

# アークジェット起動時におけるアーク柱の挙動についての研究

大阪職業能力開発短期大学校 馬場 康博  
大阪大学 吉川 孝雄

Study of Arc Column Behavior in Arcjet Starting

Yasuhiro BABA, Takao YOSHIKAWA

## 要約

本論文ではアークジェット内部において陽極のアーク付着位置に対する気体の流れの影響を述べる。実験には二次元ダクトおよび同軸円筒ダクトが用いられ、アーク放電において多数に分離された陽極に流れ込む電流を測定する。実験は気体種(アルゴン、窒素)、圧力および流速を変えて行なう。アルゴンにおいて圧力および流速の影響は現れないが、窒素において電流経路は流れによって下流に移動している。アーク柱の直径、温度および熱損失について、簡単な計算モデルを用いて数値計算を行う。この計算結果は流れが無い場合の実験結果を良く説明している。

## I 緒言

近年、宇宙開発計画がますます盛んになり、電気推進機は長期ミッションの宇宙飛翔体の姿勢制御および軌道修正用推進機として注目されている。その中でも、アークジェット推進機は実機搭載の可能性が高く、その問題点である安定作動および長寿命化について盛んに研究されている<sup>(1)-(5)</sup>。

ところで、アークジェット推進機は放電経路が長くなる作動状態において、優れた空力加速特性を示す事が知られている。しかし、その特性はどのような物性値および状態量によって維持されるのか未だに明確にされていない。そこで、本研究はアークジェット推進機内部のアーク柱の挙動を解明し、最適作動状態を維持するために必要な制御パラメータを明確にするために行われる。

本研究では、基本的なアーク柱の挙動を調べるため、流れの存在する二次元ダクト内でアーク放電が行われ、陽極のアーク付着位置に対する気体の流れの影響を調べる。気体の種類、圧力およびマッハ数を変えて実験を行ない、その結果からそれぞれの放電形態に与える影響について議論する。そして、実在形の放電形

態を詳しく調査するため、同軸円筒ダクトについて同様に吟味する。また、二次元ダクト測定室内の放電について簡単なモデル化がなされ、アーク柱の直径および温度が数値計算によって求められ、気体の種類および圧力の影響が理論的に検討される。

## II 実験装置および方法

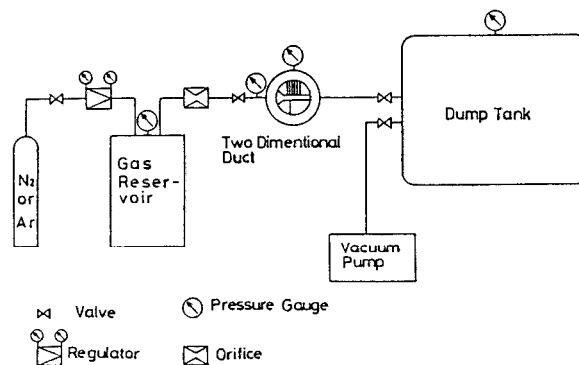


図1 作動気体供給および排出装置の概略図

図1に作動気体の供給および排出を行う装置の概略を示す。作動気体としてアルゴンおよび窒素が貯気槽に貯えられ、オリフィス、測定室およびダンプタンクを通過し、真空排気系によって排出される。流量は貯気槽の圧力とオリフィスの径によって決まり、オリ

フィス下流の電磁バルブによって、測定室内に最大約1s間気体を流すことができる。また、作動条件はダンプタンクによって作動時間内の変動が1%以内に保たれ、それは測定室に取り付けられた圧電型圧力センサー (TOYODA PMS5-5H) によって確認される。

図2に二次元ダクト測定室を示す。二次元ダクトは幅34mm、高さ5mmであり、片側の壁面には幅20mm、厚さ1mmの銅製のイグニッション電極が1個および同形の陽極が6個配置され、反対側の壁面に直径1mmのタングステン製の陰極が配置されている。また、各々の電極は、厚さ1mmの雲母によって絶縁されている。

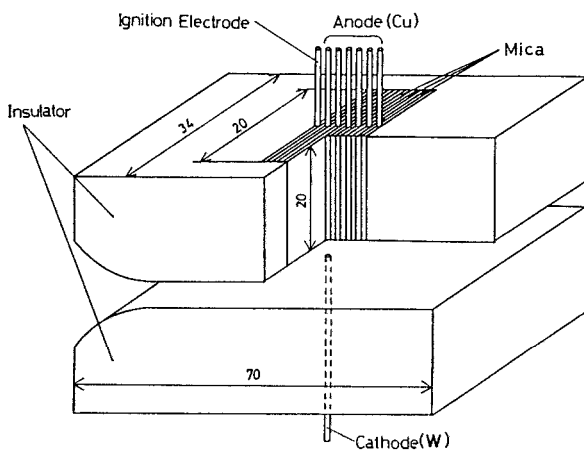


図2 二次元ダクト測定室

図3に同軸円筒ダクト測定室を示す。同軸円筒ダクトは内径5mm、厚さ1mmの銅製の陽極6個と同軸上におかれた直径4mmのタングステン製の陰極から成っている。各々の陽極は厚さ0.5mmのシリコンシートで絶縁され、その上流1mmの位置に頂角90°の陰極先端が配置されている。また、内径12mm、厚さ1mmのイグニッション電極は陰極の先端から上流側4mmの所に位置し、陽極と雲母によって絶縁されている。

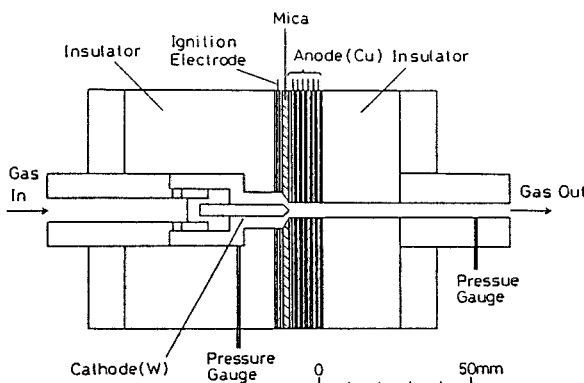


図3 同軸円筒ダクト測定室

図4に電力供給および電流測定装置の概略を示す。主放電はパルス形成回路を最大600Vの電圧で充電することによって、約80A、約1msの矩形放電電流が得られる。また、放電は電磁バルブを開いて気流が定常になった後(約0.5s)、イグニッション電極と陰極の間に約4~5kVの電圧が加えられることによって開始される。そして、6個の陽極は上流側からアノード1~6と名付けられて、各々に流れる電流はログスキーコイルによって測定され、積分回路を通してオシロスコープに記録される。

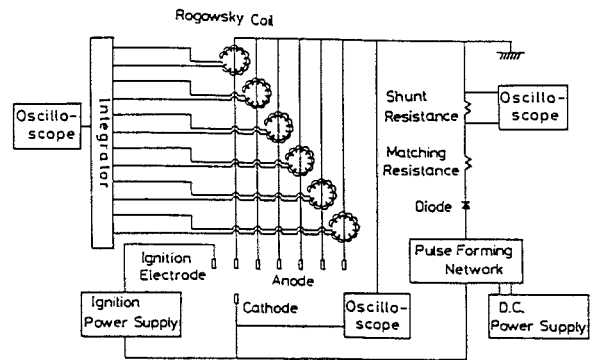


図4 電力供給および電流測定装置の概略図

### III 実験結果および考察

二次元ダクトにおける測定結果を図5および図6に示す。ここで表されるマッハ数は、流れが等エントロピー的でありオリフィスにてチョーキングすると仮定して計算される。また、圧力は測定室下流にて測定された値を示している。図5(a)および図5(b)では気体はアルゴンで、流れは無く、圧力がそれぞれ $1.33 \times 10^3 \text{ Pa}$  および  $1.33 \times 10^4 \text{ Pa}$  の場合、各陽極に流れる電流を示している。いずれの場合も第一電極と第二電極にまたがって放電している。また、図5(c)および図5(d)で気体は同じくアルゴンで、それぞれマッハ数1.0、圧力 $1.33 \times 10^3 \text{ Pa}$  およびマッハ数0.3、圧力 $1.33 \times 10^4 \text{ Pa}$  の場合に各陽極に流れる電流を表しており、前述と同様に第一電極と第二電極にまたがって放電している。これから、作動気体がアルゴンの場合は、陽極へのアーク付着位置は気体の流れおよび圧力の影響をほとんど受けないと考えられる。

図6(a)および図6(b)では気体は窒素で、流れは無く、圧力はそれぞれ $1.33 \times 10^3 \text{ Pa}$  および  $1.33 \times 10^4 \text{ Pa}$  の場合、各陽極に流れる電流を示している。いずれの場合も第一電極のみに電流が流れている。図6(c)は同じく窒素、マッハ数1.0、圧力 $1.33 \times 10^3 \text{ Pa}$  の場合の各陽極に流れる電流を示す。この場合、第一電極と

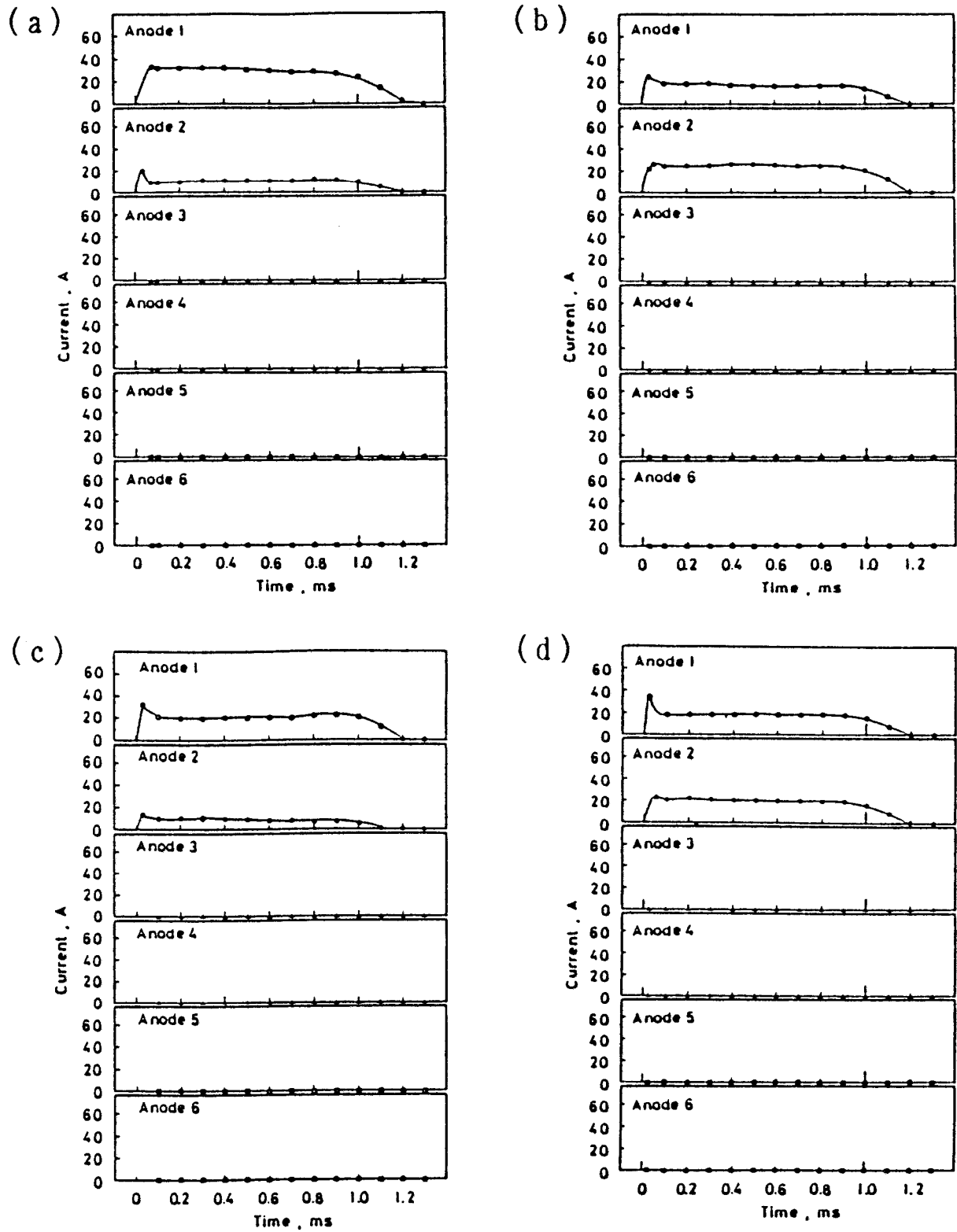


図5 アルゴンの場合二次元ダクト内の各陽極に流れる電流波形((a): 流れ無し,  $1.33 \times 10^3 \text{ Pa}$ , (b): 流れ無し,  $1.33 \times 10^4 \text{ Pa}$ , (c):  $M=1.0$ ,  $1.33 \times 10^3 \text{ Pa}$ , (d):  $M=0.8$ ,  $1.33 \times 10^4 \text{ Pa}$ )

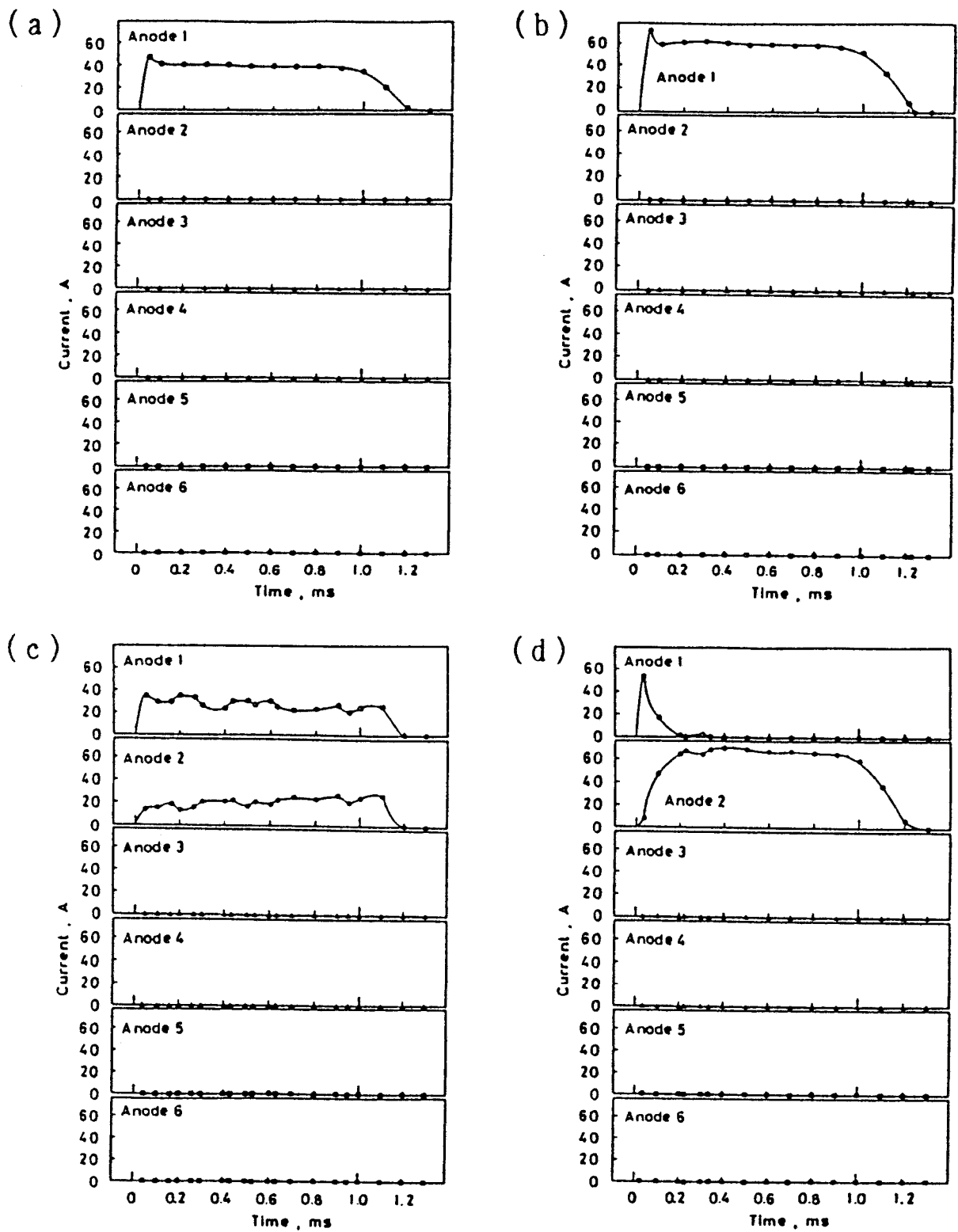


図6 窒素の場合二次元ダクト内の各陽極に流れる電流波形 ((a): 流れ無し,  $1.33 \times 10^3 \text{ Pa}$ , (b): 流れ無し,  $1.33 \times 10^4 \text{ Pa}$ , (c):  $M=1.0$ ,  $1.33 \times 10^3 \text{ Pa}$ , (d):  $M=0.3$ ,  $1.33 \times 10^4 \text{ Pa}$ )

第二電極にまたがって放電している。図6(d)は同じく窒素、マッハ数0.3、圧力 $1.33 \times 10^4 \text{ Pa}$ の場合の各陽極に流れる電流を示す。この場合、まず第一電極に放電を開始した後、第二電極に移動して放電している。

図5(a)と図6(a)、図5(b)と図6(b)の比較から、アルゴンのアーク柱の直径は窒素のものよりも大きく、拡散的であると思われる。そして、図6(a)と図6(c)、図6(b)と図6(d)の比較から、窒素の場合はアルゴンの場合と異なり流れの影響を受けてアーク付着位置が移動していることが解る。アルゴンは単原子分子気体であるため電離エネルギーを得てイオンと電子に分離するが、窒素は二原子分子気体であるため解離エネルギーおよび電離エネルギーを得て電離する。従って、アーク柱に流入したアルゴンはすぐ電離して電流を運ぶキャリアになるが、窒素は解離反応の後に電離反応によってキャリアとなるため、窒素のアーク柱はアルゴンのものよりも流れの影響を受けて移動するものと思われる。また、図6(c)と図6(d)の比較から、その流れの影響は圧力の高い方がより強く現れている。この圧力の影響について、次の同軸円筒ダクトの結果で詳しく議論される。

同軸円筒ダクトにおける測定結果を図7および図8に示す。図7(a)、(b)、(c)、(d)および(e)では気体はアルゴンで、流量が各々  $0 \text{ g/s}$ 、 $1.0 \text{ g/s}$ 、 $1.5 \text{ g/s}$ 、 $2.0 \text{ g/s}$ 、 $2.5 \text{ g/s}$  の場合、各陽極に流れる電流および全放電電流波形を示す。ダクト内に気体の流れが無い場合、放電は陰極と陰極に最も近い第一電極との間で起こり、 $1 \text{ ms}$  の間ほぼ一定の電流が持続している。気体を流すと、第二電極にも電流が流れ、放電は第一および第二電極にまたがって安定して持続する。しかし、流量が $2.5 \text{ g/s}$ になると、第三電極にも電流が流れ、放電電流波形は不安定となる。

図8(a)、(b)、(c)、(d)および(e)では気体は窒素で、流量が各々  $0 \text{ g/s}$ 、 $1.0 \text{ g/s}$ 、 $1.5 \text{ g/s}$ 、 $2.0 \text{ g/s}$  および $2.5 \text{ g/s}$  の場合、各陽極に流れる電流および全放電電流波形を示す。ダクト内に気流が無い場合、放電電流は第一電極のみに流れている。気流が存在する場合には第一電極と陰極との間で放電を開始するが、すぐにアーク柱付着位置は下流の電極に移動していく。一つのアーク柱が下流に移動すると、陰極と他の陽極との間で新たにアーク柱が発生し、前述のアーク柱は消滅する。新たに発生したアーク柱は同様に気流に流される。このようにアーク柱付着位置は常に気流により下流に流されており、落ちつく場所はない。流量が $1.0 \text{ g/s}$ 、 $1.5 \text{ g/s}$  では、一つの電極に比較的長い

間アーク柱は留まっている。しかし、流量を大きくしていくと、各電極の電流波形が鋭い立ち上がりと急激に下降する性質をもつようになり、アーク柱付着位置は下流に高速で移動している様子が観察される。

図7(a)と図8(a)を比較すると、二次元ダクトにおける様なアーク柱の直径の差異が見られない。これは同軸円筒ダクトの場合アーク柱の軸と付着面が平行であるため、アーク柱の断面は陽極付着時に軸方向に対して薄くなり第一電極だけで放電電流が賅えることによると思われる。次に、表1に同軸円筒ダクト内の圧力(測定室上流側： $P_1$ 、測定室下流側： $P_2$ )圧力差( $\Delta P = P_1 - P_2$ )およびマッハ数Mを示す。これから流量が変わってもマッハ数はほとんど変わらないが、各圧力および圧力差が流量とともに増加している。これから、アーク柱の挙動には圧力が大きく影響していると思われる。窒素がアーク柱内に流入してすぐに荷電粒子を供給できないため、電流経路としてのアーク柱は周囲を中性粒子に取り囲まれた荷電粒子から成る剛体の様にふるまい、上流と下流の間の圧力差によって下流側に押し流されるものと思われる。また、測定室内圧力が高くなると、同じマッハ数の条件はより大きな圧力差を意味するため、アーク柱の下流への移動がより顕著になるものと思われる。

表1 同軸円筒ダクト内の圧力、圧力差およびマッハ数

| gas species    | mass flow rate [g/s] | pressure $P_1$ [kPa] | pressure $P_2$ [kPa] | pressure difference $\Delta P$ [kPa] | mach number M |
|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------------|---------------|
| Ar             | 0                    | 6.65                 | 6.65                 | 0                                    | 0             |
|                | 1.0                  | 16.32                | 8.93                 | 7.39                                 | 0.958         |
|                | 1.5                  | 23.93                | 12.71                | 11.27                                | 0.923         |
|                | 2.0                  | 31.44                | 16.80                | 14.64                                | 0.926         |
|                | 2.5                  | 38.88                | 20.80                | 17.88                                | 0.921         |
| N <sub>2</sub> | 0                    | 6.65                 | 6.65                 | 0                                    | 0             |
|                | 1.0                  | 18.28                | 10.90                | 7.38                                 | 0.892         |
|                | 1.5                  | 27.62                | 16.77                | 10.85                                | 0.875         |
|                | 2.0                  | 36.46                | 21.97                | 14.49                                | 0.882         |
|                | 2.5                  | 45.54                | 27.50                | 18.04                                | 0.880         |

#### IV 理論計算

二次元ダクトの放電について簡単なモデル化を行い、その放電形態を予測する。ここでは、流れの無い場合において、気体の種類および圧力がアーク柱の直径、温度および熱損失にどのような影響を与えるか調べる。

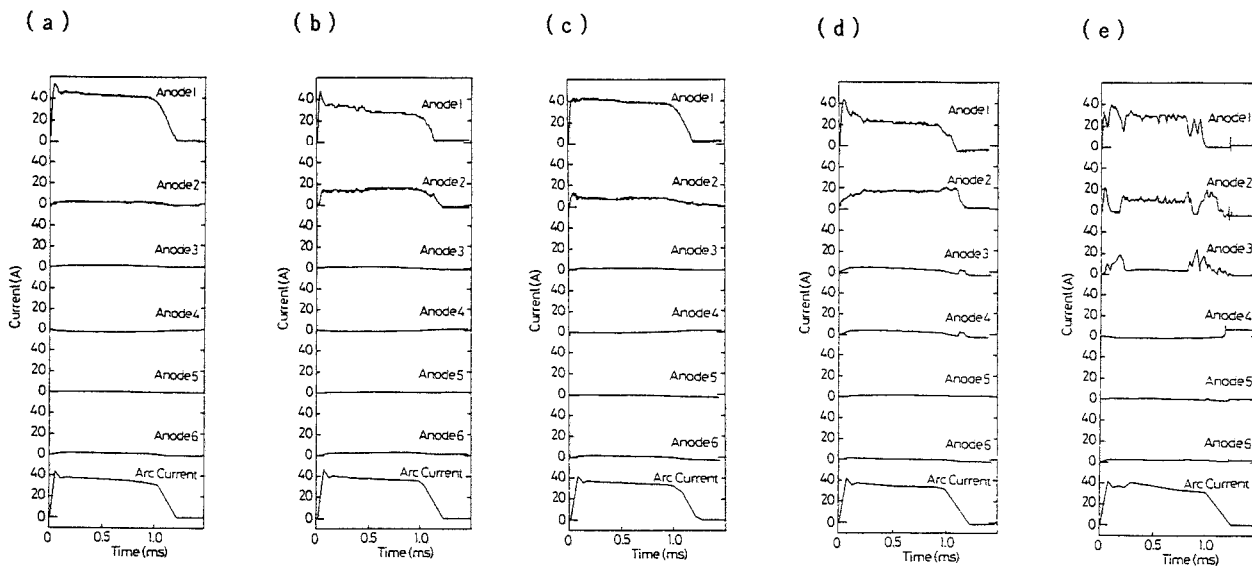


図7 アルゴンの場合同軸円筒ダクト内の各陽極に流れる電流および全放電電流波形 ((a):  $\dot{m} = 0 \text{ g/s}$ ,  $6.65 \times 10^3 \text{ Pa}$ , (b):  $\dot{m} = 1.0 \text{ g/s}$ ,  $1.63 \times 10^4 \text{ Pa}$ , (c):  $\dot{m} = 1.5 \text{ g/s}$ ,  $2.39 \times 10^4 \text{ Pa}$ , (d):  $\dot{m} = 2.0 \text{ g/s}$ ,  $3.14 \times 10^4 \text{ Pa}$ , (e):  $\dot{m} = 2.5 \text{ g/s}$ ,  $3.87 \times 10^4 \text{ Pa}$ )

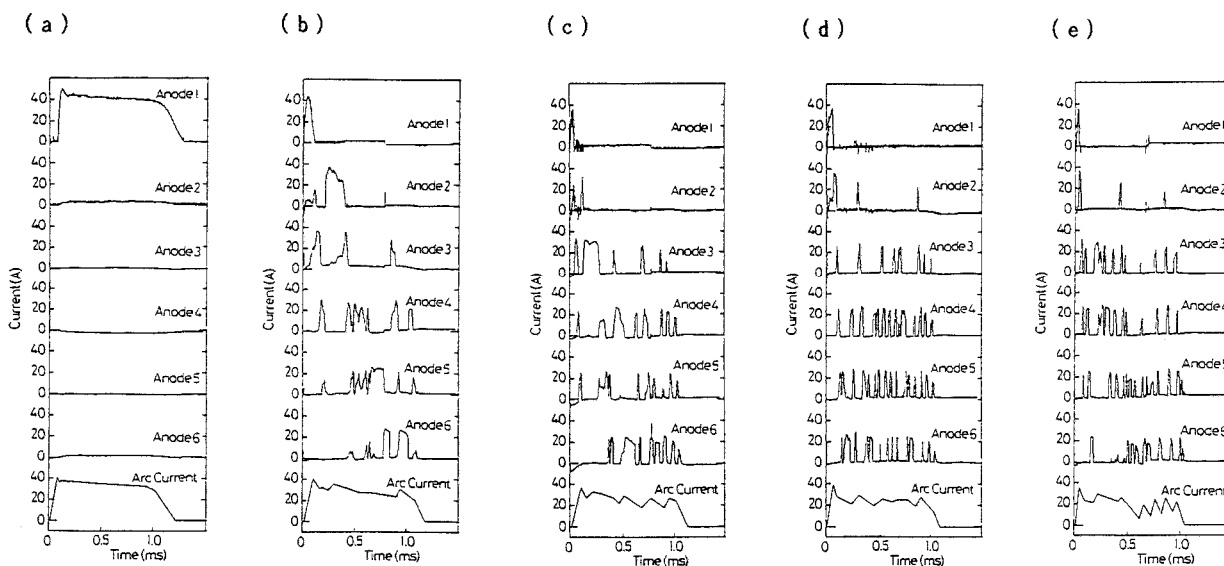


図8 窒素の場合同軸円筒ダクト内の各陽極に流れる電流および全放電電流波形 ((a):  $\dot{m} = 0 \text{ g/s}$ ,  $6.65 \times 10^3 \text{ Pa}$ , (b):  $\dot{m} = 1.0 \text{ g/s}$ ,  $1.83 \times 10^4 \text{ Pa}$ , (c):  $\dot{m} = 1.5 \text{ g/s}$ ,  $2.76 \times 10^4 \text{ Pa}$ , (d):  $\dot{m} = 2.0 \text{ g/s}$ ,  $3.65 \times 10^4 \text{ Pa}$ , (e):  $\dot{m} = 2.5 \text{ g/s}$ ,  $4.55 \times 10^4 \text{ Pa}$ )

## 1. 計算モデル

計算モデルの概念図を図9に示す。図2の二次元ダクトにおいて、陰極および第一陽極の中心軸を通る様にz軸を、その両電極の midpoint を通ってダクト側壁に垂直に交わる様にx軸を、x、z両軸に垂直にy軸を対応させる。x-z平面の中心部にはz軸に対して平行に温度 $T_c$ のアーク柱があり、放電電流はその中のみを一様に流れる。アーク柱から熱伝導によって放出された熱量は全て壁面に流れ込み、アーク柱と壁面との間でエネルギーの損失はない。yおよびz方向に状態量の変化はなく、単位長さ当たりのエネルギーバランスで計算を行う。

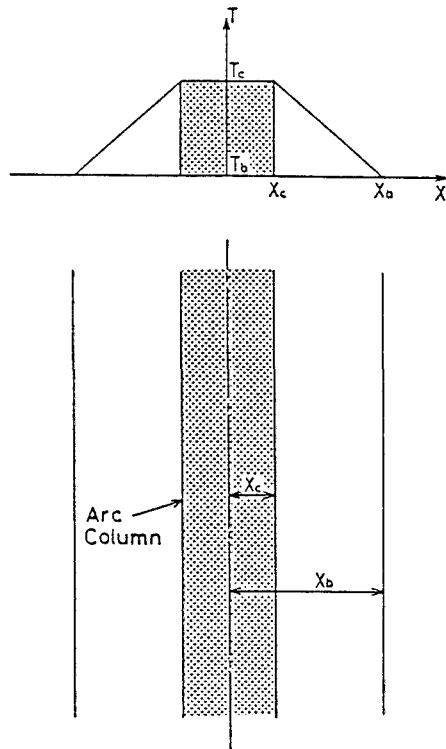


図9 計算モデルの概念図

## 2. 計算仮定

計算を簡略化するため、以下の仮定の下で計算を行う。

- 1) 電流密度がアーク柱の温度分布に依存することから、計算領域を温度が一様な電流輸送領域 ( $0 \sim X_c$ ) と温度が  $X_b$  の壁面温度まで降下する領域の二つの領域に分割する。
- 2) 本実験でのアルゴン、窒素の圧力は高く (1 kPa 以上)、熱平衡がほぼ成り立っているとす。即ち、電子温度とイオン・中性粒子温度は等しい。
- 3) 窒素の場合の反応は、 $N_2$  の解離と  $N$  の電離のみを考慮する。 $N_2^+$  の割合は少なく、それによる電気伝導率の変化は小さいとして無視する。

- 4) Steenbeck によって提唱された最小発熱原理<sup>6)</sup>より、与えられた電流、圧力および壁面温度でアーク柱電界最小のときの計算値を解とする。

## 3. 基礎方程式

### 3-1. Saha の式

・アルゴンの場合

熱平衡を仮定すると、質量作用の法則から、一価電離の式は次式で示される。

$$\frac{n_{A^+}n_e}{n_A} = \left( \frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} \frac{Z_{A^+}Z_e}{Z_A} \times \exp \left( -\frac{V_i}{kT} \right) \quad (1)$$

ここで、 $Z_A$ 、 $Z_{A^+}$  および  $Z_e$  はそれぞれアルゴン原子、アルゴンイオンおよび電子の分配関数であり、 $V_i$  はアルゴンの一価の電離エネルギー、 $m_e$  は電子の質量、 $k$  はボルツマン定数、 $h$  はプランク定数である。また、 $n$  はそれぞれの粒子の数密度を表す。電離度  $\alpha$  を用いて上式を書き換えると、次式の様になる。

$$\frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} p = \left( \frac{2\pi m_e}{h^2} \right)^{3/2} (kT)^{5/2} \times \frac{Z_e Z_{A^+}}{Z_A} \exp \left( -\frac{V_i}{kT} \right) \quad (2)$$

・窒素の場合

窒素の場合は、解離した窒素原子のみが電離するものと仮定して、アルゴンと同じ様に解離および一価電離の式は以下のように表される。

$$\frac{n_N^2}{n_{N_2}} = \left( \frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} \frac{Z_N^2}{Z_{N_2}} \times \exp \left( -\frac{V_d}{kT} \right) \quad (3)$$

$$\frac{n_{N^+}n_e}{n_N} = \left( \frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} \frac{Z_{N^+}Z_e}{Z_N} \times \exp \left( -\frac{V_i}{kT} \right) \quad (4)$$

ここで、 $Z_{N_2}$ 、 $Z_N$ 、 $Z_{N^+}$  および  $Z_e$  はそれぞれ窒素分子、原子、イオンおよび電子の分配関数であり、 $V_d$  および  $V_i$  は解離および一価電離エネルギーである。また、 $n$  はそれぞれの粒子の数密度を表す。解離度  $\chi$  および電離度  $\alpha$  を用いて上式を書き換えると

$$\frac{4\alpha^2}{(1-\alpha-\chi)(1+\alpha+3\chi)} p = \left( \frac{2\pi m_e}{h^2} \right)^{3/2} (kT)^{5/2} \frac{Z_N^2}{Z_{N_2}}$$

$$\times \exp \left[ -\frac{V_d}{kT} \right] \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{2\chi^2}{\alpha(1+\alpha+3\chi)} p \\ & = \left( \frac{2\pi m_e}{h^2} \right)^{3/2} (kT)^{5/2} \frac{Z_{N+} Z_e}{Z_N} \\ & \times \exp \left[ -\frac{V_i}{kT} \right] \quad (6) \end{aligned}$$

ただし、解離度  $\chi$  および電離度  $\alpha$  は以下の式で定義される。

$$\chi = \frac{n_N}{2n_{N_2} + n_N + n_{N+}} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{n_{N+}}{2n_{N_2} + n_N + n_{N+}}$$

### 3-2. アーク柱の熱バランス

単位長さ当たりでアーク柱の発熱量と、壁面への熱移動および制動輻射によるエネルギー損失とが釣り合っていると仮定すると、アーク柱の熱バランスは次式で示される。

$$\frac{I^2}{2X_c \sigma} - 2X_c \epsilon + \frac{2f \lambda dT}{X_c - X_b} = 0 \quad (8)$$

ここで、 $I$  は電流値、 $X_c$  はアーク柱厚さ、 $X_b$  は境界までの距離、 $\sigma$  は電気伝導度、 $\lambda$  は熱伝導度である。また、単位体積当たりの制動輻射エネルギー  $\epsilon$  は次式で示される。単位は  $W/m^3$  である。

$$\epsilon = 1.42 \times 10^{-40} n_e^2 T^{1/2} \quad (9)$$

(8)式の第一項はアーク柱での発熱量で  $IE$  と同値である。第二項は輻射によるエネルギー損失で、制動輻射のみを考慮している。第三項は熱伝導によって壁面に流れ込む熱量である。

### 3-3. 電気伝導度および熱伝導度

電気伝導度は粒子数密度と温度の関数<sup>(7)(8)</sup>で示される。

$$\sigma = \frac{e^2 n_e}{m_e \nu_e} \quad (10)$$

$$\nu_e = \frac{2kT^{1/2}}{m_e} (n_e S_{ei} + n_{N_2} S_{eN_2} + n_N S_{eN}) \quad (11)$$

ここで、 $e$  は素電荷、 $\nu_e$  は電子の衝突周波数、 $S_{ei}$ 、 $S_{eN_2}$  および  $S_{eN}$  はそれぞれ電子と窒素イオン、分子および原子との衝突断面積である。アルゴンの場合も同様に、それぞれの衝突断面積を用いて表す。また、アルゴンおよび窒素の熱伝導度  $\lambda$  は温度によって大きく変化

し、H.W.Emmons<sup>(9)</sup> および E.I.Asinovsky 等<sup>(10)</sup> によって実験的に求められている。本計算ではこの値が用いられ、図10に示される。

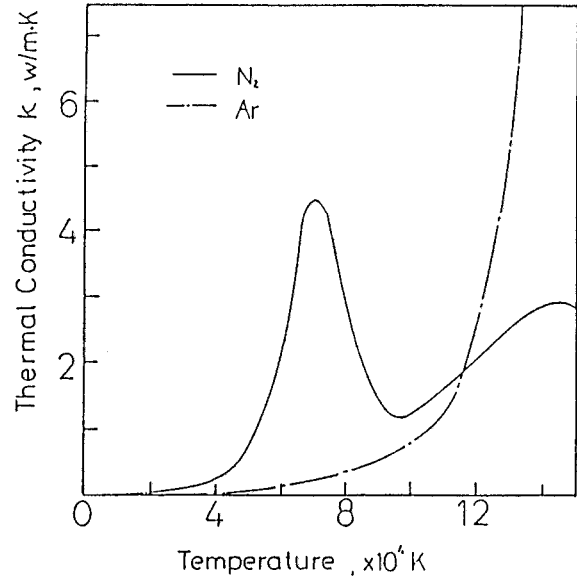


図10 アルゴンおよび窒素の熱伝導度

### 3-4. アーク柱電界強度

アーク柱内で温度は一樣であるとの仮定から、電流密度も一樣と見なされる。

$$j = I / 2X_c \quad (12)$$

そして、アーク柱電界強度は以下の式で与えられる。

$$E = j / \sigma \quad (13)$$

### 4. 計算方法

計算のパラメータとして電流値  $I$ 、圧力  $p$  および壁面温度  $T_b$  (常温度) を与え、初期値として中心温度  $T_c$  (実験値) を与える。その  $T_c$  をサハの式に代入して解離度  $\chi$  および電離度  $\alpha$  を求め、その値から電気伝導度  $\sigma$ 、単位体積当たりの制動輻射エネルギー  $\epsilon$  を計算し、(8)式を用いて  $X_c$  をニュートン法によって計算する。求められた  $X_c$  を(12)式に代入して  $j$  を求め、(13)式を用いて電界強度  $E_1$  を求める。次に、 $T_c$  を増加あるいは減少させて同様の計算を行って電界強度  $E_2$  を求め、先に計算した  $E_1$  と比較し、より電界強度の減少するように  $T_c$  を再設定して再計算し、最終的に電界強度最小となったときの値を計算結果とする。

### 5. 計算結果

壁面までの距離  $X_b$  として、ダクトの幅の半分の値 (17mm) をとる。各作動気体における実験に用いた圧



力および放電電流値について、アーク柱の直径、温度および熱損失が求められる。ここで用いられる放電電流値は、パルス形成回路（主電源）の充電電圧を400Vにして得られた放電電流電圧特性から窒素の場合30Aおよびアルゴンの場合35Aが採用される。得られた計算結果を表2および表3に示す。

表2 アーク柱の直径、温度および熱伝導度

| gas species    | pressure [Pa]      | current [A] | arc diameter ( $X_c/X_b$ ) | arc temperature [K] | thermal conductivity [W/mK] |
|----------------|--------------------|-------------|----------------------------|---------------------|-----------------------------|
| Ar             | $1.33 \times 10^3$ | 35          | 0.427                      | $7.51 \times 10^3$  | 0.449                       |
|                | $6.65 \times 10^3$ | 35          | 0.391                      | $7.93 \times 10^3$  | 0.501                       |
|                | $1.33 \times 10^4$ | 35          | 0.378                      | $8.13 \times 10^3$  | 0.526                       |
| N <sub>2</sub> | $1.33 \times 10^3$ | 30          | 0.269                      | $6.81 \times 10^3$  | 2.858                       |
|                | $6.65 \times 10^3$ | 30          | 0.233                      | $7.33 \times 10^3$  | 2.899                       |
|                | $1.33 \times 10^4$ | 30          | 0.217                      | $7.60 \times 10^3$  | 2.899                       |

制動輻射によるエネルギー損失は、全発熱量の10<sup>-2</sup>%以下であり、ほとんどのエネルギー損失は熱伝導によるものである。図5および図6から、流れが無い場合アーク柱は軸対称的であると仮定すると、その直径  $X_c/X_b$  は窒素の場合約0.03、アルゴンの場合約0.09となる。表2からアーク柱の直径の計算値は、窒素の場合約0.24、アルゴンの場合約0.40となり、定性的に窒素よりアルゴンの方が大きくなることを示している。実験値と計算値の定量的な相違の原因として、各陽極間に絶縁物が存在しているため陽極近傍で非軸対称であることの影響と、陰極近傍でのアーク収縮領域の存在によりアーク柱は軸対称になるため一次元モデルから逸脱することの影響が考えられる。本計算モデルの場合、表3に示されるように壁面への熱伝導が支配的なため、熱伝導度の影響が非常に大きい。図10からも解るように窒素の場合、熱伝導度はアルゴンよりも約5~6倍大きいため、壁面の影響により

表3 損失熱量

| gas species    | pressure [Pa]      | current [A] | generation of heat [W/m <sup>2</sup> ] | heat conduction [W/m <sup>2</sup> ] | radiant heat [W/m <sup>2</sup> ] |
|----------------|--------------------|-------------|--|-------------------------------------|----------------------------------|
| Ar             | $1.33 \times 10^3$ | 35          | $8.25 \times 10^3$                     | $8.25 \times 10^4$                  | $1.21 \times 10^{-2}$            |
|                | $6.65 \times 10^3$ | 35          | $8.87 \times 10^3$                     | $8.87 \times 10^3$                  | 0.198                            |
|                | $1.33 \times 10^4$ | 35          | $9.19 \times 10^3$                     | $9.19 \times 10^3$                  | 0.661                            |
| N <sub>2</sub> | $1.33 \times 10^3$ | 30          | $2.90 \times 10^4$                     | $2.90 \times 10^4$                  | $1.07 \times 10^{-3}$            |
|                | $6.65 \times 10^3$ | 30          | $3.26 \times 10^4$                     | $3.26 \times 10^4$                  | $2.47 \times 10^{-2}$            |
|                | $1.33 \times 10^4$ | 30          | $3.43 \times 10^4$                     | $3.43 \times 10^4$                  | $9.97 \times 10^{-2}$            |

アーク柱の直径は細く絞られる。また、圧力が上昇すると、その直径はわずかに減少する傾向がみられる。

## V 結 言

気流中でのアーク放電において、陽極のアーク柱付着位置に対する気体の流れの影響について、実験により以下の結果が得られた。

- 1) 作動気体がアルゴンの場合、窒素の場合と比較してアーク柱の直径が大きい。
- 2) 作動気体がアルゴンの場合は流れの影響が見られなかったが、窒素の場合はアーク付着位置が流れによって移動する様子が見られた。
- 3) 窒素の場合は圧力が高いほど流れの影響を強く受ける。

本研究を遂行するにあたり、大阪大学大学院卒業生の反納清貴氏（宇部興産勤務）、山田哲也氏（NTT勤務）および大阪職業訓練短期大学校卒業生の三村茂男氏（建設省土木研究所勤務）の協力を得た。また、大阪職業能力開発短期大学校の吉信宏夫校長には貴重な助言と暖かい激励を頂いた。ここに感謝の意を表す。

## 参考文献

- (1) 馬場・反納・吉川他、『気流中におけるアーク放電開始時の電流経路と電極損耗の研究』宇宙科学研究所 宇宙輸送シンポジウム 平成2年度
- (2) 反納・馬場・吉川他、『気流中におけるアーク放電開始時の電流経路の研究』日本機械学会関西支部第67期定時総会講演論文集 No.924-2、(1992)、p.82
- (3) W.D.Deininger, A.Chopra, D.Q.King and T.J. Piviotto, "Thermal Design Improvements for 30 kWe Arcjet Engines," DGLR/AIAA/JSASS 20th International Electric Propulsion Conference IEPC-88-073, October 1988
- (4) Thomas J. Piviotto and W.D.Deininger, "Analysis of a Used Pair of Arcjet Electrodes," SPIE Vol.872 Propulsion, 1988, pp.119-126.
- (5) William D. Deininger and Thomas J. Piviotto, "High-Power, NH<sub>3</sub> Arcjet Cathode Lifetime," SPIE Vol.872 Propulsion, 1988, pp.127-134.
- (6) von Engel, A. and Steenbeck, M., "Elektrische Gasentladung," Springer, Berlin, 1934
- (7) Shao-Chi Lin, E.L.Resler and A.Kantrowitz, "Electrical Conductivity of Highly Ionized Argon Produced by Shock Waves," J. Appl.

Phys., Vol.26, 1955, pp.95-109.

- (8) S. Schweitzer and M. Mitchner, "Electrical Conductivity of Partially Ionized Gases," AIAA J., Vol.4, 1966, pp.1012-1019.
- (9) H.W.Emmons, "Arc Measurement of High-Temperature Gas Transport Properties," Phys. of Fluid, Vol.10, 1967, pp.1125-1133.
- (10) E.I.Asinovsky, A.V.Kirilin and V.I.Shabashov, "Experimental Determination of Thermal Conductivity in Low Temperature Plasma," Thermal Conductivity, 1968