

# 直流プラズマ・ジェットに対する探針測定

牧 元\*・佐伯 節夫\*\*・大崎 堅\*\*\*

Probe Measurements in D. C. Plasma Jet.

Hajime MAKI, Setsuo SAEKI and Katashi OSAKI

## Abstract

Some preliminary experiments concerning high speed probe techniques has been undertaken in D. C. plasma jet.

A conductivity probe, a typical Langmuir probe and velocity probe were used for the investigation at the surface layer of the high temperature jet core. When a probe is operated in high temperature plasma flow, it appears unlikely that the static theory of the probe method will be directly applicable. So, Clayden's assumptions were given for the interpretation of results from our experiments.

Thus, apparent plasma conductivity, apparent electron temperatures and ion densities were estimated and the probe current wave form were studied. It was found that the electrical conductivity of plasma jet increased significantly with the arc current.

Typical values of specific resistance were less than  $300 \text{ K}\Omega \cdot \text{cm}$  which is equal to the resistance of the seeded Argon plasma. The results obtained from the measurements by the Langmuir probe and the velocity probe were as follows. The electron temperature were  $6500^\circ\text{K}$  for Nozzle N—2,  $12000^\circ\text{K}$  for Nozzle N—5 and the ion densities were  $4.08 \times 10^{14} \text{ ions/cm}^3$  for N—5,  $9.91 \times 10^{14} \text{ ions/cm}^3$  for N—11 respectively.

A random pulse observed in the probe current vanished with the increase of the arc current.

## 1. 緒 言

プラズマ計測に当り探針を用いるとプラズマ内の任意の点の電位、温度、電荷密度などの定量測定が可能となる。探針法の適用範囲は最近にいたって大電流アーク放電に基づくプラズマ・ジェットの領域<sup>1)</sup>まで拡張されている。このようなプラズマ・ジェットにおいては放電電流自身による磁界の発生が考えられるが、この場合当然探針に対するプラズマのドリフト速度がその熱運動に比較して大きくなり、探針の捕集特性に影響する。さらに測定に際して、探針を直接に高温高速プラズマ中に挿入するため実験方法によっては探針の温度上昇、および過熱による探針材料の飛散を招きプラズマ流自身も探針による乱れ、汚染を生ずる危険がある。またプラズマ・ジェットのアーク電圧やジェット光度に検出されるゆらぎ現象<sup>2)</sup>も探針測定値に対して問題点を残すことになろう。したがってこのよう

な特異なプラズマ流を対象とする場合には静かなプラズマに対する探針測定の方法をそのままに適用することは種々の困難があると予想される。

筆者等は、大気圧下におけるアルゴン・プラズマ・ジェットの温度  $2000^\circ\text{C}$  の周辺部に対して静電探針を試み、プラズマ流の見かけの導電度、電子温度、イオン密度などを推定し得た。今後、探針の構造、測定方法を高速度掃引に適するように改善を加えることにより高温高速プラズマ流に対しても静電探針法の特長を十分に発揮しうると考える。

以下実験的に調べた直流プラズマ・ジェットに対する探針特性について報告する。

## 2. 実験方法

プラズマに対して静電探針を行なう場合、単探針法および複探針法がある。前者は基準となるべき電極に

\* 工業短期大学部

\*\* 電気工学教室

\*\*\* 大学院修士課程

対して適当なバイアスを与えた1本の探針をプラズマ中に挿入して、これに流入する電流を測定する。後者は基準電位が与えられない場合、近接した2本の探針をプラズマ中に挿入してこの間に電圧を印加し探針に流入する電流を求める。本実験においては、前者いわゆるLangmuir探針を使用した。

### 2・1 単探針法<sup>3)</sup>

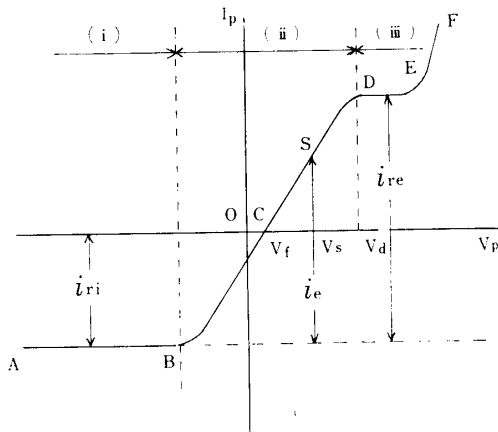


Fig. 1 Single probe characteristics.

$V_p$  : Probe potential

$I_p$  : Probe current

単探針を用いた場合の電圧電流特性を示すとFig. 1のようになり、探針電位によって (i), (ii), (iii) に大別される。(i)におけるランダムイオン電流は探針によるイオンの衝突頻度を考えることにより

$$i_{ri} = \frac{1}{4} e n_i \bar{C}_i A \quad (1)$$

ただし  $e$  : 電子の電荷

$n_i$  : 探針面におけるイオン密度

$\bar{C}_i$  : イオンの平均速度

$A$  : 探針面積

$$\text{ここで } \bar{C}_i = \left( \frac{8kT_i}{\pi m_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

ただし  $T_i$  : イオン温度

$m_i$  : イオン質量

$k$  : Boltzmann定数

同様に (iii) におけるランダム電子電流は

$$i_{re} = \frac{1}{4} e n_e \bar{C}_e A \quad (3)$$

ただし  $n_e$  : 探針面における電子密度

$\bar{C}_e$  : 電子の平均速度

$$\text{ここで } \bar{C}_e = \left( \frac{8kT_e}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

ただし  $T_e$  : 電子温度

$m_e$  : 電子質量

$n_i = n_e$  の成立するプラズマ中では

Vol.17, No.3 (1966)

$$\frac{i_{re}}{i_{ri}} = \frac{\bar{C}_e}{\bar{C}_i} = \left( \frac{m_i T_e}{m_e T_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

領域 (ii) において、探針電流は電子電流とランダムイオン電流との差で与えられる。

$$i = i_e - i_{ri} \quad (6)$$

探針電流が0になった場合の探針電位を浮遊電位とし、これより高い電位を探針に与えると、流入する電子電流はランダムイオン電流より増大する。すなわちこの領域においては探針に到達する電子数がイオン数より大となり、探針周囲にシープを作る。電子のエネルギー分布が Boltzmann 分布であると仮定し、探針電位と空間電位の差を  $V$  とすると  $eV$  なるエネルギーをもつ電子の存在確率は  $\exp(-eV/kT_e)$  に比例し、探針表面での電子密度  $n$ 、プラズマの電子密度  $n_e$  として

$$n = n_e \cdot \exp(-eV/kT_e) \quad (7)$$

電子電流は  $n$  に比例するゆえに

$$i_e = i_{re} \cdot \exp(-eV/kT_e) \quad (8)$$

ただし  $V = V_d - V_s$

$V_d$  : 飽和点Dに対する探針印加電圧

$V_s$  : 探針電圧

これより次のように電子温度が決定できる。

$$\frac{d(\ln i_e)}{dV} = - \frac{1.16 \times 10^4}{T_e} \quad (9)$$

### 2・2 高温高速プラズマ流に対する単探針

超音速プラズマ流に対してLangmuir探針理論を適用するためClayden<sup>4)</sup>は次の条件を与えた。

- 探針に対するプラズマのドリフト速度はイオンや中性粒子の熱運動に比較して大きい。
- 中性ガスの平均自由行程が探針の寸法に比較して大きい。
- 探針の寸法に比較して Debye 長は小さい。

この条件の下で探針に対する飽和イオン電流は次式で与えられる。

$$i_{i \text{ sat}} = e n_i g^2 n_i U \quad (10)$$

$$g = \frac{d}{2} + f(VT_e) \cdot \lambda_D \quad (11)$$

ただし  $g$  : 衝突パラメータ

$U$  : プラズマ流の速度

$V$  : 探針に対するプラズマの電位

$\lambda_D$  : Debye長

$\lambda_D \ll d$  であるから  $g \approx d/2$ , したがって(10)式は

$$i_{i \text{ sat}} = e n_i A_i U \quad (10')$$

ただし  $A_i$  : 探針の面積

となり、電子の平均速度  $\bar{C}_e$  が  $\bar{C}_e \gg U$  であれば

$$i_{e \text{ sat}} = \frac{1}{4} e n_e \bar{C}_e A_e \quad (12)$$

ただし、 $A_e$  : プラズマに接触する探針の面積

となる。ゆえに、アルゴン・プラズマ中においては

$$\left(\frac{i_e}{i_i}\right)_{sat} = \frac{\bar{C}_e A_e}{4 A_i U} \quad (13)$$

となる。またわずかに負電位に保った探針には  $i_e$  が流入し、それは次式で示される。

$$i_e = \frac{1}{4} n_e A_e \bar{C}_e \cdot \exp(-eV/kT_e) \quad (14)$$

式(12), (13), (14)より  $n_e$ ,  $T_e$  が求まる。

### 2.3 プラズマ・ジェットに対する探針測定

#### 2.3.1 対向複探針 プラズマの導電度測定のため

Fig. 2 に示すように、複探針をノズル電極出口より 5 mm 前方に配置し、プラズマ流軸線を挟んで間隔 4 mm で対向させて、両探針間に直流 70V を印加し探針電流を測定した。

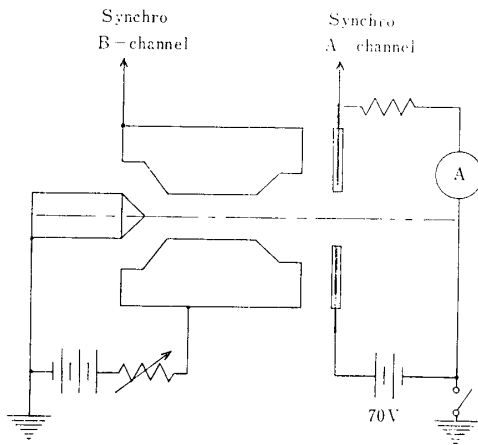


Fig. 2 Conductivity probe measuring circuit.

#### 2.3.2 Langmuir 探針 本実験で行なった

Langmuir 探針の回路は Fig. 3 に見られる通りである。探針はプラズマ流軸線に配置すると瞬時に溶融飛散するためジェットの内外周部に置き、軸線に直角になるように設定する。探針に与える電圧を変化させて電圧電流特性を求めた。

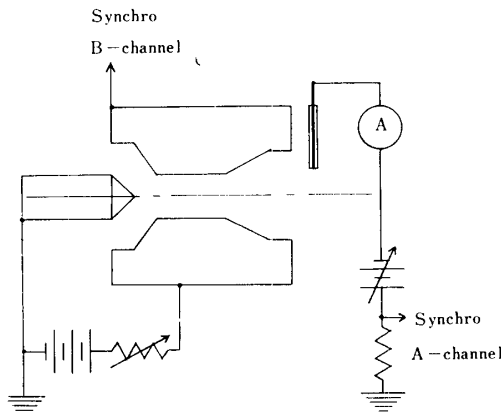


Fig. 3 Single probe measuring circuit.

2.3.3 並列複探針 プラズマ流中には濃淡の波を生じるため探針に流入するその信号を検出し、ブラウン管面上に描かれるトレス像より時間遅れを見いだすことができる。Fig. 4 に示すように距離  $l$  の位置に複探針を配し、探針流入イオン電流に発生するパルスを利用し、これらを 2 現象シンクロスコープに捕え、その時間遅れ  $t$  を見出す。プラズマ流速  $U$  は近似的に  $U=l/t$  で与えられる。

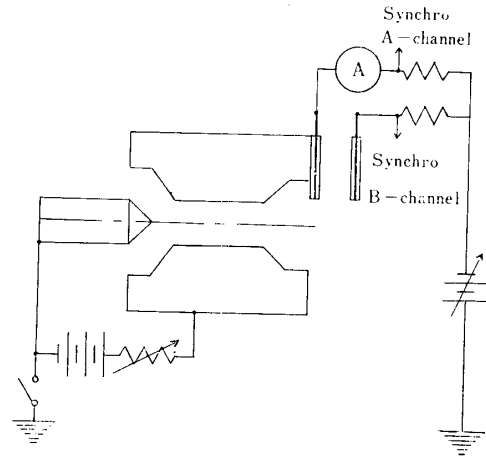


Fig. 4 Velocity probe measuring circuit.

### 3. 実験装置

本実験に使用したプラズマ・ジェット発生器は直流ガス渦流兼軸流集束形で、直径 5 mm の 1.75% トリウム入タンゲステン棒陰極と、ノズル形銅陽極間に発生したアークによって加熱されたプラズマ流がノズルより噴出する。アーク集束とプラズマ形成に用いるガスは、静かなプラズマ流発生のために安定良好なアルゴン（純度 99.99%）を用いた。

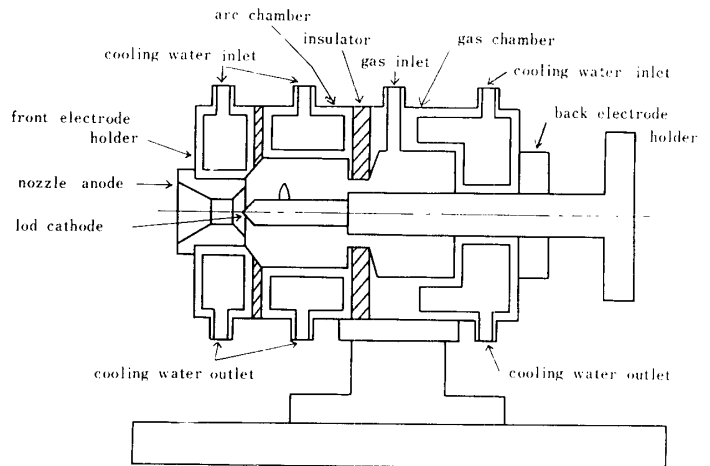


Fig. 5 Sectinal view of plasma jet generator.

Fig. 5 にプラズマ・ジェット発生器を示す。

本プラズマ・ジェット発生器の諸特性については先に発表した<sup>5)</sup>通りであるが、本実験に使用したノズル電極はオリフィス径3 mm, 集束部アスペクト比2.3, ノズル出口テーパ0.8のテーパ形(仮称N-2), オリフィス径5 mm, 集束部アスペクト比1.4, ノズル出口テーパ0.8のテーパ形(仮称N-5), およびオリフィス径5 mm, 集束部アスペクト比1.4のフラット形(仮称N-11)である。各ノズル電極による電圧電流特性をFig. 6 に示す。

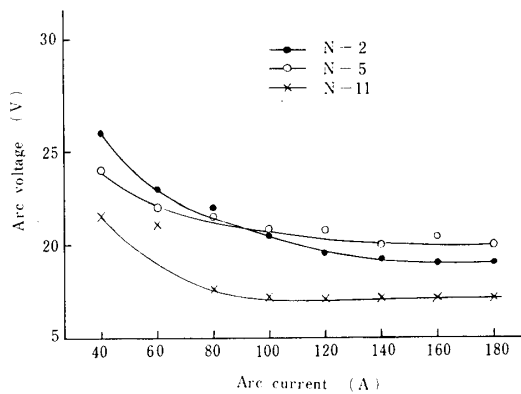


Fig. 6 Characteristics of plasma jet generator electrode gap; 2 mm, gas flow rate; 20 l/min

探針の構造は直径1 mmの純タンゲステン線を外径2 mmの耐熱セラミック管におさめたものである。プラズマ流に対する境界層の影響, シース, 接触電位, 熱電子放射の補正は行っていない。

実験中のプラズマ・ジェットの発生条件について示すと、アルゴンガス流量15~30 l/min, 電極間隙2 mm, アーク電流40~180 A, 電極間電圧 N-2: 19~28 V, N-5: 20~26 V, N-11: 21~26 V, アーク入力 N-2: 0.74~2.16 KW, N-5: 0.9~2.5 KW, N-11: 0.41~2.0 KW, プラズマ・フレーム長8 mm以上, プラズマ・ジェット平均温度 N-2: 3450~7700°K, N-5: 3500~7600°K, N-11: 2500~7800°K である。プラズマ流のエンタルピはアーク電流100 A, 電極間隙2 mm, アルゴンガス流量20 l/minにおいて N-2: 450 Kcal/kg, N-5: 611 Kcal/kg, N-11: 333 Kcal/kg となる。なおノズル電極部冷却水 2~2.5 l/min, ノズル電極出口表面温度180~270°C である。

#### 4. 実験結果と考察

対向複探針を用いて測定したプラズマ流の等価抵抗

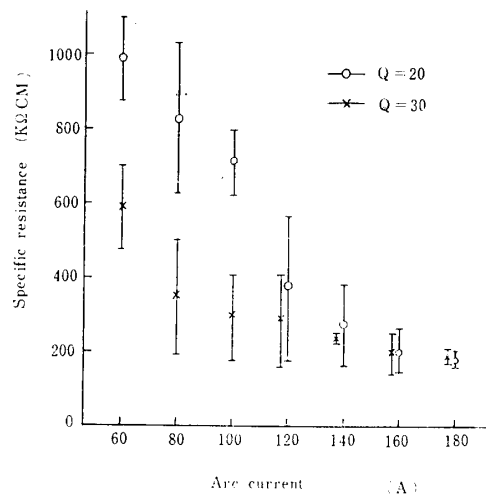


Fig. 7 Specific resistance of plasma jet. Q; gas flow rate l/min

を Fig. 7 に示す。アーク電流を増してプラズマ・ジェット発生器に与える入力を増大させるにつれて導電度が増してゆき次第に飽和してくる。ガス流量が多いほど、すなわち20 l/minより30 l/minの方がアーク電流の低い領域下の抵抗が小であるが、アーク電流12 A以上ではほとんどガス流量による差がなくなる。その抵抗値は温度1400°Kの火炎プラズマの抵抗60~80  $\Omega \cdot \text{CM}$ <sup>6)</sup> と比して約 $10^{-2}$ 倍, カリウムでシードしたアルゴン・プラズマ流の300  $\text{K} \cdot \text{CM}$ <sup>7)</sup> と変らない。



Fig. 8 Probe current wave form of conductivity measurement. N-5, gas flow rate 20 l/min arc current 100 A sweep velocity; 200  $\mu\text{s}/\text{CM}$  gain; 5 V/CM

このような複探針による探針電流波形は、アーク電流100 A 付近で Fig. 8 に見られるように随時不規則なパルスが見られるが、この波高値は探針電流の約10倍パルス幅40  $\mu\text{s}$  である。直流プラズマ・ジェットにはアーク柱のヘアピン形ねじれ, およびノズル電極壁面でのアーク陽極点のスパイラルな運動に基づくアーク電流通路のゆらぎが存在するが、この場合のアーク電圧振動周波数は、アルゴン・プラズマ・ジェットに対

して最高約10KC程度となり、探針電流のパルスがこれに起因するとは考えられない。よってノズル電極の侵蝕、ガス中に含まれる不純物、ノズル集束部に発生するキャビテーションの伝播、ジェット外周部よりの冷空気流の巻き込みなどの影響が考えられるが未だ明確でない。後に述べるように、単探針においても全く同様に不規則なパルスを検出している。いずれの場合も、パルスはアーク電流を増加してゆくにつれて、その波高値が減少し、次第に消滅の傾向を示す。

プラズマ・ジェットの発生条件を一定に保ちながら単探針のバイアスを徐々に変化すると、探針電流はFig. 9のように変化する。探針に与える負電位が大きい場合、飽和イオン電流が与えられ、次いでバイアスを正の方向に増すにつれて電子電流の流入が始まり、探針電位が浮遊電位15Vを超えると急速に探針電流が上昇し、その大きさは飽和イオン電流に比して $10^2 \sim 10^3$ 倍に達する。実験結果より求めた  $\ln j_e$  対  $V_p$  曲線の一例をFig. 10に示す。この曲線部の傾斜より(9)式に適用して電子温度  $T_e$  を求めうる。今、ノズルN-2に対してガス流量16l/min、アーク電流60Aにおいて  $T_e = 6500^\circ\text{K}$ 、N-5に対してガス流量20l/min、アーク電流180Aにおいて  $T_e = 12000^\circ\text{K}$  となる。電子温度は算出された平均温度より高くなるが、これは弱電離プラズマ流内の平衡が保たれていない結果と考えられる。すなわち、電子とアルゴン原子の衝突によるエネルギー授受が十分に行なわれていないことを示している。Fig. 10の各接線の交点より、飽和イオン電流とプラズマ電位が推定できる。(10)式より

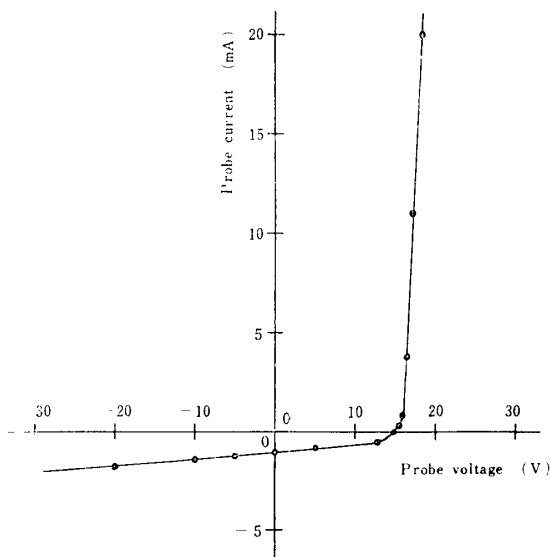


Fig. 9 Single probe characteristics.  
N-11, electrode gap ; 2 mm, gas flow rate 25l/min, arc current 100A

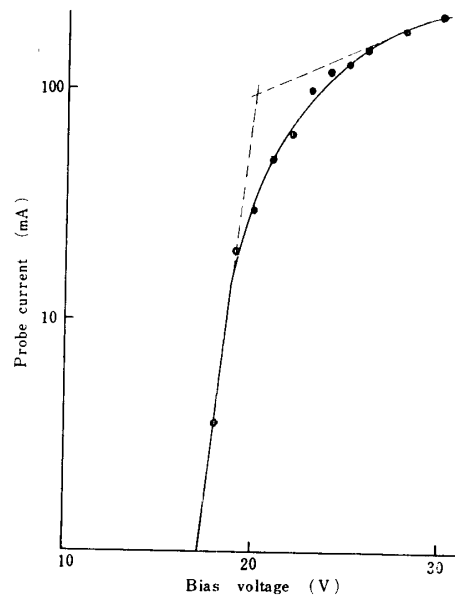


Fig. 10 Single probe characteristics.  
N-2, electrode gap ; 2 mm, gas flow rate ; 16l/min, arc current ; 60A

$$(i_{sat})_{V=0} = en_i A_i U$$

となり、Time-of-Flight法により求めたプラズマ流速  $U$  を用いて、イオン密度  $n_i$  を求められる。アルゴンは負イオンを作らないので  $n_e = n_i$  となる。以上より求められた結果を Table 1 に示す。

単探針における飽和イオン電流は、探針電位を一定のままアーク電流を増加すると次第に上昇するが、大体140A付近から飽和してきて一定値に近づく。バイアスを一定に保ったままガス流量を変化させた場合、例えばノズルN-5、アーク電流100Aにおいてアルゴン流量を15l/minより増してゆくと探針電流は増加するが、24l/min付近では飽和値に達し以後は流量を増してもほとんど影響せず過大な流量になると逆に低下する。探針電流の一定するアルゴン流量24l/minは同時にまたジェットの安定にも最適な流量で熱特性も最も高くなる。

集束ガス流を増加する場合、過大となるとアーク柱の閉ち込めが行なわれずかえってその安定が阻害され、エンタルピーは減少し、ジェットの温度も下がる。この状態ではプラズマ流内の電離度も低下し、探針電流が減少する。

対向複探針の電流波形に不規則なパルスが検出されることは先に述べたが、単探針電流波形についてもほぼ同様な現象を見出しうる。このパルスはアーク集束ガスが比較的低流量の場合に発生し易い。ガス流量が20l/min以上になると探針電流波形に不規則な連続振動が認められる。これはアーク電圧に見られるように

Table. 1 Experimental results from semi-cylindrical probes.

Nozzle number		N—5	N—11	Nozzle number		N—5	N—11
Gas flow rate	l/min	30	25	Enthalpy	kcal/kg	239	497
Arc current	A	60	100	Mean temperature of jet	°K	2210	4350
Arc voltage	V	26.1	26.3	Probe distance	cm	1.0	1.0
Power input	KW	1.56	2.63	Delay time	μs	50	50
Nozzle temperature	°C	165	175	Velocity	cm/s	$2.0 \times 10^4$	$2.0 \times 10^4$
Total loss	KW	0.664	1.085	Ion density	ions/cm <sup>3</sup>	$4.03 \times 10^{14}$	$9.91 \times 10^{14}$
Arc input	KW	0.895	1.545	Probe current	mA	10.3	25

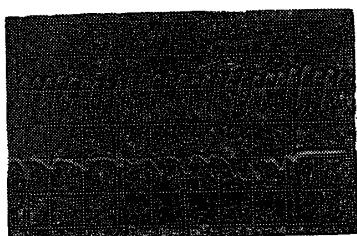


Fig. 11 Probe current &amp; arc voltage wave form of single probe.

N—26, gas flow rate 20l/min, arc current 40A

A channel ; probe current

B channel ; arc voltage

sweep velocity ; 500μs/CM

gain ; A 5 V/CM

B 5 V/CM

規則的でなく、アーク電流の増加に伴ない次第に失なわれる。探針電流波形に生じる振動は探針電位により左右され、探針の電子捕集が大きいほど著しくあらわれる。Fig. 11は単探針電流波形とアーク電圧波形を示すが、この場合探針に与えるバイアスは0であり、探針は主としてイオン電流の捕集を行なっている。

探針電流とアーク電圧またはジェット光度との関係は未だ明確でないが、アーク電流を増すと共にガス流量を適当に低くしぼった場合探針電流の振動は減少し、やがて消滅することが示されている。この動作条件はジェットを安定化し、フレームを伸長するための手段に他ならない。すなわち、プラズマ・フレーム周辺層に対する探針電流の安定は、ジェット自体の安定と強化に負うことになる。

## 5. 結 言

アルゴン・プラズマ・ジェットの周辺部に対する探

針を行なった結果、2000°Cの高温ガス流層に包まれたジェット中心部の導電度は、カリウムをシードしたアルゴン・プラズマ流のそれを上まわる値を示した。

またLangmuir探針により、ジェットの見かけの電子温度、イオン密度を求めた。探針を用いて安定した電圧電流特性を得るためには、プラズマ・ジェット自体の安定が前提であるが、同時に探針の位置とその構造、測定方法に留意しなければならない。しかし、静探針を行なう以上、本実験におけるように、測定点をジェット周辺部に選定することを余儀なくされ、探針をジェット中心部に挿入することは不可能である。したがって、ジェット内の各点におけるデータを求めることはできない。このようなプラズマ・ジェットに対しては、動探針を適用すればよいと考えられる。

今後プラズマ流に対して各種探針測定を行なうためには、探針の高速度掃引を行なわせるとともに、ジェットの雰囲気、圧力および流速の制御が必要である。

終わりにのぞみ、御指導を賜わる九州大学保刈教授、赤崎助教授に謝意を表わすと同時に、種々御協力頂いた本学吉野技官に感謝する次第である。

## 参 考 文 献

- 1) M. D. Watson, H. I. S. Ferguson & R. W. Nicholls "Canadian J. of Phys." 41, 1407 (1963)
- 2) 佐伯節夫：照学誌，50，279 (1966)
- 3) S. Aisenberg："Engineering Aspects of M. H. D." Gordon & Breach, N. Y. (1964) p.89
- 4) W. A. Clayden：AGAR Dograph., 68, 434 (1964)
- 5) 佐伯節夫：照学誌，43，142 (1964)
- 6) 山田直平他：昭38電気四学会連合大会講演論文集〔I〕，109 (1963)
- 7) 阪口忠雄他：昭38電気四学会連合大会講演論文集〔I〕，148 (1963)

(昭和41年10月15日受理)