

プラズマ・ジェットにおけるゆらぎについて

佐伯 節夫*・牧 元**・大崎 堅***

On the Fluctuation Mode in a Plasma Jet.

Setsuo SAEKI, Hajime MAKI and Katashi OSAKI

Abstract

The periodic fluctuations present in arc voltage and luminous intensity of D. C. plasma jet have been studied.

The D. C. plasma jet generator was a non-transferred, vortex and axial gas flow, constricted configuration, and taper type single port nozzles were prepared for Argon, Nitrogen and mixed gas. A P-P type valve voltmeter was used to measure the arc voltage and luminosity fluctuations were observed by a MS-9SY photomultiplier tube, which was positioned perpendicular to the jet axis at a nozzle exit. A SS-5102 synchroscope was used to determine the instantaneous waveforms of arc voltage and photocurrent.

A saw-tooth fluctuation of the arc voltage has been produced in Argon plasma jet and similar in form to the fluctuation obtained with Nitrogen. The frequency and amplitude of this fluctuation were dependent upon the arc current and the gas flow rate. There was a tendency for the frequency to increase with the gas flow rate, and for the amplitude to reduce gradually.

An increase in the arc current to 60~80 A caused the frequency of the voltage fluctuation to a maximum value. A further increase in current over 100 A reduced the frequency and fluctuations were vanished. So the transition the fluctuating mode to the steady mode depends upon the value of the arc current. The typical value of the frequency in voltage fluctuation was of the order of 4~10 kc/s in Argon and 10~20 kc/s in Nitrogen for our experimental condition. It is suggested that the cause of voltage fluctuations is the movement of the anode spot. But the different forms in Argon and Nitrogen may be attributed to the different arc mechanism in these gases.

The waveform of luminosity fluctuations in plasma jets was synchronized to the voltage fluctuation and the peak-to-peak intensity fluctuations was equal to the 17% about the mean output of a photomultiplier.

1. 緒 言

直流プラズマ・ジェットのアーク電圧および電流には、しばしば著しい振動の発生、消滅が観測される。これによってアーク入力もまた変動を余儀なくされ、その結果ジェットの光度にも時として平均値の50%にも達するはげしいゆらぎ現象¹⁾が生ずる。

アーク電圧振動はノズル電極面上の陽極点の運動²⁾

に基くものであったり、またこれとアーク柱のヘヤピン形ねじれ³⁾が同時に原因となることもある。このゆらぎはプラズマ発生器のノズル電極の設計によって左右され、さらにアーク集束ガスの種類、流量、アーク室内からノズルにかけてのガス流の流動状態、アーク電流に依存している。

アーク電圧のゆらぎ現象は一般に周期的と認め難いが、各動作条件を適当に選定すればほぼ規則的な振動

* 電気工学教室

** 工業短期大学部

*** 大学院修士課程

を反復させうる。この周期的振動現象については先に述べた⁴⁾が、プラズマ・ジェットのエネギーを利用する場合に、このゆらぎに特に注目する必要があると考えられる。以下アーク電圧、ジェット光度におけるゆらぎの発生、消滅に対するノズル電極、電気入力、ガス流の影響について述べる。

2. 実験装置

プラズマ・ジェット発生器は直流ガス渦流兼軸流集束形⁵⁾で、実験中に与えたアーク電流は最大180A、ガス流量はアルゴン20~40ℓ/min、窒素15~30ℓ/min、混合ガス25ℓ/minである。

ノズル電極は銅製、入口テーパ1.17、出口テーパ0.8の単孔式で、集束部直径5mm、アスペクト比それぞれ1, 1.4, 2.6の仮称N-4, N-5, N-6と集束部直径3mm、アスペクト比4.3の仮称N-3の各種を使用した。N-4およびN-5は主としてアルゴン用、N-3は窒素用、N-6はアルゴン・窒素混合ガス用である。陰極は直径5mmの1.75%トリウム入タングステン棒で、先端を45°に削って陰極点の定着とノズル入口でのガス流の安定をはかった。ガスは純度99.99%のアルゴン、窒素、および両ガスの混合流を使用し、ガス室流入圧力は5kg/cm²を標準とする。

アーク電圧は真空管電圧計により測定し、シンクロスコープにより各動作条件における波形観測を行なった。

プラズマ・ジェットは紫外部の放射が強いため、ジェット光度のゆらぎ検出には、紫外領域の感度の良好な光電子増倍管MS-9SYを用い、受光窓の開口角1°とし、紫外部および可視部透過率0.015%のフィルタ

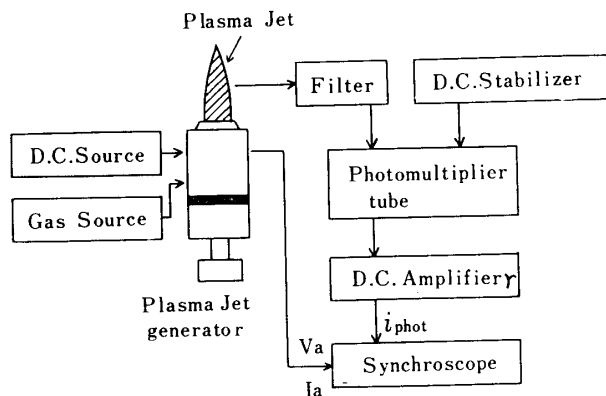


Fig. 1 Fluctuation measuring circuit.

i_{phot} : photo current

V_a : arc voltage

I_a : arc current

Vol. 17, No. 3 (1966)

を付した。光度測定対称は、ノズル中心線上でノズル電極出口より前方5mmの位置における2mm²のジェットとし、測光軸はジェット軸線に直角に設定した。測定装置および信号ケーブルに対しては、すべて完全なシールドを行なった上SS5102シンクロスコープにより記録せしめた。Fig. 1に測定回路を示す。

3. 実験結果と検討

プラズマ・ジェット発生器のノズル電極を交換するとその電圧・電流特性はFig. 2, Fig. 3のように変化する。ノズル集束部のアスペクト比により、それぞれ僅かながらその特性に相違を生ずる。窒素混入によるアーク電圧の増加は著しい。

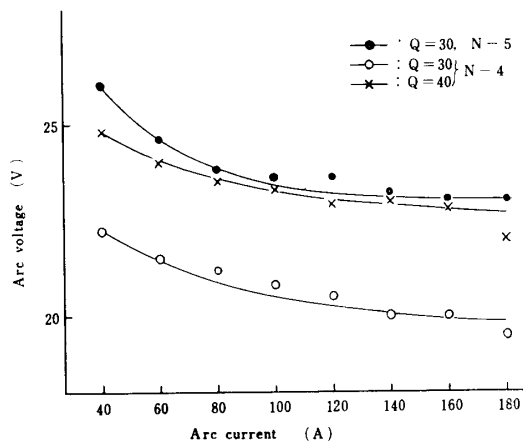


Fig. 2 Voltage-current characteristics of Argon plasma jet.
electrode gap; 2 mm
Q : gas flow rate ℓ/min

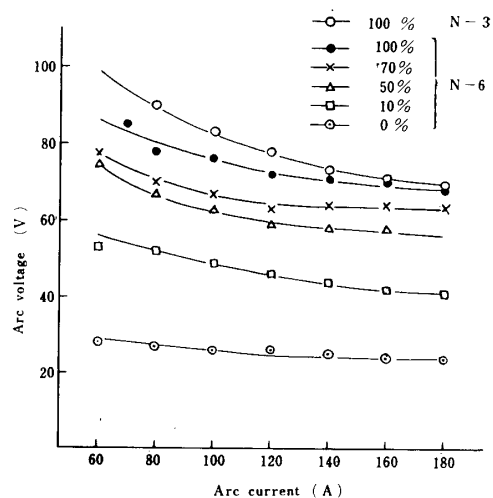


Fig. 3 Voltage-current characteristics of mix gas plasma jet.
electrode gap : 5 mm
gas flow late : 25ℓ/min
% ; Nitrogen mixing ratio to Argon

ジェットを軸対称と仮定すれば、放射スペクトル線の強度は Abel⁶⁾ により次のように与えられる

$$I(x) = 2 \int_x^R \frac{n(r) r dx}{(r^2 - x^2)^{1/2}}$$

ただし、 $I(x)$: 放射強度, $n(r)$: ジェットの単位体積から放射される光子数, r : ジェット中心より半径方向の距離, x : 横軸上の距離, R : ジェットの半径である。

今ノズル出口のジェットの平均輝度を、しゃ光筒式光電池輝度計 (筒長50mm, 開口角3°) により測定すると Fig. 4, Fig. 5 となる。輝度はアーク電流180A

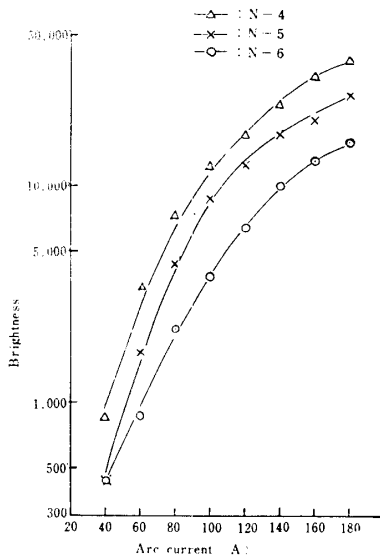


Fig. 4 Brightness-current characteristics of Argon plasma jet, electrode gap ; 2 mm, gas flow rate ; 40 l/min

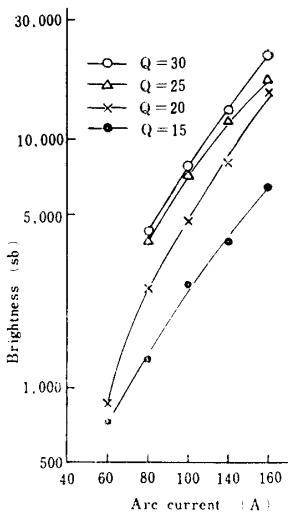


Fig. 5 Brightness-current characteristics of Nitrogen plasma jet, electrode gap ; 5 mm, nozzle number ; N-2, Q : gas flow rate l/min

以下では電流の増加と共に急速に上昇し、ガス流量の影響は僅小である。

3.1 アーク電圧のゆらぎ現象

3.1.1 アルゴン・ジェット 一般にプラズマ・ジェットのアーク電圧振動は不規則であるが、先に述べたように、適当な設計を行なったノズル電極を用い、ガス流、アーク電流などの動作条件を整えることによって規則的な振動を再現できる。アルゴン・ジェットにおけるアーク電圧の振動周波数の変化の一例を示すと Fig. 6 のようになり、その特性は主としてアーク電流とガス流量によって支配される。

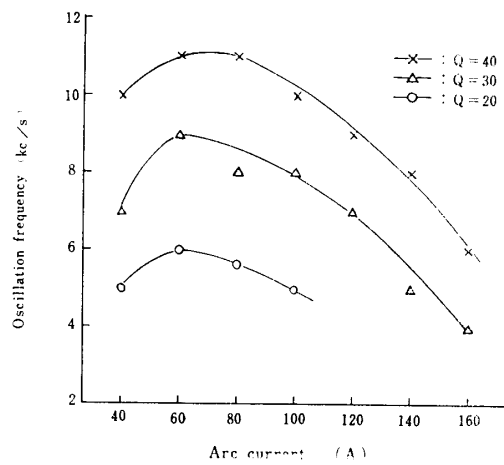


Fig. 6 Anode oscillation characteristics of Argon plasma jet, nozzle number : N-5, electrode gap : 2 mm, Q : Argon gas flow rate l/min

今 Fig. 6 におけるように、ガス流量を一定に保ちながらアーク電流を増加して行くと、概ね電流60~80 A 付近で、アーク電圧振動数はピークに達する。この電流領域で、プラズマ・ジェットの形状は安定し、発生する高周波雑音が低下する。以後アーク電流を増すにつれてアーク電圧の振動数、振幅ともに減少し、つづいて間欠的な振動に移り次第に消滅する。すなわちアーク電圧振動はアーク電流80A 付近をピークとし、以後電流増加につれて、振動モードより安定モードに移行する。

ガス流量を増してゆくと、アーク電圧振動数は著しく増加する。この傾向は低電流領域ほど明らかである。また、電極間隙が大でガス流によるアーク柱の閉じ込め部の長い程、振動が発生しやすい。

ガス流量 20 l/min 以上では、ノズル電極のオリフィス径が 3 mm より 5 mm の方が振動発生が著しいが、これは陽極点に対するガス流の作用が、オリフィス径により異なるためである。

Fig. 7, Fig. 8 に代表的なアルゴン・ジェットの

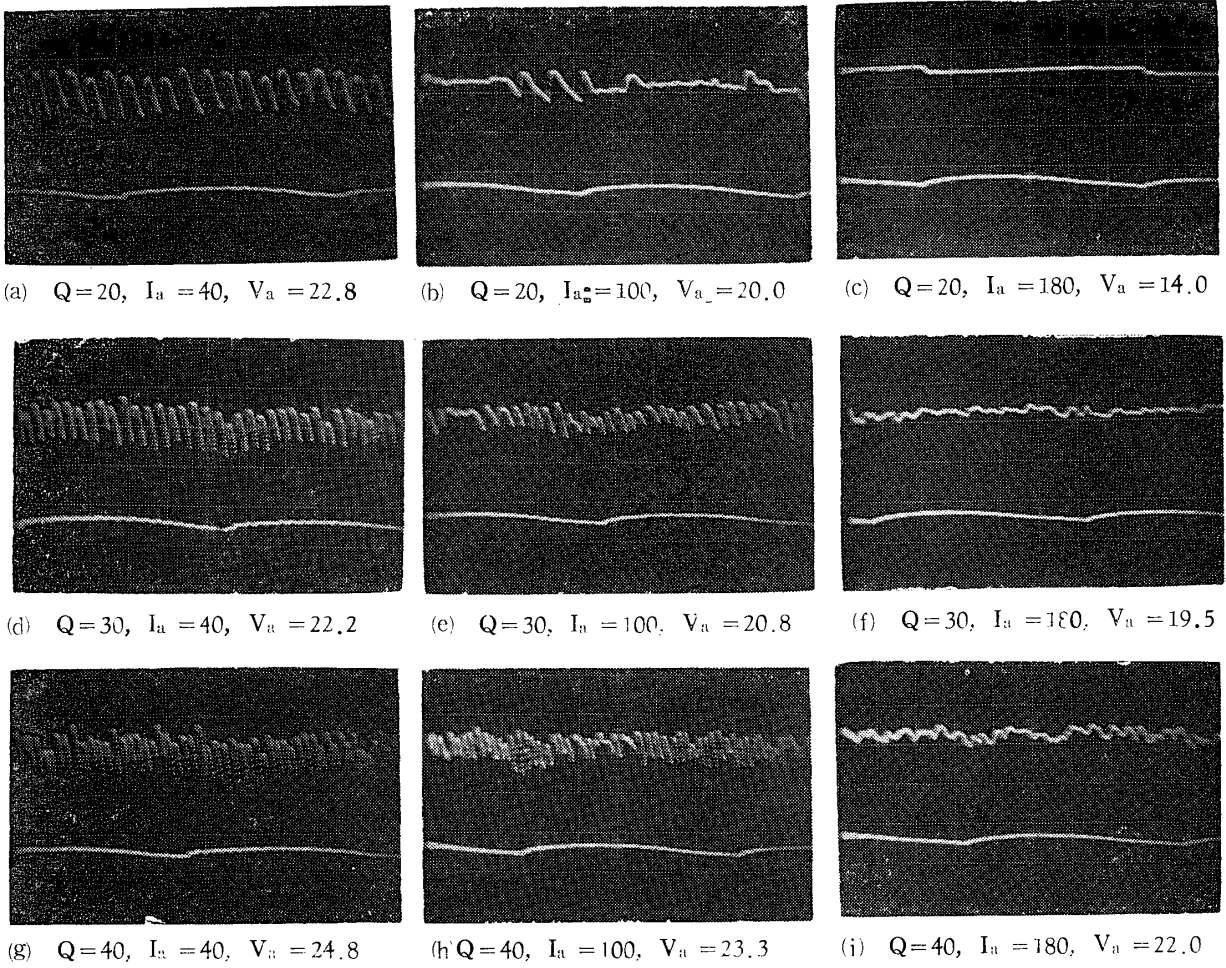
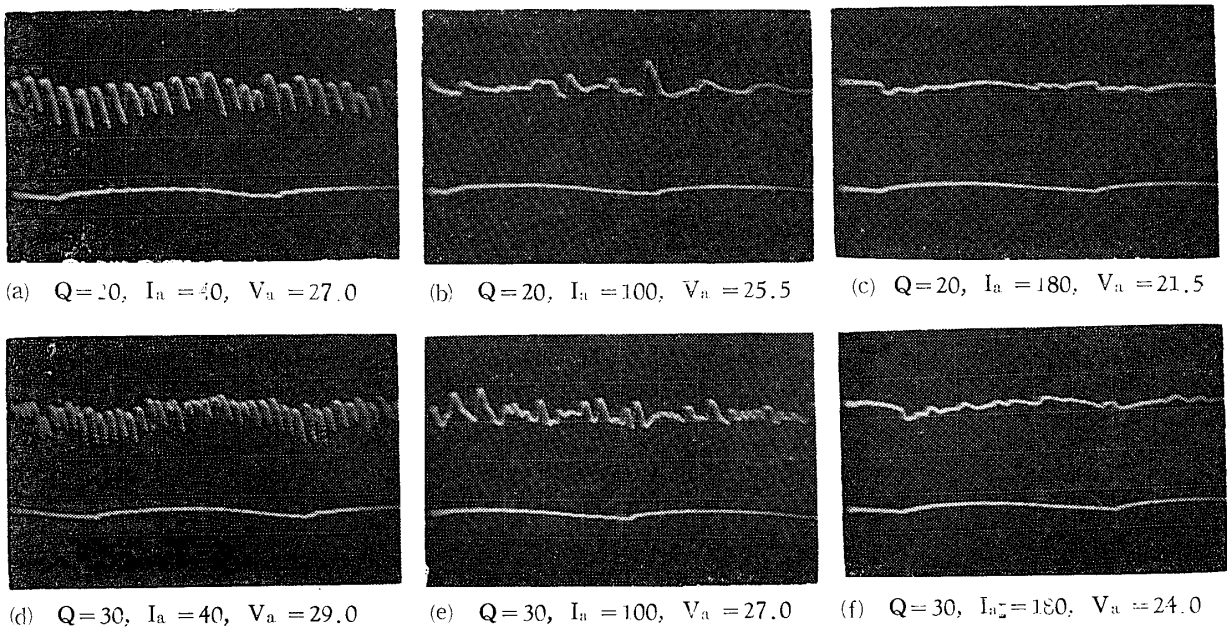
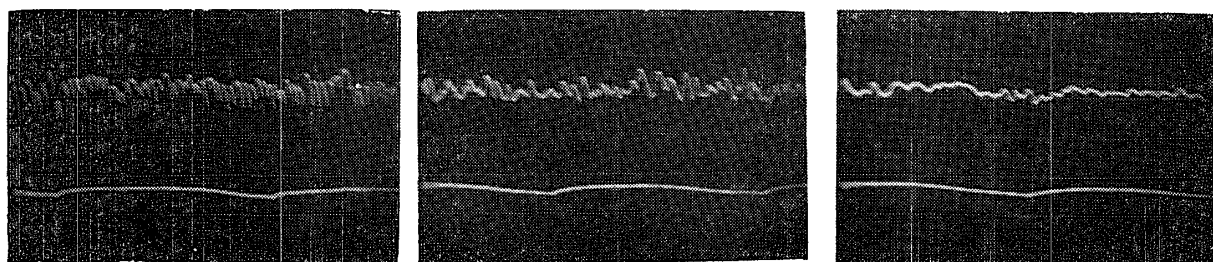


Fig. 7 Oscillogram of fluctuation in Argon plasma jet
nozzle number ; $N=4$, electrode gap ; 2 mm.

Q : gas flow rate l/min , I_a : arc current A, V_a : arc voltage V, A-channel (upper trace) ; arc voltage, B-channel (lower trace) ; arc current, sweep velocity ; $500\mu s/div$, polarity ; negative, gain ; A—5 v/div, B—100v/div





(g) $Q=40, I_a=40, V_a=31.5$ (h) $Q=40, I_a=100, V_a=29.5$ (i) $Q=40, I_a=180, V_a=27.0$

Fig. 8 Oscillogram of fluctuation in Argon plasma jet
nozzle number ; $N=4$, electrode gap ; 10mm.

Q : gas flow rate l/min , I_a : arc current A, V_a : arc voltage V, A-channel (upper trace) ; arc voltage, B-channel (lower tract) ; arc current, sweep velocity ; $500\mu s/div$, polarity ; negative, gain ; A—5 v/div, B—100v/div

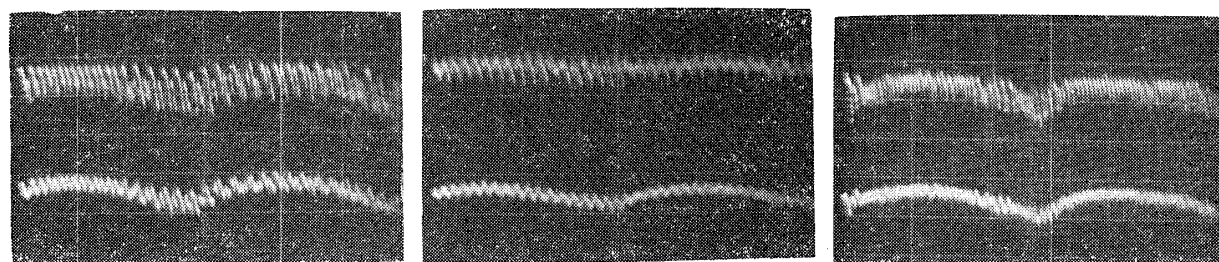
アーク電圧および電流の波形を示す。電圧振動数はほぼ10KC以下で、振巾は10Vに達しない。これらより、アーク電圧振動現象のアーク電流、ガス流依存性が明らかである。

Fig. 7において、アーク電流を40Aに保ちながら、ガス流量を20, 30, 40 l/min に変化すると振動の振巾は4~6Vでほとんど不変であるが、振動数は4KC, 7KC, 10KCと上昇する。アーク電流180Aにおいて、ガス流量20 l/min の場合は振動を全く認めないが、30 l/min においては軽微な、40 l/min においてはかなり大きいリップルを発生する。

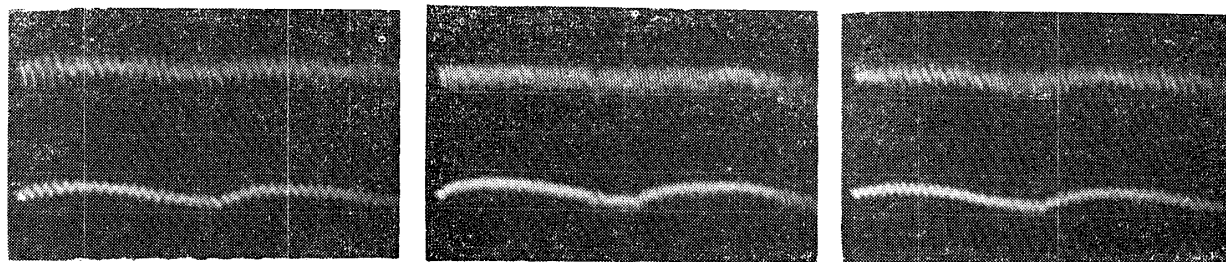
Fig. 8の場合はFig. 7に比してアーク柱長が大となるため、振動の振巾はほとんど不変ながらややランダムになり、その振動数が少し大となる。Fig. 8(c)

は電流、ガス流量ともにFig. 7(c)に等しいが、全くフラットになりえずゆらぎを残す。

3・1・2 窒素ジェット 窒素ジェットにおける電圧波形および電流波形をFig. 9に示す。この場合、アーク電圧の振動周波数は大体10~20KC、振巾25~50V程度を示す。アーク電流およびガス流に対する影響は、アルゴン・ジェットの場合と相異してアーク電流を増加すると、振動周波数はほとんど変りなく、特に振動の消滅は生じない。ガス流の影響は20 l/min 以上においては僅小で、時にはガス流を増加しても逆に振動数の低下を見ることもある。ガス流15~30 l/min の範囲では、ノズル電極オリフィス径が5mmより3mmの方が振動現象が顕著であり、この点もまたアルゴンと反対の傾向を示している。



(a) $Q=15, I_a=60, V_a=91.0$ (b) $Q=15, I_a=140, V_a=61.0$ (c) $Q=20, I_a=60, V_a=84.0$



(d) $Q=20, I_a=140, V_a=61.0$ (e) $Q=25, I_a=60, V_a=75.0$ (f) $Q=25, I_a=140, V_a=68.0$

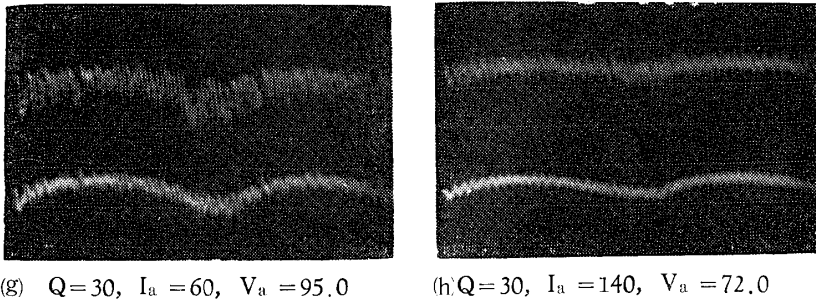


Fig. 9 Osillogram of fluctuation in Nitrogen plasma jet.
 nozzle number ; N— 3, electrode gap : 2 mm
 Q : gas flow rate l/min, I_a : arc current A V_a : arc voltage V, A-channel (upper trace) ; arc voltage B-channel (lower trace) ; arc current, sweep velocity ; 500 μ s/div, polarity ; negative, gain ; A—50v/div, B—100v/div

3・2 アーク挙動に対する考察

先に示したアーク電圧波形に見出される振動現象の成因について、考察を加えることにする。

アーク電圧は陰極表面の陰極点における陰極降下、アーク柱部分におけるアーク柱降下、陽極端すなわち陽極点における陽極降下よりなる。陰極降下および陽極降下はほぼ不変と考えるので、電圧の変動は主としてアーク柱降下部に生ずる。プラズマ発生器内におけるアークは棒陰極表面の陰極点と、ガス流およびノズル壁により集束されたアーク柱およびノズル陽極面上の陽極点より構成される。

アーク電圧振動の要因としては、先ず陰極的の棒陰極面上でのランダム運動が考えられるが、これはプラズマ発生器の構造により異なると考えられる。本器のように棒陰極先端をノズル電極入口のテーパに対して適当な角度を与えるように削り、アークガスの軸方向成分を増加することにより棒陰極先端に陰極点を固定せしめうる。使用後の棒陰極の表面の損傷程度を顕微鏡により検査することにより、電極先端に陰極点が付着していることが推定される。陰極ジェットの問題もあるが、アーク発生中のノズル前面よりの写真観測の結果ではほぼ棒陰極軸線方向に一致しているものと考えられる。したがって、陰極点の運動は直接の電圧振動の原因ではない。よって、アーク柱部分の変動および陽極点の運動が振動発生の主なる原因と考えられる。

Fig. 10 はノズル電極内側およびアーク室内におけるアーク柱とプラズマ・ジェットの発生状態の略図である。

Fig. 11は Fig. 10に対応する波形を示す。引き離しスタートによりアークを点ずると、先ずアークは削られた陰極コーン側面とノズル入口 A_1 との最短距離に

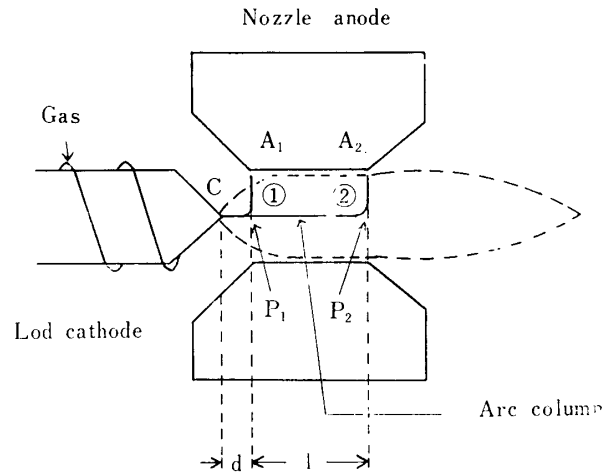


Fig.10 Schematic view of arc column and plasma jet.
 C : cathode spot
 A_1, A_2 : anode spot
 CP_1A_1, CP_2A_2 : arc column
 d : electrode gap
 l : constrictor length

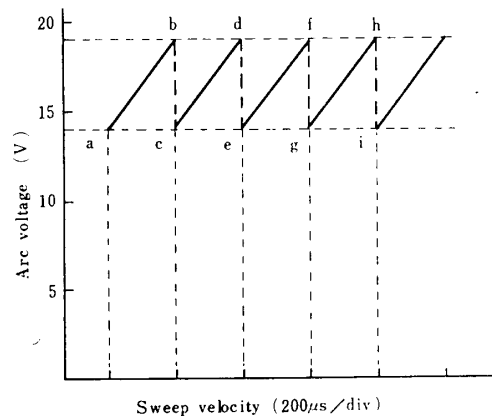


Fig.11 Wave form of arc voltage.
 nozzle number ; N— 4, gas flow rate : 20l/min, electrode gap ; 2 mm, arc current ; 40A

発生し、ついでガス流により陰極点はCに移り、Cよりは指向性のある電子流、陰極ジェットを発生しアーク柱に対するガス流の集束効果と相まって、アーク柱はほぼ①のようにCP₁A₁と形成される。これが電圧波形の最低電圧レベルa, c等の点を与えている。ついでガス流によって陽極点A₁は軸方向に運動を開始しノズル出口A₂に移動し、アークは②のようにCP₂A₂と形成される。この時の電圧波形は極大値b, d等に対応する。このようにアーク電圧の瞬時値は上昇し、アーク長は大きくなるため再びCA₁間に絶縁破壊を生じアークは①の位置に戻る。この現象の繰り返しがアーク電圧波形にほぼ規則的な振動として表示されるものと考えられる。この事実は絶縁ノズルを用いて陽極点の運動を解析²⁾することにより示されている。

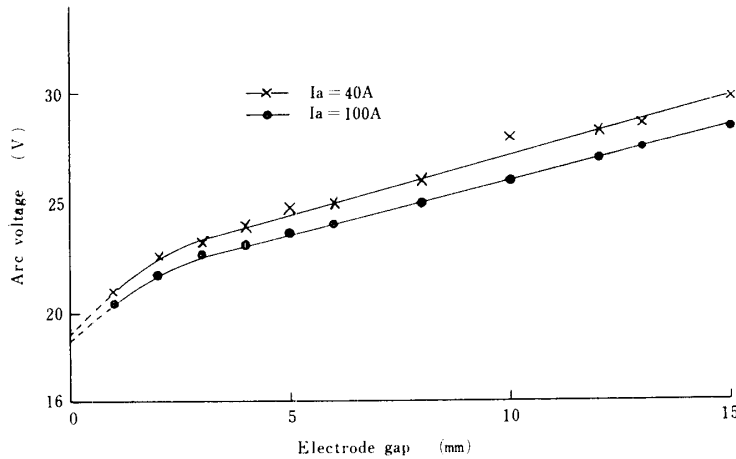


Fig. 12 Arc voltage-electrode gap characteristics of Argon plasma jet.
nozzle number ; N—4, gas flow rate ; 20l/min
I_a : arc current A

Fig.12 にノズル電極 N—4 に対するアルゴン・ジェットのアーク電圧対電極間隙を示す。電極間隙 3—4 mm 以上におけるアーク電圧の上昇率は、電極間隙 1 mm 当り 0.5V/mm で一定する。この値はアーク柱ガス流拘束部分の電位の傾きを示すものである。今電極間隙 0 に対応するアーク電圧を Fig.12 より求めると 19V と推定される。この値は、真空管電圧計およびシンクロスコープ映像より確認されたアーク電圧の極大値に相当する。

アルゴン雰囲気におけるトリウム入タングステンの陰極降下 7V, 銅ノズル電極の陽極降下を 4V と仮定し、アーク電圧のバランスを考えかつ A₁A₂間の陽極点の運動を考慮すると 8V が P₁P₂A₁ 間にかかるアーク柱降下となる。一方アーク電圧波形より対応する振

動の振巾を求めると 5V となり、P₁A₁間の電圧降下は 3V である。したがって、この間の電位の傾きは 12V/cm となる。Cより①および②を経由してA₁およびA₂に至る間の電位の傾きを等しいと見ると、電圧振動 5V に相当する距離は約 4 mm になる。

ノズル正面よりアーク柱の発生状態を写真観測すると、オリフィス径 5 mm の単孔式ノズルで集束部のアスペクト比 1—1.4 の場合、アーク電流 40—80A, アルゴンガス流量 20—30l/min においてアーク柱の直径は 2 mm, ノズル中心線のアーク柱よりノズル壁面に付着したアーク柱部分の直径約 2 mm を得る。

陽極点の中心がA₁, A₂に付着した時をそれぞれFig. 11のa, bに対応せしめると、ノズル壁内面の陽極点の軸方向移動距離は約 4 mm となる。Fig 11において、アーク電圧の上昇時間より陽極点の軸方向運動速度は

$20 \times 10^3 \text{cm/sec}$ となる。この値はノズル集束部におけるジェット作用のため、交流アーク⁸⁾の走行時間よりかなり速い。

電極間隙、アーク電流を一定に保ったままガス流量を増すと陽極点の運動速度が大となり、アーク電圧振動周波数は著しく増加するが、振巾は概ね 20l/min までにはほとんど不変で、これより流量を増すとやや減少する。アーク柱集束度の増大による電位の傾きの変化はアーク電圧の上昇によって示されるが、振巾の減少は、ガス流によりノズル出口に伸ばされた陽極点が再点弧によってA₁点に戻らず、ガス流による釣合いの位置までA₂よりに流れる結果と考えられる。

えられる。

アーク電流、ガス流量を一定として電極間隙を増加(例えば 6 mm より 8 mm)にすると、過大なギャップを取らない限り電圧振動の振巾は全く変化なく、そのレベルのみアーク電圧増加分だけ上昇する。この上昇は電極間隙の増加分に相当するアーク柱の電位の傾きに対応する。

一方ガス流量、電極間隙一定(例えば 2 mm)としてアーク電流を増加すると、アーク電圧は低下し、アーク電圧振動は次第に消滅し、波形はフラットになる。これはアーク電流の増加によって陽極点の運動能力が大となる結果、軸方向の運動が平滑になり、陽極点の面積も増加して絶縁破壊による再点弧が生じる際、アークが切れないままノズル後方に後退するた

め、電圧波形の振動が消滅すると考えられる。この場合フラットになった電圧波形のレベルはFig.11のb, d等に対応する極大値の位値にとどまる。この場合、陽極点はノズル出口に付着していると考えられる。これはアーク電流を増すことにより、ジェット的光辉、温度、エンタルピ等が上昇し、フレーム長も長く伸び強力になることと関係する。同様の状態で電極間隙を極端に増加すれば(例えば20mm)の振動の停止した電圧波形のトレースは振動波形の極小値のレベルを示し、この時はノズル入口に陽極点の付着した状態と思われる。

以上はすべて陽極点の軸方向運動のみを仮定したがガス流の回転成分が大きいため、ノズル壁内面での陽極点の施回も当然予想できる。この場合、陽極点の走行距離はさらに大きくなり速度も上昇する。ノズル前方よりアーク発生状態を観察すると、ノズル内面中心線上に存在するアーク柱より陽極点までを示すアーク柱部分(Fig.10におけるP₁A₁またはP₂A₂部)が確認でき難いことがあるが、この場合は、陽極点はノズル壁面に広範囲に一樣に分散付着していると考えられる。棒陰極軸線が正確にノズル中心線に一致し、陰極ジェットの方法も偏向なく、ノズル壁が極めて一樣に汚損なく維持され、ガス流の動作も完全に一樣であるならこのような状態を発生しうる。この場合もアーク柱のノズルに対する付着が明確に示されている時と全く同様にアーク電圧波形の振動を発生する。ゆえに、筆者等の与えた動作範囲では、陽極点のノズル内面で軸方向の運動が回転運動よりアーク電圧波形に与える影響が大きいと考えられる。アーク柱のねじ

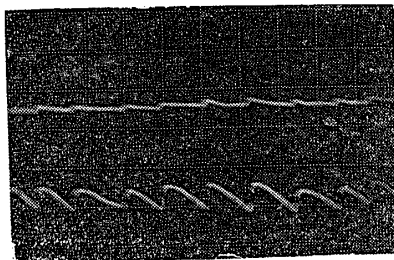
れによるノズル外部への脱出³⁾も考えられるが、本実験範囲では確認し難い。

アルゴン・ジェットのアーク電圧波形の振動はアーク電流を増すことによって停止できるが、これは一般的に陽極点の固定を示すとは断定できないし、陽極上の一点に対する入力集中による溶融は回避できる。

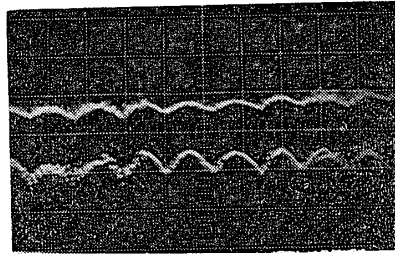
窒素ジェットにおけるアーク挙動も、ほぼアルゴンの場合と同様に考えることができる。窒素の場合もアーク電流を増した場合、陽極点の運動能力が大きくなり陽極点の面積が増加する。その結果陽極点のノズル内の軸方向運動速度の増大と移動距離の減少が生じ、アーク電圧、振動数の増加と振巾の減少をきたす。しかし窒素の場合はノズル出口に伸びたアークが再点弧に際し、必ず一度消滅し新しくノズル出口に陽極点を形成する。このため窒素ジェットはアルゴン・ジェットと異なって、アーク電流を増加した場合、アーク電圧振動の消滅が生じない、窒素ジェットにおいて、アーク電圧振動が停止すると許容限界以上の陽極入力の集中を生ずるので、ノズル損傷を招くことが予想される。

3.3 光度ゆらぎの検出

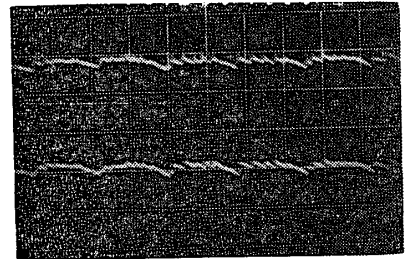
プラズマ・ジェットのアーク電圧に著しい振動を発生することは、アーク入力に対しても同様な変動を強いることになり、ひいてはジェットの光出力にも影響を与える。アルゴンに窒素を混入してゆくと、ジェットの振動の様相も窒素混入率によって異なってくる。以下アーク電圧振動と光度のゆらぎに対するガス混合率の影響を考察することにする。Fig.13に混合ガスに対する波形を示す。



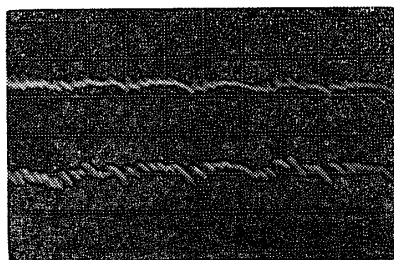
(a) A : 0.5v/div, B : 10v/div
A_r , I_a = 40, V_a = 28



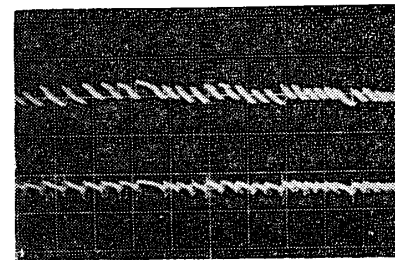
(b) A : 0.2v/div, B : 20v/div
A_r + 10%N₂, I_a = 100, V_a = 49



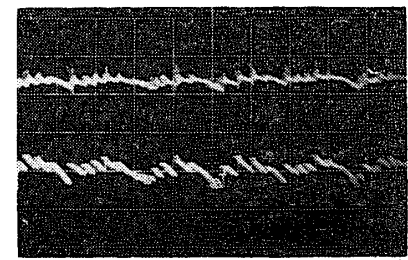
(c) A : 0.2v/div, B : 50v/div
A_r + 30%N₂, I_a = 160, V_a = 47



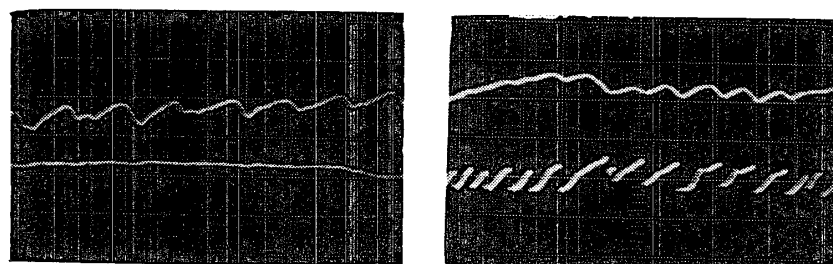
(d) A : 0.5v/div, B : 50v/div
A_r + 40%N₂, I_a = 140, V_a = 59



(e) A : 0.5v/div, B : 50v/div
A_r + 50%N₂, I_a = 100, V_a = 60



(f) A : 0.5v/div, B : 50v/div
A_r + 50%N₂, I_a = 160, V_a = 58



(g) A : 5 v/div, B : 50v/div
 $A_r + 70\%N_2, I_a = 180, V_a = 60$
 (h) A : 5 v/div, B : 50v/div
 $N_2, I_a = 120, V_a = 76$

Fig.13 Oscillogram of fluctuation in mix gas plasma jet.

nozzle number ; N—5, electrode gap ; 5 mm, gas flow rate ; 25ℓ/min
 I_a ; arc current A, V_a ; arc voltage V, A-channel (upper trace) ; photo
 current, B-channel (lower trace) ; arc voltage, sweep velocity ; 200μs/div
 polarity ; (a)~(f) : negative, (g), (h) : positive

アルゴンガスだけを使用すると、アーク電圧は(a)のように振巾4~6V, 振動数5KCを示し, ジェットの光出力には, これに同期して振巾が平均値の約5%に相当する振動を発生し, アーク電圧の上昇に追従して光度も上昇する. アーク電圧が上昇後, アークの運動機構に基づいてアーク電圧が低下し, これに対応して光度も小さくなり, 再び電圧上昇とともに増加する.

アルゴンに10%窒素を混入すると, アーク電圧振動の振巾はやや増加して10V付近になるが, 振動数は(a)とほとんど変わらず, 光出力に与える影響もすべて同様である. この程度の窒素の混入は, プラズマ・ジェットの特性をさほど変化させていないと考えられる.

窒素を30%混入するとアーク電圧振動周波数16KC程度に上昇し, 振巾は10Vをこえる. 光出力はほぼこれに追従し, 振巾はほぼ(b)に同じである.

窒素を40%混入するとアーク電圧振動周波数20KC, 振巾15Vに増加し, 光出力の周期はやや不明瞭であるが, その振巾は(b), (c)の2倍に上昇する.

窒素を50%混入するとアーク電圧, 光出力共に窒素ジェットの特徴が濃くなる. アーク電流100Aを与えた(e)では, アーク電圧の振巾20~25Vに達し, 振動数も14~16KCに増加する. 光出力は(a), (b)の場合の3倍の振巾を有し, アーク電圧に同期して振動する. アーク電流を160Aにとると, アーク電圧の振動に新たに20V, 3KC程度のレベルの変動が加わり, 光出力もまた13KC付近の小さきみな振動を行ないつつ, 電圧のレベル変化に対応した変動をくり返す.

窒素70%を混入したジェットのアーク電圧は, アーク電流180Aをとらせると(g)のように振動が消滅する. しかし, 出力には4KC程度の振動を発生し, その振

巾は光出力平均値の14~17%に当たる. この場合, アーク電圧は安定した水平状態を示しているものの, アーク自体の周期的な変化は依然として続いていると考えられる.

窒素100%を用いたジェットのアーク電圧は(h)に示すように, 振動数8KC, 振巾35Vと認められる. ジェットの光出力はその平均値の12~17%の振巾を有する振動をアーク電圧に同期して発生する. アーク電圧の上昇部を見ると, 上昇率の急な部分と比較的ゆるやかな部分とに分かれる. (h)においては前段上昇率0.25V/μs, 後段0.1V/μsの増加率を示しているが, 前段の終期より40μs遅れて光出力はピークに達し, その後はアーク電圧が徐々に上昇するにもかかわらず光出力は下降し, アーク電圧が最小に戻ると同時に光出力も最低となり, 再び同様な変化をくり返す.

4. 結 言

プラズマ・ジェットにおけるゆらぎ現象を単孔式ノズルを用いて測定した結果, アーク電圧に発生する振動の周波数, 振巾は主としてアーク電流, ガス流量に依存し, ジェット光度にもこれと同期したゆらぎを与えることが判明した. アーク電圧の振動は主として, ノズル壁内面における陽極点に起因するものと推定される. アルゴン・ジェットにおいてはアーク電流の増加はジェットの安定点をピークとして電圧振動の周波数を増すが, 以後次第に振動が低下し, 最後には消滅する. ガス流量を増すと振動周波数の著しい増加を生ずる. アルゴン・ジェットにおいてはアーク電圧振動数は概ね10KC以下, 振巾は4~6V以下である. 窒素ジェットもほぼこれと同様であるが, ジェットの安定動作範囲内ではアーク電圧振動の停止が生じないこ

とが相違している。この場合のアーキ電圧振動は10～20KC, 振巾は25～50Vを示す。

このアーキ電圧振動は, ジェット光度にもこれと同期して振巾が光出力平均値の17%にも達するゆらぎを与えている。アーキ電圧に振動が認められない場合でも, ジェット光度にゆらぎが存在し, したがってアーキ電圧振動の消滅は, ジェット出力の安定を必ずしも意味してないことがわかる。

最後に, 常に御指導御鞭撻を賜わる九州大学保刈教授, 赤崎助教授に深謝するとともに, 御協力下さった本学吉野技官に謝意を表わす。

参 考 文 献

- 1) M. Yamamoto : Japan. J. Appl. Phys. 2, 62(1963)
- 2) 館野晴雄, 斉藤健 : 昭38電気四学会連合大会講演論文集〔I〕 145(1963)
- 3) G. R. Jordan & L. A. King : Brit. J. Appl. Phys. 16, 434(1965)
- 4) 佐伯節夫 : 電気四学会九州支連論文集, 41(1964)
- 5) 佐伯節夫 : 照学誌, 43, 6 (1964)
- 6) H. E. Weber & T. K. Pugmire : IEEE Trans. Nuclear Sci., Sci-11, 243(1964)
- 7) R.R. John & W. L. Bade : ARS Journal, 31, 13 (1961)
- 8) 電気協同研究, 17, 38(1961)

(昭和41年10月15日受理)