

ハイブリッド方式によるプラズマの分光学的考察

佐伯節夫*・大崎 堅*・崎山智司**・山下 浩**

Spectroscopic Consideration of the Plasma generated by Hybrid Method

Setsuo SAEKI, Katashi ŌSAKI, Satoshi SAKIYAMA and Hiroshi YAMASHITA

Abstract

This report describes the spectroscopic consideration about the generative process of hybrid plasma which was generated by applying the damped pulsed magnetic field to DC plasma jet using the induction coil. DC plasma jet used in experiment was generated at arc current 100A and argon gas flow rate 3 l/min. The frequency of the damped pulsed magnetic field was 60.5KHz and the maximum strength of it was 700G. The spectral line intensity from the hybrid plasma and its time variation were measured by a spectroscope with photomultiplier, then the spectroscopic temperature, the electron density and their time variations were obtained.

The radial distribution of the increment of the spectral line intensity had off-axis peak characteristics. As the time (t) measured from the start of the damped pulsed magnetic field proceeds, the increment of the spectral line intensity was increased and it reached maximum at $t=100\mu\text{sec}$. The ratio of it was the largest value in the region of $50\sim 70\mu\text{sec}$.

The temperature of the hybrid plasma had the maximum value on the nozzle center axis and with increasing the distance (r) from the nozzle center axis, it was decreased. And also, the temperature of the hybrid plasma was increased rapidly at the same time interval as described above and the increment of it became especially large in outer region of $r=0.3\text{mm}$. At $t=100\mu\text{sec}$, the temperature was about 12,400K at $r=0\text{mm}$ and about 7,200K at $r=0.5\text{mm}$, so that the temperature of the hybrid plasma was higher than that of the base plasma by 680K at the former position and by 2,400K at the latter position.

At $t=100\mu\text{sec}$ and $r=0.5\text{mm}$, the electron density of the hybrid plasma was $8.26\times 10^{20}\text{m}^{-3}$, and it was 280 times as much as that of the base plasma.

1. まえがき

直流プラズマジェットに対し誘導コイル^{1),2)}や放射状電極^{3),4)}を用いて商用周波や高周波の交流入力を追加するハイブリッド方式のプラズマジェット装置では、発生ジェットの熱出力やその温度分布、ジェット形状などの特性改善が可能となる。特に誘導コイルを用いた場合、ジェットに汚染を与えず効果的な入力追加が行えるため化学反応^{5),6)}の分野に応用する試みが成されている。

ハイブリッド方式によるプラズマ加熱に際しては、異種入力追加によるプラズマの2次的生成過程の解明が重要である。すなわち、プラズマ内部の追加入力の分布や温度分布、粒子密度分布などの入力追加に伴う

変化を求め、入力混成の効果を明らかにする必要がある。

本報告では、直流プラズマジェットに減衰パルス加熱を与えたハイブリッドプラズマに対し分光学的方法を用いてスペクトル線強度及びその時間的変化を求め、これより得られた温度及び粒子密度などプラズマ基本量とその時間的変化よりプラズマの生成過程を調べたので以下にその一部を報告する。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 ハイブリッドプラズマ装置

本実験に使用したハイブリッドプラズマ装置は、Fig. 1に示すように前面フラット形ノズルを有する直流ガス集束形プラズマ発生器のノズル出口に入力追加用誘導コイルを設けており、ノズルから噴出した直流プラズマジェットに対しパルス加熱を与える。

* 電気工学科

** 大学院電気工学専攻

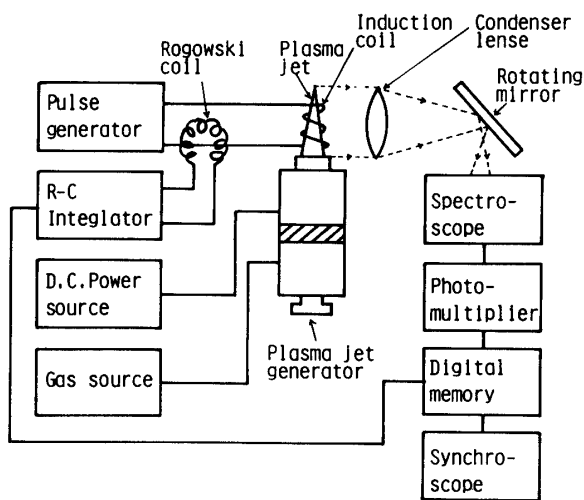


Fig.1 Experimental circuit.

誘導コイルとしては巻数3ターン、内径30mm、軸長14mmのソレノイドコイルを用い、その軸線とノズル軸線が一致するように配置し、その入口端面がノズル出口から1.3mm離れた位置においた。

パルス磁界発生装置、パルス電流及びパルス磁界の測定法などについては先に述べたとおりである。

パルス磁界はFig.2に示すようにパルス電流と同相の減衰振動となり、第1半周期で磁束密度が最大となる。本実験におけるパルス磁界発生条件は、コンデンサ5 μ F、充電電圧10KVで、対応するパルス磁界の最大磁束密度700G、周波数60.5KHz、減衰時間150 μ secである。また誘導コイル内のパルス磁束密度分布は、誘導コイル中心軸から半径4mm以内では一様であることを確認した。

直流ガス集束形プラズマ発生器はアーク室中心軸上

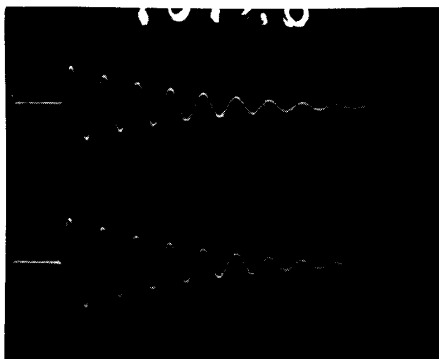


Fig.2 Oscillograms of pulsed current and produced magnetic field.

Sweep velocity: 20 μ sec/div,

Upper trace: Pulsed current; 9,650A/div,

Lower trace: Magnetic field: 584G/div

に保持された直径3mmの2%トリウム入りタングステン棒陰極とこれに対向する内径5mm、集束部長7mmのノズル形陽極を有し、両電極間に点弧したアークをアルゴンガスによって集束安定化している。

ハイブリッド加熱のベースプラズマ流としての直流プラズマジェット発生条件は電極ギャップ長2mm、アルゴンガス流量3l/min、アーク電流100Aで、対応するアーク電圧14V、正味アーク入力980W、ジェット平均温度7,730K、レイノルズ数97、ジェットコア部長5.7mm、ジェット径2.67mmである。

Fig.3はノズル軸線上で、出口から1mm離れた位置におけるベースプラズマ断面内の分光学的温度及び導電率分布を示す。なお、導電率は部分電離気体に対するカントロピツの理論⁸⁾と分光学的温度より算出したものである。温度はジェット外周部に向うにつれて低下し、軸上で最大の11,700Kを示すが、軸線からの距離 $r=0.5$ mmの位置で5,200Kに低下する。一方、導電率も軸上で最大の20.7S/cmを示すが、 $r=0.5$ mmより外周部では軸上の導電率の1/10,000以下に低下する。

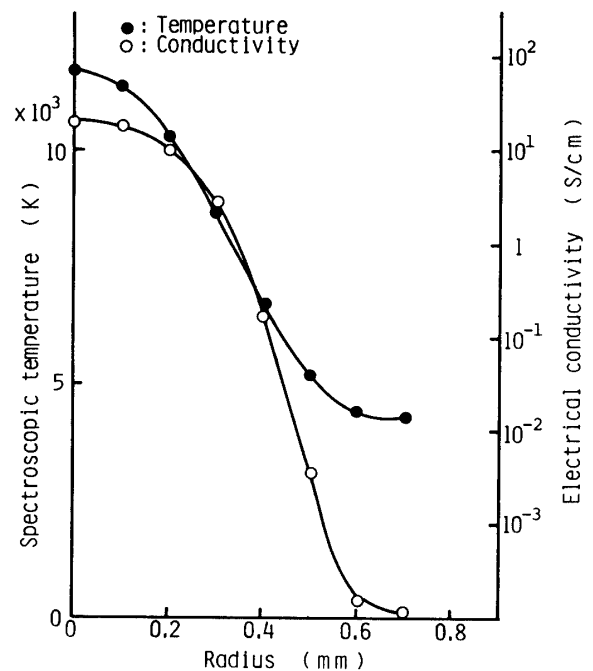


Fig.3 Radial distribution of spectroscopic temperature and electrical conductivity measured 1mm from the nozzle exit in the plasma jet. Argon gas flow rate: 3l/min, Arc current:100A

2.2 実験方法

実験回路のブロック図をFig.1に示す。アーク発生用電源は無負荷電圧140V、容量50KVAのシリコン整流器で、安定抵抗(0.14~30 Ω)によって垂下特性

を与えている。

ハイブリッドプラズマ各点からの放射光を集光レンズ及び回転鏡を通して光電子増倍管 (1P28) を付設した島津平面回折格子分光器 (焦点距離 1,000mm, 逆分散度 16.6 Å/mm) の入射スリット上に投影し, スペクトルとその強度を求めた。スペクトル線強度は発生パルス磁界の強度を示すパルス電流波形と共にデジタルメモリ (岩通製 DM-703) に記憶させた後シンクロスコープによって記録した。

発生したハイブリッドプラズマの放射光強度は, ノズル軸線上において出口から 1mm 離れた位置で最大値を示しており, この位置におけるプラズマが入力追加の影響が最も顕著である。本実験では, 前述の位置におけるノズル軸線に垂直なプラズマ断面からの放射を分光器に入射させた。

ハイブリッドプラズマ放射光のスペクトルは 3,940 Å から 4,520Å の範囲に分布し, スペクトル線は中性粒子線 (ArI) が優勢である。従って本実験ではエネルギー準位差及びスペクトル線強度の面より ArI 4,159 Å と ArI 4,259 Å の2種類のスペクトル線を選定し, パルス磁界印加後の両スペクトル線強度及びその時間的变化を求め, 温度, 粒子密度などプラズマ基本量とその時間的变化を調べた。

3. 実験結果と考察

Fig. 4 はプラズマジェットに減衰パルス加熱を与えた場合のパルス電流及び波長 4,159 Å のスペクトル線強度の波形を示す。スペクトル線強度はパルス磁界印加時から時間 $t=30\mu\text{sec}$ 遅れて増加し始め, 100 μsec 経過すると第1のピーク値に達する。引き続き第2, 第3のピーク値が現われるが, これらはノズル内部に

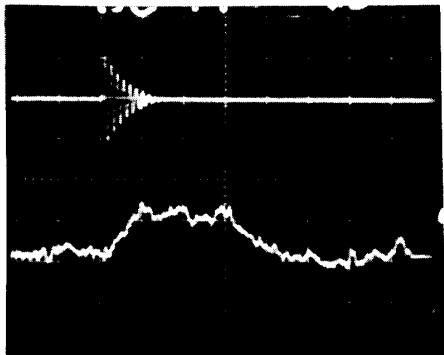


Fig.4 Oscillograms of pulsed current and spectral line intensity of the hybrid plasma.
Sweep velocity: 100 $\mu\text{sec}/\text{div}$,
Upper trace: Pulsed current; 9,650A/div,
Lower trace: Spectral line intensity; arbitrary unit

おけるパルス磁界の影響と考えられるため, ここでは第1のピーク値に達するまでの過程について解析を行った。このような一連のスペクトル線強度を読みとり, アーベル逆変換を行ってハイブリッドプラズマ断面内におけるスペクトル線強度を求め, これより線強度比法を用いて温度を算出した。なお, 本実験で得られるハイブリッドプラズマは光学的に薄く, 軸対称であり, 局所熱平衡状態であるものと仮定した。

3.1 スペクトル線強度

Fig. 5 はスペクトル線強度の増加分の径方向分布を示す。スペクトル線強度の増加分 (ΔI_p) は off-axis peak 特性を呈しており, ΔI_p のピーク値を示す径方向の位置はスペクトル線の波長によって異なり, $t=100\mu\text{sec}$ において波長 $\lambda=4,159\text{\AA}$ で $r=0.3\text{mm}$, $\lambda=4,259\text{\AA}$ で $r=0.5\text{mm}$ であり, 軸上の ΔI_p よりそれぞれ 2%, 14%大となる。また, この ΔI_p は同じ径方向位置におけるベースプラズマから放射される $\lambda=4,159\text{\AA}$ 及び $\lambda=4,259\text{\AA}$ のスペクトル線強度のそれぞれ 38.6%, 59.0%に相当する。 $\lambda=4,259\text{\AA}$ の ΔI_p は $\lambda=4,159\text{\AA}$ のそれに比べ軸線から離れた位置でも低下の割合が少なく, この波長に対する放射発生粒子密度が増大していることを示す。

一方, ΔI_p は入力追加後時間の経過に伴って増大し,

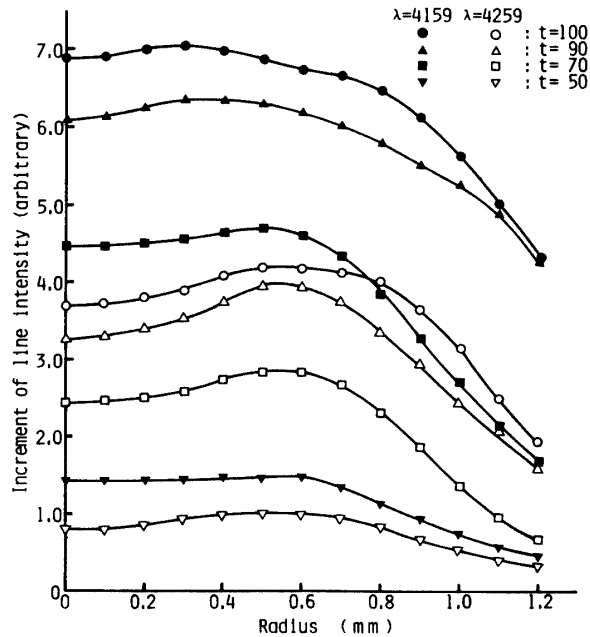


Fig.5 Radial distribution of increment of spectral line intensity measured 1mm from the nozzle exit in the hybrid plasma.
Argon gas flow rate: 3l/min, Arc current: 100A,
 t : Time measured from the start of the damped pulsed magnetic field (μsec)

$\lambda=4,159\text{\AA}$, $\lambda=4,259\text{\AA}$ のいずれの場合も ΔI_p は $t=50\mu\text{sec}$ から $70\mu\text{sec}$ の範囲において急激に増加し、その増加率は $r=0.5\text{mm}$ において観測すると、 $\lambda=4,159\text{\AA}$ では 0.161 任意/ μsec , $\lambda=4,259\text{\AA}$ では 0.092 任意/ μsec となり最大値を示す。 $t=50\mu\text{sec}$ 以下及び $t=70\mu\text{sec}$ を越えると両波長とも ΔI_p の増加率は先に示した最大値の約 $1/2$ に低下する。これよりプラズマ加熱は、 $t=50\mu\text{sec}$ から $70\mu\text{sec}$ に至る $20\mu\text{sec}$ の期間内で行われ、より高温のプラズマが生成されているものと考えられる。

また、両波長の ΔI_p がピーク値を示す径方向位置は、入力追加後時間の経過につれて軸線に近づく。一例を示すと、 $\lambda=4,159\text{\AA}$ において、 $t=50, 70, 100\mu\text{sec}$ での ΔI_p がピーク値を示す径方向位置は $0.6\text{mm} \rightarrow 0.5\text{mm} \rightarrow 0.3\text{mm}$ と軸線に向かって移行している。これよりプラズマ加熱は、入力追加後まずプラズマ周辺部で起こり、その後時間の経過と共にプラズマ中心部に向うものと考えられる。

3.2 分光学的温度

Fig. 6 はハイブリッドプラズマの分光学的温度の径

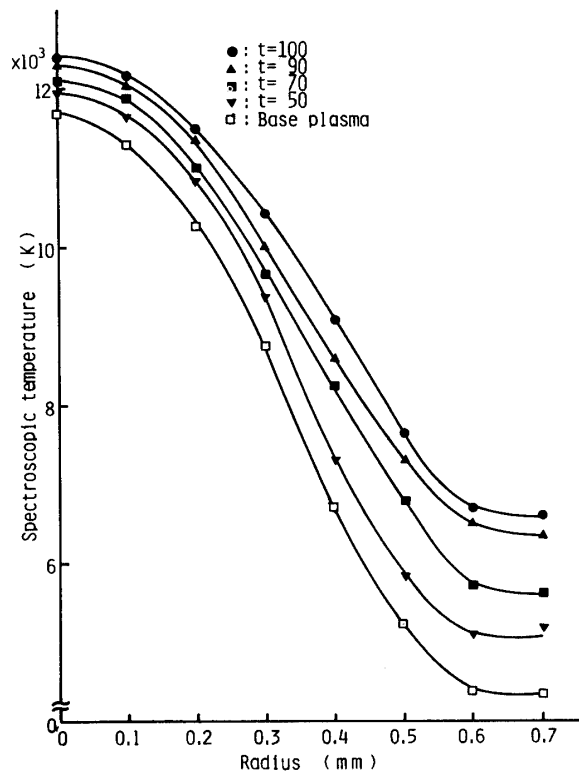


Fig.6 Radial distribution of spectroscopic temperature measured 1mm from the nozzle exit in the hybrid plasma.

Argon gas flow rate: 3l/min , Arc current: 100A ,
 t : Time measured from the start of the damped pulsed magnetic field (μsec)

方向分布を示す。温度は軸上で最大値を示し、軸線から径方向に離れるにつれて温度は減少する。特に、 $r=0.2\text{mm}$ より外周部では急激な温度低下を生じ、その低下の割合は $t=50, 70, 90, 100\mu\text{sec}$ に対してそれぞれ $16,700, 14,000, 13,500, 12,900\text{K/mm}$ となり、入力追加後時間の経過と共にその割合は小となる。また、温度は入力追加後時間の経過と共に上昇するが、その上昇率は r が大となるにつれて増大し、最大の上昇率は ΔI_p が急増する時間の範囲に対応し、 $t=50\mu\text{sec}$ から $70\mu\text{sec}$ に至る $20\mu\text{sec}$ の期間内で生じる。すなわち、 $r=0.5\text{mm}$ の位置でハイブリッドプラズマとベースプラズマの温度差は $t=50\mu\text{sec}$ では 630K , $t=70\mu\text{sec}$ では $1,960\text{K}$ となり、 $r=0\text{mm}$ の軸上における両者の温度差と比較するとそれぞれ 2.6 倍、 4 倍に相当する違いが生じている。

なお、 $t=100\mu\text{sec}$ でのハイブリッドプラズマの温度は軸上で $12,400\text{K}$ とベースプラズマの温度より 680K 高く、 $r=0.5\text{mm}$ の位置で $7,650\text{K}$ に低下するが、この温度はベースプラズマにおいては $r=0.36\text{mm}$ の位置に相当する。

以上より、プラズマジェットにパルス加熱を与える

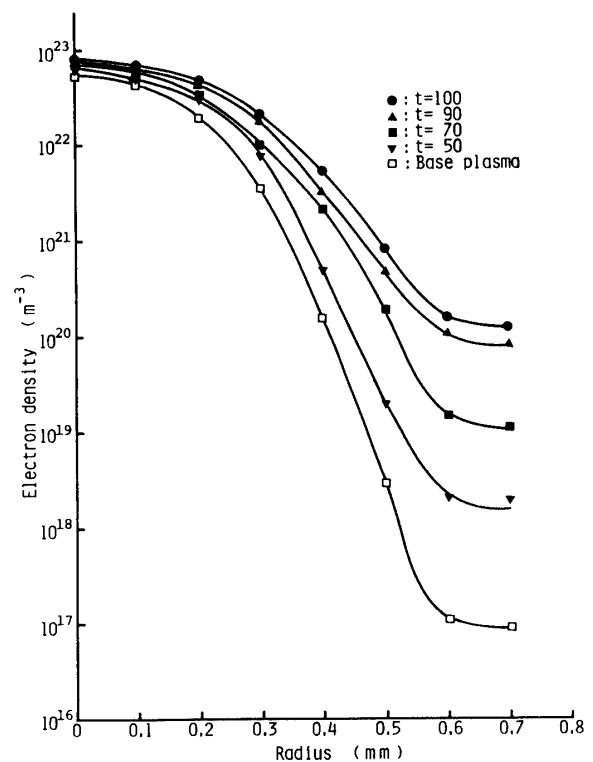


Fig.7 Radial distribution of electron density measured 1mm from the nozzle exit in the hybrid plasma.

Argon gas flow rate: 3l/min , Arc current: 100A ,
 t : Time measured from the start of the damped pulsed magnetic field (μsec)

と、入力追加後時間の経過と共にジェット外周部の温度が急上昇し、高温領域が拡がることがわかった。

3.3 電子密度

ハイブリッドプラズマの電子密度の径方向分布は、Fig. 7 に示すように温度の径方向分布の特徴と同様な傾向を示す。すなわち、 $t=100\mu\text{sec}$ において電子密度は軸上で 7.7×10^{23} 個/ m^3 、 $r=0.5\text{mm}$ の位置で 8.26×10^{20} 個/ m^3 となり、それぞれ対応する位置におけるベースプラズマの密度の1.5倍、280倍に相当する。

また、電子密度も温度が急上昇する時間に応じて急増し、 $r=0.3\text{mm}$ より外周部においてその増加が著しく、 $r=0.5\text{mm}$ の位置では $t=70\mu\text{sec}$ での電子密度は $t=50\mu\text{sec}$ での密度の約10倍の 1.88×10^{20} 個/ m^3 を維持している。

4. むすび

直流プラズマジェットに減衰パルス磁界を与えたハイブリッドプラズマ内部の加熱特性を分光学的方法を用いて調べ、次のような結果を得た。

- (1) スペクトル線強度の増加分は off-axis peak 特性を示し、入力追加後時間の経過と共にその値は増大し、さらにそのピークを与える位置は軸線に近づく。また波長 $4,259\text{\AA}$ のスペクトル線強度の増加分は、波長 $4,159\text{\AA}$ のそれと比較して軸線から離れた位置での低下の割合が少ない。
- (2) スペクトル線強度の増加分は入力追加後時間 $50\mu\text{sec}$ から $70\mu\text{sec}$ の範囲において急激に増加し、その増加率は軸線からの距離 0.5mm の位置において最大値を示す。
- (3) ハイブリッドプラズマの温度は軸上で最大値を示し、軸線から離れるにつれて低下するが、その低下の割合はベースプラズマのそれに比べて小である。一例を示すと、入力追加後時間 $100\mu\text{sec}$ においては

軸上では $12,400\text{K}$ 、軸線から 0.5mm 離れた位置では $7,650\text{K}$ を示し、対応する位置におけるベースプラズマの温度よりそれぞれ 680K 、 $2,400\text{K}$ 高い。

(4) 前記の温度はスペクトル線強度の増加分が急増する時間に応じて急上昇し、その増加率は軸線から離れるにつれて大となる。

(5) ハイブリッドプラズマの電子密度分布は温度分布と同様な特徴を示し、入力追加後時間 $100\mu\text{sec}$ においては軸線から 0.5mm 離れた位置で 8.26×10^{20} 個/ m^3 となり、対応する位置におけるベースプラズマの密度の約 280倍となる。

以上パルス状追加入力によってジェットの低温領域が加熱され、その特性が改善されることが明らかとなった。

本研究に協力いただいた昭和55年度特別研究及び卒業研究学生諸氏、本学山中麗子氏に感謝する。

参 考 文 献

- 1) P.J. Vermeulen, W.L. Boddie & F.A. Wierum: AIAA J., 5, 1015 (1967)
- 2) A. Shamin & E.R. Wooding: IEE Conf. Publ. (Inst. Electr. Eng.) NO.143, 415 (1976)
- 3) R.S. Zuchowski & E. Garrabant: Weld. J., 43, 13 (1964)
- 4) 佐伯節夫, 牧元, 大崎堅: 昭和43年度電気四学会九州支部連合大会論文集, 106
- 5) 明石和夫, 石塚隆一, 吉田豊信: 溶融塩, 21, 117(1978)
- 6) 西村博文, 吉田豊信, 明石和夫: 日本金属学会講演概要, 236 (1979)
- 7) 佐伯節夫, 大崎堅, 高橋広志: 山口大学工学部研究報告, 31, 245 (1981)
- 8) キャンベル: プラズマ物理学と電磁流体力学, 好学社, (1966) p.187.

(昭和56年10月15日 受理)