

## ワイヤ放電研削による細軸加工とその応用

Wire Electro-Discharge Grinding for Micro-Machining

増 沢 隆 久\*・藤 野 正 俊\*

Takahisa MASUZAWA and Masatoshi FUJINO

直径 200  $\mu\text{m}$  以下数  $\mu\text{m}$  までの極細軸を精密に加工する方法として開発されたワイヤ放電研削法について、その加工原理と特徴、加工例等について解説する。

## 1. はじめに

微小穴放電加工のための工具電極、微小穴打ち抜き用のポンチ、液体金属イオン源のエミッタ電極などでは、数  $\mu\text{m}$  から数十  $\mu\text{m}$  といった極めて細い径の軸成形が必要である<sup>1)~(4)</sup>。こうした細軸加工の要求は今後ますます高まっていくと予想される。しかし、軸径の減少により機械的強度は著しく低下するため、刃物との直接接触を伴う機械的加工法（切削、研削など）では工作物破損の危険度が高い。また、強度や機能上の要求から、段付き、テーパ等の形状が必要な場合も多いが、こうした局所の微細構造の加工は刃物や砥石の微細形状成形が必要となり、容易に実現できない。特に、製品精度の絶対値が小さくなるため、製品の精度保証が難しくなる。

上記のような問題点のうち、機械的強度に関する部分は、放電加工を適用することによりほぼ解決できることは明らかである。したがって、微小寸法の軸加工においては今後放電加工が有力な手段となることが予想される。このような微細軸の放電加工を実現するための手法として、ワイヤ放電研削法（Wire Electro-Discharge Grinding, 略して WEDG）を新たに開発した<sup>5)~(8)</sup>。これにより、従来熟練技能にたよらざるをえなかった微細軸の成形加工が極めて容易に行えるようになった。また、微細限界に優れていることや柔軟な適応性からみて今後大きく発展するものと期待されている。以下に本法の概要および加工例、応用例等について解説する。

## 2. ワイヤ放電研削法の概要

## 2.1 放電研削とは

放電研削という用語は、かなり以前から、特定の形態の放電加工法を表すものとして定着している<sup>9)</sup>。よく似た用語である電解研削が、電解加工と機械的な研削加工の複合加工の意味にも広く用いられているのに対し、放

電研削には従来より複合加工の意味合いは無い点に注意しなければならない。つまり、放電研削とは、砥石を用いた研削の砥石を工具電極に置き換えた形で行われる、純然たる放電加工を意味している。したがって加工原理は放電加工そのものであり、加工形態として、円筒研削盤や平面研削盤、綫形研削、ベルト研削などと似ているものを指す。

放電研削が通常の形彫り放電加工と異なる点は、工具電極と工作物が加工中にある程度大きな速度で相対運動をしていることである。したがって、加工くずの排出という問題が、通常の放電加工ほど深刻ではない。

## 2.2 微細軸の放電研削

さて、本題の微細軸の加工であるが、軸を加工する方法として従来代表的なものは、切削と円筒研削である。切削の場合は工作物が回転し、刃物は切り込みのみを与えられる。研削の場合は通常工作物と砥石が共に回転する形で行われる。

それでは、微細軸の加工を放電加工で行うとしたらどうすれば良いであろうか。

一つは切削と同じ形態で、刃物の代わりに工具電極を取りつけ、工作物を回転させながら放電させ、工具電極を送り込んでいく方法が考えられる。

もう一つは、円筒研削と同じ形態で、砥石の代わりに工具電極（たとえば円盤状の）を取りつけ、工作物と電極を共に回転させながら放電加工を行う方法が考えられる。

しかし、放電加工では工具電極の消耗が、切削工具の磨耗に比べけた違いに大きいので、切削の刃物のように鋭い先端で加工するのは得策ではない。また材料に切り込んでいくわけではないので、先端が鋭い必要もない。

また、研削の形をとる場合は砥石の代わりに工具電極は、回転していなくても加工ができる。

以上のような加工現象による固有の事情から、放電加工で細軸を加工する方法として採られるようになったの

\* 東京大学生産技術研究所 第2部

が、図1に示すような形態である<sup>2),10)</sup>。

回転している被加工軸に対し、消耗しにくい材料(たとえば銀タングステンなど)でできたブロックの平坦な面をあて、放電させながら所定の切り込みとなるまでブロックを送り込めば、細軸を任意の寸法に加工することができるわけである。

一見、ハールバイトによる切削に似ているが、電極の平坦な面で加工しているので、研削のようでもあり、いわば、旋削と円筒研削の中間的な独特の形態になっている。したがって放電切削と呼ぶことも可能であろう。しかし、加工局部に着目すると、ある面積内の材料がまとめて除去されるのではなく、分散的に除去されていく。筆者らはこの点で、より研削に近いと判断し、一応放電研削の呼称のほうを採ることにした。

なお、放電加工では図2のように穴のあいた電極を用いて軸加工を行うことも可能であるが、詳細は他の機会に譲りたい。

### 2.3 砥石による研削との違い

通常の研削と放電研削との基本的な違いは、通常の研削では砥粒が被加工材を機械的な力によって削り取るのに対し、放電研削では放電による加熱で溶融・除去していくことである。この違いから、装置に要求される機能も異なったものとなる。放電研削装置が通常の研削装置と異なる点は次のようなものである。

- 1) 砥粒が不要である(砥石の代わりに金属等の導電体の電極を用いる)
- 2) 電極(砥石)が高速で回転する必要はない
- 3) 装置の剛性はあまり高い必要はない
- 4) 電極(砥石)と工作物に給電する必要がある
- 5) 電極(砥石)の消耗が大きいが、ドレッシングと砥石交換の機能を強化する必要がある

以上のように、どちらかというとな通常の研削より条件

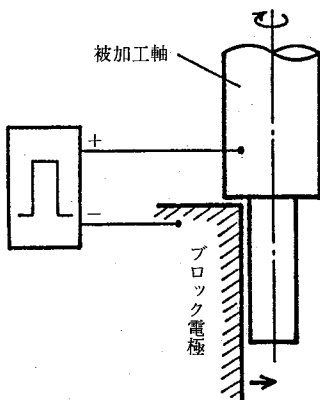


図1 放電加工による細軸の加工  
(ブロック電極による放電研削)

はゆるやかであるが、電極が消耗しやすいという点が実用面で問題になる。

### 2.4 ワイヤ放電研削の原理と特徴

上述のように、現在採用されているマイクロ放電研削の様式は、電極としては固定したブロックを用い、工作物のみを回転させて行うのが普通である。

しかし、このようにしてマイクロ加工に適用する場合は、問題点として、仕上がり寸法確認の方法が難しいことが挙げられる。前章に述べたように、いくら消耗しにくい材料を選んだとしても、ブロック電極の消耗をゼロにすることはできないので、予定の位置までブロック電極を送り込んだときに、被加工軸の仕上がり寸法はブロックの消耗分だけ大きくなってしまふ。したがって、工作物を装置から外して顕微鏡等により測定を行う作業を繰り返して寸法を追い込んでいくことが必要となる。

このような作業が必要であるということは、生産性の低下だけでなく、加工にある種のテクニックが要求されることを意味しており、熟練者でなければうまく使いこなせないという結果を招いている。

本所では、このような電極消耗の問題を解決する一つの方法として、従来の金属ブロックの代わりに走行するワイヤを電極として用いる方法を新たに開発した。これがワイヤ放電研削法(WEDG)である。

図3に示すのが、ワイヤ放電研削の原理図である。図1と対比させるとわかるように、従来電極として用いられていたブロックに代わり、直径 $50\mu\text{m}$ ~ $200\mu\text{m}$ の細い金属線(ワイヤ)が用いられる。ワイヤは紙面に垂直な方向にゆっくりと走行し、被加工軸は回転しながら軸方向に送り込まれる。

この方法ではワイヤ放電加工と同様、ワイヤが連続的に繰り出されるため、常に新しい電極面で加工していることになり、電極消耗が実際には存在しても、加工精度に及ぼす影響は無視できるほど小さくできる。

このように、WEDGでは加工中においては、ワイヤの端面(被加工軸の中心線に最も近い面)の位置は変動し

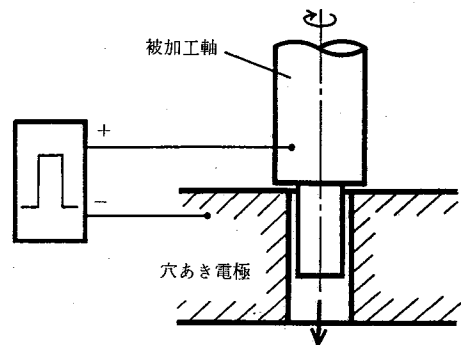


図2 穴あき電極による細軸の加工

ない。したがって、最初にワイヤを所定の位置にセットすれば、軸径は自動的に希望の値に仕上がるわけである。すなわち、従来の方法のように、測定を繰り返しながら希望寸法に近づけていくという過程を経る必要がない。

ここまでの説明では、単にワイヤ放電加工 (WEDM) を回転する軸の加工に適用したもののようにみえるが、WEDG と WEDM には大きな相違点がある。

図 4 a に示すように、WEDM ではワイヤは 2ヶ所のワイヤガイドにより張られた状態で走行している。この場合、ワイヤの振動や、ガイドによる (またはポピンに巻かれているときからの) ワイヤのくせなどによって、ワイヤの空間的位置が数  $\mu\text{m}$  から数十  $\mu\text{m}$  変動することが避けられない。ワイヤ位置の変動は、2倍の大きさで被加工軸の仕上がり直径の変動となるので、このままでは数十  $\mu\text{m}$  の直径の軸を加工する方法としては使いものにならない。

一方、WEDG では同図 b のように、ワイヤがワイヤガイドに接している位置で加工を行う。したがってワイヤがガイド面から離れないかぎりには上のような精度低下原因を完全に排除することができる。このようなことができるのは、ここで目的としている加工寸法が極めて小さ

く、ワイヤ放電加工のように深く切り込んでいく必要がないからである。

上のような原理から、ワイヤ放電研削は次のような特徴を有する。

- 1) 自動化に適している
- 2) 熟練が不要である
- 3) 製品の軸に沿った直径変動が少ない
- 4) 非常に細い軸が加工できる
- 5) 端面を平らにする加工ができる
- 6) テーパー加工ができる

以下にそれぞれの理由を簡単に述べる。

1), 2): 従来の方法では図 5 a のように、何回か寸法測定を繰り返すことによりブロック電極の消耗に対する補正を加えなければならない。軸径が細いため加工位置での測定は困難であるから、軸または軸の保持具を取り外して顕微鏡等の測定装置に運び、測定することになる。通常は、荒取り、中仕上げ、仕上げと段階を踏んで加工するので、測定作業が頻繁に入ることになり、自動化が難しい。一方 WEDG では同図 b のように単純化され、荒加工から段階を追っての加工も NC により自動化することができる。また、準備段階においても、従来法ではブロックの成型、取り付け等における作業者の腕の良し悪しがあるがそのまま製品精度に反映したのに対し、WEDG では市販のワイヤをガイドの溝にかけるだけであり、熟練技能に類するものはほとんど必要ない。

3): 従来法においては、ブロック面の垂直度が悪ければ製品軸はテーパーになり、ブロック面の平坦度が悪ければ製品軸にうねりが生じる。また、同時に軸の全長にわたって加工するため、放電間隙のむらが生じやすく、これも製品軸のうねりの原因となる。一方、WEDG ではこれらの要因が無いいため製品の軸に沿った直径の変動を

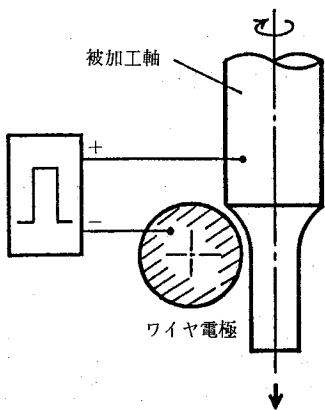


図 3 WEDG (ワイヤ放電研削) の原理

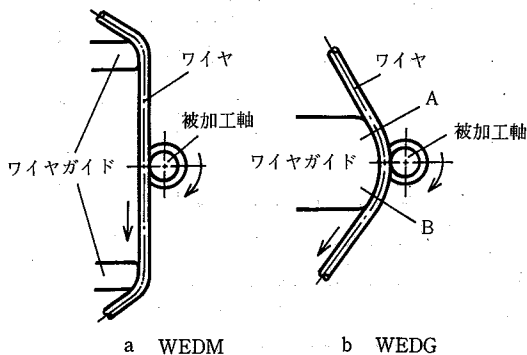


図 4 WEDM と WEDG の違い

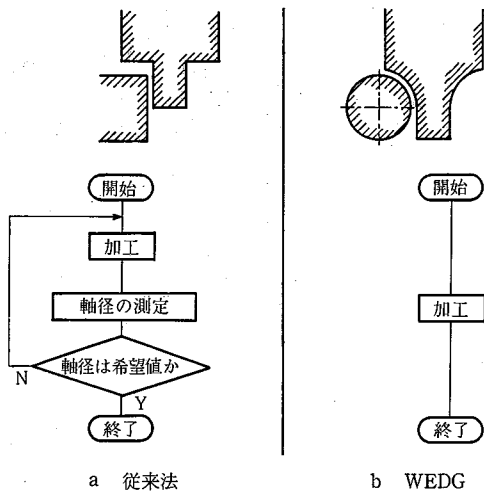


図 5 従来法と WEDG のプロセスの違い

小さくすることができる。ただし、ワイヤの直径にむらがあるとそれが製品軸のうねりとなって現れるが、ワイヤ放電加工用の良質のワイヤを用いた実験結果からみればかぎりではその影響は十分小さい。

4) : 従来法では上述のようにうねりが発生しやすい。また、全長にわたる放電のため、放電による反力が大きくなり、軸がたわんだり振動したりしやすい。そのため、今までのところ直径 10 μm 程度が細さの限界である。

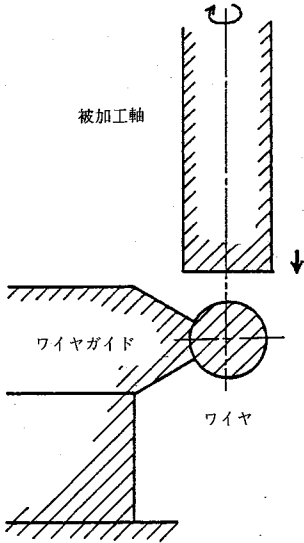


図6 軸先端を平らに加工する方法

る。WEDG ではうねりの発生も少ないし、常に太い側のつけ根の部分でのみ放電するので、反力そのものも小さく、かつその影響も小さい。したがって成形可能な直径の限界も向上する。

5) : 図6に示すように、被加工軸の中心線がワイヤの断面中心を通る位置に設定して加工を行うと、軸の先端を平らに加工することができる。従来の方でも、よく仕上げたブロック上面で加工すれば同様な加工は行えるが、やはりブロックの消耗があるので、良い平面を得るのは難しい。

6) : 通常の軸加工時はワイヤの位置は固定されて

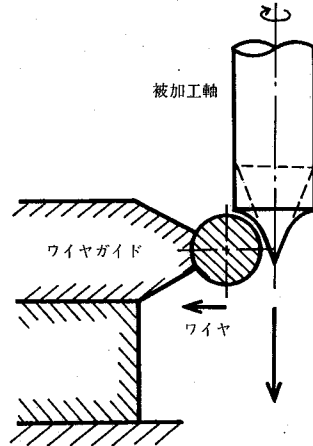


図7 テーパー軸の加工方法

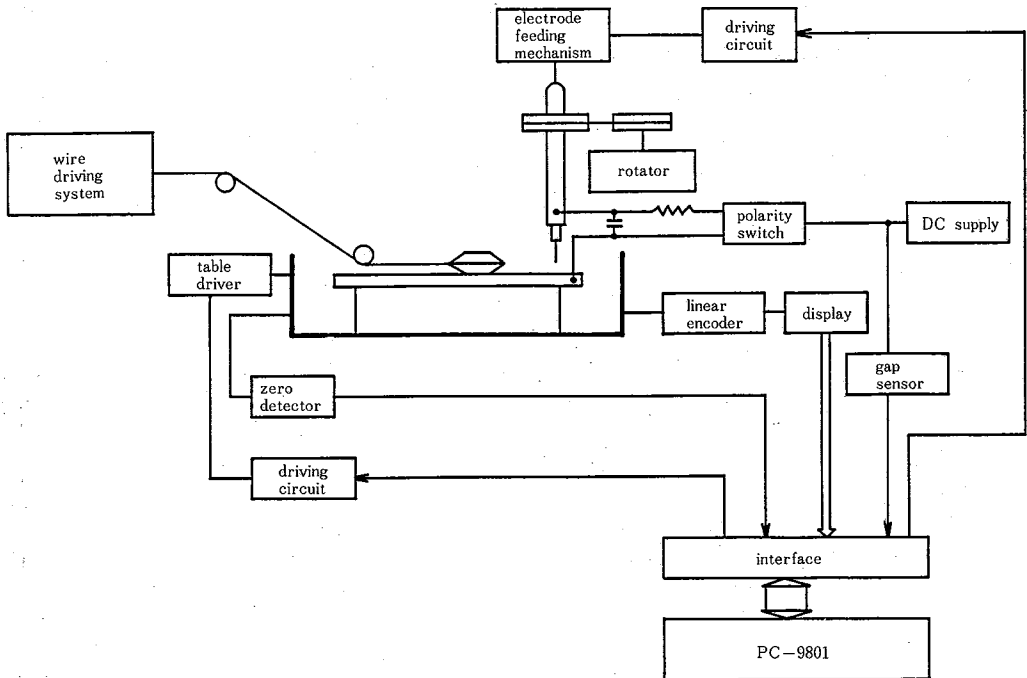


図8 WEDG装置の構成

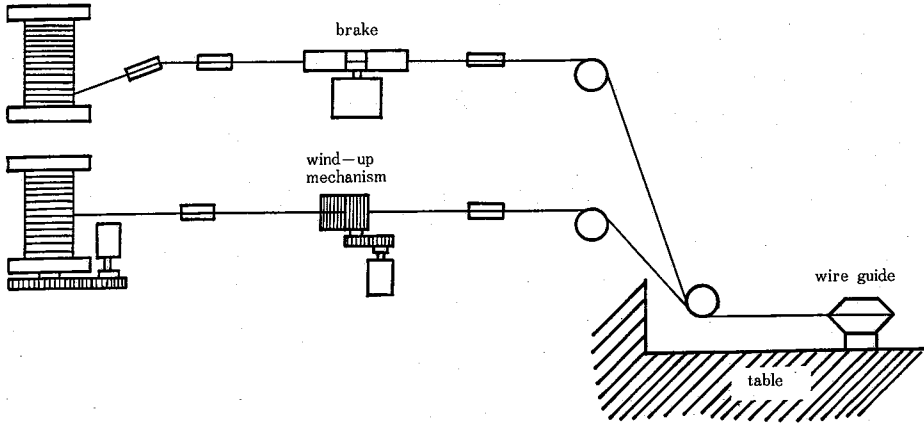


図9 ワイヤ走行装置

いるが、これを図7のように軸の送り込み量に比例して水平方向に移動させれば、任意のテーパを持った軸の加工が可能である。さらに、ワイヤの移動量を軸の送り込み量の適当な関数にしてやれば、複雑な軸径変化を持った形状の加工も可能になる。

3. ワイヤ放電研削の装置と加工例  
および穴加工への応用

3.1 加工装置

本研究所において試作した WEDG 装置の構成を図8に示す。

ワイヤは、超硬合金でできたそろばん珠状のワイヤガイドの縁に沿った浅い溝にかけられ、ワイヤ走行装置(図9)により一方向に一定速度で走行する。被加工軸は回転しつつ軸方向に送り込まれ、走行するワイヤの外側部分により放電加工される。放電加工のギャップを保つためのサーボ制御は被加工軸の送り込み機構による縦方向の運動として与えられる。加工部分全体は加工液の中に浸漬される。(放電エネルギーは通常微小なので、流しかけとすることも可能である)

加工軸の半径はワイヤ最外辺と被加工軸の中心線との距離により決まるが、本装置では被加工軸の中心線位置は固定とし、ワイヤガイドを固定したテーブルをDCサーボモータで移動させることにより、加工軸径の設定を行っている。また、このテーブルの座標原点を決めるために、繰り返し精度 0.1 μm の近接スイッチを用いている。このように座標に絶対原点を持たせると、いったん求めたテーブル座標と加工軸径の関係はシステム全体の電源を落としても変化しないため、仕上がり軸径の管理が容易となる。

3.2 加工例

WEDG の加工精度を示すものとして、加工された軸の長手方向の直径変化と、システム電源を ON に保ったとき(つまり原点の検出し直しを行わない場合)の繰り返し

表1 加工後の直径の測定例 (単位 μm) 被加工材料: タングステン, 加工長さ(平行部): 300 μm, コンデンサ容量: 22 pF

試料番号	先端からの距離 (μm)		
	20	150	280
1	34.0	33.8	33.7
2	33.5	32.7	33.0
3	33.8	34.0	33.8

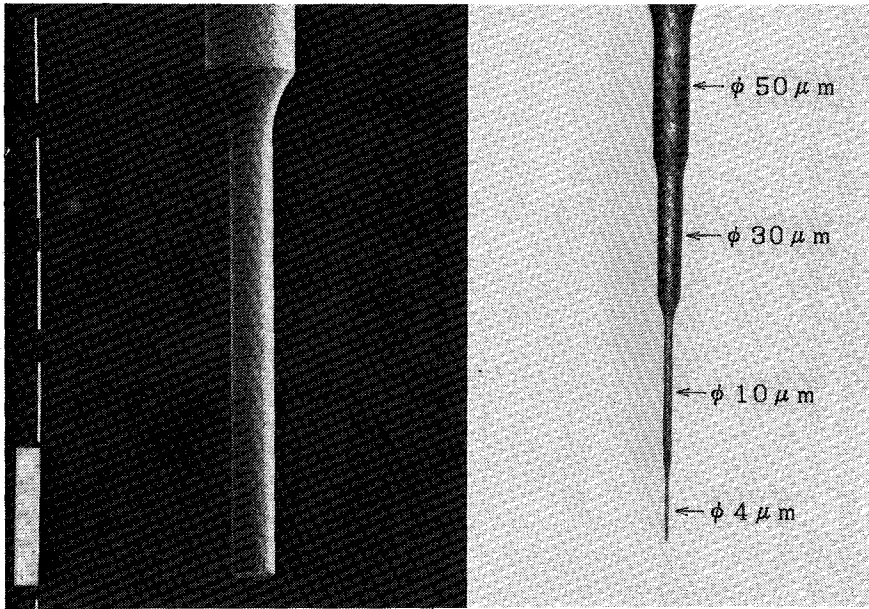
し精度を調べた結果の一例を表1に掲げる。表は、φ40 μm の状態から φ30 μm まで仕上げたときの直径を軸芯に沿った3ヶ所で測定したものである。これからわかるように、軸芯に沿った直径変動は±0.5 μm 以下と極めて良好であり、3回の繰り返し加工(1回ごとに材料は交換している)での直径の変動も±1.5 μm 以下と比較的良好な値である。

以上の結果から、直径の繰り返し誤差が設定寸法に対し±1 μm 以内で、しかも素材の取り付けから加工完了まで一切の調整、測定等の作業を行わないで数十 μm の径の細軸加工が可能であると考えられる。ただし、実用的な見地からは、座標原点の検出の精度が重要な意味を持つ。システムの電源を ON にしたとき、最初に行うのが原点検出であるが、この際の誤差はそのまま加工軸半径の誤差となる。したがって、原点検出精度が±0.5 μm 以内でなければ上記の繰り返し精度は保証されないことになる。

WEDG によって行ったいくつかの加工例を図10に示す。

a は超硬合金を直径 50 μm に仕上げた例で、端面は平行に加工してある。

b はタングステンを加工した例で、直径 4 μm で長い平行部を持つ極細軸が加工されている。なお、この例では



a 超硬合金のストレート加工 (先端平面仕上げ)      b タングステンの段付き加工 (極細仕上げ)

図 10 WEDG による加工例

直径  $30 \mu\text{m}$  の部分と  $50 \mu\text{m}$  の部分は荒加工の条件で加工されているため、図 a と比べ加工面が粗くなっている。

### 3.3 ワイヤ放電研削の応用

微小穴の加工には多くの点で放電加工が有利であるが、細い電極の作成、取り付けが難しく、従来かなりの熟練を要した。ワイヤ EDG では、細軸加工を全く熟練なしに行えるので、これを応用することで微小穴の放電加工作業を非常に容易にすることができる。

上記の実験装置を用いて、穴加工用の電極をワイヤ EDG で成形し、そのまま工作物を電極下に移動し、極性を逆転して加工を行うことができることが確認されている。この場合、電極の素材と工作物をそれぞれチャックとテーブルに取り付けた後はすべてキーボードからのデータ入力のみ行えばよい。したがってワイヤ EDG を適用することで、微小穴の放電加工の全自動化が極めて現実的なものとなった。

マイクロ放電加工用電極のほかにも、先端に段付きやテーパ等のある、やや複雑な形状の細軸加工は、このワイヤ EDG を適用することで、熟練なしに精度良く行えるため、今後広い分野での応用が期待される。

## 4. む す び

走行ワイヤを電極として用いる、細軸の放電加工法として新たに開発した WEDG 法 (ワイヤ放電研削法) について解説した。この方法は電極消耗を考慮する必要がないため、NC による自動化に適しており、直径  $10 \mu\text{m}$  以下の極細軸の加工も熟練なしに行える。放電現象を利用

した加工法であるから、加工できる材料は導電性のものに限られるが、今後、直径  $200 \mu\text{m}$  以下数  $\mu\text{m}$  までの細軸加工の領域における NC 旋盤あるいは NC 研削盤としての役割を果たしていくものと思われる。

(1985 年 8 月 16 日受理)

### 参 考 文 献

- 1) 佐藤健夫, 丸山祐二; 微小穴の放電加工, 昭和 55 年度精機学会秋期大会学術講演会論文集, 137(1980)
- 2) 鈴木靖夫, 江口嘉夫; 微細精密放電加工の研究, 昭和 58 年度精機学会春期大会学術講演会論文集, 575(1983)
- 3) 河田耕一, 水谷武, 松下久登, 佐藤健夫, 丸山祐二; 微小穴放電加工, 昭和 58 年度精機学会秋期大会学術講演会論文集, 361(1983)
- 4) 加賀谷孝三郎, 大石義為, 矢田慶治; 加工液に水を用いた放電微細加工, 東北大学科学計測研究所報告, 33, 1, 177-189(1984)
- 5) 増沢隆久, 藤野正俊, 小林一也; マイクロ放電加工の高精度化 (第一報), 昭和 59 年度精機学会秋期大会学術講演論文集, 359(1984)
- 6) 増沢隆久, 藤野正俊, 小林一也, 鈴木隆之; ワイヤ放電研削によるマイクロ加工, 電気加工技術, 8, 23, 1-5(1985)
- 7) 増沢隆久, 藤野正俊, 小林一也, 鈴木隆之; マイクロ放電加工の高精度化 (第二報), 昭和 60 年度精機学会春期大会学術講演会論文集, 475(1985)
- 8) 増沢隆久, 藤野正俊; ワイヤ放電研削における放電面積, 電気加工技術, 9, 25, 7-12(1985)
- 9) 倉藤尚雄, 鳳誠三郎; 改訂放電加工, コロナ社 (1961)
- 10) 増沢隆久, 河田耕一, 佐藤健夫; 微小穴の放電加工について, 電気加工技術, 4, 7, 18-23(1981)