



Title	放電加工の応用による物体内複雑形状創成に関する研究
Author(s)	石田, 徹
Citation	大阪大学, 2003, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2820
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

放電加工の応用による
物体内複雑形状創成に関する研究

石 田 徹

大阪大学大学院 工学研究科
博士（工学）の学位請求論文

2002年11月

放電加工の応用による
物体内複雑形状創成に関する研究

論文審査委員会

主査	竹内	芳美	教授
委員	花崎	伸作	教授
委員	三好	隆志	教授
委員	小野	里雅彦	助教授

放電加工の応用による 物体内部複雑形状創成に関する研究

石 田 徹

概 要

本論文は、除去加工法では形成不可能とされてきた物体の内部に構成された複雑形状の創成を、除去加工法の一つである放電加工を用いて実現する方法について提案したものである。具体的には、断面変化穴および曲がり穴といった物体内部形状の創成を目標としている。これらの形状の加工法を確立するために、放電加工の新しい適用方法を考案し、それを実現する様々な装置を開発することによって、放電加工による物体内部形状の創成に成功した。

本論文は、以下に示す全7章で構成されている。

第1章では、本研究の背景と目的および目的達成のための基本的な方法論について述べている。

第2章では、本研究で創成目標とした二種類の物体内部形状のうち、断面変化穴形状の加工を実現するために考案した装置について説明している。まず、装置の構造および動作過程について述べた後、本装置による目標加工形状の創成が可能であることを理論的に示している。次に、製作した装置を用いた動作実験および加工実験の結果から、考案した方法により断面変化穴が加工可能であることを証明している。

第3章から第5章では、本研究で創成目標とした二種類の物体内部形状のうち、曲がり穴形状の創成を実現するために考案した装置と、その改良の過程について説明している。

第3章では、単純な構造をもつ試作的な装置について述べている。ここでは、本装置の構造と動作過程を述べた後、製作した装置による動作実験および加工実験の結果から、考案した方法により基本的に曲がり穴の加工が可能であることを示している。

第4章では、前章で開発した装置の問題点を解消するために改良した装置について説明している。はじめに、改良した装置について、その構造と動作過程を説

明し、次に、改良後の装置による動作実験および加工実験の結果について述べ、前章の問題点が解消されたことを示している。さらに、この改良した装置を応用することにより、L字形曲がり穴の加工を実現している。

第5章では、前章までの装置がもつ構造的欠点を解消するため、スライダクランク連鎖を導入した装置について説明している。まず、本装置について、その構造と動作過程について述べた後、本装置が前章までの装置が抱えていた欠点を解消していることを、理論および動作実験と加工実験から証明している。さらに、本装置を応用することにより、U字形および3次元曲がり穴の加工に成功している。

第6章では、物体内部形状の創成能力を強化する極間距離自動制御機構について述べている。ここでは、本機構の構造と原理および動作過程について説明した後、製作した機構を用いた動作実験の結果を示し、本機構の有用性を証明している。

第7章では、各章で得られた結果を要約し、本研究の成果をまとめている。

目 次

第1章 序 論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 はじめに	1
1.1.2 除去加工法による3次元形状創成とその限界	2
1.2 本研究の目的と方法	4
1.2.1 目的とその実現のための基本的な考え方	4
1.2.2 目標加工形状	5
1.2.3 目標加工形状の需要	9
1.2.3.1 金型冷却管回路への目標加工形状の応用	9
1.2.3.2 流体機械への目標加工形状の応用	12
1.2.3.3 その他の潜在的な需要	13
1.2.4 放電加工の原理と特徴および適用方法	13
1.2.4.1 放電加工の被加工物除去過程	14
1.2.4.2 放電加工および放電加工機の特徴	16
1.2.4.3 目標加工形状を創成するための放電加工の基本的な適用方法	17
1.3 既往の研究と本研究の位置づけ	18
1.4 本論文の構成	20
参 考 文 献	21
第2章 断面変化穴加工法の開発	
一 穴内面放電加工用電極運動機構一	26
2.1 緒 言	26
2.2 実 験 装 置	27
2.2.1 装置の構造と動作過程および予想される加工形状	27
2.2.2 装置動作の幾何学的検討	32
2.3 動 作 実 験	37
2.4 加 工 実 験	42
2.5 考 察	48
2.5.1 加工形状に関して	48
2.5.2 放電加工条件に関して	48
2.6 結 言	51
2.7 展 望	52
参 考 文 献	54

第3章 曲がり穴加工法の開発 1

— 曲がり穴放電加工用電極送り機構 —	55
3.1 緒 言	55
3.2 曲がり穴放電加工用電極送り機構	56
3.2.1 装置の構造と動作過程	56
3.2.2 製作実機	62
3.3 動 作 実 験	65
3.4 加 工 実 験	70
3.5 考 察	74
3.5.1 動作実験に関して	74
3.5.2 加工実験に関して	74
3.5.3 放電加工時間に関して	75
3.5.4 本実験装置と曲がり穴形状に関して	75
3.5 結 言	76
参 考 文 献	76

第4章 曲がり穴加工法の開発 2

— 機構の改良とL字形曲がり穴加工 —	77
4.1 緒 言	77
4.2 改良型曲がり穴放電加工用電極送り機構	78
4.2.1 装置の構造と動作過程	78
4.2.2 装置の改良点	84
4.2.3 製作実機	86
4.3 基 礎 実 験	88
4.3.1 動作実験	88
4.3.2 加工実験	91
4.4 L字形曲がり穴加工実験	95
4.5 考 察	99
4.5.1 基礎実験および実験装置に関して	99
4.5.2 L字形曲がり穴加工実験に関して	99
4.5.3 放電加工時間に関して	99
4.6 結 言	102

第5章 曲がり穴加工法の開発 3	
— スライダクランク連鎖の導入と U字形・3次元曲がり穴加工 —	103
5.1 緒 言	103
5.2 スライダクランク連鎖を導入した 曲がり穴放電加工用電極送り機構	104
5.2.1 装置の構造	104
5.2.2 装置の動作過程とその幾何的検討および改良点	106
5.2.3 製作実機	118
5.3 基 礎 実 験	120
5.3.1 動作実験	120
5.3.2 加工実験	125
5.4 U字形曲がり穴加工実験	129
5.5 3次元曲がり穴加工実験	135
5.6 考 察	139
5.6.1 基礎実験および実験装置に関して	139
5.6.2 圧縮コイルばねの個体差に関して	139
5.6.3 U字形および3次元曲がり穴加工実験に関して	140
5.7 結 言	141
5.8 展 望	142
参 考 文 献	145
第6章 極間距離自動制御機構の開発	146
6.1 緒 言	146
6.2 極間距離自動制御機構	147
6.2.1 形状記憶合金	147
6.2.2 バイアス式2方向性素子	150
6.2.3 構造と動作過程	152
6.2.4 製作実機	155
6.3 基礎動作実験	157
6.4 加工動作実験	159
6.5 考 察	164
6.6 結 言	167

6.7 展 望	168
参 考 文 献	174

第7章 結 論	175
---------------	-----

謝 辞	179
関連論文の公表状況	181
著 者 略 歴	183

第1章

序 論

1.1 研究の背景

1.1.1 はじめに

材料の開発とその製造および加工技術の確立は車の両輪である。これまで人類が手中にしてきた材料には、石、骨、土、木、ガラス、ゴム、金属、プラスチック、セラミックス、半導体などがある[1]が、これらの材料を活用するためには、役に立つ形状にしなければならない。このことは、材料の新旧や種類を問わず、現在においても、変わらない真理である。

産業革命以後、文明を支える材料の主流は鉄鋼を中心とした金属となり、現在でも、金属は主要な材料の一角をなしている。これを実現たらしめた理由として、金属材料工学や金属製造技術の飛躍的な発展、すなわち、様々な特徴をもつ金属の開発と、その工業的製造技術の確立によるところが大きい。こういった弛まぬ進歩の結果、現在では、金属材料の品質、量、価格の面における安定的な供給が可能となり、このことが我々の生活水準を維持する全産業の基盤をなしているとしても過ぎた表現ではないであろう。

このような金属材料の安定供給を支えているのは、大規模設備を用いた金属の工業的な精錬、精製技術であろう。一般に、金属材料の製造工程では、含有鉱石から金属を精錬、抽出するため、加えて、組成や組織の制御による特定の性質を

もった金属を精製するために、様々な物理化学反応、添加物の投入および熱処理、熱間および冷間加工が工業的手法で施され、大量に生産されている[2].

ただし、このような過程で大量生産される金属は、板、棒、管などといった基本的な形状で供給されるのが一般的であり、そのままの形状で、我々の生活に貢献していることはむしろ少ない。基本形状で生産されている金属に、複雑な形状を与えることによって、意図した目的を果たすような形状をもつ金属製品に加工されなければ、我々の生活に役立てることはできない。すなわち、形状が付与されて初めて製品としての命を吹き込まれ、その機能を十分に発揮させることが可能となる。

基本形状で生産される金属材料に多様な形状を付与するためには、材料の余分な部分を除去しなければならない。現在、実用化されている成形加工技術[3,4]の中でも、この役割を担っているのは、除去加工法に分類される方法である。

当然のことながら、製品として機能するためには、3次元的な形状が必要である。3次元形状をもつ金属機械部品を除去加工法で創成する場合、主に切削加工、研削加工、放電加工が使用されている。

1.1.2 除去加工法による3次元形状創成とその限界

切削加工、研削加工、放電加工は、加工対象物の材質や形状などに応じて使い分けられている。これらの加工法を実現する工作機械は、NC (Numerical Control) 化に始まり、コンピュータの搭載を含めたメカトロニクス化が推進され、高剛性化、多軸化、複合化といったハードウェア技術の進歩や、CAD/CAM/CAE (Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing / Computer Aided Engineering) に代表されるソフトウェア技術の応用により、今日では、複雑な3次元形状を自動的かつ高精度に加工する能力を得るに至っている。

その例として、多軸工作機械を用いた切削加工によるインペラや自由曲面で構成された穴形状の加工[5-7]、工具研削盤を用いた特殊形状をもつ切削工具の研削加工[8,9]、多軸ワイヤ放電加工機を用いた織織面加工によるタービンブレード形状の創成[10]、型彫放電加工機を用いたリブ形状の加工などがあり、複雑な形状の創成が可能となっている。

しかし、これらの形状は、例外的なものを除き、基本的に物体の外部に構成される形状であり、物体の内部に構成される形状ではない。その理由は、工具、す

なわち、切削加工においては切刃、研削加工においては砥石、放電加工においては電極を物体内部に到達させることができないためとされ、このことは、もはや機械加工分野における常識とされてきた。

したがって、物体内部形状をもつ製品を除去加工法を用いて製作しなければならない場合には、その製品をいくつかの加工および組立可能な形状をもつ部品に分割した状態で設計[11]し、これらの部品ごとに形状を加工し、組み合わせることによって、目標とする形状を得るとというのが一般的である。しかし、この方法ではいくつかの問題が生じる。

第一に、部品点数が多くなることは無論だが、組立のための締結部品も加算される。よって、メンテナンス性の低下や修理時の煩雑さの増大などを引き起こし、さらには、信頼性の低下の原因にもなる。

第二に、各部品を組み立てる際には、要求された組立精度を達成するために、部品どうしを可能なかぎり精度よく位置決めしながら、締結あるいは接合しなければならない。つまり、各部品には、清浄で表面粗さのよい組立基準面の精密な加工が必要となる。したがって、各部品の製作時には、このような位置決めのための設計と加工という工程が必ず入ることになる。加えて、組立時には、位置決め、固定、変形防止などの目的でジグを製作することとなる。これらはコスト増大の要因となる。しかしながら、通常的设计、加工、組立では、公差をゼロとはできないので、組立誤差を全く無くすことは不可能である。

第三に、各部品の組立には、ボルトやナットなどの締結部品を使用するのが最も容易な方法であるが、締結部品の断面積は、一般に部品の合わせ面の面積より小さくならざるを得ない。よって、許容応力も減少してしまい、製品の強度が劣ってしまう。また、組立に溶接などの接合方法も用いられるが、熱変形や割れなどの溶接欠陥を生じる危険性がある。

第四に、各部品間に合わせ面が必ず存在するので、流体などに接する製品の場合には、その合わせ面からの流体の漏洩あるいは浸入に対する対策を講じる必要に迫られる。また、熱伝導性を考慮しなければならない製品の場合には、部品間の合わせ面は、熱伝導率の不安定要素となりかねない。

一方、除去加工法以外の加工法として、変形加工法や付加加工法があり、これらに含まれる物体内部形状をもつ金属部品の形成に使用される主な方法が、鋳造と焼結である[3,4]。

鋳造[12]は、溶融し、流体となった金属を型に注入し、冷却・固化させ、型の形状を転写することによって目的の形状を形成する方法である。中子を使用すれば、複雑な物体内部形状をもつ3次元形状が形成できる。しかし、成形時には欠陥やバリの発生が懸念され、一般に、形状精度および材料組織や表面性状の制御性が除去加工法より劣るという問題がある。

また、焼結[13]は、粉末状の金属を型により成形し、炉を用いて加熱することにより、粉末を溶融させ、粉末どうしを結合させることによって、目的の形状を形成する方法である。最近では、レーザによって選択的に焼結した層状の焼結体を積み重ねることにより、任意の3次元形状を形成するレーザ焼結積層造形法(Selective Laser Sintering : SLS)といった迅速試作技術(Rapid Prototyping : RP)[14-16]の応用も登場してきている。しかし、一般に焼結では、材料中に空隙が必然的に残留するため、多孔性材料となり、均一な金属組織とはならない。加えて、この空隙を埋めるためには、樹脂の含浸や溶融金属の溶浸あるいはめっきなどの表面処理といった工程が必要となる。

以上の議論は次のようにまとめることができる。

除去加工法の特徴は、特定の性質を示す均一な組織をなすように製造される一般的な金属材料を使用して、3次元複雑形状をもつ製品を高精度に加工することができる点であるが、その対象形状は、物体の外部に構成された形状であり、内部に構成された形状ではなかった。このことは、機械加工分野では常識とされ、だれもが認める除去加工法の限界であった。すなわち、物体内部形状をもつ金属製品を、いくつかの部品に分割せずに一体の製品として、除去加工法を用いて創成する技術はこれまで存在しなかった。

1.2 本研究の目的と方法

1.2.1 目的とその実現のための基本的な考え方

除去加工法に対する従来の認識では、1.1.2小節で述べたように、物体の内部に形成された形状の創成は不可能とされ、この概念は常識化している。このような除去加工法で実現できる形状の限界、もっと言えば、機械加工分野における常識を打破すべく、本研究では、物体内部における形状創成を除去加工法によって実現することを目的とする。すなわち、これは、除去加工法による3次元複雑形状

加工の対象を、物体内部にまで拡大させることを意味している。

ここで、本研究の目的を単純に表現してしまうと、除去加工法で加工不可能とされてきた物体内部形状を除去加工法で加工することとなり、矛盾が生じる。もちろん、これは正しい表現ではない。この矛盾を払拭するために、本研究の目的をもう少し具体的に表現すると、本研究の目的は、従来の除去加工法において常識的に用いられてきた適用方法を打破し、発想の転換によって新しい適用方法を開発することにより、物体内部形状を除去加工法を用いて創成することである。

この目的で表現された、発想の転換による除去加工法の新しい適用方法の開発の際における、基本的な考え方を以下に示す。除去加工法が物体内部形状を加工対象にできない理由として、工具を物体内部に到達させ、かつ、その工具による加工ができないため、除去加工法による物体内部形状の形成は不可能であるという説明がなされてきた。しかし、これを逆に考えると、加工が可能な状態にある工具を物体内部において自由に運動させることができさえすれば、除去加工法によって物体内部に任意形状を創成できることを示している。したがって、これを実現する方法を考案し、開発すればよいことになる。

この考え方の利点は、新しい除去加工法を開発するのではなく、実用化されている除去加工法の新しい適用方法を開発することが目的であるので、加工原理をそのまま用いることができる点にある。すなわち、過去、長年にわたって蓄積されてきた除去加工法のノウハウを直接的に応用することが可能となる。

本研究では、創成を目標とする物体内部形状を、断面変化穴形状と曲がり穴形状の二種類の穴形状とし、また、加工原理として、除去加工法の中でも放電加工を採用することとした。次に、目標加工形状の選定理由とその形状に対する需要、および、放電加工の適用方法について述べる。

1.2.2 目標加工形状

単に物体内部形状といっても、様々な形状が考えられ、本研究において創成を目標とする物体内部形状を絞りこむことは難しい。そこで、現在、実用化されている除去加工法を用いて形成できる形状を改めて考察したところ、除去加工法による創成が可能な物体内部形状が例外的にひとつだけ存在することに気がついた。それは穴形状である。

ここで、除去加工法による穴加工について考えると、次のようなことがわかる。

すなわち、除去加工法によって加工可能な穴形状に、除去加工法が物体外部形状に与えられるほどの自由度をもたせることは不可能とされてきたこと、言い換えれば、除去加工法により加工できる唯一の物体内部形状といえる穴形状の自由度は、除去加工法が本来実現することが可能な水準まで到達していないことである。このことは、機械加工分野において、一般に穴加工とはドリル加工による円断面の直穴を加工することと認識され、それが常識化していることから容易に理解される。つまり、機械技術者の間では、複雑な形状をした穴形状、すなわち、複雑な形状をした物体内部形状は加工できないという常識が定着している。

そこで、本研究の端緒として、除去加工法で実現できる唯一の物体内部形状である穴形状の自由度を拡張することが、除去加工法の適用範囲を従来形成不可能であった物体内部形状にまで拡大させることという本研究の目標を達成する方法であると考えた。すなわち、本研究における目標加工形状は、従来の除去加工法では実現不可能な高自由度の穴形状となる。そこで、実用化されている除去加工法の中で、穴形状の加工に利用されているものをあげ、その実現可能な穴形状の自由度と限界を考える。

現在、穴形状の加工に使用される除去加工法には、ドリル加工、フライス加工、ブローチ加工、型彫放電加工、各種ビーム加工、ウォータージェット加工、ワイヤ放電加工、多軸制御切削加工がある。以下、これらについて検討する。

これらの加工法の中で、最も一般的な穴加工法は、ドリル加工やフライス加工に代表される回転工具を用いた切削加工である。その加工形状は、ドリル加工の場合には、断面形状が円の直穴となり、フライス加工の場合には、回転工具の運動軌跡により断面形状をある程度まで多様化することができるが、原理的に直穴しか加工できない。

ブローチ加工や型彫放電加工、各種ビーム加工やウォータージェット加工では、様々な形状のブローチ工具や電極の使用、あるいは、各種ビームやウォータージェットの走査により、断面形状が円以外の多様な形状をもつ穴形状が加工できるものの、基本的には直穴となる。

ワイヤ放電加工の使用により、多様な断面形状、かつ、軸方向に断面形状が変化する穴形状を加工することができるが、その穴内面形状は、直線で表現できる包絡面に限られるうえに、穴形状の中心軸はほぼ直線とならざるを得ない。

多軸工作機械とエンドミルを用いれば、より複雑な穴形状を加工できるが、エ

ンドミルの刃先が到達できないような穴形状は加工不可能である。

ここで、これらの除去加工法によって実現できる穴形状の自由度と限界を整理するために、次に示す3つの観点から、各加工法による穴形状を分類する。その観点とは、穴の断面形状そのもの、穴の軸方向に沿った穴の断面形状の変化、穴の中心軸の形状の3つである。これらをそれぞれ、穴断面形状、穴断面変化、穴中心軸形状と呼ぶことにする。

これらの観点による分類方法を図1.1に示した例を用いて説明する。この図に示すように、Hole1, Hole2, Hole3と表された様々な形状をした穴があるとする。これらの穴形状を、第一の観点である穴断面形状で分類すると、Hole1は円、Hole2は星形、Hole3は、その断面形状が変化し、一概に穴断面形状を特定することができないため、この観点からの分類は不能となる。同じく、第二の観点である穴断面変化で分類すると、Hole1, Hole2は無、Hole3は有となる。これは、Hole1, Hole2は、その断面形状は終始不変であるのに対し、Hole3はその断面A, B, Cで形状が変化していることを示している。同様に、第三の観点である穴中心軸形状で分類すると、Hole1は直線、Hole2は直線、Hole3は曲線となる。Hole2は折れ線とも表現できるが、ここでは直線の範疇に入るものとする。

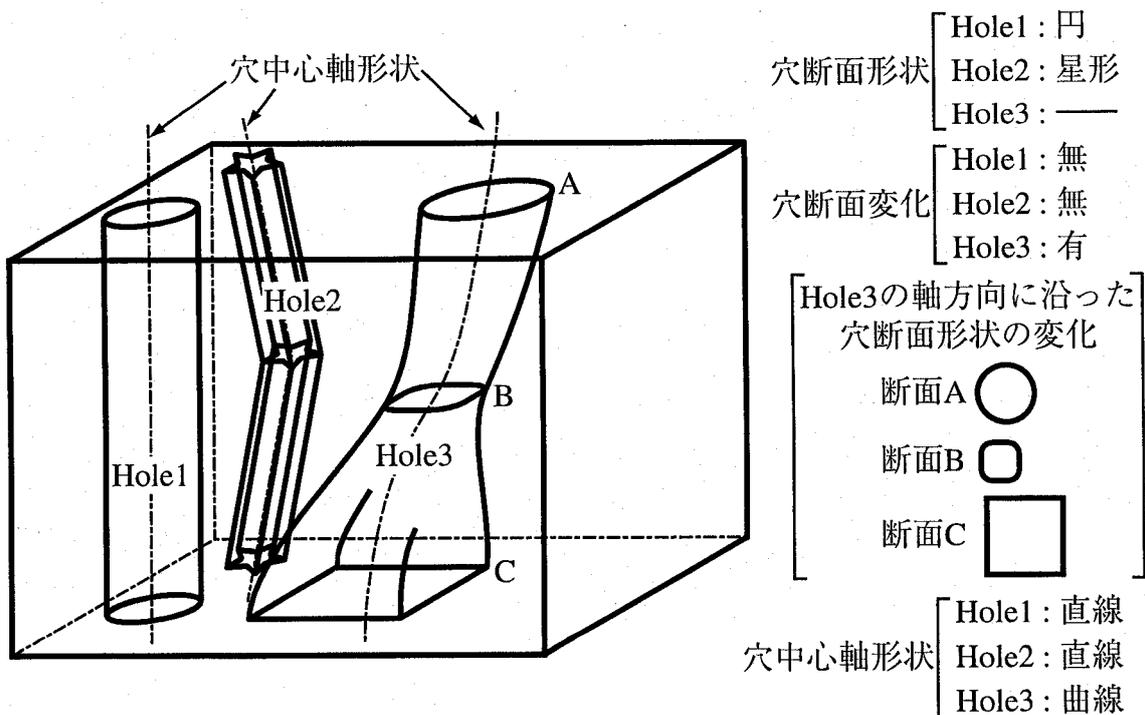


図 1.1: 穴断面形状、穴断面変化、穴中心軸形状の分類例

表 1.1: 穴加工に使用される加工法とそれにより加工可能な穴形状の分類

	穴断面...		穴中心軸 形状	備 考
	形状	変化		
ドリル加工	円†	無	直線	
フライス加工	多様†	無	直線	†: 工具運動軌跡に依存
ブローチ加工	多様†	無	直線	†: ブローチ工具形状に依存
型彫放電加工	多様†	無	直線	†: 電極形状と運動軌跡に依存
各種ビーム加工 ウォータージェット加工	多様†	無	直線	†: 各種ビーム・ウォータージェット 走査形状に依存
ワイヤ放電加工	多様 ¹⁾	有 ²⁾	ほぼ直線 ²⁾	1: ワイヤ運動軌跡に依存 2: 直線包絡形状のみ
多軸制御切削加工	多様 ¹⁾	有 ²⁾	曲線 ²⁾	1: 工具切刃運動軌跡に依存 2: 工具干渉が発生する形状は不可能

このような観点によって、前述した除去加工法で形成される穴形状を分類した結果を、表 1.1 に示す。この表から、以下のようなことがわかる。

穴断面形状については、ドリル加工以外の加工法を使用すれば、比較的多様な穴断面形状を得ることができる。しかしながら、穴断面変化が無、かつ、穴中心軸形状が直線となる加工法が大半を占めている。

ワイヤ放電加工を用いれば、穴断面変化が有と分類される穴形状が加工可能であるが、その穴中心軸形状は、原理的に曲線にはできず、ほぼ直線となる。

多軸制御加工の使用により、穴断面変化が有、かつ、穴中心軸形状が曲線となる穴形状を加工可能であるが、エンドミルの切刃が工具干渉により到達できない領域が存在する穴形状は加工不可能である。

以上をまとめると、実用化されている除去加工法では、穴断面形状が多様な穴形状が加工できるものの、穴断面変化が大きい穴形状すなわち断面形状の変化が複雑な穴形状、あるいは、穴中心軸形状が様々な曲線状となる穴形状の加工が不可能という結論が導かれる。このように、除去加工法では形成不可能な穴形状には、二種類の系統が存在する。

これはすなわち、本研究の方向性として、穴の軸方向に沿って穴断面形状が複雑に変化する穴形状を加工する方法の開発、および、穴の中心軸が任意の曲線状となる穴形状を加工する方法の開発、という二つの方向性が存在するということ

にほかならない。本研究では、前者を断面変化穴形状、後者を曲がり穴形状と呼ぶこととし、これらを目標加工形状とした。

1.2.3 目標加工形状の需要

機械加工分野においては、ドリル加工を代表とする工具を用いた穴加工法が古くから確立され、現在最も普及した穴加工法となっているため、機械技術者は無意識に穴加工とは断面形状が円の直穴を加工することと理解している。ドリル加工以外にも、表1.1に示したように、穴加工に使用される加工法は存在するが、これらによって実現できる穴形状のほとんどが、穴断面変化が無く、穴中心軸形状が直線の穴形状である。したがって、機械技術者の認識では、少なくとも、穴加工とは穴断面変化のない直穴を加工することとされてきた。このような概念が機械加工分野では定着しており、機械設計や製作の際には、このような穴形状が様々な機械に様々な用途で日常的に多用されている。さらに言えば、このいった穴形状が最適ではない事例に対してさえも、穴断面変化のない直穴が駆使されてきた。

その典型的な例として、金型の冷却管回路などの熱交換機器に冷媒を流すために加工された管路、そして、マニホールド[17]、空気軸受、エアータービンスピンドルなどといった油空圧機器[18]に代表される流体機械に流体を流すために加工された管路などが上げられる。

1.2.3.1 金型冷却管回路への目標加工形状の応用

金型による製品成形は、基本的に、熔融材料の金型への充填、保圧、冷却と固化、成形品取出しという成形サイクルの繰り返しとなる。生産性を向上させるためには、成形欠陥を避けながら、成形サイクルを可能な限り短縮させることが望まれる。したがって、熔融材料の成形性や欠陥の有無および冷却速度を支配する金型表面の温度分布や熱流制御は、金型設計において非常に重要な設計項目の一つとなっている。

このような金型の温度制御を直接的に担っているのは、金型に形成される冷却管回路である。冷却管回路とは、金型に加工される管路を指し、一般に成形時における金型の熱流制御は、この管路を流れる冷却液の流量および温度を制御することにより行われる。それゆえ、冷却管回路の形状および配置は生産性に大きな影響を与え、その最適化は急務となっている。

一方、ハードウェアおよびソフトウェアの両面における計算機科学の急激な発達、CAEの劇的な精度向上をもたらし、様々な物理現象を計算機上で解析することが可能になってきた。冷却管回路の最適配置問題に対しても適用され、適切な設計解を求めることが可能となっている[19-21]。

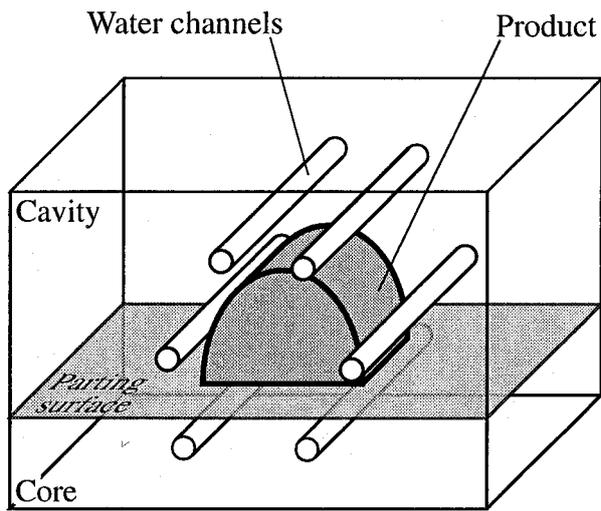
しかし、冷却管は一般にドリル加工で形成されるため、その形状は、図1.2(a)に示すような単一の円断面直穴形状、あるいは、図1.3(a)に示すような円断面直穴が連なった折れ線形状にならざるを得ない。すなわち、冷却管を任意の形状で任意の位置に配置できないため、求められた設計解を実現するのは限りなく不可能に近い。たとえば、折れ線状の冷却管配置で設計解を近似できたとしても、その近似した管路の実現のためには、1.3(a)に示すように、その管路の一部とはならない穴つまり本来なら必要のない管路を加工しなければならず、このような管路は一般的に止め栓で塞がれただけで、そのまま放置される。これは、不必要な冷却管が金型内に必然的に残留してしまうことを意味している。よって、このような残留冷却管による伝熱現象への影響も考慮しなければならなくなってしまう。

このような問題の本質は、1.2.2小節で指摘したように、実用化されている機械加工法において、実現できる穴形状の多様性があまりにも無いことにある。したがって、この問題の解決のためには、従来加工法では実現できなかった高い自由度をもつ穴形状を加工できればよい。すなわち、断面変化穴形状や曲がり穴形状の加工法の確立が求められている。

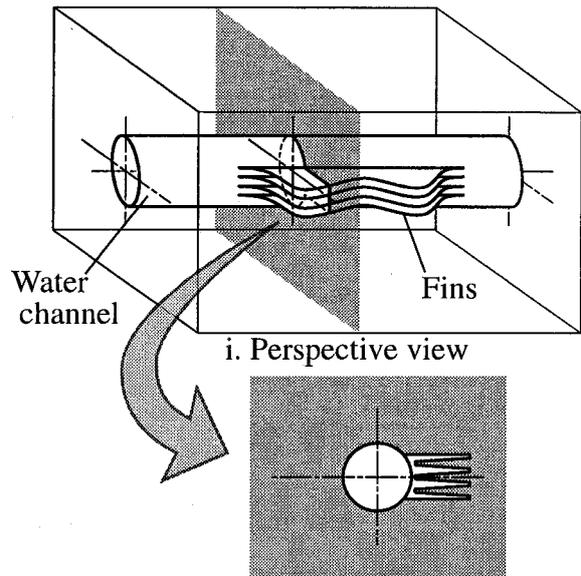
具体的には、図1.2(b)に示すように、断面変化穴加工法を応用して、冷却管内面の任意位置に任意形状のフィンを加工できれば、奪熱の効率化が図れるだけでなく、冷却管の円周方向および軸方向で選択的な奪熱が可能となり、きめ細かい熱流制御を行うことができる。すなわち、1本の冷却管を高性能化することができる。

また、図1.3(b)に示すように、曲がり穴加工法を応用して、任意の位置に曲線状の冷却管を加工できれば、直穴加工のみでは到達できなかった領域に、成しえなかった形状の冷却管を配置することが可能になり、CAEなどで求められた最適な冷却管配置を実現することができる。

さらに、両者の加工法を組み合わせた冷却管を実現することができれば、金型の熱流制御の自由度が飛躍的に高まり、金型による製品成形における生産性の向上につながるものと考えられる。

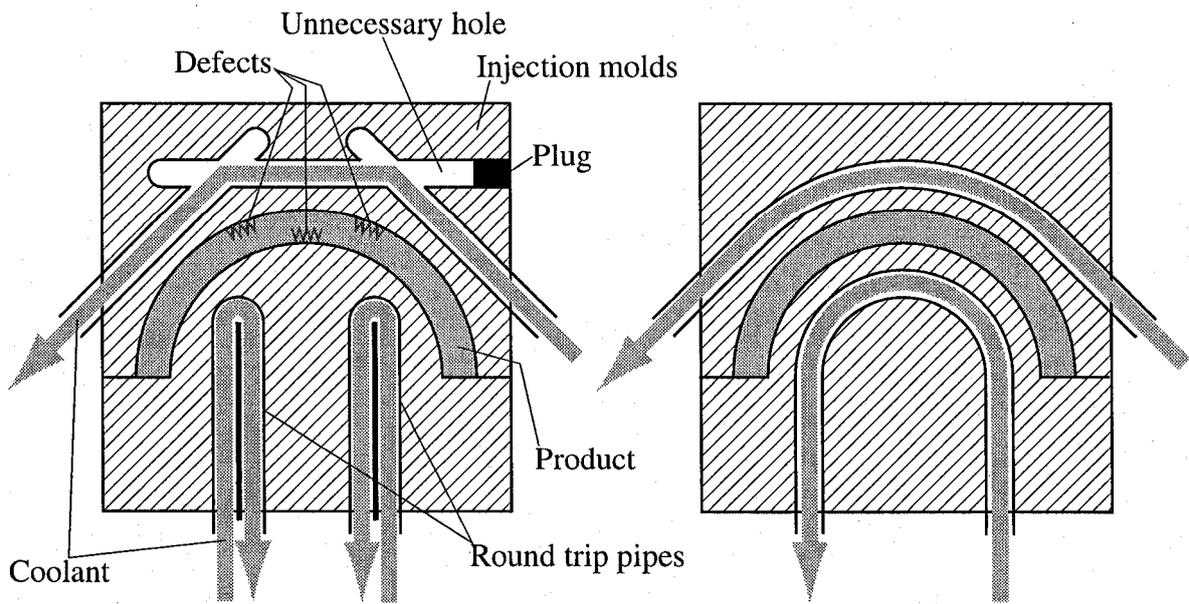


(a) Conventional water channels built in molds



(b) Water channel equipped with fins

図 1.2: 単一直線状の金型冷却管とフィンが形成された金型冷却管



(a) Conventional water channels

(b) Curved water channels

図 1.3: 折れ線状の金型冷却管と曲線状の金型冷却管

1.2.3.2 流体機械への目標加工形状の応用

油空圧機器における作動流体の流動や供給など、流体を流入出させるために流体機械に加工される管路も一般にドリルで加工されるため、その形状は単一の円断面直穴形状、あるいは、複数の円断面直穴が連結した折れ線形状となってしまう。

図 1.4(a), (c)に、折れ線状になった管路の例を示す。これにより必然的に生じてしまう直穴と直穴の接合部は、管路の急激な角度変化部分にあたり、流動している流体の圧力損失の原因となる。さらに、このような場所では、ドリル加工時にバリが形成されやすく、その除去は容易ではない。このようなバリが剥離し、流体中に混入すると、流体機械の性能低下や作動不良、寿命低下を招き、さらには故障にもつながりかねない。そのうえ、直穴加工のみでは、管路を任意の場所に任意の形状で加工することは不可能であるため、流体の流入や流出口の位置が設

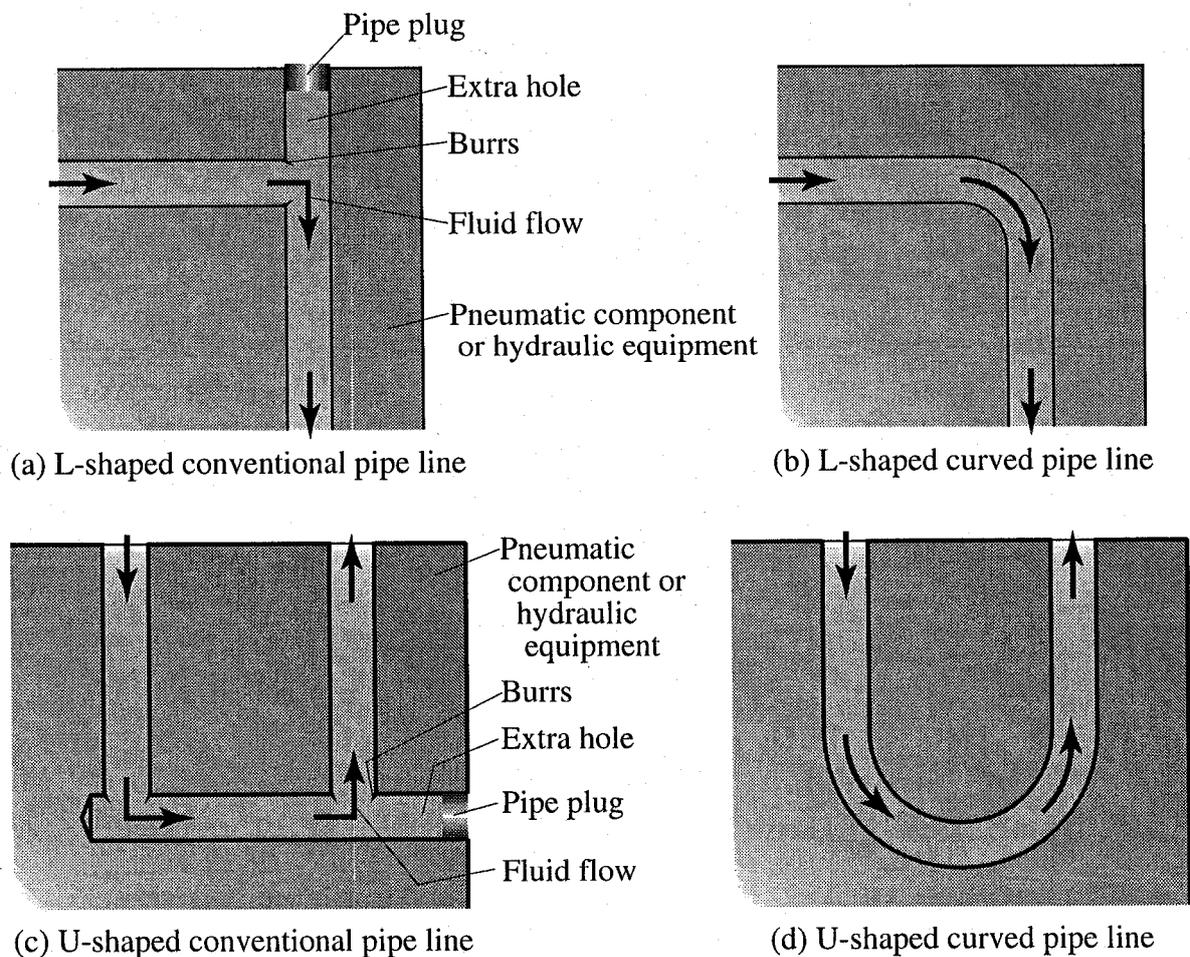


図 1.4: 油空圧機器の折れ線状の管路と曲線状の管路

計上決定しているような流体機械の場合には、その管路を加工するための加工しるを確保しなければならない。すなわち、流体機械の小型化を図る際の障壁となっている。

このような問題を解決するためには、曲がり穴加工法を応用して、図1.4(b), (d)に示すように、管路に直穴ではなく曲がり穴を適用すればよい。曲がり穴の適用によって、流動流体の圧力損失は低減され、バリの発生もなくなる。また、流体機械の任意の位置に管路を配置できるようになるので、小型化にも貢献できる。

1.2.3.3 その他の潜在的な需要

本小節冒頭でも述べたように、機械技術者は、穴加工とは一定断面形状の直穴を加工することと、強く認識していたため、加工可能な穴形状を多様化しようとする発想はなく、限られた穴形状でどのように加工し、目的の形状あるいは機能を発揮させるかに意識が集中してきたようである。つまり、断面変化穴形状や曲がり穴形状は実現不可能と信じられてきた。その結果、上記の需要以外に顕在化している需要は少ない。しかしながら、これらの形状の加工法が実用化され、一般的になっていくにしたがって、すなわち、機械技術者が不可能と信じていた形状の加工が可能であると認識されていくにしたがって、需要は大きくなるものと考えている。つまり、潜在的な需要は非常に大きいと思われる。

1.2.4 放電加工の原理と特徴および適用方法

本研究において、目標加工形状を加工するために採用した加工原理を、除去加工法の中でも放電加工とした。以下に、放電加工の原理と特徴を述べ、目標加工形状を創成するための基本的な方法について説明する。

なお、放電加工にはワイヤ放電加工と型彫放電加工があるが、本研究では後者を採用したので、以下の説明は、型彫放電加工および型彫放電加工機を念頭に置いたものである。

1.2.4.1 放電加工の被加工物除去過程

まず、放電加工による被加工物の除去過程[22,23]について説明する。

図1.5に、放電加工による進行過程を示す。図1.5(a)に示すように、絶縁性の液体中でパルス電圧を印加された工具電極と被加工物を接近させる。通常、絶縁性

の液体は加工液，工具電極は単に電極と呼ばれる．電極と被加工物の間の距離がある距離に達すると，加工液が絶縁破壊を起こし，図1.5(b)に示すように，電極と被加工物の間のある位置で放電する．このときの電極と被加工物の間，すなわち，極間で生じた単発の放電に注目した模式図を，図1.6に示す．

図1.6(a)に示すように，極間のある位置で放電が始まると，すぐに細いアーク柱，すなわち，非常に高密度の電流となり，大量の電子が極間を移動する．アーク柱の温度は，定常状態で約5000K，過渡状態で10000Kに達するといわれている．このアーク柱によって発生した熱によって，放電点における被加工物の温度はその被加工物の融点以上に上昇し，図1.6(b)に示すように，被加工物は局部的に溶融する．同時に，アーク柱による熱は，図1.6(c)に示すように，加工液を局部的に気化爆発させる．このときの加工液の急激な気化膨張は，加工液中に高い圧力波を局部的に発生させる．これによって，図1.6(d)に示すように，溶融した被加工物は加工液中に細かい粒子すなわち加工くずとなって飛散するとともに，気泡が発生する．溶融部分が飛散した後の被加工物には，単発放電痕あるいはクレータと呼

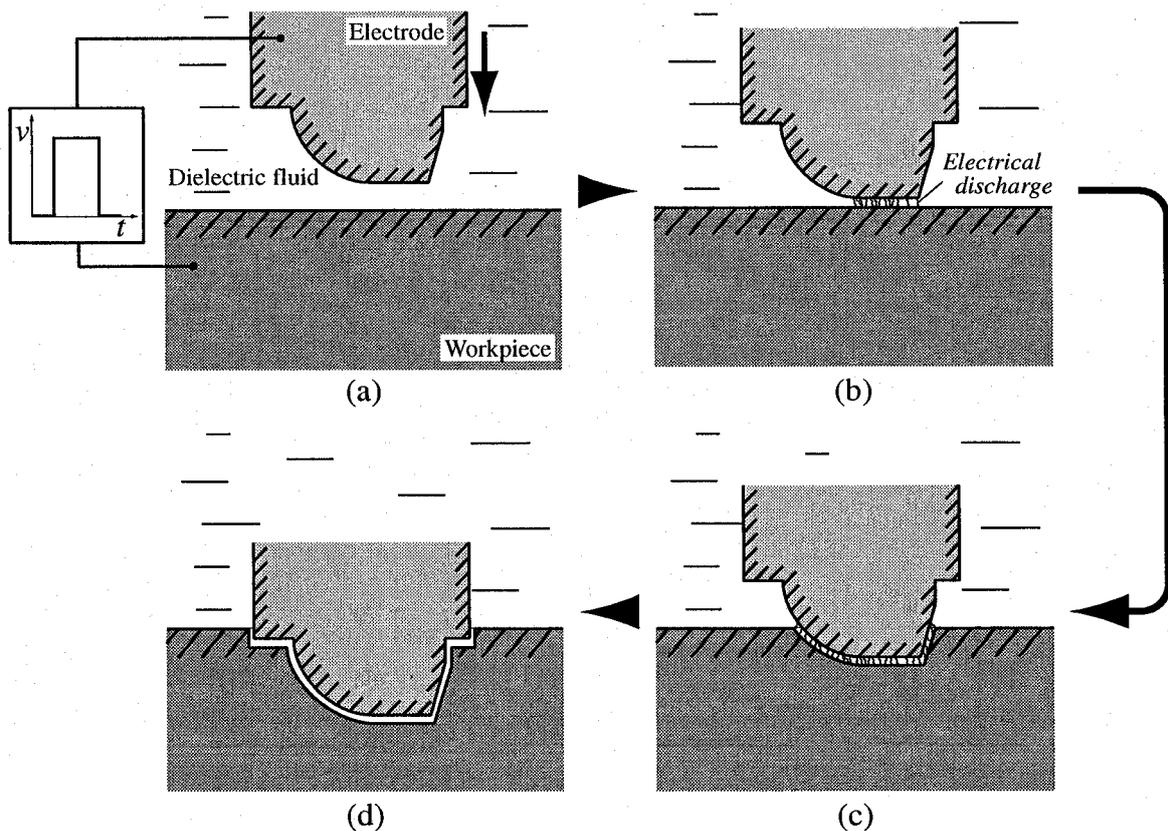


図 1.5: 放電加工の進行過程

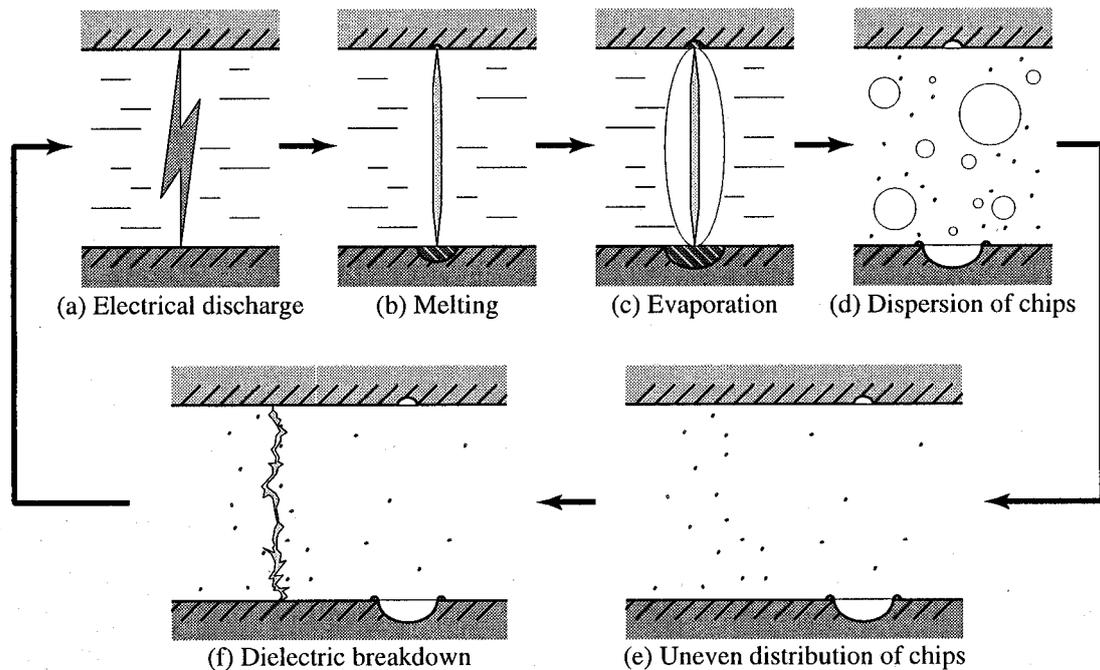


図 1.6: 放電加工による被加工物の除去過程

ばれるくぼみが残る。このクレータ周辺の被加工物表面には、吹き飛ばされなかった被加工物の一部が盛り上がった状態で付着する。発生した気泡は浮力により加工液面へと向かい、大気中に放出される。溶融部分が飛散した後、周囲から冷たい加工液が流入するため、残った熱は急速に散逸し、極間の絶縁が回復する。また、飛散した加工くずは、図 1.6(e)に示すように、極間の加工液中を浮遊するが、均一とはならず、偏在する。よって、図 1.6(f)に示すように、新たな絶縁破壊を誘発する。これに加え、クレータ周辺に付着した被加工物の盛り上がりも、極間の距離を短くするため、絶縁破壊を誘発する一因となる。絶縁破壊が起こると、再度、図 1.6(a)に示した放電が生じる。

このような被加工物の除去サイクルが1秒間に数千から数万回繰り返され、多数のクレータが累積することにより、加工が進行する。電極と被加工物の間で絶縁破壊が起こる位置は、基本的には両者間の距離すなわち極間距離が最も近い位置となる。このような位置で放電が生じ、被加工物がクレータ状に除去されるわけであるから、図 1.5(c), (d)に示すように、電極を徐々に被加工物に送り込めば、電極形状が被加工物に転写される。すなわち、被加工物に電極の逆形状が加工される。

1.2.4.2 放電加工および放電加工機の特徴

図1.6に示したように、放電加工の加工現象は、被加工物を溶融するまで加熱し、それを除去するというものであり、この点では、レーザ加工などに類似した熱的加工に分類される。その一方で、図1.5に示したように、放電加工の形状創成は、電極の形状を被加工物に転写、すなわち、被加工物に電極形状の逆形状を形成するものであり、この点では、切削加工や研削加工と類似した工具形状の転写加工といえる。このように、熱的加工の側面と転写加工の側面を合わせもつことが、放電加工の大きな特徴[24]である。具体的には、次のような特色がある。

第一点は、被加工物の除去過程が溶融によって行われるため、切削加工や研削加工に比較して、加工反力が非常に小さい。図1.6(c)に示すように、除去過程で加工液の気化爆発が起こるものの、局所的で短時間の現象であるので、電極に作用する加工反力はそれほど大きくはならない。したがって、加工時の被加工物の変形や電極の位置剛性も切削工具や研削砥石ほど考慮しなくてもよい。

これに加え、放電点では局所的に非常に高温になるため、被加工物の硬さや靱性などに影響されない。したがって、基本的に導電性のある材料であれば、加工対象とすることが可能である。

第二点は、電極の形状が被加工物に転写されるため、被加工物に加工される形状は、電極の形状とその運動軌跡から幾何学的に一意に決定される。したがって、単純な形状から複雑な3次元形状まで、高精度に加工することができる。この特徴は他の熱的加工にはない特徴である。

ただし、図1.6に示したように、1回の放電により除去される被加工物の体積は少量であるため、加工速度は、切削加工や研削加工に比べ、非常に遅い。加工速度は加工電源による極間の加工電圧や加工電流およびその波形などに依存するが、加工形状の精度や加工面の表面粗さなどにも影響するため、加工速度だけを上昇させることは難しい。よって、一定の加工条件で、加工速度を可能なかぎり高く維持するためには、加工に寄与する放電の単位時間当たりに発生する回数を増加させる必要がある。簡単に言えば、加工を進行させるためには、加工に寄与する放電を連続させなければならない。このためには、電極と被加工物の間の距離、すなわち、極間距離を適切に制御することが重要になる。

すなわち、極間距離が長ければ、加工液の絶縁破壊は起きず、放電は生じない。逆に、極間距離が短ければ、短絡してしまい、放電が生じない。あるいは、放電

が持続してしまい、絶縁復帰しない状態が続く異常放電となり、これは加工に寄与しない。

さらに、絶縁破壊が起こり、放電が生じる極間の位置は、基本的には極間が最短距離にある位置である。しかし、図1.6を用いて説明したように、極間では、被加工物表面に形成されるクレータ周辺の盛り上がりや加工くずの偏在が生じる。この影響により、加工に寄与する放電が生じる極間距離は時々刻々変化する。

加えて、加工くずが極間に堆積してしまうと、被加工物の加工面に放電せず、加工が進行しない。よって、加工くずを極間から排除しなければならない。加工くずの除去は、電極が被加工物からある高さに高速離脱と接近を数秒ごとに繰り返して行うことで、極間に加工液を流入出させ、加工くずを排除する電極の動作によって行われる。この動作をジャンプという。あるいは、極間に加工液噴流を流入させ、加工くずを極間から除去する方法もある。

このように様々な影響により、放電加工を進行させるための極間距離は変化する。これに追従するために、放電加工機は、加工に寄与する放電が常に発生するように、極間の加工電圧と加工電流の値の変化に合わせて極間距離を制御している。実際には、電極は放電加工機の主軸に取り付けられており、この主軸はマイクロメータオーダで電極の位置を常時制御することによって、極間距離を制御している。

また、図1.6に示したように、放電加工時には、電極も被加工物に比べ微小であるが損傷を受ける。これが電極消耗と呼ばれ、加工中に電極の形状が変化してしまうため、加工形状の精度に悪影響を与える。電極が消耗する場所を分散させるため、放電加工機の主軸は加工進行方向に対して垂直な面上で電極を微小に運動させている。この運動を揺動という。

1.2.4.3 目標加工形状を創成するための放電加工の基本的な適用方法

本研究の目的である物体内部形状を除去加工法で創成する際の基本的な考え方は、1.2.1小節で述べたように、工具を加工可能状態で物体内部を自由に運動させることであった。

本研究では、目標加工形状は断面変化穴形状と曲がり穴形状であり、放電加工を適用するので、工具は電極となり、また、加工可能状態とは電極と被加工物の間で加工に寄与する放電が安定的に生じることである。すなわち、極間距離を常

時適切に制御しながら，電極に被加工物の内部を断面変化穴形状あるいは曲がり穴形状をなすような軌跡上を運動させればよいことになる。

このようなことを実現させるためには，主軸の直線運動を，物体内部における電極の多様な運動に変換する機構を開発し，かつ，この機構によりその運動を変換された電極が，目標加工形状をなすような軌跡上を運動するようにすればよいと考えた。このような運動変換機構により，電極の運動は主軸の移動に同調するので，主軸の極間距離の制御動作が電極に反映され，常に電極は加工可能状態となる。なおかつ，電極の運動軌跡の包絡形状は目標加工形状に一致する。したがって，目標加工形状の加工が実現できる。

このような運動変換機構の条件は，第一に，変換後の電極運動軌跡の包絡形状が目標加工形状をなしていること，第二に，主軸の極間距離の制御を電極において実現させるため，主軸が運動する直線軌跡上の位置と電極が運動する軌跡上の位置が一對一に対応し，両者の動作が同調することである。

また，このような運動変換機構を取り付けられたとしても，放電加工機としては，通常の放電加工と何ら変わらない。よって，放電加工機の機種や電源，加工条件，プログラムなど，放電加工機固有の条件に依存しないため，どのような放電加工機を使用しても，運動変換機構さえ放電加工機に取り付けることができれば，目標加工形状の加工が可能となる。

1.3 既往の研究と本研究の位置づけ

除去加工法を用いた断面変化穴形状および曲がり穴形状の創成を対象とした加工法の開発に関して，従来の研究を概観し，それらの問題点について検討するとともに，本研究の位置づけについて述べる。

駒井ら[25]は，円弧状の電極を回転軸で円軌道を描くように送りながら電解加工することによって，円弧状の曲がり穴を加工している。

福井ら[26-28]は，ワイヤを制御することにより屈曲を可能にしたユニバーサルジョイント状の関節機構の先端に電極を取り付けた機構を用いて，放電加工することによって，曲がり穴形状の加工を試みている。

後藤ら，竹内ら，Ichiyasuら[29-35]は，形状記憶合金製の引張コイルばねを通電加熱することによって屈曲を可能にした関節群を直列に連ねた機構の先端に，電

極を取り付けた機構を用いて、放電加工を行い、曲がり穴形状の加工を試みている。

後藤ら[34-37]は、曲率をもった弾性体の先端に電極を取り付け、その弾性体をパイプ状ガイドの中から押し出しながら放電加工することによって、曲がり穴を加工している。

竹内ら[34, 38]は、一定曲率の円弧形状が記憶形状とされた超弾性形状記憶合金製のワイヤ端に電極を取り付け、そのワイヤをパイプ状ガイドから押し出しながら放電加工を行うことによって、一定曲率の曲がり穴の加工に成功している。

内山ら[39-44]は、チューブの先端に電極を取り付けた機構を用いて電解加工を行い、自らが加工した穴に倣いながら加工を進行させることによって、3次元的な曲がり穴を加工している。ただし、曲がり穴形状の制御性、再現性に問題がある。

南ら[45]は、スパイラル状に成形した電極を用い、型彫放電加工機の直進軸と回転軸を同期させてながら放電加工を行うことにより、スパイラル状の曲がり穴を加工している。

青木ら[46]は、内視鏡に用いられる屈曲機構の先端に切削工具を取り付け、その工具を回転させながら送ることによって、曲がり穴を加工している。ただし、被加工物は、金属ではなくマシナブルワックスである。

太田[47]は、パラレルメカニズム型加工機を用いた切削加工により、金属に曲がり穴を加工している。しかし、基本的に切削加工では、加工形状は切削工具の長さや径に依存してしまう。

曲がり穴加工法については、以上のように、様々な方法によってその確立が試みられてきているが、いまだに研究の域を出ず、一般に普及するに至っていない。また、究極の目標は、任意の形状をもつ曲がり穴の高精度加工法の確立であるが、これまでに提案された曲がり穴加工法の中で、その可能性に言及している報告はない。

本研究では、従来、提案されてきた方法とは異なる独自の手法を用いて、曲がり穴加工法を提案し、実際に様々な形状の曲がり穴の加工に成功している。そして、開発した曲がり穴加工法を改良および応用することによって、将来的に、本加工法の実用化を目指すとともに、任意の曲がり穴形状の加工が実現できる可能

性についても言及している。

また、断面変化穴加工法については、過去に報告された加工法は見当たらない。これは、本研究の独創性を表しているものと考えている。

1.4 本論文の構成

本論文は、以下に示す全7章で構成されている。

第1章は「序論」として、まず、金属機械部品の形状加工法の現状と問題点を指摘し、それを解決しようとする本研究の意義と目的について述べる。次に、本研究の目的を達成する方法を考案するための基本的な考え方を説明するとともに、本研究の位置づけについて言及する。

第2章は「断面変化穴加工法の開発 ー穴内面放電加工用電極運動機構ー」として、断面変化穴加工法の確立を目指し、本研究において考案した、放電加工機の主軸の直線運動を電極の回転運動に変換する装置について説明する。まず、装置の構造と動作過程について述べた後、この装置において、電極の回転運動と極間距離の制御動作が両立していることを、理論と動作実験の両面から説明する。次に、本装置を用いて、実際に加工実験を行った結果について述べる。さらに、断面変化穴加工法の今後の展望について言及している。

第3章は「曲がり穴加工法の開発 1 ー曲がり穴加工用電極送り機構ー」として、曲がり穴加工法の確立のために、本研究において開発した、放電加工機の主軸の直線運動を電極の曲線運動に変換する装置について説明する。まず、装置の構造と動作過程を説明した後、本装置による動作実験および加工実験の結果と問題点について述べる。

第4章は「曲がり穴加工法の開発 2 ー機構の改良とL字形曲がり穴加工ー」として、前章で開発した装置の問題点を解消するために改良した装置について説明する。はじめに、改良した装置について、その構造と動作過程を説明し、次に、改良後の装置による動作実験および加工実験の結果について述べ、前章の問題点が

解消されたことを証明する。さらに、この改良した装置を応用することにより、L字形曲がり穴の加工を実現できたことを述べる。

第5章は「曲がり穴加工法の開発3 スライダクランク連鎖の導入とU字形・3次元曲がり穴加工」として、前章で開発した機構がもつ欠点を解消するため、スライダクランク連鎖を導入した装置について説明する。はじめに、本装置について、その構造と動作過程について説明した後、本装置において、電極の曲線運動と極間距離の制御動作が両立していること、前章の装置が抱えていた欠点が解消されたことを、理論と動作実験および加工実験から証明する。さらに、本装置を応用することにより、U字形および3次元曲がり穴の加工に成功したことを述べる。また、曲がり穴加工法の今後の展望について言及している。

第6章は「極間距離自動制御機構の開発」として、まず、断面変化穴加工法および曲がり穴加工法における極間距離自動制御機構の必要性を説明した後、この機構の構造と原理および動作過程について述べる。次に、実際に設計、製作した、本機構の試験機を用いて、基礎動作実験ならびに加工動作実験を行った結果を説明し、本機構の有用性を証明する。さらに、極間距離自動制御機構に関する今後の展望と応用について言及している。

第7章は「結論」として、各章で得られた成果をまとめている。

参 考 文 献

- [1] 小山田了三，小山田隆信：材料技術史概論 第3版，東京電機大学出版局，(2001)
- [2] 例えば，ステンレス便覧，日刊工業新聞社(1973) 563-673.
- [3] 阿武芳朗，田村 博：朝倉機械工学講座 1 2 機械製作法，朝倉書店(1986) 4-7.
- [4] 田中芳雄，喜田義宏，杉本正勝，宮本 勇，土屋八郎，後藤英和，杉村延広：エース機械工学シリーズ エース機械加工，朝倉書店(1999) 1-3, 168-172.

- [5] K. Morishige and Y. Takeuchi : 5-Axis Control Rough Cutting of an Impeller with Efficiency and Accuracy, Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, U.S.A. (1997) 1241-1246.
- [6] K. Morishige, K. Kase and Y. Takeuchi : Tool Path Generation Using C-Space for 5-Axis Control Machining, Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, **121**, 1 (1999) 144-149.
- [7] 森重功一, 竹内芳美 : C-Space に基づいた 5 軸制御加工における工具姿勢の決定法 - 工具形状を考慮した C-Space の生成と安全第一加工戦略 -, 精密工学会誌, **66**, 7 (2000) 1140-1144.
- [8] 石塚伸護, 森重功一, 加瀬 究, 竹内芳美 : コニコイドエンドミルのための工具研削用 CAD/CAM システムの開発, 精密工学会誌, **64**, 10 (1998) 1456-1460.
- [9] 石塚伸護, 森重功一, 加瀬 究, 松岡甫篁, 竹内芳美 : 工具研削 CAD/CAM システムの開発 - システムの拡張とその評価 -, 精密工学会誌, **65**, 9 (1999) 1280-1283.
- [10] 齋藤長男, 毛利尚武, 高鷲民生, 古谷正典 : 放電加工技術 基礎から将来展望まで, 日刊工業新聞社 (1997) 140-144.
- [11] 畑村洋太郎 編, 実際の設計研究会 著 : 実務の設計選書 続・実際の設計 - 機械設計に必要な知識とデータ -, 日刊工業新聞社 (1992) 54.
- [12] 日本鑄造工学会編 : 鑄造工学便覧, 丸善 (2001)
- [13] 日本塑性加工学会編 : 塑性加工技術シリーズ 1 8 粉末の成形と加工 - 粉からなネットシェイプへ -, コロナ社 (1994)
- [14] 今村正人ら : 特集 ラピッドプロトタイピングからラピッドツーリングへ, 型技術, **15**, 7 (2000) 17-45.
- [15] 今村正人ら : 特集 ここが変わった最新ラピッドプロトタイピング装置 & 材料, 型技術, **16**, 10 (2001) 17-60.
- [16] 今村正人ら : 特集 RP 用材料を使いこなすための基礎の基礎, 型技術, **17**, 9 (2002) 17-64.
- [17] ダイキン工業油機技術グループ : 疑問にこたえる機械の油圧 下, 技術評論社 (1974) 231.

- [18] 不二越油圧研究グループ：新版 知りたい油圧 実践編，ジャパンマシニスト社 (1984)
- [19] 是澤宏之，遠近祥史，鈴木 浩：定常熱伝導解析に基づく射出成形金型の冷却管自動配置設計，日本機械学会論文集 (C編)，**65**, 633 (1999) 2087-2093.
- [20] H. Koresawa and H. Suzuki : Autonomous Arrangement of Cooling Channels Layout in Injection Molding, Annual Technical Conference Proceedings 1999 (ANTEC '99), **3** (1999) 1073-1077.
- [21] 松本敏郎，田中正隆，宮川 守：境界要素法を用いた直接微分法に基づく金型の三次元定常熱伝導設計感度解析法，日本機械学会論文集 (A編)，**59**, 567 (1993) 278-285
- [22] 齋藤長男，毛利尚武，高鷺民生，古谷正典：放電加工技術 基礎から将来展望まで，日刊工業新聞社 (1997) 15-28.
- [23] 富本直一，岩崎建史，中村和司，大場信昭：放電加工，日刊工業新聞社 (1999) 1-3.
- [24] 増沢隆久：放電加工技術の新たな展開，精密工学会誌，**64**, 12 (1998) 1713-1714.
- [25] 駒井征一，小峰 進：曲がり穴の電解加工，電気加工学会誌，**8**, 15 (1974) 20-28.
- [26] 福井雅彦，加納英人，木下夏夫：もぐら掘り放電加工法の開発，昭和63年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1988) 187-188.
- [27] 福井雅彦，加納英人，木下夏夫：もぐら掘り放電加工法の開発，電気加工技術，**12**, 38 (1988) 1-8.
- [28] M. Fukui and N. Kinoshita : Developing a 'Mole' Electric Discharge Digging Machining, Annals of the CIRP, **38**, 1 (1989) 203-206.
- [29] 後藤昭弘，福井雅彦，木下夏夫：もぐら掘り放電加工法の研究，1989年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1989) 179-180.
- [30] 福井雅彦，木下夏夫，後藤昭弘：もぐら掘り放電加工法の開発，1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1990) 683-684.
- [31] 後藤昭弘，福井雅彦，木下夏夫：もぐら掘り放電加工法の開発，電気加工学会誌，**25**, 50 (1991) 23-31.
- [32] 竹内昭伸，渡辺一樹，後藤昭弘，真柄卓司：もぐら放電加工による曲がり

- 穴加工の試み (第1報), 型技術, **12**, 8 (1997) 100-101.
- [33] S. Ichiyasu, A. Takeuchi, K. Watanabe, A. Goto and T. Magara : Machining Curved Tunnel for Coolant with Mole EDM, Proceedings of 4th International Conference on Die & Mould Technology, Kuala Lumpur, Malaysia, (1997) 224-230.
- [34] 青木正義 : 連載 実務者のためのプラスチック精密成形用金型の展望 第4回, 型技術, **17**, 4 (2002) 101-105.
- [35] 後藤昭弘, 渡辺一樹, 竹内昭伸 : もぐら掘り放電加工の開発, 型技術, **15**, 8 (2000) 136-137.
- [36] 後藤昭弘, 渡辺一樹, 竹内昭伸 : もぐら掘り放電加工による曲がり穴加工, 型技術, **15**, 11 (2000) 46-49.
- [37] A. Goto, K. Watanabe and A. Takeuchi : A Method to Machine a Curved Tunnel with EDM, International Journal of Electrical Machining, **7** (2002) 43-46.
- [38] 竹内昭伸, 幸地正信, 湯澤隆 : 曲がり穴形状の放電加工技術の開発, 型技術, **16**, 8 (2001) 154-155.
- [39] 内山光夫, 坂田尚志, 芝崎禎四郎 : 電解加工による曲がり穴加工法の開発, 1994年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1994) 277-278.
- [40] 内山光夫, 芝崎禎四郎 : 電解加工による曲がり穴加工法の開発, 2000年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2000) 249.
- [41] 内山光夫, 芝崎禎四郎 : 電解加工による曲がり穴加工法の開発 (第3報), 2000年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2000) 329.
- [42] 内山光夫, 芝崎禎四郎 : 電気加工による曲がり穴加工法の開発, 電気加工学会全国大会 (2001) 講演論文集, (2001) 71-74.
- [43] 内山光夫, 芝崎禎四郎 : 電気加工による曲がり穴加工法の開発, 日本機械学会 第3回生産加工・工作機械部門講演会, (2001) 241-242.
- [44] 内山光夫, 芝崎禎四郎 : 電解加工による曲がり穴加工法の開発 (第1報) —アクチュエータを持たない工具による加工法—, 精密工学会誌, **68**, 11 (2002) 1476-1480.
- [45] 南久, 増井清徳, 李瑞竣, 石橋正也 : スパイラル穴の高速放電加工, 電気加工学会全国大会 (2001) 講演論文集, 75-76.
- [46] 青木勇, 橋本俊典, 中野裕史, 藤本涼 : 曲線状穴あけ加工の試み, 1998

年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 188.

- [47] 太田浩充：パラレルメカニズム型加工機による多軸加工とその効果, ツールエンジニア 2002年2月号, (2002) 55-59.

第2章

断面変化穴加工法の開発

— 穴内面放電加工用電極運動機構 —

2.1 緒 言

本章では、目標加工形状とした二種類の物体内部形状のうち、断面変化穴形状の除去加工法による創成を目指し、開発した加工法について説明する。

断面変化穴形状の加工法を開発するにあたり、除去加工法により加工できる最も単純な物体内部形状である円断面直穴形状を拡張することを目標とした。つまり、円断面直穴形状は、断面形状が円で穴の軸方向に沿った断面形状の変化がない単純な形状であるが、この穴の内面に対して形状を付加することによって、穴断面形状に変化をつけることを考えた。これを実現するためには、円断面直穴の内面を加工対象として、除去加工法を適用できればよい。これが可能となれば、穴内面に多様な形状を加工することができ、その結果、穴の軸方向に沿って断面形状が複雑に変化する穴形状が創成できる。このことを放電加工で行うとすると、1.2.4.3小々節で述べたように、放電加工機の主軸の直線運動を、直穴内面を加工対象とするような電極の運動に変換する機構を開発すればよいことになる。

そこで、放電加工機の主軸の直線運動を電極の回転運動に変換する装置、すなわち、穴内面放電加工用電極運動機構を開発した。本章では、このような装置を用いた動作実験および加工実験を行い、この装置による断面変化穴形状の実現可能性について検証した。

2.2 実験装置

2.2.1 装置の構造と動作過程および予想される加工形状

図2.1に、考案した穴内面放電加工用電極運動機構の模式図を示す。型彫放電加工機の主軸に工具電極がユニバーサルホルダ、軸、リンクを介して取り付けられている。さらに、この電極は別の軸を介して放電加工機の加工槽に設置されたジグにも取り付けられている。ここで、前者の軸を Shaft 1、後者の軸を Shaft 2と呼ぶことにする。電極、リンク、Shaft 1および Shaft 2は、軸付ニードル軸受であるカムフォロア[1]を介して連結されており、各連結点において回転運動が可能となっている。つまり、電極、リンク、Shaft類は互いに回転対偶として接続されている。すなわち、主軸、ジグ、リンク、電極は、スライダクランク連鎖を構成していることになる。一般に、この連鎖からは4種の機構が生じるが、本実験装置のスライダクランク連鎖は、主軸を原動節のスライダとする往復スライダクランク機構を構成していることになる[2]。

したがって、図2.2に示すように、通常の放電加工と同様に主軸を下方に移動させると、その動作に同調して、電極が回転する。電極の回転中心は、電極と Shaft 2の連結点であり、この連結点は加工槽に対して不動である。つまり、電極は、この連結点を回転中心とした完全な円運動をすることとなる。また、この動作中には、主軸の位置と電極の回転角度は一対一に対応している。それゆえ、主軸による極間距離制御が、回転する電極においても実現され、放電加工が可能となる。さらに、加工くずの除去に使用される主軸のジャンプ動作も電極に伝達されるため、基本的に利用することができる。ただし、本実験装置の構造上、主軸を揺動させることはできない。

また、電極への加工電流の供給は、図2.1に示すように、ユニバーサルホルダとジグを、そして、ジグと電極をケーブルで結ぶことにより行う。ここで、ユニバーサルホルダとジグを結合しているケーブルを Power cable 1、ジグと電極を結合しているケーブルを Power cable 2とする。このように結線することにより、カムフォロアを主たる加工電流経路としないように設計されている。これは、以下の理由からである。

基本的に、軸受は外輪と内輪、および、それらに挟まれた鋼球あるいはニードルから構成されているが、外輪、鋼球またはニードル、内輪は、それぞれが点ま

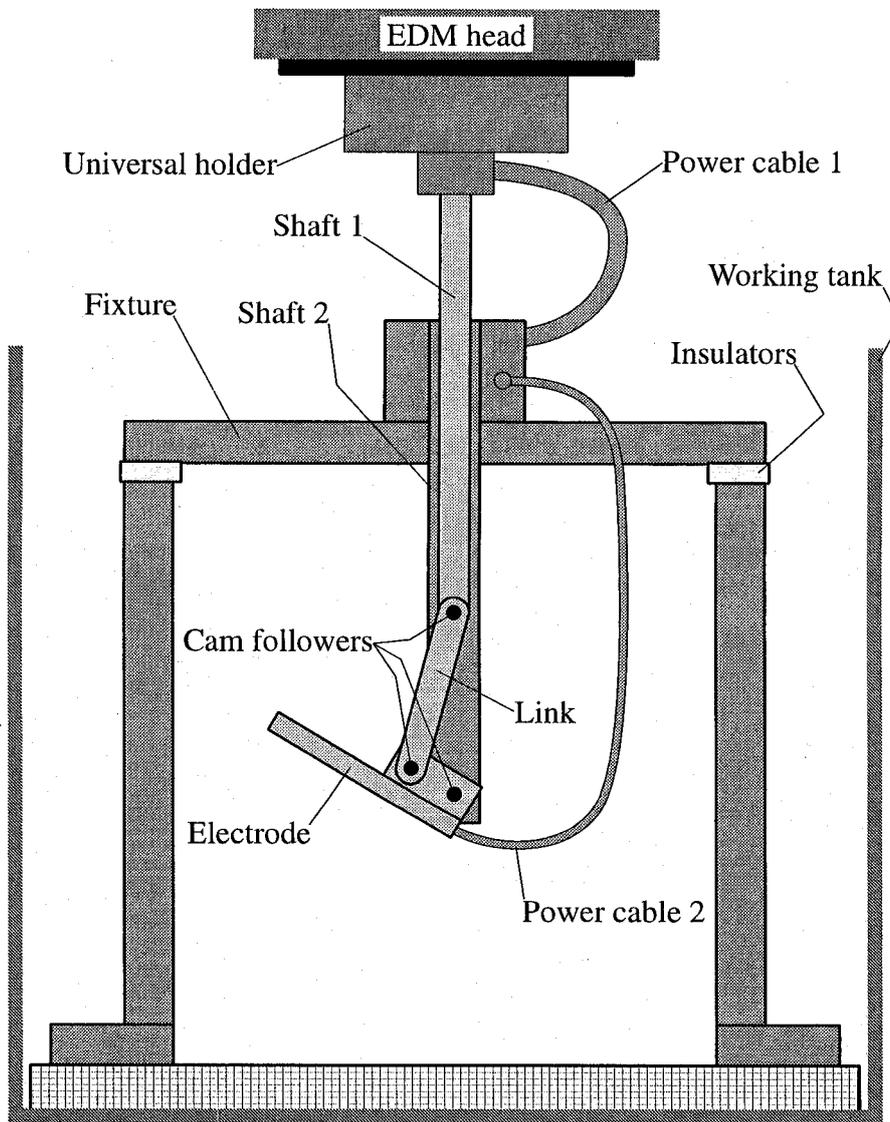


図 2.1: 穴内面放電加工用電極運動機構の模式図

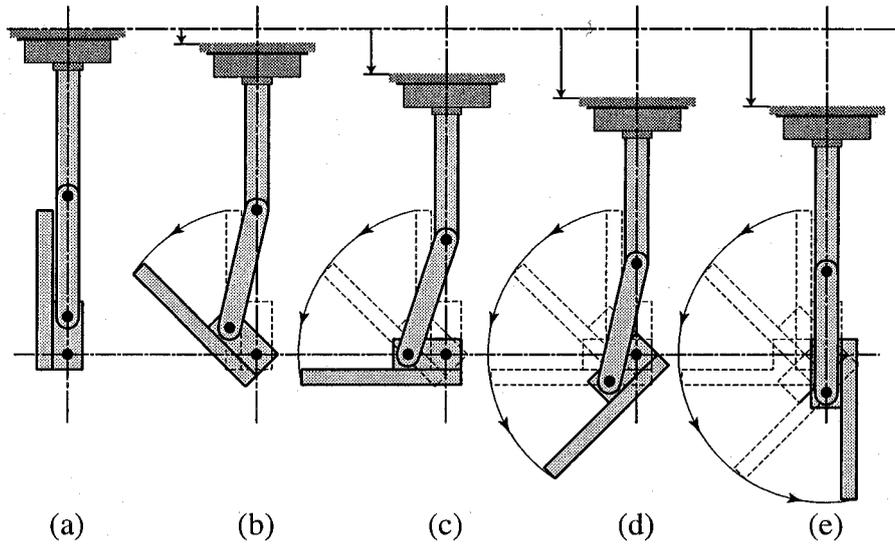


図 2.2: 主軸の移動と電極の回転運動の関係

たは線で接触しており、接触面積が小さいため、これらの部品の連結を確実な電流経路とすることは難しい。特に、軸受回転時には、これらの構成部品間に、軸受に封入された潤滑油の層が形成され、電氣的に絶縁されてしまい、電流経路とされない可能性が大きい。このような状態の軸受の内外輪間に大きな電圧をかけると、内外輪と鋼球またはニードルの間で、放電が生じてしまうこととなる。すなわち、軸受内で放電加工が行われ、軸受が損傷を受ける可能性がある。この現象を回避するために、上記のような配線を施し、軸受の内外輪が主たる電流経路とはならないようにしている。

ここで、加工電流がジグを経由しているため、加工電流がジグから加工槽に流れ、電極における放電加工が行われない事態が懸念されるが、図2.1に示すように、ジグには絶縁体が組み込まれているため、この電流経路から加工層は絶縁されており、このような事態にはならないよう設計されている。

図 2.3(a), (b)に、加工開始時点にある実験装置および加工中の実験装置の模式図をそれぞれ示す。図2.3(a)に示すように、被加工物はジグの下の加工槽底面に固定されている。この被加工物には、あらかじめ直穴が加工されており、電極およびその周辺部品は、この直穴の内部に設置される。このとき、電極は図2.2(a)に示した姿勢となっている。この状態から、通常の型彫放電加工と同様に、主軸を鉛直下方に移動させながら放電加工を行うと、図2.2に示したように、主軸の送りに伴って回転する電極により放電加工が行われる。したがって、図2.3(b)に示すよう

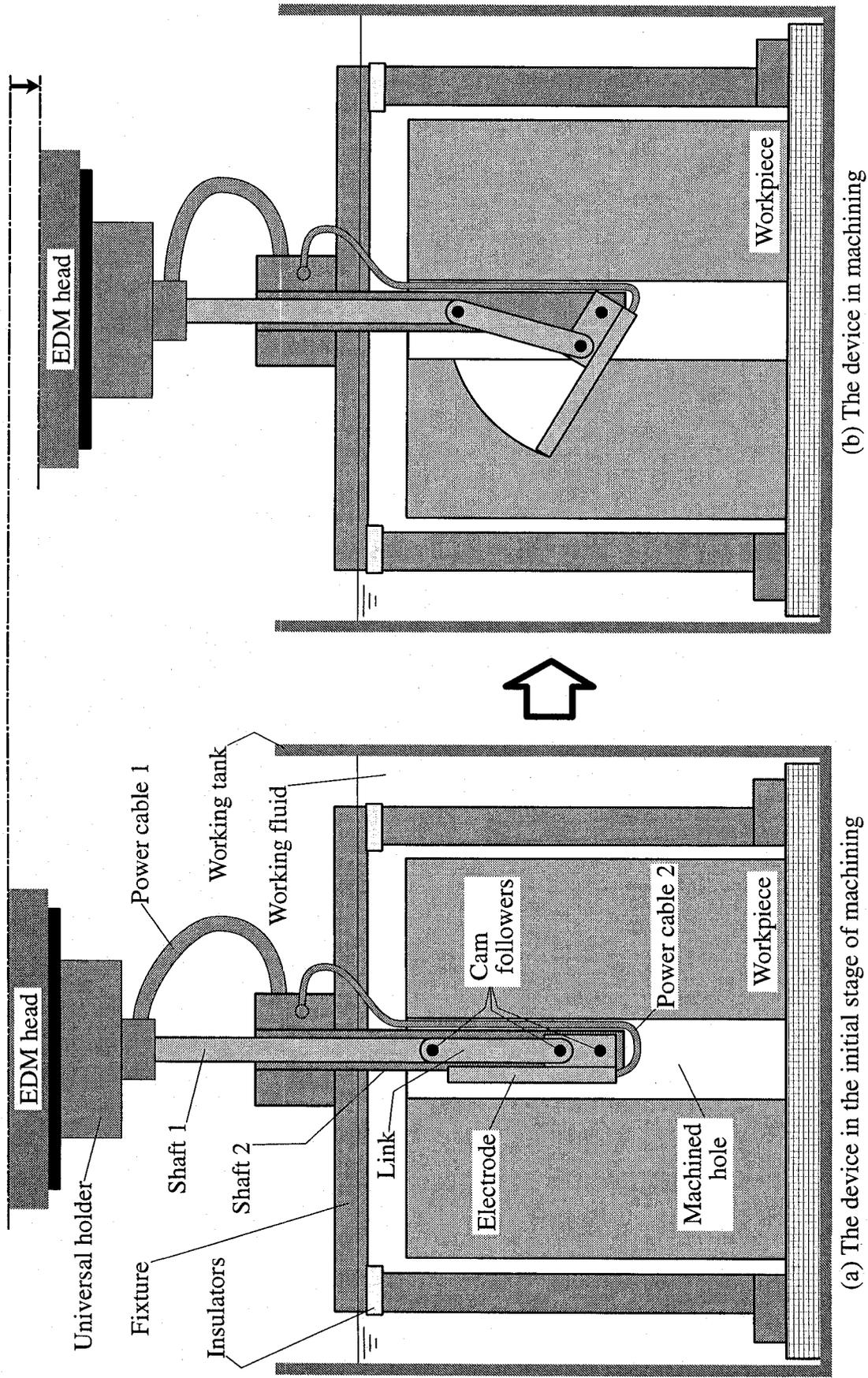


図 2.3: 実験装置の加工過程

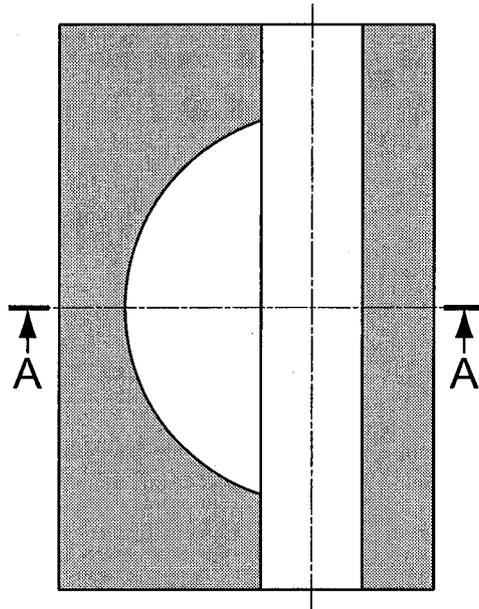


図 2.4: 予想される被加工物の縦断面形状

に、被加工物に加工された直穴内面に、電極運動軌跡のなす包絡形状が加工される。

したがって、電極が図2.2(e)に示した姿勢になるまで、放電加工させながら主軸を送ると、図2.4に示すような縦断面の穴形状、すなわち、その内面に半円形状をした空間をもった穴形状が加工されることが予想できる。さらに、この加工された部分の断面形状、その中でも、図2.4に示したA-A断面の形状は、電極運動軌跡のなす包絡形状の横断面に相当し、これは電極の側面形状に依存する。例えば、側面形状が図2.5(a)に示すような単純な長方形の電極を用いた場合は、図2.5(b)に示すように、比較的単純な断面形状になり、また、側面形状が図2.5(c)に示すような何本かのスリットが入った長方形の電極を用いた場合は、図2.5(d)に示すように、いくつかのフィンが形成されることとなる。

このように、電極の形状に様々に変化させることによって、加工形状を容易に多様化あるいは複雑化することができる。ただし、本実験装置に採用できる電極形状には、条件が2つある。すなわち、電極とその周辺部品が加工開始時点の姿勢をとった際に、直穴に挿入できる大きさであること、また、放電加工時に電極周辺部品、特にリンクが被加工物に干渉しないことがあげられる。

このように、本実験装置を用いれば、従来の除去加工法では実現不可能であった、断面形状が複雑に変化した穴形状が加工することができるはずである。

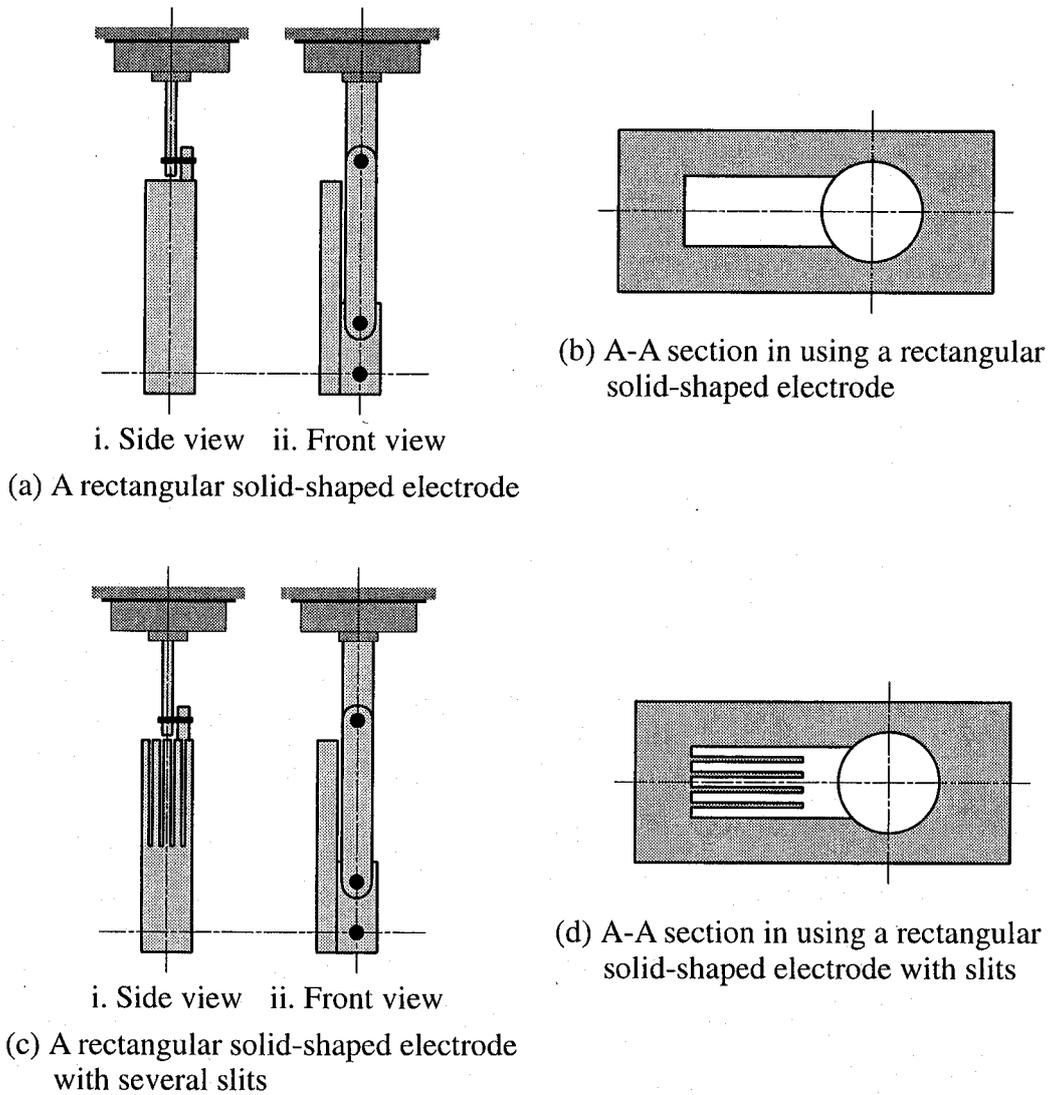


図 2.5: 使用電極の形状によって異なる被加工物横断面形状

2.2.2 装置動作の幾何学的検討

ここでは、2.2.1小節で説明した実験装置の動作を、放電加工機の主軸の移動量と電極の回転角度の関係を幾何学的に検証する。

図 2.6 に実験装置の往復スライダクランク機構部分を示す。図 2.6(a)は、本装置が加工開始姿勢となっている状態を示している。このときの主軸の位置を原点とする。この状態から、主軸がある距離だけ下方に移動し、それに伴って、電極が回転し、図 2.6(b)に示す状態になったとする。ここで、図 2.6(c)に示すように、主

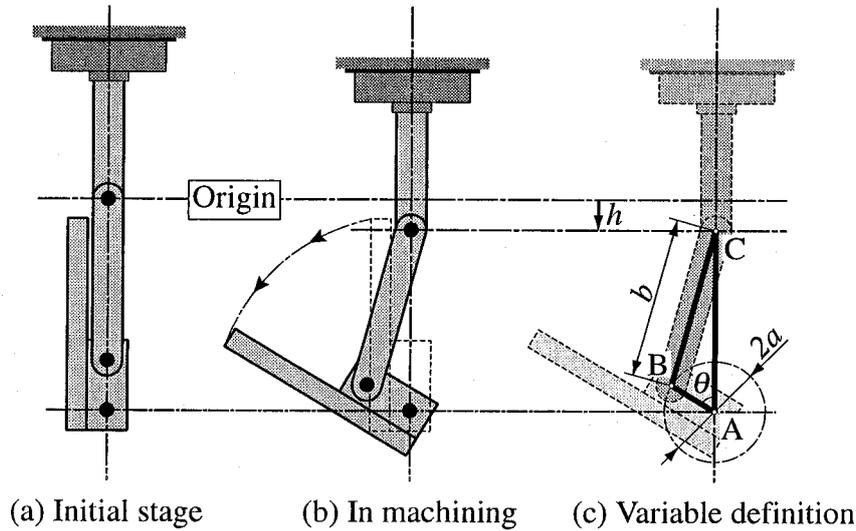


図 2.6: 往復スライダクランク機構部分の変数の定義

軸送り量を h , このときの電極回転角度を θ とする. 加えて, 往復スライダクランク機構のクランク長さ AB を a , リンク長さ BC を b とする. このとき, 往復スライダクランク機構では, h と θ の関係は, 近似的に次式で表される [2].

$$h = a \left(1 - \cos\theta + \frac{a}{2b} \sin^2 \theta \right) \quad (2.1)$$

式(2.1)を θ について解くと, 式(2.2)が導かれる.

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{-b + \sqrt{(a+b)^2 - 2bh}}{a} \right) \quad (0 \leq h \leq 2a) \quad (2.2)$$

式(2.2)において, a を 20mm, b を 50mm としたときの h と θ の関係を表したグラフを図 2.7 に示す. 往復スライダクランク機構の構造上の理由から, 式(2.2)に示したように, h の値域は 0mm 以上 40mm 以下となっている.

このグラフより, 理論的にも主軸の位置が電極の回転角度と一対一の関係をもつこと, すなわち, 本実験装置に取り付けられた電極によって, 放電加工が可能であることがわかる. また, h と θ の関係は, $h = 0, 40$ mm 近傍以外では, ほぼ比例関係となるが, h の値域の midpoint は θ の値域の midpoint に対応していないことがわかる. すなわち, $h = 20$ mm のときに $\theta = \pi/2$ rad とはならない. 式(2.2)から, $\theta =$

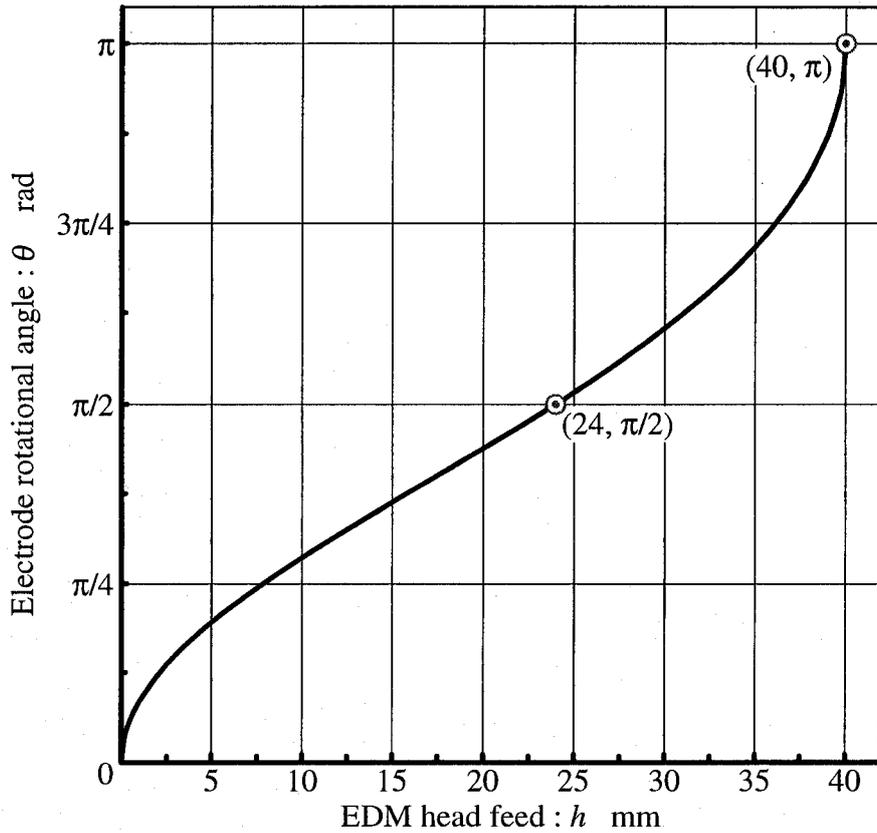


図 2.7: 主軸送り量と電極回転角度の関係 ($a=20\text{mm}$, $b=50\text{mm}$)

$\pi/2$ rad となるのは、ちょうど $h=24$ mm であるときと計算される。加えて、当然ではあるが、 $h=0$ mm のとき $\theta=0$ rad となり、 $h=40$ mm のとき $\theta=\pi$ rad となる。また、式(2.2)より、 θ を h で微分した値 $d\theta/dh$ は、次式のように計算される。

$$\frac{d\theta}{dh} = \frac{b}{P\sqrt{a^2 - (P-b)^2}} \quad \left(P = \sqrt{(a+b)^2 - 2bh} \right) \quad (2.3)$$

ここで、 $d\theta/dh$ を正確に表現すれば、単位主軸送り量当たりの電極回転角度増分となる。つまり、主軸を単位長さだけ移動させると、電極は $d\theta/dh$ の値が示す角度だけ回転するということである。このことが、単位時間当たりに行われたとすれば、主軸を単位速度で移動させると、電極は $d\theta/dh$ の値が示す角速度で回転するということになる。これを数式で表すと、次式のような関係が成り立つ。

$$\omega = \frac{d\theta}{dh} v_h = \kappa v_h \quad \left(\kappa = \frac{d\theta}{dh} \right) \quad (2.4)$$

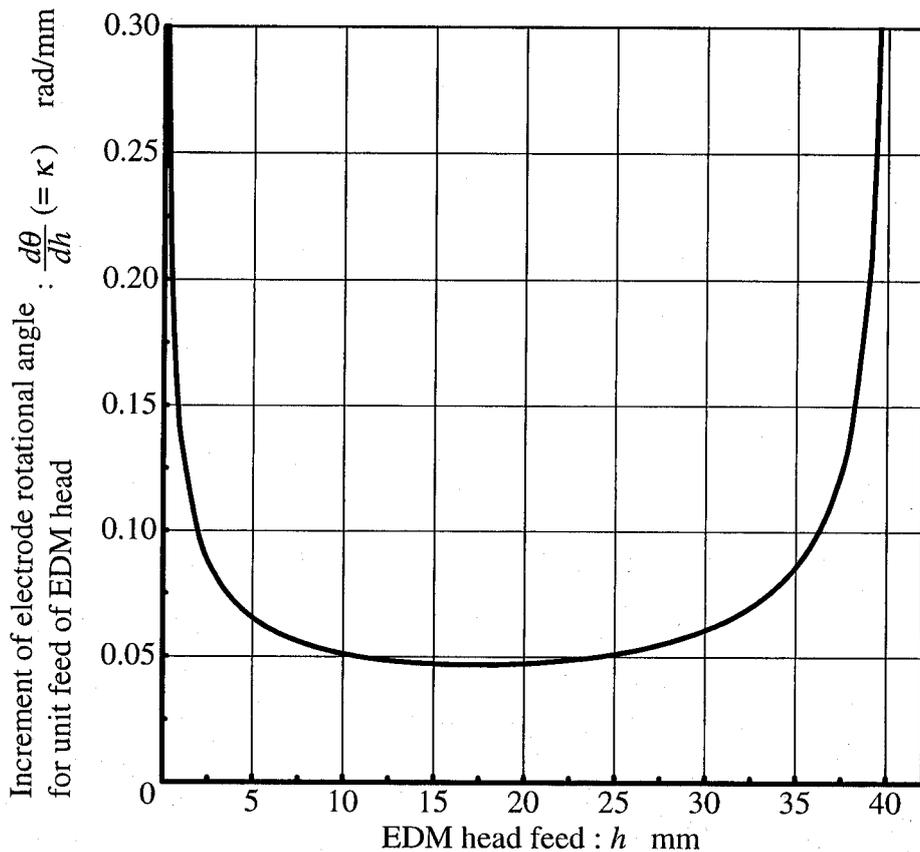


図 2.8: 主軸送り量と動作速度係数の関係 ($a=20\text{mm}$, $b=50\text{mm}$)

ここで、 ω は電極回転角速度、 v_h は主軸送り速度である。式(2.4)に示すように、 $d\theta/dh$ は、電極回転角速度と主軸送り速度の関係における比例係数となっていることから、動作速度係数と呼ぶこととし、改めて、 $d\theta/dh$ を κ と表すこととする。

式(2.3), (2.4)から、図 2.7 に示したグラフを描いたときと同様に、 a を 20mm 、 b を 50mm としたときの h と κ の関係を表したグラフを図 2.8 に示す。このグラフは、 h の値によって、 κ つまり ω の値が変化することを表している。これを言葉で表せば、このグラフは、主軸送り量つまり主軸の位置によって、動作速度係数つまり電極回転角速度が変化することを表している。同時に、このグラフは、 $h=0$ 、 40mm で動作速度係数すなわち電極回転角速度は理論的に無限大となり、動作および加工実験では、これらの値を避ける必要があることを示している。

ここで述べたように、主軸の位置により電極回転角速度が変化するということは、さらに、主軸の移動速度と電極の運動速度が異なることを示している。これに加え、本実験装置の電極は円運動するため、電極自体の部位ごとに、その運動

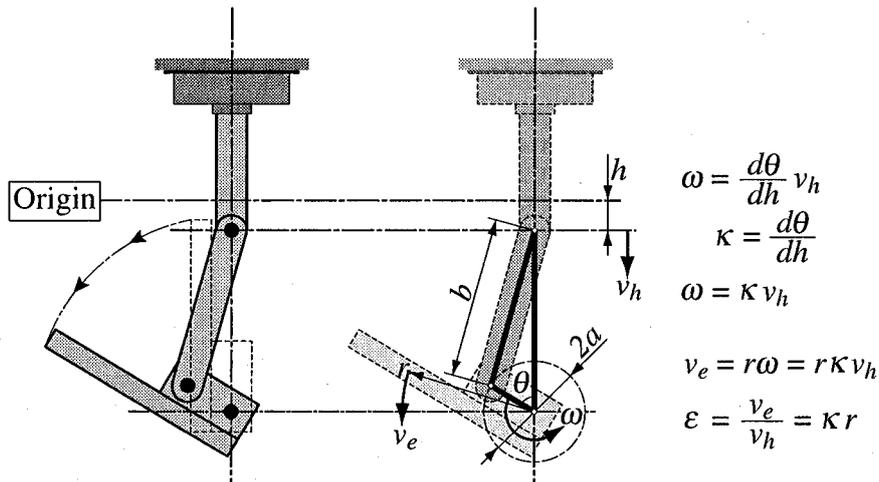


図 2.9: 主軸送り速度, 電極回転速度・角速度, および, その他の変数の定義

速度は明らかに変化する. これらの事態は, 主軸に電極を直接固定する, 従来の型彫放電加工では考えられない.

そこで, 電極の回転速度について考える. 図 2.9 に示すように, 電極の回転中心を原点とし, この原点からある距離 r にある微小電極部位の回転速度を v_e とする. 電極回転角速度 ω は式(2.4)で求められているので, v_e は次式で求められる.

$$v_e = r\omega = r\kappa v_h \quad (2.5)$$

ここで, v_e と v_h の比 ε を導入すると, 式(2.5)は, 次式のように変形できる.

$$\varepsilon = \frac{v_e}{v_h} = \kappa r \quad (2.6)$$

すなわち, ε と r の関係は, κ を傾きとする一次関数となる. κ は式(2.3), (2.4)に示すように h の関数であるので, h をパラメータとして, ε と r の関係をグラフに表すと, 図 2.10 が得られる.

図 2.10 に示すグラフにおいて, 縦軸の ε が, $\varepsilon < 1$ の領域では $v_e < v_h$, $\varepsilon = 1$ のでは $v_e = v_h$, $\varepsilon > 1$ の領域では $v_e > v_h$ となる. すなわち, ある主軸送り量 h における微小電極部位の回転速度 v_e は, その微小電極部位と電極回転中心の間の距離 r に依存して, 主軸送り速度 v_h より遅かったり, 同じであったり, 速かったりする. つまり, 主軸送り速度と比較して, 減速, 加速される, あるいは, 等速となる部位

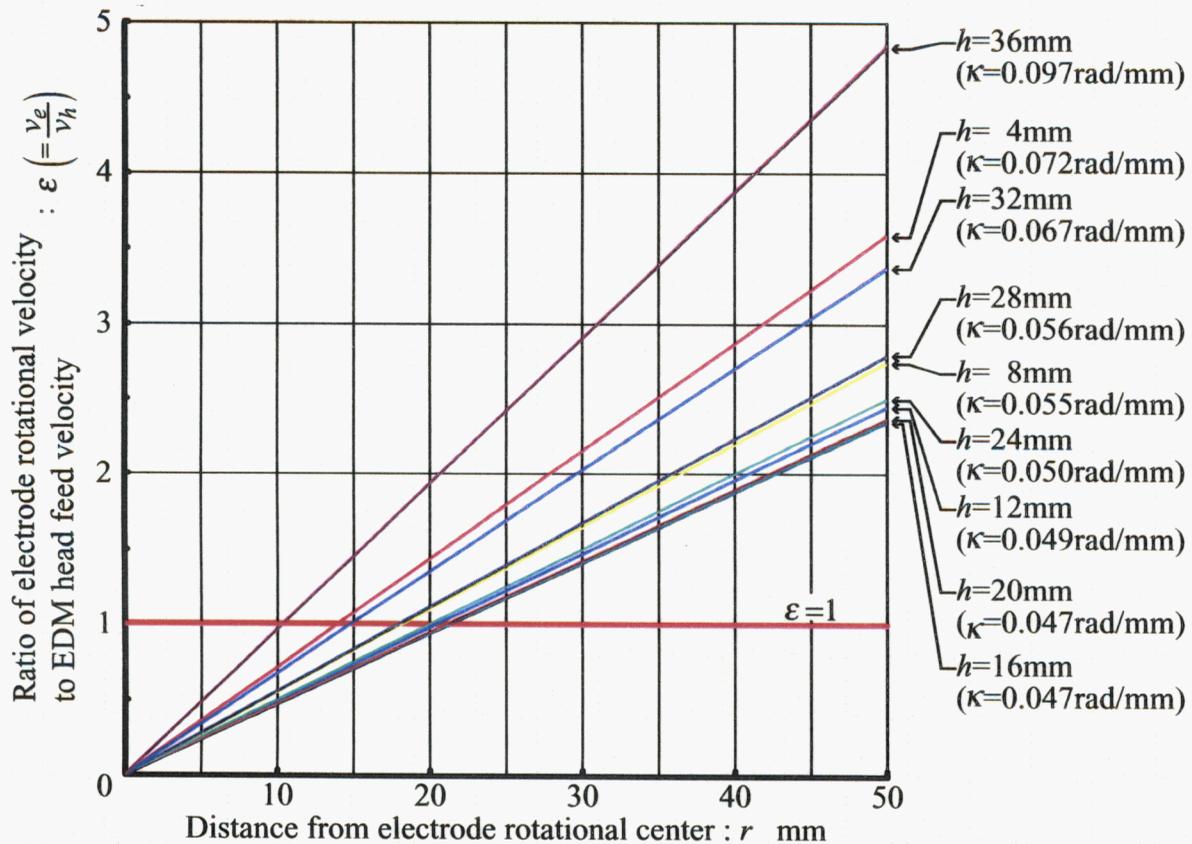


図 2.10: 電極回転中心からの距離にある電極微小領域の主軸送り速度に対する回転速度の比 ($a=20\text{mm}$, $b=50\text{mm}$)

が電極に同時に存在する。なおかつ、その様相は主軸送り量により変化していく。また、このグラフの縦軸は、単位時間当たりで考えれば、主軸の移動距離に対する各微小電極部位の移動距離の比を表す。よって、主軸と電極の移動距離に関しても、前述の移動速度と同じことがいえる。すなわち、図2.10に示すグラフは、主軸と電極の移動速度と移動距離の関係を、定量的に物語っている。

2.3 動作実験

図 2.11 に、実際に製作した実験装置を示す。この実験装置を構成する往復スライダクランク機構のクランク長さ a 、リンク長さ b は、それぞれ 20mm 、 50mm であり、図 2.7、2.8、2.10 に示したグラフを導出したときの条件と同じである。また、加工槽に据え付けられたジグは、その上部の構成部品が 4 本の柱により支持される構造となっている。上部構成部品と柱は樹脂製のボルトとワッシャによっ

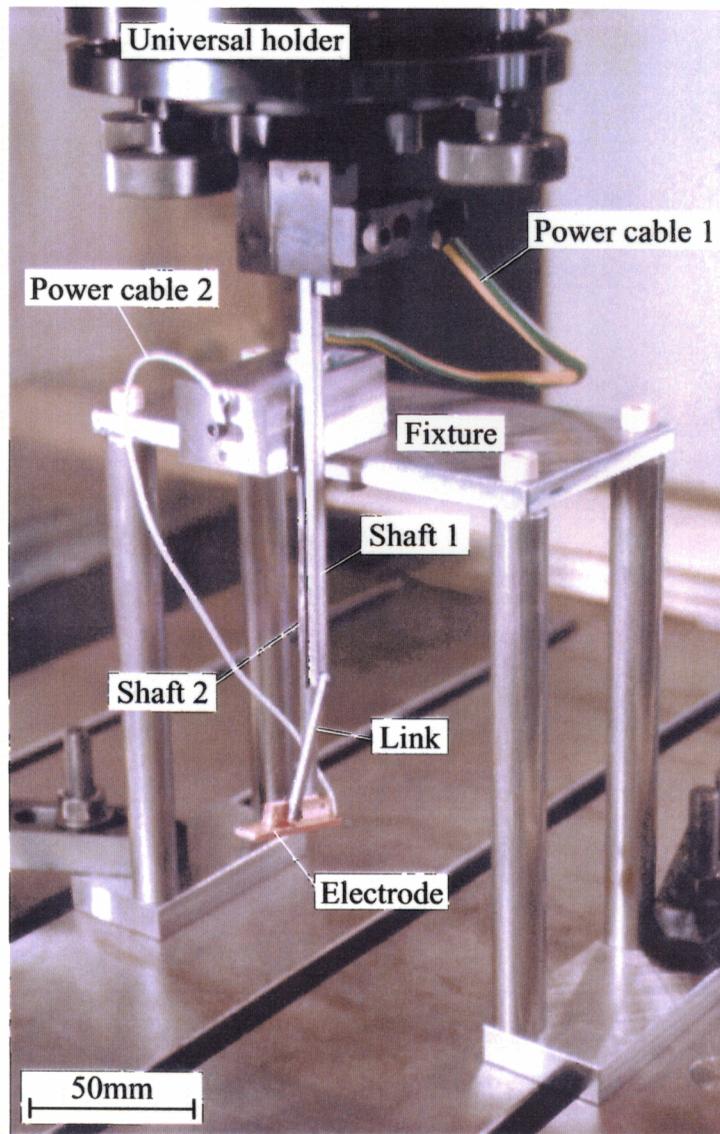


図 2.11: 製作した穴内面放電加工用電極運動機構

て締結されており、2.2.1小節で述べた加工電流経路は加工槽から絶縁されている。また、Power cable 2として採用したケーブルは、被覆を含めた直径が2.0mmのしなやかな被覆ケーブルである。細く、しなやかであるため、本装置を用いて放電加工を行う際、このケーブルが、被加工物にあらかじめ加工された直穴内部における電極などの動作を妨げることはない。加えて、このケーブルの耐用電流は20Aであり、本加工法で用いる放電加工条件に充分対応しうる性能をもっている。なお、型彫放電加工機として、(株)牧野フライス製作所製NC放電加工機EDNC65を使用した。

この実験装置を利用して、動作実験を以下のような方法で行った。まず、被加工物を設置せずに、図2.3(a)に示すような状態に本装置を設定する。次に、主軸を下方に一定の距離ずつ送り、そのときの電極姿勢を定点に置いたカメラにより撮影した。図2.7に示したグラフの導出時に述べたように、加工開始時における電極回転角速度が理論的に無限大となるため、これを避けなければならないが、動作実験では、主軸送り量が0mmのときの電極姿勢に微小な角度をつけることによって、この現象を回避している。また、主軸送り量の最大値は、図2.7、2.8、2.10にそれぞれ示したグラフを導出した際と同じく、40mmである。

図2.12に、主軸を8mmずつ下方に送ったときの電極姿勢の変化を示す。この図に示されるように、電極は実際に図2.2に示したような回転運動を行っていることがわかる。また、図2.12(d)が示すように、主軸送り量が24mmのときに、多少の誤差はあるものの、電極回転角度が $\pi/2$ radとなっていることから、ここまでは、式(2.2)および図2.7のグラフで示した理論計算結果とほぼ同様な動作をしていることがわかる。

しかし、図2.12(f)からわかるように、主軸送り量が40mmのときに、理論計算結果が示すとおり、電極回転角度が π radとなっているとはいえない。主軸をさらに送り、図2.13に示すように、主軸送り量が40.4mmになったときに、電極は約 π radまで回転した。これは、本実験装置の構成部品の寸法誤差や組立誤差によるものであると考えている。

ただし、図2.14に示すように、主軸送り量が40mmのときの電極先端位置は、主軸送り量が0mmのときの電極先端位置の直下であり、被加工物に事前に加工された直穴の半径内に到達している。すなわち、最大主軸送り量を40mmとしても、図2.4に示したような目標加工形状の形成は可能であることがわかる。しかも、結果

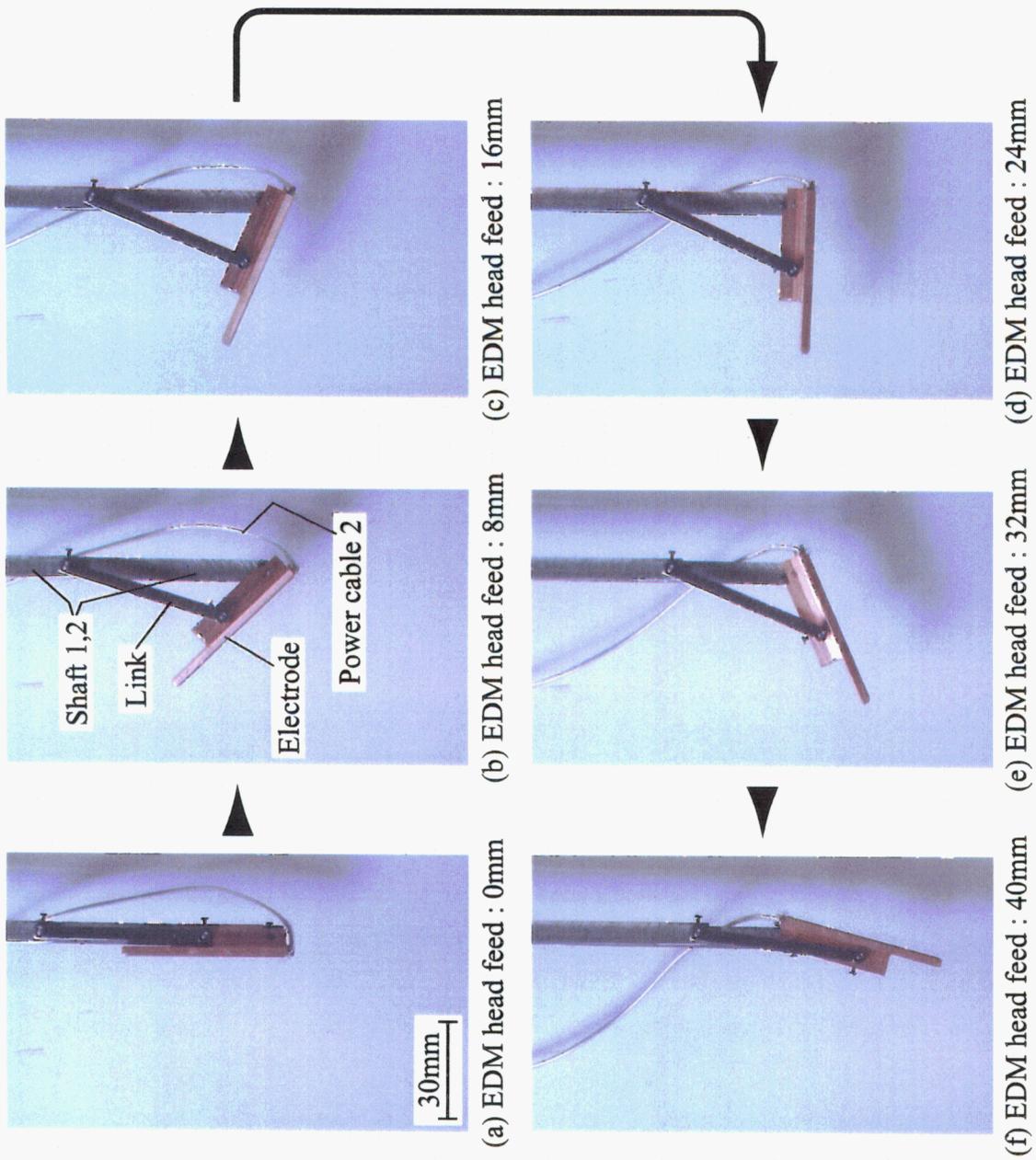


図 2.12: 主軸を送ったときの実際の電極の姿勢の変化

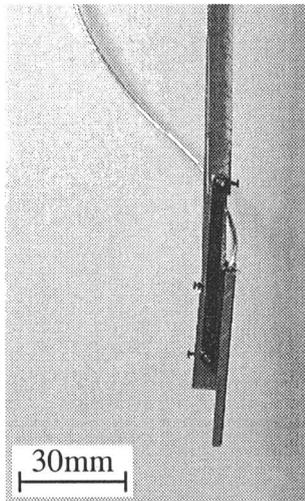


図 2.13: 主軸送り量が 40.4mm のときの電極の姿勢

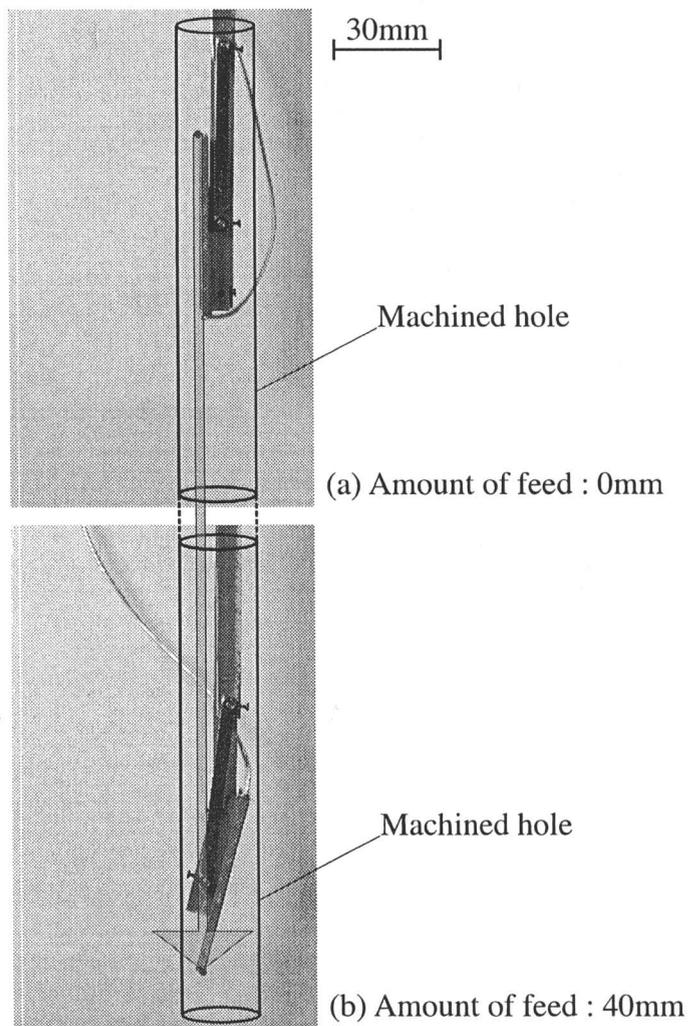


図 2.14: 主軸送り量が 0mm と 40mm のときの電極先端の位置関係

的にではあるが、図2.7のグラフ導出時に述べた、理論的に電極回転角速度が理論的に無限大となる電極回転角度が π radとなる状況が回避できている。

2.4 加工実験

図2.15, 2.16に、加工実験に使用した電極と被加工物の形状寸法および構造をそれぞれ示す。

電極は、図2.15に示すように、次の二種類を用意した。すなわち、図2.15(a)に示すような縦50mm、横10mm、厚さ3mmの直方体形状をした電極と、図2.15(b)に示すような、同様の直方体形状であるが、長さ15mm、幅2mmのスリットが等間隔に2本加工された電極である。ここで、前者をスリット無し電極、後者をスリット付き電極と呼ぶ。両者とも、材質は無酸素銅であり、電極先端が描く円軌道の半径は45.4mmである。また、スリット付き電極におけるスリット最奥点が描く円軌道の半径は30.6mmである。

被加工物は、図2.16に示すように、縦200mm、横160mm、厚さ40mmの直方体形状をしたアルミニウム合金(A5052)であり、直径22mmの貫通直穴があらかじめドリル加工により形成されている。この貫通直穴は、まず被加工物を図2.16に示した切断面で4つに分割し、次にそれらをボルトとナットで固定して、切断前とほぼ同形状に組み立てた後、加工されている。この直穴の内面を本実験装置の加工対象面とする。このような前処理がなければ、形状の評価のために加工後の物体内部形状を切断しなければならないが、これによって加工された形状に切断しろが影響してしまい、正確に加工形状を評価できなくなってしまう。そこで、あらかじめ被加工物を切断する前処理を施すことによって、切断しろの影響を排除しているばかりではなく、加工後の物体内部形状の縦および横断面からの観察が容易になるため、加工形状の評価も正確に行うことができる。

その内面が加工対象面となる直穴の直径は、加工開始時の姿勢にある電極とその周辺部品が挿入できる大きさ以上が必要であるが、本実験装置の電極と周辺部品の最大直径は16mm程度であり、この条件を十分な余裕をもちながら満たしている。これは、本実験装置を用いた型彫放電加工の例がないため、安全を考慮した結果である。

本実験装置による加工は、図2.3(a)に示すように、電極を被加工物に加工された

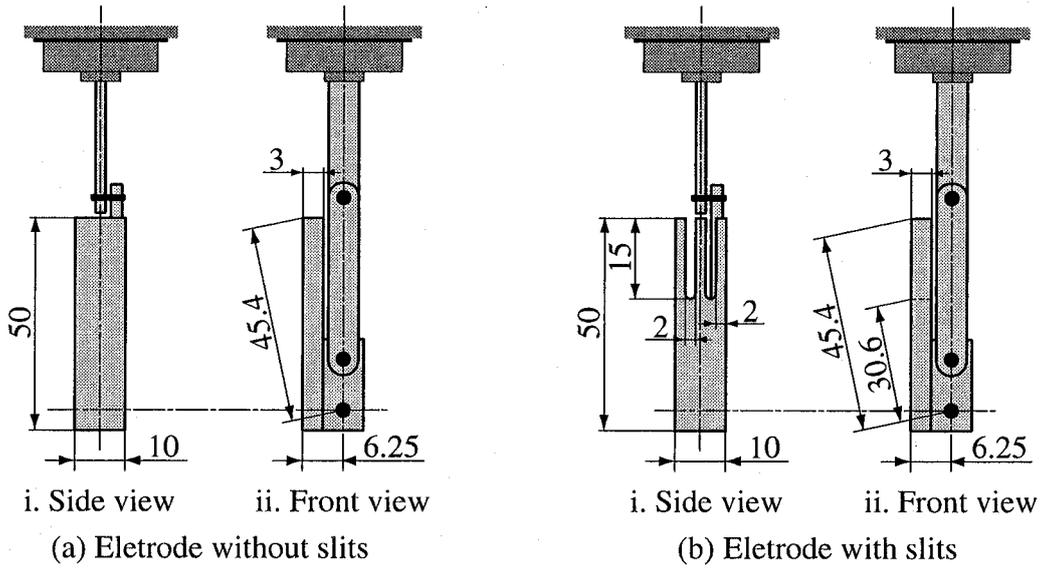


図 2.15: 加工実験に使用した電極の形状

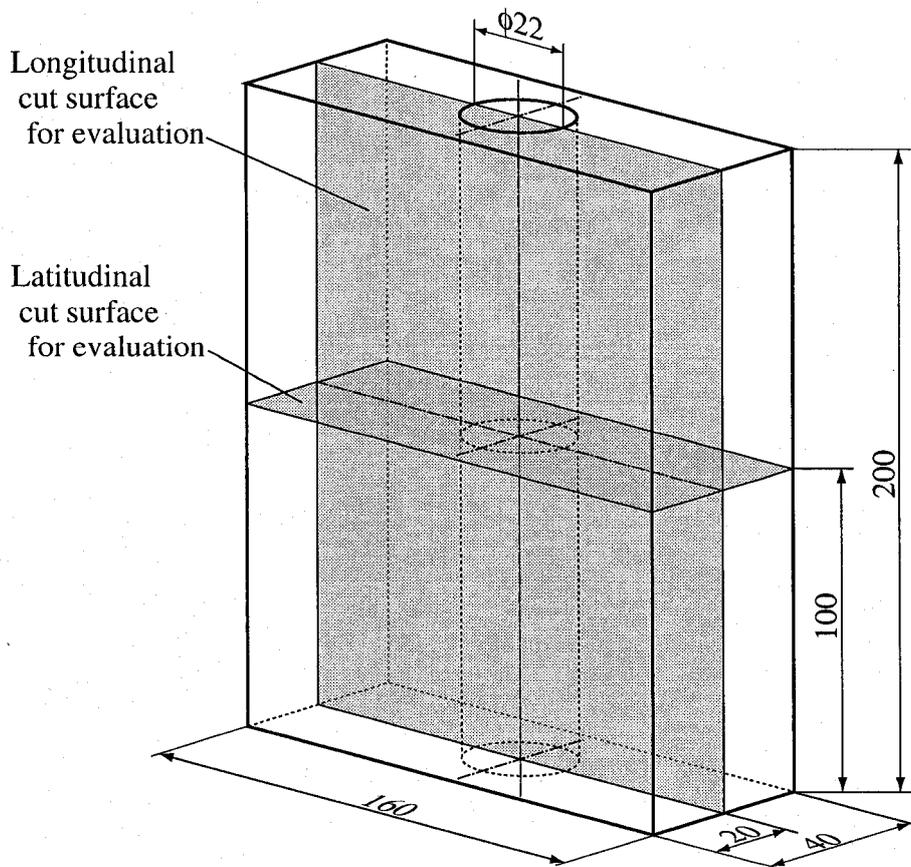


図 2.16: 加工実験に使用した被加工物の形状寸法と構造

表 2.1: 放電加工条件

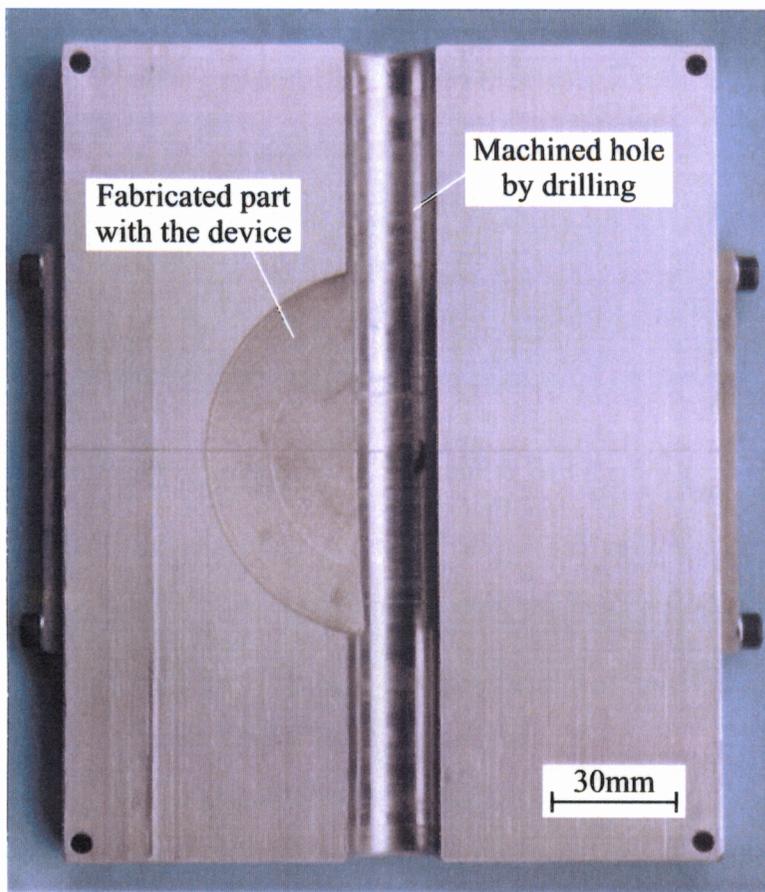
	Experiment 1 (Electrode without slits)	Experiment 2 (Electrode with slits)
Electrode	Oxygen-free copper	
Workpiece	Aluminum alloy (A5052)	
Working fluid	Oil	
Polarity	Reverse	Reverse
Discharge current	10 A	10 A
Pulse duration	155 μ s	155 μ s
Duty factor	51 %, 34 %	51 %
Jump height	0.4 mm	0.4 mm
Jump interval	1.0 sec	2.0 sec
Jump speed	100 mm/sec	100 mm/sec
Orbital motion	Not applicable	Not applicable

直穴内に設置し、開始する。加工開始時の電極は、動作実験と同様に、その姿勢に微小な角度がつけられている。また、電極回転中心の位置は、図 2.16 に示した被加工物の横断面の高さに一致するように設計されている。加工くずを除去するための主軸のジャンプ動作は、加工開始後、主軸送り量が 1mm 以下であるときは適用せず、それ以上送られたことを確認した後、ジャンプの高さを 1mm 以下に設定し、適用した。これは、本実験装置の場合、ジャンプ動作によって、主軸が加工開始時の位置より上方に移動すると、主軸送り量の値域から逸脱してしまい、往復スライダクランク機構を破壊してしまう危険性を孕んでいるためである。また、同様の理由から、加工中における主軸の揺動運動は行わない。

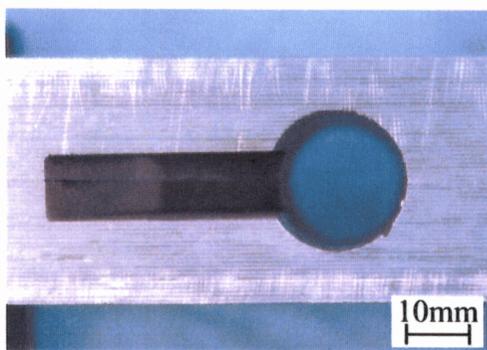
以上のような方法で、スリット無し電極およびスリット付き電極それぞれを用いて、加工実験を行った。ここで、前者の加工実験を実験 1、後者を実験 2 とし、それぞれの放電加工条件を表 2.1 に示す。これらの条件は、型彫放電加工機に用意されているメーカ推奨の放電加工条件に含まれている、電極と被加工物がそれぞれ無酸素銅とアルミニウム合金とした場合の標準的な条件を基本としている。この条件は電極低消耗条件に分類されているものである。ただし、デューティファクタは低めに設定した。特に、実験 1 では、加工途中でやや加工が不安定となったため、51% から 34% へと低くした。よって、表 2.1 に示したように、これらの

値を併記している。また、ジャンプに関しては、実験装置の構造や耐久性を考慮して、ジャンプ量とジャンプ速度ともに標準値より大幅に縮小した値に、また、ジャンプ周期は標準値より長い値に設定した。ただし、ジャンプの設定値は、主軸の動作であり、電極の動作ではない。なお、両加工実験ともに、往復スライダクランク機構のパラメータや主軸の最大送り量は、動作実験と同様である。

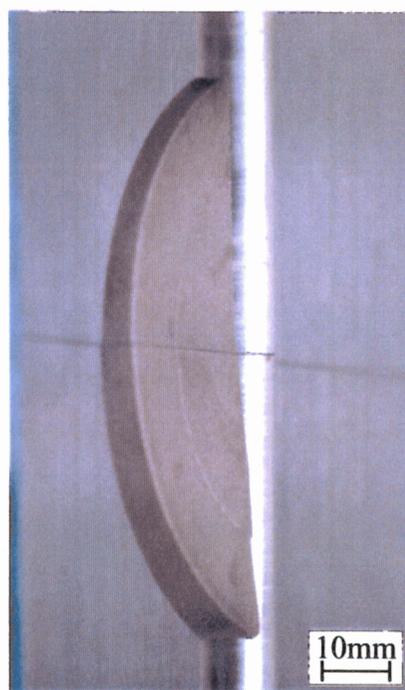
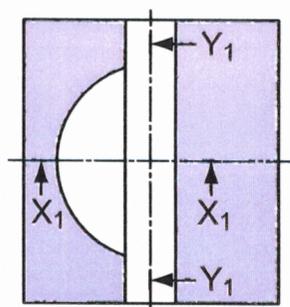
図2.17, 2.18に、それぞれ実験1, 2で加工された被加工物の断面図を示す。これらの加工結果からわかるように、図2.4, 2.5で予想したとおりの形状が加工できた。図2.17(a), 2.18(a)に示した被加工物の縦断面から、半円外周の曲率半径を測定したところ、両者とも45.6mmであった。また、図2.17(b), 2.18(b)に示した横断面より測定した加工形状の全幅は、両者とも10.3mmであり、実験2で加工されたフィンの寸法は、幅1.7mm、高さ14.9mmであった。また、実験1, 2の放電加工時間は、それぞれ16.5時間、7.2時間であった。各実験における放電加工による除去体積は、それぞれ 40cm^3 、 30cm^3 であったので、放電加工速度は、それぞれ $40\text{mm}^3/\text{min}$ 、 $70\text{mm}^3/\text{min}$ である。



(a) Longitudinal section

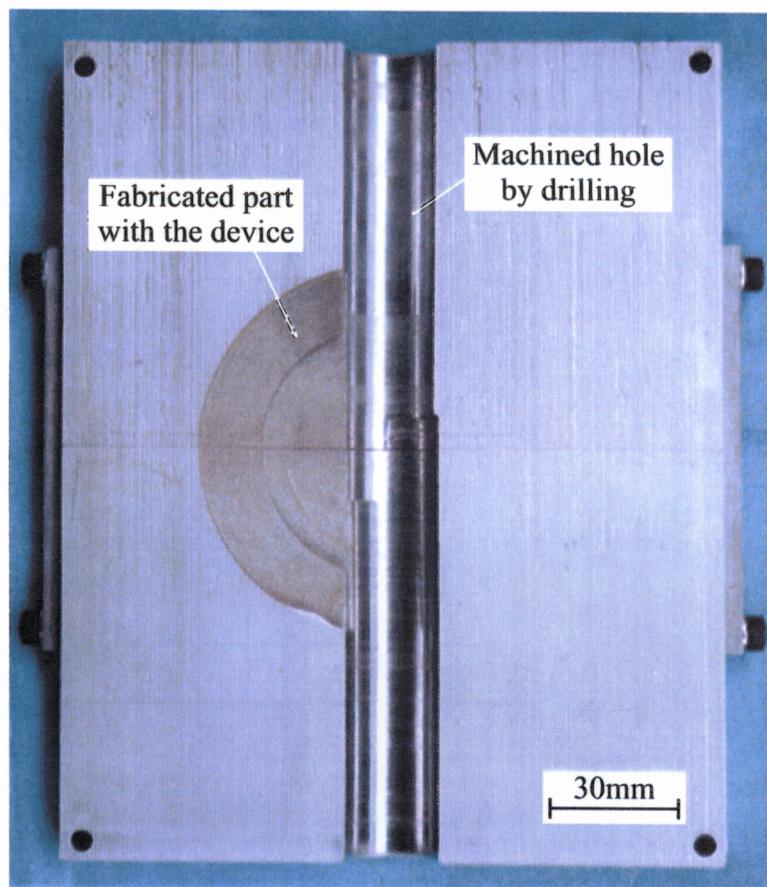


(b) X_1-X_1 section

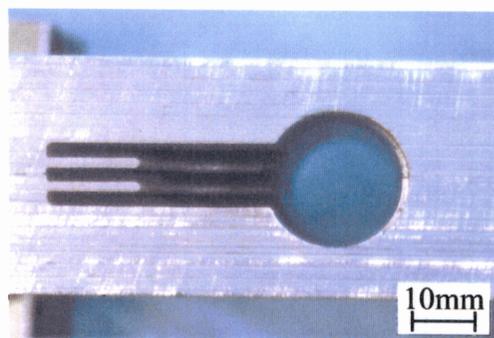


(c) Y_1-Y_1 section (half piece)

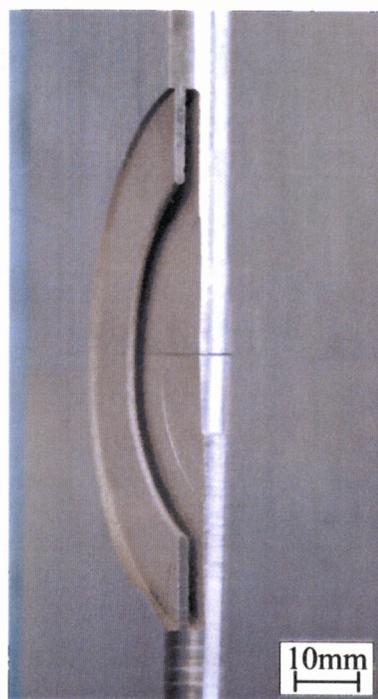
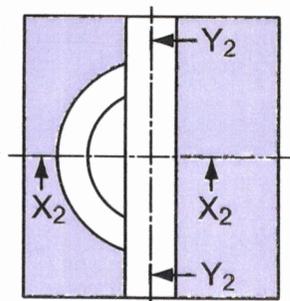
表 2.17: スリット無し電極で加工した被加工物の断面図



(a) Longitudinal section



(b) X_2 - X_2 section



(c) Y_2 - Y_2 section (half piece)

表 2.18: スリット付き電極で加工した被加工物の断面図

2.5 考 察

2.5.1 加工形状に関して

本実験装置を用いて、図 2.17, 2.18 に示すように、直穴内面に半円形状を加工することができた。この結果を定量的に評価するため、実験 1, 2 について、理論的に求めた加工形状の各寸法と、2.4 節で述べた被加工物断面の各測定結果との比較を図 2.19 中の表に示す。加工形状の各寸法の理論値は、極間距離が表 2.1 に示した放電加工条件下では 0.15mm となることは既知であるため、図 2.19(b), (d) に示した電極運動軌跡がなす包絡形状の各寸法と極間距離の位置関係から容易に計算できる。

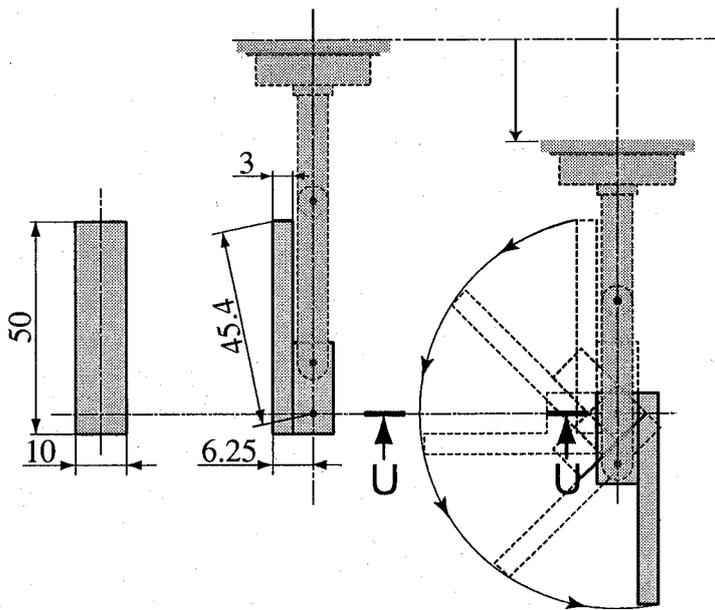
図 2.19 中の表に示したように、実験 1, 2 ともに、ほぼ理論値どおりに加工されていることがわかる。このことは、本実験装置を用いた放電加工においても、従来の放電加工と同等な精度が得られる可能性があることを示している。

しかし、図 2.17(c), 2.18(c) において見られるように、電極の運動軌跡面と被加工物の切断面は平行とはいえない。この傾向は、実験 1 の加工結果である図 2.17(c) で顕著である。この主な原因は、本実験装置を構成する各 부품の寸法誤差や組立誤差の集積による動作誤差や、加工開始時における装置と被加工物の設置位置の誤差であると考えている。

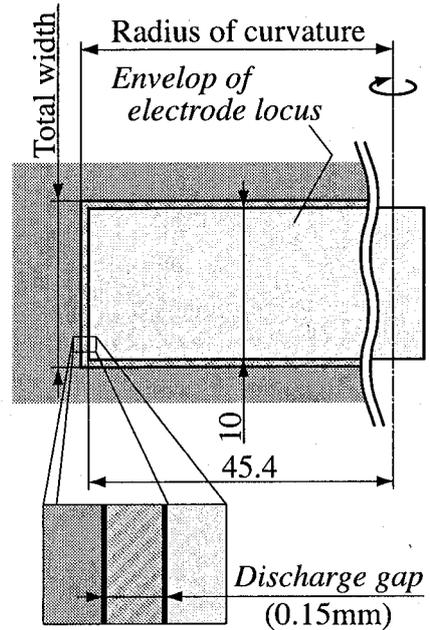
したがって、加工形状の精度を上げるためには、実験装置の動作誤差を可能なかぎり抑えること、すなわち、構成部品の精密加工と精密組立、および、これらを実現するための設計の洗練化が必要であろう。特に、電極周辺の構成部品は、縦横比が非常に大きい部品が多く、加工や組立時に変形が伴いやすい形状になっており、これらを抑制するための設計上の工夫が重要になると予想される。これらに限界がある場合は、さらに、電極運動の測定方法を開発し、動作誤差を評価したうえで、それを修正するなんらかの方法が必要になると考えている。

2.5.2 放電加工条件に関して

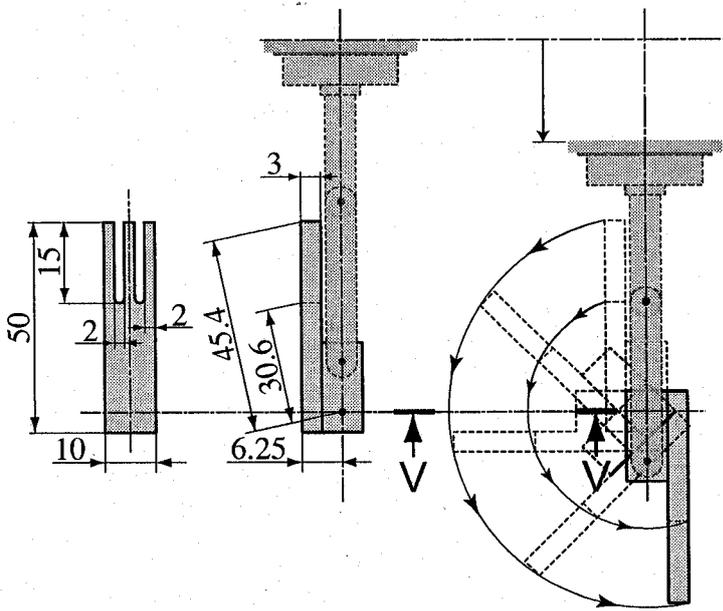
実験 1, 2 の加工速度はそれぞれ $40\text{mm}^3/\text{min}$, $70\text{mm}^3/\text{min}$ となったが、同一の型彫放電加工機を用い、表 2.1 に示した同様の放電加工条件で、通常どおりの放電加工を行ったところ、その加工速度は $50\text{mm}^3/\text{min}$ であったので、放電加工速度の面でも、本実験装置を用いた放電加工は、従来の放電加工と同等な能力をもって



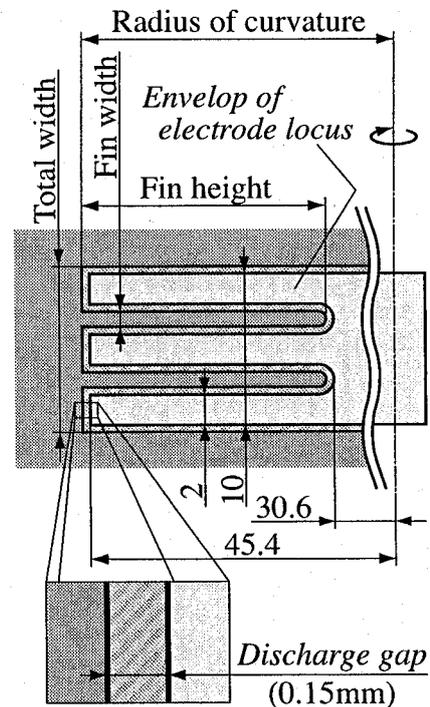
(a) Locus of the electrode without slits



(b) Dimension of U-U section



(c) Locus of the electrode with slits



(d) Dimension of V-V section

	Theoretical value	Experiment 1 (Electrode without slits)	Experiment 2 (Electrode with slits)
Radius of curvature	45.6 mm	45.6 mm	45.6 mm
Total width	10.3 mm	10.3 mm	10.3 mm
Fin height	14.8 mm	-	14.9 mm
Fin width	1.7 mm	-	1.7 mm

表 2.19: 電極運動軌跡がなす包絡形状と極間距離および加工形状の関係

いる可能性がある。ただし、前述の加工精度に関しても同様であるが、加工実験数があまりにも少ないため、断定には慎重を期し、今後、数多くの実験結果の集積のもとに、行うべきであろう。

ただし、この比較のための同放電加工条件下における従来放電加工実験では、主軸と電極は同一の動作をする。一方、図2.10に示したグラフにおいて指摘したように、主軸と電極の移動速度もしくは移動距離の関係は、主軸送り量と電極自体の部位によって変化するため、また、電極と被加工物の位置関係も逐次変化し、加工くずの排出形態も逐次変わるため、放電加工条件であるとしても、一概に、同じ加工条件とはいえないのも事実である。よって、比較のためには、従来の放電加工から本実験装置を用いた放電加工まで含めた統一的な指標を考案するか、それができなければ、飛躍が過ぎるかもしれないが、考案した型彫放電加工を、従来の型彫放電加工とは形態の違う放電加工と捕らえ、その枠の中で、なんらかの統一指標を確立したほうがよいかもしれない。

また、実験1、2の加工速度には大きな差が生じた。この直接の原因は、表2.1に示した放電加工条件の差、つまり、デューティファクタおよびジャンプ周期の差によるものと考えている。すなわち、実験1より実験2の方が、時間平均したデューティファクタが大きく、また、ジャンプ周期が2倍と長くなっている。これは、実験1より実験2の方が、単位時間当たりの投入エネルギーが大きく、単位時間当たりの放電加工に費やした時間が長いことを表している。よって、実験2の加工速度が速くなることは予想できるものの、75%も速くなっており、他の何らかの原因がある可能性がある。このような結果から、本実験装置を用いた放電加工では、加工条件の最適化の余地は多く残されているおり、多くの実験を通して、最適条件を探索しなければならないであろう。

2.6 結 言

本章では、断面変化穴形状の加工を実現するために、考案、開発した穴内面放電加工用電極運動機構について説明した。この実験装置は、往復スライダクランク機構を応用したもので、型彫放電加工機の主軸がスライダとして、また、電極がクランクとして動作するように、構築されている。よって、本実験装置は主軸の直線運動を電極の回転運動に変換することができる。さらに、主軸の移動と電極の回転運動は一対一に対応するので、この電極による放電加工が可能となる。したがって、電極を直穴にあらかじめ設置し、放電加工を開始すると、回転運動する電極によって、直穴の内面を放電加工の対象とすることができる。このような実験装置による動作実験および加工実験の結果、以下のような結論を得た。

- (1) 本実験装置を用いて動作実験を行ったところ、主軸の直線運動を電極の回転運動に変換することができた。また、両者はほぼ理論どおりに運動した。
- (2) 直方体形状の電極を用いて加工実験を行ったところ、直穴内面に半円形状の空間を加工することができた。
- (3) スリットをもつ直方体形状の電極を採用して加工実験を行ったところ、直穴内面にフィンが形成された半円形状の空間を加工することに成功した。
- (4) 加工形状を評価したところ、開発した加工方法は、従来の放電加工と同等な性能をもつ可能性があることが示された。
- (5) 加工実験の結果から総合的に判断して、考案した加工法を発展させれば、複雑な断面変化穴形状を加工できる可能性を示すことができた。

2.7 展 望

今後は、実験装置を発展させ、さらに多様な形状を加工に挑戦するとともに、動作実験および加工実験で判明した欠点の克服と実用化を目指し、以下のような研究を行っていきたいと考えている。

(1) 電極の運動軌跡と形状の高自由度化による複雑形状化および小型化

本章で考案した実験装置では、電極運動軌跡が半円形状であるが、図2.20に示すように改良し、電極運動軌跡の高自由度化を実現することによって、穴内面へのさらなる複雑形状の加工を可能にする。すなわち、放電加工機の主軸動作をリニアセンサで検知し、その主軸の位置に対応するように、Shaft2の位置をサーボモータとボールねじを用いて制御すれば、多様な電極運動軌跡を実現できる。

さらに、Z軸まわりの回転軸であるC軸によって、回転運動も組み合わせることができれば、直穴の円周方向への加工も可能になる。加えて、電極形状をより複雑な形状にすれば、さらに多彩な形状の加工が可能となる。

同時に、実験装置の電極周辺部を小型化し、小径直穴への穴内面形状加工の適用を目指す。

(2) 電極運動軌跡の測定法と形状評価法の確立

電極の運動軌跡や形状が複雑化すると、意図した運動軌跡が得られているか検証する必要がある。そこで、電極運動軌跡を測定し、実験装置の動作誤差を検出する測定システムを構築し、電極運動軌跡の補正を可能とする。また、加工形状は穴内面であるため、形状測定や評価が難しい。そこで、形状評価法を確立しなければならない。

(3) 加工された穴内面形状の仕上げ法の開発

考案した実験装置では、その構造上、通常の放電加工のように、減寸した電極を用いた電極揺動加工による加工面の仕上げができない。そこで、荒加工後に、仕上げ加工用の電極と加工条件を用いて、加工面を仕上げることが考えられるが、この際には、荒加工用電極から仕上げ加工用電極への交換時

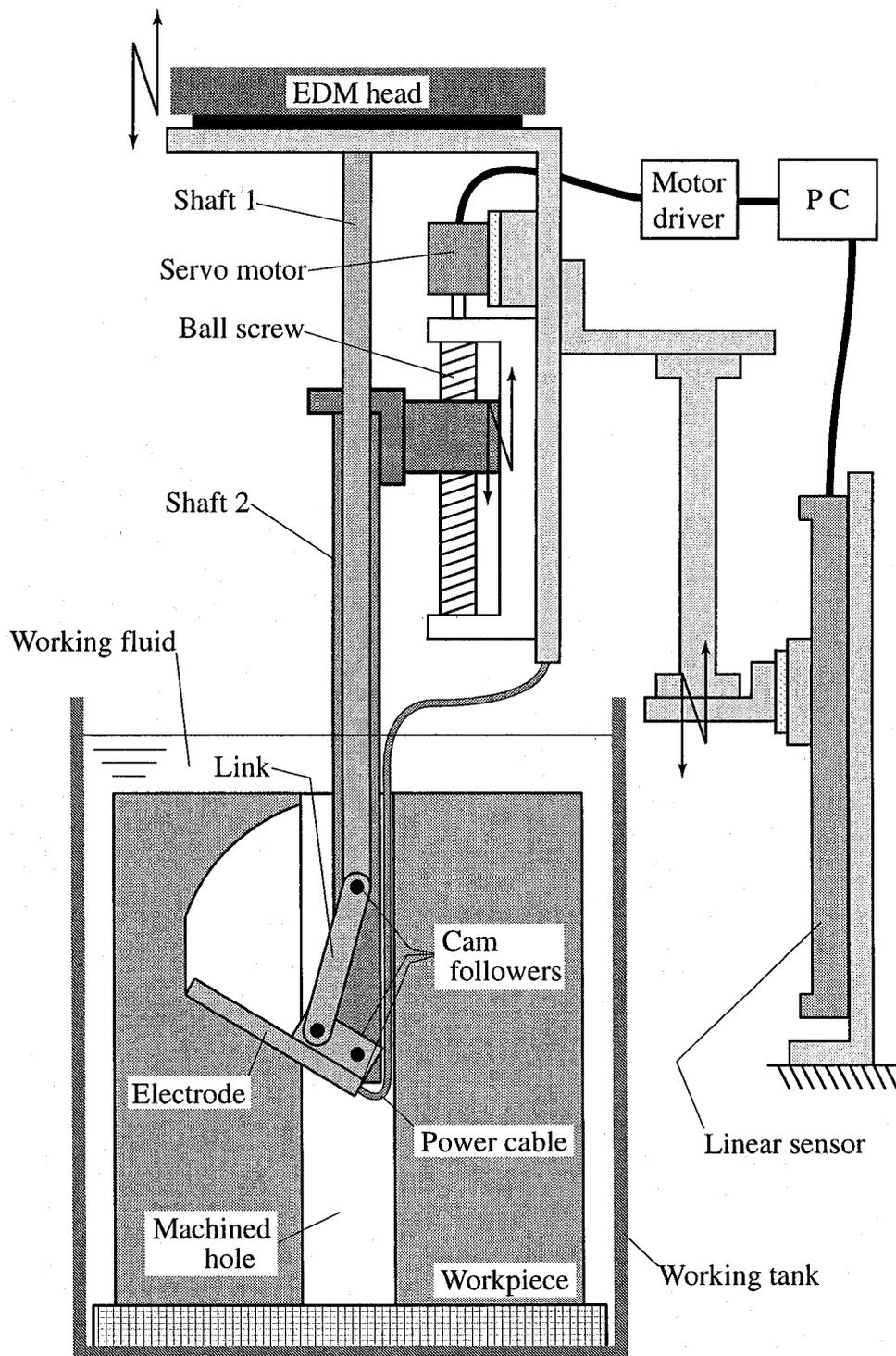


表 2.20: 次期実験装置の模式図

に、両者の位置に誤差が生じないようにしなければならず、困難な事態が予想される。よって、穴内面形状の仕上げ加工に適応した加工法を新たに開発しなければならない可能性がある。

(4) 穴内面形状加工用 CAM システムの開発

目標とする穴内面形状を CAD で定義すれば、その情報に基づき、電極の運動経路と形状を計算し、図2.20に示したサーボモータや主軸の直動および回転の動作データを出力する CAM システムを開発する。この際、本加工法では、電極の部位によって、被加工物の除去量が相違するため、電極消耗量も電極の部位によって変化し、加工後の形状精度に影響を及ぼす。同様に、電極の移動速度も電極の部位により変化し、加工くずの挙動や最適な加工条件も変化するであろう。このような電極消耗量や電極移動速度の差も考慮に入れたシステムを目指す。

(5) 穴内面形状加工の応用

断面変化穴加工法の応用として、射出成形金型の冷却管にフィンを加工し、金型の温度制御性能を高度化することが期待される。そこで、本加工法と CAE との連携による最適形状の解析や、実際に射出成形し、金型温度分布の評価や成型品の形状評価を行う。

参 考 文 献

- [1] 日本トムソン株式会社：ミニカム™ シリーズカタログ
- [2] 森田 鈞：機構学，実況出版 (1974) 149-156.

第3章

曲がり穴加工法の開発 1

— 曲がり穴放電加工用電極送り機構 —

3.1 緒 言

本章から次々章にかけては、目標加工形状とした二種類の物体内部形状のうち、曲がり穴形状の除去加工法による創成を目指し、考案した加工法について説明する。

除去加工法を用いて曲がり穴形状の加工するためには、加工可能状態にある工具を物体内部において曲線軌跡上を運動させればよい。このことを放電加工を用いて行うことを考えると、1.2.4.3 小々節で述べたように、放電加工機の主軸の直線運動を、被加工物の内部において曲線軌跡上を進行するような電極の運動に変換する機構を開発すればよいことになる。

そこで、放電加工機の主軸の直線運動を電極の曲線運動を変換することを可能にする単純な構造をした装置、すなわち、曲がり穴放電加工用電極送り機構を開発した。本章では、このような装置を用いた動作実験と加工実験を行い、開発した装置が有する運動変換原理による曲がり穴形状の実現可能性について検証した。

3.2 曲がり穴放電加工用電極送り機構

3.2.1 装置の構造と動作過程

図3.1に、曲がり穴放電加工用電極送り機構の模式図を示す。本実験装置の中央にある圧縮コイルばねの一方の端部に工具電極が、他方の端部に金属製パイプが取り付けられおり、さらに、このパイプは、型彫放電加工機の加工槽中に設置されたジグに固定されている。また、電極側のばね端には、その内側円周部に、3本のワイヤが120°等配で取り付けられており、これらは、ばねとパイプの内部を通り、放電加工機の主軸へと導かれる。一方、主軸にはプーリの固定とワイヤの取付けが可能な面盤が設置されている。ばね端から導かれた3本のワイヤは、それぞれ面盤に固定されたプーリを経由し、加工槽中に設置されたジグへと導かれる。このジグも面盤と同様にプーリの固定とワイヤの取付けが可能である。面盤のプーリを経由してきた3本のワイヤのうち、左側の2本はそのままジグに取り付けられ、右側の1本はジグに固定されたプーリを再度経由し、面盤に取り付けられている。

加工くずの除去は、放電加工機に設備されている加工液供給装置から供給される加工液を、フレキシブルチューブと電極に加工された小径穴を経由して、電極間隙へ送り込むことにより実現されている。

加工電流は、主軸とパイプをケーブルで結線することにより、主軸、ケーブル、パイプ、圧縮コイルばね、電極という経路で供給される。ここで、加工電流がパイプを経由しているため、加工電流がパイプからジグを通して加工槽に流れ、電極における放電加工が生じないことが懸念されるが、図3.1に示すように、ジグに絶縁体が組み込まれているため、この電流経路から加工槽は絶縁されており、このような事態には陥らない。

図3.1を2次元的に表した図3.2を用いて、本実験装置の動作過程を説明する。ここで、面盤にある1個のプーリを経由してジグに固定されるワイヤをWire1、面盤とジグのそれぞれ1個ずつ、合計2個のプーリを経由して面盤に固定されるワイヤをWire2とする。

図3.2(a)は加工開始時の状態を表している。加工開始時の圧縮コイルばねは、ワイヤ群により最大限に圧縮された状態となっている。このときのばねの高さは密着高さと呼ばれ、この長さを H_s と表すものとする。この状態を言い換えれば、主

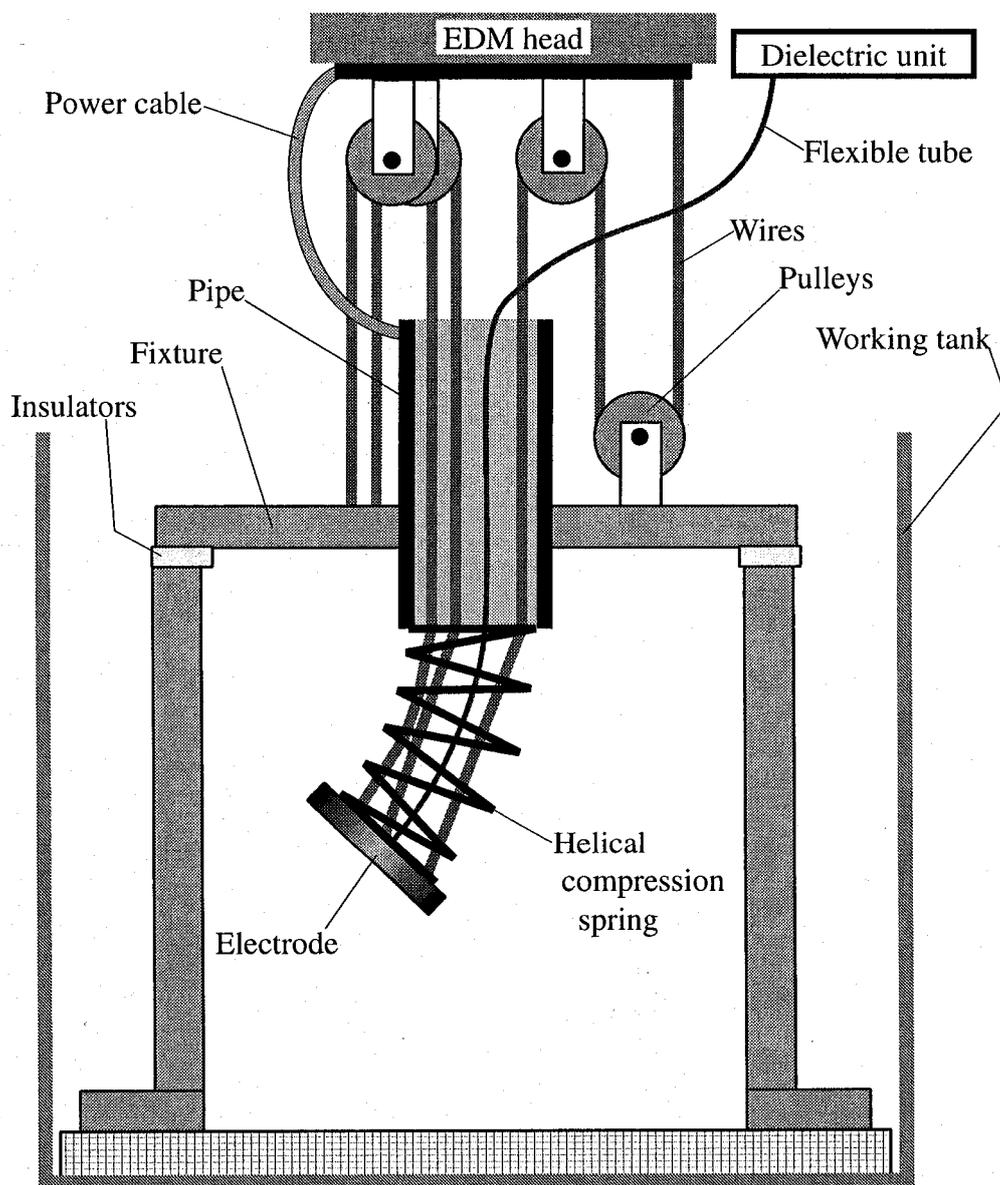


図3.1: 曲がり穴放電加工用電極送り機構の模式図

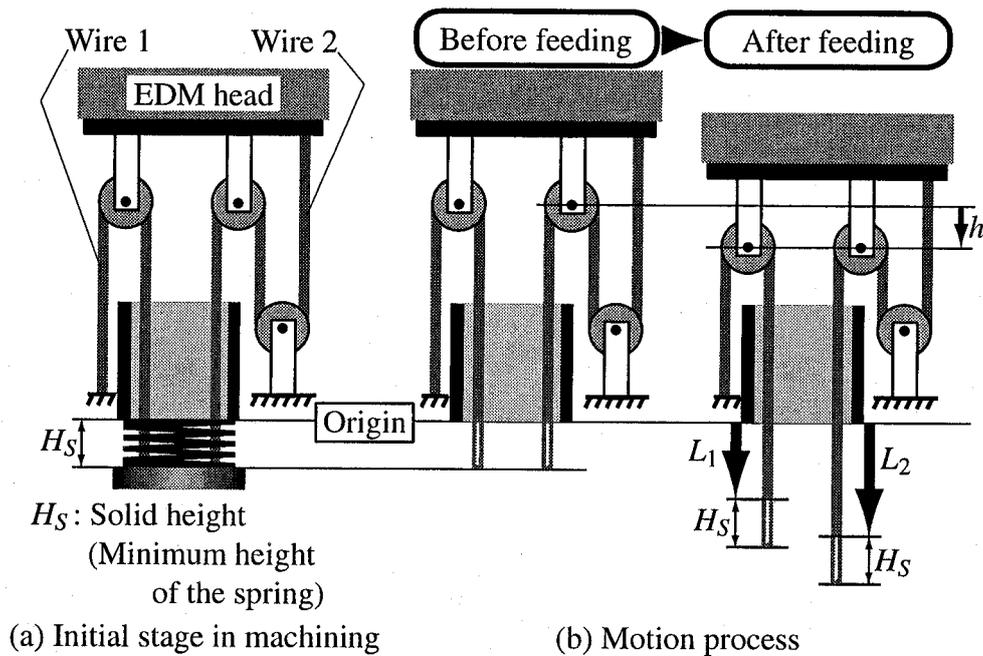


図3.2: 主軸送り量とワイヤ送り量の関係

軸が、3本のワイヤを介して、この圧縮コイルばねの発生する最大復元力を支持していることになる。

この状態から、主軸を通常の放電加工と同様に鉛直下向きに移動させると、最大圧縮状態にあった圧縮コイルばねはその長さを回復するため、図3.2(b)に示すように、各ワイヤはばねの復元力と釣り合いながら下方に引き出される。

図3.2(b)において、引き出された各ワイヤの長さ、すなわち、圧縮コイルばねの最大圧縮状態時におけるワイヤ端の位置を原点とし、主軸の下方への移動による圧縮コイルばねの伸長によって、原点より下方に引き出されるワイヤの長さをワイヤ送り量と呼ぶ。さらに、Wire1とWire2のワイヤ送り量をそれぞれ L_1 、 L_2 とする。また、各ワイヤのワイヤ送り量の比をワイヤ送り量比と呼ぶ。さらに、このときの主軸の移動量を主軸送り量と呼び、これを h と表すものとする。

ここで、図3.2(b)からわかるように、 h と L_1 および L_2 の関係は、各ワイヤのプーリ経由数の違いから、常に次式に示す関係を維持する。

$$L_1 = 2h, \quad L_2 = 3h \quad (3.1)$$

よって、 L_1 と L_2 のワイヤ送り量比は、次式に示すように一定となる。

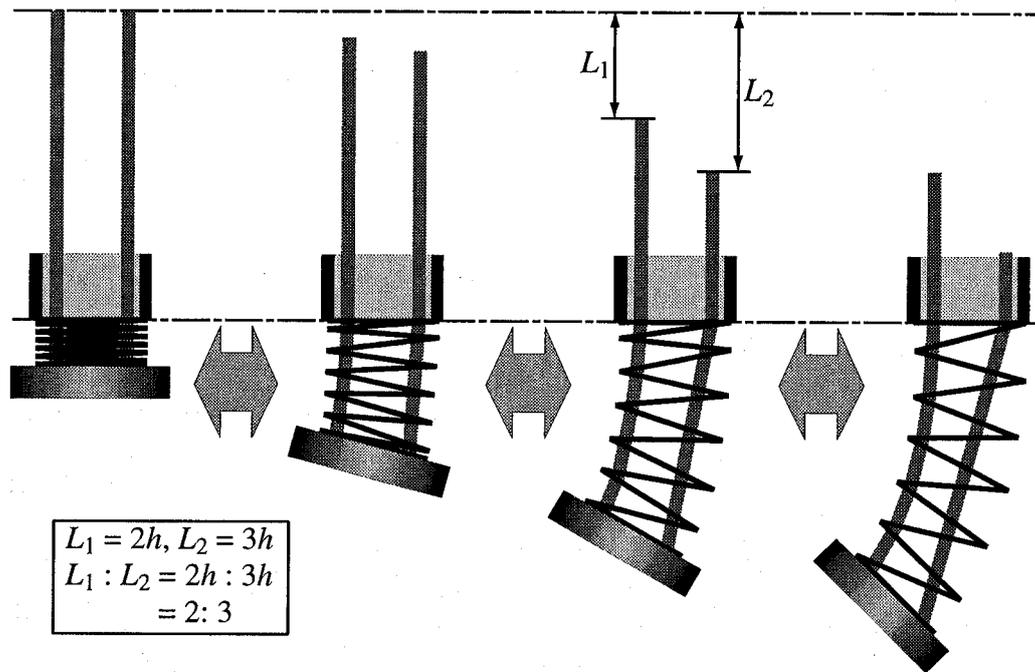


図3.3: ワイヤ送り量とばね姿勢挙動および電極運動の関係

$$L_1 : L_2 = 2 : 3 \quad (3.2)$$

すなわち、各ワイヤのワイヤ送り量は、式(3.1), (3.2)に示すように、一定の比を常時保ちつつ、主軸送り量に比例しながら増減する。したがって、図3.3に示すように、主軸が上下に移動すると、圧縮コイルばねは屈曲した姿勢を保ちつつ伸縮し、それによって、その先端に取り付けられた電極はある曲線軌跡上を往復運動する。

さらに、主軸、各ワイヤ、圧縮コイルばねが機械的に結合しているため、主軸の位置、ワイヤ送り量、ばねの姿勢の三者は一対一に対応することになる。当然のことながら、電極はばね端に取り付けられているので、ばねの姿勢と電極の位置は一対一に対応している。したがって、電極の位置および運動は、主軸の位置および移動とそれぞれ一対一に対応する。すなわち、主軸の上下移動によって、電極がある曲線軌跡を往復するとき、電極の往路と復路は同一軌跡となり、かつ、電極の運動は主軸の移動と同調する。言い換えれば、本実験装置は、主軸の上下直線移動を電極の曲線軌跡運動に変換しているといえる。

以上のような主軸と電極の関係は、主軸の上下移動距離の長短に関係なく、常に成立するため、主軸による極間距離制御が、圧縮コイルばね端に取り付けられ、

ある曲線軌跡上を運動する電極にそのまま実現される。すなわち、この電極による放電加工が可能となる。

図3.4(a), (b)に、加工開始時点にある実験装置および加工中の実験装置の模式図をそれぞれ示す。図3.4(a)に示すように、被加工物はジグの下の加工槽底面に固定されており、また、あらかじめ電極全体がちょうど収納されるような直径および深さの穴が加工されている。このときの圧縮コイルばねは最大圧縮状態となっており、ばね端部に取り付けられた電極は被加工物に加工された穴内部に設置されている。この状態から、通常の型彫放電加工と同様に、主軸を鉛直下方に移動させながら放電加工を行うと、図3.3に示したように、主軸の移動に同調しながら、ある曲線軌跡上を運動する電極によって、放電加工が行われる。したがって、図3.4(b)に示すように、被加工物には、電極が運動したある曲線軌跡のなす包絡形状、すなわち、曲がり穴が加工される。

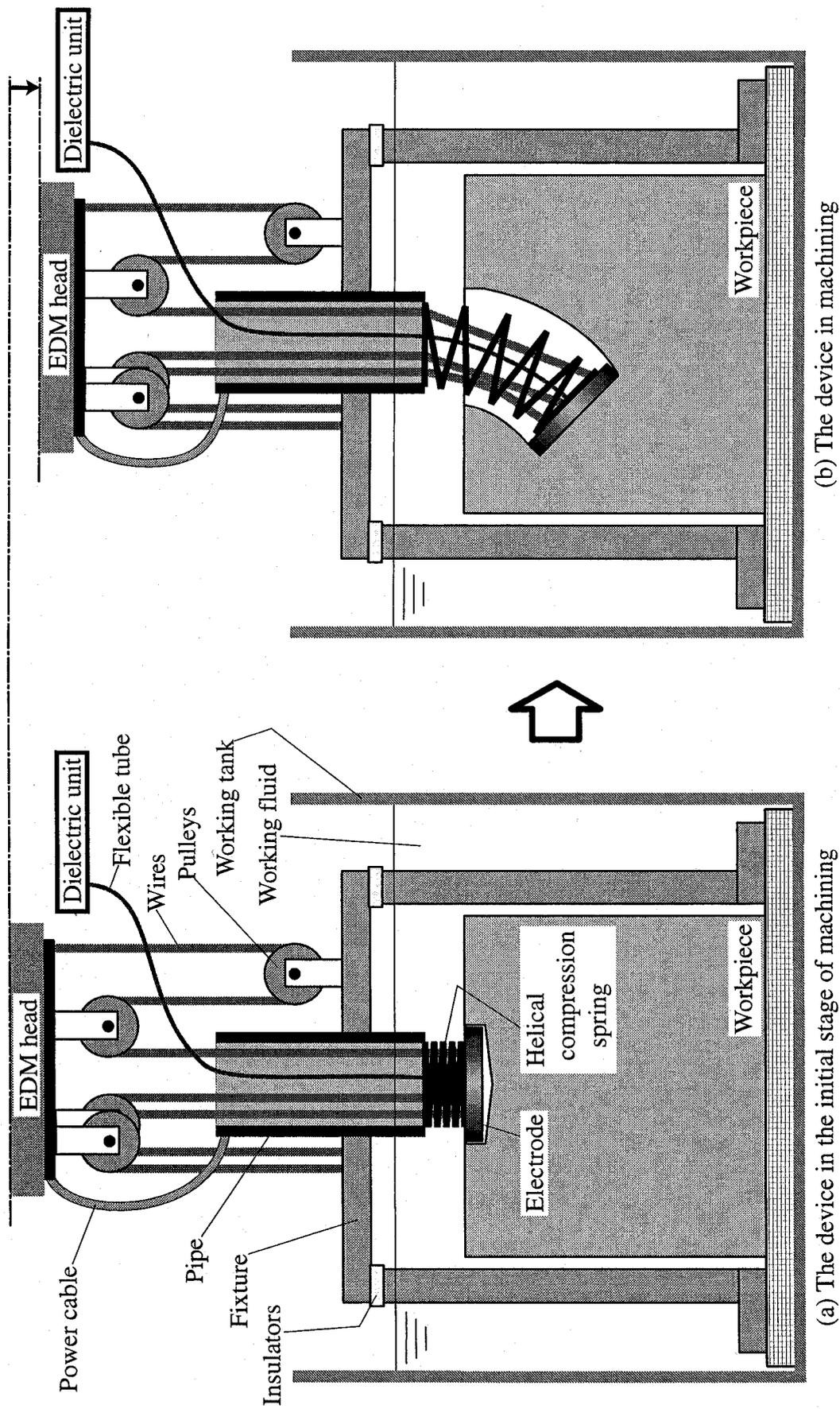


図3.4: 実験装置の加工過程

3.2.2 製作実機

図3.5に、実際に製作した実験装置を示す。この実験装置は、圧縮コイルばねが最大圧縮状態である加工開始時の状態にある。これは、図3.4(a)に示した状況であり、電極が被加工物に加工された穴の中に設置されている。図3.1に示した装備だけでは、この状態に設定するのは困難か、あるいは、煩雑な手順が予想されるが、図3.5に見られるように、ワイヤとジグまたは面盤との間に装着された小型のターンバックルによって、ワイヤの長さが調整可能であるため、加工開始時の状態に設定することは不可能なことではない。

表3.1, 3.2に、製作に使用したワイヤおよび圧縮コイルばね[1]の仕様を示す。両者とも市販されているものを使用した。また、プーリも市販されているものを採用した。

表3.1に示したように、圧縮コイルばねの端部形状にはクローズドエンド(研削)[2]を採用している。これによって、ばね端部が平面となり、そこに取り付けられた電極やパイプの中心線が、ばねの中心線に対して、ほぼ傾きなく、一致するように組み立てることができる。

表3.1: 圧縮コイルばねの仕様

Material	SUS304-WPB
Outside diameter of coil	16.0 mm
Diameter of wire	1.40 mm
Free height	51.0 mm
Solid height*	11.9 mm
Spring constant	1.51 N/mm
End of spring	Closed end (ground)

* Solid height : Minimum height of the helical compression spring

表3.2: ワイヤの仕様

Material	SUS304
Diameter	0.36 mm
Broken load	103 N

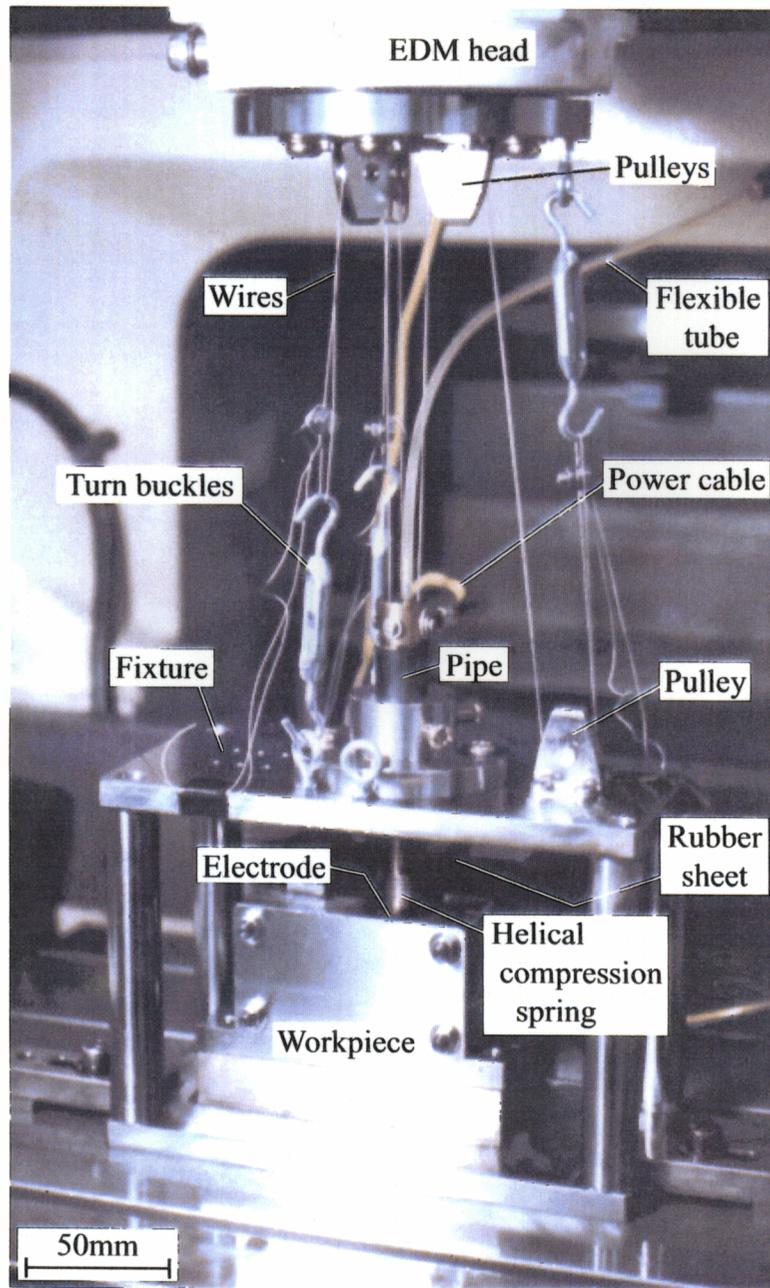


図3.5: 製作した曲がり穴放電加工用電極送り機構

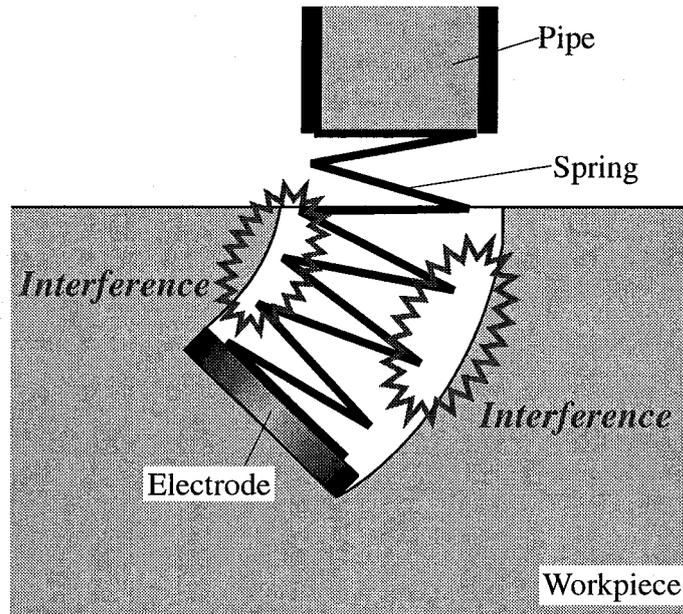


図3.6: 曲がり穴加工中における圧縮コイルばねと被加工物の干渉

表3.2には示していないが、ワイヤは、直径0.04mmの素線49本が、7本線6より共芯という構成で撚りあわされたものを採用した[3]。図3.1, 3.4に示すように、ワイヤは3本が使用されるが、実際は、専用金具で輪状にしたワイヤを3本用意し、それぞれを1本のワイヤとして使用している。つまり、図3.5に示す実機において、1本に見えるワイヤは、2本のワイヤで構成されている。したがって、合計で6本のワイヤによって、圧縮されたばねを支えていることとなる。このように、輪状にしたワイヤを用いることによって、図3.5に見られるように、ターンバックルやばね端にワイヤを取り付ける際には、ワイヤを各部品に引っかけるだけで取付けが完了する。

また、図3.6に示したように、加工中において、主軸の送りに伴い、圧縮コイルばねが屈曲しながら伸長していくと、ばねの側面部と被加工物の曲がり穴加工面が干渉する可能性がある。圧縮コイルばねは加工電流の経路となっているので、干渉してしまうと、ばねと被加工物の間で放電が生じ、曲がり穴加工面を損傷してしまうことが懸念された。そこで、図3.5、もしくは、電極周辺部分を示した図3.7に見られるように、電極と圧縮コイルばねの間にゴム膜を取り付けることによって、加工中に圧縮コイルばねと被加工物の曲がり穴加工面の間にゴム膜を介在させ、干渉によって両者間で放電が生じる可能性を排除している。

図3.5に示した実機では、その空間的制限からプーリおよびワイヤ固定具の位置

が限られるため、プーリ間またはプーリとワイヤ固定具間に張られたワイヤは、図 3.1, 3.4 に示すように、鉛直に張られていない。したがって、主軸送り量と各ワイヤ送り量の関係は、厳密には式(3.1), (3.2)に示す関係とはならないが、実質的な問題とはならないと考えた。なぜなら、本実験装置による放電加工可能性、すなわち、曲がり穴加工可能性の検証という本章の目的は、ワイヤ送り量比が1:1 にならなければ、達成できるためである。

実験に用いた電極は、外形形状が直径20mm、高さ8mmの円筒形状で、その材質は無酸素銅である。また、型彫放電加工機として、(株)牧野フライス製作所製 NC 放電加工機EDGE-1 を使用した。

3.3 動作実験

本実験装置を用いて、主軸の送りに伴う圧縮コイルばねの挙動と電極の運動を検証することを目的として、以下に示すような方法で動作実験を行った。

まず、被加工物を設置せずに、圧縮コイルばねが最大圧縮状態となる加工開始時の状態に設定する。次に、この状態を原点として、主軸を下方に一定の距離ずつ移動させる。このときの圧縮コイルばねの姿勢の変化およびその先端に取り付けられている電極の位置と姿勢の変化を、定点に置いたスチールカメラで撮影した。

図3.7に、主軸を2mm ずつ送ったときの圧縮コイルばねの姿勢および電極の位置と姿勢の変化を示す。この図からわかるように、主軸の送りにしたがって、実際に圧縮コイルばねが屈曲姿勢を保持しながら伸長し、その先端に取り付けられた電極がある曲線軌跡上を運動していることがわかる。

図3.7(a)に示す図は加工開始時の圧縮コイルばねと電極を示している。つまり、このときのばねは最大圧縮状態、すなわち、ばねの高さは密着高さになっているはずである。しかし、図3.7(a)から測定した結果、このように設定されていなかったことが、後に判明した。ばねが最大圧縮状態にならなかった理由を以下に示す。

本実験装置を加工開始時の状態にするためには、その構造上、オペレータの人力によって圧縮コイルばねを密着高さにまで圧縮しなければならないが、それに必要な力は、表3.1から計算できるように、約59N すなわち約6kgfとなる。そのため、オペレータが本実験装置を加工開始時の状態にする際、この力をばねに及

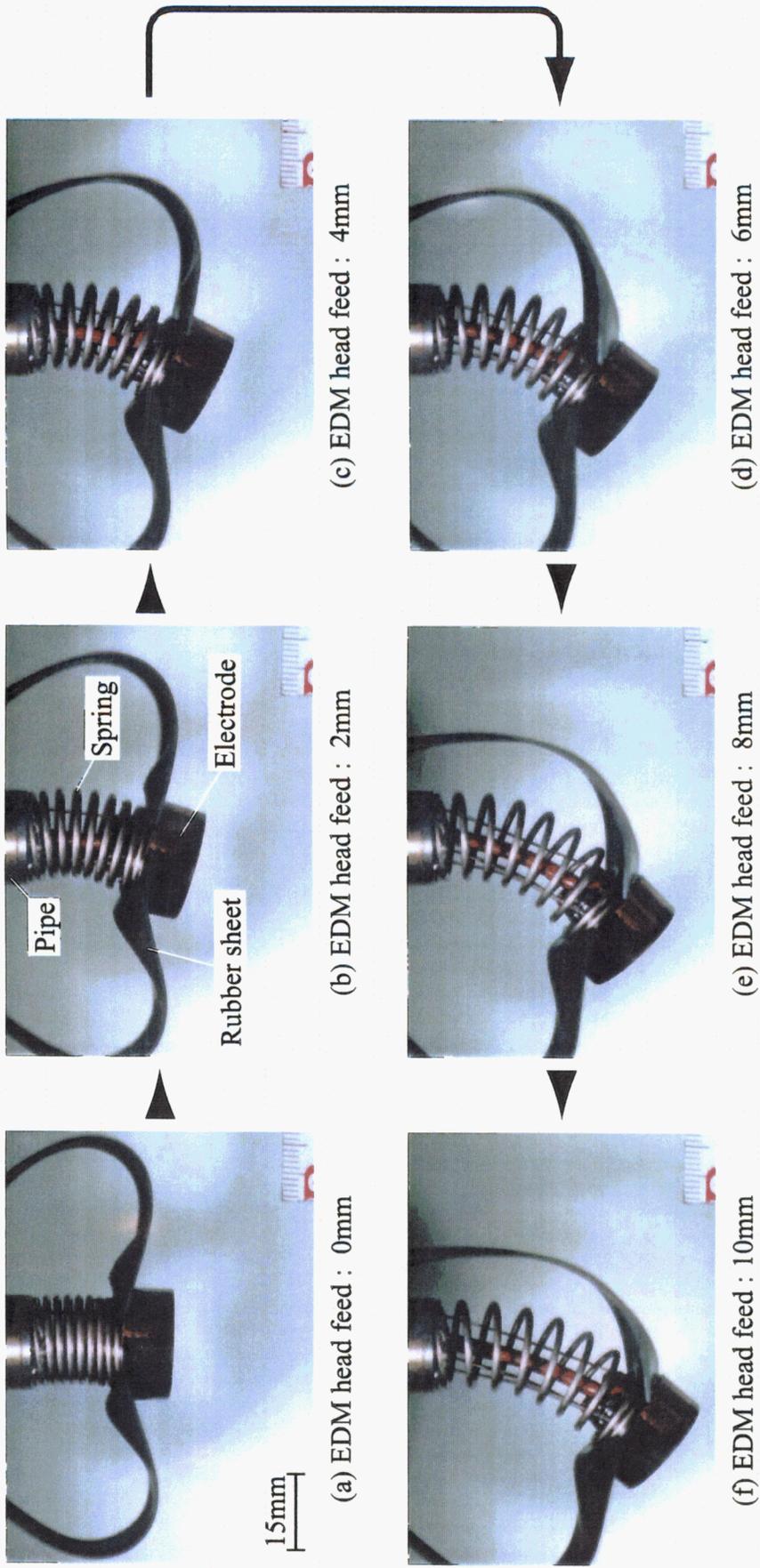


図3.7: 主軸を送ったときの実際の圧縮コイルばねの姿勢および電極の位置と姿勢の変化

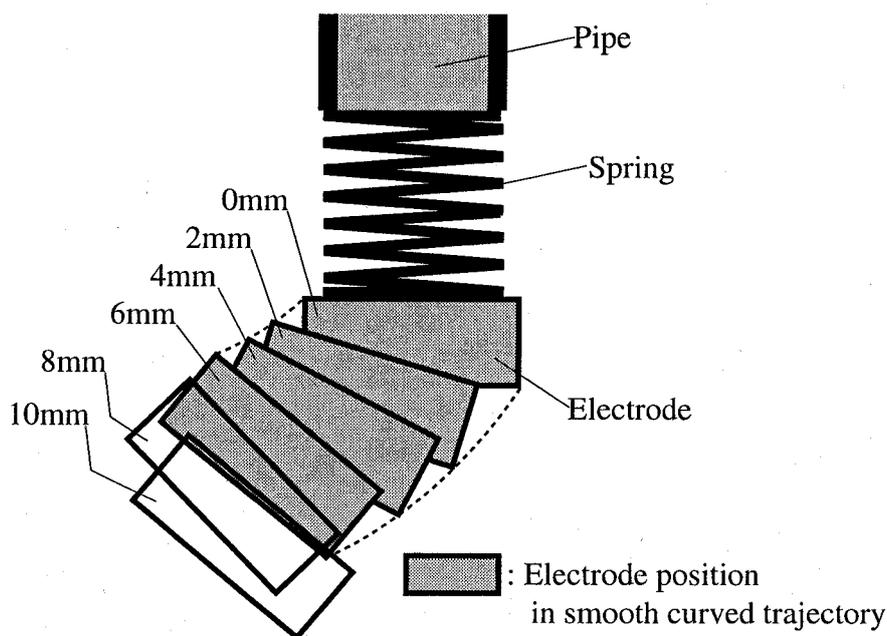


図3.8: 動作実験から得られた電極運動軌跡

ぼすことができなかつたにもかかわらず、ばねを最大圧縮状態にすることができたと認識し、さらに、このときのばねの高さを密着高さとしてしまったことによるものと考えている。すなわち、本実験装置の運用上あるいは設定上の不都合、および、ヒューマンエラーが原因である。

しかしながら、加工開始時の圧縮コイルばねが十分に圧縮されていれば、本実験装置の機能、すなわち、放電加工機の主軸の直線運動を電極の曲線運動に変換するという機能の達成可能性を検証することは可能である。事実、図3.7に示すように、本実験装置はこの機能を達成していることが確かめられた。

さらに、図3.7の結果から作成した電極の運動軌跡を、図3.8に示す。この図は、スチールカメラで撮影した画像をコンピュータに取り込み、各主軸送り量のときの電極の位置および姿勢をプロットしたものである。

図3.8からわかるように、主軸送り量が0mmから6mmのときの電極位置と姿勢から描かれる電極運動軌跡は滑らかな曲線となっているが、8mmのときの電極位置はそれまでの電極運動軌跡から逸脱しており、10mmとなるとさらに逸脱していく。この結果から、動作実験と同様の条件で本実験装置を使用した場合に加工できる曲がり穴は、主軸送り量が最大で6mm前後になるまでに加工される曲がり穴であることがわかる。

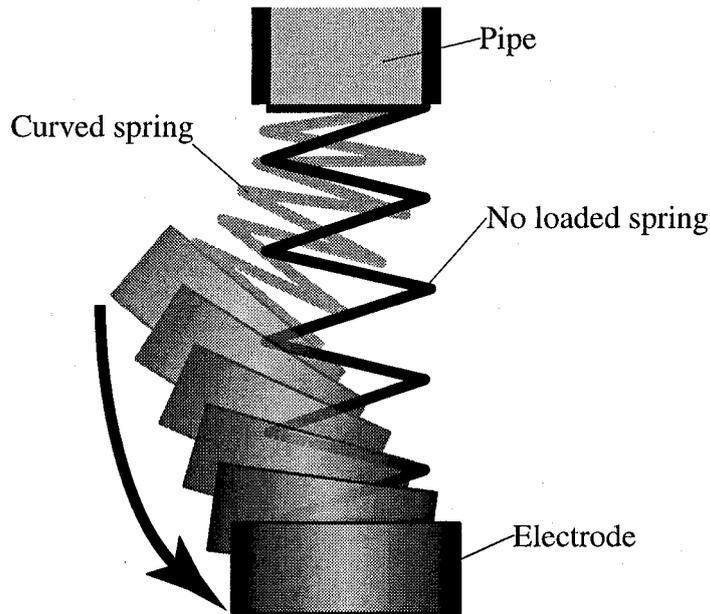


図3.9: 滑らかな電極運動軌跡から逸脱後の電極の挙動

さらに主軸を送り続け、主軸送り量が10mm以上になると、電極は主軸送り量が6mmまでの滑らかな電極運動軌跡からますます逸脱していく。最終的には、図3.9に模式的に示したように、圧縮コイルばねが無負荷時の姿勢、すなわち、高さが自由高さとなったときに、この電極の逸脱運動は停止した。

電極運動軌跡について、動作実験前に漠然と以下のように予想していた。一般に、圧縮コイルばねのばね端が移動できる最大の距離は、圧縮コイルばねの自由高さ h_0 と密着高さ h_c の差である。表3.1より、使用したばねの場合、ばね端最大移動量は39.1mmである。よって、Wire2のワイヤ送り量 L_2 がばね端最大送り量39.1mmになるまで、言い換えれば、このときの主軸送り量 h は、単純に式(3.1)から計算すると、約13mmとなるので、主軸送り量が13mmになるまで、電極はなんらかの滑らかな曲線軌跡上を運動し、Wire2のワイヤ送り量 L_2 と同等の長さをもった曲がり穴、すなわち、長さ39.1mmの曲がり穴が加工できるであろうという予想をしていた。

しかし、実際には、電極が滑らかな運動軌跡を描く主軸送り量 h の最大値は6mmであった。前述のように動作実験における加工開始時のばねが最大圧縮状態に設定されていなかったことを考慮すれば、この値はもう少し大きい値となったかもしれないが、動作実験の前に予想していた主軸送り量の最大値である13mmには遠く及ばない結果となった。

ここまで述べてきた、滑らかな曲線軌跡からの電極が逸脱する現象は、以下に示す原因で生じるものと考えている。

まず、本実験装置における圧縮コイルばねと各ワイヤの関係を説明する。両者は、本実験装置の構造上、以下のような関係にある。

(1) 圧縮コイルばねの伸長量 $>$ ワイヤ送り量の場合

圧縮コイルばねとワイヤは力を互いに及ぼしあう。すなわち、ばねはワイヤを下方に引き出す、あるいは、ワイヤに張力がかかっている。言い換えれば、ワイヤはばねの姿勢を制御できる。

(2) 圧縮コイルばねの伸長量 $<$ ワイヤ送り量の場合

圧縮コイルばねとワイヤは力を互いに及ぼさない。すなわち、ばねはワイヤを下方に引き出すことはできなくなる、あるいは、ワイヤに張力がかからず、たるむ。言い換えれば、ワイヤはばねの姿勢を制御できない。

また、本実験装置では、式(3.1),(3.2)に示すように、Wire1のワイヤ送り量 L_1 よりWire2のワイヤ送り量 L_2 の方が大きい。

したがって、本実験装置において、ばねを圧縮した状態に設定し、主軸を送ると、はじめのうちは、Wire1, Wire2とも圧縮コイルばねとの関係は上記(1)の状態を維持するが、主軸の送りに伴って、ワイヤ送り量の大きいWire2の方がWire1よりも先に上記(2)の状態に移り変わっていく。すなわち、主軸送り量の増大とともに、Wire2に及ぼされる圧縮コイルばねの力が、徐々に減少していく。言い換えれば、ばね姿勢の制御に対するWire2の影響は徐々になくなっていく。

このような過程のある時点で、圧縮コイルばねの動作が、屈曲伸長動作から無負荷姿勢への回帰動作に移り変わっていくものと考えている。したがって、ばねの屈曲伸長動作時には、電極は滑らかな曲線軌跡上を運動するが、ばねが無負荷姿勢への回帰動作を取り始めると、電極はそれまで運動してきた滑らかな曲線軌跡から逸脱してしまうものと推測している。

さらに主軸を送ると、ばね姿勢の制御に対するWire2の影響は完全になくなってしまい、Wire1のみの影響下に置かれる。すなわち、Wire1と圧縮コイルばねの間だけで力を及ぼしあう状態となり、ばねは屈曲姿勢を取るのみとなる。この状態で、主軸送り量が大きくなると、Wire1が送られることによって、圧縮コイルばねおよび電極は、図3.9に示したように運動することは容易に想像できる。

以上より、動作実験の結果をまとめると、本実験装置を利用すれば、主軸を下

方に送ることにより、あるワイヤ送り量比で各ワイヤが送られ、圧縮状態にある圧縮コイルばねに、屈曲した姿勢を保ちながら伸長する動作をとらせることができること、すなわち、電極に滑らかな曲線軌跡を描かせることができることがわかった。しかしながら、主軸送り量が増大し続けると、ワイヤは過大に送られてしまうため、ワイヤとばねが互いに力が及ぼさなくなり、ワイヤはばねの姿勢を制御できなくなる。やがては、圧縮コイルばねは無負荷時の姿勢となること、つまり、電極をそれまで運動してきた滑らかな曲線軌跡から大きく逸脱させてしまうことも明らかとなった。

3.4 加工実験

本実験装置による放電加工可能性、すなわち、曲がり穴加工可能性を検証するために、以下のような方法で加工実験を行った。

加工実験は、ほぼ動作実験と同様の条件で行うこととした。ただし、動作実験の結果から、電極が滑らかな曲線軌跡を運動するのは主軸送り量が6mmまでであることがわかったが、安全を考慮して、加工実験では、主軸送り量の最大値を5mmと設定した。

また、図3.8より、主軸送り量が6mmのときの位置と姿勢にある電極全体が、加工開始時の電極の底面より下側には存在しない。これは、電極運動軌跡から推測できる、主軸送り量が5mmのときの電極位置も同様であろう。したがって、被加工物の加工開始点が平面であると、つまり、加工開始時の電極底面の位置が被加工物平面と一致していると、主軸送り量が5mmになるまで加工しても、電極が完全に被加工物に埋没しないことになる。これでは、加工しても曲がり穴形状にはならないので、加工実験の目的である曲がり穴加工可能性の検証ができなくなる。そこで、図3.4に示したように、あらかじめ被加工物に電極全体が入る下穴をドリル加工し、この下穴の底を加工開始点とした。

図3.10に、加工実験に使用した被加工物の形状寸法および構造を示す。この図に示すように、被加工物には、直径22mm、深さ10mmの下穴が、ドリルで加工されている。この下穴は、被加工物を図3.10に示した切断面で切断し、ボルトとナットで切断前とほぼ同等な形状に組み立てた後、加工されている。このような前処理により、曲がり穴加工後の形状評価を容易なものとしていると同時に、切断し

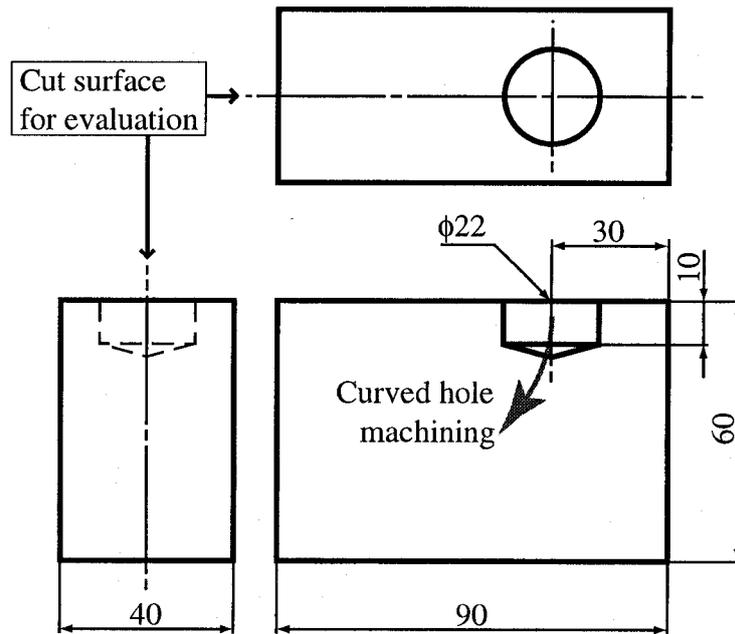


図3.10: 加工実験に使用した被加工物の形状寸法と構造

表3.3: 放電加工条件

Electrode	Oxygen-free copper
Workpiece	Carbon steel (S45C)
Working fluid	Oil
Flow rate	3 cm ³ /s
Polarity	Reverse
Discharge current	10 A
Pulse duration	114 μs
Duty factor	79 %
Jump	Not applicable
Orbital motion	Not applicable

ろの影響を排除している。また、被加工物の材質は炭素鋼（S45C）である。

この下穴の中に電極を設置しながら、圧縮コイルばねを動作実験と同様の圧縮状態に設定した後、通常の型彫放電加工と同様の方法で放電加工を行った。

表3.3 に、加工実験に使用した放電加工条件を示す。この条件は、型彫放電加工機に用意されているメーカー推奨の放電加工条件の一つから適切なものを選択した。ただし、主軸のジャンプと揺動は行わなかった。たしかに、本実験装置の場合、そ

の構造上、両者とも主軸における実現は可能である。しかし、ジャンプに関しては、3.2.1 小節で説明した主軸の移動と電極の運動の同調が、ジャンプのような主軸の長距離かつ高速で、しかも動的な移動においても、成立するかという懸念があったこと、また、加工の進行に伴った圧縮コイルばねの伸長によるばね自身の剛性低下が、ジャンプと相まって、ばねの挙動あるいは電極の運動にどのように影響するかが不明であったことから、ジャンプは適用しなかった。その代替として、図3.1に示したように、加工くずを除去するために、加工液の電極間隙への供給を行っている。また、揺動に関しては、主軸の揺動による電極の運動が正確に予測しがたいことから、揺動はさせなかった。

図3.11に、加工後の被加工物の断面図を示す。向かって穴の右側面にある穴の角度が変化している点を境にして、上が下穴部分、下が本実験装置による曲がり穴加工部分である。放電加工で形成された曲がり穴の断面形状は凹凸がなく滑らかであり、図3.8に示した電極運動軌跡とほぼ同様な形状の曲がり穴が加工できていることがわかる。図3.11に示した点Aから点Bまでの曲がり穴外周部の距離は20mmであった。また、放電加工時間は約9時間であった。放電加工による除去体積は 6cm^3 であったので、放電加工速度は $10\text{mm}^3/\text{min}$ である。

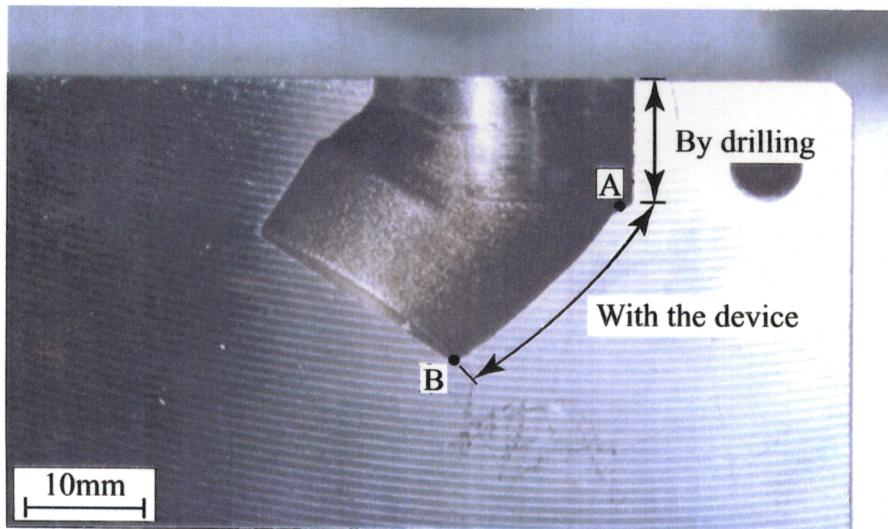


図3.11: 加工された被加工物の断面図

3.5 考 察

3.5.1 動作実験に関して

動作実験の結果から、主軸送り量がある値以上になると、圧縮コイルばねは無負荷時の姿勢に戻ろうとするため、電極はそれまで運動してきた滑らかな曲線軌跡から逸脱していくことがわかった。

したがって、圧縮コイルばねが屈曲伸長動作から無負荷姿勢への回帰動作に移行するときのワイヤ送り量、そして、そのときの主軸送り量を求めることが、重要になってくるであろう。このようなばねの動作移行が生じるときのワイヤ送り量あるいは主軸送り量は、圧縮コイルばねの仕様や各ワイヤのワイヤ送り量などによって変化すると考えられる。これを求める方法として、圧縮コイルばねの変形を理論的に計算する方法やコンピュータを用いてシミュレーションする方法が考えられるが、その確立は今後の課題である。

本論文では、このようなばねの動作移行点を確実に見極めるために、圧縮コイルばねの姿勢と位置および電極の位置と姿勢の変化を、実験装置を実際に使用した動作実験によって観測する方法を採用することにする。

3.5.2 加工実験に関して

加工実験の結果から、次の二点が確認された。

第一点は、本実験装置による放電加工が可能であることから、ワイヤや圧縮コイルばねを介して主軸に結合された電極に対しても、放電加工機の主軸による極間距離制御が実現されたこと、つまり、主軸の移動と電極の運動が同調したことである。

第二点は、放電加工された曲がり穴の断面形状が滑らかであることから、図3.8に示した滑らかな曲線軌跡を描く電極は、放電加工中においても、その往路と復路でほぼ同一の軌跡上を運動したことである。

このようなことから、電極の位置剛性のある程度犠牲にしたとしても、電極にある1本の任意曲線上に必ず存在するように運動させ、かつ、その電極による放電加工のための極間距離制御を実現させることができれば、理論的には、任意形状をもつ曲がり穴が加工できることになる。

さらに、この任意曲線上を運動する電極の位置と姿勢が一对一に対応していれば

ば、電極が任意の形状をしていても、放電加工が可能となる。このときに加工される曲がり穴の形状は、電極運動軌跡の包絡形状となり、電極が複雑な形状になればなるほど、曲がり穴の断面は複雑になるであろう。

この現象の一端は、図3.11にも見られる。すなわち、電極は図3.8に示すように、姿勢を変化させながら曲線軌跡上を運動している。したがって、加工された曲がり穴形状の断面は、単純な形状ではない。つまり、加工断面形状から、電極の底面と側面で放電加工が行われていることがわかる。

3.5.3 放電加工時間に関して

加工実験では、加工距離の短い加工であるにもかかわらず、加工時間に約9時間を要している。この原因は、圧縮コイルばねと被加工物の接触による短絡を防止するために取り付けたゴム膜が、加工が進むにつれて加工くずの排出口を塞ぐような挙動をとったため、加工くずが放電加工面にたまり、放電加工を極端に遅くしたためであると考えている。ゴム膜の形状の改良、あるいは、ゴム膜を使用しない他の方法を開発する必要がある。

3.5.4 本実験装置と曲がり穴形状に関して

本実験装置によって加工可能な曲がり穴形状は、図3.11に示した形状に近い形状に限定されるであろう。ただし、本実験装置による加工可能な曲がり穴形状つまり電極の運動する滑らかな曲線軌跡に影響する主な要因は、圧縮コイルばねの仕様やワイヤのプーリ経由数によって変更可能なワイヤ送り量比などであるため、これらを適切に組み合わせれば、異なる形状の曲がり穴が加工できる可能性はないことはないが、実用性のある曲がり穴の加工可能性は疑問である。

よって、実用的な曲率と長さをもつ曲がり穴の加工を実現するために、実験装置の構造も視野に入れた比較的規模の大きな改良を行う必要がある。

3.5 結 言

本章では、曲がり穴形状の加工を実現するために、考案、開発した曲がり穴放電加工用電極送り機構について説明した。本実験装置は、圧縮コイルばね、ワイヤ、プーリなどの機械部品から構成された非常に簡単な機構で、型彫放電加工機に取り付けることにより、型彫放電加工機の主軸の直線運動を電極の曲線運動に変換することができる。さらに、主軸の移動と電極の曲線運動は一对一に対応するので、この電極による放電加工が可能となる。本実験装置による動作実験および加工実験の結果、以下のような結論を得た。

- (1) 本実験装置を用いて動作実験を行ったところ、主軸の移動に伴って、電極に滑らかな曲線軌跡上を運動させることができた。ただし、ある値以上に主軸を送ると、電極はそれまで運動してきた滑らかな曲線軌跡から逸脱する現象が認められた。
- (2) 動作実験から得られた滑らかな曲線状の電極運動軌跡を用いて加工実験を行ったところ、この電極運動軌跡の包絡線形状とほぼ同様な形状をした曲がり穴形状の加工に成功した。これによって、考案した方法により曲がり穴が加工可能であることを証明した。

参 考 文 献

- [1] ばね技術研究所：ばね 第3版，丸善 (1983)
- [2] 日本工業規格：B0103 ばね用語 (1996)
- [3] 株式会社 新洋：ワイヤロープカタログ

第4章

曲がり穴加工法の開発 2

— 機構の改良とL字形曲がり穴加工 —

4.1 緒 言

前章で述べたように，曲がり穴放電加工用電極送り機構の有する運動変換原理により，主軸の直線運動を電極の曲線運動に変換できること，また，その電極による放電加工が可能であり，電極運動軌跡のなす包絡形状すなわち曲がり穴形状が加工可能であることが証明された。しかし，加工可能な曲がり穴形状の距離が短いという問題が浮上した。

そこで，曲がり穴形状の距離を延長することを目的として，前章の装置を改良した。その基本的な考え方を以下に示す。曲がり穴形状の距離に対応するのは，電極の描く滑らかな運動軌跡の距離であり，その距離は，電極の逸脱現象がいつ生じるかにより決定される。したがって，電極が逸脱するまでに電極が運動する距離を何らかの方法で延長させればよい。そこで，電極が曲線軌跡上を運動すると同時に，圧縮コイルばねを移動させることを考えた。

本章では，このように改良した装置，すなわち，改良型曲がり穴放電加工用電極送り機構を用いた動作実験と加工実験を行い，曲がり穴形状の延長可能性について検証した。

なお，装置を区別するために，本章では，前章の装置を「改良前の実験装置」，本章の装置を「改良後の実験装置」あるいは「本実験装置」と呼ぶことにする。

4.2 改良型曲がり穴放電加工用電極送り機構

4.2.1 装置の構造と動作過程

図4.1に、改良後の曲がり穴放電加工用電極送り機構の模式図を示す。本実験装置の中央にある圧縮コイルばねの両端には、それぞれ工具電極と軸が取り付けられており、これらは軸の他端で型彫放電加工機の主軸に固定されている。また、電極側のばね端の内側円周部には、3本のワイヤが120°等配で取り付けられており、これらはばねの内部および軸沿いを通過し、放電加工機の主軸へ導かれる。一方、主軸には面盤、加工槽にはジグがそれぞれ設置されており、これらにはプーリの固定とワイヤの取付けが可能になっている。ばね端から導かれた3本のワイヤのうち、左側の2本は、面盤とジグに1個ずつ固定された合計2個のプーリを経由し、主軸に取り付けられ、右側の1本は、面盤に2個とジグに1個の合計3個のプーリを経由し、ジグに取り付けられている。

加工くずの除去および加工電流の供給の方法は、改良前の実験装置とほぼ同様である。すなわち、加工くずは、加工液供給装置から供給される加工液を、フレキシブルチューブと電極中央に加工された小径穴を経由して電極間隙へ送り込むことにより除去される。また、加工電流は、主軸、軸、圧縮コイルばねを経て、電極に供給される。この電流経路と加工槽は、ジグに絶縁体が組み込まれているため、絶縁されている。

図4.1を2次元的に表した図4.2を用いて、本実験装置の動作過程を説明する。ここで、2個のプーリを経由して面盤に固定されるワイヤをWire3、3個のプーリを経由してジグに固定されるワイヤをWire4とする。

図4.2(a)は加工開始時の状態を表している。改良前の実験装置と同じように、加工開始時の圧縮コイルばねは最大圧縮状態となっており、その高さは密着高さ H_s となっている。この状態から、図4.2(b)に示すように、主軸が下方に移動すると、軸およびばね自体の移動とばねの復元力による伸長動作によって、各ワイヤは下方に引き出される。本実験装置においても、改良前の実験装置と同様に、主軸の移動量を主軸送り量、引き出されるワイヤの長さをワイヤ送り量、また、各ワイヤのワイヤ送り量の比をワイヤ送り量比と呼ぶことにする。

ただし、本実験装置の場合、ワイヤ送り量には二種類存在し、その定義を以下に示す。すなわち、図4.2において、圧縮コイルばねが最大圧縮状態時における軸

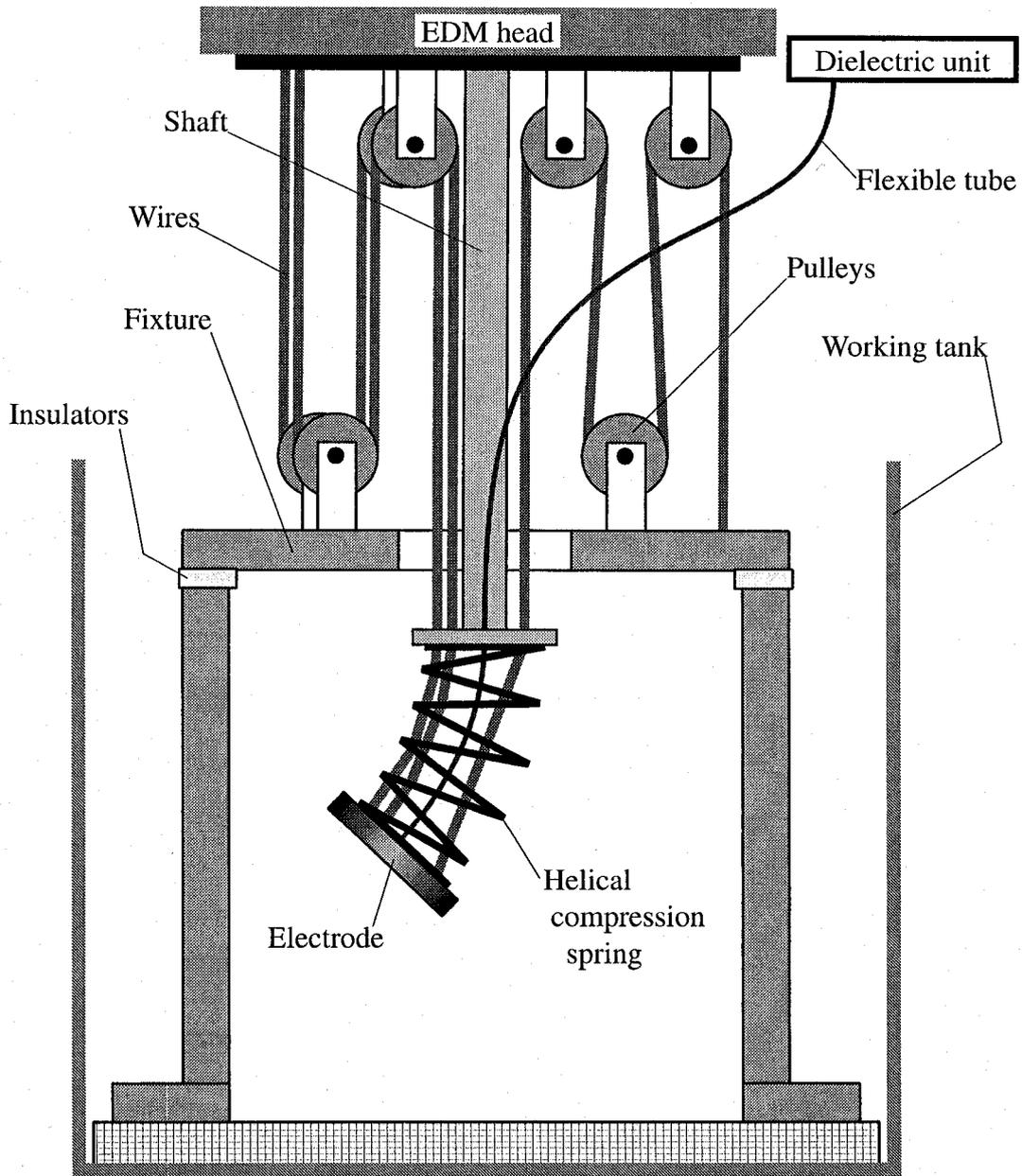


図4.1: 改良型曲がり穴放電加工用電極送り機構の模式図

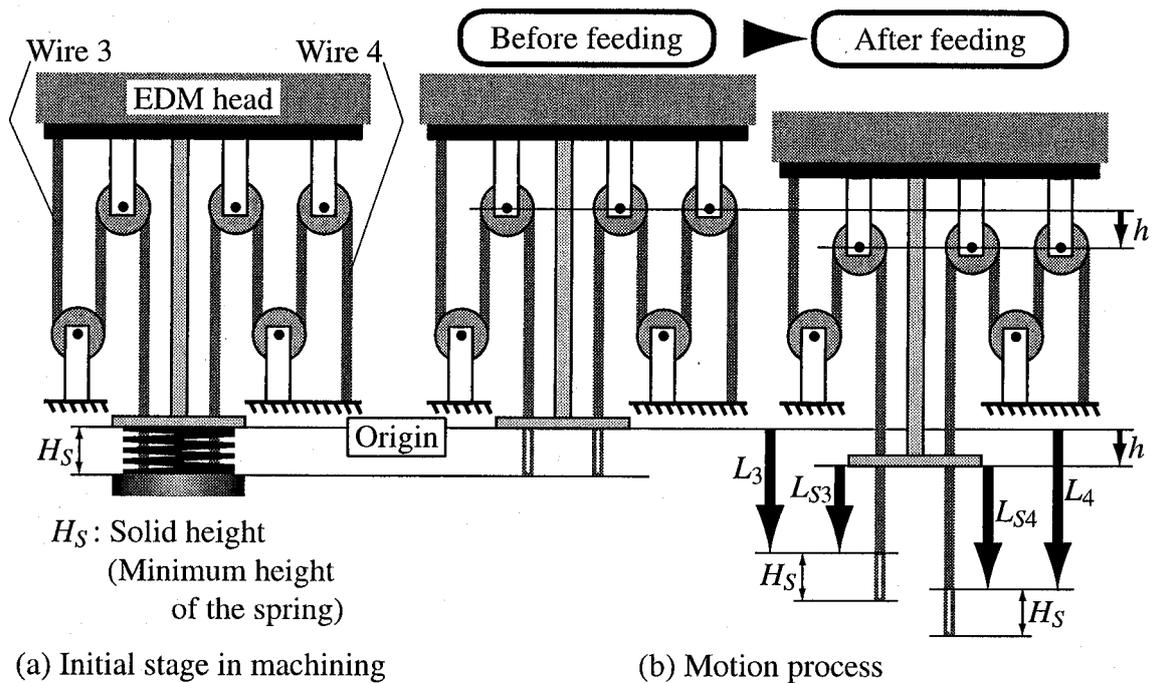


図4.2: 主軸送り量とワイヤ送り量の関係

端の位置を原点とし、加工槽の視点から見たときのWire3とWire4のワイヤ送り量をそれぞれ L_3, L_4 とする。また、軸の視点から見たときのWire3とWire4のワイヤ送り量をそれぞれ L_{S3}, L_{S4} とする。また、主軸送り量を h とする。

このとき、図3.2(b)に示すように、 h と L_3 および L_4 の関係は、各ワイヤが経由するプーリの数の相違から、常に次式に示す関係が成立する。

$$L_3 = 3h, \quad L_4 = 4h \tag{4.1}$$

よって、 L_3 と L_4 のワイヤ送り量比は、次式で表される。

$$L_3 : L_4 = 3 : 4 \tag{4.2}$$

また、 h と L_3, L_4, L_{S3}, L_{S4} の関係は、図4.2(b)に示すように、式(4.1), (4.2)の関係を保ちながらワイヤが送られると同時に、主軸が距離 h だけ送られるので、次式のように表される。

$$L_{S3} = L_3 - h = 2h, \quad L_{S4} = L_4 - h = 3h \tag{4.3}$$

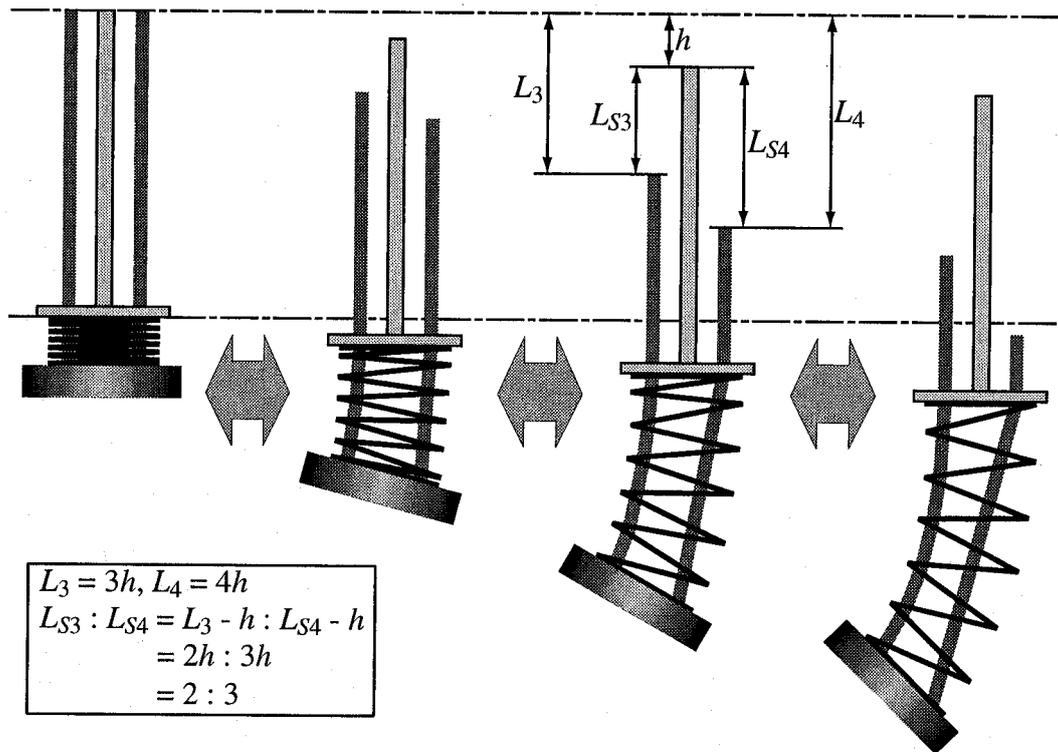


図4.3: 主軸送り量とばね姿勢挙動および電極運動の関係

よって、 L_{S3} と L_{S4} のワイヤ送り量比は、次式で表される。

$$L_{S3} : L_{S4} = 2 : 3 \tag{4.4}$$

したがって、図4.3に示すように、主軸の上下移動により、圧縮コイルばねは屈曲姿勢を保ちつつ伸縮し、同時に、圧縮コイルばねと電極全体が、主軸と同様に上下移動する。これにより、圧縮コイルばねの先端に取り付けられた電極はある曲線軌跡上を往復運動する。

本実験装置においても、主軸と電極は、圧縮コイルばねと各ワイヤおよび軸を介して、機械的に結合しているので、改良前の実験装置と同様に、電極の位置および運動は、主軸の位置および移動とそれぞれ一対一に対応している。したがって、電極は、主軸の移動に同調しながら、同一曲線軌跡上を運動する。よって、主軸による極間距離制御が、曲線軌跡上を運動する電極にそのまま反映され、放電加工が可能となる。

図4.4(a),(b)に、加工開始時点にある実験装置および加工中の実験装置の模式図をそれぞれ示す。改良前の実験装置と同様に、被加工物はジグの下に固定され、

あらかじめ電極全体が収納される下穴が加工されている。図4.4(a)に示す加工開始時では、圧縮コイルばねは最大圧縮状態で、電極は下穴内部に設置されている。この状態から、通常の型彫放電加工と同様に、主軸を下方に移動させながら放電加工を行うと、図4.3に示したように、ある曲線軌跡上を運動する電極により放電加工が行われる。したがって、図4.4(b)に示すように、被加工物には、電極が運動したある曲線軌跡のなす包絡形状、すなわち、曲がり穴が加工される。

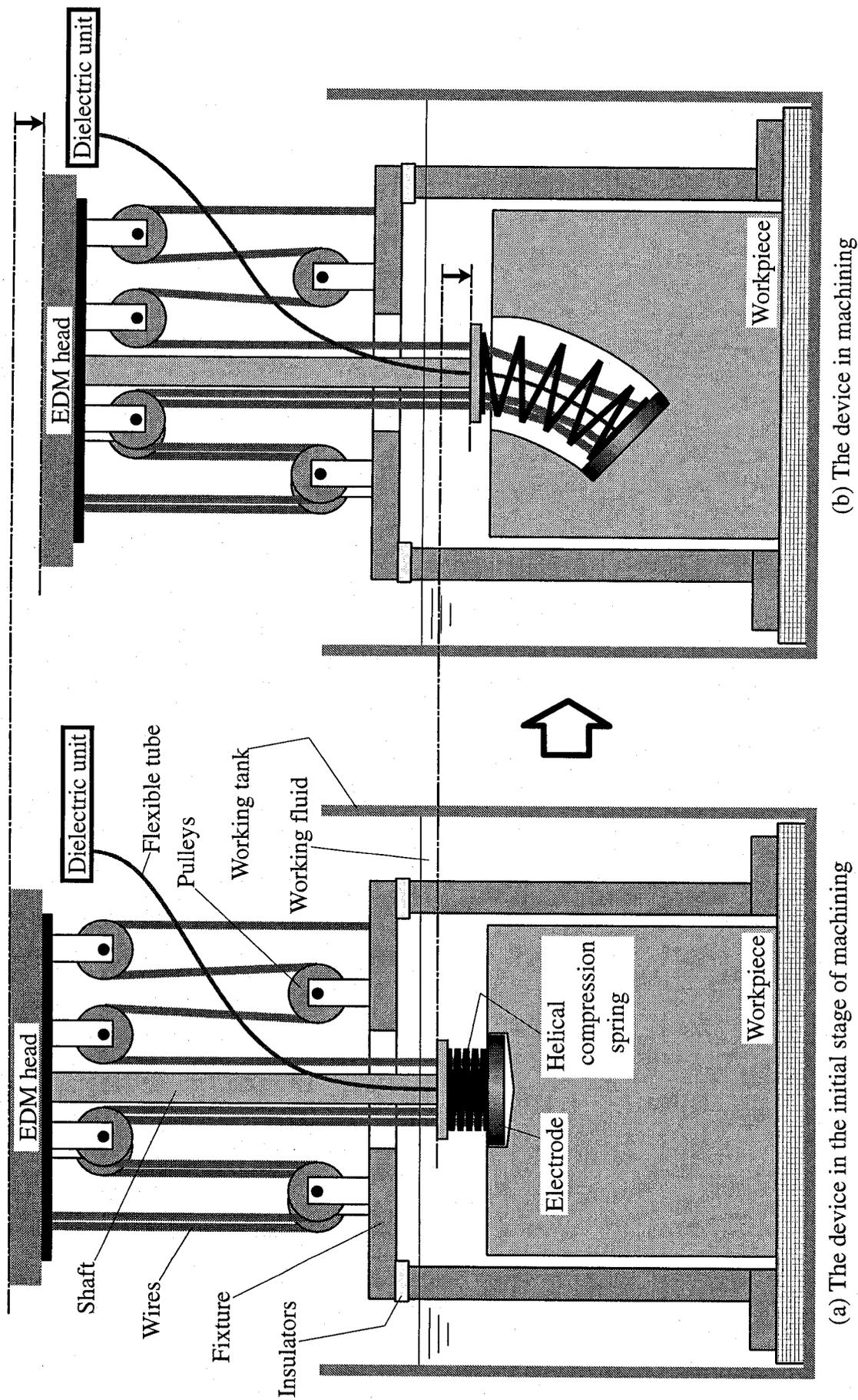


図4.4: 実験装置の加工過程

4.2.2 装置の改良点

図3.1, 4.1 にそれぞれ示す改良前, 改良後の実験装置の相違点は次の二点である。

第一点は, 圧縮コイルばねの取付け方法である。すなわち, 改良前の実験装置では, ばね端が, 加工槽中に設置されたジグに固定されているパイプに取り付けられていたが, 改良後の実験装置では, ばね端が, 放電加工機の主軸に固定された軸に取り付けられている。

第二点は, 3本のワイヤのプーリ経由数である。すなわち, 改良前の実験装置では, 左側の2本のワイヤ(Wire1)は1個のプーリを, 右側の1本のワイヤ(Wire2)は2個のプーリを経由していたが, 改良後の実験装置では, 左側の2本のワイヤ(Wire3)は2個のプーリを, 右側の1本のワイヤ(Wire4)は3個のプーリを経由していることである。その他の構造については, 両者の実験装置ともほぼ同様である。

改良前の実験装置における問題点は, 加工可能な曲がり穴の距離が短いことにあった。この問題の解決のためには, 電極の運動する滑らかな曲線軌跡を延長できればよい。

その対策の第一案として, 圧縮コイルばねの自由高さを大きくすることを考えた。しかし, 自由高さの増大は密着高さの増大を招く。改良前の実験装置では, 図3.4(a)に示すように, 加工開始時の圧縮コイルばねの高さは密着高さであるので, 密着高さが大きくなると, 加工開始時におけるパイプ端と電極との距離が長くなる。この状態から図3.4(b)に示すように加工を開始すると, 圧縮コイルばねが屈曲した際に, 図4.5に示すように, 曲がり穴内周部で被加工物と干渉する可能性が高くなる。また, 自由高さのみの過剰な増大によって, ばねを最大圧縮状態にすること, さらには, 圧縮することさえも難しくなる。もし最大圧縮状態にすることができたとしても, 主軸の移動によって, 圧縮コイルばねが屈曲した姿勢を保持しつつ伸長するとき, ばねは密着高さの状態から伸長し, かつ, ワイヤ送り量比が一定であるため, ばねの座屈を誘発する危険性がある。したがって, 圧縮コイルばねの自由高さの増大には限界がある。

対策の第二案として, 電極がそれまで運動してきた滑らかな曲線軌跡から逸脱する現象は致し方ないとし, その逸脱現象が起こるまでの電極の運動距離を延長させることを考えた。

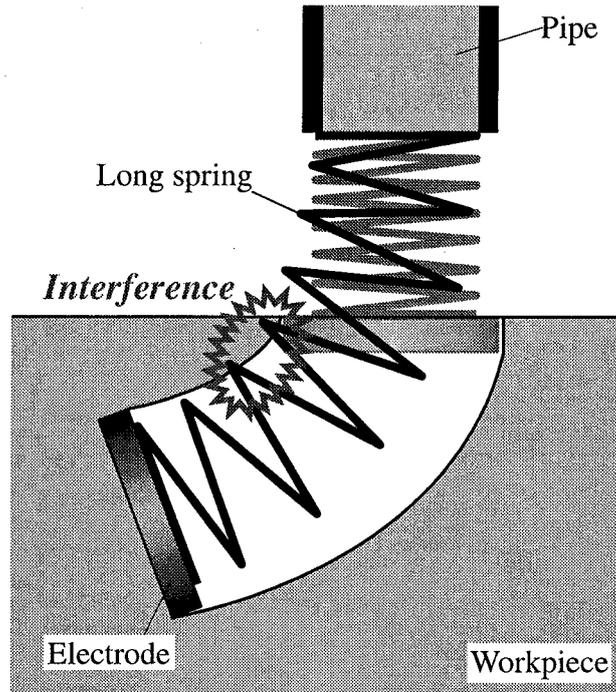


図4.5: 改良前の実験装置に自由高さの大きい圧縮コイルばねを使用した際に懸念されるばねと被加工物の干渉

これを実現させるため、考案した装置が図4.1に示した改良後の実験装置である。すなわち、主軸と圧縮コイルばねを軸で結合し、圧縮コイルばねと電極全体が主軸と一体となって移動するようにした。同時に、ワイヤのプーリ経由数をそれぞれ1個ずつ増やしている。これによって、式(4.3), (4.4)に示した軸の視点から見た各ワイヤ送り量 L_{s3} , L_{s4} とその比は、式(3.1), (3.2)に示した改良前の実験装置の各ワイヤ送り量 L_1 , L_2 とその比とそれぞれ等しくなる。すなわち、改良後の実験装置は、改良前の実験装置が実現する圧縮コイルばねの屈曲伸縮動作を実現しながら、同時に、そのばねを主軸と一体で移動させていることになる。

これにより、ワイヤ送り量とその比は不変であるため、理論上、電極の逸脱現象が発生するまでの主軸送り量は変わらないものの、電極は主軸と一体となって移動しているため、電極の運動距離が延長されることになる。このことは、図3.3と図4.3を比較すると明らかである。よって、電極の運動する滑らかな曲線軌跡の距離、すなわち、曲がり穴の加工可能となる距離は、延長されるものと考えた。

また、この改良方法は、圧縮コイルばねの自由高さの増大に頼ることなく、曲がり穴の加工可能距離を延長することができる。さらに、自由高さを長くしたと

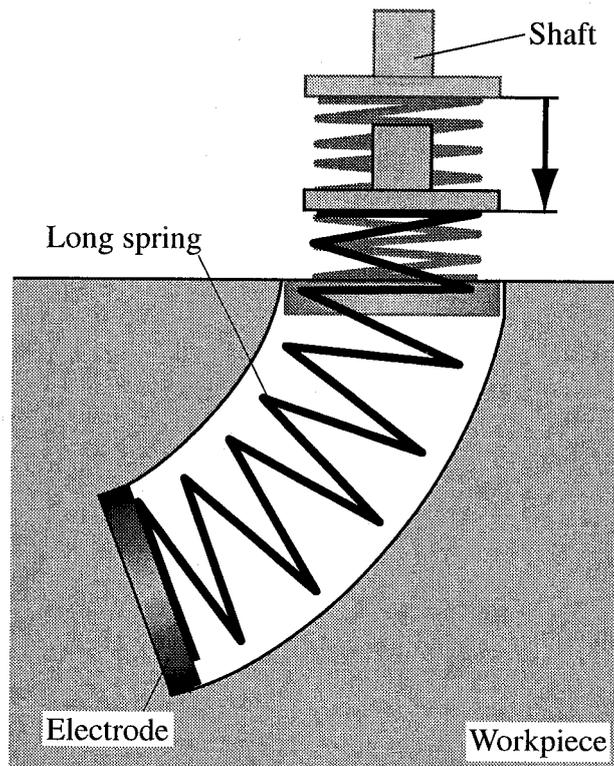


図4.6: 改良後の実験装置に自由高さの大きい圧縮コイルばねを使用した際のばねと被加工物が干渉する可能性の低下

しても、図4.6に示すように、圧縮コイルばねの位置が電極運動軌跡の包絡形状内に移動していくため、被加工物との干渉が皆無になるとは言えないが、少なくとも、図4.5に示すような干渉の可能性は低くなるという利点もある。

さらに、改良前の実験装置による実験では、運用上あるいは設定上の不都合、および、ヒューマンエラーにより、圧縮コイルばねを最大圧縮状態とすることができなかったが、本実験装置では、放電加工機の主軸を用いて、ばねを圧縮することが可能となるので、加工開始時のばねを確実に最大圧縮状態と設定することができる。これは、ばね端の動作距離が伸びることを意味している。すなわち、電極の運動する滑らかな曲線軌跡の距離が延長されることを示している。したがって、加工される曲がり穴の距離の延長に寄与する。

4.2.3 製作実機

図4.7に、実際に製作した実験装置を示す。このときの実験装置には、被加工物は取り付けられておらず、また、状態としては、圧縮コイルばねがある屈曲姿勢

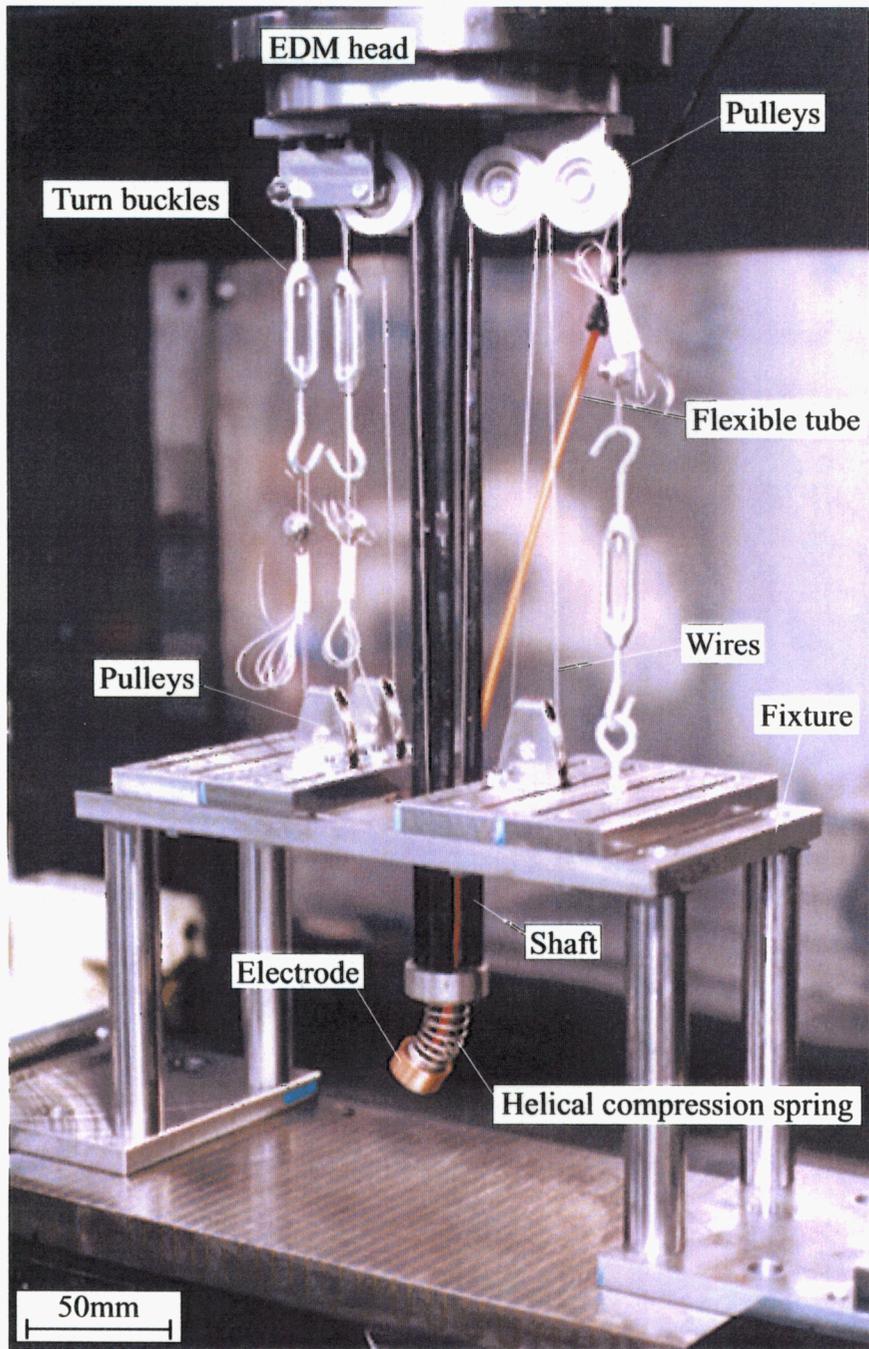


図4.7: 製作した改良型曲がり穴放電加工用電極送り機構

とっている状態にある。この図に示すように、ばねと電極部分が、軸を介して、主軸に取り付けられている。また、本実験装置に用いた圧縮コイルばねおよびワイヤは、改良の効果の確認を容易にするため、改良前の実験装置と同じものを使用した。この圧縮コイルばねおよびワイヤの各仕様は、すでに表3.1, 3.2 に示してある。プーリやターンバックルも同様に、改良前の実験装置で使用したものをそのまま用いた。

ただし、ゴム膜および電極については変更を加えた。

ゴム膜に関しては、圧縮コイルばねと被加工物の干渉を判断する手法を確立したため、その使用を取りやめた。

電極に関しては、電極部分の組立を容易にするために設計を変更したことから、その外形形状を直径20mm、高さ9.5mmの円筒形状へと、高さを若干大きくした。材質は変更なく無酸素銅である。最終的に圧縮コイルばねの先端に取り付けられた電極その他の合計質量は22.7gとなった。また、型彫放電加工機は、(株)牧野フライス製作所製NC放電加工機EDNC43を使用した。

4.3 基礎実験

4.3.1 動作実験

本実験装置による圧縮コイルばねの挙動と電極の運動を検証することを目的として、動作実験を行った。

動作実験の方法は、改良前の実験装置における動作実験の方法とほぼ同様である。すなわち、まず、圧縮コイルばねが最大圧縮状態となる加工開始時の状態になるように、本実験装置を設定し、次いで、主軸を一定距離ずつ下方に送り、そのときの圧縮コイルばねの挙動と電極の運動を、定点に設置したカメラで撮影した。

図4.8に、主軸を送ったときの圧縮コイルばねの姿勢と位置および電極の位置と姿勢の変化を示す。この図からわかるように、実際に圧縮コイルばねが屈曲姿勢を保ちながら伸長しつつ、ばねおよび電極全体が下方に移動していることがわかる。また、改良前の実験装置における動作実験とは違い、図4.8(a)に示すように、加工開始時の圧縮コイルばねの高さは密着高さとなっており、確実に最大圧縮状態となっている。

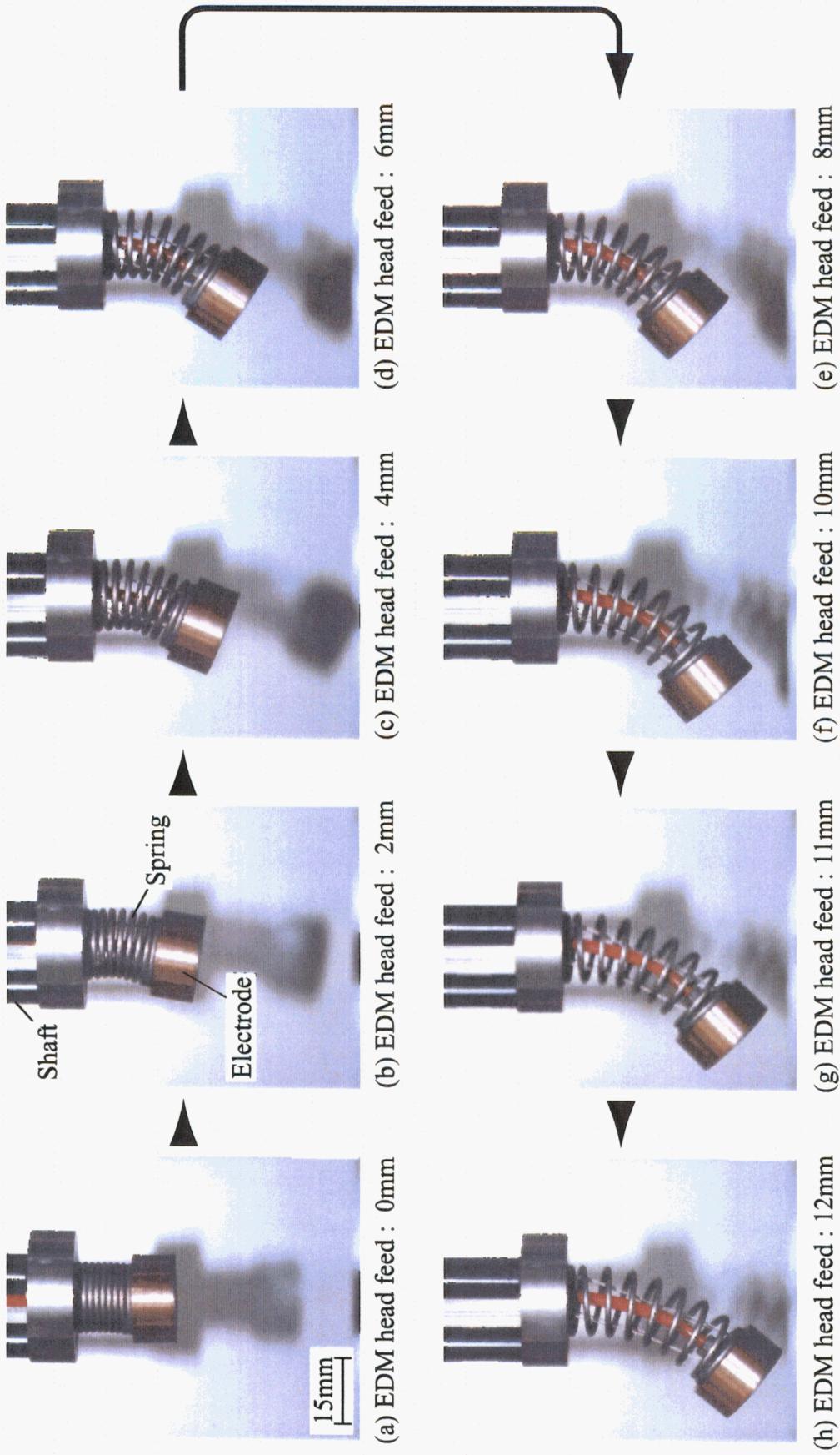


図4.8: 主軸を送ったときの実際の圧縮コイルばねの姿勢と位置および電極の位置と姿勢の変化

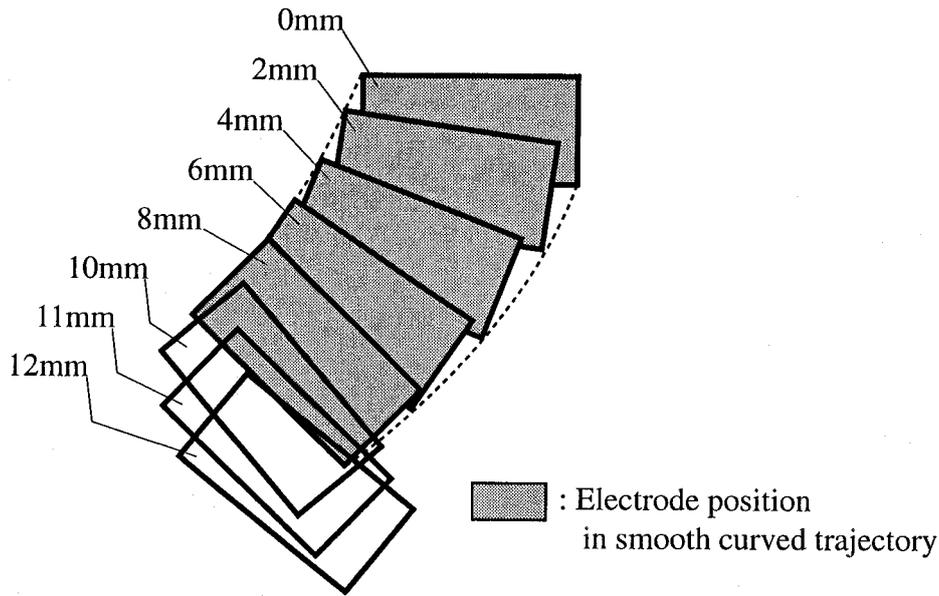


図4.9: 動作実験から得られた電極運動軌跡

図4.9は、図4.8の結果から作成した電極の運動軌跡である。この図から、改良前の実験装置と同様に逸脱はあるものの、主軸送り量が0mmから8mmになるまで、電極は滑らかな曲線軌跡上を運動していることがわかる。この電極運動軌跡が、本実験装置により加工可能な曲がり穴の形状を示している。図4.9から推定される曲がり穴の距離は、図3.8に示した改良前の実験装置による同距離より、明らかに延長されており、改良の効果が明白となった。

さらに、主軸を送ると、主軸送り量が9mmになったときに、電極は、この滑らかな曲線軌跡から逸脱しはじめ、その後は、図4.9に示すとおり、逸脱がますます大きくなった。

また、主軸送り量が8mmになるまで、圧縮コイルばねと被加工物との干渉はなかった。この確認は以下の方法で行った。

図4.9に示す電極運動軌跡を得る際、本実験装置における動作実験では、図4.8に示したばね挙動および電極運動を、定点に固定したデジタルカメラで撮影し、得られた画像をコンピュータ上で重ね、各主軸送り量のときの電極の位置と姿勢をプロットした。これにより、画像のずれをほぼ無くすことができ、各主軸送り量のときの屈曲姿勢にある圧縮コイルばねの姿勢と位置をある程度まで正確に把握することが可能となった。したがって、得られた電極運動軌跡の包絡形状とばねが接触していなければ、圧縮コイルばねと曲がり穴加工面つまり被加工物との干

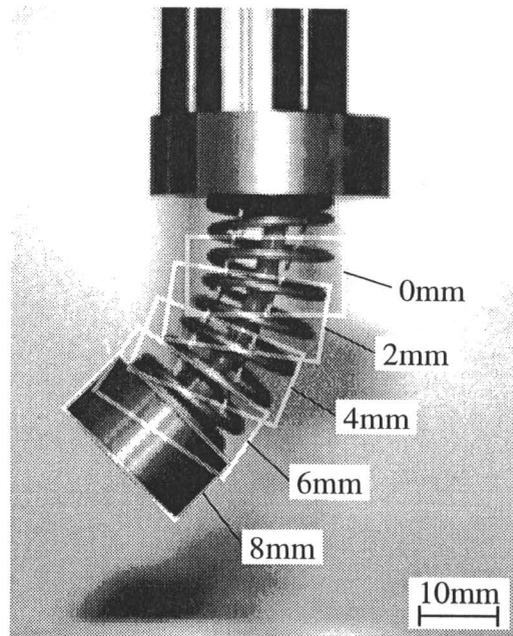


図 4.10: 主軸送り量が 8mm のときの圧縮コイルばねの姿勢および位置とそれまでの電極運動軌跡

渉はないと判断できる。

図 4.10 に、主軸送り量が 8mm のときの圧縮コイルばねの姿勢および位置と、それまでに電極が運動した軌跡の比較を示す。この図に示すように、ばねは電極がそれまで運動してきた滑らかな曲線軌跡の包絡形状の内側に存在し、干渉が生じないことがわかる。同様なことは、主軸送り量が 0mm から 6mm までのときも行い、干渉のないことを確認している。これにより、圧縮コイルばねは加工中において被加工物と干渉しないことがわかる。

また、4.2.2 小節で述べたように、理論的には、電極が滑らかな曲線軌跡から逸脱するときの主軸送り量は、改良前後で変わらないはずであるが、改良前の実験装置を用いた動作実験では、加工開始時に圧縮コイルばねが最大圧縮状態となっていなかったため、単純に比較はできない。

4.3.2 加工実験

動作実験の結果から加工可能であると予想された、距離の長い曲がり穴が実際に加工可能であるかを検証するため、本実験装置による加工実験を、以下に示す方法で行った。

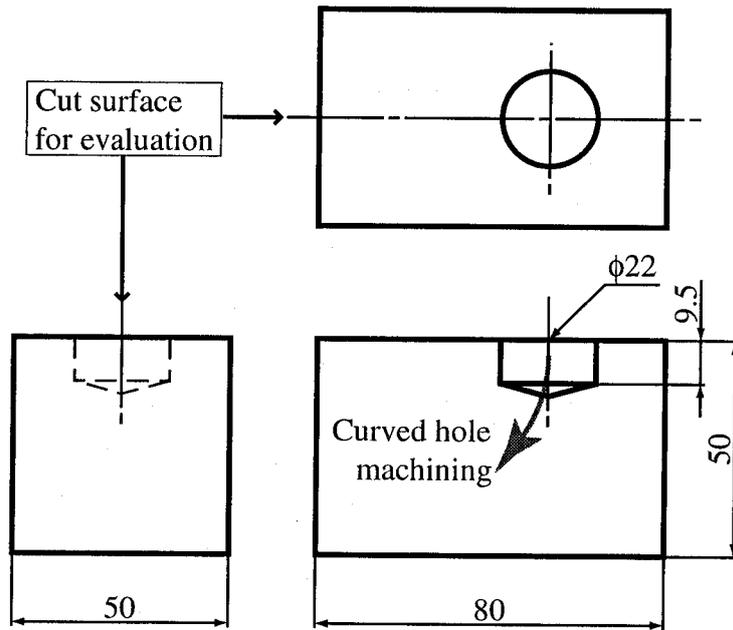


図4.11: 加工実験に使用した被加工物の形状寸法と構造

改良前の実験装置による加工実験と同様に、被加工物に電極が埋没するような下穴をドリル加工し、その穴の底を加工開始点とした。図4.11に、本実験装置による加工実験に用いた被加工物の形状寸法および構造を示す。被加工物に加工された下穴の寸法は、直径22mm、深さ9.5mmである。この下穴も、改良前の実験装置による加工実験と同じ理由から、図4.11に示す面で被加工物をあらかじめ切断し、組み立てなおした後、加工されている。また、被加工物の材質は炭素鋼(S45C)である。

この下穴の中に電極を設置しながら、圧縮コイルばねを最大圧縮状態になるように、本実験装置を設定した後、通常の型彫放電加工と同様の方法で放電加工を行った。

表4.1に、加工実験に使用した放電加工条件を示す。この条件は、型彫放電加工機に用意されているメーカー推奨の放電加工条件から適切なものを選択した。ただし、主軸のジャンプに関しては、改良前の実験装置による加工実験と同じ理由により、適用しなかった。また、主軸の揺動に関しては、本実験装置の場合、圧縮コイルばねと電極が主軸に直結されているため、改良前の実験装置のとき以上に、電極が複雑な運動をする可能性があり、これも実施しなかった。これらの理由に加えて、改良前と改良後の実験装置による曲がり穴加工結果を比較するため、電

表4.1: 放電加工条件

Electrode	Oxygen-free copper
Workpiece	Carbon steel (S45C)
Working fluid	Oil
Flow rate	3 cm ³ /s
Polarity	Reverse
Discharge current	10 A
Pulse duration	114 μs
Duty factor	79 %
Jump	Not applicable
Orbital motion	Not applicable

極運動軌跡に影響する条件を統一する必要があった。また、加工実験における主軸送り量の最大値は、動作実験で得られたとおり、8mm と設定した。

図4.12 に、加工後の被加工物の断面図を示す。ドリル加工された下穴部分と、それに連なるように、本実験装置により放電加工された曲がり穴部分が見て取れる。この図からわかるように、曲がり穴部分の断面形状は凹凸もなく、図4.9 に示した電極が逸脱する前の滑らかな電極運動軌跡と、ほぼ同形状の曲がり穴が加工できている。図4.12 に示した点Cから点Dまでの曲がり穴外周部の距離は34mm であった。図3.11 において、点Aと点B で表した改良前の実験装置で加工した曲がり穴外周部の距離が20mm であったことから、装置の改良により、加工可能な曲がり穴の距離が大幅に伸びたことが明らかとなった。これにより、装置の改良の効果が加工実験においても確認された。

また、放電加工時間は22.5 時間であった。放電加工による除去体積は8cm³ であったので、放電加工速度は6mm³/min である。

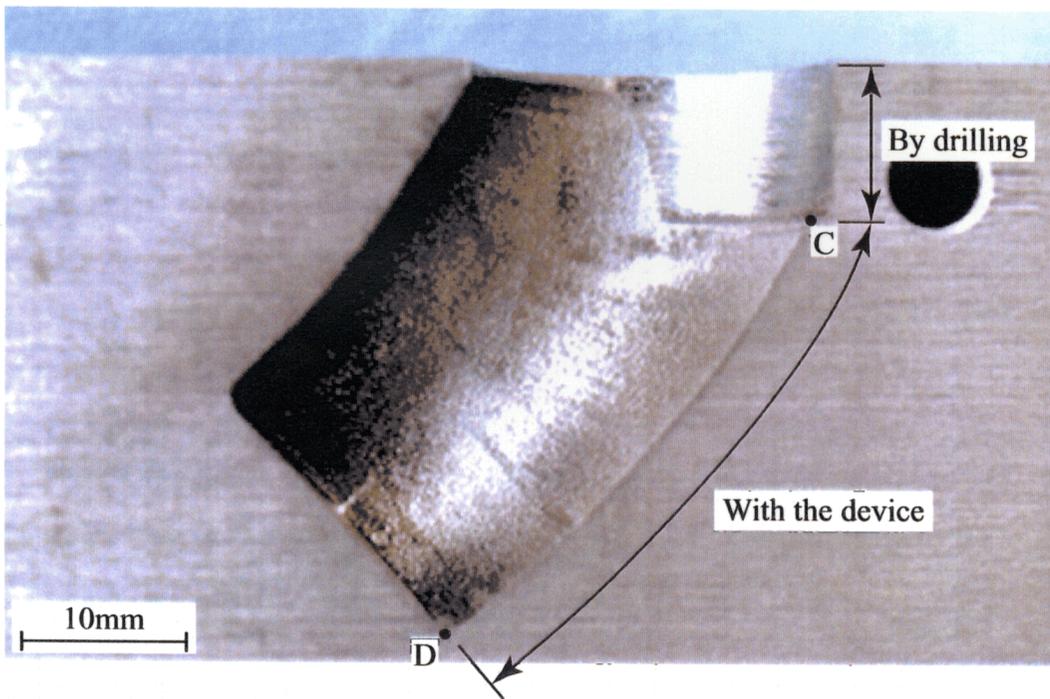


図4.12: 加工された被加工物の断面図

4.4 L字形曲がり穴加工実験

基礎実験の結果，図4.12に示すように，下穴の中心線を基準として，その底面が約 45° の角度をなす曲がり穴が加工できたことから，なす角 90° で加工された2本の直穴の底を曲がり穴で連結させることを考えた．加工後の穴断面のなす形状が，アルファベットのLに類似することから，この加工実験で目標とする穴形状をL字形曲がり穴と呼ぶこととする．

図4.13に，L字形曲がり穴の加工実験に使用した被加工物の寸法形状と構造を示す．被加工物は，縦100mm，横100mm，厚さ50mmの直方体形状をした炭素鋼(S45C)であり，直径22mm，深さ40mmの2本の直穴が，両者のなす角 90° になるように，あらかじめドリル加工されている．これらの直穴も，基礎実験と同様，図4.13に示す面で被加工物をあらかじめ切断，組み立て後，加工されている．

この2本の直穴の底を本実験装置による加工開始点とし，両方から図4.12に示す曲がり穴を1本ずつ加工，連結することによって，L字形曲がり穴の創成を目指す．

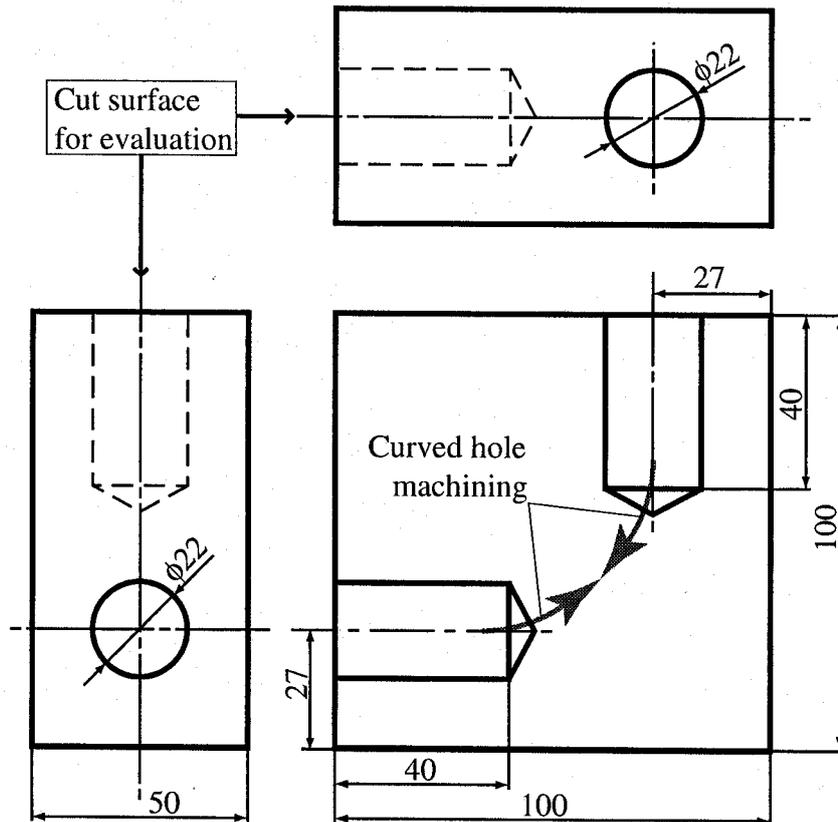


図4.13: L字形曲がり穴加工実験に使用した被加工物の形状寸法と構造

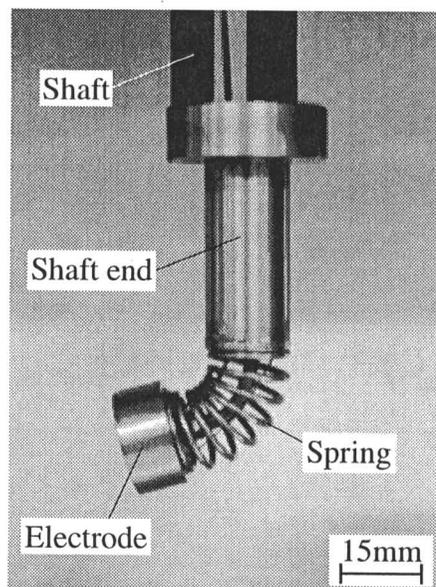


図 4.14: 改造後の軸端形状

指す。

しかし、深さ 40mm の直穴の底を加工開始点とすると、図 4.10 から容易に予想されるように、圧縮コイルばねを取り付けている軸が被加工物に干渉する。そこで、圧縮コイルばねを取り付ける軸端の形状を、図 4.14 に示すように改造して、軸端と被加工物の干渉を回避した。

加工方法は、2本の曲がり穴加工とも、直穴の開口部を上にした状態で加工した。すなわち、電極やばねを、直穴の位置に合わせて、90°回転させたのではなく、被加工物を、電極やばねの位置に合わせて、90°回転させている。具体的に言えば、一方の直穴に、基礎実験における加工実験と同じ方法で、1本目の曲がり穴を加工した後、被加工物を取り外し、他方の直穴を、1本目の曲がり穴を加工した直穴と同じ位置および姿勢になるように、被加工物を取り付け、2本目の曲がり穴を加工した。2本の曲がり穴の放電加工条件を表 4.2 に示す。放電加工条件の選択理由および機構条件は基礎実験と同様である。

図 4.15 に、加工された L 字形曲がり穴の断面図を示す。2本の曲がり穴の連結部分に段差が見られるものの、本実験装置によって、L 字形曲がり穴を加工できることがわかった。

放電加工時間は、1本目の曲がり穴が 20.5 時間、合計で 39.5 時間であった。合計の放電加工時間は、基礎実験において加工した曲がり穴 2 本分の加工時間より

表4.2: L字形曲がり穴加工における放電加工条件

Curved hole machining	First	Second
Electrode	Oxygen-free copper	
Workpiece	Carbon steel (S45C)	
Working fluid	Oil	
Flow rate	3 cm ³ /s	
Polarity	Reverse	Reverse
Discharge current	9 A	7 A
Pulse duration	121 μs	114 μs
Duty factor	49 %	49 %
Jump	Not applicable	Not applicable
Orbital motion	Not applicable	Not applicable

も短縮されている。この原因は、2本の曲がり穴の連結部分において重なりしろがあるため、L字形曲がり穴を加工した際の放電加工による除去体積が、基礎実験において加工した曲がり穴2本分の除去体積より、減少していることによるものである。

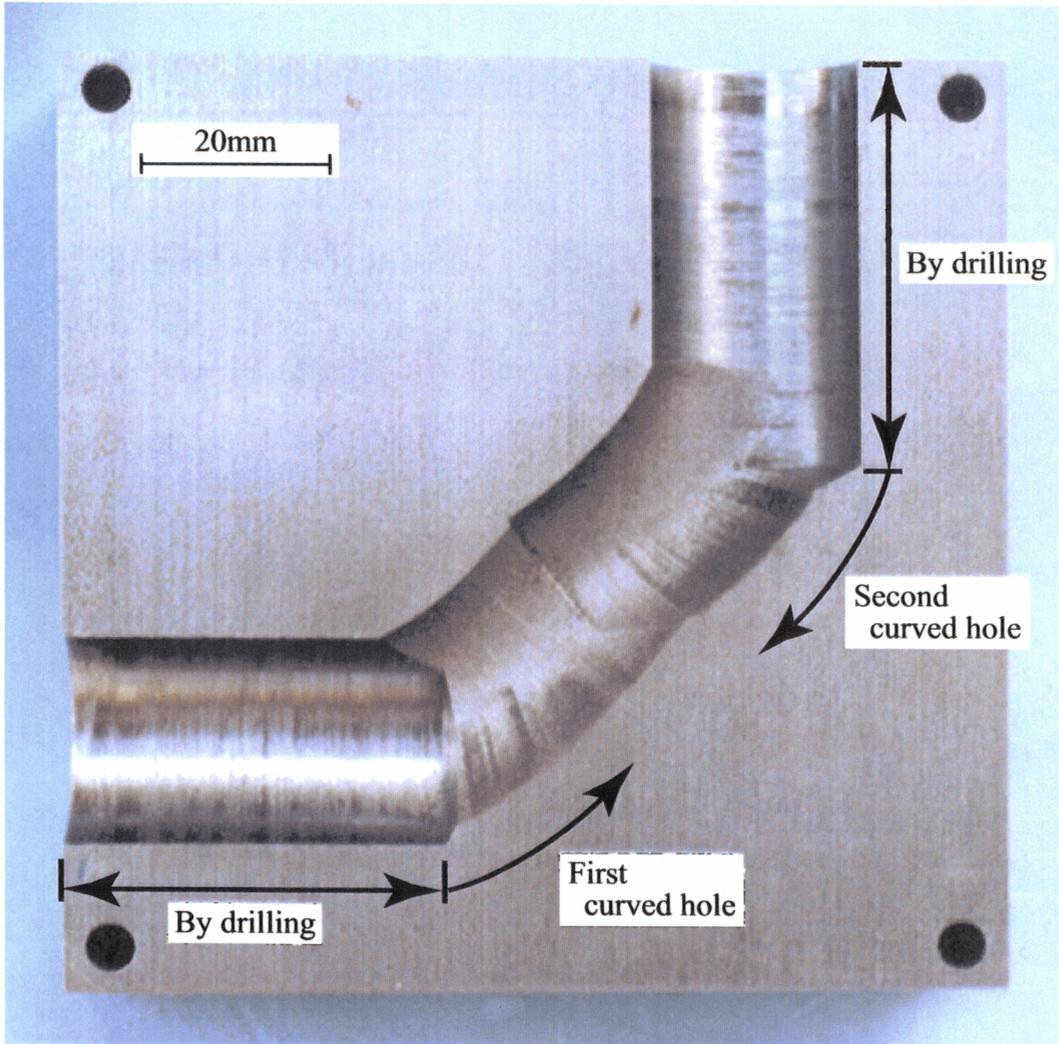


図4.15: 加工されたL字形曲がり穴の断面図

4.5 考 察

4.5.1 基礎実験および実験装置に関して

4.3節で述べたように、実験装置の改良によって、加工可能な曲がり穴の長さを延長することができ、本章の目的を達成することができた。しかし、様々な曲率や長さをもつ多種多様な曲がり穴を加工するためには、さらに改良および検証すべき点がある。

本実験装置の場合、電極が運動する曲線軌跡の制御は、図4.2に示したように、ワイヤのプリー経由数の相違による各ワイヤ送り量の差を利用したワイヤ送り量比を設定することによって実現されているが、このために、ワイヤ送り量比が離散的にならざるを得ない、なおかつ、1本の曲がり穴加工中に、ワイヤ送り量比を変化させることができない。よって、具体的には、一定の曲率をもった曲がり穴など、形状が指定された曲がり穴が加工できないなどの問題がある。

今後、このような制限をひとつずつ段階的に克服するように装置を改良していくこと、また、圧縮コイルばねの仕様の影響を検証することによって、加工可能な曲がり穴形状の自由度を向上させることができると考えている。

4.5.2 L字形曲がり穴加工実験に関して

図4.15に示したように、本実験装置を用いて、L字形曲がり穴が加工できた。この穴形状は、切削などの他の除去加工法や従来の型彫放電加工では、実現不可能な穴形状である。

ただし、L字形曲がり穴の2本の曲がり穴の連結部分には、段差が生じている。この主な原因は、被加工物に対する2本の曲がり穴の加工開始点の位置決め誤差であると考えている。今後、このような段差を可能なかぎり小さくするためには、被加工物と電極の位置関係、および、電極の空間的位置と姿勢を測定する方法の確立、そして、その修正方法の開発が必要になるであろう。

4.5.3 放電加工時間に関して

放電加工時間については、改良前の実験装置で加工くず除去の妨害をしていたゴム膜を使用しなかったにもかかわらず、通常型彫放電加工と比較して、本実験装置による加工は不安定で、放電加工速度の向上は見られなかった。これは、以

下のような原因によるものと推定している。

第一に、加工中における電極の振動である。開発した曲がり穴加工法では、電極が圧縮コイルばねを介して主軸に取り付けてある関係上、通常の型彫放電加工よりも剛性が低い。しかも、本実験装置では、図4.2に示したように、電極の移動量は主軸の移動量の3倍から4倍になるため、電極の運動速度も主軸の移動速度の3倍から4倍に加速されており、電極の振動がないとはいえない。さらに、圧縮コイルばねが最大圧縮状態のときから加工が開始されるため、加工が進むにつれて圧縮コイルばねが伸長し、電極の位置剛性が低下していく。それに伴って、放電加工反力や主軸の極間距離制御動作による電極の振動幅も大きくなり、異常放電や短絡が生じやすくなる。これを裏付けるように、実際の曲がり穴加工においても、加工が進行するにつれて、放電加工速度が低下するのが認められた。

第二に、電極運動軌跡の誤差である。図4.1では表現されていないが、3本のワイヤは、それぞれ軸端部分の部品に加工された穴を通り、電極側のばね端部品に取り付けられている。したがって、加工中に圧縮コイルばねが屈曲すると、ワイヤはこの穴部分で摩擦力を受ける。この摩擦によって、ワイヤがスムーズに繰り出されず、主軸送り量とワイヤ送り量が厳密に一对一の対応関係とならなくなる、つまり、両者に微小な誤差が生じる可能性がある。これが事実であれば、電極は、巨視的には常に同一経路上を運動しているように見えるが、微視的には同一経路上ではなく、ある程度の誤差をもった、もしくは、幅をもった経路上をランダムに運動していることになる。よって、通常の型彫放電加工よりも電極の位置決め精度が悪くなり、異常放電や短絡が多くなると推測される。ただし、これは曲がり穴の形状には影響がない程度の悪化である。

さらに、絶縁復帰するために主軸は上昇するが、電極の振動や軌跡誤差のために絶縁復帰されにくいため、主軸がさらに上昇し、電極は加工中の曲がり穴の底から遠ざかることになる。また、絶縁が復帰したとしても、軌跡誤差によって、電極が曲がり穴の先端に到達する前に、短時間で微量であるが、曲がり穴の側面を加工してしまう場面もしばしば認められた。このような問題により、曲がり穴の加工進行への寄与以外に費やされる時間が長くなってしまい、放電加工速度が遅くなったものと考えている。

このような問題に対して、以下のような対策を考えている。電極の振動に対しては、動特性解析を実機やシミュレーションなどで行うことによって、加工中に

おける電極振動の程度，および，それが加工に及ぼす影響の調査を行って，振動をできるだけ抑制するような機構の検討や放電加工機による極間距離制御の設定パラメータの最適化を行う．また，電極の運動軌跡の誤差に対しては，電極が微視的にも同一経路上を運動するように，ワイヤの摩擦部分を排除する．

4.6 結 言

本章では、前章で説明した曲がり穴加工用電極送り機構によって加工できる曲がり穴の長さが短いという欠点を克服するため、その延長を図るべく開発した改良型曲がり穴加工用電極送り機構について説明した。改良前の実験装置と本実験装置の違いは、圧縮コイルばねを、軸を介して主軸に取り付け、ばねおよび電極全体が、主軸とともに移動するようにしたこと、また、各ワイヤのプーリ経由数を1つずつ増加させたことである。本実験装置による動作実験と加工実験およびその応用実験の結果、以下のような結論を得た。

- (1) 本実験装置を用いて動作実験を行ったところ、圧縮コイルばねの仕様を変えることなく、滑らかな曲線状の電極運動軌跡の距離を延長することができた。
- (2) 延長された電極運動軌跡を用いて加工実験を行った結果、この電極運動軌跡の包絡線形状とほぼ同様の曲がり穴形状を加工できた。すなわち、加工可能な曲がり穴形状の距離を延長することに成功した。
- (3) 延長された曲がり穴形状を利用することによって、従来の除去加工法では加工することが困難である、なす角 90° で加工された直穴の底を曲がり穴で連結したL字形曲がり穴形状の創成に成功した。

第5章

曲がり穴加工法の開発 3

ー スライダクランク連鎖の導入と U字形・3次元曲がり穴加工 ー

5.1 緒 言

前章で説明したように、改良型曲がり穴加工用電極送り機構によって、加工可能な曲がり穴形状の距離を延長することに成功したが、この装置では、曲がり穴形状の曲率を様々に変化させ、多様な曲がり穴形状を加工することは、その構造上の問題により、困難であった。これは、曲がり穴形状に相当する電極運動軌跡の制御が、ワイヤのプリー経由数の相違による各ワイヤの繰り出し量の差によって実現されているため、ワイヤの繰り出し量の設定が離散的になるためであった。

そこで、曲がり穴形状を多様化させることを目的として、前章の装置を改良した。改良の基本的な考え方は、各ワイヤの繰り出し量を何らかの連続的な設定が可能なもので制御できればよい。ここでは、装置にスライダクランク連鎖を導入し、その構成部品の寸法により、ワイヤの繰り出し量を設定できるようにした。

本章では、再度改良した装置、すなわち、スライダクランク連鎖導入曲がり穴放電加工用電極送り機構を用いた動作実験と加工実験を行い、曲がり穴形状の多様化の可能性について検証した。

なお、装置を区別するために、本章では、前々章の装置を「改良前の実験装置」、前章の装置を「導入前の実験装置」、本章の装置を「導入後の実験装置」あるいは「本実験装置」と呼ぶことにする。

5.2 スライダクランク連鎖を導入した 曲がり穴放電加工用電極送り機構

5.2.1 装置の構造

図5.1に、スライダクランク連鎖を導入した曲がり穴放電加工用電極送り機構の模式図を示す。工具電極は、型彫放電加工機の主軸に、軸および圧縮コイルばねを介して直列に結合されており、さらに、電極側のばね端の内側円周部には、3本のワイヤが120°等配で取り付けられている。一方、加工槽中にはジグが設置されており、3つの回転可能な円盤が搭載されている。ばね端に取り付けられた3本のワイヤは、ばねの内部および軸沿いを通過し、それぞれが各円盤へと導かれる。そして、各ワイヤはそれぞれの円盤の周囲に巻き付けられ、ワイヤ固定具により、ワイヤの端部のみが円盤に固定される。また、3つの円盤は、それぞれが放電加工機の主軸と、リンクを介して連結されている。これらの3本のリンクは、同一なものが用いられている。それぞれの円盤、リンク、主軸の連結は、円盤の回転中心から円盤とリンクの連結点までの距離が等しくなるように、そして、主軸とリンクの連結点が各円盤の回転中心の直上に位置するように設計されている。さらに、主軸、リンク、円盤は、各連結点において回転運動が可能となっている。つまり、これらは互いに回転対偶として接続されている。したがって、主軸、リンク、円盤は、3つの等しいスライダクランク連鎖、その中でも、主軸を原動節のスライダとした往復スライダクランク機構[1]を構成していることになる。ただし、円盤の直径に関しては、図5.1において、左右に設置された円盤で違いがある。すなわち、左側に設置された2つの円盤の直径は等しいが、これらよりも右側に設置された円盤の直径が大きくなっている。

加工くずの除去および加工電流の供給の方法は、導入前の実験装置と同様である。すなわち、加工くずの除去は、加工液をフレキシブルチューブと電極中央の小径穴を通して、電極間隙に供給することにより行われる。また、電極への加工電流の供給は、主軸、軸、ばねを電流経路として行われる。この電流経路と加工槽は絶縁されている。

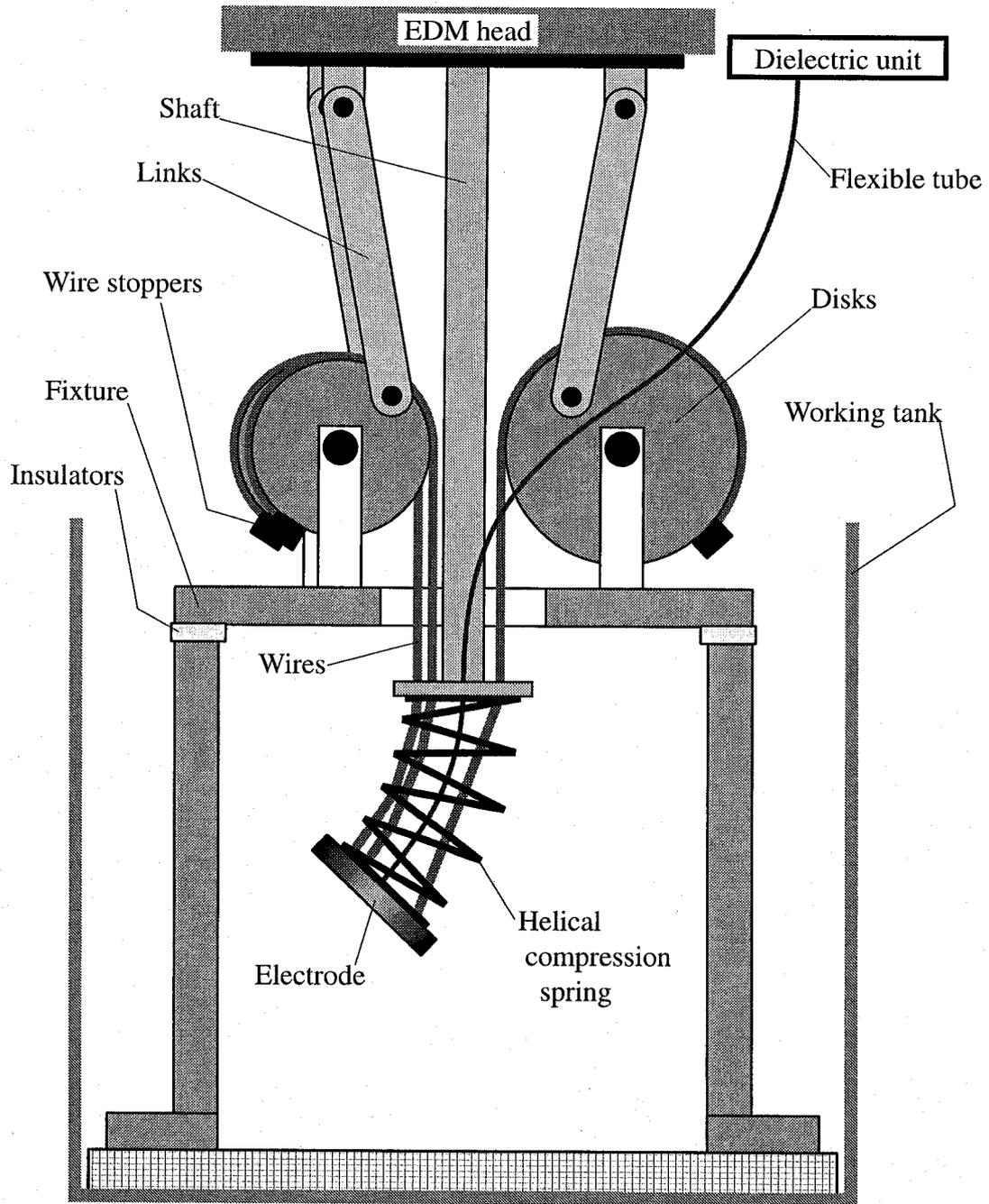


図5.1: スライダクランク連鎖導入曲がり穴放電加工用電極送り機構の模式図

5.2.2 装置の動作過程とその幾何的検討および改良点

図5.1を2次元的に表した図5.2を用いて、本実験装置の動作過程を説明する。ここで、左側に設置された円盤に巻き付けられているワイヤをWire5、同様に右側のワイヤをWire6とする。

図5.2(a)は加工開始時の状態を示している。改良前および導入前の実験装置と同じように、加工開始時の圧縮コイルばねは最大限に圧縮されており、その高さは密着高さ H_S となっている。

この状態から、図5.2(b)に示すように、主軸が下方に移動するときを考える。本実験装置では、主軸は3つの等しい往復スライダクランク機構のスライダにあたるため、主軸の移動は、軸およびばね自体を移動させると同時に円盤を回転させる。このとき、軸およびばね自体の移動と円盤の回転、および、ばねの復元力による伸長動作によって、各ワイヤは下方に引き出される。本実験装置においても、導入前の実験装置と同じように、主軸の移動量を主軸送り量、引き出されるワイヤの長さをワイヤ送り量、また、各ワイヤのワイヤ送り量の比をワイヤ送り量比と呼ぶことにする。

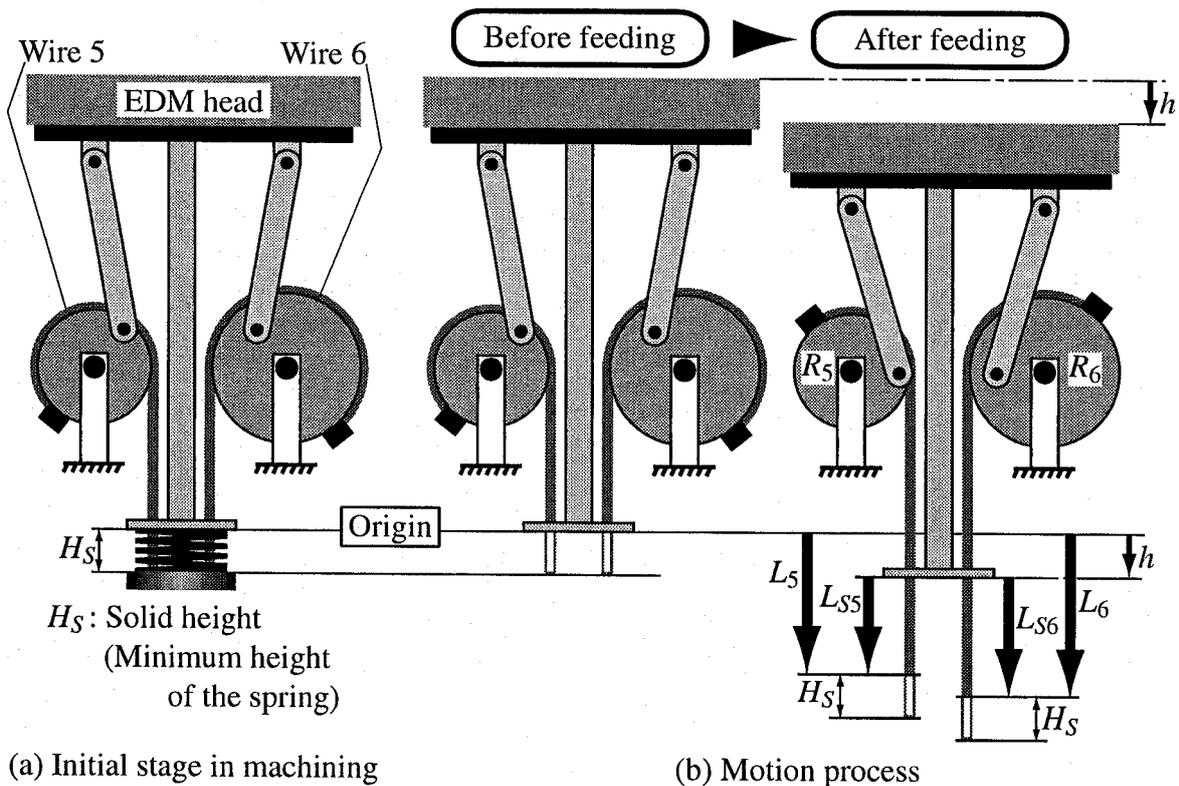


図5.2: 主軸送り量とワイヤ送り量の関係

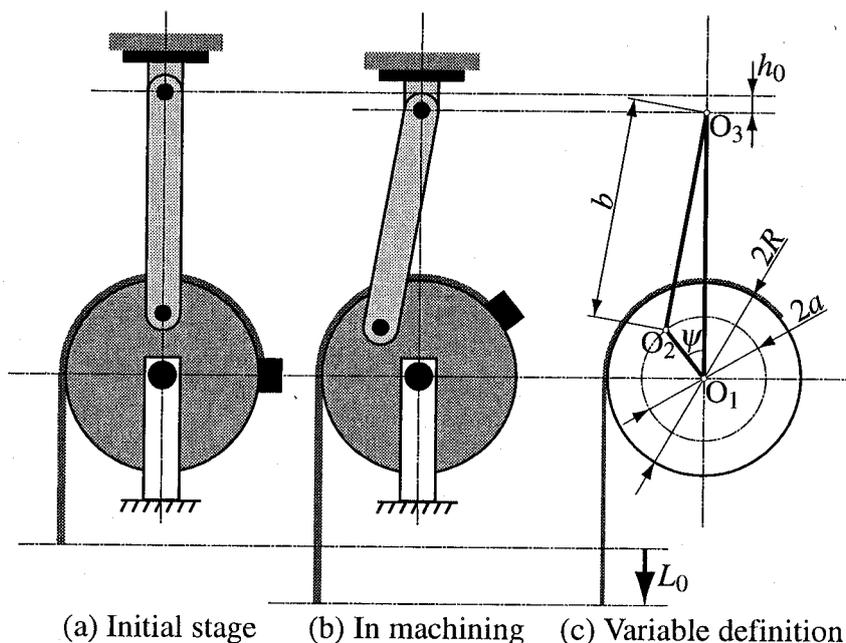


図5.3: 往復スライダクランク機構部分の変数の定義

また、本実験装置の場合も、導入前の実験装置と同様に、ワイヤ送り量には二種類が存在し、その定義も同等のものとする。すなわち、図5.2に示すように、圧縮コイルばねが最大圧縮状態時における軸端の位置を原点とし、加工槽の視点から観察したときのWire5, Wire6のワイヤ送り量をそれぞれ L_5, L_6 、また、軸の視点から観察したときのWire5, Wire6のワイヤ送り量をそれぞれ L_{s5}, L_{s6} とする。また、Wire5, Wire6が巻き付けられている左右に設置された円盤の半径をそれぞれ R_5, R_6 とし、主軸送り量を h とする。

本実験装置では、左右の往復スライダクランク機構は同等であるが、図5.2(b)に示すように、各ワイヤの巻き付けられた円盤の直径が異なるため、主軸の移動に対して、各ワイヤが繰り出される量は互いに違う値となる。このワイヤ送り量の相違が、圧縮コイルばねの挙動と電極の運動軌跡、つまり、加工される曲がり穴の形状に直接影響を与えることになる。したがって、主軸送り量に対するワイヤ送り量の挙動、および、この挙動への円盤半径の影響を定量的に評価するため、 h と L_5, L_6 および R_5, R_6 の関係を導出する必要がある。そこで、本実験装置に搭載された往復スライダクランク機構の動作を幾何学的に検討する。

図5.3は、本実験装置を構成する往復スライダクランク機構部分とその動作を表している。図5.3(a)に示すように、この機構のリンクが鉛直であるときを原点と

し、この状態からスライダである主軸が下方に移動することによって、図5.3(b)に表すように、円盤が回転し、ワイヤが繰り出されたとする。このときの各変数の定義を図5.3(c)に示す。すなわち、往復スライダクランク機構のクランク長さ O_1O_2 を a 、リンク長さ O_2O_3 を b とし、図5.3(a),(b)に示した往復スライダクランク機構の動作を一般的に記述するために、このときの主軸の移動量をスライダ移動量、また、ワイヤの繰り出された量をワイヤ移動量と呼ぶこととして、これらをそれぞれ h_0 、 L_0 と、また、改めて、円盤半径を R 、円盤回転角度を ψ と表すこととする。このとき、往復スライダクランク機構では、 h_0 と ψ の間には近似的に次の関係が成立する[1]。

$$h_0 = a \left(1 - \cos\psi + \frac{a}{2b} \sin^2\psi \right) \quad (3a \leq b) \quad (5.1)$$

式(5.1)を ψ について解くと、次式が導かれる。

$$\psi = \cos^{-1} \left(\frac{-b + \sqrt{(a+b)^2 - 2bh_0}}{a} \right) \quad (0 \leq h_0 \leq 2a) \quad (5.2)$$

また、 L_0 は次式のように表される。

$$L_0 = R\psi \quad (5.3)$$

よって、式(5.2),(5.3)から ψ を消去すると、 h_0 、 L_0 、 R の関係は次のように求められる。

$$L_0 = R \cos^{-1} \left(\frac{-b + \sqrt{(a+b)^2 - 2bh_0}}{a} \right) \quad (5.4)$$

式(5.2),(5.4)において、 a 、 b をそれぞれ20mm、100mmとし、 R をパラメータとして、 h_0 、 L_0 、 ψ の関係を表したグラフを図5.4に示す。往復スライダクランク機構の構造上の理由から、式(5.2)に示したように、 h_0 の値域は0mm以上40mm以下となる。

図5.4に示すグラフより、スライダ移動量 h_0 、円盤回転角度 ψ 、ワイヤ移動量 L_0

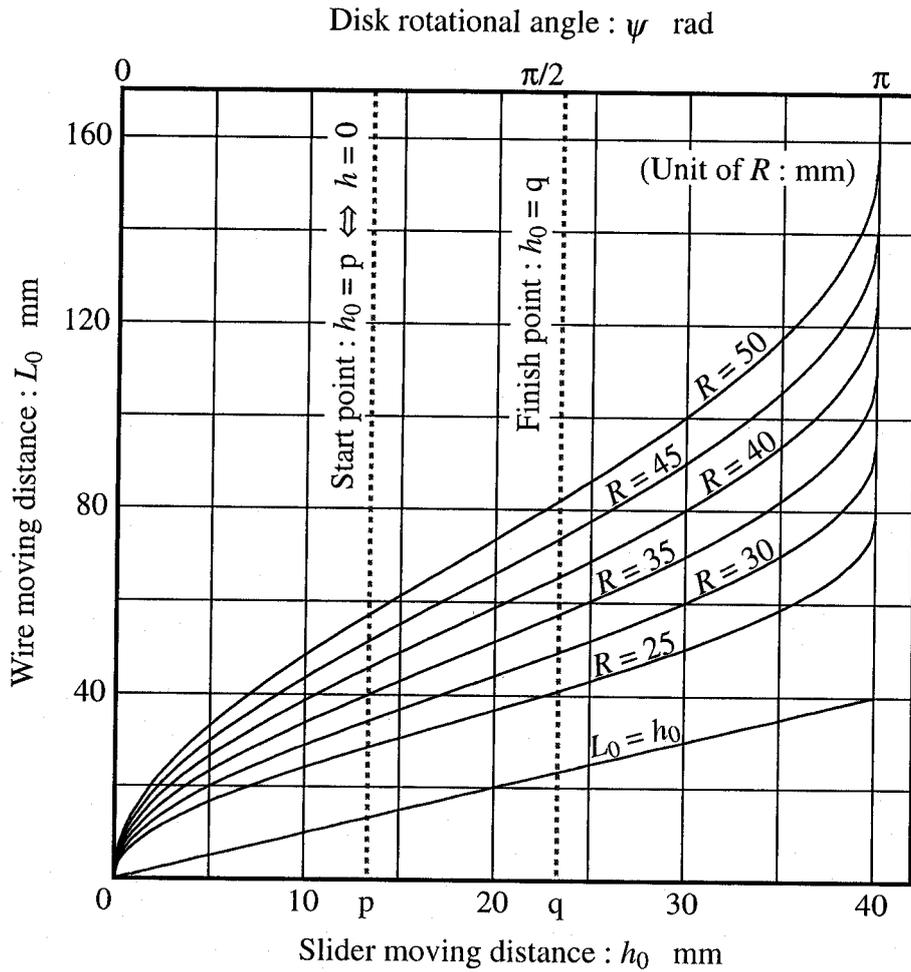


図 5.4: スライダ移動量, ワイヤ移動量, 円盤回転角度の関係
($a=20\text{mm}$, $b=100\text{mm}$)

が一對一に対応していること, すなわち, 主軸の位置とワイヤの繰り出し量が一對一に対応していること, $h_0 = 0, 40\text{mm}$ 近傍以外の領域では, h_0 と L_0 および ψ の関係はほぼ比例関係となっていることがわかる. 比較するために, $L_0 = h_0$ のグラフも併せて記載している. また, h_0 の値域とは, すなわち, 実際に本実験装置を動作させる際の主軸の最大可動範囲を表している. したがって, $h_0 = 0, 40\text{mm}$ 近傍以外のある領域を本実験装置による加工に利用すれば, 導入前の実験装置における式(4.1)に示したような主軸送り量とワイヤ送り量の比例関係を, 本実験装置においても近似的に構築することができる.

ここで, 図 5.4 のグラフに示すように, h_0 の値域内の $h_0 = 0, 40\text{mm}$ 近傍以外の領域に存在する $h_0 = p$ から $h_0 = q$ までを, 本実験装置による加工に利用したとす

る。ただし、条件は $p < q$ である。これを言い換えれば、往復スライダクランク機構のスライダ移動量が $h_0 = p$ の状態を本実験装置の加工開始点とし、同じく、 $h_0 = q$ の状態を加工終了点としたこととなる。つまり、スライダ移動量 h_0 が p mm であるときは、本実験装置は図5.2(a)に示す加工開始時の状態にあるということであり、したがって、このときの主軸送り量 h およびワイヤ送り量 L はともに 0 mm ということになる。すなわち、スライダ移動量 h_0 と主軸送り量 h の関係、および、ワイヤ移動量 L_0 とワイヤ送り量 L の関係は、 $h_0 = p$ のときのワイヤ移動量を $L_0(h_0=p)$ と表すこととすると、次式のように表される。

$$h = h_0 - p \quad (5.5)$$

$$L = L_0 - L_0(h_0=p) \quad (5.6)$$

式(5.5), (5.6)を用いて、式(5.4)から h_0 , L_0 を消去すると、主軸送り量 h とワイヤ送り量 L の関係は次式のように求められる。

$$L = R \cos^{-1} \left(\frac{-b + \sqrt{(a+b)^2 - 2b(h+p)}}{a} \right) - L_0(h_0=p) \quad (5.7)$$

式(5.4), (5.7)に示す式の形からわかるように、式(5.7)の表す h と L のグラフは、図5.4に示したグラフを、横軸の負方向に p だけ、縦軸の負方向に $L_0(h_0=p)$ だけ平行移動させたグラフとなる。

そこで、式(5.7)に表された h と L の関係を、 $p = 10$ mm, $q = 30$ mm とし、 R をパラメータとして、グラフに表したものを図5.5に示す。 a , b の設定値は、図5.4に示したグラフと同様に、それぞれ 20 mm, 100 mm である。なお、図5.5に示すグラフには、比較のために、 $L = h$, $L = 2h$, $L = 3h$, $L = 4h$ のグラフも併せて記載されている。

このグラフからわかるように、本実験装置における主軸送り量 h とワイヤ送り量 L の関係は、ほぼ比例関係にあると判断してよい。

導入前の実験装置における主軸送り量とワイヤ送り量の関係は、式(4.1)に示したような比例関係であり、これは、図5.5のグラフに示した $L = 3h$, $L = 4h$ のグラフそのものである。すなわち、両者を関係づけているのは比例係数であり、導

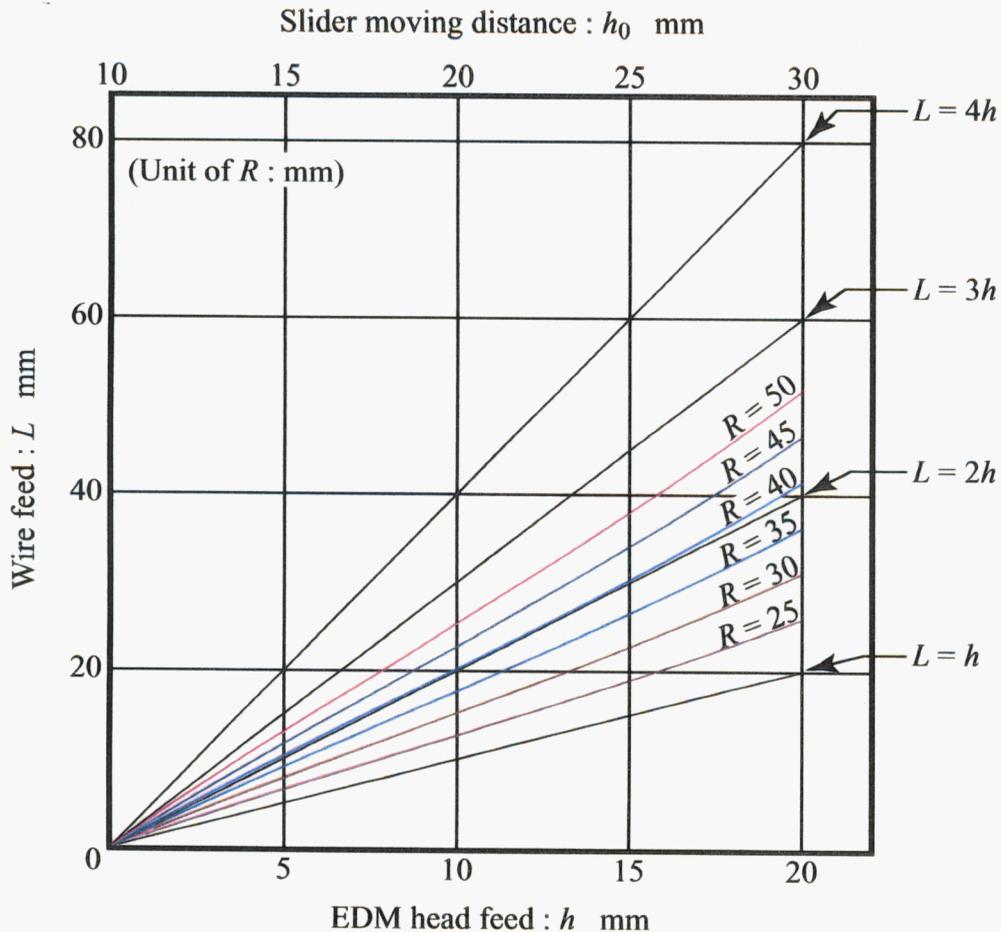


図 5.5: 主軸送り量, ワイヤ送り量, スライダ移動量の関係
 ($a=20\text{mm}$, $b=100\text{mm}$, $p=10\text{mm}$, $q=30\text{mm}$)

入前の実験装置では, それが整数であった.

本実験装置における比例係数にあたるものは, 図5.5に示すグラフの傾きに相当する. これは, 式(5.7)より L を h で微分した値 dL/dh に相当する. dL/dh を正確に表現すれば, 単位主軸送り量当たりのワイヤ送り量増分となるが, 上記のように, 主軸送り量 h とワイヤ送り量 L の関係の比例係数に相当することから, dL/dh を送り量係数と呼ぶこととし, 改めて, これを λ と表すこととする.

送り量係数 λ の導出を, 主軸送り量 h とワイヤ送り量 L の関係を導いたときと同様に, 図5.3に示した往復スライダクランク機構の動作として一般的に扱うため, 式(5.4)より, ワイヤ移動量 L_0 をスライダ移動量 h_0 で微分した値 dL_0/dh_0 の導出から行う. ここで, λ の定義と同様に, dL_0/dh_0 を移動量係数と呼ぶこととし, これを λ_0 と表すこととする.

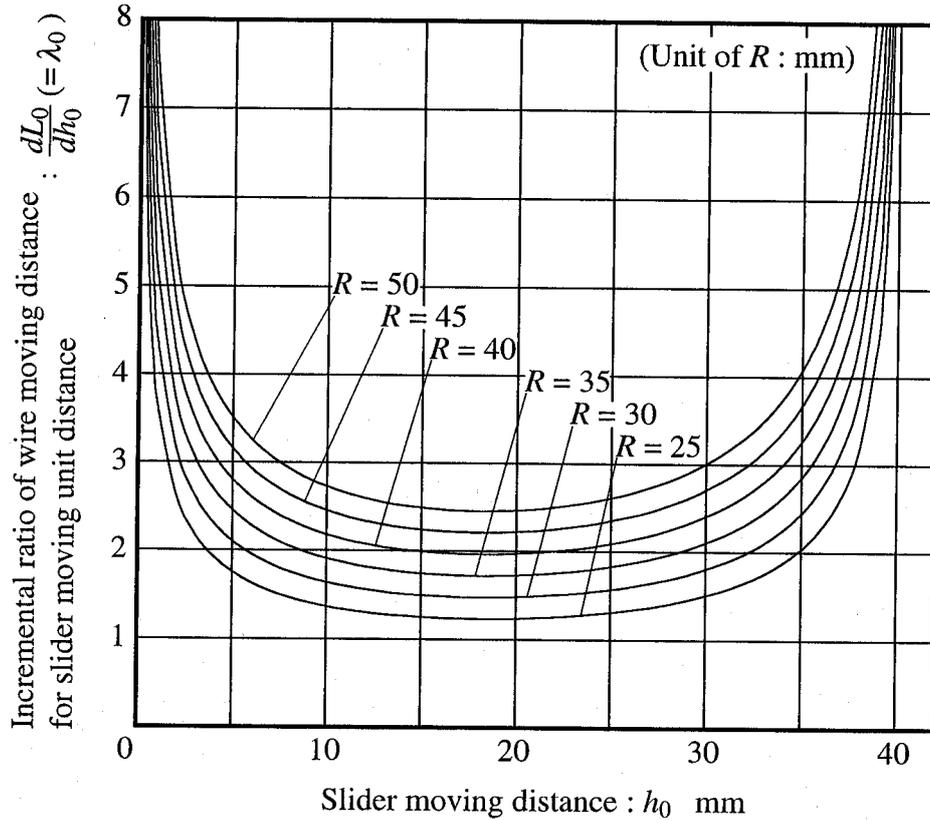


図5.6: スライダ移動量と移動量係数の関係 ($a=20\text{mm}$, $b=100\text{mm}$)

式(5.4)より λ_0 は次のように求められる。

$$\lambda_0 = \frac{dL_0}{dh_0} = \frac{bR}{Q_0 \sqrt{a^2 - (Q_0 - b)^2}} \quad \left(Q_0 = \sqrt{(a+b)^2 - 2bh_0} \right) \quad (5.8)$$

すなわち、式(5.8)は h_0 , λ_0 , R の関係を表している。

図5.4 に示したグラフの描画時と同様に、式(5.8)において、 a , b をそれぞれ 20mm , 100mm とし、 R をパラメータとして、 h_0 と λ_0 の関係を表したグラフを図5.6 に示す。図5.4 に示すグラフと同様に、本実験装置の構造上の制約から、 h_0 の値域は 0mm 以上 40mm 以下である。

このグラフに示すように、 $h_0 = 0, 40\text{mm}$ 近傍以外の領域では、 h_0 に対する λ_0 の値は急激な変動がないことがわかる。

図5.4 のグラフに表したように、 $h_0 = p$ の状態から加工が開始され、 $h_0 = q$ の状態を加工が終了したとすると、式(5.5), (5.6) に示す関係式および式(5.7), (5.8) の

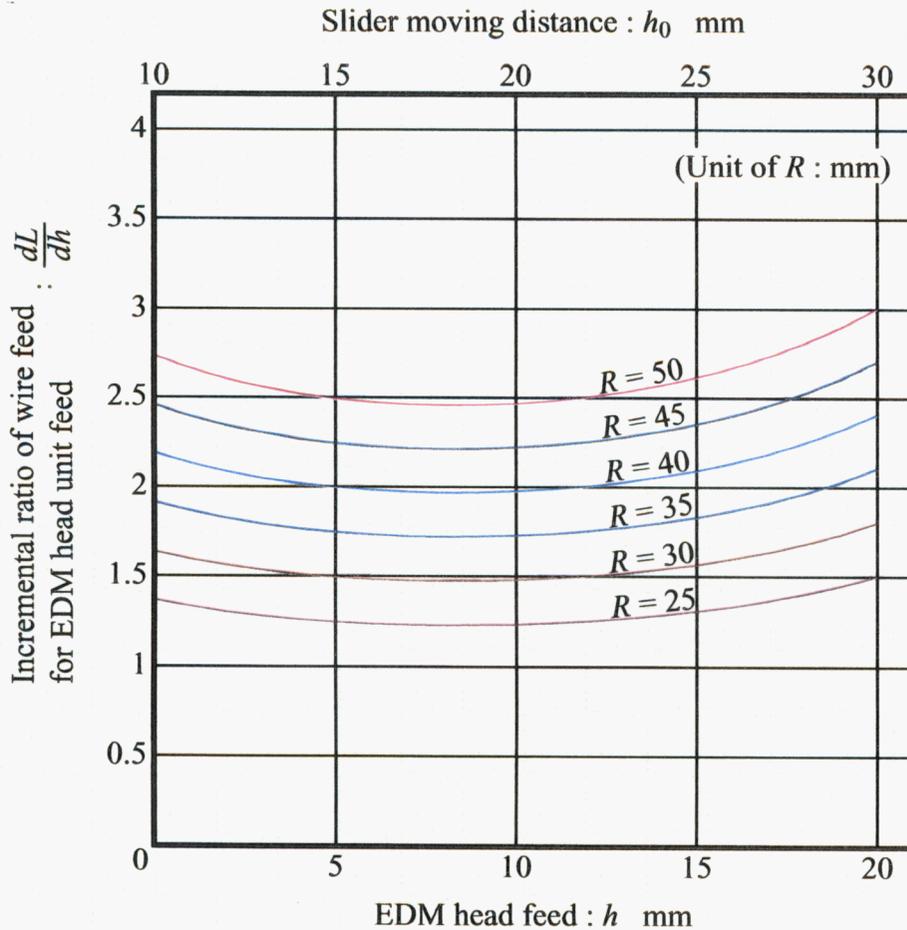


図 5.7: 主軸送り量, 送り量係数, スライダ移動量の関係
 ($a=20\text{mm}$, $b=100\text{mm}$, $p=10\text{mm}$, $q=30\text{mm}$)

結果から, 主軸送り量 h と送り量係数 λ の関係は, 次式で表される.

$$\lambda = \frac{dL}{dh} = \frac{bR}{Q\sqrt{a^2 - (Q-b)^2}} \quad \left(Q = \sqrt{(a+b)^2 - 2b(h+p)} \right) \quad (5.9)$$

式(5.8), (5.9)に示す式の形からわかるように, 式(5.9)の表す h と λ のグラフは, 図 5.6 に示したグラフを, 横軸の負方向に p だけ平行移動させたグラフとなる.

そこで, 式(5.9)に表された主軸送り量 h と送り量係数 λ の関係を, 図 5.5 に示したグラフの導出時と同様に, $p = 10\text{mm}$, $q = 30\text{mm}$ とし, R をパラメータとして, グラフに表したものを図 5.7 に示す. a , b の設定値は, 図 5.4 に示したグラフと同様に, それぞれ 20mm , 100mm である.

このグラフからわかるように, λ は h に対応して緩やかに変化している. 導入前

の実験装置における主軸送り量とワイヤ送り量の関係を表した式(4.1)を、このグラフで表せば、送り量係数 λ は比例係数そのものなので、 $\lambda=3$ と $\lambda=4$ となり、そのグラフは横軸に平行な直線となる。導入前と導入後の実験装置では、このような相違があるものの、図5.5に示したグラフに関して指摘したように、本実験装置における h と L の関係は、ほぼ比例関係にあるとしてよく、この相違点は軽微なものとしてよいであろう。

本実験装置の最大の改良点は、主軸送り量 h とワイヤ送り量 L を関係づける送り量係数 λ を、円盤半径 R を変化させることによって、連続的に設定することが可能になったことである。このことは、式(5.7),(5.9)、および、図5.5、5.7に示したグラフから明らかである。それに対し、導入前の実験装置では、構造上の制約から、主軸送り量 h とワイヤ送り量 L の関係は、ワイヤのプーリの経由数で決定されていたため、 $L = \alpha h$ (α は正の整数)という関係しか構築できず、両者の関係は離散的にしか設定できなかった。

本実験装置では、図5.4に示したグラフにおいて、加工開始点である $h_0 = p$ の p の値が、 $h_0 = 0$ 、40mm 近傍以外の領域であれば、図5.5、5.7のグラフに示すような h 、 L 、 λ の関係が得られる。すなわち、主軸可動範囲の適切な位置から加工を始めさえすれば、主軸送り量 h とワイヤ送り量 L の関係はほぼ比例関係となり、その比例係数に相当する送り量係数 λ は、式(5.9)に示されるように、円盤半径 R に比例する。他の視点に立つと、 λ は dL/dh であり、単位主軸送り量当たりのワイヤ送り量増分である。すなわち、ある位置にある主軸を単位長さだけ移動させると、ワイヤは λ の値が示す距離だけ送られるということである。つまり、端的に表現すれば、 λ はワイヤ送り量を表している。この λ が、円盤半径 R に比例し、かつ、 R は任意に指定することができるので、ワイヤ送り量である λ の設定を、離散的ではなく連続的に行うことが可能となる。

これまでの考察を、図5.2に示したWire5、Wire6に適用すると、以下のようになる。Wire5、Wire6のワイヤ送り量 L_5 、 L_6 および円盤半径 R_5 、 R_6 の関係は、式(5.7)より、次のように表される。

$$L_5 = R_5 \cos^{-1} \left(\frac{-b + \sqrt{(a+b)^2 - 2b(h+p)}}{a} \right) - L_0(h_0=p) \quad (5.10)$$

$$L_6 = R_6 \cos^{-1} \left(\frac{-b + \sqrt{(a+b)^2 - 2b(h+p)}}{a} \right) - L_0(h_0=p) \quad (5.11)$$

ここで、主軸送り量 h と Wire5, Wire6 のワイヤ送り量 L_5, L_6 を関係づける送り量係数を、それぞれ λ_5, λ_6 と表すこととすると、式(5.9)より、 λ_5, λ_6 は次式のように示される。

$$\lambda_5 = \frac{dL_5}{dh} = \frac{bR_5}{Q\sqrt{a^2 - (Q-b)^2}} \quad \left(Q = \sqrt{(a+b)^2 - 2b(h+p)} \right) \quad (5.12)$$

$$\lambda_6 = \frac{dL_6}{dh} = \frac{bR_6}{Q\sqrt{a^2 - (Q-b)^2}} \quad \left(Q = \sqrt{(a+b)^2 - 2b(h+p)} \right) \quad (5.13)$$

λ_5, λ_6 は、単位主軸送り量当たりの Wire5, Wire6 のワイヤ送り量である。また、両ワイヤの巻き付いている往復スライダクランク機構は、同じ仕様であり、同様に取り付けられているため、式(5.12), (5.13)の両方の式に含まれる a, b, h の値は等しい値をとる。よって、 λ_5, λ_6 は単純に比較することができる。

すなわち、Wire5, Wire6 のワイヤ送り量比は、 λ_5 と λ_6 の比ということになる。したがって、ワイヤ送り量比は、式(5.12), (5.13)より、常に次式に示す関係を維持する。

$$L_5 : L_6 = R_5 : R_6 \quad (5.14)$$

式(5.14)からわかるように、本実験装置では、左右の円盤の直径を変化させることによって、ワイヤ送り量比を任意に設定することが可能となる。

よって、図5.8に示すように、主軸が上下に移動すると、左右のワイヤで異なる送り量が繰り出され、圧縮コイルばねは屈曲姿勢を維持しながら伸縮し、かつ、ばねと電極全体は主軸とともに上下に移動する。これにより、ばね端に取り付けられた電極は、ある曲線軌跡上を往復運動する。

また、電極は主軸と機械的に結合しているため、また、図5.4のグラフに示したように、主軸の位置および移動と電極の位置および運動は一対一に対応する。よって、主軸による極間距離制御が、ばね端に取り付けられた電極に実現され、放電

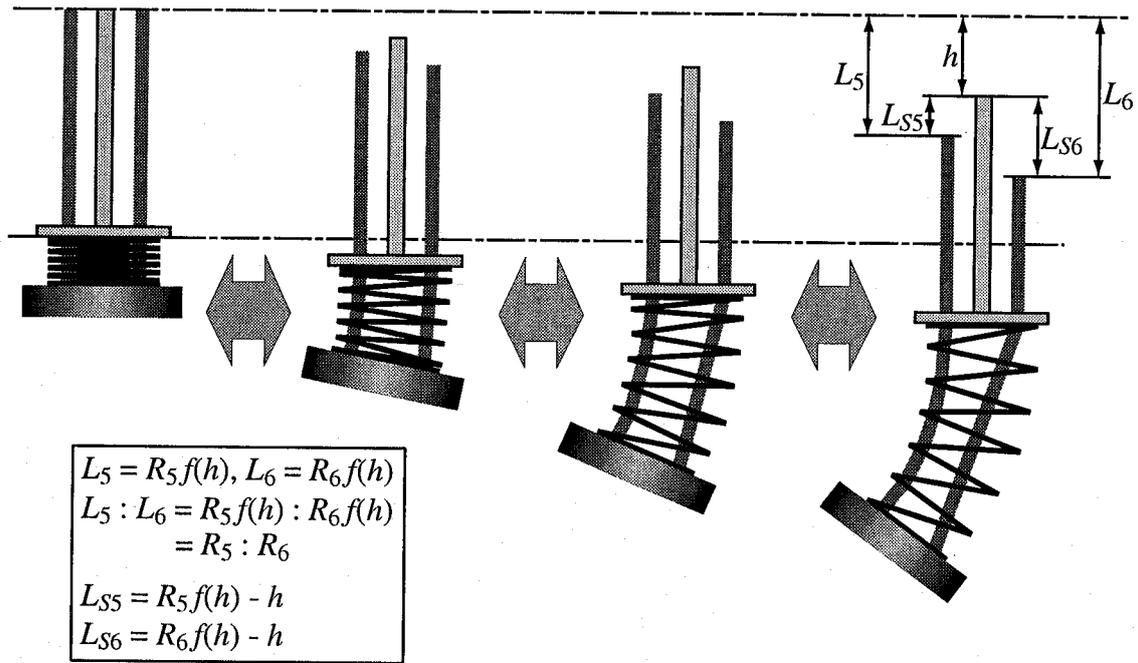


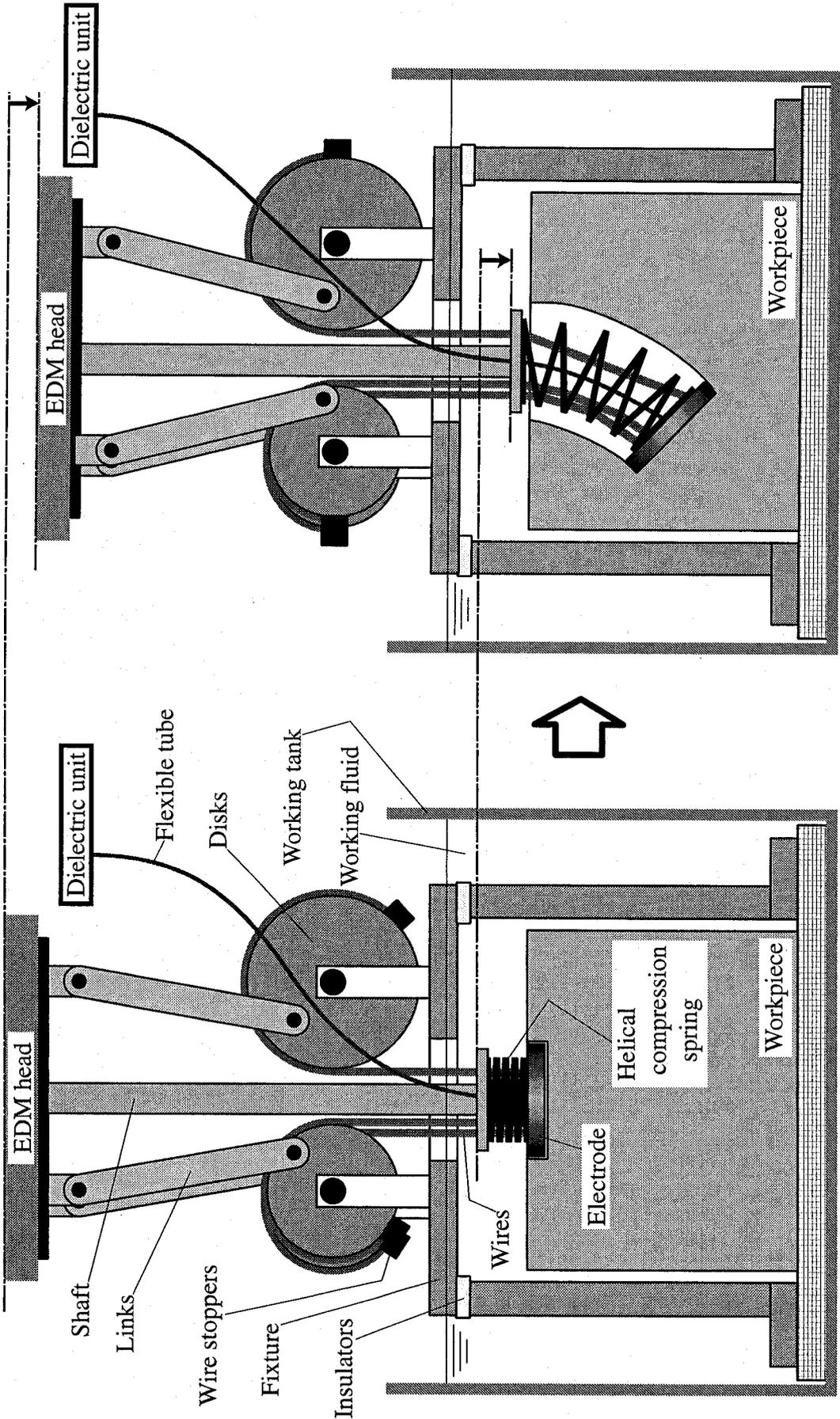
図5.8: 主軸送り量とばね姿勢挙動および電極運動の関係

加工が可能となる。

図 5.9(a), (b) に、加工開始点にある実験装置および加工中の実験装置の模式図をそれぞれ示す。導入前の実験装置と同様に、被加工物はジグの下に固定され、あらかじめ下穴が加工されている。図 5.9(a) に示す加工開始時では、電極は下穴内部に設置され、かつ、圧縮コイルばねは最大圧縮状態となっている。この状態から、通常の型彫放電加工と同様に、主軸を下方に送りながら放電加工を行うと、図 5.8 に示したように、ある曲線軌跡上を運動する電極により放電加工が行われる。したがって、図 5.9(b) に示すように、被加工物には、電極運動軌跡の包絡形状、すなわち、曲がり穴が加工される。

加えて、本実験装置では、式(5.12), (5.13) に示すように、左右の円盤半径を変えることで、左右のワイヤのワイヤ送り量を容易かつ連続的に設定することができる。このため、電極が運動する曲線軌跡、すなわち、加工可能な曲がり穴形状の自由度の向上が可能となる。

また、本実験装置では、図 5.1, 5.2 に示した構造と動作やこれまでの考察からわかるように、主軸送り量 h がワイヤ送り量 L より大きくなると、加工開始時の圧縮コイルばねは最大圧縮状態であるため、加工開始とともに、ワイヤが引きちぎられてしまう。このような事態が起こらないための条件は、無論、 $h \leq L$ である。



(a) The device in the initial stage of machining

(b) The device in machining

図5.9: 実験装置の加工過程

このことを、一般的に図5.3に示した往復スライダクランク機構で考察すると、満たされるべき条件は $h_0 < L_0$ となるが、図5.6に示したグラフからわかるように、 h_0 の全域で $dL_0/dh_0 > 1$ となっており、この条件は満たされている。 h の全域は h_0 の値域に内包されているので、 $h \leq L$ も満たされている。同時に、 $dL_0/dh_0 > 1$ ということは、本実験装置の圧縮コイルばねは、加工中に必ず伸長し続けることを示している。すなわち、軸の視点から観察したときのWire5, Wire6のワイヤ送り量 L_{S5} , L_{S6} は式(5.15)のように表されるが、これらの値は、負になることはなく、かつ、 h に対して単調に増加する。

$$L_{S5} = L_6 - h, \quad L_{S6} = L_6 - h \quad (5.15)$$

ただし、これは、往復スライダクランク機構のクランク長さ a 、リンク長さ b 、および、円盤半径 R が、図5.4, 5.6に示したグラフの導出時と同じ条件である場合である。

5.2.3 製作実機

図5.10に、実際に製作した実験装置を示す。図中の実験装置には、被加工物が固定されていない。また、圧縮コイルばねがある屈曲姿勢をとっている状態である。

図5.1に示した本実験装置の模式図のように、左側に2つの円盤、右側に1つの円盤が設置されており、これらの円盤は、様々な半径のものに取り替えられるように設計されている。また、図5.10に示すように、ワイヤは、いくつかのプーリを介して、ばね端と円盤に取り付けられているが、図5.1に示した模式図と、実質的には違いはない。

本実験装置の軸やばね周辺の構造、および、使用した圧縮コイルばね、ワイヤ、電極は、導入前の実験装置と不変である。圧縮コイルばねとワイヤの各仕様は、表3.1, 3.2に、電極に関しては、4.2.3小節に示してある。圧縮コイルばねと電極を、導入前の実験装置と同様のものを使用したのは、導入前と導入後の実験装置の動作および加工結果の比較を容易にするためである。また、型彫放電加工機として、(株)牧野フライス製作所製NC放電加工機EDNC 65を使用した。

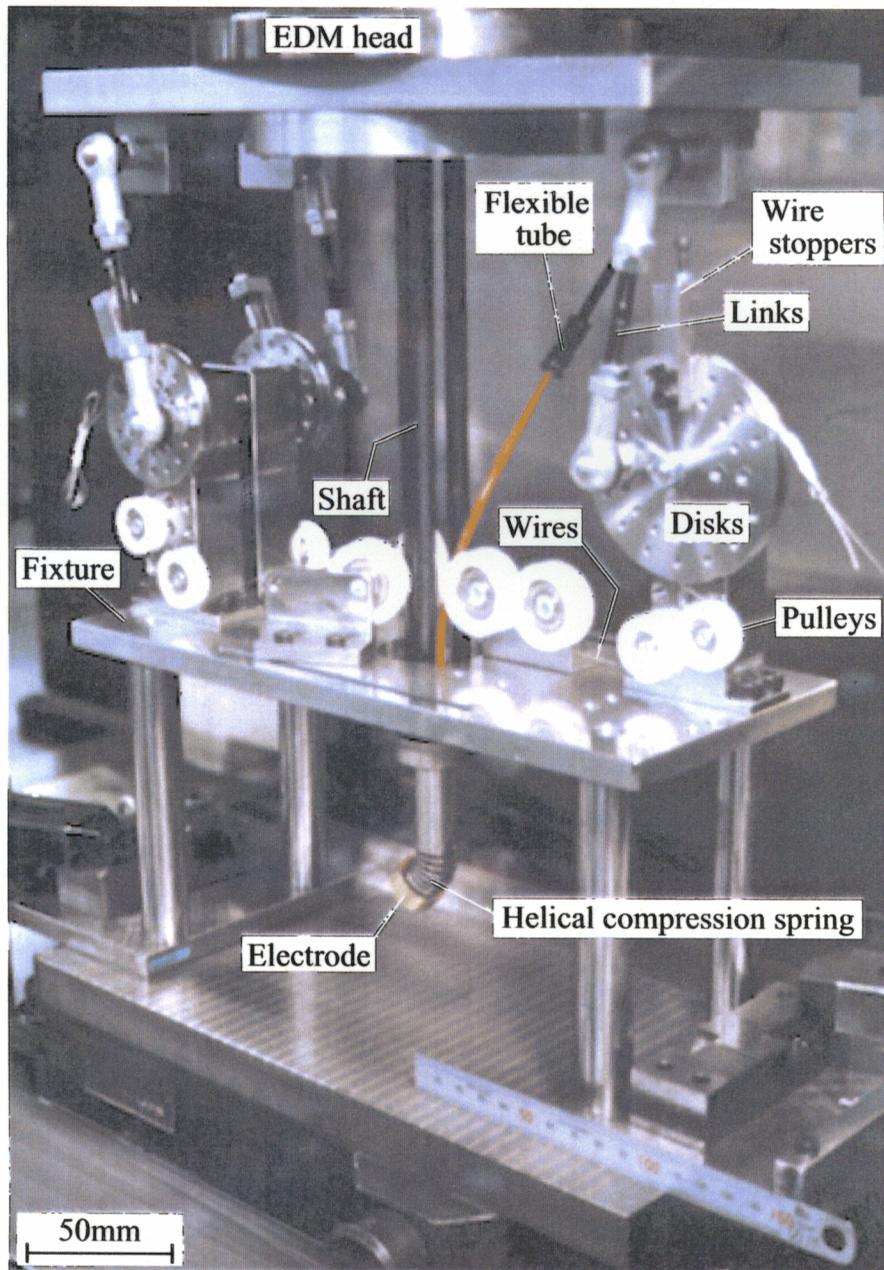


図5.10: 製作したスライダリンク連鎖導入曲がり穴放電加工用電極送り機構

5.3 基礎実験

5.3.1 動作実験

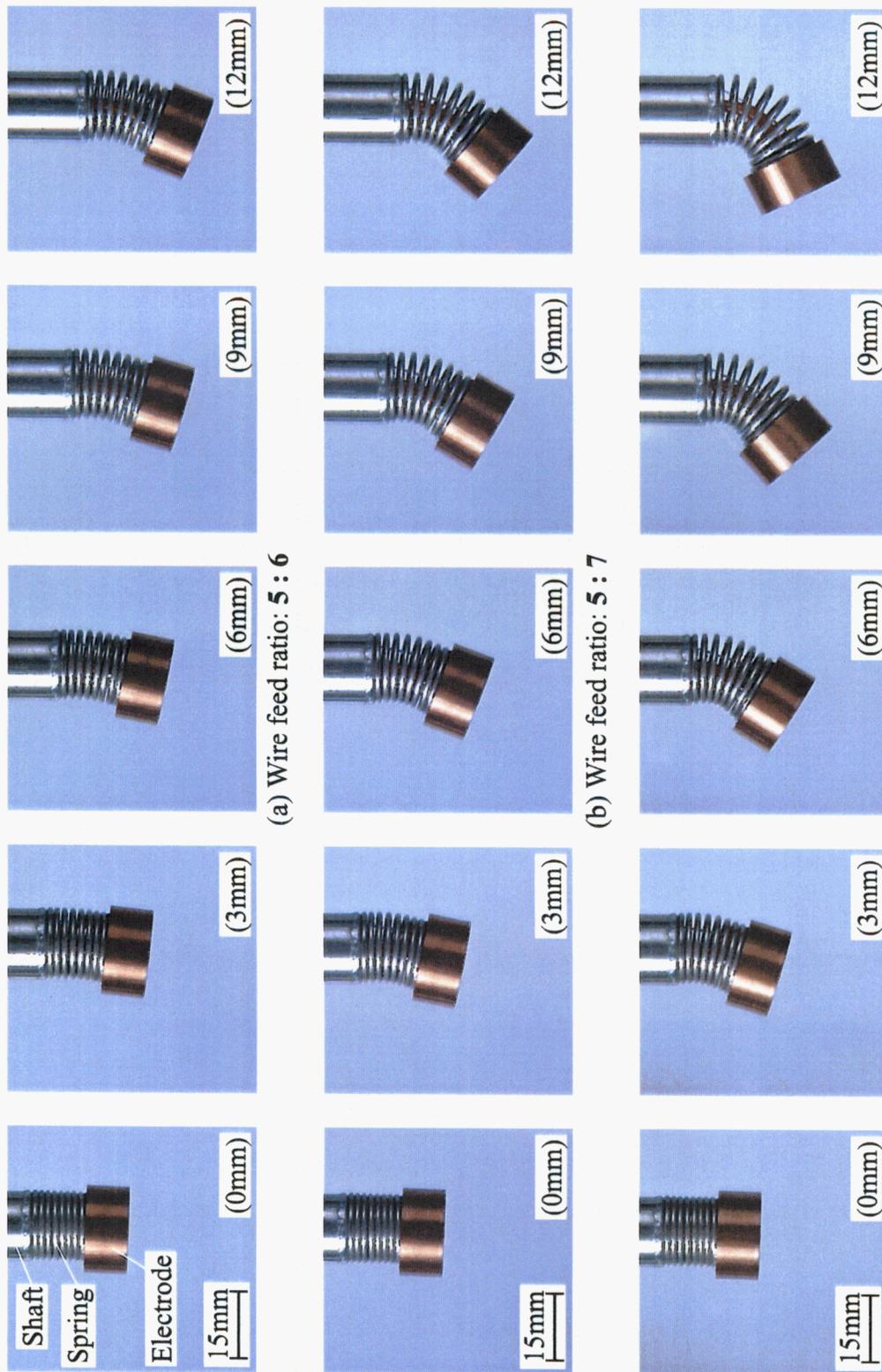
本実験装置による圧縮コイルばねの挙動と電極の運動を検証することを目的として、動作実験を行った。

動作実験の方法は、導入前の実験装置による動作実験と基本的には同じである。すなわち、まず、本実験装置を圧縮コイルばねが最大圧縮状態となる加工開始時の状態に設定し、次いで、主軸を下方に一定の距離ずつ送ったときの圧縮コイルばねの挙動と電極の運動を、定点に設置したカメラで撮影した。このような動作実験を、直径の異なる円盤を組み合わせながら、すなわち、各ワイヤのワイヤ送り量およびその比を変化させながら行った。本実験装置に用意した円盤は、円盤半径 R が5mm刻みで25mmから40mmまでのものを用意した。また、本実験装置に用いた往復スライダクランク機構のクランク長さ a 、リンク長さ b は、全動作実験でそれぞれ20mm、100mmであり、図5.4、5.5、5.6、5.7に示したグラフの導出時と同じ条件としている。

なお、本実験装置が加工開始時の状態のときのスライダ移動量 h_0 は11mmとした。すなわち、図5.4のグラフに示す p の値が $p = 11\text{mm}$ であるときを、実機での加工開始点と設定した。図5.5、5.7に示したグラフは、 $p = 10\text{mm}$ という条件で導出したものであり、その差は1mmであるので、実機の動作における主軸送り量とワイヤ送り量の関係、および、主軸送り量と送り量係数の関係も、それぞれ図5.5、5.7に示したグラフとさほど変わりはない。

このような方法で行った動作実験の中で、左に設置した2つの円盤の半径 R_5 を25mmと固定し、右に設置した1つの円盤の半径 R_6 を30mm、35mm、40mm、すなわち、ワイヤ送り量比を5:6、5:7、5:8とした場合における動作実験の結果、得られた圧縮コイルばねの姿勢と位置および電極の位置と姿勢の変化を図5.11に示す。この図に示すように、各ワイヤ送り量比の動作実験において、圧縮コイルばねは屈曲した姿勢を維持しながら伸長し、同時に、ばねおよび電極全体が主軸とともに下方に移動していることがわかる。

図5.12は、図5.11の結果から作成した各ワイヤ送り量比における電極の運動軌跡である。主軸送り量1mmごとの電極の位置と姿勢をプロットしている。この結果から、各条件ともに電極は滑らかな曲線上を運動していること、また、ワイヤ

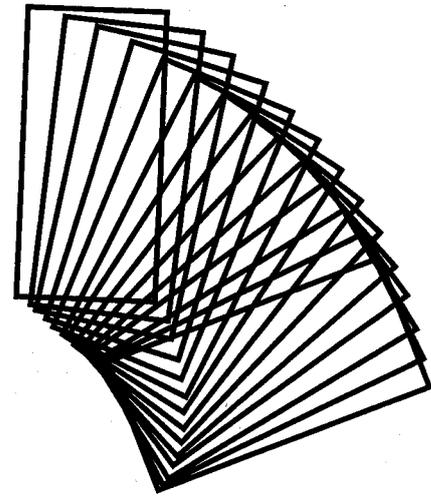


(a) Wire feed ratio: 5 : 6

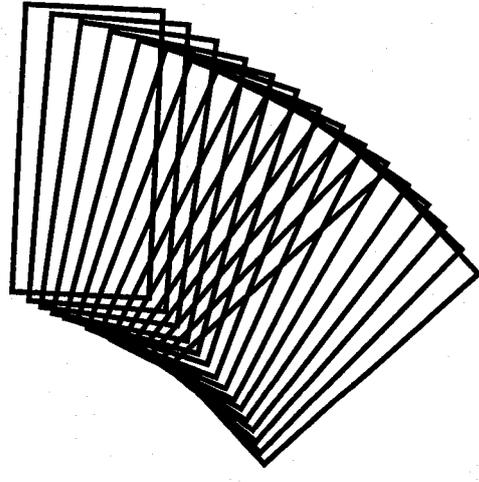
(b) Wire feed ratio: 5 : 7

(c) Wire feed ratio: 5 : 8

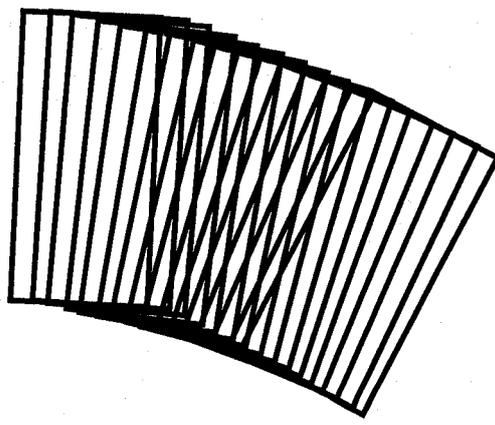
図5.11: 主軸を送ったときの実際の圧縮コイルばねの姿勢と位置および電極の位置と姿勢の変化



(c) Wire feed ratio: 5 : 8



(b) Wire feed ratio: 5 : 7



(a) Wire feed ratio: 5 : 6

図 5.12: 動作実験から得られた電極運動軌跡 (主軸送り量 : 1mm 毎)

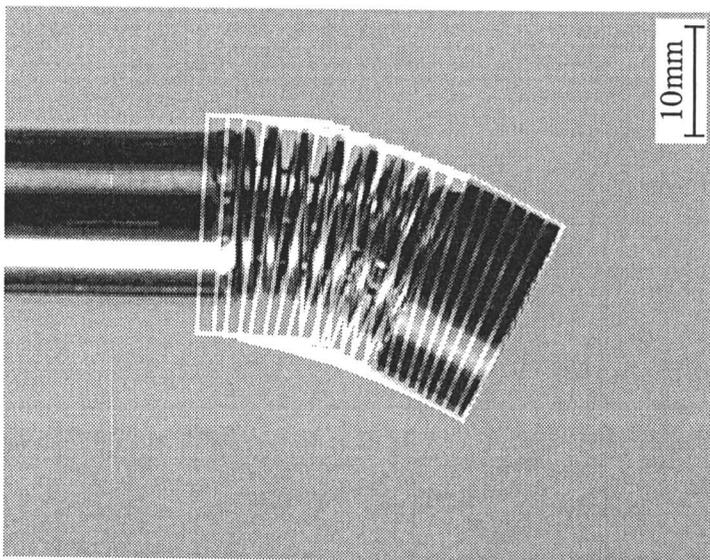
の送り量比を変えることによって、電極が運動する軌跡がそれぞれ異なる曲線軌跡となるが明らかとなった。なお、各条件における主軸送り量の最大値は、順に15mm, 14mm, 13mmである。

図5.13に、各ワイヤ送り量比の動作実験において、主軸送り量が最大値であるときの圧縮コイルばねの姿勢および位置と、それまでの電極運動軌跡を比較した図を示す。主軸送り量の最大値という限界が存在するのは、主軸をこれ以上に送ると、この図からわかるように、屈曲姿勢にある圧縮コイルばねが電極運動軌跡の包絡形状内から外れ、加工された曲がり穴外周部表面の被加工物と干渉してしまうためである。

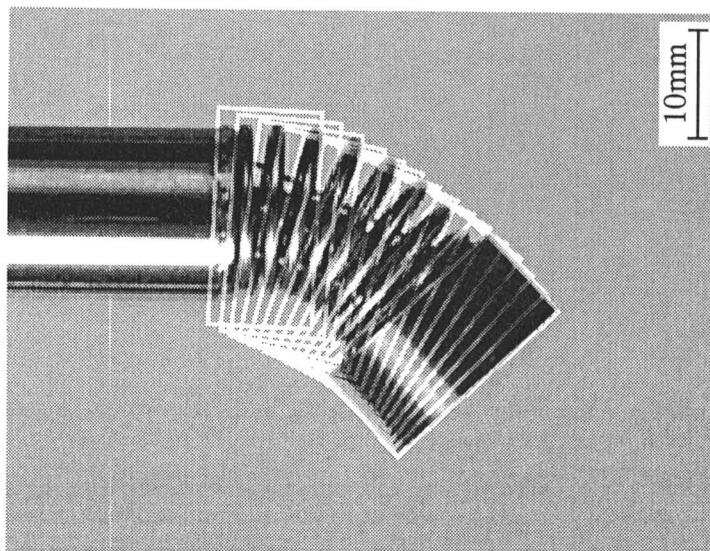
このような干渉の生じる主軸送り量の最大値以上に、さらに主軸を送っていくと、圧縮コイルばねは、最終的には、導入前の実験装置による動作実験のように、無負荷時の姿勢に戻ろうとする、つまり、電極がそれまで運動してきた軌跡から急激に逸脱する現象が生じる。すなわち、主軸送り量の最大値は、ばねと被加工物の干渉と運動軌跡からの逸脱のどちらかが生じたときの主軸送り量であるといえる。どちらが先に生じるかは、主軸送り量とワイヤ送り量の関係や圧縮コイルばねの仕様および電極の形状に依存するであろう。

図5.12に示した電極運動軌跡が、本実験装置により加工できる曲がり穴の形状を示している。導入前の実験装置では、図4.9に示した電極運動軌跡とは異なる多様な軌跡上を電極に運動させること、すなわち、曲がり穴形状の多様性を高めることは困難であったが、本実験装置では、図5.12に示すように、多様な電極運動軌跡を得ることができる。さらに、円盤半径 R の種類を多くし、様々な円盤の組み合わせで動作実験を行えば、ワイヤ送り量比を連続的に変化させることができるので、より多様な電極運動軌跡が得られるであろう。

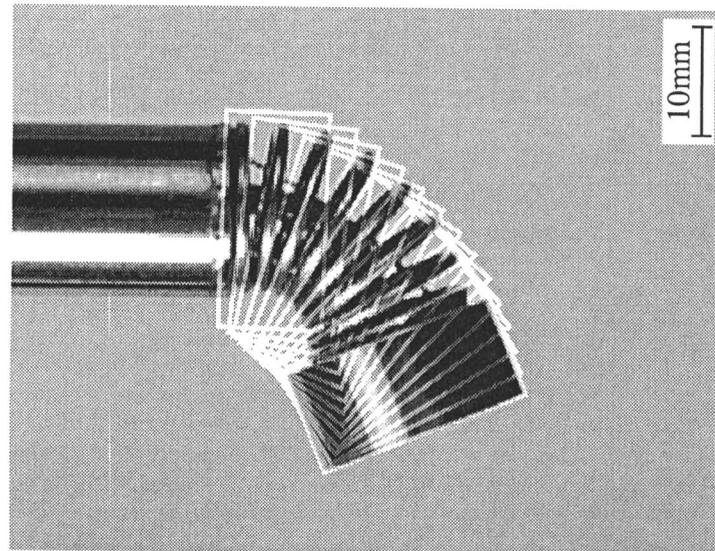
ただし、図4.9に示した導入前の実験装置による電極運動軌跡と比較して、図5.12に示す本実験装置による電極運動軌跡の距離は短くなっている。これは、導入前の実験装置における主軸送り量 h とワイヤ送り量 L の関係が、式(4.1)に示す関係であるので、図5.5に示したグラフでは、 $L = 3h$, $L = 4h$ のグラフで表される関係であるのに対し、本実験装置における両者の関係が、同グラフで、 $R = 25, 30, 35, 40$ のグラフで表される関係であるため、導入前の実験装置の方が本実験装置より、主軸送り量に対するワイヤ送り量が大きいことが原因である。同様のことを図5.7に示したグラフを用いて表現すると、導入前の実験装置の送り量係数 λ は、



(a) Wire feed ratio: 5 : 6



(b) Wire feed ratio: 5 : 7



(c) Wire feed ratio: 5 : 8

図 5.13: 圧縮コイルばねの姿勢および位置とそれまでの電極運動軌跡

主軸送り量 h 全域において、 $\lambda=3$, $\lambda=4$ で表されるのに対し、本実験装置の λ は、主軸送り量 h に対し、 $R=25, 30, 35, 40$ のグラフで表される関係にあり、導入前の実験装置の方が本実験装置より、単位主軸送り量当たりのワイヤ送り量が大きいということになる。

上記の議論を視点を変えて考えると、式(5.7), (5.9)からわかるように、本実験装置の円盤半径 R を大きくし、本実験装置における h と L の関係、または、 h と λ の関係を図5.5, 図5.7に示したグラフ上で、導入前の実験装置が示すグラフに近似させることができれば、本実験装置を用いて、導入前の実験装置による電極運動軌跡を再現することも可能であろう。すなわち、本実験装置は、導入前の実験装置の機能をほぼ内包しているといえる。

5.3.2 加工実験

動作実験より得られた電極運動軌跡と同様な形状をもつ曲がり穴の加工可能性を検証するため、加工実験を行った。

加工実験の方法は、導入前の実験装置による加工実験とほぼ同様である。すなわち、被加工物に下穴をエンドミルで加工し、その穴の底面を加工開始点として、曲がり穴を放電加工する。このような被加工物を3個用意し、動作実験で用いた3つの機構条件下でそれぞれ加工実験を行った。

図5.14に、本実験装置による加工実験に用いた被加工物の形状寸法および構造を示す。被加工物に加工された下穴の寸法は、直径22mm、深さ30mmである。この下穴も、これまでの実験装置による加工実験と同じ理由から、図5.14に示す面で被加工物をあらかじめ切断し、組み立てなおした後、加工されている。また、被加工物の材質はアルミニウム合金(A5052)である。

ここで、被加工物の材質をアルミニウム合金にしたのは、次のような理由のためである。すなわち、これまでの実験装置による曲がり穴の加工法、つまり、型彫放電加工機の主軸の移動を、複数あるワイヤの繰り出し量の差に変換し、さらにそれを圧縮コイルばね端に取り付けられた電極の曲線運動へと変換するによって、曲がり穴を加工するという本研究で考案、開発した加工法が、被加工物を炭素鋼としても、電極運動軌跡の包絡形状と同様の曲がり穴が加工できたという実績から、本実験装置においても炭素鋼に対する曲がり穴の加工は可能であると推定できる。しかし、導入前の実験装置による加工実験からもわかるように、被加

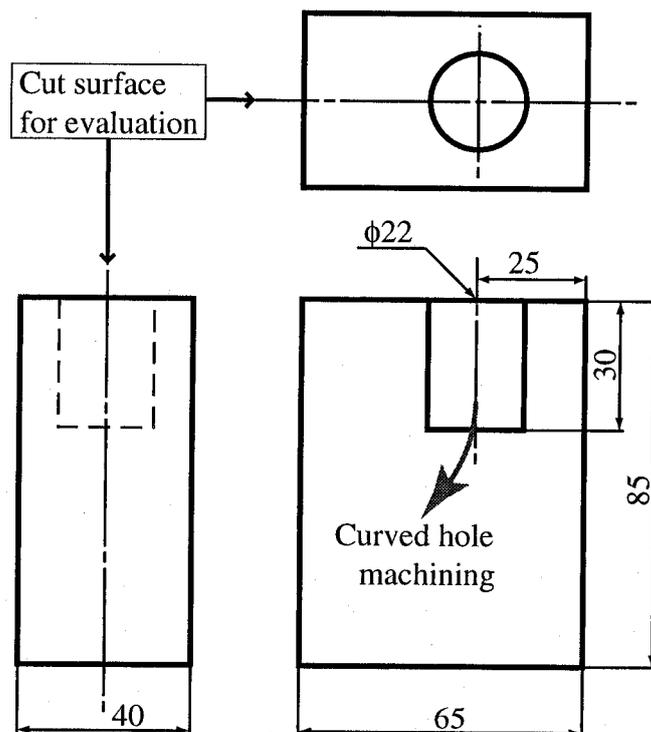


図5.14: 加工実験に使用した被加工物の形状と構造

工物を炭素鋼とした場合の本加工法による加工実験では、加工完了までに長時間を要する。また、この加工時間の短縮化つまり放電加工速度の高速化は、機構条件と放電加工条件の両面からの最適化が必要となり、これらは、本実験装置による加工実験の目的である多様な形状をもった曲がり穴の加工可能性の検討とは、性格が違うものと考えた。したがって、本来の加工実験の目的達成、および、加工実験にかかる時間の短縮と負荷の軽減のために、本実験装置による加工実験に用いる被加工物を、一般に放電加工速度が炭素鋼より速いアルミニウム合金とした。

加えて、被加工物の下穴の深さを、これまでの実験装置による加工実験に用いた被加工物のものより深くした理由は、切削加工など他の除去加工法では、加工不可能な形状であることを強調するために、このように下穴の深さを深くした。この下穴は、ドリルではなく、エンドミルで加工されているが、これは、加工深さをより正確にするための処置である。

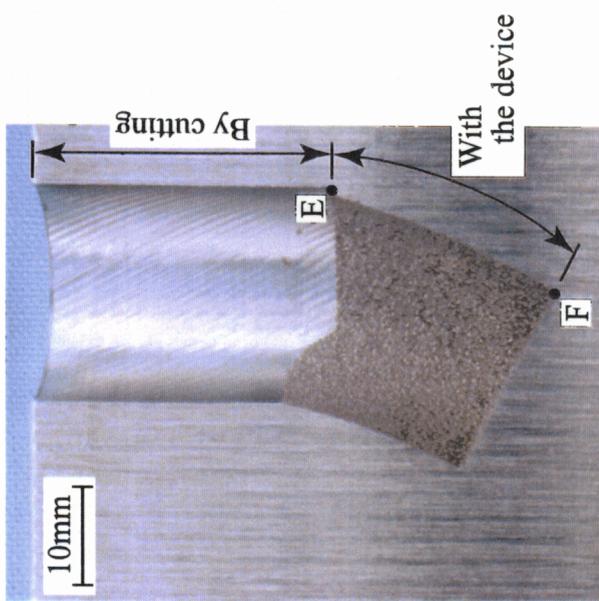
各加工実験に用いた放電加工条件は、3回の加工実験とも同じ条件とした。その放電加工条件を表5.1に示す。この条件は、型彫放電加工機メーカーの推奨している、放電加工機に用意された放電加工条件から適切なものを選択した。ただし、主軸のジャンプおよび揺動は、導入前の実験装置による加工実験と同様な理由から、

表5.1: 放電加工条件

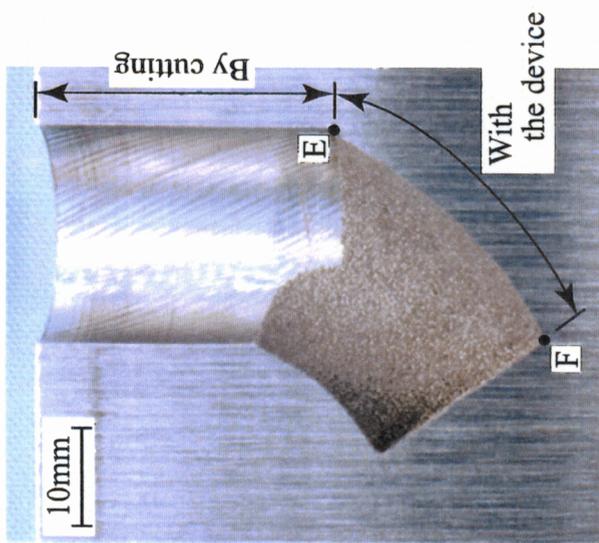
Electrode	Oxygen-free copper
Workpiece	Aluminum alloy (A5052)
Working fluid	Oil
Flow rate	1.5 cm ³ /s
Polarity	Reverse
Discharge current	20 A
Pulse duration	315 μs
Duty factor	33 %
Jump	Not applicable
Orbital motion	Not applicable

適用しなかった。また、各機構条件下の加工実験における主軸送り量の最大値は、それぞれの動作実験から得られたとおり、順に15mm, 14mm, 13mmである。

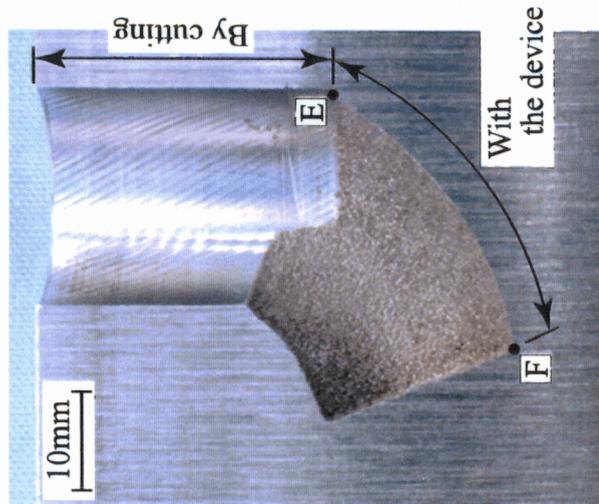
図5.15に、各機構条件下において加工された曲がり穴の断面図を示す。得られた曲がり穴の断面形状は、どの機構条件下においても、凹凸がなく、滑らかな曲線形状をなしており、また、図5.12に示した電極軌跡形状とほぼ同様の形状になっているのがわかる。なお、全加工実験において、加工中は安定した放電加工が得られた。各機構条件下で加工された曲がり穴外周部の距離、すなわち、図5.15(a), (b), (c)にそれぞれ示した点Eから点Fまでの曲がり穴外周部の距離は、順に25mm, 30mm, 33mmであった。また、各加工実験における放電加工時間は、順に77分, 69分, 68分であった。放電加工による除去体積は、それぞれ8cm³, 9cm³, 7cm³であったので、放電加工速度は、それぞれ110mm³/min, 130mm³/min, 100mm³/minである。



(a) Wire feed ratio: **5 : 6**
(EDM head feed : 15 mm)



(b) Wire feed ratio: **5 : 7**
(EDM head feed : 14 mm)



(c) Wire feed ratio: **5 : 8**
(EDM head feed : 13 mm)

図5.15: 加工された被加工物の断面図

5.4 U字形曲がり穴加工実験

図5.16に、同仕様ではあるものの、5.3節の基礎実験で使用した圧縮コイルばねとは別個体の圧縮コイルばねを用い、図5.11(c)に示した電極運動軌跡を得たときと同じ機構条件下で動作実験を行った際のばねの姿勢と位置および電極の位置と姿勢の変化を示す。この動作実験では、主軸を2mmずつ送りながら、ばねおよび電極の動作を撮影した。図5.17は、図5.16の結果から作成した電極の運動軌跡である。

図5.12(c)と図5.17の電極運動軌跡の比較を図5.18に示す。この図からわかるように、両者の電極運動軌跡は、その測定方法が確立していないため、定量的比較はできないものの、微妙に異なっている。すなわち、図5.12(c)より図5.17に示す電極運動軌跡の方が、加工開始時にある電極の底面に対して、運動後の電極の底面がなす角度が大きくなっている。その傾向は、主軸送り量の増大、すなわち、電極の運動距離の増大につれて、顕著になる。

本実験装置の機構条件および圧縮コイルばねの仕様が全く同一であるにもかかわらず、このような電極運動軌跡に差が生じた。この主な原因は、ばねの個体差によるものと考えられる。他に考えられうる原因として、組立誤差、ばねの組立向きの相違、加工開始時に圧縮コイルばねを最大圧縮状態にする際に生じる設定誤差などがある。

ただ、図5.17に示す別個体の圧縮コイルばねによる電極運動軌跡は、加工開始時の電極の底面と加工終了時の底面が、より90°に近い角度をなす。これを応用して、平行に加工された2本の直穴の底を、図5.19に示すように、曲がり穴で連結させることが可能であると考えた。加工後の穴断面のなす形状が、アルファベットのUに類似することから、この加工実験で目標とする穴形状をU字形曲がり穴と呼ぶこととする。

この電極運動軌跡を得た動作実験の結果から、主軸送り量が12mmのときの圧縮コイルばねの姿勢および位置とそれまでの電極運動軌跡の比較を図5.20(a)に、主軸送り量が14mmのときの同比較を図5.20(b)にそれぞれ示す。図5.20(b)に示すように、主軸送り量が14mmのときに、非常にわずかながら、圧縮コイルばねと被加工物の干渉が認められた。この動作実験では主軸送り量を2mmずつ移動させたときの電極の位置と姿勢の記録しかなかったため、図5.20(a)に示すように、主

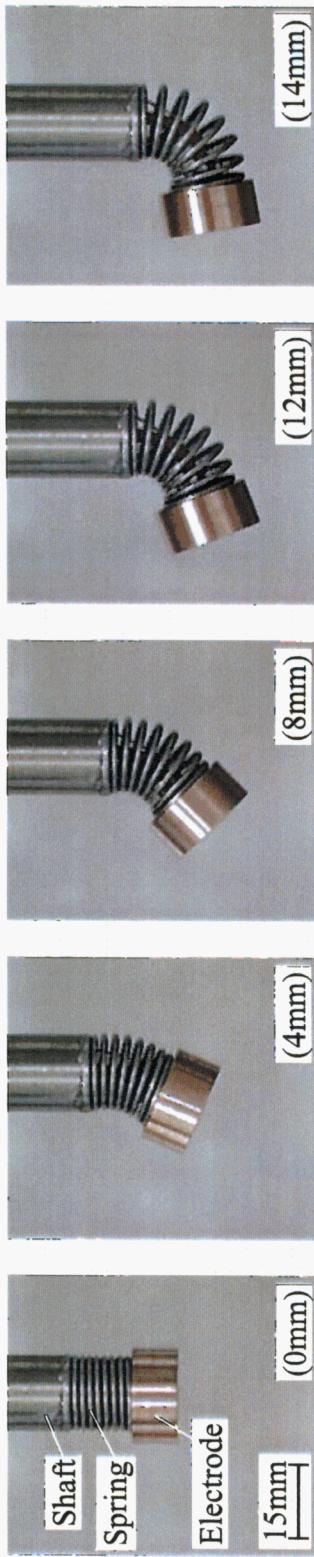


図5.16: 同仕様の別個体の圧縮コイルばねを用いた動作実験における主軸の送りに対する実際の圧縮コイルばねの姿勢と位置および電極の位置と姿勢の変化 (ワイヤ送り量比: 5:8)

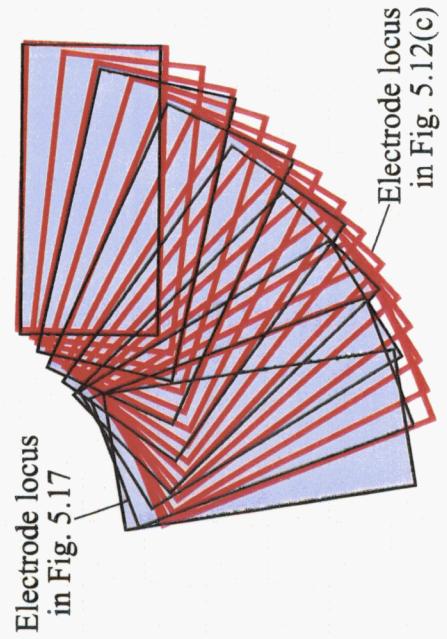
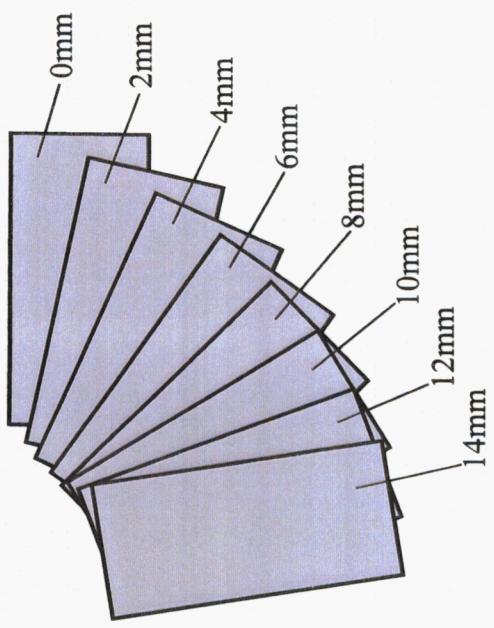


図5.17: 同仕様の別個体の圧縮コイルばねを用いた動作実験から得られた電極運動軌跡
 図5.18: 図5.12(c)と図5.17の電極運動軌跡の比較

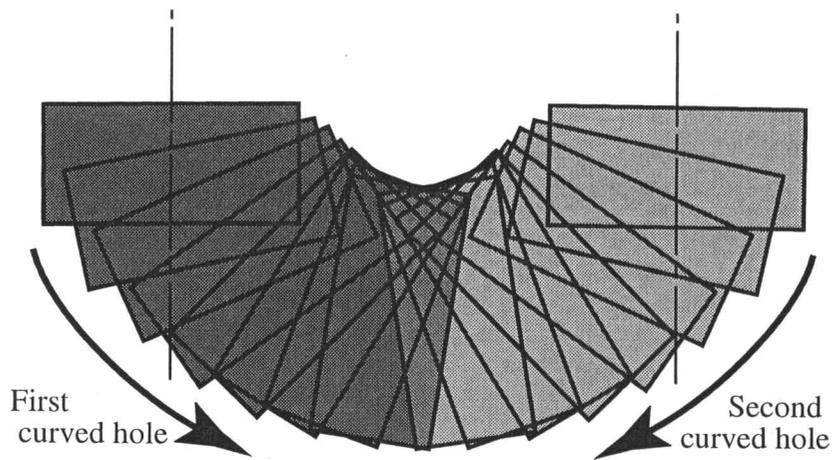
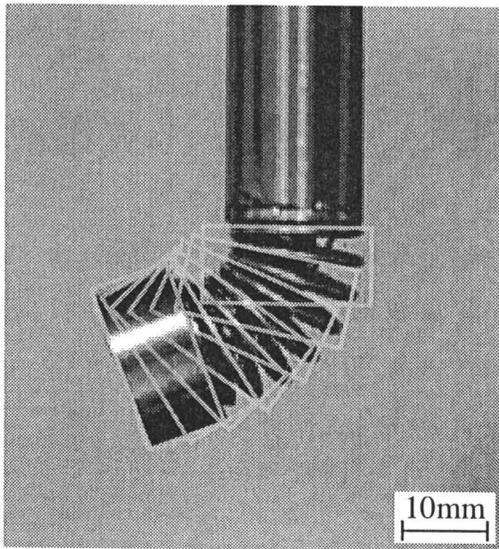
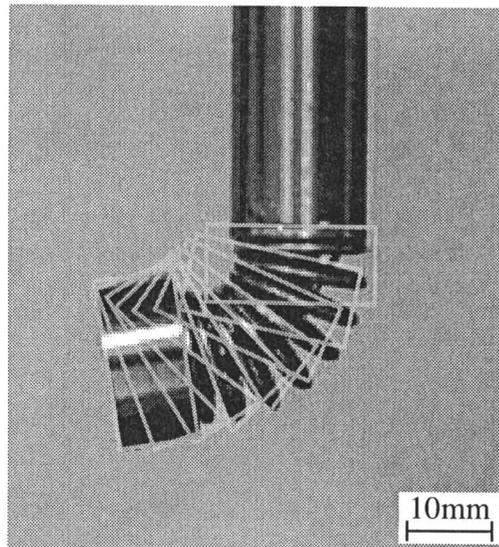


図 5.19: 予想される加工後のU字形曲がり穴の断面図



(a) Wire feed ratio: 5 : 8
(EDM head feed : 12 mm)



(b) Wire feed ratio: 5 : 8
(EDM head feed : 14 mm)

図 5.20: 同仕様の別個体の圧縮コイルばねを用いた動作実験における
圧縮コイルばねの姿勢および位置とそれまでの電極運動軌跡

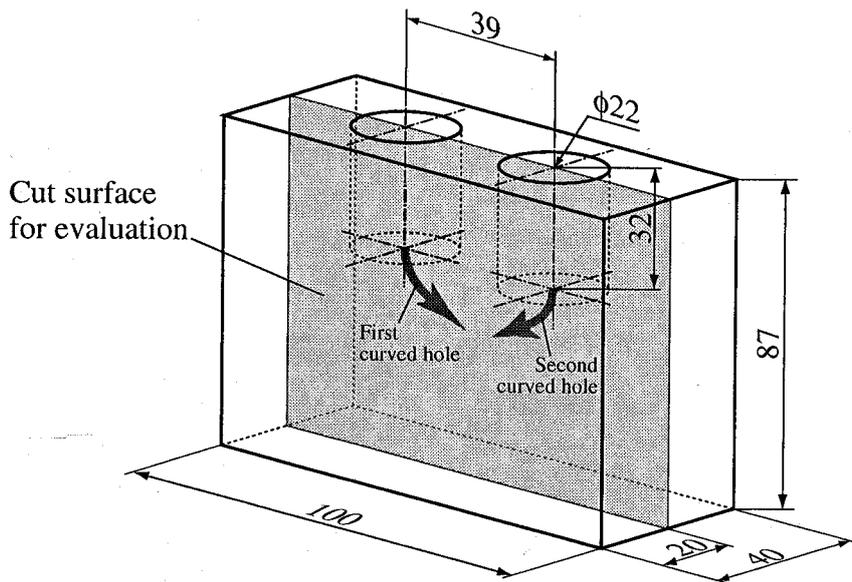


図5.21: U字形曲がり穴加工実験に使用した被加工物の形状寸法と構造

軸送り量が12mm になるまで、圧縮コイルばねは被加工物に干渉しないという証明はされたものの、加工開始時の電極底面に対する、主軸送り量が12mm のときの電極底面のなす角度は、 90° よりかなり小さくなってしまふ。したがって、加工されるU字形曲がり穴を構成する2本の直穴の間隔が短くなってしまふ。

そこで、圧縮コイルばねが被加工物と干渉することなく、可能なかぎり、加工終了時の電極底面のなす角が 90° に近づくように、1本の曲がり穴加工における主軸送り量の最大値を、図5.17、5.20 から推定して、13.5mm と設定した。

図5.21 に、U字形曲がり穴の加工実験に使用した被加工物の寸法形状と構造を示す。被加工物は、縦87mm、横100mm、厚さ40mm の直方体形状をしたアルミニウム合金 (A5052) であり、直径22mm、深さ32mm の2本の直穴が、間隔39mm で平行に配置されるように、あらかじめ加工されている。これらの直穴も、基礎実験と同様、図5.21 に示す面で被加工物をあらかじめ切断、組み立て後、エンドミルを用いて加工されている。

この2本の直穴の底を本実験装置による加工開始点とし、両方から図5.19 に示すように、曲がり穴を1本ずつ加工、連結することによって、U字形曲がり穴の創成を目指す。

加工方法は、2本の曲がり穴加工とも、同一の電極運動軌跡を用いて加工した。すなわち、圧縮コイルばねの屈曲姿勢の方向を、図5.19、5.21 に示すのように、 180°

表5.2: U字形曲がり穴加工における放電加工条件

Electrode	Oxygen-free copper
Workpiece	Aluminum alloy (A5052)
Working fluid	Oil
Flow rate	3 cm ³ /s
Polarity	Reverse
Discharge current	20 A
Pulse duration	315 μs
Duty factor	32 %
Jump	Not applicable
Orbital motion	Not applicable

変化させたのではなく、被加工物を、ばねおよび電極の運動に合わせて、180°回転させている。つまり、1本目の曲がり穴加工後、被加工物を取り外し、1本目の曲がり穴が加工された直穴と同じ位置に、2本目の曲がり穴が加工される直穴が位置決めされるように、被加工物を取り付け、2本目の曲がり穴を加工した。これらの加工の際は、図4.14に示した軸端形状を採用している。また、表5.2に、U字形曲がり穴加工における放電加工条件を示す。2本の曲がり穴とも、この放電加工条件で加工した。放電加工条件の選択理由は基礎実験と同様である。また、主軸送り量の最大値を13.5mmとしたこと、別個体の圧縮コイルばねを使用したことを除けば、他の条件は、基礎実験の図5.15(c)に示した曲がり穴を加工した際の条件と同様である。

図5.22に、加工されたU字形曲がり穴の断面図を示す。この結果から、加工された曲がり穴は凹凸がない滑らかな曲線形状で構成され、図5.19に示した形状とほぼ同様の曲がり穴が加工できていることがわかる。また、1本の曲がり穴加工における主軸送り量の最大値を、推定により13.5mmと設定したが、加工された曲がり穴表面には、圧縮コイルばねが干渉した痕跡は皆無であった。

2本の曲がり穴の連結部分では、ほとんど全周にわたって、段差が生じていなかった。2本の曲がり穴の加工開始点の位置決めが、非常に良好であったことがわかる。ただし、連結部分の最下点において、非常にわずかではあるが、未加工部分が残留している。これは、2本目の曲がり穴加工において、主軸送り量

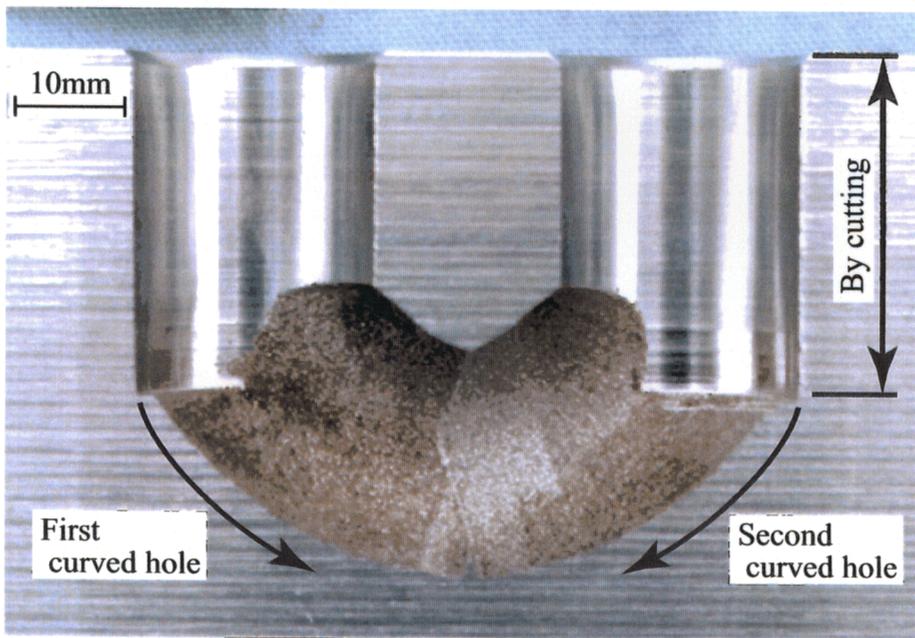


図5.22: 加工されたU字形曲がり穴の断面図

が13mm程度有的时候に、電極に不慮の不具合が発生し、加工を停止せざるを得なかったためである。この不具合は、電極の組立作業上の軽微な問題で、他の加工実験では発生していない。この事態が発生しなければ、この未加工部分は残留せず、連結部分全域にわたって、段差は生じなかったであろう。また、放電加工時間は、1本目の曲がり穴が88分、合計で176分であった。

5.5 3次元曲がり穴加工実験

図5.22に示すように、U字形曲がり穴の加工に成功したので、さらに、図5.17に示した電極運動軌跡を他形状の創成へ応用することを考えた。すなわち、ねじれの位置になす角90°で加工された2本の直穴の底を曲がり穴で連結させることを考えた。加工後の穴断面のなす形状が、L字形やU字形の曲がり穴とは異なり、2次元形状ではなく、3次元形状になることから、この加工実験で目標とする穴形状を3次元曲がり穴と呼ぶこととする。

この加工実験では、主軸送り量の最大値を14mmとした。その理由は次に示すとおりである。図5.20(b)に示した動作実験の結果から、主軸送り量が14mmのときに、わずかではあるが、ばねと曲がり穴加工面の干渉が認められた。その一方、U字形曲がり穴の加工実験では、主軸送り量が13.5mmになるまで、干渉が生じな

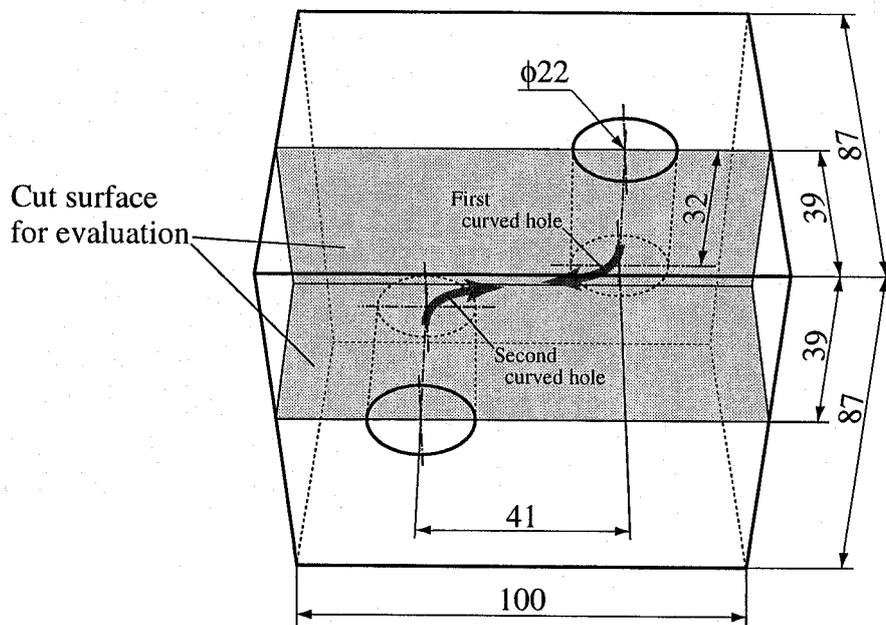


図5.23: 3次元曲がり穴加工実験に使用した被加工物の形状寸法と構造

表5.3: 3次元曲がり穴加工における放電加工条件

Electrode	Oxygen-free copper
Workpiece	Aluminum alloy (A5052)
Working fluid	Oil
Flow rate	2.2 cm ³ /s
Polarity	Reverse
Discharge current	20 A
Pulse duration	315 μs
Duty factor	33 %
Jump	Not applicable
Orbital motion	Not applicable

いことがわかっている。ここで、主軸送り量が14mmのときに干渉が生じるという判断の正当性が揺らいできた。そこで、動作実験から予想されたように、主軸送り量が14mmのときに、ばねと被加工物の干渉が生じるのか、すなわち、これまでの動作実験で採用してきた干渉有無の判断方法の妥当性を検証するために、この加工実験では、敢えて主軸送り量の最大値を14mmとした。

図5.23に、3次元曲がり穴の加工実験に使用した被加工物の寸法形状と構造を示す。被加工物は、縦87mm、横100mm、厚さ87mmの直方体形状をしたアルミニウム合金(A5052)であり、直径22mm、深さ32mmの2本の直穴が、両者がなす角90°、間隔41mmでねじれの位置に配置されるように、あらかじめ加工されている。これらの直穴も、基礎実験と同様、図5.23に示す面で被加工物をあらかじめ切断、組み立て後、エンドミルを用いて加工されている。

この2本の直穴の底を本実験装置による加工開始点とし、両方から図5.17に示した電極運動軌跡の包絡形状となる曲がり穴を1本ずつ加工、連結することによって、3次元曲がり穴の創成を目指す。

加工方法は、L字形やU字形曲がり穴加工実験と同様の方法である。すなわち、圧縮コイルばねの設置位置や屈曲姿勢の方向を変化させたのではなく、被加工物の姿勢と位置を変化させている。つまり、1本目の曲がり穴加工後、被加工物を取り外し、1本目の曲がり穴が加工された直穴と同じ位置と姿勢に、2本目の曲がり穴が加工される直穴の位置と姿勢がなるように、被加工物を取り付け、2本

目の曲がり穴を加工した。また、表5.3に、3次元曲がり穴加工における放電加工条件を示す。2本の曲がり穴とも、この放電加工条件で加工した。主軸送り量の最大値を14mmとしたことを除けば、放電加工条件の選択理由、および、機構条件は、U字形曲がり穴の加工実験と同様である。

図5.24に、加工された3次元曲がり穴の断面図を示す。この図に示す加工結果から、本実験装置によって3次元曲がり穴を加工できることが証明された。2本の曲がり穴の連結部分には、段差が残留したが、これは、電極形状の改良により克服できるものと考えている。また、3次元曲がり穴を構成する2本の曲がり穴の加工表面それぞれに、圧縮コイルばねが干渉し、放電加工が生じた小さな痕跡が認められる。これにより、曲がり穴加工における動作実験で用いてきた干渉有無の判断方法の妥当性も証明された。すなわち、電極運動軌跡および圧縮コイルばね姿勢の画像による測定の正確性が、あまり低いことの証明でもある。また、3次元曲がり穴加工に要した放電加工時間は、1本目の曲がり穴が73分、合計で140分であった。

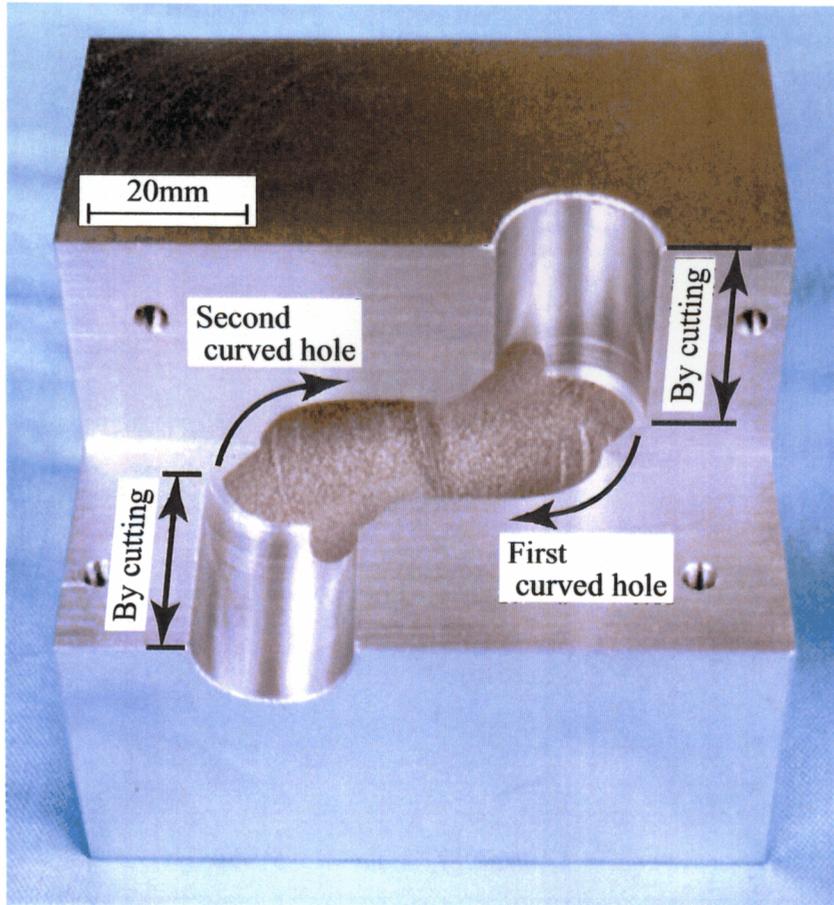


図5.24: 加工された3次元曲がり穴の断面図

5.6 考 察

5.6.1 基礎実験および実験装置に関して

5.3節で述べたように、本章の目的であった曲がり穴の多様化が実現できた。本実験装置の場合、ワイヤ送り量比すなわち円盤の半径比を様々に設定すれば、また、圧縮コイルばねの仕様を変化させれば、多種多様な形状をもつ曲がり穴が加工できるであろう。しかし、加工された各曲がり穴の曲率は一定ではない。これは、円盤の形状が円であるため、曲がり穴加工中にはワイヤ送り量比が一定になるためである。

スライダクランク連鎖の導入により、加工できる曲がり穴形状の多様性は飛躍的に高くなったものの、実用化のためには、さらなる形状の多様化が必要であろう。つまり、設計者が意図した曲率や長さをもつ曲がり穴の加工を実現しなければならない。そのためには、本実験装置のさらなる改良が必要となる。具体的には、1本の曲がり穴加工中にワイヤ送り量とその比を任意に変化させることができればよい。すなわち、ワイヤ送り量を任意に制御する機構が必要となる。

5.6.2 圧縮コイルばねの個体差に関して

考案した実験装置のもつ機能の本質は、主軸の直線運動を電極の曲線運動に変換することである。このことを、本実験装置では、すべて機構学的な原理を用いて達成しているため、その動作の繰り返し精度は、現段階では定性的にしか評価できないものの、原理的には優れているはずである。すなわち、一度、組み立てた本実験装置は、動作による消耗や疲労によって実験装置自身が変わるほど使用しないはずなので、基本的に全く同一の動作をするはずである。これが、本実験装置の特徴でもある。

しかし、同機構条件下の同仕様の圧縮コイルばねを使用しているにもかかわらず、図5.18に示したように、圧縮コイルばねの個体差により、電極運動軌跡は相違を見せた。この原因は、使用した圧縮コイルばねは安価な市販品であったこと、すなわち、その個体差は比較的大きかったものと推測される。また、組立や初期設定時にも、ばねの組立向きの相違や密着高さ設定時の誤差が、電極運動軌跡の誤差を生じうる原因になったと考えている。

対策として、使用する圧縮コイルばねに生じる個体差の軽減、組立誤差の抑制、

組立方法や初期設定の統一などを行う必要がある。

5.6.3 U字形および3次元曲がり穴加工実験に関して

図5.22, 5.24 に示したように, 本実験装置を用いて, U字形曲がり穴および3次元曲がり穴の加工に成功した。これらの曲がり穴形状は, 切削などの他の除去加工法や従来の型彫放電加工では, 実現することのできない穴形状である。

特に, U字形曲がり穴加工実験では, 曲がり穴連結部分の段差もほぼないU字形曲がり穴を加工することができた。これは, 図5.19 に示したように, 加工後のU字形曲がり穴形状がほぼ正確に把握できていたこと, そして, 本実験装置およびそれによる動作実験と加工実験における経験とノウハウの集積あるいは作業者の技能の向上によるところが大きい。技能などに依存はしているものの, 曲がり穴の連結部分に段差をほぼ無くすことができたという事実は, 曲がり穴の加工開始点における電極の位置決め精度の向上, 電極運動軌跡すなわち加工される1本の曲がり穴形状の詳細な情報の把握, 電極形状の最適化などの条件を整えれば, 本実験装置を用いて曲がり穴を精度よく連結させることは, 不可能ではないことを表している。

また, 3次元曲がり穴加工実験では, 従来加工法では実現不可能な穴形状が加工できているものの, 連結部分に段差を生じている。これは, U字形曲がり穴加工実験の図5.19 に相当するような情報を得ることが困難で, これを技能などで補うことができなかつた結果であると考えている。

このようなことから, 電極運動軌跡の定量的な情報の取得は非常に重要になる。

5.7 結 言

本章では、前章で説明した改良型曲がり穴加工用電極送り機構によって加工できる曲がり穴の曲率が限定されていたという弱点を克服するため、その多様化を図るべく開発したスライダクランク連鎖導入曲がり穴加工用電極送り機構について説明した。導入前の実験装置と本実験装置の違いは、ワイヤにプーリを經由させるのではなく、主軸と加工槽の間に構築された3つのスライダクランク連鎖の構成部品である3つの円盤に巻き付けるようにしたことである。本実験装置による動作実験と加工実験およびその応用実験の結果、以下のような結論を得た。

- (1) 導入前の実験装置では、主軸送り量とワイヤ送り量の関係がワイヤのプーリ経由数に依存していたため、両者の関係を離散的にしか設定できなかった。しかし、本実験装置では、主軸送り量とワイヤ送り量の関係がスライダクランク連鎖を構成する円盤の半径値によって設定できるようになったため、両者の関係を連続的に設定することが可能になったことを、理論的に証明した。このことに加え、本実験装置は、導入前の実験装置の機能を、近似的ではあるが、ほぼ内包していることも証明した。
- (2) 本実験装置を用いて動作実験を行ったところ、圧縮コイルばねの仕様を変えることなく、スライダクランク連鎖を構成する円盤の半径の組み合わせを様々に変えることによって、滑らかな曲線状の電極運動軌跡の曲率を多様化させることができた。
- (3) 曲率の多様な3つの電極運動軌跡を用いて加工実験を行った結果、この電極運動軌跡の包絡線形状とほぼ同様の曲がり穴形状をそれぞれ加工できた。すなわち、加工可能な曲がり穴形状の曲率を多様化することに成功した。
- (4) 曲率の多様化した曲がり穴を利用することによって、従来の除去加工法では加工することが困難である、平行に加工された2本の直穴の底を曲がり穴で連結したU字形曲がり穴形状、さらに、ねじれの位置になす角 90° で加工された2本の直穴の底を曲がり穴で連結した3次元曲がり穴形状の創成に成功した。

5.8 展 望

今後は、曲がり穴放電加工用電極送り機構、改良型曲がり穴放電加工用電極送り機構、スライダクランク連鎖導入曲がり穴放電加工用電極送り機構を用いて行った動作実験と加工実験、および、それらの結果を利用した応用実験において判明した欠点の克服とさらなる曲がり穴の高自由度化を目指し、以下のような研究を行っていきたいと考えている。

(1) 電極運動軌跡すなわち曲がり穴形状の高自由度化

曲がり穴形状を加工するために考案した実験装置の基本原理は、型彫放電加工機の主軸の移動により、複数あるワイヤの繰り出し量に差を生じさせ、それが圧縮コイルばねの屈曲伸長動作に変換されることによって、そのばね端に取り付けられた電極が曲線軌跡上を運動し、かつ、放電加工のための極間距離制御が実現される結果、電極運動軌跡の包絡形状つまり曲がり穴形状が加工されるというものである。したがって、曲がり穴形状に最も直接的な影響を与えているのは、主軸の移動量と各ワイヤの繰り出し量の関係である。本論文で扱った最新の装置である、スライダクランク連鎖導入曲がり穴放電加工用電極送り機構においても、両者の関係は、連続的な設定は可能になったものの、ほぼ比例関係となっている。したがって、1本の曲がり穴加工中に、両者の関係を任意に制御できる装置の考案、開発を行う必要がある。

第一案として、スライダクランク連鎖導入曲がり穴放電加工用電極送り機構に用いた円盤の形状は円であるが、これを円以外の形状、すなわち、円盤をカム化する方法がある。

第二案として、図5.25に示すような実験装置を開発する。これは、主軸の移動量をリニアセンサで検知し、その主軸の位置に対応するように、各ワイヤの繰り出し量をサーボモータとボールねじを用いて制御する方法である。主軸の移動量とワイヤの繰り出し量の関係は、コンピュータ上のソフトウェアで任意に制御することが可能となる。

これによって、電極運動軌跡すなわち曲がり穴形状の自由度が向上し、これまでの実験装置では実現できなかった、複雑な曲がり穴や一定曲率の曲がり穴が加工可能になると考えている。加えて、第二案の場合、曲がり穴の中

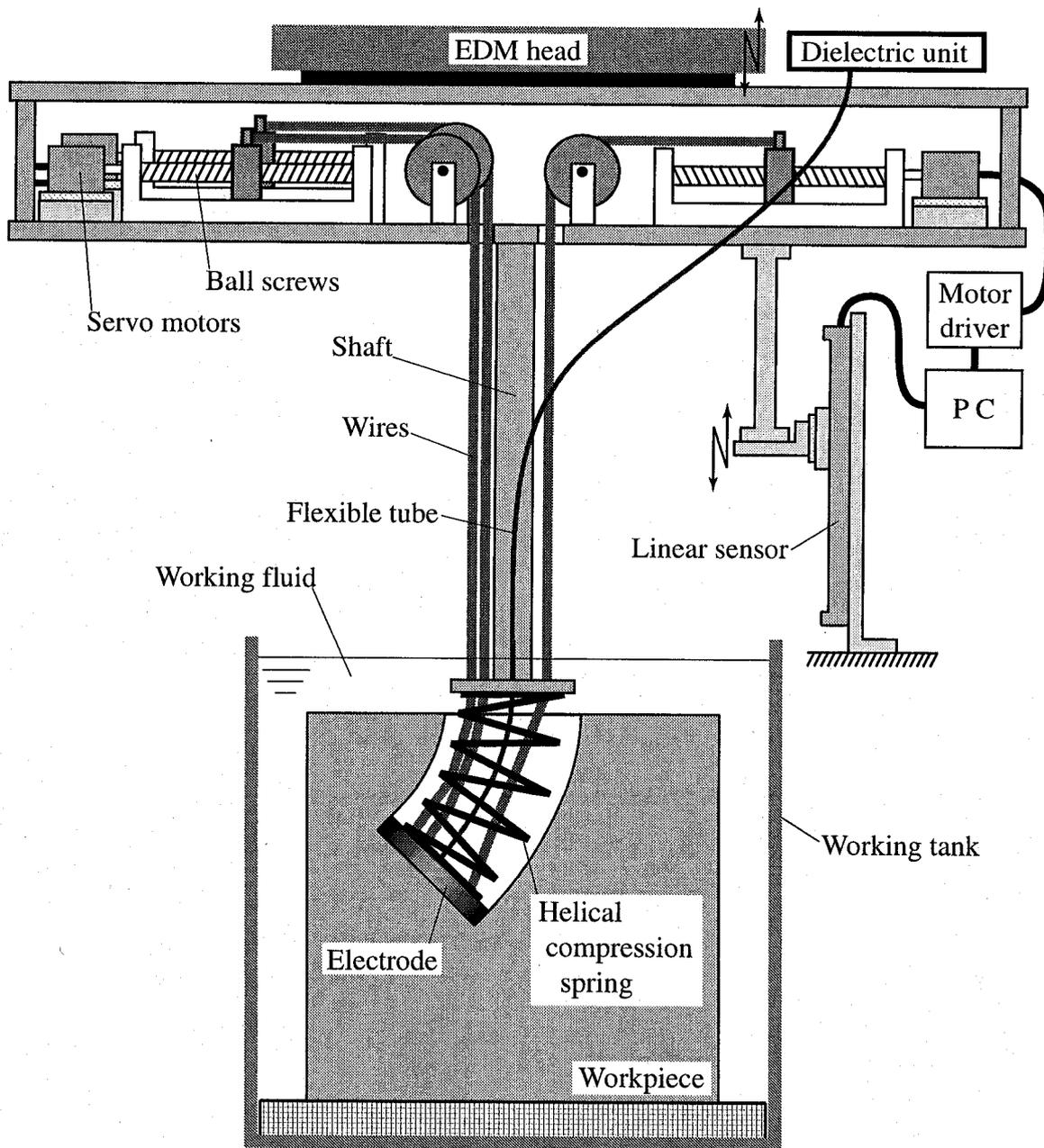


図5.25: 次期実験装置の模式図

心軸の接線方向に常に垂直な面で、電極の揺動運動が可能になる可能性がある。

(2) 電極運動および圧縮コイルばね挙動などの測定法の確立

(1)の開発に平行して、任意のワイヤの繰り出し量に対する電極の位置と姿勢および圧縮コイルばねの姿勢と位置を測定する方法を確立しなければならない。なぜならば、(1)で説明した実験装置を開発したとしても、意図した電極運動軌跡とワイヤ繰り出し量および主軸の移動量の関係を把握しなければ、電極にその意図した軌跡上を運動させることができないためである。それを同時に、圧縮コイルばね挙動とワイヤ繰り出し量および主軸の移動量の関係も掌握しなければ、電極運動軌跡の包絡形状内からの圧縮コイルばねの逸脱、すなわち、圧縮コイルばねと曲がり穴加工面の干渉の有無を判断することができないためである。

言い換えれば、このような電極とばねの測定方法の確立により、電極が意図したとおりの軌跡を運動し、かつ、圧縮コイルばねが被加工物に干渉しないような、各ワイヤの繰り出し量と主軸の移動量の関係を得ることができ、この得られた関係を、(1)で説明した実験装置を用いた曲がり穴加工において実現することにより、指定した形状をもつ曲がり穴の加工がはじめて可能となる。このような曲がり穴加工システムを構築すれば、曲がり穴形状の高自由度化が達成され、電極の運動とばねの挙動が数値的に扱うことが可能になるため、曲がり穴加工時の大部分の作業が自動化でき、これによって、実用化も可能になると考えている。

また、電極と圧縮コイルばねの位置と姿勢の測定法の確立は、電極運動軌跡の定量的な扱いを可能にさせる。したがって、電極運動軌跡と加工された曲がり穴形状を、定量的に比較、評価することができる。本研究の曲がり穴加工では、加工された曲がり穴形状を比較すべき定量的な基準がなかったため、形状の評価は、動作実験で得られた電極運動軌跡を基準とした定性的なものになっていた。

さらに、電極運動軌跡を定量的に扱えるようになれば、L字形、U字形、3次元曲がり穴加工のように、曲がり穴を連結させる際には、連結部分に生じる段差を無くす、あるいは、可能なかぎり小さくすることが可能になりう

る。また、連結後の形状を定量的にかつ事前に予測できることになるであろう。

加えて、目標とする曲がり穴形状や複数の曲がり穴の連結に際して、最適な電極形状も求められる可能性がある。

また、電極とばねの測定法の確立は、ばねと曲がり穴加工面の干渉判別の定量的な評価を可能にする。したがって、圧縮コイルばねが曲がり穴加工面に干渉するときの主軸の移動量なども数値的に求められることになる。よって、干渉判別の自動化が図れると考えられる。本研究の曲がり穴加工では、ばねと曲がり穴加工面との干渉の有無は、画像からオペレータが判断していた。

測定方法としては、本章で示したように、デジタルカメラによる画像が、ある程度信頼をおけるようであるので、画像センサの応用などを考えている。あるいは、ばねの挙動をコンピュータでシミュレーションするなどの方法も視野に入れている。

また、電極とばねの測定法に加えて、被加工物に対する加工開始点の測定法、および、その位置決め方法を確立しなければならないであろう。

(3) 放電加工条件、機構条件などの最適化

これまでの曲がり穴加工法の開発では、加工可能な形状を多様化しようとする目的が主であった。もちろん、今後も、さらに複雑な形状をもった高自由度の曲がり穴加工の実現を目指し、実験装置の改良を進めるが、それと同時に、曲がり穴加工法に最適な放電加工条件の探索や、圧縮コイルばねなどの機構条件の最適化に関する研究も行っていきたいと考えている。

参 考 文 献

- [1] 森田 鈞：機構学，実況出版（1974）149-156。

第6章

極間距離自動制御機構の開発

6.1 緒 言

本章では、断面変化穴形状および曲がり穴形状の加工のために開発した穴内面放電加工用電極運動機構および曲がり穴放電加工用電極送り機構の放電加工安定性を維持するまたは向上させ、その機能強化を可能とする機構について説明する。

本研究で開発した装置では、通常の放電加工に比較して、電極の位置剛性を犠牲にする傾向がある。今後、さらに複雑な物体内部形状を目標加工形状にした場合、放電加工機の主軸の直線運動を、創成目標とする形状を運動軌跡の包絡形状にする電極の運動に変換する装置の開発が必要となるが、これを実現する装置は複雑化し、それに伴って、電極の位置剛性がさらに低下することが予想される。これによって、放電加工機の主軸による極間距離制御動作が、電極に反映されにくくなり、安定した放電加工が維持できなくなる可能性がある。このような事態を回避するため、自動的かつ自律的に極間距離を制御し、安定な放電加工を維持する機構を電極部分に装備する必要に迫られると予想される。

本章では、このような役割を担う機構、すなわち、極間距離自動制御機構を開発し、これを用いた動作実験および加工実験を行って、この機構による極間距離の制御性について検証した。

6.2 極間距離自動制御機構

自動的かつ自律的に極間距離の制御動作を行う極間距離自動制御機構 (Automatic Discharge Gap Controller : ADGC) について説明する.

6.2.1 形状記憶合金

開発したADGCではアクチュエータとして形状記憶合金 (Shape Memory Alloy : SMA)[1-3]を使用した. SMAの変形, 温度, 組織形態の関係を模式的に示した図6.1を用いて, SMAの有する形状記憶効果 (Shape Memory Effect : SME) について簡単に説明する.

SMAは温度によって2つの相をもち, 高温時では, 図中のAで示すオーステナイト相の状態, 低温時では, 同Mで示すマルテンサイト相の状態となる. オース

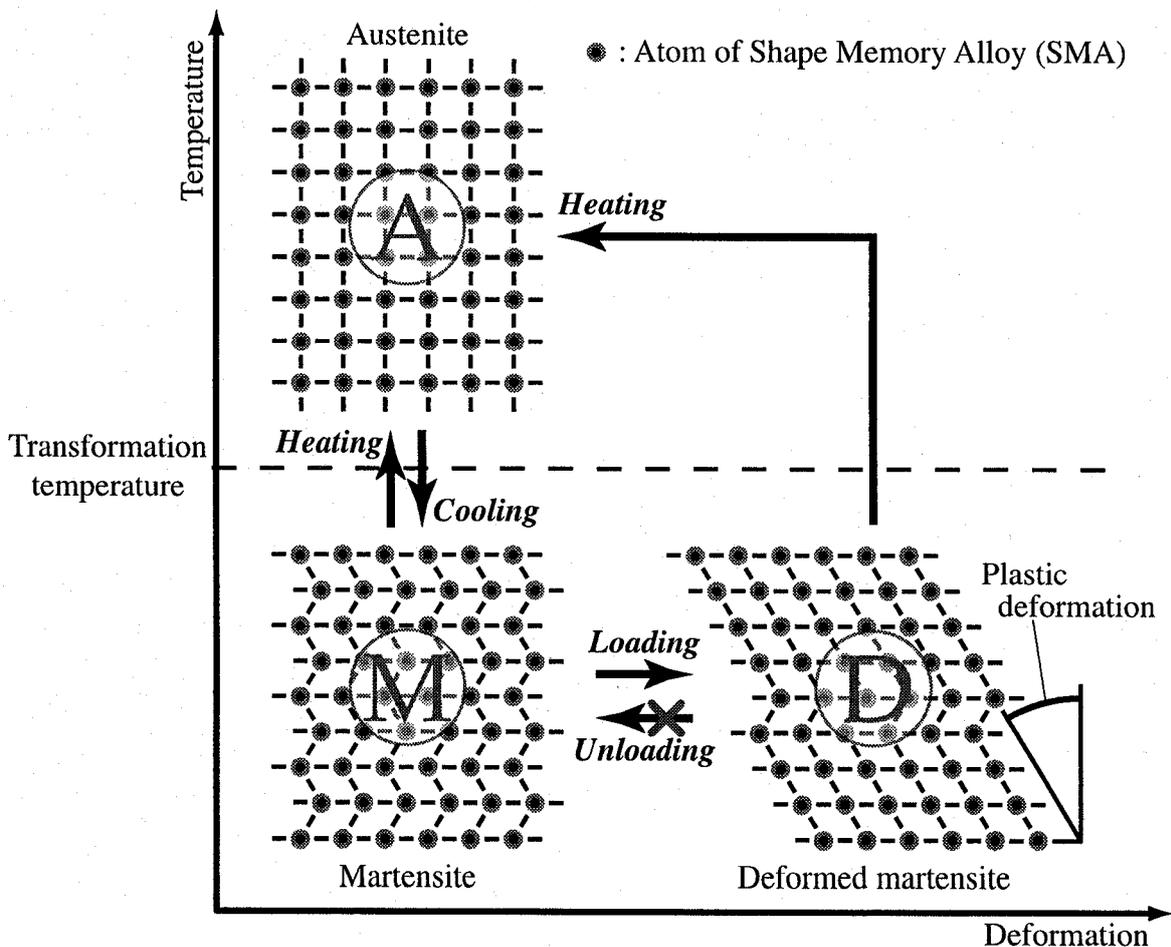


図 6.1: 形状記憶合金の形状記憶効果

テナイト相は、母相あるいは高温相とも呼ばれ、この相から冷却によってマルテンサイト相に変態することをマルテンサイト変態といい、また、その逆は逆変態という。両者の間の相変態は、温度だけに依存し、相変態時には、外部から力が作用しない限り、SMA 自体が変形することはほぼないとしてよい。

マルテンサイト相にある SMA は、鋼とは違い、柔らかく、負荷によって容易に変形する。このとき、図中の M で示す状態から、図中の D で示すように変形した状態となる。この状態を変形したマルテンサイト相と呼ぶことにする。変形後、除荷しても元の形状、つまり、図中の M に示す状態には戻らない。

塑性変形させる負荷が作用した場合、変形すること自体は、通常の金属と同じであるが、変形の仕方に通常の金属と SMA との違いがある。通常の金属は塑性変形すると、すべり面ですべりを起こす。このとき、すべり面にある金属原子は次々と結合する原子を変えることによって変形を起こす。しかし、SMA の塑性変形では、図中の M と D に示すように、平行四辺形のマルテンサイトの積み重なりが将棋倒しのように連携的に向きを変えて変形する。つまり、変形しても隣接した原子が変わらないのが、SMA の変形の特徴である。

図中の D の変形したマルテンサイト相の状態にある SMA を加熱すると、オーステナイト相に変態するが、原子同士の隣接関係が不変なので、変形前のマルテンサイト相 (M) が加熱され、オーステナイト相 (A) に逆変態したときと同様に、変形したマルテンサイト相 (D) はオーステナイト相 (A) に逆変態する。すなわち、形状は、オーステナイト相 (A) の状態に戻り、変形前の形状に復帰する。次いで、冷却すると、オーステナイト相 (A) はマルテンサイト相 (M) に変態し、このときは前述のように変形はほぼ起こらない。このように、加熱すると変形前の形状に戻るため、あたかも、変形前の形状を記憶しているかのように挙動する。したがって、変形前の形状を記憶形状、変形後の形状が記憶形状に戻ることが形状の回復あるいは復帰と呼ばれることがある。

通常の金属と SMA における応力ひずみ線図の比較を模式的に示したグラフを、図 6.2 に示す。通常の金属の場合、外部応力が大きくなるにしたがって、弾性変形領域から塑性変形領域に入り、外部応力が作用しなくなっても、塑性変形のひずみの大部分が永久変形として残留する。これに対し、SMA の場合には、通常の金属と同様に、見かけ上、外部応力により塑性変形が起こり、そのひずみが残留するが、加熱することによって残留したひずみが、SME により完全に変形前の状態

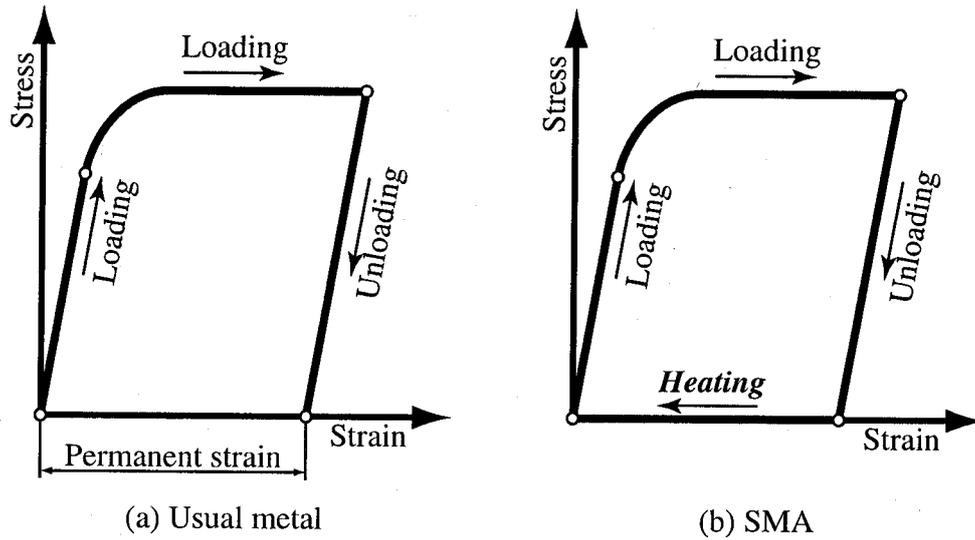


図6.2: 通常の金属と形状記憶合金の応力-ひずみ線図の比較

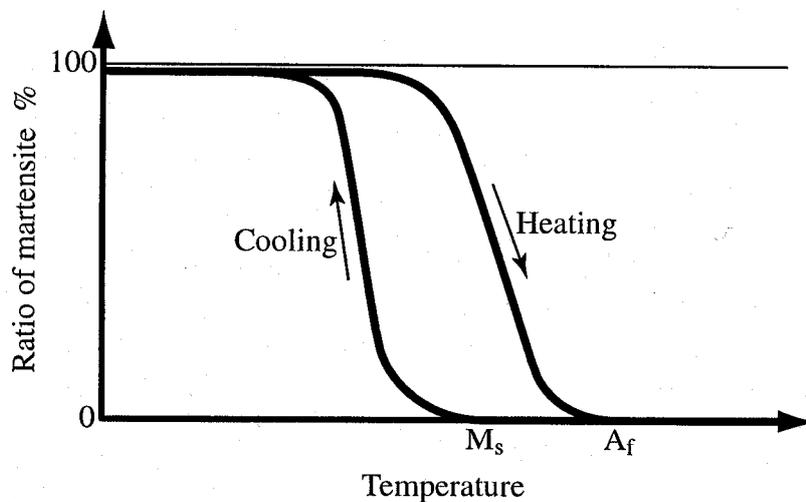


図6.3: 形状記憶合金の温度とマルテンサイト量の関係

に戻ってしまう。

また、SMAの温度と相変態時のSMAに含まれるマルテンサイト量の関係を模式的に表したグラフを、図6.3に示す。オーステナイト相にあるSMAを冷却すると、ある温度でマルテンサイト変態が始まる。このとき、初めてマルテンサイトが発生する温度を M_s 点という。さらに冷却していくと、マルテンサイト変態が活発になり、マルテンサイト量が急激に増加し、最終的にSMA全体がマルテンサイト相となる。逆に、マルテンサイト相にあるSMAを加熱すると、ある温度で逆変態が始まり、急激にマルテンサイト量が減少し、最終的にSMA全体がオーステナ

イト相となる。このとき、SMA全体がオーステナイト相になる温度を A_f 点という。このグラフからわかるように、一般にSMAの相変態には、温度ヒステリシスがある。

また、 M_s 点は、マルテンサイト変態開始温度 (Martensitic-transformation Start temperature)、 A_f 点は、オーステナイト変態終了温度 (Austenitic-transformation Finished temperature) を意味している。これらと同様に、マルテンサイト変態終了温度 (M_f 点) やオーステナイト変態開始温度 (A_s 点) も定義できるが、工業的にはほとんど使われない。

6.2.2 バイアス式2方向性素子

6.2.1小節で述べたSMAについての概要から、SMAをアクチュエータとして利用する場合、SMAは自身の温度に依存した一方向性のアクチュエータであることがわかる。つまり、SMAは変形後に記憶形状に復帰する動作のみを行い、一度、記憶形状に復帰してしまうと、アクチュエータとしては動作することはできない。このようなSMAを2方向性のアクチュエータとして利用することを可能にしたのが、バイアス式2方向性素子である。本章で開発したADGCは、SMAをバイアス式2方向性素子の形で利用している。

図6.4に、バイアス式2方向性素子の構造を示す。この図に示すように、この素子は、SMA製ばね、通常の材質製のバイアスばね、軸と円盤から構成されている。

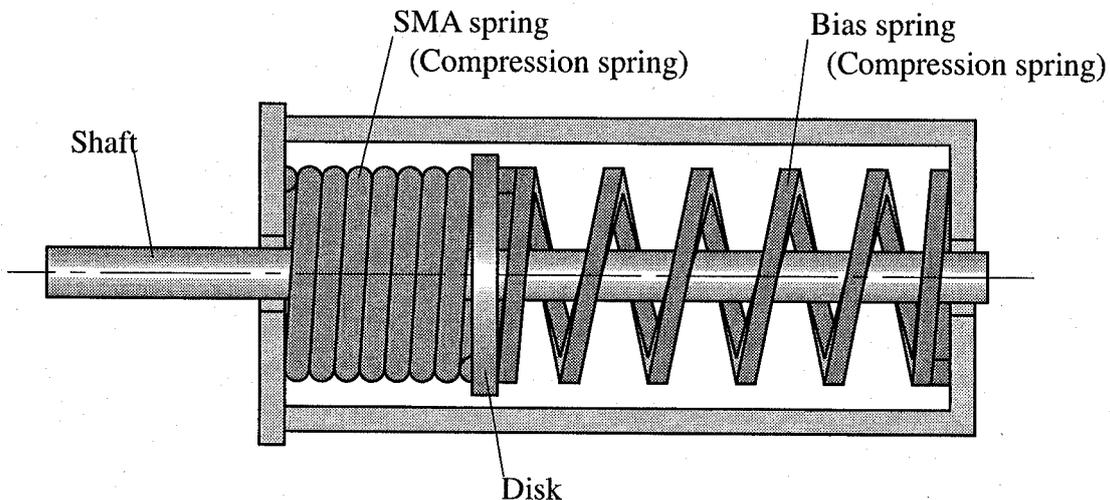


図 6.4: バイアス式2方向性素子の構造

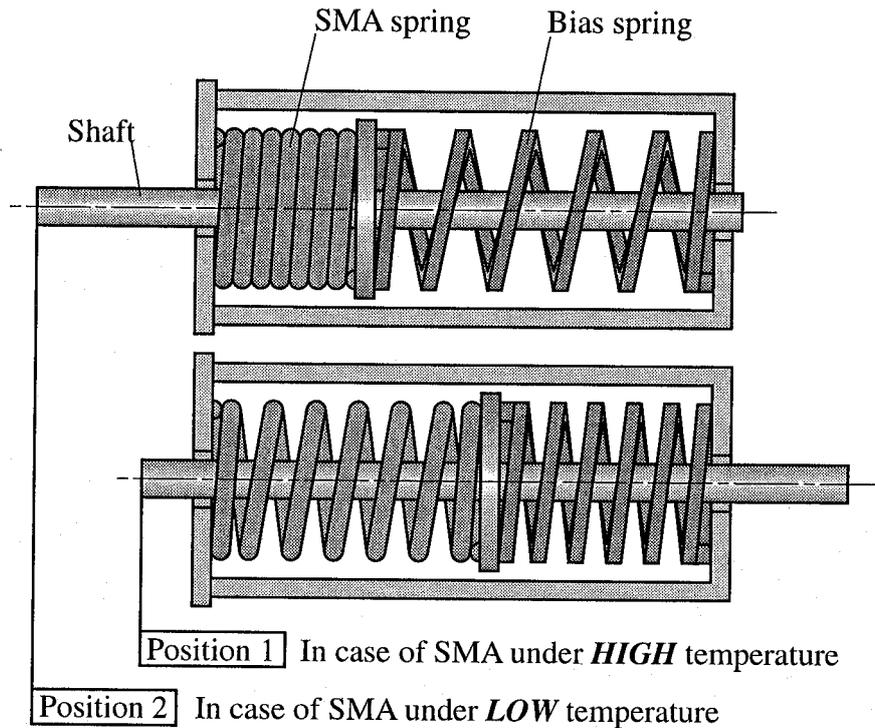


図6.5: バイアス式2方向性素子の動作過程

SMA製ばねとバイアスばねは、円盤をはさんで、互いに力を及ぼしあうように組み立てられている。この円盤には軸が取り付けられており、円盤と軸の位置は、双方のばねの力の釣り合いにより変化する。この図では、SMA製ばねとバイアスばねが圧縮コイルばねで表現されているが、両者が相互に力を及ぼす位置関係にあれば、他の形状のばねでも構わない。

図6.5に、バイアス式2方向性素子の動作過程を示す。

SMAは、図6.1に示したように、温度により相変態を起こすが、それぞれの相により、様々な物性が変化する。変化する物性の中には横弾性係数も含まれる。すなわち、SMAばねのばね係数は、SMAの温度により変化する。具体的には、高温時のオーステナイト相では高く、低温時のマルテンサイト相では低くなる。

したがって、バイアス式2方向性素子を構成するSMAばねとバイアスばねを適切に設計すれば、この素子は、以下のような動作をする。

高温時には、SMAばねの復元力がバイアスばねの復元力より大きくなり、両者の及ぼしあう力が釣り合うまで、SMAばねがバイアスばねを変形させる。逆に、低温時には、バイアスばねの復元力がSMAばねの復元力より大きくなり、両者の発生する力が釣り合うまで、バイアスばねはSMAばねを変形させる。

これによって、図6.5に示すように、軸は両ばねの釣り合い位置に依存して移動するため、SMAが高温時と低温時で、軸の位置が変化する。すなわち、バイアス式2方向性素子の入力はSMAの温度であり、出力は移動する軸の位置ということになる。

6.2.3 構造と動作過程

図6.6に、本章で開発したADGCの模式図を示す。ADGCは、バイアス式2方向性素子とその軸に取り付けられた工具電極、および、放電加工用電源から構成されている。電源から電極への加工電流の供給は、軸とSMAばねと電極を電氣的に直列に結線した電流経路を用いて行われている。

SMAは金属であるにもかかわらず、その電気抵抗が比較的高いため、通電により加熱することが可能である。したがって、バイアス式2方向性素子では、入力はSMAの温度であり、出力は軸の位置であったが、ADGCでは、入力は放電加工で生じた加工電流となり、出力は電極の位置となる。

図6.7を用いて、ADGCの動作過程を説明する。

図6.7(a),(b)に示すように、電極と被加工物の間に加工電圧が印加された状態で、ADGC全体が被加工物の方向へ接近し、両者間の距離すなわち極間距離が、放電加工可能な距離内に十分に入ったときに、ADGC全体の被加工物への接近動作

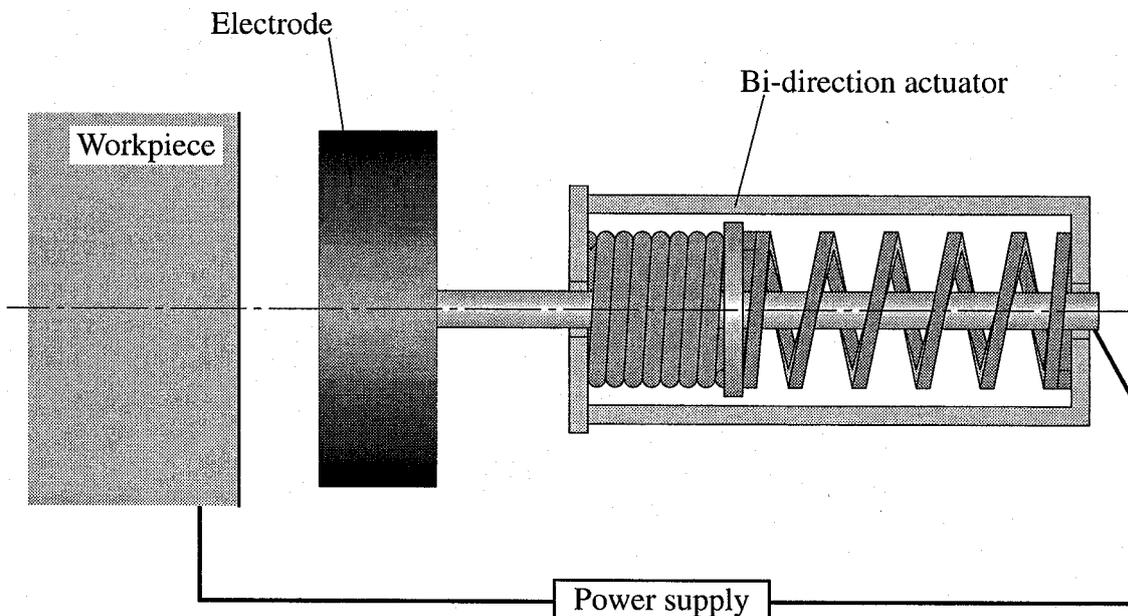


図6.6: 極間距離自動制御機構の模式図

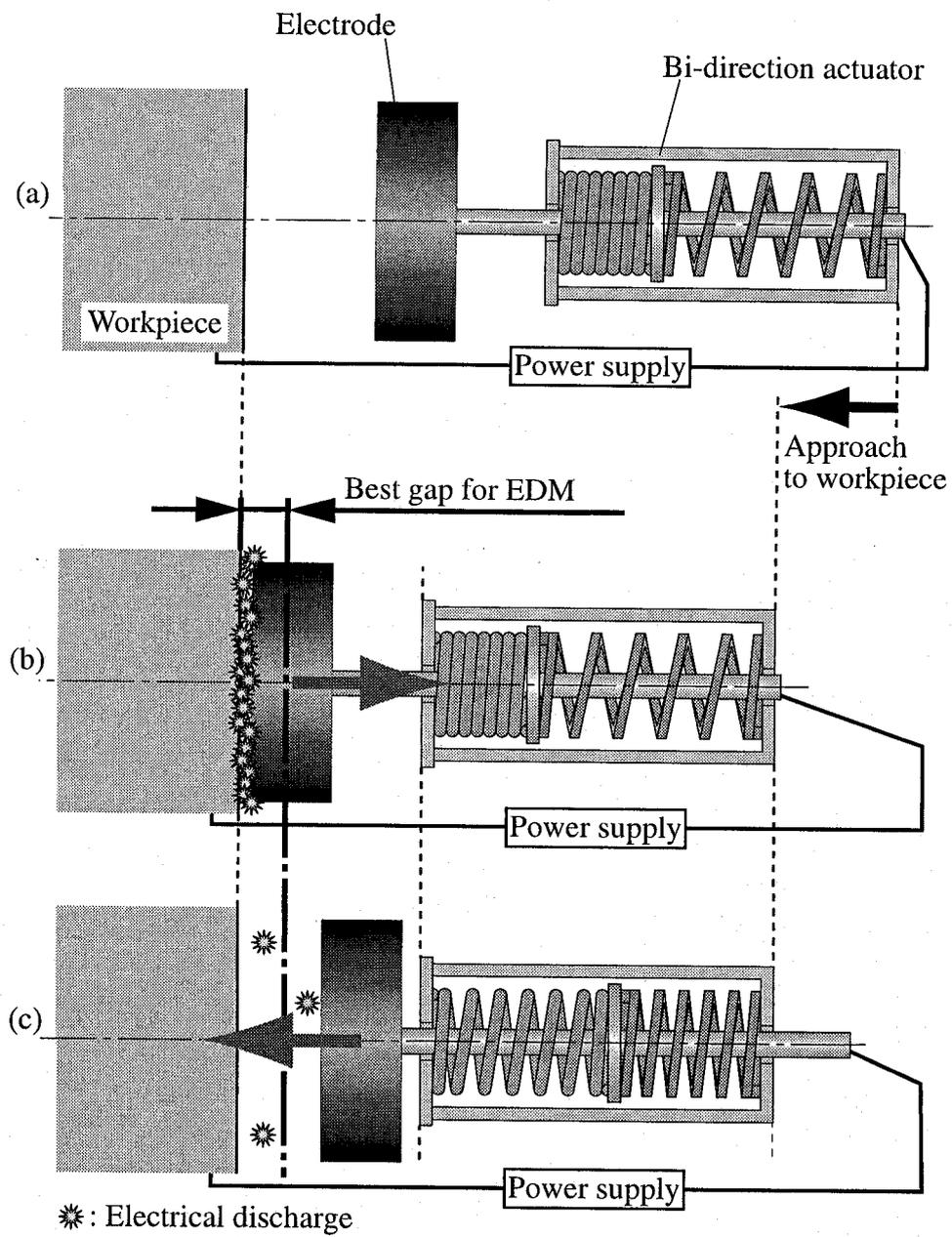


図6.7: 極間距離自動制御機構の動作過程

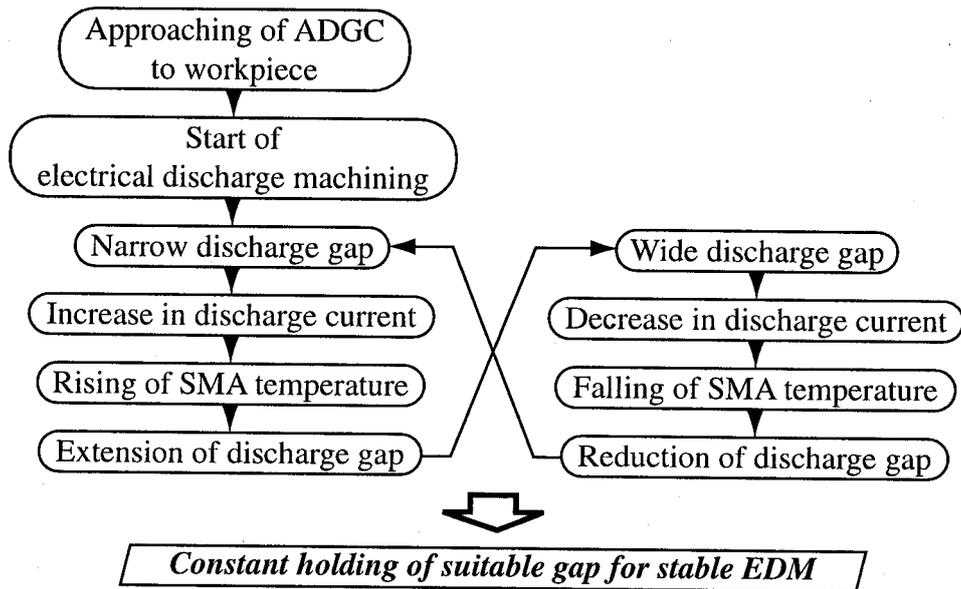


図6.8: 極間自動制御機構の動作過程のまとめ

が停止するという状況を考える。

このとき、放電加工が行われ、その加工電流がSMAばねに流れることによって、SMAばねは通電加熱される。これにより、SMAばねの温度が上昇し、軸は被加工物から離れる方向に移動する。したがって、電極は図6.7(b)に示すように被加工物から離脱する。すなわち、極間距離が増大する。

ADGCによる被加工物からの電極の離脱動作によって、極間距離が過大になると、加工電流が減少し、SMAが通電加熱されにくくなる。したがって、SMAばねは放熱により冷却される。これにより、SMAばねの温度が下降し、軸は被加工物に近づく方向に移動する。よって、電極は図6.7(c)に示すように被加工物に接近する。すなわち、極間距離が減少する。

ADGCによる被加工物への電極の接近動作によって、極間距離が過小になると、再び、加工電流が増加し、前述のような過程により、極間距離が増大する。

以上のように、SMAばねの加熱と冷却、すなわち、被加工物に対する電極の離脱と接近が繰り返されるうちに、図6.8に示すように、放電加工に最適な極間距離に常に収束し、安定な放電加工が継続される。つまり、ADGCは、安定な放電加工を持続させるように、自動的かつ自律的に極間距離を制御することができる。

また、図6.7を用いたADGCの動作過程の説明では、わかりやすくするために、ADGC全体が被加工物に接近する場合を想定していたが、ADGCが被加工物に接

近しようと、被加工物がADGCに接近しようと、どちらでも構わない。なぜなら、ADGCに装備された電極と被加工物の距離が、放電加工可能な極間距離となれば、ADGCは、前述あるいは図6.8に示すような極間距離の制御動作を常時実行するためである。よって、極間距離が時間とともに変化していても、ADGCはその変化に追従しながら、安定な放電加工が持続するように動作する。したがって、放電加工により被加工物が加工されることによって、極間距離が放電加工中に時間の関数で変化していくが、このような極間距離の変化にも追従し、適切な極間距離を維持していく。

6.2.4 製作実機

実際に製作したADGCの試験機とその模式図をそれぞれ図6.9, 6.10に、また、試験機に使用したSMAばねとバイアスばねの仕様を表6.1に示す。

図6.6に示したADGCの模式図では、SMAばねとバイアスばねはともに圧縮コイルばねで、両者の数は1本ずつ、配置は構造的に直列であった。これに対し、実際に製作した図6.9, 6.10に示すADGCの試験機では、SMAばねは引張コイルばねで、数は3本、バイアスばねは圧縮コイルばねで、数は1本である。加えて、これらの配置は、試験機の中心に1本のバイアスばねがあり、その周囲に3本のSMAばねが120°等配で配置されている。すなわち、バイアスばねとSMAばねは構造的に並列に配置されている。また、これらのSMAばねは、3本とも同一仕様のものである。試験機の製作において、このような本数とばね構成および配置とした理由は、バイアス式2方向性素子部分の軸方向の寸法を可能なかぎり抑制す

表6.1: 形状記憶合金ばねとバイアスばねの仕様

	Material	Diameter of wire mm	Mean diameter of coil mm	Active coils	A _f °C	M _s °C
SMA spring	NiTi	0.60	3.5	5	82.5	30.6
Bias spring	SW-C	0.55	3.7	8.5	-	-

A_f: Austenitic-transformation finished temperature

M_s: Martensitic-transformation start temperature

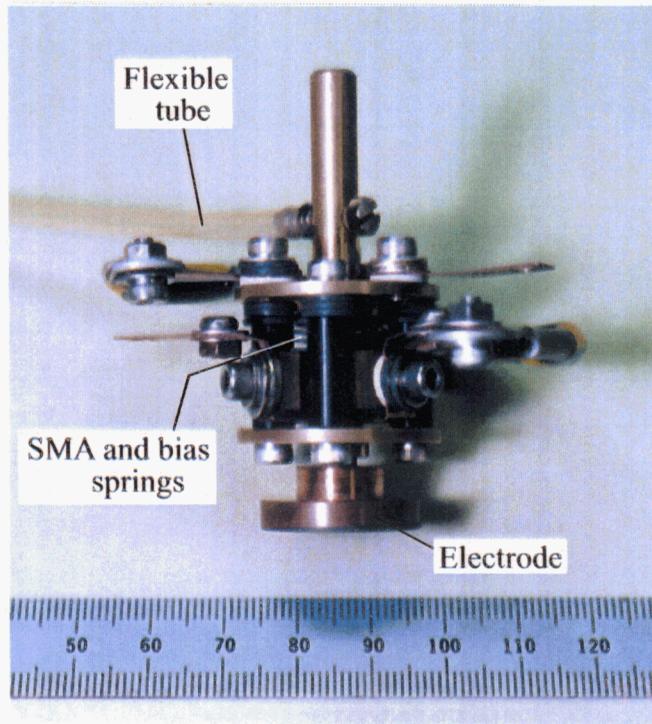


図 6.9: 試作した極間距離自動制御機構の試験機

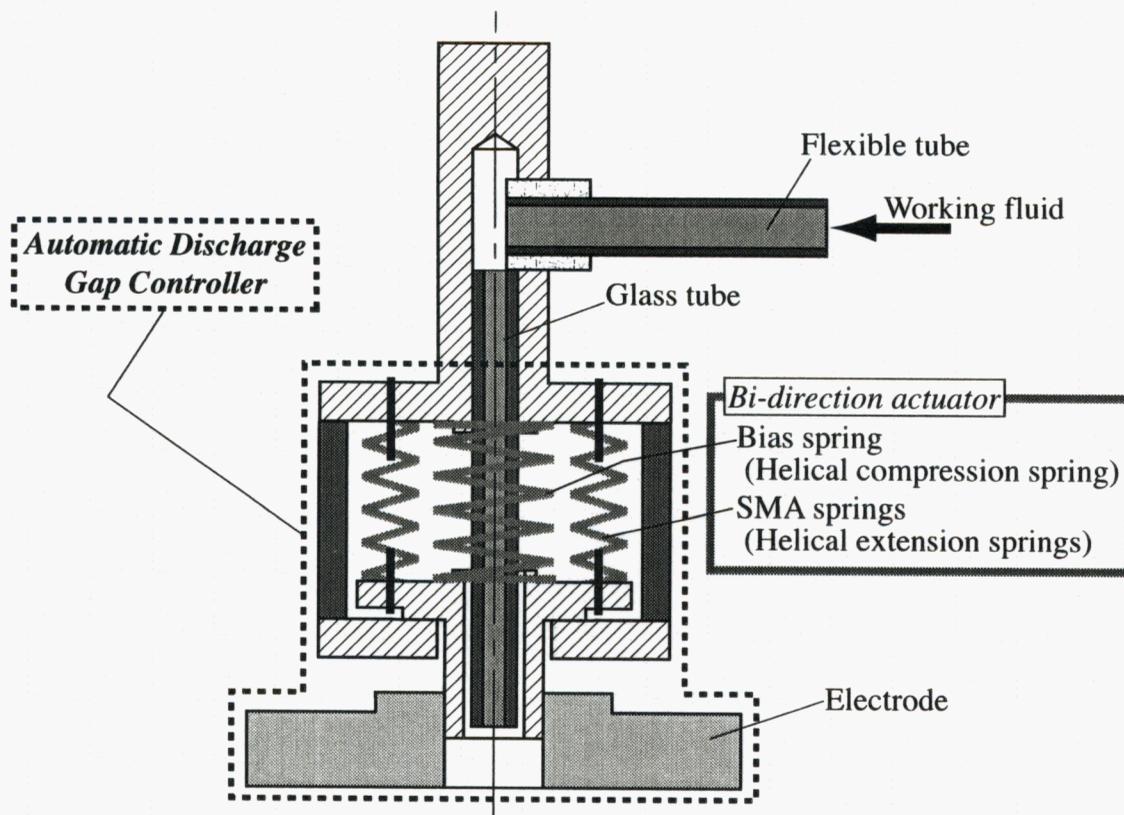


図 6.10: 極間距離自動制御機構の試験機の模式図

るためである。

試験機に搭載されたバイアス式2方向性素子を構成する、これらのSMAばねとバイアスばねの設計は、試験機がバイアス式2方向性素子あるいはADGCとしての動作をするように、SMAの高温時と低温時における3本のSMA引張コイルばねと1本のバイアス圧縮コイルばねとの及ぼしあう力の釣り合い、および、ばねの一般的な設計法と規格にしたがって行った。その結果、求められた設計解のひとつが、表6.1に示すSMA引張コイルばねおよびバイアス圧縮コイルばねの仕様である。

図6.9に示す試験機では、図6.10の模式図に示すように、加工くずの除去のための加工液が、加工液供給装置と試験機を結ぶフレキシブルチューブと試験機の中心部にあるガラス管を経由して、電極間隙に供給されるように設計されている。このガラス管は、バイアス式2方向性素子による軸および電極動作のガイドの役目も担っている。

また、加工電流は、図6.9、6.10に示す試験機の上部にある突起状の構成部品から、3本のSMAばねを経由して電極に供給される。ここで、これらの3本のSMAばねは、機構的には並列に配置されているが、電気的には直列に結線されている。したがって、3本のSMAばねを流れる加工電流は、各SMAばねで等しくなる。よって、3本のSMAばねの電気抵抗は同値なので、発生する発熱量も等しくなり、3本のSMAばねは、ほぼ同じ動作をすることになる。これ以外の電流経路は、試験機に絶縁体が組み込まれているため、絶縁されている。

6.3 基礎動作実験

製作したADGCの試験機が、SMAばねの温度変化によって、実際に電極を動作させることができるか、言い換えれば、搭載されているバイアス式2方向性素子が設計どおりに動作するかを検証するため、以下に示すような非常に簡単な方法で、基礎的な動作実験を行った。

図6.11に、基礎動作実験に使用した実験装置の概略を示す。この装置の基本的な原理は、表6.1に示したように、試験機に使用したSMAばねの M_s 点、 A_f 点が、 0°C 以上 100°C 以下であることから、試験機を水中に設置し、水温を変化させれば、SMAばねの温度も同様に変化し、試験機の動作を確認できるというものである。

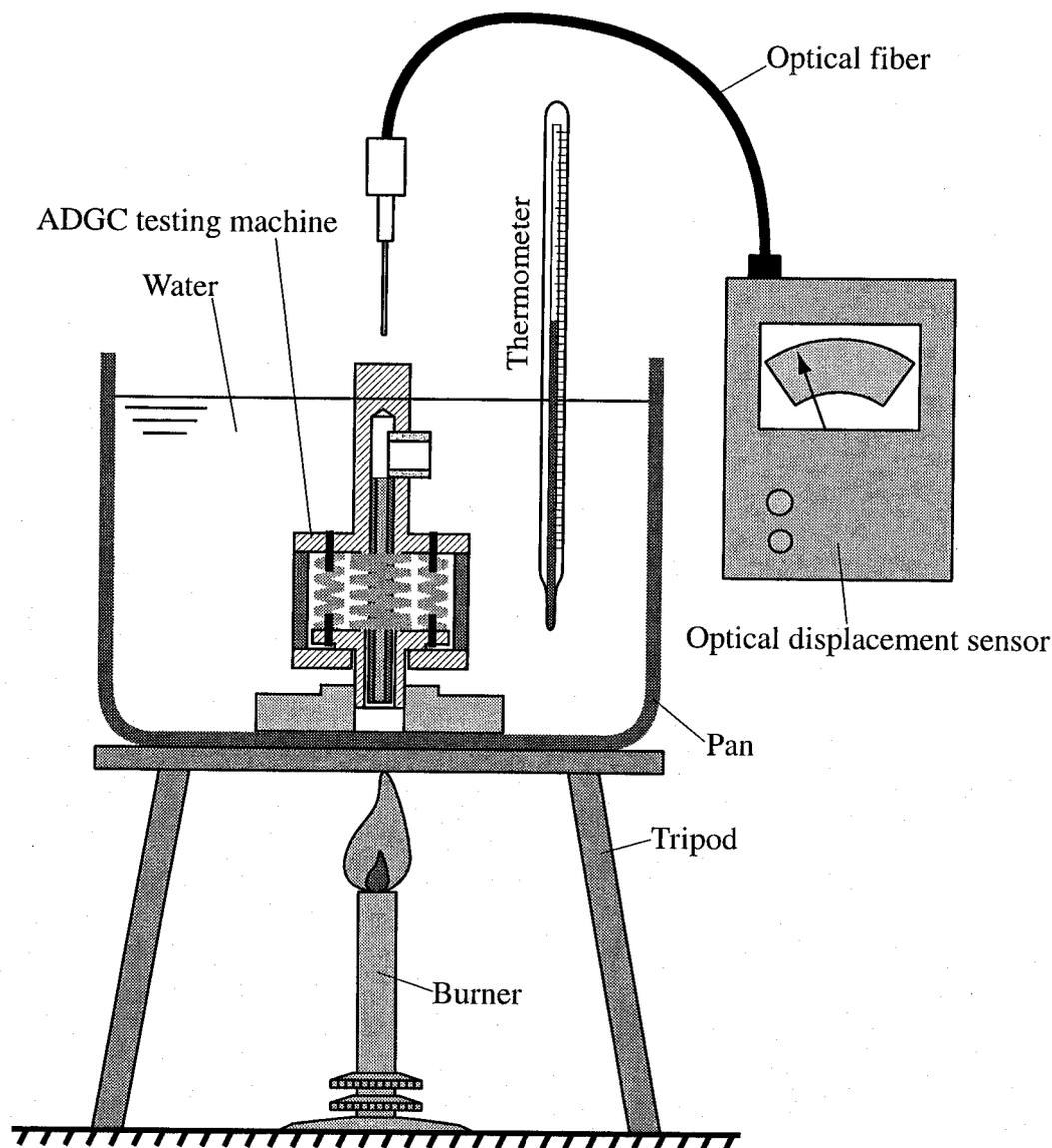


図6.11: 基礎動作実験のための実験装置

図6.11 を具体的に説明する．底の平らな鍋に試験機をその電極が下になるように入れ，試験機のバイアス式2方向性素子部分が埋没するように水を注入する．ただし，試験機上部の構成部品は，水面から出るようにしておく．この状態から，バーナーで水を加熱し，温度計で水の温度，および，水面から出ている試験機の一部を測定対象として，その鉛直方向の変位を光変位センサで測定した．ここで，加熱は緩やかに行ったので，測定した水温はSMAばねの温度とほぼ同じと考えることができる．また，測定した変位は，試験機による電極の動作そのものである．

図6.12 に，基礎動作実験で得られた水温すなわちSMAばねの温度と試験機の変位すなわち電極動作距離の関係を表したグラフを示す．このグラフからわかるよ

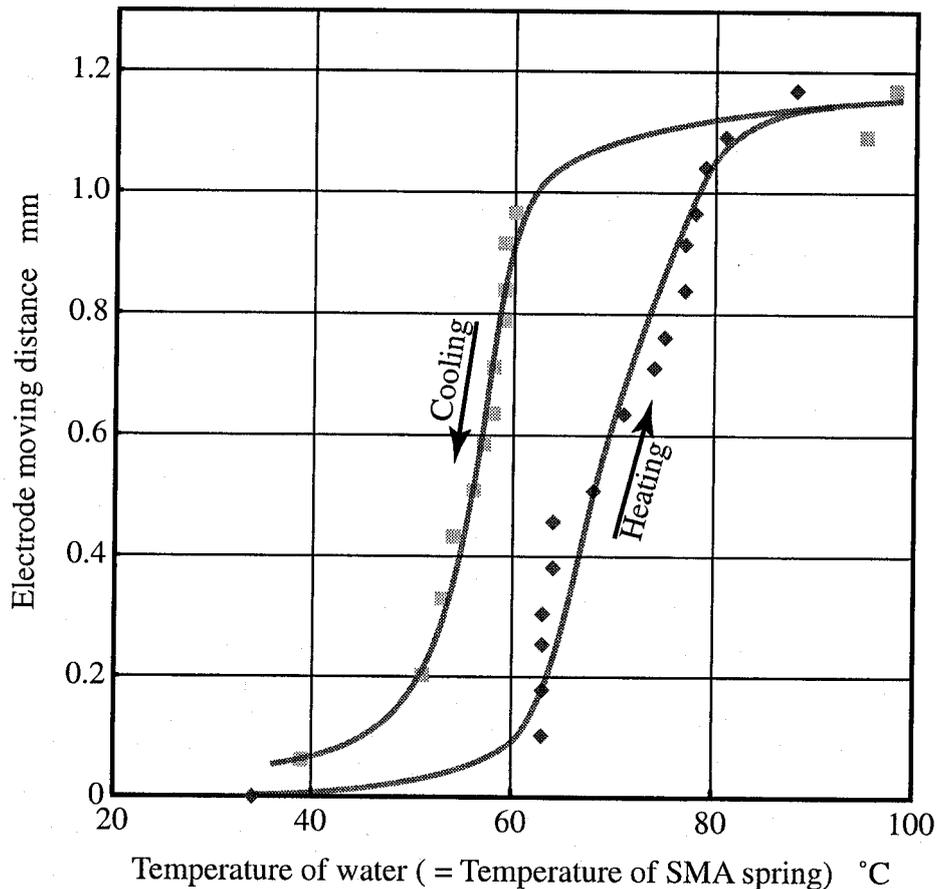


図 6.12: 水温 (=形状記憶合金ばね温度) と電極動作距離の関係

うに、試験機においても、SMAばねの加熱および冷却による電極動作は、図 6.3 に示したグラフと同様に、SMAの相変態の特徴的である温度ヒステリシスを呈している。このことから、この試験機は、バイアス式2方向性素子としての動作を行っていること、すなわち、バイアス式2方向性素子の設計および製作が妥当であったことが証明された。

6.4 加工動作実験

ADGCの試験機による放電加工可能性すなわち極間距離の制御性を検証するため、試験機を用いて放電加工させ、そのときの動作を評価する実験を行った。以下に、その方法の手順を示す。

- (1) ADGCの試験機を型彫放電加工機の主軸に取り付ける (図 6.13(a)).
- (2) 型彫放電加工機による極間距離制御機能のみを停止する。つまり、加工電

圧が印加されているだけの状態にし、主軸の極間距離制御動作を行わせない。

- (3) ADGCの試験機に搭載された電極を被加工物に、放電加工が開始される直前の距離まで、型彫放電加工機の軸を用いて、移動させる（図 6.13(b)）。
- (4) この状態から、主軸を被加工物の方向に一定量だけ送り、主軸を停止させる。これは、図 6.7 で想定した状況と同様である。よって、ADGC の試験機は放電加工を開始する（図 6.13(c)）。
- (5) このときのADGCの試験機による放電加工可能性の検証、および、その性能評価のためのデータ収集を行う。具体的には、主軸送り量と加工電流および放電加工速度を評価項目とした。

表6.2 に、加工動作実験に使用した加工電流ごとの放電加工条件を示す。これらの放電加工条件は、型彫放電加工機に付属したメーカ推奨の放電加工条件の中に含まれる一般的な条件である。ただし、主軸のジャンプと揺動は適用していない。

型彫放電加工機には、(株) 牧野フライス製作所製 NC 放電加工機EDGE-1 を使用したが、ADGC の試験機による極間距離制御機能の調査が実験の目的であるため、加工動作実験では、放電加工機の有する機能のうち使用したのは、放電加工用電源、基本的な放電加工条件の設定機能、および、位置決めのための軸などだけであり、他の機能は使用していない。また、ADGC に搭載した電極は直径22mm の無酸素銅、被加工物は炭素工具鋼（SK-5）である。

図 6.14 に、加工動作実験の結果を、加工電流をパラメータとして、主軸送り量および加工速度の関係としてまとめたグラフを示す。このグラフより、加工電流が大きければ加工速度が速くなる傾向にあること、また、ADGC の試験機は最大で50 μ mの主軸送り量に対しても安定な放電加工を維持しながら、主軸送り量分の加工を完了できることがわかる。通常の電極を用いて同様な実験を行ったところ、10 μ mの送り量でも即時に短絡し、加工不能になってしまったことから、ADGCの有用性を確認することができた。

図 6.15 に、図 6.14 から加工電流と主軸送り量の関係のみを抜粋したグラフを示す。このグラフにおいて、○印はその点の表す放電加工条件でADGCの試験機が加工を完了できたことを示し、×印はその点の表す条件では短絡によりADGCの試験機が加工を完了できなかったことを示している。このグラフから、○印で示された加工可能領域の形状は、加工電流に対してピークをもつこと、すなわち、加

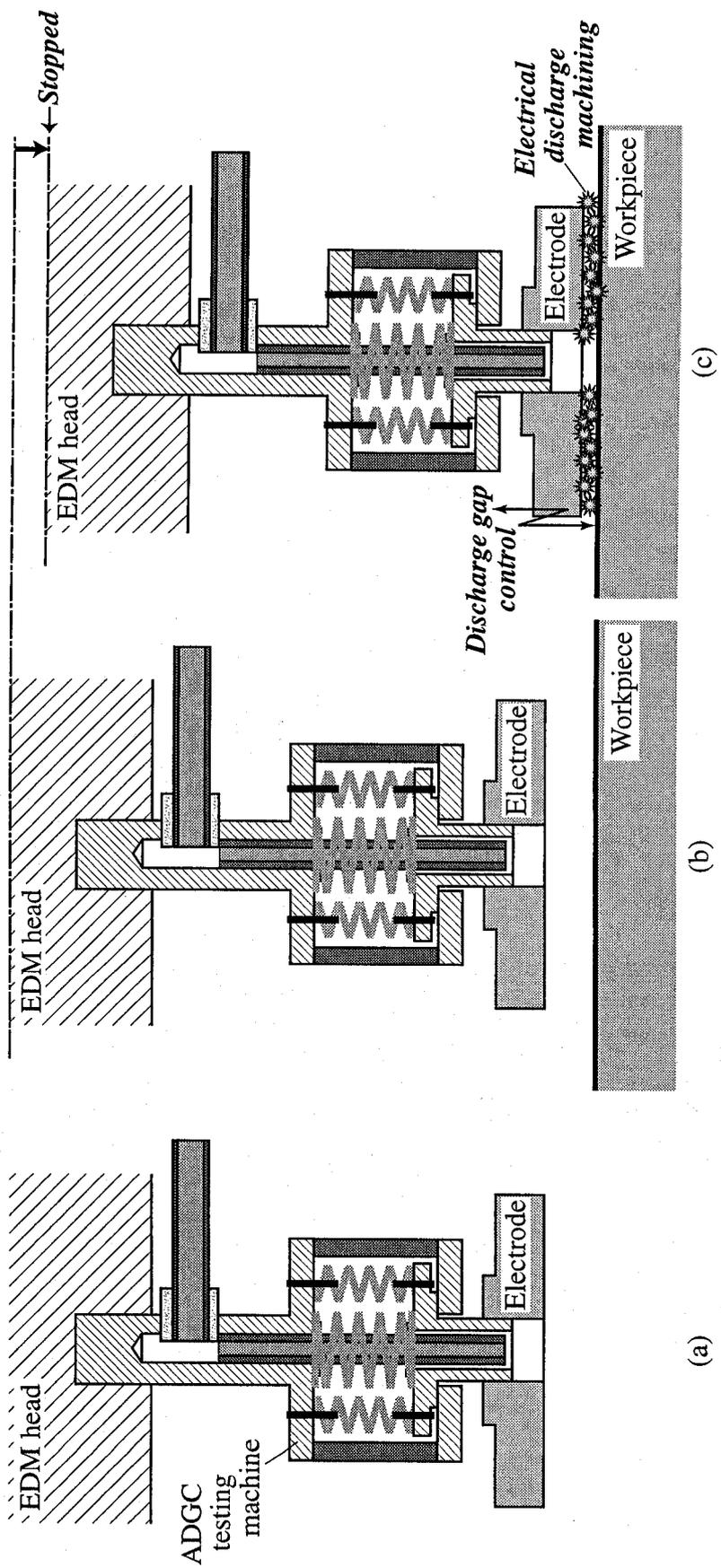


図6.13: 加工動作実験の方法

表6.2: 放電加工条件

Electrode	Oxygen-free copper						
Workpiece	Carbon tool steel (SK-5)						
Working fluid	Oil						
Flow rate	3 cm ³ /s						
Polarity	Reverse						
Discharge current	5 A	5.5 A	6.5 A	8 A	10 A	11 A	13 A
Pulse duration	69 μs	74 μs	79 μs	100 μs	114 μs	135 μs	180 μs
Duty factor	79 %	79 %	78 %	78 %	79 %	78 %	79 %
Jump	Not applicable						
Orbital motion	Not applicable						

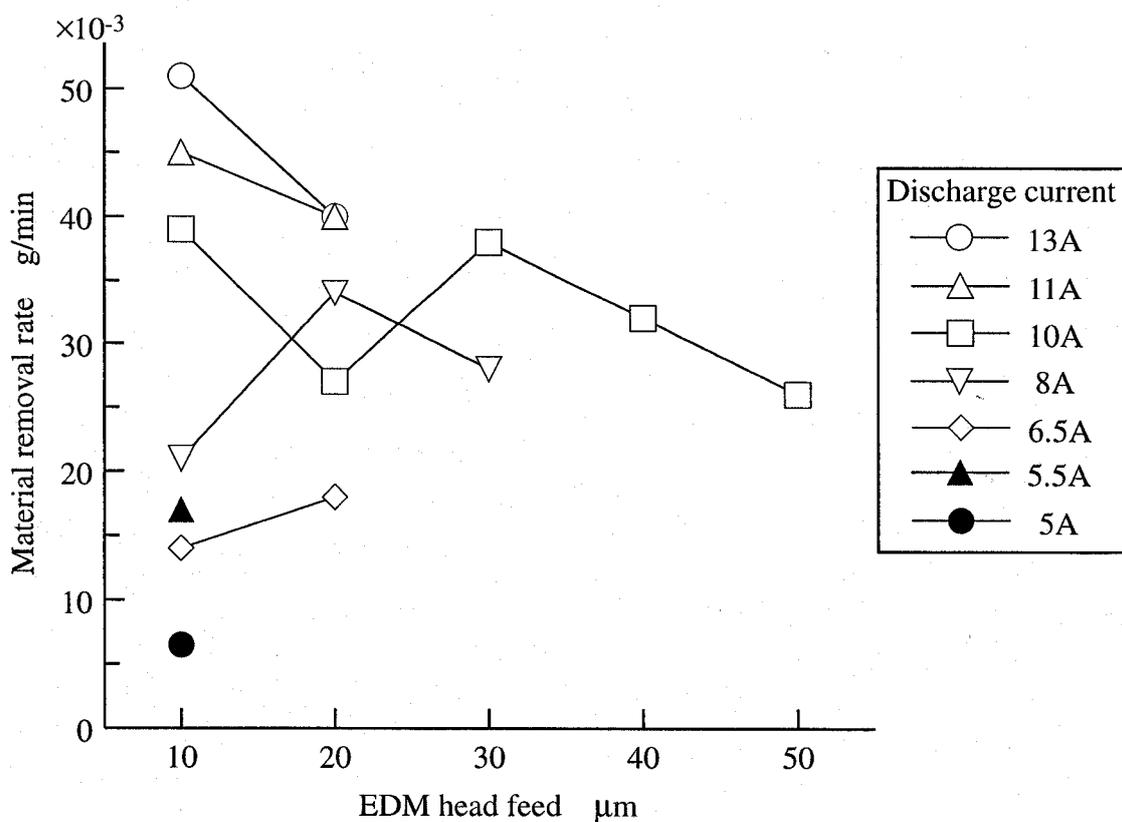


図6.14: 主軸送り量と放電加工速度および加工電流の関係

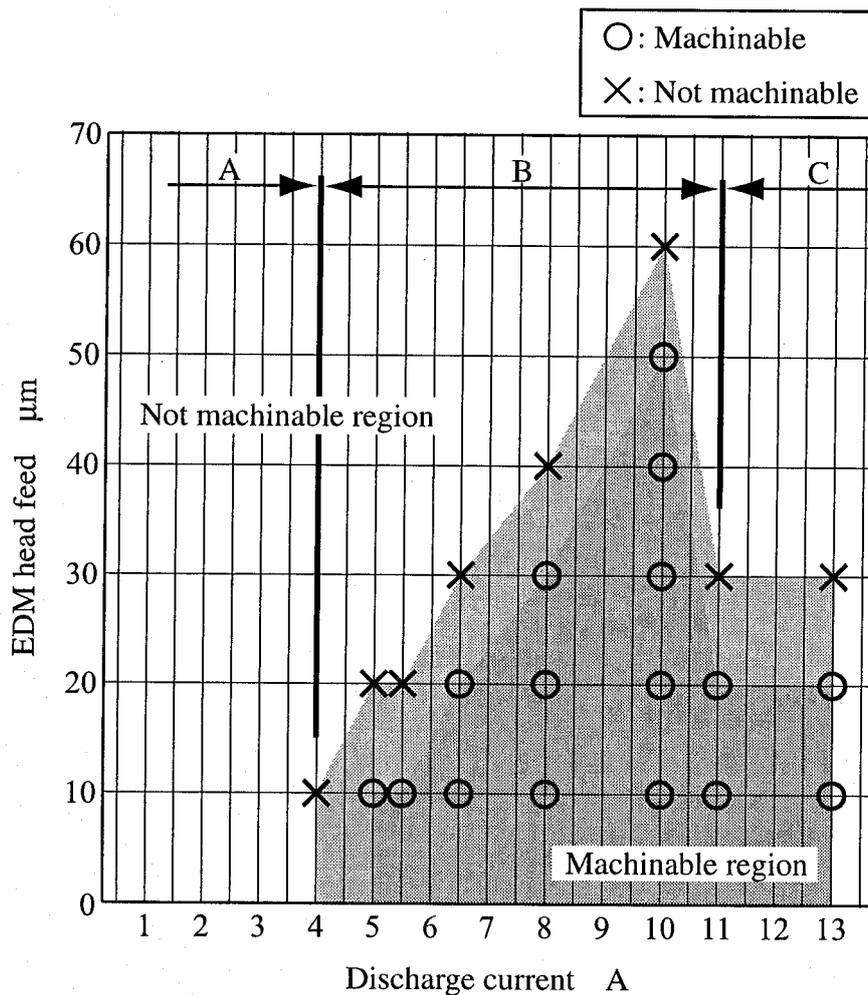


図6.15: 加工電流と主軸送り量の関係

工を完了することのできる主軸送り量の値は、加工電流の値に対して、極大値をもつことがわかる。

また、表6.3に、同一の放電加工条件の場合における、ADGCの試験機の有する極間距離制御機能を利用したときの加工速度と放電加工機のもつ極間距離制御機能を利用したときの加工速度の比較を示す。この表に示す結果より、試験機の極間距離制御機能を用いたときの加工速度は、放電加工機の極間距離制御機能を用いたときの加工速度の約10%から50%と非常に遅い。このような問題に対しては、バイアス式2方向性素子に使用した、SMAばねとバイアスばねの仕様および組み合わせを検討することによって、今後、改善そして最適化していかなければならないであろう。

表6.3: 試験機使用時と放電加工機使用時の放電加工速度の比較

Discharge current A	With ADGC (Max.) (X) mg/min	With EDM (Y) mg/min	X / Y %
5	6.5	21	31
5.5	17	38	45
6.5	18	60	30
8	34	96	35
10	39	180	22
11	45	240	19
13	51	630	8.0

6.5 考 察

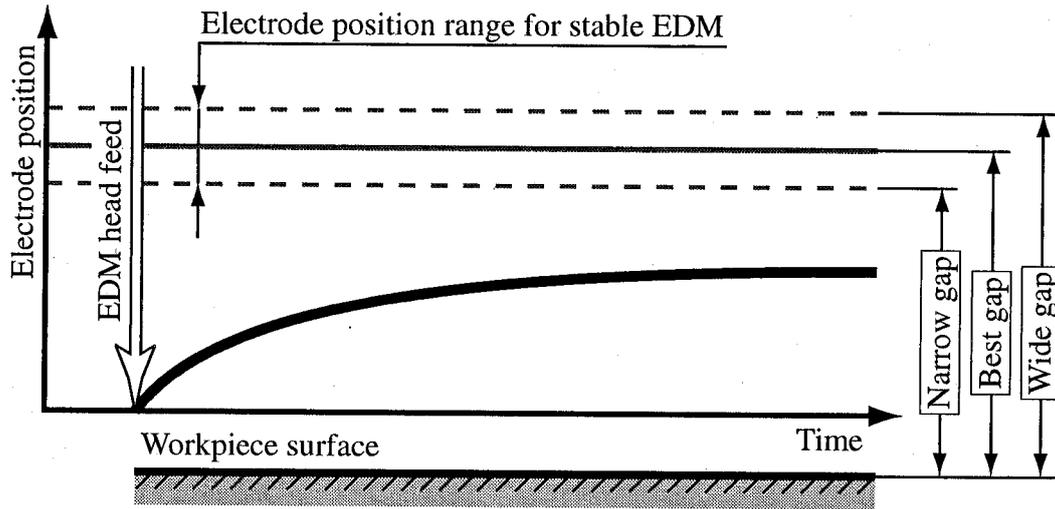
図6.15のグラフに示したように、加工完了可能な主軸送り量が加工電流に対して極大値をとることについては、このグラフに示したA、B、Cの領域ごとに、以下のような現象が生じているためと推測している。

領域Aでは、加工電流の値が過小であるため、SMAばねの通電加熱による温度上昇速度が遅く、ADGCの試験機がその電極を放電加工可能な極間距離の範囲内に追従させることができないため、短絡状態に陥ってしまう。

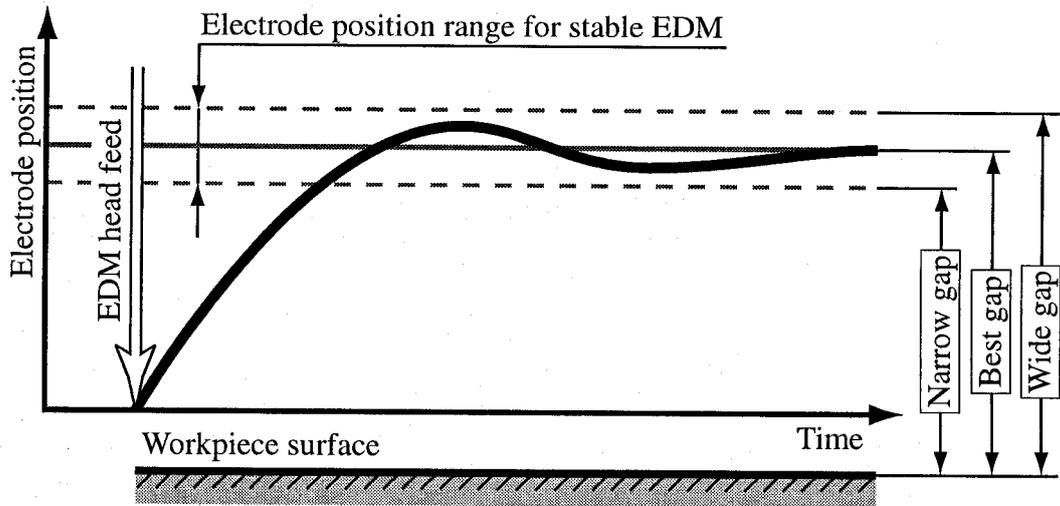
領域Bでは、加工電流の値が適しているため、SMAばねの通電加熱および放熱による温度の上昇下降速度が最適に近く、ADGCの試験機がその電極を常に極間距離を放電加工可能な範囲内にあるように追従させることができるため、大きい主軸送り量に対しても応答性がよく、加工が可能になる。

領域Cでは、加工電流の値が過大であるため、SMAばねの通電加熱による温度上昇速度が速く、ADGCの試験機がその電極を放電加工可能な極間距離の範囲内から逸脱させてしまうため、短絡状態に陥ってしまう。

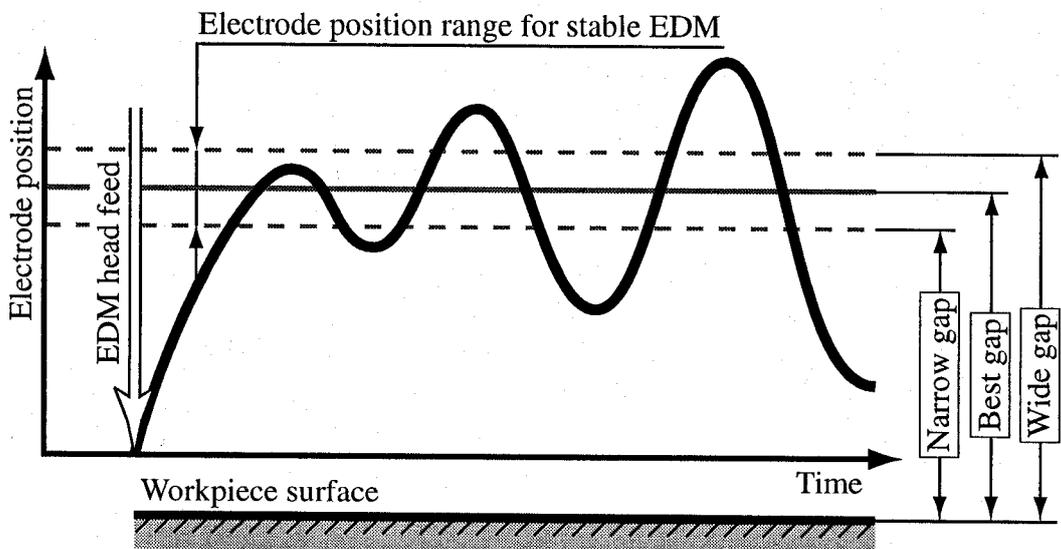
上記の考察をわかりやすくするために、領域A、B、CにおけるADGCの試作機による電極の制御動作を模式的に表した図を、図6.16(a)、(b)、(c)にそれぞれ示す。各図は、放電加工機の主軸によりADGCの試作機全体が被加工物に接近するように送られた結果、その電極と被加工物の間隙が安定した放電加工を得るには



(a) Region A



(b) Region B



(c) Region C

図 6.16: A, B, C 領域別に予想される電極の動作

狭すぎる状態となったとき、つまり、そのままの間隙では短絡あるいは異常放電となり、放電加工が維持できない状態となったときを想定している。図6.16の各グラフにおける白抜きの矢印は、この状態となるまでの電極の運動すなわち主軸の送りを示している。この状態に陥った後、各グラフは、時間に対してADGCがどのように電極の位置を制御するかを概念的に示している。以下、各グラフを用いて、各領域における電極の動作について説明する。

領域Aでは、図6.16(a)に示すように、極間距離が放電加工に適する距離になるように電極の位置を制御できず、極間距離が狭いまま短絡状態に陥り、放電加工が不可能となる。すなわち、目標値に対して定常偏差の残る応答となっていると考えている。

領域Bでは、図6.16(b)に示すように、極間距離が放電加工に適する距離になるように電極の位置を常に制御でき、常時安定した放電加工が得られる。すなわち、目標値に対して収束する応答となっているものと考えている。

領域Cでは、図6.16(c)に示すように、極間距離が放電加工に適する距離になるように電極の位置を安定的に制御できず、最終的に短絡状態に陥り、放電加工が不可能となる。すなわち、目標値に対して発散する応答となっているものと考えている。

6.6 結 言

本章では、穴内面放電加工用電極運動機構や曲がり穴放電加工用電極送り機構において、電極の位置剛性が不足することにより生じると予想される放電加工不安定性を解消するため、極間距離を自動的かつ自律的に制御することができる極間距離自動制御機構（Automatic Discharge Gap Controller : ADGC）について説明した。ADGCは、形状記憶合金（Shape Memory Alloy : SMA）製のばねと通常の金属製のバイアスばねおよび軸などから構成されるバイアス式2方向性素子に、電極と放電加工用電源が取り付けられた構造を持ち、自動的かつ自律的に極間距離を制御して、安定な放電加工を維持することができる。ADGCの試験機による基礎動作実験ならびに加工動作実験を行った結果、以下のような結論を得た。

- (1) ADGCの試験機を用いて基礎的な動作実験を行ったところ、SMAの温度の変化とともに、電極を動作させることができた。これによって、本試験機に組み込んだバイアス式2方向性素子の設計および製作が妥当であったことが証明された。
- (2) 実際にADGCの試験機を用いて放電加工を行う加工動作実験を行ったところ、本試験機によって、安定な放電加工を維持させることができた。これにより、ADGCが極間距離を自動的かつ自律的に制御する能力をもつことを証明した。

6.7 展 望

今後は、断面変化穴形状、そして、曲がり穴形状の加工装置に応用を目指し、ADGCの高性能化、小型化、最適化を行うため、以下のような行っていきたいと考えている。

(1) 電極動作のインプロセス計測法の開発とADGCの最適化

6.4節で述べたように、ADGCは放電加工の極間距離を自動的かつ自律的に制御していることが実験的に証明され、6.5節において、その電極動作について考察しているが、あくまでも、この結論と考察は、ADGCによる放電加工の様相や加工電流と加工電圧の推移などから、定性的に判断されたものである。すなわち、放電加工時のADGCによる電極の動作そのものを測定した結果からではなく、動作加工実験から得られた間接的な状況証拠から導き出された結論と考察である。結局、電極動作に関する議論を決着させるためには、放電加工時のADGCによる電極の動作を直接測定する方法を考案、開発する必要がある。

そこで、図6.17に示すような計測装置を考案した。上面に煙突状の構造をもつ筐体を製作し、型彫放電加工機の加工槽に設置する。この筐体にレーザ変位センサのヘッドを収納する。センサヘッドとコントローラを結ぶケーブルは、密閉処理により、空気および加工液の筐体内部への浸入を防止しつつ、筐体外部に出せるようにしている。一方、型彫放電加工機の主軸には、カップ形状の電極を装着したADGCが取り付けられている。さらに、カップ形状をした電極の内部には、軸が取り付けられている。この軸が筐体上部の煙突状構造物に挿入され、かつ、電極がこれを覆うように配置される。このとき、この軸の底面がレーザ変位センサの被測定体となる。このように配置された状態から、加工槽に加工液を満たすと、筐体内に空気が閉じこめられ、加工液は電極の底面からある程度の水位を保つことができる。また、筐体上部の煙突状構造物の周囲には、被加工物が設置されている。したがって、カップ形状をした電極の底面を放電加工面として利用し、6.4節で説明した方法で、加工動作実験を行えば、放電加工中のADGCによる電極動作を直接測定することが可能となる。

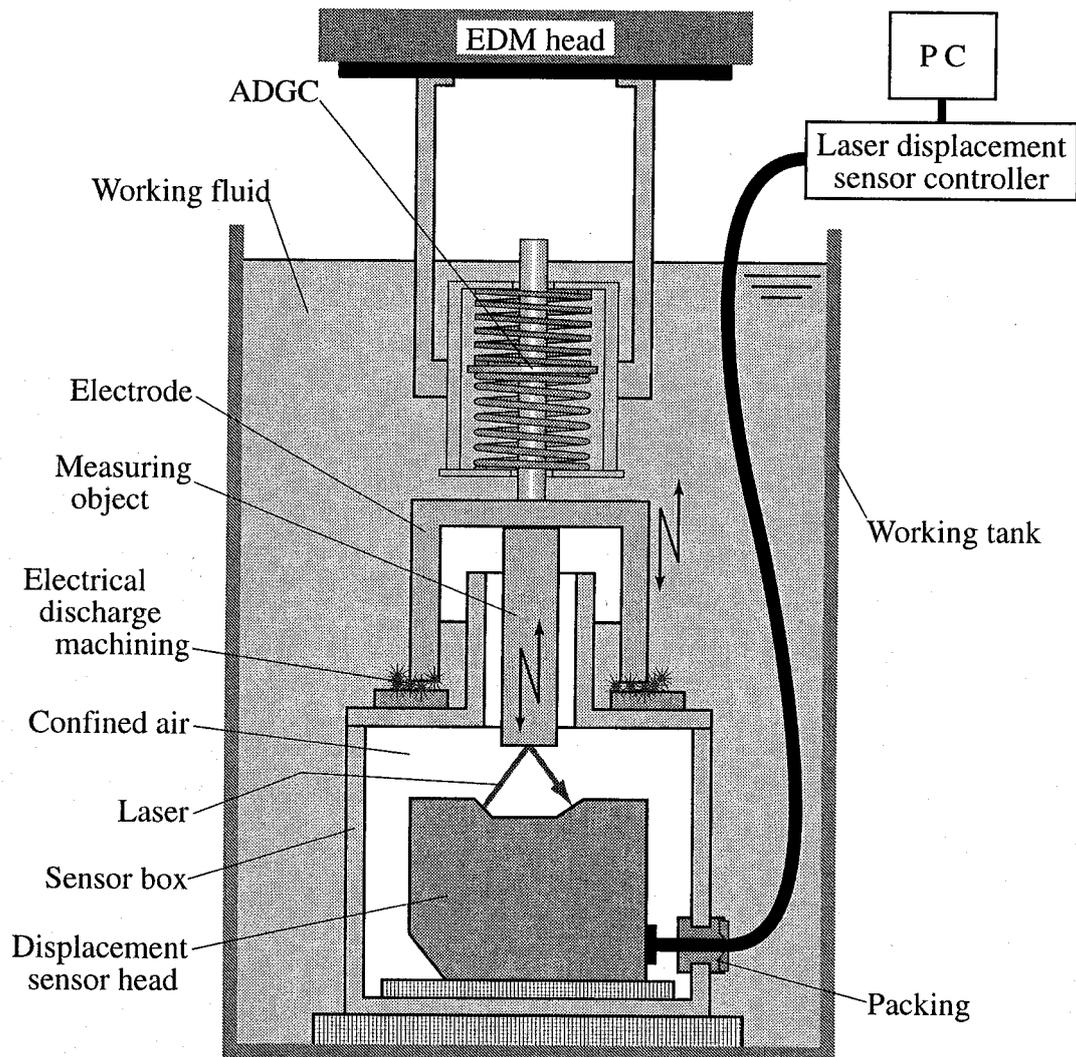


図6.17: 極間距離自動制御機構の電極動作インプロセス計測装置

このような測定装置を利用することによって、ADGCがどのように電極を動作させているかを直接評価できることになるとともに、ADGCに使用するバイアス式2方向性素子の最適化も可能となるであろう。

(2) ADGCの小型化

穴内面放電加工用電極運動機構や曲がり穴放電加工用電極送り機構にADGCを実装するためには、ADGCを小型化する必要がある。そこで、以下のような方法で、小型化を図る予定である。

第一に、バイアス式2方向性素子部分の小型化である。本章で開発したADGCの試験機に使用したばねは、3本のSMAばねと1本のバイアスばね

であり、そのばね種はともにコイルばねであって、しかも、機構的には並列に配置されていた。これを、SMAばねとバイアスばねをともに、1本の可能なかぎり小型のコイルばねとし、ADGCとしての動作を可能とする設計解を探索し、それらを同心円上かつ並列に配置することによって、小型化を目指す。あるいは、SMAばねとバイアスばねを、コイルばねではなく板ばねなど他の種類のばねにすることによって、小径化、薄片化を図る。この際、小型化されたばねの保持方法を考案する必要があるであろう。

第二に、ADGCの構成部品の設計改良である。本章で開発したADGCの試験機では、機構的に並列配置された3本のSMAばねを電氣的に直列接続するために、絶縁や配線に比較的大きな空間が占有された。しかし、これは、試験機の目的がADGCによる放電加工可能性の検証であって、試験機自体の設計の最適化や小型化が優先されたものではなかったからである。つまり、試験機自体の設計には改良の余地が残されている。よって、小型化を考慮に入れたADGCの設計を行い、小型化を目指す。

(3) 断面変化穴加工法および曲がり穴加工法への適用

穴内面放電加工用電極運動機構や曲がり穴放電加工用電極送り機構では、通常の型彫放電加工と比較して、電極の位置剛性が低くなる傾向になる。特に、曲がり穴加工法では、4.5.3小節で述べたように、放電加工条件によっては放電加工の安定性に大きく影響し、加工は可能であるものの、大幅に放電加工速度が遅くなるという現象が起こっている。そこで、曲がり穴放電加工用電極送り機構の圧縮コイルばねと電極の間に、ADGCを組み込むことによって、曲がり穴加工時の放電加工の安定性を確保でき、放電加工速度も維持できると考えている。

さらに、ADGCのもつ極間距離制御機能の性能を高くできれば、任意形状の曲がり穴を加工することができる曲がり穴加工システムの構築が可能になると考えている。

図6.18に、ADGCを応用した曲がり穴加工システムを示す。このシステムは、図5.25に示した実験装置の圧縮コイルばねと軸の間に、柔軟構造物を取り付けたものである。ただし、この柔軟構造物には、板ばねと軸受から構成されたいくつかの台車を取り付けられている。軸受は板ばねによって、曲が

り穴加工面に押し付けられており、柔軟構造物は、常に曲がり穴の中心付近に位置している。このような機構により、柔軟構造体は、型彫放電加工機の主軸の移動に同調して、曲がり穴内部を軸方向に滑らかに動作することができる。すなわち、主軸の移動と電極の運動が一对一に対応し、主軸による極間距離制御が電極においても実現できる。さらに、図5.25に示した実験装置と同様に、圧縮コイルばねの屈曲伸長動作は、リニアセンサ、コンピュータ、サーボモータにより繰り出し量を制御されるワイヤによって、主軸の移動に同調しながら制御される。つまり、圧縮コイルばねは、電極および柔軟構造体の運動軌跡を決定する方向舵のような役割を担う。このような機構により、曲がり穴形状の長距離化そして複数曲率化が可能になると考えている。

また、このシステムをさらに発展させ、将来的には、ADGCを具備したインチウォーム式の自走機構を開発し、この自走機構が材料中を任意の軌跡上を運動しながら、放電加工を行い、長く複雑な曲がり穴を加工することも考えている。

考案した自走機構の模式図を図6.19(a)に、自走機構を制御するシステムの構成を同(b)に、それぞれ示す。加工は自走機構の先端に搭載されたADGCによる放電加工で行う。自走機構の胴にあたる部分を圧縮コイルばねとし、これに複数のワイヤを取り付け、圧縮コイルばねに屈曲姿勢を保ちながら伸長させる。さらに、圧縮コイルばねに取り付けた圧電素子などのアクチュエータを利用した前後足を連動させることにより、自走機構にインチウォーム的な進行形態をとらせることができる。したがって自走機構は屈曲伸長動作を繰り返して、材料中を曲率のある穴を加工しながら進行できる。これによって、長距離の3次元任意形状をした曲がり穴の加工が可能になると考えている。

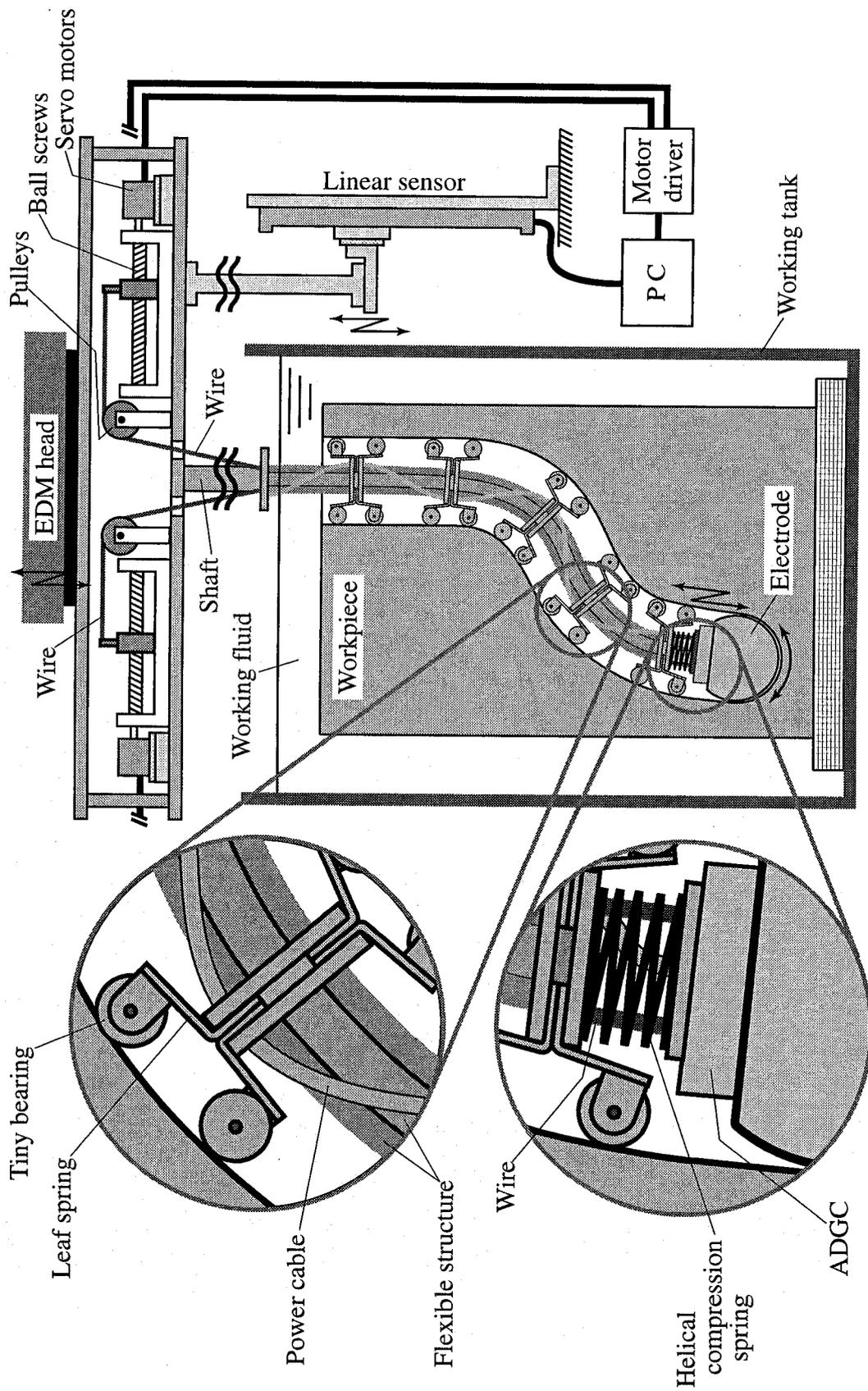
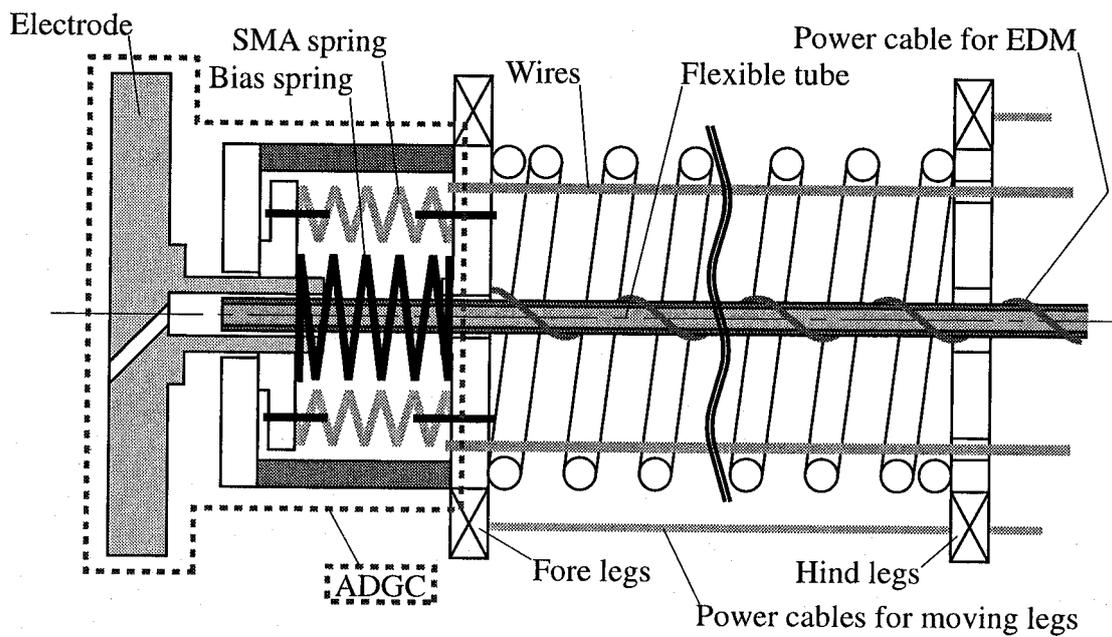
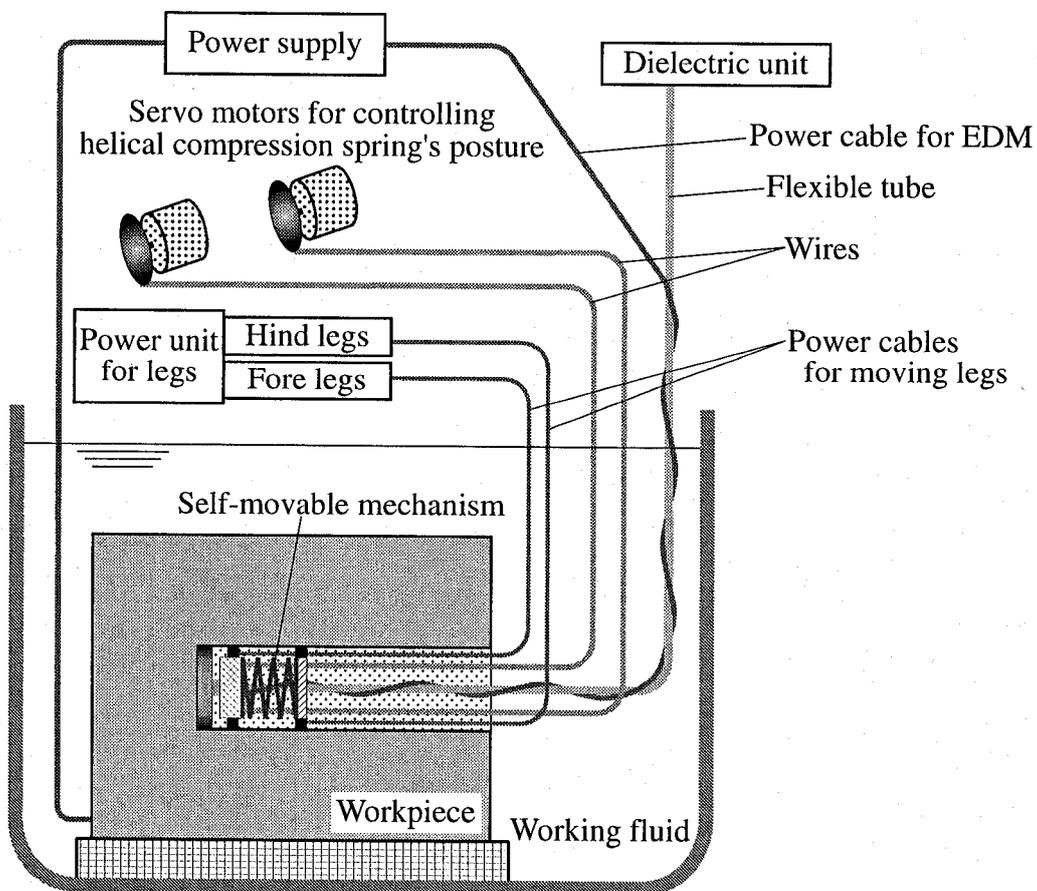


図6.18: 極間距離自動制御機構の応用した曲がり穴加工システム



(a) Self-movable machine



(b) System configuration

図6.19: 自走機構による曲がり穴加工システム

参 考 文 献

- [1] 舟久保熙康 編：形状記憶合金，産業図書 (1984)
- [2] 村上洋太郎 編：形状記憶合金とその使い方，日本工業新聞社 (1987)
- [3] 鈴木雄一：形状記憶合金の話，日本工業新聞社 (1985)

第7章

結 論

本研究では、従来、物体外部形状に限られると常識的に考えられてきた除去加工法の適用可能範囲を、物体内部形状にまで拡大させる方法を開発することを目的とし、その達成のための基本的な考え方として、加工可能状態にある除去加工法の工具を物体内部において様々な運動をさせることによって、物体内部形状を創成するという発想に至った。

この発想を具体化するべく、本研究では、使用する除去加工法を放電加工とした。したがって、工具とは電極を指し、加工可能状態とは、放電加工が維持されるように極間距離が常時適切に制御される状態を意味する。さらに、この状態の工具を物体内部において運動させ、そのときの電極運動軌跡の包絡形状が目標加工形状と一致させなければならない。この目標加工形状とする物体内部形状は、現在、実用化されている除去加工法により加工可能な唯一の物体内部形状といえる穴形状の拡張という観点から、断面変化穴形状と曲がり穴形状という高い自由度をもつ穴形状とした。

本研究は、以上に列挙した条件を満たす装置を開発すること、また、その改良を重ねることによって、従来の除去加工法では加工不可能とされてきた物体内部形状の創成に成功し、なおかつ、さらに複雑な物体内部形状についても、開発した装置の拡張によって実現できる可能性があることを示した。

以下に、本研究で得られた結果を具体的に示す。

第1章は序論であり、金属機械部品の加工法の現状と除去加工法で加工できる形状の限界について指摘し、その限界を打破しようとする本研究の目的について述べた。次に、本研究の目的を実現する方法を考案するための基本的な考え方を述べ、創成を目指す目標加工形状と各方面における目標加工形状の需要、および、本研究で使用する放電加工の基礎と選定理由について解説した後、既往の研究について紹介し、本研究の位置づけについて言及した。

第2章では、本研究において目標加工形状とした二種類の物体内部形状のうち、断面変化穴形状の加工法の開発を目指し、放電加工機の主軸の直線運動を電極の回転運動に変換する装置、すなわち、穴内面放電加工法電極運動機構について説明した。まず、この装置の構造と動作過程を述べた後、動作過程について幾何学的に検討し、電極が加工可能状態で運動することを証明した。それに加え、実際に製作した実験装置を用いた動作実験からも、ほぼ理論どおりに動作が変換されることを確認した。次に、本実験装置を用いて加工実験を行った結果、従来の除去加工法では実現不可能である、半円形状の空間を内面にもつ穴形状、および、フィンの形成された半円形状の空間を内面にもつ穴形状の加工に成功した。これにより、考案した方法が断面変化穴形状の創成に有効であることを示した。

第3章から第5章では、本研究において目標加工形状とした二種類の物体内部形状のうち、曲がり穴形状の加工法の開発を目指し、放電加工機の主軸の直線運動を電極の曲線運動に変換する装置、すなわち、曲がり穴加工用電極送り機構について説明している。各章で得られた結果について以下に示す。

第3章では、簡単な機械部品で構成された単純な機構により、主軸の直線運動を電極の曲線運動に変換する装置について説明した。はじめに、この装置の構造と動作過程を述べ、実際に製作した実験装置を用いた動作実験によって、主軸の直線運動が電極の曲線運動に変換されることが示された。次いで、本実験装置を用いて加工実験を行った結果、動作実験で得られた曲線状の電極運動軌跡と同様の形状をした曲がり穴が加工されることを確認した。

第4章では、前章で開発した装置の問題点を解消するための改良を施した装置について説明した。本章における改良の目標は、加工可能な曲がり穴形状の距離を延長することであった。はじめに、改良した装置について、その構造と動作過程を述べ、装置の構造上の改良点とその効果について説明した。次に、実際に製作した改良後の実験装置を用いて動作実験を行い、その結果から、曲がり穴形状に相当する滑らかな電極運動軌跡が延長されていることを確認した。次いで、本実験装置を用いて加工実験を行ったところ、動作実験で得られた電極運動軌跡のなす包絡形状を加工できることを示した。よって、本章の目的であった加工可能な曲がり穴形状の距離延長を達成することができた。さらに、この距離の延長された曲がり穴形状と本実験装置を応用することにより、従来の除去加工法では実現が難しい、なす角 90° の位置に加工された直穴の底を曲がり穴で連結したL字形曲がり穴形状の創成に成功した。

第5章では、前章まで開発した装置に残っていた問題点を克服するために、さらに改良を行った装置について説明した。本章における改良の目標は、加工可能な曲がり穴形状の曲率を多様化することであった。まず、改良した装置について、その構造と動作過程について述べた後、本装置の動作過程における幾何学的な検討を行った。その結果、本装置によって、様々な電極運動軌跡すなわち曲がり穴形状が実現できることを理論的に証明した。次に、このような実験装置を実際に製作し、これを用いて動作実験を行った結果、多様な電極運動軌跡を実現することができた。この動作実験の結果から得られたいくつかの電極運動軌跡について、加工実験を行ったところ、本実験装置によって、様々な曲率をもつ曲がり穴形状が加工できることを示した。この結果から、本章の目的であった加工可能な曲がり穴形状の曲率多様化を実現することができた。さらに、多様化によって加工可能となったある曲がり穴形状を応用することにより、従来の除去加工法では実現が困難である、平行に加工された2本の直穴の底を曲がり穴で連結したU字形曲がり穴形状、さらに、ねじれの位置になす角 90° の位置に加工された2本の直穴の底を曲がり穴で連結した3次元曲がり穴形状の創成に成功した。

第6章では、本研究において目標加工形状とした二種類の物体内部形状の創成を実現するために、前章までに説明されてきた穴内面放電加工用電極運動機構お

よび曲がり穴放電加工用電極送り機構を運用する際、その機能強化を目的として、放電加工安定性を維持するあるいは向上させる機構、すなわち、極間距離自動制御機構について説明した。はじめに、この機構に使用するアクチュエータについて解説した後、本機構の構造と動作原理を述べた。次に、実際に製作した本機構の試験機を用いた基礎的な動作実験を行い、この試験機に搭載されたアクチュエータが正常に動作していることを確認した。さらに、この試験機を用いて、実際に放電加工実験を行った結果、本試験機が極間距離を制御することによって、放電加工を安定的に維持させることができた。これにより、本機構が極間距離を自動的かつ自律的に制御する能力を有することを証明した。

謝 辞

大阪大学大学院工学研究科電子制御機械工学専攻 教授 竹内芳美 先生には、大阪大学に赴任される前の電気通信大学電気通信学部知能機械工学科 教授として教鞭を取られていた時代から、長年にわたり、研究活動の基本から研究者としての素養や技術そして生き方といったことまで、公私の別なく様々な面で直接および間接的にご指導およびご支援をいただきました。ここに心から厚く御礼申し上げます。

また、論文の審査にあたり、懇切丁寧なご指導と示唆に富む有益なご助言をいただきました大阪大学大学院工学研究科 教授 花崎伸作 先生，同 教授 三好隆志 先生，同 助教授 小野里雅彦 先生に甚大なる謝意を表します。

本研究を進めるにあたり、電気通信大学に放電加工機が設備されていない時代に、外部の人間である私や学生に自社の設備および放電加工機の利用をお認めいただき、加えて、放電加工および放電加工機の取扱いの基礎から応用までご教示いただきました株式会社牧野フライス製作所 常務取締役 R&D センタ長 佐藤 眞 氏，取締役 EDM 開発本部長 勝俣勝善 氏，EDM 開発本部 主任 井上尚人 氏，同 主任 中尾高史 氏，同 橘 敬志 氏，同 渡辺康夫 氏，そして、様々な形で支援していただいた御社の皆さまに深く感謝申し上げます。

さらに、形状記憶合金に関しては素人同然の私に、的確なご助言と丁寧なご対

応をいただき、かつ、形状記憶合金製の引張コイルばねをご提供いただきました古河電工株式会社 自動車技術開発センタ長 宮原真人 氏，同 横浜研究所 機能材料研究室 水戸瀬賢悟 氏に深く感謝申し上げます。

本研究で考案した装置を製作するにあたり、工作機械の取扱いのご教示や部品の製作、および、製作の観点からの設計に関するご助言をいただきました電気通信大学 技官 中澤計勝 氏，村上恭一 氏，齋藤 悟 氏，荒川欣吾 氏に御礼申し上げます。

電気通信大学電気通信学部知能機械工学科竹内・森重研究室における研究生生活では、学生そして助手として在籍してきた現在までに、多くの先輩そして後輩の皆様いろいろな面でお世話になりました。特に、私の学生時代に研究室の助手であられた浅川直紀 先生（現金沢大学工学部人間・機械工学科 助教授），同じく研究室の博士後期課程に在籍され、現在は研究室の講師である森重功一 先生に深謝申し上げます。さらに、本論文に掲載された研究に直接携わり、その推進にご協力いただいた学士 近藤和芳 氏，学士 石切山 健 氏，学士 望月雄一 氏に感謝申し上げます。加えて、本研究のさらなる発展に寄与した、あるいは、しようとしている学士 中嶋洋介 氏，学士 細田寿幸 氏，大学院博士前期課程 2 年生 小暮成一 氏，同 福田孝弘 氏，学部 4 年生 三宅康仁 氏，同 増田裕貴 氏，同 前田淳一 氏に感謝申し上げるとともに、さらなる飛躍を期待している。また、直接、間接を問わず、本研究室にゆかりのある皆様に心より感謝申し上げます。

また、本論文に掲載された研究の一部は、文部省科学研究費補助金（奨励研究 (A) 12750094）および財団法人 三豊科学技術振興協会 平成 11 年度研究助成金の支援を得て、実施されたことを付記し、謝意を表します。

最後に、様々な形で最大限の協力と理解をしてくれた家族、特に、両親に改めて心からの感謝を表します。

2002年11月

石 田 徹

関連論文の公表状況

1. 学術論文（査読付き）

- 1) 石田 徹, 竹内芳美：自走式放電加工機構による曲がり穴加工 —電極間距離の自動制御機構—, 精密工学会誌, **65**, 2 (1999.2) 245-249.
(第6章の内容に関連)
- 2) 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, **65**, 7 (1999.7) 982-986.
(第3章の内容に関連)
- 3a) 石田 徹, 近藤和芳, 竹内芳美：曲がり穴放電加工用電極送り機構の開発 —L字形曲がり穴加工—, 精密工学会誌, **66**, 12 (2000.12) 1932-1937.
(第4章の内容に関連)
- 3b) T. Ishida and Y. Takeuchi : L-Shaped Curved Hole Creation by Means of Electrical Discharge Machining and an Electrode Curved Motion Generator, Int. J. Advanced Manufacturing Technology (IJAMT), Springer-Verlag, **19**, 4 (2002.3) 260-265.
(第4章の内容に関連)
- 4) 石田 徹, 竹内芳美：スライダクランク連鎖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, **68**, 2 (2002.2) 206-210.
(第5章の内容に関連)
- 5) 石田 徹, 望月雄一, 竹内芳美：往復スライダクランク機構を用いた穴内面フィン放電加工, 精密工学会誌, **68**, 5 (2002.5) 715-719.
(第2章の内容に関連)

2. 国際会議プロシーディングス（査読付き）

- 1) **T. Ishida** and Y. Takeuchi : Curved Hole Machining by Means of Electrical Discharge Phenomena and Electrode Feed Mechanism, Proc. of 2000 Japan-USA Symp. on Flexible Automation (2000JUSFA), The Institute of System, Control and Information Engineers (ISCIE) & The Dynamic System and Control Division of American Society of Mechanical Engineers (ASME), Ann Arbor, Michigan, USA (2000.7.26) 1283-1288.
(第3章, 第4章の内容に関連)
- 2) **T. Ishida** and Y. Takeuchi : Development of Automatic Discharge Gap Controller for Curved Hole Machining, Proc. of 13th Int. Symp. for Electromachining (ISEM XIII), International Institution for Production Engineering Research (CIRP), Bilbao, Spain (2001.5.9) 63-73.
(第6章の内容に関連)
- 3) **T. Ishida** and Y. Takeuchi : U-shaped Curved Hole Creation by Means of Electrical Discharge Machining, Initiatives of Precision Engineering at the Beginning of a Millennium (Proc. of 10th International Conference on Precision Engineering (10th ICPE)), Japan Society for Precision Engineering (JSPE), Kluwer Academic Publishers, (2001.7) 214-218.
(第5章の内容に関連)
- 4) **T. Ishida**, Y. Mochizuki and Y. Takeuchi : Fin Fabrication inside a Hole by Means of Electrical Discharge Machining and Reciprocating Block Slider Crank Mechanism, Proc. of 2002 Japan-USA Symp. on Flexible Automation (2002JUSFA), The Institute of System, Control and Information Engineers (ISCIE) & The Dynamic System and Control Division of American Society of Mechanical Engineers (ASME), Hiroshima, Japan (2002.7.15) 349-355.
(第2章の内容に関連)

著 者 略 歴

石 田 徹 (いしだとおる)

- 1972年5月 宮城県仙台市に生まれる
- 1991年3月 東京都立 西高等学校 卒業
- 1992年4月 電気通信大学 電気通信学部 機械制御工学科 入学
- 1996年3月 電気通信大学 電気通信学部 機械制御工学科 卒業
- 1996年4月 電気通信大学大学院 電気通信学研究科
機械制御工学専攻 博士前期課程 入学
- 1998年3月 電気通信大学大学院 電気通信学研究科
機械制御工学専攻 博士前期課程 修了
- 1998年4月 旭硝子株式会社 入社 (高砂工場 管球硝子部 製造課)
- 1999年2月 旭硝子株式会社 退社
- 1999年4月 電気通信大学 電気通信学部 助手 (知能機械工学科)
現在に至る