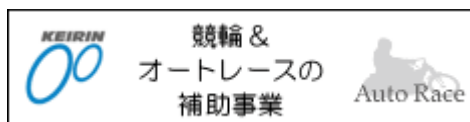


財団法人 JKA 平成 30 年度
放電柱の滑り現象を応用した表面改質放電加工法に
よる材料表面の高機能化に関する補助事業
報告書

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	3
1.1 放電加工法	3
1.1.1 はじめに	3
1.1.2 放電加工の原理	4
1.1.3 放電表面改質法	5
1.1.4 プラズマの滑りとエネルギー	6
1.2 放電痕の形成と波形	7
1.3 本研究の目的	8
1.3.1 本研究の背景	8
1.3.2 本研究の目的	8
1.4 本論文の構成	8
第 2 章 高速回転電極による単発放電	9
2.1 放電加工機	9
2.1.1 放電加工機	9
2.1.2 トランジスタ回路	16
2.2 単発放電	20
2.2.1 実験条件および実験方法	20
2.2.2 電極の極性による違い	21
2.2.3 熱伝導率	23
2.2.4 放電痕の幅	24
2.2.5 断面曲線	24
2.3 まとめ	27
第 3 章 高速回転電極による連続放電	28
3.1 緒言	28
3.2 制御システム	28
3.3 連続放電	32
3.3.1 実験条件および実験方法	32
3.3.2 電極の極性による違い	33

3.3.3	断面曲線	34
3.3.4	休止時間の拡大	35
3.3.5	極性の違いによる SEM 画像	36
3.3.6	NAK55, Cu の定性分析および定量分析	37
3.3.7	加工時間の増大	39
3.3.8	休止時間を拡大した NAK55 の定量分析	40
3.4	まとめ	43
第 4 章	結論	44
4.1	本研究のまとめ	44
4.2	今後の課題	44
参考文献		45

第1章 序論

1.1 放電加工法

1.1.1 はじめに

近年，数あるさまざまな材料加工技術の中で，放電加工が特に精密加工の分野で用いられている．その理由は，放電エネルギーによって加工していくので，導電性のあるものであれば超硬合金，焼入鋼など硬さを気にせず高精度の加工が比較的容易になり，複雑な形状の穴あけ，型彫りが容易になったためである．その一方で，除去加工が主体であった放電加工において，電極材料を被加工物へ移行堆積させる放電表面改質法が新しい加工法として提案されている^[1]．堆積加工が可能になることで，被加工物にない特定の性質を付加し，材料を高強度，耐食性，耐摩耗性，耐高温性に優れさせることが可能になる．

しかし欠点として，加工速度の遅さや電極の消耗，仕上げ面が粗いといったことがある．さらに，加工現象やメカニズムが不明な点が多く，実用化には至っていない．

1.1.2 放電加工の原理

以下に放電加工の原理を簡単に説明する．図 1.1 は放電加工の原理を模型的に示したものである．

(1) 電極と被加工物の極間

電極に電圧を加え，電極を降下させる．電極と被加工物との極間距離が数[μm]まで近づきプラズマが発生する．

(2) プラズマによる融解および気化膨張

プラズマは，非常に電流密度の高い電子の流れとなっており，電子の流れはここで熱となり，融解点の高い金属でも蒸発もしくは融解するほどの高温になる．このとき，電極側も同時に加熱される．周辺の加工液はプラズマの熱的作用で急激に気化膨張し，溶けた被加工物と電極との間に大きな圧力をおよぼす．

(3) 加工屑の発生・除去と気化爆発

電源からの電圧の供給を止めることでプラズマは消滅し，金属の溶けた部分は冷却されて小さな加工屑となり，放電による熱的作用と加工液の気化爆発により除去される．このときに，除去された部分が放電痕となる．一方，放電痕の端の気化爆発で吹き飛ばされなかった部分は，被加工物および電極に残る．

(4) 加工液と絶縁回復

加工液は極間の絶縁，極間の冷却，熔融部の除去，加工屑の排出，絶縁の回復の多くの役割を持っている[2]．

実際の放電加工は，

電圧印加→絶縁破壊→放電パルス電流→絶縁回復→電圧印加
が繰り返されて成り立つ．

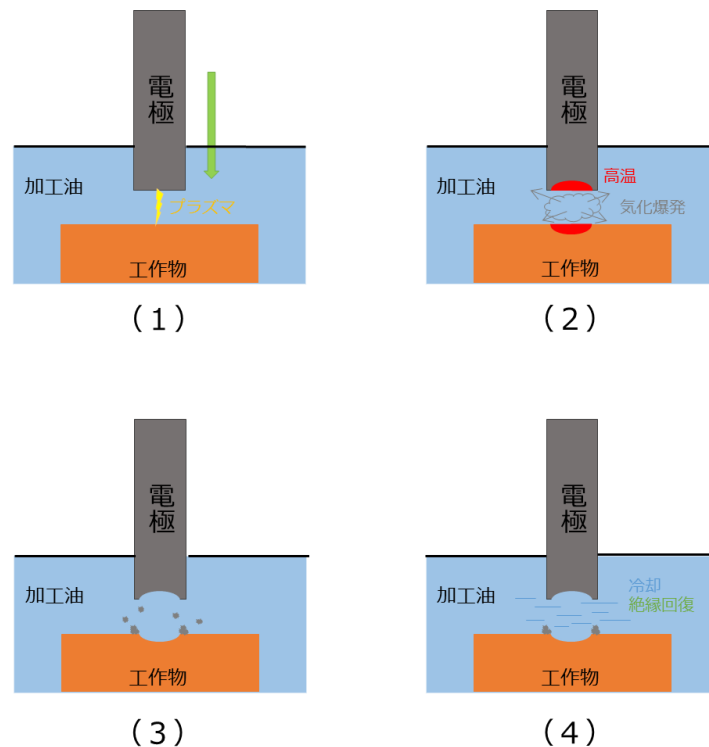


図 1.1 放電加工の加工工程

1.1.3 放電表面改質法

近年，材料の硬さに関係なく加工できることから，母材材料にない特定の性質を付加し，材料の価値を高める表面改質が行われている．また，放電加工法の分野において圧粉体電極や焼結体電極などを用い，被加工物に対して電極材料を移行堆積させる技術として実用化されている．放電表面改質法は，材料表面そのものえお異種粒子の添加により改質する方法と目的に応じた性質を持つ材料を被覆する方法があり，放電加工は後者に含まれる^[3]．しかし課題もあり，

- (1) 加工面が粗い．
- (2) 微細加工への適用が厳しい．
- (3) 加工現象やメカニズムが解明されていない．

といったことが挙げられる．

1.1.4 プラズマの滑りとエネルギー

これまで、電極と被加工物に相対速度を加えると、陽極点と陰極点でプラズマが滑ることが報告されている^[4]。陽極点側でプラズマは滑りづらく、陰極点側で滑りやすいことも報告されている。図 1.2 に本研究で使用する実験装置で放電を実施した際の放電柱の滑りと放電痕の概略を示す。

また、放電の性質として陽極側で放電が膨張し、単位面積当たりのエネルギー配分は陰極側で小さく、陽極側で大きい。

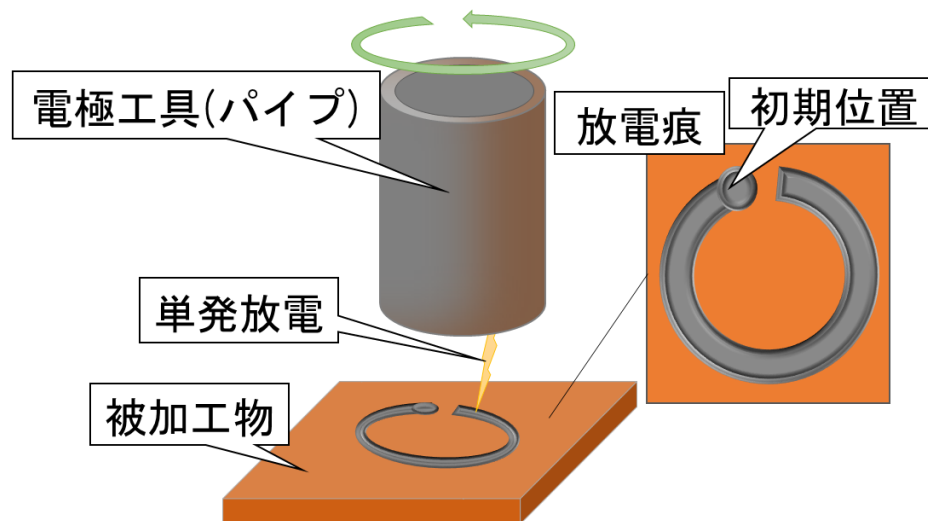


図 1.2 プラズマの滑りと放電痕

1.2 放電痕の形成と波形

放電の発生により，電極と被加工物はどちらも消耗し，電極を高速回転させているため被加工物側にプラズマが通った形でほぼ円形の底の浅い放電痕が形成される．放電痕は放電による熱的作用と加工液の気化爆発によって熔融材料を除去することで形成される．一発の放電によって加工物に形成される放電痕の大きさは材料の物性や加工時の電気条件によって異なる⁵⁾．

図 1.3 に典型的な放電時の極間の電圧・電流波形を示す．放電発生時に極間に流れる電流値をピーク電流 i_e [A]，放電が発生している時間はパルス幅 t_e [ms] と呼ばれる．一般的に，単発放電痕の大きさは，パルス幅とピーク電流に依存する．

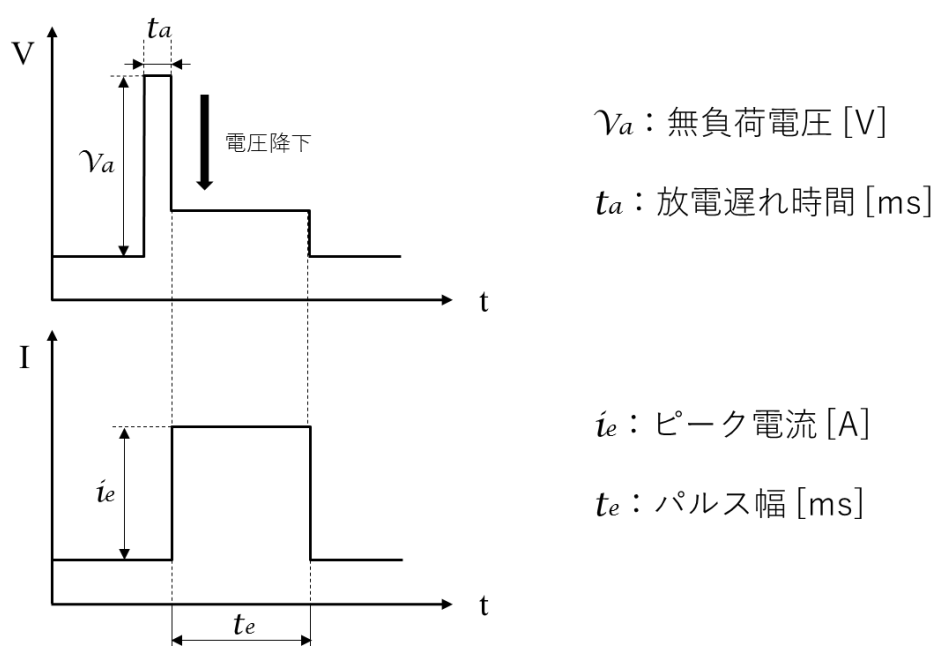


図 1.3 放電時の電圧・電流波形

1.3 本研究の目的

1.3.1 本研究の背景

除去加工が主体であった放電加工において、電極材料を被加工物へ移行堆積させる放電表面改質法が新しい加工法として提案されている^[1]。堆積加工が可能となれば、母材材料にない特定の性質を付加し、高強度、耐食性を得ることができる。これまで、パイプ型の銅電極を用い、プラズマの滑り現象が表面改質や堆積現象へおよぼす影響を調査した^[7]。鋼材（NAK55）に対して実施した結果、表面は除去加工となった。

1.3.2 本研究の目的

本研究では、材料を高強度、耐食性、耐摩耗性、耐高温性に優れさせることが可能になるため、電極材料を被加工物に移行堆積が可能かを調査した。プラズマの滑り現象によって移行堆積が起これば、電極を動かすことによって堆積加工が可能となる。また、電極や被加工物の材料の組み合わせを変えることで、単発放電におけるプラズマの滑りの影響によって被加工物表面の除去・堆積変化が得られるのかを調査した。さらに、連続放電における影響を調査し、極性や材料の違いが放電痕の形状や断面曲線へおよぼす影響について調査した。

1.4 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 4 章で構成されており、本論文の構成を示す。

第 1 章では、放電加工の原理、本研究の背景および目的を述べた。

第 2 章では、高速回転電極による単発放電を行い、得られた結果を示し考察を述べる。

第 3 章では高速回転電極による連続放電、SEM による元素分析を行い、得られた結果を示し考察を述べる。

第 4 章では、本研究の結論を述べ、今後の課題について考察する。

第2章 高速回転電極による単発放電

2.1 放電加工機

2.1.1 放電加工機

本研究で使用する実験装置の概略を図 2.1 に示す。

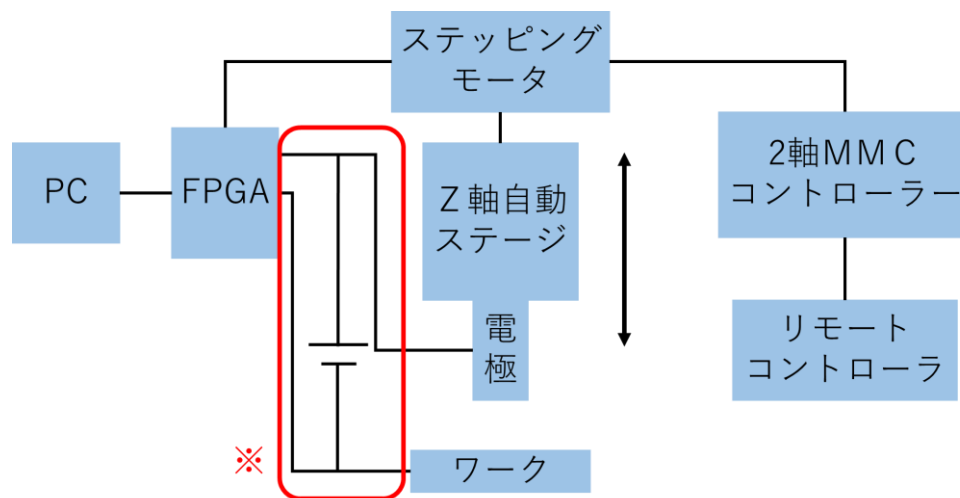


図 2.1 実験装置概略

※の電気回路については，2.1.2 項と 3.2 項にて記載する。

本研究で使用する放電加工機を図 2.2 に示す。本加工機は，粗動と微動の 2 つのステージによって Z 軸を制御している。それぞれのステージの分解能は 4 [μm]，1 [μm]であるため，粗動のステージは 4 [μm]，微動のステージは 1 [μm]の微細制御が可能である。粗動のステージは FPGA によって，微細のステージは中央精機社製のリモートコントローラと 2 軸 MMC コントローラによって制御している。単発放電時は 2 軸 MMC コントローラによって手動で制御し，連続放電時の主軸はサーボ制御とした。加工槽はアクリル製の箱型のものを使用し，中心には被加工物を固定するための精密デバイスを設置している。回転動力部に

ナカニシ社製の高速スピンドル(EM-3060)を用いて、2つの磁気歯車によってパイプ型電極を高速回転させた。また、循環器によって油の抽出と吸引を同時に行い、油を流動させている。

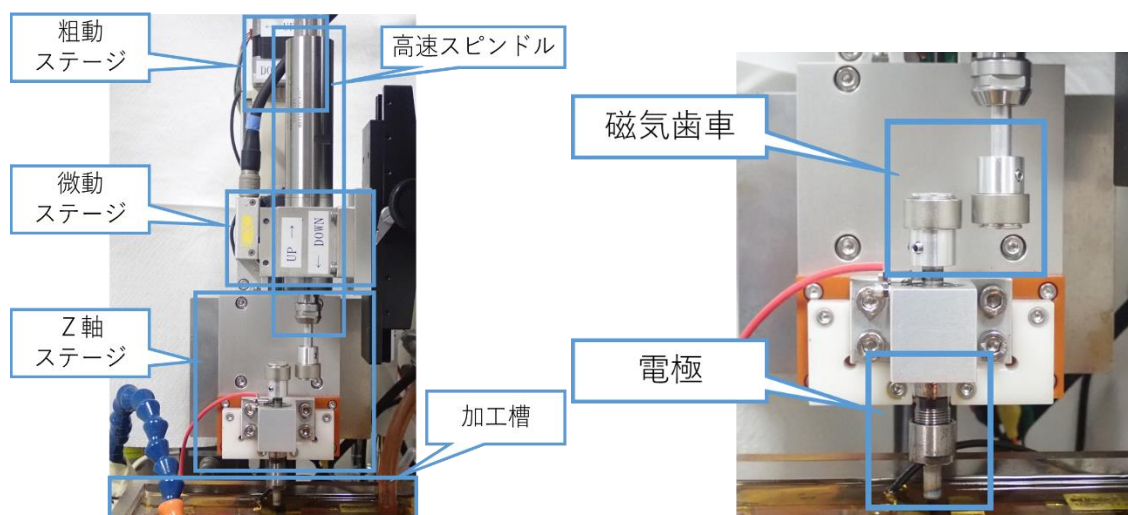


図 2.2 放電加工機

以下に、(1)パイプ型電極、(2)Z 軸ステージ、(3)高速スピンドル、(4)循環器の仕様を示す。

(1) パイプ型電極

本研究では、電極にパイプ型の Cu 電極とチタン電極を使用し、これを高速回転させて放電加工を行う。使用したパイプ型の Cu 電極、チタン電極を図 2.3、図 2.4 に示し、その使用を表 2.1、表 2.2 に示す。

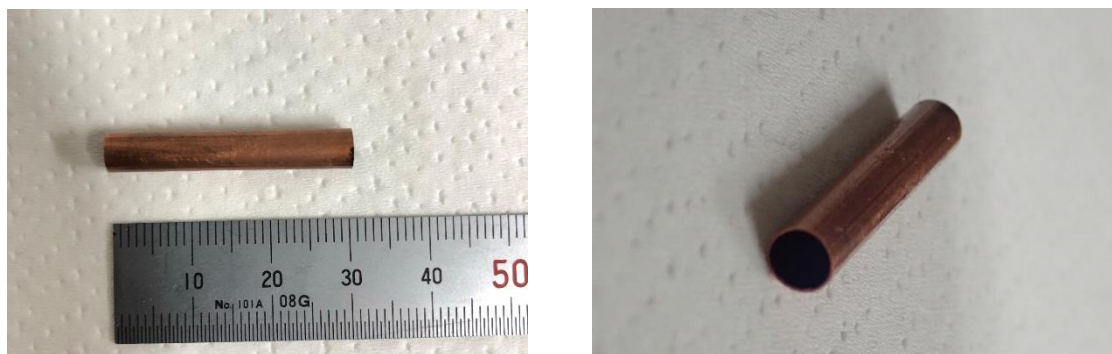


図 2.3 パイプ型 Cu 電極

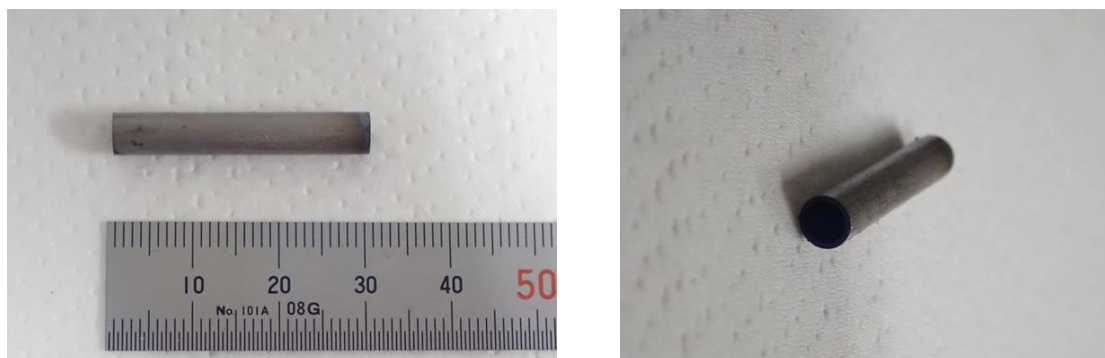


図 2.4 パイプ型チタン電極

表 2.1 パイプ型 Cu 電極の仕様

全長 [mm]	30
直径 [mm]	5
肉厚 [mm]	0.2

表 2.2 パイプ型チタン電極の仕様

全長 [mm]	30
直径 [mm]	5.1
肉厚 [mm]	0.5

(2) Z 軸ステージ

本研究で使用した Z 軸ステージを制御する 2 つのステージのうち，粗動のステージの仕様を表 2.3 に，微動のステージの仕様を表 2.4 に示す．

表 2.3 粗動ステージの仕様

ステージ	
移動量 [mm]	150
ステッピングモータ	
モデル	PK544-B
静止角度誤差 [min]	± 3

表 2.4 微動ステージの仕様

ステージ	
モデル	MMU-60X
移動量 [mm]	± 10
分解能 [μm / パルス]	1
送りネジリード [mm]	0.5
位置決め精度 [mm]	0.02
繰り返し精度 [mm]	0.001
ステッピングモータ	
モデル	PH553-NB (Orientalmotor)
静止角度誤差 [min]	± 5

(3) 高速スピンドル

本研究で回転動力部に使用した高速スピンドルを図 2.5 に示し、その仕様を表 2.5 に示す。また、図 2.6 に示す高速スピンドルを制御する専用のコントロールユニットを用いることで、5000～60000 の回転数を容易に設定することができる。図 2.7 に示すように、モータの軸とベアリングで支持した軸にそれぞれ磁気歯車を設置することで動力の伝達を行い、電極を高速回転させる。



図 2.5 高速スピンドル

表 2.5 高速スピンドルの仕様

型式	ナカニシ社製 EM-3060
回転速度 [rpm]	5000 ～ 60000
最大出力 [W]	350
スピンドル精度 [μm]	1



図 2.6 コントロールユニット



外径 [mm]	16
磁極数	12

図 2.7 磁気歯車

(4) 循環器

本研究で使用した静電浄油機を図 2.8 に示し，その仕様を表 2.6 に示す．



図 2.8 静電浄油機

表 2.6 静電浄油機の仕様

モデル		EDC-R3P（株式会社クリーンテック）
消費電力 [W]		200
寸法（L×W×H）[mm]		245×340×530
重量 [kg]		20
浄油対象油量	ISO 粘度 / 32 [ℓ]	400
	46 [ℓ]	280
	56 [ℓ]	230
	68 [ℓ]	190

2.1.2 トランジスタ回路

図 2.1 の※における，本研究で使用するトランジスタ回路の概略を図 2.9 に示す．この回路は，単発放電を実施する際に使用する．また，トランジスタ回路で使した n-MosFET の仕様を表 2.7 に示す．

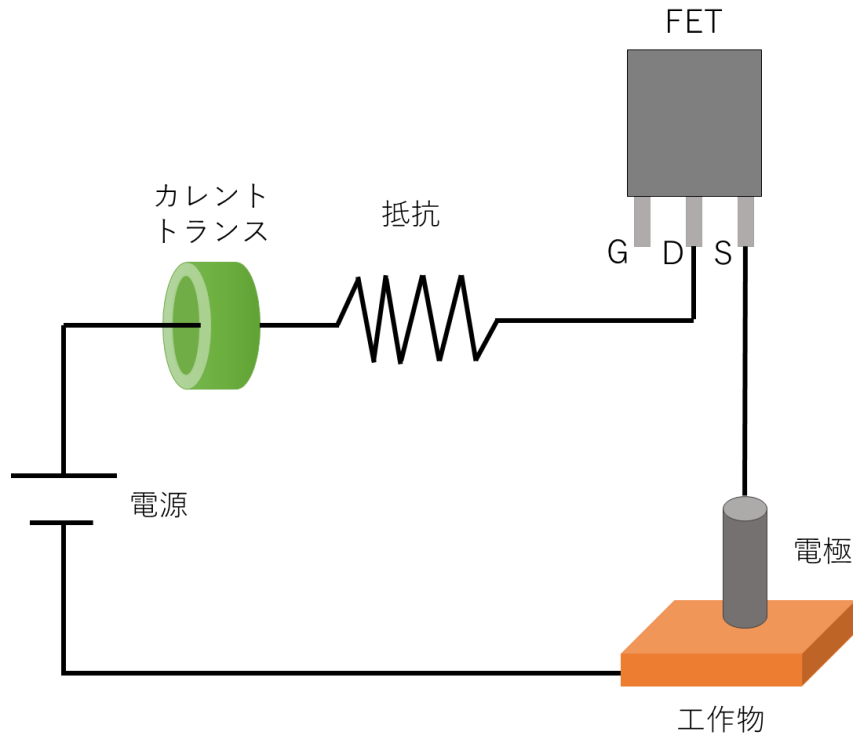


図 2.9 トランジスタ回路概略

表 2.7 n-MosFET の仕様

モデル	K3192
定格電流 [A]	30
ターンオン時間 [nsec]	45
ターンオフ時間 [nsec]	330

FET (Field Effect Transistor)は，電源から送られた電圧をスイッチングする素子である．本研究では，トランジスタ回路のみの電気回路で単発放電を行う．これらのトランジスタ回路は，FPGA (Field Programmable Gate Array)を

用いて、PC の制御プログラム(LabVIEW)で制御する。

FPGA とは、プログラマブルロジックデバイス的一种であり、製造後にユーザの手元で内部論理回路を定義・変更することができる集積回路である。プログラマブルロジックデバイスの中で、特に再書き換え可能であるものを FPGA と呼ぶ。

本研究で仕様した、NATIONAL INSTRUMENT 社製の NI cRIO-9024 を図 2.10 に示す。これはデジタル信号、アナログ信号の入出力が可能である。



図 2.10 NI cRIO-9024

制御プログラム(LabVIEW)によって、単発放電を実施するためのトランジスタ回路を制御する。

まず、単発放電の際の LabVIEW のパネルを図 2.11 に示し、そのブロックダイアグラムを図 2.12 に示す。また、単発放電の概略を図 2.13 に示す。

パルス幅は単発放電時間を意味するため、任意の値を設定する。制御プログラムを開始すると、電圧を常にかけ続け、同時に微細のステッピングモータと、これを制御する 2 軸 MMC コントローラーとリモートコントローラによって Z 軸ステージを一定送り量で高速回転電極を降下させる。極間距離が狭まると単発放電が発生し、その際オシロスコープで放電波形を読み取り、設定したパルス幅分だけ単発放電を実施した後、制御プログラムを停止させる。

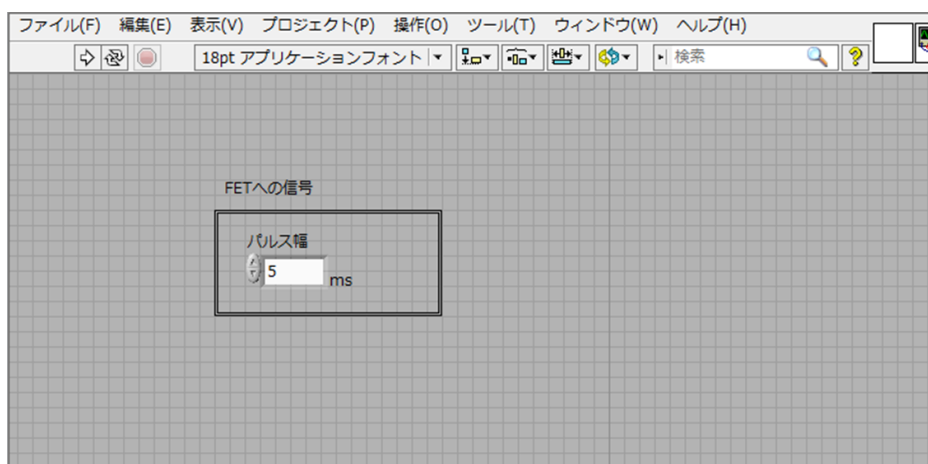


図 2.11 単発放電時の LabVIEW フロントパネル

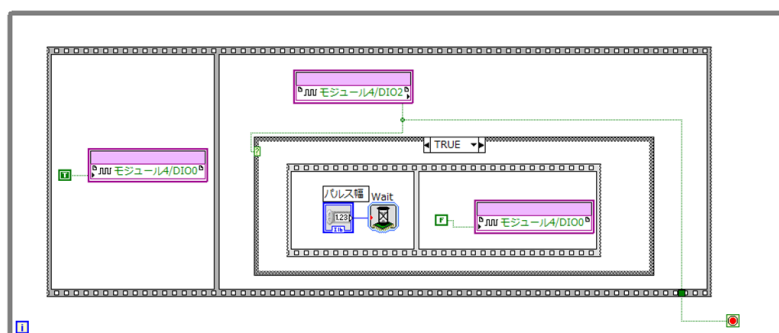


図 2.12 単発放電時の LabVIEW ブロックダイアグラム

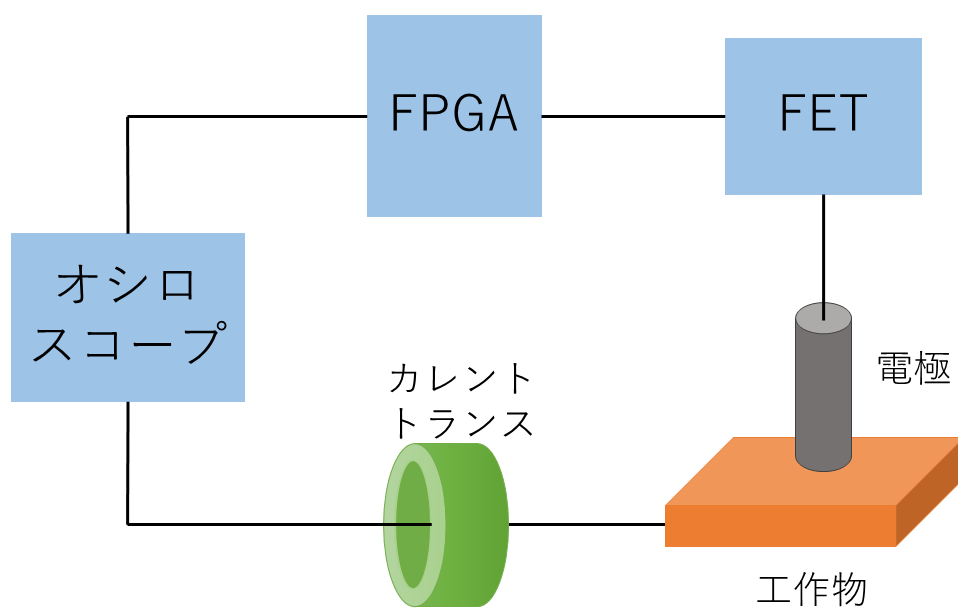


図 2.13 単発放電の概略図

2.2 単発放電

2.2.1 実験条件および実験方法

単発放電を実施した際に被加工物として使用した NAK55 と Cu をそれぞれ図 2.14 と図 2.15 に示し、NAK55 組成を表 2.8 に示す。また、単発放電の実験条件を表 2.9 に示す。電極は 2.1.1 項(1)で記載したパイプ型 Cu 電極、チタン電極を用いた。

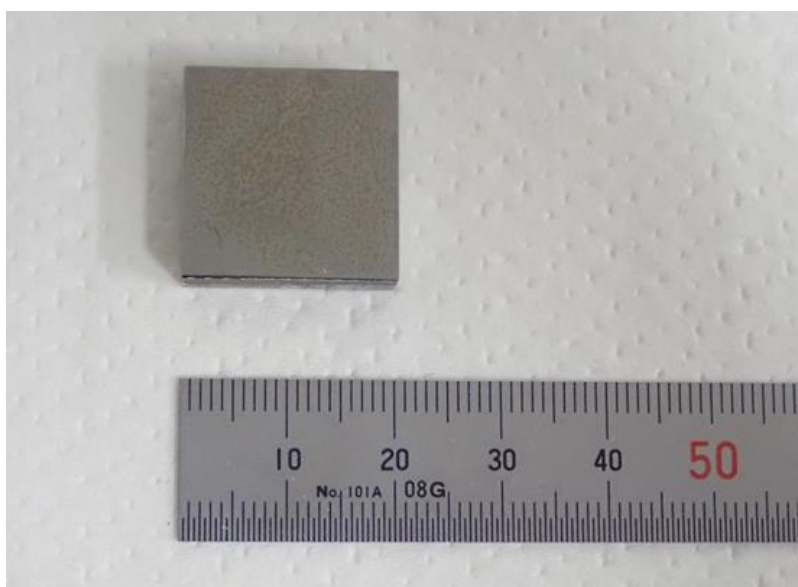


図 2.14 NAK55

表 2.8 NAK55 の組成

	C [wt%]	Si [wt%]	Ni [wt%]	Cu [wt%]	Mo [wt%]	Al [wt%]
NAK55	0.15	0.3	3.0	1.0	0.3	1.0

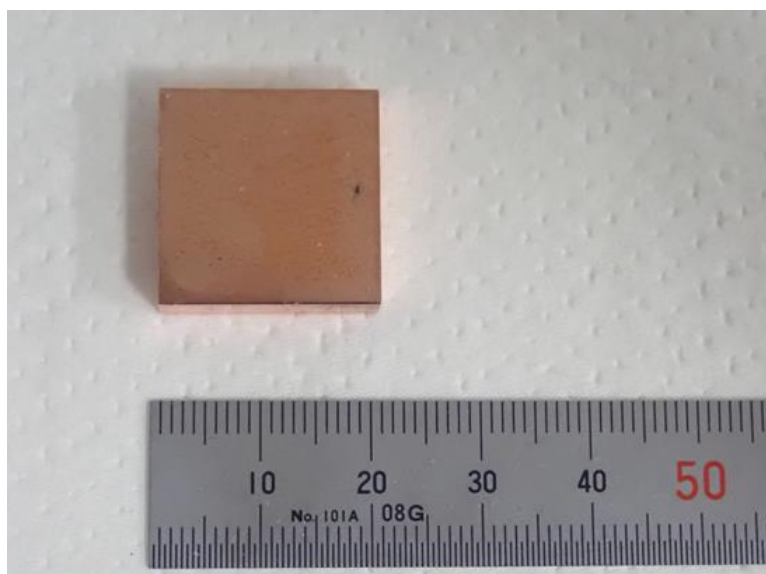


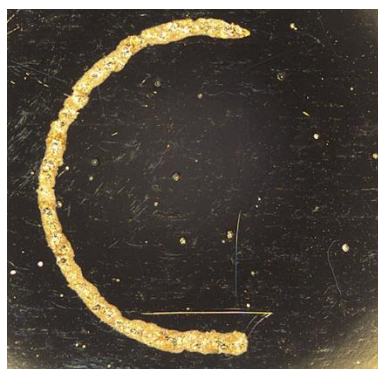
図 2.15 Cu

表 2.9 単発放電時の加工条件

極性	電極	+	-
	被加工物	-	+
電源電圧 [V]		200	
放電電流 [A]		5.5	
抵抗値 [Ω]		33	
パルス幅 [ms]		5	
回転数 [rpm]		9000	

2.2.2 電極の極性による違い

ここでは、電極の極性がプラズマの滑りにおよぼす影響を調査する．表 2.9 の加工条件でパイプ型 Cu 電極，チタン電極を用いて被加工物 NAK55 と Cu に対して，電極側と被加工物の極性を変えて単発放電を実施した．得られた放電痕を図 2.16，図 2.17，図 2.18，図 2.19 に示す．

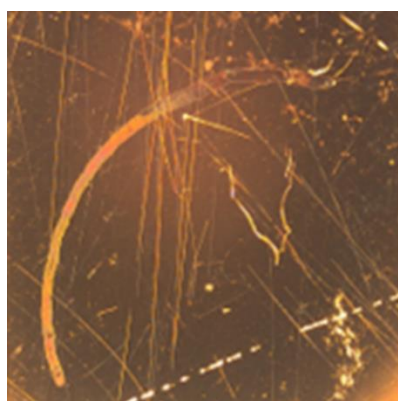


陰極

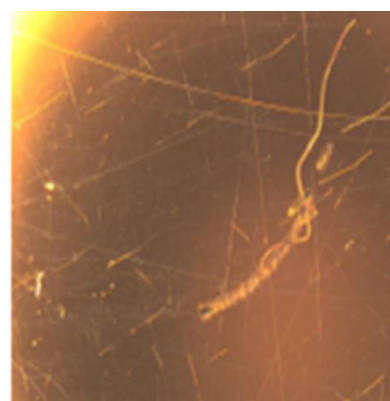


陽極 5mm

図 2.16 Cu 電極で加工後の NAK55

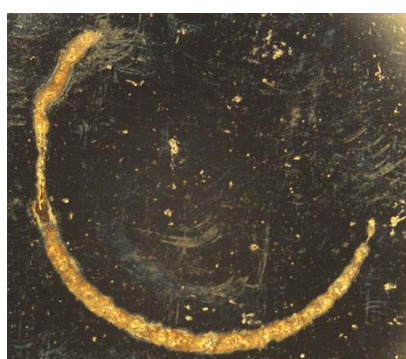


陰極



陽極 5mm

図 2.17 Cu 電極で加工後の Cu



陰極



陽極 5mm

図 2.18 チタン電極で加工後の NAK55

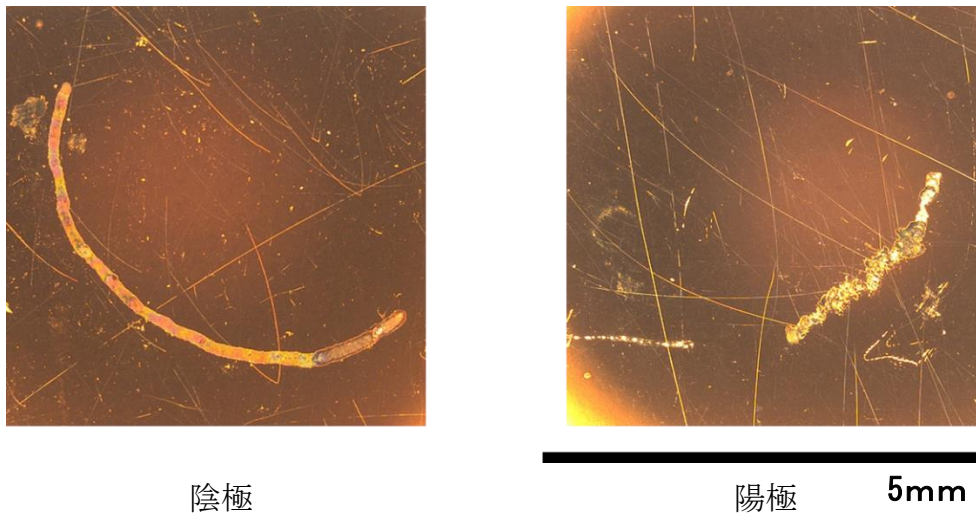


図 2.19 チタン電極で加工後の Cu

図 2.16 から図 2.19 は被加工物側の極性を示している．被加工物側が陰極極性の場合，放電痕は陽極極性に比べて長く形成されている．プラズマは陰極側で走りまわるといわれており，この影響によるものと考えられる．また，電極と被加工物の材料組み合わせによる放電痕の長さへの影響はない．

2.2.3 熱伝導率

ここで，チタン，NAK55,Cu の熱伝導率について表 2.10 に示す．

表 2.10 各材料の熱伝導率

	チタン	NAK55	Cu
熱伝導率 [W/mK]	17	42.7	398
融点[°C]	1668	1538	1085

表 2.10 のようにチタンは最も熱伝導率が小さく，Cu は最も熱伝導率が大きくなっている．放電加工において熱伝導率が高い材料は電極消耗が少なく，熱伝導率が小さい材料は電極消耗が多いといわれている．

2.2.4 放電痕の幅

ここでは電極と被加工物の材料組み合わせの違いが放電痕の幅におよぼす影響を調査した．表 2.11 に各条件での放電痕形状の寸法情報を示す．

表 2.11 放電痕形状の寸法情報

電極	Cu φ 5,肉厚 0.2mm				Ti φ 5.1, 肉厚 0.5mm			
被加工物	NAK55		Cu		NAK55		Cu	
極性	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)
幅 [mm]	0.25	0.15	0.15	0.1	0.3	0.4	0.2	0.25

表 2.11 は被加工物側の極性を示している．Cu を電極に用いた場合，被加工物が NAK55 と Cu では放電痕の幅に違いがあった．これは，熱伝導率が Cu の方が高く，熱が逃げたためであると考えられる．また，電極に Cu を用いた場合，陽極極性で幅が狭く，チタン電極では広くなる．これは，チタンの熱伝導率が NAK55, Cu より低く，放電が陽極側において膨張するためであると考えられる．

2.2.5 断面曲線

2.2.2 項では，図 2.16 から図 2.19 で NAK55 と Cu における各電極極性の放電痕を示した．ここでは，NAK55, Cu における各電極極性の放電痕に対して，東京精密社製の表面粗さ計(Surfcom130A)を用いて断面曲線を計測した．その際得られた断面曲線をそれぞれ図 2.20，図 2.21，図 2.22，図 2.23 に示す．

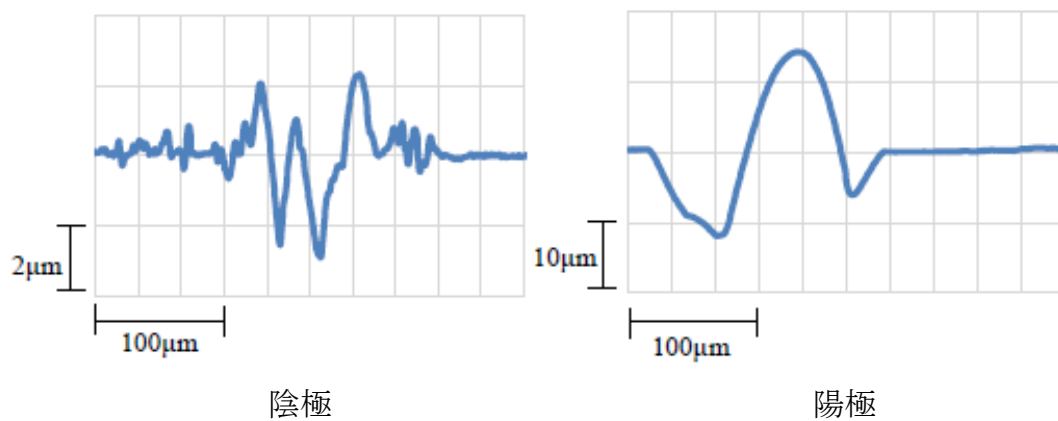


図 2.20 Cu 電極と NAK55

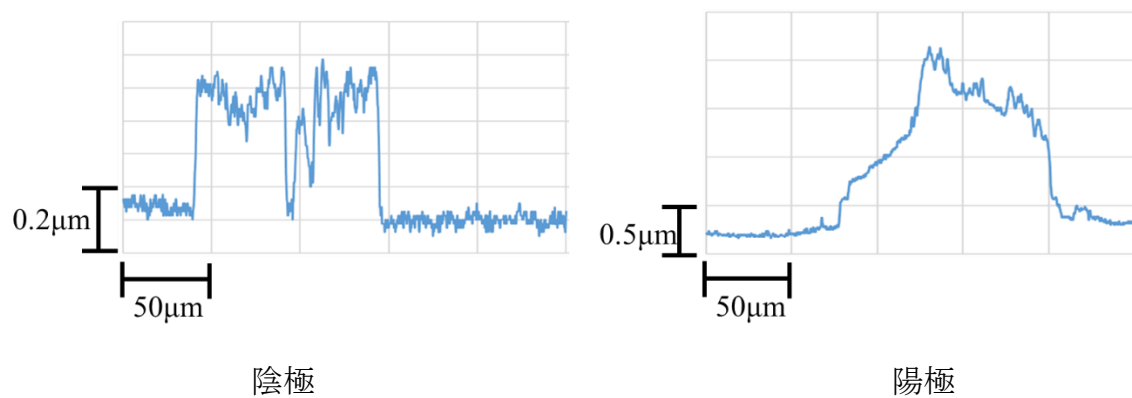


図 2.21 Cu 電極と Cu

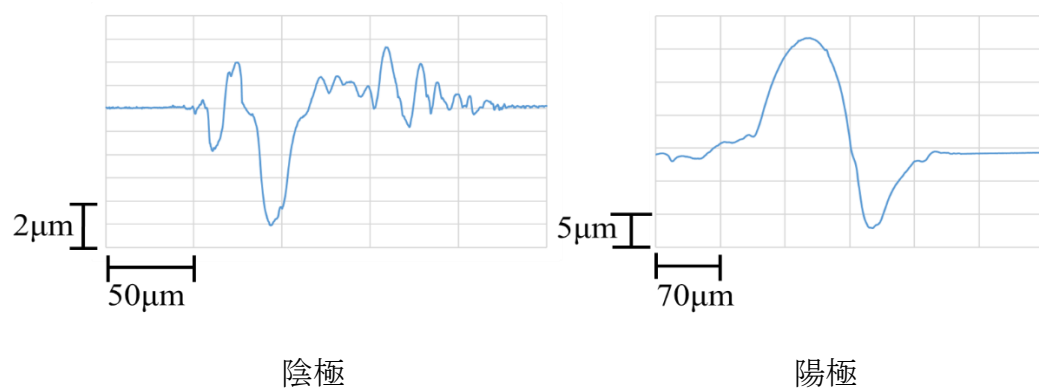


図 2.22 チタン電極と NAK55

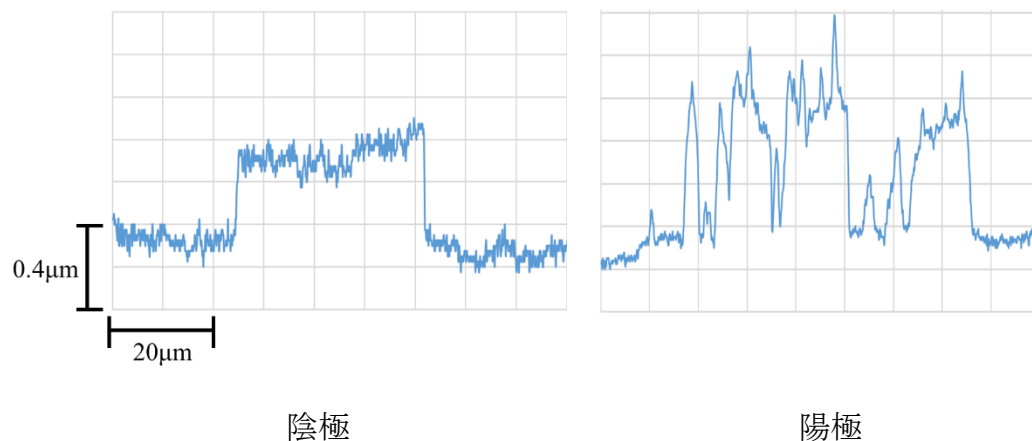


図 2.23 チタン電極と Cu

図 2.20, 図 2.21, 図 2.22, 図 2.23 は被加工物側の極性を示しており, 1 マスの大きさをそれぞれグラフ横のバーで示す. この結果から, Cu 電極と NAK55 の場合は, 両極性で除去加工されたことが確認でき, Cu の場合は両極性とも堆積を各にすることができた. 被加工物 Cu 陰極極性では比較的平らに堆積し, 陽極側では凸型のような形で堆積された. これは放電が陽極側で膨張するためであると考えられる.

チタン電極と NAK55 の場合は, 被加工物陰極極性で除去加工となり, 被加工物陽極極性で除去部分より表面が高くなっていることが確認でき, Cu の場合は被加工物陰極極性では比較的凹凸がなく堆積され, 被加工物陽極極性では細かい凹凸があるものの堆積を確認できました. これは熱伝導率が NAK55, Cu よりもチタンの方が低いため堆積されたと考えられる.

2.3 まとめ

本章では，電極に Cu，チタンを用い，被加工物に NAK55，Cu を用いた単発放電加工を行った．本章で得られた内容を以下にまとめる．

- (1) 被加工物陰極極性の場合，陽極極性と比べ，放電痕の伸びは長く，放電痕の伸びは電極の違いによる影響はないことが確認できた．
- (2) 放電痕の幅は電極に Cu を用いた場合，陽極極性で幅が狭く，チタン電極では広くなることが確認できた．
- (3) 断面曲線では被加工物 NAK55 陽極極性の場合，Cu 電極とチタン電極で見られた．Cu 電極では除去加工になっているのに対しチタン電極では除去部分よりも表面が高くなっていることが確認できた．また，被加工物 Cu の場合はどちらの電極の場合でも両極性で堆積していることが確認できた．両極性ともに表面に対して盛り上がっていることが観察された．これは電極が消耗して被加工物に堆積したものと考えられる．

② バッファ

分圧した電圧を信号として送る.

③ ローパスフィルタ

放電時の入力波形は高周波であるため, ステッピングモータの応答速度が対応できないため, 直接入力することができない. そこで, ローパスフィルタによって, 遮断周波数より高い周波数を遮断し, 低域周波数のみを通過させることで, ステッピングモータが対応できる応答速度にして出力する. 遮断周波数 f_c は, 以下の式により求められる.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad \cdots (1)$$

ここでは, $R=51[\text{k}\Omega]$, $C=0.047[\mu\text{F}]$ を用い, 遮断周波数を約 $66[\text{Hz}]$ に設定している.

④ コンパレータ

極間電圧と基準電圧を比較し, FPGA へデジタル信号として送る.

これらの電子回路も制御プログラム(LabVIEW)によって制御している.

基準電圧とは, 主軸制御の際のしきい値である. 基準電圧より高い電圧がかかると主軸を降下させ, 低い電圧がかかると上昇させるプログラムを組むことで, 極間距離の制御を行っている. パルス幅(ON)は放電時間を意味し, 休止時間(OFF)は放電の休止時間を意味する.

連続放電の際の制御プログラムのパネルを図 3.2 に示し、そのブロックダイアグラムを図 3.3 に示す。

制御プログラムを開始すると、電圧を常にかけ続け、基準電圧による制御プログラムによって高速回転電極を降下する。パルス幅(ON)で放電し、休止時間(OFF)で放電を休止している。パルス幅、休止時間は任意の値を設定する。

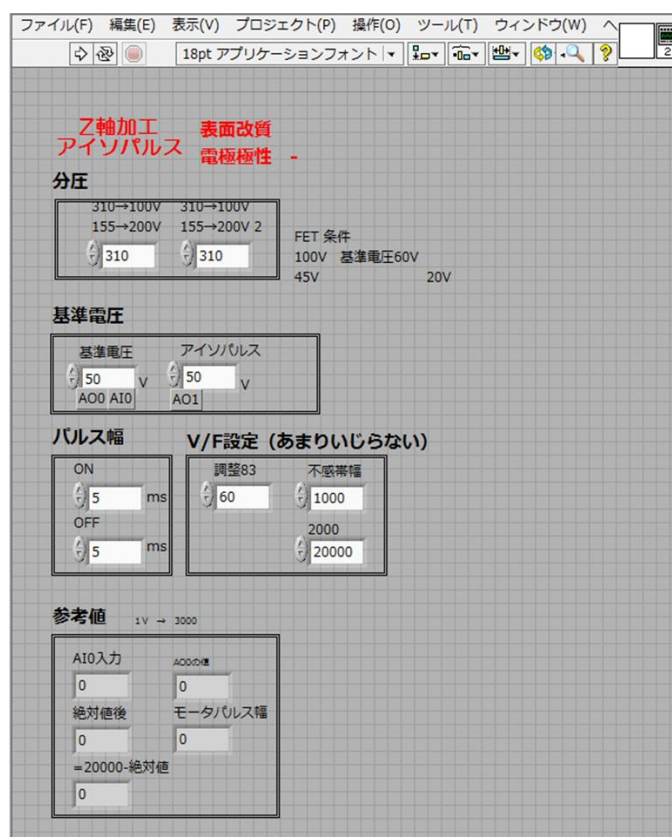


図 3.2 連続放電時の LabVIEW フロントパネル

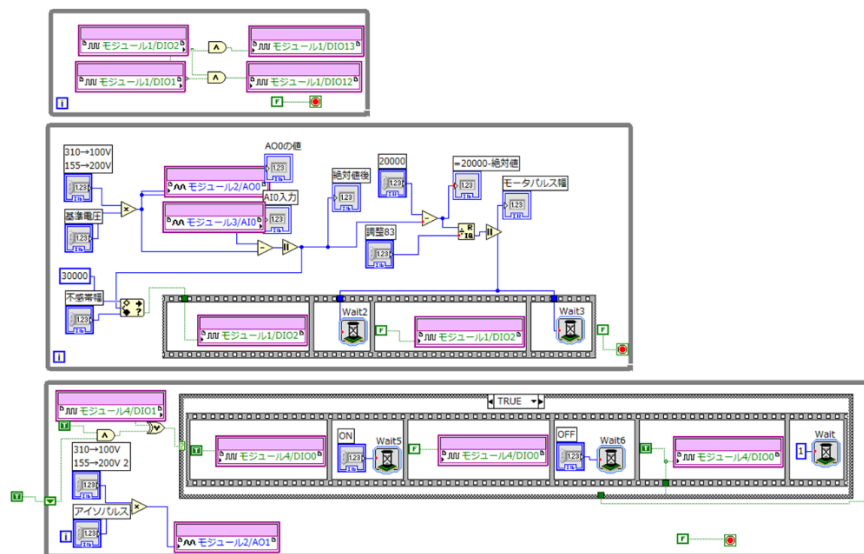


図 3.3 連続放電時の LabVIEW ブロックダイアグラム

3.3 連続放電

3.3.1 実験条件および実験方法

パイプ型チタン電極を高速回転させながら連続放電を実施した際の加工条件を表 3.1 に示す．被加工物は 2.2.1 項で示した NAK55 と Cu を用いた．

表 3.1 連続放電時の加工条件

極性	電極	+	−
	被加工物	−	+
電源電圧 [V]		100	
放電電流 [A]		2.4	
抵抗値 [Ω]		33	
基準電圧 [V]		50	
加工時間 [min]		1	
パルス幅 [ms]		5	
休止時間 [ms]		5	
回転数 [rpm]		9000	

3.3.2 電極の極性による違い

単発放電において電極にチタンを用いた場合、チタンが積極的に消耗し、被加工物側にチタンが堆積したと考えた。そこで電極にチタン、被加工物に Cu を用い、パルス幅 5[ms]、休止時間 5[ms]とし、連続放電を実施した。放電時間は 1 分とした。図 3.4、図 3.5 に得られた放電痕を示す。

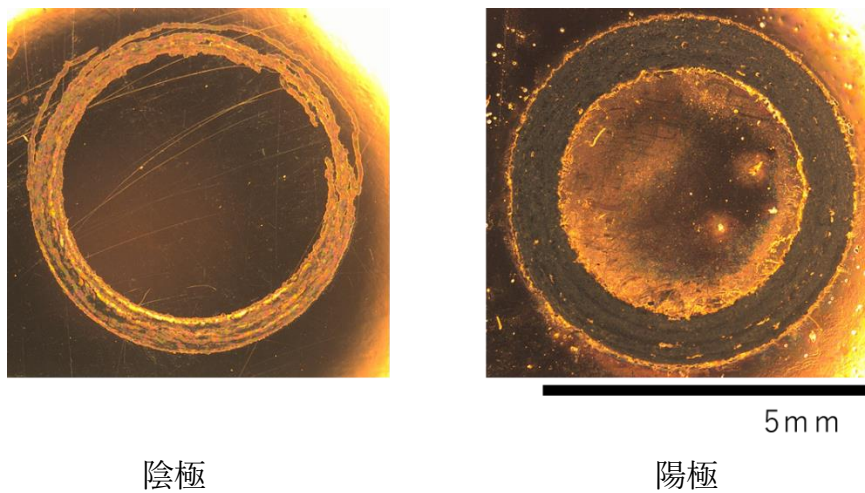


図 3.4 加工後の Cu

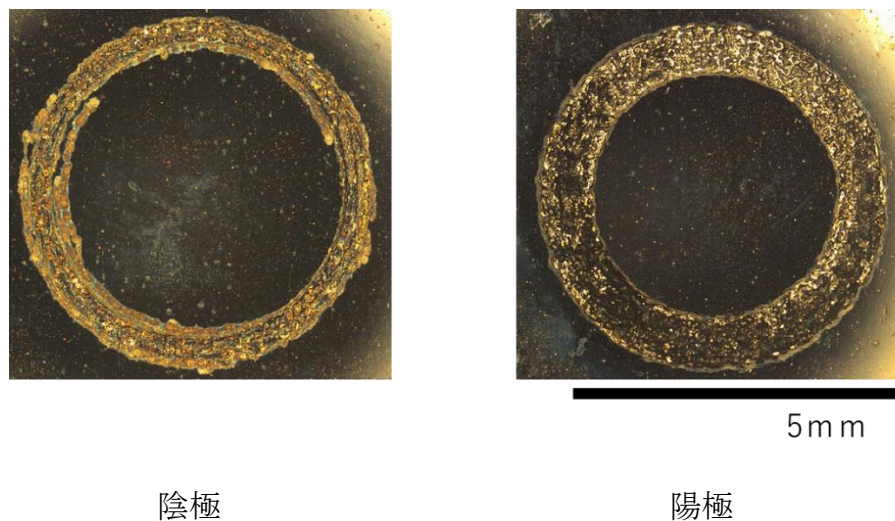


図 3.5 加工後の NAK55

図 3.4 と図 3.5 は被加工物側の極性を示している。被加工物陰極極性側では、1 発の放電痕が長く、その影響が表面に見られる。一方、被加工物陽極極性の場合、放電は重なっていることが見られた。これは単発放電の結果からも放電が陰極側で走り回るため 1 発が長いからと考えられる。また被加工物陽極側では単発放電と同様に 1 発の放電が短く、短い放電が重なったと考えられる。

3.3.3 断面曲線

3.3.2 項では、図 3.4, 図 3.5 で NAK55 と Cu における各電極極性の放電痕を示した。ここでは、NAK55, Cu における各電極極性の放電痕に対して、東京精密社製の表面粗さ計(Surfcom130A)を用いて断面曲線を計測した。その際得られた断面曲線をそれぞれ図 3.6, 図 3.7 に示す。

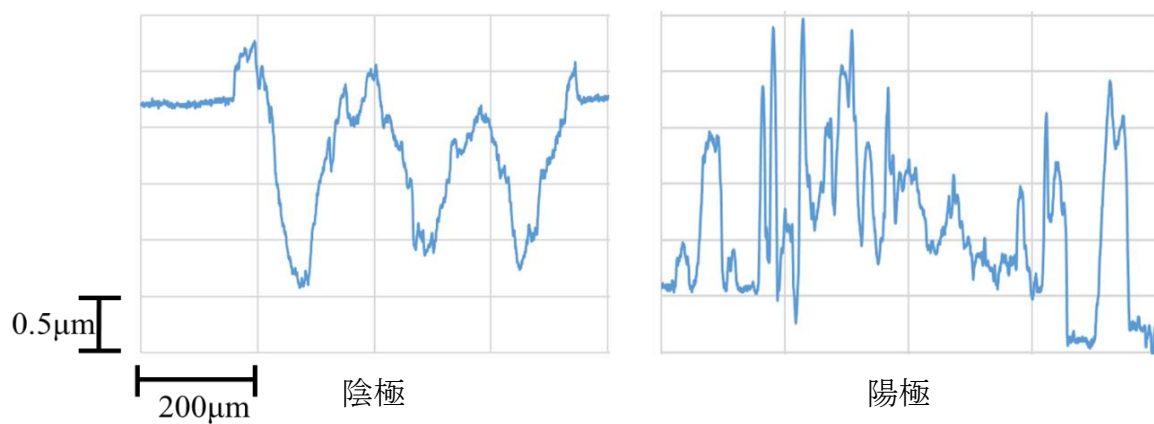


図 3.6 被加工物 Cu

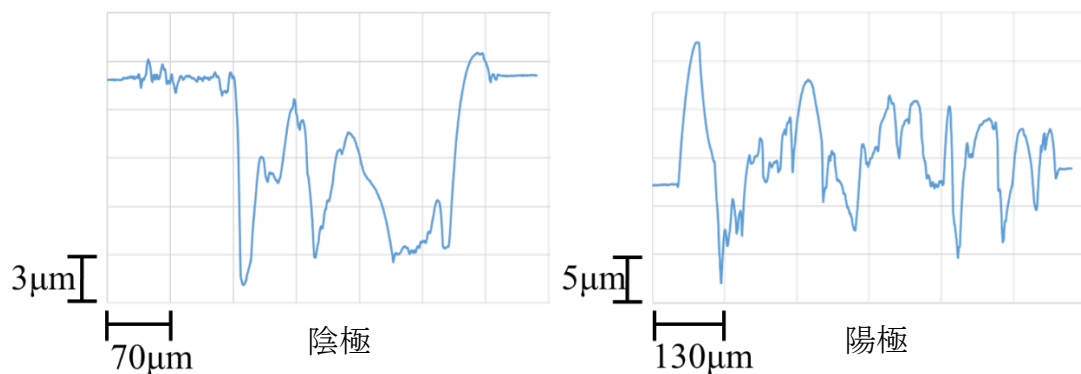


図 3.7 被加工物 NAK55

図 3.6, 図 3.7 は被加工物側の極性を示している。被加工物陰極極性は全体的に除去された領域が観察された。被加工物陽極極性は表面に細かい凹凸が見られるものの、全体的に堆積が見られた。

被加工物 Cu では、単発放電時の陰極極性で堆積が見られたのに対し、連続放電時の陰極極性では除去加工となった。これは陰極側で放電が走りまわることから 1 発の放電が長くなり被加工物が十分冷えなかったためと考えられる。陽極極性では単発放電、連続放電ともに全体的に堆積が見られた。これは電極が消耗し、被加工物側に電極が付着したものと考えられる。

3.3.4 休止時間の拡大

3.3.3 項では、図 3.6, 図 3.7 で NAK55 と Cu における各電極極性の断面曲線を示した。被加工物 Cu 陰極極性の単発放電時に堆積が見られたが、連続放電時は除去加工になっていた。ここでは、休止時間が短く 1 発の放電が長いため、被加工物表面が十分冷えなかったと考えたことから休止時間を 5[ms]から 30[ms]して連続放電を実施した。得られた放電痕と断面曲線を図 3.8 に示す。

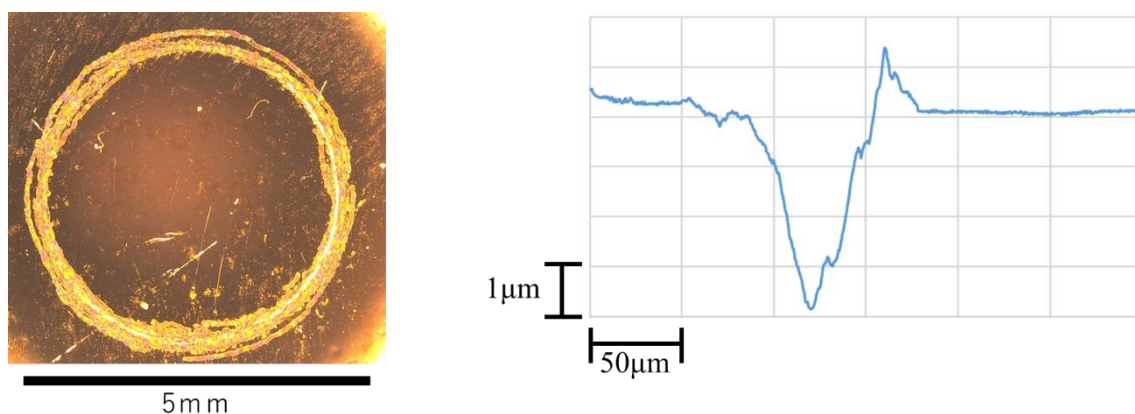


図 3.8 Cu（陰極）表面と断面曲線

結果として、連続放電時には陰極極性で表面が除去加工されることが確認された。被加工物 Cu 陰極極性では長いプラズマが何度も通ることによって除去加工になるのではないかと考えられる。

3.3.5 極性の違いによる SEM 画像

3.3.2 項で、図 3.4, 図 3.5 で NAK55 と Cu における各極性の放電痕を示した。ここでは、NAK55, Cu における各極性の放電痕に対し、一部を拡大し走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて観察を行った。その際得られたデータを図 3.9, 図 3.10 に示す。

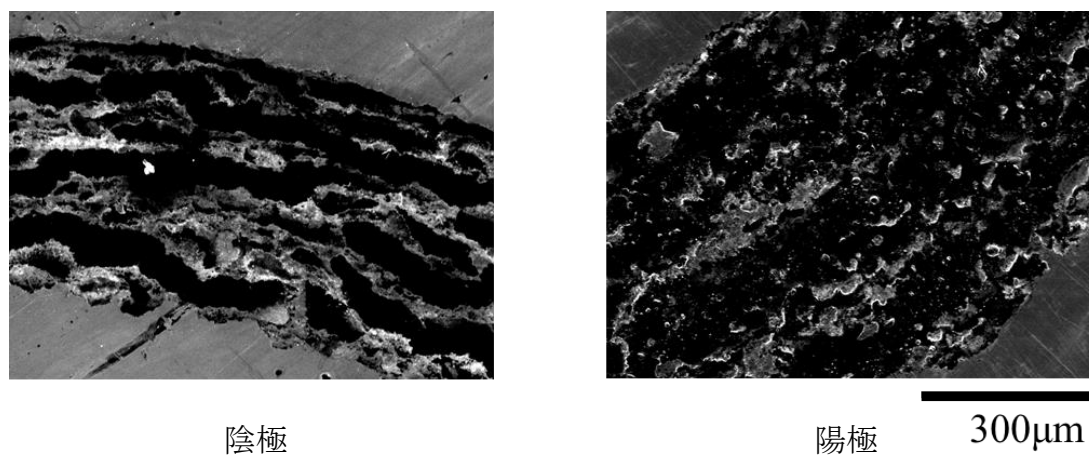


図 3.9 Cu の SEM 像

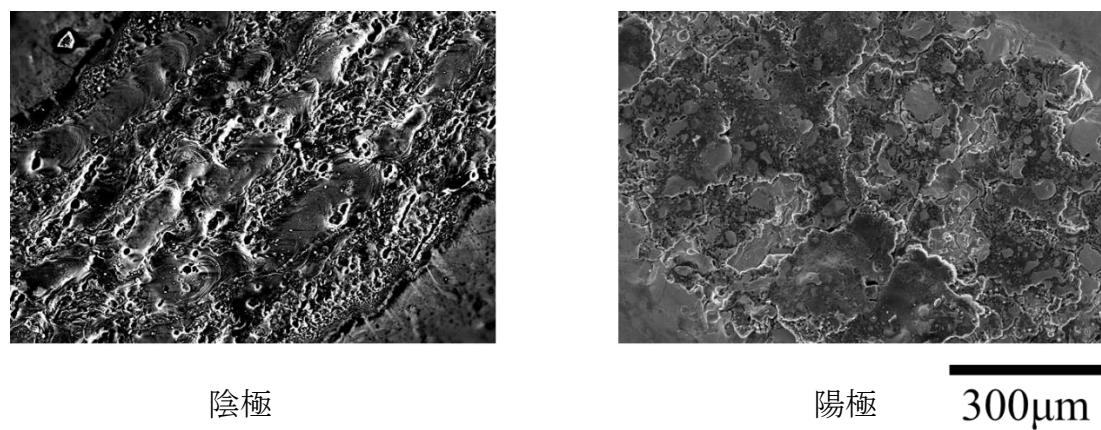


図 3.10 NAK55 の SEM 像

図 3.9 と図 3.10 は被加工物側の極性を示している。SEM 像から被加工物陰極極性において表面は長パルス放電による影響が見られた。SEM 像からも被加工物陰極極性では、プラズマが走り回り 1 発がはっきり観察できるのに対し、被加工物陽極極性では 1 発 1 発が重なって見える。

3.3.6 NAK55, Cu の定性分析および定量分析

3.3.5 項で、図 3.9, 図 3.10 で NAK55 と Cu における各電極極性の放電痕の SEM 像を示した。ここでは、NAK55, Cu において断面曲線で堆積が確認された放電痕をさらに拡大し、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用い EDS 分析を行った。得られたデータを図 3.11, 図 3.12 に示す。図 3.11, 図 3.12 はどちらも被加工物陽極極性を示している。

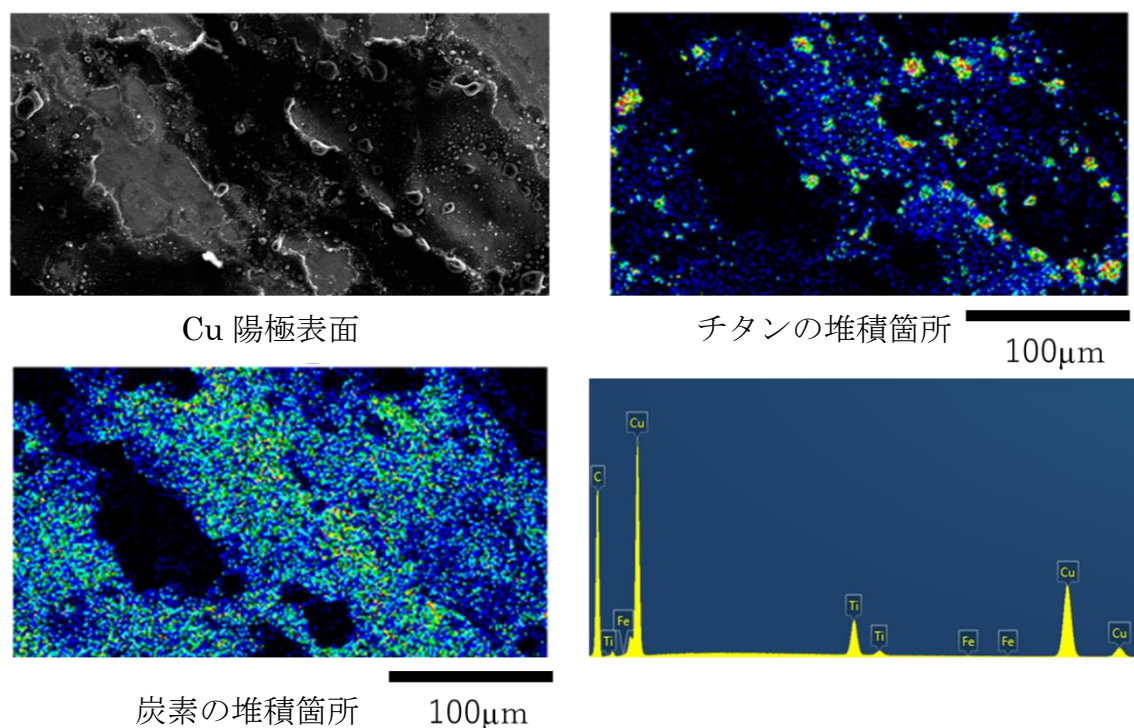


図 3.11 Cu（陽極）表面の定性・定量分析

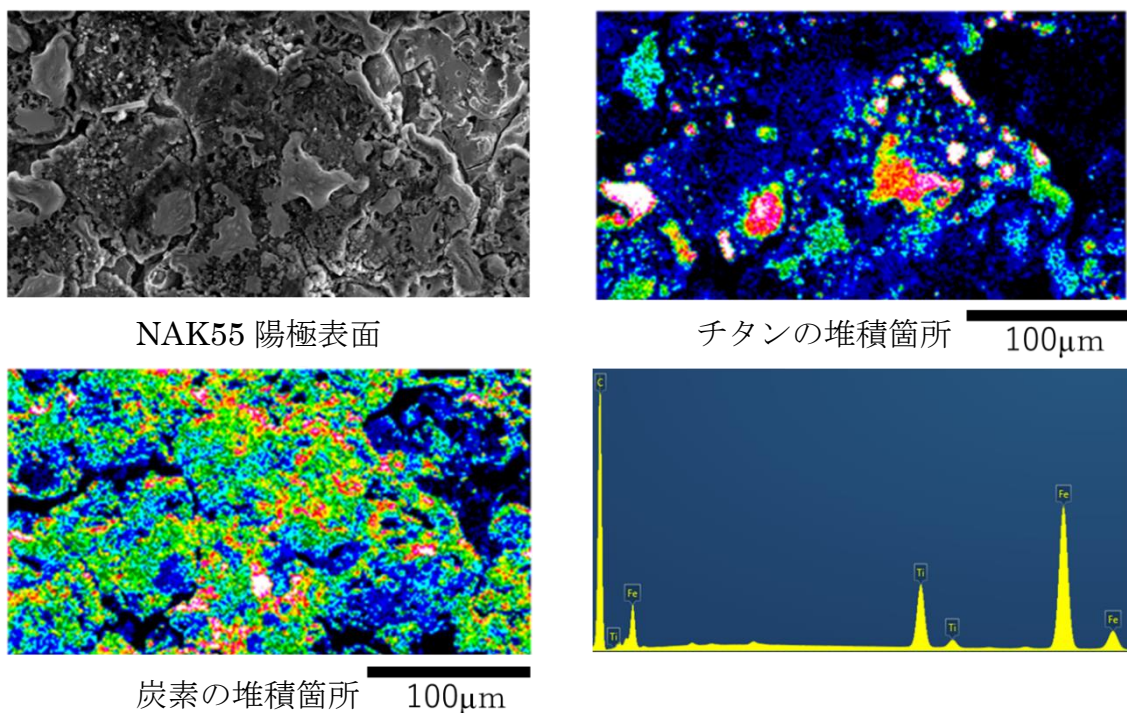


図 3.12 NAK55（陽極）表面の定性・定量分析

NAK55, Cu の定性分析からチタンのピークが立っており、チタンが堆積されていることが確認された。これは電極のチタンが消耗して被加工物表面に付着したと考えられる。また、NAK55, Cu の定量分析から被加工物に対して、プラズマが通った箇所全てにチタンが堆積するのではなく疎らに堆積していることが確認された。結果からは Cu よりも NAK55 の方がはっきりチタンを検出していた。このことから熱伝導率が高い Cu は熱が逃げて堆積現象がおこりにくいと考えられる。

さらに、炭素が幅広く堆積していることが確認された。これは油中では炭素が陽極側にくっつきやすいという性質からであると考えられる。また、被加工物陽極側で堆積がされやすいが、チタンが疎らに堆積し、炭素が多く堆積されていたことが確認された。

3.3.7 加工時間の増大

3.3.6 項で、図 3.11、図 3.12 で走査型電子顕微鏡 (SEM) を用い、NAK55 と Cu における EDS 分析を行った。ここでは、Cu に対し、加工時間を増大することで堆積が多く見られると考えたため加工時間を 1 分から 5 分にし連続放電を実施した。得られた結果を図 3.13 に示す。

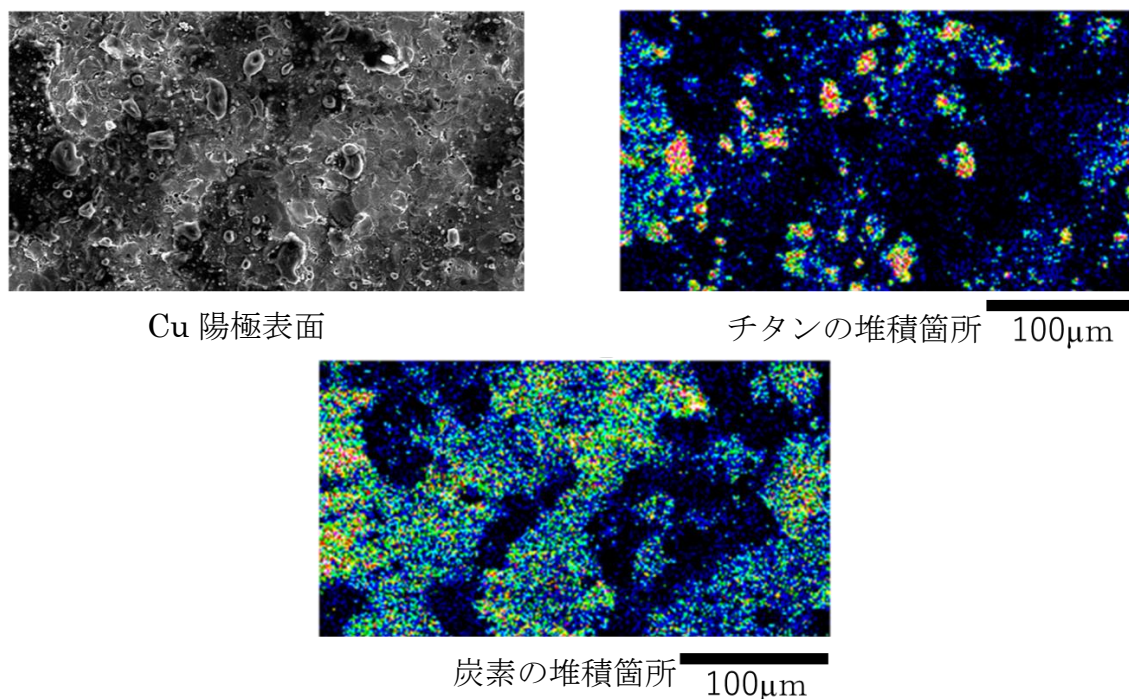


図 3.13 Cu (陽極) の定量分析

3.3.6 項の図 3.11 と比べて、加工時間が 1 分の時よりチタンが全体的に堆積しているが加工時間を長くしたことによる影響は少ないと考えられる。加工時間を長くしてもチタンの堆積は疎らであることが確認できた。ここからも熱伝導率が高い Cu は熱が逃げて堆積現象がおこりにくいと考えられる。また、炭素は表面に全体的に堆積していることが確認できる。

3.3.8 休止時間を拡大した NAK55 の定量分析

3.3.6 項で、図 3.11, 図 3.12 で走査型電子顕微鏡 (SEM) を用い、NAK55 と Cu における EDS 分析を行った。ここから、NAK55 (陽極) において休止時間を長くすることで被加工物表面が冷え、全体的にチタンが堆積すると考えたため休止時間を 30, 100, 500[ms]として連続放電を実施した。得られた定量分析と断面曲線を図 3.14, 図 3.15, 図 3.16 に示す。

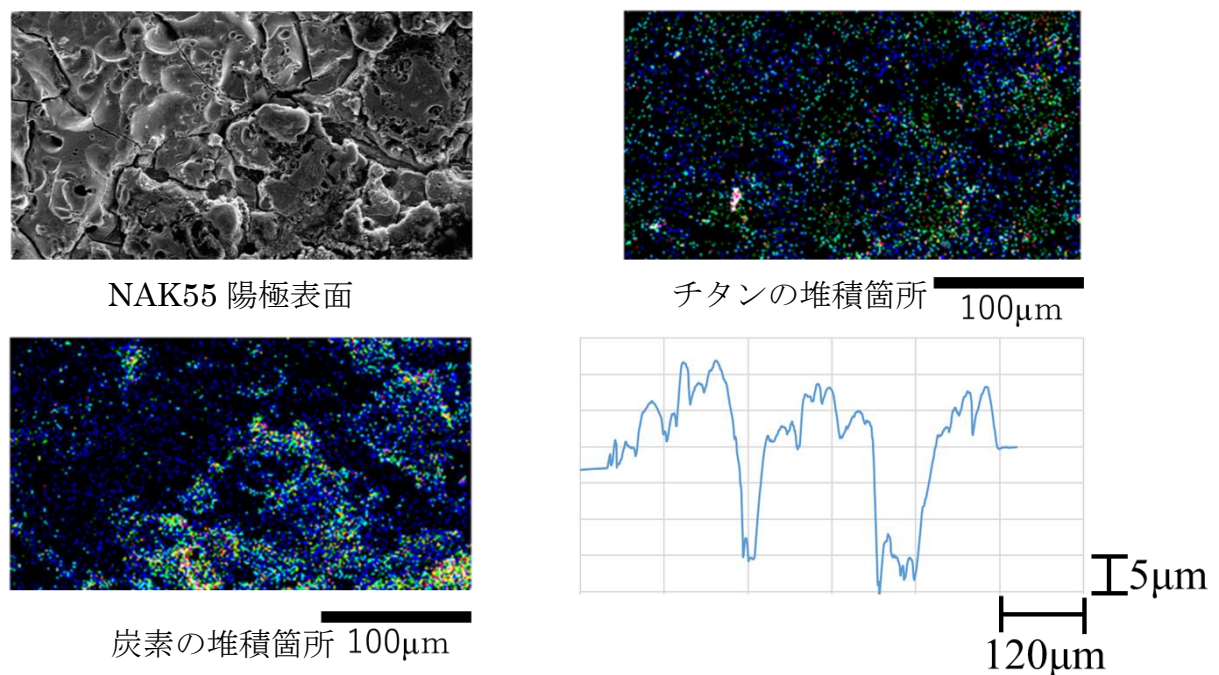
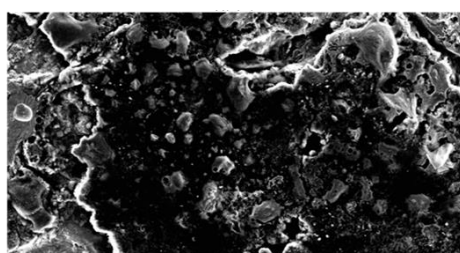
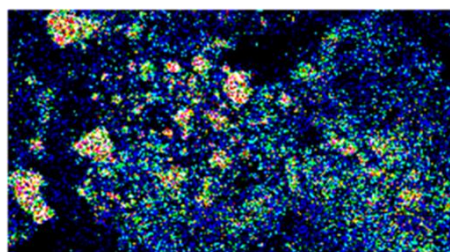


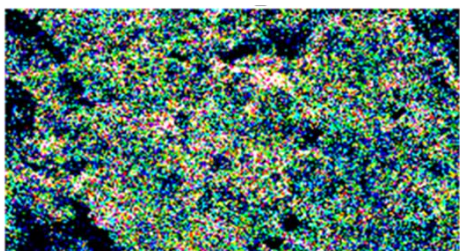
図 3.14 NAK55 (陽極) 休止時間 30[ms]の定量分析と断面曲線



NAK55 陽極表面



チタンの堆積箇所 100μm



炭素の堆積箇所 100μm

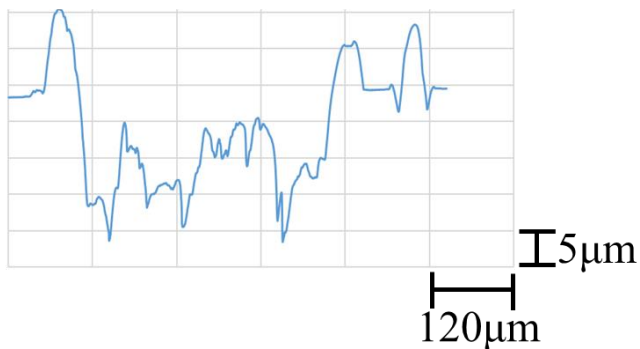
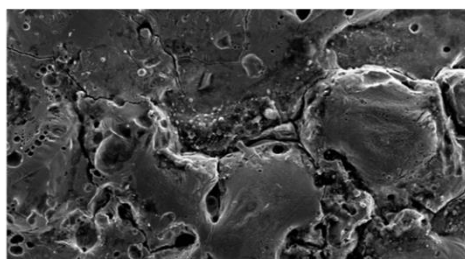
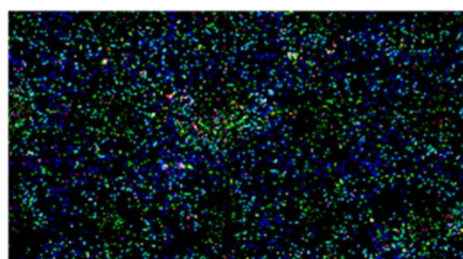


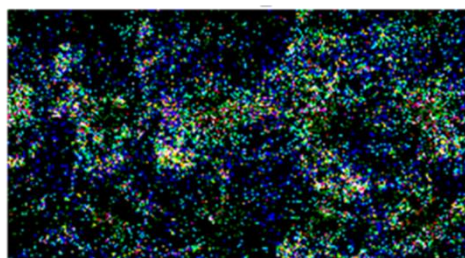
図 3.15 NAK55 (陽極) 休止時間 100[ms]の定量分析と断面曲線



NAK55 陽極表面



チタンの堆積箇所 100μm



炭素の堆積箇所 100μm

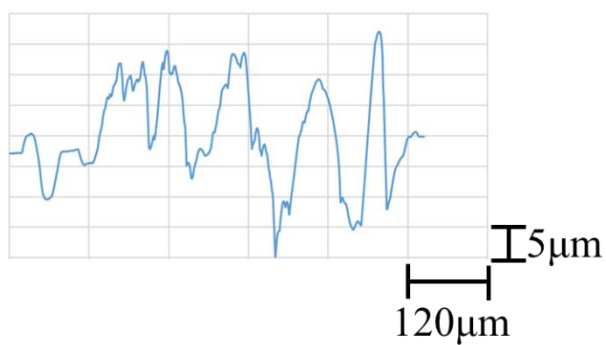


図 3.16 NAK55 (陽極) 休止時間 500[ms]の定量分析と断面曲線

結果として、休止時間を長くすることによって堆積量が大幅に増えることはないことが確認された。休止時間を長くすれば堆積が増えるということではないと考えられる。休止時間 30[ms]、500[ms]の場合では定量分析から全体的に薄くではあるが堆積していることが確認できるが微量であると考えられる。

100[ms]の場合では他の条件よりも全体的に堆積が多く見られた。断面曲線からは堆積が見られるところもあるが、チタンだけの影響ではなく炭素が堆積していることが確認された。

また、被加工物の表面温度が融点に到達しないとその点は加工されにくいと考えられる。このことから、熱伝導率が低くても、融点が高い被加工物は加工されにくいと考えられる。熱伝導率が 104[W/mK]、融点が 419.5[°C]の亜鉛を被加工物にすることで堆積されやすいのではないかと考えられる。

3.4 まとめ

本章では、電極に Cu, チタンを用い、被加工物に NAK55, Cu を用いた連続放電加工を行った。本章で得られた内容を以下にまとめる。

- (1) 被加工物陰極極性では全体的に除去された領域が形成された。被加工物陽極極性では表面に細かい凹凸が見られるが、全体的に堆積が見られた。
- (2) 電極にチタン、被加工物に Cu を用いた場合、陰極極性の単発放電時は堆積が確認されたのに対し、連続放電では除去加工になると確認された。これは、長いプラズマが何度も通ることで除去加工になるのではないかと考えられる。
- (3) 定性分析からチタンが堆積されていることが確認された。また、定量分析によって被加工物表面に疎らにチタンが堆積されていることを確認した。また、炭素が多く堆積されていたことが確認された。
- (4) 休止時間の長さに着目し、連続放電を実施したが結果としては休止時間を長くしたことで堆積現象に与える影響は少ないと考えられる。

第4章 結論

4.1 本研究のまとめ

本研究より、電極と被加工物の材料組み合わせによって結果に違いが出ることが分かった。

単発放電では、被加工物、極性の違いにより放電痕の長さ、表面形状が異なることが分かった。電極の違いは堆積現象に影響があることが確認できた。

連続放電では、被加工物 Cu 陰極極性で単発放電時には堆積したが連続放電時には除去加工になることが確認された。ここでも電極の違いや被加工物、被加工物の極性によって結果が異なることが分かった。

定性分析と定量分析によってチタンが被加工物表面に堆積されていることが確認された。また、プラズマが通った箇所全てに堆積するのではなく疎らに堆積することが分かった。

4.2 今後の課題

連続放電において、被加工物が NAK55, Cu 陽極極性の場合、疎らではあるが堆積が確認された。このことから、放電により融点に到達し、堆積加工されている部分と融点に到達していない部分があると考えられるため、連続放電時の加工時間と休止時間の両方を調整することで、さらに堆積されるのではないかと考えられる。今後連続放電を実施する際、加工時間と休止時間の両方を調整して行い、堆積の仕方の違いを観察する。

また、融点と熱伝導率に着目し、違う材料の電極でも単発放電、連続放電を実施することで異なる結果になることが予想されるため、材料を変えて実験し、違いを観察する。

参考文献

- [1] 武沢英樹, 毛利尚武, 古谷克司: 細線電極を用いた放電堆積加工 (第1報), 電気加工学会誌, Vol.34(2000)No.76, pp34-41
- [2] 鳳誠三郎: 放電加工のメカニズム, 精密機械, 29巻, 10号, (1963) ,pp.11-16
- [3] 毛呂俊夫, 毛利尚武, 松川公映, 上原康: 放電表面改質膜の結晶構造に関する研究, 精密工学会誌, Vol.69(2003)No.5, pp698-702.
- [4] 亀山敦史, 国枝正典, 佐野定男: 円板電極を用いた気中マイクロ放電加工, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2008), pp353-354.
- [5] 辻田容希: 放電加工における放電痕形成メカニズムの解明 (2017), 筑波技術大学修士学位論文, pp1-2
- [6] 堅田梨紗, 平尾篤利, 谷貴幸: 放電加工法における高速回転電極が表面に及ぼす影響, 2017年度精密工学会北陸信越支部会, 2017, pp1-2