低気圧中におかれた金属線の加熱によるシャンティングアークの発生 ＝パルス金属イオン源の基礎研究＝

正員 行村 建 (同志社大学)

Shunting Arc Generation of a Heated Wire in a Low Pressure Gas =Fundamental Research of Pulsed Ion Source=

Ken Yukimura, Member (Doshisha University)

A new type of a pulsed metallic ion source is proposed. A thin wire is placed in a low-pressure gas and is heated by capacitor energy. Before exploding the wire during maintaining a solid phase, an electrical discharge called shunting arc in the surrounding medium of the wire occurs for the appropriate heating conditions. The deposited wire material and emitted electrons cause the arc when the applied voltage across the wire satisfies the breakdown voltage of the surrounding medium. The wire under its melting point and is used repeatedly for the generation of the discharge. A tungsten wire of 0.1 to 0.4mm in diameter and about 30 mm in length in around 1.3kPa gas of air and argon is employed for the arc generation. The arc phenomena are photographed by an image converter camera and the expansion speed of the arc edge reaches at about 1000m/s. From the arc spectra, the metallic fraction in the plasma is confirmed. The possibility of the usage of a shunting arc discharge as a pulsed ion beam is discussed.

キーワード: 金属イオン源、シャンティングアーク、金属線爆発

1. はじめに

プラズマプロセスにおける金属イオン源の新しい方法を提案する。金属イオン源は、注入や堆積、スパッタにより、材料の表面改質や新素材の生成をし、医療やエネルギー、機械など様々な領域への応用が期待されている。

従来金属イオンを含むプラズマを作るには、補助的な手段により、金属原子などをあらかじめ放電媒質に供給し、その後プラズマ化する方法がとられる。例えば、金属電極の近くに点弧電極を設け、主電極との間に微小放電を先行させ、主放電に導く[1]。コイルに加熱用電源から電流を流し、金属成分を蒸発させる[2]。放電容器中に設けたるつばに金属を入れておき、ヒータやレーザ、電子ビーム照射などの外部エネルギーの供給により、金属の加熱を行い、金属を蒸発させる[2]などの方法があげられる。これらは装置構造が複雑になること、装置コストがかかることなどの問題が生ずる。

補助的な手段を用いることなく自らのエネルギーにより金属アークを発生、維持させる方法ができれば装置は簡素化され、コストの低減にもつながる。本論文では、トリガー機構を用いない金属アーク発生法を提案する。基本的な発想点は、金属線爆発法によるシャンティングアークにある。

本論文では金属線を従来のように溶断、爆発させるのではなく、固体の状態で元の形状を保ったまま、周囲媒質中にアークを発生させる点に特徴を持つ。すなわち、自らのエネルギー源により金属を加熱して周囲媒質の絶縁破壊をもたらし、アークの形成に至る。

固体状態における金属線の周囲でアークを発生させることができるか否か。仮に発生したとして、プラズマ中に金属成分が含まれるか否かについての研究例は見あたらない。本論文では金属イオン源の基礎的研究として固体状態にある金属線の周囲にパルスアークを発生させ、その発生現象及びスペクトルについて研究を行った成果であり、アーク中には金属成分が含まれていることを明らかにした。

2. シャンティングアークの発生

シャンティングアークは気体中の放電であり、もともと金属線中を流れていた電流が、周囲媒質のプラズマ化により、一転して、プラズマ中を流れる現象であり、数千 A の大電流が流れる。すなわち、金属線の周囲に発生するアークである。従来、shunting arc[3]あるいは peripheral arc[4]と称されており、1960～1970 年代に物理学の見地から多くの研究が行われた[5]。研究のすべての場合、一回の放

電で金属線は溶断、爆発して消滅し、毎回の放電のたびに金属線を電極間に設ける必要があった。放電の発生方法について、産業用の観点から検討された例は見受けられない。発生の原理は以下の通りである。

放電回路の概要を図1に示す。最初、金属線あるいは金属板や箔などの金属素子（ここでは代表して金属線と称する）は室温にあり、抵抗値も低い。金属線加熱用のエネルギー源として主にコンデンサに蓄積されたエネルギーが使われる。金属線及びコンデンサは閉スイッチを通して直列に接続されており、金属線は低圧力の気体中におかれ、放電媒質となる気体はパシエンの法則[6]に従う絶縁破壊電圧を有する。

VP:電圧プローブ、SR:分流器、Lc:回路インダクタンス、CS:閉スイッチ、C:コンデンサ、V₀:充電電圧、RP:ロータリーポンプ、Ar:アルゴンガス、VL:バルブ

図1 回路構成

Fig.1. Schematic diagram of experimental facilities.

閉スイッチをオンし、コンデンサの電荷を金属線に投入する。電流は最初、抵抗の低い金属線中を流れ、金属線は加熱される。放電回路は通常、減衰振動性の電流となる。時間の経過とともに金属線の抵抗は増加し、回路の条件は非振動性へと移行する。加熱に従い金属線の周囲には金属粒子の蒸発に伴う金属粒子雲が形成されたり、金属表面から熱電子放出が起こる。

金属線間電圧が周囲媒質の絶縁破壊電圧を満足する値に達すると、金属原子や粒子あるいは電子を含む周囲媒質中で、放電が発生しアークに至り、いわゆるシャンティングアークとなる。

一般にプラズマの内部あるいは近傍に設けられた基板に電圧を印加することにより、金属イオンや電子が引き出される[7]。アーク発生時金属線の温度が融点以下で固体であれば、シャンティングアークが形成されても金属線は元の形状を保つ。従って、適当な金属線の長さや直径の選択により、任意の電圧において、外部から別のエネルギー源を用いることなく金属プラズマを発生することが可能であり、放電の繰り返しも行うことができる。結果として、発

生するアーク放電はパルスであり、パルス金属イオン源を得る可能性を持つ。

3. 実験方法

用いた金属線は主に直径0.1mm、長さ30mmのタングステン線であり、主に約2.0kPaの低気圧空気中において、充電電圧500V、容量200μFのコンデンサのエネルギーを投入する。放電回路の抵抗は約17.3mΩ、回路インダクタンスは約1.7μHであり、放電の初期にはいわゆる減衰振動性の電流となる特性を持つ。放電容量の真空排気はロータリーポンプにより所定の圧力にまで排気される。アルゴンを媒質とするときには最初0.1Torr程度まで排気した後、所定の圧力にする。

電極間電圧及び放電電流の測定には、それぞれ、電圧プローブ（立ち上がり4ns、分圧比1/1000）と同軸型分流器（抵抗約1mΩ、周波数帯域DC～1MHz）を用いオシロスコープ（立ち上がり約3.5ns）により波形観測を行う。用いた閉スイッチはトリガトロンである。

生ずる現象の観測をイメージコンバータカメラにより行った。無背光とし1回のコンデンサ放電で、1枚の撮影を行う駒撮り法である。撮影の露出時間は100nsであり、放電電流の開始を時間の基準とした。撮影はほぼ同時刻において3～5枚の撮影を行い、十分に再現性のあることを確認した。

アークにより生成されるイオン種を確認するために分光器によるスペクトルの観測を行った。ここでは、直径0.4mmのタングステン線を容量20μF、充電電圧2kVとした。

分光器は、ツェルナー型で、焦点距離は約250mmである。1200gr/mmグレーティング使用時の逆分散は、約3nm/mmである。スリット幅は10～100μmであり、積分光による観測を行った。測光方法は既報[8]と同様である。

4. 電流・電圧特性

図2(a)と(b)は電流、電圧波形の観測例を示す。トリガトロンスイッチのオンに伴い、金属線に電流が流れはじめ、約3μsにおいて約640Aのピークに達する。その後、金属線の抵抗が増加して電流値は低下する。約15μsにおいて電流は急激に増加を始め、正弦波状の電流となる。この点でアークの形成に至る。アークの形成の確認はイメージコンバータカメラによる現象の観測と電流、電圧波形による。

電圧波形は約5μs程度まで増加する。その後わずかに低下し、アークの発生まではおおむね一定の値を示す。すなわち、金属線抵抗の増加により、金属線中に流れる電流が次第に少なくなり、金属線中の通電が困難になることを表すが、金属線間電圧について言えば、抵抗の増加が電流の減少を補う。

アーク発生以前の電流、電圧波形を詳細に観測すると、

(a)電流波形 5 μs/div.,200A/div.

(b)金属線間電圧波形 5 μs/div.,200V/div.

図2 電流・電圧波形(圧力 2.0kPa 空気)

Fig.2. Waveforms of current through circuit and voltage across wire.(total pressure :2.0kPa air).

20 μs/div.,1000A/div.

図3 電流波形(圧力 2.0kPa 空気)

Fig.3. Waveform of current through circuit and gap voltage. (total pressure =2.0kPa air).

電流と電圧値がピークとなる時刻に 2 μs 程度の差異が見られる。これは金属線に加わる電圧が流れる電流と金属線の抵抗との積により決まる結果、抵抗の増加が著しい場合、わずかに電流が減少しても線間電圧は増加すると考えられ

ること、電流の減少は放電回路のインダクタンスに誘導電圧をもたらし、結果として、コンデンサの電荷が流れる向きと同じ方向に発生し、金属線に加わる電圧が高くなる時刻に違いが生ずることが原因と考えられる。アークの発生により電圧は急激に低下し、80~200V の維持電圧を示す。

アーク電圧は 90V 程度の値を維持した後、消弧に向かう。電流がゼロになるとともに電圧もゼロになる。最大電流値付近のアーク抵抗は約 22mΩ と小さな値になる。

アーク電流の観測例を図3に示す。アーク電流の最大値は約 4kA であり、約 80 μs において放電は終了する。

以上のように電流は2種に分けられ、初期(図2の場合時刻ゼロから約 15 μs)には金属線中を流れ、その後は気体中の放電に基づく電流が発生する。アーク電流は第一半波で終了しているが、これはコンデンサの残留電圧が第二半波の再点弧電圧に達しなかったためである。

金属線の温度は金属線に投入されたエネルギーと抵抗の関係や抵抗と抵抗温度係数の関係等を用いて求めることができる[9]。特に、抵抗 R は金属線が温度 T の固体である場合、

$$R = R_0 [1 + \alpha_s (T - T_0)] \dots \dots \dots (1)$$

にて与えられる。ここで、 R_0 : 金属線の初期抵抗(式(2))、 α_s : 固体の抵抗温度係数、 T_0 : 初期温度であり、

$$R_0 = \rho_0 \frac{l}{S} \dots \dots \dots (2)$$

の関係が成り立つ。ここで、 ρ_0 : T_0 での体積抵抗率、 l : 金属線の長さ、 S : 金属線の断面積である。タングステンの場合、 $\alpha_s = 4.6 \times 10^{-3} \text{deg}^{-1}$ 、 $\rho_0 = 5.5 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}$ [10]、であるので、 $T_0 = 300\text{K}$ として時刻 15 μs での電流約 200A、電圧約 440V より、 R は 2.2Ω と計算されるので、上記定数を代入して $T = 2400\text{K}$ を得る。タングステンの融点は約 3660K であるので、アーク発生時の金属線は固体であることがわかる。

2400K におけるタングステンの蒸気圧による蒸発の割合は1秒あたり約 $8.0 \times 10^{-10} \text{g/cm}^2$ [11]である。仮に加熱の初期から 2400K を維持すると仮定して、アーク発生時までのタングステンの蒸発量を計算すると約 $1.5 \times 10^{-15} \text{g}$ となる。この結果、発生するタングステン粒子の累積数は約 4.9×10^6 個となる。アーク発生時のアーク直径を 3mm と考え、すべての粒子がこの内部に存在すると考えると粒子密度は 1cm^3 あたり 2.3×10^7 個程度となる。このように金属線の温度に起因する蒸気圧によって粒子が生成されることがわかる。これらの粒子は後述する粒子雲の主要な成分であると考えられる。なお、上記の物理定数については引用する文献[12]により 20 倍程度の差違が生ずる。

以上要するに、タングステン線を低圧空気中にてコンデンサのエネルギーにて加熱した結果、固体である状態において金属線の周囲媒質は絶縁破壊し、アークに至ることがわかった。アーク発生時の金属線の抵抗から金属線は固体の状態であることがわかった。

5. シャンティングアークの観測

図4(a)~(c)はアーク発生現象の観測例である。図中の時刻は図2の電流の開始時刻を基準とする。(a)は金属線加熱の初期であり、中心部に加熱された金属線とごく近傍

(a) 6.1 μ s

(b) 14.5 μ s

(c) 19.3 μ s

0 5 10mm

図4 イメージコンバータカメラによる金属線およびアークの観測(C:200 μ F、 V_0 :500V、直径0.1mm、長さ30mmタングステン線、全圧力2.0kPa空気)

Fig.4. Image converter camera photographs showing metal wire and shunting discharge at 500V (C:200 μ F, V_0 :500V, 0.1mm ϕ , 30mm-long Tungsten wire, 2.0kPa air).

には金属線に沿って濃い粒子雲が見られる。濃い粒子雲の外側には薄い粒子雲が観測される。空間には熱電子放出に基づく電子も存在すると考えられる。時間の経過とともに、金属線のごく近傍の濃い粒子雲及び薄い粒子雲の両者とも膨張する。粒子雲の形成は、放電媒質に導電性の金属粒子を飛散させるので、絶縁破壊電圧の低下をもたらす。

(b)はほぼアーク発生直後の写真である。金属線からわずかに離れて濃く写っている円筒状の放電が見られる。この時刻において電流が急激に増加することを併せて考えると、金属線に沿ってみられる濃く写っている観測される現象はアークであるといえる。時間の経過とともにアークの著しい膨張が観測される。アークは膨張し、薄い粒子雲に重畳する。従って、(c)ではアークの半径はほぼ薄い粒子雲の端に達しており、中央部において約6 μ sの間に約6mmの膨張が観測される。よって平均膨張速度は約1000m/sである。

図(c)の中央部にみられるように金属線は直線状の元の状態をを維持しており、放電終了後も同様であった。1秒で1回の割合で繰り返し実験を行った結果、100回以上の放電が可能であることがわかった。放電の最適化を図り、繰り返し数の増加をはかることが産業用とし

図5 スペクトルの観測例

(C:20 μ F、 V_0 :2kV、直径0.4mm、長さ35mmタングステン線、全圧力1.3kPaアルゴン)

Fig.5. Observation of spectrum from shunting discharge at 2.0kV (C:20 μ F, 0.4mm in diameter and 35mm-long tungsten wire in 1.3kPa of Argon gas).

て供する場合の必須の条件となる。

6. スペクトルの観測

プラズマからのスペクトルの観測例を図5に示す。図より明らかなように金属スペクトルが現れているのがわかる。タングステンについてはほぼ原子スペクトルであるが、一部イオンスペクトル(波長393.544nm)や放電媒質であるアルゴンのスペクトル(419.832nmなど)も観測される。

いずれにしても、発生するシャンティングアークには金属成分が含まれており、金属イオン源として利用できる可能性を示唆する。

7. 検討とまとめ

金属線を低気圧気体中におき、コンデンサのエネルギーにより金属線を加熱すると金属蒸気の放出が見られる。金属線の抵抗の増加により、金属線間に加わる電圧は大きくなり媒質中でプラズマが発生し、アークに至る。プラズマ中には金属イオンが多く含まれる。アークの発生にも関わらず、金属線は元の状態を維持し、繰り返し放電の動作が可能である。また、アークはパルスであるため、パルス金属イオン源としての利用を示唆する。

従来の直流イオン源に比べ、パルスイオン源は次のような特徴を有する。基板に高電圧パルスを印加して、複雑形状物にイオン注入する場合、パルスが無印加の時間領域では基板に金属プラズマ成分が付着あるいは堆積し、イオン注入が行われない。パルスアーク中でパルスイオンビームを形成できれば、アークの継続時間とイオンビームの発生時間の同期をとることにより、放電のすべての時間帯において堆積させることなく、イオン注入を行うことができる。

本論文において提示したシャンティングアークはさらに以下の特徴を有する。第1に、放電条件の設定により、繰り返し放電が可能である。第2に金属線を用いることから複雑形状物の内面へのイオン注入を行うことができる。第3に金属プラズマ発生用の電源自身により金属線を加熱し、表面層のみを蒸発させ、金属線そのものは残したまま、金属線から周囲に発生する粒子雲を含む媒質中で絶縁破壊を達成する。従って、金属蒸発用に新たな電源を設けることなく、言い換えれば金属プラズマ発生用のトリガとなる金属プラズマや金属蒸発用に新たな電源を設けることなく、一つの電源により金属プラズマ形成に至る点に大きな特徴を有し、繰り返して使用できる。第4としてアーク電流値が容易に数千Aに達することがあげられる。従来数十Aのアーク電流値からのイオン引き出しであることを考えると、短時間の内に高いドーズ量のイオン注入ができる可能性を有する。これらの事柄は従来にない金属イオン源の特徴を持ち、かつ簡便でコストパフォーマンスに優れた金属イオン発生方式であるといえる。

本論文においては、アークの発生現象と金属イオンの含

有のみについて明らかにした。金属粒子の供給機構としてはアークによるスパッタ現象も寄与すると考えられ、基礎的な物理機構の解明は必須の課題である、さらに、多くの線種について線長、直径、媒質などの放電条件を明確にするとともに、実際のイオン電流の観測、注入実験を行う予定である。

参考文献

- [1]岡本他:「MAVS法による窒化セラミックスの合成」、日新電機技報、33,29(1988)。
 - [2]山田:「イオンビームによる薄膜設計」、66頁、69頁(1991)、共立出版。
 - [3]S.A.Bordzilovskii et al: "Electron Emission in Pulsed heating of a Wire", Sov.Phys. Tech.Phys., 18, 1251 (1974)。
 - [4]F.D.Bennett et al: "Correlated Electrical and Optical Measurements of Exploding Wires", Phys.Fluids, 5, 102(1962)。
 - [5]W.G.Chace & H.K.Moore Ed.: "Exploding Wires", Vol.1-4(1959-1968),Plenum Press。
 - [6]例えば鳳他:「電離気体論」、93頁(昭和44年)電気学会。
 - [7]例えば大野他:「全方位型パルスイオン注入装置によるTi製膜」、電気学会プラズマ研究会、資料番号EP-97-42(平成9年)。
 - [8]小池、行村:「XeClエキシマレーザ励起放電におけるアーク移行と金属スペクトルの発生」、電学論A、118、65(平成10年)。
 - [9]元木、行村:「水中タングステン線爆発の溶断特性」、電学論A、98、241(昭和53年)。
 - [10]日本金属学会編:「金属データブック」、12頁、13頁(昭和49年)丸善。
 - [11]W.E.Forsythe et al: "Smithsonian Physical Tables", p.362 (1964) The Smithsonian Institute。
 - [12]たとえば、蒸気圧については、D.E.Gray ed.: "American Institute of Physics Handbook", p.4-300 (1982) McGraw-Hill。
- (平成10年1月26日受付、平成10年6月11日再受付)

行村 建

1948年2月11日生まれ。77年3月同志社大学工学研究科博士課程修了。同年4月同大学工学部電気工学科助手、79年4月同専任講師、86年4月同助教授、92年4月同教授、現在に至る。工学博士。主として、エキシマレーザ、真空紫外光、パルスイオン注入などパルスパワーに関する研究に従事。日本物理学会、応用物理学会、レーザー学会会員。