

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	高応答多自由度電極駆動による放電加工の高速・高精度化の研究
Title(English)	
著者(和文)	上山吉崇
Author(English)	Yoshitaka Ueyama
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9589号, 授与年月日:2014年5月31日, 学位の種類:課程博士, 審査員:進士 忠彦,北條 春夫,初澤 毅,佐藤 海二,吉岡 勇人
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9589号, Conferred date:2014/5/31, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

東京工業大学

平成二十六年 学位論文

高応答多自由度電極駆動による放電加工の  
高速・高精度化の研究

メカノマイクロ工学専攻

上山 吉崇

# 目次

<b>第1章 緒論</b> .....	<b>1</b>
1. 1 研究の背景.....	1
1. 2 放電加工.....	1
1. 2. 1 放電加工の原理.....	1
1. 2. 2 放電加工の特徴.....	4
1. 2. 3 放電加工の技術開発動向.....	5
1. 3 放電加工の課題.....	6
1. 3. 1 電極の応答性, 運動自由度および位置決め範囲.....	6
1. 3. 2 加工屑の排出.....	7
1. 3. 3 放電加工の微細・高精度化.....	11
1. 4 磁気軸受を用いた放電加工用ローカルアクチュエータ.....	12
1. 5 本論文の目的.....	13
1. 6 本論文の構成.....	14
<b>第2章 高応答多自由度電極駆動による放電穴加工の高速化</b> .....	<b>16</b>
2. 1 緒言.....	16
2. 2 放電穴加工高速化法の提案.....	16
2. 2. 1 極間距離の高応答調整.....	16
2. 2. 2 軸方向ジャンプ.....	17
2. 2. 3 径方向揺動.....	18
2. 3 5自由度制御型磁気浮上ローカルアクチュエータ.....	18
2. 3. 1 磁気浮上ローカルアクチュエータの構成.....	18
2. 3. 2 ローカルアクチュエータモデル.....	19

2. 3. 3	スラスト磁気軸受コントローラ的设计	25
2. 3. 4	ラジアル磁気軸受コントローラ的设计	27
2. 3. 5	磁気浮上ローカルアクチュエータ制御システムの構成	29
2. 3. 6	磁気浮上ローカルアクチュエータの基本性能	31
2. 4	既存放電加工機とローカルアクチュエータを用いた 協調制御放電加工システム	35
2. 4. 1	既存放電加工機の基本性能	35
2. 4. 2	協調制御放電加工システム	37
2. 5	放電穴加工実験	40
2. 5. 1	加工方法	40
2. 5. 2	加工条件	41
2. 5. 3	加工実験結果	42
2. 5. 4	ジャンプ中の加工液の数値流体力学解析	51
2. 6	結 言	55

### **第3章 高応答多自由度電極駆動による放電穴加工の高精度化 ..... 58**

3. 1	緒 言	58
3. 2	5自由度制御型磁気浮上ローカルアクチュエータ	58
3. 2. 1	磁気浮上ローカルアクチュエータの構成とふれまわり 補正における課題	58
3. 2. 2	ローカルアクチュエータ位置決め範囲の拡大	60
3. 2. 3	磁気浮上ローカルアクチュエータ制御システムの構成	66
3. 2. 4	磁気浮上ローカルアクチュエータの基本性能	67
3. 3	回転電極ふれまわりの計測と補正	69
3. 3. 1	ふれまわりのモデル化	69
3. 3. 2	ふれまわり計測方法	70

3. 3. 3	ふれまわり補正方法	73
3. 3. 4	ふれまわり補正実験	78
3. 4	ふれまわり補正を用いた放電穴加工	80
3. 4. 1	加工条件	80
3. 4. 2	加工穴形状	82
3. 4. 3	電極の送り波形, 極間電圧と加工速度	83
3. 4. 4	電極消耗	84
3. 5	テーパ形状補正のための加工方法	85
3. 5. 1	テーパ形状補正のため電極駆動方法	85
3. 5. 2	テーパ形状補正を用いた放電穴加工	87
3. 6	結 言	91

## 第4章 高応答多自由度電極駆動による形彫り放電加工における仕上げ

### 加工の高速化..... 92

4. 1	緒 言	92
4. 2	仕上げ加工高速化のための電極駆動方法	92
4. 3	放電加工制御システム	93
4. 3. 1	放電加工制御システム	93
4. 3. 2	ディザ信号の生成方法	94
4. 4	放電加工実験	97
4. 4. 1	加工方法	97
4. 4. 2	加工条件	98
4. 4. 3	電極送り量	99
4. 4. 4	短時間における極間電圧と電極挙動	100
4. 4. 5	加工穴深さ	103

4. 4. 6	電極送り速度 .....	103
4. 4. 7	底面粗さ .....	104
4. 5	揺動直径・周波数と加工速度の調査 .....	104
4. 5. 1	揺動条件および加工条件 .....	104
4. 5. 2	電極送り量 .....	105
4. 5. 3	加工穴深さ .....	105
4. 5. 4	電極の送り速度 .....	106
4. 5. 5	加工穴直径 .....	107
4. 5. 6	短絡頻度 .....	107
4. 6	形彫り放電加工・仕上げ加工実用化のための検討.....	109
4. 6. 1	簡易なローカルアクチュエータを用いた仕上げ加工速度の改善 .	109
4. 6. 2	弾性ヒンジ2自由度制御型磁気駆動ローカルアクチュエータの構成 .....	110
4. 6. 3	ローカルアクチュエータ位置決め制御システム .....	112
4. 6. 4	仕上げ加工高速化のための電極揺動 .....	116
4. 6. 5	放電加工システムと加工条件 .....	118
4. 6. 6	実験結果 .....	122
4. 7	結 言.....	124

## **第5章 結 論.....126**

5. 1	本論文のまとめ .....	126
5. 2	今後の課題 .....	128

## **参考文献.....130**

## **謝 辞**



# 第1章 緒 論

## 1.1 研究の背景

近年、電気・電子、光学、医療、精密機器、自動車等において、高度な機能を有する製品開発が進んでいる。このような技術の開発の中で、製品を製造するための加工技術への要求も、ますます高度化している。たとえば、携帯電話、デジタルカメラ、DVDピックアップ等の機器で使用されるレンズには非球面、自由面形状のものが使用されている<sup>(1)</sup>。また、レンズの素材は、従来のプラスチックから、光学特性の優れたガラスへ移行が進みつつある<sup>(2)</sup>。金型を用いて、ガラスレンズを加熱プレス成形する場合、成形温度が 500℃以上になるため、レンズ金型材料も超合金や超硬セラミックスなど、耐熱性に優れた、極めて加工しにくい材料が増えている<sup>(3,4)</sup>。

自動車用燃料噴射ノズルでは、燃料微粒化、噴射流量の精密な制御に加えて、複雑な噴霧形状が要求される。それに対応すべく、燃料噴射穴の加工では、極めて高硬度な金属材料に、アスペクト比（深さ／穴径の比）5以上、任意の形状、およびマイクロメートルオーダの精度を実現する必要がある<sup>(5)</sup>が、機械加工においては、材料の硬度が60 HRC を超えると、切削の状態が急激に変化し、刃先のチッピングや異常摩耗が問題となる<sup>(6)</sup>。また、航空機機体に広く採用され、今後は、自動車、スポーツ用具等、その他産業分野においても、採用が進むと考えられる、軽くて強い炭素繊維複合材料(CFRP)など、従来の加工技術では対応できない材料も登場している<sup>(7)</sup>。

従来、工業製品の製作には、旋盤、ボール盤、フライス盤やエンドミルを用いたNC多軸加工機などを用いた、機械的加工が一般的に利用されていた。これら方法では、被加工物が工具刃物より柔らかいことが、加工を実施する上での重要な条件であるため、従来技術では対応が困難な、新しい生産技術の開発および発展が強く望まれている。

## 1.2 放電加工

### 1.2.1 放電加工の原理

放電加工は、1943年にソビエト連邦においてラザレンコが開発した加工技術である<sup>(8)</sup>。  
 図1.1は、放電加工の原理図である。絶縁性液体（加工液）中で、工具電極と加工物を対向させ、両者間（極間）にパルス電圧を印加する。極間距離には、1パルスにつき、1か所で絶縁破壊が生じ、放電柱が発生する。放電柱の温度は、6,000～7,000Kに達し、加工物の融点と比較して高いため<sup>(9)</sup>、放電エネルギーによって加工物表面および電極が溶解する。溶解した加工物、電極は、加工液の気化に伴う爆発によって、加工面から除去され、工作物に微小な放電痕が生成される<sup>(10)</sup>。以上のような、単発放電による材料除去の繰返しによって、加工物には電極形状が転写される。

放電加工が開発された当時は、工具電極の消耗が激しく、高精度加工や、微細加工には適用できないと考えられていた<sup>(11)</sup>。しかし、その後、低電極消耗電源の開発、CNC放電加工機による自動化などの、技術の発達により、高い精度が要求される金型マザーマシンの一翼を担うようなど、放電加工は、重要な加工技術の一つとなっている<sup>(12)</sup>。

図1.2に、極間における、1回の放電（単発放電）での、放電現象の詳細を示す<sup>(13)</sup>。ただし、電極を陽極、加工物を陰極としている。電極と加工物の相対距離が、数～数マイクロメートルになると、陰極表面から電子が放出される（図1.2(a)）。放出された電子は、陽極に向かって運動を開始するが、極間の加工液分子に衝突し、加工液分子が電離する。このようにして放出された電子は次々と衝突を繰り返す、電子は陽極、陽子は陰極に到達する。このような状態を絶縁破壊と呼ぶ（図1.2(b)）。絶縁破壊が発生した部分では、周囲と比較し、電気抵抗が極端に小さくなり、電流が集中して流れ、放電柱が生成される。前述のとおり、放電柱は数千Kと極めて高温であり、加工物、電極が溶解する（図1.2(c)）。放電柱内の加工液の蒸発によって気泡が生成し、気泡の体積膨張に伴い、加工屑と呼ばれる、炭化した加工液、溶解・再凝固した加工物および工具電極は、加工面から除去される（図1.2(d)）。電圧の印加が停止されると、放電が終了し、周囲から加工液が流入し、絶縁状態が回復する（図1.2(e)）。

図1.3は、放電中における、印加電圧、電極-加工物間の極間電圧 $V_g$ および放電電流 $I_p$ の関係を示している。極間にパルス電圧が印加され、放電エネルギーが供給されると、印加開始から $t_d$ の後、極間電圧 $V_g$ は20～40V程度に低下し、極間には、 $t_{ON}(=t_P-t_d)$ の間、放電電流が流れる。ここで、 $t_d$ は、放電回路の定数および前回の単発放電後、絶縁回復に要する時間により生じる遅れ時間である。また、印加電圧 $V$ および放電電流 $I_p$ は、加工電源の設定により決定される。 $T_{OFF}$ はパルス電圧の印加休止時間を示す。

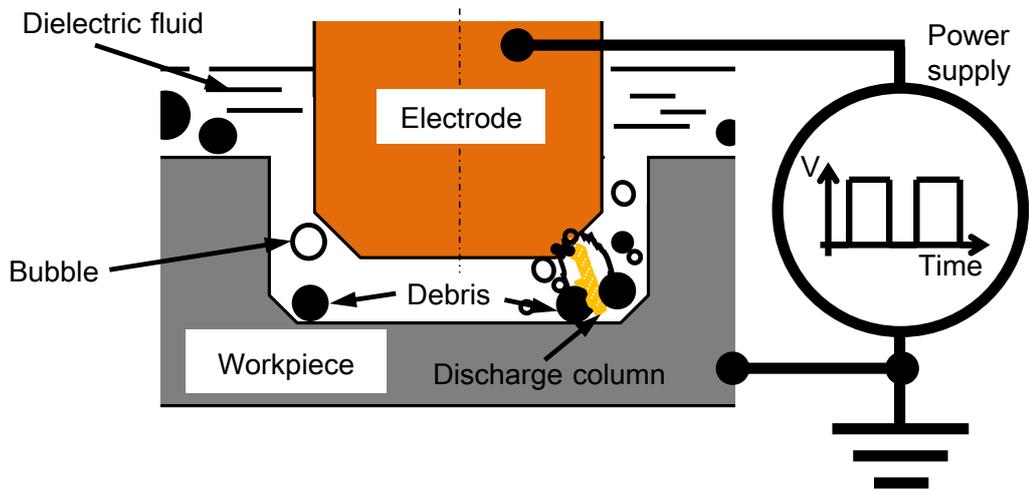


Fig. 1. 1 Schematic illustration of electrical discharge machining

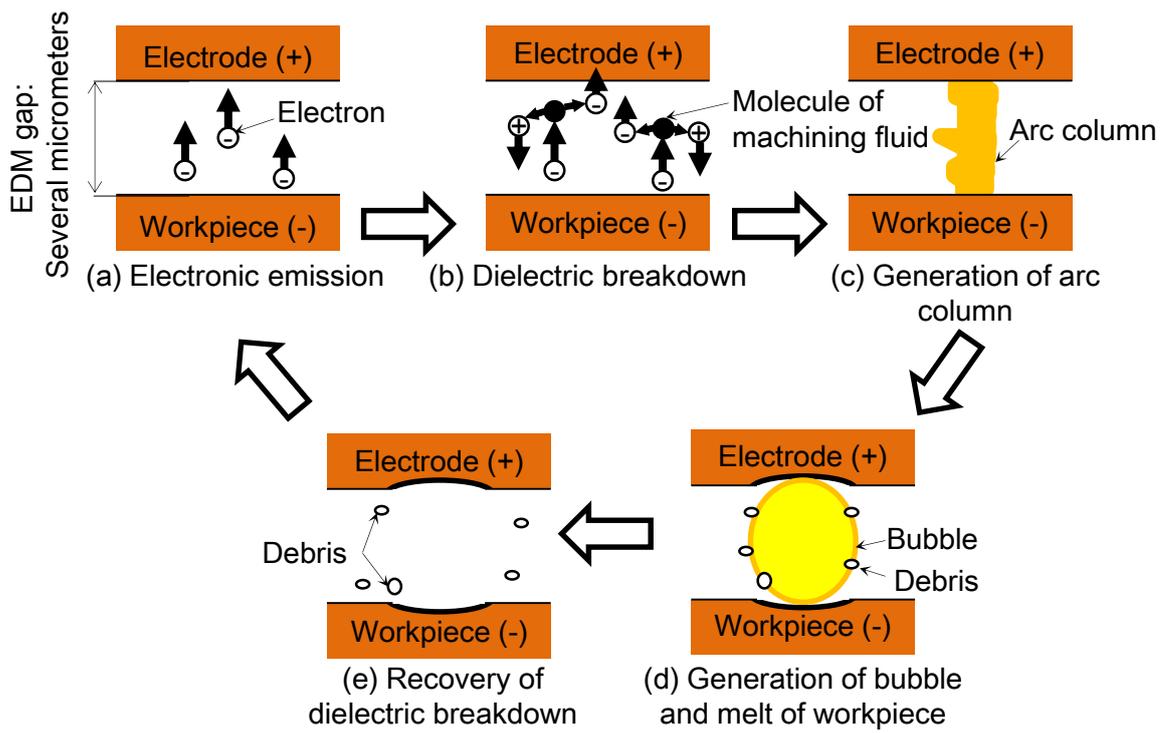


Fig. 1. 2 Mechanism of electrical discharge phenomenon

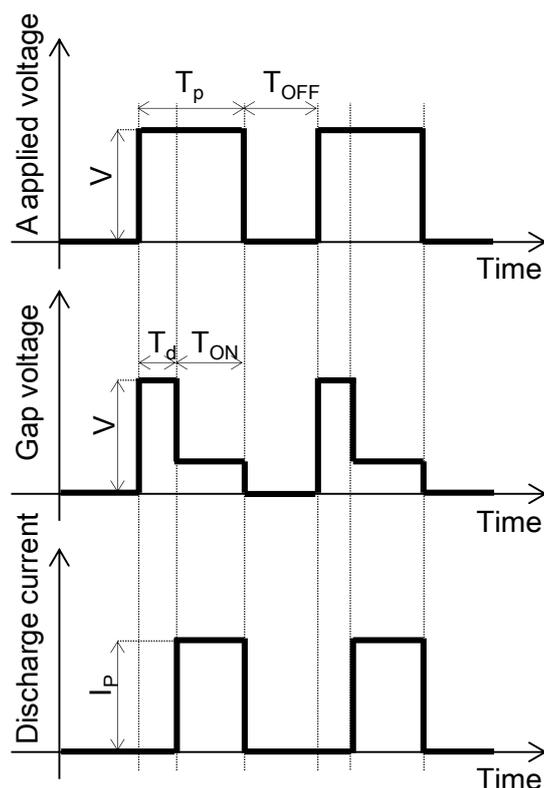


Fig. 1. 3 Typical discharge waveforms

### 1. 2. 2 放電加工の特徴

放電加工は、次のような利点を有する。まず、加工物を放電によって溶解、除去するため、導電性材料であれば、硬さに関係なく加工が可能である<sup>(8,14)</sup>。また、非接触加工のため、工具反力が切削加工に比べて小さく、微小工具の適用が比較的容易である<sup>(15)</sup>。更に、任意形状の工具を被加工物に転写加工できるため、複雑な形の加工が簡単になる。さらに、非回転の工具を用いて加工が可能であるため、角部アールの小さな角穴、異形状、溝等の加工が、切削加工と比較して容易である<sup>(10)</sup>。

放電加工は、電極の形状を加工物にそのまま転写する形彫り放電加工、細径の黄銅やタングステンのワイヤを電極として使用し、糸鋸盤のように形状を切り抜く、ワイヤ放電加工に、大きく分類される。形彫り放電加工は、金型の製作において、その適用が最も多い<sup>(16)</sup>。過酷な状況下で、繰返し長期間使用される金型は、高い精度と耐摩耗性が要求されるため、チタン合金やステンレスなどの、高硬度材料が使用される。高速切削の登場により、金型加工を放電から切削直彫りに置き換える動きがあったが、工具の折損、摩耗などのデメリットから、高速切削の適用には限界が生じ、現在では、放電加工に回

帰する傾向もある<sup>(17)</sup>。鍛造工程で使用される金型は、摩耗による型の変形を適宜修正する必要がある。金型が新しいうちに、鍛造によって銅電極を作製し、これを用いた、摩耗した型の修理も、放電加工が担う重要な役割である<sup>(16)</sup>。

微細穴加工は、形彫り放電加工と同じ加工原理により、微細電極を加工物に転写する手法である。主な適用例として、燃料噴射ノズル、インクジェットプリンタノズル、金型のガス抜き穴などがあり、微細加工分野の中でも、要求案件が最も多い<sup>(17)</sup>。これらには、直径数～数百マイクロメートルの微細穴<sup>(18,19)</sup>が求められる場合もあるため、工具反力が小さく、微小工具の適用が可能な放電加工の適用が有利である。また、銅など、比較的安価な工具を適用可能であることも、放電加工の利点である<sup>(20)</sup>。微細加工の分野では、微細穴に特化した専用加工機<sup>(21)</sup>も市販化されており、放電加工の領域において重要な役割を担っている。

ワイヤ放電加工は、リードフレーム金型、歯車、タービンブレードの製作などに適用されている<sup>(16,22)</sup>。また、ワイヤ放電加工による、WEDG(wire electro discharge grinding)<sup>(23)</sup>は、回転軸側面に対して、ワイヤ放電を行うことによって、微細軸を作製する手法であり、WEDGによって、 $\phi 1\mu\text{m}$ の微細軸が実現されている<sup>(24)</sup>。

従来、放電加工の加工条件は、熟練者の経験に基づいて選定されていたが、加工状態によって電源などの条件をリアルタイムで自動調整する機能が搭載された放電加工機も開発されている<sup>(25,26)</sup>。また、対話型インターフェースによって、加工機のガイドに沿った項目を入力するだけで、複雑なNCプログラム作成や加工条件選択が可能な機能が搭載された放電加工機<sup>(27)</sup>、加工の段取りや工具電極の取り扱いに関する、放電加工プロセス全体のシステム化の進化<sup>(28,29)</sup>によって、非熟練者でも、放電加工の取り扱いが容易となっている。

### 1.2.3 放電加工の技術開発動向

放電加工技術の新しい技術展開として、絶縁性セラミックスの放電加工<sup>(30)</sup>、油等の加工液を必要せず、環境負荷の小さい空気中での放電加工<sup>(31)</sup>、非常に硬く耐摩耗性に富み次世代のプレス金型材として期待される焼結ダイヤモンドの放電加工<sup>(32)</sup>が実現されている。また、除去加工だけでなく、溶解した電極を加工表面に付着させることで、材料の表面改質や3次元構造の造形が可能である<sup>(33,34)</sup>。

更に、圧縮コイルばねとワイヤ機構による曲がり穴の加工<sup>(35)</sup>や、断面が変化する加工

穴<sup>(36)</sup>など様々な形状加工，円柱，角柱などの単純電極を多自由度方向に走査させ，三次元形状を放電加工する，創成放電加工<sup>(37)</sup>が実現されている．このような革新的な技術展開により，放電加工は今後ますます重要な生産技術になるであろうと考えられる．

## 1.3 放電加工の課題

### 1.3.1 電極の応答性，運動自由度および位置決め範囲

放電加工の欠点は，機械加工やレーザ加工などと比較して，加工速度が遅いことである．この理由を，放電加工現象と加工制御システムおよび既存加工機構の観点から説明する．放電加工では，毎秒，数千から数万回の放電が生じ<sup>(38)</sup>，放電毎に，加工対象と電極の一部が除去されるため，極間距離が常に変化する．放電が発生する極間距離は，粗加工，仕上げ加工でそれぞれ  $100\mu\text{m}$ ， $10\mu\text{m}$  程度であり，超仕上げ加工では更に狭くなる<sup>(39)</sup>．このため，たゆまなく放電を持続させるためには，工具電極あるいは加工物を高速かつ高精度に駆動し，位置補正することによって，適切な極間距離を保つ必要がある．

放電加工では，加工プロセスの状態を反映する極間電圧，放電電流が比較的容易に検出可能であるため，放電状態に応じて電極の指令位置を逐次変更する制御系が構成され，電極と工作物間の極間距離が自動的に調整される<sup>(40)</sup>．図 1.4 に，一般的な放電加工機で採用されている，放電加工制御システムのブロック線図を示す．この加工制御システムでは，極間電圧  $V_g$  をフィードバック信号として利用する． $V_s$  は，極間電圧の目標値であり，放電加工機に内蔵された位置決めコントローラは， $V_g$  と  $V_s$  の偏差から，電極の位置目標値  $V_{sd}$  を生成する．放電加工機の移動ステージは，高速に変化する  $V_g$  に応じて，電極を位置決めする必要がある．このような理由から，工作機械の標準的な応答周波数が  $5\text{Hz}$  であるのに対し，放電加工機では，その 3 倍以上である  $16\text{Hz}$  以上が必要とされる<sup>(41)</sup>．

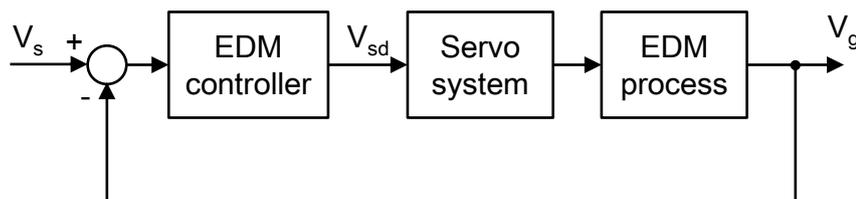


Fig. 1.4 Block diagram of existing EDM servo control system

ところで、一般的な放電加工機の電極位置決め機構は、ACサーボモータとボールねじを組み合わせたものが一般的であり、電極を多自由度駆動するため、1自由度位置決めステージを積み重ねた構造となっている。特に下部のステージでは、駆動質量が大きくなり、電極の応答速度が制限される。

ボールねじ位置決め機構では、ステージの運動方向が反転する際に、象限突起が発生する<sup>(42)</sup>。電極の多自由度駆動を用いた加工では、象限突起は、加工精度を悪化させる原因となると考えられる。また、後述する、加工屑排出のためのジャンプ動作など、電極の高速かつ大ストローク駆動時では、駆動部質量の大きい位置決め機構が、構造体の共振を誘発することが指摘されている<sup>(43)</sup>。

ボールねじに代わる位置決め機構として、リニアモータがある。リニアモータはボールねじと比較して、バックラッシュが小さいことや、機械的な摩擦が無く長寿命であること、位置決めステージの高速駆動が可能であるという利点を有する<sup>(44)</sup>。放電加工の分野では、1999年に、リニアモータを用いた形彫り放電加工機が初めて登場し、その後、リニアモータ駆動型ワイヤ放電加工機が市場投入されている<sup>(45,46)</sup>。電極を高速に駆動することが可能なリニアモータ駆動型放電加工機は、放電状態をより安定に維持可能であるとされ、ボールねじ機構を用いた従来の放電加工機と比較して、加工の高速化を実現している<sup>(47)</sup>。ただし、ボールねじと同様に、多軸化に対しては、積み重ね構造を採用する必要があるため、極間距離の高速調整などでは、工具の応答速度が制限されることが懸念される。

電極の応答性を向上させるための機構として、ボイスコイルモータ<sup>(48)</sup>や圧電素子<sup>(49)</sup>などの微動機構を用いた、放電加工用ローカルアクチュエータが提案されている。これらローカルアクチュエータの位置決め範囲は、数十マイクロメートルであり、極間距離を高速に微調整することが可能である。一方、後述する加工屑排出のためのジャンプは、そのストロークが大きくなる程、効果も高くなるとされている<sup>(50)</sup>。また、加工前の電極位置の初期設定においても、電極駆動機構による、位置決め制御が用いられており、電極微動機構とはいえ、数ミリメートルの位置決め範囲を有することが望ましいとされる<sup>(51)</sup>。

### 1.3.2 加工屑の排出

放電加工では、極間に発生する加工生成物（加工屑）が問題となる。加工屑は、放

電によって溶融した後、加工液に触れて冷却され、再凝固した加工物と、加工液の熱分解によって生成する炭化物から、主に構成されている。電極と加工層間で発生する、加工屑を原因とした二次放電（異常放電）は、加工速度、精度の低下、電極消耗の増大を招く。例えば、細穴放電加工では、アスペクト比が5を超える場合、加工屑の排出性が悪化し、異常放電の頻発により、加工が進展しなくなる<sup>(52)</sup>。

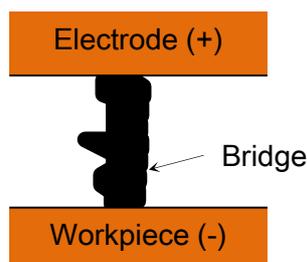
一般的な形彫り放電加工では、加工が開始されると、粗加工、準仕上げ加工、仕上げ加工と、電極の送り量に応じて、段階的に放電エネルギーが低減するよう、加工電源は加工条件を制御する<sup>(53)</sup>。単発放電による加工物除去量 $W$ および加工面粗さ（最大高さ $R_z$ ）は、前節で述べた、放電電流 $I_p$ 、放電時間 $t_{ON}$ を用いて、次式で示される<sup>(54)</sup>。ただし、 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\varepsilon$ および $\theta$ は、加工物、電極の材質、加工電源条件、加工液などによって決定される定数である。

$$\begin{aligned} W &= \alpha t_{ON}^{\beta} I_p^{\gamma} \\ R_z &= \delta t_{ON}^{\varepsilon} I_p^{\theta} \end{aligned} \dots\dots\dots (1. 1)$$

粗加工と比較し、仕上げ加工では、 $I_p$ および $t_{ON}$ は、それぞれ数から数十分の一程度に設定されるため、仕上げ加工では、良好な加工面が得られる一方、加工速度は低下する。仕上げ加工における加工物除去量は、全除去量の数%であるのに対し、仕上げ加工時間は、全加工時間の2/3程度を占める場合もあり、これの短縮は、形彫り放電加工の課題である<sup>(54,55)</sup>。

仕上げ加工時間が長くなる、その他の理由について説明する。放電エネルギーの減少に伴い、放電が可能な極間距離は狭くなる。このため、極間距離に対する加工屑の大きさが無視できなくなり、加工屑滞留の影響が顕在化する<sup>(56)</sup>。極間に滞留した加工屑は、図1.5のように、電極-加工物間に、短絡ブリッジと呼ばれる橋絡を生成し、加工効率低下の原因となる、短絡を発生させる。粗加工のように極間距離が大きい条件では、短絡ブリッジが生成されにくく、また、ブリッジが生成された場合でも、放電発生時の熱エネルギーにより短絡ブリッジは破壊される。一方、仕上げ条件では、極間距離が狭く、また放電エネルギーが小さいため、加工屑の排出および一旦生成した短絡ブリッジの除去が困難である。以上より、形彫り放電加工における、仕上げ加工は粗加工と比較して加工が困難な状況で実施されると考えられ、極間において、加工屑を含んだ加工液の排出は、重要な課題である。

加工屑を排出するためには、極間外の加工屑濃度の低い加工液を、極間に強制的に流し込み、加工液を入れ替える必要がある。具体的な手法は、噴流法や噴射法と呼ばれる、ノズルから圧力を高めた加工液を極間に強制的に供給する方法と電極もしくは加工物を駆動し、極間と極間外の加工液の循環を促進する方法（電極／加工物駆動法）に分類できる。以下では、噴流法、噴射法と、電極／加工物駆動法について説明する



**Fig. 1. 5** Typical discharge waveforms

## (a) 噴流法, 噴射法

噴流法は、電極に設けた穴から、極間に加工液を強制的に供給する方法である。加工屑除去を確実に行うことが可能である一方、電極に加工液供給用の穴を加工する必要がある。特に、電極の寸法が大きい場合や、形状が複雑な場合、複数個の穴が必要となり、それらの配置、寸法に関する設計は簡単でない。また、加工後、加工面に噴射穴に起因した突起が生成されるため、仕上げ加工には適用し難い<sup>(57)</sup>。微細穴加工では、電極直径が 100 $\mu\text{m}$  以下となる場合、加工液供給用の穴を電極中央に有する、パイプ電極の製作は困難である<sup>(58)</sup>。

噴射法は、高圧ノズルを用いて、電極側面から、加工液を極間に供給する方法である。これは、電極を新たに加工する必要はなく、前述した噴流法に対して、適用しやすい利点がある。一方で、噴射ノズルの配置場所によっては、極間における加工液流れが様でなくなり、加工屑が不均一に分布する。たとえば、加工液の噴射が行き届かない部位、複数のノズルを利用する場合では、両者から供給される加工液が衝突する部位で、局所的に加工屑濃度が高くなり、この位置で発生する異常放電によって、加工面にくぼみが生じるなど、加工精度が著しく悪化することがある。しかしながら、加工液を一様に流すノズルの配置は困難である<sup>(57)</sup>。

## (b) 電極/加工物を駆動する方法

加工対象もしくは電極のジャンプ、揺動、回転が挙げられる。ジャンプは、加工物あるいは電極を強制的に駆動することにより、両者を相対的に退避・接近させ、その運動によって発生するポンピング作用により、加工面から、加工屑を含んだ加工液を排出、新たな加工液を導入する方法である。ジャンプ効果を高めるためには、電極もしくは加工対象の駆動量を大きくする必要があるが、ジャンプ中は加工が停止するため、ジャンプ時間の増加に伴い、実質加工時間が短くなり、加工効率が低下する<sup>(49)</sup>。

既存の放電加工機では、1回のジャンプ所要時間は数百ミリ秒程度、頻度は、1～数秒に一回行うため、ジャンプによる非加工時間は、全体加工時間の数十パーセントを占める<sup>(43, 59)</sup>。従って、短時間かつストロークの大きなジャンプ駆動が可能な高速位置決め機構の実現が望まれる。

揺動は、側面を仕上げる目的で、電極を加工方向と垂直な平面内で駆動する方法であるが、副次的な効果として、加工物を極間から排出する効果が見込まれる<sup>(52)</sup>。本手法は、揺動中も、電極・加工物間で放電が持続するため、加工が停止しないことが利点である。ただし、揺動量の増加に伴い、電極および加工対象の側面放電頻度が高くなるため、揺動駆動量は、側面放電が顕著に発生しない程度に、制限する必要がある。制限された揺動量を補い、より効果的に加工屑の排出性を改善するためには、揺動を高速に行う必要があると考えられるが、既存放電加工機で実現可能な揺動周波数は、数～十数ヘルツである。また、これまでに、弾性ヒンジ機構を用いた円軌道揺動によって、細穴加工高速化を実現した報告がされているが<sup>(60)</sup>、位置決め機構の応答性の限界から、検討された揺動周波数は、こちらも数ヘルツ程度である。

電極の回転は、加工液流れを発生させ、加工屑の排出を促進させるため、穴加工の高速化に対して有効な方法である。さらに、加工穴真円度を向上させることが可能である<sup>(61, 62)</sup>。ただし、彫り放電加工のように、円柱形状と異なる電極を用いる場合、回転は適用できない。また、加工機スピンドルに対する、工具電極の取り付け誤差は、回転電極のふれまわりを発生させる要因となる。ふれまわりは、加工穴直径および加工穴断面のテーパ角度の増加、電極交換ごとの加工穴形状のばらつきを生じさせるため、高精度穴加工における課題となる。

加工屑の排出性改善では、その他の方法として、圧電素子によって工具電極<sup>(63-65)</sup>、加工物<sup>(66-68)</sup>を振動させる方法、工具付近の加工液を超音波ウェルダによって超音波振動させる方法<sup>(69)</sup>が提案されている。圧電素子を用いた電極を高速に振動させる研究では、振

動方向が1自由度に限定されている。また、位置決め範囲が、数マイクロメートルであるため、加工屑排出に効果的なジャンプ駆動量の実現は不可能である。加工液の超音波振動では、深穴加工に伴い電極突き出し量が増加すると、音圧により電極が振動し、加工穴が楕円状にゆがむことや、電極が折損することが課題である。

### 1.3.3 放電加工の微細・高精度化

細穴加工では、回転電極ふれまわり抑制のため、セラミックス製の非導電性ガイドを用いることが一般的である<sup>(70)</sup>。ガイドでは、これに混入した加工屑の目詰まりによって、電極が破損することがあり、頻繁なメンテナンスが必要である<sup>(71)</sup>。また、使用する電極直径に対応したガイドを用意する必要があり、コストの増加を招く。更に、電極とガイド間には、摩擦力低減のため一定のクリアランスを設ける必要があり、ガイドを利用した場合でも、一定のふれまわりが生じる<sup>(70,72)</sup>。

ふれまわりを低減するその他の方法として、ワイヤ電極や二次電極を用いた、電極の機上創成がある<sup>(23,73)</sup>。これらの手法では、加工機スピンドルの回転軸と同一直線状に回転中心を持つ、電極の製作が可能であり、ふれまわりを抑制することができる。ただし、ワイヤ電極を用いる方法は、放電点が発生する領域が小さく、軸形成に多くの時間を費やす。また、二次電極を使用する方法では、この消耗によって、任意の軸径を得ることが困難である<sup>(74)</sup>。

放電穴加工では、工具によって加工物を貫通させる場合、穴の入口直径に対して、出口直径が縮小することがあり、ストレート状の断面形状を得ることが困難となる。これは、電極先端が、放電によって消耗し、底面の加工穴直径が縮小すること、加工穴入口部で、加工屑を介した側面放電発生した場合、径方向に材料が除去され、直径が拡大されることが主たる原因である。貫通加工では、工具を加工物が貫通した後、更に加工穴深さに対して2倍程度送る対策<sup>(75)</sup>がされるが、電極突き出し量を余分に取らなくてはならない。また、本手法は、加工物を貫通させない穴加工には適用できないこと、前述した、加工穴入口の直径拡大には対応できないことが課題となる。

ディーゼルエンジン噴射ノズルでは、ノズルの形状を逆テーパ状にすることにより、噴射燃料のキャビテーションを防止し、エンジン燃焼効率の改善が可能であるとされ、放電加工で、ワイヤ電極をガイドによって姿勢制御することによって、テーパ穴を加工することが試みられている<sup>(76)</sup>が、上述したガイドのメンテナンス、ガイドによる、ジャ

ンプや揺動など、電極運動の制限が問題である。以上のような、放電加工の微細、高精度化に対しては、図1.6のように、多自由度位置決め機構を利用して、電極を径方向および傾き方向に同時駆動することによって、ふれまわりおよびテーパ角の補正、逆テーパ穴の加工が実現できると考えられる。

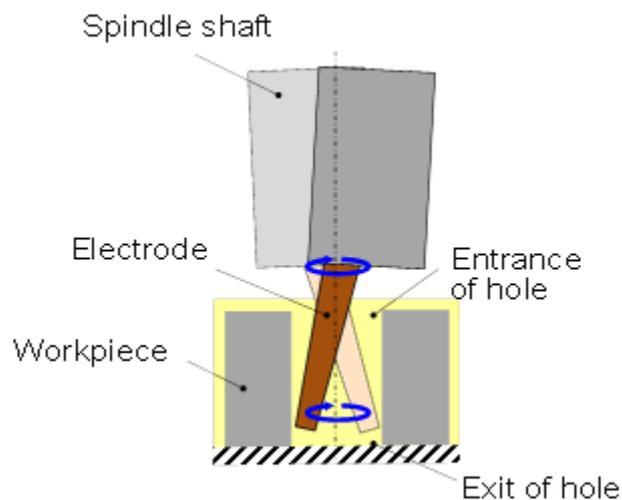


Fig. 1.6 Compensation of taper hole

## 1.4 磁気軸受を用いた放電加工用ローカルアクチュエータ

磁気軸受は、完全非接触の軸受である。潤滑油を必要としないため、宇宙機器やターボ分子ポンプ等の真空内高速回転機の適用例がある<sup>(77, 78)</sup>。また、無摩擦機構であるため、ナノメートルレベルの回転精度、位置決め制度を実現する機構が提案されている<sup>(79, 80)</sup>。放電加工においても、磁気軸受を用い、電極を高速高精度に1自由度駆動および、3自由度駆動が可能なモジュールが開発されている<sup>(81)</sup>。1自由度制御型モジュールを用いた放電加工実験では、電極の高応答位置決め制御により、既存の放電加工機を用いた場合と比較した、細穴加工の高速化を実現している。ただし、本機構の位置決め範囲は400 $\mu\text{m}$ であるため、深穴加工などで、効果的な加工屑排出を行う場合、ジャンプのストロークが不足することが考えられる。3自由度制御型モジュールは、低速ではあるが、平面方向の四角形揺動を実現している。ただし、これを放電加工に適用した報告はされていない。

ところで、磁気軸受は、設計次第で、高応答・高精度・多自由度かつ、ミリメートルオーダーの位置決め範囲を実現可能である<sup>(82, 83)</sup>。筆者の所属する研究室では、電極を5自由度方向に、高応答かつ高精度に駆動可能で、軸方向には、数ミリメートルの位置決め

範囲を有する、放電加工用磁気浮上ローカルアクチュエータを開発し、これを使用した、放電加工実験を行ってきた<sup>(84-87)</sup>。

先行研究<sup>(84, 85)</sup>では、磁気浮上ローカルアクチュエータ単体を用いた、直径 $\phi 1\text{mm}$ 、深さ数百マイクロメートル程度の穴加工において、極間距離を調整するための、高応答電極位置決め効果を検討し、加工速度は既存の放電加工機と比較し、20%改善されることを確認している。しかしながら、加工範囲拡大のため、既存の放電加工機およびローカルアクチュエータを組み合わせ、両者を協調制御させる加工システムの構築、また、深穴加工で問題となる、加工屑を排出するためのジャンプや揺動などの電極駆動は実施されていない。

また、磁気浮上ローカルアクチュエータによる極間距離調整と軸方向電極回転の併用により、直径約 $\phi 0.1$ 、深さ $1\text{mm}$ の穴加工では、加工速度が従来比の20倍に大幅改善されている<sup>(86, 87)</sup>。ここでは、二次電極を用いた機上創成によって微細電極を作製し、回転電極のふれまわりを抑制しているが、磁気浮上ローカルアクチュエータにより、電極を並進・傾き方向に積極的に駆動して、ふれまわりを抑制する手法は検討されていない。また、以上の先行研究は、細穴加工を対象としており、形彫り放電加工で用いられる、円柱以外の形状電極による放電加工は実施されていない。

### 1.5 本論文の目的

本論文の目的を、電磁力駆動型多自由度ローカルアクチュエータを用いた、細穴放電加工の高速化、高精度化、形彫り放電加工の高速化の実現とする。細穴放電加工の高速化に関しては、既存放電加工機と高応答多自由度制御型磁気浮上ローカルアクチュエータを組み合わせた協調制御放電加工システムを構築し、加工速度における、極間距離の高応答・高精度調整の効果を検討する。また、異常放電を発生させ、加工速度低下の原因となる加工屑を排出するため、磁気浮上ローカルアクチュエータによる軸方向高速ジャンプ、径方向高速揺動を提案し、その効果を実験的に検討する。

細穴放電加工の高精度に関しては、工具電極の取り付け誤差に起因する、回転電極のふれまわりを抑制するため、5自由度制御型磁気浮上ローカルアクチュエータを用いた、ふれまわりの計測および補正方法を提案し、その原理検証と補正を用いた細穴加工を実施する。また、電極消耗に起因する穴断面のテーパ形状を改善するため、電極をすりこ

ぎ状に多自由度駆動させる方法を提案し、その有効性を調査する。

形彫り放電加工の高速化に関しては、穴放電加工の高速化で使用した、5自由度制御型磁気浮上ローカルアクチュエータを用い、高応答・高精度極間距離調整、軸方向ジャンプおよび径方向揺動のほかに、数百ヘルツの軸方向高周波微小振動（ディザ）の、単独および複合効果を検討する。更に、径方向揺動に対しては、加工速度における、揺動周波数および直径の影響を調査する。

また、ローカルアクチュエータを用いた放電加工システムの実用化を目指し、5自由度型磁気軸受と比べ、構造が簡易な2軸制御型高速ローカルアクチュエータ<sup>(88)</sup>による揺動運動を用いた、形彫り放電加工における仕上げ加工の高速化を検討する。実験においては、加工電源設定を、粗加工から仕上げ加工まで段階的に切り替える、汎用的な形彫り放電加工プログラムを適用する。工具電極は、角柱型のものを使用し、従来の円揺動のほか、電極形状に対応した、四角形揺動も行う。

### 1.6 本論文の構成

本論文の構成と内容を以下に示す。

第2章「高応答多自由度電極駆動による放電穴加工の高速化」では、細穴加工の高速化を目的とし、放電加工中の極間距離の高応答・高精度調整および加工屑の排出を試みる。まず、電極の多自由度に高応答・高精度位置決めが可能な5自由度制御型磁気浮上ローカルアクチュエータと、加工に必要な電極送り量を発生可能な既存の放電加工機を組み合わせ、両位置決め機構を協調動作させる放電加工システムを構築する。

次に、ローカルアクチュエータによる、高応答かつ高精度な極間距離の調整および加工屑の排出促進のための軸方向高速ジャンプ、径方向円揺動の複合効果に関して、直径の異なる2種類の円柱型電極を用いて、放電穴加工を検討する。また、ジャンプに関しては、数値流体力学（CFD）解析を利用し、ジャンプ中の加工液流れを調査する。

第3章「高応答多自由度電極駆動による放電穴加工の高精度化」では、細穴加工の高精度化を目的とし、5自由度制御型磁気浮上ローカルアクチュエータによる電極の多自由度駆動を用いた検討を行う。まず、電極取り付け誤差に起因する、回転電極のふれまわりを抑制するため、非接触式光学センサを用いたふれまわり計測方法を提案する。次に、計測したふれまわりの情報を利用して、ふれまわりを補正する方法を提案し、ふれ

まわり補正を適用した放電穴加工を実施する。

最後に、電極先端部の消耗を主な原因として発生する、テーパ状の加工穴断面を、電極をすりこぎ状に多自由度駆動することによって補正する方法を提案し、本手法を用いた、細穴放電加工を実施する。

第4章「高応答多自由度電極駆動による形彫り放電加工における仕上げ加工の高速化」では、形彫り放電加工における、仕上げ加工の高速化を目的とし、高応答ローカルアクチュエータを用いた検討を行う。まず、第2で用いた5自由度制御型磁気浮上ローカルアクチュエータによる、極間距離の高応答・高精度調整および加工屑の排出性改善のための電極駆動方法である、軸方向ジャンプ、径方向揺動および軸方向高周波微小（ディザ）の効果を検討する。また、径方向揺動に対しては、揺動周波数および揺動の直径を変化させ、加工速度における、揺動条件の影響を詳細に調査する。

最後に、仕上げ加工の高速化の実用化を目指し、電極の軸方向回転を拘束可能で、構造が簡易な2軸制御型高速ローカルアクチュエータによる、電極の揺動効果を検討する。ここでは、形彫り放電加工を模擬するため、角柱電極を使用し、円揺動だけでなく、電  
第5章「結 論」では、各章で得られた結果と結論を述べ、今後の課題を述べる。

## 第2章 高応答多自由度電極駆動による 放電穴加工の高速化

### 2.1 緒言

近年、電気・電子、光学、医療、自動車などの分野では、穴加工の高品位、高速化が要求されている。放電加工は、放電エネルギーで加工物を溶解、除去する非接触加工法である。放電加工では、工具反力が小さく、微小工具の適用や、硬質材料、難削材料の加工が比較的容易などの利点を有するが、機械加工やレーザー加工などと比較して、加工速度が遅い。

放電加工では、電極と加工物の距離（極間距離）は、常に変化しており、放電をたゆまなく発生させるためには、適切な極間距離を高応答かつ高精度に維持することが必要である。しかしながら、一般的な放電加工機は、電極の多自由度駆動に対応するため、1軸ステージの積み重ね構造が用いられており、特に、下部のステージでは、駆動質量が大きく、電極の応答速度が制限されることが、加工速度低下の原因となっている。また、加工物と電極間におけるギャップ（極間）に滞留した加工屑も、異常放電の発生原因となり、加工速度を低下させる。このため、加工屑の排出は、放電加工における重要課題である。

本章では、放電穴加工の高速化を目的とする。まず、電極を高応答・高精度・多自由度に位置決め可能な、磁気浮上ローカルアクチュエータを既存放電加工機と組み合わせ、両位置決め機構を協調動作させる放電加工システムを構築する。次に、加工屑を排出するための軸方向ジャンプと、径方向揺動を提案し、直径の異なる2種類の円柱型電極を用いた加工実験において、これらの効果を実験的に検討する。最後に、ジャンプ中の加工屑の挙動を調査するため、数値流体力学解析による、ジャンプ中の加工液流れのシミュレーションを行う。

### 2.2 放電穴加工高速化法の提案

#### 2.2.1 極間距離の高応答調整

放電加工では、放電によって、加工物および電極が溶解、除去されるため、両者

の相対距離（極間距離）は常に変化している．放電を持続させるためには，放電に適した極間距離を保つよう，電極あるいは加工物を高応答・高精度に位置補正する必要がある．本章では，加工方向に対して 200Hz 以上のバンド幅を有する，5 自由度制御型磁気浮上ローカルアクチュエータ（ローカルアクチュエータ）を用いて，電極を高応答かつ高精度に位置制御し，極間距離の微調整を行うことによって，放電穴加工の高速化を試みた．

### 2.2.2 軸方向ジャンプ

放電加工では，加工屑と呼ばれる，放電によって除去された加工物や工具電極の微粒子，加工液の分解生成物である炭化物が，極間に滞留する．加工屑は，異常放電の発生原因となり，加工速度や加工粗さに影響をおよぼすため，加工屑を極間から排出し，異常放電を回避することは，放電加工の課題の一つである．加工屑排出の一般的な手法に，[図 2.1](#)のように，電極を加工面から一旦退避させ，再度接近させるポンピング作用を利用する，ジャンプフラッシング（ジャンプ）がある．ジャンプによる加工屑排出は，電極の引き上げ量を大きくするほど効果的であるとされる．しかし，ジャンプ中は放電が休止し，加工が中断するため，ジャンプ駆動量の増加に伴う，ジャンプ時間の増加は，加工効率を低下させる．そこで，本章では，ローカルアクチュエータによる，引き上げ量数百マイクロメートルかつ，所要時間数十ミリ秒の高速ジャンプを用いて，加工屑の排出および，放電穴加工の高速化を試みた．

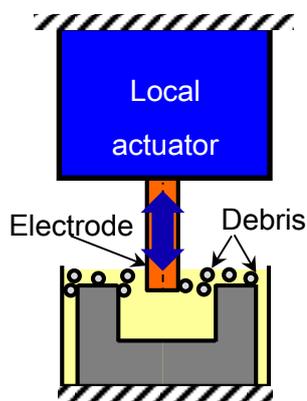


Fig. 2.1 Jump motion

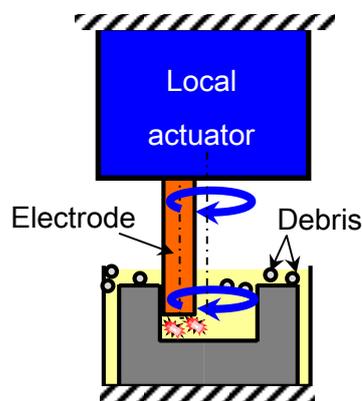


Fig. 2.2 Orbital motion

### 2.2.3 径方向揺動

揺動は、図 2. 2 のように、加工中、電極を加工方向と垂直な平面内で多自由度駆動し、加工液を攪拌し、加工屑を加工面から排出させる方法である。既存の放電加工機を用いた揺動では、位置決めステージ応答性の限界から、その周波数は数ヘルツ程度に制限される。そこで本章では、ローカルアクチュエータの径方向高応答駆動を利用し、電極を振幅数マイクロメートル、周波数数百ヘルツで揺動させ、放電穴加工の高速化を試みた。

## 2.3 5自由度制御型磁気浮上ローカルアクチュエータ

### 2.3.1 磁気浮上ローカルアクチュエータの構成

本章で使用した、ローカルアクチュエータの写真と断面図を図 2. 3 に示す。ローカルアクチュエータは主に、電極を取り付けるスピンドル、スピンドルを軸方向に駆動するスラスト磁気軸受、径方向および傾き方向に駆動するため、上下に取り付けられたラジアル磁気軸受から構成される。

効果的な加工屑排出のための軸方向ジャンプでは、高速かつミリメートルオーダーでの駆動が要求される。このため、図 2. 4 のようにスラスト磁気軸受には、高速駆動が可能で、数ミリメートルの動作範囲を持つ、ボイスコイルモータ型磁気軸受が採用された。スラスト磁気軸受は、スピンドルに組み込んだ永久磁石リングとハウジングに配置した2個の空芯コイルからなる。また、ハウジングには、永久磁石が取り付けられており、スピンドルに取り付けた永久磁石との間で発生する吸引力により、スピンドルの自重を補償する。この機能によって、コイルのバイアス電流を低減し、コイルの発熱を抑制することが可能である。

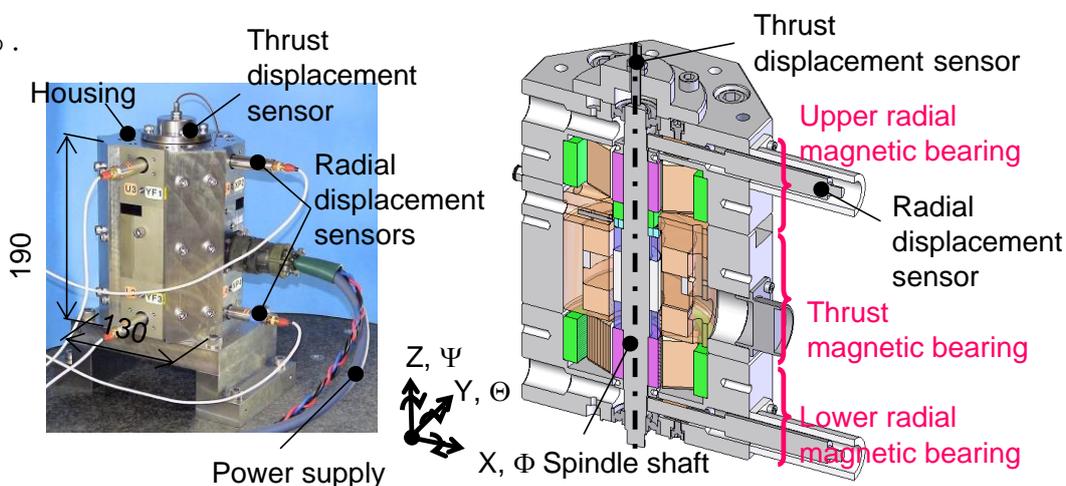


Fig. 2. 3 Photograph and cross section of magnetically levitated local actuator (MLA)

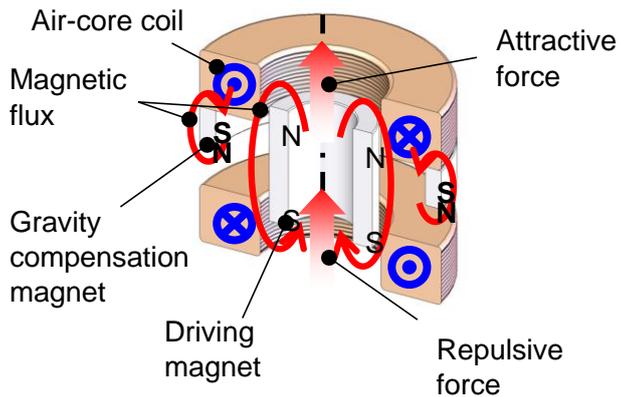


Fig. 2. 4 Configuration of thrust magnetic bearing

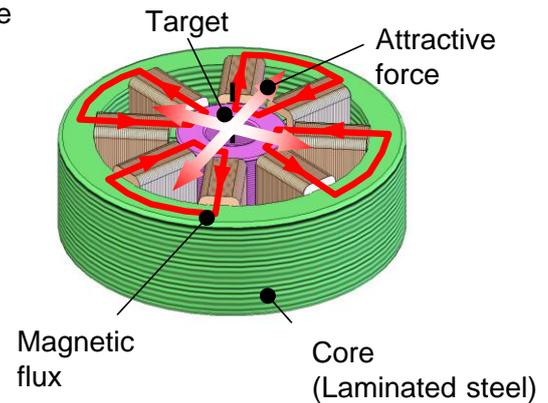


Fig. 2. 5 Configuration of radial magnetic bearing

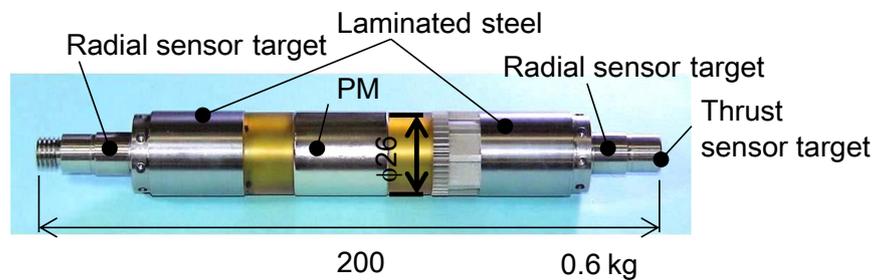


Fig. 2. 6 Photograph of spindle shaft

図 2. 5 にラジアル磁気軸受の概要を示す。ラジアル磁気軸受はリラクタンス方式のヘテロポーラ型磁気軸受を採用した。渦電流損を減らす為、電磁石コアおよびスピンドルの電磁力ターゲット部には、積層鋼板を用いた。図 2. 6 は、スピンドルの写真である。スピンドルは、長さ200mm、最大径 $\phi 26$ mm、電極および電極の取り付け部を含めた質量は、0.6kgである。

### 2. 3. 2 ローカルアクチュエータモデル

ローカルアクチュエータのモデルを図 2. 7 に示す。本ローカルアクチュエータは、スピンドルZ軸方向の運動をスラスト磁気軸受で制御し、X、Y、 $\Theta$ および $\Phi$ 軸、合計4軸方向の運動を、上下のラジアル磁気軸受で制御する。各運動方向の位置決め制御コントローラ設計のため、磁気軸受の動的モデルを導出する。

スピンドルZ、Xおよび $\Theta$ 軸方向の運動方程式を式(2. 1)に示す。Yおよび $\Phi$ 軸方向については、Xおよび $\Theta$ 軸方向と同様であるため省略する。

## 第2章 高応答多自由度電極駆動による放電穴加工の高速化

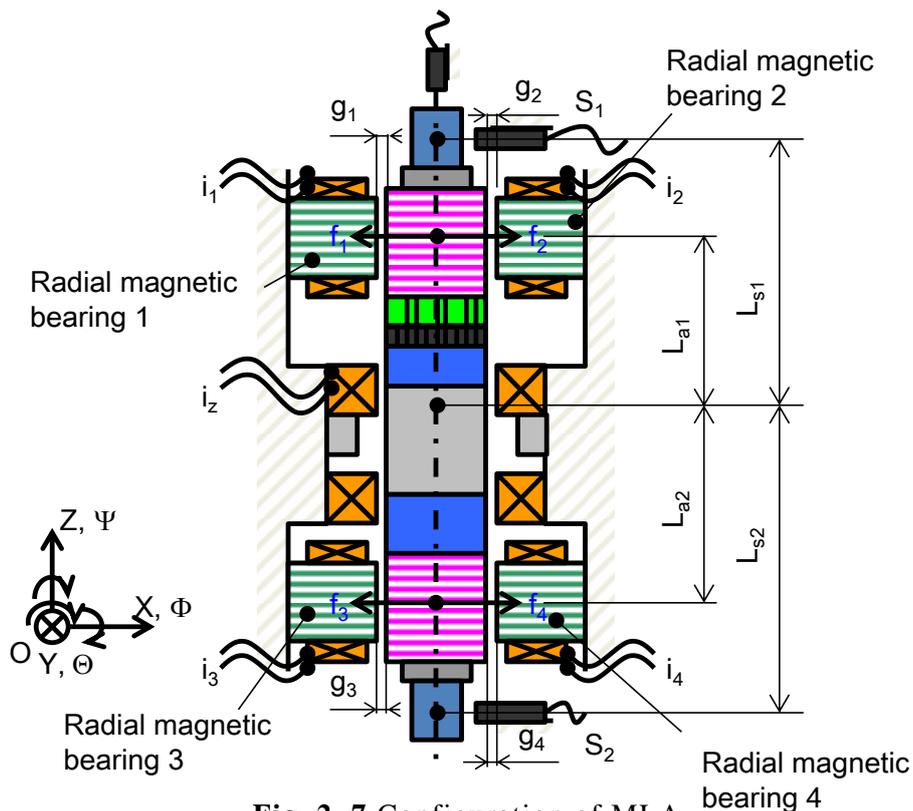


Fig. 2. 7 Configuration of MLA

$$\begin{aligned}
 m\ddot{z} + c_z\dot{z} + k_z z &= f_z \\
 m\ddot{x} + c_x\dot{x} &= f_x \quad \dots\dots\dots (2. 1) \\
 J_\theta\ddot{\theta} + c_\theta\dot{\theta} &= M_\theta
 \end{aligned}$$

ここで、

$z$  : スピンドルZ軸方向変位

$x$  : スピンドル X 軸方向変位

$\theta$  : スピンドル $\Theta$  軸方向回転角

$m$  : スピンドル質量

$J_\theta$  : スピンドル慣性モーメント

$c_z$  : スピンドルZ軸方向減衰係数

$k_z$  : スピンドルZ軸方向ばね定数

$f_z$  : スラスト磁気軸受Z軸方向発生力

$c_x$  : スピンドル X 軸方向減衰係数

$c_\theta$  : スピンドル $\Theta$ 軸方向減衰係数

$f_x$  : ラジアル磁気軸受 X 軸方向発生力

$M_\theta$  : ラジアル磁気軸受 $\Theta$ 軸方向発生トルク

とする。ボイスコイルモータを用いたスラスト磁気軸受Z軸方向発生力 $f_z$ は、

## 第2章 高応答多自由度電極駆動による放電穴加工の高速化

$$f_z = k_{iz} i_z \dots\dots\dots (2.2)$$

となる。ここで、 $i_z$ ：コイル電流、 $k_{iz}$ ：電流・力係数である。X軸方向に作用する力 $f_x$ と $\Theta$ 軸方向に作用するトルク $M_\theta$ は、電磁石の漏れ磁束、磁気飽和、ヒステリシス、渦電流などの影響を無視すると、式(2.3)となる。

$$\begin{aligned} f_x &= f_2 - f_1 + f_4 - f_3 \\ M_\theta &= (f_2 - f_1)L_{a1} - (f_4 - f_3)L_{a2} \dots\dots\dots (2.3) \end{aligned}$$

ただし、 $f_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ )は、各電磁石が発生する電磁力であり、式(2.4)のとおりである。

$$f_i = k_0 \frac{i_i^2}{g_i^2} \quad (i=1,2,3,4) \dots\dots\dots (2.4)$$

ここで、

- $i_i$ ：コイル電流
- $g_i$ ：電磁石コアとスピンドル電磁石ターゲット間の距離
- $k_0$ ：電磁石の電流・変位・力係数
- $L_{a1}$ ：スピンドル重心から上部電磁石電磁力の作用点までの距離
- $L_{a2}$ ：スピンドル重心から下部電磁石電磁力の作用点までの距離

とする。

式(2.4)から明らかなように、電磁力は、電磁石ギャップの2乗に反比例し、コイル電流の2乗に比例する非線形性を有する。ただし、電磁石にバイアス電流を与えた条件で、制御電流をバイアス電流と比較して微小、かつスピンドルの駆動範囲を、電磁石の初期ギャップに対して微小な領域に限定する場合、電磁力は線形化可能である。

電磁力の線形化について説明する。バイアス電流を $i_0$ 、各コイルに流れている制御電流のうち、スピンドル X 軸および $\Theta$ 軸方向運動の制御電流成分をそれぞれ、 $i_{ix}$ 、 $i_{i\theta}$ とする。このとき、各コイルに流れる電流は、式(2.5)となる。

$$\begin{aligned} i_1 &= i_0 - i_{1x} - i_{1\theta} \\ i_2 &= i_0 + i_{2x} + i_{2\theta} \\ i_3 &= i_0 - i_{3x} + i_{3\theta} \\ i_4 &= i_0 + i_{4x} - i_{4\theta} \dots\dots\dots (2.5) \end{aligned}$$

また、それぞれの電磁石とスピンドルのギャップは式（2. 6）のようになる．

$$\begin{aligned}
 g_1 &= g_0 + x + L_{a1}\theta \\
 g_2 &= g_0 - x - L_{a1}\theta \\
 g_3 &= g_0 + x - L_{a2}\theta \\
 g_4 &= g_0 - x + L_{a2}\theta
 \end{aligned} \quad (2. 6)$$

ここで、 $g_0$ は、電磁石とスピンドルの電磁力ターゲット部の初期ギャップである．電磁力 $f_i$ は、式（2. 4）に、式（2. 5）および式（2. 6）を代入することにより、式（2. 7）で示される．

$$\begin{aligned}
 f_1 &= k_0 \frac{\{i_0 - (i_{1x} + i_{1\theta})\}^2}{\{g_0 + (x + L_{a1}\theta)\}^2} \\
 f_2 &= k_0 \frac{\{i_0 + (i_{2x} + i_{2\theta})\}^2}{\{g_0 - (x + L_{a1}\theta)\}^2} \\
 f_3 &= k_0 \frac{\{i_0 - (i_{3x} - i_{3\theta})\}^2}{\{g_0 + (x - L_{a2}\theta)\}^2} \\
 f_4 &= k_0 \frac{\{i_0 + (i_{4x} - i_{4\theta})\}^2}{\{g_0 - (x - L_{a2}\theta)\}^2}
 \end{aligned} \quad (2. 7)$$

次に、 $f_1$ を式（2. 8）のように変形する．

$$f_1 = k_0 \frac{i_0^2}{g_0^2} \times \frac{\left(1 - \frac{i_{1x} + i_{1\theta}}{i_0}\right)^2}{\left(1 + \frac{x + L_{a1}\theta}{g_0}\right)^2} \quad (2. 8)$$

$\Delta i_1 = (i_{1x} + i_{1\theta})/i_0$ 、 $\Delta x_1 = (x + L_{a1}\theta)/g_0$ と置き、式（2. 8）を整理すると、

$$f_1 = k_0 \frac{i_0^2}{g_0^2} \times \frac{(1 - \Delta i_1)^2}{(1 + \Delta x_1)^2} = k_0 \frac{i_0^2}{g_0^2} (1 - \Delta i_1)^2 (1 + \Delta x_1)^{-2} \quad (2. 9)$$

となる．ここで、 $i_0 \gg i_{1x}$ 、 $i_0 \gg i_{1\theta}$ 、 $g_0 \gg x$ 、 $g_0 \gg L_{a1}\theta$ のとき、 $1 \gg \Delta i_1$ 、 $1 \gg \Delta x_1$ であるから、式（2. 9）をバイアス電流  $i_0$  および初期ギャップ  $g_0$ の近傍でテイラー展開し、2次以上の項を無視すると、

$$f_1 \cong k_0 \frac{i_0^2}{g_0^2} (1 - 2\Delta i_1 - 2\Delta x_1) \quad (2. 10)$$

となり，電磁力が線形化される．

式（2. 7）の $f_2 \sim f_4$ についても同様の操作によって，線形化された電磁力に関する，式（2. 11）が得られる．

$$\begin{aligned}
 f_1 &\cong k_0 \frac{i_0^2}{g_0^2} (I - 2\Delta i_1 - 2\Delta x_1) \\
 f_2 &\cong k_0 \frac{i_0^2}{g_0^2} (I + 2\Delta i_2 + 2\Delta x_2) \\
 f_3 &\cong k_0 \frac{i_0^2}{g_0^2} (I - 2\Delta i_3 - 2\Delta x_3) \dots\dots\dots (2. 11) \\
 f_4 &\cong k_0 \frac{i_0^2}{g_0^2} (I + 2\Delta i_4 + 2\Delta x_4)
 \end{aligned}$$

式（2. 11）を，式（2. 3）に代入すると，スピンドルX軸方向に作用する $f_x$ ， $\Theta$ 軸方向に作用するトルク $M_\theta$ は，それぞれ，

$$\begin{aligned}
 f_x &= k_i (i_{1x} + i_{2x} + i_{3x} + i_{4x}) + k_i (i_{1\theta} + i_{2\theta} - i_{3\theta} - i_{4\theta}) \\
 &\quad + k_x x + \frac{L_{a1} - L_{a2}}{2} k_x \theta \\
 M_\theta &= k_i \{L_{a1} (i_{1\theta} + i_{2\theta}) + L_{a2} (i_{3\theta} + i_{4\theta})\} + k_i \{L_{a1} (i_{1x} + i_{2x}) - L_{a2} (i_{3x} + i_{4x})\} \dots (2. 12) \\
 &\quad + k_\theta \theta + \frac{L_{a1} - L_{a2}}{L_{a1} + L_{a2}} k_\theta x
 \end{aligned}$$

となる．ただし，電流力係数 $k_i$ ，X軸方向ばね定数 $k_x$ ， $\Theta$ 軸方向ばね定数 $k_\theta$ を，

$$\begin{aligned}
 k_i &= 2k_0 \frac{i_0}{g_0^2} \\
 k_x &= 8k_0 \frac{i_0^2}{g_0^3} \dots\dots\dots (2. 13) \\
 k_\theta &= 4k_0 \frac{i_0^2}{g_0^3} (L_{a1}^2 + L_{a2}^2)
 \end{aligned}$$

とおいた．以上より，線形化されたスピンドルの運動方程式は，Xおよび $\Theta$ 軸方向に対して，それぞれ，式（2. 14），（2. 15）となる．

$$\begin{aligned}
 m\ddot{x} + c_x \dot{x} - k_x x \\
 = k_i (i_{1x} + i_{2x} + i_{3x} + i_{4x}) + k_i (i_{1\theta} + i_{2\theta} - i_{3\theta} - i_{4\theta}) + \frac{L_{a1} - L_{a2}}{2} k_x \theta \dots\dots (2. 14)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & J_{\theta} \ddot{\theta} + c_{\theta} \dot{\theta} - k_{\theta} \theta \\
 & = k_i \{L_{a1}(i_{1\theta} + i_{2\theta}) + L_{a2}(i_{3\theta} + i_{4\theta})\} \dots\dots\dots (2. 15) \\
 & + k_i \{L_{a1}(i_{1x} + i_{2x}) - L_{a2}(i_{3x} + i_{4x})\} + \frac{L_{a1} - L_{a2}}{L_{a1}^2 + L_{a2}^2} k_{\theta} x
 \end{aligned}$$

上2式について、右辺第2項はそれぞれ、 $\Theta$ から X 軸方向、および X から $\Theta$ 軸方向への、駆動電流の干渉を示す。ここで、式(2. 14)中、スピンドル $\Theta$ 軸方向の運動制御を行うための駆動電流  $i_{i\theta} (i=1, 2, 3, 4)$ を、式(2. 16)のように置くと、右辺2項目が相殺され、 $\Theta$ から X 軸方向の制御電流の非干渉化がなされる。

$$i_{1\theta} = i_{2\theta} = i_{3\theta} = i_{4\theta} = i_{\theta} \dots\dots\dots (2. 16)$$

式(2. 15)に含まれる X から $\Theta$ 軸方向への駆動電流の干渉項については、スピンドル X 軸方向の制御電流  $i_{ix} (i=1, 2, 3, 4)$ を、式(2. 17)と置くことによって、消去可能である。

$$\begin{aligned}
 & i_{1x} = i_{2x} = C_{1x} i_x \dots\dots\dots (2. 17) \\
 & i_{3x} = i_{4x} = C_{2x} i_x
 \end{aligned}$$

ここで、 $C_{1x}, C_{2x}$ はコイル電流の重み係数とし、次式(2. 18)で示される。

$$\begin{aligned}
 & C_{1x} = \frac{2L_{a2}}{L_{a1} + L_{a2}} \dots\dots\dots (2. 18) \\
 & C_{2x} = \frac{2L_{a1}}{L_{a1} + L_{a2}}
 \end{aligned}$$

式(2. 12)～式(2. 18)から、スピンドルの運動方程式は、各軸方向に対して、以下のようなになる。

$$m\ddot{x} + c_x \dot{x} - k_x x = 4k_i i_x + \frac{L_{a1} - L_{a2}}{2} k_x \theta \dots\dots\dots (2. 19)$$

$$J_{\theta} \ddot{\theta} + c_{\theta} \dot{\theta} - k_{\theta} \theta = 2(L_{a1} + L_{a2})k_i i_{\theta} + \frac{L_{a1} - L_{a2}}{L_{a1}^2 + L_{a2}^2} k_{\theta} x \dots\dots\dots (2. 20)$$

式(2. 19)、(2. 20)の右辺第2項は、 $\Theta$ 軸方向から X 軸方向および X 軸方向から $\Theta$ 軸方向の、スピンドルの変位に伴う、運動の干渉を示すが、本章では、これらを外乱として扱い、ロバスト性の高いコントローラを設計するこ

とで補償した。

磁気軸受コイルに印加される電圧と制御電流の関係を，式（2. 2 1）～式（2. 2 3）に示す。ただし，ラジアル磁気軸受に関する式（2. 2 2）および（2. 2 3）では，[図 2. 7](#)のラジアル磁気軸受1について示した。

$$v_z = L_z \dot{i}_z + R_z i_z + k_{vz} \dot{z} \dots\dots\dots (2. 2 1)$$

$$v_x = L_x \dot{i}_x + R_x i_x + k_v \dot{x} \dots\dots\dots (2. 2 2)$$

$$v_\theta = L_\theta \dot{i}_\theta + R_\theta i_\theta + k_v L_a \dot{\theta} \dots\dots\dots (2. 2 3)$$

ただし，式中の物理定数および変数は下記の通りである。

- $v_z$  : スラスト磁気軸受コイルの印加電圧
- $L_z$  : スラスト磁気軸受コイルインダクタンス
- $R_z$  : スラスト磁気軸受コイル抵抗
- $k_{vz}$  : スラスト磁気軸受速度起電力係数
- $v_x$  : ラジアル磁気軸受コイルの端子間電圧（X軸方向制御用）
- $v_\theta$  : ラジアル磁気軸受コイルの端子間電圧（ $\Theta$ 軸方向制御用）
- $L$  : ラジアル磁気軸受コイルインダクタンス
- $R$  : ラジアル磁気軸受コイル抵抗
- $k_v$  : ラジアル磁気軸受速度起電力係数

### 2. 3. 3 スラスト磁気軸受コントローラの設計

スピンドルをZ軸方向に位置決め制御するための，コントローラを設計する。

[図 2. 8](#)に，Z軸方向制御システムのブロック線図を示す。コントローラは，定常偏差を取り除くための積分器と，式（2. 2 4）の伝達関数 $R_z(z)$ で示される，レギュレータを採用した。

$$R_z(s) = \frac{b_{2z}s^2 + b_{1z}s + b_{0z}}{s^2 + a_{1z}s + a_{0z}} \dots\dots\dots (2. 2 4)$$

[図 2. 8](#)において，変位目標 $Z_r$ からスピンドルの変位 $Z$ までの，閉ループ伝達関数は，式（2. 2 5）のようになる。

$$\frac{Z}{Z_r} = \frac{\gamma K_i (b_{2z}s^2 + b_{1z}s + b_{0z})}{A(s)} \dots\dots\dots (2. 2 5)$$

ただし、伝達関数の特性方程式  $A(s)$  は、式 (2. 26) で示される。

$$\begin{aligned}
 A(s) = & ML_z s^6 + \{ ML_z a_{1z} + (MR_z + L_z C_z) \} s^5 \\
 & + \{ (MR_z + L_z C_z) a_{1z} + ML_z a_{0z} + (R_z C_z + L_z K_z + K_{iz} K_{vz}) \} s^4 \\
 & + \{ K_{iz} b_{2z} + (R_z C_z + L_z K_z + K_{iz} K_{vz}) a_{1z} + (MR_z + L_z C_z) a_{0z} + R_z K_z \} s^3 \dots (2. 26) \\
 & + \{ R_z K_z a_{1z} + (R_z C_z + L_z K_z + K_{iz} K_{vz}) a_{0z} + \gamma_z K_{iz} b_{2z} + K_{iz} b_{1z} \} s^2 \\
 & + (R_z K_z a_{0z} + \gamma_z K_{iz} b_{1z} + K_{iz} b_{0z}) s + \gamma_z K_{iz} b_{0z}
 \end{aligned}$$

式中、パラメータ  $\gamma_z, a_{1z}, a_{0z}, b_{2z}, b_{1z}, b_{0z}$  は、次の手順で決定される。まず、式 (2. 27) のように、伝達関数  $A(s)$  が複素平面の左半平面の実軸上に、6重根を持つよう極  $\alpha_z$  を指定する。

$$A(s) = ML_z (s + \alpha_z)^6 \dots (2. 27)$$

式 (2. 26) および (2. 27) から、 $a_{1z}, a_{0z}, b_{2z}$  が、式 (2. 28) のように、自動的に決定される。

$$\begin{aligned}
 a_{1z} &= 6\alpha_z - \frac{L_z c_z + mR_z}{mL_z} \\
 a_{0z} &= 15\alpha_z^2 - \frac{L_z c_z + mR_z}{mL_z} a_{1z} - \frac{L_z k_z + R_z c_z + k_{iz} k_{vz}}{mL_z} \dots (2. 28) \\
 b_{2z} &= \frac{20\alpha_z^3 mL_z}{k_{iz}} - \frac{L_z k_z + R_z c_z + k_{iz} k_{vz}}{k_{iz}} a_{1z} - \frac{L_z c_z + mR_z}{k_{iz}} a_{0z} - \frac{R_z k_z}{k_{iz}}
 \end{aligned}$$

次に、 $\gamma_z$  に関する3次方程式 (2. 29) を解き、その実数解を  $\gamma_z$  とする。

$$\begin{aligned}
 & k_{iz} b_{2z} \gamma_z^3 + \{ (R_z c_z + L_z k_z + k_{iz} k_{vz}) a_{0z} + R_z k_z a_{1z} - 15\alpha_z^4 mL_z \} \gamma_z^2 \\
 & + (6\alpha_z^5 mL_z - R_z k_z a_{0z}) \gamma_z - \alpha_z^6 mL_z = 0 \dots (2. 29)
 \end{aligned}$$

最後に、決定された  $\alpha_z, a_{0z}, \gamma_z$  を、式 (2. 30) 代入することによって、 $b_{1z}, b_{0z}$  が決定される。

$$\begin{aligned}
 b_{1z} &= \frac{6\alpha_z^5 mL_z - R_z k_z a_{0z}}{\gamma_z k_{iz}} - \frac{\alpha_z^6 mL_z}{\gamma_z^2 k_{iz}} \dots (2. 30) \\
 b_{0z} &= \frac{\alpha_z^6 mL_z}{\gamma_z^2 k_{iz}}
 \end{aligned}$$

本項までの物理定数および制御パラメータを表2. 1, 表2. 2にまとめる。

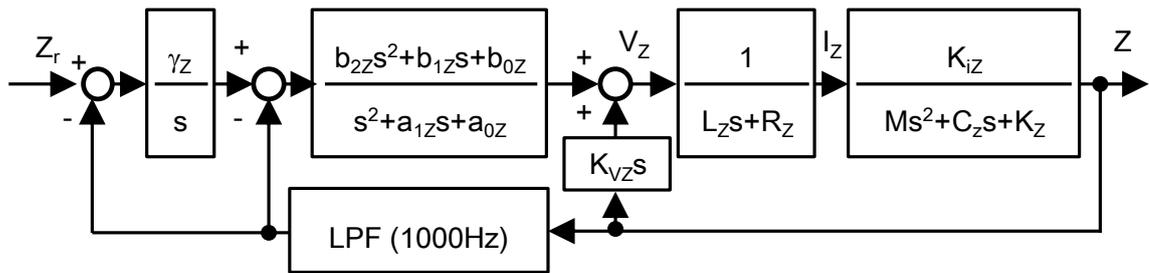


Fig. 2. 8 Block diagram of MLA control system in Z direction

Table 2. 1 Parameter of MLA system in Z direction

m	0.597 kg
C <sub>z</sub>	10 Ns/m
k <sub>z</sub>	2.04×10 <sup>3</sup> N/m
L <sub>z</sub>	17.6 mH
R <sub>z</sub>	6.6 Ω
K <sub>vz</sub>	11.0Vs/m
K <sub>iz</sub>	11.N/A

Table 2. 2 Control parameter of MLA system in Z direction

α <sub>z</sub>	2π×180
γ <sub>z</sub>	4.42×10 <sup>2</sup>
a <sub>0z</sub>	1.66×10 <sup>7</sup>
a <sub>1z</sub>	6.39×10 <sup>3</sup>
b <sub>0z</sub>	4.91×10 <sup>11</sup>
b <sub>1z</sub>	1.49×10 <sup>9</sup>
b <sub>2z</sub>	2.30×10 <sup>6</sup>

### 2. 3. 4 ラジアル磁気軸受コントローラの設計

ラジアル磁気軸受のコントローラ設計について説明する。ラジアル磁気軸受では、コイル電流の遅れを補償するため、図 2. 9 に示す、PIコントローラを適用した電流フィードバックループ(CFL : Current Feedback Loop)を導入した。コイル電流の目標値からコイル電流までの伝達関数は、式 (2. 3 1) となる。

$$\frac{I_x(s)}{I_{ix}(s)} = \frac{\beta_e s + \gamma_e}{L_x s^2 + (R_x + \beta_e) s + \gamma_e} \dots\dots\dots (2. 3 1)$$

なお、速度起電力V<sub>dx</sub>は外乱項として扱う。

図 2. 1 0, 図 2. 1 1 に、X軸およびθ 軸方向について、それぞれの位置、姿勢目標値からスピンドル位置・姿勢までの、ブロック線図を示す。図中の外乱は、2. 3. 2 項で説明した、スピンドルの並進および傾き方向の運動によって発生する、トルクおよび力である。

ローカルアクチュエータのX軸方向およびθ軸方向の位置決めコントローラは、Z軸方向と同様に、定常偏差を取り除く積分器および、分母2次、分子2次のレギュレータを採用し、前項と同様の方法を用いて、各制御パラメータを決定し

## 第2章 高応答多自由度電極駆動による放電穴加工の高速化

た。ただし、本研究では、コントローラ設計を簡単にするため、式 (2.31) の伝達関数を、式 (2.32) のように、1次遅れ系で近似した。

$$\frac{I_x(s)}{I_{dx}(s)} = \frac{1}{T_{dx}s+1} \dots\dots\dots (2.32)$$

ここで、 $T_{dx}$ は近似した1次遅れ系の時定数である。最後に、2.3.2項から本項までの物理定数および制御パラメータを表2.3、表2.4にまとめる。

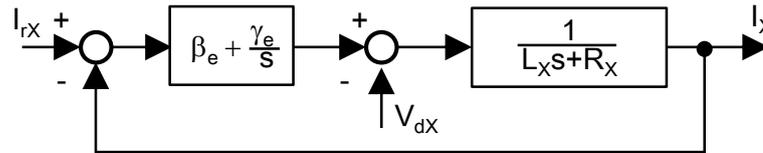


Fig. 2.9 Block diagram of current feedback

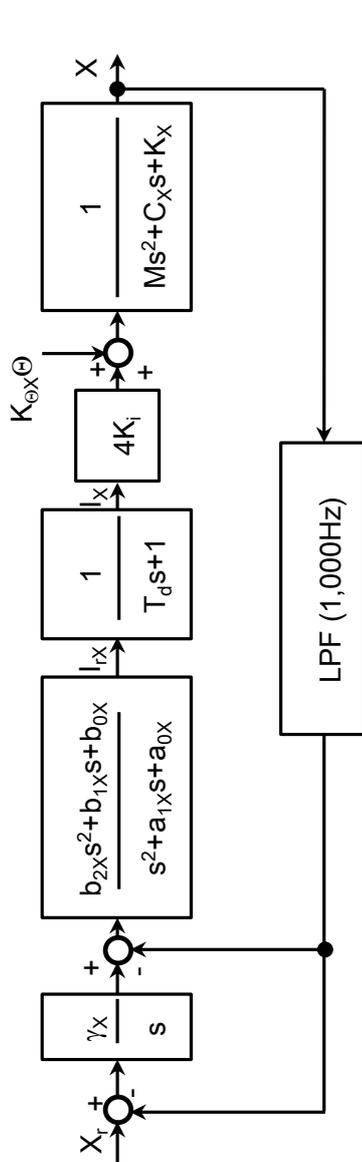


Fig. 2.10 Block diagram of MLA control system in X direction

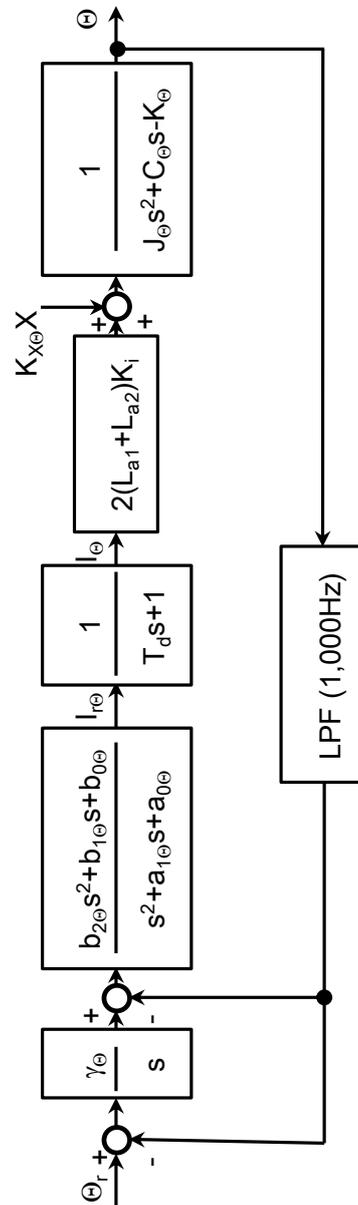


Fig. 2.11 Block diagram of MLA control system in Theta direction

Table 2. 3 Parameter of MLA system in X and  $\Theta$  directions

m	0.597 kg
$J_{\Theta}$	$2.16 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$
$C_X$	5.0 Ns/m
$C_{\Theta}$	0 Nms/rad
$k_x$	$3.6 \times 10^5 \text{ N/m}$
$k_{\Theta}$	1,066 Nm/rad
$K_v$	45.0Vs/m
$K_i$	45.0N/A
L	43.3 mH
R	2.4 $\Omega$
$T_{dx}$	0.3 mH

Table 2. 4 Control parameter of MLA system in X and  $\Theta$  directions

X direction		$\Theta$ direction		Bias current	
$\alpha_X$	$2\pi \times 380$	$\alpha_{\Theta}$	$2\pi \times 240$	$i_0$	0.5A
$\gamma_X$	$2.00 \times 10^3$	$\gamma_{\Theta}$	$2.70 \times 10^3$	Current feedback PI controller	
$a_{0X}$	$5.09 \times 10^7$	$a_{0\Theta}$	$1.60 \times 10^7$		
$a_{1X}$	$1.12 \times 10^4$	$a_{1\Theta}$	$5.91 \times 10^3$	$\beta_e$	150
$b_{0X}$	$7.32 \times 10^{10}$	$b_{0\Theta}$	$3.34 \times 10^8$	$\gamma_e$	1,000
$b_{1X}$	$1.95 \times 10^8$	$b_{1\Theta}$	$1.91 \times 10^6$		
$b_{2X}$	$1.23 \times 10^5$	$b_{2\Theta}$	$1.43 \times 10^3$		

### 2. 3. 5 磁気浮上ローカルアクチュエータ制御システムの構成

ローカルアクチュエータ制御システムの構成図を図 2. 1 2 に示す. 変位計測は, Z軸方向については, 渦電流式変位センサ (PU-05, AEC Corp.), X, Y,  $\Theta$  および  $\Phi$  軸方向については静電容量式変位センサ (MicroSense 5502, ADE Corp.) を用いて行った. 各軸方向変位計測用センサの性能を表 2. 5 に示す. ローカルアクチュエータの位置決め制御コントローラは, DSPシステム (PXI-

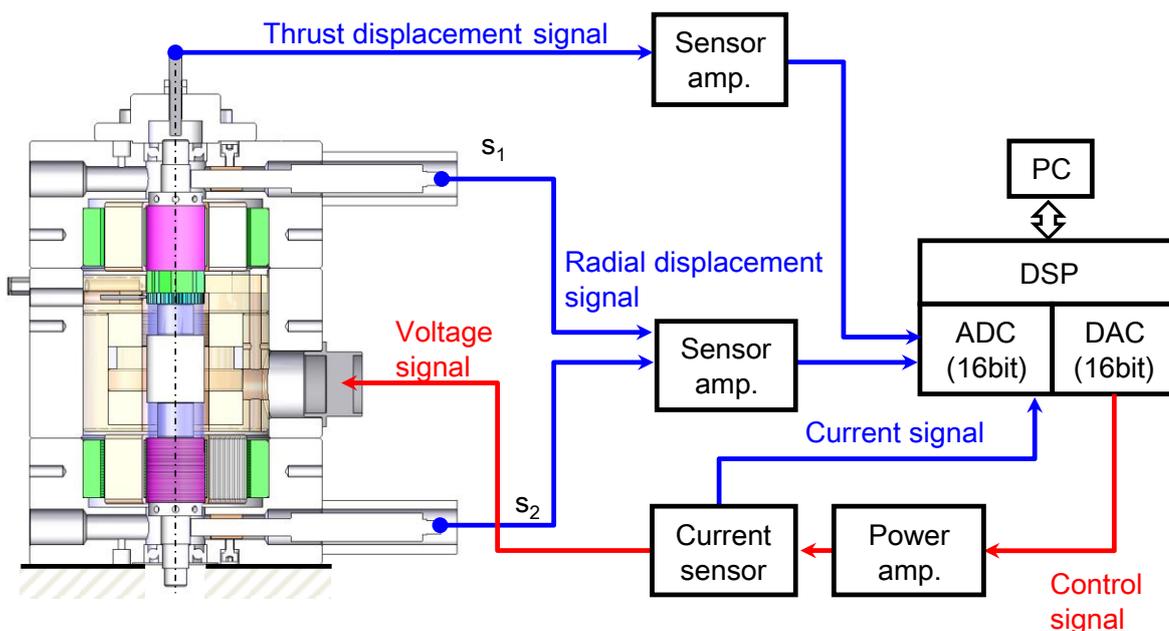


Fig. 2. 12 Experimental set-up of MLA system

Table 2. 5 Performances of displacement sensors

	Thrust sensor	Radial sensor
Manufacturer	AEC Corp.	ADE Corp.
Probe model	PU-05	MicroSense 5502
Console model	AEC-5505	MicroSense 5130
Resolution	0.5 μm	20 nm
Positioning range	2 mm	±100 μm
Bandwidth	30 kHz	5 kHz
Output	±5 V	±10 V

DSP26701, Comex Electronics Co.,Ltd) を使用した。サンプリング周波数は10kHzである。本システムでは、DSPボードにて演算した制御信号を、D/Aコンバータ(16bit)から出力し、電圧アンプ(DCV-304A, Uniel Corp.)で増幅した後、電磁石を駆動する。また、5自由度方向の変位センサおよび電流フィードバック用電流センサ(LA25-NP, LEM Japan Co., Ltd.)の出力を、A/Dコンバータ(16bit)を介して、コントローラに取り込むことで、フィードバック制御を行った。各ハードウェアの性能を表2.6～2.8に示す。コントローラ設計は、数値解析ソフトウェア(MATLAB/Simulink, MathWorks, Inc)を使用した。

図2.12に示された、Xおよびθ軸方向の変位計測用のセンサ信号 $S_1$ ,  $S_2$ と位置, 姿勢 $x$ ,  $\theta$ の関係を式(2.33)に示す。

$$\begin{aligned} S_1 &= x + L_{s1}\theta \\ S_2 &= x - L_{s2}\theta \end{aligned} \dots\dots\dots (2.33)$$

ここで、 $L_{s1}$ ,  $L_{s2}$ はスピンドル重心からセンサ測定点までの距離である。式(2.33)から、スピンドルの位置 $x$ ・姿勢 $\theta$ は、式(2.34)のように示される。

$$x = \frac{L_{s2}S_1 + L_{s1}S_2}{L_{s1} + L_{s2}} \dots\dots\dots (2.34)$$

$$\theta = \frac{S_1 - S_2}{L_{s1} + L_{s2}}$$

Table 2. 6 Performances of linear amp.

Manufacturer	Uniel Corp.
Model	DCV-304A
Max. output voltage	±35 V
Max. output current	±5 A
Bandwidth	100 kHz

Table 2. 7 Performances of current sensor

Manufacturer	LEM Corp.
Model	LA25-NP
Rated current	±5 A
Max current	±7 A
Bandwidth(-1dB)	150 kHz

Table 2. 8 Performances of DSP system

DSP board	Manufacturer	Systems Design Service Corp.
	Model	PCI-DSP26701
A/D, D/A board	Manufacturer	Systems Design Service Corp.
	Model	PCI-SAD2080D
	A/D, D/A channel number	8
	Resolution	16 bit
	A/D, D/A voltage	±5 V

### 2. 3. 6 磁気浮上ローカルアクチュエータの基本性能

ローカルアクチュエータの位置決め制御システムに、 X, Y, Z 軸方向に振幅 10μm およびΘ, Φ軸方向に振幅 10 μrad の正弦波状目標値を与えたときの周波数応答特性を図 2. 1 3 に示す。バンド幅は X, Y, Z, ΘおよびΦ軸方向に対して、それぞれ、 260Hz, 240Hz, 240Hz, 140Hz および 140Hz であった。

## 第2章 高応答多自由度電極駆動による放電穴加工の高速化

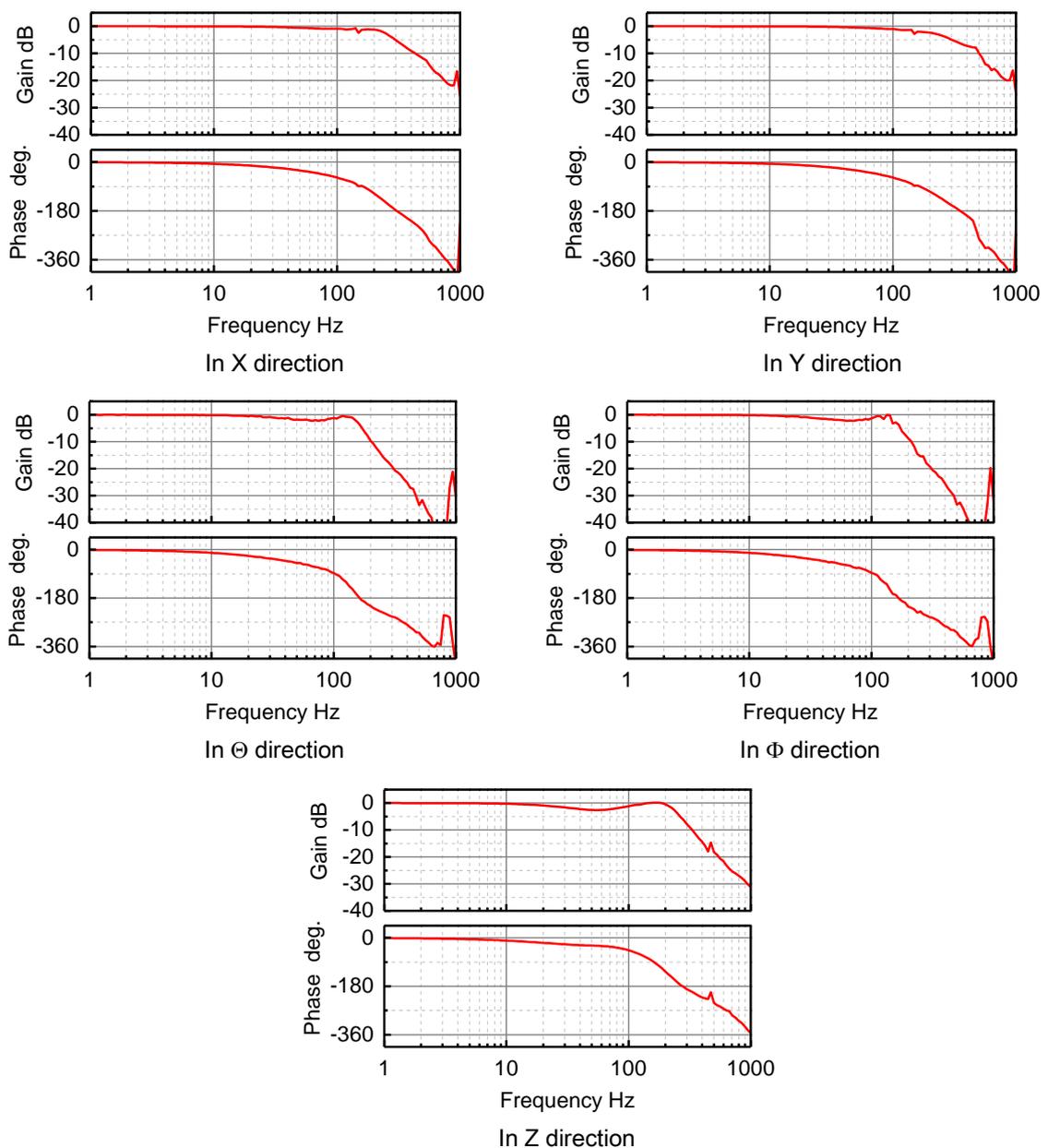


Fig. 2. 13 Bode diagram of MLA

図 2. 1 4 に、X, Y, Z,  $\Theta$  および  $\Phi$  軸方向のスピンドルの位置決め分解能を示す。位置決め分解能は、X, Y, Z,  $\Theta$  および  $\Phi$  軸方向に対して、それぞれ  $0.15\mu\text{m}$ ,  $0.25\mu\text{m}$ ,  $0.5\mu\text{m}$ ,  $2\mu\text{rad}$  および  $4\mu\text{rad}$  となった。また、図 2. 1 5 はローカルアクチュエータの位置決め制御システムに、X, Y, Z 軸方向に高さ  $10\mu\text{m}$  および  $\Theta$ ,  $\Phi$  軸方向に高さ  $10\mu\text{rad}$  のステップ状目標値を入力したときの、スピンドルの応答波形である。スピンドルがオーバーシュート、定常偏差なく、目標値に追従していることが確認できる。

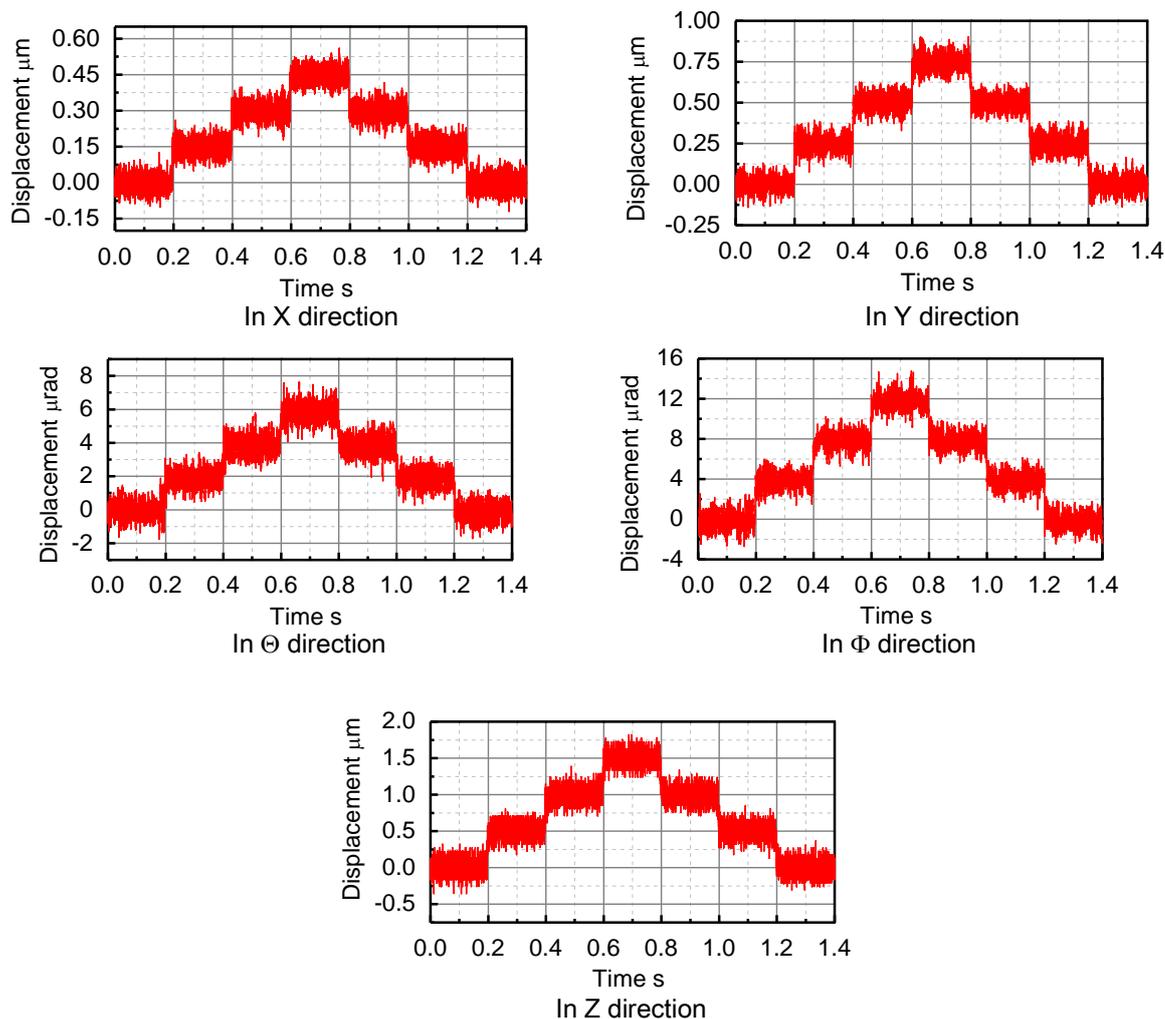


Fig. 2. 14 Positioning resolution of MLA

図 2. 1 6 は、スピンドルを X, Y, Z,  $\Theta$ および $\Phi$ 軸方向に対して、フルストロークで駆動した時の軌跡である。スピンドルの位置決め範囲は、X, Y, Z,  $\Theta$ および $\Phi$ 軸方向に対して、それぞれ  $200\mu\text{m}$ ,  $200\mu\text{m}$ ,  $2\text{mm}$ ,  $2\text{mrad}$  および $2\text{mrad}$  であった。

また、図 2. 1 7 に放電加工中における、スピンドルのジャンプおよび揺動の軌跡を示す。ジャンプ開始から終了までの時間はおよそ  $30\text{ms}$  であり、既存放電加工機におけるジャンプ所要時間の  $10$  分の  $1$  程度である。揺動周波数は、 $300\text{Hz}$  であり、既存放電加工機では実現が困難な高速揺動を実現している。最後に、ローカルアクチュエータの基本性能を、表 2. 9 にまとめる。

## 第2章 高応答多自由度電極駆動による放電穴加工の高速化

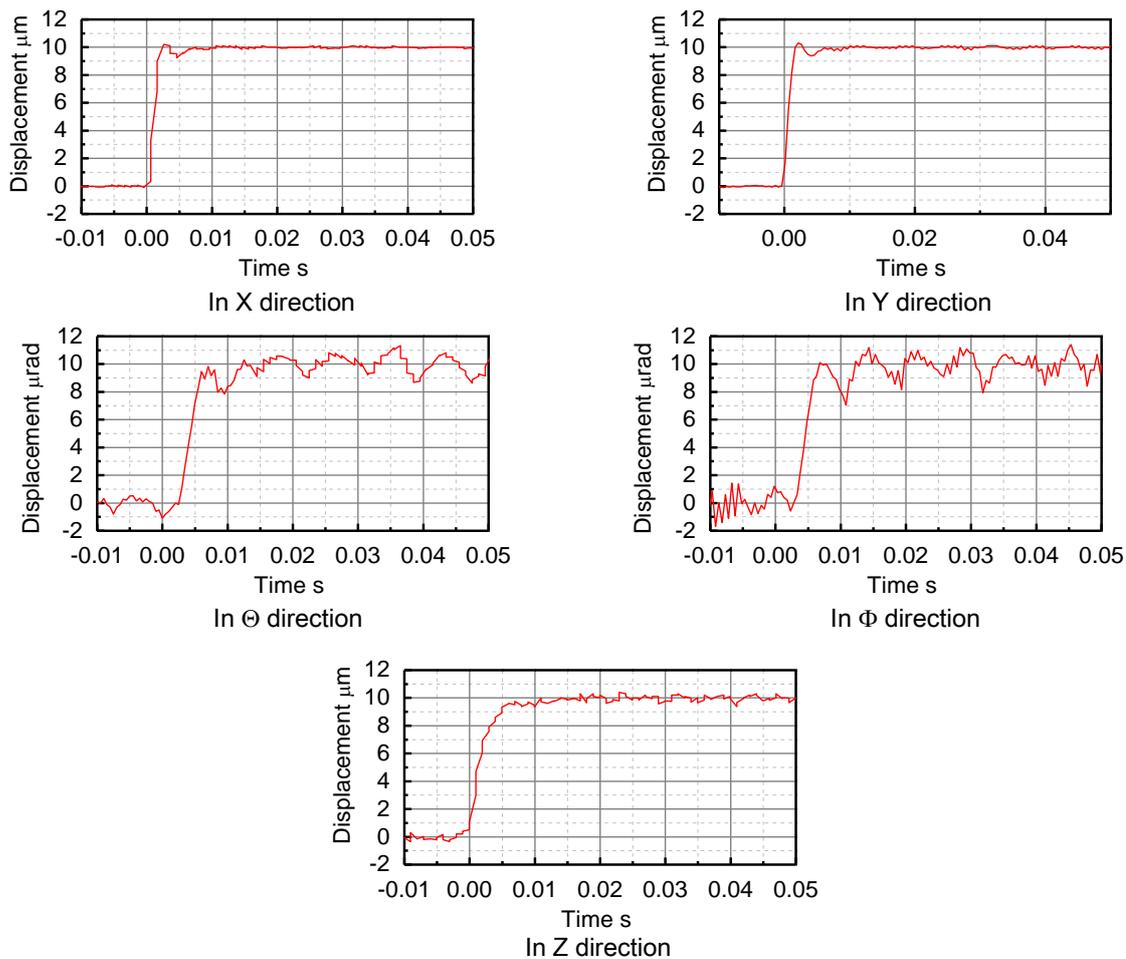


Fig. 2. 15 Step response of MLA

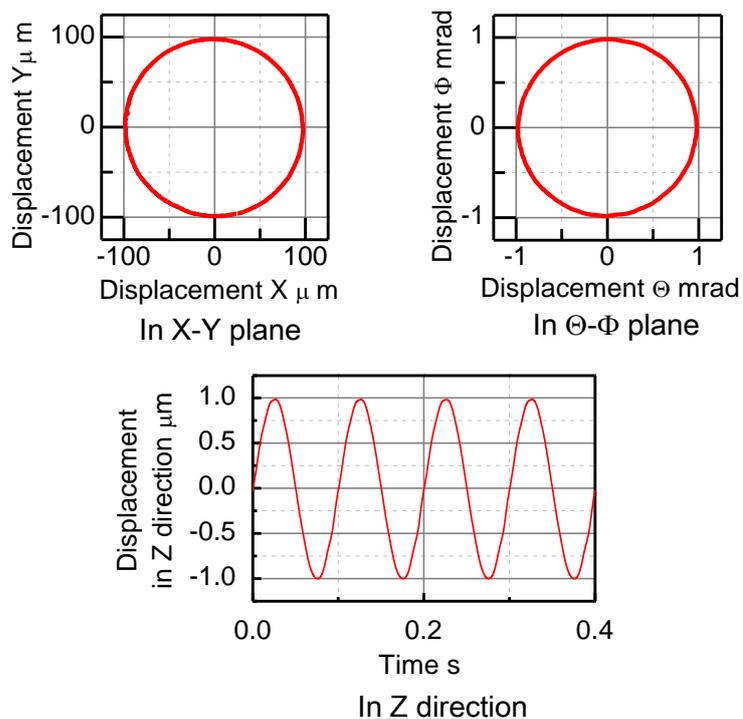


Fig. 2. 16 Positioning stroke of MLA

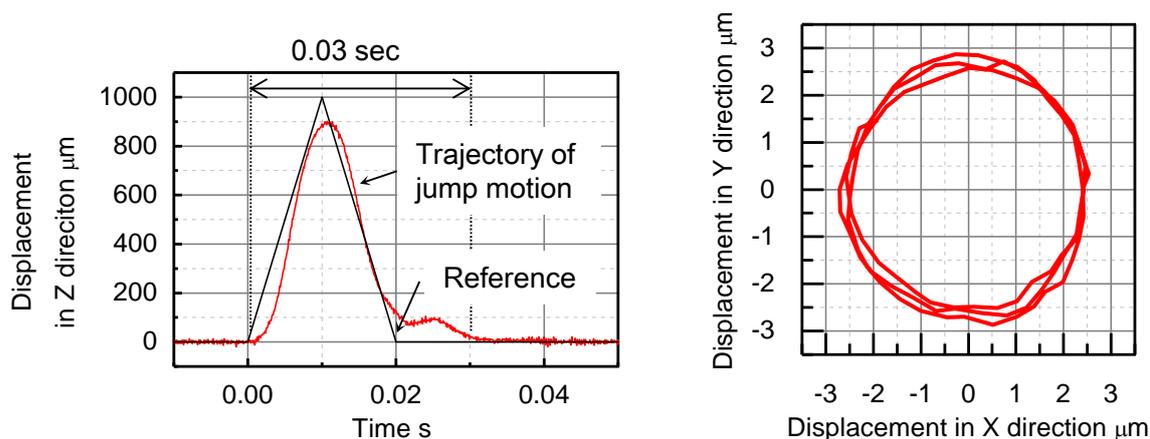


Fig. 2. 17 Jump and orbital motion

Table 2. 9 Positioning performances of MLA

Directions	Band width	Poisoning resolution	Poisoning stroke
X	260Hz	0.15μm	200μm
Y	240Hz	0.25μm	200μm
Z	240Hz	0.5μm	2mm
Θ	140Hz	2μrad	2mrad
Φ	140Hz	4μrad	2mrad

## 2. 4 既存放電加工機とローカルアクチュエータを用いた協調制御放電加工システム

### 2. 4. 1 既存放電加工機の基本性能

図 2. 1 8 に本研究で使用した、既存放電加工機 (EA-12E, Mitsubishi electric corp.) の写真, 表 2. 1 0 にその基本性能を示す. 放電加工機は, AC サーボモータとボールねじを用いて, 電極の位置決めを行い, 位置決め範囲は, X, Y, Z 軸方向に対して, それぞれ 400mm, 300mm, 300mm である. 取り付け可能な電極質量は最大 50kg であり, 本章で用いる質量 26kg のローカルアクチュエータを取り付け可能である.



Fig. 2. 18 Photograph of conventional EDM machine

Table 2. 10 Performances of conventional EDM machine

Items	Specification
Stroke	X: 400 mm
	Y: 300 mm
	Z: 300 mm
Max. size of work	800×550×250 mm
Max. mass of work	700 kg
Max. mass of electrode	50 kg

放電加工機の Z 軸方向の周波数応答特性を，下記の方法によって調査した．本研究で利用する放電加工機の位置決めシステムでは，極間電圧の目標値電圧  $V_r$  とフィードバック電圧  $V_{fb}$  の偏差  $V_e = V_{fb} - V_r$ ，および加工機位置決めステージの加工方向速度目標値  $v_{ref}$  について，式 (2. 35) の関係が成り立つ．

$$v_{ref} = kV_e \dots\dots\dots (2. 35)$$

ここで， $k$  は定数である． $V_e$  が一定あるいは，その変動が緩やかな場合，実際のステージ移動速度  $v_{stage}$  と，速度目標値  $v_{ref}$  は一致すると考える．

$k$  の値を決定するためには，放電加工機の位置決めシステムに，DSP から生成した，直流電圧  $V_d = V_r + V$  を入力する．このとき，レーザ変位計 (LK-G51, KEYENCE CORP.) によって，ステージ Z 軸方向の変位を計測し，その移動速度  $v_{stage}$  を求める． $V$  を変化させ，その都度，移動速度  $v_{stage}$  の計測を行うことによって，図 2. 19 のような， $V$  と  $v_{stage}$  の関係が得られた．グラフの傾きから， $k = -2.03 \times 10^{-6} m/Vs$  となった．

直流成分  $V_r$ ，振幅  $a[V]$ ，周波数  $f[Hz]$  の交流電圧  $V_a = V_r + a \sin 2\pi ft$  を，加工機の位置決めシステムに入力したとき， $V_e = V_a - V_r = a \sin 2\pi ft$  となるため，ステージ速度目標  $v_{ref}$  は，式 (2. 36) のようになる．

$$v_{ref} = ka \sin 2\pi ft \dots\dots\dots (2. 36)$$

式 (2. 36) を積分することによって，(2. 37) のように，加工機ステージの変位目標  $Z_r$  が得られる．

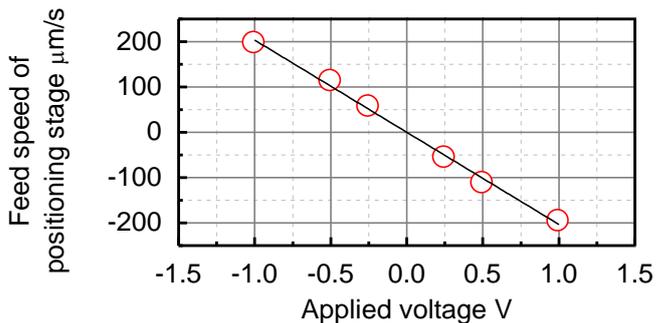


Fig. 2.19 Relationship between feed speed of positioning stage and applied voltage

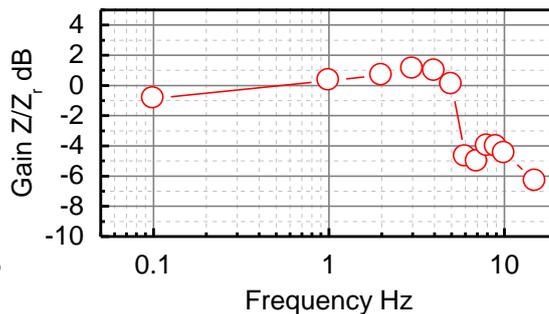


Fig. 2.20 Bode diagram of positioning stage of conventional EDM machine

$$Z_r = \int v_{ref} dt = \int ka \sin 2\pi f t dt = -\frac{2.03 \times 10^{-6}}{2\pi f} a \cos 2\pi f t \dots\dots\dots (2.37)$$

図 2.20 は、DSP から生成した、振幅  $a=1V$  の正弦波電圧信号を放電加工機の位置決めシステムに入力し、加工機ステージの変位を計測することによって調査したゲイン線図である。実験の結果より、加工機ステージのバンド幅は、5Hz 程度であると考えられる。

### 2.4.2 協調制御放電加工システム

図 2.21, 22 に、放電加工制御システムの写真および構成図を示す。加工システムでは、ローカルアクチュエータは、既存放電加工機の電極取り付け部に装着されており、両者を協調動作させ、放電加工を行う。以下、本加工システムを、協調制御放電加工システムと記す。

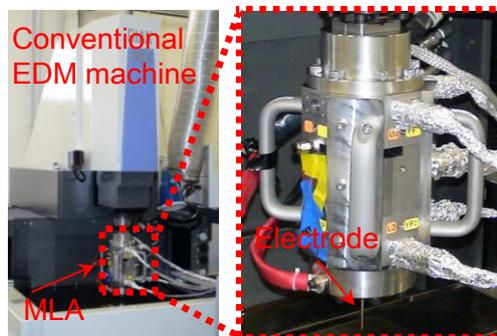


Fig. 2.21 Photograph of EDM system

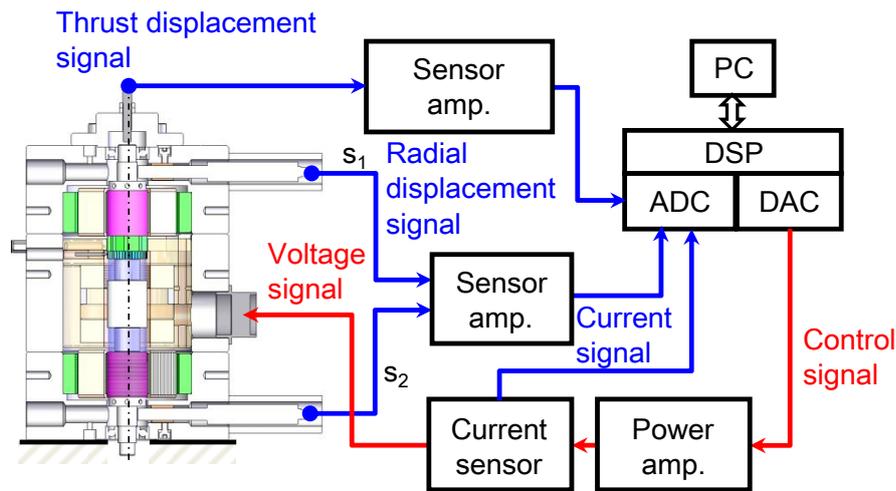


Fig. 2. 22 Experimental system of EDM

図 2. 23 に、協調制御放電加工システムのブロック線図を示す。本加工システムでは、加工物-電極間の極間電圧  $V$  を加工中モニタリングし、これを分圧、平均化したものを、フィードバック電圧  $V_{fb}$  として利用する。放電加工用の PI コントローラは、電圧目標値  $V_r$  と  $V_{fb}$  の偏差から、加工方向の電極位置目標値  $Z_r$  を生成する。 $Z_r$  は、ローカルアクチュエータの位置決めシステムに入力され、極間距離は高応答かつ高精度に調整される。ローパスフィルタにより、 $Z_r$  の高周波数成分を取り除いたものは、既存放電加工機本体の制御システムに入力され、放電加工機はローカルアクチュエータのストロークが飽和しないよう、アクチュエータごと、電極を緩やかに駆動する。図中、 $Z_c$  は加工機位置決めステージの移動量であり、 $Z_a$  はローカルアクチュエータによる極間距離の調整量となる。また、両者の総和  $Z$  は電極の総移動量となる。放電加工プロセスは、加工屑や気泡の影響がない場合、図中の加工プロセスのブロックのように、電極-加工物間の極間距離と極間電圧  $V$  によってモデル化される<sup>(89)</sup>。電極と加工物が接触し、極間距離が 0 の場合、極間電圧  $V$  は 0 である。極間距離の拡大に伴い  $V$  は増加するが、極間距離が一定量を超えると、 $V$  は飽和し、その値は加工電源電圧そのものになる。ブロック線図中、 $Z_j$  ( $X_r$ ,  $Y_r$ ) はそれぞれ、加工屑排出のためのジャンプおよび揺動の目標値である。

図 2. 24 は、放電加工用 PI コントローラの詳細である。極間距離が一定量以上になると、極間電圧は、放電電圧そのものとなる。このような状態を開放と呼ぶ。開放中、加工用コントローラは、電極を加工物に接近させるような指令値を出力する。ところで、放電時の極間距離が、 $10\mu\text{m}$  程度であるのに対して、

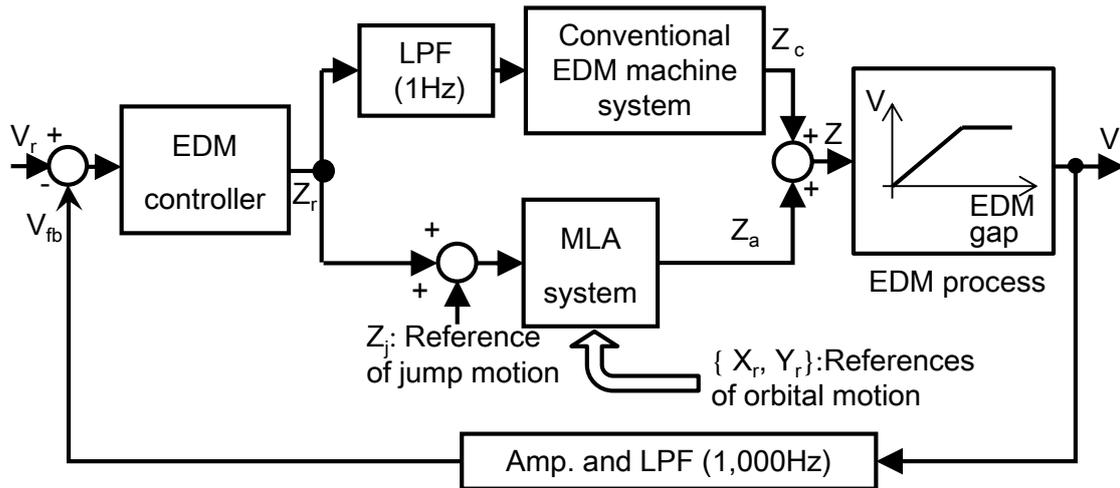


Fig. 2. 23 Block diagram of cooperative control system

ジャンプ駆動量は数百  $\mu\text{m}$  以上であるため、ジャンプ中は、開放状態である。このため、ジャンプ中、加工用コントローラに含まれる積分器の出力は、電極が加工物に接近する方向に増加し続け、ジャンプ後の電極がジャンプ開始位置に対して戻り過ぎてしまう。このとき、電極と加工物が接触、衝突し、短絡が発生するばかりでなく、低剛性の電極では、工具破損の危険性がある。

そこで、ジャンプ開始から終了まで、積分動作を休止し、出力を一定値に保持する機能をコントローラに付加した。ジャンプ中であるか否かの判断は、ジャンプ目標値  $Z_j$  を利用して行い、 $Z_j$  が閾値を越えているとき、ジャンプ中であるとした。閾値の大きさは、信号ノイズが閾値を超えないような値を実験的に調査し  $3\mu\text{m}$  とした。

図 2. 25 は、積分休止機能の有無による、ジャンプ中の、積分器の出力とスピンドルの軌跡である。積分動作を休止しない場合では、ジャンプ中、積分器の出力が増加し続け、ジャンプ終了時の電極位置は、ジャンプ開始位置に対して戻り過ぎてている。図 2. 26 は、図 2. 25 と同時時間帯における、フィードバック電圧の波形である。積分動作を休止しない図 2. 26 (a) から、電極の戻り過ぎに伴う、短絡が確認できる。これに対して、積分動作を休止する図 2. 25 (b) では、ジャンプ中の積分器出力が一定に保持され、電極の戻り過ぎが解消されている。また、図 2. 26 (b) から短絡は確認されない。

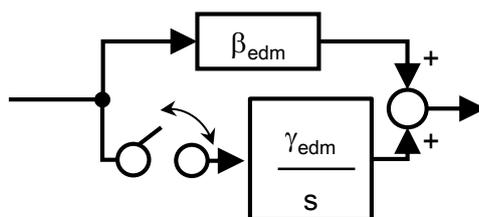


Fig. 2. 24 EDM controller

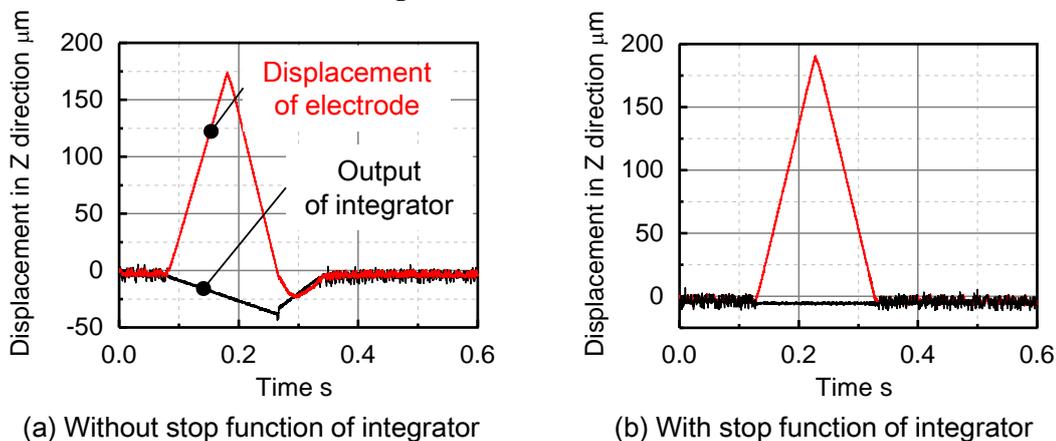


Fig. 2. 25 Displacement of electrode and output of integrator of EDM PI controller during jump motion

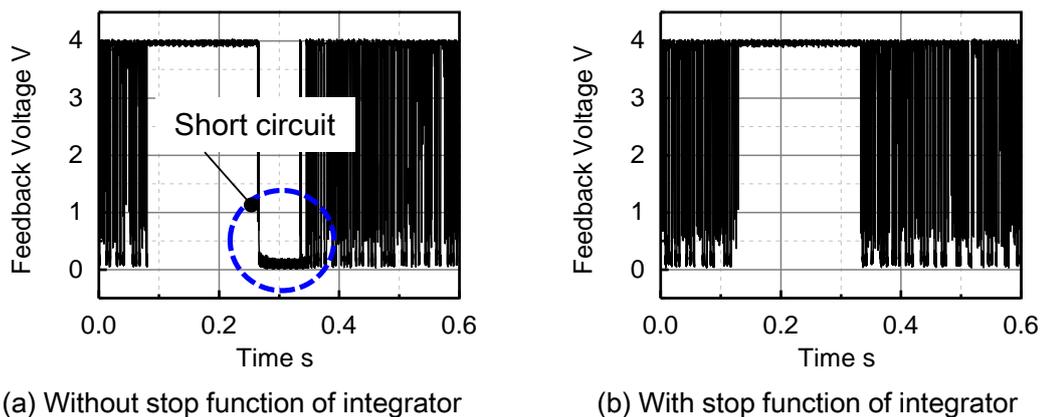


Fig. 2. 26 Feedback voltage during jump

## 2.5 放電穴加工実験

### 2.5.1 加工方法

ローカルアクチュエータによる，極間距離の高速・高精度調整，加工屑排出のための，ジャンプおよび揺動の効果を検討するため，表 2. 11 に示す 5 通りの加工方法で垂直放電穴加工実験を行った．以下に，各加工方法を説明する．加工は電極が加工物を貫通するまで行った．

**加工方法 1**：既存放電加工機単体を使用し，ジャンプ，揺動を行わない．

**加工方法 2**：協調制御放電加工システムを使用し，ジャンプ，揺動を行わない．

**加工方法 3**：協調制御放電加工システムを使用し，ジャンプを行う．

Table 2. 11 Machining methods

Machining method	MLA	Jump motion	Orbital motion
1			
2	✓		
3	✓	✓	
4	✓		✓
5	✓	✓	✓

**加工方法 4**：協調制御放電加工システムを使用し，揺動を行う。

**加工方法 5**：協調制御放電加工システムを使用し，ジャンプ，揺動を行う

ただし，加工方法 1 では，ローカルアクチュエータを加工機から取り外し，加工機に直接電極を取り付けた。

### 2. 5. 2 加工条件

主な加工条件を示す。電極は， $\phi 1$  および  $\phi 0.1$  で銅製円柱型とした。電極長さは，25mm とした。電極は，加工中 Z 軸回りに回転させていない。スピンドルは，Z 軸回りに特別に拘束されていないが，目視の範囲では，スピンドルの回転は確認できなかった。加工物は，プリハード鋼（NAK-80, Daido Steel Co., Ltd.）を用い，板厚は，電極直径により，4mm ( $\phi 1$ ) および 1mm ( $\phi 0.1$ ) とした。

加工電源は，既存放電加工機に内蔵された，RC回路を使用した。加工電源の抵抗値およびコンデンサ容量はそれぞれ，1.1k $\Omega$  および 0.01 $\mu$ F とした。放電電圧は，電極の直径に応じて，150V ( $\phi 1$ )，90V ( $\phi 0.1$ ) とした。また，放電加工用 PI コントローラの比例ゲイン  $\beta_{edm}$ ，積分ゲイン  $\gamma_{edm}$  はそれぞれ， $2.15 \times 10^{-6}$ ， $0.25 \times 10^{-3}$  とした。

ジャンプは，頻度を高く，ジャンプ高さ，速度を大きくすることにより，加工層の排出効果は高くなる。本研究では，1 回あたりのジャンプ時間を短く，かつジャンプ復帰直後に安定な放電が維持可能な速度，高さを実験的に調査し，速度および高さは，電極直径  $\phi 1$ ， $\phi 0.1$  でそれぞれ，25.0mm/s，750 $\mu$ m および 16.0mm/s，480 $\mu$ m とした。ジャンプの目標値は，図 2. 1 7 と同様に，電極がジャンプを開始し，最大高さまでに至る時間および，ジャンプ最大高さからジャンプ開始位置に至るまでの時間が等しいような，二等辺三角形形状の波形とした。

ジャンプ開始から，ジャンプ後の放電が再開するまでの時間はおよそ 30ms であり，ジャンプによる加工停止時間が総加工時間の数%となるよう，ジャンプ

頻度は、1秒あたり1回とした。ジャンプは放電状態の安定、不安定に関わらず、定期的に実施された。一般的に、ジャンプは1秒あたり数回の頻度で実施され、その所要時間は数百msであるため、総加工時間に占める、ジャンプによる加工停止時間の割合は大きい。ローカルアクチュエータによるこの影響は既存の加工方法と比較すると小さい。高周波数揺動は、電極直径に関わらず、既存放電加工機では実現困難な、周波数300Hz、実片側振幅2.5 $\mu$ mで実施した。

### 2.5.3 加工実験結果

#### (1) $\phi 1$ の電極を用いた穴加工

##### (a) 電極送り波形と加工速度

図2.27に、加工開始から終了までの、既存放電加工機 Z 軸ステージの送り量  $Z_c$  を示す。ステージの変位は、レーザ変位計 (LC-2010, KEYENCE CORP.) によって計測し、データレコーダ (EZ7510, NF CORP.) を用いて保存した。加工終了時の電極総送り量が、加工物板厚 4mm を超えているのは、電極消耗に起因する。

加工終了の判断は次のように行った。図2.28(a)のように、電極の先端の一部が加工物を貫通すると、貫通部より滞留した加工層が穴外へ排出されるため、放電状態が安定し、電極の振動が低減される。更に加工が進み、電極先端部全体が加工物を貫通すると、極間電圧が開放状態となるため、電極の加工方向への送り速度が急激に増加する(図2.28(b))。既存の放電加工機の送り量  $Z_c$  を加工中、デジタルオシロスコープ (MEMORY HiCORDER 8855, HIOKI E.E. CORP.) を用いてモニタリングし、図2.29のように、送り速度が急激に変化したことを確認し、加工終了をした。

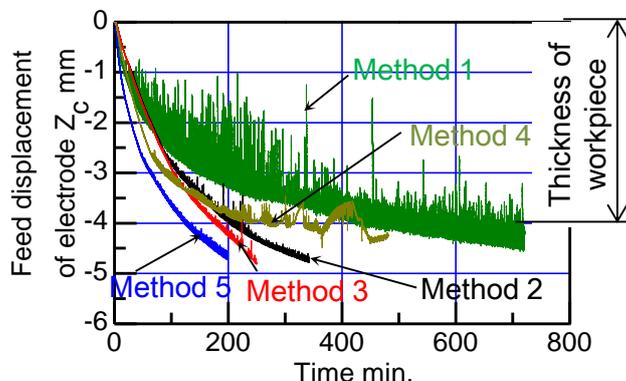


Fig. 2.27 Feed displacement of electrode

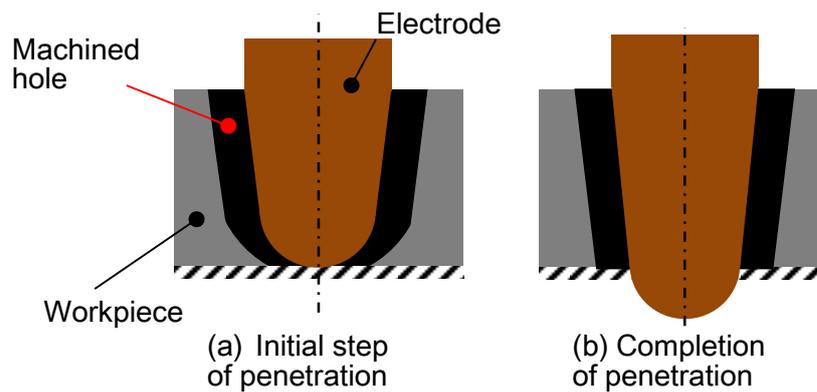


Fig. 2. 28 Configuration of workpiece penetration

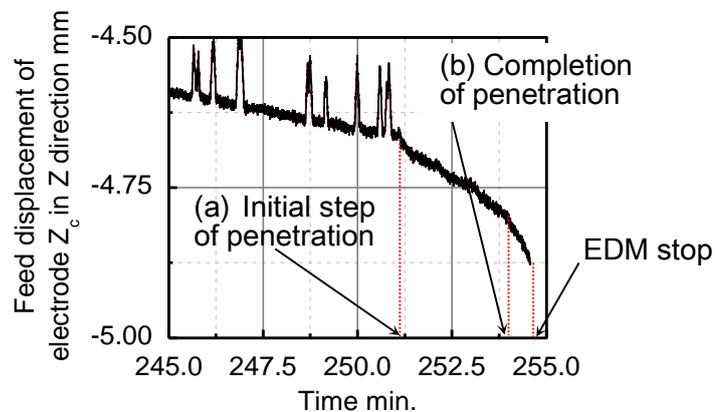


Fig. 2. 29 Feed displacement of electrode at the moment of penetration

再び図 2. 27 に戻ると、加工方法 1 では、電極が大きく振動していることが確認される。送り速度は最も遅く、加工穴深さの増加に伴い、電極が大きく振動し、加工を継続することが困難となったため、加工は 720 分で中断された。これに対して、加工方法 2 では、加工方法 1 と比較して、電極の振動が小さく、送り速度は大きくなった。既存加工機単体を用いた加工で、電極が大きく振動した原因について考察する。既存放電加工機単体で極間距離の調整を行う場合、加工屑の滞留によって、放電状態が不安定化すると、短絡状態を解消するため、電極は既存放電加工機によって加工方向とは逆方向に緩やかに移動する。一方、協調制御を用いる場合、図 2. 30 に示すように、短絡が発生すると、まず、応答性の高いローカルアクチュエータが放電加工安定化のための電極駆動を開始し、それに追従して既存の放電加工機が駆動される。短絡解消のための電極駆動をローカルアクチュエータが担うことによって、既存放電加工機の軸方向振動が低減される。

加工方法 3 では、加工方法 2 と比較して、加工開始直後は、波形に大きな違いがみられないが、送り量が約 2.7mm を超えた後は、電極の送り速度が大きくなって

## 第2章 高応答多自由度電極駆動による放電穴加工の高速化

いることが確認された。このことから、加工穴深さの増加に伴い、加工屑の排出効果が出現したと考えられる。さらに、加工方法5では、加工開始の段階から、他の加工方法より、電極の送り速度が大きくなった。ジャンプおよび揺動の併用により、放電状態がより安定に維持可能になると考えられる。

加工方法4では、加工開始直後は、効果的に電極が送られていることが確認できる。しかし、送り量が約3mmに到達すると、電極はZ軸方向に対して、急激に振動を始めた。この原因の詳細は不明であるが、加工穴深さが増加した場合、揺動により、加工穴底面に滞留した加工屑の排出を阻害するような加工液流れが生じていることが考えられる。本加工方法では、加工開始から480分で加工を中断している。

図2.31に加工速度を示す。加工速度は、加工穴深さ（加工物板厚）と加工時間の比で定義した。ただし、貫通前に加工を停止した加工方法については、電極の総送り量から電極消耗長さを差し引いた値を加工穴深さとした。各加工方法、3サンプル（加工方法1、4は1サンプル）の平均値は、それぞれ、（1） $0.08\mu\text{m/s}$ 、（2） $0.17\mu\text{m/s}$ 、（3） $0.26\mu\text{m/s}$ 、（4） $0.13\mu\text{m/s}$ 、（5） $0.36\mu\text{m/s}$  となり、既存放電加工機のみ使用する、加工方法1と比較して、加工速度はそれぞれ、（2）1.9倍、（3）2.9倍、（4）1.7倍、（5）4.5倍に改善された。また、協調制御放電加工システムを使用し、加工屑排出の電極駆動を実施しない加工方法2と比較すると、ジャンプおよび揺動によって、加工速度は（3）1.5倍、（5）2.1倍に改善された。

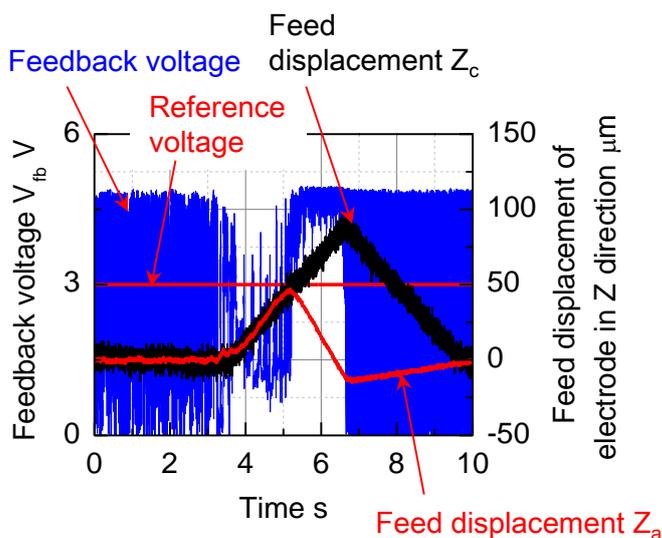


Fig. 2.30 Feedback voltage and feed displacement  $Z_a$  and  $Z_c$

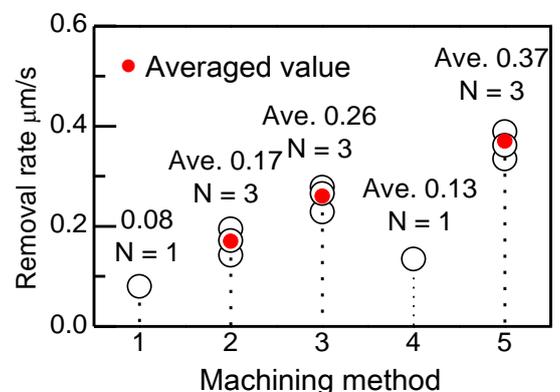


Fig. 2.31 Removal rate

(b)電極の振動とフィードバック電圧波形

図 2. 3 2 は、各加工方法において、電極の送り速度が低下し、加工層の影響が顕著に表れていると考えられる、電極送り量 3mm での電極送り波形  $Z_c$  である。また、図 2. 3 3 に、図 2. 3 2 と同時帯における、フィードバック電圧  $V_{fb}$  を示す。フィードバック電圧のデータは、図 2. 2 7 の電極送り波形のデータ採取に利用したのと同じレコーダを用いて取得した。

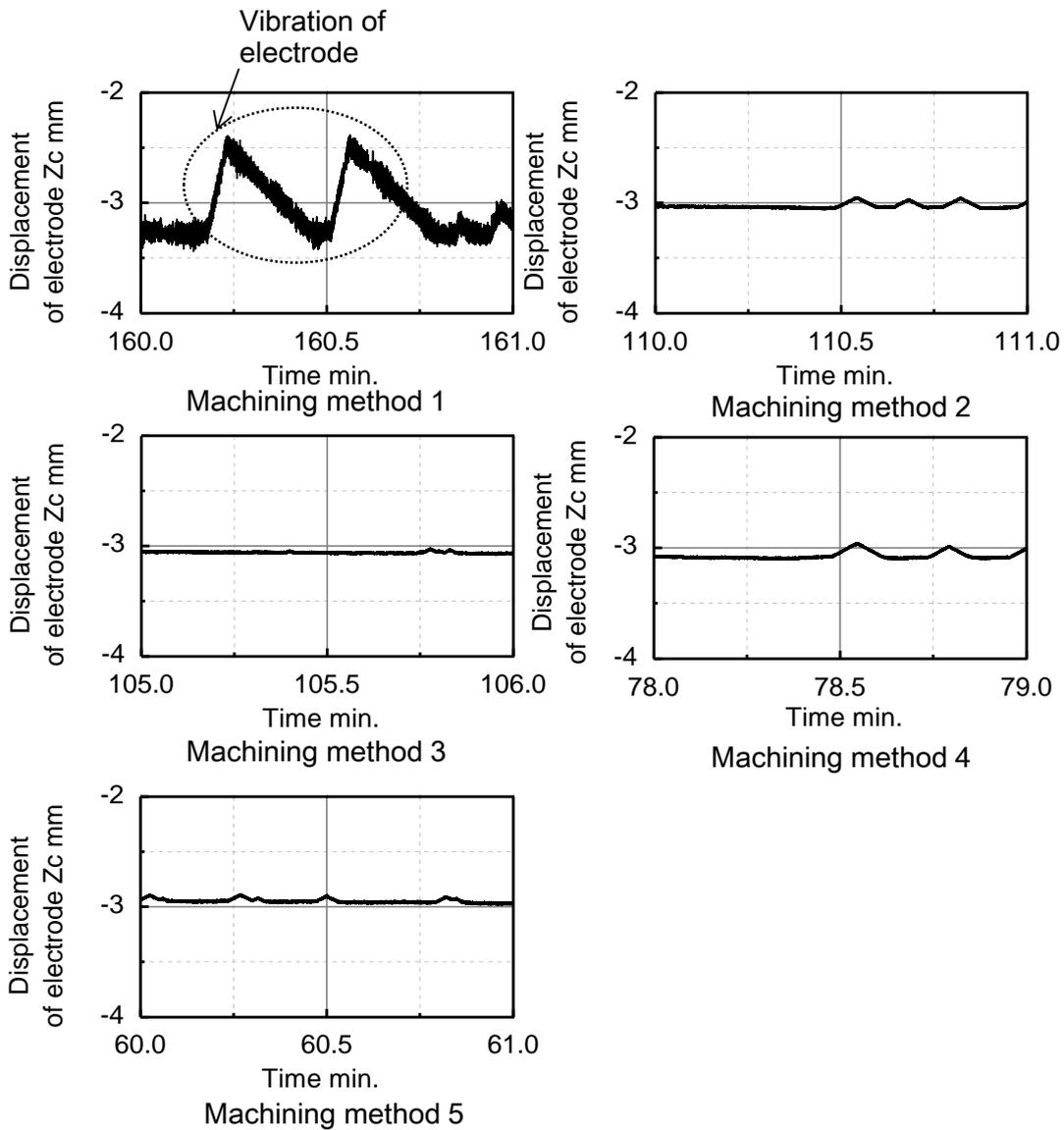


Fig. 2. 32 Displacement of electrode

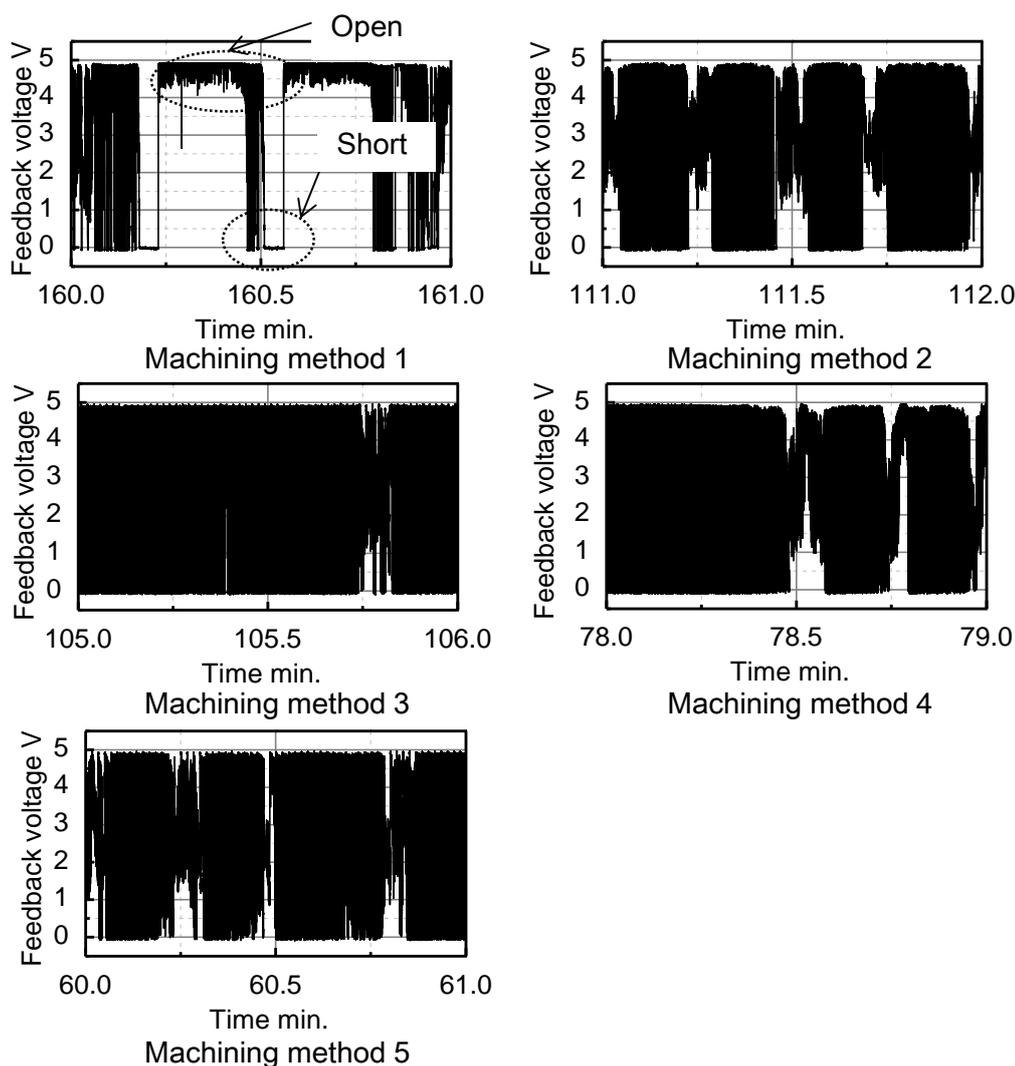


Fig. 2. 33 Feedback voltage

図 2. 3 2, 図 2. 3 3 より, 加工方法 1 では, 電極が大きく振動し, その間, 開放あるいは短絡状態を確認できる. 加工方法 2 では, 加工方法 1 と比較して, 振幅は小さいが, 電極が振動した. 一方, ジャンプを単独利用, およびジャンプと揺動の併用を適用する加工方法 3 および 5 では, 電極の振動が改善された. 加工中, 加工状態が急激に不安定化した加工方法 4 では, 加工方法 2 と同程度の電極の振動が確認できる.

図 2. 3 4 は, 送り量速度が低下し始めた, 送り量 2.7mm から貫通までの, 各加工方法における, 短絡率である. 短絡率は, フィードバック電圧  $V_{fb}$  の出力範囲, 0V~5.0V に対して, その下位 20%, すなわち 0~1.0V を短絡電圧と定義し, 加工中に取得したフィードバック電圧および短絡電圧のデータ数の比とした. 加工方法 1 では, 短絡率は 14.2%となり, 加工方法 2, 3 および 5 と比較して短絡頻度は高くなった. 加工方法 4 では, 短絡率は 18.4%と最大となった.

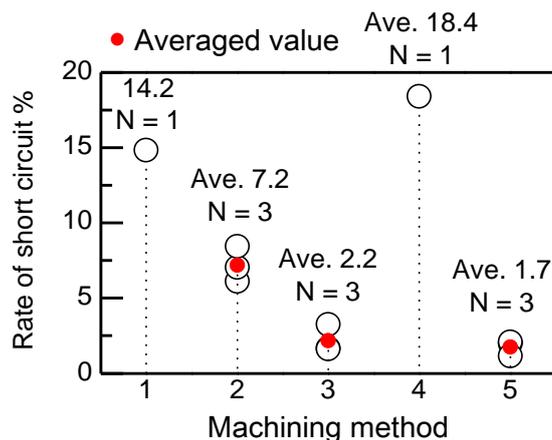


Fig. 2.34 Rate of short circuit

(c)電極率消耗

図 2.35 に電極消耗率を示す。電極消耗率は、電極の軸方向消耗長さとの加工穴深さの比で定義した。電極消耗率は、電極総送り量から加工穴深さの差分から求めた。電極消耗率は、それぞれの加工方法で、(1) 21.9%, (2) 24.9%, (3) 22.0%, (4) 15.8%, (5) 21.1%となった。電極消耗率は、協調制御システムを用い、ジャンプおよび揺動を適用しない、加工方法 2 と比較して、加工方法 3, 5 において改善された。また、加工を中断した加工方法 1, 4 における電極消耗率はその他加工方法と比較して小さい。これは、貫通までに加工を途中で中断したためであり、加工を継続した場合、電極消耗率は悪化すると考えられる。図 2.36 は、SEM (JSM-5610, JEOL Ltd.) によって撮影した、各加工方法における、電極先端部の写真である。加工方法 1 において、先端部の消耗が激しく、直径が最も縮小していることが確認できる。

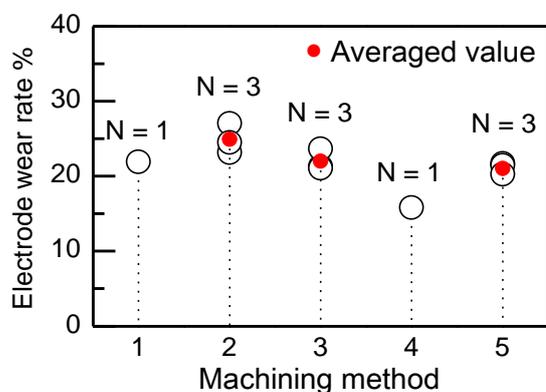


Fig. 2.35 Electrode wear rate

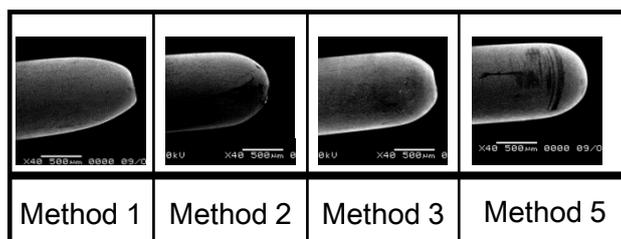


Fig. 2.36 Photograph of electrode

(d)加工穴形状

図 2. 3 7 に、コンフォーカル顕微鏡 (HD100D, Lasertec CORP.) を使用して撮影した、加工穴入口と出口の写真を示す。加工方法 1 で出口の写真が示されていないのは、実験を中断したことによる。また、入口直径と比較して、出口直径が縮小しているのは、放電により電極先端部が消耗したことによる。揺動を適用する場合、加工穴入り口直径の大幅な増加は確認されない。このことから、高周波揺動による、加工中の電極の振動は発生していないと考えられる。図 2. 3 8 に、加工方法 1, 4 による 1 個, 他の加工方法による 3 個の加工穴の入口直径を示す。加工方法 2, 3, 5 における、直径のばらつきは、それぞれ (2) 68 $\mu\text{m}$ , (3) 35 $\mu\text{m}$ , (5) 29 $\mu\text{m}$  となり、ジャンプや揺動を用いることによって、ばらつきが改善される傾向となっていることが確認できる。

		Machining methods			
		1	2	3	5
Entrance					

Fig. 2. 37 Photographs of machined hole

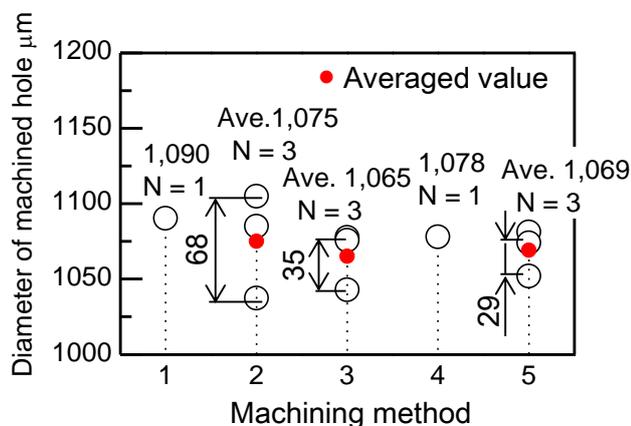


Fig. 2. 38 Diameter of machined hole

(2)  $\phi 0.1$  の電極を用いた加工

(a) 電極送り波形と加工速度

図 2. 3 9 に、既存放電加工機 Z 軸ステージの送り量  $Z_c$  を示す。  $\phi 0.1$  の電極では  $\phi 1$  とは異なり、協調制御システムを用い、揺動のみを適用する加工方法 4 においても、電極は振動することなく、加工物を貫通した。加工方法 1 と比較すると、加工方法 2 から 5 では、加工開始直後から、送り速度が改善されていることが確認できる。小径の電極は、電極の断面積が小さくなるため、加工物の加工方向除去量、軸方向の電極消耗長さは増加する。このため、加工中、極間距離の変動が大きく、放電を維持するには、高速に極間距離を調整する必要があると考えられる。よってローカルアクチュエータによる、高応答極間距離調整の有効性が、より顕著に表れると考えられる。

ジャンプや揺動による送り速度の改善を確認することが可能であるが、  $\phi 1$  の電極を用いた場合と比較して、その効果は小さくなった。電極径が縮小したため、電極駆動による、加工液の攪拌効果が低下したことが、一つの原因であると考えられる。図 2. 4 0 に、加工速度を示す。各加工方法において、4 サンプル（ただし加工方法 1, 4 のサンプル数はそれぞれ 1, 2）の加工速度の平均値は、それぞれ (1)  $0.80\mu\text{m/s}$ , (2)  $4.21\mu\text{m/s}$ , (3)  $4.92\mu\text{m/s}$ , (4)  $5.18\mu\text{m/s}$ , (5)  $5.30\mu\text{m/s}$  となり、加工方法 1 と比較して、それぞれの加工方法で、(2) 5.3 倍、(3) 6.2 倍、(4) 6.5 倍、(5) 6.6 倍に改善された。また、協調制御放電加工システムを使用し、加工屑排出の電極駆動を実施しない加工方法 2 と比較すると、加工速度は (3) 1.2 倍、(4) 1.2 倍、(5) 1.3 倍となった。加工速度における、加工屑排出のための電極駆動の効果は、  $\phi 1$  の電極を利用する場合と比較すると小さい。

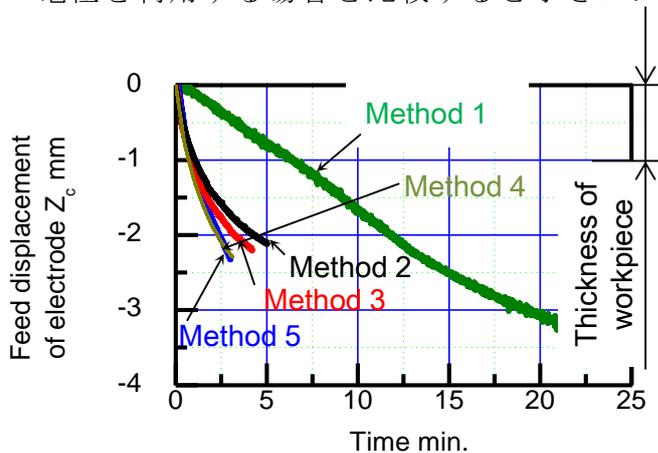


Fig. 2. 39 Feed displacement of electrode

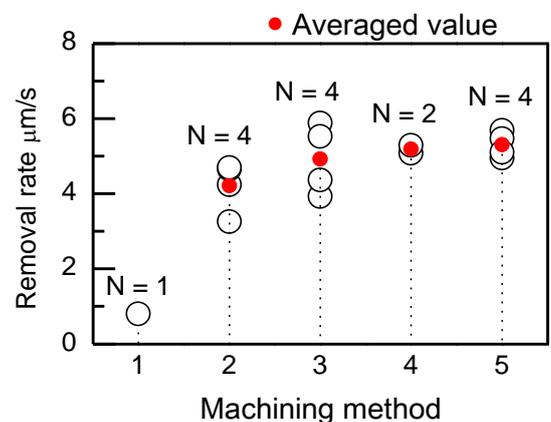


Fig. 2. 40 Removal rate

(b)電極消耗率

図 2. 4 1 に電極消耗率を示す。電極消耗率はそれぞれの加工方法で、(1) 217.0%、(2) 128.3%、(3) 132.8%、(4) 129.0%、(5) 144.0%となり、加工方法 1 と比較して、加工方法 2～5 では、電極消耗率が大きく低減した。ローカルアクチュエータの利用によって、加工時間が短縮したことが、この原因であると考えられる。

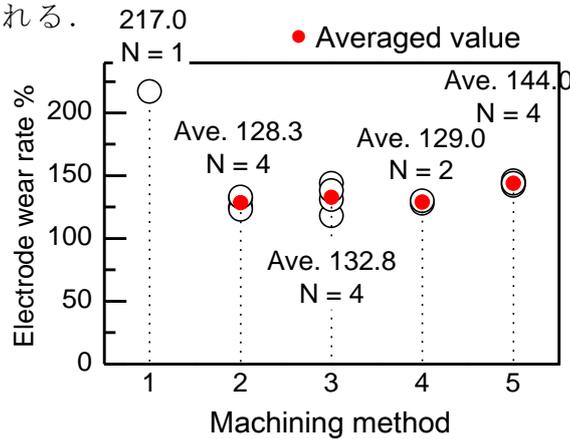


Fig. 2. 41 Electrode wear rate

(c)加工穴形状

図 2. 4 2 に、コンフォーカル顕微鏡を使用して撮影した、加工穴入口と出口の写真を示す。加工方法 1 では、加工穴入口形状がいびつになった。これは、加工層を介して、加工穴側面に放電が発生し、径方向に加工物が除去されたためであると考えられる。

図 2. 4 3 に、加工穴の入口直径を示す。加工穴の直径は、150 $\mu$ m程度であり、加工穴のアスペクト比は約7である。また、 $\phi 1$ の電極を用いる場合と同様に、揺動による加工穴直径の拡大は確認されなかったことから、電極の径方向振動は発生していないと考えられる。直径のばらつきは、それぞれ(2) 22 $\mu$ m、(3) 10 $\mu$ m、(5) 13 $\mu$ mとなり、 $\phi 1$ 電極の場合と同様に、ジャンプおよび揺動によって、加工穴直径のばらつきが低減された。

Entrance				
Exit				
	Method 1	Method 2	Method 3	Method 5

Fig. 2. 42 Photographs of machined hole

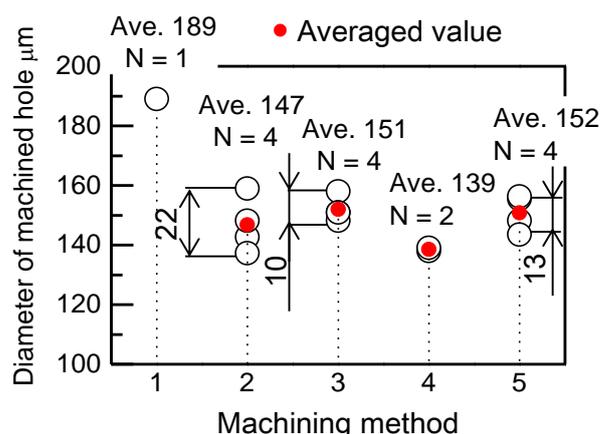


Fig. 2. 43 Diameter of machined hole

### 2. 5. 4 ジャンプ中の加工液の数値流体力学解析

本節では、ジャンプによる加工屑の排出効果およびジャンプ中の極間現象を調査するため、 $\phi 1$  の電極を使用した放電加工において、電極のジャンプ開始から終了まで加工液流れを、数値流体力学解析ソフト（STAR-CD, CD-adapco JAPAN Co.,LTD.）を用いた、有限体積法によって調査した。解析モデルの概要を図 2. 4 4 に示す。解析は、円柱座標系の軸対称問題として扱い、中心角を  $2^\circ$  とした。

加工穴は、深さ 4mm、形状は電極消耗による加工穴断面のテーパ角は考慮せず、ストレート垂直穴とした。加工穴および電極の半径はそれぞれ  $540\mu\text{m}$ 、 $500\mu\text{m}$  であり。電極と加工穴側面の隙間は  $40\mu\text{m}$  とした。また、ジャンプ開始時の、電極底面と加工穴底面の極間距離は  $20\mu\text{m}$  とした。要素形状は 6 面体であり、要素数は 59,717 であった。

加工屑および加工液の気化に伴う気泡は考慮せず、極間は加工液のみ存在するものとした。加工液の動粘度および密度は、それぞれ  $1.9\text{mm}^2/\text{s}$ 、 $0.77\text{g}/\text{cm}^3$  である。ジャンプ高さ、速度は、 $0.8\text{mm}$ 、 $26.7\text{mm}/\text{s}$  とした。解析は電極がジャンプ開始し、開始位置に戻るまで、ジャンプ動作 1 回分について行った。

第2章 高応答多自由度電極駆動による放電穴加工の高速化

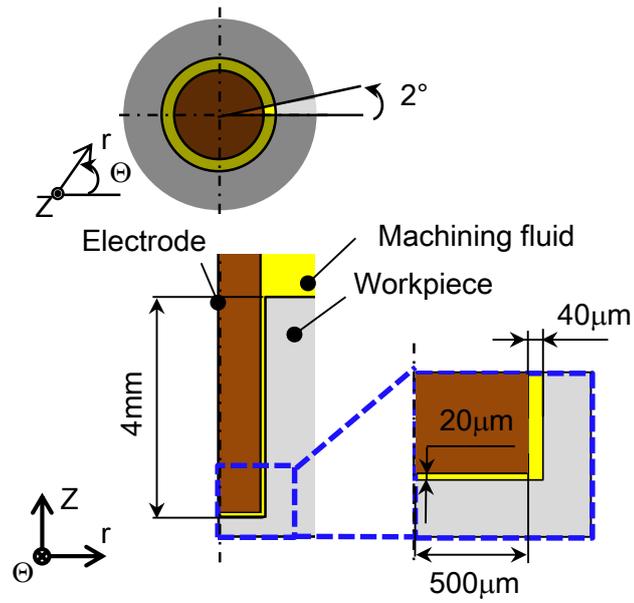


Fig. 2.44 Analysis model

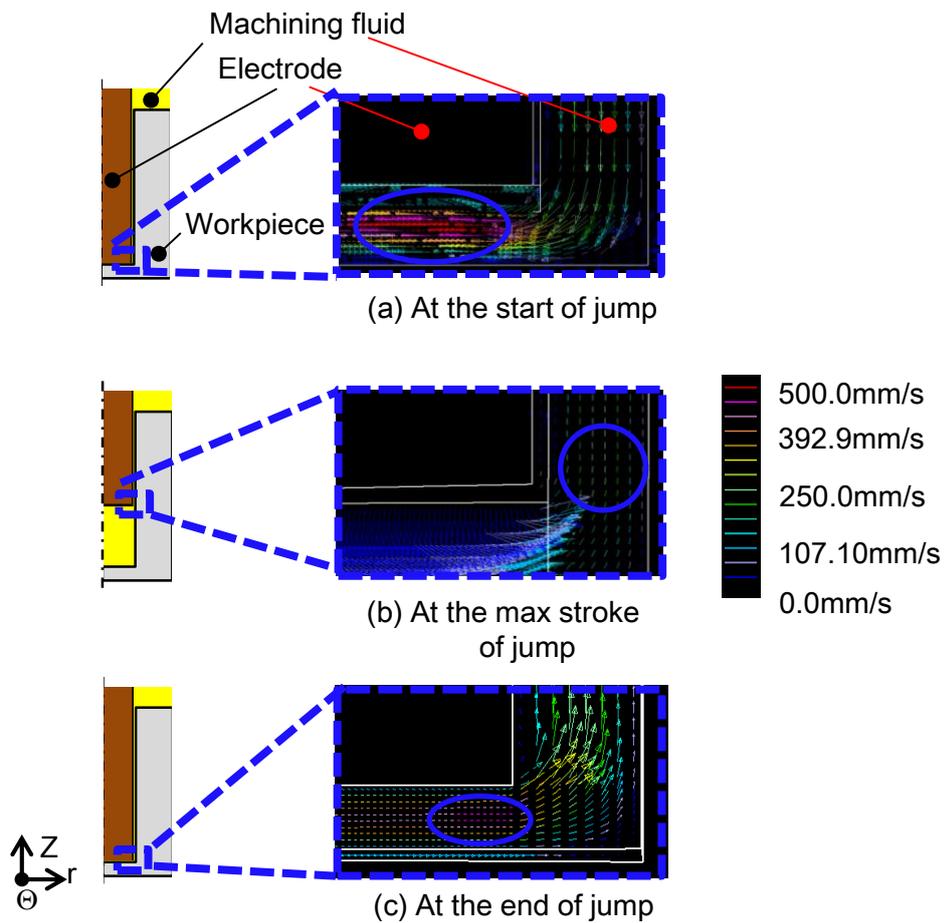


Fig. 2.45 Flow speed of machining fluid at bottom of hole

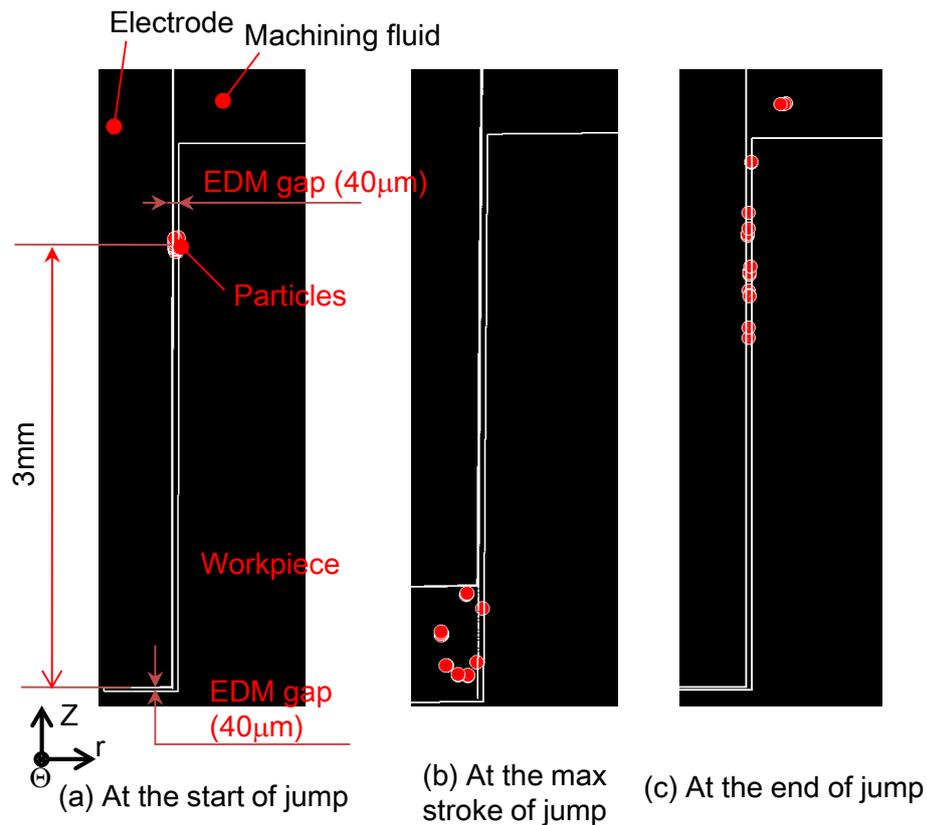


Fig. 2. 46 Particle tracking 1

ジャンプ中，電極退避時は毎秒  $21.0\text{mm}^3$  の加工液が，加工穴に流入し，接近時は，同量の加工液が加工穴から流出する．このため，加工穴の側面ギャップでは，Z 軸に垂直な断面における，加工液の平均流速は  $160.5\text{mm/s}$  となる．代表長さを，電極および加工穴側面のギャップ距離  $40\mu\text{m}$ ，代表速度を  $160.5\text{mm/s}$  としたとき，レイノルズ数は， $3.38$  となるため，本節では，非定常層流モデルで解析を行った．

図 2. 4 5 に，ジャンプ中の加工液の流速を示す．図 2. 4 5 ( a ) は，電極のジャンプ開始直後の，流速分布である．流速は，丸で囲った位置で最大となり，加工液は加工穴に  $493\text{mm/s}$  で流入する．図 2. 4 5 ( b ) は，電極が最大点に到達した後，引き戻された始めた直後の，流速分布である．流速は，図中，丸で囲った部分で最大  $227\text{mm/s}$  となり，加工液は加工穴から流出する．図 2. 4 5 ( c ) は，ジャンプ終了時の，流速分布である．流速は，丸で囲った部分で最大  $441\text{mm/s}$  となり，加工液は加工穴から流出する．

図 2. 4 6 には，加工穴底面から，約  $3\text{mm}$  上方の加工穴側面ギャップに流体粒子を配置し，ジャンプ開始から終了まで，流体粒子を追跡した結果を示す．

図 2. 4 6 ( a ) は、ジャンプ開始前の流体粒子の状態である。また、図 2. 4 6 ( b ) は、電極が高さ 0.8mm の地点に到達したときの状態を示す。このとき、流体粒子は、加工穴底面の中心付近に移動しており、放電ギャップにおける加工屑濃度が、一時的に高くなっていると考えられる。

図 2. 4 7 に、ジャンプの開始から終了までの、フィードバック電圧の平均波形を示す。平均波形は、図 2. 2 7 において、送り速度が低下し始めた、送り量 2.7mm から貫通までの時間帯について、ジャンプ開始から終了までの 1 秒間ごとに、フィードバック電圧波形を足し合わせ、ジャンプ回数で割ることによって求めた。ジャンプ終了直後、目標値電圧  $V_r=3.0V$  に対して、電圧が低下し、一時的に短絡状態が発生している。図 2. 4 6 ( b ) の数値解析の結果が示すように、ジャンプによって、加工穴底面中央部に加工屑が流入し、一時的にその濃度が上昇したため、ジャンプ終了直後、短絡状態が発生していると考えられる。

図 2. 4 6 ( c ) は、電極がジャンプ開始位置に戻り、ジャンプ動作が終了する直前の状態である。流体粒子は再び、加工穴側面と電極間に側面に移動しており、一部は加工穴から排出されている。また、図 2. 4 8 には、加工穴底面の中心付近  $20\mu\text{m}\times 20\mu\text{m}$  の領域に流体粒子を配置し、ジャンプ動作前後の位置を調査した解析結果を示す。図 2. 4 8 ( a )、図 2. 4 8 ( b ) は、それぞれ、ジャンプ開始直後およびジャンプ終了直前の、加工穴底面の様子である。ジャンプ前後で、流体粒子の位置は大きく変化しておらず、加工穴底面に滞留したままであった。実際の放電加工においては、ジャンプ動作は繰り返し行われるため、加工屑が複数回のジャンプで徐々に加工穴外へ排出されていると考えられる。複数回のジャンプにおける、加工液の流れの調査は、今後の課題である。

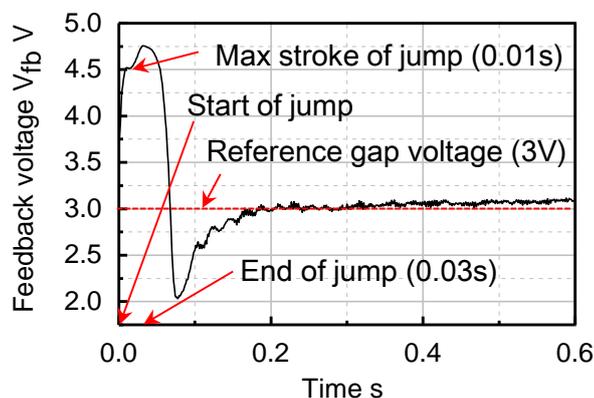


Fig. 2. 47 Averaged feedback voltage

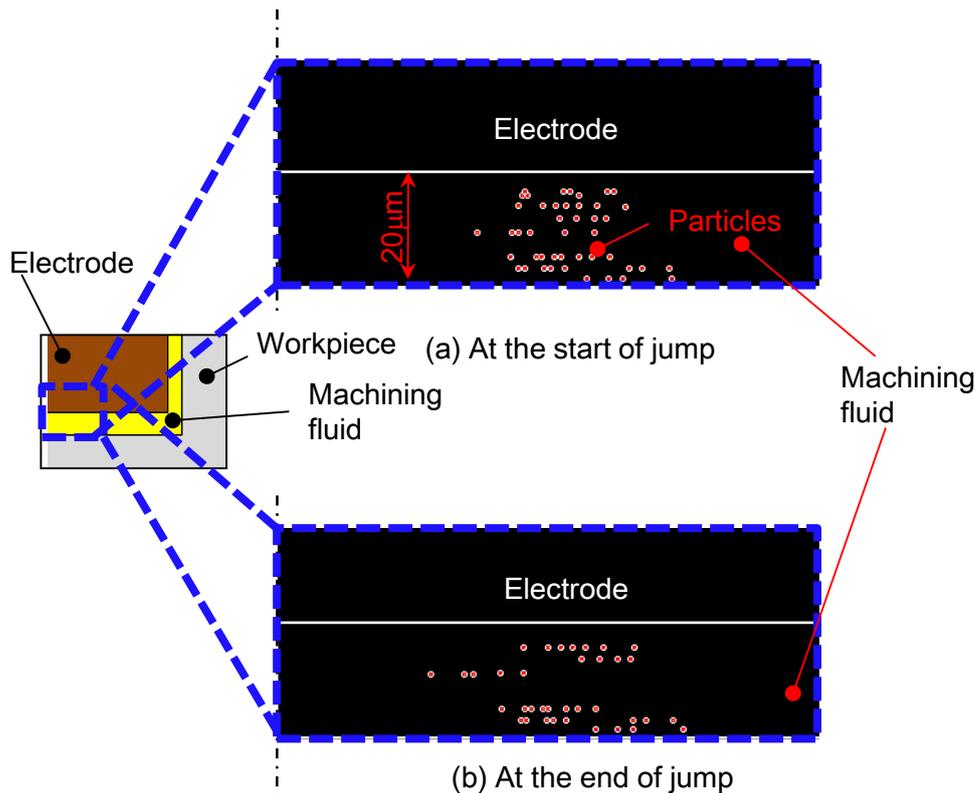


Fig. 2. 48 Particle tracking 2

## 2.6 結 言

本章では、放電穴加工の高速化を目的として、既存の放電加工機と5自由度制御型磁気浮上ローカルアクチュエータを組み合わせた、協調制御放電加工システムによる、高応答・高精度極間距離調整、軸方向の高速ジャンプ、径方向揺動を提案した。また、提案した電極駆動法による、直径 $\phi 1\text{mm}$ 、 $\phi 0.1\text{mm}$ の電極を使用した、加工物の貫通加工を実施した。最後に数値流体力学解析により、 $\phi 1\text{mm}$ の円柱電極について、ジャンプ開始から終了までの加工液流れの調査を実施した。本章で得られた結果を以下に示す。

$\phi 1\text{mm}$ の円柱電極を用いた加工

- 板厚 4mm の加工物を貫通させる、垂直穴放電加工では、既存の放電加工機単体を使用した場合と比較して、協調制御放電加工システムを用いた場合では、加工速度は 1.9 倍に改善された。また、ジャンプおよびジャンプと揺動の組み合わせによって、加工速度は、

それぞれ、2.9倍、4.5倍に改善された。

- ジャンプおよびジャンプと揺動の組み合わせによって、3サンプル間の加工直径のばらつきは、 $68\mu\text{m}$  からそれぞれ、 $35\mu\text{m}$ 、 $29\mu\text{m}$  に軽減され、ジャンプおよび揺動が、穴加工の高精度化に対しても有効である可能性を示した。

### $\phi 0.1\text{mm}$ の円柱電極を用いた加工

- 板厚 $1\text{mm}$ の加工物を貫通させる、垂直穴放電加工では、既存の放電加工機単体を使用した場合と比較して、協調制御放電加工システムを用いた場合では、加工速度は、5.3倍に改善された。また、ジャンプおよびジャンプと揺動の組み合わせによって、加工速度は、既存加工機単体を用いた場合と比較し、それぞれ、6.2倍、6.6倍に改善された。
- 協調制御放電加工システムによって、電極消耗率が、217.0%から128.3%へ低減した。

### ジャンプ中の加工液流れの数値流体力学解析

- 深さ $4\text{mm}$ の穴において、深さ $1\text{mm}$ の地点の加工液粒子は、電極がジャンプ最大高さ $800\mu\text{m}$ に到達した時点で、加工穴底面に引き込まれる。
- 電極がジャンプを終了し、再びジャンプ開始点に戻ったとき、深さ $1\text{mm}$ の位置に置かれた加工液粒子の一部が穴外へと排出される。

本章の課題について以下に示す。

### ジャンプ軌道の検討

ジャンプの目標値は、電極がジャンプを開始し、最大高さまでに至る時間および、ジャンプ最大高さからジャンプ開始位置に至るまでの時間が等しいような、二等辺三角形の波形としたが、波形形状と加工屑排出性の関係の検討は実施していない。加工屑排出性向上について、より効果的なジャンプ波形形状の検討を行う必要があると考えられる。

### 加工中の極間状態の可視化

## 第2章 高応答多自由度電極駆動による放電穴加工の高速化

導電性を有するSiC 単結晶材料などの、透明な加工物を用い、加工中の極間状態を観察するとともに、揺動、ジャンプの加工屑排出性改善の効果を確認する。

### ジャンプ・揺動中の数値流体解析

本章では、ジャンプ開始から終了まで、ジャンプ1回分についての加工液流れの数値シミュレーションを実施した。数値流体解析による、複数回のジャンプや円揺動中の加工液流れの調査は、これら電極駆動方法の効果を理論的に解明する、有効な手段であると考えられる。また、加工屑排出に対して有効な、ジャンプの速度、高さ、頻度、揺動の周波数や揺動量などのパラメータを、シミュレーションによって決定する手法も、有用であると考えられる。

本章では、放電穴加工の高速化に対する検討を実施した。第3章では、放電穴加工の高精度化を目的とし、回転電極のふれまわり補正、加工穴断面のテーパ形状補正について検討する。

## 第3章 高応答多自由度電極駆動による 放電穴加工の高精度化

### 3.1 緒言

第2章では、放電穴加工の高速化を目的として、ローカルアクチュエータと既存放電加工機を組み合わせた、協調制御放電加工システムを構築し、ローカルアクチュエータを用いた、極間距離の高応答・高精度調整、加工屑排出のための、軸方向ジャンプ、径方向揺動の効果を検討した。円柱型電極を用いた放電穴加工実験の結果、既存放電加工機単体を用いた場合と比較し、ローカルアクチュエータによる、高応答・高精度調整、ジャンプおよび揺動の複合効果によって、加工速度が最大 6.6 倍に改善されることが確認された。本章では、ローカルアクチュエータを用いた、放電穴加工高精度化の実現を目指す。

電極回転は、第2章で検討したジャンプ、揺動とともに、加工屑排出のための、代表的な電極駆動法であり、細穴放電加工の高速化、また、その精度が高ければ加工穴真円度の改善を実現可能である。しかしながら、スピンドルへの電極取り付け誤差が生じると、回転電極のふれまわり発生し、加工穴直径の増大、電極交換ごとの加工穴形状ばらつきの原因となる。また、高精度放電穴加工の他の課題として、放電によって消耗した電極が加工物に転写されることにより、加工穴がテーパ形状になることが挙げられる。

本章では、加工前、ローカルアクチュエータを用いて、回転電極のふれまわりを計測し、加工中は、計測したふれまわりの情報を用いて、これが低減されるように、スピンドルを並進および傾き方向に、位置・姿勢制御する方法を提案し、放電穴加工を実施する。また、電極をすりこぎ運動させることによって、電極消耗に起因した加工穴のテーパ形状を補正する方法を提案し、垂直穴加工においてその効果の検討を行う。

### 3.2 5自由度制御型磁気浮上ローカルアクチュエータ

#### 3.2.1 磁気浮上ローカルアクチュエータの構成とふれまわり補正における課題

図3.1に、先行研究<sup>(86)</sup>で開発され、本章で用いた、5自由度制御型磁気浮上ローカルアクチュエータの構成、既存放電加工機に取り付けられたローカルアクチュエータの写真を示す。ロー

カルアクチュエータは高さ159mm，幅100mm，質量10kg，スピンドルは長さ123mm，直径 $\phi 26$ mm，質量0.53kgであり，2章で用いたローカルアクチュエータと比較し，小型かつ低質量である。

ローカルアクチュエータは，スピンドル，スピンドルを軸方向に駆動するボイスコイルモータ型スラスト磁気軸受，スピンドルを半径方向および傾き方向に駆動するため，上下に取り付けられたリラクタンس式のヘテロポーラ型ラジアル磁気軸受，および，回転・給電機構から構成される。

図3. 2に回転・給電機構の原理図および写真を示す。本機構の給電リングには，平歯車が装備されており，外部に設置したACサーボモータと駆動用平歯車によって給電リングを回転させる。平歯車の駆動歯数および被駆動歯数はそれぞれ100，150である。給電リングには，永久磁石が取り付けられており，スピンドル，給電リング間に形成される磁気カップリングを用いて，給電リングに同期して，スピンドルは回転する。

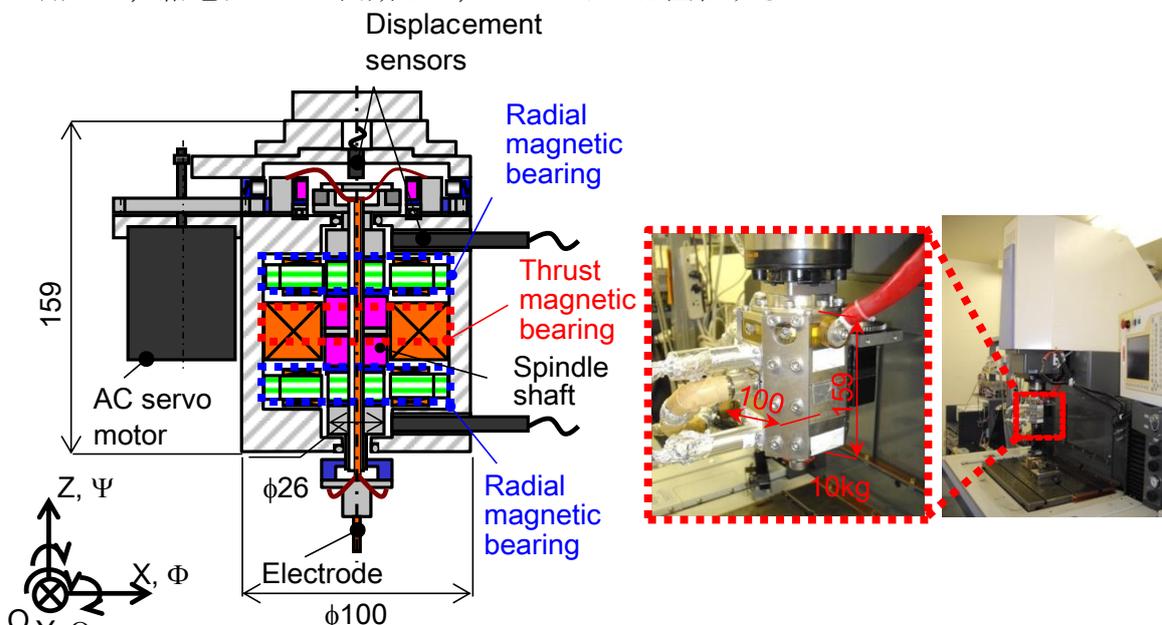


Fig. 3. 1 Cross section and photographs of magnetically levitated local actuator (MLA) with conventional EDM machine

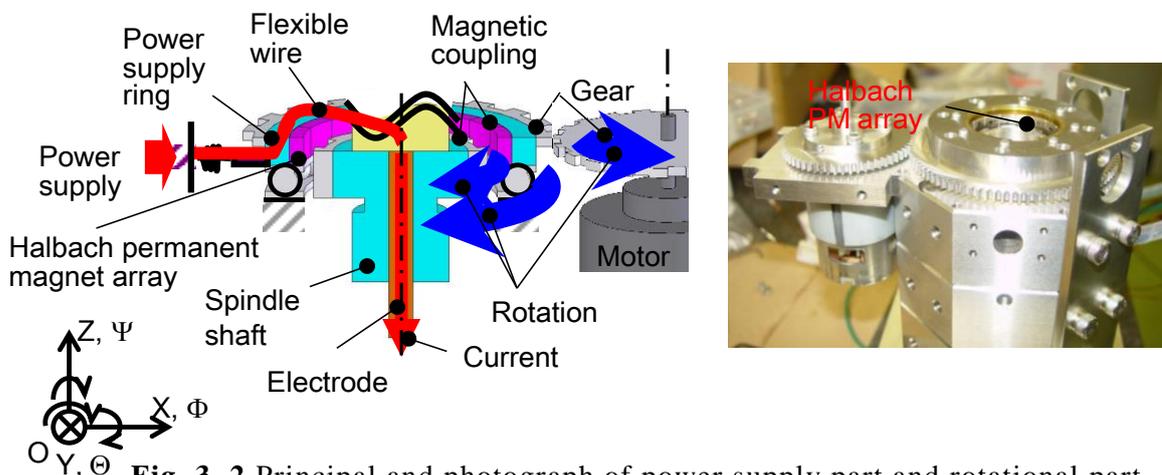


Fig. 3. 2 Principal and photograph of power supply part and rotational part

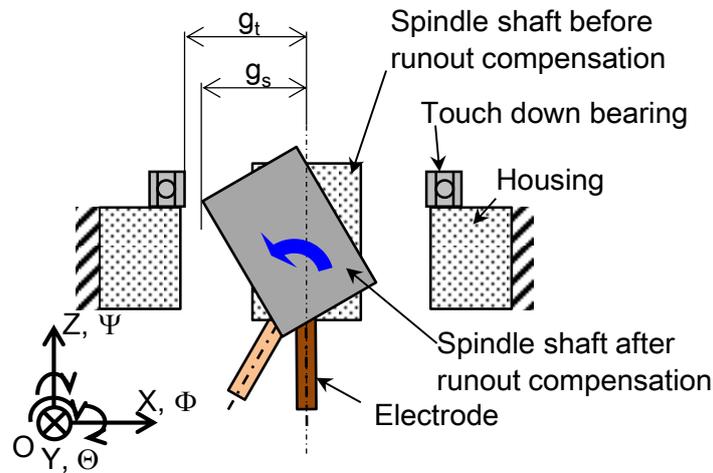


Fig. 3. 3 Configuration of electrode runout compensation

スピンドルと給電リングは、柔軟なワイヤで接続されており、放電電流は、このワイヤを経由して、電極に供給される。ブラシを使用しない給電方式により、摩擦の影響による、スピンドルの回転精度、位置決め精度の低下を回避可能である。また、本機構は、スピンドル自重補償機能も有しており、スラスト磁気軸受コイルのバイアス電流を低減し、アクチュエータの発熱を抑制する。

図3. 3は、電極取り付け誤差によって発生する、回転電極のふれまわりを、スピンドルの駆動によって補正する様子を示している。詳細な補正方法は後述するが、補正に要求されるスピンドル駆動量 $g_s$ は、取り付け誤差が大きくなるに伴い増加する。ふれまわり補正を行うためには、 $g_s$ が、ローカルアクチュエータの最大駆動量である、スピンドルとタッチダウンベアリング間の初期ギャップ $g_t$ 未満でなくてはならない。スピンドルに電極を取り付け、ふれまわりを計測し、要求されるスピンドルの径方向駆動量を調査したところ、およそ $150\mu\text{m}$ であった。しかし、先行研究で達成されたローカルアクチュエータの駆動範囲 $g_t$ は $100\mu\text{m}$ であり、位置決め範囲の拡大が必要であることが明らかとなった。

### 3. 2. 2 ローカルアクチュエータ位置決め範囲の拡大

ローカルアクチュエータの位置決め範囲拡大は、図3. 4に示すように、スピンドル直径を縮小し、ラジアル磁気軸受の電磁石の初期ギャップを $250\mu\text{m}$ から $550\mu\text{m}$ 、タッチダウンベアリング初期ギャップ $g_t$ を $100\mu\text{m}$ から $250\mu\text{m}$ に変更することによって行った。このとき、スピンドルの位置決め範囲は、並進方向は $\pm 100\mu\text{m}$ から $\pm 200\mu\text{m}$ 、傾き方向は $\pm 2\text{mrad}$ から $\pm 4\text{mrad}$ に拡大される。

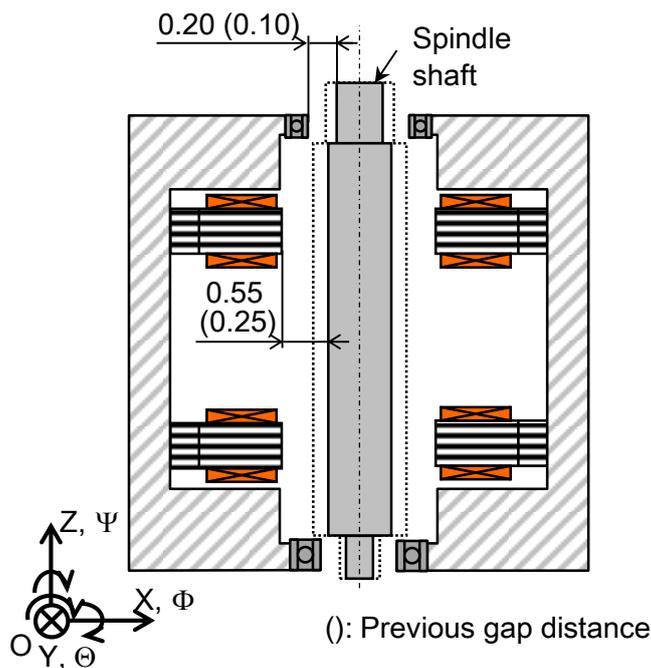


Fig. 3. 4 Methodology for expansion of positioning stroke

位置決め範囲の拡大に伴い、ラジアル磁気軸受制御システムの再設計が必要となったため、磁気軸受のモデルパラメータの再同定を行った。また、従来考慮されていなかった、スピンドルの並進・傾き方向の運動干渉の影響が、位置決め範囲の拡大に伴い顕在化するため、非干渉制御に関する対策を検討した。

スピンドルの位置、姿勢制御は、従来通りバイアス電流法によって行う。式(3. 1)、式(3. 2)に、並進X軸方向および傾き $\theta$ 軸方向について、線形化された、スピンドルの運動方程式を示す。

$$m\ddot{x} + c_x\dot{x} - k_x x = k_{ix}i_x + k_{\alpha x}\theta \dots\dots\dots (3. 1)$$

$$J_\theta\ddot{\theta} + c_\theta\dot{\theta} - k_\theta\theta = k_{i\theta}i_\theta + k_{\alpha\theta}x \dots\dots\dots (3. 2)$$

ただし、式中的変数および定数は、下記の通りである。

- $x$  : スピンドル X 軸方向変位
- $\theta$  : スピンドル $\theta$ 軸方向(Y 軸回り)回転角
- $i_x$  : スピンドル X 軸方向制御電流
- $i_\theta$  : スピンドル $\theta$ 軸方向制御電流
- $m$  : スピンドル質量
- $J_\theta$  : スピンドル $\theta$  軸方向(Y 軸回り)慣性モーメント
- $c_x$  : X 軸方向減衰係数

- $c_\theta$  :  $\Theta$ 軸方向減衰係数
- $k_x$  : X軸方向ばね定数
- $k_\theta$  :  $\Theta$ 軸方向ばね定数
- $k_{x\theta}$  : 運動干渉定数(並進→傾き)
- $k_{\theta x}$  : 運動干渉定数(傾き→並進)
- $k_{ix}$  : 電流・力定数
- $k_{i\theta}$  : 電流・トルク定数

$k_x, k_\theta, k_{x\theta}, k_{\theta x}, k_{ix}, k_{i\theta}$ は、有限要素法による数値解析によって決定した。解析には、磁場数値解析ソフト(Maxwell 3D ver. 14, Ansys, Inc.)を使用した。図3.5に、解析モデルを示す。トルク伝達用カップリングディスクおよびスラスト磁気軸受に設けられた永久磁石が、半径および傾き方向に与える影響を考慮するため、解析モデルには、ラジアル磁気軸受の他、スラスト磁気軸受および回転機構が含まれている。各電磁石に供給する電流  $i_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ )を示す式において、 $i_x$ に掛けられる、電磁力の作用点とスピンドル重心からの距離  $L_1$  および  $L_2$  を用いて計算される係数は、X軸方向制御電流が、スピンドル $\Theta$ 軸方向の運動へ干渉することを防ぐために設けられる。 $L_1$ および $L_2$ は、それぞれ、32.4mm および 16.8mm である。

電流・力定数 $k_{ix}$ は、スピンドルのX、 $\Theta$ およびZ軸方向の位置、姿勢を原点に置き、ラジアル磁気軸受の各コイルにバイアス電流 $i_0$ (2A)を与えた状態で、 $i_x$ を変化させ、 $i_x$ とスピンドルに作用する力の関係から求めた。電流・トルク定数 $k_{i\theta}$ も同様に、 $\Theta$ 軸方制御電流 $i_\theta$ を変化させ、 $i_\theta$ とスピンドルに作用するトルクの関係から求めた。図3.6および図3.7に、解析の結果を示す。

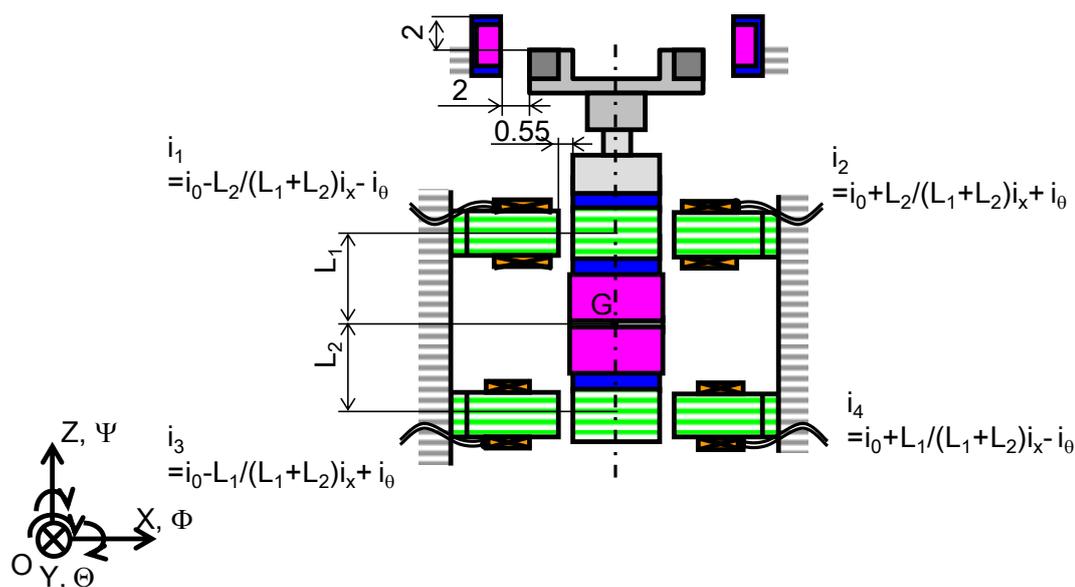


Fig. 3.5 Analysis model for expansion of positioning stroke

$k_x$  および  $k_{x\theta}$  は、全てのコイルにバイアス電流  $i_0$  を与えた状態で、スピンドルを X 軸方向に移動させ、その移動量  $x$  とスピンドルに働く力およびトルクの関係からそれぞれ求めた。 $k_\theta$  および  $k_{\theta x}$  は、スピンドルを重心回りに回転させ、スピンドル回転角  $\theta$  とスピンドルに加わるトルクおよび力の関係から求めた。図3.8～11に、数値解析結果を示す。また、表3.1に、図3.6～11のグラフを線形近似し、その傾きから求めた、各物理定数をまとめる。

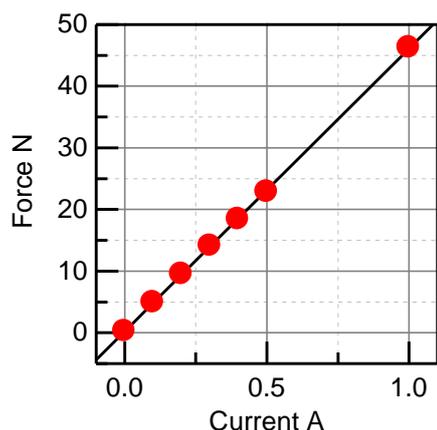


Fig. 3. 6 Relationship between  $i_x$  and force (Simulated)

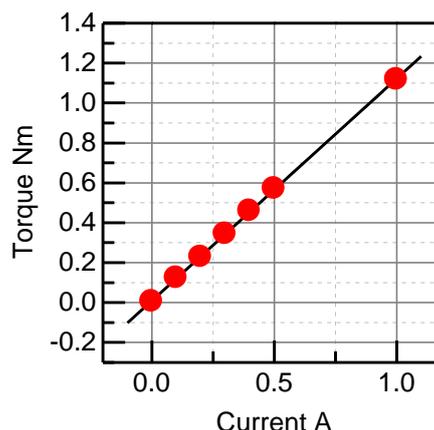


Fig. 3. 7 Relationship between  $i_0$  and torque (Simulated)

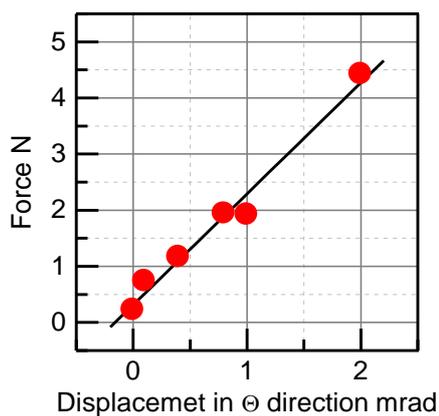


Fig. 3. 8 Relationship between  $\theta$  and force (Simulated)

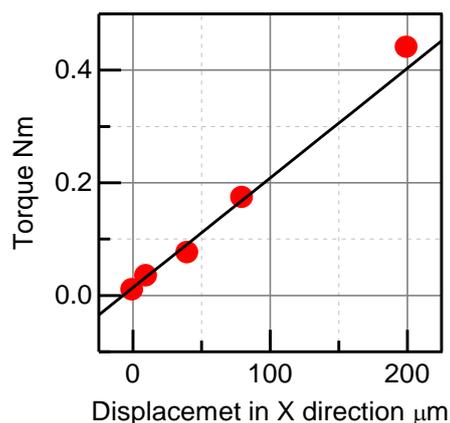


Fig. 3. 9 Relationship between  $x$  and torque (Simulated)

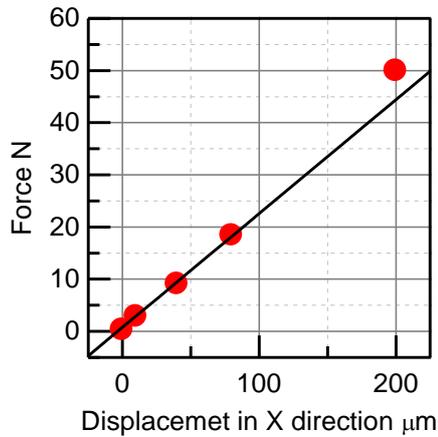


Fig. 3.10 Relationship between x and force (Simulated)

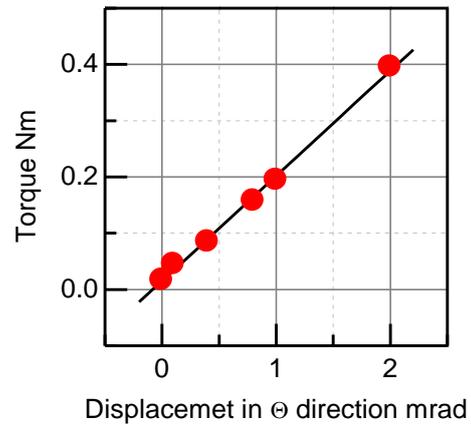


Fig. 3.11 Relationship between  $\theta$  and torque (Simulated)

Table 3.1 Physical constants calculated by FEM analysis

Coefficients	Value
$K_x$	$2.2 \times 10^5 \text{N/m}$
$K_\theta$	$190 \text{Nm/rad}$
$K_{\theta x}$	$1.90 \times 10^3 \text{N/rad}$
$K_{x\theta}$	$1.95 \times 10^3 \text{N}$
$K_{ix}$	$46 \text{N/A}$
$K_{i\theta}$	$1.11 \text{Nm/A}$

スピンドルの運動非干渉制御について説明する。図3.12に、非干渉化のブロック線図を示す。傾き方向( $\theta$ 軸方向)から並進方向(X軸方向)の、非干渉制御では、スピンドルに、 $-k_{\alpha}\theta$ なる力を与えればよい。そこで、コイルの応答性は十分であるとして、変位センサを用いて計測した、スピンドル傾き $\theta$ に、 $-k_{\theta x}/k_{ix}$ を掛けた目標値電圧をコイルに印加した。並進方向から傾き方向の非干渉は、同様にして、トルク $-k_{x\theta}x$ をスピンドルに加えるため、スピンドル位置 $x$ に、 $-k_{x\theta}/k_{i\theta}$ を掛けた電圧目標を印加した。

フィードバック制御設計は、X軸方向および $\theta$ 軸方向それぞれ独立に行った。前章と同じく、制御コントローラは、積分器および分母二次、分子二次のレギュレータを用い、目標値から変位までの閉ループ伝達関数の特性方程式が、複素平面左半面の実軸上に6重根を持つように極

を指定し、積分器のゲイン、レギュレータの係数を自動的に決定した. X 軸および $\Theta$ 軸方向のレギュレータの極 $\alpha_x, \alpha_\theta$ , 積分器ゲイン $\gamma_x, \gamma_\theta$ , レギュレータの係数,  $a_{1x}, a_{0x}, b_{2x}, b_{1x}, b_{0x}$  および  $a_{1\theta}, a_{0\theta}, b_{2\theta}, b_{1\theta}, b_{0\theta}$ を, 表3. 2に示す.

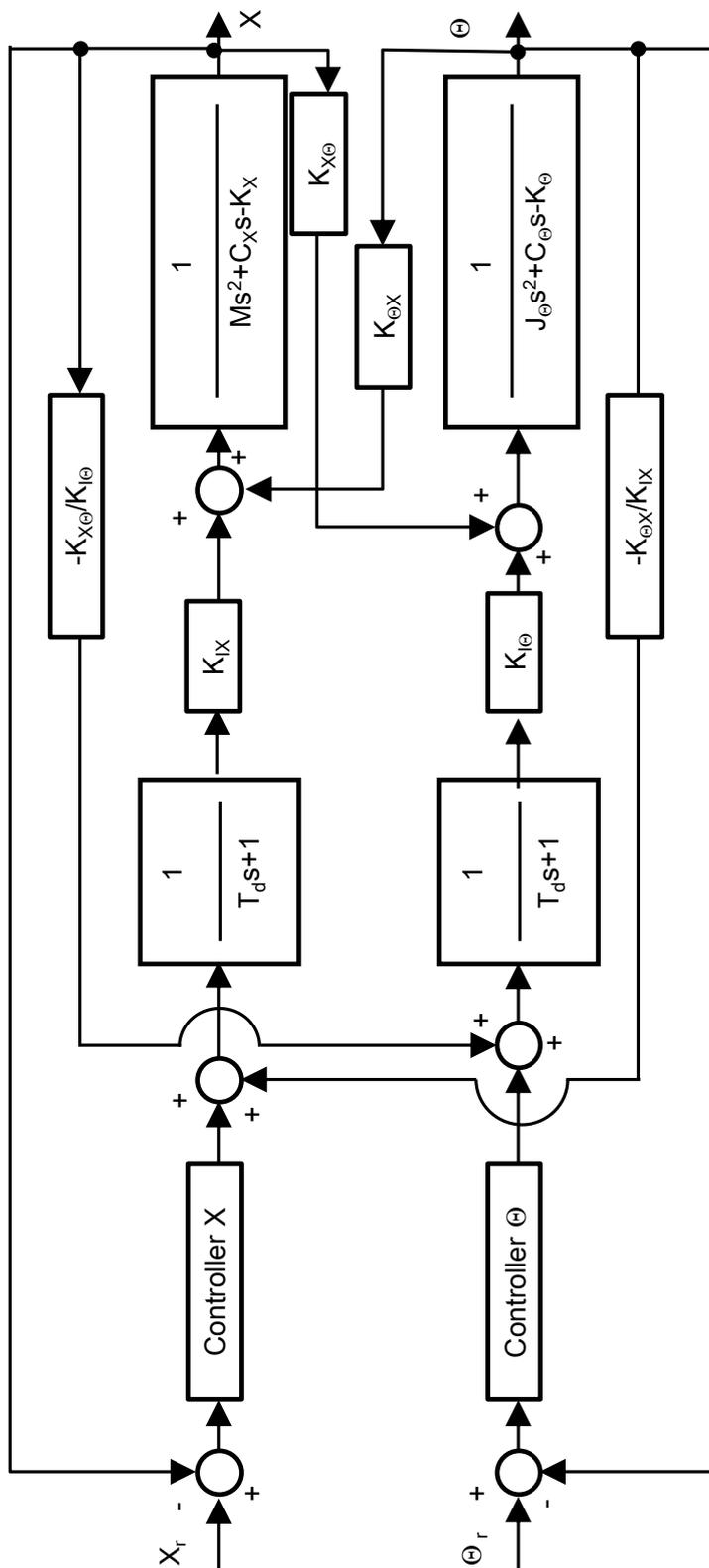


Fig. 3. 12 Block diagram of decoupling of spindle motion

Table 3. 2 Control parameters of MLA system in X and  $\Theta$  directions

X direction		$\Theta$ direction	
$\alpha_X$	$2\pi \times 245$	$\alpha_\Theta$	$2\pi \times 185$
$\gamma_X$	$3.13 \times 10^2$	$\gamma_\Theta$	$2.57 \times 10^2$
$a_{0X}$	$2.04 \times 10^7$	$a_{0\Theta}$	$9.91 \times 10^6$
$a_{1X}$	$0.70 \times 10^4$	$a_{1\Theta}$	$5.01 \times 10^3$
$b_{0X}$	$2.24 \times 10^{11}$	$b_{0\Theta}$	$4.04 \times 10^9$
$b_{1X}$	$4.67 \times 10^8$	$b_{1\Theta}$	$1.25 \times 10^5$
$b_{2X}$	$1.66 \times 10^5$	$b_{2\Theta}$	$4.30 \times 10^3$

### 3. 2. 3 磁気浮上ローカルアクチュエータ制御システムの構成

ローカルアクチュエータシステムの構成を図3. 13に示す. Z軸方向の変位計測は, 2章と同じ, 渦電流式変位センサ, X, Y,  $\Theta$ および $\Phi$ 軸方向の変位計測には, 静電容量式変位センサ(CPL190, Lion Precision)を用いた. 静電容量式変位センサの性能を表3. 3に示す. スピンドル回転用のモータは, ACサーボモータ(SGMJV-A5A, YASKAWA Electric Corp.)を用いた. ローカルアクチュエータのコントローラは, DSPシステム(DS1005, dSPACE, Inc.)を使用し, サンプリング周波数は10kHzとした. 変位センサ, 電流センサおよびACモータのエンコーダパルスの出力は, 16bitA/Dコンバータから取り込まれ, DSPボードにて演算した制御信号は, 16bitD/Aコンバータから出力される. 制御信号は, 電圧アンプで増幅され, 電磁石が駆動される. コントローラの設計および制御には, 解析ソフトウェア(MATLAB/Simulink, MathWorks, Inc.)を使用した.

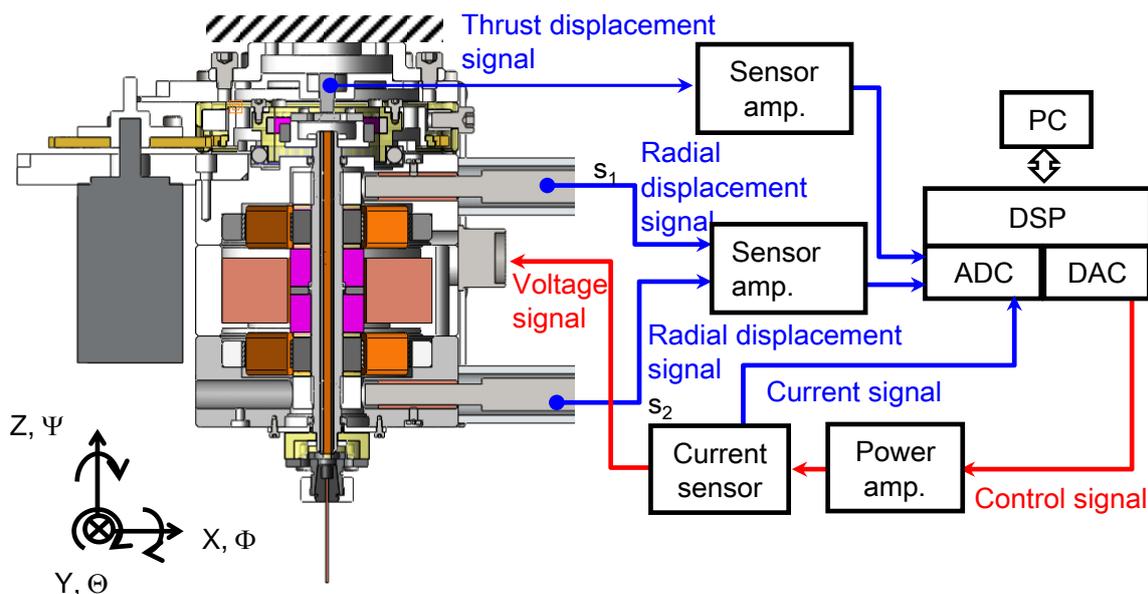


Fig. 3. 13 Experimental setup of MLA system

Table 3. 3 Performances of radial displacement sensor

Manufacturer	Lion precision
Probe model	C23
Console model	CPL190
Resolution	40nm
Positioning range	1,250 $\mu$ m
Bandwidth	15kHz
Output	$\pm$ 10V

### 3. 2. 4 磁気浮上ローカルアクチュエータの基本性能

図 3.1 4 は、スピンドルを X, Y,  $\Theta$  および  $\Phi$  軸方向に対して、周波数 1Hz にて、フルストローク駆動した軌跡である。スピンドルの位置決め範囲は、X, Y,  $\Theta$  および  $\Phi$  軸方向に対して、400 $\mu$ m, 400 $\mu$ m, 8mrad, 8mrad であった。図 3.1 5 は、回転速度 1,000rpm における電極ふれまわり補正を想定し、スピンドルを X 軸方向に対して、片側振幅 100  $\mu$ m, 16.7Hz で正弦波駆動したときの、X および  $\Theta$  軸方向のスピンドル位置・姿勢である。非干渉制御により、スピンドルの X 軸方向運動から、 $\Theta$  方向運動への干渉が低減された。また、図 3.1 6 は、 $\Theta$  軸方向に対して、片側振幅 1mrad, 16.7Hz で正弦波駆動した時の、

Θ軸および X 軸方向のス핀ドル位置・姿勢である。図 3. 15 と同様に，非干渉制御の効果が確認された。最後に，ローカルアクチュエータの位置決め性能を，表 3. 4 にまとめる。

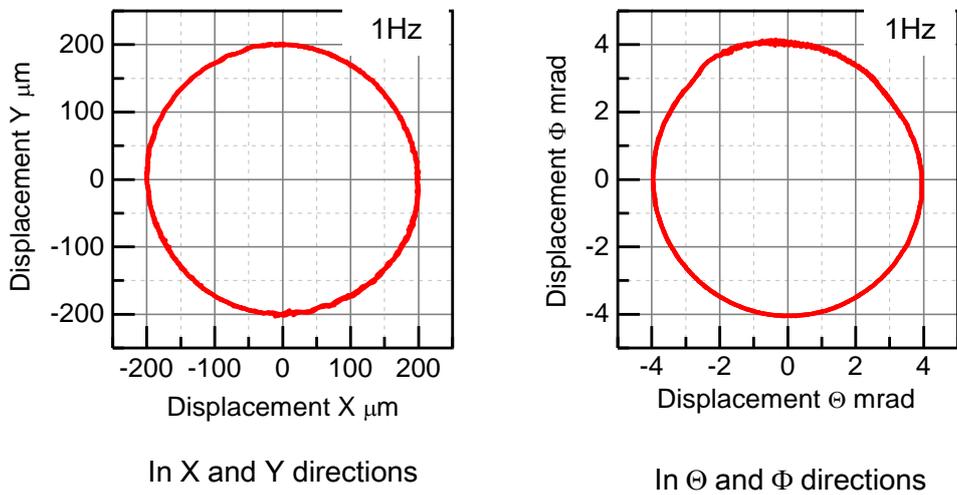


Fig. 3. 14 Full stroke driving of spindle shaft

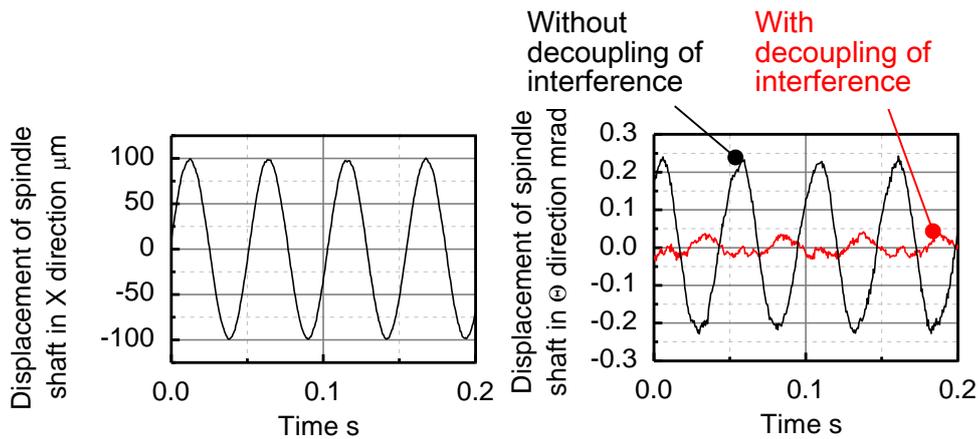


Fig. 3. 15 Motion interference from X to Θ direction

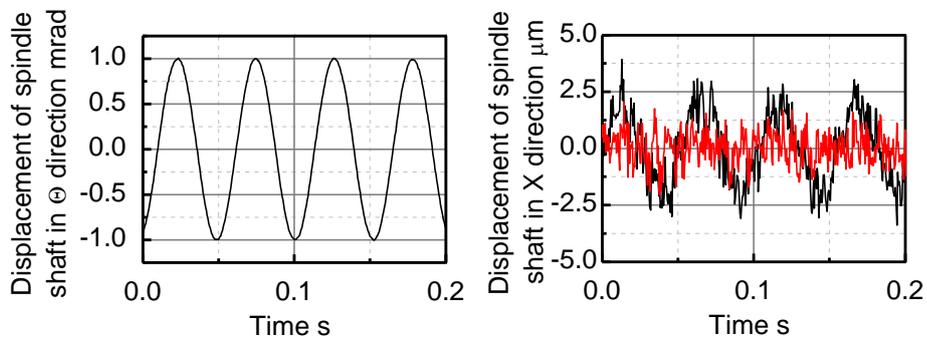


Fig. 3. 16 Motion interference from Θ to X direction

Table 3. 4 Positioning performances of MLA

Directions	Band width	Poisoning resolution	Poisoning stroke
X	150Hz	2 $\mu$ m	400 $\mu$ m
Y	170Hz	2 $\mu$ m	400 $\mu$ m
Z	250Hz	0.6 $\mu$ m	2mm
$\Theta$	110Hz	25 $\mu$ rad	8mrad
$\Phi$	110Hz	25 $\mu$ rad	8mrad

### 3. 3 回転電極ふれまわりの計測と補正

#### 3. 3. 1 ふれまわりのモデル化

電極取り付け誤差とふれまわりのモデルを図3. 17に示す. 電極の取り付け誤差は, スピンドル回転中心軸と電極中心軸との距離(偏心)およびスピンドル回転中心軸と電極中心軸のなす角(傾き)にモデル化される. 本論文では, 偏心を $\varepsilon$ , 傾きを $\alpha$ と定義する. 電極回転時では, 電極の取り付け位置において, 偏心 $\varepsilon$ および傾き $\alpha$ に起因した, ふれまわり X, Y,  $\Theta$ ,  $\Phi$ 軸方向成分が生じる. ふれまわりは, Z 軸回りのスピンドル回転角  $\Psi$ によって変化するため,  $\Psi$ の関数として, 式(3. 3)のように定義する. ただし, 式中の添え字 X, Y,  $\Theta$ ,  $\Phi$ は, ふれまわり成分の方向を示す.

$$R\alpha(\Psi) = [R_{0x}(\Psi), R_{0y}(\Psi), R_{0\theta}(\Psi), R_{0\phi}(\Psi)]' \dots\dots\dots (3. 3)$$

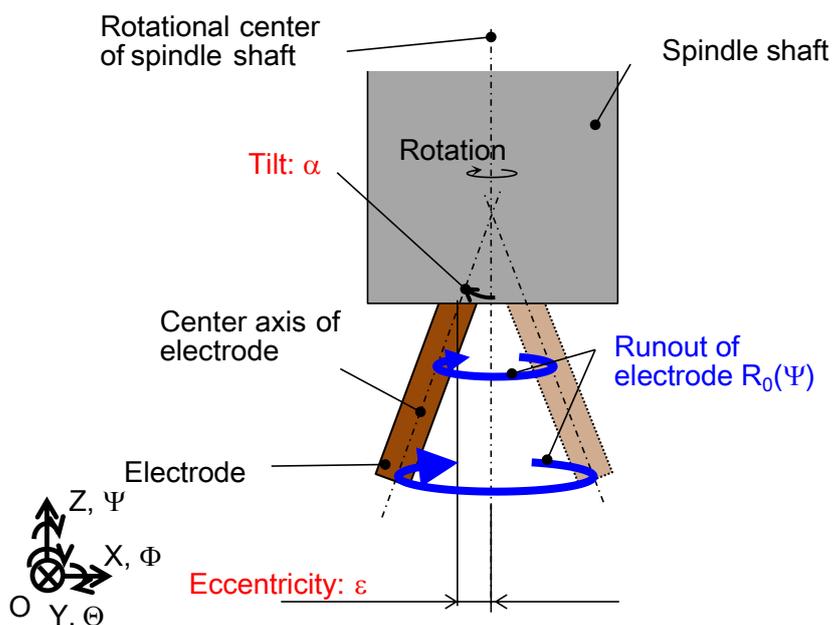


Fig. 3. 17 Setting error and runout of electrode

### 3.3.2 ふれまわり計測方法

#### (1) 電極回転角の計測

ふれまわり計測では、電極回転角  $\Psi$  の情報が必要である。 $\Psi$  は、AC サーボモータに内蔵された、インクリメンタルエンコーダの出力電圧を利用して計測した。エンコーダ出力は、図3.18に示すような、モータが  $\Delta \Psi_m^\circ$  回転するごとに一度立ち上がるパルス波形であり、これを DSP に取り込み、立ち上がり回数をカウントすることによって、モータ回転角  $\Psi_m$  を求めた。

スピンドル回転機構の平歯車の駆動歯数および被駆動歯数は、それぞれ 100, 150 であるため、モータが  $\Delta \Psi_m$  回転するときの、電極回転角  $\Delta \Psi$  は、式(3.4)のように示される。

$$\Delta \Psi = \frac{2}{3} \Delta \Psi_m \dots\dots\dots (3.4)$$

このため、エンコーダパルスが  $n$  回立ち上がる間の、電極回転角  $\Psi$  は、式(3.5)で示される。

$$\Psi = (n-1) \Delta \Psi = \frac{2}{3} (n-1) \Delta \Psi_m \dots\dots\dots (3.5)$$

ただし、以上の方法で計測可能な回転角は、計測開始位置を基準とした、相対的なものである。本研究では、電極回転方向の原点 ( $0^\circ$ ) を基準とした絶対角の情報が必要であるため、モータが  $360^\circ$  回転するごとに、1度立ち上がるエンコーダパルス(Z相パルス)を利用して、原点を計測した。具体的な方法を説明する。まず、スピンドルが回転を開始した後、最初のZ相パルス立ち上がりを検出する。その後、一番初めにA相パルスが立ち上る位置を、モータ回転方向(Z軸回り)の原点と定義する。ローカルアクチュエータ回転機構の駆動歯数および被駆動歯数の関係から、任意の位置から回転を開始した場合、モータ回転角  $0^\circ$  の位置では、電極回転角は、 $0^\circ$  (原点)、 $120^\circ$  および  $240^\circ$  のいずれかである。モータとスピンドルの原点を一致させるため、2つの歯車にそれぞれ一か所、印を付け、両者の位置を合わせた後、スピンドルを回転開始した。

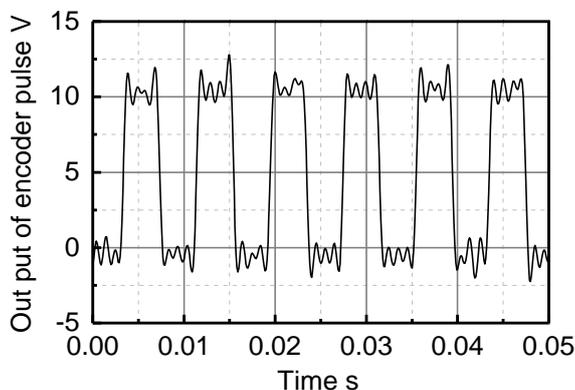


Fig. 3. 18 Pulse signal of rotary encoder

(2) ふれまわり並進方向成分の計測

ふれまわり計測には、2軸の非接触式寸法測定器 (LS7600, Keyence Corp.) を利用した。測定的前提条件として、電極の円筒度は十分であり、変形はないものとした。また、スピンドルの振動振幅は、ふれまわりの大きさと比較して十分小さく、無視できるものとした。

電極の取り付け位置でのふれまわりのうち、X, Y (並進) 方向成分,  $R_{0x}(\Psi)$ ,  $R_{0y}(\Psi)$  の計測について説明する。図3. 19に計測システムの概要を示す。まずスピンドルを磁気浮上させ、図3. 20のように、直行する2つの寸法測定器投光部から、電極取り付け点に向けて、レーザ光を照射する。寸法測定器受光部は、電極の影を認識し、電極エッジの座標データを電圧値に変換、出力する。スピンドル回転時は、ふれまわりによって移動する影エッジの座標データを、AD コンバータから DSP システムに取り込む。電極回転角  $\Psi$  と同時刻に計測された電極ふれまわりは、 $\Psi$  の情報を含む,  $R_{0x}(\Psi)$ ,  $R_{0y}(\Psi)$  となる。

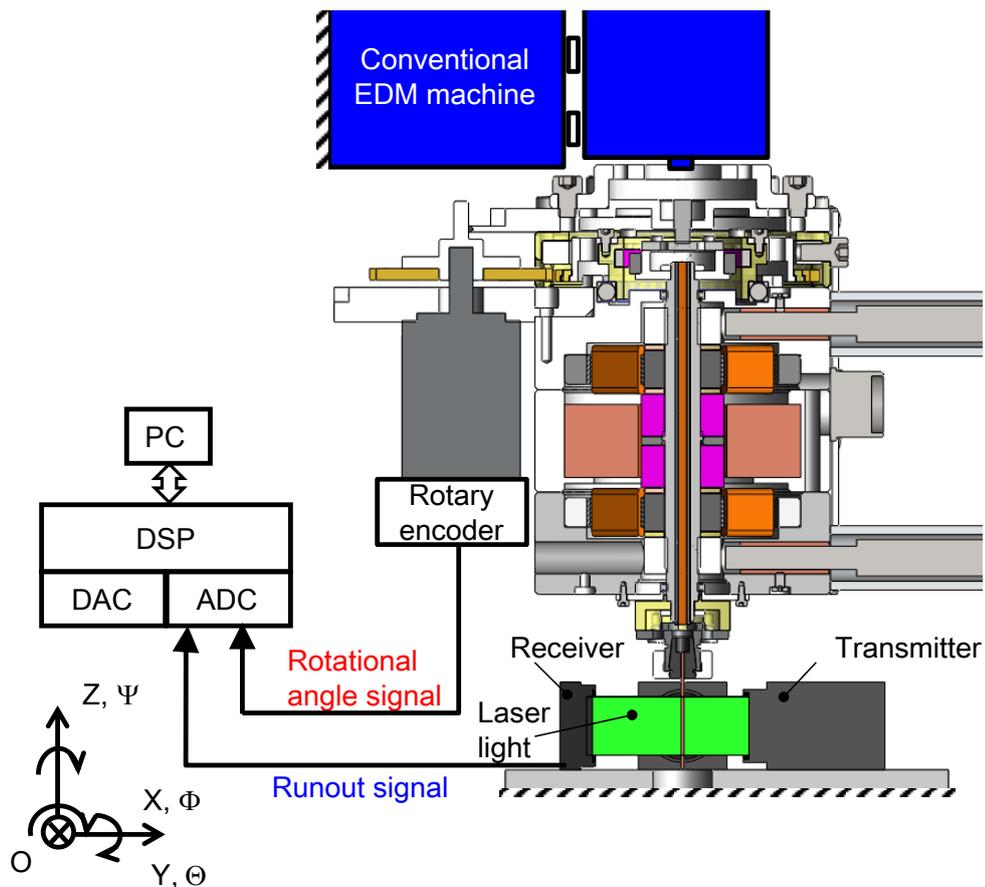


Fig. 3. 19 Experimental set-up of electrode runout measuring system

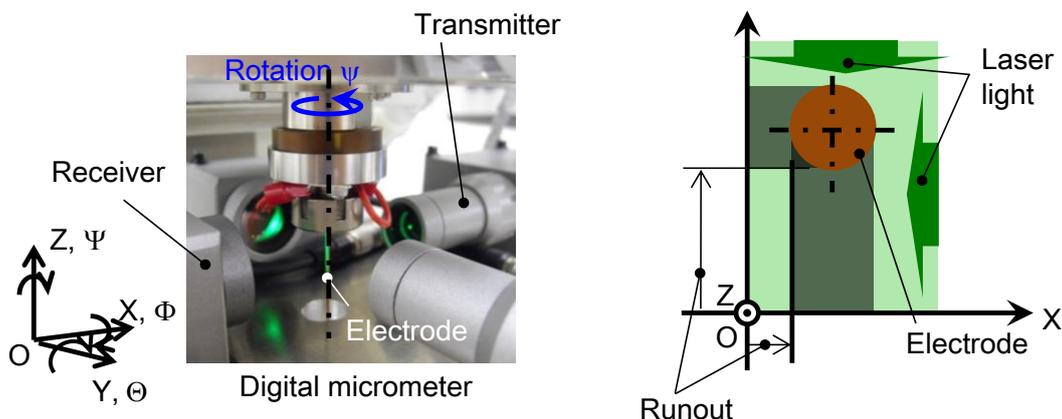


Fig. 3. 20 Electrode runout measurement in X and Y directions

### (3) ふれまわり傾き方向成分の計測

次に、ふれまわり $\Theta, \Phi$ (傾き)方向成分,  $R_{\theta\theta}(\Psi), R_{\theta\phi}(\Psi)$ の計測方法について説明する。これらは,  $R_{ox}(\Psi), R_{oy}(\Psi)$ とは異なり, 図3. 21に示すように, ローカルアクチュエータの移動を伴う計測を行った。電極取り付け点におけるふれまわり,  $R_{ox}(\Psi)$ および  $R_{oy}(\Psi)$ を計測した後, 放電加工機の位置決めステージを利用して, ローカルアクチュエータを, Z 軸方向に距離  $L$  だけ上昇させる。その後, 電極取り付け点と同様に, ふれまわりを計測する。これらを,  $R_{Lx}(\Psi), R_{Ly}(\Psi)$ と定義する。ふれまわり  $R_{\theta\theta}(\Psi), R_{\theta\phi}(\Psi)$ は, 式(3. 6)により導出可能である。

$$R_{\theta\theta}(\Psi) = \tan^{-1} \left[ \frac{R_{Lx}(\Psi) - R_{ox}(\Psi)}{L} \right]$$

$$R_{\theta\phi}(\Psi) = \tan^{-1} \left[ \frac{R_{Ly}(\Psi) - R_{oy}(\Psi)}{L} \right] \dots \dots \dots (3. 6)$$

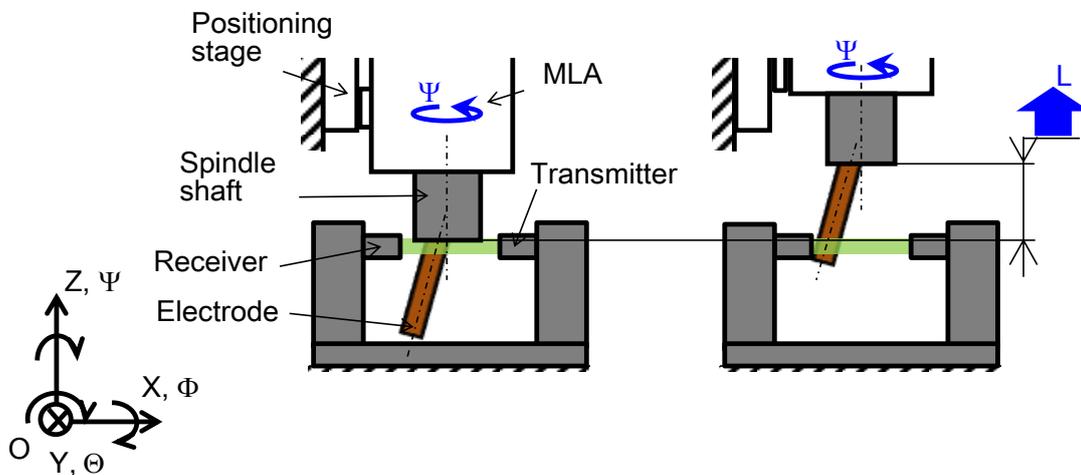


Fig. 3. 21 Electrode runout measurement in  $\Theta$  and  $\Phi$  directions

3.3.3 ふれまわり補正方法

図3.22に、ふれまわり補正システムのブロック線図を示す。補正システムは、ローカルアクチュエータシステム、電極取り付け誤差、ふれまわり補正目標発生器から構成される。図中、 $P$  は、スピンドルの位置・姿勢、および回転角であり、式(3.7)で示される。

$$P = [X, Y, Z, \Theta, \Phi, \Psi]' \dots\dots\dots (3.7)$$

$R$  は、電極取り付け誤差ブロックへの入力  $P$  に対する出力であり、電極取り付け点における、電極のふれまわりを示し、式(3.8)で示される。

$$R = [R_x(\Psi), R_y(\Psi), R_{\theta}(\Psi), R_{\phi}(\Psi)]' \dots\dots\dots (3.8)$$

本研究では、 $R$  を低減するために、ふれまわり補正目標発生器から、ふれまわり補正のための、スピンドルの位置・姿勢目標  $R_r(\Psi)$  を出力し、スピンドルを並進および傾き方向に多自由度駆動する。ふれまわり補正目標  $R_r(\Psi)$  は、次のように決定される。図3.23は、ふれまわり傾き( $\Theta, \Phi$ 方向)成分のみを補正した時のスピンドルを、 $X$ - $Z$  平面に垂直な方向から見たときの断面図である。図に示すように、補正前のふれまわり $\Theta$ 軸方向成分  $R_{\theta}(\Psi)$  は、スピンドルを  $Y$  軸の回りに、 $-R_{\theta}(\Psi)$  回転させることにより、補正可能である。このとき、 $X$  軸方向に発生するふれまわり  $R_x(\Psi)$  は、式(3.9)で表わされる。

$$R_x(\Psi) = L_G \sin(R_{\theta}(\Psi)) - R_{\theta x}(\Psi) \cos(R_{\theta}(\Psi)) \dots\dots\dots (3.9)$$

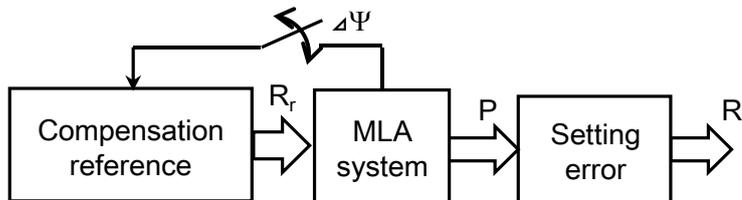


Fig. 3.22 Block diagram of electrode runout compensation system

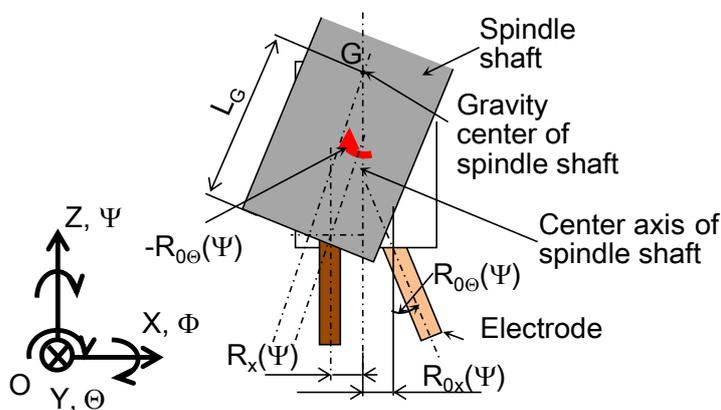


Fig. 3.23 Electrode compensation reference

これを補正するためには、スピンドルを X 軸方向に $-R_x(\Psi)$  駆動すればよい。Y および $\Phi$ 軸方向についても同様に考えると、補正目標値  $R_r(\Psi)$ は、式(3. 10)のように決定される。

$$R_r(\Psi) = \begin{bmatrix} -[L_G \sin(R_{0\theta}(\Psi)) - R_{0x}(\Psi) \cos(R_{0\theta}(\Psi))] \\ -[L_G \sin(R_{0\phi}(\Psi)) - R_{0y}(\Psi) \cos(R_{0\phi}(\Psi))] \\ -R_{0\theta}(\Psi) \\ -R_{0\phi}(\Psi) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3. 10)$$

ふれまわり補正方法について説明する。磁気浮上し、回転を開始したローカルアクチュエータが、電極回転方向(Z 軸回り)原点  $0^\circ$  を検出すると、補正目標発生器は補正目標  $R_r(0^\circ)$ を出力開始する。その後は、電極が  $\Delta \Psi^\circ$  回転するごとに、目標値の出力を更新し、スピンドルの位置・姿勢制御により、ふれまわりは補正される。

ところでエンコーダパルスの立ち上がりを検出して、補正目標を更新する上記の補正方法は、[図3. 24](#)のように、ノイズレベルが高い環境では、エンコーダパルスの立ち上がりが誤検出され、電極回転角を正確に計測することが困難となる。誤検出が発生すると、補正に必要な位置・姿勢目標と、ふれまわり補正発生器からの出力に相違が生じ、補正の効果が低下する。これを防ぐため、Z 相パルスを利用した原点検出を利用して、電極回転角  $\Psi$ が  $0^\circ$  のときは、補正目標発生器出力を  $R_r(0^\circ)$ にリセットする機能を、補正アルゴリズムに追加する。ただし、モータ回転角  $0^\circ$  のとき、電極回転角は、 $0^\circ$  ,  $120^\circ$  ,  $240^\circ$  のいずれかあるため、リセットは、モータが3回転(電極が2回転)する毎に行う。

リセット機能の効果を検討するため、10 分間のふれまわり補正を行った結果を、[図3. 25](#)に示す。実験は、 $\phi 1$  の精密ピンゲージを使用し、ふれまわりの並進(XY)方向成分補正のみ行った。スピンドルの回転速度は 33rpm とした。リセット機能を用いない場合では、時間の経過とともにパルス立ち上がりの誤検出が繰返し発生し、ふれまわり振幅が変化しているが、リセット機能の適用により、10 分間連続してふれまわりが抑制された。

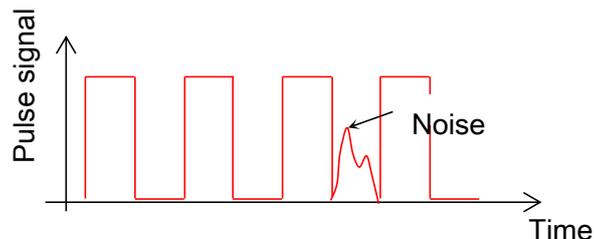


Fig. 3. 24 False detection of rotational angle

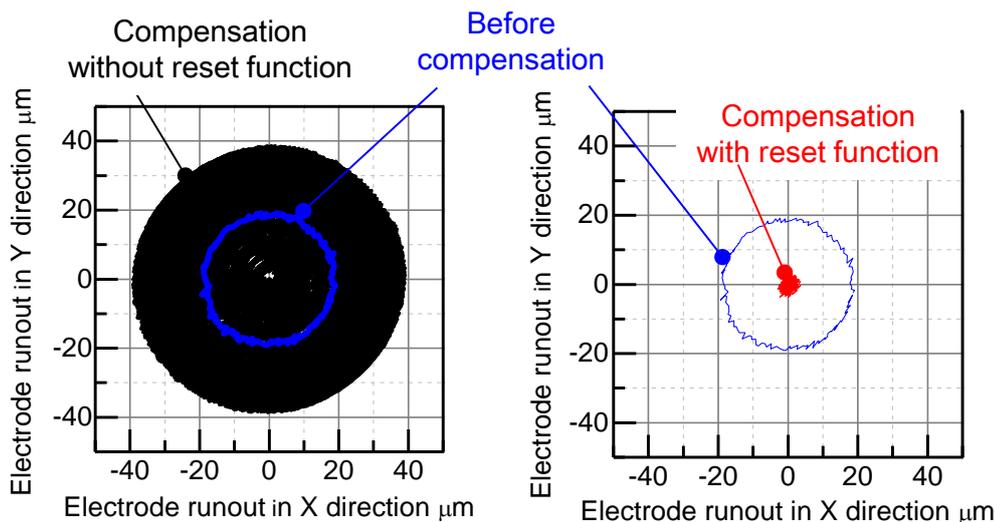


Fig. 3. 25 Runout of rotary electrode

高速回転領域の補正では、ローカルアクチュエータのゲイン誤差、位相遅れによって、補正目標値 $R_r$ とスピンドルの位置・姿勢に偏差が生じ、補正効果が低下する。本研究では、この課題に対して、繰返し制御<sup>(90)</sup>を適用した補正システムを提案する。繰返し制御は、周期的な目標値が入力される制御システムの目標値追従性の向上に対して有効な手法である<sup>(91)</sup>。

図3. 26に、位置決め機構における、一般的な繰返し制御系のブロック線図を示す。ブロック線図中、 $P(s)$ 、 $C(s)$ は制御対象および制御系安定化のためのコントローラの伝達関数を示す。この制御系は、位置決め目標値 $X_r$ の周期 $L$ に対応するむだ時間要素を制御ループに含み、むだ時間要素が、1周期前までの偏差を利用した制御信号を出力することによって、偏差は周期を経るごとに減少する。

本研究で使用するローカルアクチュエータは、スピンドルの回転むらによって、回転速度に変動が生じ、周期 $L$ が厳密には一定でない。そこで、「角度領域」<sup>(92)</sup>の概念に基づき、空間領域繰返し制御系を構成した。図3. 27に、繰返し制御を用いた補正システムのブロック線図を示す。 $R_r$ および $P$ の偏差は、繰返しコントローラに入力される。繰返しコントローラは、1回転前までの偏差の情報を積分し出力する。本制御では、スピンドル1回転をサンプリング角 $\Delta\psi$ で $N$ 等分割し、離散値化した回転角を基準とした、繰返しコントローラを用いる。サンプリング角 $\Delta\psi$ の検出は、ACサーボモータ内蔵の、エンコーダパルスを利用した。

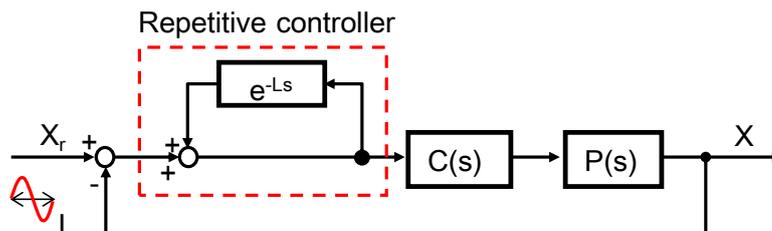


Fig. 3. 26 Block diagram of repetitive control system

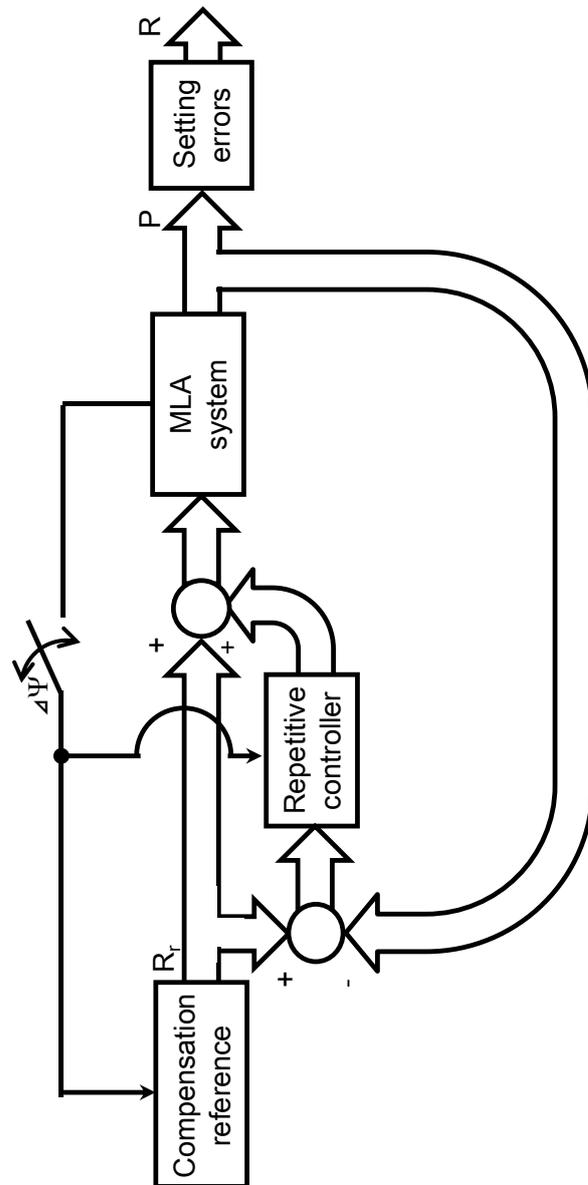


Fig. 3. 27 Block diagram of electrode runout compensation system with repetitive control

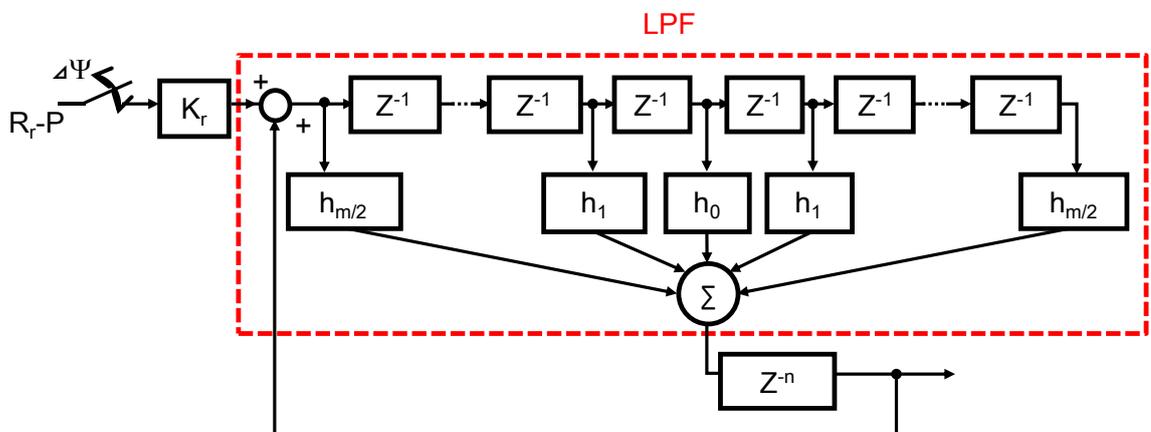


Fig. 3. 28 Detail of repetitive controller

図 3. 28 に、繰返し補償器のブロック線図を示す。補償器は、むだ時間要素と、ノイズ低減のための、直線位相型のローパスフィルタ  $F_L(z)$  および比例ゲイン  $K_r$  から構成される。係数  $h_k$  にハミング窓を使用した、ローパスフィルタ  $F_L(s)$  は式 (3. 11) で示される<sup>(93)</sup>。

$$F_L(z) = h_{m/2} + h_{m/2-1}z^{-1} + h_{m/2-2}z^{-2} + \dots + h_1z^{-(m/2-1)} + h_0z^{-m/2} + h_1z^{-(m/2+1)} + \dots + h_{m/2}z^{-m}$$

$$h_0 = \frac{\Delta T}{\pi} \omega \dots\dots\dots (3. 11)$$

$$h_k = \frac{1}{k\pi} \sin(k\Delta T\pi) \left\{ 0.54 + 0.46 \cos\left(\frac{2\pi k}{m}\right) \right\} \quad (k = 1, 2, 3, \dots, m/2)$$

ここで、

- $\Delta T$  : 繰返しコントローラのサンプリング周期
- $\omega$  : カットオフ周波数

であり、本研究では、 $\omega = 300 \times 2\pi \text{rad/s}$  とした。空間領域におけるサンプリング周期  $\Delta T$  は、以下の式 (3. 12) で決定される。

$$\Delta T = \frac{60}{n_r N} \dots\dots\dots (3. 12)$$

$n_r$  : スピンドル回転数

ただし、フィルタ  $F_L(z)$  の次数  $m$ 、フィルタ以外の遅延素子の数  $n$ 、遅れの段数  $N$  は、式 (3. 13) の関係を満たす必要がある。ここで、 $N$  の値は、スピンドル 1 回転あたりのエンコーダパルス数に等しい。

$$\frac{m}{2} + n = N \dots\dots\dots (3. 13)$$

ところで、モータの回転速度が  $n_m \text{rpm}$  のとき、1 秒間あたりにエンコーダから出力されるパルス数  $N_e (= 2/3N)$  は、式 (3. 14) で示される。

$$N_e = \frac{n_m}{60} \times \frac{360}{\Delta \Psi_m} \dots\dots\dots (3. 14)$$

ふれまわり補正を効果的に行うためには、 $N_e$  を大きくとり、モータ回転角度分解能  $\Delta \Psi_m$  を小さくすることが重要であるが、 $N_e$  の増加に伴い、DSP による、エンコーダパルス立ち上がりの読み取りが困難になる。そこで、電極回転速度

$n_r = 1,000\text{rpm}$  ( $n_m = 1,500\text{rpm}$ )にて、DSPシステムが、エンコーダパルスの立ち上がり認識可能な値として、 $N_e = 2,500$ を選択した。このとき、 $\Delta \Psi_m = 3.6^\circ$ であり、スピンドルの角度分解能  $\Delta \Psi$ は $2.4^\circ$ である。

フィルタ  $F_L(z)$ の急峻な遮断特性を得るためには、次数  $m$ を高くする必要があるが、DSPシステム内での演算量が増大する。そこで、DSPのサンプリング周期  $10\text{kHz}$ で制御系の演算処理が可能な次数として、 $m = 16$ を採用した。このとき、式 (3. 1 3) より、 $n$ の値は142となる。

### 3. 3. 4 ふれまわり補正実験

図3. 29は、繰返し制御の効果を確認するために、 $\phi 1$ の精密ピンゲージを用いて、ふれまわりX、Y軸方向成分について、回転数  $1,000\text{rpm}$ でふれまわり補正を行った結果である。繰返し制御を用いない場合、補正目標に対する、スピンドルの追従誤差によって、補正後のふれまわりが発生しているが、繰返し制御によって、より効果的にふれまわりが補正されていることが確認できる。また、本章において放電加工に使用するものと同じ、 $\phi 0.5$ のタングステン製円柱電極を使用し、 $50\text{rpm}$ から  $1,000\text{rpm}$ の回転速度において、ふれまわりを傾きおよび並進方向に同時補正した結果を、X、Y軸方向成分について図3. 30、 $\Theta$ 、 $\Phi$ 方向成分について図3. 31に示す。 $1,000\text{rpm}$ までの回転速度領域において、ふれまわりが抑制された。

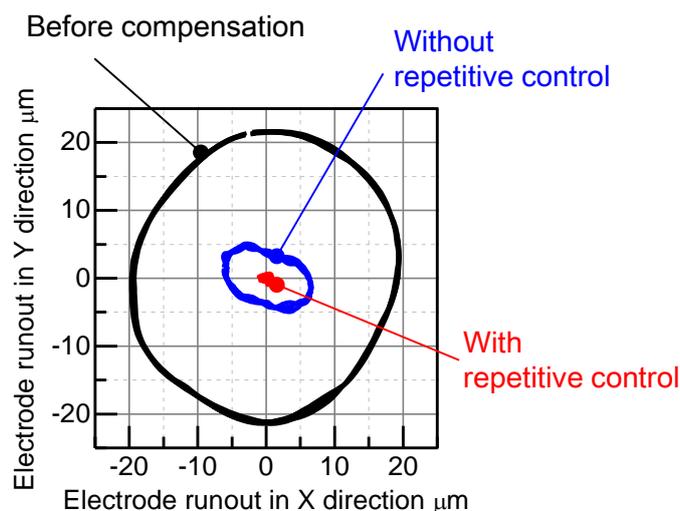


Fig. 3. 29 Runout of rotary electrode in radial direction

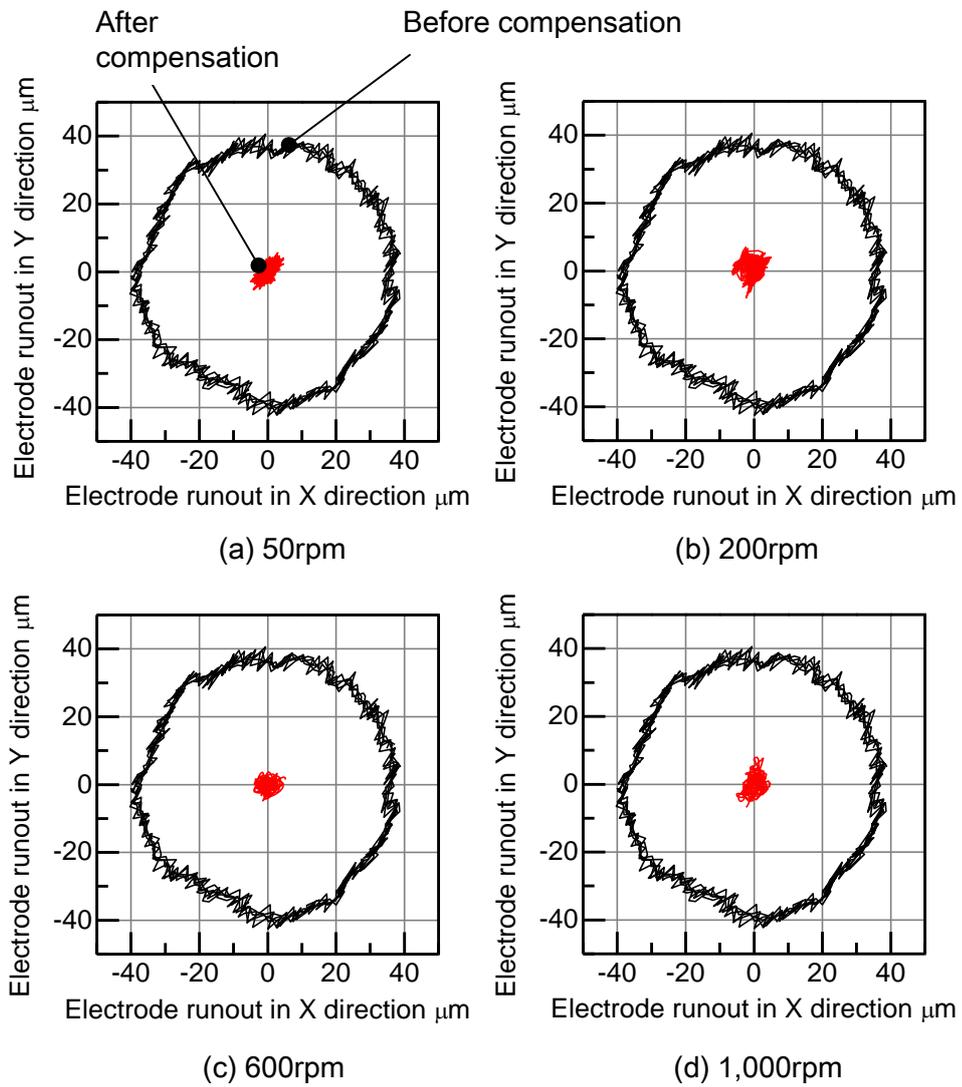


Fig. 3. 30 Runout of rotary electrode in X and Y directions

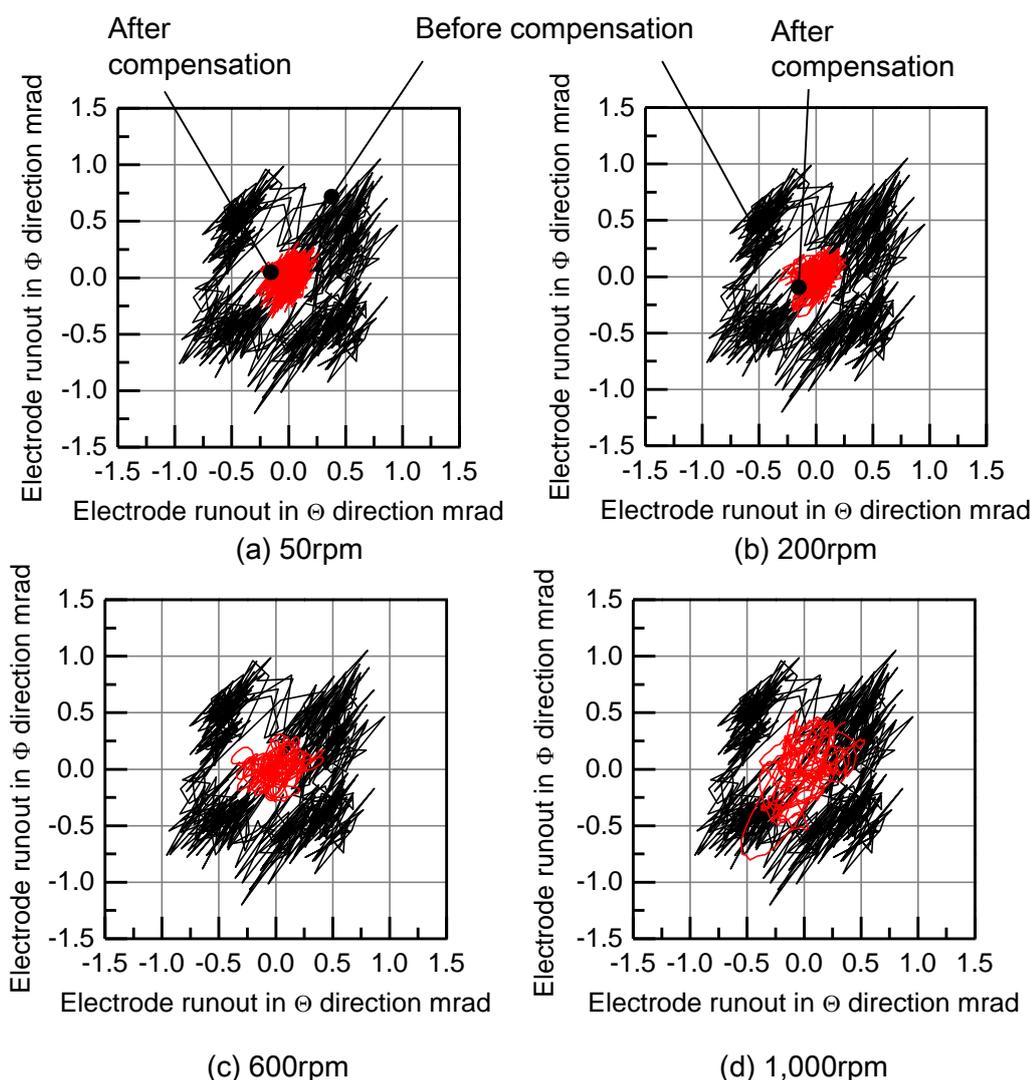


Fig. 3. 31 Runout of rotary electrode in  $\Theta$  and  $\Phi$  directions

### 3. 4 ふれまわり補正を用いた放電穴加工

#### 3. 4. 1 加工条件

提案したふれまわり補正方法を用いて、放電穴加工を実施した。放電加工制御システムは、第2章と同様に、ローカルアクチュエータと既存放電加工機を組み合わせ、Z 軸方向加工用の協調制御放電加工システムを使用した。加工方法は、加工物の貫通加工とした。電極は $\phi 0.5$ 、長さ 25mm の円柱型タングステンを用いた。電極回転速度は 1,000rpm であり、加工屑排出のためのジャンプ、揺動は行わない。加工物には、プリハードン鋼 (NAK-80)、加工液には、放電加工用油を使用した。加工電源は、既存放電加工機の RC 回路を使用し、開放電圧、抵抗値、コンデンサ容量をそれぞれ、120V、1.1k $\Omega$ 、0.01 $\mu$ F とした。

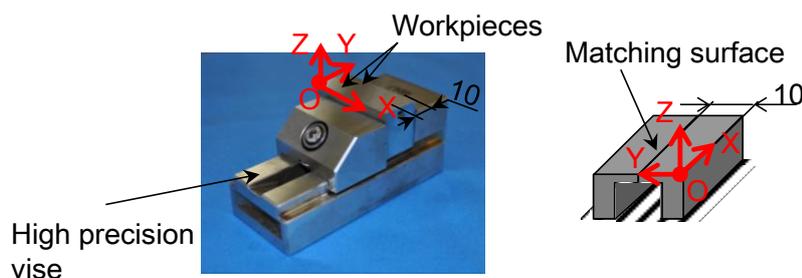


Fig. 3.32 Photograph and configuration of workpiece

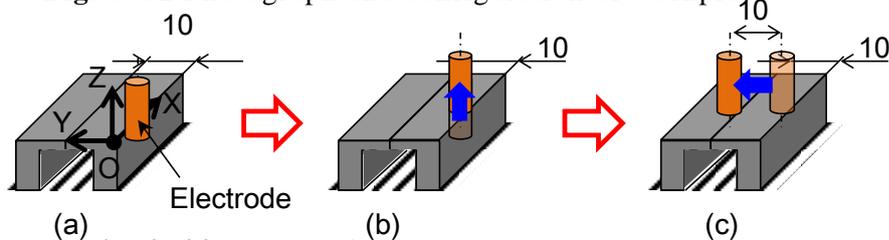


Fig. 3.33 Setting of initial machining position

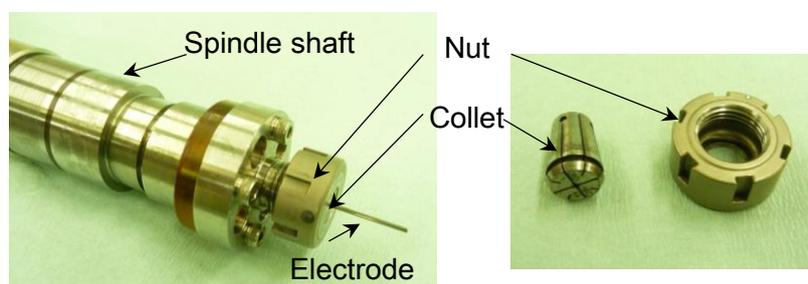


Fig. 3.34 Chucking tool and spindle shaft with electrode

図3.32に加工物の写真および概略図を示す。加工後、穴断面形状を観察するため、2枚の加工片を用い、加工穴側面に対して加工物を分割可能な加工物を製作した。加工物の製作手順は、次の通りである。まず、それぞれの加工片の合わせ面(YZ面)を、高精度に研削し、その後、研削面を対向させ、精密バイスを用いて固定した。次に、上面(XY面)を研削することによって、加工片合わせ面の段差を除去した。

穴断面形状を観察するためには、加工片合わせ面のY座標、電極の回転軸中心のY座標を一致するよう電極を位置決めし、加工を開始する必要がある。加工開始点の決定方法を、図3.33を用いて説明する。まず、既存放電加工機に搭載された、電極と加工物の接触検知機能を利用し、電極先端部側面が加工物側面に接触する点に、電極を位置決めする(図3.33(a))。次に、電極を垂直方向に引き上げた後(図3.33(b))、Y軸方向に、加工片の奥行寸法(10mm)だけ移動させる(図3.33(c))。この位置から、電極をZ軸方向に下降させ、加工物と接触する位置を加工開始点とした。電極は図3.34で示す、市販のコレット(NBC6, Big Daishowa Seiki Co., Ltd.)を用いて把持され、ナット(NBN6, Big Daishowa Seiki Co., Ltd.)により、スピンドルに取り付けた。取り付け時は、誤差を軽減あるいは加重するような操作は特別に行わず、スピンドルに固定した。

### 3.4.2 加工穴形状

図3.35に、デジタルマイクロスコープ（VHX-1000, Keyence Corp.）によって撮影した、加工穴入口の写真を示す。ふれまわりの補正により、加工穴直径が  $674\mu\text{m}$  から  $600\mu\text{m}$  へ縮小した。図3.36は、加工穴の断面写真である。いずれの場合も、入口直径に対して、出口直径が縮小した。これは、放電によって、電極先端が消耗することが主な原因であると考えられる。加工穴入口と出口の直径を図3.37に示す。ふれまわり補正を行う場合、出入口の直径差の2サンプルにおける平均値は、 $86\mu\text{m}$ （ふれまわり補正未適用）、 $98\mu\text{m}$ （ふれまわり補正適用）と、補正により拡大し、断面のテーパ角が大きくなる傾向が確認された。

この理由について考察する。図3.38は、電極が加工物を貫通する時の穴断面を示した概念図である。図3.38(a)では、電極のふれまわりによって、電極が半径および傾き方向に振動し、加工液が攪拌されるため、加工穴底面部に滞留した加工屑が、穴側面へと移動する。このとき、加工屑を介した放電が、加工穴側面で発生し、出口の直径が拡大したものと考えられる。一方、図3.38(b)では、ふれまわり補正の適用により、電極の振動が抑制され、加工液の攪拌作用が低下する。このため、加工屑は加工穴底面から移動しないまま滞留し、ふれまわり補正を適用しない場合で発生する側面放電の頻度は低下する。以上の理由から、ふれまわり補正により、加工穴断面のテーパ角は拡大したと考えられる。このようなテーパ角の補正については、次節で検討する。

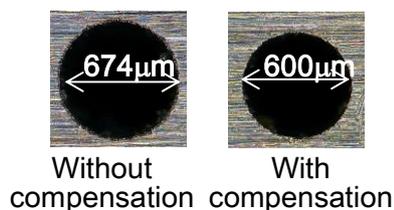


Fig 3.35 Photographs of machined hole (entrance)

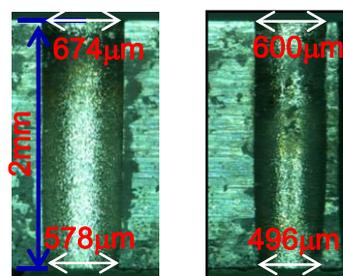


Fig 3.36 Photographs of machined hole (cross section)

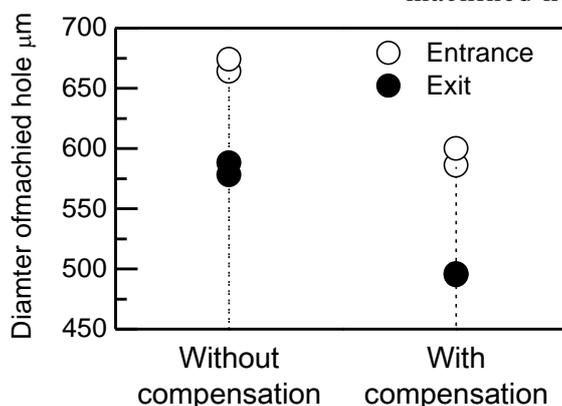


Fig 3.37 Diameter of machined hole

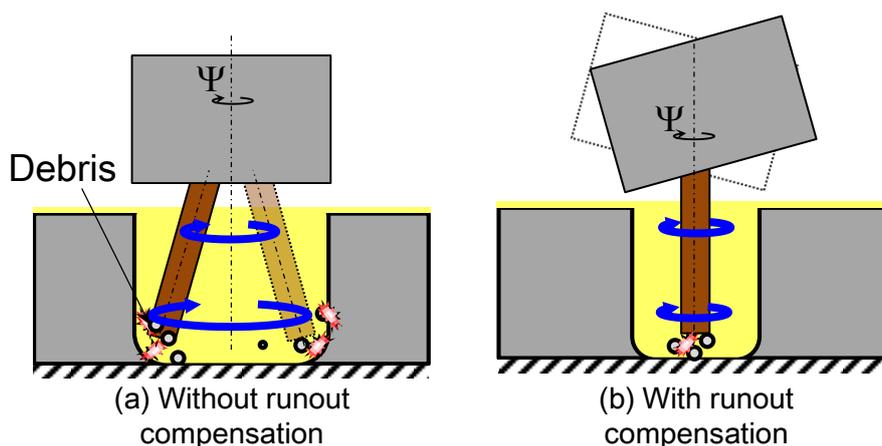


Fig 3. 38 Cross section of machined holes at penetrating workpiece

### 3. 4. 3 電極の送り波形, 極間電圧と加工速度

図3. 39に, 加工中の放電加工機 Z 軸ステージの送り量を示す. 加工開始直後は, 補正を行う場合, 送り速度が大きい. ふれまわり補正により, 加工穴径が縮小し, 径方向の加工物除去体積が減少する分, 加工方向(Z 軸方向)に対して, 加工物が多く除去されたことが主な原因であると考えられる. しかしながら, 加工穴深さが増加するに従い, 補正適用により, 送り速度は低下した. 一方, ふれまわりを補正しない場合, 貫通まで, 送り速度の低下は確認できなかった.

図3. 40に, 加工開始から 1,200 秒経過後のフィードバック電圧, 図3. 41に磁気浮上アクチュエータによる電極の送り量を示す. ふれまわり補正を行う加工では, 短絡, 開放状態が発生し, 電極が軸方向に, 低周波数で振動していることが確認できる. 一方, ふれまわりを補正しない場合, 放電状態は良好であり, 電極振動は発生していない. これは, 前項で説明した通り, 電極のふれまわりによって, 加工液が攪拌され, 加工屑の排出性が改善されたことによると考えられる.

図3. 42に, 加工穴深さと貫通までの加工時間の比で定義した加工速度を示す. 2サンプルの平均値は,  $1.18\mu\text{m/s}$  (ふれまわり補正なし),  $0.58\mu\text{m/s}$  (ふれまわり補正あり) となり, ふれまわり補正なしが良好な結果を示した. 本章で検討した穴加工の高精度および高速化を両立させるには, ふれまわり補正と加工屑排出のための軸方向ジャンプを併用するなどが必要であると考えられる.

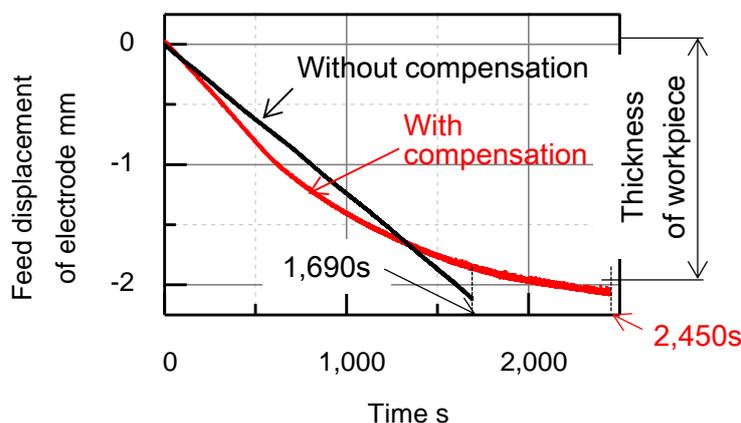


Fig. 3. 39 Feed displacement of electrode

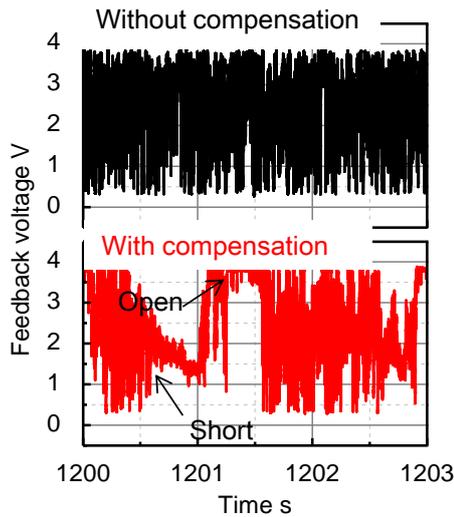


Fig 3. 40 Feedback voltage

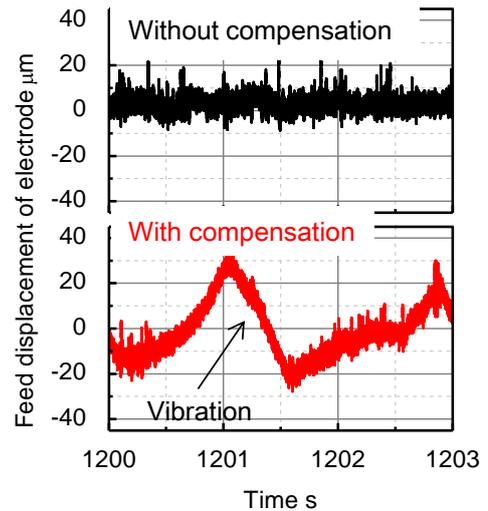


Fig 3. 41 Feed displacement of electrode

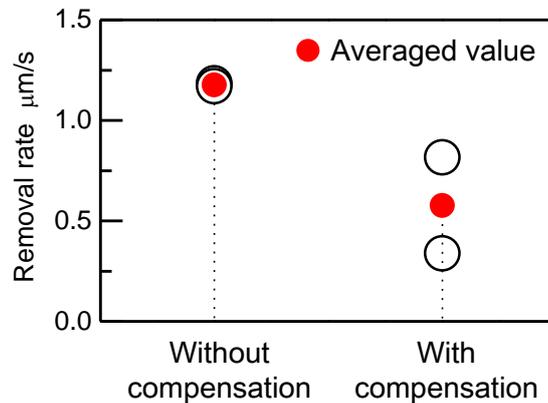


Fig 3. 42 Removal rate

### 3. 4. 4 電極消耗

図3. 43は加工前後における電極先端形状の写真である。ふれまわり補正を行わない場合の電極は、先端部分の消耗が激しい。また、電極の片側側面に、材料の溶解した痕が確認される。これは、図3. 44に示すように、ふれまわりが生じる場合、回転によって、側面の片側のみ極間距離が小さくなり、放電が発生するためであると考えられる。一方、補正を行う場合、先端部の先細りは、補正を行わない場合ほど、顕著ではなかった。

図3. 45に、軸方向の電極消耗長さと加工穴深さの比で定義した、電極消耗率を示す。電極消耗率は、6.1%（ふれまわり補正なし）、10.6%（ふれまわり補正あり）となり、ふれまわり補正によって増加した。これは加工屑排出性の低下による、異常放電、加工時間の増加が寄与していると考えられる。

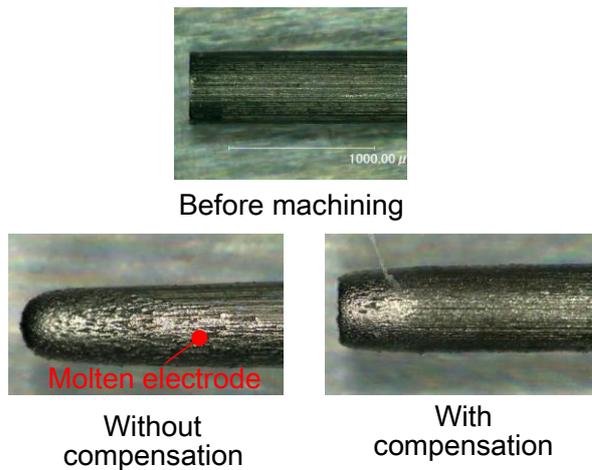


Fig 3. 43 Tip of electrodes after EDM

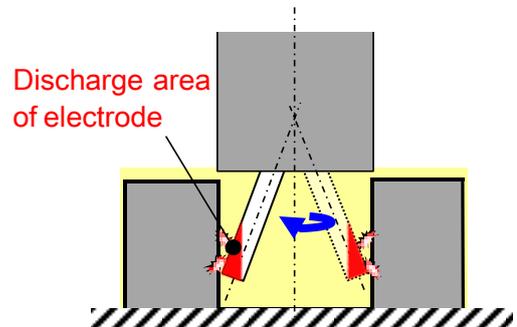


Fig 3. 44 Discharge area of runout electrode

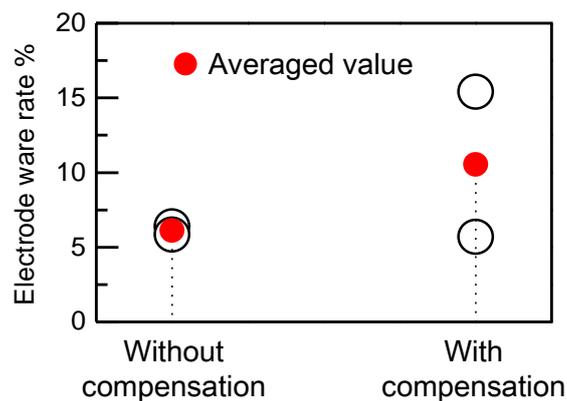


Fig 3. 45 Electrode wear rate

### 3.5 テーパー形状補正のための加工方法

#### 3.5.1 テーパー形状補正のための電極駆動方法

前節では、加工穴入口と出口に直径差が生じ、断面がテーパー状になることが課題として残った。これは、電極先端が放電によって消耗し、底面側の加工穴直径が縮小すること、加工穴入口部では、加工層を介した側面放電発生した場合、径方向に材料が除去され、直径が拡大されることが主たる原因である<sup>(22)</sup>。本節では、回転電極を図3.46のように並進および傾き方向に駆動し、出口部直径を拡大することによって、テーパー状の穴形状を補正する方法(テーパー形状補正)を提案し、本手法を利用した垂直穴放電加工を実施した。

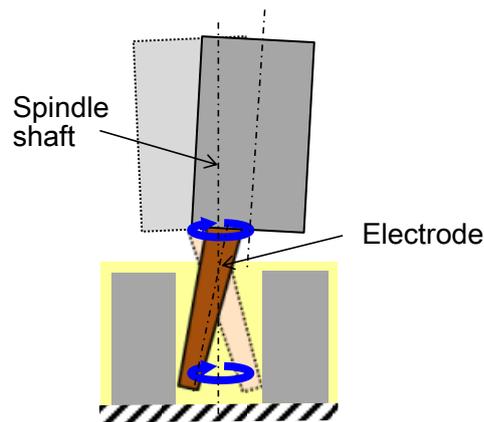


Fig 3. 46 Configuration of taper hole compensation

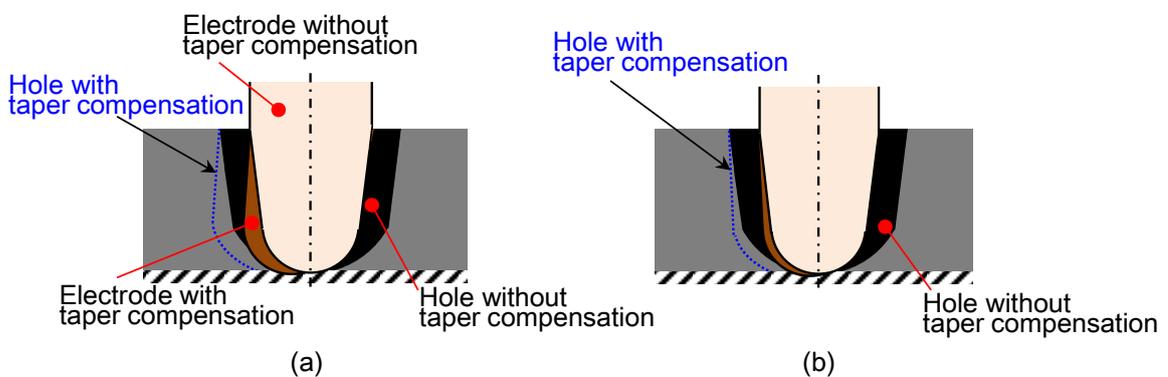


Fig 3. 47 Cross section of machined hole with taper shape compensation

電極の位置・姿勢の  $X$ ,  $\Theta$  軸方向目標値について説明する。  $Y$ ,  $\Phi$  軸についても同様である。テーパ形状補正では、加工穴出口の直径を拡大するため、電極先端部の半径方向ふれまわりが増加させる一方で、加工穴入口の直径には影響を与えないよう、電極を駆動することによって実施する。図3. 47に補正を適用した場合の穴断面の概略図を示す。側面の放電ギャップは一定であると仮定すると、径方向の補正量だけ、直径は拡大すると考えられる。図3. 47(a)のように、補正量が一定値を超えると、加工穴断面は逆テーパ状になる。このような場合、加工中、放電によって消耗した電極形状を考慮し、補正量を決定することが重要である。一方、本章で検討する補正では、図3. 47(b)のように、アクチュエータの位置決め範囲の限界から、逆テーパ穴形状が発生することはないと考えられる。このため、消耗による電極形状は考慮せず、テーパ形状補正を実施した。

スピンドルの姿勢(傾き)目標値として、本節ではふれまわり補正する前の、回転電極 $\Theta$ 軸方向ふれまわり  $R_{0\theta}(\Psi)$  を正弦波近似し、その位相を  $180^\circ$  反転させたものを利用した。これを  $R_{0\theta}(\Psi)$  と定義する。テーパ形状補正において、スピンドル  $X$  軸方向の位置決め目標  $R_x(\Psi)$  は、上述したスピンドル $\Theta$ 軸方向目標値  $R_{0\theta}(\Psi)$  を用いて、スピンドルを駆動することによって発生する、加工穴入口における電極  $X$  軸方向ふれまわりを相殺するように決定する。具体的には、ス

ピンドル重心から電極取り付け部までの距離を  $L_G$ 、電極取り付け部から加工穴入口までの電極長さを  $L_e$ 、電極の初期取り付け誤差によって発生する回転電極の X および  $\Theta$  軸方向ふれまわり  $R_{0x}(\Psi)$ 、 $R_{0\theta}(\Psi)$ を用いて、式(3. 15)で示される。

$$R_x(\Psi)' = (L_G + L_e)R_{0\theta}(\Psi)' + L_e R_{0\theta}(\Psi) + R_{0x}(\Psi) \dots\dots\dots (3. 15)$$

以上より、テーパ補正のための、4自由度方向スピンドル位置・姿勢目標を  $R_{it}(\Psi)$ とすると、式(3. 16)のようになる。

$$R_{it}(\Psi) = \begin{bmatrix} (L_G + L_e)R_{0\theta}(\Psi)' + L_e R_{0\theta}(\Psi) + R_{0x}(\Psi) \\ (L_G + L_e)R_{0\phi}(\Psi)' + L_e R_{0\phi}(\Psi) + R_{0y}(\Psi) \\ R_{0\theta}(\Psi)' \\ R_{0\phi}(\Psi)' \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3. 16)$$

図3. 48に、非加工時において、ローカルアクチュエータシステムに、式(3. 16)の位置決め目標値を入力したときの、電極先端部の径方向の軌跡を示す。補正時の回転速度は 1,000rpm である。出入り口の直径差は、テーパ形状補正によって、10 $\mu\text{m}$  程度減少すると予想される。前節において、加工穴出入り口間における直径差は 104 $\mu\text{m}$  であり、図3. 48に示す電極運動では、補正量が不十分であるが、提案したスピンドル運動を用いたテーパ補正の有効性を検証するため、穴加工を実施した。

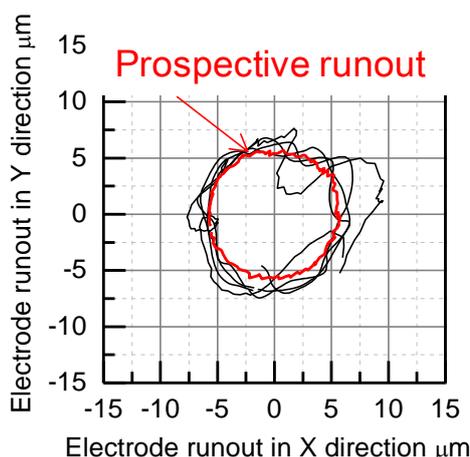


Fig 3. 48 Electrode runout at the tip of electrode during taper compensation

### 3. 5. 2 テーパ形状補正を用いた放電穴加工

テーパ形状は、先端が消耗した電極が加工物に転写されることによって発生するため、穴直径の縮小は加工穴出口付近で顕著である。テーパ形状補正は加工物貫通直前に実施すること

が有効であると考えられるため、図3.49に示す手順で実施した。加工開始から電極の送り量が、一定量に達するまでは、前節までと同様に、ふれまわり補正を利用し、垂直放電穴加工を実施する(ステップ1)。一方で、放電加工機 Z 軸ステージの送り量が一定量を超えると、加工穴の直径が出口部では拡大、入口部では変化しないよう、スピンドルを並進および傾き方向に駆動する(ステップ2)。

前節と同様に、電極は直径 $\phi 0.5\text{mm}$  のタングステン製円柱型電極を使用し、油加工液中での板厚  $2\text{mm}$  のプリハードン鋼の貫通加工を行った。電極の長さは  $25\text{mm}$  とし、スピンドル重心から電極取り付け部までの距離  $L_G$ 、貫通時の電極取り付け部から加工穴入口までの電極長さ  $L_e$  は、加工穴深さである  $2\text{mm}$  を電極長さ  $25\text{mm}$  差しから引いた、 $23\text{mm}$  とした。加工電源は、RC 電源であり、開放電圧、抵抗値、コンデンサ容量をそれぞれ、 $120\text{V}$ 、 $1.1\text{k}\Omega$ 、 $0.01\mu\text{F}$  とした。電極の加工方向位置決めには、協調制御放電加工システムを用いた。加工開始から、既存の放電加工機の Z 軸ステージの送り量が  $1.8\text{mm}$  を超えるまでは、前節と同様に、ふれまわりを補正した加工を行い、送り量が  $1.8\text{mm}$  を超えた時点で、テーパ補正を開始した。以下では、テーパ形状補正を用いた加工方法を、加工方法1とし、比較のため、加工開始から加工物の貫通まで、ふれまわり補正のみを適用する加工方法を、加工方法2とする。

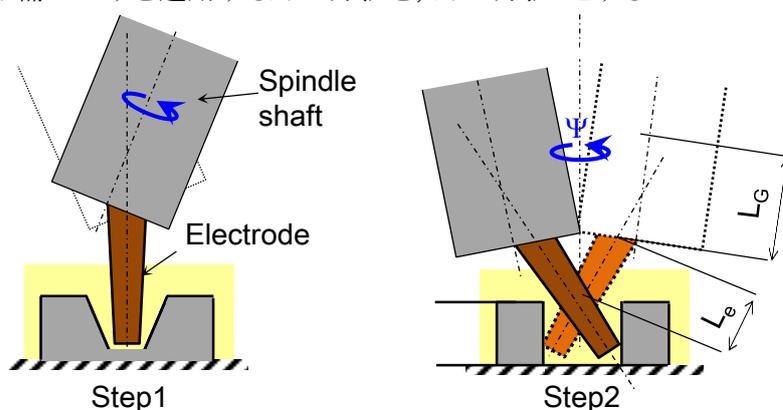


Fig 3. 49 Machining method for taper hole compensation

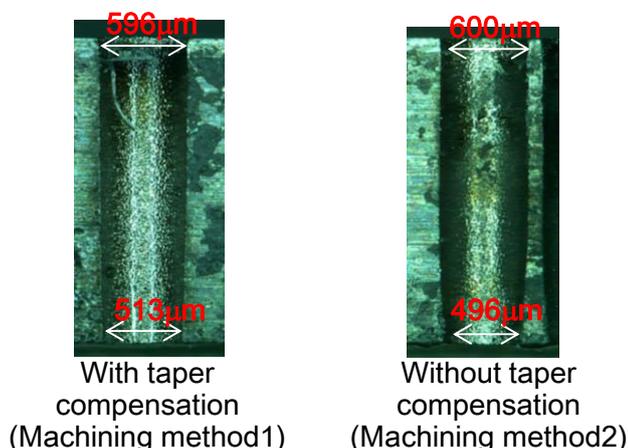


Fig 3. 50 Cross section of machined holes

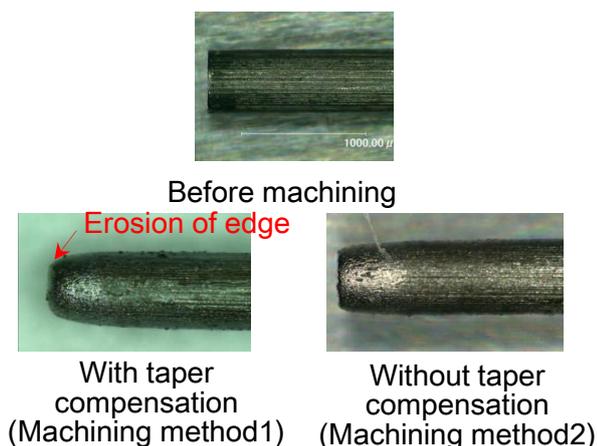


Fig 3. 51 Tip of electrodes after EDM

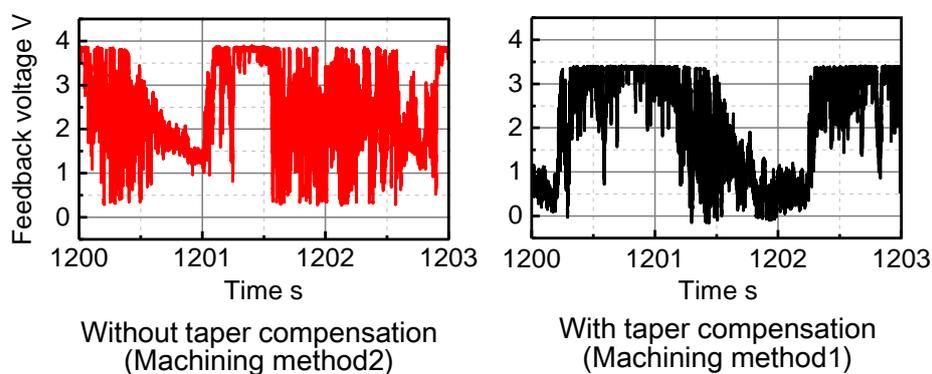


Fig 3. 52 Feedback voltage

図3. 50に、加工穴断面の写真を示す。加工方法1による入口直径は、予想通り、加工方法2における入口の直径と比べ、その差は  $4\mu\text{m}$  と、ほぼ同等である。一方、加工方法2と比較して、加工方法1による入口直径は、 $17\mu\text{m}$  の差が発生している。

出入口の直径差は、ふれまわり補正のみ行う加工方法2の  $104\mu\text{m}$  から、加工方法1の場合  $83\mu\text{m}$  へ改善された。加工方法1における、電極先端部の補正量  $10\mu\text{m}$  から予測される直径差は  $94\mu\text{m}$  であり、予測値よりテーパ形状が改善されたことになる。この原因として、ふれまわりにより加工穴底面部の加工屑が側面へ移動し、加工屑を介した加工穴の側面放電が増加したことが考えられる。ただし、テーパ形状の補正効果は不十分であり、本手法を、より広範囲に電極の駆動が可能な位置決め機構に対して適用することが望ましいと考えられる。

図3. 51右下は、テーパ形状補正を適用した加工後の電極先端部の写真である。比較のため、加工前(上)、および、加工物の貫通までふれまわり補正を適用した電極先端部(加工方法2、右下)の写真も合わせて示す。電極の先端角部の消耗は、ふれまわり補正のみ適用する場合と比較し顕著となった。この理由について考察する。テーパ形状補正では、電極先端部のふ

れまわりにより、加工穴底部では、側面の極間距離が減少する。このため、電極先端部において放電の頻度増加する。また、前述したような、加工屑の攪拌と、加工屑を介した側面放電の影響も、一因として考えられる。

図3.52に、加工方法1において、テーパ形状補正を適用する前後における、フィードバック電圧を示す。テーパ形状補正を適用した、加工方法1においても、短絡、開放状態が確認されており、放電波形からは、加工方法1, 2の間の電圧波形において、明確な差異は確認されなかった。図3.53に、電極の加工方向送り波形を示す。比較のため、ふれまわり補正のみを適用した加工(加工方法2)における送り波形を合わせて示す。テーパ形状補正(加工方法1)の加工プロセスでは、電極送り量が 1.8mm までは、ふれまわり補正(加工方法2)と同様の電極駆動を行うため、両波形から大きな違いは確認できなかった。一方、テーパ補正を適用する、送り量 1.8mm 以降では、ふれまわり補正を実施する場合と比較して、送り速度に改善がみられた。これは、電極先端部を積極的に振動させることによって、加工液が攪拌されたことによると考えられる。貫通時間に様子した加工時間は、ふれまわり補正のみ、テーパ形状補正の併用で、2,450 秒、2,190 秒となった。また、図3.54は、加工方法1において、テーパ形状補正を適用する前後における、スピンドルの並進(X, Y)および傾き方向( $\Theta$ ,  $\Phi$ )の位置・姿勢である。

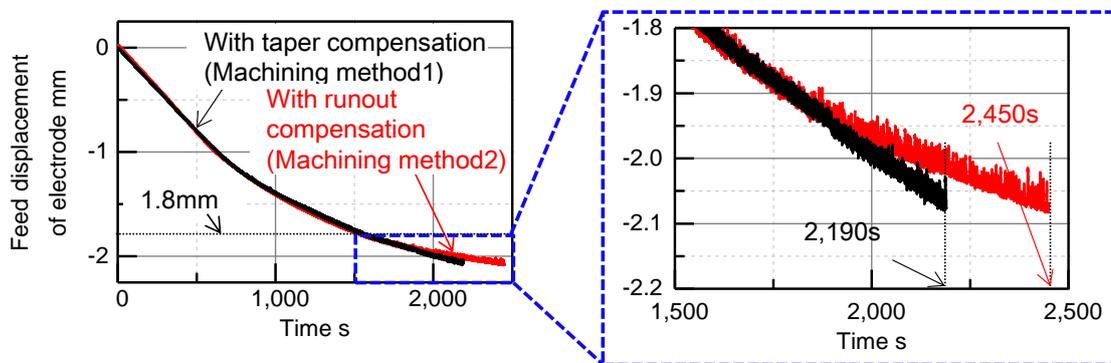


Fig. 3.53 Feed displacement of electrode

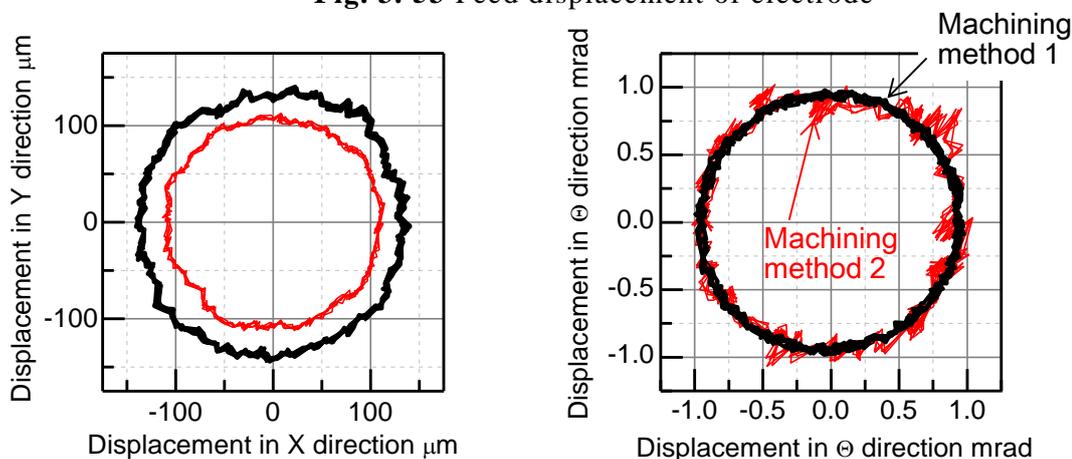


Fig. 3.54 Displacement of spindle shaft during taper compensation

## 3.6 結 言

本章では、放電穴加工の高精度化を目的として、磁気浮上ローカルアクチュエータによる、電極多自由度駆動を用い、加工前に電極の取り付け誤差を計測し、これが低減されるように、積極的にスピンドルの位置・姿勢の制御を行う、回転電極のふれまわり補正方法、および加工穴テーパ角の補正方法を提案した。また、提案した手法を用いて、垂直穴加工を実施した。本章で得られた結果を以下に示す。

- ふれまわり補正方法の原理検証実験では、50rpm から 1,000rpm までの回転領域において、並進方向では 100 $\mu\text{m}$  のふれまわりを数 $\mu\text{m}$ 、傾き方向では 2mrad のふれまわりを半分程度まで低減することに成功した。
- $\phi 0.5\text{mm}$  の電極を使用した、深さ 2mm の垂直穴放電加工では、ふれまわり補正によって、加工穴直径が 670 $\mu\text{m}$  から 593 $\mu\text{m}$  に縮小した。
- テーパ穴補正を適用した放電穴加工では、加工穴出入り口における、直径の差分が 104 $\mu\text{m}$  から 84 $\mu\text{m}$  へ改善された。

前章、および本章では、高応答・多自由度ローカルアクチュエータを用いた放電穴加工の高速・高精度化について、検討を行った。次章では、形彫り放電加工の仕上げ加工高速化に対して、磁気駆動ローカルアクチュエータを用いた有効性の検討を行う。

## 第4章 高応答多自由度電極駆動による

# 形彫り放電加工における仕上げ加工の高速化

### 4.1 緒言

第3章では、放電穴加工の高精度化のため、スピンドルへの電極取り付け誤差に起因して発生する、回転電極のふれまわり補正方法を提案し、放電穴加工を実施した。また、電極の消耗によって発生する、テーパ状加工穴断面を、電極多自由度駆動により修正する方法を用いた垂直穴加工を実施した。本章では、形彫り放電加工に着目し、仕上げ加工の高速化実現を目的とする。

仕上げ加工は、粗加工と比較して極間距離が狭く、加工屑の排出性が低下するため、厳しい条件のもとで実施されることになる。本章では、はじめに、第2章で用いた、5自由度制御型磁気浮上ローカルアクチュエータを用い、既存の放電加工機では実現不可能な、電極の数十 Hz 以上の高周波揺動、数百 Hz の高周波微小振動(ディザ)、高速ジャンプ、周波数帯域 200Hz 以上の極間距離調整を、単独あるいは複合的に付加させた放電加工を行う。次に、揺動のパラメータと加工速度の関係を調査するため、揺動の周波数、直径をそれぞれ 1~300Hz、5~20 $\mu$ m の範囲で変化させ、高速化に適した揺動パラメータを検討する。最後に、より実用的な条件での仕上げ加工高速化のため、電極を軸方向に回転拘束可能で構造が簡易な、2軸制御型高応答ローカルアクチュエータと汎用的な形彫り放電加工プログラムを適用した、放電加工を行う。

### 4.2 仕上げ加工高速化のための電極駆動方法

形彫り放電加工では、加工中に発生する加工屑の速やかな排出が重要である。仕上げ加工では、放電エネルギーが絞られるため、極間距離が小さくなる。このため、放電ギャップ内に加工屑が滞留しやすくなる。また、狭い放電ギャップにおいて、放電状態を維持するためには、粗加工と比較し、より高精度に極間距離を微調整する必要がある。

本章では、形彫り放電加工における、仕上げ加工高速化の実現のため、5自由度制御型ローカルアクチュエータを用いた検討を行った。具体的には、円柱型の電極を利用した

放電加工において、第2章で利用した、極間電圧に基づいたZ軸方向高応答・高精度位置決め、Z軸方向高速ジャンプ、X、Y軸方向高速円揺動を行う。ところで、形彫り放電加工では、径方向に電極を駆動すると、転写される加工形状がくずれる恐れがある。そこで、加工形状に影響を与えない新たな駆動法として、加工方向(Z軸方向)に、電極を振幅数マイクロメートル、周波数数百ヘルツで強制的に振動させる駆動法(ディザ)を新たに導入し、これらの電極駆動を単独あるいは同時に組み合わせた加工方法において、加工速度に対する効果を調査した。

### 4.3 放電加工制御システム

#### 4.3.1 放電加工制御システム

放電加工実験は、第2章で使用した5自由度制御型ローカルアクチュエータを用いた。ローカルアクチュエータシステムのハードウェア構成、スピンドル位置、姿勢のフィードバック制御方法、およびその制御パラメータは変更していない。ただし、今回検討する放電加工では、加工深さが、数十マイクロメートルであり、ローカルアクチュエータZ軸方向の位置決め範囲2mmに対して十分小さいため、協調制御放電加工システムは用いず、ローカルアクチュエータ単体を使用した、電極位置決めを行った。

図4.1に、Z軸方向に加工を行うための、放電加工制御システムのブロック線図を示す。本加工制御システムは、放電加工用のPIコントローラが、フィードバック電圧 $V_{fb}$ と目標値電圧 $V_r$ の偏差をもとに、電極の加工方向位置目標 $Z_r$ を生成し、 $Z_r$ はローカルアクチュエータの位置決め制御システムに入力される。極間距離はローカルアクチュエータ単体によって調整される。

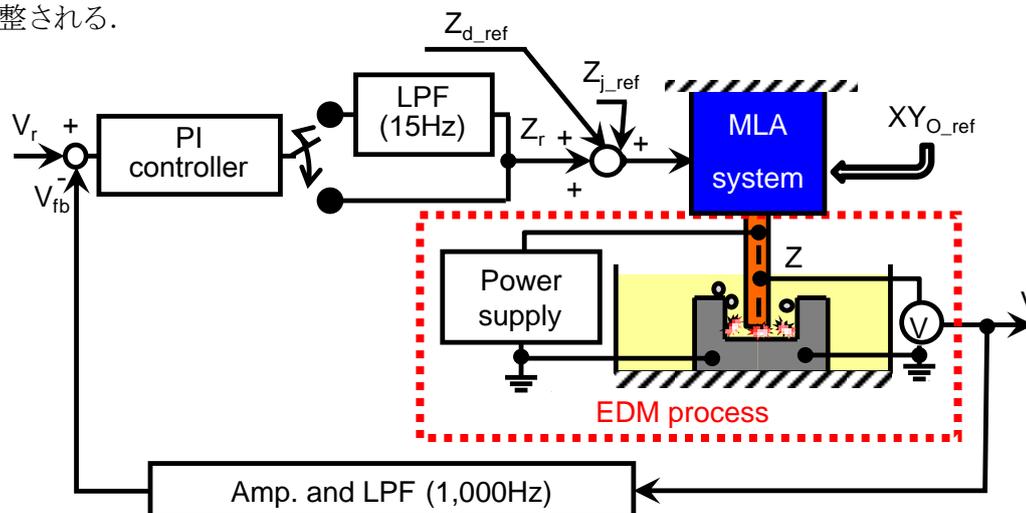


Fig. 4. 1 Block diagram of EDM control system to machine in Z direction

## 第4章 高応答多自由度電極駆動による形彫り放電加工における仕上げ加工の高速化

ブロック線図中，放電加工用コントローラとローカルアクチュエータシステム間に挿入されたローパスフィルタ(カットオフ周波数15Hz)は，既存形彫り放電加工機を用いた加工を模擬することを目的とし，加工方向の電極応答性を制限するために用いた．図中， $Z_{j\_ref}$ ， $XY_{o\_ref}$ および $Z_{d\_ref}$ は，それぞれ，ジャンプ，円揺動およびディザの目標値である．

### 4.3.2 ディザ信号の生成方法

本節では，ディザの信号生成方法および電極駆動方法について説明する．ディザの電極位置決め目標 $Z_{d\_ref}$ は，式(4.1)で示す正弦波とした．

$$Z_{d\_ref} = A_{d\_ref} \sin 2\pi f_d t \dots\dots\dots (4.1)$$

ここで， $f_d$ はディザ周波数である．高周波領域では，目標振幅に対して，実振幅が減少するため， $A_{d\_ref}$ は，スピンドルZ軸方向のゲイン特性を考慮し，所望の振幅 $A_d$ が得られるように設定された．

ところで，ディザは，加工方向に対して，極間電圧の情報に基づく，電極駆動とは独立して重畳される．したがって，図4.2のように，極間距離 $g_e$ が，片側実振幅 $A_d$ 以下の状況でディザを実施する場合，電極が加工物に接触あるいは衝突し，電極の変形や破損が発生する恐れがある．電極と加工物の衝突を避けるため，極間距離 $g_e$ を考慮したディザ方法について説明する．

図4.3に，本手法のフローチャートを示す．DSPシステムのサンプリング時間を $\Delta t$ として，加工開始から*i*回目にサンプリングされた，Z軸方向スピンドル位置を $Z(i \Delta t)$ とする．また， $Z(0)$ ， $Z(\Delta t)$ ， $Z(2 \Delta t)$ ， $\dots$ ， $Z(i \Delta t)$ の最小値を， $Z_{min}(i \Delta t)$ と定義し，これを電極が加工物に接触した位置と仮定する． $Z_{min}(i \Delta t)$ は，次のようにして決定された．まず， $Z(0)=Z_{min}(0)=0$ とする．加工中， $Z(i \Delta t)$ および，1サンプリング前までの， $Z_{min}((i-1) \Delta t)$ は，リアルタイムで比較され，式(4.2)のとおり，*i*サンプリング目における $Z_{min}(i \Delta t)$ が更新される．

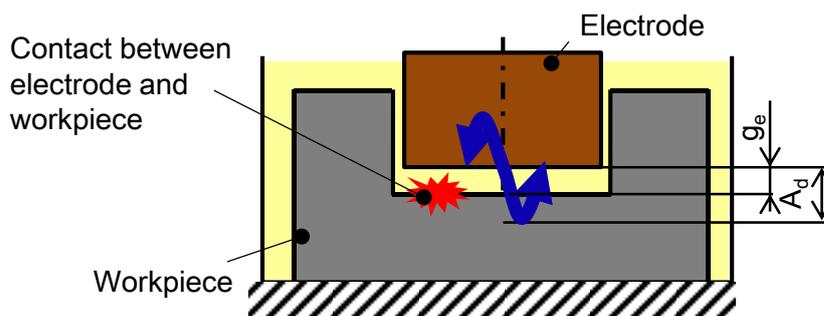


Fig. 4.2 Contact between electrode and workpiece

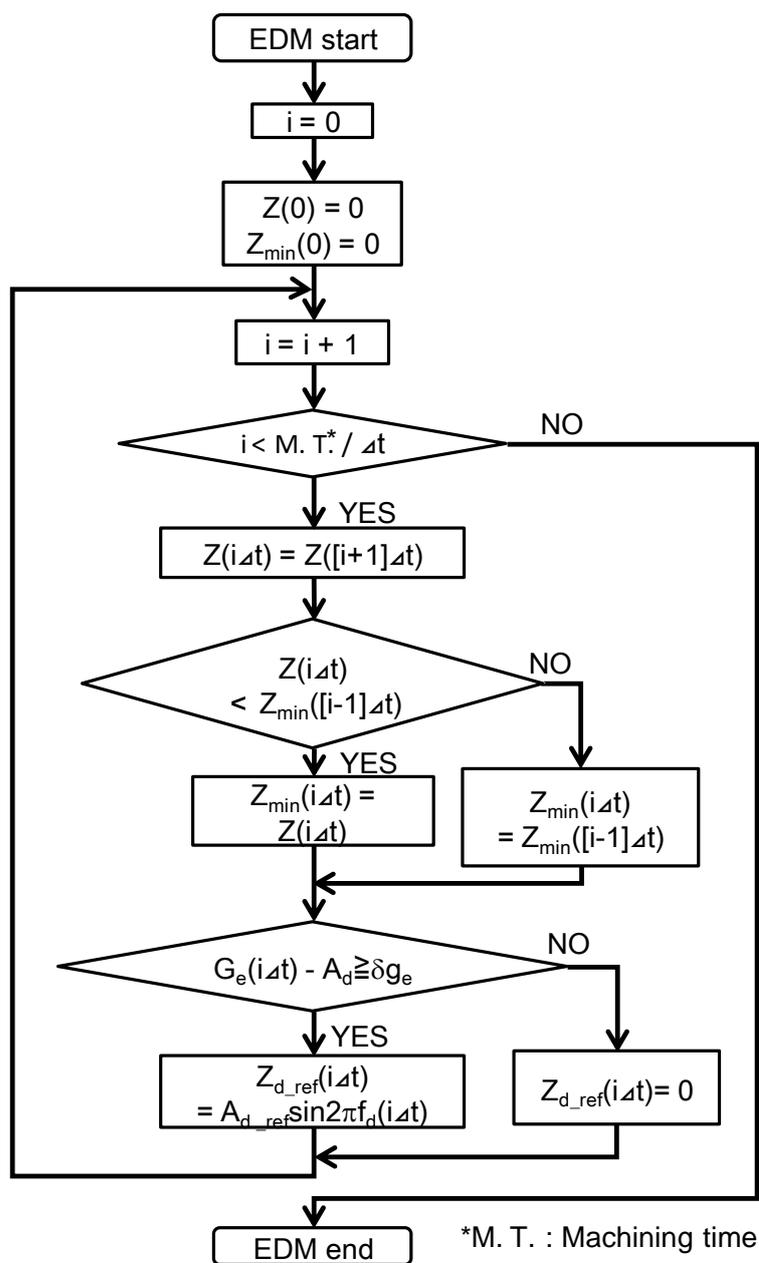


Fig. 4. 3 Flow chart of dither1

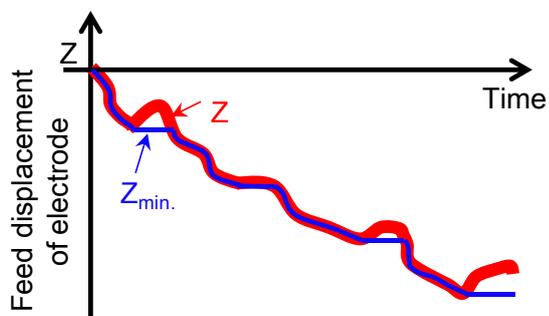


Fig. 4. 4 Configuration of Z and Z<sub>min</sub>

#### 第4章 高応答多自由度電極駆動による形彫り放電加工における仕上げ加工の高速化

$$\begin{array}{ll}
 \text{if} & Z(i\Delta t) \leq Z_{\min}((1-i)\Delta t) \\
 \text{then} & Z_{\min}(i\Delta t) = Z(i\Delta t) \\
 \text{else} & Z_{\min}(i\Delta t) = Z_{\min}((1-i)\Delta t)
 \end{array} \dots\dots\dots (4.2)$$

$i = 1, 2, 3, \dots\dots$

$Z(i\Delta t)$ と $Z_{\min}(i\Delta t)$ の関係は、図4.4のように示される。

時刻 $i\Delta t$ における極間距離 $g_e(i\Delta t)$ は、 $Z(i\Delta t)$ および $Z_{\min}(i\Delta t)$ を用いて、式(4.3)で表わされる。

$$g_e(i\Delta t) = Z(i\Delta t) - Z_{\min}(i\Delta t) \dots\dots\dots (4.3)$$

ディザ目標 $Z_{d\_ref}$ は、式(4.4)のように、極間距離 $g_e$ とディザ片側実振幅 $A_d$ の差が、閾値 $\delta G_e$ 以上となる場合、ローカルアクチュエータシステムに入力される。ただし、 $\delta g_e$ は、Z軸方向変位計測用センサのノイズ程度の大きさとした。

$$g_e(i\Delta t) - A_d \geq \delta g_e \dots\dots\dots (4.4)$$

以上、極間距離 $g_e$ の大きさによって、ディザの実施を判断する電極駆動法を、ディザ1とした。

ところで、ディザによって、極間距離 $g_e$ が変動するため、放電状態は変化する。安定な放電状態下で実施されるディザは、放電状態悪化の要因となる可能性がある。そこで、本研究では、極間距離 $g_e$ に加え、フィードバック電圧 $V_{fb}$ の情報に基づき、ディザを実施する方法を提案する。図4.5は、極間距離 $g_e$ に基づくディザ1に、さらに、極間電圧が短絡状態であることを実施条件として追加した電極駆動方法のフローチャート図である。本手法では、フィードバック電圧 $V_{fb}$ が、式(4.5)のように、基準電圧値 $V_d$ 以下となる場合、短絡状態であると判断し、ディザを実施する。

$$V_{fb} \leq V_d \dots\dots\dots (4.5)$$

極間距離  $g_e$  およびフィードバック電圧  $V_{fb}$  からディザ実施を判断する方法を、ディザ2とした。

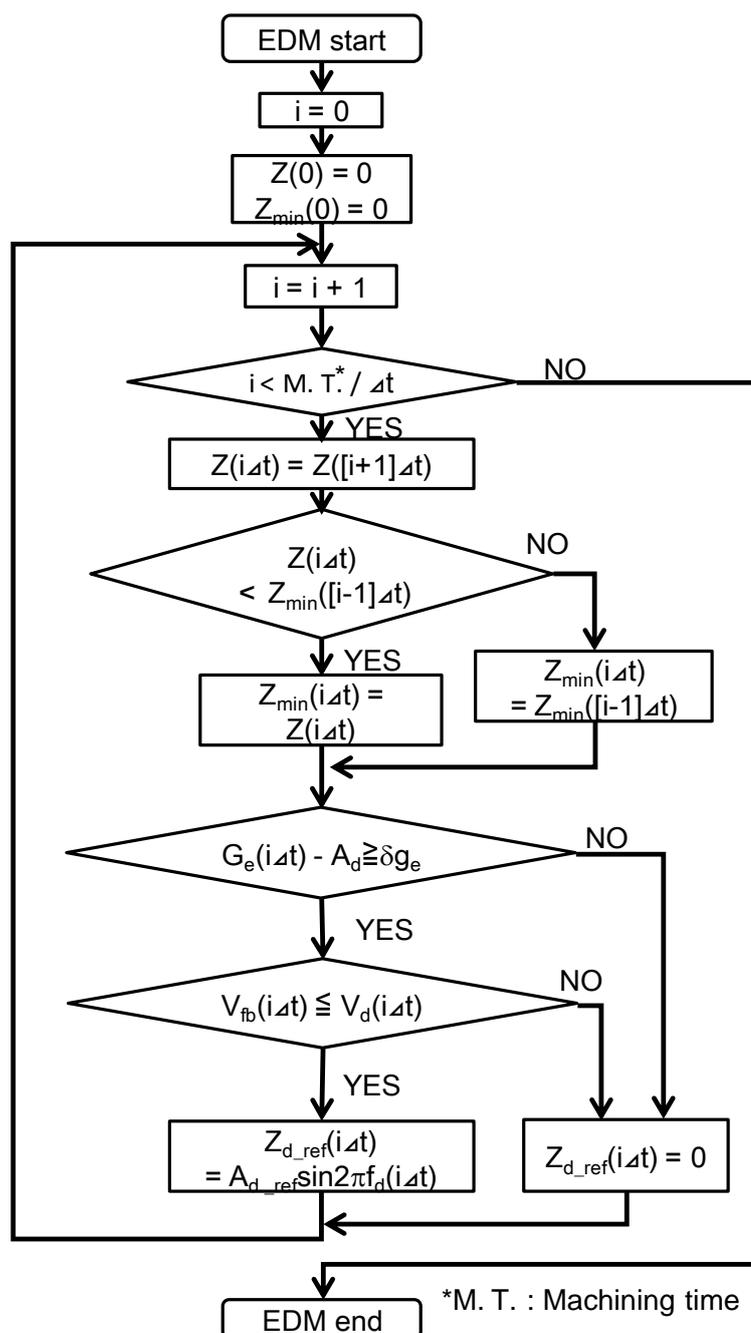


Fig. 4. 5 Flow chart of dither2

## 4. 4 放電加工実験

### 4. 4. 1 加工方法

表4. 1に、本節で検討した、電極の駆動法に関する7通りの加工方法を示す。加工方法1では、加工屑排出のための電極駆動は実施しておらず、極間電圧  $V_{fb}$  の情報をもとに、極間距離を、高応答かつ高精度に調整した。加工方法2では、極間距離調整のための  $Z$

## 第4章 高応答多自由度電極駆動による形彫り放電加工における仕上げ加工の高速化

Table 4. 1 Machining methods

Method	Bandwidth in Z direction (Hz)	Jump in Z direction	Orbital motion in X-Y plane	Dither in Z direction
1	240			
2	15	✓		
3	240	✓		
4	15	✓	✓	
5	240	✓	✓	
6	240	✓		✓(Ditehr1)
7	240	✓		✓(Ditehr2)

軸方向電極応答帯域を 15Hz に制限した。また、ジャンプによって、加工屑を積極的に排出した。加工方法3では、極間距離を高応答・高精度に調整し、ジャンプを用いた。加工方法4では、電極応答帯域を 15Hz に制限し、ジャンプおよび揺動を組み合わせて利用した。加工方法5では、極間距離の高応答・高精度調整、ジャンプ、揺動を併用した。

加工方法6では、極間距離の高応答・高精度調整、ジャンプおよび、極間距離  $g_e$  に基づいてディザを実施する、ディザ1を利用した。加工方法7では、高応答・高精度調整、ジャンプおよび、極間距離  $g_e$  とフィードバック電圧  $V_{fb}$  に基づく放電状態からディザの実施を判断する、ディザ2を利用した。

### 4. 4. 2 加工条件

直径  $\phi 2\text{mm}$  の円柱型電極を用いた、深さ数十マイクロメートル程度の Z 軸方向放電加工を行った。電極材料は銅、加工液および加工物はそれぞれ、放電加工用油 (EDF-K, Nippon Oil Corp.), プリハードン鋼 (NAK-80, Daido Steel Co., Ltd.) を利用した。加工電源は RC 回路を使用し、抵抗値  $1.1\text{k}\Omega$ , コンデンサ容量  $0.01\mu\text{F}$ , 開放電圧  $90\text{V}$  の仕上げ設定とした。極性は、加工物が正極、電極が負極とした。加工中、電極は軸回りに回転させていない。加工時間は 1 サンプル当たり  $1,200$  秒とした。放電加工 PI コントローラのパラメータは、第2章と同様とした。

加工屑排出のためのジャンプは、 $0.5\text{s}$  間隔で行い、所要時間  $0.03\text{s}$ , 平均速度  $6.7\text{mm/s}$ , 高さ  $0.1\text{mm}$  とした。揺動の直径, 周波数はそれぞれ  $15\mu\text{m}$ ,  $50\text{Hz}$  とした。ディザは, 片側実振幅  $A_d$ , 周波数  $f_d$  は, それぞれ  $1\mu\text{m}$  および  $300\text{Hz}$  とし, 式 (4. 4) および (4. 5) について  $\delta g_e$  を  $1\mu\text{m}$ ,  $V_d$  は, 開放時のフィードバック電圧  $2.6\text{V}$  の  $50\%$  である,  $1.3\text{V}$  とした。

### 4.4.3 電極送り量

図4.6に、各加工方法における、電極の送り量を示す。送り量のデータは、スピンドルZ軸方向位置計測用の渦電流変位計の出力を、データレコーダ(EZ7510, NF Cooperation)を用いて取得した。データサンプリングの周波数は10kHzであるが、グラフには、これを25,000分の1に間引いたものを使用し、Z軸方向ジャンプを実施する加工方法については、その動作を除いた。

図4.7は、加工方法5において、図4.6の波形のうち、加工開始から200秒経過まで、時間軸を拡大したものである。加工開始から100秒までの送り量が、およそ20 $\mu\text{m}$ であるのに対して、100秒から200秒では、10 $\mu\text{m}$ 程度となり、加工の進捗に伴い、電極送りが停滞していることが確認された。

電極送り速度が、加工開始直後は大きく、加工経過に従い低下した理由を、図4.8(a)、(b)の電極と加工物の関係を用いて説明する。加工開始直後、電極送り速度が大きいことに対して、考えられる第一の理由は、図4.8(a)のように、電極取り付け誤差や形状誤差により、電極底面全体が加工物に対向しないため、極間のある一部に、放電が集中することである。このため、加工方向(Z軸方向)に対する、加工物除去量が増加し、送り速度が増加すると考えられる。第二の理由は、加工穴深さが小さい状態では、放電状態を不安定化させるだけの加工屑が滞留しないことである。

一方、加工が進むと、図4.8(b)のように、電極底面全体と加工物が対向すること、放電点が加工面全体に分散し、Z軸方向の除去量が低下すること、および加工穴深さの増加による加工屑の滞留の影響により、加工方向の加工物除去速度が低下したと考えられる。

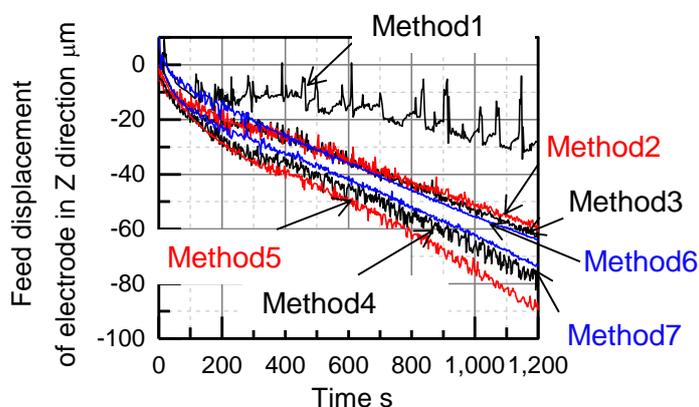


Fig. 4.6 Feed displacement of electrode

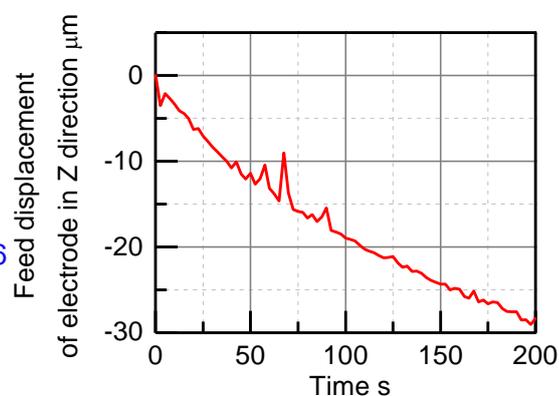


Fig. 4.7 Feed displacement of electrode

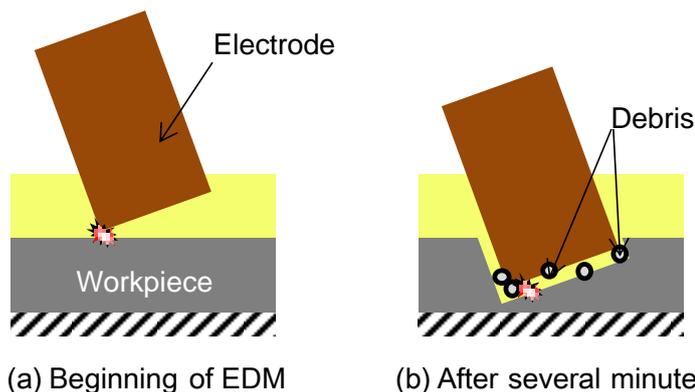


Fig. 4. 8 Relationship between electrode and workpiece

表4. 1に示した，電極駆動法の効果について検討するため，再び図4. 6を用いて加工方法ごとの，電極送り波形について考察する．極間距離を高速調整し，加工屑排出のための電極駆動を行わない，加工方法1では，電極が大きく振動していることが確認できる．これに対して，電極を軸方向にジャンプさせる，加工方法2では，軸方向の電極応答性を15Hzに制限したにもかかわらず，送り量増加に伴う，電極送りの停滞の程度は小さかった．また，電極応答性を制限せず，ジャンプを付加した加工方法3では，加工方法2と比較して，大きな違いが見られなかった．以上より，加工方法1から，送り速度が改善されたのは，ジャンプの効果が主たる要因であったと考えられる．

加工方向の電極応答帯域 15Hz で，軸方向ジャンプを用いた加工方法2に対し，さらに揺動を付加した加工方法4では，加工方法2と比較して送り速度が改善された．また，ジャンプと揺動を併用し，極間距離を高速に調整した加工方法5では，加工方法4と比較し，更に，送り速度が改善された．

フィードバック電圧  $V_{fb}$  の状態を考慮せず実施される，ディザ1を利用する加工方法6では，加工方法2, 3と比較して大きな改善は確認できなかった．これに対し，フィードバック電圧  $V_{fb}$  の情報をもとに，短絡時にディザを実施する加工方法7では，送りに改善が見られた．しかし，その効果は揺動を用いる加工方法5より小さい．以上より，本章で検討した7つの加工方法では，加工方向電極応答性を 240Hz とし，電極をジャンプおよび揺動させる加工方法5において，電極が最も効果的に送られていることが確認された．

#### 4. 4. 4 短時間における極間電圧と電極挙動

図4. 9は，加工方法1, 3, 4, 5, 7における，フィードバック電圧  $V_{fb}$  を，加工開始 900秒後から 5 秒間について表示したものであり，図4. 10は，同時間帯における，電極送り

#### 第4章 高応答多自由度電極駆動による形彫り放電加工における仕上げ加工の高速化

波形である。データは、前項と同じレコーダにて 10kHz で記録したものを、間引きせずに使用した。図4.10中、0.5秒間隔で発生しているインパルスは電極のジャンプである。

まず、加工屑排出のためのジャンプ、揺動およびディザのいずれも行わなかった、加工法1では、図4.9中、枠で囲った時間帯において、持続的な短絡が発生した。図4.10より、この時間帯において、振幅数十マイクロメートルでの電極の振動が確認された。

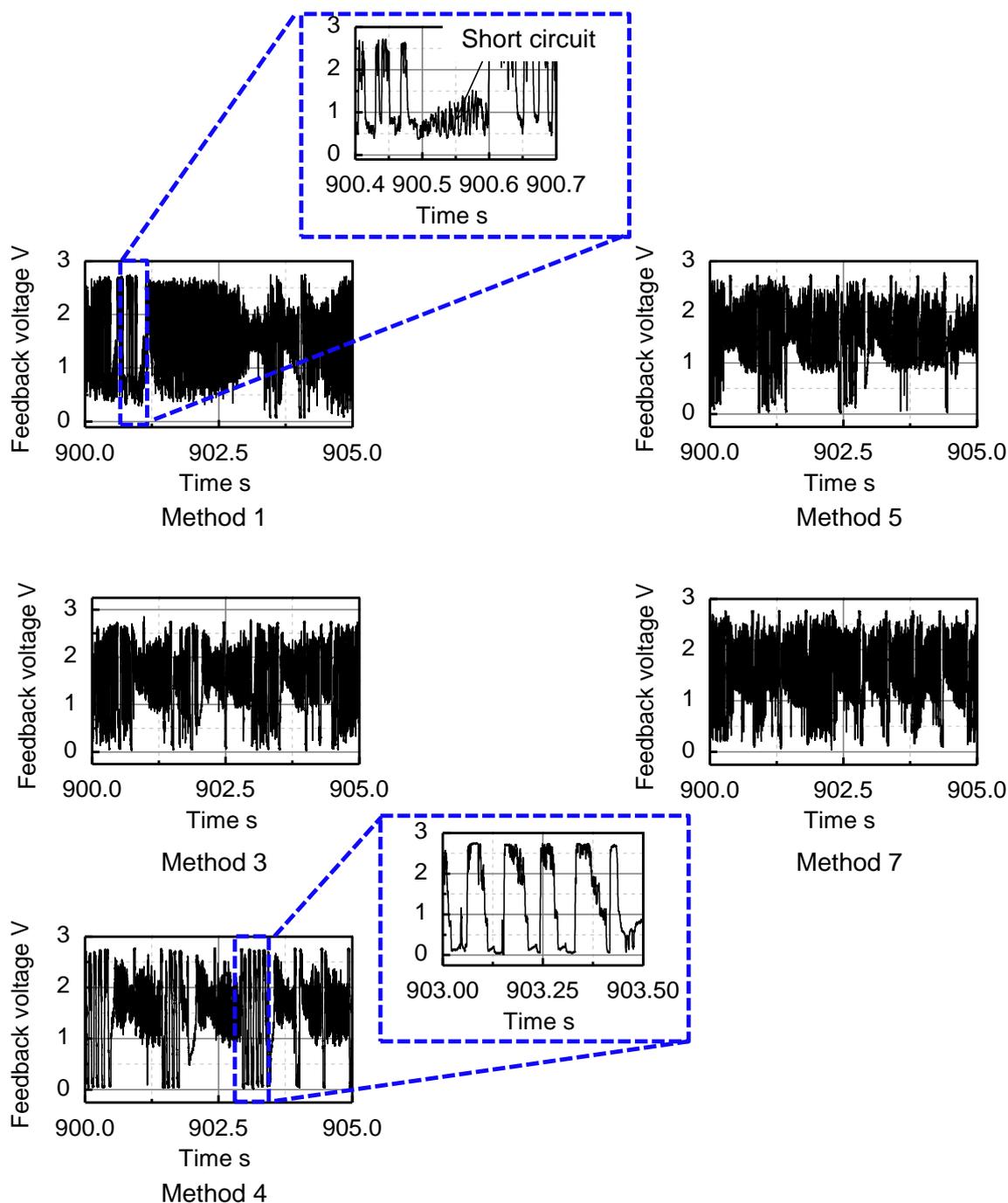


Fig. 4. 9 Feedback voltage

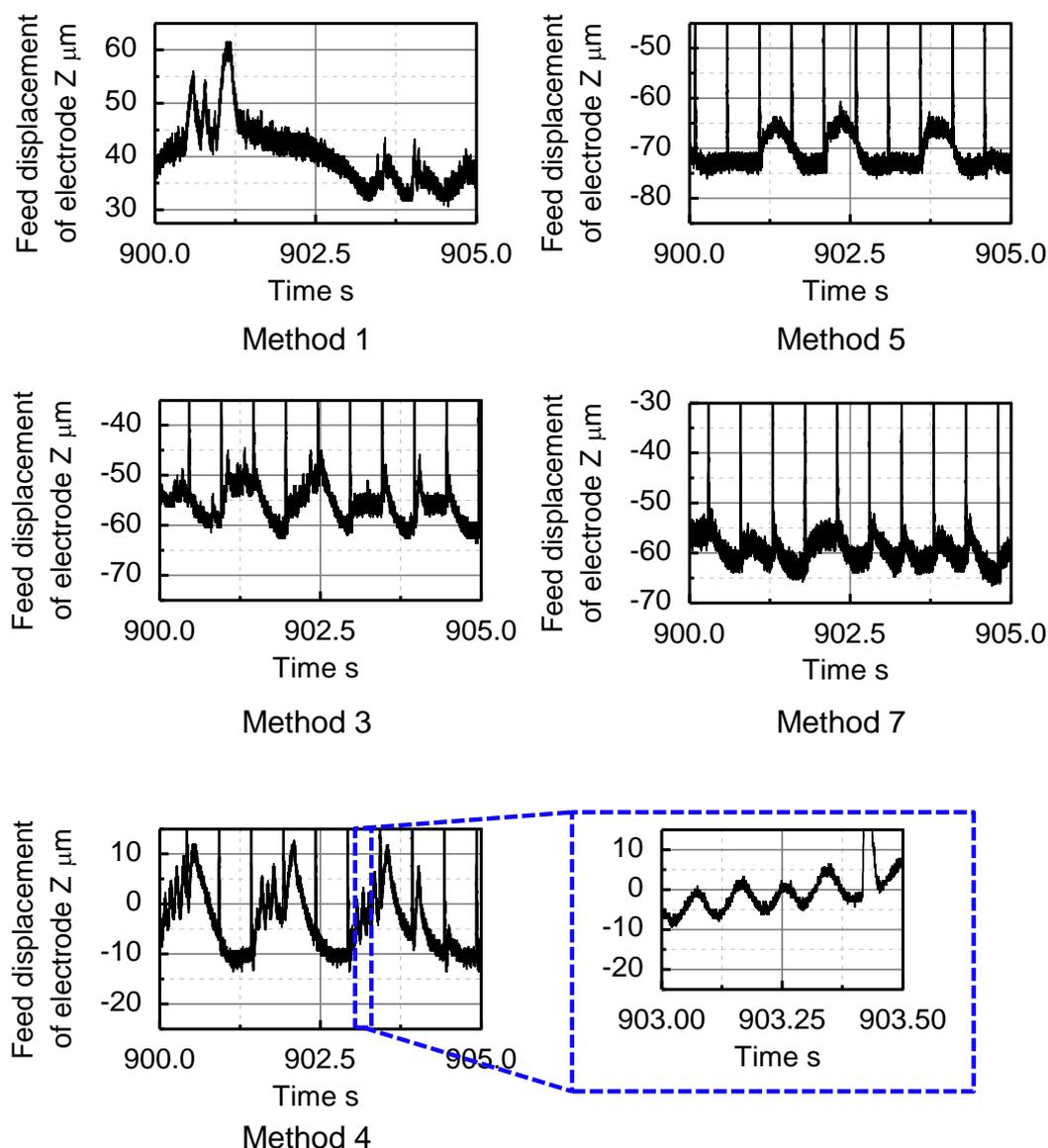


Fig. 4. 10 Feed displacement of electrode

極間距離を高速・高精度に調整した, 加工方法3, 5, 7においても, 図4. 9より, 短絡, 図4. 10より, 電極の低周波振動が確認されたが, これらの発生頻度は, ジャンプおよび揺動を併用した, 加工方法5において最も低い.

ローパスフィルタによって, 極間距離のための電極応答速度を制限した, 加工方法4では, フィードバック電圧の波形が, 数 Hz で振動するパルス状になっており, 長時間の短絡, 開放を頻繁に繰り返している. 図4. 10より, この現象が発生していた時間帯で, 電極が数マイクロメートルの振幅で振動した. 電極応答性を制限することにより, 放電状態は不安定化されと考えられる.

#### 4.4.5 加工穴深さ

図4.11に、7通りの加工方法における、加工穴底面中央付近の穴深さを比較した。計測には、白色干渉計(New view 5032, Zygo corp.)を利用した。3 サンプルの平均値は加工方法毎に、それぞれ、(1)37 $\mu\text{m}$ 、(2)50 $\mu\text{m}$ 、(3)52 $\mu\text{m}$ 、(4)61 $\mu\text{m}$ 、(5)73 $\mu\text{m}$ 、(6)55 $\mu\text{m}$ 、(7)62 $\mu\text{m}$  と、加工方法5で最大となり、加工方法1と比較すると97%増加した。ディザを用いる加工方法(6)、(7)間の比較では、フィードバック電圧  $V_{fb}$  の情報をもとに、極間状態を考慮して実施する、ディザ2において、加工穴深さは増加した。

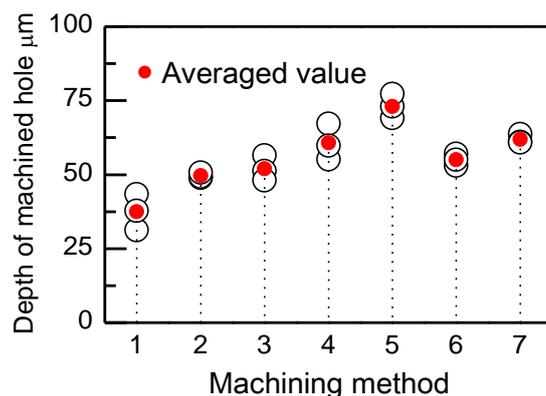


Fig. 4.11 Depth of machined hole

#### 4.4.6 電極送り速度

各種電極駆動効果が現れるのは、加工屑が滞留するため、これを強制的に排出する必要性が生じた、加工穴深さが増加した状態であると考えられる。そこで、図4.6の電極送り波形を、加工開始600秒から加工終了までの時間帯で直線近似し、この傾きを電極送り速度と定義した。図4.12に、7通りの加工方法における電極送り速度を示す。3 サンプルの平均値は、それぞれ、(1)0.035 $\mu\text{m}/\text{s}$ 、(2)0.043 $\mu\text{m}/\text{s}$ 、(3)0.044 $\mu\text{m}/\text{s}$ 、(4)0.058 $\mu\text{m}/\text{s}$ 、(5)0.071 $\mu\text{m}/\text{s}$ 、(6)0.039 $\mu\text{m}/\text{s}$ 、(7)0.050 $\mu\text{m}/\text{s}$  となり、加工穴深さと同様に加工方法5で最大、加工方法1で最小となった。送り速度は、加工方法1と比較して、加工方法5で、103%増加した。また、加工穴深さと同様に、ディザ1と比較して、ディザ2における送り速度が増加している。

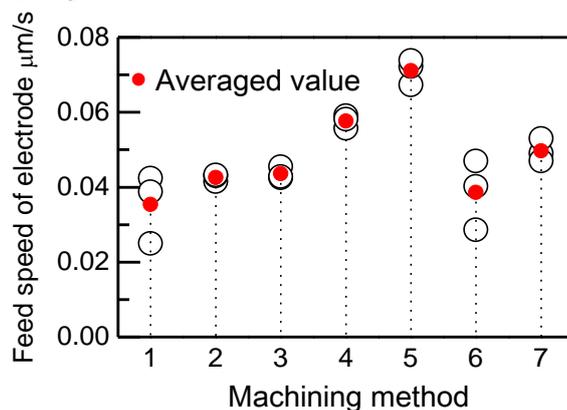


Fig. 4.12 Feed speed of electrode

### 4.4.7 底面粗さ

図4.13に加工穴底面の平均粗さ $R_a$ を示す。底面粗さは、コンフォーカル顕微鏡(HD100D, Lasertec CORP.)を用いて、加工穴中心部1mm×1mmの領域について計測した。7通りの加工方法では、 $R_a$ はいずれも1.5~2.0 $\mu\text{m}$ 程度であり、電極の駆動により、加工速度が向上した場合でも、底面粗さが悪化することはないと考えられる。

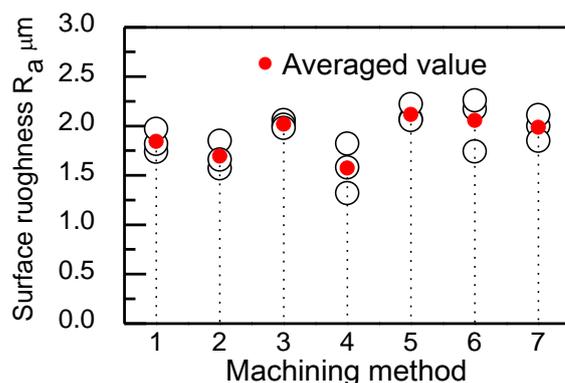


Fig. 4.13 Surface roughness

## 4.5 揺動直径・周波数と加工速度の調査

### 4.5.1 揺動条件および加工条件

前節までに検討した、表4.1の7つの電極駆動法において、形彫り放電加工の高速化に最も有効であったのは、ジャンプ、揺動を併用し、加工方向電極応答性が高い、加工方法5であった。本節では、加工方法5において、揺動パラメータと加工速度の関係を調査した。具体的には、表4.2のように、揺動の周波数を1~300Hz、直径を5~20 $\mu\text{m}$ の範囲で変化させ、高速化に適した揺動パラメータを検討した。実験条件は、4.4.1項と同様とした。

Table 4.2 Diameter and frequency of orbital motion

		Frequency Hz					
		1	20	50	100	200	300
Diameter $\mu\text{m}$	5		✓	✓	✓	✓	✓
	10		✓	✓	✓	✓	
	15	✓	✓	✓	✓	✓	
	20		✓	✓	✓	✓	

### 4.5.2 電極送り量

図4.14に、揺動周波数 50Hz における、電極の送り波形を、揺動直径ごとに比べた。波形に使用するデータは、4.4.3項と同様に、10kHz で記録したものを 25,000 分の 1 に間引いたものであり、ジャンプ動作は除いてある。これまでと同様に、加工開始時は、送り波形の傾きが大きく、加工開始から数十秒経過後、送りが停滞し始めていることが確認できる。揺動直径 5 $\mu\text{m}$  の条件では、800 秒以降で、その他の揺動直径と比較して、送りの停滞の程度が大きくなった。揺動の直径は、加工速度に影響を与える要因であると考えられる。

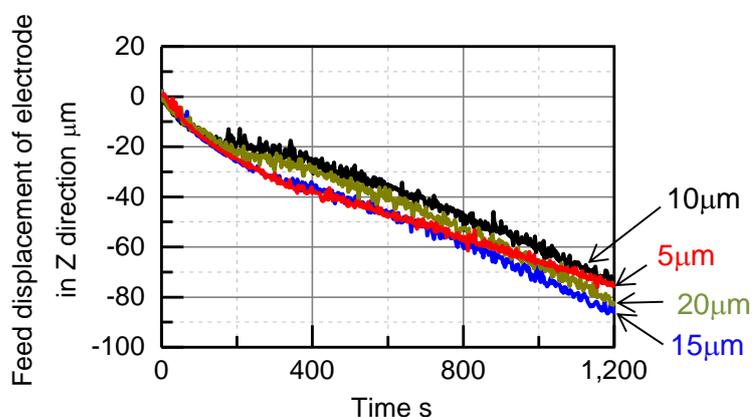


Fig. 4.14 Feed displacement of electrode

### 4.5.3 加工穴深さ

図4.15に、各揺動条件における3サンプルについて、加工穴中央付近の深さの平均値を示す。加工穴深さは揺動なしの場合と比較して、全ての揺動条件で改善され、揺動周波数 200Hz では 10 $\mu\text{m}$ 、100Hz では 20 $\mu\text{m}$  その他の周波数では 15 $\mu\text{m}$  のとき最大となった。グラフから、穴深さは、揺動直径の増加に伴い増加するが、揺動直径が一定量を超えると減少する傾向が確認できる。この理由として、揺動直径が増加すると、加工屑が効果的に排出される一方で、加工穴側面への放電頻度が増加し、径方向に対しても、加工物の除去がなされることが考えられる。また、揺動直径 15 $\mu\text{m}$  において、周波数 1Hz の低速揺動を行った場合は、その他の揺動周波数と比較して、穴深さは小さくなった。このため、揺動を周波数数十 Hz 以上で行うことが、加工高速化では重要であると考えられる。

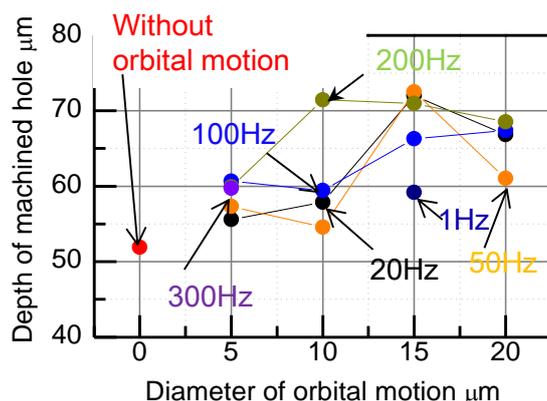


Fig. 4. 15 Depth of machined hole

#### 4. 5. 4 電極の送り速度

4. 4. 5項と同様に、加工開始から600秒経過後から加工終了までの、電極送り波形を線形近似し、その傾きで定義された送り速度を、揺動直径、周波数ごとに比較した。図4. 16は、各揺動条件における、3サンプルについての、送り速度の平均値である。図4. 16(a)では、グラフ横軸は揺動直径を示し、周波数ごとにまとめた。加工穴深さと同様、揺動直径の増加に伴って、送り速度が向上する傾向が見られた。ただし、揺動周波数50Hzのとき、揺動直径15μmから20μmにかけて、送り速度が低下した。この原因も、加工穴深さの場合と同様に、揺動直径の増加に伴う、加工穴側面への放電が関係していると考えられる。また、加工穴深さの場合と同様に、周波数が1Hzのとき、その他の周波数と比較して、送り速度が低下した。

図4. 16(b)は、横軸を揺動周波数とし、揺動直径ごとにまとめた送り速度である。直径5, 10μmでは、その周波数を20Hzとしたとき、直径15, 20μmと比較して、送り速度が低下している。また、周波数を大きくすることによって、送り速度が改善するが、直径を15, 20μmとする場合より、送り速度に対する揺動の効果は小さいことが確認できる。直径15μmでは、1Hzの低速揺動を実施したが、20Hz以上の揺動と比較し、送り速度が小さくなっている。これらのことから、揺動直径と周波数はいずれも、加工速度向上に寄与する要素であると考えられる。

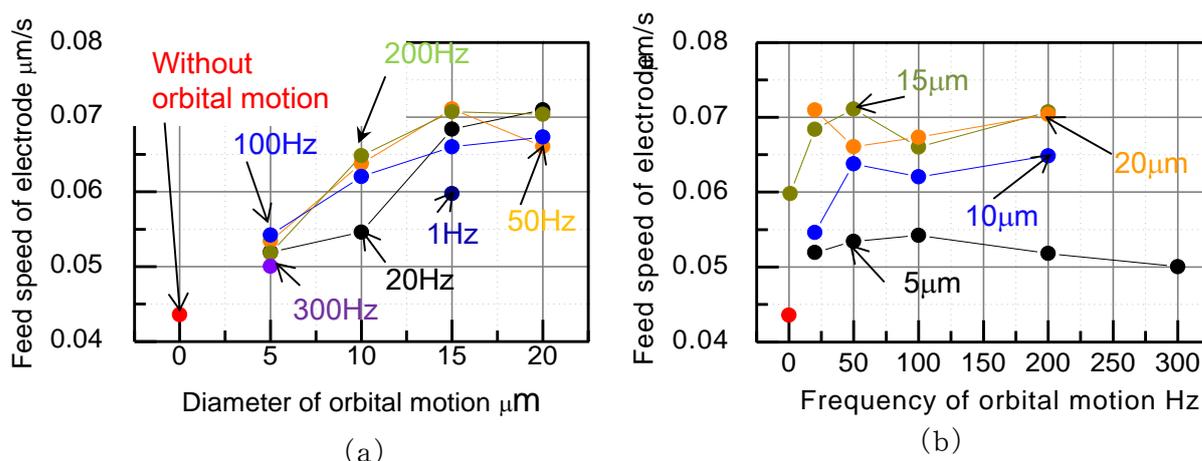


Fig. 4. 16 Feed speed of electrode

#### 4. 5. 5 加工穴直径

図4. 17は、デジタルマイクロスコープ (VHX-1000, Keyence Corp.) を使用して測定した、各条件で加工した3個の穴直径の平均値である。図中、点線で示された直線は、揺動を実施しない加工穴直径に、揺動直径を加えた、加工穴直径の予想値である。揺動直径の増加に伴い、直径が増加しており、その増加量は揺動量と同程度である。これは、揺動により、加工穴側面での放電が発生し、径方向に加工物が除去されたことによると考えられる。

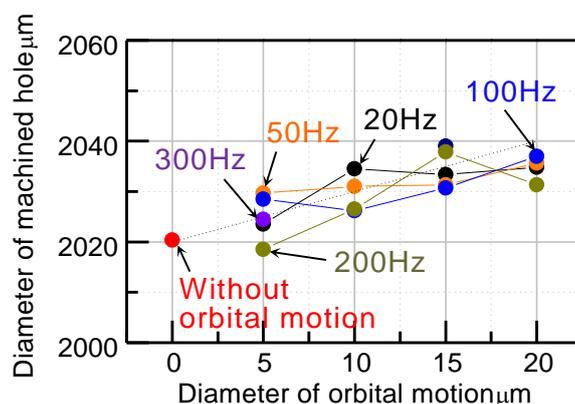


Fig. 4. 17 Diameter of machined hole

#### 4. 5. 6 短絡頻度

図4. 18に、加工開始 600 秒から 1,200 秒までの短絡頻度を示す。短絡は、加工中計測したフィードバック電圧  $V_{fb}$  の出力範囲  $0V \sim 2.6V$  のうち、下位 20%、すなわち  $0 \sim 0.52V$  を短絡状態と仮定した上で、フィードバック電圧  $V_{fb}$  の全データ数と短絡のデータ数の比で定義した。短絡頻度は、揺動の直径が増加するに従って低減するが、 $15 \sim 20\mu m$  にか

#### 第4章 高応答多自由度電極駆動による形彫り放電加工における仕上げ加工の高速化

けては、再度増加した。これは、送り速度と逆の傾向である。また、図4.19は、すべての加工サンプルにおいて、送り速度と短絡率の関係を示したものである。送り速度と短絡率は、負の相関関係があることが確認できる。

前項で説明したように、揺動により、加工穴側面放電が発生し、径方向に対して加工物が除去される。このような場合、電極側面-加工穴側面間での短絡頻度も増加すると考えられる。本章ではフィードバック電圧に基づく、短絡時の電極退避は、Z軸方向のみに対して実施されるが、電極側面で短絡が生じた場合、電極のZ軸方向退避により、短絡は速やかに解消されない可能性がある。この場合、径方向の電極退避が有効であると考えられ、図4.20で示すように、加工方向(Z軸方向)と斜め方向の電極退避を、今後は検討する必要がある。

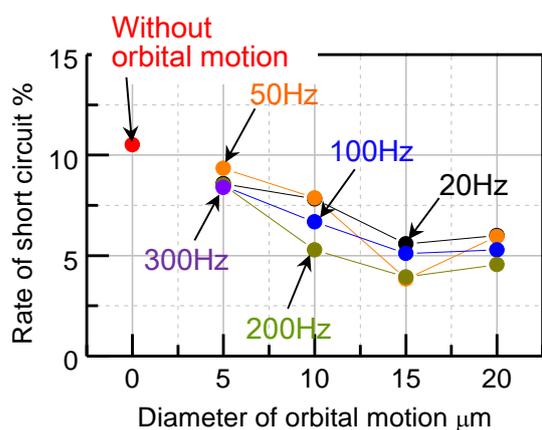


Fig. 4.18 Rate of short-circuit

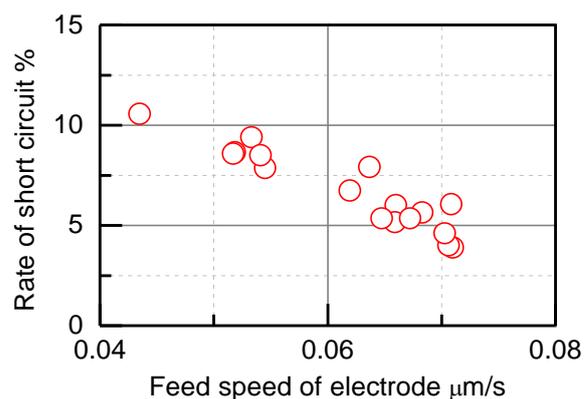


Fig. 4.19 Relationship between rate of short-circuit and feed speed of electrode

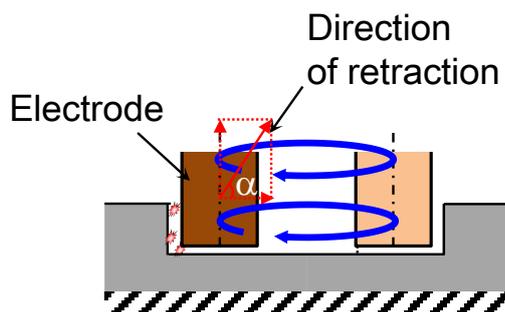


Fig. 4.20 Rate of short-circuit

## 4.6 形彫り放電加工・仕上げ加工実用化のための検討

### 4.6.1 簡易なローカルアクチュエータを用いた仕上げ加工速度の改善

本研究で前節までに検討した電極駆動方法では、電極の径方向揺動、軸方向ジャンプ、高応答・高精度な極間距離の微調整の複合的な組み合わせが、放電加工における加工速度の改善に対して最も有効であることを確認した。ただし、高速揺動を単独で付加させる場合についても、一定の効果を確認した。第2, 3章および本章前節までに用いた5自由度制御型ローカルアクチュエータは、電極を多自由度方向に位置決め可能なため、穴加工や形彫り放電加工の高速化、穴加工の高精度化を実現可能である。その一方で、従来の形彫り放電加工技術に対する、高速化に注目する場合、次のような課題を有する。まず、5軸ローカルアクチュエータでは、5自由度方向同時に、電極の位置・姿勢制御を行うため、アクチュエータやセンサの数が増加する。このため、ハードウェア、ソフトウェアの構成が複雑となり、かつ高コストである。また、電極をZ軸周りに拘束不可能である。ところで、形彫り放電加工では、使用される電極形状は様々である。電極形状を、加工物に忠実に転写する場合、円柱型電極を除き、電極のZ軸回り回転は許容されない。

これらの課題に対して、本節では、弾性ヒンジ2自由度制御型ローカルアクチュエータ(2軸ローカルアクチュエータ)を、形彫り放電加工に適用し、電極の高速揺動を用いた、仕上げ加工高速化を実施した。2軸ローカルアクチュエータは、弾性ヒンジ案内により、電極をZ軸周りに拘束可能である。また、制御方向が並進2自由度であるため、5自由度制御型磁気浮上ローカルアクチュエータと比較して、構造、ハードウェアの構成が簡易かつ制御が容易である。

形彫り放電加工では、利用される電極の形状は様々であるため、電極の形状に応じて揺動形状を選定しなければならない。一例として、図4.21のように、角柱型電極を用い、鋭いエッジを有する四角形状を転写する場合では、(a)のような円揺動では、コーナ部が円弧状になるため、(b)に示す電極形状に応じた四角形状の揺動が望ましい。

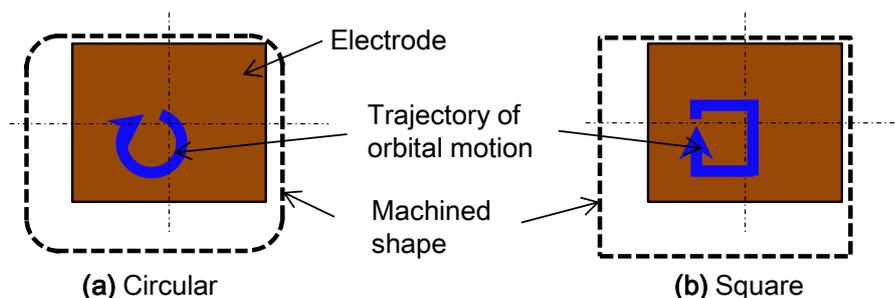


Fig. 4.21 Configuration of orbital motion and machined shape

## 第4章 高応答多自由度電極駆動による形彫り放電加工における仕上げ加工の高速化

本節では、角柱電極を用いた形彫り放電加工における仕上げ加工速度の改善について検討を行う。このため、まず、高速四角揺動を実現するための電極駆動方法提案し、高速四角揺動を可能とした2軸ローカルアクチュエータを、形彫り放電加工に適用した。また、加工条件には、電極送り量に応じて、加工電源設定を、粗加工から仕上げ加工まで段階的に切り替える、汎用的な形彫り放電加工プログラムを利用した。

### 4.6.2 弾性ヒンジ2自由度制御型磁気駆動ローカルアクチュエータの構成

図4.22に、電極を取り付けた、2軸ローカルアクチュエータ単体の構成図、写真、および形彫り放電加工に取り付けた状態の写真を示す。2軸ローカルアクチュエータ電極取り付け部は、弾性ヒンジ案内で支持されており、電極は、制御方向である並進XY軸方向を除き、運動を拘束される。2軸ローカルアクチュエータ本体と電極を、電氣的に絶縁するため、電極取り付け部は主にエンジニアリングプラスチックを用いて作製された。2軸ローカルアクチュエータ電極ホルダの変位計測用センサ、駆動アンプ、およびその他制御用機器の関係を、図4.23に示す。電極ホルダの変位計測には、渦電流式変位センサ(PU-05, AEC Corp.)を用いた。電磁石コイルの線径は0.7mmであり、巻き数は220、電磁石とターゲット間の初期ギャップ  $g_0$  は0.8mmとした。

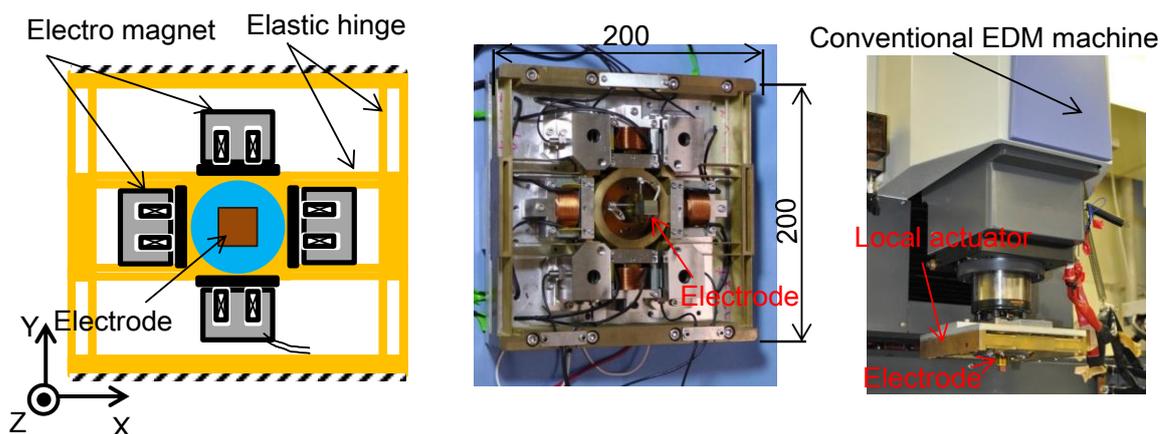


Fig. 4.22 Configuration and photographs of elastic hinge local actuator

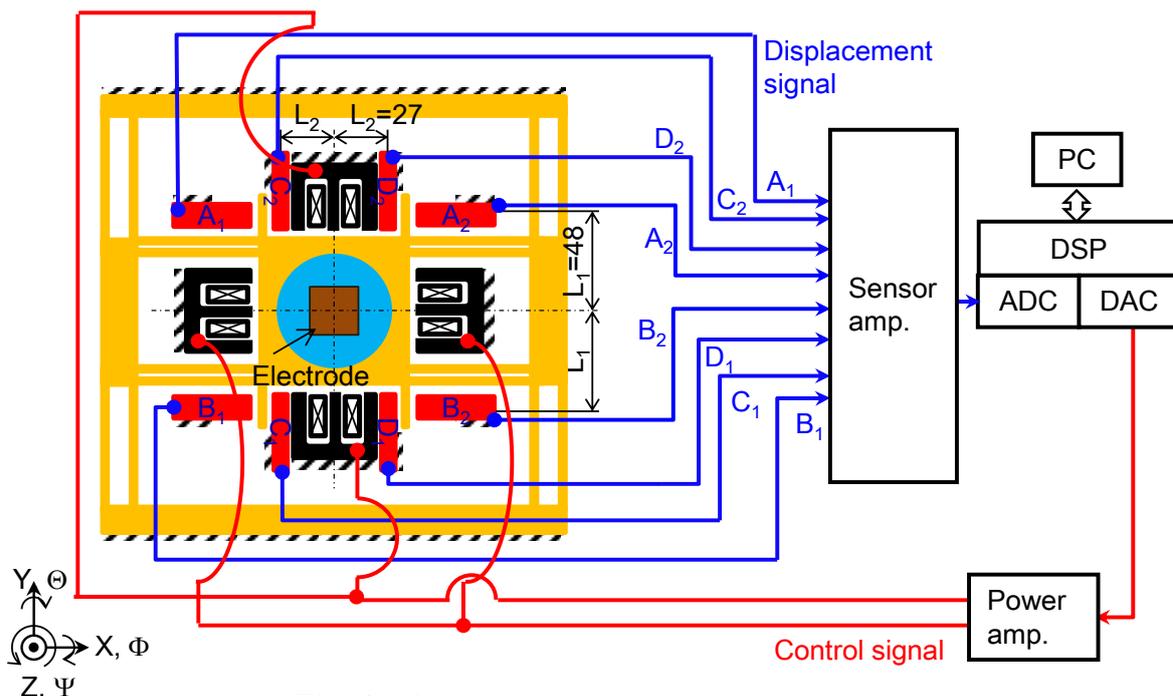


Fig. 4. 23 Local actuator experimental system

電極ホルダの位置決め制御は、DSP システム(DS1103, dSPACE Corp.)を用いて行い、サンプリング周波数は 10 kHz とした。変位センサで取得した電圧信号は、A/D コンバータ(16bit, ±10 V)を介して DSP ボードに取り込まれる。演算処理後の制御電圧信号は D/A コンバータ(16bit, ±10V)を介して、リニアアンプ(DCV-304A, Uniel Corp.)で増幅され、コイルに印加される。変位計測に、1自由度あたり4本、2自由度で計8本のセンサ A<sub>1</sub>~D<sub>2</sub> を利用した理由は、センサとアクチュエータのコロケーションの問題を解消するため、およびセンサの温度ドリフトおよびコモンモードノイズを相殺するためである。電極ホルダ重心部の並進方向変位を  $x, y$ , Z 軸周りの回転角を  $\psi$  とおくと、各センサ出力と  $x, y, \psi$  との関係は、式(4. 6)で示される。ただし、 $\delta T$  は温度ドリフトの影響を表わす。

$$\begin{aligned}
 A_1 &= x - L_1\psi + \delta T \\
 A_2 &= -x + L_1\psi + \delta T \\
 B_1 &= x + L_1\psi + \delta T \\
 B_2 &= -x - L_1\psi + \delta T \\
 C_1 &= y - L_2\psi + \delta T \dots\dots\dots (4. 6) \\
 C_2 &= -y + L_2\psi + \delta T \\
 D_1 &= y + L_2\psi + \delta T \\
 D_2 &= -y - L_2\psi + \delta T
 \end{aligned}$$

上式より、電極ホルダの並進方向変位  $x, y$  は、式(4. 7), (4. 8)となる。

$$x = \frac{A_1 - A_2 + B_1 - B_2}{4} \dots\dots\dots (4.7)$$

$$y = \frac{C_1 - C_2 + D_1 - D_2}{4} \dots\dots\dots (4.8)$$

2軸ローカルアクチュエータは、制御方向以外の並進・回転方向の剛体モードを制御できないが、揺動時における、他の剛体モードは、加工精度に影響を及ぼすと考えられる。そこで、有限要素法による、ヒンジ機構の振動モード解析を行った。解析は、3D-CAD (Solidworks 2010, Dassault Systemes Solidworks Corp.) に付属する、構造解析プログラムを用いて行い、解析モデルの節点数および要素数はそれぞれ 98,579, 57,847 であった。境界条件は、ローカルアクチュエータを形彫り放電加工機に取り付ける場合と同様に、アクチュエータ固定部の固定板への完全固定とした。図4.24に解析結果を示す。Z軸回りの回転モード(3次モード)の固有振動数は329Hzであり、今回検討した、最大150Hzまでの円揺動、50Hzまでの四角揺動の周波数領域内においては、振動モード励起の影響は、比較的小さいと考えられる。

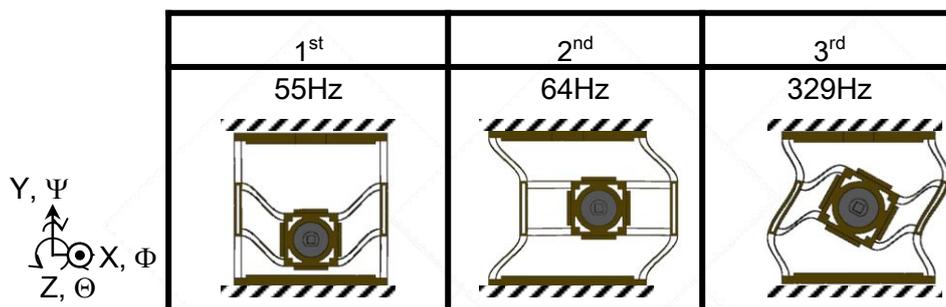


Fig. 4.24 Modal analysis of elastic hinge

### 4.6.3 ローカルアクチュエータ位置決め制御システム

ローカルアクチュエータの位置決めコントローラ設計は、5自由度制御型磁気浮上ローカルアクチュエータと同様に、バイアス電流法を用いて行った。電磁石コイルのバイアス電流は、1.5Aとした。図4.25に、電磁力が線形化された、X軸方向位置決め制御システムのブロック線図を示す。ただし、ブロック線図中の物理定数は、次のように定義される。また、表4.3に、実験的に同定した、具体的な値を示す。

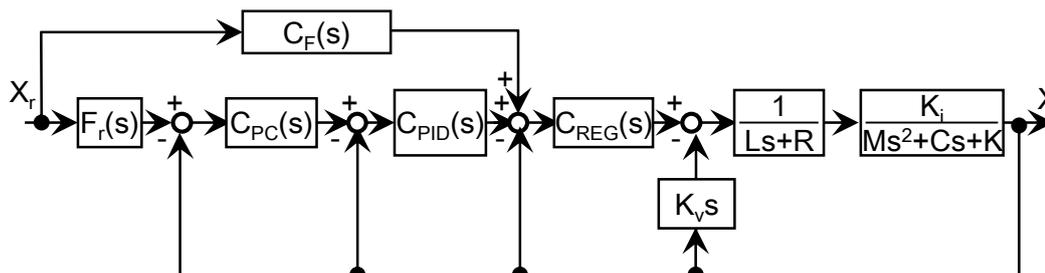


Fig. 4.25 Block diagram of MA control system

Table 4. 3 Model parameters

M	0.883 kg
C	3.94 Ns/m
K	-5.00×10 <sup>4</sup> N/m
K <sub>v</sub>	59.3 Vs/m
K <sub>i</sub>	59.3 N/A
R	1 Ω
L	14.5 mH

*M*: 電極駆動部質量(電極質量含む)

*C*: 減衰係数

*K*: ばね定数

*K<sub>v</sub>*: 速度起電力定数

*K<sub>i</sub>*: 電流・力定数

*R*: コイル抵抗

*L*: コイルインダクタンス

制御コントローラは、各要素の詳細は後述するが、負ばねの影響を補償し、システムを安定化するためのレギュレータ  $C_{REG}(s)$  , 定常偏差除去および応答性改善のための PID コントローラ  $C_{PID}(s)$ , 応答性改善のためのフィードフォワード補償器  $C_F(s)$ , 四角揺動における象限切り替え時に発生する振動を抑制するためのポジキャストコントローラ  $C_{PC}(s)$ から構成されている。

コントローラ設計手順を説明する。まず、 $C_{PID}(s)$ ,  $C_{PC}(s)$ ,  $C_F(s)$ を、制御コントローラから取り除いた状態で、 $C_{REG}(s)$ により、電磁石および弾性ヒンジ機構からなる、閉ループ伝達関数の特性方程式  $A(s)$ が5重根の解を持つよう、

$$A(s) = ML(s + p)^5 \dots\dots\dots (4. 9)$$

とし、さらに、 $C_F(s)$ と  $C_{PID}(s)$ を追加した状態で、バンド幅が 100Hz 以上となるよう、パラメータを設定した。式(4. 10)に、 $C_F(s)$ の伝達関数を示す。 $C_F(s)$ は、バンドパスフィルタの形をとり、式中の  $f_c$  は、共振周波数である。バンドパスフィルタは、数から十数ヘルツの周波数領域における、変位目標から実変位までの閉ループ伝達関数のゲインの低下を補償するために用いた。

#### 第4章 高応答多自由度電極駆動による形彫り放電加工における仕上げ加工の高速化

$$C_F(s) = \frac{2\zeta(2\pi f_c)s}{s^2 + 2\zeta(2\pi f_c)s + (2\pi f_c)^2} \dots\dots\dots (4.10)$$

レギュレータ  $C_{REG}(s)$  の伝達関数は、第2章と同様に式(4.11)で示され、パラメータは、極  $p$  を指定することにより、自動的に決定された。

$$C_{REG}(s) = \frac{b_2s^2 + b_1s + b_0}{s^2 + a_1s + a_0} \dots\dots\dots (4.11)$$

また、PID コントローラの微分要素  $D(s)$  には、式(4.12)の、疑似微分を用いた。

$$D(s) = \frac{K_D s}{T_D s + 1} \dots\dots\dots (4.12)$$

ここで、 $T_D$  は時定数、 $K_D$  は、微分要素のゲインである。パラメータの決定には、数値計算ソフト(Matlab, Mathworks Japan)を用いたシミュレーションおよび、ローカルアクチュエータ実機とサーボアナライザ(FRA5022, NF cooperation)を用いた周波数応答試験によって決定した。

形彫り放電加工において、電極のオーバーシュートは、その軌道が加工物に転写されるため、電極の振動抑制は重要である。これに対して、本節では、ポジキャスト制御<sup>(94)</sup>を適用した。図4.26に、ポジキャスト制御の原理を示す。位置決めシステムのステップ応答における、オーバーシュートおよび振動周期が、それぞれ  $\delta$ ,  $T_\delta$  であるとする。このようなシステムに対して、高さ  $1/(1+\delta)$ 、ステップ目標を入力し、 $T_\delta/2$  後に、高さ  $\delta/(1+\delta)$  のステップ目標を、初期ステップに重ね合わせて入力する。このとき、システムの応答は、2つの位置決め目標に対する応答の重ね合わせとなり、オーバーシュートおよび振動が抑制される。

ただし、上述した手法は、位置決めシステムの入力である、ステップ目標を整形し、これを新たな目標値として入力する手法である。このため、システムのパラメータ変動に対して、ロバスト性が低いという問題がある。これに対して、本研究では、閉ループ内にポジキャストコントローラを含む制御方法<sup>(95)</sup>による制御設計を行う。ブロック線図中、 $C_{PC}(s)$  は、ポジキャストコントローラであり、ブロック線図および伝達関数は、それぞれ図4.27、式(4.13)となる。

$$\frac{\delta}{1+\delta} \left[ -1 + e^{-s(T_\delta/2)} \right] \dots\dots\dots (4.13)$$

ポジキャストコントローラの設計は、まず、ステップ目標を入力する。次に、得られたステ

## 第4章 高応答多自由度電極駆動による形彫り放電加工における仕上げ加工の高速化

ステップ応答波形の、振動周期およびオーバーシュートから、ポジキャストコントローラ  $C_{PC}(s)$  の、コントローラ定数  $\delta$  および  $T_{\delta}/2$  を決定した。図4.28に、電極のステップ応答波形、図4.29に周波数応答波形を示す。ポジキャスト制御を適用することにより、オーバーシュートが低減されていることが確認できる。表4.4に、2軸ローカルアクチュエータシステムの制御パラメータ、表4.5に、ローカルアクチュエータの位置決め性能を示す。

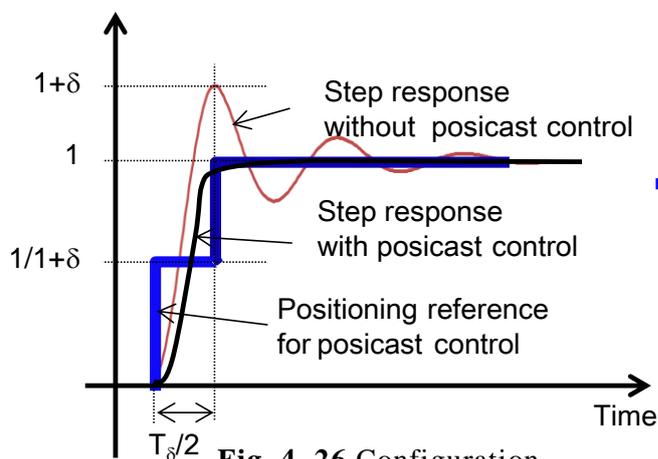


Fig. 4.26 Configuration of posicast control

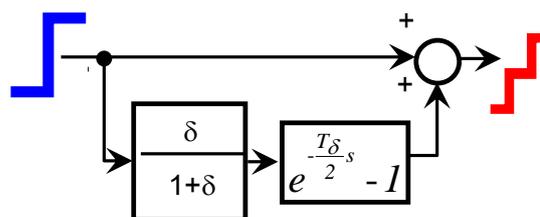


Fig. 4.27 Block diagram of posicast controller

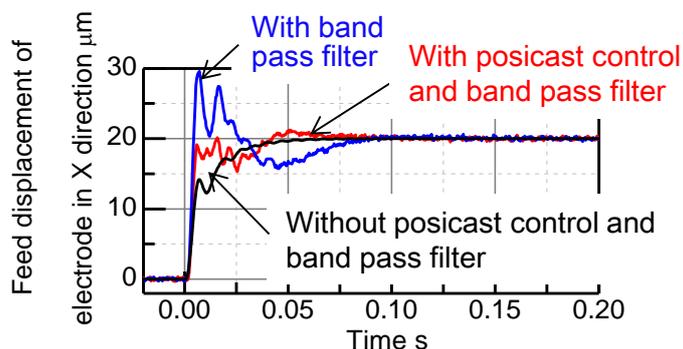


Fig. 4.28 Step response of electrode (Experimental)

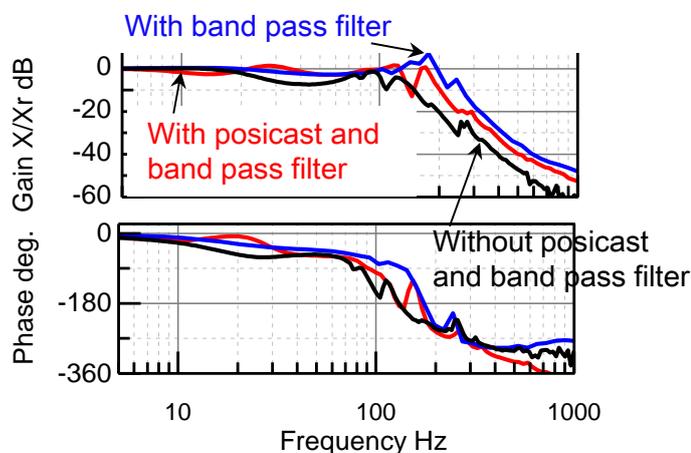


Fig. 4.29 Frequency response of electrode (Experimental)

Table 4. 4 Control parameters of local actuator

p	$2\pi \times 127$	$\beta$	0.01
$A_0$	$6.04 \times 10^6$	$\gamma$	180
$a_1$	$3.92 \times 10^3$	$T_D$	0.016
$b_0$	$1.33 \times 10^{10}$	$K_D$	$3.98 \times 10^{-5}$
$b_1$	$7.67 \times 10^7$	$\delta$	0.48
$b_2$	$1.94 \times 10^5$	$T_\delta/2$	0.007
$f_c$	20		

Table 4. 5 Positioning performance of local actuator

Directions	Band width	Positioning resolution	Positioning stroke
X, Y	130Hz	1 $\mu$ m	1mm

#### 4. 6. 4 仕上げ加工高速化のための電極揺動

円揺動の電極位置決め目標は、式(4. 14)で示される円軌道とした。

$$\begin{bmatrix} x_{o\_ref} \\ y_{o\_ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{rx} \cos 2\pi f_o t \\ A_{ry} \sin 2\pi f_o t \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4. 1)$$

ここで、 $f_o$ は円揺動の周波数である、また、 $A_{rx}$ 、 $A_{ry}$ は揺動目標値振幅であり、ローカルアクチュエータのゲイン特性を考慮し、高周波数揺動では実振幅が所望の値となるよう、[図4. 25](#)中、 $F_r(s)$ で示す、ゲインおよび位相調整用フィルタをコントローラに追加している。

一方、四角揺動を実現するX軸方向の電極軌道は、式(4. 15)、[図4. 30](#)のように一方向(X軸方向)を見ると、台形状の波形となる。ただし、式中、 $r$ 、 $T$ は揺動の振幅および周期を示す。

$$x_{s\_ref} = \begin{cases} \frac{8r}{T}t - r & (nT \leq t \leq nT + \frac{1}{4}T) \\ r & (nT + \frac{T}{4} \leq t \leq nT + \frac{2}{4}T) \\ -\frac{8r}{T}t + 2r & (nT + \frac{2}{4}T \leq t \leq nT + \frac{3}{4}T) \\ -r & (nT + \frac{3}{4}T \leq t \leq nT + T) \end{cases} \dots\dots\dots (4. 15)$$

$n = 0, 1, 2, 3, \dots$

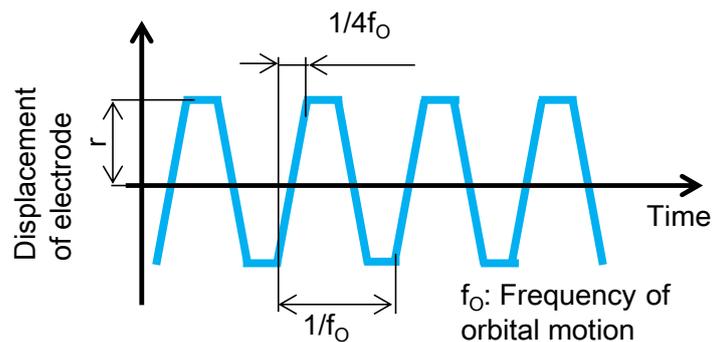


Fig. 4. 30 Positioning reference of square motion (Low frequency)

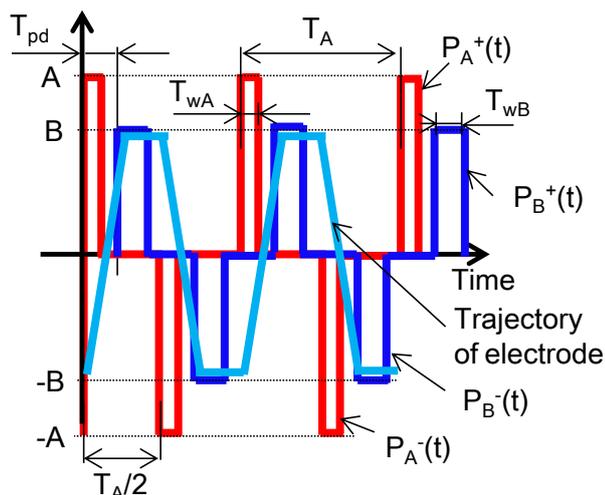


Fig. 4. 31 Positioning reference and trajectory of square motion (High frequency)

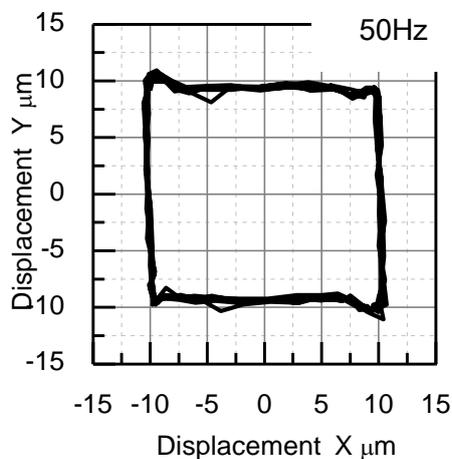


Fig. 4. 32 Trajectory of orbital motion (square)

揺動周波数が、数ヘルツ程度と低いときは、式(4. 15)の $x_{s\_ref}$ を、揺動目標として、ローカルアクチュエータの位置決めシステムに直接入力すればよい。一方、高周波揺動の場合、ローカルアクチュエータに追従誤差が発生し、四角揺動の実現が困難となる。

四角揺動を数十ヘルツで実施する場合の電極駆動方法について説明する。揺動は、複数のパルス状の位置決め目標を、ローカルアクチュエータの位置決めシステムに入力することによって行った。図4. 31に目標値の概要を示す。パルス高さ $A$ 、繰返し周期

## 第4章 高応答多自由度電極駆動による形彫り放電加工における仕上げ加工の高速化

$T_A (=1/f_o)$ , パルス時間  $T_{AW}$  である信号を  $P_A^+(t)$  とする. また, パルス高さ  $A$ , 繰返し周期, パルス時間は  $P_A^+(t)$  と等しい信号を  $P_A^-(t)$  とする.  $P_A^-(t)$  は  $P_A^+(t)$  に対して位相が遅れており, その遅れ時間は,  $T_A/2$  である. また, 両者の和を  $P_A$  とする. 同様にして, パルス高さ  $B$ , 繰返し周期  $T_B (=1/f_o)$ , パルス時間  $T_{BW}$  のパルス信号を  $P_B^+(t)$ , パルス高さ  $B$ , 繰返し周期, パルス時間は  $P_B^+(t)$  と等しい信号を  $P_B^-(t)$  とし, 両者の和を  $P_B(t)$  とする.  $P_B(t)$  の,  $P_A(t)$  に対する遅れ時間は,  $T_{pd}$  である. 式 (4. 16) で示される, 4つのパルス信号の和を, 揺動目標  $X_{s\_ref}$  とした.

$$x_{s\_ref} = P_A^+ + P_A^- + P_B^+ + P_B^- \dots\dots\dots (4. 16)$$

なお, 四角揺動実施時は, 揺動周波数  $f_o$ , および実振幅  $r$  に対して, 電極ホルダの軌道が, 式 (4. 15) 右辺の波形に近づくように, 図 4. 31 のパラメータ,  $A, B, T_{AW}, T_{BW}$  および  $T_{pd}$  を, 実験的に決定した. 図 4. 32 は, 本手法を用いて, 50Hz, 一辺  $20\mu\text{m}$  の揺動を実施した際の, 電極ホルダの XY 平面内軌跡である. ただし, 揺動目標のパラメータ  $A, B, T_{AW}, T_{BW}$  および  $T_{pd}$  は,  $15.5\mu\text{m}, 10\mu\text{m}, 0.0023\text{s}, 0.0027\text{s}$  および  $0.0023\text{s}$  とした.

### 4. 6. 5 放電加工システムと加工条件

図 4. 33 に, 本節において実施した, 形彫り放電加工のプロセスを示す. この加工方法では, 粗加工用の加工電源条件を用いて加工を開始し, 電源条件は, 加工の進捗に伴い, 加工穴深さが増加するとともに, 準仕上げ条件さらに仕上げ条件へと切り替えられる. 粗加工では, 放電エネルギーが高く, 全加工量に対して, 加工物の大半が除去される. 粗加工では, 単位時間あたりの加工物除去量, 表面粗さは共に大きい. これに対して, 準仕上げ, 仕上げ加工では, 加工面を仕上げるため, 放電エネルギーは絞られる. 極間距離は粗加工のそれと比較して狭くなり, 加工屑の排出が困難となる.

本節で用いた, 放電加工システムの構成を, 図 4. 34 に示す. 本加工システムでは, 既存放電加工機の電極取り付け部に, ローカルアクチュエータが取り付けられており, 電極はローカルアクチュエータの駆動部に固定されている. 加工方向である, Z 軸方向の電極駆動は, 既存放電加工機が行う. 具体的には, 極間電圧  $V$  が, 既存放電加工機の加工制御の位置決めシステムに, フィードバック信号として入力され, Z 軸方向電極位置決めが行われる. ローカルアクチュエータは, 加工液を攪拌し, 加工屑排出性を改善するために, X, Y 平面内で電極を駆動する.

#### 第4章 高応答多自由度電極駆動による形彫り放電加工における仕上げ加工の高速化

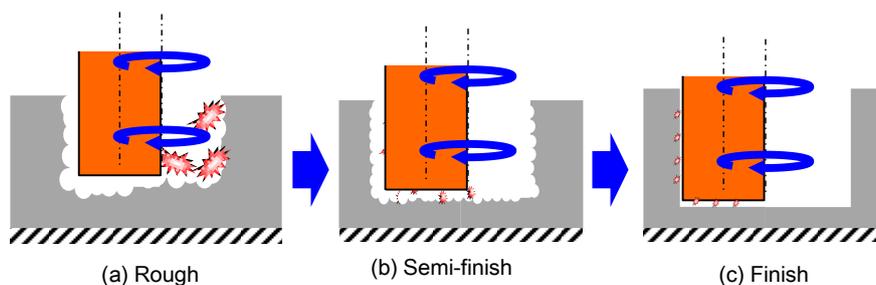


Fig. 4.33 Procedure of die-sinking EDM

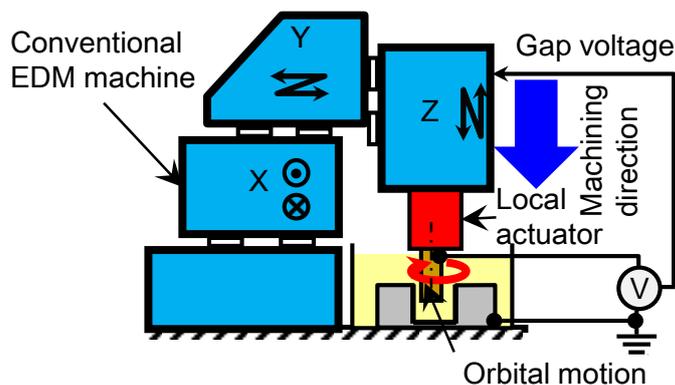


Fig. 4.34 Configuration of EDM system

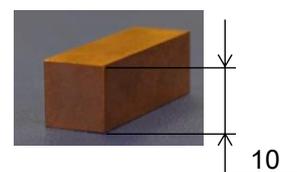


Fig. 4.35 Photograph of electrode

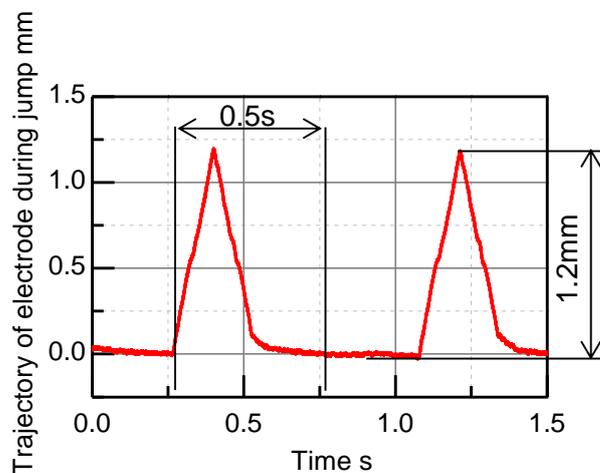


Fig. 4.36 Trajectory of electrode during jump motion

Table 4.6 Input parameters of machining conditions

Electrode	Copper
Workpiece	Stainless
Machined depth	0.5mm
Dimension of orbital motion	20 $\mu$ m
Machining area	100mm <sup>2</sup>
Shape of orbital motion	Circle, Square
Electrode wear mode	Super low
Surface roughness	2 $\mu$ m( $R_{max}$ )
Finishing	Satin finished surface

## 第4章 高応答多自由度電極駆動による形彫り放電加工における仕上げ加工の高速化

Table 4. 7 Power supply conditions

EDM step	Feed displacement in Z direction $\mu\text{m}$	Power supply circuit [Polarity]	$I_p$ A	$T_{on}$ $\mu\text{s}$	$T_{off}$ $\mu\text{s}$
1	393	Transistor SC [+] Rough	6	96	16
2	411		5.5	64	64
3	426		4.5	64	64
4	439		3.5	64	64
5	452		2.5	32	32
6	463		2.5	16	16
7	473		1.5	16	16
8	481		1	8	8
9	488		1	4	8
10	492	RC circuit PS [-] Finish	2.5	2	8
11	495		2.5	2	4
Total	495				

詳細な加工条件について説明する。電極は、[図4. 35](#)の10×10mm角柱型銅電極を使用し、深さ0.5mmの垂直方向加工を行う。加工物、加工液は、それぞれ、プリハードン鋼（NAK-80, Daido Steel Co., Ltd.）、放電加工用油（EDF-K, Nippon Oil Corporation）を用いた。Z軸方向のジャンプは、放電加工機によって行った。[図4. 36](#)にジャンプの軌跡を示す。ジャンプの、高さ、所要時間、周期はそれぞれ1.2mm, 0.5s, 0.85sである。ジャンプ所要時間は、5自由度制御型磁気浮上ローカルアクチュエータによるジャンプと比較して、10倍程度である。

電源条件は、形彫り放電加工機に搭載された、加工条件探索システム（E.S.P.E.R. II, Mitsubishi Electric Corporation）を用いて決定した。これは、加工前に、加工終了時の加工深さ、面粗さ、電極の材料・形状・寸法、加工物材料、揺動寸法、加工液の種類などの情報を、加工機モニタから入力すると、データベース化された加工ノウハウに基づいた、適切な電源条件を、放電加工機が自動的に決定する機能である。[表4. 6](#)に、加工条件エキスパートへ入力した加工条件、[表4. 7](#)に入力条件から決定された電源条件を示す。[表4. 6](#)中、 $R_{max}$ は廃止された規格であるが、加工機の設定上、本パラメータを使用した。

電源条件は、11段階に分かれており、既存放電加工機のZ軸ステージの総送り量が、

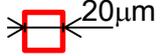
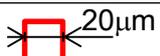
#### 第4章 高応答多自由度電極駆動による形彫り放電加工における仕上げ加工の高速化

表4. 7, 第2列の値に到達すると, 電源設定は自動的に次のステップへ切り替わる. 表中,  $I_p$ ,  $T_{ON}$ および $I_{OFF}$ は, それぞれ, 放電電流, 放電パルスの継続時間, および休止時間を示す. 単発放電のエネルギーは,  $I_p$ および $T_{ON}$ を大きく設定することによって増加するため<sup>(54)</sup>, 電源設定は, 加工が進むに従い, エネルギーが絞られることが表から確認できる.

電源回路方式は, 9段目まではトランジスタ回路 (SC回路), 10, 11段目はRC回路 (PS回路)となり, 電極の極性は, SC回路では正極性, PS回路では負極性である. 本節で利用した形彫り放電加工機では, PS回路が梨地面仕上げ加工用回路として選択されるため, 本研究においても, 10段, 11段目を仕上げ加工と定義し, 仕上げ加工に要した加工時間を以下に示す加工方法ごとに比較した.

表4. 8に揺動方法ごとに分類した加工方法を示す. 加工方法1では, 揺動は行わなかった. 加工方法2および3は, 既存放電加工機のX, Y軸ステージを駆動し, それぞれ円, 四角揺動を行った. 揺動寸法はいずれも,  $20\mu\text{m}$ とした. 揺動時, 加工機ステージのXY軸方向移動速度は,  $24\text{mm}/\text{min}$ .であり, 揺動軌道1周分の距離, およびステージの移動速度から算出される, 揺動周波数は, 加工方法2(円), 加工方法3(四角)で, それぞれ  $0.8\text{Hz}$ ,  $0.5\text{Hz}$ である. 加工方法4~7では, ローカルアクチュエータを用いて揺動を実施した. 揺動寸法はいずれの場合も $20\mu\text{m}$ であり, 周波数は, 円では $1\sim 150\text{Hz}$ , 正方形では,  $1$ および $50\text{Hz}$ とした. 揺動は, 加工開始から実施した.

Table 4. 8 Machining methods

Machining method	Orbital motion	Frequency	Amplitude of orbital motion
Method 1	-	-	-
Method 2	Conventional EDM machine	$0.5\text{Hz}$	
Method 3		$0.8\text{Hz}$	
Method 4	Local actuator	$1\text{Hz}$	
Method 5		$50\text{Hz}$	
Method 6			
Method 7		$150\text{Hz}$	

### 4.6.6 実験結果

図4.37に、仕上げ加工の加工時間を示す。各加工方法での実験は、一回ずつ行った。加工時間は、それぞれの加工方法で、1)292秒、2)274秒、3)225秒、4)210秒、5)289秒、6)223秒、7)86秒となり、150Hzで円揺動を実施する、加工方法7で最短となった。円揺動を行う加工法では、周波数の増加に伴い加工時間の短縮されていることが確認可能である。ただし、四角揺動については、加工法3、6の比較から、揺動周波数が増加するに伴い、仕上げ加工時間が延長した。この原因として、電極の高速かつ非連続的な運動に起因して、加工液の澱みが発生し、加工屑が局所的に滞留したことや、電極先端部の振動などが考えられるが、詳細は不明である。数値流体解析を用いた、揺動中の加工液流れの調査、揺動時の電極先端部の変位計測などが、今後は必要である。

図4.38に加工穴底面の平均粗さ $R_a$ を示す。底面粗さは、触針式表面形状測定器(SurfTest SJ-400, Mitutoyo CORP.)を用いて、加工穴中心部4mmの直線距離を計測した。7通りの加工方法では、それぞれの加工方法において粗さに大きな差異は現れなかった。このため、仕上げ加工の高速化に有効である電極の高速揺動は、加工精度に対しては影響を与えないと考えられる。

図4.39に、高速揺動の効果が確認された加工方法7、および揺動を実施しなかった加工法1において、電源条件10段目での、短時間のフィードバック電圧波形を示す。図中、破線で囲った時間帯において、数百ミリ秒継続して極間電圧が0Vとなるのは、形彫り放電加工機が、Z軸方向ジャンプ中、放電電流の供給を停止するよう、電源制御したことによる。また、その後の数百ミリ秒の持続した開放状態は、電極と加工物の衝突防止のため、加工機ステージが、加工物へ接近する移動速度を制限したことにより発生した。加工法7では加工法1と比較して、フィードバック電圧値が、0.75Vから2.0Vの範囲で振動していることが確認できる。図4.40は、放電加工後の加工物の写真である。加工面には、加工液が炭化した絶縁性の生成物(タール)<sup>(96)</sup>が滞留していることが確認できる。本章の加工制御システムでは、極間電圧が目標電圧値に一致するよう、電極が軸方向に駆動される。図4.41のように、タールが生成した状況では、極間電圧が目標値に一致した状態で電極が停止し、放電はタールに阻害され、持続発生が困難となる。一方、揺動によって、加工屑の攪拌が促進されると、放電が継続して発生し、絶縁破壊による極間電圧の降下、絶縁回復による電圧の上昇が繰り返されるため、図4.39のようにフィードバック電圧は目標値を中心に振動する。

フィードバック電圧の振動を詳細に調査するため、10段目の電源条件での加工におい

## 第4章 高応答多自由度電極駆動による形彫り放電加工における仕上げ加工の高速化

て、 $V_{fb}$ が0.75Vから2.0Vまでの、1.25Vの範囲内にあるデータを抽出し、これらの0.125Vごとの分布を計算した結果を図4.42に示す。いずれの場合も、1.125Vから1.375Vまでに、ピークがあるが、加工時間が最も短縮された加工方法7では、その他の加工方法と比較して、ピーク値が小さくなった。

本節で実施した仕上げ加工では、加工時間が最も短くなった、150Hz円揺動では、フィードバック電圧波形形状が、その他の方法と比較して、異なることが確認された。形彫り放電加工の仕上げ加工において、極間の放電電圧と加工速度の関係については、今後、詳細に検討する必要があると考えられる。

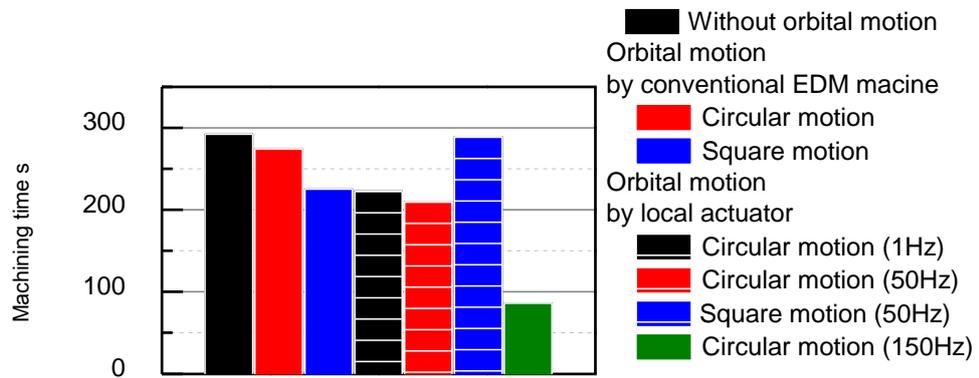


Fig. 4.37 Machining time

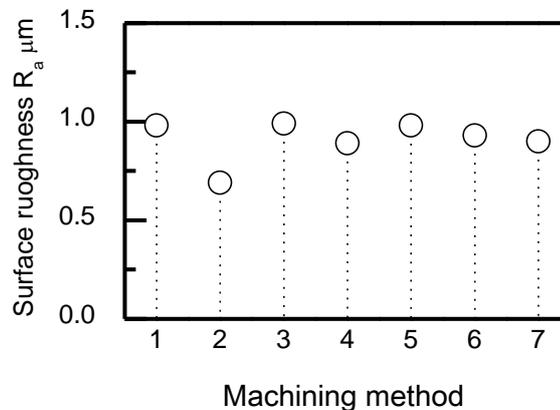


Fig. 4.38 Surface roughness

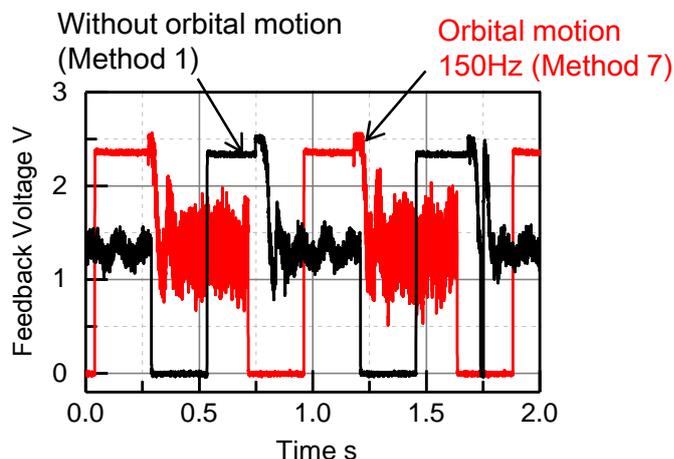


Fig. 4.39 Feedback voltage



Fig. 4. 40 Photograph of workpiece

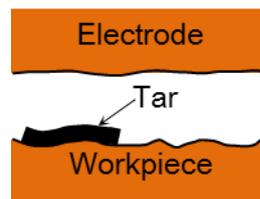


Fig. 4. 41 Contamination of tar

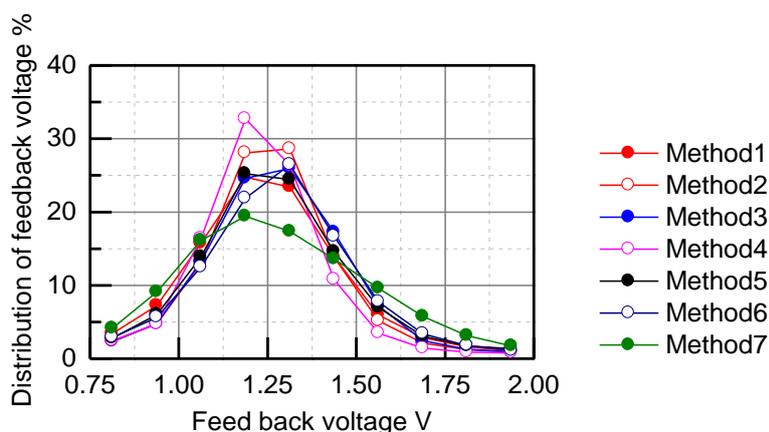


Fig. 4. 42 Distribution of feedback voltage

## 4.7 結 言

本章では、高速・高精度磁気駆動ローカルアクチュエータを用いた、形彫り放電加工における仕上げ加工の高速化について検討を行った。はじめに、予備実験として第2章で用いた、高応答・高精度5自由度制御型磁気浮上アクチュエータによる、電極駆動法を検討し、次に、形彫り放電加工の実用化を目指して、電極を回転方向に拘束可能で、構造が簡易な、2軸制御型高速アクチュエータを用いた加工実験を実施した。本章で得られた結果を以下に示す。

- 直径 $\phi 2\text{mm}$ の円柱型銅電極を用いた放電加工では、高応答・高精度極間距離調整、ジャンプ、揺動の複合効果により、加工穴深さ、電極送り速度は最大となり、3サンプルの平均値はそれぞれ、 $73\mu\text{m}$ 、 $0.072\mu\text{m/s}$ であった。

#### 第4章 高応答多自由度電極駆動による形彫り放電加工における仕上げ加工の高速化

- 揺動の直径を拡大すると、加工穴深さ、電極送り量が改善されたが、揺動直径が、 $15\mu\text{m}$ ～ $20\mu\text{m}$  の領域では、これらが減少する傾向が確認された。揺動直径が増加すると、加工屑が効果的に排出される一方で、加工穴側面への放電頻度が増加し、径方向に対しても、加工物の除去がなされることが考えられる。
- 揺動直径  $15\mu\text{m}$  に固定し、周波数を変化させる加工実験では、周波数  $1\text{Hz}$  の低速揺動を行った場合は、 $20\text{Hz}$  以上で実施した揺動と比較して、穴深さ、送り速度が小さくなった。揺動を周波数数十  $\text{Hz}$  以上で行うことが、加工高速化では重要であると考えられる。
- 2軸ローカルアクチュエータによる、形彫り放電加工仕上げ加工の検討では、揺動を行わない場合と比較して、 $150\text{Hz}$  の高速円揺動を付加させた場合では、仕上げ加工に要する時間が、 $292$  秒から  $86$  秒に短縮されることが確認された。

下記は、本章における課題である。

- 2軸ローカルアクチュエータを用いた加工において、四角揺動について、仕上げ加工時間の改善は確認できなかった。この原因の解明に対して、加工中の電極先端部の振動の調査、数値流体力学解析を用いた、揺動中の加工液流れの解析が必要である。
- アクチュエータが把持できる電極の質量が数十グラムであったが、様々な形彫り放電加工用電極に対応するため、大質量の電極を駆動可能な、高応答ローカルアクチュエータの開発が望まれる。
- 揺動により、加工穴側面放電が発生し、径方向に対して加工物が除去される。このような場合、電極側面-加工穴側面間での短絡頻度も増加すると考えられるため、加工方向 ( $Z$  軸方向) と斜め方向の電極退避を、今後は検討する必要がある。

## 第5章 結論

### 5.1 本論文のまとめ

近年、電気・電子、光学、医療、精密機器、自動車等において、高度な機能を有する製品開発が進んでおり、従来の加工技術では対応が困難な、新しい生産技術の開発および発展が強く望まれている。放電加工は、導電性材料であれば硬さに関係なく加工が可能、微小工具の実現、適用が比較的容易などの利点を有する一方で、既存放電加工機の駆動軸応答性が低いこと、加工屑の滞留により、加工速度が低下すること、工具電極の取り付け誤差に起因する回転電極のふれまわりや電極の消耗によって、加工精度が低下することが課題として挙げられる。以上のような課題に対して、本研究では、放電穴加工の高速・高精度化、および形彫り放電加工の仕上げ加工の高速化を目的として、高応答・高精度多自由度ローカルアクチュエータを用いた放電加工を検討した。具体的には、各章において以下の結論を得た。

第2章「高応答多自由度電極駆動による放電穴加工の高速化」では、細穴加工の高速化を目的とした。はじめに、5自由度制御型磁気浮上ローカルアクチュエータを既存放電加工機に組み合わせ、両位置決め機構を協調動作させる放電加工システムを構築した。また、極間距離を高応答・高精度に調整し、加工穴中に滞留した加工屑の排出を促進するため、電極を加工面から高速に一旦退避し、再接近させる軸方向ジャンプと、径方向に円軌道を描くように駆動する高速揺動を複合的に組み合わせる加工法の加工速度への影響を検討した。

直径の異なる2種類の円柱型電極を用いた放電穴加工において、既存放電加工機単体と比較した加工速度の向上率を表5.1に示す。 $\phi 1\text{mm}$ の電極では、ジャンプおよび揺動による加工屑排出の効果が大きく、 $\phi 0.1\text{mm}$ の電極では、極間距離の高応答・高精度調整の効果が大きく現れた。これは、電極寸法が大きい場合は、電極駆動によって加工液流れが発生しやすく、加工屑排出のための電極駆動がより有効であること、また、電極の寸法が小さい場合は、加工方向に対する極間距離の変化が大きいため、より高応答かつ高精度な極間距離が要求されることによると考えられる。また、 $\phi 1\text{mm}$ の電極による加工では、ジャンプ中の加工屑の挙動を調査するために、数値流体力学解析を用いて、加工液流れの数値シミュレーションを行った。解析の結果、1度のジャンプにおいても、放電ギャップに滞留した加工屑の一部が、加工穴外へ排出されることが確認された。

Table 5. 1 Progress of removal rate (times)

Diameter of electrode	$\phi 1$	$\phi 0.1$
High response electrode positioning	1.9	5.3
Jump	2.9	6.2
Orbital motion	1.7	6.5
Jump and orbital motion	4.5	6.6

以上より、第2章では、磁気浮上ローカルアクチュエータによる、極間距離の高応答・高精度調整および加工屑排出のためのジャンプ、揺動の適用によって、放電穴加工の高速化を実現した。残された課題として、複数回のジャンプや揺動中の数値流体力学解析が挙げられる。

第3章「高応答多自由度電極駆動による放電穴加工の高精度化」では、細穴加工の高精度化を目的とした。このため、電極の取り付け誤差によって発生する、回転電極のふれまわりを抑制する方法を提案した。補正方法の原理検証実験では、50rpm から 1,000rpm までの回転領域において、併進方向では 100 $\mu\text{m}$  のふれまわりを数 $\mu\text{m}$  に、傾き方向では 2mrad のふれまわりを半分程度まで低減することに成功した。また、 $\phi 0.5\text{mm}$  の電極を使用した、深さ 2mm の垂直穴放電加工では、ふれまわり補正によって、加工穴直径が 670 $\mu\text{m}$  から 593 $\mu\text{m}$  に縮小した。また、ふれまわりの補正によって、電極の振動が抑制されるため、補正を行わない場合と比較して、加工速度が低下することが明らかとなった。

工具電極の消耗によって電極先端が細くなり、加工穴の断面形状がテーパ状になる問題に対して、5自由度制御型磁気浮上ローカルアクチュエータの多自由度駆動を用いた、電極のすりこぎ運動によって、加工穴形状を修正する方法を提案し、垂直穴加工において、その効果の検討を行った。テーパ穴補正を適用した放電穴加工では、加工穴出入口における、直径の差分が 104 $\mu\text{m}$  から 84 $\mu\text{m}$  へ改善された。

以上より、第3章では、磁気浮上ローカルアクチュエータによる、電極の多自由度運動によって、回転電極のふれまわりの影響を低減し、放電穴加工の高精度化を実現した。残された課題として、テーパ補正可能量が不十分で、加工穴入口と出口直径の差が生じたため、傾き方向に対して、より大きな位置決め範囲を有するローカルアクチュエータの開発が挙げられる。

第4章「高応答多自由度電極駆動による形彫り放電加工における仕上げ加工の高速化」では、形彫り放電加工における、仕上げ加工の高速化を目的とした。まず、5自由度制御型磁気浮上ローカルアクチュエータを使用した、電極の数十 Hz 以上の高周波揺動、数百 Hz の

高周波微小振動(ディザ), 高速ジャンプ, 周波数帯域 200Hz 以上の高応答・高精度極間距離調整を, 単独あるいは複合的に付加させた放電加工を実施し, 高応答・高精度極間距離調整, ジャンプ, 揺動を組み合わせた場合において加工穴深さ, 電極送り速度ともに最大となった. 更に, 揺動のパラメータと加工速度の関係を調査するため, 揺動の直径と周波数をそれぞれ 1~300Hz, 5~20 $\mu\text{m}$  の範囲で変化させ, 高速化に適した揺動パラメータを検討した. 周波数, 直径が 50Hz, 15 $\mu\text{m}$  の時, 電極送り速度はそれぞれ 73 $\mu\text{m}$ , 0.072 $\mu\text{m}/\text{s}$  と最大となった.

また, より実用的な形彫り放電加工において, 仕上げ加工の高速化を実現するため, 電極を軸方向に回転拘束可能な2軸制御型高速ローカルアクチュエータと, 電極の送り量に応じて, 加工電源設定を粗加工から仕上げ加工まで段階的に切り替える, 汎用的な形彫り放電加工プログラムを用いた放電加工を実施し, 高速揺動の効果を検討した. ここでは, 現在までに実施した円揺動のほか, 電極形状に対応した, 四角揺動を適用した.

加工実験の結果, 円揺動では, 揺動を行わない場合と比較し, 150Hz の高速円揺動を付加させたとき, 仕上げ加工時間が, 292 秒から 86 秒に改善された. しかし, 四角揺動では, 揺動周波数が増加するに伴い, 仕上げ加工時間が長くなった. この原因として, 電極の高速かつ非連続的な運動に起因する加工液の澱みに伴う加工層の局所的な滞留, 電極先端部の振動などが, が考えられるが, 詳細は不明である. 数値流体解析を用いた, 揺動中の加工液流れの調査, 揺動時の電極先端部の変位の計測などが, 今後は必要である.

## 5.2 今後の課題

### (1) 数値流体力学解析

第2章で検討した, 加工液流れ解析は, 1回のジャンプのみについて実施した. ジャンプ中の加工現象をより詳細に検討するため, 複数回のジャンプ中の解析が必要である. また, 本研究で実施した, ディザ, 揺動中における加工液の挙動を調査することも課題である. 第4章では, 高周波四角揺動の効果が確認されなかった. この原因として, 電極の高速かつ非連続的な運動に起因する加工液の澱みに伴う加工層の局所的な滞留が考えられるが, 詳細は不明である. 様々な形状の揺動に対して, 数値流体力学解析を行う.

### (2) ジャンプ波形の検討

ジャンプの目標値は, 電極がジャンプを開始し, 最大高さまでに至る時間および, ジャンプ最大高さからジャンプ開始位置に至るまでの時間が等しいような, 二等辺三角形形状の波形としたが,

波形形状と加工屑排出性の関係の検討は実施していない。加工屑排出性向上について、より効果的なジャンプ波形形状の検討をする必要があると考えられる。

### (3) 加工中の極間状態の可視化

導電性を有するSiC 単結晶材料などの、透明な加工物を用い、加工中の極間状態を観察するとともに、揺動、ジャンプの加工屑排出性改善の効果を確認する。

### (4) テーパ形状の補正

テーパ形状の補正では、ローカルアクチュエータの位置決め範囲の限界から、加工穴出入口における直径の差分を取り除くことは出来ず、その補正効果は不十分であった。傾き方向に広い位置決め範囲を有する電極位置決め機構による、本研究で提案した手法を用いたテーパ形状補正が課題である。

### (5) ふれまわり補正加工における加工速度の改善

ふれまわり補正では、加工速度が低下した。これは、ふれまわり補正によって、加工屑攪拌効果が低下したことが原因であると考えられる。ふれまわり補正中、電極軸方向ジャンプやディザを併用することによって、加工速度の低下を抑制する。

### (6) 電極退避方向の検討

揺動により、加工穴側面放電が発生し、径方向に対して加工物が除去される。このような場合、電極側面-加工穴側面間での短絡頻度も増加すると考えられるため、加工方向(Z 軸方向)と斜め方向の電極退避を、今後は検討する必要がある。

### (7) 形彫り放電加工実用化の検討

本研究で検討した、形彫り放電加工実用化の研究では、アクチュエータが把持できる電極の質量が数十グラムであった。様々な形彫り放電加工用電極に対応するため、大質量の電極を駆動可能な、高応答ローカルアクチュエータの開発が課題である。

## 参考文献

- (1) 山本雄士, 鈴木浩文, 沖野正, 森脇俊道, 福田将彦, 西岡昌彦, 古嶋洋一, “マイクロ非球面の超精密研削に関する研究 (第4報) —XYZ 同時3軸制御の研削点固定方式斜軸研削による高精度化—”, 精密工学会誌, Vol. 72, No. 1 (2006), pp. 84-88.
- (2) 西塚公次, 新井章生, “高精度光学レンズの研磨—レンズ磨き(研磨)技能の伝承—”, 精密工学会誌, Vol. 72, No. 1 (2006), pp. 17-20.
- (3) 天野啓, “光学部品用金型を製作する加工技術”, ツールエンジニア, Vol. 50, No. 13 (2009), pp. 28-31.
- (4) 森脇俊道, “工作機械をめぐる最近の話題”, NTN TECHNICAL REVIEW, No. 74 (2006), pp. 2-7.
- (5) 森田浩充, 山口哲司, 毛利尚武, “レーザ・放電複合加工法による微細穴高速加工の研究—燃料噴射ノズルへの適用—”, 電気加工学会誌, Vol. 44, No. 106 (2010), pp. 45-51.
- (6) 木野晴喜, “微細穴あけ加工と精密金型加工のための新概念小径工具”, ツールエンジニア, Vol. 50, No.13 (2009), pp. 44-45.
- (7) 北野彰彦, “航空機の軽量化を支える炭素繊維複合材料”, 化学と教育, Vol. 59, No. 4 (2011), pp. 226-229.
- (8) 国枝正典, “放電加工の基礎と将来展望 I”, 精密工学会誌, Vol. 71, No. 1 (2005), pp. 58-62.
- (9) 橋本浩明, 国枝正典, “分光分析による放電加工アークプラズマの温度変化の観察”, 電気加工学会誌, Vol. 31, No. 68 (1997), pp. 32-40.
- (10) 国枝正典, “放電加工プロセスのシミュレーション技術の現状と動向”, 計測と制御, Vol. 41, No. 11 (2002), pp. 787-793.
- (11) 増沢隆久, “放電微細加工の問題点”, 生産研究, Vol. 27, No. 7 (1975), pp. 21-27.
- (12) 齋藤長男, “放電加工の研究開発, 事業化と思い出となる次なる技術革新”, 精密工学会誌, Vol. 75, No. 1 (2009), p. 36.
- (13) 竹内芳美, 青山藤詞郎, 新野秀憲, 光石衛, 国枝正典, 今村正人, 三井公之, “機械加工ハンドブック”, 朝倉書店, (2006)
- (14) 国枝正典, “放電加工の基礎と将来展望 II”, 精密工学会誌, Vol. 71, No. 2 (2005), pp. 189-194.
- (15) 増沢隆久, “マイクロ放電加工”, 精密工学会誌, Vol. 68, No. 2 (2002), pp. 180-184.
- (16) 超精密加工編集委員会編, “超精密加工の基礎と実際”, 日刊工業新聞社, (2006)
- (17) 岩崎健史, “3Dデータとグラフィットの活用による生産性向上”, ツールエンジニア, Vol. 49, No. 12 (2008), pp. 30-31.

- (18) Chen-Chun Kao and Albert J. Shih, "Design and tuning of a fuzzy logic controller for micro-hole electrical discharge machining", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 10, Issue 2 (2008), pp. 61-73.
- (19) 馬博驍, 柴田隆行, 村上良彦, 堀内宰, 野村光由, "微小径ドリル加工に関する研究", *精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集*, (2008), pp. 579-580.
- (20) 古谷克司, 平岡大輔, 村瀬靖男, 武田幸三, 村上剛, "アザラシ型機構を用いた細穴放電加工用小型電極送り機構", *精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集*, (2009), pp. 785-786.
- (21) <http://www.mitsubishielectric.co.jp>
- (22) 喜多祐樹, 村井正生, 川原章義, 櫻井章博, "ワイヤ放電加工による仕上げ加工—高精度仕上げ加工—", *電気加工学会誌*, Vol. 36, No. 82 (2002), pp. 39-43.
- (23) T. Masuzawa, M. Fujino, K. Kobayashi, T. Suzuki and N. Kinoshita, "Wire Electro-Discharge Grinding for Micro-Machining", *Annals of the CIRP*, Vol. 34, Issue 1 (1985), pp. 431-434.
- (24) 山崎実, 鈴木岳美, 森紀年, 寺西義一, 国枝正典, "加工穴を利用した微細放電加工法の微細化限界", *電気加工学会誌*, Vol.42, No.100 (2008), pp. 51-57.
- (25) Marco Boccadoro and D.F. Dauw, "About the Application of Fuzzy Controllers in High-Performance Die-Sinking EDM Machines", *Annals of the CIRP*, Vol. 44, Issue 1 (1995), pp. 147-150.
- (26) 森田温, 尾崎好雄, "形彫り放電加工機のファジィ制御", *精密工学会誌*, Vol. 57, No. 6 (1991), pp. 968-971.
- (27) 加藤木英隆, 中川孝幸, 赤松浩二, 小川元, "形彫放電加工機EAシリーズによる高精度金型加工", *三菱電機技法*, Vol. 75, No.7 (2001), p. 449.
- (28) 安友一, "放電加工およびプロセスチェーンのシステム化—スイス・シャルミー放電加工機及び周辺機器によるインテグレーション—", *電気加工学会誌*, Vol. 39, No. 90 (2005), pp. 2-5.
- (29) 米倉竜二, "段取り作業のシステム化", *電気加工学会誌*, Vol. 39, No. 90 (2005), pp. 6-8.
- (30) 福澤康, 谷貴幸, 岩根英二, 毛利尚武, "放電加工機を用いた絶縁性材料の加工", *電気加工学会誌*, Vol. 29, No. 60 (1995), pp. 11-21.
- (31) 古館周, 国枝正典, "気中ワイヤ放電加工に関する基礎的研究", *精密工学会誌*, Vol. 67, No. 7 (2001), pp. 1180-1184.
- (32) 中奥洋, 増沢隆久, 藤野正俊, "焼結ダイヤモンドの微細放電加工", *電気加工学会誌*, Vol. 39, No. 91 (2005), pp. 24-28.
- (33) 毛利尚武, 齋藤長男, "表面改質放電加工", *精密工学会誌*, Vol. 64, No. 12 (1998), pp. 1715-1718.

- (34) 早川伸哉, ORI Ricardo Itrio, 糸魚川文宏, 中村隆, 松原十三生, “微細放電付着加工による3次元形状創成法”, 精密工学会誌, Vol. 66, No. 12 (2000), pp. 1943-1947.
- (35) 石田徹, 竹内芳美, “圧縮コイルばねとワイヤを用いた曲がり穴放電加工用電極送り機構の開発”, 精密工学会誌, Vol. 65, No. 7 (1999), pp. 982-986.
- (36) 石田徹, 竹内芳美, “放電加工を用いた断面変化穴の創成”, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2003), pp. 596-597.
- (37) 富本直一, 真柄卓司, 湯澤隆, 渡辺尚紀, “微細創成放電加工”, 精密工学会誌, Vol. 64, No. 12 (1998), pp. 1727-1730.
- (38) 増沢隆久, 藤野正俊, “小穴加工における放電加工の能率”, 生産研究, Vol. 28, No. 11 (1976), pp. 56-58.
- (39) 今井祥人, “放電加工機における加工制御”, 計測と制御, Vol. 41, No. 11 (2002), pp. 799-802.
- (40) 佐藤達志, “ワイヤ放電加工における高精度化と自動化”, 精密工学会誌, Vol. 71, No. 5 (2005), pp. 549-552.
- (41) 今城昭彦, 家澤雅宏, 富沢正雄, 種田淳, 金谷隆史, “相対変位フィードバックによる形彫放電加工機の高速度・高精度化”, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 63, No. 609 (1997), pp. 71-77.
- (42) 堤正臣, “工作機械における計測/制御技術の現状と動向”, 計測と制御, Vol. 41, No. 11 (2002), pp. 765-768.
- (43) 阿久根光明, 中川孝幸, 毛呂俊夫, “放電加工における最新駆動制御技術の応用”, 日本機械学会第3回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, (2001), pp. 249-250.
- (44) 荻田充二, “リニアモータにおける高性能化技術”, 精密工学会雑誌, Vol. 61, No. 3 (1995), pp. 347-350.
- (45) 金子雄二, 山田久典, 豊永竜生, 正田和男, “リニアモータを使った放電加工性能”, 電気加工学会誌, Vol. 33, No. 74 (1999), pp. 32-41.
- (46) 澤崎隆, 布施永了, “リニアモータ駆動ワイヤ放電加工機・ハイスピードミーリングセンタによる多軸加工を活用した最新事例”, 素形材, Vol.49, No.6 (2008), pp.12-17.
- (47) Albert Wen-Jeng, Hsue Chih-Hug Chung, “Control Strategy for High Speed Electrical Discharge Machining (Die-sinking EDM) Equipped with Linear Motors”, Proceedings of International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, (2009), pp. 326-331.
- (48) 増沢隆久, 田中勝也, 藤野正俊, “可動式コイルヘッドによる放電微細加工の高速度化”, 電気加工学会誌, Vol. 8, No. 16 (1975), pp. 43-52.
- (49) 今井祥人, 佐竹彰, 種田淳, 小林和彦, “高速電極駆動装置による放電加工速度の改善”, 電気加工学会誌, Vol. 27, No. 55 (1993), pp. 23-30.
- (50) 土屋政光, 金子勉, 佐藤清侍, “ジャンプフラッシング放電加工に関する研究(第

- 1 報) ”, 精密工学会誌, Vol. 56, No. 5 (1990), pp. 849-854.
- (51) 古谷克司, 毛利尚武, 樋口俊郎, “細穴放電加工用電極送り機構の比較”, 電気加工学会誌, Vol. 28, No. 59 (1994), pp. 41-50.
- (52) 窪田真一郎, 宇野義幸, 栗林宏和, 横溝精一, “YAGレーザを併用した超硬合金への微細深穴放電加工”, 電気加工学会誌, Vol. 35, No. 78 (2001), pp. 19-25.
- (53) 今井祥人, 鈴木俊雄, 河津秀俊, 後藤昭弘, “使いこなす放電加工”, 技術評論社, (2010).
- (54) 向山芳世, “放電加工マニュアル”, 大河出版, (1989).
- (55) <http://www.kochi-tech.ac.jp/>
- (56) 国枝正典, “放電加工における放電点分布の観察”, 精密工学会誌, Vol. 57, No. 6 (1991), pp. 941-944.
- (57) 催小新, 増沢隆久, “仕上げ放電加工の新しいフラッシング法”, 生産研究, Vol. 43, No. 11 (1991), pp. 489-496.
- (58) 山下弘之, 西川隆敏, “精密加工に関する研究 (第8報) 高アスペクト比の微細穴加工法の検討”, 広島県立西部工業技術センター研究報告, No. 44 (2001), pp. 16-19.
- (59) 今井祥人, “放電加工・レーザ加工における加工制御に関する研究”, 東京工業大学学位論文, (1998).
- (60) Eberhard Bamberg and Sumet Heamawatanachai, “Orbital electrode actuation to improve efficiency of drilling micro-holes by micro-EDM”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, Issue 4 (2009), pp. 1826–1834.
- (61) 河田耕一, 佐藤健夫, 正木健, 増沢隆久, “微細放電加工の研究 (第1報) - 基本性能の実現 - ”, 電気加工学会誌, Vol. 28, No. 57 (1994), pp. 32-42.
- (62) Dongjue He, Tadahiko Shinshi, Xiaoyou Zhang, Takashi Yuzawa and Tatsushi Sato, “Improving the Speed of Small Deep Hole Electrical Discharge Machining by Combining Rotation of the Electrode with a Rapid-Response”, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 5, No. 4 (2011), pp. 284-294.
- (63) M. R. Shabgard, B. Sadizadeh and H. Kakoulvand, “The Effect of Ultrasonic Vibration of Workpiece in Electrical Discharge Machining of AISI H13 Tool Steel”, Proceedings of World Academy of Science : Engineering and Technology, Vol. 52 (2009), pp. 392-396.
- (64) M. Ghoreishi and J. Atkinson, “A Comparative Experimental Study of Machining Characteristics in Vibratory, Rotary and Vibro-rotary Electro-discharge Machining”, Journal of Materials and Processing Technology, Vol. 120, Issue 1 (2002), pp. 374-384.
- (65) Takashi Endo, Takayuki Tsujimoto and Kimiyuki Mitsui, “Study of vibration-assisted micro-EDM The effect of vibration on machining time and stability of discharge”, Precision Engineering, Vol. 32, Issue 4 (2008), pp. 269-277.
- (66) Changshui Gao and Zhengxun Liu, “A Study of Ultrasonically Aided Micro-electrical

- discharge Machining by the Application of Workpiece Vibration”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 139, Issue 1 (2003), pp. 226–228.
- (67) R. Garn, A. Schubert and H. Zeidler, “Analysis of the Effect of Vibrations on the Micro-EDM Process at the Workpiece Surface”, *Precision Engineering*, Vol. 35, Issue 2 (2011), pp. 364–368.
- (68) Tong Hao, Wang Yang and Li Yong, “Vibration-assisted Servo Scanning 3D Micro EDM”, *Journal of Micromechanics and Micro engineering*, Vol. 18, No. 2 (2008), pp. 1-8.
- (69) 小川仁, 板東和宏, 常本佳生, “放電加工における加工液超音波振動援用の効果 (第1報) - 超音波振動援用微細穴あけ加工に関する研究 -”, *電気加工学会誌*, Vol. 41, No. 98 (2007), pp. 163-168.
- (70) D.T. Pham, S.S. Dimov, S. Bigot, A. Ivanov and K. Popov, “Micro-EDM—Recent Developments and Research Issues”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 149, Issue 1 (2004), pp. 50–57.
- (71) <http://www.nakano-steel.co.jp/>
- (72) <http://www.sfc-hp.co.jp/>
- (73) H.S. Lim, Y.S. Wong, M. Rahman and M.K. Edwin Lee, “A Study on the Machining of High-aspect Ratio Micro-structures Using Micro-EDM”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140, Issue 1 (2003), pp. 318–325.
- (74) 谷貴幸, 後藤啓光, 李珠, 毛利尚武, “走査放電加工による微細軸成形法”, *電気加工学会誌*, Vol. 43, No. 104 (2009), pp. 187-193.
- (75) 香川勝一, “段付き電極によるストレート微細穴放電加工に関する研究”, *東海大学紀要* Vol. 38, No. 1 (1998), pp. 273-279.
- (76) C. Diver, J. Atkinson and H. J. Helm, “Micro-EDM Driving of Tapered Holes for Industrial Applications”, *Journal of Processing Technology*, Vol. 149, No. 1 (2004), pp. 296-303.
- (77) 樋口俊郎, “磁気軸受とその制御系”, *生産研究*, Vol. 37, No. 11 (1985), pp. 469-476.
- (78) H-P Kabelitz, “Turbo molecular vacuum pumps with a new magnetic bearing concept”, *Vacuum*, Vol. 38, No. 8 (1988), pp. 673-676.
- (79) Xiaoyou Zhang, Tadahiko Shinshi, Lichuan Li and Akira Shimokohbe, “A combined repetitive control for precision rotation of magnetic bearing”, *Precision Engineering*, Vol. 27, No. 3 (2003), pp. 273–282.
- (80) Stephen J. Ludwick, David L. Trumper and Michael L. Holmes, “Modeling and Control of a Six Degrees-of-Freedom Magnetic/Fluidic Motion Control Stage”, *IEEE Transactions on Control System Technology*, Vol. 4, No. 5 (1996), pp. 553-564.
- (81) Yoshihito Imai, Takayuki Nakagawa, Hidetaka Miyake, Hirofumi Hidai and Hitoshi Tokura, “Local actuator module for highly accurate micro-EDM”, *Journal of Materials*

- Processing Technology, Vol. 149, No. 1 (2004), pp. 328-333.
- (82) 森本 貴景, 進士 忠彦, 中井 孝洋, 福岡 輝章, “レーザ偏心加工に用いる磁気・静圧ハイブリッドレンズ駆動アクチュエータ”, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 78, No. 794 (2012), pp. 239-252.
- (83) 何冬覚, 森本貴景, 進士忠彦, 中井孝洋, 藤川周一, “レーザ加工用高速・多自由度磁気浮上アクチュエータ”, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2012), pp. 7-8.
- (84) Xiaoyou Zhang, Tadahiko Shinshi, Go Kajiwara and Akira Shimokohbe, “A 5-DOF Controlled Maglev Local Actuator and its Application to Electrical Discharge Machining”, Precision Engineering, Vol. 32, No. 4 (2008), pp. 289-300.
- (85) Xiaoyou Zhang, Tadahiko Shinshi, Akira Shimokohbe, Tatsushi Sato, Hidetaka Miyake and Takayuki Nakagawa, “High-speed Electrical Discharge Machining By Using a 5-DOF Controlled Maglev Local Actuator”, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 2, No. 4 (2008), pp. 493-503.
- (86) Dongjue He, Hiroki Morita, Xiaoyou Zhang, Tadahiko Shinshi, Takayuki Nakagawa, Tatsushi Sato and Hidetaka Miyake, “Development of a novel 5-DOF controlled maglev local actuator for high-speed electrical discharge machining”, Precision Engineering, Vol. 34, Issue 3 (2010), pp. 453-460.
- (87) Dongjue He, Tadahiko Shinshi, Xiaoyou Zhang, Takashi Yuzawa, Tatsushi Sato, “Improving the Speed of Small Deep Hole Electrical Discharge Machining by Combining Rotation of the Electrode with a Rapid-Response”, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, Vol. 5, No. 4 (2011), pp. 284-294.
- (88) Yoshihiro Morimoto, Tadahiko Shinshi and Takahiro Nakai, “A TWO-DOF Controlled Lens Drive Actuator for Off-Axis Laser Beam Cutting”, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 6, No. 6 (2012), pp. 875-884.
- (89) 家澤 雅宏, 今城 昭彦, 鈴木 智 “高速微動アクチュエータによる細穴放電加工の高速化”, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 69, No. 680 (2003), pp. 982-988.
- (90) 中野道雄, 井上憲, 山本裕, 原辰次, “繰返し制御”, コロナ社, (1989).
- (91) 吉岡勇人, 橋詰等, 新野秀憲, “高速ナノメートル位置決めテーブルシステムに関する研究: 繰返し制御による超精密位置決めの実現”, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 67, No. 663 (2001), pp. 292-298.
- (92) 中野道雄, 余錦華, 松尾芳樹, “低速回転制御系における角度依存性外乱の新しい除去法”, 電気学会論文誌D, Vol. 112, No. 4 (1992), pp. 409-414.
- (93) 杉本英彦, 鷺田一夫, “直線位相フィルタ型離散時間修正繰返し制御と無駄時間補正型離散時間修正繰返し制御の特性比較”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 36, No. 1 (2000), pp. 60-67.
- (94) O. J. M. Smith, “Posicast control of damped oscillatory systems”, Proceedings of the IRE, Vol.

45, No. 9 (1957), pp. 1249–1255.

(95) Hung, J.Y. , “Feedback control with Posicast”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 50, Issue 1 (2003), pp. 94 – 99.

(96) 後藤明宏, “放電加工における放電生成物の状態制御と利用に関する研究”, 東京大学学位論文, (1999) .

## 謝 辞

東京工業大学，精密工学研究所，進士忠彦教授には，本研究の遂行にあたり，懇切丁寧なご指導を頂きました。投稿論文執筆や国内外の学会発表など，貴重な経験を積ませて頂いたことに，心から感謝申し上げます。ここで学んだことを心の糧に，技術者として，日々精進したいと思う次第です。ありがとうございました。東京工業大学，下河辺明名誉教授には，研究についてご指導を頂く機会はありませんでしたが，研究が順調に進まないとき，進路に悩んだときに頂いた，暖かい言葉に随分と救われた気がします。偉大な先生に巡り会えたことをいつまでも誇りにしてゆきます。

本研究をまとめるにあたり，貴重な御教示と御意見を賜りました東京工業大学，精密工学研究所，北條春夫教授，初澤毅教授，吉岡勇人准教授，東京工業大学，大学院総合理工学研究科，佐藤海二准教授に厚く御礼申し上げます。

東京工業大学，技術部精密工作技術センターの和田選主任技術専門員，長峯靖之センター長をはじめとした皆様には，実験装置の製作に多大なご助力を頂きました。無理なお願いにもいつも快く応じていただき，私は研究を進めることができました。

日本工業大学，機械工学科，張曉友准教授，トヨタ自動車株式会社，森田浩基さん，日本精工株式会社，何冬覚君には，同じ研究チームのメンバーとして，いつも助けていただきました。御三方の御協力なしに，本研究はなかったものと考えております。

真柄卓司氏，佐藤達志氏，今城昭彦氏，藤川周一氏，中川孝幸氏，湯澤隆氏をはじめ，三菱電機株式会社の皆様には，放電加工について，全くの無知である私に対して，多くのご指導をいただきました。また貴社での出張実験は良き思い出となりました。深く御礼いたします。青野祐子さん，阿部充博君，後藤駿治君，山口裕史君，湯本淳史君の優秀な同期に会えたことに感謝いたします。皆との修士の2年間および湯本君と苦楽を共にした5年間を，この先，忘れることはありません。森本貴景君，藤原良元君をはじめ，進士研の学生には，本論文の執筆にあたり，多くの協力をいただきました。ありがとうございました。

東京エレクトロン株式会社，桜井淳平氏，東京工業大学，精密工学研究所，土方亘助教には，研究に対する多くの助言を頂きました。今後の更なる飛躍を期待しております。無量林直子さんには，私が研究室を去った以降も，厚いサポートをして頂きました。どうもありがとうございました。

小澤仁氏，小澤大治氏をはじめ，日産自動車株式会社・要素技術開発本部の皆様には，本研究活動にご理解して頂き，時に温かいお言葉をかけて頂きました。本当にありがとうございました。

私の研究生生活および私生活を応援してくれた両親および故郷の皆様には心から感謝いたします。最後に，ここまで辛抱強く付き合ってくれた妻の佐和，心の拠り所になって頂いた，友人はじめ，すべての関係者の皆様に深く感謝の意を表します。

2014年6月30日