

層流形プラズマジェット

佐伯 節夫*・田村 博**

Study on A Laminar Plasma Jet

Setsuo SAEKI and Hiroshi TAMURA

Abstract

It has been observed that a laminar jet has virtually no acoustic power output and has a sharp, long luminescent form. A laminar jet generator were designed, with which the measurement were performed to investigate laminar conditions as to arc mode, noise level, Reynolds number (Re) and a form of plasma jet.

The concluding remarks of this experimental investigation are as follows.

For laminar and transitional flow, arc mode was in the steady mode, while was in the restrike or takeover mode for turbulent flow.

Sound pressure level for laminar jet was higher than noise level based on auditory sense, but for turbulent jet, the former was less than the latter.

It was assumed that turbulent jet noise was caused by turbulent eddy in jet as well as the variation in pressure based on motion of anode spot on the nozzle. The acoustic power of a jet was dependent upon fourth power of jet velocity.

The operating conditions under which the three regimes occurred were as follows: for $Re > 200$, the flow was laminar; for $200 < Re < 400$, the flow was transitional and for $Re > 400$, the flow was turbulent.

A laminar jet has a long plum, whose length reached twice larger than the core section and for the same power input, a laminar jet length was four times longer than a turbulent of it.

The thermal efficiency for a laminar jet in the optimum operating condition reached about 55%.

1. ま え が き

アーク放電形プラズマ発生器内でプラズマ化したガスは、高温ジェットとしてノズルから噴出するが、その流速は、亜音速から超音速にわたっている。高温高速のジェット流は、周辺部の低速気流との剪断作用により激しい乱流状態を呈する¹⁾。このような乱流プラズマ・ジェットは、コア部に続く混合領域が短かいためフレーム伸長率が悪く、またジェット境界層の乱れも大で激しい騒音を発生する。これに対し、層流形ジェットはフレーム伸長が著しく、形状も尖鋭で加工性能にも優れている反面熱効率が低く、動作条件の範囲も狭いことが知られている²⁾。層流ジェットの発生条件は、一般にガス流量の低下を必要とするため、ジェット形成の過程に特異な影響がおよぶ可能性があ

る。

筆者らは、主としてノズル部に流入するガス流³⁾のふるまいの面より、ジェットの層流条件、および乱流より層流に至る遷移過程に対する実験的考察を行なった。

2. 実 験

2・1 層流プラズマ発生器

層流形ジェットは、アーク柱に対する冷却ガス流量を減少させる結果、集束度が低下し、ノズル壁による閉じ込め効果を期待しなければならない。従って、ノズル部に対する熱伝達が増加する。一方、ガス流による陽極点の駆動力も低下するので、陽極入力の中でも発生し易くなる。このような条件下で、発生器の動作を安定化するために、アーク電流とガス流量によって

* 電気工学科

** 大学院電気工学専攻

定まるアーク形状に適合し、かつ噴出後、遷移領域におけるジェット膨張を抑え、直進性を増すようなノズル構造を有するよう、Fig. 1のような主要部を有する発生装置を試作した。

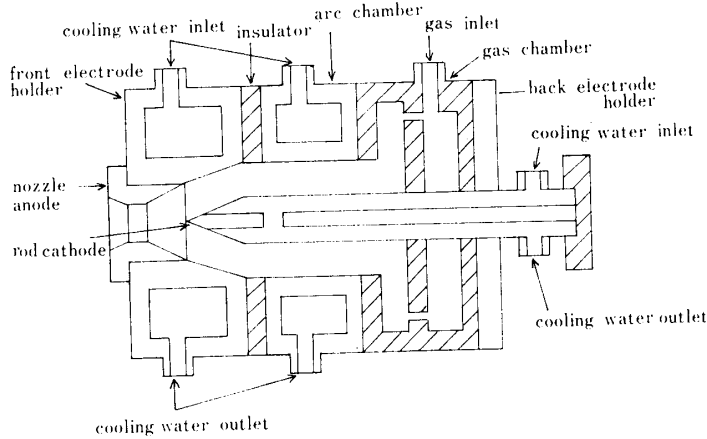


Fig. 1 Sectional view of plasma jet generator

発生器は、ノズル陽極部、アーク室部、陰極部に分けて水冷し、熱損失を測定する。陰極は、直径5mmの1.75%トリウム入りタングステン棒で、先端の削り角は44度である。ノズル形銅陽極は、入口テーパ0.7、出口テーパ1.0、の単孔式で、集束部直径6mmの仮称L-13、入口テーパ1.7、出口テーパ1.0、集束部直径2mmの仮称L-10、入口テーパ0.84、出口テーパ1.0、集束部直径2mmの仮称L-8のFig. 2に示す各種ノズルを使用した。集束ガス流路断面250mm²とし、99.99%アルゴン軸流を用い、アーク柱のシースを形成させる。

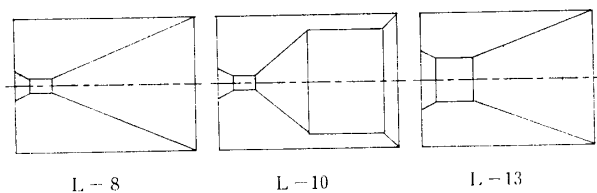


Fig. 2 Schematic view of various type nozzle electrode

実験における動作条件の範囲は、アルゴン流量5~20l/min、電極間隙4mm、アーク電流40~160A、対応するアーク電圧12~25V、平均温度2400~15000°K、である。

2・2 計 測

アーク電圧は、デジタル型トランジスタ電圧計により測定し、その変動を記録するとともに、4現象シンクロスコープDS 5305 Bにより、アークモードと

ジェットノイズの同時観測を行なった。また、ジェット側面像の写真測定により、コア部と外炎部の伸長度を求め、ジェット軸線より50cm離れた位置で、リオンNA-02型騒音計を用い、Fletcherの聴感特性に基づくA特性値と、音圧レベルを表示するC特性値とを測定した。発生器の入力、熱損失、および動作条件などより、プラズマ・ジェットの平均エンタルピ、平均温度、およびレイノルズ数は次のように求められる。

$$W_p = V_a I_a - JC / \Delta t \{ q_n (t_n - t_0) + q_a (t_a - t_0) + q_c (t_c - t_0) \} \quad (1)$$

$$H_m = 0.238 \times W_p / m \quad (2)$$

$$T_m = H_m / C_g + 273 \quad (3)$$

$$Re = \frac{Ud}{\nu} \quad (4)$$

ただし

W_p : プラズマ入力 (W)

V_a : アーク電圧 (V)

I_a : アーク電流 (A)

J : 熱の仕事当量 (4.18joul/cal)

C : 冷却水の比熱 (1 cal/g°C)

q_n, q_a, q_c : それぞれノズル陽極部、アーク室部、棒陰極部の冷却水量 (l)

t_u, t_a, t_c : 同上各部の冷却水出口温度

t_0 : 冷却水入口温度 (°C)

Δt : 測定時間 (60sec)

H_m : ジェットの平均エンタルピ (kcal/kg)

m : ガス質量流量 (g/sec)

T_m : ジェットの平均温度 (°K)

Re : ジェットのレイノルズ数

U : ジェットの平均流速 (m/sec)

d : ノズル集束部直径 (m)

ν : 動粘性係数 (m²/sec)

3. 結果と考察

発生器のアーク電圧対アーク電流の関係は、Fig. 3に示すように、各ノズルによって軽微な相異を生じるが、これは主としてノズル集束部のアスペクト比に基づくものと思われる。低流量の場合、40~100Aでは垂下特性を示し、100A以上では水平となる。ノズルL-13、流量5l/minに対する垂下率は0.015V/Aとなり、従来の発生器の値0.04V/Aよりかなり低下する。以下では、ジェットの層流条件を、(1)アークモード、(2)ノイズレベル、(3)レイノルズ数 (4)ジェット形状の

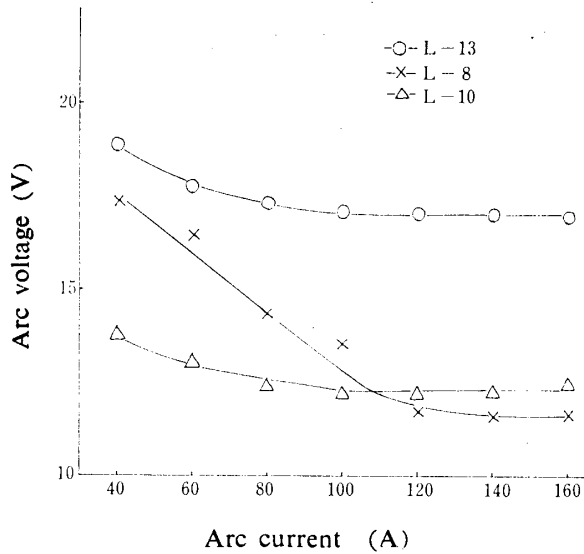


Fig. 3 Voltage-current characteristics of Argon plasma jet
gas flow rate ; 5 l/min
nozzle member ; L-13, L-8

点より考察を加える。

3.1 アークモード

プラズマ発生器のアークモードは、再点孤形、継続振動形、定常形に大別でき、ノズル特性と動作条件によって各モードに移行する⁴⁾。アルゴンジェットの場合、規則的振動モード、または定常モードを示す限り、巨視的には安定と見なしうる。Fig. 4にアークモードと対応するジェット形状を示す。低ガス流量では、アーク柱のゆらぎが少なく、陽極点の駆動力も微弱で、モードは定常形となる。この境界は、L-8, L-10, L-13の各ノズルについてそれぞれ8, 12, 6 (l/min)である。電圧振動振幅0.5V, 振動周波数0.33 KHzを示す。このとき、対応したノイズには10~16 KHzの振動現象が現われるが、電圧振動とは同期しない。これより低ガス流量におけるジェットノイズは、アーク放電路より離れたノズル、および噴出ジェット部分における気流の乱れに基づくことが推定できる。更に、ガス流量が増加して、乱流形に移行すると、アークモードは再点孤モード、振動モードを示し、電圧振動の振幅は1~4.0V; その周波数は2~

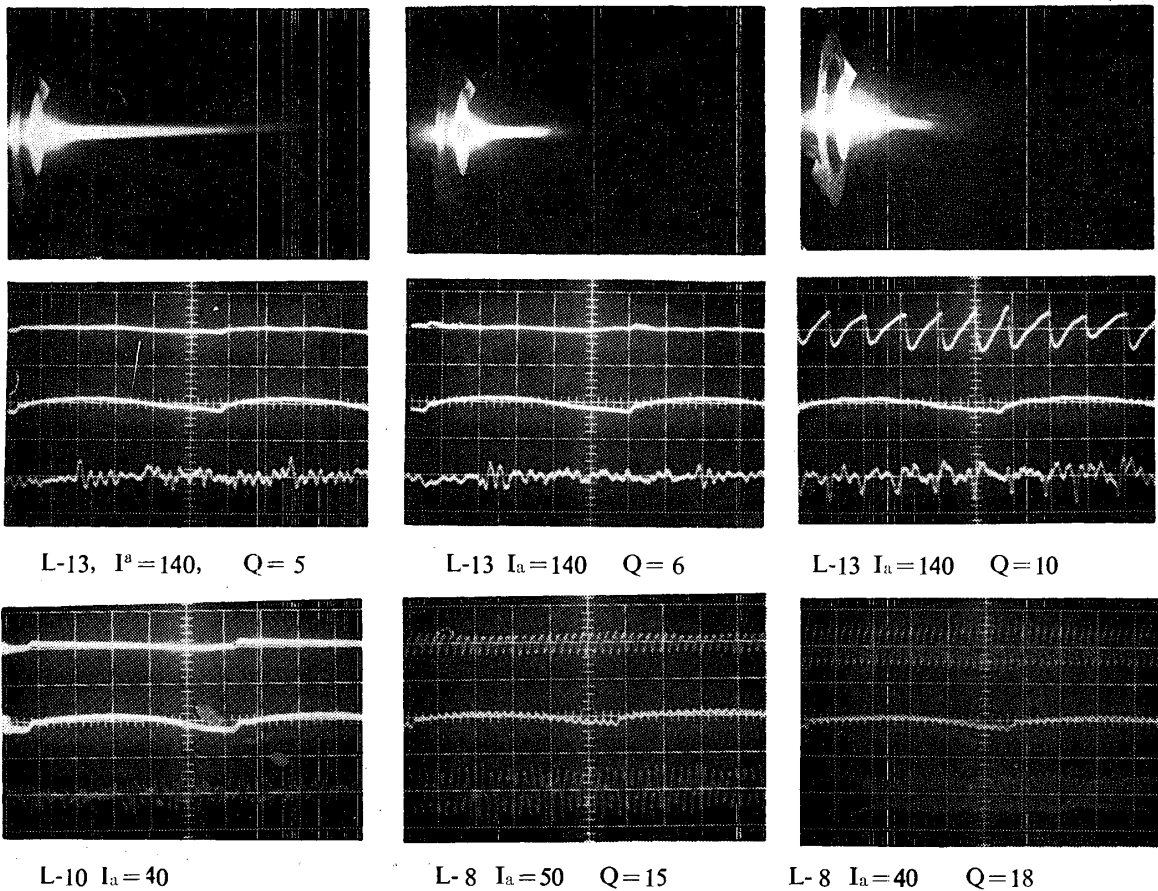


Fig. 4 Oscilloscope of arc mode and the photograph of Argon plasma jet
Q ; gas flow rate (l/min), nozzle number : L-10, L-8, L-13
upper trace ; V_r , arc voltage (V), gain 5V/div center trace ; I_r , arc current (A), gain 5V/div
lower trace : noise waveform, gain 5V/div sweep velocity ; 500 μ sec/div

20 KHzに増加する。このときノイズ振動周波数は16~21 KHzに上昇し、その振幅は4~4.5Vで、低流量の場合の12%増を示す。この領域では、電圧振動は同期したノイズ振動も見られる。この場合は、ジェット中に発生、消滅する乱渦流による圧力変動に、ノズル内面上での陽極点およびアーク陽極端部分の激しい運動によって生ずるノズル内部の圧力変動が、重ねられるものと考えられる。

3.2 ノイズレベル

ジェット気流による騒音の原因は、Lighthill 氏⁵⁾により、ジェット中に生ずる乱渦流によるとされている。ノイズ出力は速度の8乗に比例し、次式となる。

$$P_a \propto d^2 U^8 \quad (5)$$

ただし、

d : ノズル直径 (m)

U : ガス流速 (m/sec)

Williams 氏と Gordon 氏¹⁾によれば、ノズル部の乱流が重要な要素となる場合、速度の4乗に依存することが示されている。Fig. 5にジェットのノイズ特性を示す。ノズル L-8, L-10, L-13 に対し、それぞれガス流量 8, 10, 6 l/min 以下では、A 特性値は 75~85 [phon] を示すが、C 特性値はそれより 8~10 [phon] 大きくなり、聴覚による騒音値は低いが、ジェットの音圧レベルは、実際には高いことがわかる。

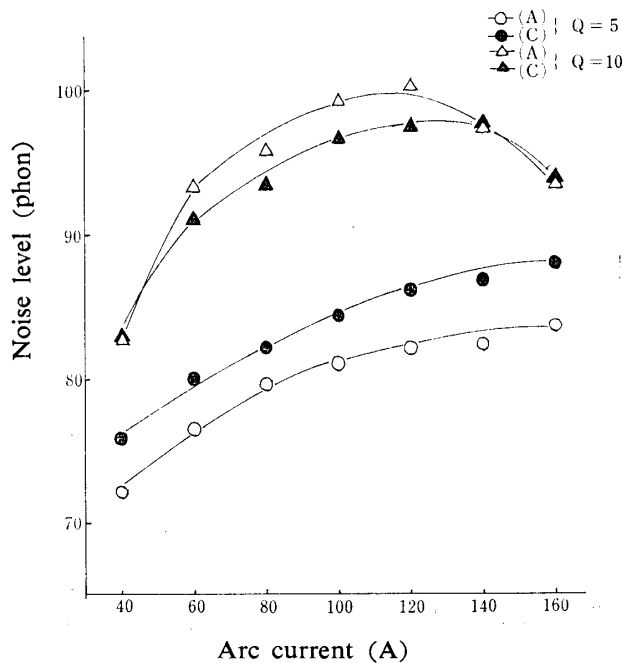
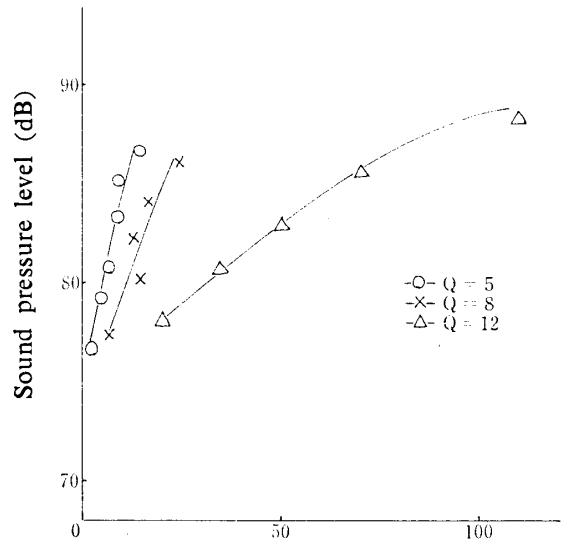


Fig. 5 Noise level-current characteristics of Argon plasma jet nozzle number ; L-13, Q ; gas flow rate (l/min)

また、このときジェットは、定常モードとなる。さらに流量を増加すると、アークモードは再点弧形となるが、この場合のA特性値とC特性値は接近し、時としてA特性値が大となる。

以上より、小流量では聴覚騒音値より、音圧レベルが相対的に高く、大流量となると、逆に低くなることが明らかである。Fig. 6は音圧レベルとジェット平均流速の関係である。ノイズの強度は速度の4乗に比例することが示されている。すなわち、ジェット・ノイズは、その流速と密接な関係を有している。



fourth power of mean jet velocity (m⁴/sec⁴)

Fig. 6 Effect of jet noise upon jet velocity nozzle number ; L-10, Q ; gas flow rate(l/min)

3.3 レイノルズ数

Fig. 7にレイノルズ数とアーク電流との関係を示す。レイノルズ数は、ガス流量の増加とともに上昇し、電流の増加につれて減少する性質を有している。一般にレイノルズによって流れの状態を判別し、乱流、層流などの範囲を定める。プラズマ・ジェットに対しても、アークモード、ノイズレベル、ジェット形状と対比させると、層流ジェットを与える限界レイノルズ数は、本発生器では、 $Re=200$ となる。 $200 < Re < 400$ の領域では、アークモードは定常モードを示し、ノイズのC特性値がA特性値より4~6 [phon]大きいことから見て、層流から乱流に至る遷移状態にあると考えられる。 $Re > 400$ では明らかに乱流ジェットを呈する。

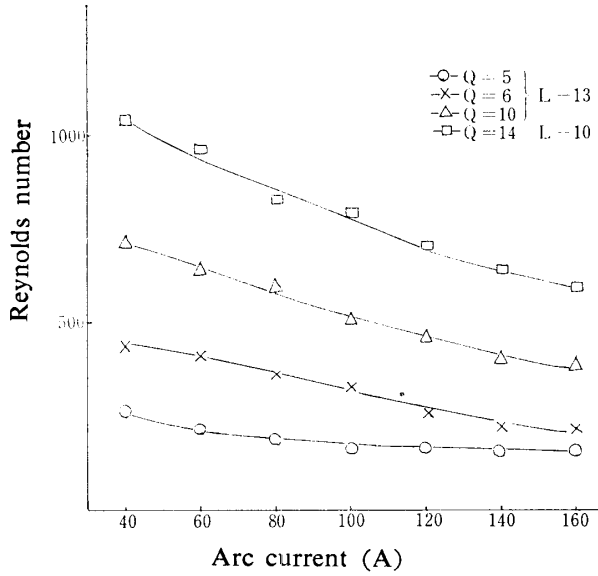


Fig. 7 Reynolds number-current characteristics of Argon plasma jet nozzle number ; L-13, L-10, Q ; gas flow rate (l/min)

3.4 ジェット

アーク電流増減に対するジェット長の変化の一例を示すと Fig. 8 のようになる。流量 5 l/min, 電流 80~160A の範囲で, 外炎部の伸長が特に著しく, その伸長率は1.2mm/A を示すが, コア部はほとんど伸長しない。乱流ジェットは, コア部に対し外炎部の伸びがほとんどなく, 全長も短くなるが, 層流ジェッ

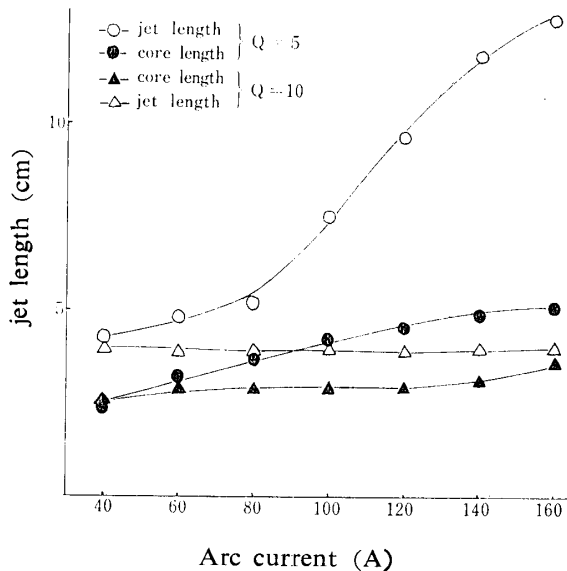


Fig. 8 Jet length-current characteristics of Argon plasma jet nozzle number ; L-13, Q ; gas flow rate (l/min)

トは外炎部の伸長が著しいため, ガス流量 5 l/min, 電流 160A で外炎部を含めたジェット全長は 12.8cm を示し, コア部の約2倍となる。この長さは同入力乱流ジェットの4倍以上である。

3.5 熱効率

発生器の熱効率をアーク電流に対して示すと Fig. 9 のようになる。熱効率は, 電流100A を越えると, 電流増加とともに減少してゆく。これは電流増加により, アーク柱径が増大するが, ガス流量が少ないため, 集束が不足し, 効果的なガス加熱が行なわれず, かってノズル損失が増加するためと考えられる。それ故ジェット平均温度は, 100A 以下では急激に上昇するが, 100A 以上になると上昇率が低下する。プラズマ生成に対する最適動作条件の一例を求めると, L-13ノズルを用いて, 流量 5 l/min, 電流 140A において達成され, ジェット全長11.8cm, コア部長4.9cm, レイノルズ数140, ノイズレベル82 [phon], 同振動周波数 10KHz を示す。なお, アークモードは定常形に属し, 熱効率は55%となり, 低ガス流量に対しては良好な値を示す。

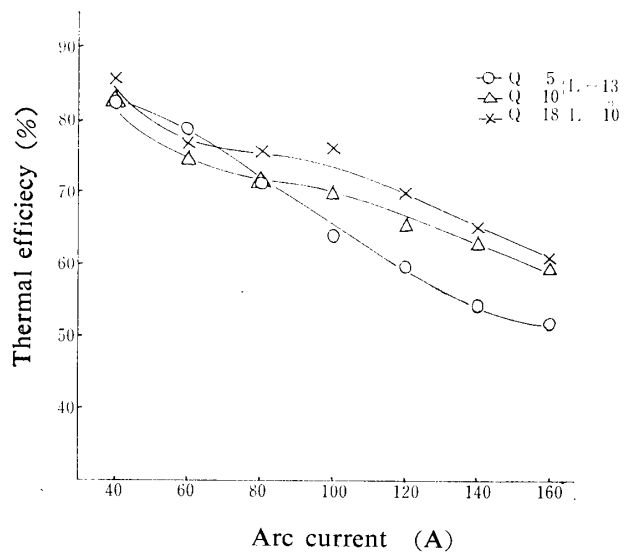


Fig. 9 Thermal efficiency-current characteristics of Argon plasma jet nozzle number ; L-13, L-10, Q ; gas flow rate (l/min)

4. あとがき

層流形プラズマ・ジェットについてアークモード, ノイズレベル, レイノルズ数, ジェット形状より検討を加えた。結果を要約すれば以下ようになる。

- (1) 層流ジェットは一般に定常モードを示し, 乱流

ジェットは再点弧、および継続振動モードを呈する。なお、乱流より層流に至る遷移領域は定常モードとなる。

(2) 層流ジェットにおいては、ノイズの音圧レベルが聴覚騒音値より相対的に高く、乱流ジェットになると、両者の差が失なわれ、時として逆転する。ジェットの発するノイズは、通常ジェット中に発生、消滅する乱流渦に基づくものであるが、乱流ジェットに移行すると、ノズル内面上のアーク陽極端部の運動に起因する圧力変動が、重なることが考えられる。ノイズ出力は、ジェット流速の4乗に比例する形で示される。

(3) アークモード、ノイズレベル、ジェット側面像を併せ解析すると、層流ジェットを与える限界レイノルズ数 $Re=200$ を得た。なお、 $200 < Re < 400$ は遷移領域、 $Re > 400$ では乱流ジェットを示す。

(4) 層流条件を満足する場合のジェットは、特に外炎部が伸長し、コア部の2倍に達する。また、同入力での乱流ジェットに比して、全長は約4倍を示す。

(5) 層流ジェットは一般に熱効率が低いが、最適動作条件を与えると55%にまで向上できる。

参 考 文 献

- 1) J. E. Ffowcs Williams & C. G. Gordon : AIAAJ., 3, 792 (1965)
- 2) G. R. Jordan : Nature, 210, 84 (1966)
- 3) F. Incropera & G. Leppert : AIAAJ., 4, 1087 (1966)
- 4) S. A. Wutzke, E. Pfender & E. R.G. Eikert : AIAAJ., 5, 708 (1967)
- 5) M. J. Lighthill : AIAAJ., 1, 1057 (1963)

(昭和47年12月15日受理)