マイクロアーク現象*

平田 好則**, 福嶋 勝人***, 佐野 孝信****, 尾崎 公洋*****, 黄地 尚義**

Experimental Research of Micro-Arc Discharge Phenomena*

by Yoshinori HIRATA**, Masato FUKUSHIMA***, Takanobu SANO****, Kimihiro OZAKI*****
and Takayoshi OHJI**

Features of microseconds arc discharge with gap spacing of micrometers, between a cathode of thin tungsten wire with sharpened tip and an anode of stainless steel plate, have been experimentally investigated. The experimental setup, which consists of a micro-arc torch, precise positioning mechanisms actuated by piezoelectric devices and pulse motors, and a power supply for discharge, was constructed. Time-resolution of micro-discharge appearance was observed through microscope with high-speed shutter CCD camera. It is shown that gap length is dominant factor of not only electrical breakdown voltage but also size and/or form of melting spot at anode surface by micro-arc.

Key Words: Micro-Arc, Electrical Breakdown, Tungsten Cathode, Melting Spot, Very Small Size Welding, Gap Spacing, Microseconds Pulse

1. 緒 言

マイクロマシンに代表されるような微小サイズで、かつ、さまざまな機能を持つ構造体を作り上げるマイクロ加工技術の開発が進められている。現在の技術基盤は、主としてセンサーなどへの応用から集積回路の組込みも同時に行える半導体シリコンを材料として使用するフォトファブリケーションなど、いわゆるシリコンプロセスに置かれている¹⁻³⁾。一方、金属やセラミックスなどの加工を対象とした研究も進展しており、集束イオンビーム(FIB)やレーザーアシストエッチングなどのビーム加工法、ワイヤ放電研削加工法が検討されているが、いずれも除去加工を基本としたプロセスであり、溶接・接合の視点から検討した例は少ない。そこで、本研究では微小サイズの溶接を行う上での問題点を明らかにするため、アーク放電を溶接熱源として

ビード幅などの溶接部寸法が従来技術で得られるものに比べて、千分の1(1/1000)以下となるような溶接を達成することを目標において、その基礎実験を行うことにした。

まず、走査電子顕微鏡(SEM)の試料室内でマイクロ放電実験を行える装置を試作し、SEM画面を見ながら電極や被加工材を精度よく操作するとともに、マイクロサイズの溶融現象をその場観察した⁴⁻⁸⁾。その結果、真空中の放電現象では、陽極もしくは陰極材料の金属蒸気を電極間ギャップのプラズマ物質として放電中に供給する必要があるが、放電を長時間安定に持続することが難しいことなどが明らかとなった。次に、実用化にあたって不可欠となる大気中でのマイクロアーク放電の現象を実験的に調べ、絶縁破壊電圧がギャップ長により変化することや陽極表面の溶融スポット径が放電電力や時間とともに大きくなることなどを示した⁹⁾。しかし、実験のばらつきがあり、放電形態の非対称性なども含めて、これら現象に及ぼす各因子の影響が十分明らかではなかった。その後、実験データが電極形状によって変化することをつかみ、タングステン電極の作製方法を改善した。本報告では大気圧下での微小ギャップの絶縁破壊現象と放電形態、放電後の溶融スポットについて、実験的に調べた結果を述べる。

2. 実験装置および実験方法

Fig.1はマイクロアーク放電の実験に用いたトーチ断面を示す。ティグトーチを小さくした形で、雰囲気ガス導入部、微細電極を支えるコレットとコレット保持部、ノズルからなっている。電極(陰極)には、直径0.3 mmの純タン

*原稿受付 平成11年10月1日 平成10年度春季全国大会で発表、平成10年5月溶接アーク物理研究委員会で発表

**正 員 大阪大学大学院工学研究科 Member, Osaka University, Graduate School of Engineering

***正 員 大阪大学大学院工学研究科(現:石川島播磨重工業(株)) Member, Osaka University, Graduate School of Engineering (Present Address: IHI Co.)

****正 員 大阪大学大学院工学研究科(現:日本鋼管(株)) Member, Osaka University, Graduate School of Engineering (Present Address: NKK Co.)

*****正 員 名古屋工業技術研究所 Member, National Industrial Research Institute of Nagoya

Fig. 1 Cross section of micro-arc torch.

Fig. 2 SEM photographs of tungsten electrodes shaped by electrolytic polishing.

Fig. 3 Block diagram of experimental setup.

グステン線（純度99.95%）とトリヤ入りタングステン線（1%ThO₂）の2種類を用いた。タングステン電極の作製方法の改善点であるが、基本的にはこれまでと同じ電解研磨を用いている⁵⁾が、電極を電解溶液に浸漬するときの直角度や浸漬深さの設定精度、電解溶液の濃度管理などをより厳しく行った。Fig. 2は実験に使用したタングステン電極のSEM写真である。電解研磨時の電極の浸漬深さや電流などの条件によって、先端曲率半径を変えることができ、本実験では0.4~6.7 μm の5種類の形状を用いた。一方、

陽極側の試料には、主としてステンレス鋼を用いた。雰囲気ガス（放電ガス）にはアルゴン（Ar）とヘリウム（He）を用いている。

Fig. 3に試作した実験装置の概略を示す。周辺の騒音や床振動の影響を小さくするために、装置全体を防振台の上に設置している。トーチ及び試料陽極は、それぞれ小型ステージ上にセットし、その上下（Z）方向、水平（X）方向の移動は、ステップモータを用いて、0.5 μm の精度で調整できる。さらにトーチの上下方向の位置決めは、ピエゾ

Fig. 4 Electric circuit used for micro-discharge experiment.
 (E_D : Pulse power source for discharge, E_C : Power source for detecting contact of electrodes, r : Current detecting resistance, R : Current limiting resistance)

素子によりナノメートルオーダーの精度で調節可能である。放電実験の電気回路を Fig. 4 に示す。主回路の電源には無負荷電圧100～1000 V 可変の直流パルス電源を用い、本報告の実験範囲ではマイクロ秒オーダーの時間変化を調べることとし、パルス幅を0.5～50 μ s の間で変化させた。また、放電電流を制限するために100 Ω ～5 k Ω の抵抗 (R) を直列につないでいる。放電電流は0.5 Ω の抵抗 (r) の両端に発生する電圧から求めている。なお、スイッチ SW を切り替えて、1 V 以下の直流電圧を電極間に加えることにより電極と試料との接触を検出した。

実験手順として、まず、スイッチ SW を図の破線側に入れて主回路から切り離し、上記のステップモータおよびピエゾ素子を駆動させ、タングステン電極をゆっくりと試料(陽極)に近づけ接触させる。電極と試料が接触した時に流れる短絡電流(数10 μ A に制限している)を微小電流計で検出し、試料表面の位置とした。その後、所定の電極間距離に設定し、スイッチ SW を主回路につないで放電実験を行った。このとき、光学顕微鏡に取り付けた高速シャッターカメラ(ナック社製 Flash CAM: 露光時間1～999 μ s 可変)を用いて、放電状況をマイクロ秒オーダーで観察した。

3. 微小ギャップの絶縁破壊

放電をスタートさせるためには、電極間の気体ギャップの絶縁破壊が必要条件である。もとよりギャップ長を大きくすると絶縁破壊電圧は高くなるが、雰囲気や電極先端形状なども大きく影響する。気体中での絶縁破壊は電界で加速された電子の衝突電離によって荷電粒子が増殖し、導電性が高まることによって生じる。そして、さらに陰極での電子放出が電流の連続条件を満足すると火花放電が発生し、電流密度に依存してアークやグローなどの気体放電に移行する。数100 Pa 以上の雰囲気圧力の場合、室温でも極く微量の電子が存在するので、これらを種にして絶縁破壊をさせることができる。

このような絶縁破壊の機構はタウンゼント理論とストリーマ理論に大別されるが、各理論の適用範囲を規定するパラメータは明確でなく、おおまかには雰囲気圧力 p によって区分され、 $p > 10^4$ (Pa) の場合、ストリーマ理論が、それよりも圧力が低いときにはタウンゼント理論が適用できるとされている¹⁰⁾。上に述べた電子の衝突電離による荷電粒子の増殖はタウンゼント理論に基づくものであるが、ストリーマ理論では、これに加えてプラズマ発光による光電離も荷電粒子の増殖に寄与している点異なる。つまり、タウンゼント理論ではギャップ気体が絶縁破壊するためには、電子が陽極に到達するまでの時間を要するのに対して、ストリーマ理論ではプラズマが形成されると、この発光によって電子の移動距離を越えた部分の中性気体を電離することができるので、陽極に向かって急速に放電経路が進展していくことになる。しかし、ストリーマ理論においても初期段階では、陰極近傍から出発した電子が電界で加速され、衝突電離により荷電粒子を増殖することになるので、定性的な議論においては大気圧でもギャップ長が非常に短い場合、タウンゼント理論を適用してもよいと考えられる。

タウンゼント理論に基づいて、自続放電の条件から絶縁破壊電圧 V_s (V) を求めると、次式のように雰囲気圧力 p (Pa) とギャップ長 d (m) の積の関数で表すことができる(バッシュェンの法則)。

$$V_s = \frac{Cpd}{\ln[Apd/\ln(1+1/\gamma)]} \quad (1)$$

ここで、 A 、 C は気体の電離係数(電子1個が電界の方向に1 m 移動する間に衝突電離する数)を E/p の関数として表すために導入される定数であり、気体の種類によって異なる。これらは平板電極を用いた低圧放電による実験から求められているが、実験値との照合から圧力によらず $C/2 \leq E/p \leq 3C$ (V/mPa) において有効とされる¹⁰⁾。ここで、 E (V/m) はギャップ中の電界強度である。式(1)により計算した絶縁破壊電圧(火花電圧)とギャップ長の関係を Fig. 5 に示す。圧力を大気圧(10⁵ Pa)として、シールド

ガス(雰囲気)をアルゴンガス($A=9.0$ ion-electron pairs/mPa, $C=150.0$ V/mPa)について示している。なお、 γ は陰極からの2次電子放出に関係する定数(陰極表面にイオン1個が衝突したときに放出される電子の数と考えてよい)である。これは陰極材料と雰囲気との組み合わせによって異なり、アルゴン-鉄で0.001~0.01とされており、計算では0.005とした。

図からギャップ長が $10\ \mu\text{m}$ を超えると、絶縁破壊電圧はギャップ長を長くするとともに上昇する。定性的には、電界で加速された電子が気体の中性原子や分子と衝突して電離させることになるが、圧力すなわち粒子密度を一定とすると、陽極に向かう電子が衝突してから次に衝突するまでの間に得るエネルギーは、電界強度でほぼ決定されるので、ギャップ間隔が長くなるとともに大きな電圧が必要となる。一方、ギャップ長がマイクロメートルオーダーに短くなると、陽極方向への衝突回数が減少するので、1回の衝突での荷電粒子増殖の割合を高くするために急激に電圧が上

昇することになる。

Fig. 6は先端曲率半径 $r=0.4\ \mu\text{m}$ のタングステン電極による実験結果である。シールド(雰囲気)ガスとしてアルゴンとヘリウムを比較する。ギャップ長が $10\ \mu\text{m}$ を超えると、いずれの雰囲気においても、絶縁破壊電圧はギャップ長とともに高くなるのが分かる。また、電離電圧の高いヘリウムの方がアルゴンよりも電圧が高くなっており、ギャップ長の長い領域では、気体の衝突電離の現象が支配的になっているものと考えられる。もとより光電離も同時に進行しているものと考えられ、ストリーマも生じている可能性もある。ただし、絶縁破壊電圧とギャップ長との関係だけに注目して議論するのは危険であり、時分解精度の高い観測を必要とする。

一方、ギャップ長が $10\ \mu\text{m}$ よりも短くなると、パッシェン則による計算結果が最小値230 Vから1000 V以上に急激に上昇しているのに対して、実験では雰囲気ガスの種類によらずほぼ250 Vの一定値を示している。この理由を考えるために、SEM 試料室の真空中での実験結果^{5,7,8)}を引用する。実験では真空中で絶縁破壊させるためには、ギャップ長 $2\ \mu\text{m}$ でも800 V以上の電圧が必要であったが、ギャップ長をそれよりも小さくすると絶縁破壊電圧が急激に低下した。具体的には、ギャップ長 $1\ \mu\text{m}$ で300 V、 $0.3\ \mu\text{m}$ で150 V以下となり、電極間の平均電界強度がほぼ 5×10^8 V/mの一定値となるような実験結果が得られた。このことから真空中では陰極からの電界放出がまず起こり、それによって陰極局部がジュール加熱されるか、あるいは、陰極から飛び出した電子がギャップ中で加速され、陽極表面に流入しこれを加熱することが考えられる。その結果、両電極もしくはいずれかの電極物質が蒸発することにより、電極ギャップに金属蒸気が供給され、電子がこれらに衝突して絶縁破壊に至ると考えられる。このことから大気圧下においても、気体の平均自由行程程度(大気圧でサブミクロンオーダー)の短いギャップ長になると、絶縁破壊が

Fig. 5 Paschen curve of breakdown voltage calculated as a function of gap length for argon gas.

Fig. 6 Electrical breakdown voltage as a function of gap length for argon gas and helium gas.

Fig. 7 Relationship between electrical breakdown voltage for argon gas and curvature radius of electrode tip.

起こる時の電子放出機構としてイオンや光子による γ 作用に加えて、電界放出も大きく影響するものと考えられる。従って、なんらかの形で陰極からの電子放出を促進してやれば、絶縁破壊が容易になることを示唆している。例えば、非接触のアークスタートを行うには3,000 V以上の電圧が必要とされるが、交流アーク溶接で観測される再点弧電圧は、電極材料にもよるが200~400 V程度であり、ギャップ気体の温度に加えて電極温度が高いため熱電子放出が影響しているものと考えられる。

次に、電極先端の曲率半径の影響を調べた。両電極が平板状の場合、ギャップ間の電界強度 E_0 は均一で、印加電圧 V とギャップ長 d を用いて $E_0 = V/d$ で表せる。電極形状を尖鋭化すると、その電極の極く近傍の電界を高めることができる。すなわち、曲率半径やギャップ長を調整することによって、電極近傍の局部電界強度を平行平板電極の電界強度 E_0 よりも高くすることが可能となる⁹⁾。従って、ギャップ長が長くなっても陰極先端から数マイクロメートル程度までの領域での衝突電離が盛んとなり、絶縁破壊電圧が低下することが予想できる。Fig. 7はタングステン電極の先端形状の影響を示したもので、曲率半径を小さくすると絶縁破壊電圧が低下することが分かる。

4. マイクロアークの電流電圧波形と放電形態

Fig. 8(a)(b)(c)はいずれも無負荷電圧400 V、ギャップ長4 μm 、パルス幅20 μs で母材陽極をステンレス鋼としたときの電流・電圧波形である。それぞれ、雰囲気ガスと電極材料の影響を比較している。これらの電流・電圧波形に対応する放電外観をFig. 9(a)(b)(c)に示す。高速シャッターカメラの感度の関係で、いずれも露光時間は3 μs としている。写真に示した各時刻はシャッターが開いた瞬間で、例えば、時刻0 μs のものは0~3 μs の放電状況が撮影されたものである。なお、CCD素子出力のゲインは(a)(b)で最大、(c)で

最小に設定している。まず、電極材料を純タングステンとして、雰囲気ガスの影響についてアルゴン(Fig. 8(a), Fig. 9(a))とヘリウム(Fig. 8(b), Fig. 9(b))を比較する。電圧波形から、アルゴンの場合、点弧直後17 V程度であるものが、約6 μs 後に約24 Vに上昇していることが分かる。この電圧変化に対応して、Fig. 9の時刻0 μs 、3 μs ではアークが電極付近に集中しており、その後10 μs で、軸対称で周辺に広がっていることが分かる。さらに、15 μs になると発光は電極のやや上方で見られ、軸対称ではなくなっている。一方、ヘリウムでは通常のティグアークと同様、放電電圧がアルゴンよりも高く、約30 Vとなっている。また、アーク外観は点弧直後の0 μs で軸対称に見えるが、すぐに非対称な形状になる。このような電圧や形態変化の理由として、(1)電極先端の溶融、消耗によるアーク長の増加、(2)アークプラズマの拡大による電位傾度の増加などが考えられるが、メカニズムを含めて明らかではなく、今後、放電後の電極観察など詳細に行う必要がある。

次に、電極材料の比較としてアルゴン雰囲気におけるトリヤタングステンの現象(Fig. 8(c), Fig. 9(c))を述べる。まず、Fig. 8(a)(c)の電圧波形を比較する。アルゴン雰囲気の場合、電極材料によらずいずれの波形にも電圧の段差が見られるが、トリヤタングステンでは電圧の低い(17 V程度)期間が純タングステンよりも長く、より安定なことが推察できる。また、Fig. 9(c)のアーク外観から明らかなように、CCDのゲインを最小にしても発光輝度がかかなり高いことが分かる。これはトリヤ入りの仕事関数が純タングステンよりも低いことが現象に作用しているものと考えられる。メカニズムとしては電極の温度分布が同じ場合、仕事関数が小さいほど電流密度が高くなるので、アークの陰極部が先端付近に集中しやすくなるなど考えることができるが、今後の検討課題としている。

Fig. 8 Oscillograms of current and voltage in gas tungsten micro-arc discharge.
(No load voltage: 400 V, Gap length: 4 μm , Pulse width: 20 μs)

Fig. 9 Time-change of gas tungsten micro-arc appearances taken by fast shutter CCD camera.
(No load voltage: 400 V, Gap length: $4 \mu m$, Exposure time: $3 \mu s$)

5. 陽極の溶融現象

Fig. 10 は単パルスのアーク放電を発生させたあとの試料ステンレス鋼の溶融スポットを示している。雰囲気ガス Ar, 無負荷電圧 600 V, 制限抵抗 200Ω , パルス幅 $5 \mu s$ として, ギャップ長を変えている。SEM 写真からスポットの直径を求め, ギャップ長との関係を表したものが Fig. 11 である。これからギャップ長が短いとき, 溶融部は穴明きとなり, 長くなるにしたがって平坦となる。また, スポット直径もギャップ長とともに小さくなり, $5 \mu m$ ではアーク放電が発生しても溶融部は形成されなかった。このことから, 陽極表面でのアークの集中度がギャップ長によって変化すると考えられる。ギャップ長が短い場合には, 電極

直下の電流密度もしくはエネルギー密度が高く, 局所的なアーク圧力が高くなるため, 溶融スポットの中心部が凹むものと考えられる。また, 入熱密度が高いため, 局所的な蒸発が起これ, その反力によりくぼみが形成される可能性もある。上記の場合, アーク電流が約 $2.5 A$ であるが, 無負荷電圧を変えることにより, アーク電流の影響を調べることができる。Fig. 12 はギャップ長と無負荷電圧を変え, 陽極の溶融スポットを分類した結果である。図から, 無負荷電圧(アーク電流)よりもギャップ長の影響が大きく, $1 \mu m$ 程度よりも短くなると溶融部の中心が凹んだ穴あき状態になる。 $1 \mu m$ から数 μm の範囲で溶融面が平坦な陽極スポットが得られる。ギャップ長が $5 \mu m$ を越えると, 放電が発生しても陽極表面には溶融部は形成されない。

平坦な溶融スポットが形成された例を Fig. 13 に示す。

Fig. 10 SEM photographs of melting spots at anode surface formed by argon gas micro-arc with pure tungsten cathode at various gap lengths. (No load voltage: 600 V, Resistance R : 200 Ω , Pulse width: 5 μ s, Anode: stainless steel plate)

Fig. 11 Relationship between gap length and melting spot diameter at stainless steel anode by argon gas micro-arc. (No load voltage: 600 V, Resistance R : 200 Ω , Pulse width: 5 μ s)

なお、溶融深さについては調べていないが、10 μ s 程度のパルス幅であるので、熱伝導論的には数マイクロメートルの深さとなる。Fig. 14 は雰囲気ガス Ar、無負荷電圧 500 V、ギャップ長 1.5 μ m として、平坦な溶融スポットを形成させたときのパルス幅と溶融スポット径との関係を整理したものである。いずれの電極材料においても、スポット径はパルス幅の短い領域では、時間とともに大きくなるが、3 μ s 以上ではほぼ一定値になっている。しかし、純タングステンよりもトリヤ入りタングステンの方がスポット直径が大きく、放電時の発光強度に対応して、アークの集中度が高くなっているものと推測している。

Fig. 12 Dependence of melting form at anode surface by argon gas micro-arc on gap length and no load voltage.

Fig. 13 SEM photographs of melting spot with flat surface formed by argon gas micro-arc. (No load voltage: 500 V, Resistance R : 200 Ω , Gap length: 1.5 μ m, Pulse width: 6 μ s)

Fig. 14 Relationship between pulse width and melting spot diameter formed by argon gas micro-arc.

6. 結 言

本報告では、大気中でのアーク放電による微小サイズの溶融現象を利用するための基礎実験として、直径0.3 mmのタングステン陰極と金属陽極との間のギャップ長を数マイクロメートル以下にして、1000 Vまでのマイクロ秒オーダーのパルス電圧を印加したときの放電現象と陽極表面の溶融特性を調べた。

以下に得られた結果を要約する。

- (1) 絶縁破壊電圧はギャップ長を大きくすると高くなる。ギャップ長が1 μm よりも短い領域では200~300 Vのほぼ一定値を示した。また、電極先端の曲率半径を小さくすると、絶縁破壊電圧は低下する。
- (2) マイクロアークの高輝度領域は、点弧直後の数 μs の期間、電極先端部に集中しているが、その後、時間の経過とともに周囲に広がっていく。また、ギャップ長が短く、電極先端の曲率半径が小さいほど、電極先端に集中する。
- (3) マイクロアークによる陽極表面の溶融スポットの形態や大きさは、ギャップ長や無負荷電圧、電流値、パルス幅などによって異なり、平坦溶融や穴明きなどが生じる。スポット径は放電時間(パルス幅)とともに大きくなり、ステンレス鋼では1~3 μs でほぼ一定値になる。

本研究は、文部省科学研究費平成7年度重点領域研究(ミ

クロ伝熱：代表 棚沢一郎(東京大学))、平成7、8年度基盤研究A(2)、平成10、11年度基盤研究B(2)の援助により実施した。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 江刺正喜：マイクロマシン，応用物理，Vol. 60，No. 3，pp. 227-238 (1991)。
- 2) 藤田博之：マイクロマシン研究入門，電気学会論文集A，Vol. 112，No. 12，pp. 958-961 (1992)。
- 3) 庄子習一：微小電子機械システム要素材料とマイクロマシーニング，まてりあ，Vol. 34，No. 1，pp. 17-24 (1995)。
- 4) 丸尾，平田，尾崎：試作STMによる蒸着表面の観察，高温学会誌，Vol. 20，No. 1，pp. 12-18 (1994)。
- 5) 丸尾，平田，尾崎：サブミクロンオーダーの微小ギャップ中の放電現象，溶接学会論文集，Vol. 12，No. 4，pp. 477-484 (1994)。
- 6) 丸尾，平田，尾崎：マイクロ放電による溶融現象，溶接学会論文集，Vol. 13，No. 1，pp. 46-53 (1995)。
- 7) H. Maruo, Y. Hirata, K. Ozaki: Surface Melting Process with a Thin Electrode in a Micrometer Scale, International Institute of Welding, Doc. 212-835-93 (1993)。
- 8) Y. Hirata, K. Ozaki, H. Maruo and T. Ohji: Micro-Discharge and Melting Phenomena with Thin Electrode in SEM Vacuum Environment, Molecular and Microscale Heat Transfer in Materials Processing and Other Applications, begell house, inc. (1997)。
- 9) 平田，佐野，尾崎，黄地：マイクロ放電プロセスについて，アーク物理委資料，ア物97-984 (1997)。
- 10) J.R. Roth: Industrial Plasma Engineering, Institute of Physics Publishing (1995)。