electrodes, Precision Engineering, Vol. 34, pp. 546-553 (2010).
- 4) 横山貴一, 吉川浩一, 水垣善夫: 形状創成放電加工における電極消耗形状の高精度予測—電極部位ごとの周速度の電極消耗率に対する影響—, 電気加工学会全国大会(2012)講演論文集, pp. 41-42 (2012).
- 5) 松下栄俊, 横山貴一, 吉川浩一, 水垣善夫: 円筒電極側面放電加工における電極消耗の電極周速度依存性, 2102年度精密工学会秋季大会講演論文集, pp. 367-368 (2012).
- 6) 松下栄俊, 横山貴一, 永井裕大, 吉川浩一, 水垣善夫: 形状創成放電加工における電極消耗予測の高精度化—第4報 部位別電極消耗率の周速度依存性—, 2013年度精密工学会九州支部宮崎地方講演会講演論文集, pp. 87-88 (2013).
- 7) 永井裕大, 吉川浩一, 岡田一貴, 今村逸人, 水垣善夫: 形状創成放電加工における電極消耗予測に基づく加工経路の補正—基本アルゴリズムの検討—, 2014年度精密工学会九州支部鹿児島地方講演会講演論文集, pp. 93-94 (2014).
- 8) 知念秀作, 水垣善夫, 吉川浩一, 森直樹: 形状創成放電加工における電極消耗予測の高精度化—第5報 実験計画法による影響因子の分析—, 2015年度精密工学会九州支部飯塚地方講演会講演論文集, pp. 121-122 (2015).
- 9) 吉川浩一, 森直樹, 水垣善夫: 形状創成放電加工における電極消耗予測のための電極部位別消耗率の高精度測定, 2017年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, pp. 318-323 (2017).