研 究

高精度微細軸加工の研究 (第1報)*

—— ワイヤ放電研削法の開発 ——

増沢隆久** 藤野正俊**

Precision Machining of Micro Spindles (1st Report)

—— Development of Wire Electrodischarge Grinding Method ——

Takahisa MASUZAWA and Masatoshi FUJINO

Abstract

Production of various micro-spindles is now an urgent problem in relation with the rapid change of industrial parts and tools towards miniaturization. A new micro EDM application is proposed to realize the formation of micro-spindles of which the diameter is between 0.5mm and several micrometers. The principle of the method consists in using a travelling wire as an electrode to form the spindle by EDM. Differently from known WEDM, the wire is guided by a single guide and machining takes place at a guided part of the wire. An extreme precision is guaranteed by this mechanism. According to the similarity to a grinding process, the method is named wire electrodischarge grinding (WEDG). Experimental results proved the applicability of this method to automated production of very fine spindles.

* 昭和59年度精機学会秋季大会および第116回電気加工研究会にて発表

** 東京大学生産技術研究所

1. はじめに

諸機器の小型高性能化はもはや定常的な流れとして産業界に君臨している。これを支えるものとして微細加工技術には常により一層のレベルの向上が要求され続けている。微細加工技術のうち、LSI等、半導体製造技術に代表される2次元的パターン加工は独自な分野として急速な発展をとげ、すでにサブミクロン領域の加工の実用化へと踏み込んでいる。一方、その他の部品や、金型をはじめとする工具の製造においては3次元的形状加工が中心となるが、この分野では100 μm 以下の寸法が工業的な標的となった段階にある。

数十 μm の3次元的形状の加工においては、半導体デバイス製造に多用されるようなエッチングを主体とするプロセスでは対象寸法が大きすぎて精度の確保が難しく、一般に適用しにくい。一方、工具を用いてその形状や軌跡を転写するという、通常の機械部品生産等に多く用いられている方法は、原理的には充分こうした対象に対応できると考えられるが、寸法が小さいほど工具の製作が困難になるために、広く普及するには至っていない。

微細な3次元的形状で最も基本であり、また現在最も需要の大きいのは微細穴加工である。工具を用いる加工法では、例えばドリル、放電加工、超音波加工などが、直径100 μm 以下の微細穴加工に対応できる技術である。しかし、いずれの加工法においても工具の製作、そして取付けを精度良く行なうことが容易ではない。ドリルについては専門のメーカーがあり、直径数十 μm のものを入手できるが、形状精度、価格、径の種類など、問題点も多い。他の加工法については工具の供給態勢は全く整っておらず、従って、原理的または実験室的には直径数十 μm の寸法まで加工可能であることが既に20年前に示されているにもかかわらず、生産現場への適用はほとんど行なわれていない状態のまま推移してきた。

本研究では、主として放電加工において、この工具製作の問題を解決するために、ワイヤを電極とする放電加工により微細な軸または棒（以下、微細電極と表記する）を成形する新しい手法、ワイヤ放電研削法（wire electrodischarge grinding, WEDG法）²⁾³⁾を提案し、その有効性、実用性を示す。

2. 細軸加工の問題点

放電加工用の微細電極作成法の主なものとして図1に示すように次の三つの方法がある。

- A) 細線を切断して用いる。
- B) 切削または研削により挽き出す。
- C) 放電加工（逆放電）により成形する。⁴⁾⁵⁾

しかし、これらはそれぞれ次のような問題点を抱えている。

- A) 細線そのものは断面形状、直径変動などの点で良好なものが入手できるが、コイルから直線状に

きょう整する際に直径が変化する。切断後放電加工機に装着する際に傾きを生ずる。この傾きの修正を含め切断後の取扱いは線が細いために熟練を要する。直径の選択には制限がある。

B) 切削力、研削力が加わるため一本の微細電極内での直径変動（テーパなど）が生じやすい。センタレス研削ではA)と同様の問題点が残る。太いシャンク部を有する形状とすることもできるが、それでも放電加工機に取り付ける際に傾きを生ずることは避け難い。

C) 加工力が極めて小さく、また、放電加工機上で成形すれば装着時の精度低下の問題を回避できるなど、A), B)の問題点の多くは解決できるので、成形時に放電加工機を専有してしまうことを除けば、理想に近い形である。しかし、より一層の高精度化に対応し、取扱いの容易な生産現場対応技術とするためには次のような問題点がある。

a) 微細電極の形状はブロック状の成形用電極（以下ブロック電極とする）の形状を転写したものとなるので、このブロック電極は直角度、表面あらさ、うねりなどが極めて高精度に加工されたものでなければならない。

b) 仕上がり径は、微細電極の中心軸とブロック電極の相対位置で決まるので、ブロック電極の取付け位置および水平面での姿勢調整が高精度に行なわれなければならない。

c) 微細電極成形中にはブロック電極が消耗し、通常は無視できない程度の仕上がり径誤差を生ずる。また、この消耗が一様でないため、軸方向の直径変動を生ずる。

d) 全長にわたって同時加工するので、放電間隙のムラによる直径変動を生ずる。

e) 長さや直径の比が大きい微細電極を成形する際は加工力が無視できなくなり、たわみや振動を生ずる。このため先細りのテーパがつきやすい。

本研究で提案するワイヤ放電研削法では、これらの大部分を解決することができる。

3. ワイヤ放電研削法の原理

図2はワイヤ放電研削法の基本的な形態を示したものである。前述のブロック電極に代えて、ワイヤガイドに沿ってゆっくり移動する金属細線を成形用の電極として用いる（以下これをワイヤ電極と表記

図1 微細電極の作成法

する)。そして、ワイヤ電極のワイヤガイドに接している部分、またはその極く近傍の部分を微細電極の素材に切り込み、微細電極を軸方向に送り込むことにより細い棒状に加工していく。この際、微細電極に軸まわりの回転を与えれば円筒状に成形された微細軸が得られるわけである。加工そのものは放電加工であり、従って加工時には加工部分を絶縁液に浸すか、加工部分に絶縁液をかけ流す必要がある。図から分かるように、ワイヤ電極とワイヤガイドの全体を

図2 WEDGによる加工の形態

砥石に見たてればちょうど円筒研削と同様の加工形態となっている。砥石の代わりにバイトと見たてて、旋盤と同様と考えることもできるが、放電加工は多数の微小放電による加工であり、多数の微小切れ刃による加工である研削の方が似ているため、本手法をワイヤ放電研削法と名づけた。(なお、放電研削という用語は研削と似た形態の放電加工に古くから用いられており、砥粒による研削との複合という意味合いは含まれない。⁶⁾)以下、本報告ではWEDG法と表記することにする。

この方式を取ることで、前記2-C)に示した従来法の問題点は次のように解消する。

a) 形状転写そのものではなく、微細電極の送り込みにより形状を生成するので、形状精度は送りの精度とワイヤの直径変動によって決まる。直径変動の少ないワイヤは入手可能であり、送りも現在の技術水準からみてサブミクロンのレベルを実現できると考えられる。

b) 仕上がり径は微細電極とワイヤガイドの相対位置で決まるが、ワイヤガイドはテーブル上に固定したままでよいので、1回座標校正をすれば、仕上がり径はテーブルの位置決めのみで、繰り返し正確に決定できる。

c) ワイヤは加工中移動しつづけるので、放電による消耗があっても加工部分は常に新しい部分が供給され、正しい直径とみなすことができる。したがって電極消耗の影響は無視できる。

d) 小さな局部を加工しながら、加工部位を移動していく形となるので、放電間隔が小さく、したがってその変動の絶対値も小さくなる。

e) 長い微細電極を成形する場合でも、加工の済んだ細い部分には全く力が加わらないので、直径を均一に保つことができる。

4. 実 験

4.1 実験装置

松下技研製の微小穴加工用放電加工装置を改造し、実験装置とした。主な改造点は、ワイヤガイドおよびワイヤ駆動装置を取付けたこと、およびZ軸(微細電極の中心軸方向の送り)とX軸(テーブルの

位置決め)をNC化し、 X 軸には座標原点検出機能を持たせた点である。

加工回路はRC回路とし、浮遊容量を小さくするために放電用コンデンサは微細電極の直上約50mmの位置およびワイヤガイドの台に接続し、両方に470 Ω の充電用抵抗器を直接接続する形とした。電源電圧(開放電圧)は80または100Vとした。

ワイヤとしては直径200 μm のワイヤ放電加工用黄銅線(沖電線製)を用いた。ワイヤガイドは超硬合金で図3に示すような断面形状のものを製作し、テーブル上に固定して用いた。したがってワイヤはワイヤガイド上の溝を滑って移動する。ワイヤ移動速度は、加工量が少なくワイヤの消耗も小さいことから、通常のワイヤ放電加工に比べ相当小さくしても差し支えない。本実験で

図3 ワイヤガイドの断面形状

は約50mm/minに設定した。ワイヤテンションは、ワイヤがワイヤガイドから離れさえしなければ良いので、繰り出し側ポビンにブレーキをかけることにより約100gfを与えた。

ワイヤ駆動系はワイヤガイドと同じテーブル上に設置するのが望ましいが、テーブル面積が不十分なため、今回はテーブル外に固定した形とした。したがって、テーブルをワイヤ駆動系に接近する方向に動かす時には移動速度に制限がある(テーブル移動速度<ワイヤ移動速度)。また、ワイヤテンションはテーブルの駆動力より充分小さくしなければならない。

加工液は灯油とし、アクリル樹脂製の加工槽内で加工部を浸漬した状態で加工を行った。加工量は微小で加工液の汚れも少ないので、加工液の循環は行なわなかった。

加工装置全体の概略を図4に示す。

図4 加工装置の構成

4.2 実験結果

WEDG法の実用性を明らかにするため、上述の装置により細軸の加工を行ない、動作の確認をすると共に、加工性能の試験を行った。

4.2.1 動作確認および加工精度

工作物として、加工前直径が0.3mmのタングステン線を用い、これを直径30 μ mまで成形してみた。

最初に適当な切り込みによりテストカットを行ない、その時のテーブル座標と仕上がり径をメモリーに設定した。これにより、以降の仕上がり径はテーブル座標で一意的に与えられることとなる。また、この過程で、本システムが予定通りの動作をし、細軸成形を実際に行なえることが確認された。

次に、最も重要な要素である加工精度を調べるため、直径60 μ mおよび30 μ mの軸を成形し、軸方向の3点における仕上がり径を測定した。加工長さ（平行部）は ϕ 60 μ mで600 μ m、 ϕ 30 μ mで300 μ mとし、測定位置は先端から30 μ m、100 μ m、および170 μ mである。素材の偏心の影響を除くため各実験とも、素材を一旦少し大きい径に予備成形してから最終切り込みを与えて加工を行った。直径60 μ mに成形した場合の結果を表1に示す。表に示したのは同一条件の3サンプルの測定結果であるが、各サンプル共軸方向三点の直径変動は2 μ m程度に抑えられており、本手法が高精度軸成形に適していることが確認された。繰り返し加工による変動は、この3サンプルで約3 μ mで、比較的良好な結果である。

表2は直径30 μ mに成形した例である。この場合も、60 μ mの場合と同じ程度の精度が得られている。

表1 仕上げ直径の測定結果
(切込み量: 5 μ m, 設定直径: 60 μ m)

仕 上 げ 加 工						
加工長さ (μ m)	目標直径 (μ m)	コンデンサ容量 (pF)	加工時間 (s)	測 定 値 (μ m)		
600	60	100	249	59.9	61.6	62.2
			274	59.2	61.6	61.7
			329	61.1	62.7	61.9

表2 仕上げ直径の測定結果
(切込み量: 5 μ m, 設定直径: 30 μ m)

仕 上 げ 加 工						
加工長さ (μ m)	目標直径 (μ m)	コンデンサ容量 (pF)	加工時間 (s)	測 定 値 (μ m)		
300	30	22	132	34.0	33.8	33.7
			121	33.5	32.7	33.0
			134	33.8	34.0	33.8

表3 原点を取り直したときの直径の変化

仕 上 げ 加 工						
加工長さ (μ m)	目標直径 (μ m)	コンデンサ容量 (pF)	加工時間 (s)	測 定 値 (μ m)		
600	60	100	182	55.7	58.5	57.8
			204	62.8	65.4	65.3
300	30	22	89	30.5	30.1	30.4
			95	36.8	36.5	37.1

ところで、上述の各表内の3サンプルはそれぞれ同一条件で、連続的に行われた実験結果であるが、表3に、テーブル座標原点を取り直して、異なった期日に行った加工例の測定結果を比較して示す。これによれば、軸方向の直径変動は常に小さいが、繰り返し加工による変動が $10\mu\text{m}$ 程度と大きな値となっている。この原因は主としてテーブル位置決め精度にあると考えられる。その内容は、主として次の2点であると思われる。第1点は、本装置のテーブル位置決め用エンコーダの最小読み取りが $1\mu\text{m}$ であることで、これにより直径で $2\mu\text{m}$ までのバラつきが生じうる。次に、第2点としては温度による装置の変形が考えられ、実際に周囲温度により仕上がり径が変動することが観察された。本装置の場合にはおよそ $1\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ の影響があった。

以上より、WEDG法によれば軸方向の直径変動の小さい良好な形状の細軸が成形できることが分かった。また、ワイヤガイドの位置決め精度すなわちテーブルの位置決め精度を高めることで繰り返し精度も高いものとすることができる見通しが得られた。

4.2.2 加工条件の影響

WEDG法では基本的にはワイヤの位置で仕上がり径が決まるが、非接触加工であるため、微細電極とワイヤの間のすきま（以下ギャップと表記する）が仕上がり径に影響を与える。図5にこのようすを示す。ワイヤの位置が理想的に制御されているとして、実際に加工された仕上面の位置は、予定位置よりギャップ分だけ内側になる。すなわち、仕上がり径はギャップの2倍だけ予定寸法より小さくなる。もし、ギャップが常に一定であれば、テーブルの位置決めにギャップと等しいオフセットを与えることでその影響をなくすることができる。しかし、一般に放電加工では加工条件によってギャップが変動するので、WEDG法においても加工条件によって仕上がり径が変動する可能性がある。

図5 ギャップと仕上がり径との関係

特に、いくつかの実験中に、次のような現象が観察された。図6に示すように、ある直径である長さまで成形した後、さらに細い径に成形した時、同じ加工長さに設定すると最後の部分で直径が小さくなり、くびれを生ずる。これは、最後の部分のみ加工面積が急に大きくなる（切り込みが大きい状態）ためであると考えられる。そこで、切り込みが重要なパラメータであると考え、この影響を調べることにした。また、一般に放電加工では放電エネルギーによってギャップが変わるので、その影響も調べた。

ギャップの変動はあまり大きな値とは考えられないので、繰り返しによる誤差と分離するため図7に示すような方法で実験を行った。

まず図7aのように、段つきの形状に成形を行なう。これを図7bのようにストレートに加工する。

図6 仕上げ加工時の直径変動の形態

図7 切込み量の変化の形態

このようにすると他の条件は一定で、切り込みのみステップ状に変化する加工を行なったことになり、切り込みによるギャップの変化分が図7 cの直径段差 $d_1 - d_2$ の $1/2$ として検出できることになる。

ギャップの絶対値を検出するのは困難（接触検知で $1\mu\text{m}$ 以下の値を再現性よく測定するのは容易でない）なので、切り込み $2\mu\text{m}$ の時の値を基準値として、その値との差をもってギャップの大きさを評価することにした。

図8は切り込みを $55\mu\text{m}$ 、 $85\mu\text{m}$ 、 $135\mu\text{m}$ と変化させた時のギャップ変化分の測定結果である。これから、切り込みが大きいほど、またコンデンサ容量が大きいほどギャップが大きくなることがわかる。図9はコンデンサ容量を横軸にして表示しなおしたものである。図からわかるように切込み量が $55\mu\text{m}$ ではコンデンサ容量の大きさによらずギャップはほぼ一定となる。これ以外ではコンデンサ容量が大きいほどギャップが大きくなっている。しかし、この変化量は大きくても $4\mu\text{m}$ 程度であった。したがって、若干のテスト加工により元径、切り込み、コンデンサ容量をパラメータとした大まかな補正表を作成しておけば、実用上十分な対応ができるものと考えられる。

図8 切込み量の変化による仕上がり直径の差

図9 コンデンサ容量の変化による仕上がり直径の差

4.3 極微細軸の加工

前述のようにWEDG法により作成された軸の軸方向の直径変動は極めて小さい。このことは、本手法によれば極めて小さい直径の軸加工を行なえる可能性を示している。そこで、これを確かめるために、直径 $10\mu\text{m}$ 以下の微細軸の加工を試みた。その結果、最小で直径 $2.5\mu\text{m}$ までの微細軸を成形することができた。 $\phi 50\mu\text{m}$ 程度の例も含めいくつかの加工例を図10に示す。

図10 加工例

5. むすび

従来経験とカンによることが多かった微細軸の成形方法として、ワイヤ放電研削法(WEDG法)を提案し、その実用性を示した。

本手法の主な特徴は以下のとおりである。

- 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

以上のように、WEDG法は小寸法の軸、棒をいろいろな形状に加工する有力な手段となる素質を備えており、微細穴放電加工用の電極作成はもちろん、各種の微細なピン部品や治工具の加工に広く応用されることが期待できる。

最後に、本研究の実施に際して、多くのご協力を頂いた松下技研㈱、セイコーエプソン㈱、三菱金属㈱、㈱エリオニックスの各社、小林一也、鈴木隆之の各氏および東京大学生産技術研究所試作工場のみな

さんに感謝申し上げます。なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金により行われた。

参 考 文 献

- 1) 倉藤尚雄, 増沢隆久; 超硬合金の放電による微細加工, 電気加工学会誌, 2, 3(1968)1-16
- 2) 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) — 走行ワイヤによる自動電極成形 —, 昭和59年度精機学会秋期大会学術講演会論文集 (1984)359-360
- 3) 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(1985)1-5
- 4) 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(1981)18-23
- 5) 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 (1983)575-576
- 6) 鳳誠三郎, 倉藤尚雄; 改訂放電加工, コロナ社, (1961)

(1990.8.7 受付)