

プラズマ流による熱伝達現象

佐伯節夫*・大崎 堅*

The Heat Transfer Phenomena by a Plasma Stream

Setsuo SAEKI and Katashi OSAKI

Abstract

An experimental investigation of the heat transfer flux of the supersonic plasma jet has been carried out in D. C. Argon plasma jet.

Measurements of the heat transfer flux was made in this flow with the calorimetric probe.

The heat transfer flux increased significantly with the arc current.

As the gas flow rate increased, the heat transfer flux was decrease until the arc current was 80A, but for over 80A, it was increase.

In the jet core, the reducing ratio of the axial heat transfer flux was large, but in the surface layer of jet core, it was small and constant independently of arc current.

The radial distribution of the heat transfer flux was symmetric about the jet center line, and the radial heat transfer flux was maximum value on the jet center line and suddenly reduced as departure from the jet center line. The reducing ratio of this was approximately twenty-two times the reducing ratio of axial distribution.

The integrated heat transfer flux near the nozzle exit plane was over 84% of the net arc input power, and when the arc current was 140A and Argon gas flow rate was 30l/min., it was maximum value of 89.8%.

1. ま え が き

アーク放電形プラズマ発生器は安定な高温高速プラズマ流の発生が可能であり、材料加工、材料試験、化学反応等の工学的分野におけるプラズマ発生源として広く実用化されている¹⁾。

プラズマジェットの有する物理的な諸量²⁾ (温度、密度、導伝度等)、噴出速度³⁾ およびジェットのゆらぎ⁴⁾、発生器における電極現象等⁵⁾ については多くの報告がなされている。しかし、高温高速の高圧プラズマ流内部のエンタルピ、圧力、速度、熱伝達量等の諸量に関しては測定の高難性のゆえに、僅かの実験結果^{6,7,8)}がえられているにすぎない。このような諸量は化学反応においては反応生成物の質や収率に影響し、材料試験に際しては材質の変化や昇華に直接関係するためプラズマ装置の実用上極めて重要な意味をもつ。

筆者らは、大気圧下におけるアルゴンプラズマ流の

熱伝達特性を求めめるため、カロリメトリックプローブを試作し、プラズマ流の軸方向および径方向に掃引して、その熱伝達量分布を測定した。

2. 実 験 装 置

2・1 カロリメトリックプローブ

高速度で噴出する高温度、高密度プラズマ流の熱伝達量を測定するためにFig. 1に示すようなカロリメトリックプローブ (以後プローブと称する) を試作した。本器は熱伝達検出部と整流フィンより、構成されており、熱伝達検出部は外径2.6mmφ、肉厚0.1mmの円筒状銅管とし、十分な水冷を行なうとともに、0.3mmφ銅-コンスタンタン熱伝対を埋設した。冷却水は上水道を使用し、流量310~320cc/min.を供給した。この冷却水流量とその温度上昇より検出部に對する熱伝達量を算出できる。

またプラズマ流の流線を乱さないように水冷した整

* 電気工学科

流フィンを熱伝達検出部後方に設置し、両者はテフロンで絶縁し相互の熱的、電気的影響をしゃ断した。フィン部の冷却水も上水道を用い、流量600cc/min.以上を供給した。なお整流フィンを加熱し、検出部に与える熱的影響を調べた結果、フィン部からの熱伝達は実験的には無視しうることを確認した。

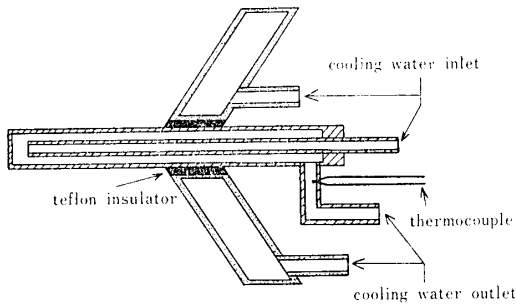


Fig. 1 Schematic view of calorimetric probe

2.2 プラズマジェット装置

本実験に使用したプラズマ流は、直径5mmの1.75%トリウム入タンゲステン棒陰極とノズル形銅陽極を有する直流ガス集束形プラズマジェット装置により発生したアルゴンプラズマ流である。

本プラズマ発生器はノズル陽極取り付け部、アーク室部、棒陰極取り付け部の3ブロックに分割し、各部をテフロンで絶縁の上、上水道(2~3l/min.)で冷却を行ない各部熱損失測定が可能である。

実験に使用したノズル電極はオリフィス径5mm、集束部アスペクト比1.4、ノズル出口テーパ1.8のテーパ形である。

作動ガスは純度99.99%アルゴンを用い、アーク柱に対して渦流を形成するように流入させる。

実験中のプラズマジェット発生条件を示すと、アルゴンガス流量20~40l/min. (アーク室流入圧力5kg/cm²), 電極間隙2mm, アーク電流40~140A, アーク電圧29.7~21.7V, アーク入力626~3150W, ジェット平均温度1570~8130°K, プラズマ流の平均エンタルピ161~974kcal/kg, プラズマフレーム長10~21mmである。

2.3 実験回路

実験回路をFig. 2に示す。アーク発生用直流電源の無負荷電圧は145Vで安定抵抗を挿入する。

熱伝達測定点はジェットの径方向R(ジェット軸線に対して垂直方向)と、ジェットの軸方向L(ジェット軸線方向)によって定める。プローブはその検出部先端をノズル前面に正対させるように設置した。また

プローブ本体の温度上昇を埋設した熱伝対で検出し、定常状態への移行時間を判別した。本プローブの場合5秒であった。ジェット長は約20mmで、ノズル集束部直径が5mmであるため、軸方向の測定点はL=5, 10, 15, 20, 30mmの各点とし、径方向は0, 1, 2, 3mmの各点とした。

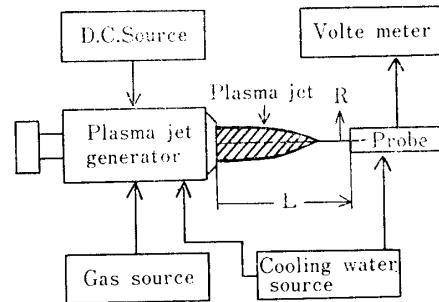


Fig. 2 Experimental circuit

プローブへの熱伝達量を算出するにあたり、本実験条件でのジェットの平均流速は亜音速以上であり、プローブの検出部先端付近がよどみ点となり、その下流側には衝撃波の発生が観測されるので検出部側面の熱しゃ断層と仮定して、次式より熱伝達量を求めた。

$$H = C \frac{q \cdot \Delta T}{\Delta t \cdot S} \quad (1)$$

- ただし
- H : 熱伝達量 [cal/s · mm²]
 - C : 水の比熱 [1 cal/g · °C]
 - q : 冷却水量 [cc]
 - ΔT : 冷却水の温度上昇 [°C]
 - Δt : 測定時間 [s]
 - S : プローブ前端の断面積 [mm²]

3. 実験結果と考察

3.1 プラズマジェットの諸特性

本実験に使用したノズルを用いたプラズマジェットの諸特性は以下のとおりである。

アーク電圧対電流の関係はFig. 3のように一般に垂下特性を示す。アーク電流80A付近を境界として小電流領域では垂下率が0.05~0.06V/Aと大きく、大電流領域では0.01V/Aとなりほぼ水平となる。ガス流量が増加すると小電流領域での垂下率は増大する。ガス流量増加に対するアーク電圧上昇率は、0.2~0.3V/lであり、アーク入力増大の比率は大電流領域では1l当り30Wを越えるが、小電流領域ではその1/2に達しない。

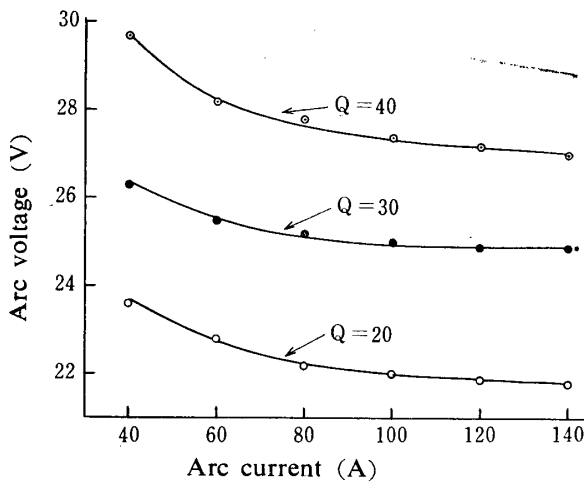


Fig. 3 Characteristics of plasma jet generator
Q : Argon gas flow rate ℓ/min .

発生器に与えられる全電気入力中正味のアーク入力 (全入力より各部熱損失を取り去った値) の占める比は、プラズマ生成の熱効率となるが、本実験装置においては60~74%であり、ガス流量の増大とともにやや上昇する。また正味のアーク入力とガスの質量流量より求められるジェットのアーク平均エンタルピはFig. 4に示すように、アーク電流増加に対し直線的に上昇し、上昇率はアルゴン流量20 ℓ/min . に対し7.23Kcal/kg \cdot Aとなり、流量40 ℓ/min . に対しては4.71Kcal/kg \cdot Aとなる。

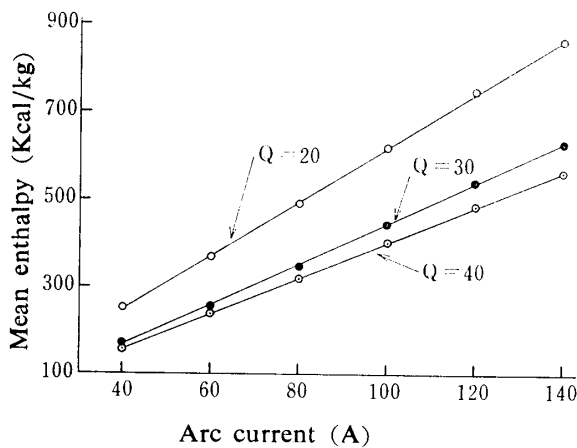


Fig. 4 Mean enthalpy for plasma jet generator
Q : Argon gas flow rate ℓ/min .

プラズマジェットに含まれるゆらぎは、ジェット側面像の高速度写真、陽極点およびアーク柱の運動を示すアーク電圧波形、ジェットの光学的変化を示す光出力波形により解析した。本実験条件下ではジェットの軸方向の伸縮、径方向の偏向とも概ね許容範囲内に収

まり安定⁴⁾であり、特に大電流領域におけるプラズマジェットはゆらぎ量が少なく、よく伸長する。

3・2 プラズマ流からの熱伝達特性

3・2・1 熱伝達量の軸方向分布 プローブをジェット軸線上 $L=5\text{ mm}$ にセットした時の熱伝達量対アーク電流の関係をFig. 5に示す。高ガス流量においてアーク電流が上限に近づく飽和の傾向を示すが、その他は一般に電流増加とともにほぼ直線的に上昇する。この上昇率は平均エンタルピの電流依存性とほぼ相似形をなす。すなわちジェットの含有エネルギーにほぼ比例した熱伝達量が得られることが示されている。つぎに熱伝達量とガス流量の関係をみると、アーク電流80A付近を境界として、これより小電流領域では、ガス流量を増加した場合熱伝達量は低下するが、大電流領域では、逆に熱伝達量が増える傾向を示す。この現象はプラズマ流の平均エンタルピと流速に關係することは推察できるが、詳しくはノズル集束部の構造、アーク電流とこれによって決まるアーク柱直径と陽極点の形成状態、アーク柱をめぐる冷却ガス流の流速と圧力分布等によって異なるものと考えられる。アーク電流80A以下の領域においては、アーク柱が弱勢力で不安定な放電モードを示すことは従来の実験結果⁴⁾より認められている。このような状態でガス流量を増加すると逆にアーク柱の集束の乱れを誘い、プラズマ流に熱的ゆらぎとなって伝播す結果上記の相違を生ずるものと考えられる。

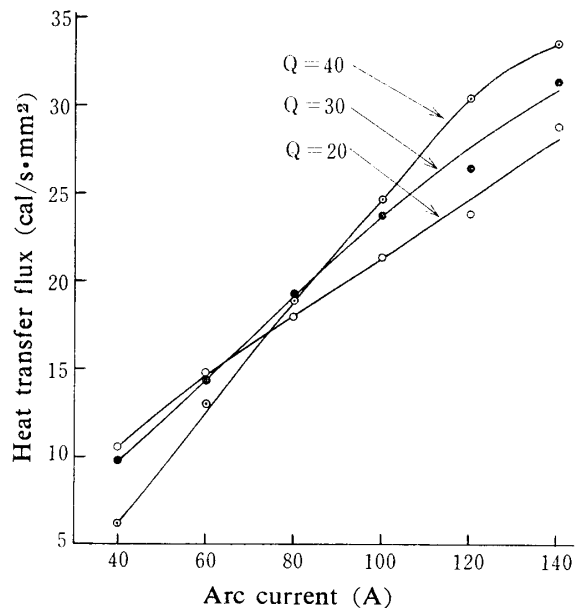


Fig. 5 Heat transfer flux-current characteristics
Q : Argon gas flow rate ℓ/min .
Radial position : 0 mm
Axial position : 5 mm

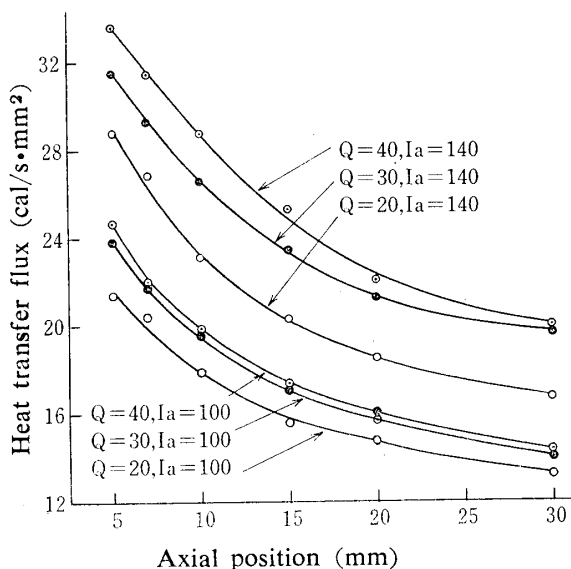


Fig. 6 Axial heat transfer flux distribution
 Q : Argon gas flow rate $l/min.$
 Ia : Arc current A
 Radial position : 0 mm

アーク電流100A, 140A に対する熱伝達量の軸方向分布をFig. 6に示す。アーク電流およびガス流量により、それぞれ異なった特性を有しているが、下流側に進むにつれて、その値が減衰する傾向は一致している。特にアーク電流を100A一定とした場合ガス流量30および40 $l/min.$ に対する熱伝達量はほぼ等しくなる。熱伝達量の減少率はアーク電流100Aに対して $L=10mm$ 付近、140Aに対して $L=15mm$ 付近を境界として異なり、前者に対して約 $0.42cal/s \cdot mm^2 \cdot mm$ 、後者に対して約 $0.55cal/s \cdot mm^2 \cdot mm$ となり、電流値が大きい程大きくなるが、 $L=20mm$ 以上では両者とも等しく $0.17cal/s \cdot mm^2 \cdot mm$ である。この境界点は、それぞれのアーク電流に対するジェットの写真測定より求めたジェットコア部長13.1mm, 15.4mmと一致する。また $L=20mm$ 以上はジェットの外炎部に相当する。以上の結果より、ジェットコア内部での熱伝達量の軸方向減少率は $R=1mm$ 以内にとった径方向減少率の約1/10となり、外炎部での減少率はアーク入力、ガス流量に関係なくほぼ一定となることが判る。

3・2・2 熱伝達量の径方向分布 分光測定により求めたプラズマジェットの温度分布は、通常軸対称に示されるが、熱伝達量の径方向分布もジェット軸線に対して軸対称形となる。Fig. 7はアーク電流140Aの場合、 $L=5mm$ の位置における熱伝達量の径方向分布の半面を示したものであるが、熱伝達量はジェッ

ト軸上が最大となり、ガス流量20, 30, 40 $l/min.$ に対してそれぞれ28.8, 31.5, 33.6 $cal/s \cdot mm^2$ となる。軸からの径方向距離が増大するにつれ熱伝達量は減少し、減少率は $R=1mm$ 以下で約 $4.5cal/s \cdot mm^2 \cdot mm$ 、 $R=1 \sim 2mm$ で約 $7.0cal/s \cdot mm^2 \cdot mm$ 、 $R=2 \sim 3mm$ で約 $4.1 \sim 3.5cal/s \cdot mm^2 \cdot mm$ となる。 $R=1 \sim 2mm$ で最大の傾きを示すが、この区域は分光測定より求めたジェット内部の温度分布曲線の勾配が最大となる領域でもある。 $R=2 \sim 3mm$ の範囲はジェット外炎部に相当し、軸方向下流に対する減少率と比較すると約22倍となり、径方向への熱伝達損失の大なることを示している。またガス流量を増加すると正味のアーク入力が増大し、ジェット長およびジェット径も増大するため、 $R=2mm$ 以上で熱伝達量およびその傾きにガス流の影響が顕著となる。

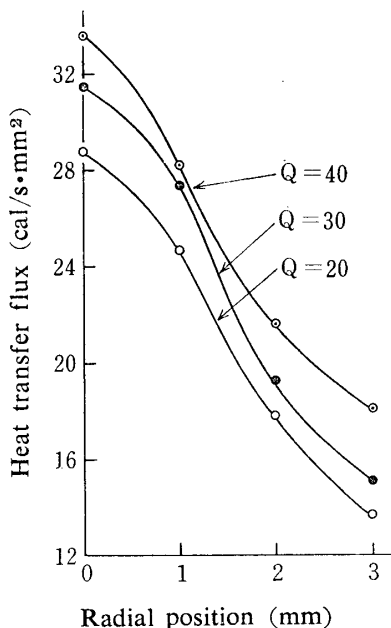


Fig. 7 Radial heat transfer flux distribution
 Q : Argon gas flow rate $l/min.$
 Axial position : 5 mm
 Arc current : 140A

熱伝達量の径方向分布より、区分求積法を用い $L=5mm$ の点の断面における全熱伝達エネルギー W_h を求めるとTable 1のように示される。正味のアーク入力 W_p の約84%以上がプローブ側に伝達されており、アーク電流が増大すると W_h/W_p の値は増大する。また特定のガス流量に対して最高の W_h/W_p が与えられることがわかる。この値は本プラズマ発生器を加工用トーチとして使用する場合最も効率よく物体加熱を行ないうる最適動作条件を与えることとなる。

Table 1 Plasma flame power comparison

Argon gas flow rate (l/min.)	Arc current (A)	Net arc input : W_p (KW)	Integrated heat transfer flux : W_h (KW)	W_h/W_p (%)
20	100	1.54	1.35	87.7
	140	2.43	2.17	89.3
30	100	1.65	1.44	87.3
	140	2.66	2.39	89.8
40	100	2.00	1.68	84.0
	140	3.15	2.67	84.8

Axial position : 5 mm

本実験における最適動作条件はアーク電流 100A に対してはガス流量 20l/min., 140A に対しては 30l/min. となり, 最高の W_h/W_p を示す動作条件はガス流量 30 l/min., アーク電流 140 A, アーク電圧 24.9V, $W_p=2.66KW$, ジェット平均エンタルピ 628Kcal/kg, 熱効率 67.4%, ジェット平均温度 5340°K, ジェット平均流速 534m/s, $W_h/W_p=89.8\%$ であった.

4. ま と め

以上プラズマ流の物体加熱に際しての熱伝達特性を測定した結果, アルゴンジェット内の熱伝達量分布を求めた.

要約すると次のとおりである.

1) 熱伝達量はアーク電流を増大すると, ほぼ直線的に増大する.

アーク電流 80A 付近を境界として熱伝達量に対するガス流量の影響は逆転し, 小電流領域では低流量が, 大電流領域では高流量が熱伝達量を増加させる.

2) アーク電流を 100A 一定とした場合, ガス流量 30 および 40 l/min. に対する軸方向熱伝達量分布特性は等しくなる.

熱伝達量の軸方向減少率はジェットコア部と外炎部で異なり, 前者の方が大となる. またコア部ではアーク電流が大きい程その傾きは大となるが, 外炎部ではアーク電流に依存せず一定となる.

3) 熱伝達量の径方向分布は, 温度分布と同様に

ジェット軸線に対して軸対称形となる. 熱伝達量は軸線上で最大となり, 半径が増大するにつれて減少し, 半径 1 mm から 2 mm の範囲での減少率が最大となり, 約 7.0 cal/s·mm²·mm である. ジェット外炎部での減少率は, 軸方向減少率の約 22 倍となり, 径方向での熱伝達損失が大きいことを示している.

4) 熱伝達量の径方向分布より, ノズル出口前方 5 mm の点のジェット断面に伝達される熱伝達エネルギーを求めると, アーク入力約 84% 以上となり, 最適動作条件ではアーク入力約 89.8% が伝達される.

常に御指導を賜わる九州大学赤崎正則教授に厚く謝意を表わす. また実験に協力頂いた昭和 47 年度卒業研究学生諸氏に感謝する.

参 考 文 献

- 岡田, 荒田: プラズマ工学 (昭和 40) P. 337
- 例えば H. N. Olsen: *Phy. Fluid*, 2, 614 (1959)
- 例えば I. Kimura & A. Kanzawa: *AJAA J.*, 1, 310 (1963)
- 佐伯, 大崎: 昭 46 電気四学会九州支連論文集, 202 (1971)
- E. R. G. Eckert & E. Pfender: *WRS*, 10, 471 (1967)
- A. Witte, et. al.: *AIAA Paper*, No. 68-135 (1968)
- J. C. Kroutil: *AIAA J.*, 5, 1503 (1967)
- D. W. Esker: *AIAA J.*, 5, 1504 (1967)

(昭和 48 年 4 月 16 日受理)