

ガス流の作用下にある三相回転アークとジェットのおるまい

佐伯 節夫*・大崎 堅*・山中 麗子*

Behavior of the Three Phase Rotating Arc and the Plasma Jet
under the Action of the Gas Flow

Setsuo SAEKI, Katashi ŌSAKI and Reiko YAMANAKA

Abstract

Dynamic behavior of the three phase rotating arc which was ignited between three radial electrodes in the nozzle cross section and the plasma jet was studied by the high speed photography.

Using the taper type nozzle (AN52-nozzle) having the taper in the constrictor entrance region and the no-taper type nozzle (AN50-nozzle), experiments were made at the arc current 20~73 A, the total gas flow rate 10~20 l/min and the three kinds of gas flow pattern which were the cross flow pattern, vortex flow pattern and mixed flow pattern mixed the cross flow with vortex flow.

The arc igniting condition and its rotating aspect were different in the nozzle configuration and the gas flow pattern. In the cross gas flow pattern, when the arc current was small, the arc was straightly maintained between the electrodes, but increasing the arc current, it was bended toward the nozzle center axis. On the other hand, in the vortex and the mixed flow pattern, the arc was became hair-pin configuration near the electrode situated the downstream and it was always maintained near the nozzle center axis irrespective of the arc operating parameter (arc current, gas flow rate). The distance (r) between the arc and the nozzle center axis in the nozzle cross section was 1.05~1.75 mm for the cross flow pattern but r of AN52-nozzle and AN50-nozzle was 0.4~1.2 mm, 0.6~1.6 mm respectively for the mixed gas flow pattern.

The plasma jet, which was generated by providing the mixed gas flow pattern of which mixed ratio Q (cross gas flow rate)/ Q (cross gas flow rate+vortex gas flow rate) was 0.5 to AN52-nozzle, had so small fluctuation range in the radial and the axial direction that it was stable and its length was longest.

1. まえがき

アーク放電(直流または商用周波交流)にガス流を吹きつけてアークを拘束安定化し、熱ピンチ効果を利用するアークプラズマ発生器またはアーク加熱器は、50,000度以下の低温弱電離プラズマ流を長時間安定して供給しうするため、現在多くの工業分野^{1)~8)}に利用されている。

アークプラズマ発生器の電源として三相交流を用いると、アークの再点弧による不安定性を改善でき、安定で多量のプラズマが得られる。現在報告されている三相交流プラズマジェット発生器は、ノズル電極と棒電極を組合せた四電極式^{9),10)}とノズル断面内に3本

の放射状電極を配置した三電極式¹¹⁾がある。特に三電極式三相交流プラズマジェット発生器を用いると、三相回転に応じて円滑にアークが回転するとともに、常時二相間にアークが維持されノズル断面内に一様に拡がりながら回転するため、発生ジェットの軸対称性が良く、ゆらぎも小である。また、アークの集束と伸長量は電気入力とアークに直交するガス流によって制御できるため、工業応用に際しては極めて有効なプラズマ発生装置となる。

本研究では、三電極式三相交流プラズマジェット発生器のノズル構造とガス流入方式についてノズル断面内の三相回転アーク及び発生ジェットの巨視的ふるまいを高速度撮影によって求め、三相回転アークの動的特性及びジェットの特徴を明らかにした。

* 電気工学科

2. 実験方法と装置

Fig. 1 に示す三電極式三相交流プラズマジェット発生器のノズル断面内に放射状に配置した3本の棒電極間に点弧したアークは Fig. 2 のような形状となる。すなわち、各電極間アークはその側面から作用するガス流によって Fig. 2 (b) に示すようにノズル出口側に向って集束伸長されるため、ノズル後部よりこのアークを観測すると同図 (a) のようにノズル軸線方向にわん曲した形状となる。このように器壁及びガス流によってノズル断面内に集束安定化した三相回転アークのふるまいを直視するために、ガス流入室後部断面に観測窓を設置し、高速度撮影及びスチル撮影を行った。また、プラズマジェットに対しても側面から同様の写真測定を行った。

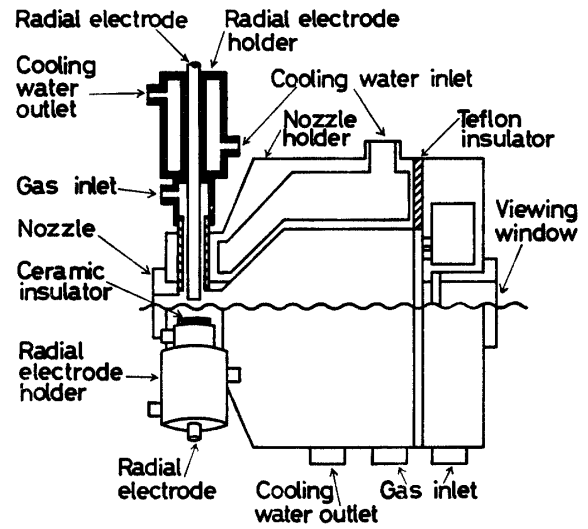


Fig. 1 Sectional view of the three electrode type three phase AC plasma jet generator.

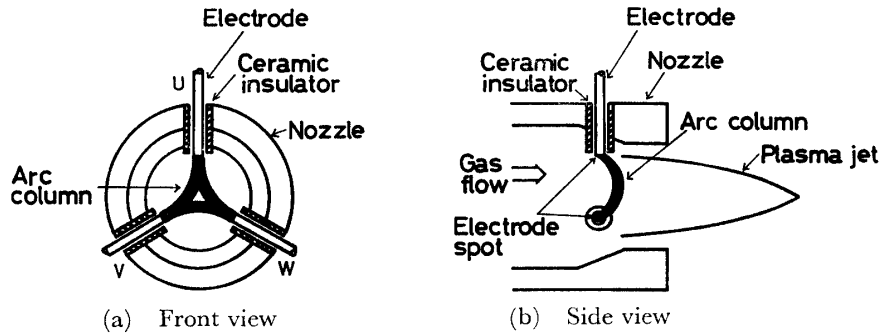


Fig. 2 Configuration of the three phase AC arc in nozzle.

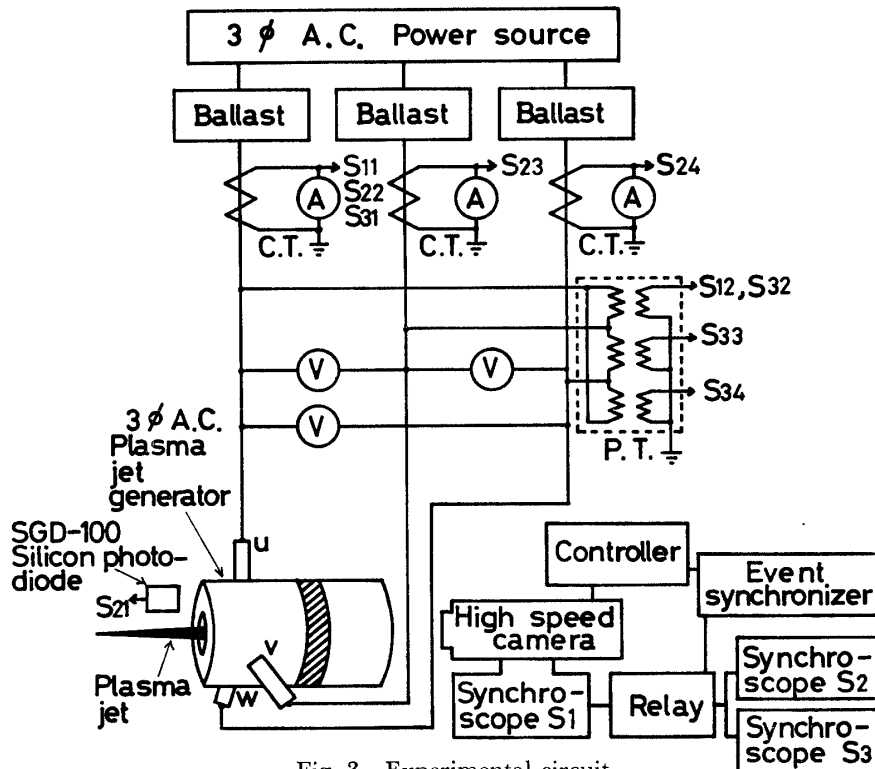


Fig. 3 Experimental circuit.

Fig. 3 は測定回路を示す。シンクロスコープ S_1 には電極 $u-v$ 間のアーク電圧波形及び u 相の線電流波形を描せ、リレーレンズを通して高速度撮影像と並べて流し撮りを行う。この場合フィルム流し速度が波形の時間軸となる。また同時にシンクロスコープ S_2 には各線電流波形及び放射光強度波形、シンクロスコープ S_3 には u 相の線電流波形及び各電極間アーク電圧波形を記録する。高速度フィルム上に流し撮りされた信号波形とシンクロスコープ S_2, S_3 上の記録と比較することにより、アークの時間的、空間的ゆらぎと放電諸量瞬時値との関係が求められる。高速度撮影は撮影速度 8,000 P. P. S. で行った。

三相回転アーク発生回路、アーク電圧及び電流、放射光強度、アークモードなどの測定方法は前報¹¹⁾と同様である。以下、ノズル構造と三相回転アークプラズマ発生器の概要について述べる。

2.1 ノズル

ノズル断面内に点弧したアークは、その側面から作用するガス流による気体力学的抗力とアーク電流及び自己誘導磁界に基づく電磁力とが平衡するようにふるまうため、Fig. 2 (b) に示すようにノズル出口側に向ってアークが吹き流されてわん曲する。また、このように吹き流されたアークの伸長量は T. K. Bose 氏¹²⁾によって示された Blowing パラメータを求めて算出する。すなわち、アークに働く電磁力と気体力学的抗力の平衡式⁶⁾は (1) 式で、Blowing パラメータは (2) 式で与えられる。

$$C_D r_0 \rho v^2 dl = (3\mu_0 I_a^2 / 16\pi R) \{1 - 7r_0^2 / 18R^2\} dl \quad (1)$$

ただし C_D : 抗力係数, r_0 : アーク柱半径 (m),
 ρ : ガス密度 (kg/m^3), v : ガス流速 (m/sec), dl : アーク長 (m), μ_0 : 透磁率 (H/m), I_a : アーク電流 (A), R : わん曲アークの曲率半径 (m)

$$B \equiv en_e U_w \delta / I^* \quad (2)$$

ただし $I^* = 4 I_a / \pi D_0$
 e : 電子の電荷 ($1.6 \times 10^{-19} \text{C}$), n_e : 電子密度 (m^{-3}), U_w : 特性速度 (m/sec), δ : アーク柱半径 (m), D_0 : アーク平均長 (m)

本発生器によって得られるプラズマジェットの熱出力及び安定度を向上するためには、(1), (2) 式を満足するようにふるまう各相アークをノズル壁及びガス流によってノズル先端部の中心軸上に向って拘束安定化しなければならない。

使用したノズルは、放射状電極を配置する位置すなわちノズル集束部入口にテーパ 0.67, テーパ部長 3 mm の先細状のテーパを有する AN 52 ノズルとテーパ無しの AN 50 ノズルである。なおノズルはいずれも内径 5 mm の黄銅性である。

2.2 三相回転アークプラズマ発生器と動作条件

実験に使用した三相回転アークによるプラズマ発生器は、中性点に接続するセンタ電極を除去しアークの回転を容易にした三電極式三相交流プラズマジェット発生器である。本発生器は Fig. 1 に示すような構造を有し、電極は内径 4 mm のセラミック管に収められた直径 3 mm の 2%トリウム入りタングステン棒である。また、各電極間に点弧したアークは各電極周辺からのシースガス流及びノズル後部よりのセンタガス流によって集束安定化する方式をとっている。センタガス流はアークに交差する交差ガス流とアークに沿って流れ、アークをシース状に包囲する渦流として供給する形式で、両者の配分比を任意に調整できる。アーク観測窓はガス流入室後部断面に直径 10 mm の円形スリットを設け、石英ガラスで密封して構成する。

電極はその円筒状先端部がノズル出口から 6~8 mm 内部で、軸線から 1.65 mm 径方向に離れた点に位置するように放射状に配置した。

電極とノズルとの絶縁は耐熱セラミックによって行い、各電極部には 1.5~2 l/min, ノズル部には 2.5~4 l/min の冷却水を供給して冷却し、熱損傷を防止するとともに各部熱損失を求めた。

作動ガスは純度 99.99% のアルゴンで、流入圧力 4 kg/cm² とし、シースガス流とセンタガス流に分けて供給した。

動作条件は電極ギャップ長 2 mm, アーク電流 20~73 A, ガス流量 (Q) 10~20 l/min (センタガス流 (Q_c) 4~14 l/min とシースガス流 (Q_s) 6 l/min) である。なお、センタガス流は交差ガス流 (Q_{cc}), 過流 (Q_{cv}) 及び両者の配分比 (M) を任意に調整した混成流 (Q_{cm}) の 3 形式で供給した。ここで M は Q_c に対する Q_{cc} の割合とする。

3. 実験結果と考察

3.1 プラズマ発生器の一般特性

3.1.1 電氣的特性

アーク電圧対電流の関係は Fig. 4 のように垂下特性を示し、電流 40 A を境いとして垂下率は異なる。電流 40 A 以下における電圧垂下率は、AN 52 ノズル

では 0.28~0.21 V/A の範囲内にあり、 Q_{cc} , Q_{cm} , Q_{cv} の順に小となるが、AN 50 ノズルではガス流入方式によらず 0.23 V/A 一定となる。電流 40 A 以上ではノズル構造、ガス流入方式に依存せずほぼ 0.08 V/A である。またアーク電圧は Q_{cc} , Q_{cm} , Q_{cv} の順に低下し、 Q_{cc} と Q_{cv} との差は最大 4.8 V であるが、AN 52 ノズルと AN 50 ノズルとの差は 2 V 以下と小である。

Q_c を増加するとアーク電圧はほぼ直線的に上昇し、電圧上昇率は AN 52 ノズルと AN 50 ノズルに対し Q_{cc} ではそれぞれ 0.40 V/l, 0.48 V/l であり、 Q_{cv} ではそれぞれ 0.27V/l, 0.29V/l と Q_{cc} のその約 3/4~3/5 に低下する。

Q_{cm} において M が大となるとアーク電圧は上昇し、AN 50 ノズルでは M が 0.5 以上、AN 52 ノズルでは同じく 0.79 以上になると急激に電圧が上昇する。

以上のように電圧垂下率及びアーク電圧がノズル構造とガス流入方式により相違するのは、ノズル断面内に点弧したアークの形状が後述するように異なるとともに、アークの集束度に基づくアークの物理的な基礎量の違いによるものと考えられる。

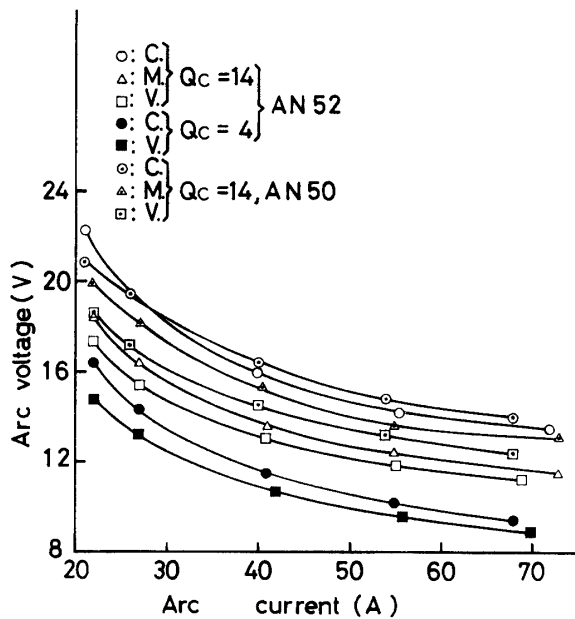


Fig. 4 Arc voltage vs. arc current.

C.: Cross flow, M.: Mixed flow (Mixed ratio: 0.5)
V.: Vortex flow, Q_c : Center gas flow rate (l/min),
AN52, AN50: Nozzle number, Stheath gas flow rate: 6 l/min.

3.1.2 再点弧特性

三相回転アークモードは Fig. 5 に示すように各電極間においては単相交流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間は放電が停止するため電流休止期間となる。三相回転アークでは一相間の電流休止期間は 2.57~2.78 msec であるが、アークは電源の相回転に応じて点弧し、巨視的には常にノズル断面内にアークが存在しているものとみなしうる。なお本論文では Fig. 3 に示す電極 $u-v$ 間に点弧するアークについて、電極 u に対して電極 v が正電位となる半サイクルにおけるアークの点弧を正点弧、電極 v 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 $v-w$ 間及び $w-u$ 間に点弧するアークについても同様に定義する。

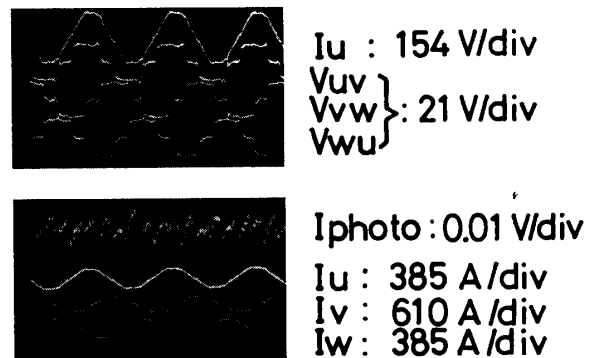


Fig. 5 Oscillograms of arc behavior in three phase AC operation.

Arc current: 73 A, Mixed gas flow rate: 14 l/min (Mixed ratio: 0.5), Stheath gas flow rate: 6 l/min, Sweep velocity: 5 msec/div, I_u, I_v, I_w : Line current, V_{uv}, V_{vw}, V_{wu} : Arc voltage, I_{photo} : Light intensity.

三相回転アークにおける各電極間の再点弧電圧の差及び半サイクル中のアーク持続時間の差はそれぞれ 4 V 以下、0.3 msec 以下であるゆえ、アークはデルタ形の三相平衡負荷とみなしうる。Fig. 6 はノズル構造及び動作条件が再点弧電圧に与よぼす影響を示している。再点弧電圧は 34~9.9 V の範囲内に収まり、電流の増加によりそれは低下する。ガス流入方式の違いによる再点弧電圧の差は 16 V 以下となり、 Q_{cc} での再点弧電圧が最も高い。一方ノズル構造及び正負極性アークによる再点弧電圧の差はそれぞれ 8 V 以下、6 V 以下と小である。また再点弧電圧は Q_c の増加とともに上昇し、その上昇率は Q_{cc} で 0.73 V/l, Q_{cv} で 0.35 V/l となり、 Q_{cc} でのそれが最大となる。

Q_{cm} において再点弧電圧対 M の関係はアーク電圧対 M の関係と同様な特徴を有し、再点弧電圧が急激に上昇する M は AN 50 ノズル、AN 52 ノズルに対しそれぞれ 0.5, 0.79 である。

このようにガス流入方式、ノズル構造、正負極性

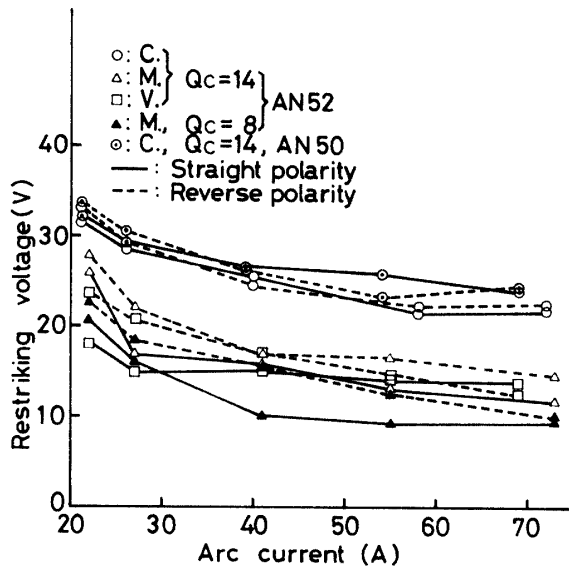


Fig. 6 Restriking voltage vs. arc current.

C.: Cross flow, M.: Mixed flow (Mixed ratio: 0.5), V.: Vortex flow, Q_c : Center gas flow rate (l/min), AN52, AN50: Nozzle number, Sheath gas flow rate: 6 l/min.

アークにより再点弧電圧に幅が生じるのは後述するようにアーク点弧時の電極点形成位置及びアークの形状、放電空間におけるプラズマ粒子の特徴の違いによるものと考えられる。

3.1.3 エネルギー収支

放射状電極部及びノズル部熱損失は Fig. 7 に示すように電流の増加とともにいずれも直線的に上昇する。放射状電極部熱損失は電流を 20 A から約 70 A に増すと、AN 52 ノズルでは 160 W から 290 W に、AN 50 ノズルでは 190 から 340 W に増大し、前者の熱損失が後者のそれより 30~50 W 小となる。またガス流入方式及びガス流量が放射状電極部熱損失に与える影響は軽微である。一方、ノズル部熱損失は電流の増加とともに著しく上昇し、ノズル部熱損失の増加の割合は AN 52 ノズルでは 6.2~4.6 W/A, AN 50 ノズルでは 6.5~5.6 W/A となり、AN 52 ノズルにおけるほぼ増加の割合が小であるとともにノズル部熱損失も失が 70 W 小である。なお両ノズルとも Q_{cc} での熱損その最大となる。

アークに投入される電気入力から放射状電極部熱損失及びノズル部熱損失を差し引いて求められる正味アーク入力は、Fig. 7 に示すように 406~1670 W の範囲内にあり、電流の増加とともに増大する。 Q_c が増すと正味アーク入力も増加し、 Q_c を 10 l/min 増加すると 140 W 以上増大する。またアーク電圧の高い

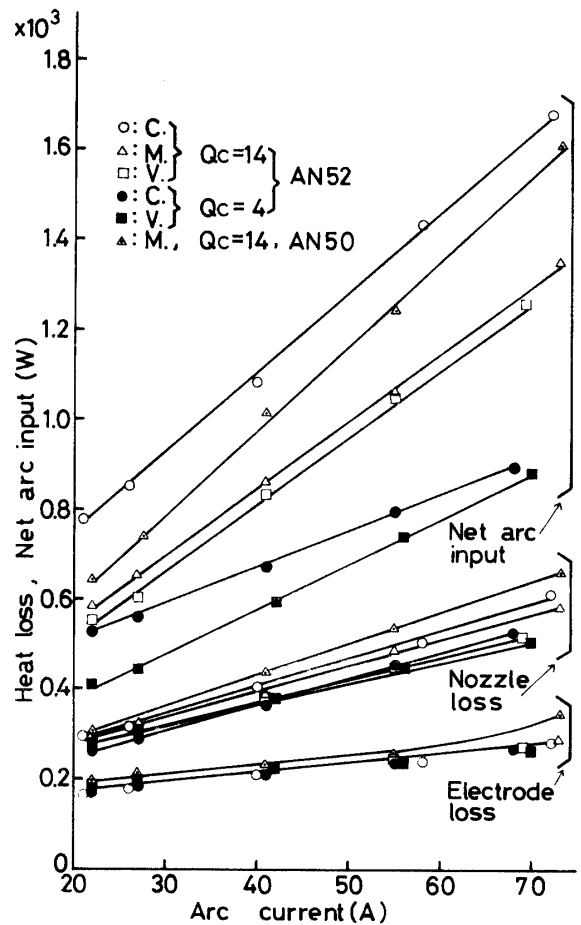


Fig. 7 Heat loss and arc input vs. arc current.

C.: Cross flow, M.: Mixed flow (Mixed ratio: 0.5), V.: Vortex flow, Q_c : Center gas flow rate (l/min), AN52, AN50: Nozzle number, Sheath gas flow rate: 6 l/min.

Q_{cc} での正味アーク入力が大となる。

本発生器の熱効率は41~61%と概ね良好である。プラズマジェットの平均温度は 2,040~6,070 K であり、正味アーク入力の大きい Q_{cc} でのそれが最高である。

3.2 三相回転アークの形状とふるまい

ノズル断面内に点弧した三相回転アークのステンル撮影像を Fig. 8 に示す。アークは各電極間に平衡して点弧しており、デルタ形の三相平衡負荷とみなしうる。アークの形状はガス流入方式によって異なる。

Q_{cc} においては、低電流領域では Fig. 8 (a) に示すようにアークは細く、電極間に直紙状に点弧しているが、高電流領域では同図 (b) のようにアークは膨脹するとともにノズル軸線方向に向かってわん曲した状態で点弧している。このようにアーク柱のわん曲が観測されるのは、電流が増加するとアーク入力の増大に伴

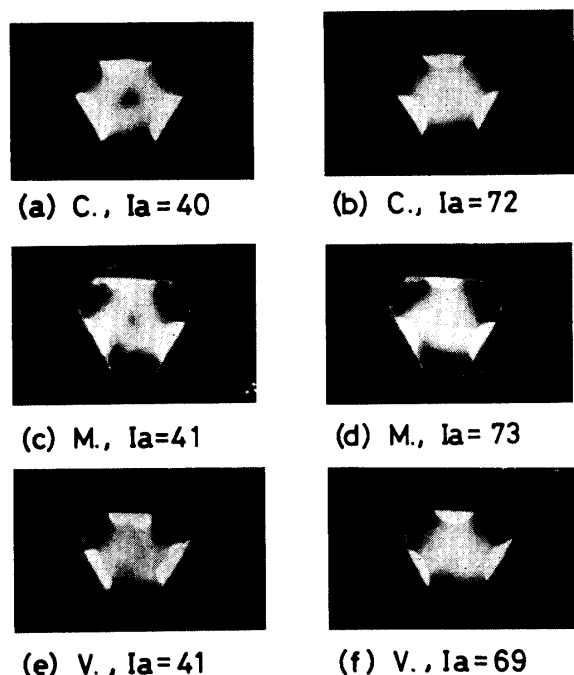


Fig. 8 Photographs of the three phase AC arc in nozzle cross section.

Nozzle number: AN52, Center gas flow rate: 14 l/min, Sheath gas flow rate: 6 l/min, C.: Cross flow, M.: Mixed flow (Mixed ratio: 0.5), V.: Vortex flow, I_a : Arc current (A).

うノズル内圧力の上昇及びアークに交差するガス流によってアークがノズル先端部の中心軸上に向かって集束されながら吹き流されたものと考えられる。 Q_{cr} を増すとノズル出口方向の圧力が大となり、電流を増加してもアークはノズル軸線に向かってわん曲せず、ノズル中心部に空洞を生じる。ノズル中心部に空洞を生じない電流と Q_{cr} の範囲は AN 52 ノズルではそれぞれ 42 A 以上、14 l/min 以下であるが、AN 50 ノズルでは同じくそれぞれ 57 A 以上、8 l/min 以下となる。これより Q_{cr} では入口テーパを有するノズルを用いるとアークを効果的に拘束安定化できる動作条件が拡がることになる。

一方 Q_{cv} でのアーク形状は Fig. 8 (e), (f) に示すようにガス流の下流側に位置する電極近傍でヘアピン形状を呈する。また Q_{cr} ではノズル軸線近傍の圧力は低いゆえ、アークはノズル中心部に集められ、電流及びガス流量に関係なくノズル中心部に空洞を生じない。

さらに Q_{cm} でのアーク形状は同図 (c), (d) のように Q_{cv} の場合と同様電極近傍でヘアピン形状を呈し、その形状を保ったままノズル中心部に集められている。しかし M が 0.5 以上、電流 40 A 以下になると Q_{cr} の

場合と同様にノズル中心部に空洞が生じる。

Fig. 9 に三相回転アークの高速度撮影像を示す。アークは相回転に応じて回転し、各電極間で点弧→発達→衰退→消弧を繰り返していることがわかる。再点弧時のアークの状態は電極の極性によって異なり、その様相を Fig. 10 に模擬的に示している。また Fig. 11, Fig. 12 は AN 52 ノズルに対し電流 72 A, $Q_c=14$ l/min を与えた場合のアークの時間的変化を示しており、Fig. 11 はノズル軸線からアーク柱の存在する位置までの径方向距離 (r), Fig. 12 はアーク柱直径の時間的変化である。以下では電極 u を基準極とした場合について述べる。

Q_{cr} において電極 $u-v$ 間の正点弧直後では、アークは $r=1.75$ mm の位置に直線状に形成され、アーク入力が増大に伴ってノズル軸線に向かってわん曲を開始し、電極 $u-v$ 間と $v-w$ 間のアーク入力がほぼ等しくなる時点では $r=1.55$ mm, 電極 $v-w$ 間の負極性アークが消弧し $w-u$ 間の負点弧が起こる直前で $r=1.05$ mm となり、アークはノズル軸線に最も近づく。次に電極 $w-u$ 間の負極性アークは、陽極 w とその直下に存在する $u-v$ 間のアークとの間に点弧し、点弧後約 750 μ sec 経過した時点で $r=1.15$ mm の位置に直線状アークとなり、以後アークは前述と同様な過程を呈す

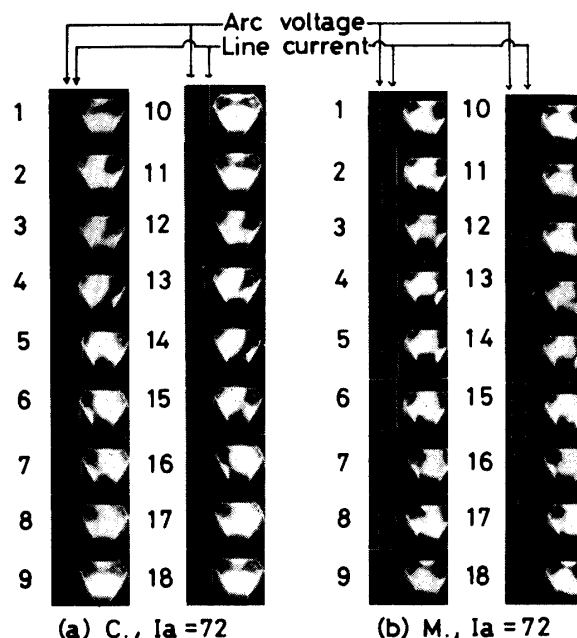


Fig. 9 Frames from high speed movies of the three phase AC arc in nozzle cross section.

Nozzle number: AN52, Center gas flow rate: 14 l/min, Sheath gas flow rate: 6 l/min, C.: Cross flow, M. Mixed flow (Mixed ratio: 0.5). Framing rate: 8,000 P.P.S..

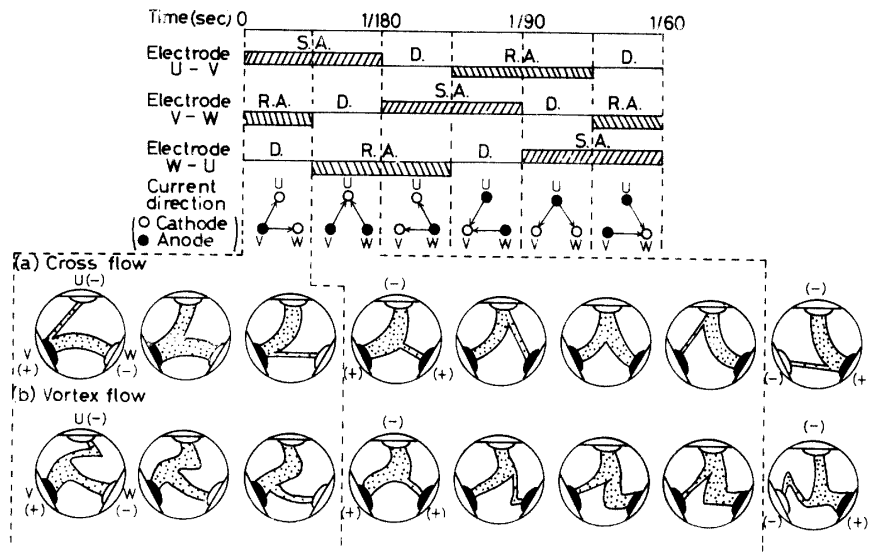


Fig. 10 Sketches of arc rotation between three electrodes.

る。

Q_{cr} での点弧の様相を Fig. 10 (b) に示す。正点弧は陰極 u の表面上のガス流下流側に位置する点と陽極 v との間で起こる。一方負点弧は陽極 w とその直下に存在する電極 $u-v$ 間の正極性アークとの開で起こり、陽極点はガス流によってただちに陽極 w の表面上をガス流下流側に移動する。正極性アークともガス流下流側に位置する電極近傍でヘアピン形状を呈している。またアークは点弧直後 $r=0.7\text{ mm}$ の位置に形成されるが、アーク入力が増大するとヘアピン形状を保ったまま $r=0.95\text{ mm}$ に位置し、 Q_{rc} の場合に比べて位置の変動幅は小である。

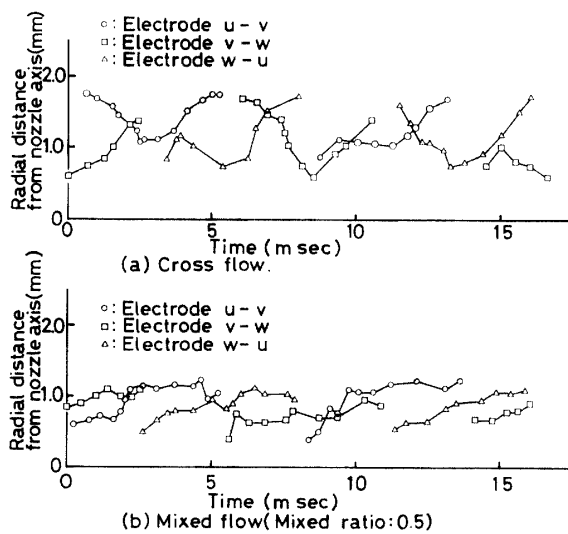


Fig. 11 Profiles of arc rotation in nozzle cross section. Nozzle number: AN52, Arc current: 72 A, Center gas flow rate: 14 l/min, Sheath gas flow rate: 6 l/min.

Q_{cr} ($M=0.5$) においてアークの形状と拡がりは、 Q_{rc} の場合と同様であるが、アークの位置は Fig. 11 (b) に示すように点弧直後では $r=0.4\sim 0.7\text{ mm}$ 、アーク入力が増大した時点では $r=0.75\sim 1.2\text{ mm}$ である。

AN 50 ノズルでのアークの形状と拡がりも AN 52 ノズルのそれらと同様であるが、アークが維持される位置は Q_{cr} ($M=0.5$)、電流 72 A では $r=0.5\sim 1.6\text{ mm}$ と AN 52 ノズルのそれより大となる。

以上のようにガス流入方式、ノズル構造によりノズ

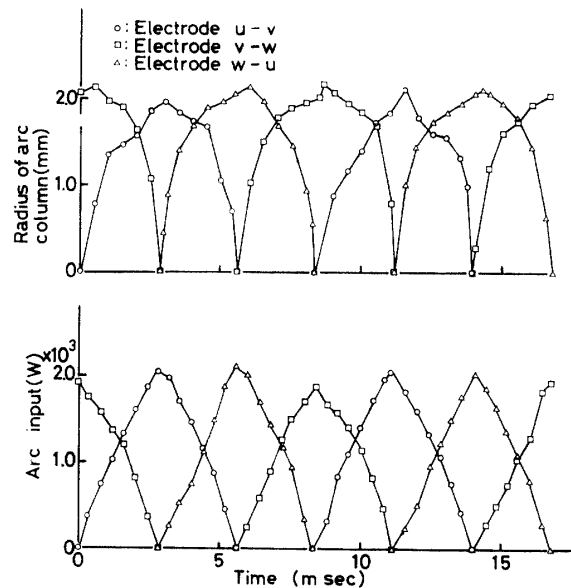


Fig. 12 Profiles of radius of arc column and arc input of the three phase AC arc.

Nozzle number: AN52, Arc current: 72 A, Mixed gas flow rate: 14 l/min (Mixed ratio: 0.5), Sheath gas flow rate: 6 l/min.

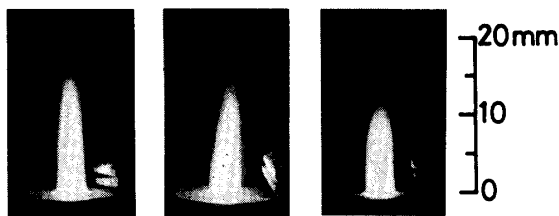
ル断面内に点弧したアークの形状と拡がり著しく異なっているため、3.1で述べた諸特性に相違が生じたものと考えられる。

アーク柱直径の時間的变化は Fig. 12 に示すように、アーク入力時間の変化とほぼ同様に推移し、アーク入力が最大を示した後約 500 μ sec 遅れてアーク柱直径が最大となる。アーク柱の最大直径は電極 $v-w$ 間で正点弧後約 3.1 msec 経過したアークによって与えられ、2.19 mm である。また、ノズル内には常にいずれかの二電極間に直径 1.6 mm 以上のアークが存在しており、効果的なアーク加熱が行われている。

3.3 プラズマジェットのおふるまい

Fig. 13 に示すように三相回転アークによって得られるプラズマジェットは、三相回転に応じて正極性及び負極性ジェットを同時に含むがその形状は直流ジェット同様安定に持続されている。Fig. 14 はノズル構造と動作条件がジェットに与える影響を示している。

Q_{cc} 及び Q_{cv} においては電流の増加にほぼ比例してジェットは伸長するが、 Q_{cm} ($M=0.5$) では電流 27 A 以上においてジェットの急激な伸長が見られる。21 A から 70 A への電流増加に対するジェット伸長量を比較すると Q_{cc} で 2.8~4.2 mm, Q_{cm} ($M=0.5$) で 4.9~6.7 mm, Q_{cv} で 3.2~5.8 mm となり、 Q_{cm} のジェット伸長量及びジェット長とも最大となる。また AN 52 ノズルのジェット長が AN 50 ノズルのそれより最大 3 mm 大となる。ガス流量を減少すると、ジェットの流動状態を表わすレイノルズ数は低下して 940~380 と層流領域¹³⁾に近づくため、ジェットは伸長し、最大のジェット長は AN 52 ノズルに $Q_{cm}=8$ l/min ($M=0.5$)、電流 73 A を与えた場合に得られ 24 mm である。なおこの場合のレイノルズ数は 790 である。



(a)C., Ia=72 (b)M., Ia=73 (c)V., Ia=69

Fig. 13 Photographs of the three phase AC plasma jet.

Nozzle number: AN52, Center gas flow rate: 14 l/min, Stheath gas flow rate: 6 r/min, C.: Cross flow, M.: Mixed flow (Mixed ratio: 0.5), V.: Vortex flow.

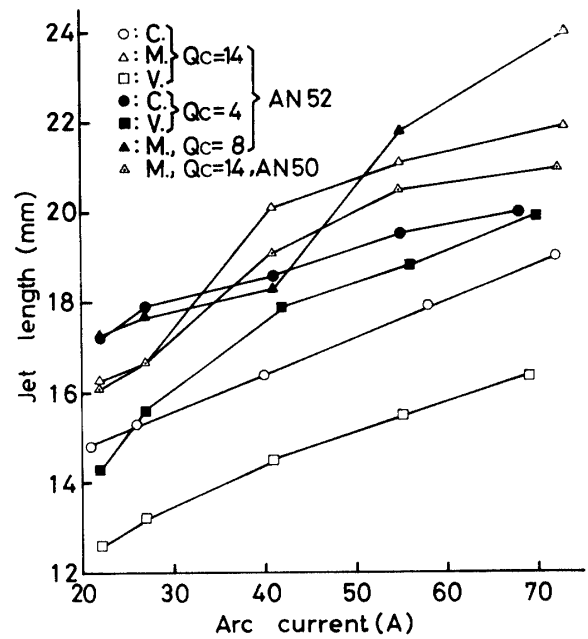


Fig. 14 Jet length vs. arc current.

C.: Cross flow, M.: Mixed flow (Mixed ratio: 0.5), V.: Vortex flow, Q_c : Center gas flow rate (l/min), AN52, AN50: Nozzle number, Stheath gas flow rate: 6 l/min.

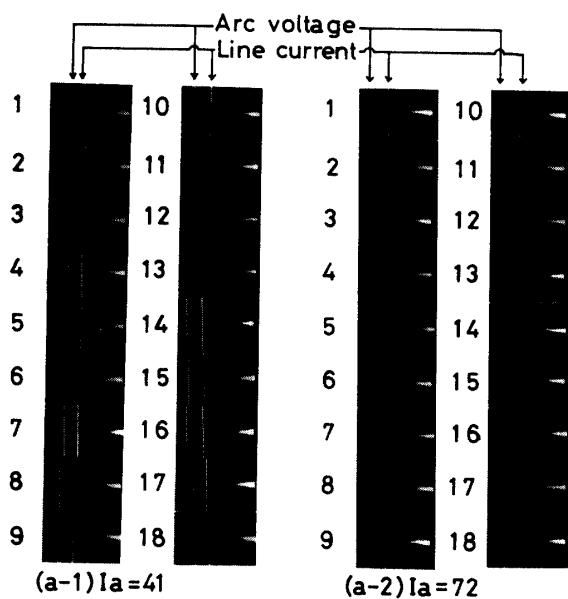
ノズル出口から 2 mm の位置でのジェット直径は、ノズル構造、ガス流入方式及び動作条件に関係なくほぼ 4 mm 一定であるが、5 mm の位置でのジェット直径は電流、 Q_c の増加とともに大となり、 Q_{cv} の場合最大 3.4 mm に達する。 Q_{cc} のジェット直径は Q_{cv} のそれより小であり、またジェット長は Q_{cc} の場合大であるゆえ、 Q_{cc} によるジェットは先鋭である。

ジェットからの放射光には Fig. 5 に示すように、アークの点弧に同期した 360 Hz 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。

Fig. 15 (a) に三相交流ジェットの高速撮影像を示す。このような一連の撮影像によりジェットの時間的、空間的ゆらぎを求め、同図 (b) のように区分表示すると Table 1 を得る。

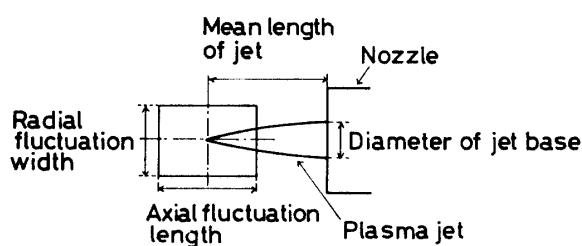
ジェットは、ノズル構造及びガス流入方式の違いによりその形状やおふるまいを異にする。ここでは主として AN 52 ノズルに対し $Q_c=14$ l/min を与えた場合の Q_{cc} 、 Q_{cv} 及び Q_{cm} ($M=0.5$) でのジェットの特徴を比較して述べる。

電流を 41 A から約 70 A に増加すると各ガス流入方式ともジェットは伸長するとともにジェット直径、伸縮ゆらぎ幅及び偏向ゆらぎ幅とも減少し、電流を増加するとジェットは安定になることがわかる。一例を示すと Q_{cm} において電流 31 A の増大に対しジェッ



Note; Nozzle: AN52, Mixed gas flow rate: 14 l/min (Mixed ratio: 0.5), I_a : Arc current (A), Sheath gas flow rate 6 l/min, Framing rate: 8,000 P.P.S..

(a)



(b)

Fig. 15 (a) Frames from high speed movies of the three phase AC plasma jet, (b) Classification of fluctuation range.

トは 2.21 mm 伸長し, ジェット径は 0.32 mm, 伸縮ゆらぎ幅は 0.22 mm, 偏向ゆらぎ幅は 0.04 mm 減少する.

電流約 70 A で各ガス流入方式におけるゆらぎを比較すると, 伸縮ゆらぎ幅は Q_{cr} で 8.37 mm と最大となり, Q_{cm} で 6.71 mm と最小になる. また偏向ゆらぎ幅は 2.00~2.12 mm の範囲内に収まり, 各ガス流入方式による差は 0.12 mm 以下と小である. これより安定度の優れたジェットは, ガス流入方式を Q_{cm} とすることによって得られることがわかる.

AN 52 ノズルと AN 50 ノズルの伸縮及び偏向ゆらぎ幅を比較すると, AN 52 ノズルではそれぞれ 6.71 mm, 2.11 mm と AN 50 ノズルのそれらの 82%, 79%以下となり, AN 52 ノズルによるジェットのゆらぎが小であることがわかる. またジェット長も AN 52 ノズルの場合が約 1 mm 長い.

ジェット長の時間的变化は二相間のアークに投入される電気入力を加え合わせた入力変化とほぼ同様に推移し, ジェットは AN 52 ノズル, $Q_{cm}=14$ l/min ($M=0.5$) において電流 41 A で 8 mm 以上, 72 A で 11 mm 以上の長さを持続している.

以上より, ノズル断面内に点弧した三相回転アークをノズル入口テーパ及び混成流(混合比: 0.5)で拘束安定化すると, 安定度の良い三相交流ジェットが発生することがわかる.

4. むすび

三電極式三相交流プラズマジェット発生器のノズル断面内に点弧した三相回転アーク及び発生ジェットのふるまいを高速度撮影によって解析した. その結果, 各相アークの点弧と転移状態が明らかになり, 三相回転アークの基礎的特性が求められた. また三相交流

Table 1 Fluctuation of the three phase AC plasma jet.

Nozzle number	Gas flow pattern	Center gas flow rate (l/min)	Arc Current (A)	Jet mean Length (mm)	Jet mean diameter of basis (mm)	Fluctuation	
						Axial range (mm)	Radial range (mm)
AN 52	Gross flow	14	41	11.63	4.14	10.30	2.03
		4	73	13.45	3.78	8.37	2.00
	Vortex flow	14	41	11.42	4.13	7.25	2.29
		70	12.44	4.04	7.18	2.12	
Mixed flow (M=0.5)	14	41	11.78	4.17	6.93	2.15	
	72	13.99	3.85	6.71	2.11		
AN 50	Mixed flow (M=0.5)	14	69	12.91	4.17	8.17	2.67

Note; M: Mixed ratio, Sheath gas flow rate: 6 l/min.

ジェットの軸方向及び径方向のゆらぎ量とその特徴が確認できた。

ノズル断面内に点弧した三相回転アークによって得られるジェットの安定度と熱出力を向上するには、ノズル出口側に向って集束伸長された各相アークをノズル壁及びガス流によってノズル軸線上に集めさせればよい。

本研究に協力いただいた大学院崎山智司氏，昭和55年度特別研究及び卒業研究学生諸氏に感謝する。

参 考 文 献

- 1) J.A. Browing: *Weld. J.*, **38**, 870 (1959)
- 2) D.L. O'Brien, R.J. Wickham & W.P. Keame: *Weld.*

- J., **42**, 107 (1963)
 - 3) N.N. Rykalin & V.V. Kudinov: *Pure. Appl. Chem.*, **48**, 229 (1976)
 - 4) I.G. Sayce: *Pure. Appl. Chem.*, **48**, 215 (1976)
 - 5) T.C. Wang & S.J. Dudzinsky: *AIAA J.*, **5**, 2059 (1967)
 - 6) S.A. Wutzke, E. Pfender & E.R.G. Eckert: *AIAA J.*, **6**, 1474 (1968)
 - 7) K. Kuroda: *AIAA/DGLR*, [**78-715**], 1 (1978)
 - 8) R.J. Richard & L.B. Willam: *ARS J.*, **31**, 1 (1961)
 - 9) I.D. Tredup: *Technik*, **25**, 270 (1970)
 - 10) 逸見文彦，山岡唯男，加藤洋明：電学誌，**86**, 395 (1966)
 - 11) 佐伯節夫，大崎堅：山口大学工学部研究報告，**30**, 93 (1980)
 - 12) T.K. Bose: *AIAA J.*, **10**, 4 (1972)
 - 13) F. Incropera & G. Leppert: *AIAA J.*, **4**, 1087 (1966)
- (昭和56年4月15日 受理)