

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03875

研究課題名(和文) 不燃性加工液掛け流しによる加工槽を不要にする高速・省エネくり抜き放電加工法の開発

研究課題名(英文) Development of high-speed, energy-saving scooping EDM method with pouring nonflammable machining fluid for aiming no processing tank

研究代表者

吉川 浩一 (Kikkawa, Koichi)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：90274547

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)：本研究の目的は、加工槽を不要にし、工具電極と工作物間に加工液として純水を掛け流す「高速・省エネくり抜き放電加工」の開発である。本研究では特に、くり抜き放電加工の高速化手段を検討し、以下の結果を得た。

(1)加工液の掛け流し速度の効果：掛け流し速度が増すと加工速度も上昇するが、次第に収束する。(2)くり抜き加工経路の効果：L字形電極先端を下に向け水平方向に送る経路を用いると、加工状態が最も安定する。(3)微粒子添加の効果：添加微粒子の粒径を小さくすると、正常放電回数が減少するにも関わらず加工速度は速くなり、粒径の大きな加工くずの割合が多くなる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究対象としている「くり抜き加工」は、現在良く用いられている加工形式と比較して、実際に除去する体積が圧倒的に少ない特徴を持つ。放電加工は、放電エネルギーを利用して工作物を溶融除去する加工法なので、除去体積が少なければ省エネ加工になる。また、加工液に水を使うため、火災の危険性が無く安全である。しかし、現状では加工速度が遅く、これが普及しない一因と思われる。本研究の成果を発展・応用することにより、くり抜き加工を高速にすることが期待できる。その結果、この加工法がより普及し、製造業の省エネルギー化に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop high-speed, energy-saving scooping EDM method with pouring nonflammable machining fluid for aiming no processing tank. In this study, in particular, three kinds of means to increase processing speed of scooping EDM are experimented and obtained the following results.

(1) Effect of flowing speed of machining fluid: As the flowing speed increases, the machining speed also increases, but it gradually converges. (2) Effect of machining path: The machining state is most stable when the tip of the L-shaped electrode is directed downward and fed in the horizontal direction. (3) Effect of adding fine particles: When the particle size of the added fine particles is reduced, the processing speed increases and the proportion of removed material with a large particle size increases even though the number of normal discharges decreases.

研究分野：生産工学

キーワード：くり抜き放電加工法 不燃性加工液 掛け流し

1. 研究開始当初の背景

形彫り放電加工は、工具電極の形状を工作物に転写する加工法であり、金型のような複雑な凹凸形状をもつ高硬度材料の加工に広く用いられている。この加工法では、工具電極の形状を転写することから、除去しなければならない領域はすべて加工くずになる。

これに対し、除去領域の輪郭部分のみを加工する方法として、ワイヤーフレーム電極による形状創成加工が提案されている。本研究では、この加工法を「くり抜き加工法」と呼ぶ。くり抜き加工法は、形彫り放電加工と比較して工作物の除去量が圧倒的に少ない利点がある。

しかし、実際の製品加工でこの加工法が採用された例は見当たらない。くり抜き加工法を用いても、形彫り放電加工と比較して加工時間が短縮されないことがその一因であると思われる。したがって、くり抜き加工法においては、加工速度の向上が最も重要な研究課題の一つであると言える。

2. 研究の目的

本研究の目的は、工具電極と工作物の間に純水加工液を掛け流すことによる、「新・高速・省エネくり抜き放電加工法」の開発である。図1に示すように、加工液をL字形電極にそって掛け流し、加工くずの排出を促進することにより、加工速度の向上を目指す。

詳細には、本手法には次のような特徴がある。

- (1)加工液を掛け流すことにより、工具電極と工作物間の加工くず排出が促進されることから、加工速度の向上が期待できる。

先行研究において、くり抜き加工法において、工具電極と工作物間の加工くず量が増すと加工速度が低下することがわかっている。

- (2)くり抜き加工法であることから、除去体積を格段に削減できる。その結果、除去能率が同じであれば、加工に必要なエネルギーも少なく済み、省エネルギー効果が期待できる。

- (3)工具電極と工作物間にのみ加工液を供給すればよいことから、循環して使用するのに必要な量だけの加工液があれば良く、省資源である。

従来の浸漬加工法では、循環に必要な加工液以外にも、加工槽を充分満たす加工液が必要となる。

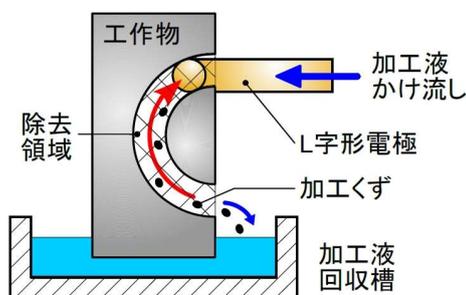


図1:くり抜き放電加工法

3. 研究の方法

(1)掛け流し速度の効果実測

加工速度に対する、加工液の掛け流し速度の効果を実験的に明らかにする。

本研究では、加工液を掛け流すことにより、図2に示すように加工液とともに加工くずが排出されると考える。ここで、図2の工作物上面付近で発生した加工くずは、工具電極と工作物間から流れ出るまで一定の時間を要し、その時間は加工液の落下速度に依存すると考えられる。また、加工液に十分な速度を与えれば、溶融した工作物が再付着することなく加工くずとなり、加工液とともに押し流されることが期待できる。

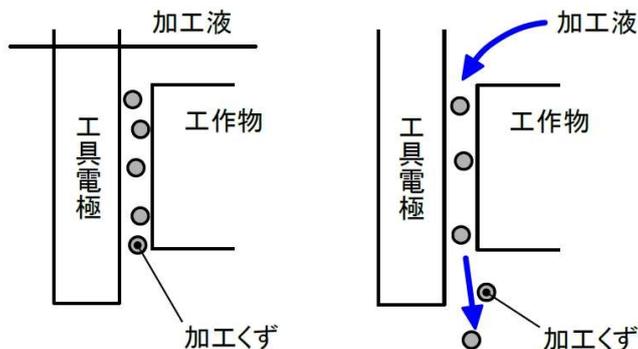
以上のことから、掛け流す加工液の速度を変更してくり抜き加工を行い、各加工液速度における加工速度を実測する。

(2)くり抜き加工経路の効果実測

加工経路の違いが加工速度に及ぼす影響を実験的に明らかにする。

本研究では、金型加工への適用を想定していることから、底付き凹形状(ポケット形状)の加工を前提とする。さらに、側面から水平方向にポケット形状ができるように加工する。上面から下向きにポケット形状ができるように加工すると、ポケット内に加工液がたまり、掛け流しの効果が得られないからである。

このような前提のもとで、単純な直方体領域を除去する場合でも、図3に示すような3種類の加工経路が考えられる。加工くずの排出効果は図3(a)が最も



(a)加工くずの滞留 (b)かけ流しによる排出
図2:加工液かけ流しの効果

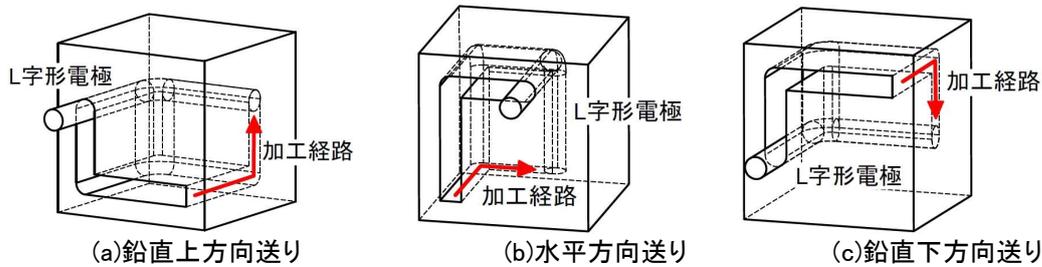


図3: 加工経路の種類

高いが、加工液の供給は図 3(c)が最も容易である。このように、加工経路によって利点・欠点異なることから、加工速度に及ぼす影響を実験的に明らかにする。

(3)微粒子添加の効果実測

微粒子添加加工液を用いた加工における微粒子直径が加工速度に及ぼす影響を実験的に明らかにする。

彫り放電加工では、加工液に微粒子を混入すると加工速度が上昇するとの報告がある[1]。しかし、くり抜き放電加工における微粒子添加加工液の効果は未確認である。そこで、添加微粒子の粒子直径を変更してくり抜き加工を行い、各条件における加工速度を実測・比較する。

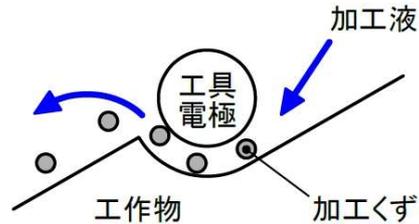


図4: かけ流し速度の効果検証実験概念図

4. 研究成果

(1)掛け流し速度の効果実測

掛け流し速度の効果実測では、加工条件を単純化し、工具電極と工作物間に確実に加工液を供給するために、図 4 に示す概念図のように、円柱形状の工具電極に対し、円柱中心軸と垂直な方向から加工液を供給する配置で加工を行う。具体的な実験装置の模式図を図 5 に示す。ノズルはアクリル板で自作しており、開口部面積を変更することにより、ノズル出口の流速を約 1.1[m/s]から約 2.2[m/s]まで 6 段階に変更する。

加工条件を表 1 に、実測結果を図 6 に示す。実測結果のうち「+」で示した値は先行研究における実測値である。噴流速度が 2.2 [m/s] のとき加工速度の最大値 24.8 [mm³/min]を得たが、噴流速度が 1.7 [m/s]以上ではほぼ収束した。本実験では工具電極の側面から加工液を供給していることから、加工くずが電極間を流れる距離が短く、一定以上の加工液の流速があれば充分加工くずを排出できることを示していると思われる。

一方この実験では、電極間隙を通過した加工液の出口側に大量の火花が飛ぶことがわかった。火花の本体は、放電によって熔融した工作物や工具電極であると考えられることから、電極間隙に加工液が存在しない空間が存在することの傍証であると考えられる。

表1: 掛け流し速度の効果測定の実験条件

極性	逆極性 (電極+, ワーク-)
電極	無酸素銅
ワーク	SKD11(200×20×8mm)
電極形	中実丸棒 φ6 [mm]
切り込み深さ	3 [mm]
加工距離	5 [mm]
電流ピーク値	60 [A]
無負荷電圧	90 [V]
パルス幅	30 [μ sec]
Duty Factor	60 [%]
加工液	純水 (1.0×10 ⁵ [Ω・cm])

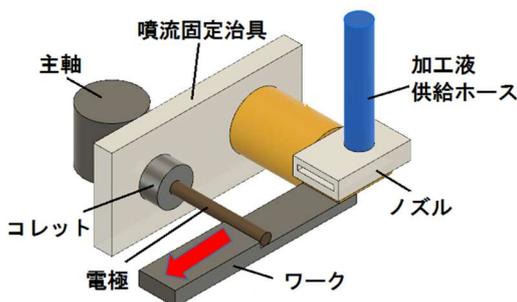


図5: 実験装置模式図

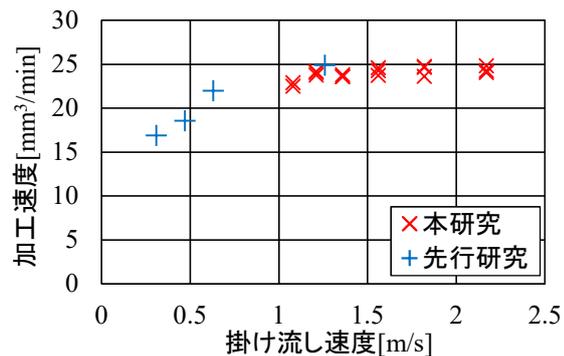


図6: 加工速度に対するかけ流し速度の効果

(2)くり抜き加工経路の効果実測

くり抜き加工経路の効果実測では、図 3 に示した 3 種類の経路に L 字形電極の先端を上に向けた経路を追加し、合計 4 種類の加工経路を用いてくり抜き加工を行う。以下では各経路の名称を、L 字形電極の姿勢と送り方向を組み合わせで表す。すなわち、図 3(a)水平 L 上向き送り経路、図 3(c) 水平 L 下向き送り経路、図 3(b)下向き L 水平送り経路、図 3(b)の工具電極を上下逆にした上向き L 水平送り経路、とする。

図 7 に実験概念図を、加工経路ごとの加工速度を図 8 に示す。加工速度は、工作物表面から深さ方向に切り込む経路(図 7 赤矢印の経路。以下「深さ経路」と略す)と、除去領域の底面を加工する経路(図 7 緑矢印の経路。以下「底面経路」と略す)に分けて求め、さらに底面経路は加工距離 6 mm を境界に前半と後半に分けて計測している。

加工速度の平均値は、下向き L 水平送り経路の底面経路前半で最大値:26.7[mm³/min]となった。エラーバーは加工速度測定値の変動幅を表し、異なる加工経路の加工速度を同一区間で比較すると、ほぼ変動幅の範囲内に含まれているので、これらの加工速度に有意の差があるとは言い難い。ただし、掛け流し効果の観点から最も有利であると考えられる「下向き L 水平送り経路」の実測結果は変動幅が小さく、加工状態が安定していたと思われる。

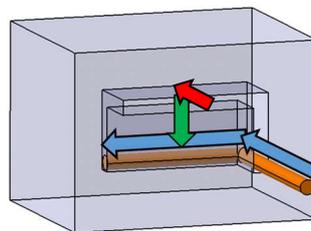


図7:加工経路比較実験概念図

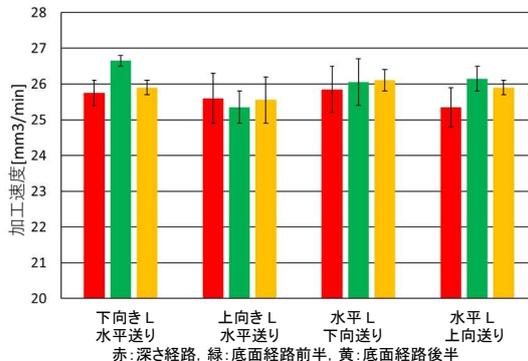


図8:加工経路による加工速度の違い

(3)微粒子添加の効果実測

微粒子添加の効果実測では、加工液の供給状態を管理しやすくするために加工条件を単純化し、図 9 に示すように円柱電極による側面放電加工を行う。本実験では、純水にタングステンカーバイド(WC)の微粒子を分散剤とともに添加したものを加工液として用いる。この微粒子の粒径を 5 種類用意し、加工速度の微粒子添加と粒径の効果を実測する。

さらに、加工中の工具電極と工作物間に流れる電流・電圧を測定し、その波形から放電状態を分類することによって、微粒子添加や粒子径による放電状態の差異を検討する。合わせて、加工くずの粒径分布を測定し、分布の差異からも微粒子添加による放電状態の差異を検討する。

① 加工速度の実測

図 10 に加工速度と電極消耗率の実測結果を示す。微粒子無添加の結果を粒径:0.0 μm とみなして記載している。本実験では、粒径:0.89 μm の WC 微粒子を添加したとき加工速度が最も速く、最大値:28.8 [mm³/min], 平均値:27.8 [mm³/min]となった。微粒子無添加の純水加工液を用いた加工結果に対して、微粒子を添加した加工液を用いると、加工速度が最大値の比較で 16%, 平均値では 15%, 向上した。

本実験では、微粒子径の増加にともない加工速度は減少する傾向の結果を得たが、微粒子添加加工液を用いたときの加工速度の最小値は、粒径 2.63 μm の微粒子を添加したときに得られた。

② 電極間の電流・電圧波形分析

電極間の状態は、絶縁-放電-休止を繰り返すのが基本である[2]。実際にはこのサイクルから外れ、不安定状態になることがあり、安定状態を含め電流・電圧波形から、識別する。



図9:微粒子添加加工液を用いた加工

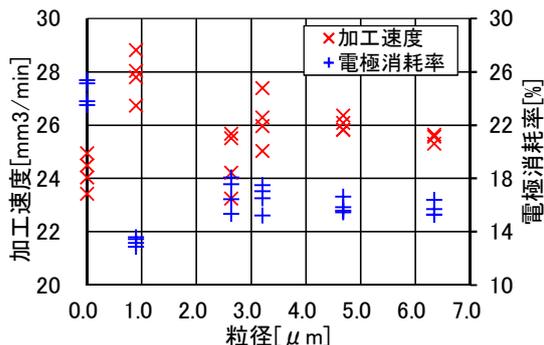


図10:微粒子添加の加工速度と電極消耗率

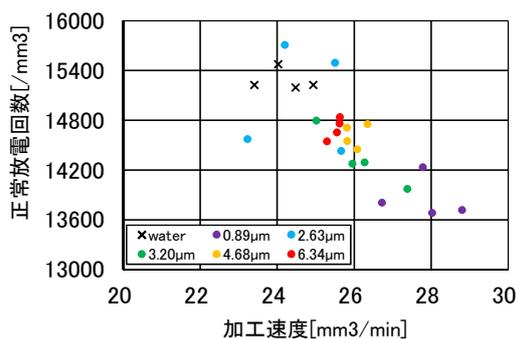


図11:正常放電回数と加工速度の関係

- (a)正常放電：開放電圧が印加されている状態が一定時間続く場合.
 - (b)集中放電：絶縁状態が短い時間しか維持されていない場合.
 - (c)短絡：休止状態の後、開放電圧に戻らずに放電電圧になり、同時に放電電流が流れている場合.
- この識別条件に従って、放電波形を分析した結果を図 11 に示す. グラフは、横軸を加工速度、縦軸を各状態の単位体積当たりの発生回数としている. また、粒子径ごとに色分けしてプロットしている. 正常放電回数に関しては、同一粒子径でも加工速度、正常放電回数ともに変動があり、一定の傾向は見いだせない. しかし、全体としては負の相関があり、加工速度が速いほど正常放電回数が少ない結果となった. なお、集中放電と短絡については、明確な傾向はみられなかった.

③ 加工くずの粒径分布測定

前項から「加工速度が大きい条件では正常放電回数が少ない」結果が得られた. そこで、加工くずを回収し、その粒径分布から加工状態の差異検出を試みる. ここでは、前項で最も加工速度が向上した粒径 $0.89\mu\text{m}$ の WC 粒子を添加した加工液と、微粒子無添加の純水加工液を用いた場合について比較する.

加工液から加工くずのみ磁石を用いて回収し、実体顕微鏡による撮影画像から、既存の画像解析アプリケーションを利用して粒子径を求める. このようにして求めた粒子径の相対度数分布を図 12 に示す. なお、粒径 $10\mu\text{m}$ 以上の加工くずは個数が少ないため、階級の幅を大きくしている. 微粒子添加加工液を用いた加工において、粒径 $10\mu\text{m}$ 以上の加工くずの個数が微粒子無添加の場合よりも多いことがわかる. 次に加工くずを球体であるとみなし、体積比を求めた結果を図 13 に示す. 粒径 $10\mu\text{m}$ 以上の加工くずの占める割合が格段に大きくなり、微粒子無添加の場合でも約 6 割、微粒子添加加工液を用いた場合は約 8 割を占める結果になった.

まとめ

本研究は、加工液掛け流しくり抜き放電加工法の加工速度向上のために、三つの観点から研究を進めた. 各観点で得られた結論を以下に示す.

(1)加工液の掛け流し速度の効果

- ・掛け流し速度が増すと加工速度も上昇すが、掛け流し速度が一定以上あれば、加工速度は収束すると思われる. 本研究の実験条件では、噴流速度： $1.7[\text{m/s}]$ 以上で収束する.

(2)くり抜き加工経路の効果

- ・L 字形電極先端を下に向け水平方向に送る経路を用いると、最も加工状態が安定する.
- ・加工速度の高速化に適した加工経路は、除去領域の大きさ、噴流速度、噴流量にも依存する.

(3)微粒子添加の効果

- ・添加微粒子の粒径が小さいほど加工速度が速くなる. 本研究の実験条件では、粒径： $0.89\mu\text{m}$ の WC 微粒子を添加したとき加工速度が最も速く、微粒子無添加の純水加工液を用いた加工結果に対して、平均値では 15% 向上した.
- ・放電時の電流・電圧波形から、加工速度が速いほど正常放電回数が少ない結果となった.
- ・微粒子添加加工液を用いると、粒径が比較的大きい加工くずが無添加の場合より多い.

各観点で得られた結果の原因について、本研究において推定できた部分もあるが不十分である. これらの点を明確にしていくことが今後の課題である.

[参考文献]

- [1]谷貴幸, 福澤康, 南部浩二, 毛利尚武: 粉末混入加工液による絶縁性セラミックスの放電加工現象, 電気加工学会誌, Vol. 36, No. 81, pp39-46 (2002)
- [2]国枝正典: 放電加工の基礎と将来展望-I 基礎一, 精密工学会誌, Vol. 71, No. 1, pp58-62 (2005)

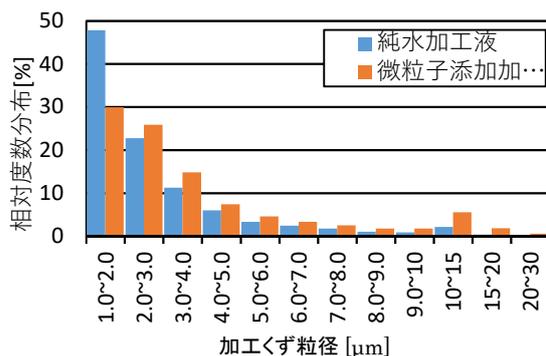


図 12: 加工くず粒径の相対度数分布

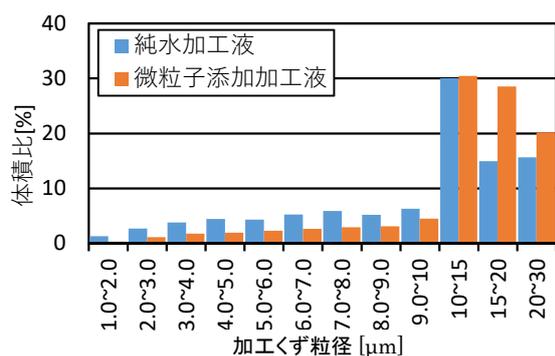


図 13: 加工くず粒径と体積比分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小西貴信
2. 発表標題 不燃性加工液のかけ流しによるくり抜き放電加工の開発 - 黒鉛粒子添加加工液の粒子径が放電波形に与える効果 -
3. 学会等名 精密工学会九州支部 佐世保地方講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 二田光司
2. 発表標題 不燃性加工液のかけ流しによるくり抜き放電加工の開発 - 加工経路による加工速度の変化 -
3. 学会等名 精密工学会九州支部 第20回学生研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 日高詢子
2. 発表標題 不燃性加工液掛け流し放電加工の基礎研究 - 円筒電極側面放電加工における加工速度の掛け流し流速依存性の実測 -
3. 学会等名 精密工学会九州支部 第19回学生研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 清井洋輔
2. 発表標題 不燃性加工液のかけ流しによるくり抜き放電加工の開発 - 微粒子添加放電加工における加工くずの観察 -
3. 学会等名 精密工学会九州支部2020年度学生Web講演会
4. 発表年 2020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	小西 貴信 (Konishi Takanobu)		
研究協力者	日高 詢子 (Hidaka Junko)		
研究協力者	二田 光司 (Nita Koji)		
研究協力者	清井 洋輔 (Kiyoi Yosuke)		

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
---------	---------