

ワイヤ放電加工機用旋削加工装置の製作と評価

Development and Evaluation of Turning System for Wire EDM

佐々木敏幸*、御厨照明**
名古屋大学工学部・工学研究科技術部

はじめに

従来のワイヤ放電加工機（WEDM：Wire Electro Discharge Machine）の工作性能、加工範囲のより一層の拡張を図るため、WEDMに被加工物（ワーク：Work）を回転させることができる旋削加工装置を付加し、WEDMの非接触・溶融加工という、切削抵抗が非常に少ない加工法の利点を生かして、従来の旋盤では工作不可能な歪み易い薄物や極細で縦横比の大きな線状工作物の加工を試みた。あわせて加工に最適な旋削回転数の選定および加工物の加工精度、面粗度、真円度を測定し、装置の評価を行ったので報告する。

尚、1999年の高エネルギー加速器研究機構技術研究会等において、吹掛式WEDMについての同様な報告がなされているが、現有の機械は浸漬式（後述）で利用されることが多く、本報告は、吹掛式、浸漬式の両方に対応し、しかもパソコンによりワークの細かな回転速度制御や回転角度制御を行うことが出来る、より発展性と応用範囲の広い装置を目指した。

1. ワイヤ放電加工機の概要

ワイヤ放電加工機（WEDM）は適切な張力で引張られながら供給されるワイヤ電極とワーク間の数万Hzの高電圧パルスにより間欠的に電弧放電（アーク放電）を生じさせ、この放電により発生した数千度の高熱によりワークを溶融して平面の2次元形状切り出し加工を行うものである。溶融した金属はワイヤ電極とワーク間の放電により瞬時に気化した加工液の急激な体積膨張による爆発現象により吹き飛ばされるとともに、新たに吹き掛けられる加工液により冷やされ、細かな粒となって洗い流されて次の高電圧パルスを待つ。WEDMはこの加工液（濾過された清浄な脱イオン水）の使い方により二つの型式がある。一方は吹掛式といわれる加工時に放電部のみに加工液を吹き掛けて加工する型式、他方は浸漬式といわれるワーク全体を液中に浸すとともに、さらに液中において放電部に加工液を吹き掛けて加工する型式である。浸漬式は、加工液による電極間絶縁の保持、冷却作用、溶融物の洗い出しが充分に行われるため、ワイヤ電極の断線が少なく、近年では主流となっている。実験実習工場の三菱製FX10型は両方式に対応しているが、前述の理由によりほとんど浸漬式で利用している。

WEDMは非接触加工、溶融加工という切削抵抗の非常に少ない長所のほか、導電性があれば材料の硬度や質に関係なく（例えば、超硬材や熱処理済みのワークでも）加工できる点で、他の工作機械には無い長所を有する。しかし、加工速度が遅いのが難点である。また、WEDMは電極であるワイヤを糸ノコのように使って、ワークの2次元平面の切り出しが精度良く出来る。さらに、ワイヤを供給する上下のノズル位置を単独に制御できるので、例えば上側形状が四角、下側形状が円となるような上下異形の工作物を切り出すことも出来、誠に多才な機械である。

*電子・情報技術系

**構造・安全技術系

2 . 旋削加工装置の製作

今回は現有のWEDMに旋削加工という新たな機能を付加するために、ワークを回転させ、ワイヤ電極を旋盤のバイトにみたてて加工することが出来る旋削加工装置を製作した。図1に旋削加工装置をセットしたWEDMを示す。WEDMの長所と旋盤加工の長所をそれぞれに生かして、新たな加工が期待できるこの装置は、図2の様にワークを固定するチャックと、それを駆動するためのベアリングで支持されたシャフト、歯車ならびに駆動モータにより構成されている。



図1 WEDMと旋削加工装置

2.1 駆動系

水中で駆動させるため、潤滑油をあまり必要としない高分子プラスチックのベアリングでシャフトを支持した。絶縁上、モータを水から切り離すために、当初フレキシブルワイヤを用いて、モータと接続することを考えたが、フレキシブルワイヤのねじれ量が意外に多く、またそのねじれ量が負荷により異なるので伝達誤差が大きくなった。さらに遊び量も比較的多く、モータ停止時においてワークを完全に固定することが出来なかったため、その使用を止め、シャフトに直に取り付ける構造とした。このため、シャフトの回転軸の向きを鉛直方向に転換し、モータを水面上に設置する必要性が生じた。力を直角に転換するために砲金製の螺旋歯車を使用した。潤滑油による加工液（脱イオン水）の汚濁防止のため無潤滑で行った結果、予想通り、加工途中で水中の歯車の滑りが非常に悪くなり噛みついてしまった。そこで比較的自己潤滑性の高い高分子プラスチックの歯車を利用することにした。歯車は、ウォーム歯車、傘歯車等、

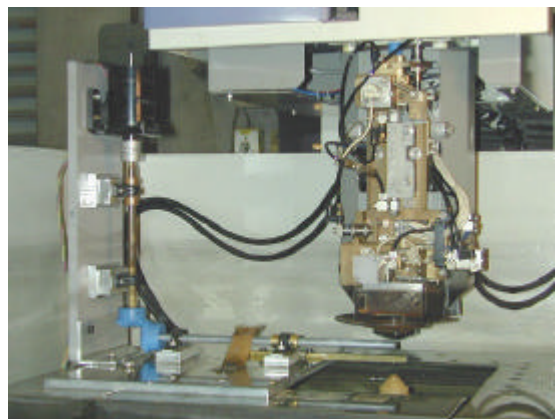
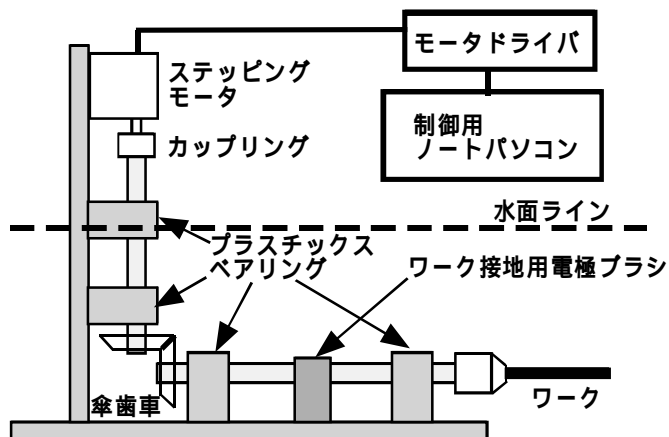


図2 旋削加工装置概観

いろいろ比較検討した結果、1対1に滑らかに力の伝達ができる傘歯車を選択した。また、モータ電源とWEDMの電源系を絶縁するために、シャフトにはプラスチックのカップリングを用い、モータは塩ビの板に取り付けた。

2.2 制御系

ワークの回転速度や回転角度の細かな制御を行って、より応用性や発展性のある装置にするため、ステッピングモータ（オリエンタルモータ製2相ステッピングモータUMD - 268 - A(B)をハーフピッチモードで使用、400pulseで1回転、1 pulse当り0.9度回転）を使用した。また、その制御には、IBM製のノートパソコンThink Padを使用した。Visual Basic 5.0により制御プログラムを作成し、その制御信号はパソコンのプリンタポートを通じて、モータドライバに供給される。指定角度回転の場合は、回転速度と回転角度を入力し、指定角回転釦をクリックする。連続回転の場合も同様に回転速度を入力し、所定の釦をクリックする。



図3 回転制御プログラム

2.3 電気系

WEDMは放電により加工を行うので、ワークはワイヤと対になる片方の電極となる。従って、ワークは本体の工作テーブルと電氣的に接続されていなければならない。通常は、ワークをテーブルに固定させるボルトがその役目を果たしているが、今回はワークが回転し、しかもプラスチックのベアリングで絶縁されているのでそれなりの対応が必要である。回路を形成するため、当初は比較的板バネ効果のあるリン青銅の薄板を駆動シャフトに押し付けるだけの単純な接触方法で行ったが、シャフトとの電氣的接触が不十分なためか、加工中にその接触部でアーク放電が生じて両方が溶融してしまった。そこで、いかに接触を良くするかを検討した結果、細いワイヤを編んで帯状にしたワイヤ（通常は主にアース配線の引き廻しに使用）をシャフトとリン青銅板の間に挟み込んで接触抵抗の低減を試みた。この改良により、接触部での放電が激減し、スムーズな放電加工が出来るようになった。

2.4 チャック

ワークを啜めるのに、当初は駆動シャフトの一端をねじ切りして現有のチャックヘッドを取り付け、いろいろな直径の材料を掴んで加工できるように試みたが、このチャックヘッドのねじ部の遊び量が比較的大きいので、回転させると偏芯し、ワイヤとワークとの接触が頻繁に発生し、断線が多発した。このため、今回はチャックを付けず、シャフトそのものを加工対象物として加工した。このチャックの問題は今後の検討課題としたい。

3. 旋削加工

旋削加工は加工精度や面粗さを測定する加工評価用円柱型試験片と数種の形状加工を行った。

3.1 加工機の加工モードの決定

今回使用した三菱製FX10型の加工機では、加工モードを2通り選ぶことができる。

1. PM制御：Power Monitor制御で、センサにより最適の電気条件になるよう自動制御される。このモードは、センサにより最適放電となるようにワイヤ電極とワークとの距離を制御しているため、ワークが回転することにより、常に距離が変わる今回のケースでは、ワイヤ電極とワークとの接触により制御回路が過剰に働いて、停止時間が多く、加工速度が非常に遅くなって利用不可であった。
2. Eパック制御：材料の厚みや材質などの諸条件を鑑み、予め色々な電気条件が組合わされた加工条件パックが整備されており、この条件に基づいて加工が行われる。このモードではワイヤの切削速度に関して、その速度を手動で任意に決められるモードと自動の最適送りモードが選択できる。パック番号の適切な選択と最適送りの併用により、PM制御より良好な加工が出来たので、今回の加工はすべてEパック制御（パックNo.922）で行うことにした。

3.2 加工評価用の円柱型試験片の作製

180, 300, 480, 600, 900rpmの回転数において、10mmのジュラルミン棒から図4のような7mmの評価用試験片を1回加工にて旋削した。また比較のため、回転数685rpm、送り量0.077mm/cycleにて旋盤加工も行った。7mm試験片の端面輪切りの加工時間は、回転させた場合は、回転数にもよるが2分30秒～3分、静止時におけるそれは35秒程度で約5倍程度長くかかった。180rpmではワイヤとワークが頻りに接触し、ワイヤの断線が多発した。最適回転数は、加工精度のばらつきや面粗さ、ならびにワイヤ断線の頻度等を総合的に評価して480rpmとした。

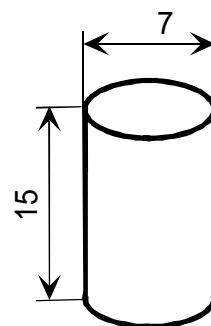


図4 試験片形状

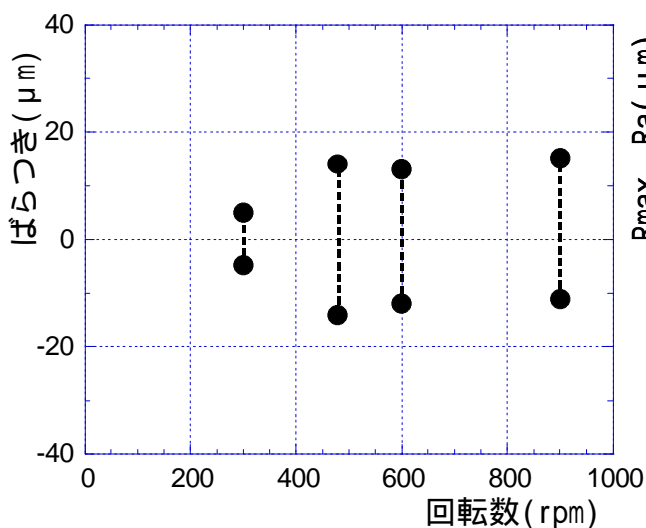


図5 回転数別加工精度のばらつき

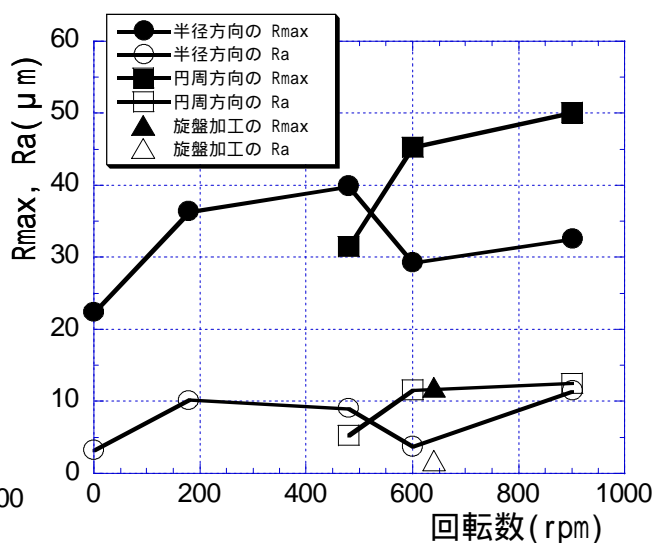
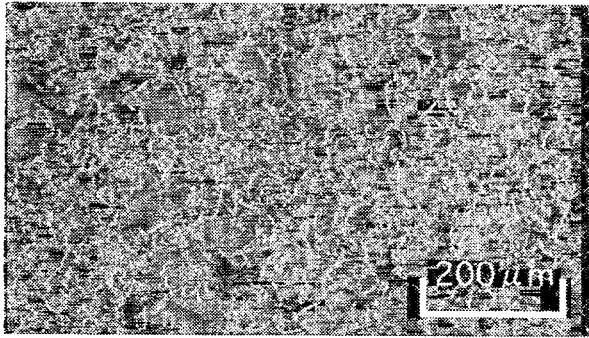
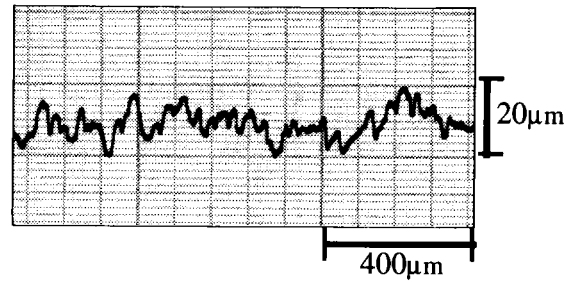


図6 回転数別面粗さ

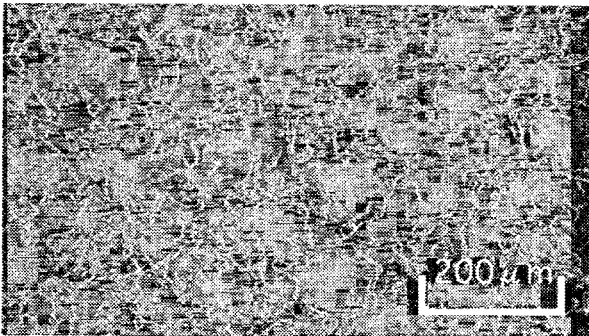


(a) SEM画像

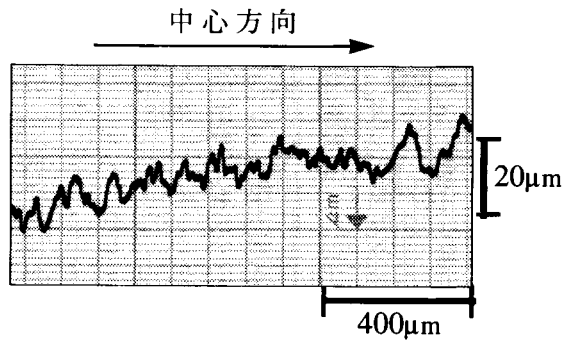


(b) 表面粗さ ($R_{max}=25.0\mu\text{m}$, $R_a=3.69\mu\text{m}$)

図7 SEM画像と面粗さ (ワーク固定, 1回加工)

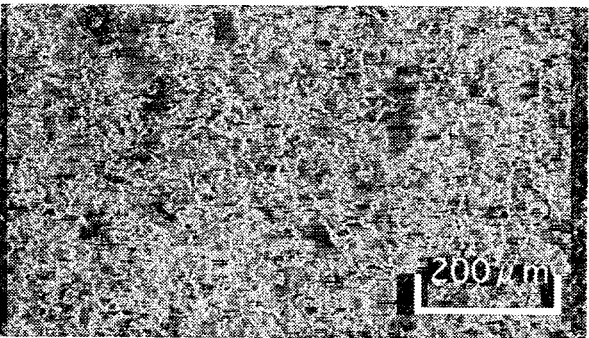


(a) SEM画像

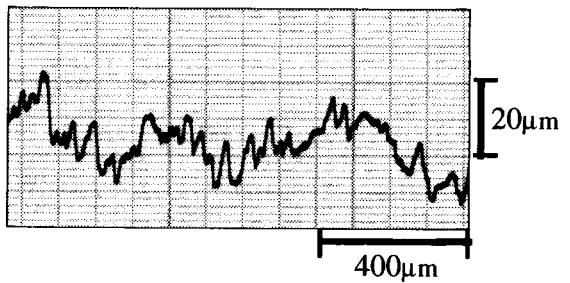


(b) 表面粗さ ($R_{max}=39.0\mu\text{m}$, $R_a=3.89\mu\text{m}$)

図8 半径方向のSEM画像と面粗さ (ワーク回転480rpm, 1回加工)

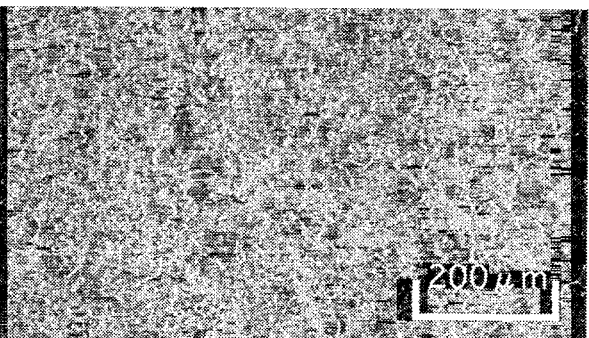


(a) SEM画像

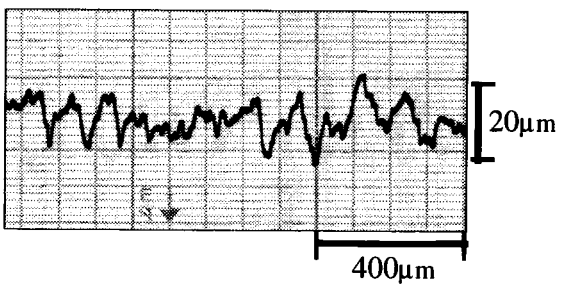


(b) 表面粗さ ($R_{max}=35.5\mu\text{m}$, $R_a=5.49\mu\text{m}$)

図9 円周方向のSEM画像と面粗さ (ワーク回転480rpm, 1回加工)



(a) SEM画像



(b) 表面粗さ ($R_{max}=26.0\mu\text{m}$, $R_a=3.73\mu\text{m}$)

図10 円周方向のSEM画像と面粗さ (ワーク回転480rpm, 4回加工)

3.3 加工特性の評価

3.3.1 加工精度

図5に各回転数でφ10mmからφ7mmに旋削加工した円柱試験片の各回転数における精度のばらつきを示す。加工精度は±15μm以内に治っており、どの回転数でもほぼ平行に加工されているのが分かる。ワイヤ電極は一定の力で引張られているが、常にワークとの爆発で振動しており、剛体である旋盤のバイトと同一に比較することはできない。旋削加工量1.5mmを一回ではなく、数回にわけて行えばより精度の高い加工が可能と思われる。

3.3.2 加工面粗さ

図6には各回転数における円周方向ならびに半径方向の加工面の粗さ（最大粗さRmax、平均粗さRa）を示した。さらに、回転数0つまり通常のワークを固定した場合、および旋盤加工の場合のデータもプロットした。他の回転数に比べ480rpmが若干粗いようである。しかし、回転数の違いによるRmax、Raの一定の傾向は見受けられない。一方、旋盤加工と比較すると、WEDMの旋削加工はRmaxではほぼ4倍、Raで7倍の値を示した。これも加工回数の増加や加工条件の最適化で改善されるものと考えられる。

3.3.3 SEM画像

図7にはワークを固定した状態での加工断面の走査型顕微鏡（SEM：Scanning Electron Microscope）の画像(a)ならびに表面粗さ(b)を示す。同様に図8はワークを回転数480rpmで回転させて半径方向に旋削加工、図9は回転させて円周方向に加工、図10は回転させて円周方向に2nd cut加工（4回加工）した場合を示した。

SEM画像を比較すると、ワークを固定した像に近いのが半径方向の場合の像である。つまり、熔融面がクレータのように規則的に観察される。円周方向の場合は面がやや不規則になっている。また、2nd cutすることによって加工面がより滑らかになっていることが分かる。

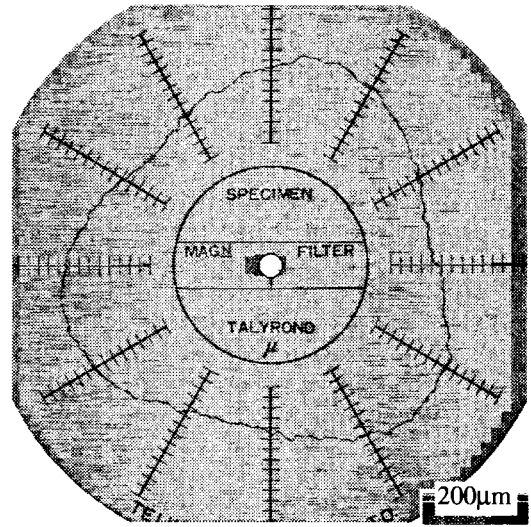


図11 真円度（旋盤、685rpm、1回加工）

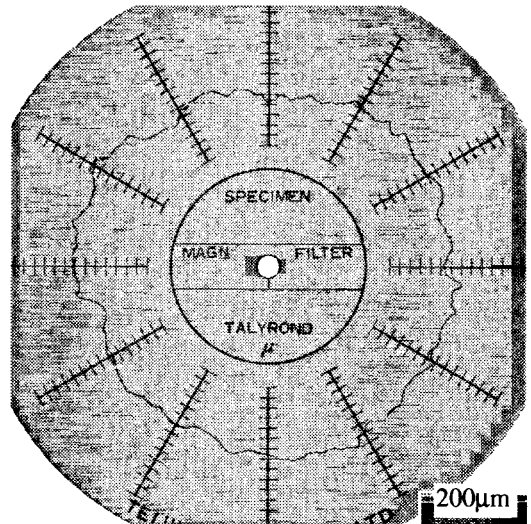


図12 真円度（WEDM、480rpm、1回加工）

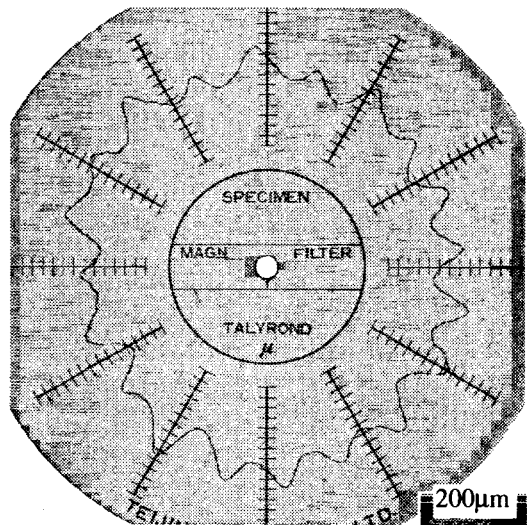


図13 真円度（WEDM、480rpm、4回加工）

表面粗さでは固定して加工した場合に比べて、旋削加工することで面粗度が悪くなっているのが分かる。特に半径方向の面は中心に向かうに従って太鼓形状になっている。これは旋削量が徐々に増加してくることにその一因があるように思われる。一方旋削加工においても2nd cutによる面粗度向上の効果が確認された。

3.3.4 真円度

真円度では旋盤加工の場合、おにぎりのような形となっている(図11)。これは1回の旋削量が1.5mmと大きいためと考えられる。ワークを回転させての加工では、2nd cut(図13)は1回加工(図12)に比べて真円度が落ち、周期的に変形している。これはワークを回転させた時の共振によって生じたものと思われる。ここでは1回加工の旋削量が大きい場合におけるWEDMの優位性が認められた。

3.4 旋削加工例

旋削加工の製品例(材質はジュラルミン)を図14~16に示す。加工条件はEパック922の最適送りモード、回転数は480rpmで行った。加工は、三菱電機製MEDIAPT CAD/Wによりパソコン画面上で設計を行い、数値制御データを作成し、それをもとに行った。旋盤では加工不可能と思われるすばらしい製品を作ることが出来た。

- ・ 図14 [加工例1] : 連続回転により、細い棒、算盤玉、円柱を作製した。
- ・ 図15 [加工例2] : まず傘の柄の幅を切取り、次に90度回転させて、柄の湾曲形状を切取って柄の部分を作製した。その後、連続回転にて傘のテーパ部を作製した。
- ・ 図16 [加工例3] : 連続回転により心棒を作り、次に72度毎に回転させて5角柱を作製した。その後、連続回転により0.25mm毎に0.25mm幅のスリットを切り、10mmの間に20枚のフィンを作製した。
- ・ 図17 [加工例4] : 連続回転により心棒と厚さ0.15mmの薄板を作製した。

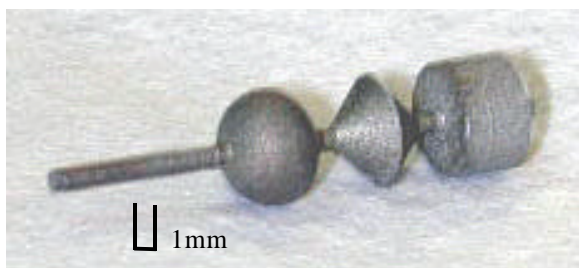


図14 加工例1(連続回転のみ)

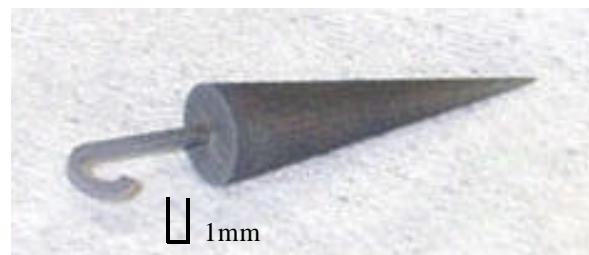


図15 加工例2(連続回転+指定角回転)

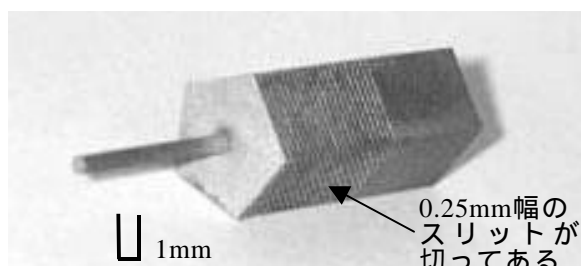


図16 加工例3(連続回転+指定角回転)

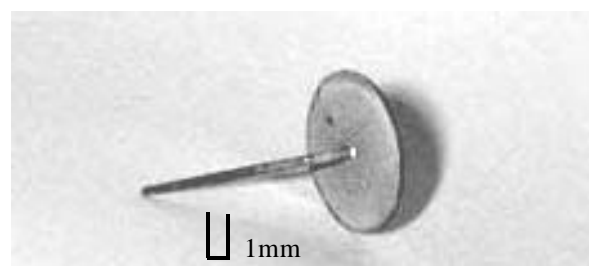


図17 加工例4(連続回転のみ)

まとめ

現有のワイヤ放電加工機の能力向上と応用範囲拡大のため、ワークを回転させることができる旋削加工（旋盤加工）装置を製作した。

1. WEDMで旋削加工を行うという所期の目的は達成した。
2. 旋盤加工と比較した加工評価は、寸法精度はやや良、表面粗さはやや不良、真円度はやや良という結果を得た。今回は試作ということで回転時の振動や偏芯など、また放電間隔と回転数とのマッチングなど、色々な面で充分に対処することが出来なかったことが原因と思われる。今後これらの改良により、加工精度の更なる向上が望まれる。
3. 加工評価の面では旋盤加工に劣るが、今回、旋盤では絶対に加工できない縦横比の非常に大きい極細棒や極薄のフィンなどを製作することが出来た。精度をあまり要求されなければこれらの需要用途に充分対応出来るものと確信するとともに、今後この研修の報告を通してこれらの潜在的需要を掘り起こすことが出来れば、この研修の意義は更に大きくなると思う。問題点の指摘と実用化への展望を開くということで大変有意義な研修であった。

本研修は少ない予算の中で課題を遂行するため、現有の機器や部品を工夫して多用した。今後の改良検討課題としては、回転の振動を押さえるために、ステップ角のより小さい5相ステップモータと減速ギアの使用、また、加工精度の向上のために遊びの少ない高精度高分子支持ベアリングの使用や駆動シャフトとテーパ接続できる偏芯の無いチャックの使用が挙げられる。さらに、WEDM自身の加工運転制御プログラムと新たに作成した回転制御プログラムとの連携が出来るようになれば、より一層実用性と応用性のあるWEDMとして、展望が開けるのではないかと考える。

謝辞

ワイヤ放電加工機の取扱い等に関して、快く教授して頂いた工学部実験実習工場の立花一志技官、また測定器を快く提供して頂いた機械工学専攻超精密工学講座の諸氏に心から感謝の意を表します。

参考文献

- ・平成9年度名古屋大学工学部技術報告集
「ワイヤ放電加工機による精密加工と加工精度の実証」
- ・平成10年度名古屋大学工学部・工学研究科技術部技報
「ワイヤ放電加工」
- ・平成10年度高エネルギー加速器研究機構技術研究会
「ワイヤ放電加工機による旋削加工」
- ・平成11年度名古屋大学技術職員研修報告集
「ワイヤ放電加工機によるワーク表面の評価」