

# Hollow Cathode Arcの熱源特性 —赤外線放射プラズマ診断法による電子密度計測—

正箱 信一郎\*・黄地 尚義\*

Characteristics of Hollow Cathode Arc as a Welding Heat Source  
—Measurement of Electron Density by IR Method of Plasma Diagnostics—

Shinichiro SHOBAKO and Takayoshi OHJI

**Synopsis :** Hollow Cathode Arc (HCA) was developed as a plasma source under the condition of low pressure in the 1960s, and various researches were performed to make clear the mechanism of the HCA. Since the HCA is a discharge under low pressure environment, it attracts attention as a welding heat source in space. Moreover, the HCA is expected to be useful for the industrial application on the earth, because the melting process by HCA is very active and the penetration is huge in comparison with that by the conventional GTA.

In the previous paper, it has been shown that the HCA configuration and the melting process by HCA are very sensitive to process parameters, such as gas flowrate and ambient pressure.

In the present paper, the electron density distribution of HCA has been measured by IR method of plasma diagnostics (IR method). It is concluded that the beam like core of electron density is formed on the arc axis in the case of low gas flowrate, and the huge penetration by HCA is closely related to the beam like core.

**Key words:** hollow cathode arc; welding in space; electron density; IR radiation; plasma diagnostics.

## 1. 緒言

HCA (Hollow Cathode Arc)は低圧環境下でのプラズマ源として1960年代に開発され、そのメカニズムを解明するために様々な研究が行われてきた<sup>1,2)</sup>。このHCAは、アーク電流を比較的大電流にすることによって溶接熱源としても適用可能であり<sup>3-5)</sup>、また低圧環境下でのプラズマ源であることから、宇宙環境下での溶接熱源として注目されている<sup>6,7)</sup>。さらに通常の大気圧下でのGTA (Gas Tungsten Arc)を熱源に用いた場合に比べて母材の溶融量が桁違いに多くなることから<sup>8,9)</sup>、地上・低圧環境下での工業的な適用にも有効であると考えられる。しかし、溶接熱源としてのHCAの熱源特性やそのメカニズムについては十分に検討されているとは言えず、解明されていない部分が多く残されている。また、未だその実用化に至っていないのが現状である。

そこで本研究ではこのHCAに注目し、その溶接熱源としての基本的な特性を調査した。さらにHCAプラズマの状態を正確に把握するために、赤外線放射プラズマ診断法(IR法)によるHCAの電子密度計測を行い、電子密度分布と放電形態及び母材の溶融特性との関係について検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 HCAの原理

HCA (Hollow Cathode Arc)とは、低圧中において中空陰極から発生するアーク放電である。Fig. 1にGTA溶接用のトーチを改造して作成したHCA用のトーチの概略図を示す。実験では、このHCAトーチを真空チャンバー内に設置し、陰極-陽極間にアーク放電を発生させる。図中に示

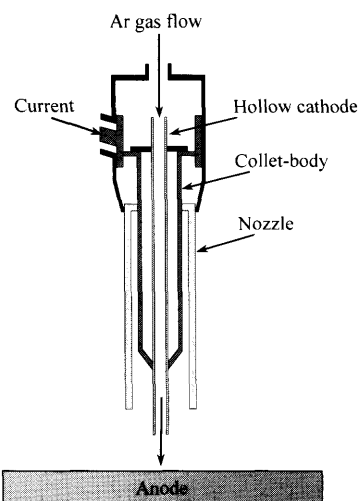


Fig. 1. Detail of HCA torch.

Table 1. Range of experimental conditions used in the present paper.

| Ambient pressure, $P$<br>(Pa) | Electrode  | Base metal       | Arc current, $I$<br>(A) | Arc length, $L$<br>(mm) | Gas flowrate, $Q$<br>(ml/s) |
|-------------------------------|--|------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 3                             | Tungsten containing 2%thorium oxide<br>Outside diameter : 4.0 mm<br>Inside diameter : 3.0 mm | Copper,<br>A1050 | 100-150                 | 10-40                   | 0.17-3.3                    |

Table 2. Numerical values of  $A(\lambda)$ .

| Wave length ( $\mu\text{m}$ ) | $A(\lambda)$            | Wave length ( $\mu\text{m}$ ) | $A(\lambda)$           |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------------|
| 0.96                          | $1.015 \times 10^{-33}$ | 6                             | $5.35 \times 10^{-35}$ |
| 2                             | $3.52 \times 10^{-34}$  | 8                             | $3.15 \times 10^{-35}$ |
| 4                             | $1.10 \times 10^{-35}$  | 10                            | $2.07 \times 10^{-35}$ |

すように、HCA トーチでは低圧中において中空陰極先端からのみアークの発生・維持に必要なだけの微量のプラズマ形成ガスを流出させることにより、通常のGTAでは困難である低圧中でのアークの発生・維持を可能としている。本実験での実験条件を Table 1 に示す。実験に使用した電極（中空陰極）は2%酸化トリウム入りのタングステンチューブで、外形4mm、内径3mmである。本実験でのプラズマ形成ガスにはArを用いており、実験中の周囲圧力は3Pa一定に保っている。溶接電源としては市販のMIG溶接機を用い、実験はすべて直流電極マイナス(DCEN)極性として行った。また母材には、熔融実験には純アルミニウム(A1050)、電子密度計測では母材溶融によるアークへの影響を避けるために純銅を用いている。

2.2 赤外線放射プラズマ診断法 (IR法)<sup>10)</sup>

赤外線放射プラズマ診断法とは、プラズマから放射される電磁波（赤外線）の放射エネルギーから、そのプラズマの電子密度を推定する方法である。アークプラズマでは赤外域での連続放射エネルギーがプラズマ密度に強く依存することから、波長を適切に選択すればプラズマから放出される連続放射のエネルギー $L_\lambda$ は次のような簡単な式で表現することができる<sup>10)</sup>。

$$L_\lambda = A(\lambda) \cdot \int n_e^2 dx \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $A(\lambda)$ ：波長に依存する定数 (Table 2参照)、 $n_e$ ：電子密度である。また、積分は視線方向にとるものとする。以上の関係から、プラズマからの放射エネルギーを計測すれば(1)式よりプラズマの電子密度が簡単に推定できる。

プラズマからの放射エネルギーの計測には市販の赤外線放射温度計を利用した。計測に際してはFig. 2に示すようにプラズマの横方向に赤外線放射温度計(Spot sensor)を設置し、真空チャンバー外から石英ガラス越しに輝度温度を計測する。本実験では、Table 3に示すように $2\mu\text{m}$ および $0.96\mu\text{m}$ の波長を検出する放射温度計を用いた。なお、石

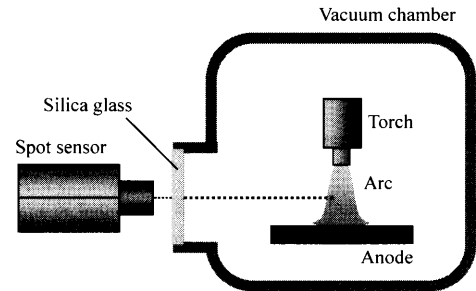


Fig. 2. Experimental apparatus for spectral radiance measurement.

Table 3. Sensor for measurement.

| Detector                          | PbS  | Si   |
|-----------------------------------|------|------|
| Spectral range ( $\mu\text{m}$ )  | 2    | 0.96 |
| Distance from measured object (m) | 0.56 | 0.43 |
| Diameter of measured object (mm)  | 2    | 2    |

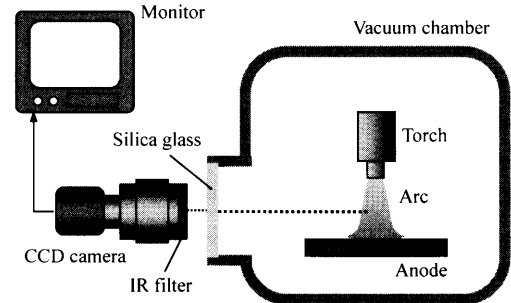


Fig. 3. Experimental apparatus for relative luminance measurement.

英ガラスによる放射エネルギーの減衰を考慮するため、黒体炉を用いて輝度温度の校正を行っている。このようにして得られたプラズマの輝度温度からプランクの放射則(2)を用いて放射エネルギーを知ることができる。

$$L_\lambda = \frac{2c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(c_2/\lambda T) - 1} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $c_1 = 5.9548 \times 10^{-17}$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ],

$c_2 = 0.014388$  [ $\text{m} \cdot \text{K}$ ],

$L_\lambda$ ：放射エネルギー（分光放射強度），

$\lambda$ ：波長， $T$ ：温度

さらに本研究ではHCAプラズマの電子密度分布の全体像を容易かつ高速に計測するため、Fig. 3に示すように CCDカメラを用いた電子密度計測を行った。実験は、は

じめに真空チャンバー外に設置したCCDカメラによって、十分安定したプラズマの全体の輝度画像を取り込む。このCCDカメラにはその検出波長範囲を考慮し、 $0.96\ \mu\text{m}$ 付近に透過率のピークを持つ干渉フィルターを取り付けている。次に、このCCDカメラと放射温度計及び(2)式を用いて画像の輝度と放射エネルギーの関係を求める。最後に、得られた関係をCCDカメラによる輝度画像に適用し、プラズマ全体の放射エネルギー分布を得る。なお、CCDカメラの設定は露光時間 $1/60$ 秒とし、輝度画像の最高値が255となるように絞りを調節している。放射エネルギーから電子密度を得る手順は先に示した通りである。また、IR法では視線方向に積分された放射強度を計測しているため、径方向の分布を得る場合には計測結果をAbel変換<sup>1)</sup>し、電子密度を推定している。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 HCAの基本特性

大気圧下でのGTAと低圧下でのHCAを用いた場合の放電形態と母材の溶融池断面形状をFig. 4に示す。実験条件はアーク電流 $150\ \text{A}$ 、アーク長 $10\ \text{mm}$ 、溶接速度 $5\ \text{mm/s}$ で、Arガス流量はGTAでは $250\ \text{mL/s}$ 、HCAでは $0.17\ \text{mL/s}$ である。図のように、大気圧下でのGTAでは釣鐘型の放電形態であるが、低圧下でのHCAでは放電は中空陰極内部から発生すると考えられており、陰極から陽極に達する円柱状の放電形態であることが特徴である。また、先に述べたように、GTAに比べてHCAでは母材の溶融量が桁違いに多くなる。

Fig. 5にArガス流量を変化させた場合のHCAの放電形態と母材の溶融池断面形状を示す。実験条件はアーク電流 $150\ \text{A}$ 、アーク長 $10\ \text{mm}$ 、溶接速度 $5\ \text{mm/s}$ で、周囲圧力はいずれのArガス流量であっても $3\ \text{Pa}$ 一定に保っている。

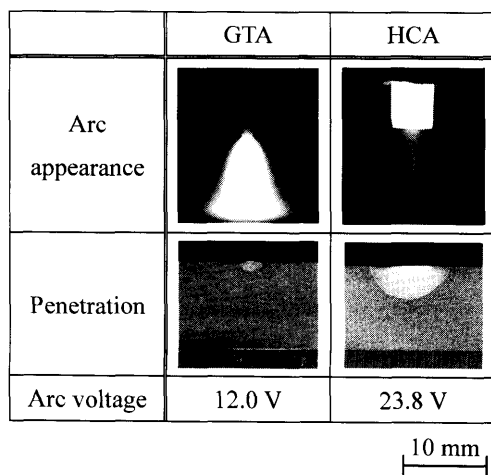


Fig. 4. Arc appearance and penetration on base metal by GTA and HCA (anode: A1050,  $I=150\ \text{A}$ ,  $L=10\ \text{mm}$ ,  $v=5\ \text{mm/s}$ , GTA:  $Q_{\text{Ar}}=250\ \text{mL/s}$ , HCA:  $Q_{\text{Ar}}=0.17\ \text{mL/s}$ ).

放電形態を見て分かるように、Arガス流量が $1.7\ \text{mL/s}$ と多い場合ではHCA特有の円柱状の放電形態は確認できず、母材も溶融しない。Arガス流量を減少させると次第に円柱状の放電形態に変化し、母材の溶融量も増加する。これらの原因として著者等は、HCAでは大気圧下のGTAとは違い、Arガス流量が少ない場合に陰極から陽極に向かう電子の強い流れが存在し、その流れによる運動エネルギーが溶融量の増加に関係することを指摘している<sup>9)</sup>。

次に、円柱状の放電形態が得られるArガス流量 $0.17\ \text{mL/s}$ においてアーク長を $10\sim 40\ \text{mm}$ に変化させた場合の放電形態と母材の溶融池断面形状をFig. 6に示す。その他の実験条件はアーク電流 $150\ \text{A}$ 、溶接速度 $5\ \text{mm/s}$ である。図のように、HCAではアーク長が $40\ \text{mm}$ と長い場合にお

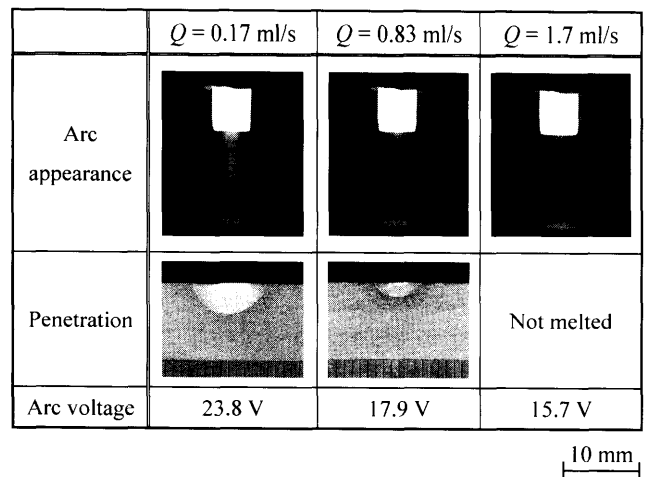


Fig. 5. Effect of gas flow rate on arc appearance and penetration (anode: A1050,  $P=3\ \text{Pa}$ ,  $I=150\ \text{A}$ ,  $L=10\ \text{mm}$ ,  $v=5\ \text{mm/s}$ ).

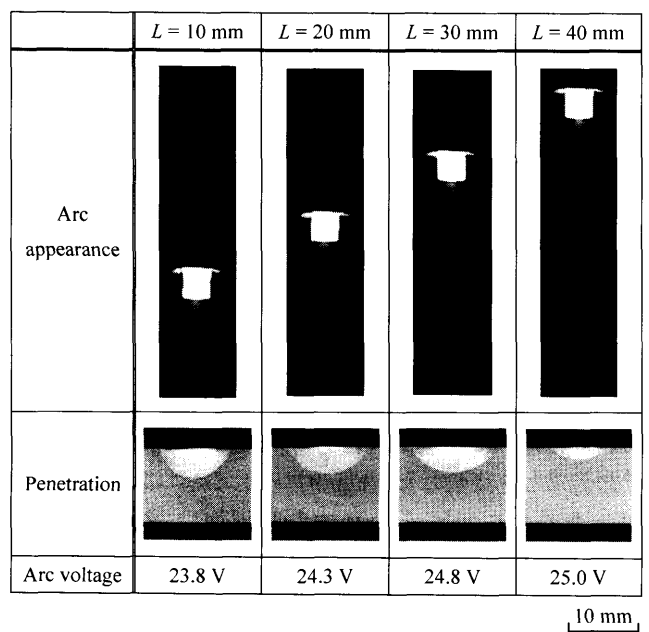


Fig. 6. Effect of arc length on arc appearance and penetration (anode: A1050,  $P=3\ \text{Pa}$ ,  $I=150\ \text{A}$ ,  $Q=0.17\ \text{mL/s}$ ,  $v=5\ \text{mm/s}$ ).

いても陰極から陽極に達する円柱状のアーキが形成されることがわかった。また、アーキ電圧を見るとアーキ長の違いによる電圧の変化は少なく、HCAではアーキ柱でのエネルギーロスが少ないことを暗示している。しかし、溶融池の断面形状に注目すると、アーキ長40mmの場合では溶融量が大きく減少しており、アーキ長が長くなるに従って溶融量が減少していく傾向にあることがわかった。このことから、アーキ長が長くなると陽極表面でのアーキが次第に広がるものと考えられる。

### 3.2 HCAプラズマの電子密度計測

#### 3.2.1 HCAに対するIR法の有効性について

プラズマ中の電子状態の変化には、イオンのポテンシャル場によって電子が散乱される場合の自由-自由遷移 (free-free 又は f-f transition) と電子が捕獲される場合の自由-束縛遷移 (free-bound 又は f-b transition) がある。また、自由-自由遷移に伴う放射を制動放射 (bremsstrahlung)、自由-束縛遷移に伴う放射を再結合放射 (recombination radiation) と呼ぶ。プラズマの連続放射理論を用いて求めたこれらの放射エネルギーと波長の関係を Fig. 7 に示す<sup>10)</sup>。図において、実線は f-f 遷移と f-b 遷移による放射エネルギーの和を、破線は f-f 遷移のみによる放射エネルギーを示している。この例からわかるように、波長2~3 $\mu\text{m}$ を越える赤外域では制動放射が支配的となっていることから、IR法ではこの波長域の放射強度を計測し、放射は制動放射のみとして電子密度を推定している。しかし先に述べたように本研究では CCD カメラを用いて波長0.96 $\mu\text{m}$ での放射強度を計測するため、再結合放射が影響する可能性がある。そこでまず検出波長2 $\mu\text{m}$ と0.96 $\mu\text{m}$ の放射温度計を用いて HCA の電子密度を計測し、その結果を比較した。Fig. 8 に同じ空間位置での計測結果を対比したものを示す。なお、電子密度はプラズマの厚み方向の平均電子密度である。また、計測は円柱状のアーキが確認できる Ar ガス流量0.17 mL/s の場合と円柱状のアーキが形成されない1.7 mL/s の場合について行った。

両者を比較すると、0.96 $\mu\text{m}$ の場合では2 $\mu\text{m}$ の場合に比べて僅かに電子密度を低く評価しているものの、ほぼ1:1の直線上に分布しており、Ar ガス流量の違いによる計測結果の差も小さいことがわかる。

また西川ら<sup>12)</sup>は、ラングミュアプローブ法を用いて HCA の電子密度を計測している。そこで、CCD カメラを用いて計測した電子密度とラングミュアプローブ法による計測結果とを比較した。Fig. 9 にそれぞれの計測結果を対比したものを示す。計測は先と同様に、Ar ガス流量0.17 mL/s と1.7 mL/s の場合について行った。この図から、CCD を用いた IR 法での計測結果とラングミュアプローブ法での計測結果はほぼ1:1の関係にあることがわかる。

以上の結果から、IR 法において検出波長0.96 $\mu\text{m}$ の CCD を用いた場合でも電子密度計測が可能であり、HCA の電

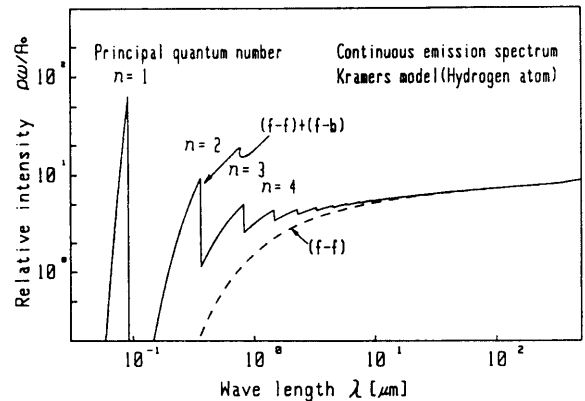


Fig. 7. Comparison of emission spectrums between bremsstrahlung (f-f) and recombination (f-b) ( $T_e = 15000\text{K}$ ).

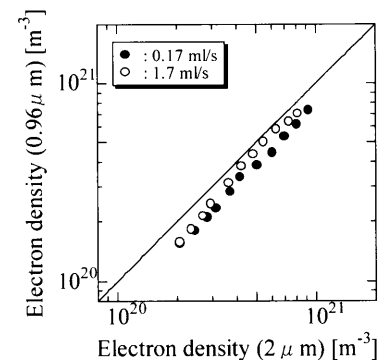


Fig. 8. Comparison of measured mean electron densities by PbS and Si sensors (anode: copper,  $P=3\text{ Pa}$ ,  $L=10\text{ mm}$ ).

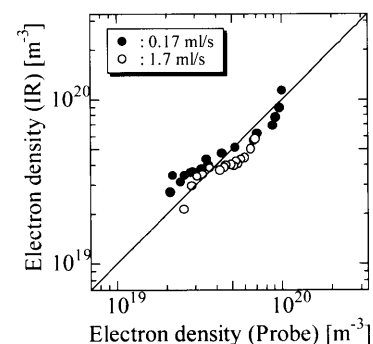


Fig. 9. Comparison of measured electron densities by Langmuir probe and IR methods (anode: copper,  $P=3\text{ Pa}$ ,  $L=10\text{ mm}$ ).

子密度計測にも十分有効であることがわかった。

#### 3.2.2 電子密度分布の計測結果

ここでは、CCD カメラを用いて HCA の電子密度分布を計測した結果を示す。

はじめに Ar ガス流量を 0.17~1.7 mL/s に変化させた場合の電子密度分布を計測した。Fig. 10 は陽極直上におけるプラズマの径方向の電子密度分布、Fig. 11 はプラズマ全体の電子密度分布である。実験条件はアーキ長10 mm、周囲圧力3 Pa で、アーキ電流は陽極の溶融を避けるために 100 A

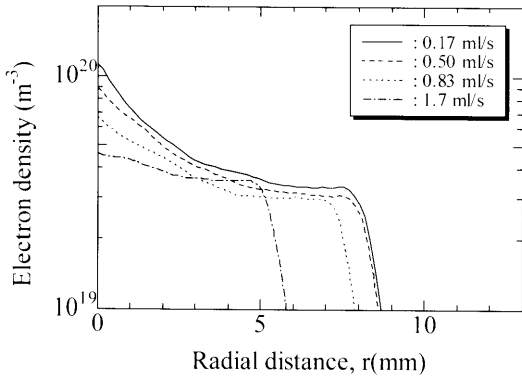


Fig. 10. Effect of flowrate of Ar on radial electron density distribution (anode: copper,  $P=3$  Pa,  $I=100$  A,  $L=10$  mm).

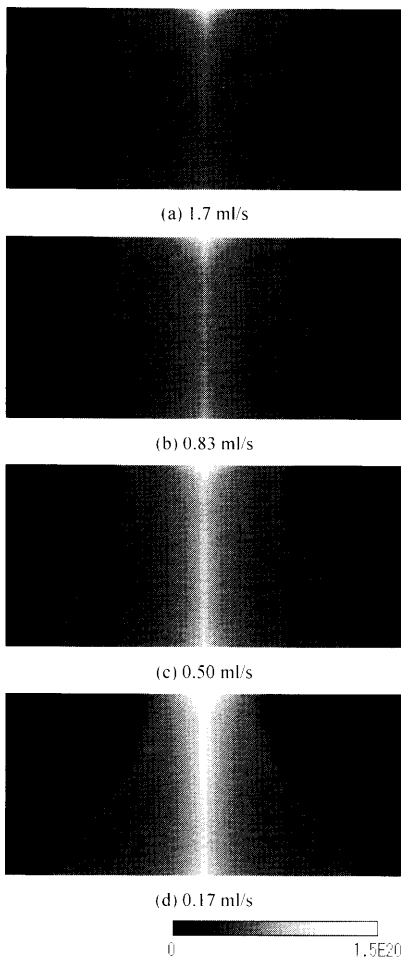


Fig. 11. Effect of flowrate of Ar on electron density distribution (anode: copper,  $P=3$  Pa,  $I=100$  A,  $L=10$  mm).

としている。Fig.10から、HCAでは陽極直上において円柱状の放電外観が確認できる電極径の範囲( $r=2$  mm)よりも電子密度分布が大きく広がっていることがわかった。また電子密度の値は $10^{19} \sim 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 程度であり、大気圧下でのアーク放電に比べてかなり低い値である。Arガス流量の変化に注目すると、Arガス流量が減少するに従ってアーク軸上での電子密度が増加していることがわかる。Fig.11

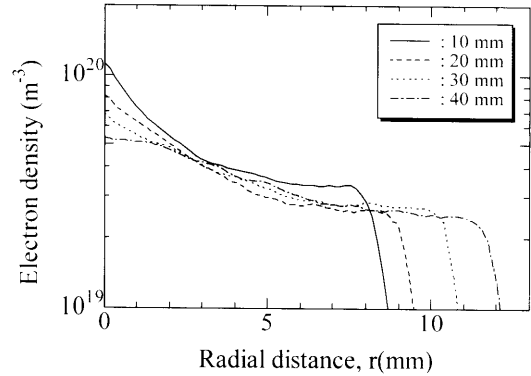


Fig. 12. Effect of arc length on radial electron density distribution (anode: copper,  $P=3$  Pa,  $I=100$  A,  $Q=0.17$  mL/s).

に示す全体の分布を見ると、Fig. 5に示した放電形態の変化から推測されるように、Arガス流量が少なくなるに従ってアーク軸上の電子密度が増加し、電極径の範囲にビーム状のコアを形成していることがわかる。HCAにおいてArガス流量が少ない場合には電極径の範囲の電子温度が60000Kに達し<sup>12)</sup>、電子は陽極へ方向性を持って運動することが示されている<sup>9)</sup>。よってこのビーム状のコアの部分において、Arガス流量が多い場合に比べて電子温度および電子の方向性エネルギー<sup>9)</sup>が高いと考えられる。この結果をFig. 5に示した母材の溶込みと比較すると、Arガス流量が少なく、ビーム状のコアが形成される場合に母材の溶融量が多くなることがわかる。

次に、アーク長を10~40 mm変化させた場合の電子密度分布を計測した。実験条件はアーク電流100 A、Arガス流量0.17 mL/sで、周囲圧力は3 Paである。Fig.12に陽極直上におけるプラズマの径方向の電子密度分布、Fig.13にプラズマ全体の電子密度分布を示す。Fig.13より、アーク長を変化させても電子密度分布はアーク軸上に集中し、ビーム状のコアを形成することがわかった。しかしFig.12を見ると、アーク長が長くなるに従って陽極直上の電子密度分布は大きく広がり、その最高値も低下することから、ビーム状のコアが減衰することがわかる。この結果およびFig. 6から、Arガス流量を変化させた場合と同様に、ビーム状のコアが形成される条件下において母材の溶融量が多くなることが確認できた。

#### 4. 結言

本研究では、HCAの熱源特性の調査およびIR法によるHCAの電子密度計測を行った。以下に得られた主な結果を要約する。

- (1) HCAでは、Arガス流量が少なくなるに従って集中した円柱状のアークが得られ、母材の溶融量が多くなる。
- (2) アーク長が40 mmと長い場合でも円柱状のアーク

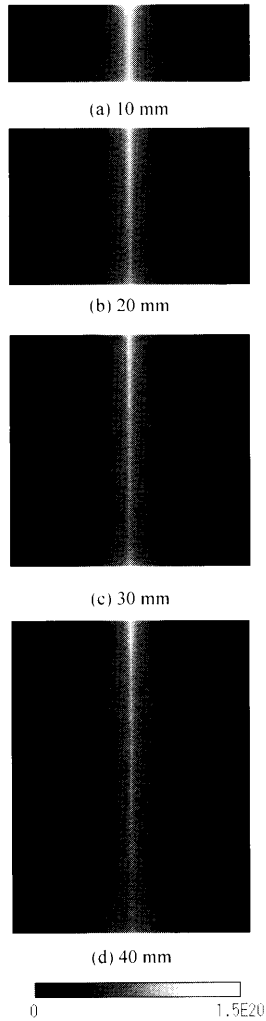


Fig. 13. Effect of arc length on electron density distribution (anode: copper,  $P=3$  Pa,  $I=100$  A,  $Q=0.17$  mL/s).

が維持されるが、アーク長が長くなるに従って母材の溶融量が次第に減少する。

(3) 赤外線放射プラズマ診断法による計測結果とラングミュアプローブ法による計測結果がほぼ一致することを示し、IR法がHCAの電子密度計測にも有効であることを示した。

(4) HCAでは、Arガス流量が少なくなるに従って電子がアーク軸上に集中し、ビーム状のコアを形成していることを示した。

(5) このビーム状のコアが形成される条件下において、母材の溶融量が多くなることを示した。

## 文 献

- 1) L.M.Lidsky, S.D.Rothleder, D.J.Rose and S.Yoshikawa: *J. Appl. Phys.*, **33** (1962), 2490.
- 2) J.L.Delcroix and A.R.Trindade: *Adv. Electron. Electron Phys.*, **35** (1974), 87.
- 3) V.M.Nerovnyi and G.V.Pod'yapol'skii: *Autom. Weld.*, **38** (1985), 39.
- 4) V.M.Nerovnyi, V.P.Fedichev and G.V.Pod'yapol'skii: *J. Eng. Phys.*, **54** (1988), 183.
- 5) V.M.Nerovnyi: *Weld. Int.*, **16** (2002), 561.
- 6) B.E.Paton and V.F.Lapchinskii: Cambridge International Science Publishing, Cambridge, (1997).
- 7) Y.Suita, Y.Tsukuda, T.Takagi, T.Ohji and K.Masubuchi: *Weld. Int.*, **8** (1994), 269.
- 8) N.Nishikawa, K.Kosaka and T.Ohji: *J. High Temp. Soc.*, **28** (2002), 344.
- 9) S.Shobako, M.Ohta and T.Ohji: *Q. J. Jpn. Weld. Soc.*, **23** (2005) (to be published).
- 10) T.Ohji and T.W.Eagar: *Plasma Chem. Plasma Process.*, **12** (1992), 403.
- 11) O.H.Nestor and H.N.Olsen: *SIAM Rev.*, **2** (1960), 200.
- 12) N.Nishikawa, T.Maruyama and T.Ohji: *Trans. Inst. Electron. Eng. Jpn.*, **123** (2003), 35.