

グラファイト板を陰極とする低真空アーク放電の特性

杉本尚哉¹, 堀川佑太郎², 伊波周吾³

¹ 秋田県立大学システム科学技術学部機械知能システム学科

² 元秋田県立大学システム科学技術学部機械知能システム学科 (現 太平電業 (株))

³ 元秋田県立大学大学院システム科学技術研究科機械知能システム学専攻 (現 DOWA ホールディングス (株))

低真空アークによる金属表面の酸化膜除去での陰極点挙動の理解を深め、新たな応用を開拓することを目的として、グラファイト板を陰極とする低真空アークで出現する陰極点の様子について、酸化膜付き鉄鋼板を陰極とした場合と比較した。さらに、陽極材料の違いによる変化や、放電後のグラファイト板の様子も調査した。グラファイト板上に出現する陰極点は放電電流に依らず1個の場合が多く、複数個の陰極点が発生してその個数が放電電流の増加とともに増加する酸化膜付き鉄鋼板の場合とは、全く異なることがわかった。これは、陰極材料の沸点及び昇華温度の違いが原因と考えられる。一方、陰極点からはオレンジ色に発光する微粒子が多数飛散する現象が見られた。グラファイト板表面の陰極点の軌跡では、表面が削り取られたような状態で凹凸が大きくなっており、陰極表面が固体状のまま放出されているものと思われる。放電中の陰極点の様子は、グラファイト陽極でも銅陽極でも同様であるが、放電電圧は、銅陽極の場合に変動が大きいのに対し、グラファイト陽極では時間変動も小さく、放電電流に対しても変化はほとんど無かった。

キーワード: 低真空アーク, 陰極点, グラファイト板, 酸化膜付き鉄鋼板

金属加工品の劣化を防止する表面処理に際し、事前に処理部分に行う清浄化への応用を目的として、低真空アークによる金属表面酸化膜除去法の研究を進めてきた。これは、処理対象物を陰極として低真空中でアーク放電を行ったときに表面上に発生する陰極点の作用により、金属表層部分の酸化膜を従来法より効率良く除去しようとするものである。この方法の一番の課題は電力効率を向上させることであるが、そのためには陰極点の物理を詳細に知ることは必須であろう。

著者らは、この金属表面上の酸化膜を除去するときの陰極点がいろいろと興味深い振舞いを見出してきた。これまでは研究の目的が酸化膜の除去にあったことから、主に表面に酸化膜層を持つ金属板を陰極とするときの陰極点挙動ばかりを見てきた。しかし、陰極点についてより詳しく知るため

には、それ以外の物質を陰極としたときの陰極点を観察することからもヒントを得ることができると思われる。

本研究では、非金属で高い導電性を持つグラファイトを陰極とする低真空アークでの陰極点の挙動について調べる。アーク放電と炭素材料は、Grapheneの合成などで互いに関連の深いものである。陰極点は非常にエネルギー密度の高い状態であり、今後低真空アークによる特殊な炭素材料の合成法への応用を考える上でも基礎的知見を得ることは重要である。

実験装置と実験方法

実験に用いた陰極用試験片

図1に、実験で使用した陰極用試験片を示す。陰極には1辺が100mmの正方形で厚さ3mmの、グラ

ファイト板（東京炭素工業株式会社製）を用いた。また図 1 (b) は、従来の酸化膜除去研究で用いてきた陰極用試験片で、寸法はグラファイト板と全く同じで、表面全体が厚さ約 5 μm の酸化膜で覆われた鉄鋼板 (SS400) である。どちらの陰極用試験片にも、対角線上に実験装置に設置するための直径 7mm の孔がある。

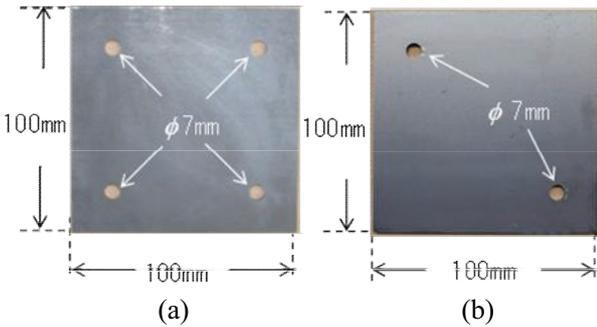


図 1 陰極用試験片。(a) グラファイト板 (b) 鉄鋼板 (SS400)

実験装置

図 2 に、本研究で使用した実験装置の概略図を示す。実験では、真空容器内に陽極と陰極を設置して放電を行った。真空容器はステンレス製で、内径が 250mm で、長さが 300mm と 230mm の円筒形のを結合している。実験時には真空容器内を ULVAC 社製メカニカルブースターポンプ MBS-050 で排気する。

真空容器上部に、陽極を設置する。陽極はステンレス製で円筒形をしており、内部を冷却水が循環している。図 3 は、陽極の底面部分に取り付ける導電

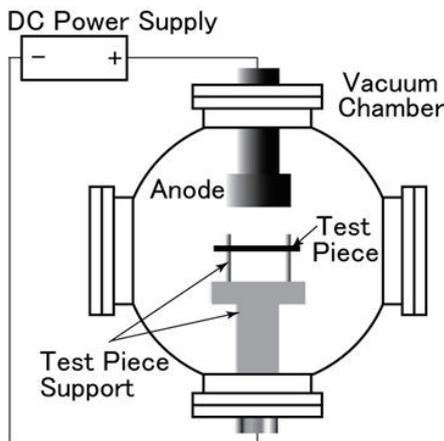


図 2 実験装置

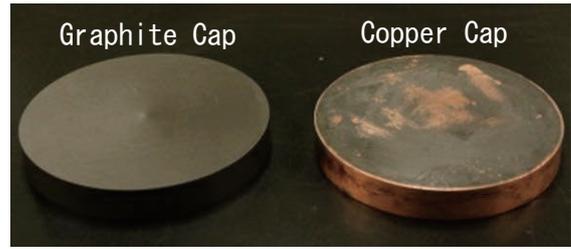


図 3 陽極に装着するグラファイト製キャップと銅製キャップ

性のキャップである。陽極はそのままでも放電できるが、底面部分に銅製とグラファイト製のキャップを装着することにより、陽極材質が異なる放電実験を行う。陽極の底面の直径は 100mm である。底面部分以外は放電防止のため、グラストープを貼って絶縁処理を施している。

一方、真空容器下部には、ステンレス製で水冷式の陰極用試験片設置台を設置し、それに 2 本の直径 6mm のステンレスロッドを取り付け、陰極用試験片の対角線上にある孔に通す。ステンレスロッドにはねじ山が切っており、陰極用試験片を 1 本のステンレスロッドにつき上下から 2 個のナットではさんで固定する。陰極用試験片と陽極底面は平行であり、その間の距離は 50mm である。また、陰極板と陰極板設置台との間にも空間がある。陰極設置台とステンレスロッド表面もグラストープにより絶縁処理を施している。

放電は直流の CW で行った。放電電力の供給には、大阪電気社製インバータ制御エアープラズマ切断機用電源 SC-120P を使用する。最大無負荷電圧は 285V、最大出力電流は 120A である。

円筒形真空容器の底面部分の一方は、厚さが 20mm の透明アクリル板で閉じられており、放電中の真空容器内の様子を観測することができる。

実験方法

真空容器内を約 10Pa まで排気後、あらかじめ陽極と陰極用試験片との間を短絡するように設置した直径 1mm の垂鉛線に通電し、垂鉛線が溶解して短絡が切れるとアーク放電に移行し、維持される。

放電中の真空容器内の様子と、放電後の陰極用試験片の様子を、Canon 製デジタルカメラ Eos Kiss X5

で撮影した。また、放電中の直流電源の端子間電圧の時間変化を、Graphtec 社製波形測定器 Midi Logger GL840 を用いて、サンプリング周波数 0.02kHz で記録した。

実験結果

放電中の真空容器内の様子

図 4 に放電中の真空容器内の様子を示す。(a) と (b) は陰極用試験片がグラファイト板の場合、(c) と (d) は鉄鋼板の場合である。また、(a) と (c) が放電電流 50A の場合、(b) と (d) が放電電流 100A の場合である。図 4 (d) はステンレス陽極、それ以外はすべて銅陽極で実験を行った。

放電開始直後、陰極用試験片の陽極に対向する面上に点状の非常に強い発光領域である「陰極点」が出現した。

グラファイト板が陰極である場合、図 4 (a) と (b) に示すように、発生する陰極点はほぼ 1 個であり、陰極点からはオレンジ色に発光する微粒子状が放出されるのが見られた。陰極点の移動速度は小さかった。放電電流が増加しても発生する陰極点の個数に変化はほとんど無かった。その代わりに、放電電流が増加すると陰極点の発光光度が増加し、陰極点から放出される微粒子の量も増加した。一方、(c) と (d) に示すように、陰極用試験片が酸化膜付き鉄鋼板である場合は、複数個の陰極点が発生し、放電電流が増加するにしたがって陰極点の個数も増加した。陰極点の移動速度はグラファイト板の場合よりもかなり大きかった。陰極点からの微粒子の放出は見ら

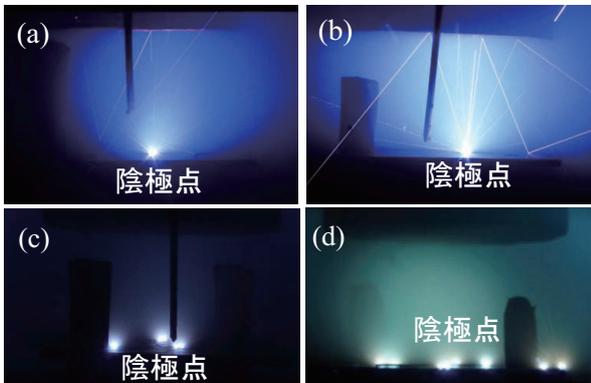


図 4 出現した陰極点の様子. グラファイト板 (a) 50A, (b) 100A, 鉄鋼板 (c) 50A, (d) 100A

れなかった。

尚、炭素製陽極を用いて放電を行っても、放電中の様子に大きな変化は見られなかった。

放電電圧の時間変化

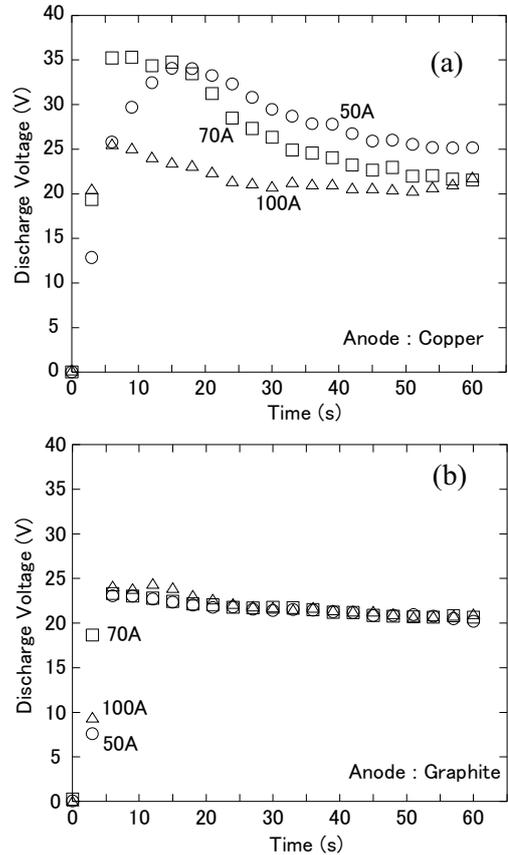


図 5 放電電圧の時間変化. (a) 銅陽極, (b) グラファイト陽極の場合

図 5 は、陰極用試験片をグラファイト板として、放電電流を 50A, 70A, 100A としたときの、銅陽極とグラファイト陽極の場合の放電電圧の時間変化を示したものである。各点は、測定値の 3 秒ごとの平均値を示している。図 5 (a) のように、銅陽極の場合、放電開始後、放電電圧はいったん高くなった後、徐々に低下して一定となった。一方、グラファイト陽極の場合も、時間経過とともに放電電圧は低下し、やがて一定となる傾向はあるが、銅陽極の場合のような経過時間や放電電流による大きな違いは見られなかった。

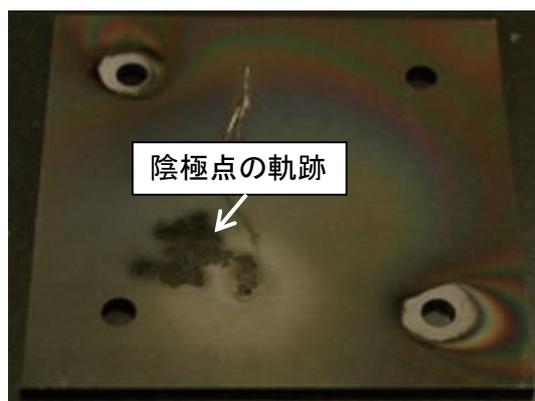


図6 放電後の陰極用試験片のグラファイト板の様子

放電後のグラファイト板の様子

図6は、放電後の陰極用試験片であるグラファイト板である。放電前と比較すると、陰極板設置台に固定した部分が大きく変色し、それ以外の部分も全体的に変色した。また、陰極点の軌跡とみられる部分は、表面が削り取られたような状態で、凹凸が大きくなっていた。

考察

グラファイト板が陰極である場合、図4(a)と(b)に示すように、陰極点からオレンジ色の光跡が出ているのが見られた。このオレンジ色の光跡は、対向する陽極に当たっても、再び陰極に当たっても、弾性衝突のような運動をしていた。一方、図6に示すように、放電後のグラファイト板表面には陰極点の軌跡が見られた。陰極点の軌跡部分は、表層部分が断片的に削り取られたようになっていた。以上のことから、放電中グラファイト表面は陰極点により削られ、固体のままの高温の断片が発光しながら飛散していると考えられる。材料合成への応用を考える上では陰極材料が固体のまま飛散するのは好ましいことではなく、どのような過程でそのような陰極材料の高速度放出が起きるのか、今後詳細に調べる必要がある。

グラファイト板の場合発生する陰極点はほぼ1個であり、放電電流が増加しても発生する陰極点の個数に変化はほとんど無い。その代わりに、放電電流

が増加すると陰極点の発光光度が増加し、陰極点から放出される試験片材料断片の量も増加している。これは、図4の(c)と(d)に示すように、陰極用試験片が酸化膜付き鉄鋼板である場合の、複数の陰極点が発生し、放電電流が増加するにしたがって陰極点の個数も増加する様子と全く異なっている。低真空アークの放電機構では、陰極点から陰極材料蒸気が噴出し、陰極表面での Thermo-Field Emission による電子により陰極材料蒸気が電離してプラズマ状態になると考えられている。FeとCの仕事関数の値は、それぞれ4.5~4.7eVと4.4eVであり、大きな差は無い。一方、1気圧下での値ではあるが、Feの沸点は3136K、Cの昇華温度は3643Kと大きく異なる。放電電流は陰極点部分に集中しており、グラファイト陰極では陰極点が分裂して電流密度が低下すると昇華温度を維持できず陰極材料蒸気の供給が不足し、その結果陰極前面に発生するプラズマに伴う強電場に依存する放電機構も維持できなくなるため、本実験程度の放電電流では、放電電流増加による陰極点の増加が見られなかったと推測される。また、これはタングステン陰極の場合の真空アーク放電の様子とも一致する(Wの仕事関数は4.55eV、沸点は1気圧下で5828K)。

今回の実験では、図5に見られるように陽極材料によって放電電圧の時間変化に違いが見られた。時間変化の様子から、銅陽極の場合は大気開放中に陽極材料に付着・結合したものが放電開始後に陽極から放電空間へ放出され、抵抗として作用するためにこのような結果になったものと考えられるが、陽極材料に対してどれほどの依存性がある現象なのかなど、詳細については今後検討する必要がある。

結論

グラファイト板を陰極として低真空アークを発生させ、出現する陰極点の様子について、酸化膜付き鉄鋼板を陰極とした場合での陰極点の挙動と比較した。グラファイト板上に出現する陰極点は放電電流に依らず1個の場合が多く、酸化膜付き鉄鋼板の場合と全く異なっている。これは、陰極材料の沸点及び昇華温度の違いによるものと推測される。また、

陰極点からはオレンジ色に発光する微粒子が多数飛散しており、グラファイト板表面の陰極点の軌跡で、表面が削り取られたような状態で凹凸が大きくなっていることから、陰極材料が固体のまま飛散していると考えられ、今後詳細に調べる必要がある。

放電中の陰極点の様子は、グラファイト陽極でも銅陽極でも大差ないが、放電電圧は、銅陽極の場合、時間変化が大きく、また、放電電流による差もあるのに対し、グラファイト陽極では時間変動も小さく、放電電流に対しても変化は小さい。

文献

- Anders, A. (2008). *Cathodic Arcs*, Springer Science+Business Media, LLC.
- Kajita, S., Hwangho, D., Ohno, N., Barengolts, S. A. and Tsvetoukh, M. M. (2014). Arc Spot Grouping: an Entanglement of Arc Spots. Proceedings of PLASMA 2014, USB, 20PA-051.
- Sugimoto, M. and Takasugi, S. (2014). Strange Collective Behaviors of Cathode Spots in Low Vacuum Arc. *Journal of Physics: Conference Series*, 550, 012013.
- 国立天文台編 (2012). 「理科年表」. 丸善出版.

〔平成 29 年 6 月 30 日受付〕
〔平成 29 年 7 月 11 日受理〕

Characteristics of Low Vacuum Arc Discharge with Flat Graphite Cathode

Masaya Sugimoto¹, Yutaro Horikawa², Shugo Iha³

¹ *Department of Machine Intelligence and Systems Engineering, Faculty of Systems Science and Technology,
Akita Prefectural University*

² *Former student of Department of Machine Intelligence and Systems Engineering, Faculty of Systems Science and Technology,
Akita Prefectural University (presently at Taihei Dengyo Kaisha, Ltd.)*

³ *Former student of Course of Machine and Intelligence Systems, Graduate School of Systems Science and Technology,
Akita Prefectural University (presently at Dowa Holdings Co., Ltd.)*

The characteristics of a low vacuum arc with a flat graphite cathode were investigated and compared with those of flat steel cathode covered with an oxide layer to improve the removal efficiency of the oxide layer in a descaling process and explore the novel applications of a low vacuum arc. In addition, the changes in cathode spot behavior with different anode materials and post-discharge cathode surfaces were also studied. Only one cathode spot appeared in various current cases of discharge, and it was entirely different from the case with flat steel cathode, in which several cathode spots were observed and their populations increased with increments of the discharge current. This is possibly caused by the large difference between the boiling and the sublimation points of each part of cathode material. Furthermore, many glowing particles were released from bright cathode spots with flat graphite cathodes. According to the very rough cathode spot mark on the graphite cathode surface, it can be concluded that these particles are eroded cathode materials flying in a solid state. Although the manner of discharge seems to be independent of the anode material, there were large differences in voltage variation of the discharges.

Keywords: low vacuum arc, cathode spot, flat graphite cathode, flat steel cathode covered with oxide layer