# 微細放電加工用ピーリング工具の作製とそれによる加工技術

# 研究報告者 山岸 里枝

#### プロフィール



最終学歴 2006年3月

長岡技術科学大学大学院エネルギー・

環境工学専攻

博士後期課程修了

専門分野 特殊加工

学 位 博士(工学)

所属団体 福岡工業大学工学部知能機械工学科

役職名 教授

## 今後の抱負

微細放電加工用の電極として、タングステン線をコアとし、その周囲に融点が低い亜鉛をめっきにより被覆した二層構造の工具を開発してきました。 融点の差を利用した 2 つの加工法を検討しており、1つは単発放電により電極先端の被覆部のみを瞬時除去し、露出したコアで微細加工を行う方法で、コアが消耗しても単発放電によりコアを再露出させることが可能なため、工具の交換頻度が減らせます。 もう1つは二層構造のまま加工を行う方法で、融点の低い被覆部が優先的に除去され、コアが露出し、同時にコアでも加工が進行するため、一度の加工で異なる直径の凹みと微細穴が加工されます。 今後は凹み深さや微細穴深さの制御や加工効率の向上を目指して研究を行う予定です。

#### 1. はじめに

金属の微細加工法として、レーザー加工、放電加工、電解加工などが挙げられるが、筆者は主に微細放電加工法について研究してきた。微細放電加工は、微細金型や紡糸用・噴射用の各種ノズルの加工などに応用されている。加工には、微細径の工具電極が必要となるが、とりわけ直径 100µm 以下の細線電極は、その細さゆえに取り扱いが困難である。一般に、微細加工用の電極は、チャッキングしやすい直径の金属材料の先端を、ワイヤ放電研削法叩により必要な軸径になるまで削り出すことにより作製されており、微細軸部の成形精度が重要になる。これに対して、筆者らは、直径 100µm 以下の市販の細線を工具電極の軸中心(コア)として、その周囲をコア材よりも融点の低い別の金属で被覆した二層構造の工具電極を提案・作製してきた 24. 被覆により工具外径を太くすることで、チャッキングや取り扱いが容易になる。この工具電極は、図1に示すように加工前に工具先端の被覆層を除去し、コア部を露出させ、その露出したコア部で微細加工を行う構想であった。被覆部を皮むき(ピール)のように除去することから"ピーリング工具"と名付けている。ピーリング工具は、タングステン線の周囲をめっきにより亜鉛を被覆して作製している。露出したコア部で微細加工を行うと、加工の進展に伴いコアは消耗するが、コアが消耗して短くなった場合は再度被覆部を除去し、コアを再露出させることで、工具交換をしなくても加工を継続することができる。また、コアは市販の細線であるため、微細軸部の成形精度を気にする必要がない。

これまで、ピーリング工具の作製法の検討や作製したピーリング工具による微細穴あけ放電加工を行ってきた <sup>2-7</sup>. コア径 10~100µm のタングステン線に対して、工具外径が 100~300µm となるピーリング工具の作製が可能であり、コアと工具外径の中心位置の差(偏心量)は 2µm 以下、工具表面の表面粗さ(Ra)も 2µm 以下の精度を達成している. ピーリング工具の応用として、当初は単発放電によりピーリングの先端の被覆部を除去し、露出したコア部で微細穴あけを行っていた. 数十 A の大電流での単発放電により、コアを未溶融のまま露出できる長さはコア径の約 6 倍であることが分かったが、この結果は、アスペクト比(穴径に対する穴深さの比)が 6 以上の穴あけ加工が困難であることを示唆している. 一方で、単発放電による被覆部除去過程の高速度撮影では、被覆部とコア部の溶融・除去の挙動は独立しているように観察されたことから、単発放電せずにピーリング工具をそのまま微細放電加工に用いた場合、被覆部の亜鉛は低融点材料のため高い消耗率となり、優先的に除去加工され、これと当時に、露出した高融点材料のタングステンは低消耗であり、タングステンコアによ



図1 ピーリング工具の構想

る穴あけ加工が進展し、その結果、高アスペクト比の穴あけ加工が実現できるのではないかと考えた.これまで、銅、ステンレス鋼、チタン、モリブデンなど様々な材料に対し、ピーリング工具を用いて穴あけ加工を行ったところ、図2に示すように、工具外径に対応する凹み穴の中央に、コア径に対応する微細穴が形成され、一度の加工で段付き形状の穴が加工された.これまでの加工で用いた被加工材の最大厚さは300μmであり、これ以上の板厚に対する加工はまた試みていない.加工時間を長くすれば、さらに深い穴あけ加工が実現できるはずである.

そこで本課題では、①加工穴深さ 1000µm を目指し、その加工特性を調べる。また、これまでピーリング工具の作製において用いたタングステン線の最小径は 10µm であるが、直径 10µm 以下の穴あけ加工を実現するためには、放電ギャップを考慮しなければならないので直径 10µm 未満のタングステン線へのめっきに成功しなければならない。そこで、②コア径 5µm のタングステン線へのめっきによるピーリング工具の作製と、それによる加工に挑戦する。また、これまでの加工は、微細放電加工によく用いられるコンデンサ放電回路を備えた加工機を用いてきた。一方、一般的な放電加工ではトランジスタ放電回路を備えた放電加工機が用いられ、放電持続時間や放電休止時間が自由に設定できる。ピーリング工具を用いる微細放電加工において、一度の加工で段付き穴が形成できることは特徴的であるが、トランジスタ放電によりマイクロ秒の長い放電によって被覆部を多く除去し、長いコア露出長さが得られる可能性がある。これが実現すれば、凹み穴の深さと微細穴の深さの比を任意に変えることができるのではないかと考えた。そこで本課題では、③トランジスタを用いたスイッチング回路を備えた自作放電加工機の作製とピーリング工具による加工にも挑戦する。

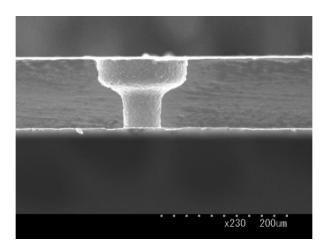


図 2 コア径  $50\mu m$ , 外径  $140\mu m$  のピーリング工具を用いて  $100\mu m$  厚の貫通穴加工を行った際の加工 穴断面の例

### 2. めっき方法と実験装置

ピーリング工具のコア材には市販のタングステン線 (融点 3387°C) を用い、電解めっきにより亜鉛 (融点 420°C) を被覆する. タングステン線は、前処理としてエタノールで脱脂した後、塩酸で酸処理を行う. その後、治具に巻き付け、めっき槽の中央に固定し、陰極に接続する. 亜鉛板はめっき槽

の内側を覆うように固定し、陽極に接続する。 亜鉛めっきの浴組成はいくつかあるが、硫酸亜鉛 180g/l、酢酸ナトリウム 45g/l を混合した硫酸亜鉛浴を基本浴とし、添加剤としてデキストリン 5g/l を混合している。pH の初期値は 2.3、浴温は 25°C±1°C、陰極電流密度の初期値は 11A/dm²に設定する。 本研究では、定電流でめっきを行っているため、時間に伴いめっき膜が厚くなるが、これに伴いめっき面積が増加するため電流密度は減少する。 めっき中、タングステン線上に気泡が滞留し、めっき層に気泡による凹みが形成されてしまう。 これを避けるため、めっき浴槽を超音波洗浄器の中に入れて、超音波振動を付与しながらめっきを行う。 高周波である程、気泡の長時間の滞在を抑制し、くぼみが浅く、より滑らかなめっき面が得られたことから、100kHz の超音波をかけている 20. ピーリング工具は、作製精度を評価するために、工具端面を研磨し、マイクロスコープで観察して偏心量を測定する。また、レーザー顕微鏡により表面粗さ (Ra) を測定する。

加工機は、特別な記載がない限り、図3に示すコンデンサ回路を備えた自作放電加工機を用いている。コンデンサ容量は150pF、無負荷電圧は100V、電極送り速度は15µm/s とし、放電加工油にはEDF-K2を用いる。ピーリング工具を設置する Z 軸は、加工中の極間電圧を測定し、極間電圧がしきい電圧よりも大きい場合は電極が降下し、しきい電圧よりも小さい場合は上昇するようにプログラミングしている。加工終了後は、加工穴の顕微鏡写真を撮影し、試料表面の穴径を測定する。その後、加工形状を調べるために試料を研磨し、走査型電子顕微鏡(SEM)で加工穴断面を観察する。

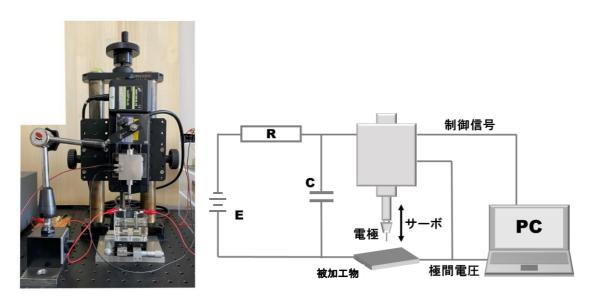


図3 コンデンサ回路を備えた自作放電加工機の概略

#### 3. 実験結果

## 3.1 ピーリング工具を用いた微細深穴放電加工

コア径  $50\mu m$  のタングステン線を用い、30 分間の亜鉛めっきを行い、外径約  $140\mu m$  のピーリング 工具を作製した。ピーリング工具の表面粗さ Ra は  $0.2\mu m$  以下、偏心量は約  $2\mu m$  であった。まず、試料として市販品で容易に入手できる SUS304 の薄板(板厚は  $100\mu m$  から  $1000\mu m$ )に対して貫通穴あ

け加工を行った.図3に、各板厚での加工断面および試料裏面の加工穴の代表例を示す.買通穴あけ加工の場合、貫通を判断するために試料裏面から気泡が排出される様子を観察した.気泡の排出が観察された後すぐに加工を停止した場合、裏面の穴径がコア径よりも小さくなる.そこで、気泡を観察後、さらに50μm送ってから停止した.各板厚に対して4回の穴あけ加工を行っており、裏面の穴径を調べたところ平均で57μmであった.加工開始側の穴形状は多少楕円になる場合もあったが、コアが貫通する試料裏面ではきれいな円形となっていた.

板厚が小さい場合、被覆部による凹みとコア部による微細穴との境で段が形成されているが、板厚が大きい場合、漏斗状の加工穴となった。そこで、凹みの底部と水平軸との傾斜角度を測定してみると、板厚300μm以下では45度未満であったが、その傾斜角度は徐々に大きくなり、板厚1000μmでは84度となっていた。板厚が大きくなると加工時間は長くなり、工具の被覆部先端の円周部の消耗が進むため、時間の増加につれ傾斜角度が大きくなったと考えられる。

次に, 難削材である超硬合金に対する加工を行った。超硬合金にはタングステンカーバイド (WC) の粒子径の大きさなどによってさまざまな種類があるが、本実験では、WC の粒子径が  $0.5\mu m$  から  $1.5\mu m$ 、コバルト含有量が 13%の KD20 を用いた。入手した KD20 の厚さは 3mm であったため、貫通穴あけ加工ではなく、加工時間を 10 分から 600 分まで変化させることにした。 10 分から 120 分は 10 分間隔,120 分から 240 分までは 30 分間隔,240 分から 600 分までは 60 分間隔でそれぞれの時間で4 回以上(ただし 70 分,90 分,110 分,360 分,480 分,540 分の加工回数は 1 回)の加工を行った。

図4に、超硬合金に対する微細深穴加工における試料表面の加工穴の顕微鏡画像と加工断面の SEM 画像の代表例を示す。 試料表面に形成された加工穴は、加工時間 100 分程度までは直径 155 $\mu$ m 前後 であったが、それ以上長くなると大きくなる傾向があり、600 分では平均 188 $\mu$ m であった。 凹みの底部と水平軸との間の傾斜角度(図4中の  $\alpha$ )は加工時間が長いほど大きく、60 分までは 30~50 度、それ以降は 60~75 度であった。

図5に、加工断面のSEM画像から測定した加工穴深さと凹み深さを示す。加工時間10分での加工穴深さは約129μmであり、加工時間が長いほど加工穴深さは深くなった。加工時間600分では4回の加工で2回、加工穴深さが1000μmに達していた。加工時間は80分では加工穴深さが400μm、凹み深さが200μmであったが、これを超えると、加工速度が落ちているように見える。近似式により加工速度を求めたところ、10~80分では3.6μm/min、90~600分では1.0μm/minであり、加工穴深さが約400μmまでは加工が進みやすく、それ以降になると加工は進みにくいことが分かった。これは、深穴になるほど加工くずの排出が難しくなることが原因の1つとして考えられる。図5では、加工穴深さを100%としたときの凹み深さの割合を合わせて示しているが、加工時間80分までは約40%、100~420分では約50%、600分では約60%と、加工時間が長くなるほど凹み深さの割合が高くなっていることが分かった。

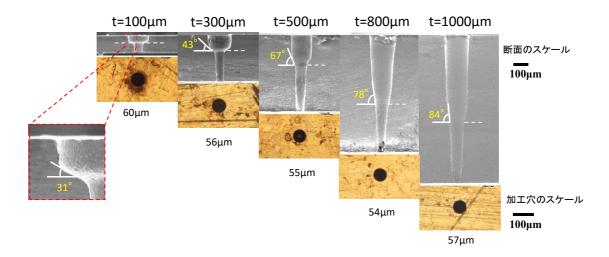


図 3 ピーリング工具を用いたステンレス鋼 SUS304 に対する貫通穴あけ加工における加工穴断面 SEM 画像と試料裏面の加工穴の顕微鏡画像

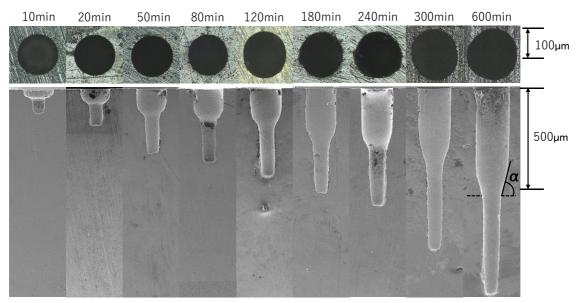


図4 ピーリング工具を用いた超硬合金 KD20 に対する穴あけ加工における試料表面の加工穴の顕微 鏡画像と加工穴断面 SEM 画像  $^5$ 

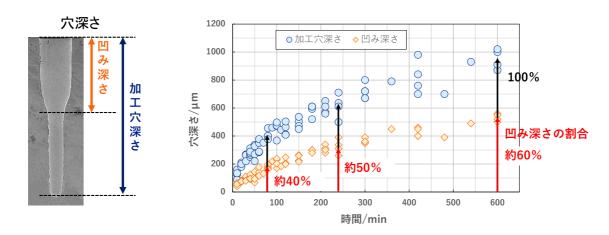


図5 超硬合金を用いた場合の加工時間に対する穴深さ、加工穴深さに対する凹み深さの割合を合わせて記す。

## 3.2 コア径 5µm のタングステン線を用いるピーリング工具の作製とそれによる加工5

放電加工における直径 10μm 以下の穴加工の試みのためには、放電ギャップを考慮しなければならないため、直径 5μm のタングステン線を用いてピーリング工具を作製することにした。直径 5μm のタングステン線は、コア径 50μm の場合と同様に治具に巻き付け、外径を約 100μm とするため 3 時間のめっきを行った。図 6 に、めっき後の外観を示す。ピーリング工具は穴あけ加工を実施する前に、ニッパーで切断した工具端面を平らにするため、通常は、ピーリング工具が折れないように型に挟み手作業による研磨を行っていたが、コア径 5μm のピーリング工具は、逆放電加工(工具は陽極、被加工材は陰極に接続)により 15 秒間加工することにより、平らにした。逆放電加工後の工具端面の SEM 画像を図 7 に示す。めっき後の工具外径は 30 本の平均で 107μm、偏心量は 0.5μm、Ra は平均 1.1μm であった。



図6 めっき後の外観

図7 逆放電後のピーリング工具の端面

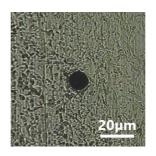


図8 コア径 5μm のピーリング工具による貫通加工後の試料裏面

コア径 5μm のピーリング工具を用いて板厚 50μm と 100μm の SUS304 に貫通穴あけ加工を行ったところ、図 8 に示すように裏面の穴径が目標の 10μm のものもあれば、約 40μm の場合もあった.これは、被加工材の裏面から気泡が出たのを目視観察して加工を停止したため、気泡の目視検知が困難で工具を送りすぎていた可能性がある.そこで裏面の穴径が 15μm 未満だったものをピックアップして結果をまとめる.裏面の穴径が 15μm 未満だったものは、板厚 50μm の場合,12 試料である.それぞれの加工において気泡検知にかかった時間は 48s から 210s である.表面の穴径は平均で 121μm、裏面の穴径は9.8μm、凹み深さは26μm であった.板厚 100μm の場合,裏面の穴径が15μm 未満だったものは3 試料であり,気泡検知にかかった時間は270s から440s であった.表面の穴径は平均で105μm、裏面の穴径は10.6μm、凹み深さは72μm であった.気泡検知にかかった時間に大きな差はあったが、穴径のばらつきは数μm、凹み深さは72μm であった.気泡検知にかかった時間に大きな差はあったが、穴径のばらつきは数μm、凹み深さのばらつきは最大で14μm であった.コア径 5μm のピーリング工具を用いると、板厚 50μm や 100μm の SUS304 に対して,裏面穴径が約 10μm の貫通穴をあけることができた.一般に、直径 5μm の工具電極で、その10 倍、20 倍の深さの加工を行うことは非常に困難であるが、ピーリング工具を用いれば、段付き形状にはなるが、小さなコア径でも深い穴あけが可能であることが分かった.

## 3.3 トランジスタを用いたスイッチング回路の作製とピーリング工具による加工の試み

これまではコンデンサ放電回路を備えた自作放電加工機を用いてピーリング工具を用いた微細放電加工の研究を行ってきた。コンデンサ放電回路を用いた場合,放電持続時間がナノ秒オーダーのパルス放電が生じるため,微細加工に適しているためである。しかし、コンデンサの充電時間が必要であり放電頻度は低くなる。一方、一般的な放電加工ではトランジスタ放電回路が使われている。トランジスタはスイッチング素子として用いられており、任意のパルス信号を回路に送ることで、マイクロ秒オーダーのパルス放電が生じる。充電時間もなく、放電頻度が高いため加工速度がコンデンサ放電回路に比べて速い。また、パルス信号はオン時間(Ton)とオフ時間(Toff)を変更することができる。1回の放電周期に対する放電パルスの比はDuty 比と言い、Ton/(Ton+Toff)により求める。同じ周波数でもDuty 比が異なると加工特性も変わるはずである。ピーリング工具は、高融点のタングステンをコアに持ち、その周囲を低融点の亜鉛で被覆した構造であり、トランジスタ放電では、放電1発当りの除去量が多く、コア部を長く露出することができる可能性がある。つまり、周波数やDuty 比を変化させることで、被覆部の除去量やコア部の露出長さが調整出来るようになり、凹み深さと微細

穴深さの比率を変更出来るようになるのではないかと考えた. そこで、図9に示すような、トランジスタを用いたスイッチング回路を作製した.

図10 に、周波数 40kHz、Duty 比20%(Ton: 5μs、Toff: 20μs)で10 分加工した際の加工穴断面を示す。加工穴深さは約 400μm、凹み深さは数十μm であった。RC 回路(コンデンサ容量 150pF)で10 分加工した場合、加工穴深さは128μm、凹み深さは46μm であったため、同じ10 分の加工でも、トランジスタ放電(周波数 40kHz、Duty 比20%)の場合、加工穴深さは約3倍、凹み深さは約0.6倍の、加工穴深さに対して被覆部での凹み穴が非常に浅い穴が形成された。その他の加工条件については実験中であるが、放電条件によって凹み深さと微細穴深さの比率を変更出来る可能性を示すことができた。

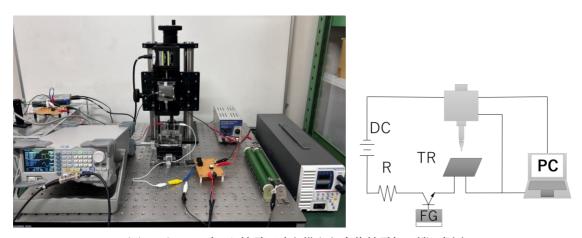


図9 トランジスタ放電回路を備えた自作放電加工機の概略

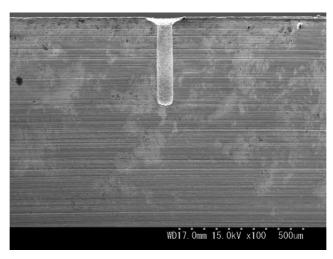


図 10 周波数 40kHz, Duty 比 20%で 10 分加工した際の加工穴表面および加工断面の例

#### 4. まとめ

コア径 50μm のタングステン線を 30 分の亜鉛めっきを行い、外径約 140μm のピーリング工具を作製し、作製したピーリング工具を用いて、コンデンサ放電による微細深穴加工を SUS304 および超硬合金 (KD20) に対して実施した。ピーリング工具を用いた場合、被覆部とコア部で同時に加工が進展し、加工穴直径の異なる段付き穴が加工される。加工時間が長いほど、加工穴深さ、凹み深さ、傾斜角度は大きくなった。いずれの被加工材に対しても深さ 1mm を加工するには約 600 分の時間を要した。

直径 10μm 以下の微細穴あけ加工を実現するために、コア径 5μm のタングステン線を用いて亜鉛めっきを 3 時間行い、外径約 100μm のピーリング工具を作製することに成功した。このピーリング工具を用いて、板厚 50μm と 100μm の SUS304 に対して放電加工を試み、裏面穴径が約 10μm の貫通穴をあけることができた。段付き形状にはなるが、コア径の 10 倍、20 倍となる深い微細穴あけが可能であることが分かった。

トランジスタを用いたスイッチング回路を完成させ、超硬合金に対して 10 分加工を行った. 40kHz, Duty 比 20%では、凹み深さ数十 μm、加工穴深さ約 400μm の加工穴が得られ、加工穴深さに対して被覆部での凹み穴が非常に浅い穴が形成される条件を見いだした.

#### 謝辞

本研究は、公益財団法人三井金型振興財団による研究助成により実施されました。ここに記して感謝します。

## 参考文献

- T. Masuzawa, M Fujino, K. Kobayashi, T. Suzuki, N. Kinoshita: Wire Electro-Discharge Grinding for Micro-Machining, Annals of the CIRP, Vol.34, No.1 (1985) pp.431-434.
- 2) Rie Tanabe, et al, Development of peeling tool for micro-EDM, CIRP Annals Manufacturing Technology 60 (2011), pp.227-230.
- 3) R. Tanabe, Y. Ito, N. Mohri, T. Masuzawa: Development of peeling tools with sub-50µm cores by zinc electroplating and their application to micro-EDM, Annals of the CIRP, Vol.65, No.1 (2016) pp.221-224.
- 4) 田辺里枝:ピーリング工具の開発とそれによる微細放電加工,電気加工学会誌 Vol.51, No.128 (2017) pp.89-94.
- 5) 山岸里枝, 浅倉悠斗, 吉住留奈, 伊田拓未, 植木滉大, 伊藤義郎, 増沢隆久: ピーリング工具を 用いた微細深穴の放電加工 - 超硬合金への適用および 5μm コアによる加工 - , 電気加工学会全 国大会(2021)講演論文集, (2021) pp.53-54.
- 6) 山岸里枝: 微細放電加工用ピーリング工具の開発と加工事例,型技術 2022 年 4 月臨時増刊号 (2022) pp.10-13.
- 7) 山岸里枝: 微細放電加工用ピーリング工具の作製とそれによる加工例, 金属(2022) pp.54-59.