財団法人 JKA 2022 年度

表面改質放電加工法による高アスペクト比穴内 面への高機能化による先進的噴射ノズルの開発

補助事業

報告書

新潟大学教育学部金属加工研究室 平尾 篤利



目次

第1章	序論1
1.1	放電加工法1
1.1.1	放電加工法について1
1.1.2	放電加工の原理2
1.2	本研究の目的3
1.2.1	本研究の背景および従来研究との関連性3
1.2.2	本研究の目的5
1.3	本論文の構成5
第2章	放電加工現象の直接観察と飛散タイミングの計測6
2.1	緒言6
2.2	実験条件7
2.2.1	実験装置概要7
2.2.2	単パルス波形入力8
2.2.3	観察系12
2.2.4	放電加工機19
2.2.5	放電条件・加工条件
2.3	実験結果24
2.3.1	亜鉛の加工屑飛散
2.3.2	純鉄の加工屑飛散
2.3.3 翁	同の加工屑飛散
2.3.4 키	- チタンの加工屑飛散43
2.4	第2章結言
第3章	各種材料における放電痕体積と熱伝導率 50
3.1	緒言
3.2	実験条件52
3.2.1	材料特性52
3.2.2	放電条件53
3.2.3 力	汝電痕体積計測53

表面改質放電加工法による高アスペクト比穴内面への高機能化による先進的噴射ノズルの開発

3.3	実験結果:各種材料と放電痕体積	53
3.3.1	亜鉛	53
3.3.2	純鉄	55
3.3.3	銅	57
3.3.4 チ	タン	58
3.4	実験結果:飛散回数と放電痕体積	60
3.5 実験	結果:放電痕体積と熱伝導率	61
3.6 第3	章結言	63
第4章	両極性パルスが加工に及ぼす影響	64
4.1	諸言	64
4.2	実験条件	64
4.2.1	実験装置概要	64
4.2.2 両	極性パルス入力	65
4.2.2	放電条件・加工条件	68
4.3	実験結果	69
4.4	第4章結言	72
第5章	結論	73
5.1	本研究のまとめ	73
5.2	今後の展開	74
参考文献		76

第1章 序論

1.1 放電加工法

1.1.1 放電加工法について

放電加工法とは、電極と被加工物の短間隙(数 μm~数十 μm)において、高圧 電流によるアーク放電の熱作用を利用する加工方法である⁽¹⁾.

硬度や靭性などの材料特性に左右されない加工法であり,金属などの難加工物を加工する際によく利用される加工法である⁽²⁾.

放電加工法は、電極をあらかじめ任意の形状に形成し、その形状を被加工物 に転写加工することが可能である.

しかしながら,加工速度が遅く,時間的加工効率が悪いという問題点がある. 本研究では,一発の放電を各種被加工物に行うと共に,両極性のパルスによ る単発放電加工について議論を進める.

1.1.2 放電加工の原理

以下に放電の発生原理について説明する.

①アークの発生

電極と被加工物が数 μm~数十 μm の距離に近づくと,まず距離の一番近いところで火花放電が発生する.放電は細いアーク柱となり,電流密度の高い電子の流れが生じる⁽¹⁾.

(2)熱の発生

アーク柱の温度は定常状態で 5000~6000K, 過渡状態で 10000K になると 言われている.ただし,放電点のアーク柱の脚となる部分は,その材料の 沸点と考えてよい.1回の放電によって加工される領域は,材料内部の融 点に達する深さと考えてよい.すなわち,アーク柱の脚部はアーク柱より も低温であると考えられる⁽³⁾.

③過熱と溶融

アーク放電により高い熱エネルギーが被加工物に加えられることにより、
 放電点が被加工物の融点もしくは沸点へと到達し、被加工物が溶融する。
 ④加工屑の飛散と除去

融点もしくは沸点へと到達し,溶融した被加工物は小さな塊となり,爆発的な勢いで極間に飛散する.この飛散した塊が気中で冷却されることで 加工屑となる.放電点の端の吹き飛ばされなかった部分は,盛り上がりと なって被加工物表面に残る.この際に,放電点を中心に生じたクレータの ようなくぼみが放電痕である.

1.2 本研究の目的

1.2.1 本研究の背景および従来研究との関連性

放電加工において,加工屑の除去メカニズムは未だ解明されていない.放電 加工の加工効率向上のためには,単発放電における各種材料の加工屑の除去過 程や加工特性を詳しく知る必要がある.

以下に従来研究について示す.

①液中と気中における単発放電の観察

放電加工では主に、間隙の絶縁回復を行うため、電極と被加工物の間隙 に加工油を流し込み、液中放電とされる.従来の研究では、この加工油が、 アーク放電の熱によって気泡となり、急激に気化膨張することにより、放 電点中心の圧力が低下し、加工屑が液中に飛散することで除去されると考 えられていた.そこで、単発放電における加工屑の飛散の観察が、液中と 気中でそれぞれ行われた⁽⁴⁾.

結果,気中であっても液中と同じ程度の加工速度で除去が推移しており, 生じた加工屑を被加工物に再付着させることなく除去を行うことで,気中 加工でも放電加工が可能であることが明らかになった.そのため,加工油 中の気泡の気化膨張による圧力低下は,加工屑の除去メカニズムとしては 有力ではないとされた. ②透過光とバンドパスフィルタを用いた観察

単発放電における加工層の除去メカニズムを解明するために,透明対電 極を介した放電現象の直接観察が行われてきた.また,現象観察の有効な 手段としてハイスピードカメラを用いた観察が行われていたが,単発放電 中に溶融した被加工物がどのように除去されているかは十分に観察されて いなかった.

そこで、透過光としたグリーンレーザの波長のみを通すバンドパスフィ ルタを用いた観察装置を構築し、放電加工現象が撮影された.

この研究結果では,観察した被加工物表面の挙動より加工屑の除去メカ ニズムは,被加工物への継続された入熱により被加工物の内部が溶融し, この時発生する蒸気圧がある限界を超えると,表面蒸発による反跳力が生

じ,溶融した被加工物の内部が吹き飛ばされるとした.

③電流波形が加工屑除去のタイミングに及ぼす影響の観察

レーザ光源とバンドパスフィルタを用いたハイスピードカメラで極間の 直接的な観察を行うとともに、放電電流波形のピークの有無や位置、勾配 が加工物の飛散に及ぼす影響を調べるため、異なる形状の電流波形を用い て加工屑が飛散するタイミングとその様子が撮影された.また、放電痕の 直径と凹凸部体積を測定することで除去体積が算出された⁽⁶⁾.

その結果,異なる形状の電流波形を用いても,単発放電痕直径に大きな 差は見られないが,ピークが1つのみの波形の除去体積が大きくなった.

1.2.2 本研究の目的

本研究では、谷らの実験装置を参考に構築した観察装置を用い、単発放電加 工現象の直接観察を行う.その際、様々な材料の被加工物を用いて、加工屑の 飛散や放電痕について研究を行い、放電加工効率の加工屑除去のメカニズムを 解明する.また、両極性パルス信号を利用し、単極性パルス信号による単発放 電加工との違いから加工屑除去メカニズムの考察を行う.

1.3 本論文の構成

ここでは、本論文の構成を説明する.本論文は第1章から第5章で構成されており、本論文の構成を示す.

第1章では、放電加工法の詳細や原理を簡潔に説明し、本研究の背景および 目的について述べる.

第2章では、放電加工現象の直接観察を行い、複数回の飛散の観察結果とその飛散タイミングについて述べる.

第3章では,各種材料を用いた実験を元に,放電加工現象における放電痕体 積と熱伝導率の関係性について述べる.

第4章では、両極性パルス信号を用いた実験を元に、加工屑の飛散する様子 を観察し、単極性パルス信号による加工屑飛散現象との違いを述べる.

第5章では、本研究の結論を述べ、今後の展望について考察したものを述べる.

第2章 放電加工現象の直接観察と飛散タイミングの計測

2.1 緒言

放電加工の原理として,放電により温められた溶融部が何らかの原因によって飛散することで加工屑除去が行われているが,いまだ詳しいメカニズムは 解明されていない.後藤らの研究から,単発放電加工において,複数回の飛散 が発生しているとされている.最初の加工屑は水平方向に飛散していることが 観察された.これは,放電の衝撃波によるものであると考察された.これに対 し,2回目以降の加工屑は上部へ飛散していることが観察される.これは,溶 融部の突沸によるものと考察された.

放電加工において,加工屑除去飛散タイミングを測定することができれば, 複数回の飛散による加工の再現性が高まり,加工効率の向上が期待できる.そ こで,本研究では単発放電加工による複数回の飛散メカニズムの解明を目的と する.

図 2.1 に実験の流れを示す.本章では,亜鉛,純鉄,銅,チタンにおいて,鏡 面仕上げを施した表面に単発放電を行う.それぞれの金属に対して,10µs,20µs, 50µs,100µsのパルス信号を入力し,回路には10Ωの抵抗を用いて実験を行う. その中で複数回の実験を行い,放電時の様子が顕著に表れているデータを代表 的なものとして利用する.また,加工屑除去観察とともにアーク柱の発生につ いても観察を行う.



図 2.1 実験の流れ

- 2.2 実験条件
- 2.2.1 実験装置概要

図 2.2 に実験装置概要図を示す.



図 2.2 実験装置概要図

2.2.2 単パルス波形入力

波形入力の概要を図 2.3 に示す. 電源から抵抗を介し流れた電流は一度 FET にて保持される. myRIO を用い, FET にパルス信号を入力することにより FET のゲートが解放され,回路にパルス波の電流が流れる.また,回路内の電流および電圧の変位をオシロスコープによって観察を行う.



図 2.3 波形入力概要図

表面改質放電加工法による高アスペクト比穴内面への高機能化による先進的噴射ノズルの開発

以下に, (1)電源, (2)myRIO, (3)オシロスコープの仕様を示す.

(1) 電源

図 2.4 に使用した電源を示し、表 2.1 にその仕様を示す.



図 2.4 電源

表 2.1 電源の仕様

モデル	ZX-S-1600HA (TAKASAGO)
定格出力電圧	640 [V]
定格出力電流	20 [A]
定格出力電力	1600 [W]
設定範囲(電圧)	$0.0\sim 672.0~\mathrm{[V]}$
設定範囲(電流)	$0.00\sim21.00~[{ m A}]$

(2) myRIO

回路内にパルス波の電圧を発生させるために myRIO を用いた. 図 2.5 に myRIO を示し, その仕様を表 2.2 に示す.



図 2.5 myRIO 表 2.2 myRIOの仕様

モデル	NI myRIO -1900
型番	NI782693-01

(3) オシロスコープ

オシロスコープを用い,回路内の電流,電圧の変位を観察する.図 2.6 に用いたオシロスコープを示し,表 2.3 にその仕様を示す.



図 2.6 オシロスコープ

表 2.3 オシロスコープの仕様

メーカ	Teledyne LeCroy
型式	WAVESURFER 3024
СН	4
帯域	200 [MHz]
最大入力電圧	400 [V]
メモリーサイズ	40 [Mpts]

2.2.3 観察系

観察系の概要を図 2.7 に示す. ハイスピードカメラに高倍率レンズを取り付 けることによって,電極と被加工物の極間の撮影の可能とし,トリガーによっ て放電とカメラのシャッターのタイミングを同期させ,放電直後を観察した. 放電アーク柱の観察には、レンズ(KEYENCE, VH-Z20)倍率を30倍とした. 加工屑除去の観察には、レンズ(KEYENCE, VH-Z50)倍率を150倍とした. 本実験では、光源に波長 532nmのグリーンレーザを用い、中心波長 532nm、半 値幅 2.87±0.85nm のバンドパスフィルタを用いることで放電光を取り除いた. また、アークの発生を撮影するためのカメラをもう一台観察系として構築する.



図 2.7 観察系の概要

以下に(1)ハイスピードカメラ,(加工屑飛散観察用,アーク柱観察用),(2)バンドパスフィルタ,(3)グリーンレーザ,(4)レーザ顕微鏡(放電痕観察・解析用)の仕様を示す.

(1) ハイスピードカメラ

放電時間は数 10µs~数 100µs というごく短い時間であるため,ハイスピード カメラを用いることで 4.3µs ごとの撮影を可能とした. 図 2.8, 図 2.9, 図 2.10 にハイスピードカメラ,高倍率レンズ(加工屑観察用,アーク柱観察用)をそれ ぞれ示し,表 2.4,表 2.5,表 2.6にそれぞれの仕様を示す.



図 2.8 ハイスピードカメラ(加工屑観察用)

表 2.4 ハイスピードカメラの仕様

メーカ	KEYENCE
型式	VW-600C
タイプ	カラー
フレームレート帯	$30\sim230{,}000~{ m [fps]}$



図 2.9 高倍率レンズ(加工屑観察用)

|--|

メーカ	KEYENCE
型式	VH-Z50L
倍率	50~500[倍]
観察距離	85 [mm]



図 2.10 高倍率レンズ(アーク柱観察用)

表 2.6 高倍率レンズ(アーク柱観察用)

メーカ	KEYENCE
型式	VH-Z20
倍率	20~20 0[倍]
観察距離	25.5 [mm]

(2)バンドパスフィルタ

放電時の発光によって極間が観察できないことを防ぐため、グリーンレーザの波長の身を通すバンドパスフィルタを用いた. 図 2.11, 図 2.12 に使用したバンドパスフィルタと装着時をそれぞれ示し、その仕様を表 2.7 に示す.



図 2.11 バンドパスフィルタ

表 2.7 バンドパスフィルタの仕様

メーカ	シグマ光機
型式	VPF-25C-01-40-53200
中心波長	532 [mm]
半値幅	2.87±0.85 [nm]



図 2.12 バンドパスフィルタ装着時

(3)グリーンレーザ

放電時の加工屑などの挙動影として観察するためのグリーンレーザを用いた. 図 2.13 にグリーンレーザを示し,表 2.8 にその仕様を示す.



図 2.13 グリーンレーザ

表面改質放電加工法による高アスペクト比穴内面への高機能化による先進的噴射ノズルの開発

波長	532 [nm]
----	----------

(4)レーザ顕微鏡

各条件下における単発放電加工を行った後に,放電痕の撮影と放電痕体積,深 さ・高さ,直径を解析するためにレーザ顕微鏡を用いた.図2.14にレーザ顕微 鏡を示し,表2.9にその仕様を示す.



図 2.14 レーザ顕微鏡(VK-X3000)

表面改質放電加工法による高アスペクト比穴内面への高機能化による先進的噴射ノズルの開発

メーカ	KEYENCE	
型式	VK-X3000	
倍率	×5, ×10, ×20, ×50	
光源	白色 LED 光	
解像度	5,600,000[pixel]	
レーザ光源[波長]	バイオレットレーザ 404[nm]	赤色レーザ 661[nm]
レーザ光源[出力]	0.9[mW]	0.9[mW]

表 2.9 レーザ顕微鏡の仕様

2.2.4 放電加工機

放電加工機の概要を図 2.15 に示す.加工形態は,気中において丸棒電極対平 面とした.電極と被加工物の位置関係は XY ステージを用いて調整した.極間 距離は,電極と被加工物の電気的な接触を基準とし,Z ステージをステッピン グモータにて上昇させることで設定した.また,Z ステージの変位値はレーザ 変位計を用いることによって常に計測している.

表面改質放電加工法による高アスペクト比穴内面への高機能化による先進的噴射ノズルの開発



図 2.15 放電加工機の概要

以下に、(1)放電加工機、(2)レーザ変位計の仕様を示す.

(1) 放電加工機

図 2.16に放電加工機を示す. 電極と被加工物はそれぞれ固定し, XY 軸は XY ステージを用い, Z 軸は Z ステージとステッピングモータを用いることによって設定した. また, 図 2.17 に電極と被加工物の位置関係模式図を示す. 金属片は厚さ 2mm のものを用い, 鏡面仕上げを行った側面に放電を行った.



図 2.16 放電加工機



図 2.17 電極と被加工物の位置関係模式図

(2) レーザ変位計

極間距離の正確な設定を可能とするため、レーザ変位計を用いた. 図 2.18 に レーザ変位計を示し、表 2.10 にその仕様を示す.



図 2.18 レーザ変位計

表面改質放電加工法による高アスペクト比穴内面への高機能化による先進的噴射ノズルの開発

メーカ	KEYENCE		
型式	LE-4000		
測定範囲	±5 [mm]		
作動距離	30 [mm]		
分解能	0.1 [μm]		
ゲイン調整	AUTO, HIGH, LOW		

表 2.10 レーザ変位計の仕様

2.2.5 放電条件・加工条件

放電加工条件,撮影条件を表 2.11 および表 2.12 に示す.本実験では電極(陰極)に直径 0.1mm のタングステン,被加工物(陽極)に亜鉛,純鉄,銅,チタンを 使用した.また,電圧印加後,FET に 10,20,50,100µs のパルス信号を入力 することによってパルス幅を設定した.回路には 10Ωの抵抗を用いた.極間距 離は,電極と被加工物との電気的な接触を基準とし,電極側に設置した Z ステ ージを上昇させることによって 5µm に設定した.また,ハイスピードマイクロ スコープを 2 方向から撮影し,1つは加工屑の飛散,1つは放電加工によるアー ク柱の状況を観察した.抵抗 10Ω-入力信号 10,20,50,100µs の条件下におい て約 10~20 回ずつ単発放電加工を行い,加工屑飛散が顕著なものを代表的なデ ータとして示す.

2台のハイスピードマイクロスコープのフレームレートは同様に230,000fpsとした. 放電アーク柱の直径は材料の飛散距離より大きいため, それぞれ異なる 倍率を用いた. カメラはそれぞれ 90°となる位置で固定した.

表 2.11 放電条件

電源電圧/放電電流	400 [V]/40[A]		
パルス幅	10,20,50,100[µs]		
電極(-)	W(φ0.1)		
被加工物(+)	Zn,Fe,Cu,Ti		
極間距離	5 [µm]		

表 2.12 撮影条件

	アーク柱	加工屑飛散	
露光時間	1/900,000[s]		
フレームレート	230,000 [fps]		
解像度	160×32 [pixel]		
カメラ倍率	×30	×150	

2.3 実験結果

亜鉛,純鉄,銅,チタンに対し様々な条件下で単発放電加工を行い,加工屑 が飛散する様子とアーク柱の発生状況を2台のカメラを用いて観察した.また, 複数回発生する飛散のタイミングを測定した.写真内において,放電加工屑観 察時,アーク柱観察時の様子についてそれぞれ図2.19,図2.20に示す.

亜鉛,純鉄,銅,チタンの4種類の被加工物に対し,抵抗10Ω,入力信号10, 20,50,100µsの条件下において数回ずつ単発放電加工を行った.これまでの 報告と同様に,1発の単発放電加工において,複数回の加工屑飛散除去現象が 発生していることが確認された.また,アーク柱は加工屑が飛散する際に発光 が強くなり,各データにもみられるように燃え上がるような像を観察した.



図 2.19 電極と被加工物の位置関係(加工屑飛散除去観察用)



図 2.20 電極と被加工物の位置関係(アーク柱観察用)

2.3.1 亜鉛の加工屑飛散

後藤らによって、1 発の放電加工において加工屑飛散除去現象が複数回発生 していることが確認されている.また、加工屑は被加工物に対して、1 回目の 飛散が水平方向、2 回目以降の飛散では垂直方向に飛散する様子が観察された. また、パルス幅毎に飛散回数が変化した.表 2.12 にそれぞれの入力信号におけ る実験回数とその飛散回数を示す.10µs においては 1 度しか飛散していなかっ た.20,50,100µs では複数回の飛散が発生した.パルス幅が大きくなるほど、飛 散回数と複数回の飛散の発生確率は上昇した.50、100µ では最高 4 回の飛散が 発生している.また、1 度目の飛散タイミングはどの入力信号においても平均 的に 10µs 付近を示しているが、2 回目以降の飛散は、入力信号が大きくなるほ ど発生タイミングが遅れていた.

また, 放電痕における直径はパルス幅毎に比例して大きくなっているが, 深 さはパルス幅毎に差が見られなかった.

放電開始を 0μs とし, 放電開始からの時間経過とともに加工屑が飛散してい る様子を静止画で保存し,代表的なものを示す.以下に各条件下における加工屑 飛散除去観察および放電痕とその直径, 高さ情報を記す.また, 核実験において 設定したパルス幅毎の複数回の飛散タイミングを表したグラフを下記に示す.

	実験回数	飛散(計1回)	飛散(計2回)	飛散(計3回)	飛散(計4回)
10µs	10	10	0	0	0
20µs	10	0	10	0	0
50µs	18	1	11	5	1
100µs	20	0	7	12	1

表 2.13 Zn: 各入力信号における実験回数と飛散回数





図 2.21 Zn:入力信号 10µs 観察結果



図 2.22 Zn:入力信号 10µs 放電痕

(2) Zn:入力信号 20µs







図 2.24 Zn:入力信号 20µs 放電痕

(3) Zn:入力信号 50µs





表面改質放電加工法による高アスペクト比穴内面への高機能化による先進的噴射ノズルの開発



図 2.26 Zn:入力信号 50µs 放電痕

(4) Zn:入力信号 100µs







図 2.28 Zn:入力信号 100µs 放電痕



図 2.29 Zn: 各入力信号の飛散タイミング

2.3.2 純鉄の加工屑飛散

純鉄に対して単発放電加工を行った結果, 亜鉛と同様に複数回の加工屑の 飛散が観察された.表 2.14 にそれぞれの入力信号における実験回数とその飛散 回数を示す.亜鉛と同じく, 10µs での飛散は 1 回しか発生していない.また, 同様に 20,50µs では複数回の飛散が発生したが, 20µs では, 複数回の飛散が 10 回の実験中 2 回, 50µs では 20 回の実験中 5 回となった. 100µs においては 2 回 以上の飛散が 10 回の実験で 9 回発生している.したがって, 純鉄は, 亜鉛と比 べて複数回の飛散が発生する確率が低く, 複数回の飛散が発生しにくいと考え られる.また, 飛散している加工屑の量も亜鉛に比べて少なく見える.

放電開始を 0µs とし,放電開始からの時間経過とともに加工屑が飛散してい るタイミングを数枚写真に保存し,代表的なものを示す.

以下に,各条件下における加工屑飛散除去観察,その放電痕と放電痕直径, 高さ情報を記す.

	実験回数	飛散(計1回)	飛散(計2回)	飛散(計3回)	飛散(計4回)
10µs	20	20	0	0	0
20µs	10	8	2	0	0
50µs	20	15	5	0	0
100µs	10	1	3	6	0

表 2.14 Fe: 各入力信号における実験回数と飛散回数



図 2.30 Fe:入力信号 10µs 観察結果



図 2.31 Fe:入力信号 10µs 放電痕


図 2.32 Fe:入力信号 20µs 観察結果



図 2.33 Fe:入力信号 20µs 放電痕

⁽³⁾ Fe:入力信号 50µs

表面改質放電加工法による高アスペクト比穴内面への高機能化による先進的噴射ノズルの開発



図 2.34 Fe:入力信号 50µs 観察結果



図 2.35 Fe:入力信号 50µs 放電痕

(4) Fe:入力信号100µs

表面改質放電加工法による高アスペクト比穴内面への高機能化による先進的噴射ノズルの開発



図 2.36 Fe:入力信号 100µs 観察結果



図 2.37 Fe:入力信号 100µs 放電痕

表面改質放電加工法による高アスペクト比穴内面への高機能化による先進的噴射ノズルの開発



図 2.38 Fe: 各入力信号における飛散タイミング

2.3.3 銅の加工屑飛散

銅に対して単発放電加工を行った結果, 亜鉛と同様に複数回の加工屑の飛散 が観察された.表 2.15 にそれぞれの入力信号における実験回数とその飛散回数 を示す.他材料と同じく, 10µs での飛散は1回しか発生していない.また,他 材料と同様に20µs以降では複数回の飛散が発生したが,20µsでは,複数回の飛 散が10回の実験中1回,50µsでは10回の実験中2回となった.100µsにおいて は2回以上の飛散が10回の実験で9回発生している.また,純鉄は100µsにお ける10回の実験で3回目の飛散が6回発生している.これに対し,銅では100µs における3回目の飛散が2回しか発生していなかった.したがって,銅は,他 材料と比べて,最も複数回の飛散が発生する確率が低く,複数回の飛散が発生 しにくいと考えられる.

また, 50µsと100µsにおける2回目の飛散タイミングが大きく離れている.

放電開始を 0µs とし,放電開始からの時間経過とともに加工屑が飛散してい るタイミングを数枚写真に保存し,代表的なものを示す.以下に,各条件下に おける加工屑飛散除去観察,その放電痕と放電痕直径,高さ情報を記す.

	実験回数	飛散(計1回)	飛散(計2回)	飛散(計3回)	飛散(計4回)
10µs	10	10	0	0	0
20µs	10	9	1	0	0
50µs	10	8	2	0	0
100µs	10	1	7	2	0

表 2.15 Cu: 各入力信号における実験回数と飛散回数

(1) Cu:入力信号10µs



図 2.39 Cu:入力信号 10µs 観察結果

表面改質放電加工法による高アスペクト比穴内面への高機能化による先進的噴射ノズルの開発



図 2.40 Cu:入力信号 10µs 放電痕

(2) Cu:入力信号 20µs



図 2.41 Cu:入力信号 20µs 観察結果

表面改質放電加工法による高アスペクト比穴内面への高機能化による先進的噴射ノズルの開発



図 2.42 Cu:入力信号 20µs 放電痕

(3) Cu:入力信号 50µs







図 2.44 Cu:入力信号 50µs 放電痕



(4) Cu:入力信号100µs





図 2.46 Cu:入力信号 100µs 放電痕



図 2.47 Cu: 各入力信号における飛散タイミング

2.3.4 チタンの加工屑飛散

チタンに対して単発放電加工を行った結果,他材料と同様に複数回の加工屑の 飛散が観察された.表 2.16 にそれぞれの入力信号における実験回数とその飛散 回数を示す.他材料と同じく,10µs での飛散は1回しか発生していない.また, 同様に20,50,100µs では複数回の飛散が発生した.20µs では,複数回の飛散 が10回の実験中2回,50µs では10回の実験中8回となった.100µs においては 複数回の飛散がすべての実験で発生している.最大で5回の飛散が発生した. 各種材料の中で最も多い飛散回数であった.また,4回の飛散が発生する確率 も各種材料の中で最も高かった.したがって,チタンは,各種材料と比べて複 数回の飛散が発生する確率が高く,複数回の飛散が最も発生しやすいと考えら れる.また,チタンを利用した際,飛散した加工屑が,電極に付着する現象が 発生した.これにより,中央部が盛り上がった放電痕が確認された.

放電開始を 0µs とし, 放電開始からの時間経過とともに加工屑が飛散してい るタイミングを数枚写真に保存し, 代表的なものを示す.

以下に,各条件下における加工屑飛散除去観察,その放電痕と放電痕直径, 高さ情報を記す.

	実験回数	飛散 (計1回)	飛散 (計2回)	飛散 (計3回)	飛散 (計4回)	飛散 (計5回)
10µs	10	10	0	0	0	0
20µs	10	8	2	0	0	0
50µs	10	2	6	2	0	0
100µs	10	0	1	3	5	1

表 2.16 Ti: 各入力信号における実験回数と飛散回数



図 2.48 Ti:入力信号 10µs 観察結果





表面改質放電加工法による高アスペクト比穴内面への高機能化による先進的噴射ノズルの開発

(2) Ti:入力信号 20µs



図 2.50 Ti: 入力信号 20µs 観察結果





表面改質放電加工法による高アスペクト比穴内面への高機能化による先進的噴射ノズルの開発

(3) Ti:入力信号 50µs



図 2.52 Ti:入力信号 50µs 観察結果



図 2.53 Ti:入力信号 50µs 放電痕

表面改質放電加工法による高アスペクト比穴内面への高機能化による先進的噴射ノズルの開発





図 2.54 Ti:入力信号 100µs 観察結果



図 2.55 Ti:入力信号 100µs 放電痕



図 2.56 Ti: 各入力信号における飛散タイミング

2.4 第2章結言

本章では、2 つのカメラを用いた観察装置を利用し、亜鉛、純鉄、銅、チタンに対して様々な条件下で単発放電を行い、加工屑の複数回飛散発生の直接観察とそのタイミングの計測を行った.また、各実験における放電痕を撮影し、高さ情報を得た.

本章で得られた内容を,以下にまとめる.

- (1)各種材料における単発放電加工の飛散タイミングの計測を行った.
- (2)各種材料の中で最も複数回の飛散が発生しやすい被加工物はチタンである. また,最も発生しにくいのは銅である.
- (3) 亜鉛, チタン, 純鉄は複数回の飛散タイミングが等間隔であることが分かった. 対して, 銅は飛散タイミングが不規則であった
- (4)どの材料においても、入力信号が 100µs を超えると複数回の飛散発生確率が 高く、安定している.
- (6)1回目の飛散は、全ての材料において 13µs 付近で発生している.対して、2 回目以降の飛散は入力信号や被加工物の違いから、2回目以降の飛散タイミ ングは安定していない. 100µs を超えると、それぞれの飛散タイミングが規 則的になる.
- (5)チタンは,飛散が発生したときに電極に付着したまま硬化することがある. これにより,中央部が盛り上がった放電痕が撮影された.

以上から、本章では2つのカメラを用いた観察装置を利用し、亜鉛、純鉄、 銅、チタンに対して様々な条件下で単発放電を行い、加工屑の複数回飛散発生 の直接観察とそのタイミングの計測を行った.

表面改質放電加工法による高アスペクト比穴内面への高機能化による先進的噴射ノズルの開発

第3章 各種材料における放電痕体積と熱伝導率

3.1 緒言

第2章において,各種材料に対して,単発放電加工を行い,各種材料におけ る,複数回の飛散の発生タイミングや複数回の飛散の発生しやすさについて考 察した.しかし,その明確な違いに関する根拠が示されていない.そこで,複 数回の飛散による放電痕体積を測定することで,各種材料における加工屑の複 数回飛散メカニズムの解明につながると考えた.放電加工は,アーク放電によ る高い熱エネルギーが被加工物に加えられることにより,溶融した被加工物が 小さな加工屑となり,飛散すると考えられている.

本章では,第2章の実験で加工された放電痕体積を解析アプリケーションで 測定し,複数回の飛散による放電痕と被加工物の熱伝導率との関連性について 考察する.

実験の流れを図 3.1 に示す.本章では,放電加工機,観察系,波形入力,実 験装置は上記第2章と同様のものを利用する.第2章でも利用した熱伝導率が 異なる純金属である純鉄,亜鉛,銅,チタンにおいて,鏡面仕上げを施した表 面に単発放電を 10~20 回行う.放電によって形成された放電痕をレーザ顕微鏡 で撮影する.その後,画像解析アプリケーション(VK-X 3000 Multi File Analyzer) を利用して,放電痕体積を測定し,各入力信号の放電痕体積の平均を算出する. この際,複数回の飛散との関連性も考察するために,飛散回数ごとに算出する.

また,放電痕体積の定義を示す.図 3.2 に凹・凸部放電痕体積の定義を示す. 放電痕には加工よってできたクレータ部である凹部と,飛散した加工屑が放電 痕周囲に堆積した凸部が存在する.それぞれの体積を凹部放電痕体積,凸部放 電痕体積とする.



3.2 実験条件

3.2.1 材料特性

本章で用いる材料は,熱伝導率の異なる純金属である亜鉛,純鉄,銅,チタ ンを使用した.表3.1に各種材料の熱伝導率λ[W/(m・K)],融点θ[K],熱加工し やすさ λθ[W/m]熱加工しやすさを示す.定義した熱伝導率における温度は 0℃ とする.熱伝導率は小さいほど熱エネルギーが流れにくく,熱が停滞するため, 溶融・突沸が発生しやすいことから,加工がしやすいと考えられる.対して, 熱伝導率が大きい場合,熱エネルギーが広がるため,溶融・突沸が発生しにく いことから加工がされにくいと考えられる⁽⁷⁾.熱伝導率が最も小さい材料はチ タンであり,最も大きいのは銅である.したがって,平均放電痕体積は,(1)の ようになると考えられる.

Ti > Zn > Fe > Cu ...(1)

	融点θ[K]	熱伝導率 λ[W/m・K]	加工しやすさ λθ×10 ⁻⁵ [W/m]
Zn	693	117	0.81
Fe	1536	83.5	1.51
Cu	1358	403	5.47
Ti	1939	22	0.43

表 3.1 各種材料の材料特性

3.2.2 放電条件

放電加工条件を表 3.2 に示す. また, 第2章と同様, 電極(陰極)に直径 0.1mm のタングステン, 被加工物(陽極)に亜鉛および純鉄を使用した. 電圧印加後, FET に 200µs の重畳パルス信号を入力することによってパルス幅を設定した. 回路には加工屑の飛散が発生しやすい 10Ωの抵抗を用いた.

観察系は加工屑飛散除去観察のみとする.

電圧	400[V]
抵抗	10[Ω]
パルス幅	10, 20, 50, 100 [µs]
極間距離	5[µm]
被加工物	Zn, Fe, Cu, Ti

表 3.2 放電・加工条件

3.2.3 放電痕体積計測

第2章図 2.14 において,利用したレーザ顕微鏡(VX-K 3000)を使用し,放電 痕の撮影を行う.また,画像解析ソフト(VK-X multi file analyzer)を利用して撮 影した放電痕を解析し,各種材料の放電痕の凹部及び凸部体積を測定する.

3.3 実験結果:各種材料と放電痕体積

3.3.1 亜鉛

以下,図 3.3 に亜鉛の放電痕凹部体積を示す.また図 3.4 に亜鉛の放電痕凸部 体積を示す. 亜鉛の最大凹部体積は 769,561µm³で,100µs のパルス幅で計測さ れた.最小凹部体積は,45,767µm³で,10µs のパルス幅で計測された.このよ うにパルス幅と凹部体積の増加は比例関係にあることがわかる.しかし,10~ 50µs では顕著に平均体積が上昇していたが,100µs の平均体積は 50µs と比べ, 大きな上昇は無かった.この現象を図 3.5 に示す.これは,垂直方向に飛散し た2回目以降の加工屑が凹部に堆積しているためだと考える.

また,放電痕凸部体積において,各信号入力における平均体積の上昇率が,

凹部体積より小さい.また,最大凸部体積は 567,879µm³であり,凹部との差が 大きい.しかし,10µs における凹部凸部の平均体積に差はない.これは1回目 の飛散が水平方向のみであることから,被加工物の堆積に大きな影響を与えな いためであると考える.



図 3.4 Zn: 放電痕凸部体積

表面改質放電加工法による高アスペクト比穴内面への高機能化による先進的噴射ノズルの開発



図 3.5 凹部への加工屑の堆積

3.3.2 純鉄

以下,図 3.6 に純鉄の放電痕凹部体積を示す.また図 3.7 に純鉄の放電痕凸部 体積を示す.純鉄は、10~50µs までは平均体積の増加が少ない.また、10~ 50µs までで、平均体積が 100,000µm³以下であった. 最大凹部体積は、100µs に おける 410,690µm³であり、最小凹部体積は 10µs における 8,296µm³であった. これは、亜鉛に比べて小さかった.

また、放電痕凸部体積における各入力信号における平均体積は、凹部における平均体積と大きな差がなかった.最大凸部体積は、100µs における 398,390µm³であり、最小凸部体積は10µsにおける6,940µm³であった.凹部凸部 における体積で差が大きく生まれなかったのは、熱伝導率の関係から純鉄は加 工しにくいため、複数回の飛散における溶融・突沸による熱エネルギーの影響 が小さいためであると考える.



図 3.7 Fe: 放電痕凸部体積

3.3.3 銅

以下,図 3.8 に純鉄の放電痕凹部体積を示す.また図 3.9 に純鉄の放電痕凸部 体積を示す.銅は,純鉄と同様に10~50µsまで平均体積の増加が少ない.最大 凹部体積は、50µs における 213,025µm³であり,最小凹部体積は 10µs における 7,863µm³であった.これは,各種材料と比較して最も小さかった.また,他材 料においては入力信号 100µs で平均体積が非常に大きくなったが,銅において は,平均体積が 50µs から減少した.また,200,000µm³以上の体積を超えたのは, 50µs における最大凹部体積のみで,各種材料と比べて,放電痕体積が小さい. また,100µs において,平均体積が減少した理由としては,亜鉛の時と同様に, 加工層が凹部放電痕に堆積したことである.

また,放電痕凸部体積における各入力信号の平均体積は,純鉄と同様に,凹 部における平均体積と大きな差がなかった.最大凸部体積は,50µs における 241,481µm³であり,最小凸部体積は10µs における9,330µm³であった.凹部凸部 における体積で差が大きく生まれなかったのは,銅は,熱伝導率の関係から加 工しにくいため,複数回の飛散における溶融・突沸による熱エネルギーの影響 が小さいためであると考える.



図 3.8 Cu: 放電痕凹部体積



図 3.9 Cu: 放電痕凸部体積

3.3.4 チタン

以下,図 3.10 に純鉄の放電痕凹部体積を示す.また図 3.11 に純鉄の放電痕凸 部体積を示す. チタンは、10~50µs まで平均体積の増加はそこまで大きくなか った.しかし、100µs において、平均凹部体積が大きく上昇した. 最大凹部体 積は、100µs における 1,127,254µm³であり、最小凹部体積は 10µs における 6,455µm³であった.100µs における最大凹部体積は、各種材料の中で最も大き かった.しかし、100µs における平均が亜鉛より小さい理由は、第2章でも述べ た、加工屑が電極に付着し、中央部が隆起した放電痕によるものだと考える.

また,放電痕凸部体積における各入力信号の平均体積は,純鉄,銅と同様に, 凹部における平均体積と大きな差がなかった.しかし,100µs における平均凸 部体積は,100µs における平均凹部体積より大きい.これは,上記でも述べた 通り,加工屑が電極に付着し,隆起した放電痕によるものである.最大凸部体 積は,100µs における 1,078,673µm³であり,最小凸部体積は 10µs における 8,996µm³であった.凹部・凸部においても,各種材料の中で最も大きい体積で あったので,各種材料の中で最も加工しやすい材料はチタンであると考えられ る.



図 3.10 Ti: 放電痕凹部体積



図 3.11 Ti: 放電痕凸部体積

表面改質放電加工法による高アスペクト比穴内面への高機能化による先進的噴射ノズルの開発

3.4 実験結果:飛散回数と放電痕体積

以下,図 3.12 に、加工屑の飛散回数と放電痕凹部平均体積の関連性を示す. 1 回目の飛散では、すべての被加工物で凹部体積に差が無く、熱伝導率および 加工しやすさの関連性がない.これは、1 回目の飛散が水平方向に飛んでいる ため、深い凹部体積を得ていないからだと考える.また、1 回目の飛散は放電 による衝撃波によって飛散していると考察されていることから、熱エネルギー が関連していないため、各種材料に左右されないと考えられる.

2回目の飛散では、加工しやすさの観点から、チタンの凹部放電痕が最も高いと予想されたが、銅、純鉄よりも小さかった.また、亜鉛との体積に大きな差が生まれていなかった.これは、2回目の飛散まででは、充分な熱エネルギーが生まれておらず、溶融・突沸が発生していないため、熱伝導率および加工しやすさの影響を受けていないと考えられる.3回目の飛散では、銅よりもチタンの凹部体積の方が大きくなかったが、亜鉛は他3種類と比較して凹部体積が大きくなった.チタンの放電痕凹部体積がFeより小さい理由としては、チタンの中央部が盛り上がった放電痕が影響していると考える.

4回目の飛散は、亜鉛とチタンのみが発生した.この時の放電痕凹部体積が3 回目の飛散から大きく増加した.2・3回目の飛散が発生した際の、入力信号は 20、50µsであり、4回目の飛散が発生したのは100µsであった.このことから、 100µs以上のパルス幅から、熱伝導率および加工しやすさの影響を受けるので はないかと予想される.100µs以下では、アーク柱による熱エネルギーが発生 する時間が短く、材料特性が影響を与えないと考えられる.



図 3.12 飛散回数と放電痕凹部体積

3.5 実験結果:放電痕体積と熱伝導率

以下,図3.13に、入力信号10µsにおける凹部放電痕体積と加工しやすさの関係性、図3.14に、入力信号100µsにおける凹部放電痕体積と加工しやすさの関係性を示す.10µsにおける放電痕凹部体積は、亜鉛が最も大きい.チタンの放電痕体積よりも銅、純鉄の方が大きい.10µsでは、1回の飛散のみであるので、これは材料特性に左右されず、放電の衝撃波のみで飛散していると考察される.

対して、100µs における凹部放電痕体積は、大きい順に亜鉛、チタン、純鉄、 銅であった.これは、おおむね加工しやすさおよび熱伝導率における、加工し やすい順になっている.このことから、入力信号 100µs における複数回飛散の 発生から熱伝導率および加工しやすさの材料特性が放電痕体積に関係すると考 えられる.



図 3.13 10µs における凹部放電痕体積と加工しやすさの関係性



図 3.14 100µs における凹部放電痕体積と加工しやすさも関係性

3.6 第3章結言

本章では、熱伝導率の異なる純金属である亜鉛、純鉄、銅、チタンを利用し、 単発放電加工を行った.そして、レーザ顕微鏡を用いて加工後の放電痕を撮影 し、放電痕体積を解析ソフトで測定した.複数回の飛散による放電痕体積と被 加工物の熱伝導率との関連性について考察した.

本章で得られた内容を,以下にまとめる.

- (1) 放電痕体積が最大であったのは、チタンであり、最小が銅であった.
- (2)パルス幅が増加するともに、凹部放電痕体積は比例的に増加すると考えられたが、垂直方向の飛散により、加工層が凹部放電痕に堆積し、体積が減少する可能性があることが判明した.
- (3) 飛散回数が1回の放電痕体積は,熱伝導率および加工しやすさに左右されないと考察された.1回目の飛散は,放電による衝撃波によって水平方向に飛散していると予想されるため,熱エネルギーが関係しないと考察された.
- (4)4回目の飛散が発生する入力信号 100µs 以降で,熱伝導率および加工しやす さの影響を受けると予想された.100µs 以降でアーク柱による熱エネルギー が,溶融・突沸をが活発に発生させる程度まで上昇すると考えられる.した がって,放電痕体積に熱伝導率および加工しやすさといった材料特性が影響 を与えるのは100µs 以降であると考えることができる.

以上から、本章では放電痕体積の解析ソフトで計測し、複数回の飛散における 放電痕体積と熱伝導率の関係性を調査し、加工屑除去メカニズムの考察を行った.

第4章 両極性パルスが加工に及ぼす影響

4.1 諸言

本研究において、単パルス波形による単発放電加工の実験を行った.そこで、 複数回の飛散の発生を確認し、その飛散タイミングおよび放電痕体積の計測を 行った.これにより、単極性パルスにおける放電加工メカニズムの考察を行こ とができた.しかし、両極性パルスを用いた単発放電加工における加工屑飛散 の直接観察は行われていない.また、両極性パルスによる放電痕の観察も行わ れてない.そこで、本章では、両極性パルスが単発放電加工に対してどのよう な影響を与えるのかを調査する.

4.2 実験条件

4.2.1 実験装置概要

図 4.1 にバイポーラ電源を用いた実験装置の概要を示す.



図 4.1 実験装置概要図

表面改質放電加工法による高アスペクト比穴内面への高機能化による先進的噴射ノズルの開発

4.2.2 両極性パルス入力

波形入力の概要を図 4.2 に示す. バイポーラ電源から抵抗を介し流れた電流 は,直接被加工物に流れる.ファンクションジェネレータを用いて,両極背パ ルス信号を入力することにより,回路にパルス波の電流が流れる.また,回路 内の電流および電圧の変位,ファンクションジェネレータから入力された信号 をオシロスコープによって観察を行う.



図 4.2 波形入力概要図

以下に,(1)バイポーラ電源,(2)ファンクションジェネレータの仕様を示す.オ シロスコープは第2章で使用したものと同様の物である. (1) バイポーラ電源



図 4.3 に使用したバイポーラ電源を示す,表 4.1 にその仕様を示す.

図 4.3 バイポーラ電源

表 4.1 🌙	バイ	ポー	ラ	電源(の仕樹	É
---------	----	----	---	-----	-----	---

モデル	HSA 4052(NF)
最大電圧	±150V(300Vp-p)
最大電流	2Ams, 5.66Ap-p
消費電力	700W/950VA
周波数特性	500kHz

(2) ファンクションジェネレータ



図 4.4 ファンクションジェネレータ

表 4.2 ファンクションジェネレータの仕様

モデル	WF1973(NF)	
最大出力電圧	20Vp-p/開放, 10Vp-p/50Ω	
最高周波数	30MHz(正弦波), 15MHz(方形波, パルス)	
発振モード	連続,変調,スイープ, バースト,シーケンス	
周波数確度	±3ppm+2pHz	
デューティ設定範囲	0.0170%~99.9830%(分解能0.0001%)	

4.2.2 放電条件・加工条件

放電加工条件,撮影条件を表4.3に示す.撮影条件は,第2章におけるものと 同様である.本実験では,電極に直径 0.1mmのタングステン,被加工物に亜鉛 を使用した.また,ファンクションジェネレータを利用して 100µsの両極性パ ルス信号を入力することによってパルス幅を設定した.回路には10Ωの抵抗を 用いた.極間距離は,電極と被加工物との電気的な接触を基準とし,電極側に 設置したZステージを上昇させることによって5µmに設定した.被加工物には 加工油を付着させ,油中での放電加工を行った.また,ハイスピードマイクロ スコープを利用して撮影し,加工層の飛散,現象を観察した.抵抗10Ω-入力信 号 200µs,デューティ比1:1の条件下において,単発放電加工を行い,加工層飛 散が発生しているものをデータとして示す.

電源電圧/放電電流	200 [V]/40[A]
パルス幅	200[µs]
電極	W(φ0.1)
デューティ比	1:1
被加工物	Zn
極間距離	2[µm]

表 4.3 放電加工条件

表 4.4 撮影条件

	加工屑除去
露光時間	1/900,000[s]
フレームレート	230,000[fps]
解像度	160×32[pixel]
カメラ倍率	imes 50

4.3 実験結果

本研究において、単極性パルスを利用した各種材料の直接観察により、加工 屑飛散タイミングおよび放電痕体積と熱伝導率の関係を考察した.しかし、両 極性パルスにおける加工屑除去飛散現象の直接観察は行われていない.そこで、 両極性パルスを入力した加工屑除去飛散現象の直接観察を行った.

図 4.5 に観察結果,図 4.6 に波形,図 4.7 に放電痕,表 4.5 に凹部・凸部放 電痕体積を示す. 両極性パルスによる単発放電加工は, 放電が発生しにくく, 200回の実験で4回しか発生しなかった.また、デューティ比の+側が大きい条 件で成功した回数が3回であった.よって、デューティ比は+側の比率を大き くすることで発生しやすくなると考える. 飛散現象の開始は、単極性パルスと 違い, 30µs ほど遅れて飛散が発生した.しかし,水平方向の飛散は発生せず, 爆発的な飛散が発生した後、微小な加工屑が湧き上がるように飛散した.飛散 現象は 200µs 以降も続いた.これは,油の影響であると考える.波形は,電圧 波形,入力信号,電流波形のすべてで,40µs付近で変化が見られた.また, 120us 付近で逆極性の波形を,示した.このことから,波形と加工屑飛散のタ イミングは両極性パルスにおいても関連性はあると考える. 放電痕に関しては, 200µs という大きなパルス幅であったが,放電痕体積は単極性パルスにおける 放電痕体積と比べて小さい. 放電痕の形は、両極性の放電加工が発生している ため,2 つの放電痕が混合したような形が形成された. したがって, 両極性パ ルスによる単発放電加工では、2つの放電痕が混ざったような複雑な形状の放 電痕が形成されると考える.


図 4.5 Zn 200µs 両極性パルスによる単発放電加工



図 4.6 Zn:波形

表面改質放電加工法による高アスペクト比穴内面への高機能化による先進的噴射ノズルの開発



図 4.7 Zn: 放電痕

表 4.5	両極性パルスにおける放電痕体積

凹部放電痕体積	39,705[µm³]
凸部放電痕体積	19,087[µm³]

4.4 第4章結言

本章では、200µsの両極性パルス信号による放電加工を行い、加工屑飛散除 去現象における加工屑の飛散方法を観察し、単極性パルス信号による単発放電 加工との違いを考察する.

本章で得られた内容を,以下にまとめる.

(1)両極性パルス信号における加工屑飛散の開始タイミングは、単極性パルス信号よりも遅れた.また、1回目の飛散は、水平方向ではなかった.

(2) デューティ比の+側の比率を大きくすることで、両極性の放電は発生しやす くなると考える.これは、逆極性の放電より、正極性の放電の方が発生しやす いからだと考える.

(3)観察結果より、爆発的飛散の後に、微小な加工屑が湧き上がるように飛散する様子が確認された.これは油中であることが原因と考える.

(4)波形と加工屑除去飛散現象の関連性はあると考える.また、両極性パルスを用いて、両極性の電圧・電流の印加が可能であることが分かった.

(5)放電痕体積は、単極性パルスによる放電痕体積よりも小さい.これは、逆極 性が印可されたことによる影響と考える.放電痕の形は、2つの放電痕が重な ったような形であった.これは、両極性パルスによる単発放電加工によって、 2回の加工が発生したことによる結果だと考える.

以上から、本章では 200µs の両極性パルス信号を用いて加工屑飛散除去現象の 観察を行った.

第5章 結論

5.1 本研究のまとめ

本研究では、2 つのハイスピードカメラを用いた観察装置を利用し、各種 材料における単発放電加工現象の直接観察および放電痕体積・加工屑飛散タイ ミング測定を行った.また、両極性パルス信号を利用した放電加工現象の直接 観察を行った.

(1)各種材料における単発放電加工の直接観察と飛散タイミングの計測

各種材料に対して、10~100µs のパルス信号を入力し、その際の飛散回数及び 飛散タイミングを計測した.その結果、各種材料における 1 回目の飛散は、全 ての材料で 13µs 付近を記録し、タイミングが安定していた.対して、2 回目以 降の飛散は、亜鉛、チタン、純鉄は等間隔的に複数回の飛散発生タイミングを 記録したが、銅は不規則なタイミングで複数回の飛散が発生していた.また、 入力信号が 100µs を超えると、複数回の飛散が発生する確率が高くなるため、2 回目以降の飛散タイミングを正確に計測するには、100µs 以降のパルス幅を入 力するべきだと考える.

(2)各種材料における放電痕体積と熱伝導率の関係

単発放電加工による放電痕を撮影し、画像解析ソフトを利用して放電痕の凹 部・凸部の体積を計測した.また、放電痕体積と熱伝導率との関連性を調査し た.その結果、チタンが最も大きい体積を、銅が最も小さい体積を計測した. これは熱伝導率および加工しやすさの観点から考えると妥当な結果であった. しかし、入力信号 10µ による 1回の飛散による放電痕体積では、各種材料の材 料特性との関連性が見られなかった.これは、1回目の飛散は、放電の衝撃波 による飛散であると予想されるため、熱エネルギーが影響していないためと考 える.対して、100µs では熱伝導率との関連性が顕著に表れたため、アーク柱 による熱エネルギーが大きくなり、溶融・突沸が顕著に発生していると考える. (3) 両極性パルス信号による単発放電

バイポーラ電源とファンクションジェネレータを用いた装置で、両極性パルス による単発放電加工の直接観察を試みた.その結果、両極性の放電が発生し、 直接観察を行うことができた.両極性の放電加工により、放電痕が2つ重なっ たような複雑な形状を示した.また、飛散のタイミングは単極性パルスによる 単発放電加工の時に比べ、遅かった.加えて、1回目の飛散は水平方向に発生 せず、爆発的な飛散を見せた.200µs 以降にも加工屑が飛散しているように見 えるが、これは油中であるという影響があると考える.デューティ比は正極性 側の比率を大きくすると、両極性の放電加工が発生しやすくなる.これは、逆 極性の放電よりも、正極性の放電の方が発生しやすいからである.

5.2 今後の展開

(1) 各種材料における両極性パルス信号による単発放電加工の調査

本実験において, 亜鉛を用いた両極性パルス信号による実験を行った. しかし, 他の材料における両極性における単発放電加工を行っていないため, それらの直接観察を行う必要があると考える.

(2)気中での両極性パルス信号による単発放電加工現象の直接観察

本実験では、油中での単発放電加工現象の直接観察であった.そのため、 アーク柱の発光を観察できていないため、気中での両極性パルス信号によ る単発放電加工現象の直接観察を行う必要がある.

(3)シュリーレン法

超短パルス放電実験から,加工屑飛散除去現象の1回目が被加工物に対し て水平に飛散することが確認された.この結果をもとにシュリーレン法を 用いて放電加工現象を観察し,流体の密度変化を捉えることで,電極と被 加工物の周りの変化を観察することができる.シュリーレン法を利用した 観察装置を組み,直接観察することで,加工屑飛散除去のメカニズムの解 明につながると考える.

表面改質放電加工法による高アスペクト比穴内面への高機能化による先進的噴射ノズルの開発

参考文献

(1) 齋藤長男,毛利尚武,高鷲民生,古谷政典:放電加工技術-基礎から将来展 望まで-,日刊工業新聞社

(2) 齋藤長男: B. 放電加工, 電学誌(1987), p1123-1124

(3) 国枝正典: 放電加工の基礎と将来展望, 精密工学会誌(2015), p58-62

(4) 吉田政弘,国枝正典:単発放電における加工屑の飛散の観察,電気加工学会誌(1996), p27-36

(5) 谷貴幸, 辻田容希, 後藤啓光, 毛利尚武: 気中単発放電における材料除去過程の観察, 電気加工学会全国大会(2017)講演論文集, p83-88

(6)篠原真由,国枝正典:単発放電加工における電流波形が加工屑除去のタイミングに及ぼす影響の観察,電気加工学会全国大会(2018), p31-34

(7)池田光和:放電加工における熱伝導と被加工物の溶融深さ,電気加工学会誌(1969), p1-22