低電流真空アーク放電の拡散アークモードから フットポイントモードへの移行 ——窒素ガス圧の影響——

正 員 滝 川 浩 史 (豊橋技科大)

学生員 藤 島 友 紀 (豊橋技科大)

正 員 榊 原 建 樹 (豊橋技科大)

Transition from Diffuse-Arc Mode to Footpoint Mode in Low-Current Vacuum Arc ——The Influence of Ambient N₂ Gas Pressure——

Hirofumi Takikawa, Member, Tomonori Fujishima, Student-member, Tateki Sakakibara,
Member (Toyohashi University of Technology)

キーワード：低電流真空アーク，拡散アークモード，フットポイントモード，アーク電圧，圧力依存性

真空アークの陽極に関する放電モードは，最近，次の五つのモードがあることがわかってきた⁽¹⁾。

(1) 低電流モード：陽極は陰極からの放出粒子(電子，イオンなど)のコレクタにすぎない。

(2) 第二低電流モード：陽極からスパッタされた粒子が放出される。

(3) フットポイント (Footpoint; FP) モード：1個以上の比較的大きな輝点 (FP) が陽極表面上に発生する。FPの温度は陽極点の温度よりも低い。

(4) アノードスポット (Anode-Spot) モード：一つの大きなあるいは複数の小さな陽極点が発生する。陽極点の輝度は非常に高く，温度は陽極材料の沸点近くに達し，そこから蒸気・イオンを放出する。

(5) 強烈アーク (Intense-Arc) モード：1個の陽極点が存在する。陰極の侵食も激しい。

なお，(1)，(2)のモードを合わせて「拡散アーク (Diffuse-Arc; DA) モード」と呼ばれる。アーク電圧は，DAモードおよび強烈アークモードでは比較的低くしかも変動が小さいが，FPモードおよびアノードスポットモードでは比較的高くかつ変動が激しい。真空アークが五つのモードのうちどれをとるかは，主に電流(およびその波形)，電極材料・形状，ギャップの長さ，磁界⁽²⁾に依存するとされている。しかしながら，圧力に関しては何ら言及されていない。

一方，著者らはこれまで TiN 膜生成用真空アーク蒸着装置において，真空アークのプラズマパラメータの圧力依存性を報告してきている⁽³⁾。その際の圧力範

囲は 0.1~10 Pa であったが，今回圧力範囲を 100 Pa まで広げたところ，放電モードが DA モードから FP モードに遷移した。ここでは，圧力によっても放電モードが遷移することを報告する。

図 1 に真空アーク蒸着装置の概要を示す。SUS 304 製の円筒形真空チャンバ内の一端に円柱状 Ti 陰極 (64 mmφ) を設置した。放電は，接点弧法により陰極と陽極である真空チャンバ内壁面との間に発生させた。流量 15 ml/min 一定の N₂ を雰囲気ガスとしてチャンバ内に導入し，圧力調整バルブにより排気速度を調整して圧力を変化させた。

アーク電流を 50 A に設定し，圧力を 0.01 Pa から徐々に上げながら放電の様相を観察していたところ，30 Pa 以下では陽極表面が不活性な DA モードであったが，圧力が 30 Pa を超えると，陽極表面上に多数の

図 1 真空アーク蒸着装置および撮影した陽極表面箇所

Fig.1. Vacuum arc deposition apparatus showing the photographed area on anode surface.

約 10cm
アーク電流: 50 A, 圧力: 60 Pa

図 2 陽極表面上のフットポイントの様相
Fig. 2. Photograph of footpoints on anode surface.

図 3 拡散アークモードからフットポイントモードへの移行に伴うアーク電圧の変化
Fig. 3. Arc voltage variation with transition from diffuse-arc mode to footpoint mode.

FPが発生し始め発生消滅を繰り返した。50 Pa 以上ではFPが定在した。図1のようなカメラアングルで撮影(絞リ: 11, シャッタ速度: 1/30 秒, ISO: 100)した陽極表面上のFPの様相を図2に示す。FPの個数は、陰極に近いほど(図2では上方になるほど)密で、陰極から250 mm以上離れた陽極表面上には存在しなかった。圧力の上昇につれてFPの個数が増え、100 Paでは個々のFPがつながり、陰極から250 mmまでの陽極表面全体が明るく発光した。

次に、アーク電圧をペンレコーダで測定してみた。その結果を図3に示す。0.01 Paから30 Paへと圧力が増加すると、アーク電圧は22 Vから17 Vへ減少する。この間のアーク電圧の変動幅は約0.8 Vであった。圧力が30 Paを超えると、陽極表面にFPが現れると同時にアーク電圧は急激に上昇し、変動幅も約8 Vと増大した。圧力が50 Paになると、アーク電圧

は35 Vに達したが、変動幅は約6 Vに減少した。

真空アークがDAモードからFPモードへ遷移するきっかけの一つは、陽極近傍にイオン欠乏層が形成されることにあるとされている⁽¹⁾。イオン欠乏層の形成は、アーク電流が増大したり、ギャップの長さが長くなると、陰極から供給されるイオンが途中で自分自身や他の粒子と衝突し、陽極に到達しなくなることが原因とされている。一方、アーク電流およびギャップの長さを一定にしておいて、圧力を上昇させると、陰極からのイオンはプラズマ空間で頻繁に衝突し、その結果、陽極に到達するイオンの割合が減少することになる。両者の現象は本質的には同じものであり、今回得られた結果は、真空アークがDAモードからFPモードに遷移するメカニズムに関する上記の説を圧力の観点から支持するものである。

(平成5年1月19日受付)

文 献

- (1) H. C. Miller: "A review of anode phenomena in vacuum arcs", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, PS-13, 242 (1985)
- (2) S. Yanabu, S. Souma, T. Tamagawa, S. Yamashita & T. Tsutsumi, "Vacuum arc under an axial magnetic field and its interrupting ability", *Proc. Instn Elect Engrs*, 126, 313 (1979)
- (3) 例えば, 榊, 榊原: 「窒化チタン膜形成用中真空アークプラズマのイオンエネルギー分布」, 電学論 A, 111, 1071 (平 3-12)

滝 川 浩 史 (正員)

昭和37年2月15日生。61年3月豊橋技術科学大学大学院工学研究科電気・電子工学専攻修士課程修了。現在、同大学電気・電子工学系助手。工学博士。

藤 島 友 紀 (学生員)

昭和45年3月5日生。平成4年3月豊橋技術科学大学電気・電子工学課程卒業。同年4月同大学大学院工学研究科修士課程進学, 現在に至る。

榊 原 建 樹 (正員)

昭和47年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了。現在、豊橋技術科学大学電気・電子工学系教授。工学博士。応用物理学会, IEEE 会員。