

# プラズマ柱に接するアーク電極現象

佐伯節夫\*・大崎 堅\*

Phenomena of the Arc Electrode contacting with the Plasma Column

SETSUO SAEKI and KATASHI ŌSAKI

## Abstract

This report described the electrical and mechanical characteristics of the face-face electrode arc, which was supplied with Argon plasma stream, and macroscopic behavior of the electrode spot and boundary layer of that arc by means of high speed photography.

The face-face electrode was consist of copper anode and thoriated tungsten cathode or tungsten anode and thoriated tungsten cathode.

The arc voltage-current characteristics was always dropping characteristics for tungsten anode. But using the copper anode, it changed from rising characteristics to dropping or flat characteristics with increasing of the arc current, and arc voltage rising ratio, in the region of rising characteristics, became large as the radial distance ( $R_a$ ) of anode from nozzle axis was increased.

Using tungsten anode, anode spot of which temperature was 3,700~4,400 K and diameter was 0.08~0.13 mm always existed. On the other hand, for copper anode, drop let of which thickness was 0.06~0.17 mm was observed until  $R_a$  was 1.1 mm, but for over 1.1 mm, anode spot of which temperature was 2,570~2,650 K and diameter was 0.06~0.2 mm was appeared. As the arc current increased, anode spot for tungsten anode was dispersed and then it was converged, but that for copper anode was dispersed.

Boundary layer thickness on anode surface was increased in the region of rising characteristics of arc voltage, and that had different feature at the upstream and downstream.

Behavior of cathode spot was regular reciprocating motion, but that of anode spot was random motion.

## 1. まえがき

アーク電極は固体電極とプラズマ柱を通して集電し、電力輸送を行う試みであり、プラズマの高い導電率と流動性を利用したものである。最近このアーク電極を MHD 発電用アーク電極<sup>1)</sup>、架空線からのアーク集電極<sup>2)</sup>へ応用する試みがなされている。

プラズマは電離度、粒子温度などによってその性質に著しい相違があることが知られているが、工学的応用<sup>3)~10)</sup>の対象となるプラズマは一般に 50,000°C 以下の低温弱電離プラズマである。現在実用化されている各種のプラズマ応用装置に対しては、このようなプラズマを長時間安定に維持することが要求され、特にアーク電極に対しては高電離で流速の低い安定化プラ

ズマ流が要求される。

アーク電極においては、プラズマとこれに接する固体電極との相互作用が極めて重要となる。すなわち、プラズマと電極との接触面における境界部のプラズマ粒子密度や温度分布、電荷輸送、熱伝達などを明らかにする必要がある。しかし、これらに対する解析は極めて困難であるが、最近種々の方面から実験的、理論的解明<sup>11)~13)</sup>がなされつつある。

本研究では、プラズマ接触子を用いた対向電極アークの解析を行ったので、その基礎的特性について述べる。

## 2. 実験装置及び実験方法

### 2.1 対向電極形アーク装置

対向電極形アーク装置は Fig. 1 に示すように対向

\* 電気工学科

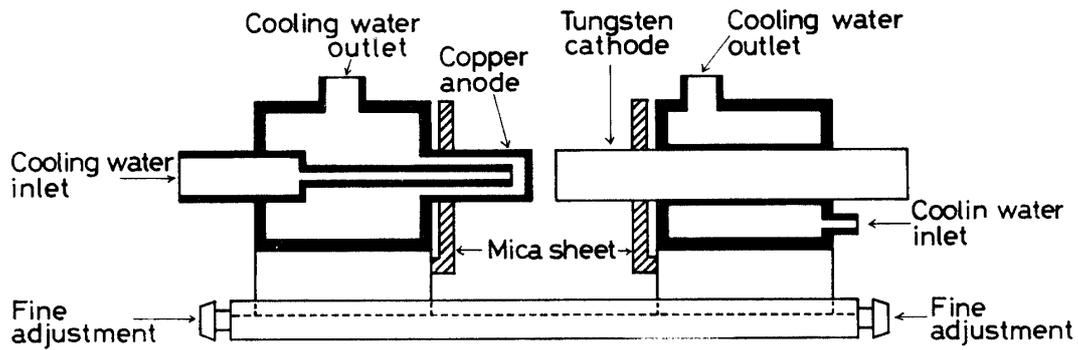


Fig. 1 Sectional view of the face-face electrode device.

電極、電極ホルダ部及び電極可動部より構成されている。対向電極は互に円柱状端面が正対するように配置し、その直径はいずれも 3 mm である。電極としては、陰極が 2% トリウム入タングステン棒、陽極が純タングステン棒及び円筒状銅管であり、電極先端はいずれも円板状平面である。

電極は流量 1 l/min の冷却水を個別に供給して水冷し、熱損傷を防止するとともに、冷却水の流量とその温度上昇よりそれぞれに対する熱入力が求められる。なお、電極ホルダ部に対するプラズマ流からの放射及び対流による熱伝達を防ぐために、ホルダ前面にマイカを設置した。

2.2 プラズマ発生器

本実験に使用したプラズマ流は、先端を90度に削った直径 5 mm の 2% トリウム入タングステン棒状陰極と、内径 5 mm, 集束部長 7 mm のノズル形陽極を有する直流ガス集束形プラズマジェット発生器により発生したアルゴンプラズマジェットである。

実験中のプラズマジェット発生条件を示すと、アルゴンガス流量 4 l/min, 電極ギャップ長 2 mm, アーク電流 100 A, アーク電圧 14.1 V, ジェット平均温度 6,900 K, プラズマ流の平均エンタルピ 820 Kcal/kg, レイノルズ数130, プラズマジェット長 52 mm 及びその径 1.9 mm である。なお、プラズマジェットに含まれるゆらぎはジェット側面像の高速度写真、陽極点及びアーク柱の運動を示すアーク電圧波形、ジェットの光学的变化を示す放射光出力波形により解析した。その結果、本実験条件下ではジェットの軸方向の伸縮、径方向の偏向とも概ね許容範囲内に収まり、安定なプラズマジェットであることを確認した。

ノズル軸線上で出口から 2 mm 離れた位置のジェット断面内のプラズマ基本量を Fig. 2, Fig. 3 に示す。Fig. 2 は動的静電単探針により求めた電子温度、電子

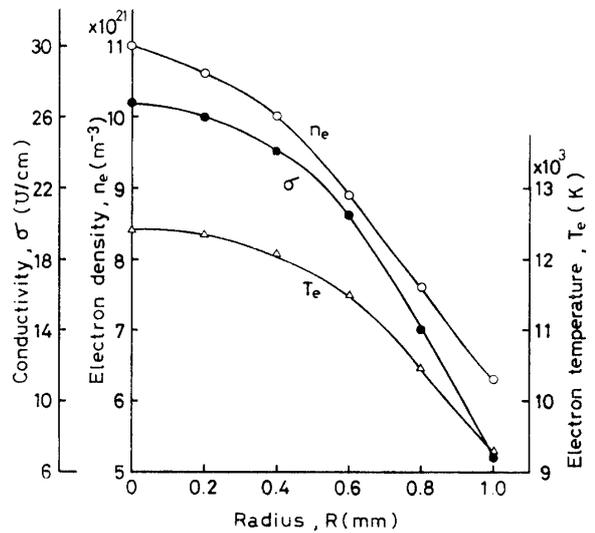


Fig. 2 Radial distribution of electron temperature, electron density and conductivity of the plasma jet.

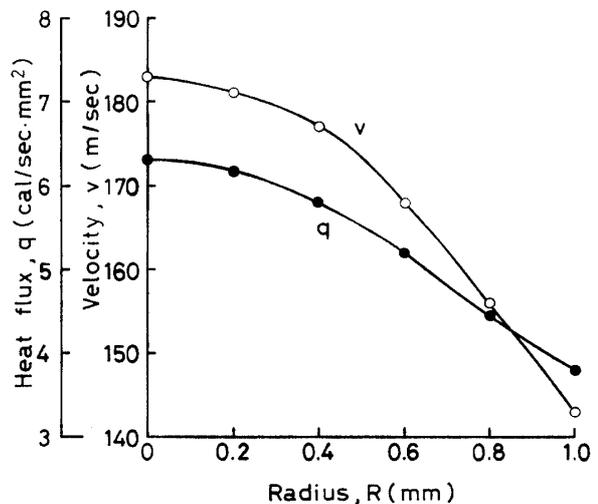


Fig. 3 Radial distribution of velocity and heat flux of the plasma jet.

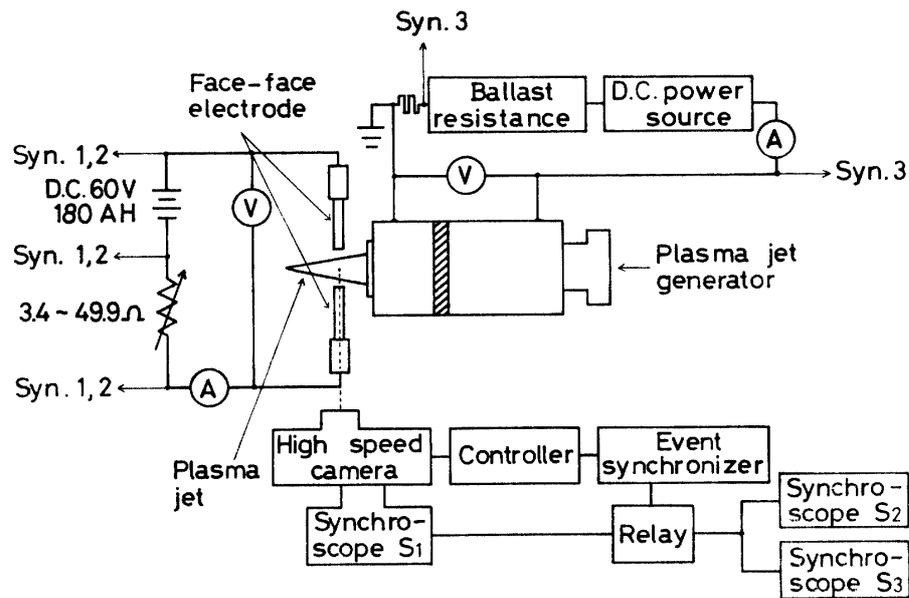


Fig. 4 Experimental arrangement of the face-face electrode device.

密度及びカントロヴィッツら<sup>14)</sup>の方法より算出した導電率の径方向分布を示している。電子温度、電子密度及び導電率はジェット外周方向に向うにつれて減少し、半径 0.6 mm より外周部でいずれも急激な低下を生じ、軸線から 1 mm 離れた位置における温度、密度及び導電率はそれぞれ軸線上の75%で 9,300 K, 57%で  $6.3 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ , 26% で  $6.9 \text{ } \Omega/\text{cm}$  に低下する。

Fig. 3 は流速測定用探針及び熱流束測定用探針により求めたプラズマ流速と熱流束の径方向分布を示している。いずれの分布も電子温度分布とほぼ同様な特徴を有している。すなわち、プラズマ流速及び熱流束は軸上でそれぞれ 183 m/sec,  $6.3 \text{ cal/sec}\cdot\text{mm}^2$  であり、軸線から 1 mm 離れた位置では同じく 143 m/sec,  $3.8 \text{ cal/sec}\cdot\text{mm}^2$  に低下する。

### 2.3 実験方法

Fig. 4 に実験回路を示す。対向電極アーク電流( $I_{fa}$ )は無負荷電圧 60 V, 容量 180 A の直流電源(鉛蓄電池 30個直列接続)から安定抵抗(3.4~49.9  $\Omega$ )を通して銅陽極の場合は 13 A まで、タングステン陽極では 11 A まで供給した。

対向電極アークの電圧( $V_{fa}$ )及び  $I_{fa}$  はそれぞれデジタル計器、可動コイル形計器を使用し、平均値を求めた。また、対向電極アークモードを調べるために各動作条件における電圧波形、電流波形をシンクロスコープにより観測した。なお、対向電極アーク回路は電氣的にうかした状態とした。

対向電極の挿入位置は、ノズル軸線上で出口から

2 mm 離れた位置のジェット断面内で軸線からの距離が陽極( $R_a$ ), 陰極( $R_c$ )ともに 0.9 mm, 1.1 mm, 1.5 mm 径方向に離れた点である。

対向電極アークの側面からスチル撮影及び高速度撮影(16,000 P.P.S)を行い、電極点及び境界面の形状並びにそれらのふるまいを調べた。

また、対向電極アーク発生中の電極点温度はマイクロピロメータによって直読した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 電氣的特性

対向電極アークの電圧対電流の関係は Fig. 5 に示すように、陽極材料及び陽極先端部のプラズマ流断面内径方向位置によりその特性が異なる。

タングステン陽極では常に垂下特性を示し、電圧垂下率は電極ギャップ長が大きい場合は  $0.48 \sim 0.90 \text{ V/A}$  であるが、それが小さくなると約  $0.1 \text{ V/A}$  に低下する。また、電極ギャップ長を増すと垂下特性を維持したまま  $V_{fa}$  のみ上昇し、電圧上昇率は  $4.5 \sim 17 \text{ V/mm}$  である。

銅陽極では  $I_{fa}$  の増加と共に上昇特性から垂下または水平特性に移行する。 $R_c = 0.9$  (一定) に保ち  $R_a$  を 0.9 mm から 1.5 mm に増すと、垂下または水平転移点はそれぞれ  $7.5 \text{ A} \rightarrow 8.3 \text{ A} \rightarrow 6.7 \text{ A}$  と大きく変化すると共に低電流側へ移行する。一方  $R_a = 0.9$  (一定) に保ち  $R_c$  を同様に増加すると、転移点は  $7.5 \text{ A} \rightarrow 6.3 \text{ A} \rightarrow 6.0 \text{ A}$  と変化し、その変化幅も小である。

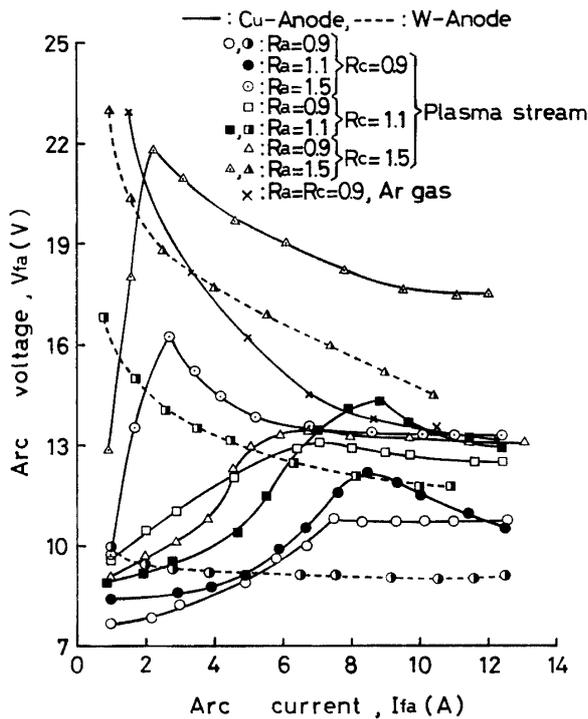


Fig. 5 Arc voltage-current characteristics of face-face electrode arc.

$R_a$ : Radial distance of anode from nozzle center axis (mm),

$R_c$ : Radial distance of cathode from nozzle center axis (mm)

転移点より小電流側における電圧上昇率は  $R_a$  が増加すると共に大となり、最大電圧上昇率は  $R_a = 1.5$ ,  $R_c = 1.5$  で与えられ約 7 V/A である。

よって、転移点は主に陽極近傍の放電モードに依存し、放電モードは転移点より小電流側では拡散モード<sup>15)</sup>であり、それより大電流側では収縮またはジャイアントアークモードと考えられ、後述する写真観測解析結果と一致する。

対向電極アークの電極ギャップにアルゴンガスのみ供給した場合の電圧対電流の関係は、Fig. 5 に示すように通常のアーク放電と同様に垂下特性となり、 $V_a$  は電極ギャップにプラズマ流を供給した場合の 25~194% 増の 13.2~22.9 V となる。

このように電極ギャップにプラズマ流を供給した場合とアルゴンガスのみ供給した場合で電圧特性、 $V_{fa}$  が異なるのは、電極面上に形成される境界面内及びアーク柱内での輸送特性に相違が生じているものと考えられる。

### 3.2 電極における熱収支

銅陽極に対する熱入力  $I_{fa}$  は Fig. 6 に示すように  $I_{fa}$

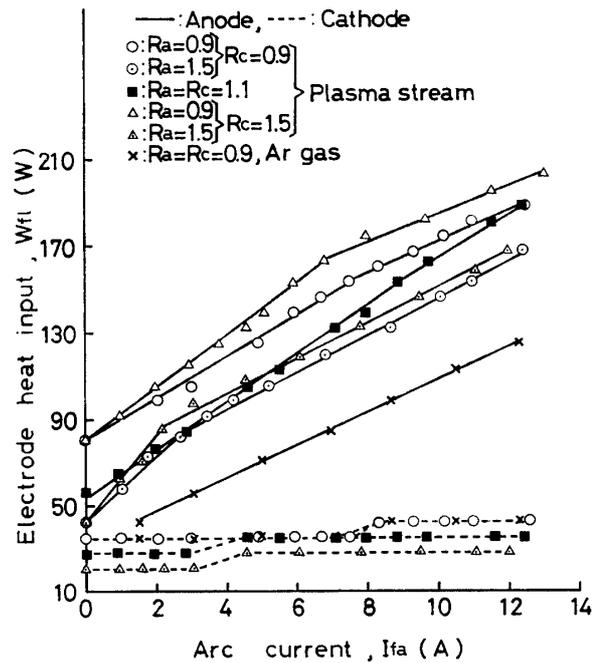


Fig. 6 Face-face electrode heat input.

$R_a$ : Radial distance of anode from nozzle center axis (mm),

$R_c$ : Radial distance of cathode from nozzle center axis (mm)

の増大と共に増加し、その増加の割合は電圧特性の垂下または水平転移点を境いにして異なる。すなわち、熱入力の増加の割合は転移点より小電流側で  $R_a$  を 0.9 mm から 1.5 mm に増すとそれぞれ 9.6 W/A, 12.3 W/A, 19.5 W/A であり、それより大電流側では同じく 6.8 W/A, 7.8 W/A, 8.4 W/A と  $R_a$  による差は小である。このように転移点より小電流側で、 $R_a$  の増大と共に熱入力の増加の割合が増すことは電圧上昇率もこの領域で増すことと一致している。

$R_a = R_c = 0.9$  において、電極ギャップにプラズマ流を供給した場合とアルゴンガスのみ供給した場合について比較すると、プラズマ流からの熱伝達量 81 W を含む前者が 50~63 W 後者より大となる。

陰極への熱入力は  $I_{fa}$ ,  $R_c$  による影響は軽微であり、 $I_{fa}$  が約 12 A の増加に対して熱入力は 7 W 増し、 $R_c$  が 0.6 mm 増すとそれは約 13 W 減少する。また、電極ギャップにアルゴンガスのみ供給した場合の  $R_c = 0.9$  における陰極への熱入力は、プラズマ流を供給した場合のそれとほぼ等しい。これより電極ギャップにプラズマ流を供給した場合、陰極加熱は主にプラズマ流からの熱伝達により行われているとみなしうる。

### 3.3 対向電極アークモード

Fig. 7 は対向電極アーク及びプラズマ発生器のアー

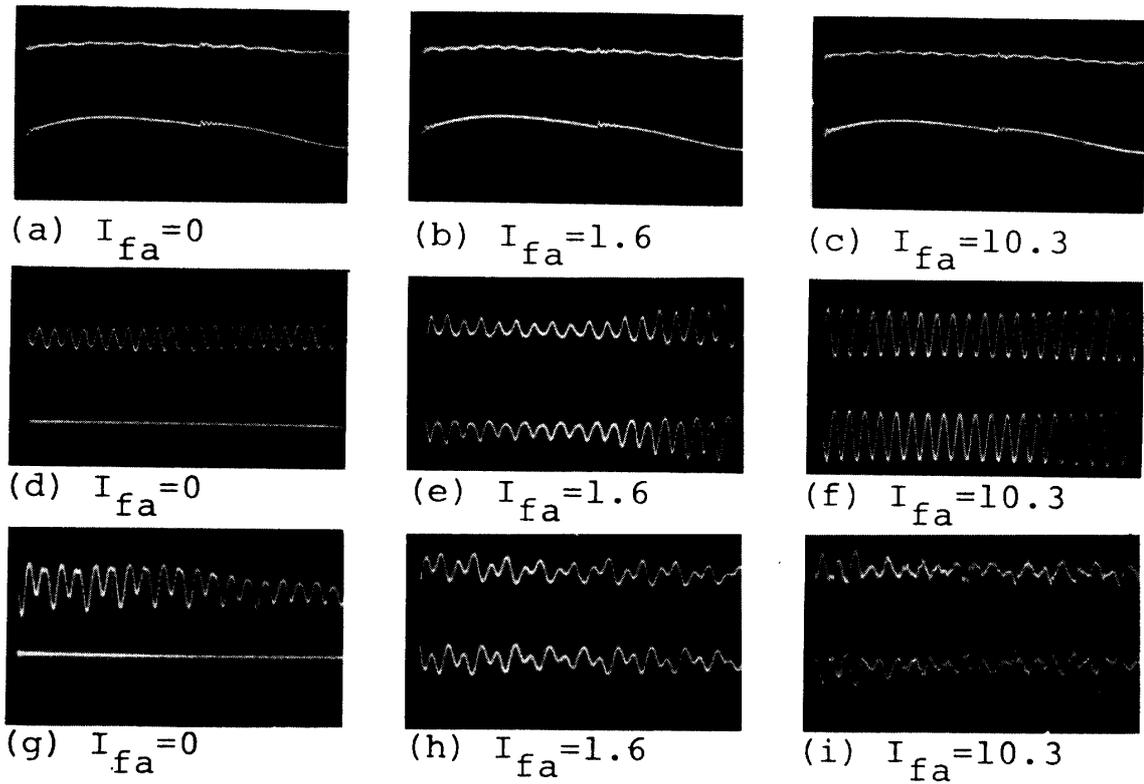


Fig. 7 Oscillograms of the plasma jet generator and face-face electrode arc modes.

$I_{fa}$ : Face-face electrode arc current (A), Face-face electrode gap: 3.0 mm, Sweep velocity: 500  $\mu$ s/div,

(a)~(c): The plasma jet generator arc mode

Upper trace; Arc voltage wave form; 0.2 V/div

Lower trace; Arc current wave form; 1.5 A/div

(d)~(i): Face-face electrode arc mode

(d)~(f): W anode, (g)~(i): Cu anode,

Upper trace; Arc voltage wave form, (g); 0.2 V/div,

(d)~(f); 0.5 V/div, (i); 1 V/div, (h); 5 V/div,

Lower trace; Arc current wave form, (d)(g); 9.6 mA/div,

(e); 95 mA/div, (f); 109 mA/div, (h); 240 mA/div, (i); 235 mA/div

クモードを示す。対向電極をプラズマ流に挿入すると無電界の場合でも対向電極間に振動周波数 3.8~4kHz の正弦波状の振動が現われると共に、プラズマ発生器のアーク電圧にもそれと同期した正弦波状の振動が現われる。これは電極の挿入によるプラズマ流内の発生器アーク電流通路の障害及びプラズマ流の乱れに基づくノズル内アークのゆらぎによるものと考えられる。

タングステン陽極におけるアークモードは常に正弦波状の継続振動モードを示し、その振幅は 0.05~2.7 V である。 $I_{fa}$  を増加すると振動振幅は減少するが、 $R_a$  が大となるとそれは増し、最大 2.7 V に達する。

一方、銅陽極におけるアークモードは  $I_{fa}$  の増加と共に、ほぼ正弦波状の継続振動モードよりランダム振動モードへと移行する。ランダム振動モードへ移行する  $I_{fa}$  は  $R_a=0.9$  でほぼ 6~7 A,  $R_a=1.5$  で 2~3 A

である。この電流値は電圧対電流の関係に現われる垂下または水平転移点を与える  $I_{fa}$  と一致すると共に、後述する陽極点または溶滴が陽極面上に現われる  $I_{fa}$  とも一致する。すなわち、陽極点または溶滴が形成されるまではほぼ正弦波状の継続振動モードを保つのに対し、それらが形成されると振動周波数 20 kHz, 振幅 4~5 V のランダム振動となる。

このようにタングステン陽極と銅陽極でアークモードが異なるのは、陽極側境界面及び陽極面上の電極点のふるまいの相違に基づくものと考えられる。

### 3.4 電極点と境界面の特徴

対向電極ギャップにアルゴンガスのみ供給した場合とプラズマ流を供給した場合の対向電極アークのステル撮影像の一例を Fig. 8 に示す。

陽極点の形状は球状を呈し、陽極点直径及びその個数を Fig. 9 に示す. タングステン陽極では,  $I_{fa} < 7$  で 1~4 個の直径 0.08~0.13 mm の陽極点が陽極面上を移動しているが,  $I_{fa} = 7 \sim 8$  では数個の陽極点が集まり始め,  $I_{fa} > 8$  では直径約 0.1 mm の陽極点 30 個が陽極中央に集中し, 直径 1 mm 程度の半球状陽極点を形成する. 一方, 銅陽極において  $R_a < 1.1$  では大電流

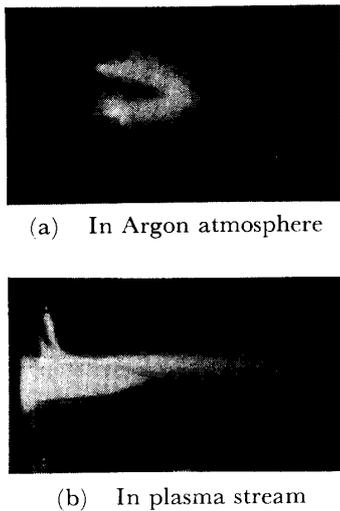


Fig. 8 Photographs of face-face electrode arc.

Face-face electrode arc current: (a); 1.5 A, (b); 1.0 A.  
Face-face electrode gap: 1.8 mm

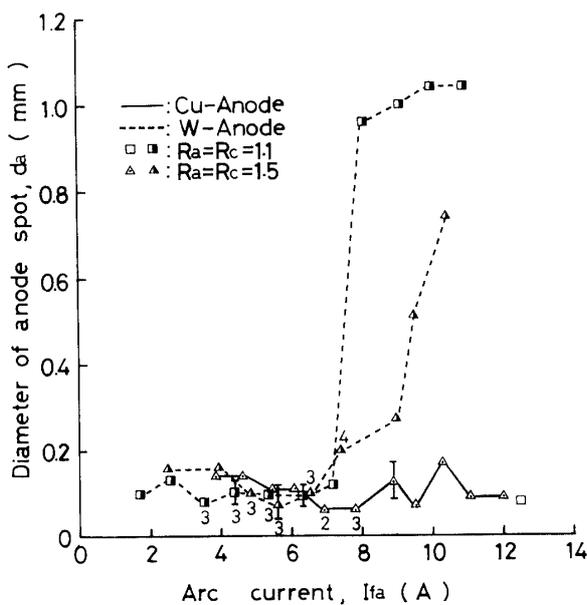


Fig. 9 Diameter of anode spot on the anode electrode surface.

$R_a$ : Radial distance of anode from nozzle center axis (mm),  
 $R_c$ : Radial distance of cathode from nozzle center axis (mm)

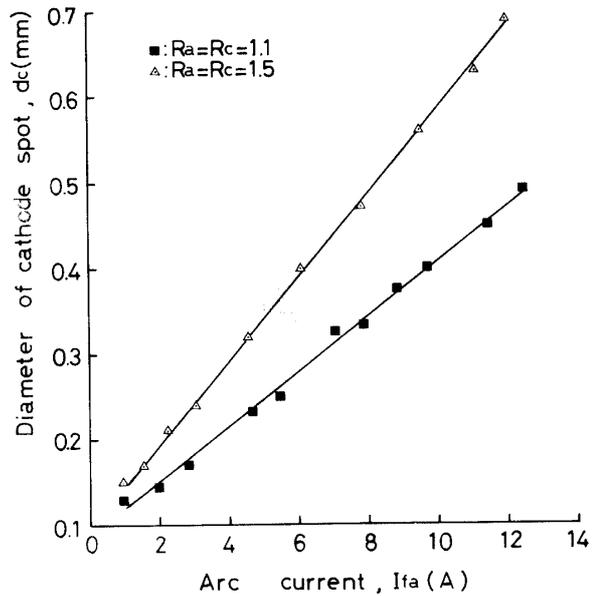


Fig. 10 Diameter of cathode spot on W-cathode surface.

$R_a$ : Radial distance of anode from nozzle center axis (mm),  
 $R_c$ : Radial distance of cathode from nozzle center axis (mm)

領域においても陽極点は認め難く, 赤熱状態の溶滴が現われ, この溶滴は一定の特徴ある形状を示さない. 溶滴の厚みは  $R_a = 0.9$  で 0.06~0.12 mm と薄く,  $R_a = 1.1$  では 0.06~0.17 mm とわずかに厚くなるが, 溶滴の基底部長はそれぞれ 0.07~0.31 mm, 0.08~0.28 mm で  $R_a$  が増すと減少する.  $R_a = 1.5$ ,  $I_{fa} > 3$  で陽極点が現われ,  $I_{fa} = 3 \sim 7$  では陽極面上を直径 0.06~0.2 mm の陽極点が陽極ジェットを伴ってプラズマ流下流方向に移動するが,  $I_{fa} > 7$  では数個の陽極点が陽極面上に点在している. なお, 陽極点温度はタングステン陽極で 3,700~4,400 K と高く, 銅陽極では 2,570~2,650 K と低い.

以上述べたように陽極面上に陽極点または溶滴が現われると電圧・電流特性は垂下または水平特性となり, それが認められない場合は上昇特性となる.

陰極点の形状は楕円形状であり, その直径は Fig. 10 に示すように 0.13~0.68 mm の範囲内に収まり,  $I_{fa}$  の増加と共にほぼ直線的に増す. その膨張の割合は  $R_c$  が 1.1 mm, 1.5 mm に対してそれぞれ 0.03 mm/A, 0.05 mm/A となり,  $R_c$  が増大すると陰極点の膨張の割合及びその径ともに大となる. 陰極点温度は 2,700~2,860 K で,  $I_{fa}$  の増加及び  $R_c$  の減少と共に上昇する. 陰極点平均電流密度及びその温度を  $I_{fa} = 10$  について示すと,  $R_c = 1.1$  でそれぞれ  $8.8 \times 10^3$  A/cm<sup>2</sup>,

2,840 K,  $R_c=1.5$  で同じく  $4 \times 10^3$  A/cm<sup>2</sup>, 2,740 K である。

銅陽極部境界面の厚みは Fig. 11 に示すように,  $I_{fa}$  の増加と共に拡大から飽和に移行し, 電圧上昇特性領域では境界面の厚みも拡大し, 垂下または水平特性領域ではその厚みはほぼ一定となる。また, 対向電極ギャップ長が大となると境界面の厚みも増し, 最大 0.55 mm に達する。

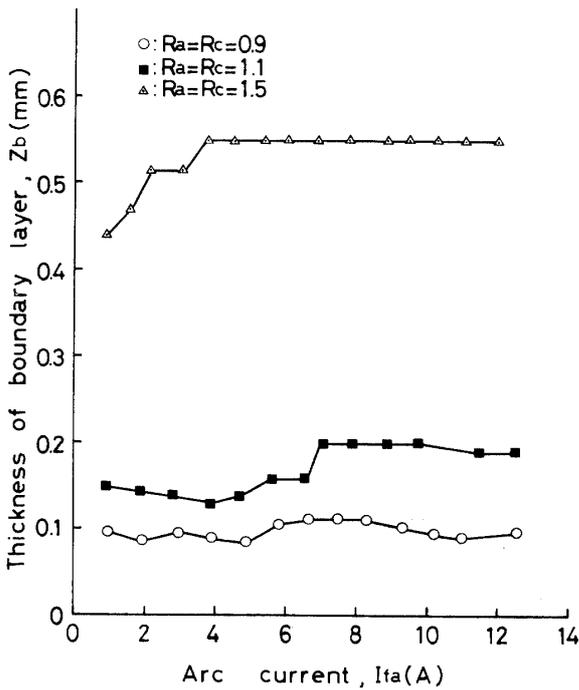


Fig. 11 Thickness of boundary layer on Cu-anode surface.

$R_a$ : Radial distance of anode from nozzle center axis (mm),  
 $R_c$ : Radial distance of cathode from nozzle center axis (mm)

Fig. 12 は,  $R_a=R_c=1.1$ ,  $I_{fa}=12$ , 銅陽極における対向電極アークの高速度撮影像の一例を示している。このようなシネ撮影像をフィルム解析装置によって処理し, Fig. 13, Fig. 14 を得た。Fig. 13 は電極点直径とその付着位置, Fig. 14 は電極部境界面の厚みの時間的变化を示している。

陽極点は直径 0.07~0.21 mm の範囲内で膨張収縮すると共に, 対向電極入口規準面から 2.86 mm 下流側で 0.14 mm の範囲内を周波数約 3.8 kHz でランダム運動を行っている。一方陰極点は直径 0.37~0.64 mm と陽極点より大きく, 同じく 2.38 mm 下流側で 0.24 mm の範囲内を周波数 3.4 kHz で規則的な往復運動を繰り返すと共に, 直径もまた膨張収縮を繰り返している。

電極部境界面の厚みは, 上流側, 下流側で異なると共に, その変動周期も異なる。すなわち, 上流側における境界面の厚みは陽極部で 0.18~0.38 mm, 陰極部

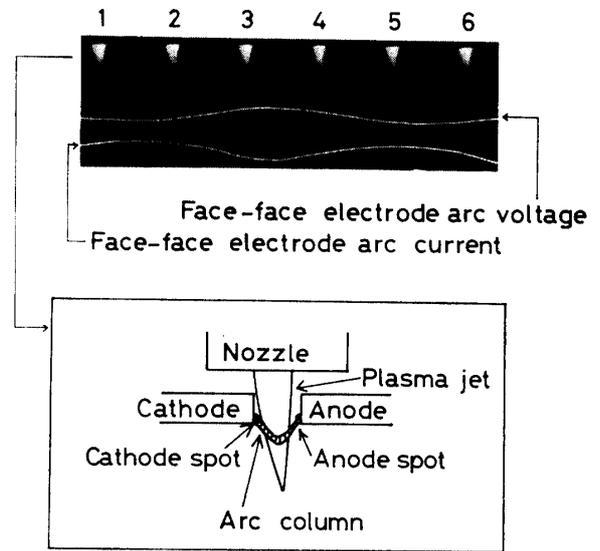


Fig. 12 High speed movies of face-face electrode arc.

Face-face electrode arc current: 12 A,  
 Face-face electrode gap: 2.2 mm,  
 Anode: Cu, Cathode: Th-W

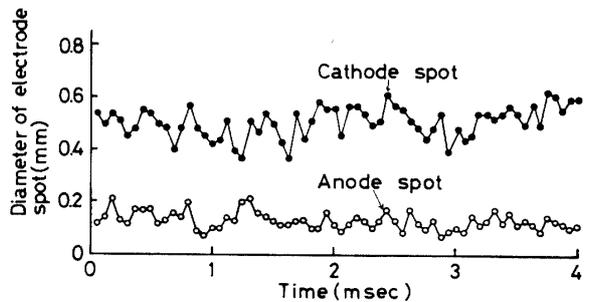
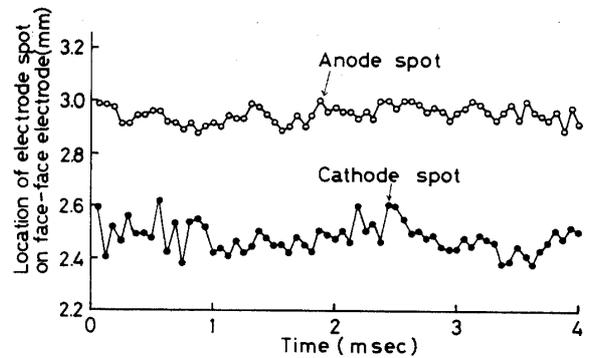


Fig. 13 Profiles of diameter and location of electrode spot.

Face-face electrode arc current: 12 A,  
 Face-face electrode gap: 2.2 mm,  
 Anode: Cu, Cathode: Th-W

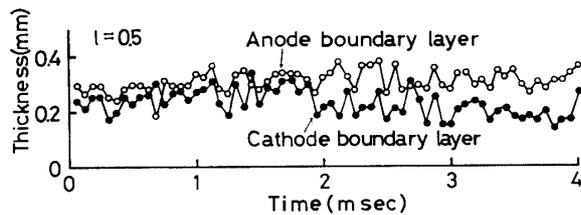
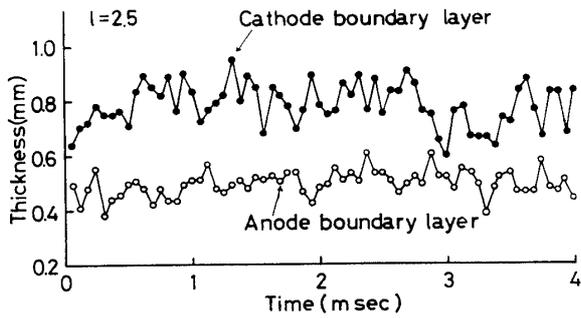


Fig. 14 Profiles of boundary layer thickness on face-face electrode surface.

Face-face electrode arc current: 12 A,  
Face-face electrode gap: 2.2 mm,  
Anode: Cu, Cathode: Th-W,  
 $l$ : Axial distance from face-face electrode inlet (mm)

で 0.14~0.34 mm であるが、変動周期は陽極部、陰極部とも約 3.4 kHz で規則的である。これに対し下流側では同じく 0.38~0.61 mm, 0.56~0.95 mm で、陰極部境界面の厚みは陽極部のその約 50% 大となる。また、境界面の変動は陽極部では不規則であるが、陰極部では約 4.7 kHz で規則的である。

アーク柱は Fig. 12 に示すように陽極側にわん曲した形状を呈し、平均アーク長は 3.9 mm である。

#### 4. むすび

対向電極形アークの電極ギャップに安定化プラズマ

流を供給し、固体電極面に形成される電極点とそのふるまい及び電極部境界面の変化を調べることにより、プラズマ柱に接する電極の境界面における輸送現象の特徴が明らかとなった。すなわち、対向電極間のプラズマ柱の状態は主に陽極側境界面の放電モード、輸送特性に顕著な影響を与えており、対向アーク特性もこれに対応した変化を伴うことが確認された。その結果、アーク電極の動作条件に対する指針が求められた。

本研究に協力いただいた大学院高橋広志氏、同柳楽昌宏氏、昭和54年度特別研究及び卒業研究学生諸氏、本学山中麗子氏に感謝する。

#### 参考文献

- 1) D. A. Oliver & M. Mitchner: AIAA J., **5**, 1424 (1976)
- 2) D. Klapose, et. al.: IEE Conf. Publ., **143**, 299 (1976)
- 3) J. A. Browning: Weld. J., **38**, 870 (1959)
- 4) 岡田 実, 荒田吉明: プラズマ工学, 日刊工業新聞社 (1976) p. 396
- 5) N. N. Rykaiin & V. V. Kudinov: Pure. Appl. Chem., **48**, 229 (1976)
- 6) I. G. Sayce: Pure. Appl. Chem., **48**, 215 (1976)
- 7) H. K. Messerle, et. al.: J. Phys. D; Appl. Phys., **3**, 1080 (1970)
- 8) 文献 4) の p. 457
- 9) K. Kuroda: Pap. AIAA, [**78-715**], 1 (1978)
- 10) R. R. Jhon & W. L. Bade: ARS J., **31**, 4 (1961)
- 11) M. Suzuki & A. Kanzawa: AIAA J., **17**, 1320 (1979)
- 12) H. K. Messele & A. Manglick: J. Phys. D; Appl. Phys., **11**, 1073 (1978)
- 13) E. Pfender: Pure. Appl. Chem., **48**, 199 (1976)
- 14) キャンベル著・棚澤一郎他訳: プラズマ物理学と電磁流体力学, 好学社 (昭 41) p. 187
- 15) K. Okasai, et. al.: AIAA J., **16**, 334 (1978)

(昭和 55 年 4 月 15 日 受理)