

ノズルアークの集束効果について

佐伯節夫*・大崎 堅*

On the Constriction Effect of a Nozzle Arc

Setsuo SAEKI and Katashi ŌSAKI

Abstract

The constriction effect of the arc in the cross electrode type nozzle was investigated in nine kinds of nozzle, which were able to vary stepwise the nozzle diameter between 6mm and 30mm.

Experiments were made at the arc current to be from 17A to 31A for DC arc and 40A to 100A for AC arc in Argon gas flow rate to be from 8l/min to 20l/min.

The arc voltage-current characteristics for all nozzles was a drooping characteristics.

With decreasing in the nozzle diameter below 14mm and increasing in the gas flow rate, the wall compression effect became efficient and the arc column was always held on the nozzle center axis.

The relative spectral line intensity of the nozzle arc of the nozzle diameter to be 6mm was about two times of that of the nozzle diameter to be 14mm.

1. まえがき

一般にプラズマジェット発生器は、ガス流とノズル壁によってアークをノズル軸線上に拘束し、熱ピンチ効果により圧縮されたアーク柱の軸方向に発生する圧力とアーク加熱による作動ガスの膨張を利用してプラズマジェットをノズルから噴射する方式をとっている。それゆえ、発生ジェットの温度¹⁾、流速²⁾などの基本量や、その安定度³⁾などの重要な特性はアークの集束状態に依存している。このようにノズル内に閉じ込められたアークの温度、導電率、電界強度や、アーク柱及び電極点のふるまいについては円筒形ノズル⁴⁾、平行平板形陽極⁵⁾、カスケードノズル⁶⁾を用いて解析が行われている。

さらにノズル内のアークに絶縁集束形ノズル⁷⁾を用いて陽極点をノズル出口に拘束しアークを強制伸長する方式や、集束リング形ノズル⁸⁾によりノズルアークの一部に局所圧縮を加える方式などアーク特性の改善を計りうる事が発表されている。

本研究では、ノズル径を段階的に増減できる可変断面ノズルを用いて、ノズルアークに対する圧縮効果を変化し、器壁及びガス流がアーク特性に与える影響を調べたので以下に報告する。なお、本報告では主に動

* 電気工学科

的特性を有する交流アークについて述べる。

2. 実験装置

2.1 可変断面形集束ノズル

プラズマジェット発生器内で棒電極先端の電極点から発達膨張したアークは、冷却ガスによる熱ピンチ効果を受け、ノズル軸線上に拘束安定化され、ノズル壁面上の電極点に達する。このような集束アークで軸線上に保持されたノズル内アーク柱は、器壁及びガス流によって圧縮され、Elenbass-Heller 方程式⁹⁾によるエネルギー平衡が成り立つようにふるまう。一方、陽極点はノズル軸線からノズル壁に向う径方向アーク柱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⁹⁾するようにふるまう。円筒形アーク柱に対する Elenbass-Heller 方程式は (1) のように示される。また径方向アーク柱に働く電磁力と気体力学的抗力の平衡条件は (2) で与えられる。

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \kappa \frac{dT}{dr} \right) + \sigma E^2 - q = 0 \quad (1)$$

ただし r : アーク柱中心軸からの距離, κ : 熱伝導率, σ : 導電率, E : 軸方向電位の傾き,

q : 放射強度

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

ただし C_D : 抗力係数, r_0 : 径方向アーク柱半径,
 ρ : ガス密度, v : ガス流速, dl : 径方向アーク柱長,
 μ_0 : 透磁率, I : アーク電流,
 R : わん曲アーク柱の曲率半径

ノズル内のアークは以上の (1), (2) に示す条件を同時に満足するようにふるまうため, その解析はきわめて困難となる。

本実験では, 交差電極形プラズマ発生器¹⁰⁾を用いて電極点をノズル先端部に拘束し, Fig.1 に示す9種類の可変断面をもつノズルを用いて, ノズルアークに対する器壁及びガス流による圧縮効果を調べた。ノズルは内径を 6mm, 8mm, …20mm と 2mmずつ直径を増大した8種類と, 直径 30mm の計9種類を使用した。ノズル集束部の長さはすべて 19mm である。ノズルはいずれも銅製で集束部側壁にく形断面のアーク観測窓を軸線に平行に配置した。Fig.1 (a) はノズル形状を, 同図 (b) はその仕様を示している。

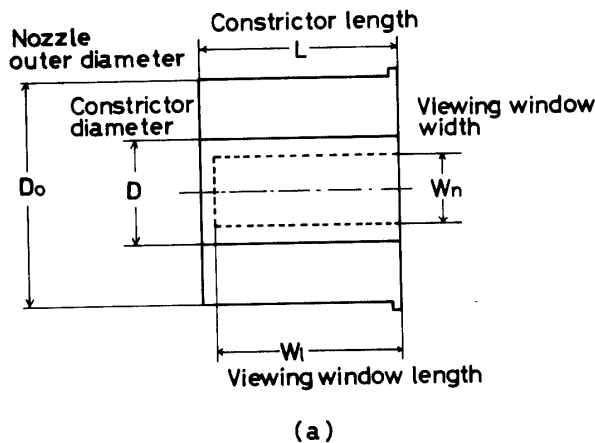


Fig.1 (a) Shape of a constricted nozzle and (b) specification of various constricted nozzles.

2.2 交差電極形プラズマ発生器

本実験に使用したアーク観測窓を有する交差電極形プラズマ発生器は, Fig.2 に示すようにノズル取り付け部中心軸上に保持したセンタ電極とノズル集束部側面から軸線に垂直に挿入した交差電極とにより構成され, 電極間に点弧したアークを軸方向ガス流及び器壁によって集束安定化する方式をとっている。アーク観測窓はノズル取り付け部側壁に幅 10mm, 長さ 17mm

のスリットを軸線に平行に設け, 石英ガラスで密封して構成する。

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, センタ電極先端は頂角 90 度の円錐形に削り, 交差電極はその先端部がノズル出口から 5mm 内側で, 軸線から 1.5mm 径方向に離れた点に位置するように配置した。なお, 交差電極は内径 4mm のセラミック絶縁管, センタ電極は内径 4mm の黄銅管に収め, 電極周囲にはシースガス流を流している。

交差電極とノズルとの絶縁, センタ電極とノズル取り付け部との絶縁はそれぞれ耐熱セラミック, ベークライトで行った。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, 熱損傷を防ぐと共に, 各部の熱損失を求めた。

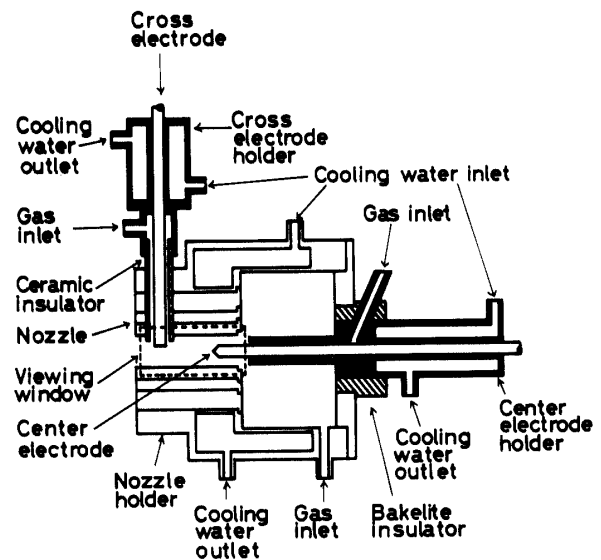


Fig.2 Sectional view of cross electrode type arc generator

2.3 実験回路

Fig.3は実験回路を示している。直流アーク発生用電源は無負荷電圧 140V, 容量 50KVA, 交流アーク発生用電源は単相 60Hz, 容量 30KVA, 無負荷電圧 158V で, それぞれ抵抗形安定器 (無誘導抵抗 0.8~3.3Ω), リアクトル形安定器 (0.8~3.3Ω の無誘導抵抗素子と 3mH のリアクトルとの組合せ) によって垂下特性を与えている。

アーク電圧及び電流の測定は, 直流アークに対しては両者ともデジタル計器を用いて平均値を, 交流アークに対してはそれぞれ熱電形計器, 可動鉄片形計器を用いて実効値を求めた。

器壁効果を求めるため Fig.1 に示す9種類のノズルを Fig.2 のノズル取り付け部に挿入し, 段階的にアーク

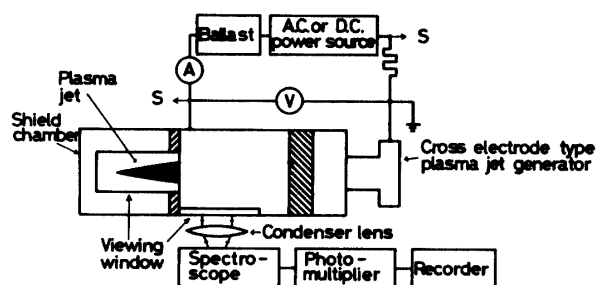


Fig. 3 Experimental arrangement of the plasma jet device.

クの圧縮を行った。一方、ガス流によるアークの圧縮は、ノズル後部に流入する集束ガス流を連続的に変化して行った。

作動ガスは純度 99.99% のアルゴンで、流入圧力 4kg/cm^2 とし、ガス流量 $8\sim 20\text{l/min}$ をセンタ電極シースガス流 3l/min 、集束ガス流 $5\sim 17\text{l/min}$ に分割して供給した。なお、交差電極に対するシースガス流は 1l/min としたが、本実験の範囲では交差電極部のシースガス流がアーク圧縮に与える影響は微弱であり無視できることを確認した。

アークの形状はノズル側壁の観測窓を通してスチル撮影により求めた。

さらに、観測窓よりアーク各点からの放射光を集光系を通して分光器スリット上に投影し、スペクトルとその強度を求めた。測定対象としてはセンタ電極先端より 1mm 及び 5mm 離れたノズル軸線上のアークを選んだ。

実験は電極ギャップ長を 10mm に保持し、直流アーク電流は $17\sim 31\text{A}$ 、交流アークに対しては電流 $40\sim 100\text{A}$ を供給して行った。

3. 実験結果と考察

3.1 電気的特性

Fig. 4 はノズル径及び動作条件が直流アークの電圧に与える影響を示している。ノズル径が 14mm 以下では、いずれもアーク電圧はノズル径の縮小と共に急激に上昇し、最大の電圧上昇幅はガス流量 20l/min 、電流 31A でノズル径が 8mm から 6mm に縮小した場合に現われ、 2.1V である。一方、 14mm 以上ではノズル径によるアーク電圧への影響は微弱であり、ガス流量 8l/min ではノズル径が 18mm 以上になると、アーク電圧は再び上昇する。これはアーク柱へアピン部の曲率が大きくなる故であり、写真測定と一致する。

ガス流量を増加するとアークに対する熱ピンチ効果

が向上し、アーク電圧は上昇する。とくにノズル径が小さい場合に熱ピンチが効果的に作用し、ノズル径 6mm でガス流量を 8l/min から 20l/min に増すとアーク電圧は 3.1V に上昇し、この時の電圧上昇率は 0.26V/l である。

また、本実験条件内における直流アークの電圧対電流の関係は垂下特性を示し、アーク柱平均電流密度は $240\text{A/cm}^2\sim 1,010\text{A/cm}^2$ であった。

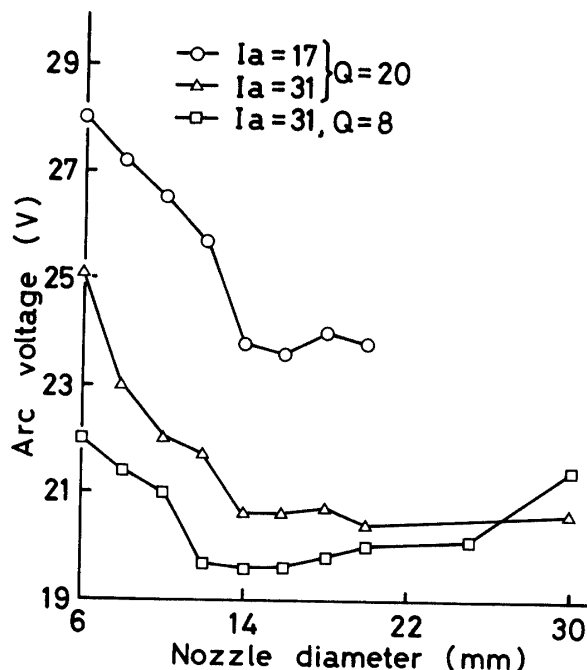


Fig. 4 Arc voltage vs. nozzle diameter for DC arc. I_a : Arc current (A), Q : Gas flow rate (l/min)

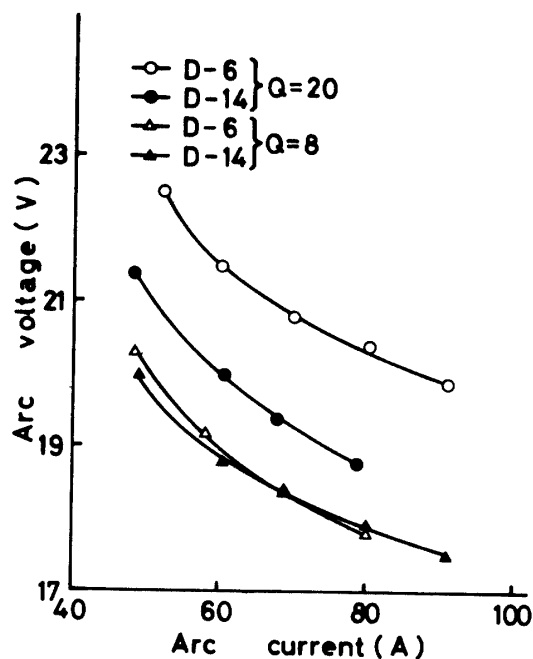


Fig. 5 Arc voltage vs. arc current. D-6, D-14: Nozzle number, Q : Gas flow rate (l/min)

以上述べたようにノズル径 14mm 以上では器壁による圧縮効果が顕著にアーク特性に表われない故、以下ではノズル径 14mm (D-14ノズル) と 6mm (D-6ノズル) のノズルを用いた場合の器壁及びガス流によるアークの圧縮効果について述べる。

交流アークの電圧対電流の関係は Fig.5 に示すように垂下特性を有し、アーク電圧はほぼ直線的に低下する。このように垂下特性領域にあることは、電極点が固定されアーク長が一定に保たれていることを考慮すると、アーク柱の導電率が電流の増加と共に増大しているものと考えられる。ガス流量 8l/min では器壁による圧縮効果はほとんどなく、D-6 ノズルと D-14 ノズルとのアーク電圧の差は 0.3V 以下であるが、ガス流量を 20l/min に増すと、その差は 1.5V に増大し、器壁による圧縮効果が表われる。また D-6 ノズルと D-14 ノズルのガス流量増加によるアーク電圧上昇率はそれぞれ 0.22V/l, 0.08V/l である。これよりノズル径が小さいほどガス流による圧縮効果が有効であることがわかる。

3.2 アーク形状

Fig. 6 (a) に示すような交流アーク側面像より求めたアークの形状は同図 (b) のように 2 種類の形状に分類しうる。すなわち、アーク柱へアピン部の曲率が小さく、アーク柱がノズル軸線上に保持されている形状と、アーク柱へアピン部の曲率が大きくなり、交差電極の対向側に大きくわん曲し、アーク柱がノズル軸線よりずれた形状である。ここで前者を形状 I、後者を形状 II とする。ノズル径の大きい D-14 ノズルにおけるアークは形状 II を呈し、アーク柱へアピン部の曲率は電流の増加あるいはガス流量の減少に伴って小となる。しかし軸線上に保持されるアーク柱の長さは 1.88 ~ 4.88mm であり、電流あるいはガス流量を増大すると大となる。すなわち、その長さは電流約 30A の増加に対してガス流量 20l/min では 2.26mm, 同じく 8l/min では 1.12mm 伸び、またガス流量 12l/min の増大によるその伸びは 0.74~1.18mm である。一方ノズル径を 6mm に縮小した D-6 ノズルにおけるアークは形状 I を呈し、電流及びガス流量に依存せずアーク柱へアピン部の曲率は小さく、また軸線上に保持されるアーク柱の長さも電極ギャップ長の 90% 以上となり、器壁及びガス流によるアークの集束安定化が効果的に行われていることがわかる。

Fig.7 は交差電極先端から 5mm 離れた位置における交流アーク柱直径がノズル径及び動作条件によって受ける影響を示している。アーク柱直径は電流が増加

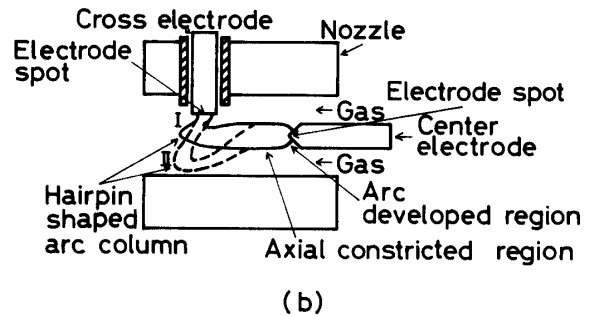
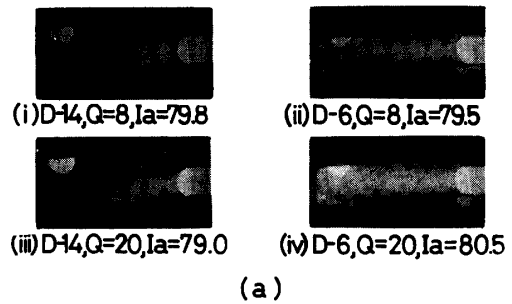


Fig.6 (a) Photographs of AC arc and (b) sketch of a constricted arc.
 D-14, D-6 : Nozzle number,
 Q : Gas flow rate (l/min),
 I_a : Arc current (A)

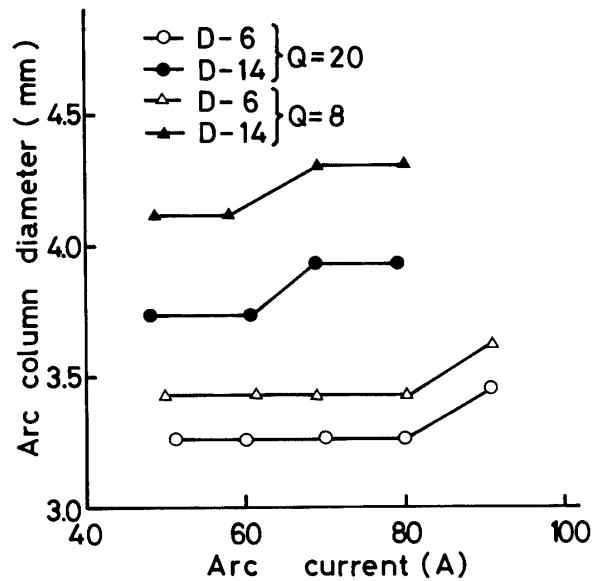


Fig.7 Arc column diameter vs. arc current for AC arc.
 D-14, D-6 : Nozzle number,
 Q : Gas flow rate (l/min)

すると大となるが、アーク柱直径の膨張が起る電流値はノズル径によって異なり、D-14 及び D-6 ノズルに対してそれぞれ 60A, 80A である。またアーク柱直径は D-6 ノズルが D-14 ノズルに比較して 0.47 ~ 0.83mm 圧縮されている。ガス流量を増加すると、両ノズルにおけるアーク柱とも圧縮され、アーク柱直

径は5.9~12.1%減少する。本実験条件下で最小のアーク柱直径はD-6ノズルでガス流量20l/minの場合に得られ、その値は3.28~3.47mmである。また、ガス流量20l/min、電流79Aでノズル径を14mmから6mmに縮小した場合のアーク柱直径の減少は0.66mmであり、対応するアーク電圧上昇は1.8Vである。

以上よ、りノズル径が小さく、ガス流量が大きいほ

ど圧縮効果が有効に作用し、アーク柱の安定度もよいことがわかる。

3.3 スペクトルとその強度

センタ電極先端から1mm, 5mm離れた軸線上の位置におけるアーク放射光の分光測定結果を解析し、Table 1を得た。なお対象としたアークは電流49Aの交流アークである。

Table. 1 Spectroscopic characteristics.

Nozzle number	Gas flow rate (l/min)	Distance from center electrode (mm)	Spectral region (Å)	Relative intensity (arbitrarily)		Spectroscopic temperature (K)
				Ar I 4, 201Å	Ar II 4, 348Å	
D-6	8	5	3,940~4,520	21.9	1.4	7,470
	20	5	3,940~4,520	20.9	1.2	7,150
D-14	8	5	3,940~4,520	10.3	0.6	5,780
	20	5	3,940~4,520	11.8	0.7	6,540
	20	1	3,470~5,060	11.9	19.8	10,720

Note: Arc current; 49A

アーク放射光のスペクトルとその強度は発光位置によって異なり、センタ電極から1mm離れた軸線上の位置ではスペクトルは3,470~5,060Åの範囲に分布し、スペクトル強度はイオン線が強力であるが、5mm離れた軸線上ではそれは3,940~4,520Åに縮まり、強度は中性粒子線が強力となる。最も強い強度のスペクトル線はイオン線ではAr II 4,348Å、中性粒子線ではAr I 4,201Åである。

センタ電極から5mm離れた軸線上の位置におけるアーク放射光のスペクトルはノズルの種類、ガス流量に依存せず常に3,940~4,520Åの範囲に分布している。一方、スペクトル線強度は、ガス流量12l/minの増加に対してD-6ノズルでは5~14%減少するが、D-14ノズルでは逆に15~17%増大する。また、D-6ノズルのスペクトル線強度はD-14ノズルの約2倍となり、器壁による圧縮が効果的に行われていることがわかる。

4. むすび

交差電極形プラズマ発生器のノズルアークに対してノズル断面を段階的に変化させて圧縮効果を調べた。その結果、器壁がノズルアークに与える影響はきわめて大きく、またノズル径が小さいほどガス流による圧縮効果が有効であることが確かめられた。ノズルアーク

の効果的圧縮を行うためには、アーク発生条件に対するノズル内径と作動ガス流量の選定をさらに厳密に検討する必要があると考えられる。

本研究に協力いただいた本学山中麗子氏、大学院吉村剛治氏、同高橋広志氏、同柳楽昌宏氏に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 例えば H.N. Olsen: Phys. Fluid, 2, 614 (1959)
- 2) J. Burlock, P. Brockman, R.V. Hess & D.R. Books: AIAA J., 5, 558 (1967)
- 3) E. Pfender & C.J. Cremers: AIAA J., 3, 1345 (1965)
- 4) 佐伯節夫: 応用物理, 45, 845 (1976)
- 5) S.A. Wutzke, E. Pfender & E.R.G. Eckert: AIAA J., 6, 1474 (1968)
- 6) E.P. Incropera: IEEE Trans. Plasma Science, PS-1, 3 (1973)
- 7) 佐伯節夫, 内山格郎: 山口大学工学部研究報告, 27, 113 (1976)
- 8) 佐伯節夫, 二矢田正輝, 大崎堅: 山口大学工学部研究報告, 29, 273 (1979)
- 9) M.F. Hoyaux: "Arc Physics" Springer-Verlag (1968) p.47
- 10) 佐伯節夫, 大崎堅: 山口大学工学部研究報告, 24, 177 (1973)

(昭和54年10月15日 受理)