微小放電接合法による金属粒子の接合部の強化について

Micro Discharge Welding and Joint Reinforcement by Non-contact Welding Method

今野 武志, 小林 幹彦, 江頭 満, 新谷 紀雄

Takeshi Konno, Mikihiro Kobayashi, Mitsuru Egashira, Norio Shinya

Received 12 May 2005 ; Accepted 3 August 2005

Newly developed manipulator using microprobe has a function of welding for small metal particles. The welding is carried out by contact discharge welding method and non-contact discharge welding method. High voltages are applied to the probe when the probe touches the particle with the former method, while it is applied when the probe is positioned at $20\mu\text{m}$ above the particle with the latter method. The welded particle is detached, and the fractured joint is observed by an SEM. The fractured joint is less than $5\mu\text{m}$ in each side of square cross section with the contact discharge welding regardless of the welding time. Followed by the contact discharge welding, the non-contact discharge welding is carried out to increase the welding interface. When nitrogen gas is introduced toward the surface during the welding, the discharge flare generated at the tip of the probe extends along the surface of the particle to the joint. Molten metal is piled around the joint and the welding interface is increased.

Keywords : Manipulation, Micro-welding, Microprobe, Particle, Welding interface

1. 緒 言

粉体粒子の集積化は、従来のリソグラフィ技術に替わる微小構造体の作製技術の一つである。工業化が可能な方法として、自己組織化^{1, 2)}やテンプレート法³⁾、モールド法⁴⁾などが注目を集めており、フォトリソグラフィ⁵⁾やバイオセンサー⁶⁾への応用が研究されている。一方、粒子を1粒ずつ扱う方法も、試験的・先導的なフォトリソグラフィの作製法⁷⁾として、あるいは、MEMS^{8, 9)}やロボット技術¹⁰⁾と関連して研究がなされている。

我々は、微小な粒子を規則的に集積させ、微小構造体やデバイスを創製することを目的とした、粒子アセンブルと呼んでいる研究^{11, 12)}を行ってきた。そのための技術開発の一つとして、金属プローブを用い、 $10\mu\text{m}$ ～数百 μm の金属粒子を1粒ずつ配置・接合することができる粒子アセンブル装置の開発¹³⁾を行った。

この粒子アセンブル装置の基本的な考えは、先端を尖らせた金属プローブに、電圧を加えることにより、静電的な力を作用させて、粒子をプローブ先端に吸着させる。また、プローブで粒子を所定の位置に運んだ後に、プローブを微小な溶接棒あるいは電極として用いて、接合するということである。

装置を試作して実験を行ったところ、数十Vの電圧を印加すると、電圧を加えなければ吸着しない大きさの金属粒子を、プローブ先端に吸着することができた。また、低電流・高電圧の電源を用いて、抵抗溶接の手法を適用し、プローブで粒子を基板に押しつけ、しかも、その接触圧力が非常に小さい状態で高電圧を印加すると、金粒子が金基板に接合されることが分った¹⁴⁾。

抵抗溶接による接合で、 $60\sim 80\mu\text{m}$ の金粒子を3段に積み上げた接合体を作った。この接合体は、通常の取り扱いにも耐えるだけの強度があった。しかし、接合状態については全く調べていない。

そこで本論文では、粒子アセンブル装置により接合された粒子について、剥離面をSEM観察し、間接的ではあるが接合状態を推定し、その強化法について検討を行った。

(独) 物質・材料研究機構 材料研究所 機能融合材料グループ
(〒305-0047 茨城県つくば市千現1-2-1) TEL 029-859-2421
Intelligent/Smart Materials Group, Materials Engineering
Laboratory, National Institute for Materials Science
(1-2-1, Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-0047, Japan)

Fig. 1 Main part of the apparatus for the particle assemblage

(1) Microscopes, (2) probe, (3) worktable and (4) jacket for gas flow

2. 実験装置及び方法

2. 1 粒子アセンブル装置

装置についてはすでに前報¹⁴⁾で詳細を述べているので、ここでは簡単に紹介する。金属基板を電動ステージの上に載せて作業台とし、作業台上方にタングステンのプローブを垂直に固定した。プローブ先端に焦点を合わせた2台の実体顕微鏡に取り付けたCCDカメラ（ソニー、XC-003）で、プローブの先端を2方向からモニターする。実体顕微鏡とプローブを固定しておき、作業台を移動させて操作を行うが、ここでは直感的に分りやすいように、プローブを移動して作業したと記述する。吸着及び接合のいずれにも、定格1mA、10kVの直流電源（マクセレック、RHV）を用いた。

前報で述べた装置からの改良点は、不活性ガス雰囲気下で接合を行えるように、ガスを流せるようにしたことである。プローブを固定するコレットチャックから不活性ガスを流し、内径8mmのSUS304鋼チューブのガスガイドを通して、接合時にプローブと同軸にガスが流れるようにした。装置は湿度5～15%に保持された実験室内に設置した。Fig. 1にプローブとその周辺の写真を示す。

2. 2 接合法

Fig. 2に、プローブを電極として用いた、2種類の接合法を模式的に示す。Fig. 2 (a)は、抵抗溶接に相当する方法で、粒子-基板間の抵抗が100k Ω 以上になる程度に、プローブで粒子を基板に軽く押しつけながら、4kV以上の電圧を印加する。Fig. 2 (b)は、アーク溶接に相当する方法で、粒子の上方にプローブ先端がくるようにし、プローブに電圧を印加して放電を発生させる。本実験ではプローブと粒子上面との距

Fig. 2 Two welding methods by the apparatus for the particle assemblage

(a) Contact discharge welding and
(b) non-contact discharge welding

離を20 μm とし、2kVの電圧を印加した。実際の抵抗溶接法とは、電極との接触圧力や電圧・電流値の違いがあり、本論文では前者の方法を接触放電接合と呼ぶ。また、後者の方法も電圧・電流値の違いから、ここでは非接触放電接合と呼んだ。

2. 3 接合部の評価法

プローブ先端にゼリー状瞬間接着剤（アロンアルファ、GL-10）を少量附着させて、基板に接合させた粒子の上面に接触させ、その状態のまま3時間以上乾燥放置する。接着剤が完全に硬化してから、プローブを真上に引き上げて粒子を基板から剥離し、基板に残った剥離面をSEMで調べた。接合した粒子を、プローブで横方向から押すと粒子を剥離することができるが、粒子は基板表面を滑り接合界面を損なったため、せん断ではなく引張りで剥離した。

2. 4 供試材

タングステンプローブは軸径660 μm で先端径2 μm の、半導体の動作検査等に用いられている市販品（エヌピーエス、W26-05-01 $\times$ 1.1/2）を使用した。また粒子は60～80 μm 径の単分散となっている金（以後Auと表記する）粒子を用いた。厚さ1.5mmの銅板に300 μm 厚のAu板を貼り付け基板とし、Au面を作業面とした。

3. 実験結果および考察

3. 1 接触放電接合

3. 1. 1 接触放電による接合

Au粒子を接触放電接合するために、プローブを所

Fig. 3 A frame of video picture of contact discharge welding
(a) Just before the discharge and
(b) during the discharge

定の位置に運び、電源のスイッチを入れると、その瞬間だけプローブ-粒子間、および、粒子-基板間が白く光る。CCDカメラのモニター画像は、民生用ミニDVテープに録画しており、コマ送りで見ると、プローブ-粒子間の光は放電に伴う発光で、粒子-基板間の光は、プローブ-粒子間の発光の反射であった。**Fig. 3**に動画像の1コマを示す。

Fig. 3 (a) は発光前の画像で、**Fig. 3 (b)** は発光中の画像である。発光すると部分的に露出過剰となり、プローブ、粒子および基板の位置関係が分りにくくなるので、発光直前の画像と並べて示した。実体顕微鏡は基板面より高い位置から俯角約5度で観察しているために、Au粒子の下に、基板に反射した粒子が見えている。

Fig. 3 (b) の発光は、プローブ-粒子間に瞬間的に高い電圧がかかり、プローブ表面に存在する薄い酸化絶縁被膜を破壊したときの、火花放電によるものである。粒子-基板間の接触抵抗もかなり高いと予想され、火花放電が生じた可能性はある。しかし、粒子の陰になり見えなかったか、あるいは、高速現象でビデオ画像では捉えられなかったためか、本実験では火花放電を確認することができなかった。

Fig. 3 (a) 中で、粒子とプローブの間の青い光や、プローブや粒子の側面に黄色の強い光が認められる。これらの光は、照明と基板や粒子からの反射光によるものである。**Fig. 3 (b)** でもプローブ先端部に同じ青い光が認められるが、その範囲は広がっている。この青い光は直接放電によるものではなく、放電に伴う発光と照明の反射光の作用によるものと思われる。

3. 1. 2 接触放電接合時の接合界面

接触放電接合を0.5秒間行い、Au粒子をAu基板

Fig. 4 Result of contact discharge welding of 0.5s
SEM photograph of (a) is welded particle
and (b) is the substrate after the particle
is taken off.

に接合した。**Fig. 4** は、接合した粒子、および、粒子を剥離した後の基板に残る剥離面のSEM写真である。(a) は粒子を真上から観察した写真であり、粒子の中央に見える模様を拡大したものを脇に示している。この模様は、プローブと接触していた痕と思われるが、部分拡大写真から分るように、丸みを帯びた凹凸の構造をしており、Au粒子が局部的に熔融したことが分る。その部分以外の粒子の表面及び基板面の変化は認められない。

粒子剥離面は写真(b)の中央部に白く見える部分であり、直径約5μmの円に相当する程度の大きさであり、粒子は基板とこの部分で接合していたと推定される。基板を60度以上傾斜させてSEM観察を行うと、白黒の濃淡に応じた凹凸が観察された。全体として周囲がやや隆起し、中央部分が凹んだ形状をしており、粒子はこの部分から剥離したことが裏付けられた。

接合部は通常の取り扱いにも耐えるだけの強度を持っているが、Auの引張強度を130MPa¹⁵⁾とすると、直径5μmの円形の接合面の強さは $2.6 \times 10^{-3} \text{ N}$ と小さい。接合面積が小さければ、構造体としての強度(耐力)が不足する。接合部の強度を直接測定することは困難であるので、以下では、接合界面の面積のみを考慮し、その面積を大きくする接合部の強化について検討を行った。

3. 1. 3 接合時間の影響

接合時間を変えて接触放電接合を行った後に、粒子を剥離した基板のSEM写真を**Fig. 5 (a) ~ (d)**に示す。接合時間を10秒まで延ばしたが、接合面はいずれも**Fig. 4 (b)**に示されたのと同じく、約5μm程度にしか広がっていない。同じ倍率で比較すると、むしろ接合面積は接合時間が0.5秒のものがもっとも広い。(a)のように形が線状になっているものや、(c)のように数カ所に散在するものもあり、0.5秒の接合時間が最適というよりも、元の粒子の形状の差による

Fig. 5 Variation of welded interface with the time of contact discharge welding
Welding time are (a) 1s, (b) 2s, (c) 5s and (d) 10s.

ばらつきと考えられる。また、基板も写真から分るように平滑ではなく、亀裂が存在する。従って、基板の影響によるばらつきも考えられる。少なくとも、接合時間を長くしても接合面積が大きくなったとはいえない。

接触放電接合では、プローブで粒子を押し付ける接触圧が重要な因子である。接触圧が弱く、プローブと基板間の電気抵抗が $100\text{k}\Omega$ 以上であると接合ができるが、逆に接触圧が強く、抵抗が 1Ω 以下であると接合はできなかった¹⁴⁾。

本論文で使った電源は、 1000pF のコンデンサーを2段直列に接続した、コッククロフト・ウォルトン回路で昇圧しており、コンデンサー電荷の放電電流を出力する。このため、電流量は小さいが極めて昇圧時間が短いという特徴を持っている。また、最大が 1mA となるように電流制限抵抗を内蔵している。すなわち、設定電圧を 10kV としても、外部抵抗、すなわち、プローブ-基板間の抵抗が $10\text{M}\Omega$ 以下なら、電流値はすべて 1mA になる。接触放電接合時には、最大でも 1mA で、極めて速い周期で変動する電流が流れているものと思われる。

接触放電接合では、抵抗溶接と同じくジュール熱を接合の熱源に使っている。従って、接触圧が弱いときには、接触抵抗の高い接合部で大きな熱量が発生し、接合される。一方、接触圧が強い時には、接触抵抗が

10 万分の 1 以下と小さく、発生ジュール熱も 10 万分の 1 以下と小さくなり、接合できない。接触圧が弱い場合でもいったん接合されると、その界面での抵抗は小さくなる。このために、接触放電接合を長時間継続しても、ある程度の接触が起こった時点で、それ以上の接合界面の増大はない。その臨界面積が図に見られる程度の大きさである。確認はできないが、最初の火花放電が生じた極めて早い段階で接合が終了していると思われる。

3. 2 非接触放電接合

3. 2. 1 非接触放電による接合

接触放電接合ではなく、非接触放電接合で接合界面を広くすることを試みた。プローブ-粒子間の距離をある程度離すと、放電電圧が高くなるので、電流値が 1mA と一定であっても、より高い熱量が発生するので、これを有効に使うことができれば界面を熔融し、より広い接合界面を得ることができると考えた。

すでに報告したように、基板上に置かれている粒子に対して、非接触放電接合をすると、放電開始と同時に粒子は吹き飛ばされてしまうので、接合はできなかった¹⁴⁾。しかし、接触放電接合で接合されている粒子に対しては、非接触放電接合が可能である。Fig. 2 から分るように、接触放電接合からプローブを引き上げるだけで、非接触放電接合時のプローブの配置になるので、接触放電接合に続いて行うには都合がよ

Fig. 6 A frame of video picture of non-contact discharge welding
The welding is carried out (b) in the air and (d) in N_2 flow.
Figs. (a) and (c) are the pictures just before the discharge
in the air and N_2 flow, respectively.

い。

0.5 秒間の接触放電接合をした直径 $60 \sim 80 \mu m$ の Au 粒子に対して、 $20 \mu m$ 上方からプローブに $2kV$ を印加して非接触放電接合を行った。接触放電接合同様に、プローブ-粒子間、粒子-基板間で白い発光が観察される。しかし、接触放電接合時の放電とは異なり、この光は、強弱の揺らぎはあるものの、接合中はずっと継続する。

Fig. 6 は、非接触放電接合を実施している時のモニター画像の 1 コマである。(b) は大気中で窒素ガス(以後 N_2 と表記する)を流さずに行ったもの、(d) は N_2 を $0.75 l/min$ 流しながら行ったものである。Fig. 3 と同様にプローブと粒子の位置関係をはっきりと示すために、接合直前の画像をそれぞれ Figs. 6 (a), (c) に示した。

大気中で非接触放電を起こさせると、発光はプローブ先端部の約 $20 \mu m$ と粒子上面部との間に集中しており、基板表面まで達する発光は観察されない。接触放電接合時と同様に粒子の下部の白く光っている部分は、上部の発光が反射しているだけで、実際にこの部分で放電が起きていることは、ビデオ画像からは確認できなかった。

一方、 N_2 を流した場合には、放電炎が均一に粒子を包むように下方に流れて、基板に達している。粒子下部の白い発光は反射ではなく、実際に粒子-基板間で放電が起きて生じたものである。 N_2 を流した場合に放電炎が粒子を包み込むように生じるが、このような現象はすでに報告されている。渡辺¹⁶⁾ はアルゴン雰囲気下で、針電極同士のグロー・アーク遷移領域における放電プラズマを高速カメラを用いて観察し、グロー放電が陰極先端を包み込むように発生している

Fig. 7 Results of non-contact discharge welding of 2s

The welding is carried out (a) in the air and (b) in N_2 flow.

ことを確認している。Nasser¹⁷⁾ は、このような現象は陰極表面から放出する電子の作用によると説明している。

逆に、 N_2 を流さない場合に、放電炎が粒子の上面のみに集中した理由については、正確には分らない。大気中の酸素ガスや水分が分解して生じる水素は電子親和力が必要な物質であり、電離能力を低下させることが知られている¹⁸⁾。これが、放電が基板まで達しないで粒子上面に集中した理由の一つと考えられる。

非接触放電接合を 2 秒間行った粒子の写真を **Fig. 7** に示す。(a) は大気中で行ったもの、(b) は N_2 を $0.75 l/min$ 流しながら行ったものである。(a) で放電が粒子上面に集中していると、粒子上面が削れており、表面が円形にクレータ状になっている。これはスパッタと同じ原理で、放電が起った場所で、Au 粒子が局部的に溶融し、それが飛散したためと思われる。飛散した微小な粒子は溶融した状態で基板表面に衝突し、鱗状の凹凸模様を作る (Fig. 8 参照)。基板上で、粒子の外側にやや白く見えて広がっているのがそれである。

一方 (b) では、粒子上面に放電痕と思われる円形

Fig. 8 Substrates after the welded particle are taken away

The welding is carried out (a) in the air and (b) in N_2 flow.

のクレータ状の模様があるが、大きさは直径で (a) の 40 % 程度である。また、粒子上面はほとんど削られていない。基板表面に見られる模様も (a) と同様に認められるが、一面に広がっているのではなく、散在している。なお、(a)、(b) とともに粒子の側面に小さな粒子が見えているが、これは接合前から存在するものである。

3. 2. 2 非接触放電接合時の接合界面

Fig. 8 (a), (b) はそれぞれ、大気中および N_2 気流中で 2 秒間の非接触放電接合を行った粒子を剥離した基板である。(a) の中央部には、Figs. 4, 5 に見られるものと変わらない直径約 $5\mu m$ の接触放電接合時の接合面と思われる剥離面が観察される。その外側に未溶着の基板があり、さらに、接触放電接合時の接合面の直径約 $15\mu m$ 外側から凹凸模様が認められる。粒子の直径は約 $80\mu m$ であり、この模様は前節で述べたように溶融した Au 粒子が飛んできて、基板に衝突してできたものと、放電ストリーマが粒子の陰になる部分まで入り込んだか、あるいは、粒子の下面と基板間で放電したかということの意味する。

一方、(b) は N_2 気流中で非接触放電接合した粒子を剥離した結果である。凹凸模様のない未溶着の基板は円形ではなく、上側に凹凸模様が入り込んでいる。接触放電接合時の接合界面は、他の写真のようにはっきりとはしないが、拡大した写真で見ると、凹凸が入り込んでいる部分の下方に、微小な剥離痕が分散していくつか認められる。Fig. 5 (c) のように、元々の接触放電による接合面が凹凸模様の入り込んでいる部分と、そこから少し離れている位置に存在していたようである。

未溶着基板と凹凸模様の境界は、他の部分とは異なり特に高く盛り上がり、基板を傾けて観察すると、高さは $1\sim 2\mu m$ であった。頂部は粒子と接合していたと思われる。この接合部の強度については不明であるが、 N_2 気流中での非接触放電により、接合強

度は明らかに増加する。すなわち、粒子を剥離する際には、粒子とプローブを接着剤で固定し、プローブを真上に引き上げる。大気中で接合した粒子は、直ちに剥離する。一方、 N_2 気流中では接合した粒子はプローブを引き上げても瞬時には剥離しない。電動ステージのコントローラーの読みで、プローブが数 μm 引き上がってから剥離する。モニター画像ではプローブ自身はほとんど引き上がっていないため、プローブを固定している片持ち梁型の支持具がたわんだためと推定される。すなわち、支持具が数 μm たわむ程度の応力まで強度が増加した。

Fig. 8 と Fig. 6 を比較すると、放電炎の状態と、基板に残る凹凸模様が対応している。Fig. 6 (b) のように大気中で行って、放電炎が粒子上面だけに集中する場合、粒子の上面が削れて、基板の凹凸模様は大きく広がっている。一方、Fig. 6 (d) のように放電炎が粒子を包むように生じて、粒子と基板の接合点付近で収束するように狭まる時、粒子の上面はあまり削れず、基板に残る凹凸模様は狭い。

これらから、非接触放電時に次のようなことが起こっていると考えた。 N_2 を流した場合、高電圧スパッタリングにより、粒子表面から溶融した金属を飛散させ、これが放電炎の流れに乗り接合境界部に運ばれて堆積し、環状の接合部を形成する。一方、Fig. 6 (a) のように放電炎が粒子上面にだけしか行かない場合は、粒子上面を集中的にスパッターし、熔融金属は、接合に寄与することなく、粒子の周囲に飛散して凝固する。

接触放電接合に加えて、非接触放電接合を施すことにより、接合面積を増加させて、接合強度を増加させることができた。しかし、非接触放電接合より生成した新たな接合面と、接触放電により生成した接合面の間には、未溶着部があり、接合としてはまだ良好とはいえず、改善する余地がある。また、本方法により微小構造物やデバイスを作っていくためには、今後接合部の強度を測定する必要がある。

4. 結 言

プローブを使って金属粒子を配置・接合する粒子アセンブル装置を使った接合について検討を行った。これまで、プローブ-基板間の抵抗が高くなるように、プローブで金粒子を金基板に軽く押しつけた状態で、高電圧を印加する接触放電接合で金粒子が接合できることが分っている。接触放電接合を行った金粒子を引張荷重で剥離し、剥離後の基板を調べたところ、接合

部の大きさは5 μm 程度であった。接合時間を0.5秒から10秒まで変えたが、接合部の大きさに変化はなかった。接合面積を増大させるために、接触放電接合後にプローブを約20 μm 上方に引き上げて、高電圧を印加する非接触放電接合を行った。非接触放電接合では、プローブと同軸方向に窒素ガスを0.75l/minで流しながら行くと、放電炎が粒子全体を包み込むように起こり、粒子表面で局所的に熔融した金粒子の一部を基板-粒子の接合界面まで運ぶために、粒子と基板の接合面積が増大した。しかし、接触放電接合によ

る接合面と、非接触放電接合による接合面の間に、未溶着の基板面が存在するために、接合方法に関しては、改善の余地がある。今後は、接合面積だけでなく、接合部の強度に関しても定量的な測定をする必要がある。

〔謝辞〕 本稿を執筆するにあたり、多くの助言を頂きました東京工業大学大学院の高橋邦夫先生に感謝します。また、文献資料に関し、ご協力を頂きました芝浦メカトロニクス(株)の渡辺 茂様に感謝します。

References

- 1) Tien, J., A. Terfort and G. M. Whitesides : "Microfabrication through electrostatic self-assembly", *Langmuir*, **13**, 5349-5355 (1997)
- 2) Fudouzi, H., M. Kobayashi, M. Egashira and N. Shinya : "The Arrangement of Micrometer-sized Powder Particles by Electron Beam Drawing", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **33**, 176-181 (1996)
- 3) Wijnhoven, J. E. G. J., L. Bechger and W. L. Vos : "Fabrication and Characterization of Large Macroporous Photonic Crystals in Titania", *Chem. Mater.*, **13**, 4486-4499 (2001)
- 4) Kim, E., Y. Xia and G. Whitesides : "Two- and Three-Dimensional Crystallization of Polymeric Microspheres by Micromolding in Capillaries", *Adv. Mater.*, **8**, 245-247 (1996)
- 5) Masuda, Y., T. Itoh, M. Itoh and K. Koumoto : "Self-Assembly Patterning of Colloidal Crystals Constructed from Opal Structure or NaCl Structure", *Langmuir*, **20**, 5588-5592 (2004)
- 6) Velez, O. D. and E. W. Kaler : "In situ assembly of colloidal particles into miniaturized biosensors", *Langmuir*, **15**, 3693-3698 (1999)
- 7) Miyazaki, H. and T. Sato : "Mechanical assembly of three-dimensional microstructures from fine particles", *Adv. Robotics*, **11**, 169-185 (1997)
- 8) Chih-Che, K., K. Takamasu, M. Hiraki, R. Furutani and S. Ozono : "Development of Pneumatic Ball Probe (2nd Report)-Evaluative Experiments of Flux Trigger Sensor Type Probe-", *J. Japan Soc. for Prec. Eng.*, **66**, 612-616 (2000)
- 9) Arai, F., D. Andou and T. Fukuda : "Micro Manipulation Based on Physical Phenomena in Micro World (1st Report, The Reduction Method of Van Der Waals Force)", *J. Japan Soc. for Prec. Eng.*, **63**, 4286-4293 (1996)
- 10) Nakao, M., K. Ishii, T. Sato and Y. Hatamura : "Prototypes of Micro Nontweezing Handling Tools with Releasing Mechanism", *Trans. Japan Soc. Mech. Eng. C*, **61**, 1021-1026 (1995)
- 11) Kobayashi, M., H. T. Miyazaki and N. Shinya : "New Functional Materials Created by the Techniques of Particle Assemblage", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **40**, 664-671 (2003)
- 12) Kobayashi, M., T. Dan, H. Fudouzi and N. Shinya : "Development of New Handling Techniques for Particle Assemblage", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **35**, 125-134 (1998)
- 13) Konno, T., M. Egashira and N. Shinya : Japan Patent No. 2653424 (Application 1995. 09. 25. Registration 1997. 05. 23)
- 14) Konno, T., M. Kobayashi, M. Egashira and N. Shinya : "Study on Manipulation and Welding Method of Fine Particles Using Microprobe", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **42**, 98-104 (2005)
- 15) Edited by Tanaka, S. : "Kikinzoku no Kagaku (Applied Edition)", p. 137, Tanaka Kikinzoku Kogyo (1985)
- 16) Watanabe, S. : "Study of discharge phenomena in glow-arc transition region and the neighborhood-Observation of plasma between thoriated tungsten electrodes at atmospheric pressure in argon-", A thesis for a doctoral degree of Tokyo Inst. of Tech. (2004)
- 17) Nasser, E. : "Role of the Cathode Field Emission in the Streamer-Spark Transition", *J. Appl. Phys.*, **37**, 4712-4716 (1966)
- 18) Akasaki, M. : "Kiso Kodenatsu Kogaku", p. 7, Shokodo (1992)