電解放電加工の基礎的研究

—— 針電極の挙動と加工特性について ——

土屋 八郎^{*} 後藤 英和^{*} 宮崎 真^{*} 高田 暢茂^{**} 小野 潔^{**}
のぶしげ

A Fundamental Study on Electro-Chemical

Discharge Machining

—— Relations between Behavior of a Needle Electrode

and Machining Characteristics ——

by Hachiro TSUCHIYA, Hidekazu GOTO, Makoto MIYAZAKI,

Nobushige TAKADA and Kiyoshi ONO

Abstract

This paper deals with relations between the behavior of a needle electrode and machining characteristics in drilling with electro-chemical discharge. The behavior of a needle electrode was observed by using a detector consisting of an optical fiber and a phototransistor. As the machining characteristics, the profile and the volume of pit formed by electro-chemical discharge were measured. The results obtained are as follows :

- 1) The needle electrode rises with the bubbles generated in the electrolytic reaction. The rising speed and the rising distance depend on the voltage across the electrode, but they are independent of the load applied on the needle electrode.
- 2) The pit profiles change from ring- to cone-shape as the discharge time progresses. The pit volume is proportional to the discharge time, but is independent of the load applied on the needle electrode.

* 京都工芸繊維大学 工学学部

** 京都工芸繊維大学 研究生

1. 緒 言

電解放電加工は、その対象を金属等の電気良導体のみとせず、不良導体のアルミナなどセラミックス材料、ダイヤモンド等にも適用され実際に穿孔加工が行われ研究報告^{1)~3)}も多い。この電解放電加工によるセラミックス材料の加工を二次元加工に進展させたワイヤ電解放電加工法 WECDM は、その装置を試作し加工の可能性が確められている⁴⁾。WECDMにおいて、工具電極はワイヤ放電加工と同様のワイヤであるが、このワイヤと被加工物との位置関係が加工特性に影響を及ぼすと思われる、また参考文献1)においても取りあげている。

本研究では、WECDMのワイヤ電極と被加工物の最適な位置関係を得るためにその基礎研究として電解放電加工中の工具電極の挙動を把握しあわせて加工特性について検討する。

2. 実験方法

実験装置の概略図を図1(a)(b)に示す。装置は、主に電解放電加工装置と工具電極変位検出系からなる。

図1(a) 実験装置の概略図

図1(b) 実験装置の概略図

電解放電加工装置について、工具電極は直径1mmのタングステン棒で先端を電解加工で約0.1 R の針状にしている（以後針電極）。針電極の支持には電極の挙動を一自由度にするためにリン青銅の板バネ（幅10mm、長さ30mm、厚さ0.3mm）を用いその自由端に固定する。板バネは、顕微鏡台の載物台に固定し針電極の初期の位置は微動ハンドルで設定する。他方の電極には白金線を用いる。電解放電の電源はB級アンプで電圧および波形をファンクションジェネレータで制御できる。極性は針電極を負とする。

針電極変位検出器系は、針電極の上下方向の変位を検出するために光ファイバーを利用している。検出の原理は、図2にその概略図を示すが、光源のファイバーから照射される光（白色光）を対面する受光用のファイバーが受光するがその中間に針電極と一体となっているナイフエッジが光を一部遮断する。この針電極の変位に応じた光量の変化を受光用ファイバー他端のフォトトランジスタで電気信号に変換

図2 針電極変位検出器系の概略図

図3 針電極変位検出器の特性曲線

する。その特性曲線の一例を図3に示す。本研究では、特性曲線のほぼ直線を示す中央付近を使用する。図3では、変位が $50\mu\sim 100\mu$ で電圧差が $4V\sim 1V$ の箇所では 1μ を約 $60mV$ で読みとることができる。それをX-tレコーダに入力し同時にシンクロスコープでも観測する。

被加工物には、針電極の挙動の実験においては加工が進行し難いアルミナを用い、加工特性の実験においてはホウケイ酸ガラス（パイレックスガラス）を用いた。電解液はKOH水溶液（濃度5N）を用いた。

加工特性は、加工痕をSEMで観察し表面粗さ計でその形状を測定した。

3. 実験結果

3.1 電解現象時の針電極の挙動

針電極の挙動について、放電を伴わない電解現象時（両電極の印加電圧が $20V$ 以下）に針電極に荷重を与えた場合その荷重の影響について述べる。なお荷重 $0g$ とは、板バネ先端に針電極とナイフエッジのみ装着して被加工物上面に接触している状態である。この状態に設定した後に荷重に相当する分銅を載せる。

図4に電極間に約40秒 $20V$ の電圧を印加したときの荷重 $0g$ と $40g$ の針電極の変位を示す（写真上方の波形）。下方の波形は電極間電圧をあらわす。双方とも電圧印加直後に針電極は急上昇し、2～3秒以降は多少上下動しながらも一定速度で上昇している。荷重 $0g$ では約 $20\mu m$ 、 $40g$ では約 $17\mu m$ 上昇し電圧が $0V$ になると同時に下降している。次に図5に印加電圧を $0V$ 、 $10V$ 、 $15V$ 、 $20V$ と段階的に変化させた（図5下方の波形）ときの針電極の変位を示す。荷重 $0g$ 、 $40g$ とも同様に電圧の変化直後に針電極は急上昇し、その後ゆるやかな上昇が続いている。 $0g$ では約 13μ 上昇し、絶縁状態で変位は $13\mu m\sim 14\mu m$ の位置が持続している。

荷重 $10g$ についても、 $20V$ 40秒印加の実験、印加電圧を段階的に変化させる実験とともに他と同様の

結果となった。

これらの結果より、針電極は電圧の変化直後に急上昇し電圧値によって上昇の度合が異なることから、気泡の発生量あるいは発生速度が針電極の挙動に影響を及ぼすと考えられる。また 0 g, 40 g の荷重差が針電極の変位に顕著にあらわれていないところから気泡の内圧が大きいのではないかと予想される。

次に、これらの結果より発生する気泡のうち特に針電極先端近傍あるいは被加工物との間隙に発生する気泡が電極の上昇量に影響していると考えて、実験の設定時に間隙（以後初期間隙）を $0\ \mu\text{m}$, $3.4\ \mu\text{m}$, $6.8\ \mu\text{m}$, $10.3\ \mu\text{m}$, $50\ \mu\text{m}$ にして実験を行った。その結果を図 6 に示す。初期間隙 $0\ \mu\text{m}$ では、前述と同様でこの場合の変位量は約 $6\ \mu\text{m}$ である。この変位波形において上昇速度の変化（低下）が $0.5\sim 0.6$ 秒付近でみられることに着目して初期間隙 $3.4\ \mu\text{m}$ の波形を見ると $0.6\sim 0.7$ 秒まで電極の変位が見られず、その後急上昇しゆるやかな上昇へと移行して約 $3.6\ \mu\text{m}$ 変位している。初期間隙 $6.8\ \mu\text{m}$ 以上では、電圧印加当初から約 2 秒まで変位がみられず、その後 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 上昇し印加電圧が 0 になってもその状態が持続している。

これらの結果より、初期間隙を与

図4 極間電圧と針電極の変位

図5 極間電圧と針電極の変位（電解のみ）

えた状態で電圧印加当初に電極が変位しないことから針電極先端の気泡の大きさがその間隙長に到達するまで針電極は変位しないことが考えられる。また、初期間隙がない状態では電圧印加直後から電極先端の気泡の大きさに応じた電極の変位があったと考えられる。一方、初期間隙 $6.8\ \mu\text{m}$ 以上では、その間隙長以上の大きさの気泡ができなかったと予想され、若干の上昇は先端、側面に付着した気泡の影響によるものと思われる。なお、間隙に発生した気泡の大きさは初期間隙 $0\ \mu\text{m}$ の実験では $6.1\ \mu\text{m}$ 、初期間隙 $3.4\ \mu\text{m}$ では変位が $3.6\ \mu\text{m}$ であるところから約 $7.0\ \mu\text{m}$ と予想される。初期間隙が $6.8\ \mu\text{m}$ 以上では針電極の上昇が顕著にみられないことから、電極先端に発生する気泡の大きさは $7\ \mu\text{m}$ 程度が限界と予想される。

以上二種類の実験結果より、針電極の上昇は被加工物との間隙に生じた気泡によるものと考えられ、上昇変位の立ち上がりは図8(a)に示す被加工物と針電極の両方に接触して動きがそれらに拘束されている気泡の成長によると思われる。また、上昇量は、印加電圧値、印加時間からある程度予測される。しかし、荷重による上昇量の差はないと思われる。

3.2 電解放電現象時の針電極の挙動

図7に電解状態から放電を伴う状態に移行したときの針電極の挙動を示す。上方の波形が針電極の変位で下方が電極間電圧である。荷重は $0\ \text{g}$ で、初期間隙は $0\ \mu\text{m}$ (a)、 $5\ \mu\text{m}$ (b) である。図7(a)において、電圧印加初期15秒の電解時は前述と同様であるが極間電圧が $50\ \text{V}$ になると放電が生じ、同時に針電極は下降し初期の位置

図6 初期間隙を与えた時の針電極の変化と極間電圧

付近で変動している。これは、放電により間隙に生じた気泡が飛散して電極が下降したものと考えられ、以後の放電中も間隙で気泡が成長していないことが予測される。(b)において、初期間隙があるため電圧印加当初の変位は前述と同様であるが放電中の変位は(a)と異なり上昇した位置でほぼ一定となっている。これより、放電が電極側面で生じ間隙の気泡はそのまま残留していることが予測される。

これらの結果より、図8に針電極上昇過程と放電点のモデルを示す。(a)は、初期間隙 $0\mu\text{m}$ で電圧印加当初気泡は針電極表面全体で発生するが電極先端で発生した気泡は側面

図7 極間電圧と針電極の変化(電解放電状態)

図8 (a)

針電極の上昇過程と放電点のモデル

図8 (b)

初期間隙を与えた時の針電極の上昇過程と放電点のモデル

より自由度が小さくその位置に滞留する(I)。時間の経過とともに気泡が成長し(II), 針電極が上昇する。そして, 針電極表面全体にわたって気泡による絶縁が形成されると放電が生じる(III)が, その放電点が針電極先端であれば針電極は図7(a)の様に初期の位置にもどると考えられる。

図8(b)は, 初期間隙がある場合で電圧印加直後は気泡が被加工物に到達していないために針電極の上昇はなく(I), 次の段階で上昇し(II)絶縁層が形成されていく。絶縁が形成されて放電が発生するが, その発生箇所は絶縁層の最も薄いところであることが予想される。この場合, 先端における絶縁層より側面の方が近距離になる可能性が高く側面での放電が発生しやすいと考えられる。図7において, 初期間隙 $0\mu\text{m}$ の場合上昇距離約 $8\mu\text{m}$ 放電が開始している。初期間隙 $5\mu\text{m}$ の場合, 上昇距離約 $7.5\mu\text{m}$ で放電が開始しているがこの時の電極先端の間隙は約 $12.5\mu\text{m}$ で, (a)の $8\mu\text{m}$ の間隙の場合より電極先端での放電は発生しにくいと思われる。その結果, 放電が発生しても(a)の様に電極は下降せず上昇を維持するものと考えられる。

3.3 加工特性

加工特性において, まず電圧印加初期とある程度時間経過後の加工痕の形状について述べる。図9に電圧印加初期(0.5秒間印加)の加工痕のSEM写真および断面形状を, 図10に電圧印加時間2秒の加工痕のSEM写真および断面形状を示す。加工特性の実験においては, 被加工物にホウケイ酸ガラスを用い印加電圧は50Vとした。電圧印加初期の加工痕は, SEM写真の加工痕中央付近に加工されていない元のガラス表面が残存しており, そのまわりにドーナツ状に加工されている。一方, 2秒間電圧を印加した加工痕は円錐状を呈している。このような結果から, 電圧印加時間を徐々に延長してそれぞれの時間における加工痕の形状を測定する実験を行った。また, 荷重は, 1g, 4g, 10gの三種類とし荷重0gで針電極を被加工物に接触させその後重錘を載せる。したがって本実験における荷重とは, 加工当初の荷重であって加工が進行す

図9 ドーナツ状加工痕のSEM写真(a)と断面形状(b)

るにしたがい針電極が被加工物を押しける荷重は減少し、1gではバネ系の最大たわみが $10\mu\text{m}$ であるから加工が $10\mu\text{m}$ 進行した時点で荷重は0gとなる。4gと10gの最大たわみはそれぞれ $40\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ である。

図11, 12に電圧印加時間と図9(b)に示す電極直下の加工深さ h_0 (加工痕の直径から推定するその中心点における深さとする)および最大深さ h の関係を示す。電圧印加時間1秒付近まで h_0 が h より小さく前述のドーナツ状を示しているが荷重1gでは h_0 が $10\mu\text{m}$ となった電圧印加時間(0.9秒)の次の電圧印加時間(1.2秒)で h_0 は10倍以上になっている。また、荷重4g, 10gにおいても h_0 が $50\mu\text{m}$ となった電圧印加時間(1.2秒)の次の電圧印加時間(1.4秒)で増加傾向が急に伸びている。一方、最大深さ

図10 円錐状加工痕のSEM写真(a)と断面形状(b)

図11 電極直下の深さ

図12 最大深さ

は電圧印加時間が1.8秒までほぼ直線的に増加傾向にあり h_0 と異なる。電圧印加時間が2秒以後について、 h は横這いとなっているが h_0 は値が低くなっている。この h_0 の低下について、電極直下の深さが埋まることを示すものではなく、本実験方法において1回の放電で時間を h_0 を逐次測定しているのではなく各電圧印加時間（8種類）毎に放電痕を得ているためである。 h_0 が h より小さい値を示す放電痕は、最大深さが中心（ h_0 の測定箇所）よりずれている場合である。

これらのことから、まず放電痕形状が前述の電圧印加初期のドーナツ状から円錐状に移行していることが明らかである。その移行する時間は、この実験においては、1秒ないし1.4秒と思われる。このドーナツ状から円錐状への移行について、荷重1gでは h_0 が10 μm の直後に、荷重4gと10gでは h_0 が50 μm の直後と見られ、1gと4gでは針電極を支持するバネ系の最大たわみ10 μm 、40 μm とほぼ一致する。これらのことより、バネ系の最大たわみ時は電極が被加工物に対しては荷重0gの状態であるから、荷重0gのとき加工の進行がはやくなることが予想される。荷重差の影響について、 h_0 で電圧印加時間1秒以下のところで10gがやや勝っている他は h についても差が見られないことから前述のことが予想される。また、 h が250~300 μm で横這いとなっていることからこの値が深さ方向の加工限界と思われる。

図13 加工痕直径

図14 除去体積

図13に加工痕直径、図14に除去体積を示すがともに荷重による差がみられない。また、体積は、初期のドーナツ状から円錐状に至るまで連続的に電圧印加時間に比例し、0.04~0.05 mm^3 が加工限界と思われる。これらの結果より、加工痕形状の如何んにかかわらず除去体積に差がなく荷重による加工速度の差はないと思われる。

4. 加工過程のモデルについて

針電極の挙動とその加工特性から、電解放電加工による穿孔加工の加工過程について述べる。そのまゝに、つぎのことを仮定する。被加工物の除去機構は、 KOH 水溶液と放電による高温場が重なってホウケイ酸ガラスが化学反応によって除去されるとする。

図 15 加工過程のモデル

図 15 に加工過程のモデルを示す。(I) 電解による絶縁形成後に生じる放電は、針電極と他方の電極即ち KOH 水溶液の界面との間で発生しこの放電による熱エネルギーで KOH 水溶液は局部的に高温となり被加工物のガラスと化学反応をするが、電極直下のガラスには KOH 水溶液が接していないため反応せず加工されない。従って前述のドーナツ状を呈すると考えられる。(II) 電圧印加時間が経過すると中央部はまわりから除去される、あるいは針電極の振動により電解液が電極先端部と被加工物の間に入り込み化学反応が生じると考えられる。(III) バネ系のたわみが最大状態で電極先端を中心に半径 R の領域まで加工が進行しその後加工限界に達すると考えられる。

5. 結 言

今回の実験で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 電解によって発生した気泡が針電極を上昇させ、印加電圧が高いほど上昇速度がはやくまた上昇距離も長く、このとき荷重による差はなかった。
- 2) 電解放電中の針電極の変位は、定常あるいはゆるやかな上昇傾向にある。
- 3) ホウケイ酸ガラスの加工痕形状は、加工初期のドーナツ状から円錐状に移行する。その移行は、電極直下の深さが針電極を保持するバネ系の負荷による最大たわみに達する前後に起こる。

4) 加工量は、放電時間と比例関係にあり、荷重は加工量に影響を与えない。

以上の結果、ワイヤ電解放電加工においてワイヤ電極が被加工物に接する状態、あるいは間隙をもたせる状態の位置関係での加工特性の検討を試みる予定である。

(1987.11.6 受付)

参 考 文 献

- 1) 倉藤尚雄, 増沢隆久, 古明池繁樹: ルビーの放電小孔加工 電気加工学会誌 Vol.3, No.6, 1969, 33-40.
- 2) 筒井忠夫: ガラスの放電加工 精密機械 Vol.26, No.10, 1960, 28-32.
- 3) 谷口信夫: 非金属の放電加工 精密機械 Vol.29, No.10, 1963, 798.
- 4) 土屋八郎, 後藤英和, 宮崎 眞, 井上友一: ワイヤ電解放電加工に関する研究(第1報) — ガラスおよびセラミックス材料の加工特性 — 電気加工学会誌 Vol.20, No.40, 1987, 24-31.