

# 三相交流プラズマジェットの特徴

佐伯節夫\*・大崎 堅\*

## Characteristics of the Three Phase AC Plasma Jet

Setsuo SAEKI and Katashi ŌSAKI

### Abstract

This report described the general characteristics of the three phase AC plasma jet which was generated by the three electrode type plasma jet generator which had three radial electrodes in the constrictor section of a nozzle.

The measurements of the restriking voltage and the duration time of the arc of each electrode gap at each half cycle indicated that the polarity of arc and the arc operating parameters (arc current, gas flow rate) had a little influence on the restriking characteristics. And also, it was indicated that the arc was always ignited in two electrode gaps according to the phase rotation of the three phase AC power source.

The arc voltage-current characteristics was a drooping characteristics.

The thermal efficiency was range from 68% to 75%.

The plasma jet was stable, for all the arc was restriking at 360Hz, and its length, which was elongated in comparison with that of the single phase AC plasma jet, was range from 17.0mm to 19.9mm at gas flow rate: 20 l/min.

### 1. ま え が き

アーク放電形プラズマ発生器はアーク室中心軸上に保持された棒状電極とこれに対向するノズル形電極を有し、電極間に点弧したアークに冷却ガス流を吹きつけて熱ピンチを与え、プラズマジェットを形成させる方式をとっている。この形式の発生器によって直流アークを拘束する場合はノズル電極側が陽極となる正極性接続が一般に用いられており、安定度のよいプラズマジェットがえられる。このようなプラズマジェットの基本量<sup>1)</sup>、ジェットのゆらぎ<sup>2)</sup>、さらにノズル内のアーク現象<sup>3)</sup>などについては多くの報告がなされている。一方、発生器の電源として商用周波単相交流を用いると、電源の極性反転に伴うアークの消弧、再点弧のため、プラズマジェットは間歇的に噴射され、そのゆらぎも大きい。交流ジェットの安定度を増し、その性能を向上させるためには半サイクルごとの再点弧を円滑に行わせることが必要である。このため商用周波交流に高周波を重畳して再点弧を円滑にする方式<sup>4)~6)</sup>、交差電極形ノズルを用いてアークの再点弧条件を改善

する方式<sup>7),8)</sup>などが試みられている。また多相交流電源<sup>9),10)</sup>を用いて位相差のあるアークを発生させ、持続したプラズマジェットを得る方法も発表されている。

本報告で述べる発生器は、三相交流を3本の棒電極間に印加し、中性点に接続するセンタ電極を省略した構造である。すなわちノズルの集束部側面から軸線に垂直に、絶縁管に収めた3本の放射状電極を挿入し、これらに商用周波三相交流を印加すると相回転に応じて常時2相間にアークが点弧し、このアークに直交するガス流によって高温プラズマジェットがノズルから噴出する。以下では、このような三電極式三相交流プラズマジェットの特性について述べる。

### 2. 実験装置

#### 2.1 三電極式三相交流プラズマジェット発生器

本発生器は Fig.1 に示すようにノズル集束部側面から軸線に垂直に挿入した3本の放射状電極を有し、各電極間に点弧したアークを各電極周辺よりのシースガス流及びノズル後部よりの軸方向ガス流によって集束安定化する方式をとっており、相回転に応じて正極性及び負極性ジェットが同時にノズルから噴射される。なお、中性点に接続するセンタ電極を除去し、アーク

\* 電気工学科

の回転を容易にした。

電極はともに直径 3mm の 2%トリウム入りタングステン棒を使用し、その円板状先端部がノズル出口から 8mm 内部で、軸線から 1.5mm 径方向に離れた点に位置するように放射状に配置した。なお各電極は内径 4mm のセラミック絶縁管に収められており、各電極にシースガス流を流す。

放射状電極が挿入されるノズルは黄銅製で、集束部直径 5mm、集束部長 5mm である。

電極とノズル間の絶縁は耐熱セラミックによって行った。各電極及びノズルに対してそれぞれ 1.5l/min、2.5l/min の冷却水を供給して冷却し、熱損傷を防止すると共に各部熱損失を求めた。

作動ガスは純度 99.99% のアルゴンを流入圧力 4kg/cm<sup>2</sup> で、シースガス流と軸方向ガス流（センタガス流）に分割して供給し、両者の配分比を変化した。

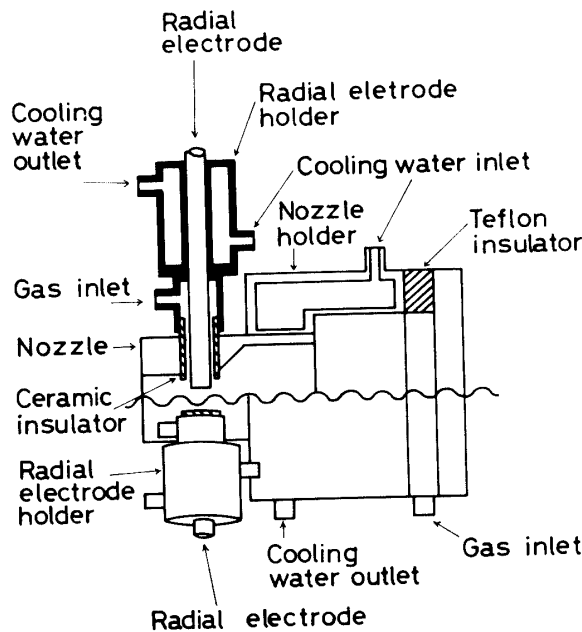


Fig.1 Sectional view of the three electrode type three phase AC plasma jet generator.

### 2.2 実験回路

実験回路を Fig.2 に示す。三相交流プラズマジェット発生用電源は三相 60Hz、容量 30KVA、無負荷電圧 158V であり、各相に挿入した安定用直列無誘導抵抗 (0.64~12.7 Ω) によって垂下特性を与えている。

アーク電圧測定は各電極間に挿入した熱電形計器、アーク電流測定は各相に挿入した可動鉄片形計器を使用して、実効値を求めた。またこの値はシンクロスコープにトレースされたアーク電圧・電流波形の解析結果と比較すると 4%以内に収まる。

各電極間で点弧、消弧を繰り返す三相交流アーク放

電のモードを求めるために、Fig.2 示すように各電極間アーク電圧、各相アーク電流をそれぞれ 3 台の計器用変圧器及び 3 台の変流器を用いてアーク放電回路より絶縁の上、2 台の 4 現象シンクロスコープ上に記録する。またノズル出口より 2mm 離れた軸線上における三相交流プラズマジェットからの放射光を検出器 (SGD-100 シリコンフォトダイオード) に導き、その出力をアーク電圧及び電流と共にシンクロスコープ上に記録し、アークモードとジェットパワーの変化を求めた。なお計器用変圧器及び変流器における入力信号と出力信号との間の位相差及び歪率を調べた結果、本実験においては無視しうることを確認した。

実験中の電極ギャップ長は 2mm に保持し、ガス流量 17~30l/min をセンタガス流として 0~15l/min、シースガス流として 12~21 l/min に分割して流し、アーク電流 40~100 A を供給した。

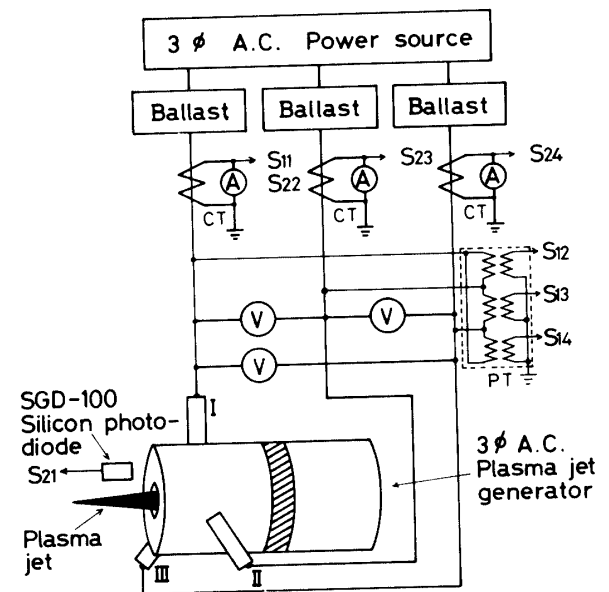


Fig.2 Experimental circuit.

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 再点弧特性

三相交流プラズマジェットのアークモードは Fig.3 に示すように各電極間においては単相交流プラズマジェットのアークモードと同様に半サイクル毎の再点弧モードとなり、消弧から再点弧に至る時間は放電が停止するため電流休止期間となる。しかし三相交流プラズマジェットにおけるアークは電源の相回転に応じて点弧し、常時 2 相間にアークが点弧しているため、巨視的には電流休止期間はないものと見なされる。なお本論文では Fig.2 に示す放射状電極 I II 間に点弧する

アークについて、電極Ⅱに対して電極Ⅰが正電位となる半サイクルにおける正極性アークの点弧を正点弧、電極Ⅰ側が負電位となる負極性アークの点弧を負点弧と定義し、他の電極ⅡⅢ間及びⅢⅠ間に点弧するアークについても同様に定義する。

Fig.4 は Fig.3 に示したアークモードより1サイクル中における各電極間の正極性アーク持続時間、電流休止期間、負極性アーク持続時間及びそれぞれの極性アークに対応して陰極として動作する電極を模倣的に表わした図である。電源の相回転に応じてアークの消弧、再点弧が1/360秒ごとに起こり、陰極または陽極としての責務を果たす電極は順次変わる。すなわち陰極は、電極ⅠⅡ間の正点弧時を基準にすると電極Ⅱ→電極Ⅱ及びⅢ→電極Ⅲ→電極Ⅲ及びⅠ→電極Ⅰ→電極Ⅰ及びⅡへと移行し、これに対応して陽極も移行しており、相回転に応じてアークの移行が円滑に行われていることがわかる。

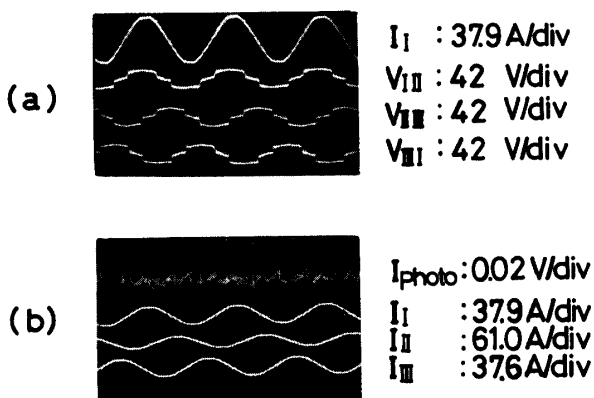


Fig.3 Oscillograms of arc behavior in three phase AC operation.

Arc current: 86A, Gas flow rate: 20l/min (Sheath gas flow rate:15l/min, Center gas flow rate:5l/min), Sweep velocity: 5msec/div,  $I_1, I_2, I_3$ : Arc current,  $V_{12}, V_{23}, V_{31}$ : Arc voltage,  $I_{photo}$ : Light intensity

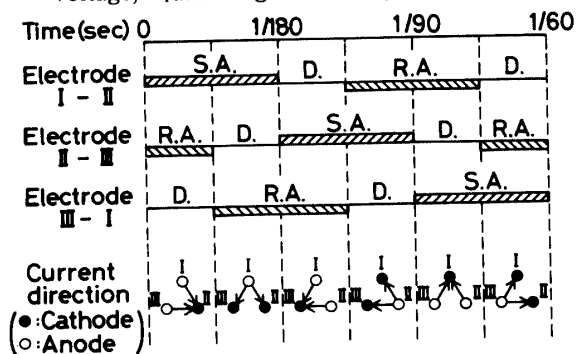


Fig.4 Diagram of the arc mode and the current direction.

S.A.: Straight polarity arc, R.A.: Reverse polarity arc, D.: Dead interval of arc current

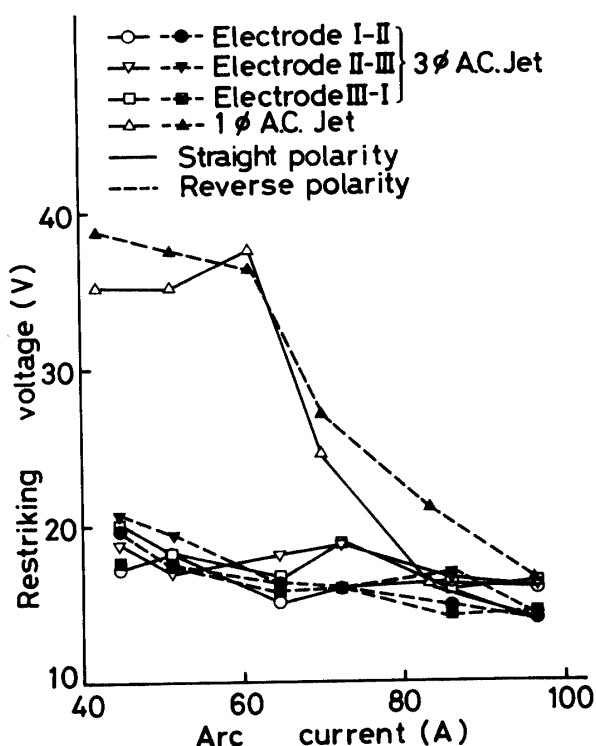


Fig.5 Restriking voltage vs. arc current. Gas flow rate: 3φ A.C. Jet; 20l/min (Sheath gas flow rate: 15l/min, Center gas flow rate: 5l/min), 1φ A.C. Jet; 20l/min

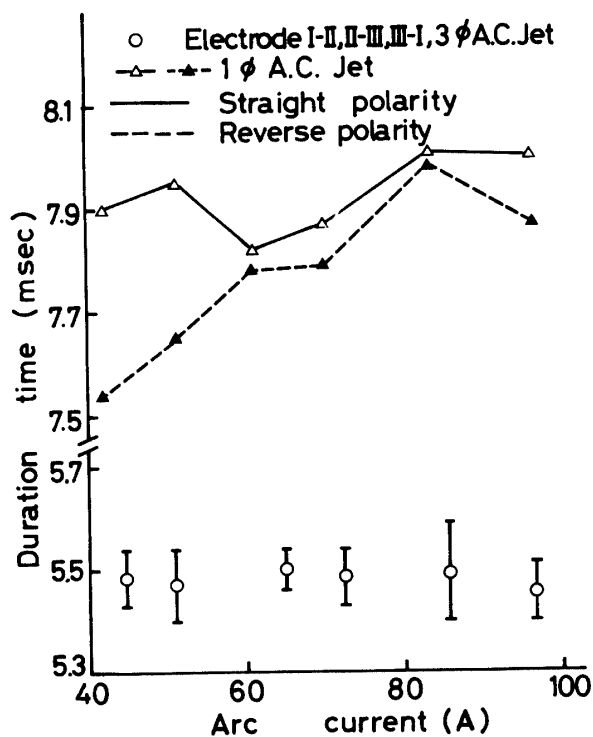


Fig.6 Duration time of arc of a half cycle. Gas flow rate: 3φ A.C. Jet; 20l/min (Sheath gas flow rate: 15l/min, Center gas flow rate: 5l/min), 1φ A.C. Jet; 20l/min

Fig.5, Fig.6はガス流量 20l/min (シースガス流 15l/min, センタガス流 5l/min) における各電極間の再点弧特性を示している。三相交流プラズマジェットにおける各電極間アークの再点弧電圧及び半サイクル中のアーク持続時間はそれぞれ 20.7~14.0V, 5.40~5.58msecの範囲内に収まり、電流の増加により再点弧電圧はわずかに低下するが、アーク持続時間はほぼ一定である。再点弧電圧の差は各電極間では 2.7V 以下、正負極性では 2.4V 以下となり、アーク持続時間も同じく 0.11msec 以下, 0.18msec 以下となる。このように再点弧電圧, アーク持続時間に幅が生じる理由は、アーク点弧時の電極点形成位置及び放電空間の状態が各電極間, 正負極性アークによって相違するためと考えられる。

一方単相交流プラズマジェットにおける再点弧特性は電流による影響が大で、再点弧電圧は電流 60A 以上になると急激に低下し、80A 付近より三相交流プラズマジェットのそれとほぼ同等となるが、60A 以下では三相交流プラズマジェットの約 1.8 倍の電圧となる。またアーク持続時間も電流による影響が大で、とくに負極性アークに対する影響が強い。

以上のように三相交流プラズマジェットにおいては、常時 2 相間にアークが点弧しているため、各相アークの再点弧電圧及び半サイクル中のアーク持続時間は電流, ガス流量による影響は著しく軽微であり、また正負極性アークによるそれらの差も小さいゆえ、アークはほぼ 3 相平衡に点弧しているものとみなしうる。

### 3.2 電気的特性

アーク電圧対電流の関係は Fig.7 のように垂下特性を示し、電圧垂下率は電流 70A を境界として異なり、70A 以下で 0.18V/A で単相交流プラズマジェットの約 2 倍となり、70A 以上で 0.03V/A に低下する。またアーク電圧は同一動作条件下で単相交流プラズマジェットの電圧と比較すると 15~21% 低い。これはガス流によるアーク柱の集束効果の相違によるものと考えられる。

ガス流量を増加すると垂下特性を保持したままでアーク電圧のみ上昇し、電圧上昇率は 0.16~0.34V/l である。Fig.8 は電流 64A (一定) とし、センタガス流及びシースガス流を変化した場合のアーク電圧に与える影響を示している。ガス流量の増加と共にいずれも直線的に上昇し、電圧上昇率はセンタガス流増加に対しては 0.24V/l, シースガス流増加に対しては、0.16V/l と前者の約 2/3 に低下する。これよりアーク柱に対して直交するガス流がアーク電圧に与える影響が大

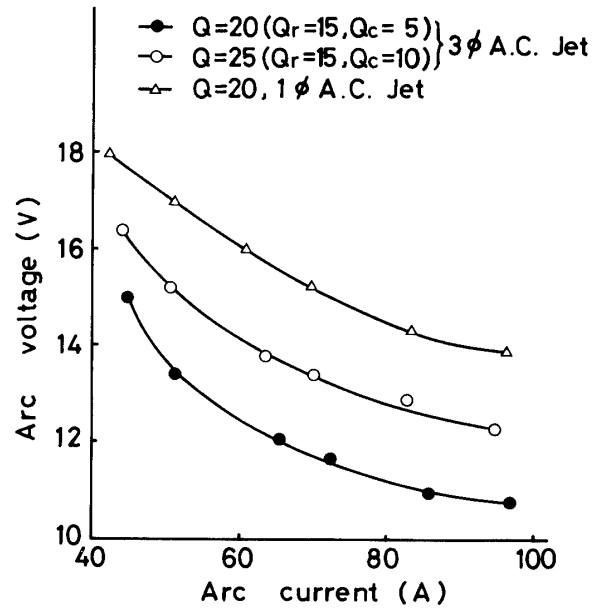


Fig.7 Arc voltage vs. arc current.  
 Q: Gas flow rate (l/min),  
 Q<sub>r</sub>: Sheath gas flow rate (l/min),  
 Q<sub>c</sub>: Center gas flow rate (l/min)

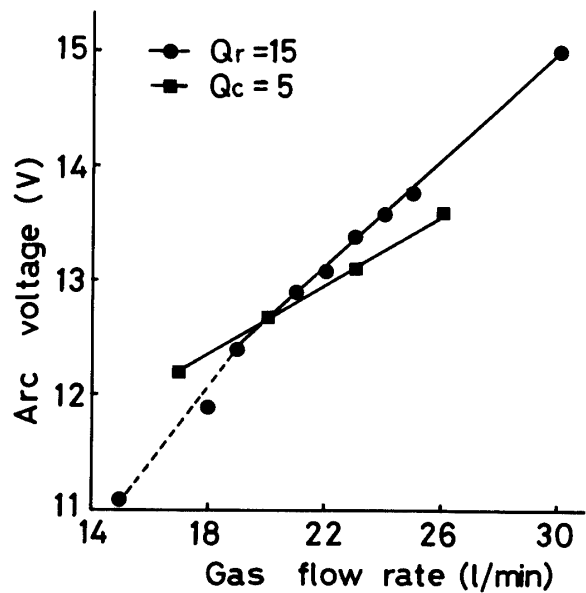


Fig8 Arc Voltage vs. gas flow rate.  
 Arc current: 64A,  
 Q<sub>r</sub>: Sheath gas flow rate (l/min),  
 Q<sub>c</sub>: Center gas flow rate (l/min)

であることがわかる。

### 3.3 エネルギー収支

放射状電極部及びノズル部における熱損失はFig.9に示すように、いずれも電流の増加と共に直線的に上

昇する。ノズル部熱損失は電流の増加と共に著しく大となり、電流 45A では 157W であるが、電流 97A

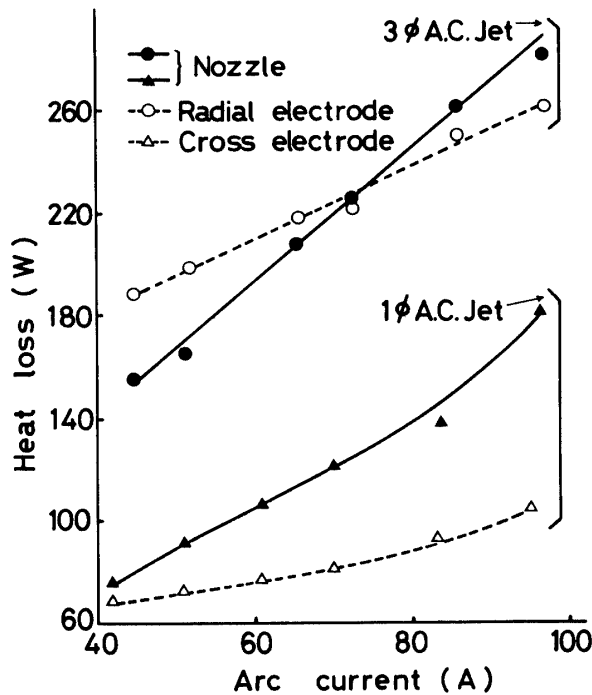


Fig.9 Heat loss vs. arc current.  
Gas flow rate: 3φ A.C. Jet; 20l/min (Sheath gas flow rate: 15l/min, Center gas flow rate: 5l/min), 1φ A.C. Jet; 20l/min

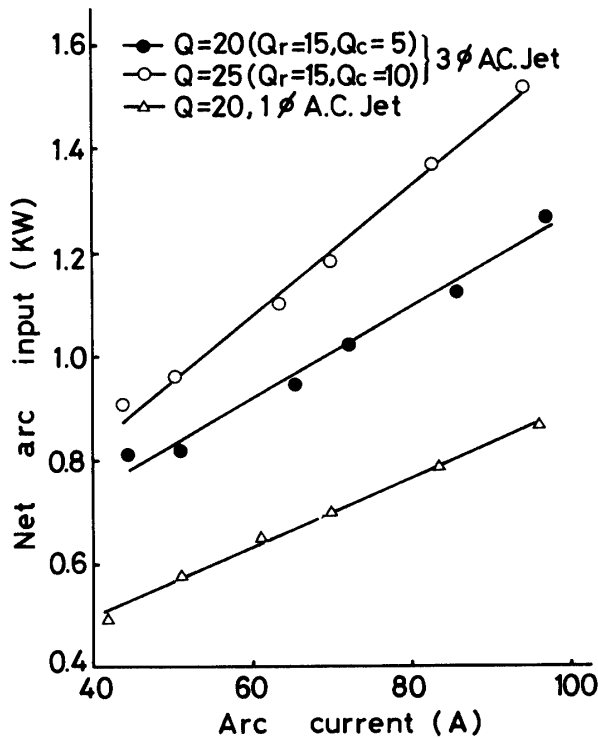


Fig.10 Net arc input vs. arc current.  
Q: Gas flow rate (l/min),  
Q<sub>r</sub>: Sheath gas flow rate (l/min),  
Q<sub>c</sub>: Center gas flow rate (l/min)

では 279W に上昇する。一方放射状電極部熱損失は電流 75A 以下ではノズル部熱損失より最大 30W 大であるが、75A を越えるとノズル部熱損失より逆に最大 20W 小となる。

同一動作条件下で発生器各部の熱損失を三相交流プラズマジェット発生器と単相交流プラズマジェット発生器について比較すると、ノズル部熱損失及び電極部熱損失ともに常時 2 相間にアークが点弧している三相交流プラズマジェット発生器の方がそれぞれ 77~110W, 80~100W 大となる。しかし三相交流プラズマジェット発生器の放射状電極 1 本当りの熱損失は単相交流プラズマジェット発生器の交差電極部熱損失より 5~20W 小である。

ガス流量を増加すると発生器各部の熱損失は減少するが、シーガス流を 12l/min から 21l/min に増すと、放射状電極部熱損失のみ約 31W 減少する。一方センタガス流を 0 から 15l/min に増すと放射状電極部熱損失は約 11W, ノズル部熱損失は約 35W 減少し、ノズル部に対する影響はセンタガス流が大である。

Fig.10はアーク入力から各部熱損失を差し引いて求められる正味アーク入力と電流の関係を示す。電流の増加と共にほぼ直線的に上昇し、ガス流量を増加すると前述のごとく発生器各部の熱損失が低下すると共に Fig.7 に示すようにアーク電圧も上昇するため正味アーク入力は増大する。特にセンタガス流の影響が大で、5l/min の増加に対して正味アーク入力は 14~30W 増大する。三相交流プラズマジェットの正味アーク入力は Fig.10 に示すように単相交流プラズマジェットのそれよりは 40~50% 大となる。

本発生器の熱効率は 68~75% で単相交流プラズマジェット発生器の熱効率とほぼ同等であるが、ジェット平均温度は正味アーク入力の大きい三相交流プラズマジェットが高く、2,300~4,400K である。

### 3.4 三相交流プラズマジェット

三相交流プラズマジェットは Fig.11 に示すような形状となり、1/360 秒毎の再点弧を含むが常時 2 相間にアークが点弧しているためジェット形状は直流ジェットと同様安定に持続される。Fig.12 に写真測定より求めたジェット長と電流、ガス流量の関係を示す。ジェット長は電流を増加すると伸長し、電流 50A の増加に対するジェット伸長量は 2.0~2.3mm である。一方ジェット径は電流、ガス流量に関係なく 4.5mm 一定である。同一電流値に対してジェット長を単相交流プラズマジェットと三相交流プラズマジェットについて比較すると正味アーク入力の大きい三相交流プラ

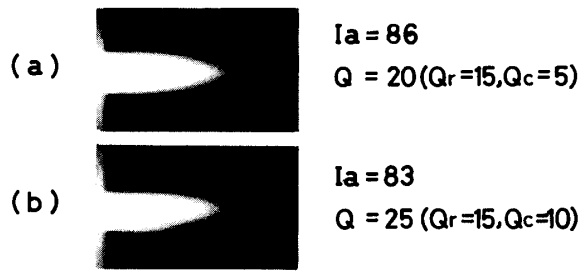


Fig.11 Photographs of the three phase AC plasma jet.

$I_a$ : Arc current (A),  $Q$ : Gas flow rate (l/min),  
 $Q_r$ : Sheath gas flow rate (l/min),  $Q_c$ : Center gas flow rate (l/min)

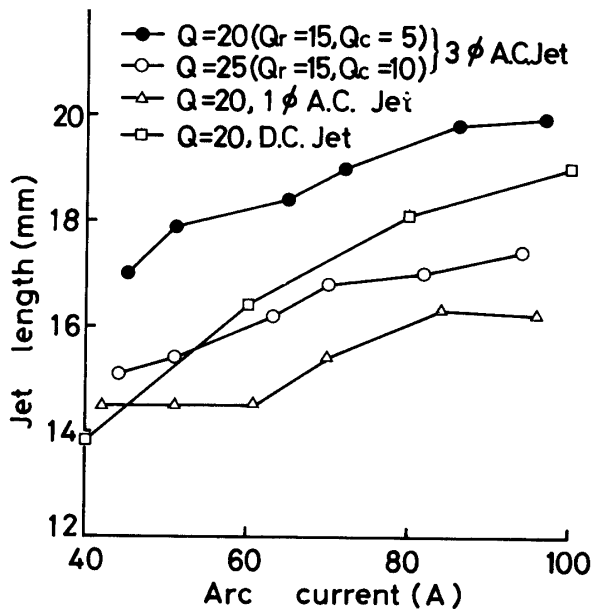


Fig.12 Jet length vs. arc current.

$Q$ : Gas flow rate (l/min),  
 $Q_r$ : Sheath gas flow rate (l/min),  
 $Q_c$ : Center gasflow rate (l/min)

ズマジェットが伸びが 2.5~3.8mm 大である。また直流プラズマジェットよりも 1.1~2.5mm 伸びが大である。

ガス流量すなわちセンタガス流あるいはシースガス

流を増加すると正味アーク入力が増すが、安定動作範囲をはずれるとジェットは短縮する。本実験範囲内ではシースガス流 15l/min, センタガス流 5l/min の場合がジェット伸長状態も良好で、電流 95A でジェット長は 19.9mm の最大長となり、電極損傷もほとんど認められなかった。

ジェットからの放射光には Fig.3 に示すようにアークの点弧に同期した 360Hz の振動と、点弧後のアークの動揺に基づく高周波振動が現われる。しかし放射光強度の変動幅は単相交流プラズマジェットのそれに比して小である。これは常時 2 相間にアークが点弧していることとアーク入力瞬間値の変動幅が小さいためと考えられる。

#### 4. むすび

以上述べたように、放射状電極配置を有する三電極式三相交流プラズマジェット発生器を用いると、各相アーク間の移行が円滑に行なわれるため、発生ジェットの安定度及び熱出力が著しく向上することが明らかとなった。

本研究に協力いただいた本学山中麗子氏、大学院高橋広志氏に感謝する。

#### 参 考 文 献

- 1) 例えば H.N. Olsen: Phys. Fluid, 2, 614 (1959)
- 2) 例えば E. Pfender & C.J. Cremers: AIAA J., 3, 1345 (1965)
- 3) 例えば 佐伯節夫: 応用物理, 45, 845 (1976)
- 4) J.L. Murgratroyd: Meas. Conf., 7, 77 (1974)
- 5) J.E. Harry: IEEE Trans., IGA-6, 36 (1970)
- 6) W.K. Roots & M.A. Kadhim: IEEE Trans., IM-18, 150 (1959)
- 7) 佐伯節夫・大崎堅: 応用物理, 45, 747 (1976)
- 8) 佐伯節夫・大崎堅・豊田英二: 山口大学工学部研究報告, 30, 55 (1979)
- 9) D.E. Geister: AIAA Paper, 69-348, 6 (1969)
- 10) I.D. Tredup: Technik, 25, 270 (1970)

(昭和 54 年 10 月 15 日 受理)