マイクロ放電による溶融現象*

—微細電極を用いる放電とそれによるマイクロ溶融現象 (第2報)—

丸尾 大**, 平田 好則**, 尾崎 公洋***

Melting phenomena by micro-discharge*

—Micro-melting by discharge with a thin tungsten electrode (Report 2)—

by Hiroshi Maruo**, Yoshinori Hirata** and Kimihiro Ozaki***

Micrometer sized melting process is available to micro-welding for manufacturing micromechanical systems. This report describes an in-situ observation of the micrometer sized melting phenomena by micro-discharge with a thin tungsten (W) electrode in a SEM vacuum environment. By the cathode electrode a melting spot can be formed on the surface of the specimen. Diameters of melting spots depend on the amount of discharge energy. Consequently, in the range of $1\text{ }\mu\text{m}$ to $10\text{ }\mu\text{m}$, the diameter of a melting spot can be controlled by selecting the pulse condition. Additionally, a weld bead like melted-zone can be formed by applying repeated pulsed voltage between an electrode and a specimen. The width of a melted-zone depends on pulse voltage, pulse width, repetition frequency, and traveling velocity of an electrode.

Key Words: micro-discharge, micrometer sized melting process, pulsed discharge, in-situ observation by SEM, micro-welding

1. 緒 言

前報では、 10^{-3} Pa の真空中で、細径電極と試料間のギャップ長をマイクロメートル以下にすると、 1000 V 以下の電圧で、真空絶縁破壊が生じ、放電が起こることを明らかにした¹⁾。この放電と同時に、電極および試料表面の極めて小さい領域で溶接が生じる。放電エネルギーは、操作性や制御性に優れており、アーク溶接、放電加工など材料加工のさまざまな用途に用いられている。放電を微小な領域に発生させ、マイクロメートルのレベルで溶融部の形成を制御することができれば、微小なサイズの溶融加工を行うことが可能になると考えられる。本研究では、このようなマイクロ放電による微小溶融現象について基礎的に調べ、マイクロメートルサイズのビードの形成を試みた。

2. 実験装置

実験装置は、前報で示した微小ギャップ放電装置である。これによって、電極と試料間の距離は、ナノメートルの精度で制御することができる。また、3本の圧電素子をトライポッド型に組んだサンプルホルダーに試料をセットすることによって、ナノメートルレベルの精度で、3方向に、最大 $15\text{ }\mu\text{m}$ 移動させることができる。電極は、直径 $90\text{ }\mu\text{m}$ のタングステンワイヤを電解研磨することによって、先端を細く加工したものを使用し、試料は、Ti および Au の薄板をバフ研磨して鏡面仕上げしたものを用いた。放電用の電源は、直流電源とパルス電源を用い、回路内に抵抗を直列に挿入することで、放電電流を制限するようにした。また、すべての実験は、SEM 内

(真空度 10^{-3} Pa)で、その場観察を行いながら実験を行った。SEM に光電子増倍管を取り付け、溶融の際の発光を検出することができるようにした。

3. 実験結果および考察

3.1 直流電圧による溶融現象

電極を陰極にした場合と陽極にした場合の、絶縁破壊後の電極形状と試料表面の状況を Fig. 1 に示す。試料として厚さ 0.5 mm の金の薄板を使用した。図の(a)が電極を陰極、(b)が陽極として電圧 100 V にて放電させたものである。溶融の様相が明らかに異なっていることがわかる。電極を陰極とした場合、陽極となる試料の溶融は、一カ所に集中して生じているのに対し、電極を陽極とした場合には、陰極となる試験面に小さい溶融痕が広がっており、さらに、陽極である電極が、電極が陰極の場合に比べ、激しく溶接していることがわかる。これらのことから、従来の溶接に用いるようなアーク放電と同様に、このようなマイクロ放電においても陽極側が選択的に溶融することが認められる。したがって、試料の局所的な溶融を目的とするとき、直流電圧による放電では試料を陽極、電極を陰極とすると効果的であることがわかる。

直流電圧をギャップ間に印加することで、絶縁破壊を起こし、これと同時に光が検出された。このとき、電極と試料が溶融していることが、SEM によって観察できる。この溶融と電流および光の関係を調べる。制限抵抗を $200\text{ k}\Omega$ として、電極と試料間に、 0 V から 300 V までゆっくりと上昇する電圧を印加した。このとき、回路には電流を制限するために、 $200\text{ k}\Omega$ の抵抗を接続している。ある電圧に達したときに絶縁破壊を起こし、瞬間的に電流が流れる。このとき、オシロスコープに記録された電流と光の強度信号、および、その時観察された試料表面の SEM 像をそれぞれ Fig. 2 (a), (b), (c) に示す。この例では、約 290 V になったときに電流が流れ始め、絶縁破壊が起こっているが、このとき、極めて短時間持続する $100\text{ }\mu\text{A}$ 程度の放電が4つ間欠的に生じてピークとして認められる。これと同期して4つのピークを持つ光の信号が

*原稿受付 平成6年1月6日 平成5年5月 溶接アーク物理研究委員会が発表

**正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Eng., Osaka Univ.

***正 員 名古屋工業技術研究所 Member, National Industrial Res. Inst. of Nagoya

(a) Electrode : Negative

(b) Electrode : Positive

Fig. 1 SEM photographs showing the tip of electrode and the surface of specimen.

Fig. 2 SEM photograph showing melted Au surface by micro-discharge and oscillogram of discharge current and light signal. (a) current, (b) light intensity, (c) melted area.

検出されている。この絶縁破壊が起こった後の試料表面をSEMで観察すると、(c)のように、4つの溶融部が重なった状況となっていて、それぞれが4つのピークに相当する放電に対応していると思われる。このことから、一つの放電によってすでに試料表面に溶融部が形成されていることがわかる。

直流絶縁破壊にともなう溶融は、このように短時間に放電と消滅を繰り返すことによって形成される。この放電と消滅の繰り返しの周期、回数の再現性はほとんど無く、そのときどきで変化する。これは、電極先端の形状が、放電を起こす度に溶融・蒸発して変形し、絶縁破壊する際の電極表面での電流の流れるサイト（陰極点）が変わるためであると考えられる。再現性が乏しいために、こ

のときの溶融部はFig. 3のように、それぞれの溶融部の外形は不規則な形状を呈している。また溶融部には微小な凹凸が存在している。

このようにしてできた数個のまとまった溶融部の外形の直径と絶縁破壊電圧の関係をFig. 4に示す。直流絶縁破壊にともなう放電は、断続的に起こり、その時の放電電流をすべてとらえることが困難であるため、絶縁破壊電圧で整理した。電圧の増加とともに溶融部の直径も増加していることがわかる。このように、直流絶縁破壊にともなうマイクロ放電においては、溶融部の大きさは、与える電圧に依存するものの放電の不安定さから溶融部の形状が不定であり、形の整った溶融部を形成することができない。

Fig. 3 SEM image of a melted surface by DC discharge.

Fig. 4 Relationship between DC voltage applied and diameter of melted spot ($R=200 \text{ k}\Omega$).

Fig. 5 SEM images of melted surfaces by pulsed discharge.

3.2 パルスエネルギーと溶融部の直径との関係

上述のように、直流電圧による溶融部はその形状が定まらないので、安定した溶融部を得るために、パルス電圧を用いた。単パルスの印加によって絶縁破壊を発生させ、その時の電圧、電流、ギャップ間隔を測定し、また、絶縁破壊前後の電極先端および試料表面をSEMで観察した。金板を試料として、絶縁破壊を起こし、放電電流が流れたときに試料にできる溶融部のSEM像をFig. 5に示す。パルス幅を300 nsで一定にし、それぞれパルス電圧を100 Vから300 V、制限抵抗値を200 Ω から1 k Ω に変化させた。いずれも、マイクロサイズの直径を持つ

クレータが形成されているのがわかる。(a)は、パルス電圧300 V、制限抵抗200 Ω における溶融部である。(b)は、パルス電圧を100 Vとして溶融させたものであるが、電圧を低くすると溶融部の直径が小さくなっている。(c)は、制限抵抗 R を1 k Ω として、電流を抑えたときの溶融部である。電流を制限することによっても直径が小さくなっていることがわかる。それぞれの条件における溶融部の直径を測定し、Fig. 6(a)にパルス電圧と溶融部径、(b)に制限抵抗と溶融部径の関係を示す。パルス電圧の増加とともに、また制限抵抗の減少とともに溶融部径が大きくなることわかる。これらのことから、投入されたエネ

Fig. 6 Relationship between diameter of melted spot and pulse conditions. (a) Voltage, (b) Resistance.

ルギーと溶融部の直径には、相関関係があることが予想できる。そこで、第1報¹⁾のFig. 11に示したような電極一試料間に与えられた電圧波形とその間を流れる電流波形との積をパワー(W)とし、さらにそのパワーを時間積分したものを投入エネルギー(J)として求め、その投入エネルギーと溶融部の直径との関係をFig. 7に示す。溶融部直径は、エネルギーに依存し、エネルギーの増加とともに大きくなっていることがわかる。このことは、投入エネルギーによって、すなわち電流と電圧を適切に選ぶことによって、溶融部の直径を制御することができることを示している。

今、この溶融が熱伝導に支配されると考えた場合、上記のエネルギーが表面に投入されたときの溶融する大きさを計算した。半径 a (m) の円盤熱源が、瞬間的に半無限平板上に投入された場合についての熱伝導を考える。このとき平板内の位置 (r, z) における温度は、次式のように表わされる²⁾。

$$T = \frac{qa}{2\sqrt{\pi\kappa t}} \exp\left(-\frac{z^2}{4\kappa t}\right) \int_0^\infty \exp(-\kappa t \lambda^2) J_0(\lambda r) J_1(\lambda a) d\lambda \quad (1)$$

$$q = \frac{Q}{c\rho \cdot \pi a^2}$$

ただし、 J_0 , J_1 : 0次および1次の第1種ベッセル関数, κ : 熱拡散係数 (m^2/s), c : 比熱 (J/kgK), ρ : 密度 (kg/m^3), Q : 投入エネルギー (J), r : 面半径方向 (m), z : 板厚方向位置 (m), t : 経過時間 (s) である。

温度が、試料材料の融点を越える領域の半径を溶融半径 r_m として、この式を数値積分することによって溶融半径を計算する。実験データと比較する場合、熱源の大きさを知る必要がある。本実験において、熱源の大きさを知ることは困難である。しかし、絶縁破壊の際に電極が同時に溶融・蒸発し、電極先端が変形し、この変形部分は、直径にして約 $2\mu\text{m}$ であり、電極と試料間の距離が非常に近いために、これと同程度の大きさの熱が試料表面に到達すると考え、熱源半径を $1\mu\text{m}$ と仮定した。このようにして求めた溶融直径 ($2 \times r_m$) とエネルギーの関係を、実験データと合わせて先に示したFig. 7に示す。この図から、同じ径を溶融させるために必要なエネルギーを比較すると、計算値は実験データから得られ

Fig. 7 Relationship between diameter of melted spot and discharge energy.

るエネルギーの約20%となる。

放電する際には、試料の溶融のみならず電極も溶融し、蒸発する。Fig. 8は1パルスごとの電極の消耗の様子を示している。電極先端部が、パルスを加えるごとに蒸発し、変形していることがわかる。この消耗は、電極の先端の形状によって異なることがSEMで観察できる。実際に消耗した部分の体積を求めることは困難であるが、体積変化の割合と面積変化の割合との間には相関があると考えられるので、この消耗する量の変化を調べるために、パルスを印加する前後のSEM写真を比較し、Fig. 9の模式図の斜線部分のような、パルス印加後に消滅した部分の見かけの面積(投影面積)を求めた。

電極の形状は、放電電流の分布に影響をおよぼすことが考えられる。そこで、電極の頂角をSEM像から測定し、その角度によって電極先端の形状を表した。角度を決める基準として、頂角が、電極の溶融・蒸発による変形に対して影響を受けず、かつ、電極の先端の形状を反映する領域として、頂点から $2\mu\text{m}$ の位置を選んだ。Fig.

Fig. 8 Change of shape of an electrode by pulse voltage applied. (a) before voltage applied, (b) after 1 pulse voltage applied, (c) after 2 pulses voltage applied.

Fig. 9 Schematic of tip of electrode.

9のように電極先端から2 μmのところまで電極側面に対して接線を引き、それらが交わる点の角度を頂角とした。この角度が小さいほど電極は細く、逆に大きくなると電極の先端は太いということになる。

以上のようにして求めた電極の先端角度と蒸発量について検討した。Ti試料を用い、パルス電圧600 V、制抵抗1 kΩ、パルス幅1 μsの条件で、絶縁破壊させたときの、電極先端の蒸発量と試料溶融部の直径との関係をFig. 10に示す。横軸は、上述したように蒸発した部分の面積であり、図中の白丸は、先端角度54°の太い電極、黒丸は15°の細い電極を使用したときの実験結果である。この図から明らかなように、電極の先端の角度の違いで、電極蒸発量と試料溶融部直径の関係が大きく異なっている。すなわち、先端角度の大きい電極を使用した場合、電極の蒸発はほとんどなく、蒸発量と試料溶融部直径との相関はあまり見られない。一方、先端角度の小さい電

Fig. 10 Relationship between diameter of melted spot and removed area from tip.

極を使用した場合、電極の蒸発量の増加とともに試料溶融部の直径も増加していることがわかる。また、その蒸発量は、先端の太い電極に比べて、面積にして最大20倍程度多くなっている。このことから、電極の形状によって、電極の消耗の度合いが異なり、電極の先端が細いほど消耗が激しく、パルスごとの蒸発量が変化することがわかる。このとき試料溶融部の直径と電極先端角度の関係はFig. 11のようになり、電極が太くなると試料の溶

融部直径はわずかに大きくなる。以上のことから、電極の消耗を抑えるためには、先端の太い電極を使用すればよいことがわかる。

3.3 繰り返しパルスによるマイクロビードの形成

以上述べたように、電極と試料の微小ギャップ間にパルス電圧を印加し、パルス放電を発生させることにより、溶融部の形状が安定し、溶融部の大きさが放電エネルギーに依存することがわかった。そこで、パルスを周期的に繰り返し、放電を繰り返し発生させ、電極を試料に添って移動させると、試料表面に連続した溶融部を形成することができると考えた。前報で述べたように、絶縁破

壊を起こし電極と試料間に放電電流を流すためには、 10^9 V/m 前後の電界強度が必要である。従って、1000 V 以下のパルス電圧によって放電を起こすためには、電極と試料間隔を $1\mu\text{m}$ 以下にする必要がある。また、絶縁破壊は数十ナノメートルのギャップ長の変化に影響されるので、放電を安定に発生させるためには、ギャップ長をナノメートルの精度で一定に保つ必要がある。そこで、本研究では、Fig. 12 のように、パルス電圧にベース電圧を加え、ベース電圧が印加されているときに電極と試料間に流れる電流（電界放出電流）を一定に保つように圧電素子を制御して、ギャップ長を一定に保つようにした。本実験において、印加電圧が1000 V で電界放出電流が $1\mu\text{A}$ 程度の場合において、電極間距離が10 nm 変化すると電界放出電流は約2倍変化する。このように電界放出電流は、電圧一定のもとで、ギャップ長に敏感に反応する。従って、電界放出電流を一定に保てば、ギャップを制御することになり、ギャップ長を一定に保つことができる。

ベース電圧印加時に流れる電界放出電流は、数 μA のレベルであるので、この電流を検出するために、I/V コンバータ（増幅率： 10^7 V/A）を用いた。この検出した電界放出電流を制御回路への入力信号とした。制御回路としては、STMの制御回路³⁾を用い、PI制御の定数を電界放出特性に合うように、比例定数（増幅率）は約 $10\text{ nm}/\mu\text{A}$ 、積分回路定数を 0.5 ms とした。なお、本研究で利用したパルス電源装置の制約により、印加できるベース電圧の最大値は100 V である。Fig. 13 は、制御を行っているときの電流信号と、そのときの制御圧電素子の変位量（すなわち、電極と試料間の相対距離変化）を示している。このように制御が安定している場合、電界放出電流を制

Fig. 11 Relationship between taper angle of tip and diameter of melted spot.

Fig. 12 Pulse waveform for repetitious melting process.

御している状態でパルスが印加されると、図のように瞬間的に高いピークを持つ放電電流が流れる。放電電流は設定電流値をはるかに越えているので、制御回路によっ

Fig. 13 Relationship between current waveform and gap length in repetitious pulse process.

て圧電素子が駆動され、その結果、電極は試料から約40 nm 離れる。放電電流が消失した後、再び電界放出電流を一定に制御するように、電極が駆動され、元の位置に戻って行く。これを繰り返すことで、試料表面の凹凸に対しても安定な距離を保ちながら溶融させることが可能である。

この方法によって、チタンの試料を用い、パルス幅300 ns, 制限抵抗100 k Ω とし、ベース電圧100 V, 設定電流値1.5 μ A で制御を行い、繰り返し周波数50 Hz で連続的に溶融させたときの溶融部を Fig. 14 に示す。これは、金属

Fig. 15 SEM image of melting zone by repetitious pulse process of Ti surface.

Fig. 14 Optical microscope image of melting zone by repetitious pulse process on Ti surface (V_p : pulse voltage, $R=100$ k Ω , base voltage: 45 V, traveling velocity: 0.6 μ m/s, pulse frequency: 50 Hz).

Fig. 16 Relationship between pulse condition and melting width. (a) Voltage, (b) Current.

顕微鏡に微分干渉装置を付けて、凹凸を強調したものである。図のように、一定の幅を持つビード状の溶融部を形成することができる。この溶融部にはリップル状の凹凸が観察できるが、SEMで詳しく観察すると、Fig. 15のように微小な溶融部が重なっていることがわかる。このことは、放電が終了してから次のパルスが印加されるまでの間に、溶融部がすでに凝固していることを示している。この溶融幅を、パルス条件によって整理すると、Fig. 16のようになる。この図から、溶融幅は、繰り返し周波数、パルス電圧、電極移動速度などのパルス条件に依存することがわかる。

以上のように、電界放出電流をモニターすることで、電極と試料間のギャップ長が一定になるように制御し、繰り返しのパルス電圧を加えることによって、試料にマイクロメートルの幅の溶融ビードを形成することが可能であることがわかった。

4. 結 言

微小ギャップにおける真空絶縁破壊現象にともなって発生するマイクロ放電を利用して、TiおよびAu表面をマイクロメートルのサイズで溶融させ、その制御性を調べた。以下に得られた結果を要約する。

1) 電解研磨によって作成した先端曲率半径が数十nm程度の針状タングステン電極を用いて、絶縁破壊を起こすと、金およびチタンの試料にマイクロメートルサ

イズの溶融部を形成させることができる。この溶融と同時に光を発生する。

2) 電極と試料間に100~1000 Vのパルス電圧を印加することで、金およびチタン試料表面に直径1 μm から10 μm のサイズのクレータ状の溶融部を形成することができる。このとき形成される溶融部の直径は、投入されたエネルギーに依存し、エネルギーの増加とともに大きくなる。

3) マイクロ放電を安定に発生させるために、電極と試料間に100 V以下のベース電圧を印加し、この時に流れる電界放出電流を検出して、ギャップ長を一定に保つようにした。このベース電圧に周期的にパルス電圧を重ねることで繰り返し放電を発生させ、マイクロメートルレベルの溶融幅を持つビードを形成することができる。このとき形成されるビード幅は、パルス電圧、パルス周期、移動速度に依存し、これらの操作量により制御できる可能性が見出された。

参 考 文 献

- 1) 丸尾, 平田, 尾崎: 溶接学会論文集, Vol. 12, No. 4, p. 477-484 (1994).
- 2) H.S. Carslaw and J.C. Jaeger; "Conduction of Heat in Solids", Oxford.
- 3) 丸尾, 平田, 尾崎: 高温学会誌, Vol. 20, No. 1, p. 12 (1994).