単発放電による微細電極の瞬時成形（第2報）*

— 微細化現象の動的挙動の観察 —

武沢英樹** 毛利尚武*** 伊藤義郎† 田辺里枝†† 堀尾健一郎**

Rapid Production of a Thin Electrode by Single Discharge Machining (2nd Report)

- Dynamic behavior observation of thinning phenomenon -

Hideki TAKEZAWA, Naotake MOHRI, Yoshiro ITO, Rie TANABE and Kenichiro HORIO

In single discharge machining of a 0.1mm tungsten electrode with discharge current of between 30 to 50A and pulse duration of several hundreds microseconds, a needle of 20 to 35 μ m in diameter has been produced instantaneously. In the 1st report, we studied the effect of the discharge conditions on the shape of the formed electrode's tip. However, the forming mechanism could not be understood clearly from several experiments in the 1st report. To understand this phenomenon, a stroboscopic imaging system with a Q-switched Nd:YAG laser is used to observe the dynamical change of the electrode during and after the discharge pulse. Formation of the needle-shaped electrode occurs after a single discharge in an interval of 100 to 300 μ s. Therefore, the electrostatic or electromagnetic force may not be considered to have an effect on the thin electrode formation phenomenon. Air currents are suggested as one possible contributor to the formation mechanism and its effect on wear length for positive and negative electrode polarities is discussed.

Key words : single discharge machining, thin electrode, electrode wear length, YAG laser

1. はじめに

直径0.1mm程度のタングステン電極を用いた大電流単発放電により、放電後の電極先端に図1に示すような直径30 μ m、長さ250 μ m程度の微細な軸が瞬時に成形される。成形した微細電極により同一機上で微細穴放電加工が可能である。さらに、成形した微細軸の先端半径は200nm程度以下であり、微細形状の計測用プローブとして応用が期待できる。

これまでの報告では、放電条件と先端形状との関係および瞬時成形時の軸先端に作用する力について考察した。また、瞬時成形した微細軸を放電加工用の電極として用いた微細穴加工の実施例について述べた¹⁾。しかしながら、単発放電中に電極先端がどの時点で微細化するのかが不明であったために、成形メカニズムの詳細を解明するには至らなかった。微細軸の成形形状を制御するには、成形メカニズムを把握して成形条件や成形環境を整えることが必要である。

そこで、YAGレーザを背光として用いたイメージングシステムを構築して、単発放電中の電極先端形状を捉え、成形現象の動的挙動を観察した。本報では、電極先端が微細化するタイミングと成形軸断面組織の観察から微細軸の成形プロセスを考察し、電極先端に作用する力について議論した。

2. YAGレーザを背光とした極間イメージングシステム

形彫放電加工では、大きな電極の場合、放電の発生位置を精確に特定できない。さらに電極と工作物との極間距離は数十 μ m程度であるため、極間を横から観察した場合、奥で発

生した放電を観察することは困難である。これに対して、直径0.1mm程度の細線電極を使用した大電流加工の場合は、放電箇所が一意に決定され、電極の奥行きも無視できることから極間の側面観察が可能になる。一方、放電中の極間の様子を高速ビデオカメラあるいはCCDカメラなどで直接観察しても、プラズマの発光により電極形状を観察することは難しい。図2に、細線電極を用いた単発放電中の極間の様子を直接観察した写真の一例を示す。CCDカメラ（浜松ホトニクス社製 C4346）を用いて露光時間10nsで観察した画像である。写真に見られるように、プラズマの発光に妨げられて電極形状を観察することができない。

これに対して、従来は放電中の気泡の発生状態や極間の様子を観察するために、X線やキノンランプによる照明光を電極の背面から極間に導き、対向する高速度カメラで観察する方法が用いられてきた^{2) 3) 4)}。これは、発生するプラズマの発光よりも強度の高い光を背光として用いて、気泡や電極の影を撮影する手法である。そこで、本研究においても同様な手法により単発放電中の電極先端形状の観察を行った。背光としてNd:YAGレーザを用いた、YAGレーザを用いた時間分解観察法は、筆者らの一部がYAGレーザによるアブレーション観察の手法と

Fig.1 Rapid production of a thin electrode by a single discharge

* 原稿受付 平成14年9月12日

** 正会員 埼玉大学工学部（さいたま市下大久保255）

*** 正会員 東京大学大学院工学系研究科（東京都文京区本郷7-3-1）

† 正会員 長岡技術科学大学機械系（長岡市上富岡町1603-2）

†† 学生会員 長岡技術科学大学大学院

Fig.2 Direct observation of the discharge phenomena in gap region

Table 1 YAG laser specifications

Repetition	10Hz
Energy	480mJ
Pulse width	5~7ns
Jitter	±0.5ns

Table 2 Machining conditions of a single discharge

Peak current	ie=30A
Open voltage	ui=100V
Polarity	(-)
Pulse duration	te=400μs

して利用している⁵⁾⁶⁾。その観察システムの一部を使用して、単発放電中の極間観察システムを構成した。本システムでは、数ns～十ns程度の時間分解能で現象を観察できる。これを用いて、放電開始からの任意の時点での極間現象の瞬間を観察する。図3に、本実験で用いた観察システムの概要を示す。YAGレーザーは、ビームエキスパンダを通してビーム径を拡大して放電部に導かれる。さらにレンズを通して対向するCCDカメラに入射する。用いたCCDカメラの分光感度範囲は290～1000nmであるため、YAGレーザー（Continuum社製 Laser Powerlight8000）の第2高調波、波長532nmを照明光に用いた。CCDカメラの前には、532nmの波長だけを通過させるバンドパスフィルタを取り付け、プラズマの発光など他の波長の光の影響を少なくしている。YAGレーザーの諸特性を表1に示す。表に示されるように10Hzで発光を繰り返す仕様になっている。放電中の任意のタイミングで極間観察を行うため、YAGレーザーの発光時点を基準として放電を発生させた。即ち本観察システムでは、YAGレーザーの発振と同期した出力信号を基準にして、放電発生トリガ信号およびCCDカメラのゲート信号をDelay Generator（Stanford Research Systems社製 DG535）によって制御し、放電開始時間と観察時間の間隔を調節した。Delay Generatorにより調整された両信号のタイミング精度は、数ns～十ns程度の誤差範囲であった。

また本システムでは、YAGレーザーが10Hzで発光を繰り返しているため1回の単発放電中における極間観察は1画像だけとなる。したがって、同一条件の単発放電を繰り返して、観察するタイミングを変更して電極先端形状の変化を観察した。また、前報での実験では全て市販の放電加工機（三菱電機製M35K）を用いた単発放電実験の結果であったが、図3の観察システムでは、放電回路を自作して単発放電を発生させている。自作した単発放電回路は、直流電源とスイッチング素子であるFET及び無誘導抵抗からなり、FETのゲート信号にはファンクションジェネレータ（岩崎通信FG-350）からのシングルパルス信号を入力した。信号のパルス幅の調整により、極間への電圧印加時間

Fig.3 Schematic diagram of the experimental device

Fig.4 Photographs of the discharge phenomena in gap region

が制御可能である。作成した放電回路は、極間への電圧印加時間のみが制御可能であり、放電パルス幅を制御する仕様ではない。そのため、放電遅れ時間がある場合には実際の放電パルス幅は一定とならない。しかしながら、直径0.1mmの細線電極を用い、極間距離を数μm程度に小さくして単発放電実験を繰り返したところ、いずれの場合も放電遅れ時間は観察されず、電圧印加とほぼ同時に放電が発生した。すなわち、電源電圧が印加されても極間はその電圧値にまで立ち上がらず直接放電に至り、同時に指定した放電電流が流れることが確認された。これより、本実験においては電圧印加時間と放電パルス幅となり、パルス幅一定の実験を繰り返すことが可能であると判断した。自作放電回路による微細化条件として、電流値30A、パルス幅400μsを設定した。実験に用いた他の放電条件を表2に示す。この条件を用いた単発放電により電極先端が微細化することを事前に確かめている。

3. 油中単発放電実験における極間観察

図3の装置を用いて、小型の加工槽に放電加工油を満たし単発放電を発生させた時の極間観察を行った。電極は直径0.1mmのタンゲステン電極、相手材料にはカツの刃を用いた。図4は、一回の単発放電実験における一連の写真を示す。同図は3枚の写真から構成されており、(a)は放電発生前の状態（電極と工作物が極間距離数μm離れて保持された状態）、(b)は放電中の任意のタイミングにおける極間状態、(c)は放電終了後2分程度経過した後の極間状態をそれぞれ示す。図4(b)に見られるように油中単発放電における極間観察では、発生する気泡に遮られて電極先端形状を観察することはできない。加工液を放電加工油から脱イオン水に変えた実験でも同様に気泡が発生して電極形状は観察できなかった。これはYAGレーザーが、気泡の表面で反射や屈折をしたためである。そこで、気泡が発生しない気中放電実験を行い、同様な極間観察を行った。図5に、気中放電における放電開始後300μs

Fig.5 Photographs of the discharge in air

Fig.6 Bubble radius as a function of time after discharge starts

の極間観察結果を示す。気泡が発生しなければ、放電プラズマの発光に妨げられずに放電中の電極先端形状が観察できる。これより気泡の発生を防ぐか、あるいは気泡表面でのレーザー光の反射や屈折の影響を防ぐことができれば、油中単発放電中の極間観察が可能であると考えられる。ただし単なる気中放電では、図5に示すように電極先端は丸くなるのみで微細化することはない。

一方、油中単発放電における極間観察では、電極形状を観察することができなかったが、発生する気泡の変化を観察することは可能である。そこで、観察タイミングを変えて、各観察時点における気泡半径を測定した。図6に、得られた気泡半径の時間変化を示す。電極先端形状を把握できるようにレンズ系を高倍率に設定したため、視野を越えて気泡が広がった400μs付近では半径を特定できない。また、気泡が崩壊する過程では、気泡形状が崩れるために800μs以後は半径を特定できない。ただし、気泡消滅の直前では、再び小半径の気泡が観察された。図より、気泡は放電開始直後から膨張を続け放電終了前後には直径数mmにおよぶ。その後気泡は収縮し、極間が再び油で満たされるのは放電開始から2ms程度後であると推定される。ところで気泡が消滅した直後では、電極先端の観察が可能であり、その時点では電極先端は既に微細化していることが判明した。このことから、先端の微細化は気泡中で進行しているものと考えられる。

次に、気泡の発生を防ぐ方法として、以下の対策を講じた。即ち、加工液を加工槽一杯に満たさずに、工作物上に油を一滴垂らした状態で単発放電を行う方法（油膜法）である。この方法であれば、放電が発生する瞬間には極間のみが油膜で満たされるため、その後気泡が発生することはないと考えられる。市販の形彫放電加工機を用いて、上記の方法で単発放電を試みたところ、電極の先端が油中放電と同じように微細化していることが確かめられた。したがって、以後は油膜法を用いた単発放電中の極間現象の観察を行った。

(a) Before discharge (b) During discharge (10μs after breakdown) (c) After discharge (2min after discharge)

Fig.7 Photographs of the discharge phenomena in gap region

Fig.8 Scattering of oil film

4. 油膜単発放電実験における極間観察

上記の油膜法を用いて単発放電中の極間観察を行った。相手材料には炭素鋼（SK4）を用いた。図7（b）に放電開始後10μsの極間観察写真を示す。図4と同様に3枚の写真を1セットとしている。（b）の写真に見られるように、放電開始直後は油膜の飛散により電極先端形状を観察することはできない。ただし、（c）に示すように放電後は電極先端が微細化していることから、油膜の飛散が収まれば、電極先端形状の変化が観察できると考えた。観察するタイミングを変えて実験を繰り返したところ、放電開始後300μs以後は油膜の飛散が収まり、電極先端形状を観察することができた。放電開始後50μs～300μsまでの油膜の飛散の変化を図8に示す。油膜の飛散が徐々に大きくなり、その後収まりつつある様子が観察できる。これら4枚の写真は全て異なる単発放電実験による観察結果であるが、油膜飛散の時間変化から現象の繰り返し精度は良いと判断できる。

放電開始後400μsの極間観察結果を図9（b）に示す。加工前の状態（a）と放電後の状態（c）を合わせて示している。図9（b）の観察時点は、放電が終了する直前であり電極と工作物間にプラズマが発生している最中である。図5の気中放電における観察と同様に、プラズマの発光中にもかかわらず電極先端形状が観察されている。この時点においては、電極先端は溶滴が形成されて丸い状態にあることがわかる。ところが、図9（c）に見られるように放電後は微細軸が成形されている。以上は一回の単発放電実験の結果である。そこ

Fig.9 Photographs of the discharge phenomena in gap region

Fig.10 Photographs of the discharge phenomena in gap region

で放電が終了した直後、数 μs ～50 μs までの観察を繰り返したが、いずれの場合も電極先端は丸い形状のままであった。前報で報告したように¹⁾、電極先端の微細化の要因としてプラズマジェットや電磁力や静電気力など電気的な作用を考え、放電が終了する前後で微細化が進行しているのではないかと予想した。ところが、上記の観察結果により、放電終了後50 μs であっても電極先端は微細化していなかった。しかも、図9(c)に示した様に各単発放電実験における放電終了後の観察では電極先端が微細化していたことから、放電終了後少なくとも50 μs 以後に微細化が進行したと判断できる。そこで、放電終了後50 μs 以後の観察を続けたところ、放電終了後100 μs 程度から電極先端が微細化し始めることがわかった。図10(b)に、放電終了後135 μs の観察結果を示す。電極先端が丸い形状ではなく先端が尖り始めていることがわかる。ただし、(c)の放電終了後2分後の写真を見ると先端形状はさらに微細化が進行していることから、(b)の時点から徐々に形状が変化して最終的に(c)の形状になったと考えられる。さらにタイミングを遅らせて観察を続けたところ、放電終了後350 μs （放電開始後750 μs ）程度以後では形状変化は停止し、最終形状に至っていることがわかった。これらの観察結果より、微細軸の成形は放電終了後100 μs 程度から先端が微細化し始め、以後250 μs 程度の時間をかけて成形されることが判明した。

以上に述べた一連の単発放電実験では、電極先端形状の変化と共に各観察時点における極間距離を同時に観察することが可能である。放電開始前の極間距離は数 μm に設定しているため、各観察時点における極間距離は、その観察時点までの電極長さ消耗量に等しいと考えられる。各観察時点における極間距離に注目すると、電極先端は放電が終了した後も後退し続けており、電極の消耗が進行しながら微細軸が成形されていることがわかった。これより微細軸の成形プロセスとして、当初予想したような電極先端の溶融部が引きのばされて成形するものではないことが明らかとなった¹⁾。以上は電極側の極性を(－)として実験した場合の結果であるが、電極極性を(＋)とした場合の極間観察も行い、先端の形状と極

Fig.11 Change of electrode edge shape and gap distance during discharge

Fig.12 SEM image on cross section of a thin electrode

間距離の変化を観察した。図11に、放電開始後の(－)極側と(＋)極側の先端形状化の変化を、極間距離の推移と共に模式的に示す。横軸に放電開始からの時間を示し、縦軸は各観察時点における極間距離(＝電極長さ消耗量)を示す。放電開始直後は、油膜の飛散により電極先端形状を観察することができないため原点との間を点線で補間した。放電条件は電流値30A、パルス幅400 μs である。図11によれば、極性(＋)側の長さ消耗量が常に大きい。また極性(＋)側は、放電が終了した直後に電極の消耗は停止するのに対して、(－)側は放電が終了した後も数百 μs の間、電極の消耗が進行する。以上のように、電極極性の違いにより消耗量やその時間的変化および先端形状が大きく異なることがわかる。

5. 微細軸の断面観察と成形プロセスの推察

単発放電により瞬時成形された微細軸の断面組織の観察を行った。微細軸を樹脂埋して研磨した後、タンゲステン用の腐食液（硝酸35ml、ふっ酸15ml、蒸留水75ml）を用いてエッチングした組織をSEMにて観察した。図12に観察写真を示す。(a)に先端全体写真、(b)に根元側の拡大写真、(c)に最先端付近の拡大写真をそれぞれ示す。(b)より、軸根元側の太くなった部位には元の直径100 μm の電極組織との間に隙間が観察でき、この部位の組織は中にクラックも見られることから溶融再凝固した組織であることがわかる。また(c)より、先端

Fig.13. SEM image on cross section of a spherical electrode

付近の組織には数 μm の結晶粒が観察でき、この部位は溶融再凝固した組織ではないことがわかる。直径数 μm の結晶粒は、軸先端が高温にさらされることにより成長した組織と考えられる。また、最表面には薄い膜の存在が認められる。以上により、電極先端に形成されていた熔融部が(b)の位置まで移動したものと考えられる。

図11の電極先端形状の時間的変化と微細軸の断面組織観察から、微細軸の成形プロセスは、電極先端に形成した熔融部が表面に沿って軸根元側に移動することにより、未熔融部である電極の芯が露出して成形されたと考えられる。

同様にして、電極極性(+)で単発放電した電極先端に対して断面組織観察を行った。図13に観察結果を示す。先端の丸い形状の周囲は、図12(b)の電極外側の組織と同様に溶融再凝固した組織であることがわかる。ただし、その中央には未熔融組織が三角状に存在している。これより、(+)極側でも、外側の熔融部が軸根元側に移動しさえすれば、未熔融部である電極の芯が露出する可能性がある。

電極先端形状の時間変化および微細軸の断面組織の観察より、単発放電による微細軸成形のメカニズムを推察すると次のようになる。電極の極性を(-)として単発放電を行った場合、放電終了後100 μs 程度経過してから先端に形成されていた熔融部が何らかの力の作用により軸根元側に移動することで、未熔融部の電極の芯が露出して微細軸が形成される。放電が終了した後の現象であることから、前報で検討していたプラズマジェットによる作用あるいは電磁力や静電気力などの電気的な作用は考え難い。放電終了後に電極先端に作用する力として、気流の影響が候補として挙げられる。気流の影響は極性(+)側にも同様な作用が働くと考えられるが、極性による長さ消耗量、すなわちエネルギー配分の違いにより影響に差が生じているものと考えた。電流値50A、パルス幅256 μs で単発放電を行えば、極性(-)側の長さ消耗量は220 μm 程度であるのに対して、(+)側の長さ消耗量は550 μm 程度である。(+)側は2倍以上も放電発生点、すなわち圧力の起点から遠いため、気流の影響が小さくなったと考えられる。以上の推論は、気泡発生が見られない油膜法における電極先端形状の観察に基づいている。これに対して油中単発放電では、既述のように発生気泡の影響によって電極先端形状を光学的に観察できない。一方、過去の研究において、コンデンサによる水中単発放電の実験がなされ(パルス幅68 μs 、ピーク電流値120A)、放電終了後においてもなお百数十 μs の間気泡が膨張することが報告

されている³⁾。すなわち図6においてはカメラ視野の制限のため確認できないが、放電終了後にさらに気泡が膨張している可能性がある。そうであるならば、油中放電でも微細軸成形メカニズムは油膜法におけると同様であると推察される。しかし、気泡の膨張過程についてはさらに確認する必要がある。

6. ま と め

単発放電を用いた微細軸瞬時成形の成形メカニズムの解明のために、放電中の電極先端形状が観察できるYAGレーザを背光としたイメージングシステムを構築して電極先端形状の変化を観察した。また、成形した微細軸の断面観察により成形プロセスおよび成形メカニズムを検討し、以下の結論を得た。

- 1) YAGレーザを背光として用いたイメージングシステムにより、放電中のプラズマの発光に影響を受けずに高い時間分解能で極間状態を観察することが可能となった。
- 2) 工作物表面に油膜を塗布した単発放電において、電極先端形状の変化を観察した結果、微細軸は放電終了後100 μs 程度から微細化し始め、250 μs 程度の時間を掛けて成形される。
- 3) 微細軸の先端は未熔融組織であり、電極先端に形成された熔融部が軸根元側に移動することにより電極の芯が露出して微細軸が成形されている。
- 4) 放電終了後に、極性(-)側の先端に形成した熔融部を軸根元側に移動させる力として、放電により発生する気流の影響が考えられる。

単発放電による微細軸瞬時成形法は、微細放電加工用の工具電極および微細計測用のプローブとしての応用が期待できる。成形プロセスおよび成形メカニズムを推定できたことにより、微細軸の成形精度の向上、成形形状の制御への可能性が開けた。

謝 辞

タンガステン断面組織観察に関しまして御指導いただきました豊田工業大学 恒川好樹教授に感謝致します。放電中の極間観察実験に協力いただいた長岡技術科学大学 大学院生 清久悟志氏(現:大日本スクリーン製造(株))、小倉勉氏(現:三菱重工業(株))、佐藤尚之氏(現 横河電機(株))に感謝致します。本研究の一部には、平成12年度文部省科学研究費(基盤研究(A)(1)11305053)、平成13年度住友財団基礎科学研究助成および平成13年度ファナックF Aロボット財団研究助成を用いました。記して感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 武沢英樹, 毛利尚武, 古谷克司: 単発放電による微細電極の瞬時成形(第1報), 精密工学会誌, 67, 8(2001)1299.
- 2) 池田光知: 単発放電により細隙に発生した気泡の挙動について(第1報), 電気加工学会誌, 6, 11(1972)12.
- 3) 元木幹雄, 行村 建, 和田宏隆: 放電加工の加工機構, 電気加工学会誌, 11, 22(1978)100.
- 4) 橋口清人, 山本武久: 液中過渡アーク放電による衝撃力, 電気加工学会誌, 6, 12(1973)55.
- 5) Ito Y., Shimizu T., Oguro I. and Kijima S.: Jet-like plasma formation in laser ablation of metals observed by nanosecond imaging technique in gases, Proceedings of ICALEO'99, LIA Vol. 87, Part 2, (2000)61.
- 6) Ito Y., Oguro I., Kiyoku S., and Nakamura S. Effects of Pulse Numbers in Laser Ablation of Metals Observed by Photoacoustic and Imaging Technique. Proceedings of ICALEO 2000, LIA Vol.87, Part 2, (2000)242.