

## 準定常 MPD アークジェット の推力特性\*

吉川 孝雄\*\*・加賀谷洋一\*\*

島本 恭次\*\*・横井 洋一\*\*

(1983年3月25日受理)

## Performance Characteristics of Self-Field Quasi-Steady MPD Arcjet

By

Takao YOSHIKAWA, Yo-ichi KAGAYA

Yasuji SHIMAMOTO and Yo-ichi YOKOI

**Abstract:** Two self-field quasi-steady MDP arcjets, K-III and MS-I, have been investigated to obtain fundamental performance characteristics. The present data are obtained with different propellant species (Ar, NH<sub>3</sub> and H<sub>2</sub>) for discharge current ranging 3 and 25 kA. It was found that three arc modes (diffuse, spot and gross-erosion modes) exist and the electromagnetic scaling law is valid in MPD arcjet. In addition, current distribution, cathode erosion, voltage-current characteristics and thrust efficiency depend strongly on propellant species. The thrust performance for H<sub>2</sub> or NH<sub>3</sub> is better than that for Ar. Thrust efficiency was found to increase monotonically with specific impulse, reaching a value of 39% at 6500 sec for H<sub>2</sub> and 27% at 2500 sec for NH<sub>3</sub>.

### 概 要

K-III と大型の MS-I の 2 種類の準定常 MPD アークジェットの推進性能が研究された。実験は 3 種類の推進剤 (Ar, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>) を用い、放電電流は 3~25 kA の範囲で実験される。その結果、MPD アークジェットには 3 種類の放電モード (拡散、スポット、エロージョ

---

\* 宇宙研特別事業費による研究論文

\*\* 大阪大学基礎工学部

ン)が存在する事が判った。また、K-III と大型の MS-I の間には電磁気的な相似則が成立し、長い陰極より短い陰極の方が推力特性は良好であった。さらに、電流分布、電極損耗、電圧-電流特性および推力特性は強く推進剤の種類に依存した。H<sub>2</sub> と NH<sub>3</sub> に対する推力特性は重い Ar よりも良好であった。推進効率は比推力の増加と共に増加し、H<sub>2</sub> 推進剤に対して、6500 sec で 39 %、NH<sub>3</sub> に対して 3000 sec で 27 % の効率を得た。

### 1. ま え が き

MPD アークジェットは高比推力、高推力密度で作動するので、近い将来スペース・ステーションや太陽発電衛星の輸送および位置制御の推進機として期待されている。しかし実現するためには、最適の電極形状と寸法効果、最適の推進剤の種類、電極損耗の低減化の問題などを明らかにする必要がある。本研究では主として3種類(H<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub> と Ar ガス)の推進剤を用い、さらに2種類の MPD アークジェット(K-III と MS-I)を用いて推力特性を測定し、推進剤の種類と電極形状が推力特性にどのように影響するかを議論する。さらに Rogowski コイルを用いてアークジェット下流の放電電流の分布が測定され、その電流分布が推進効率および陰極の損耗とどのように関係しているかを議論し、推進剤の種類により最適の放電室形状があるという事を示す。

MPD アークジェットにおいて、推進剤流量( $\dot{m}$ )が一定の時、放電電流( $J$ )が大きくなれば、推力( $T$ )および推進効率( $\eta$ )が良くなることが知られている。しかし、放電電流には $\dot{m}$ に対応する上限の値が存在し[1][2]、その電流を越えると、電極の損耗が激しく、放電が不安定になり、推進機としては好ましくない作動になる。したがって、推進性能を論ずる場合には、この上限電流を明確に定義し決定することは非常に重要である。本研究では放電電圧の変動と電圧-電流特性により、MPD アークの放電モードを3種類に分類する。激しい陽極損耗が生じる電流範囲では、その平均電圧波形が矩形でなくなるという事実が判明したので、その開始を上限電流 $J^*$ と定義した[3]。そして Alfvén[4]-[6]などにより提案された臨界電離速度に基づいて理論的に予想される電流(臨界電流と呼び $J_c$ で示す。)と比較検討する。

将来 MPD アークジェットが宇宙空間で推進機として使用される時には、多種多様の仕様が要求される。すなわち、電力、重量などが与えられ、所定の推力、比推力および推進効率が要求される。それに対応するためには、推進剤の種類および電極形状を変えた時、推進性能がどのように変化するかを調べ、相似則を確立しておくことはぜひ必要である。本研究では K-III とそれより放電室容積が3倍大きい MS-I の2種類のアークジェットを製作し実験した。さらに、MS-I では陰極の長さを3種類準備し、その推進特性を上限電流 $J^*$ に注目して評価する。

実際に MPD アークジェットを宇宙空間での推進機として用いる場合には、本論文で議論する推力、推進効率および電極の損耗以外のパラメータを考慮しなければならない。例えば、運搬の容易さ(貯蔵性)、推進剤の宇宙環境の汚染の問題、電磁干渉の問題を評価す

る必要がある。

## 2. 実験装置および方法

図1にK-IIIとMS-I MPD アークジェットの概略図を示す。K-III[7]は長さ33 mm, 直径9.5 mmのトリウム・タングステンの陰極と内径36 mm, 奥行33 mmの放電室をも

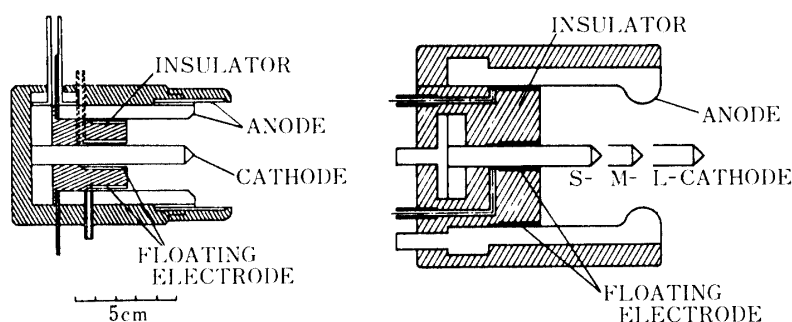


図1 K-IIIとMS-I MPD アークジェット

ち、出口内径は52 mmである。陽極は銅製で外側は絶縁されている。一方、MS-IはK-IIIより3倍大きい放電室容積をもち、その内径は70 mmである。安定した放電を得るために、出口附近にリップを設け、リップ部分の内径はK-IIIの出口内径と一致する様に52 mmにした。陰極はK-IIIと同様に直径9.5 mmのT,Wからなり、3種類の長さの陰極(L, M, S)を製作した。M-陰極は丁度リップの位置に陰極先端が一致するように設計され、L-およびS-陰極はM-陰極よりそれぞれ30 mm長く、あるいは20 mm短く設計された。

放電室への気体の供給はそれぞれ4個のオリフィスを用いて、陽極内側と陰極外側より行なわれる。本実験条件では気体の投入法により推力特性が変わらない事が確認されたので、陽極側と陰極側の流量比は1対1とした。高速電磁弁(FAV)を用いて約6 msの間定常な気体の供給が行なわれる。流量( $m$ )はオリフィス直径とFAVの貯気槽圧により調整され、その絶対値はオリフィスのスロート部で閉塞状態にあるとして理論的に計算される。実際に真空タンクを閉じ、タンク圧上昇速度より流量を校正すると、そのオリフィスの縮流係数は0.85~0.95であった。本研究のごとく、流量の値に理論値を用いる事は、それぞれの実験条件で流量を最大に見積っているのだから、実際はここで得られた推進効率以上の値を期待することができる。

実験装置の概略図を図2に示す。MPDアークジェットは最大62 kJ蓄えることができる40段のL-C梯子回路(PFN)により駆動される。本実験ではPFNは0.6 msの間、最大27 kAの電流を準定常に供給することができる。真空タンクは実験前に $2 \times 10^{-3}$  Pa以下に排気される。放電電流は校正されたRogowskiコイルを用いて測定され、放電電圧は電極間に10 kΩの抵抗を接続し、その分流回路に流れる電流をカレント・プローブ(岩通CP-502)を用いて測定する。電圧測定系の周波数応答は約1 MHzである。

図2に示すように、MPDアークジェットとFAVは真空タンクの天井から吊るされた推

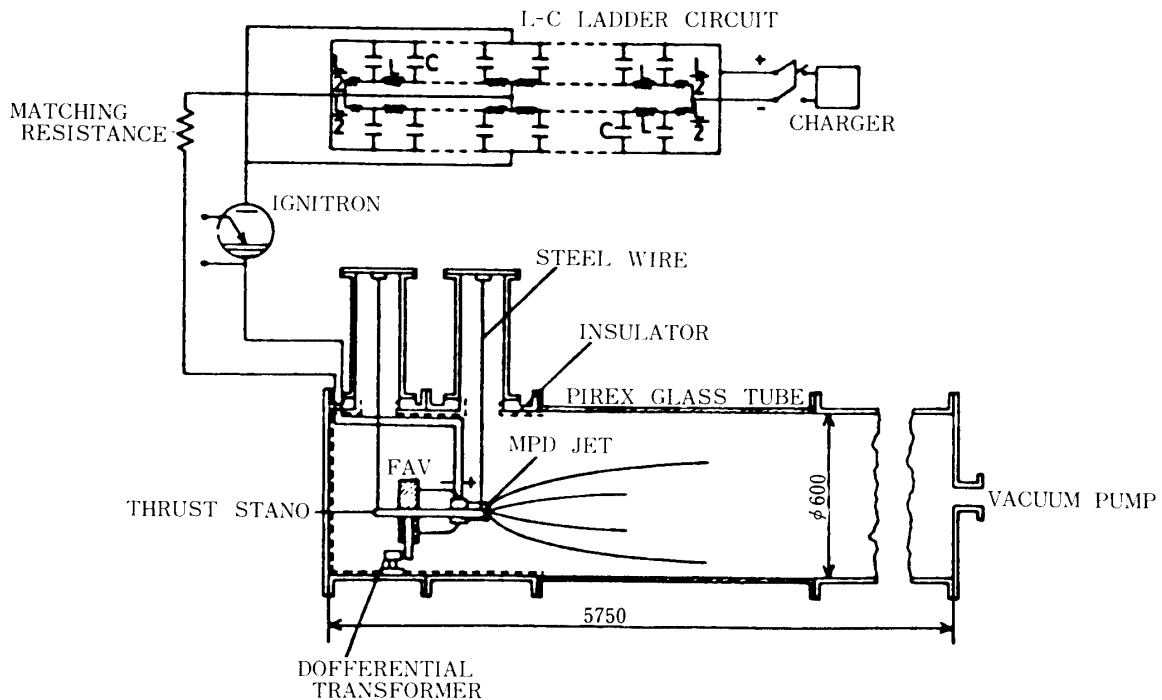


図2 実験装置の概略図

進台の上に取り付けられる。その重さは約 8 kg で、推進台は約 1 Hz の固有振動数をもつ 1 自由度の減衰振動をする。推進台の変位は差動変圧器により検出される。推力は鋼球を用いて衝撃力を推進台に与えることにより校正された推進台の変位より求めることができる。その時、アークジェットが点火していない時の冷たい気体による推力は除かれる。

以上の方法により測定された放電々流 ( $J$ )、放電々圧 ( $V$ )、推力 ( $T$ ) および流量 ( $\dot{m}$ ) を用いて MPD アークジェットの推力特性を以下に議論する。

### 3. 実験結果および考察

#### (a) MPD アークジェットの放電モード

一定流量において、電流を増加させた時の代表的な電圧波形を図 3 に示す。  $J=5 \text{ kA}$  において、電圧波形は静かであるが(拡散モード)、電流を次第に上げると、陽極にスポットが形成され(スポット・モード)、そのスポットの運動により電圧波形に高周波成分が観測される。陽極にスポットが発生すると、陽極のエロージョンが生じ、次第にその平均電圧波形は矩形ではなくなってくる。本論文では、平均電圧波形が矩形でなくなり始める電流を上限電流と呼び  $J^*$  の記号で示す。さらに電流を上昇させると、図 3 (d) に示すように、激しい変動電圧はなくなり、激しい陽極エロージョンが生じるので、エロージョン・モードと呼ぶ。本論文では、 $J^*$  以上の作動は推進機として受け入れることができないと考え、以下の図で内部を黒く塗りつぶした記号を用いる。

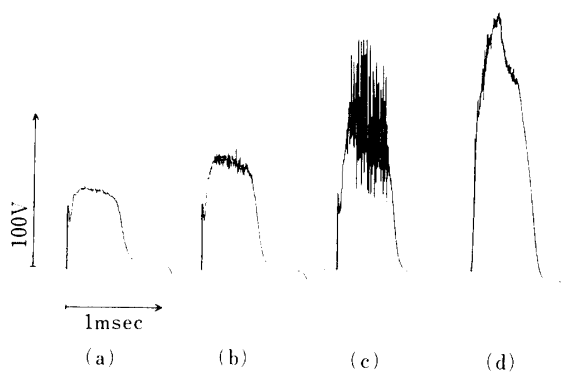


図3 代表的な放電々圧波形  
 推進剤：Ar,  $\dot{m}=2.4 \text{ g/s}$ , a) 5 A, b) 9 A,  
 c) 16 kA, d) 21 kA

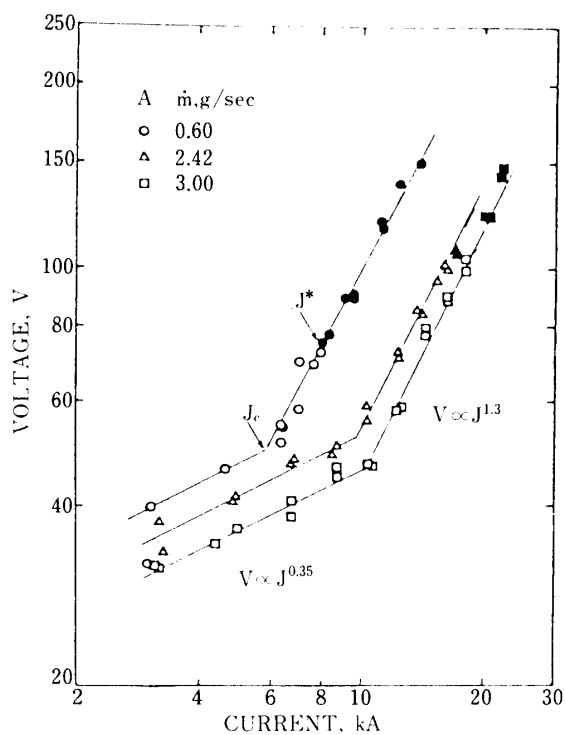


図4 Arの電圧-電流特性

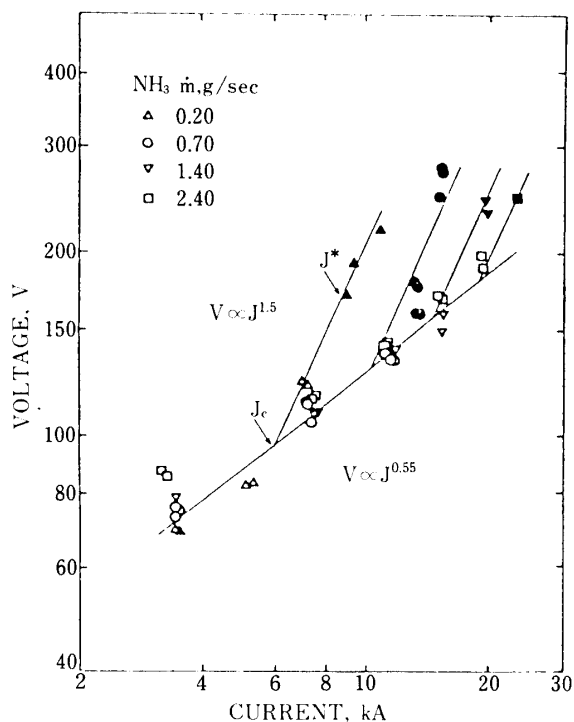
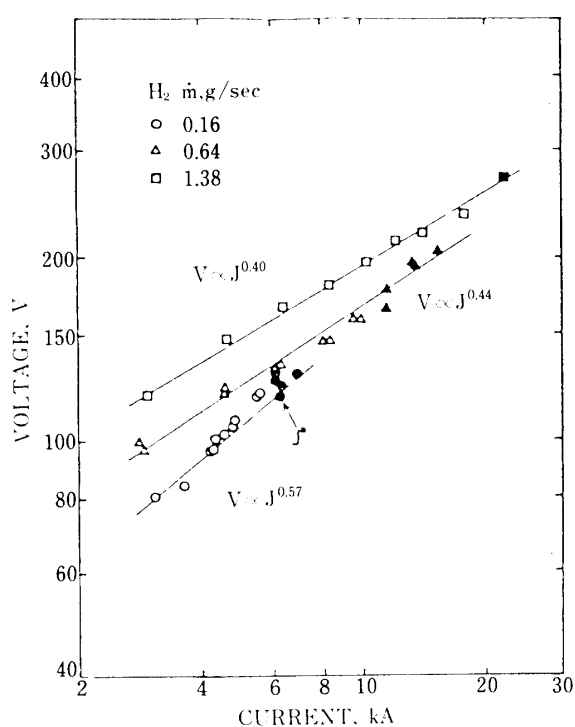


図5 NH<sub>3</sub>の電圧-電流特性

K-III アークジェットの場合の Ar, NH<sub>3</sub> および H<sub>2</sub> 推進剤を用いた時の電圧-電流特性をそれぞれ図4-図6に示す。一般に電圧は電流と共に増大し、ある電流値を越えるとその増加率は突然大きくなる。この時の電流値を本論文では、臨界電流と呼び  $J_c$  の記号で示す。実験的に求めた  $J_c$  は磁場中での臨界電離速度に基づいて計算した値[2][6]と表1

図6 H<sub>2</sub>の電圧-電流特性

に示すように、ArとNH<sub>3</sub>の場合には非常に良く一致した。図6のH<sub>2</sub>の場合には電圧-電流特性において、折れ曲がり点は観測できなかった。以上の結果より、電圧波形より決定した上限電流 $J^*$ は、Arの場合には $J_c$ より大きく、NH<sub>3</sub>の場合はほとんど同じであり、H<sub>2</sub>の場合は $J_c$ 以下であった。Arの場合には陽極スポットができて、それが大きく成長して激しい陽極損耗を引き起こしにくいのに対し、H<sub>2</sub>の場合には軽い気体であるので、陽極上に電流集中が起り易いためと考える。すなわち気体特有の性質によるものであろう。

表1  $J_c$ と $J^*$ の実験値( )は理論値

Propellant	$\dot{m}$ g/s	$J_c$ kA	$J^*$ kA
Argon	0.60	5.8 (5.0)	7.9
	2.42	9.6 (10.1)	15.4
	3.00	10.5 (11.2)	20.2
Ammonia	0.20	5.9 (5.0)	7.2
	0.70	10.2 (9.3)	11.0
	1.40	14.6 (13.2)	15.2
	2.40	18.8 (17.3)	21.2

## (b) 電流分布

Rogowski コイルを用いて下流への電流の張り出しの様子が調べられた。そのコイルの直径は 10~60 mm で 10 mm 間隔で 6 種類が準備され、それぞれ軸方向 10 mm 間隔の位置で測定された。図 7 は  $J \sim 10$  kA,  $\dot{m} \sim 1.4$  g/s に定め、推進剤の違いによる電流分布の様子を示している。Ar の場合には、張り出し電流は全電流の 10% と一番少なく、NH<sub>3</sub> の場合には 30%, H<sub>2</sub> の場合には 60% も張り出し、陰極先端で放電していることを示している。この理由は次のように考えられる。放電室内では強い  $\theta$  方向の磁場  $B_\theta$  ( $J=10$  kA, 半径  $r=15$  mm で  $B_\theta \sim 1500$  Gauss) が存在し、放電室圧力が低いので、粒子間衝突が余りないとすれば、重いイオンが主として電流を運ぶと考えることができる。下流および放電室側壁での Langmuir 探針の測定結果より電子温度は 3~4 eV と推定されたので、放電室内のイオン温度を 3 eV と仮定すれば、Ar のイオン・ラーマ半径は約 12 mm, 水素のそれは 1.9 mm となる。Ar のイオン・ラーマ半径は放電室半径とほぼ同じオーダーであるが、水素のそれは小さいので、H<sup>+</sup> は放電室内で Ar<sup>+</sup> と比べて半径方向に動きにくいことがわかる。したがって、H<sub>2</sub> 推進剤の場合には電流は下流に多く張り出す。

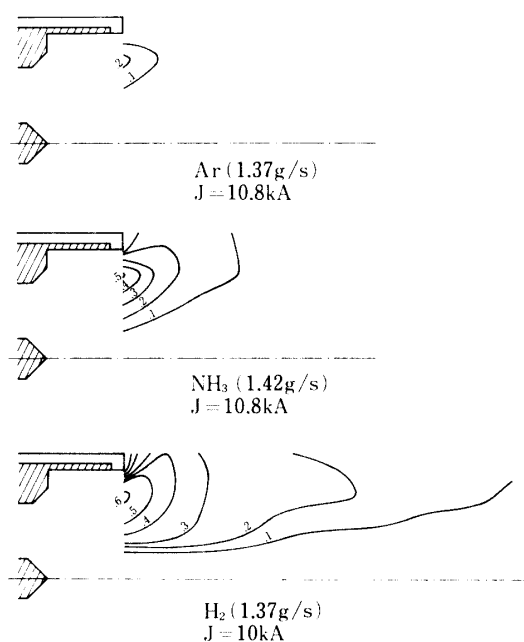


図 7 張り出し電流分布

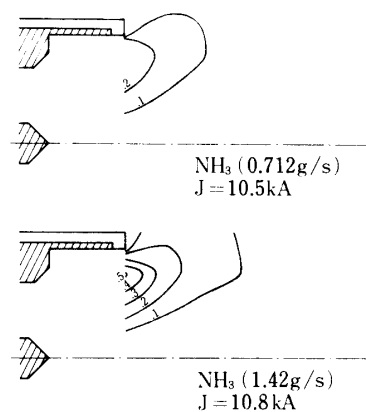
図 8 NH<sub>3</sub> の張り出し電流分布

図 8 に NH<sub>3</sub> を用いた時の電流分布を  $\dot{m}=0.7$  g/s と  $\dot{m}=1.4$  g/s の場合について示す。流量の増加と共に下流の張り出し電流量は増加する。

さらに注目すべき測定結果は、 $J^*$  以上の電流範囲では Rogowski コイルの出力信号と放電圧波形はほとんど同じように変動することが観測された。この事実は陽極のエロージ

オンが生じれば多量の Cu 蒸気が陽極面より放出され、その結果放電室内で電流を運ぶイオンが増加するので、張り出し電流がなくなることを示す。陽極のエロージョンによりアーク電流路が非定常に変化するので、 $J^*$  以上の作動では MPD アークジェットは多くのノイズを出すことが予想される。宇宙空間で用いる時には、 $J^*$  以上の作動は電磁干渉の面からいっても受け入れることはできない。

(c) 推力-電流特性

代表的な流量で種々の推進剤で作動させた時の K-III の推力-電流特性を図 9 に示す。推力は次式のように、電磁氣的加速成分と空力的加速成分の和として表わすことができる。

$$T = bJ^2 + \dot{m}u_a \quad (1)$$

$$b = 10^{-7} \{ \ln(r_a/r_c) + \alpha \} \quad [\text{MKS}] \quad (2)$$

ここで、 $r_a$  と  $r_c$  は陽極および陰極半径である。 $\alpha$  は陰極先端に流れ込む電流の割合の関数である。 $u_a$  は Joule 熱により加熱された気体が空力的効果より得られる出口速度である。図 9 で Max. と Min. 線は電磁氣的加速成分を示し、Max-線は  $\alpha = 3/4$ ,  $r_a = 26$  mm,  $r_c = 4.75$  mm, Min-線は  $\alpha = 0$ ,  $r_a = 18$  mm,  $r_c = 4.75$  mm として計算した式(1)の第1項である。この図で、電流の小さい範囲では空力加速成分が支配的であり、電流が大きくなると  $T \propto J^2$  の関係を満たす電磁氣的加速成分が支配的になる。図 7 に示した電流分布より、 $\text{H}_2$  と  $\text{NH}_3$  の場合には先端に流れ込む電流量の割合が大きいため、電流を上げると Max-線

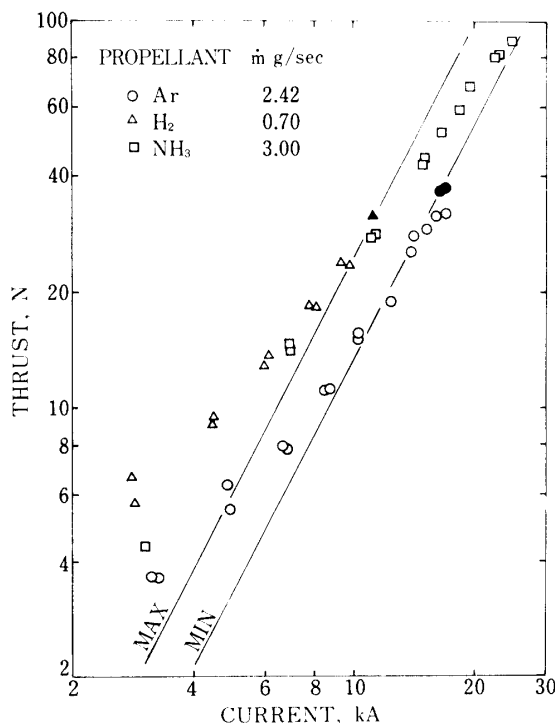


図 9 K-III の推力-電流特性

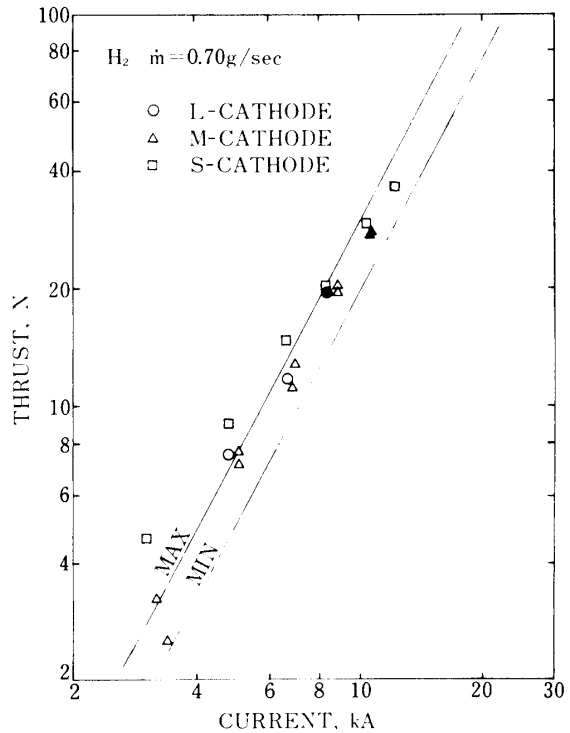


図 10 MS-I の推力-電流特性



に近づき、Ar の場合には少ないので Min-線に近づく。また、 $H_2$ 、 $NH_3$  のような軽い気体の場合には空力的加速成分が多くなる。

MS-I アークジェットで流量を一定にして、陰極長さを変えた時の  $H_2$  の場合の推力-電流特性を図 10 に示す。この図より、同じ電流では短い S-陰極の場合が一番大きな推力を得ることができ、また上限電流  $J^*$  も大きくなる。すなわち、陰極先端より流れ込む電流の割合が大きくなる程放電は安定しており、大きな推力が得られる事が判る。長い L-陰極を用いた時には、陰極面では比較的広い範囲にわたって放電するので、陰極の損耗はほとんど生じない。しかし、陽極面ではアークはローレンツ力により外側に押しやられるので、陽極前面の外端にアークが集中する傾向があり、この部分がエロージョンを起こし、上限電流は小さくなる。 $NH_3$  の場合は水素とほぼ同じ結果であったが、Ar の場合には陰極長さを変化させても推進性能はほとんど変化しななつた。その理由は Ar の場合には電流がほとんど放電室内部で流れているためと考える。陰極長さを変えるよりはむしろ陽極の形を変える事により性能向上を計る方がより有効である[8]。

図 10 に示すように、放電室の大きさを変えても  $T \propto J^2$  の関係が成り立っているので、MPD アークジェットでは電磁氣的な相似則は成り立っていると考えられる。また、電流が先端に設けたリップの部分に集中する事を期待したのであるが、電流路はローレンツ力により外側へ押しやられほとんどその効果はなかった。むしろ、軽い気体の  $H_2$  の場合には K-III と比較して空力的加速が妨げられ逆効果であった。現在リップを取り去って実験を行い、リップがある場合よりも良好な推進性能を得ている。

#### (d) 電圧-電流特性

電圧-電流特性は図 4-図 6 に示された。MPD アークジェットの電圧は[9][10]、

$$V = V_d + V_m + V_t \quad (3)$$

ここで、 $V_d$  は陰極および陽極ドロップによる電圧で、臨界電流値までは約 20 V でほぼ一定である。 $V_m$  は電磁氣的加速に必要な電圧で

$$V_m = b^2 J^3 / 2m \quad (4)$$

$V_t$  は解離、電離および粒子の加熱に必要な電圧である。一般に、 $V_t$  は気体が Joule 加熱で加熱され、電気伝導度が一定ならば、 $V_t \propto J$  の関係が成り立つ[10][11]。本実験結果によれば、 $J_c$  までの小さい電流では、 $V \propto J^{0.35-0.55}$  になった。この理由は電流が増加すれば、解離・電離が盛んになると共に電子温度 ( $T_e$ ) が上昇し、電気伝導度  $\sigma$  (Spitzer によれば  $\sigma \propto T_e^{3/2}$ ) が大きくなるために、 $V \propto J$  よりもむしろ  $V \propto J^{0.35-0.55}$  の関係を満たすものと考えられる。流量が少なくなれば  $V \propto J$  の関係に近づく傾向がある。

一方  $J_c$  以上では、電磁氣的加速による電圧  $V_m \propto J^3$  の関係を満足する事が予想されるが、本実験では  $V \propto J^{1.3-1.55}$  の関係を満たし、それ程電圧は上昇しなかつた。この理由は  $J_c$  を越えると陽極スポットが形成され、陽極より Cu の蒸気が放出され電離される。さらに、気体のそれ以上の電離が生じる(例えば二価イオンの生成など)。すなわち、 $J_c$  以上でも完全な電磁氣的加速による電圧だけでなく、電離・加熱に要する電圧も必要であるためと考

えられる。

次に、電流一定の時、電圧の  $m$  依存性には次の3つのタイプがある。i)  $Ar$  (重い気体) は  $m$  が増加すれば、電圧は減少する。ii)  $NH_3$  ( $CO_2$  など分子気体) は  $m$  により電圧はほとんど変化しない。iii)  $H_2$  ( $He$  など軽い気体) は  $m$  が増加すれば、電圧は増加する。これは式(3)で電磁氣的加速に必要な電圧  $V_m$  ( $V_m \propto 1/m$ ) と電離、加熱に必要な電圧  $V_t$  ( $V_t \propto m$ ) の大小関係に依存するものと考え、 $H_2$  のような軽い気体では、同じ流量ならば  $Ar$  のような重い気体と比べて粒子数が多いので  $V_t$  の方が  $V_m$  より大きくなる。

(e) 推進効率

次式を用いて比推力と推進効率が計算される。

$$I_{sp} = T/\dot{m}g = U/g \quad (5)$$

$$\eta = \dot{m}U^2/2VJ = T^2/2\dot{m}VJ \quad (6)$$

$$T_p = T/VJ \quad (7)$$

ここで  $g$  は重力加速度、 $U$  は排出速度、 $T_p$  は推力-入力比 (Thrust-Power Ratio) である。

図11と図12にK-IIIとMS-Iアークジェットを用いて最大の効率が得られた代表的流量での  $\eta-I_{sp}$  特性を示す。これらの図で実線は式(7)に示された推力-入力比を示している。これらの図より、推進効率は比推力と共に、すなわち放電電流と共に増加する。もし

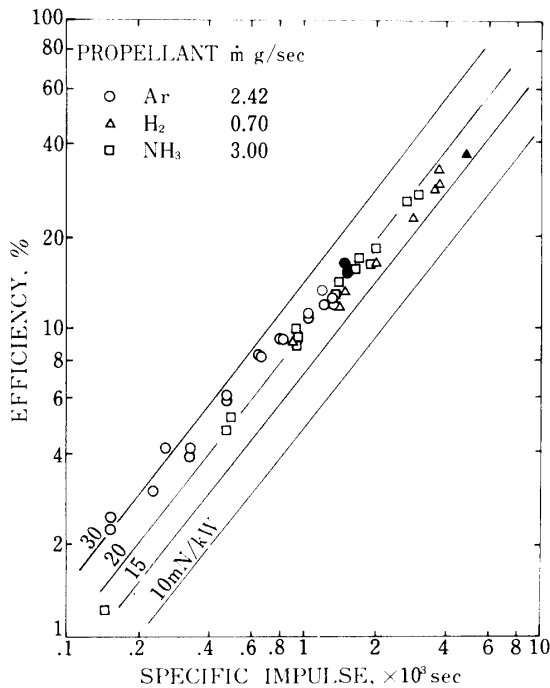


図11 K-IIIの推進効率-比推力の関係

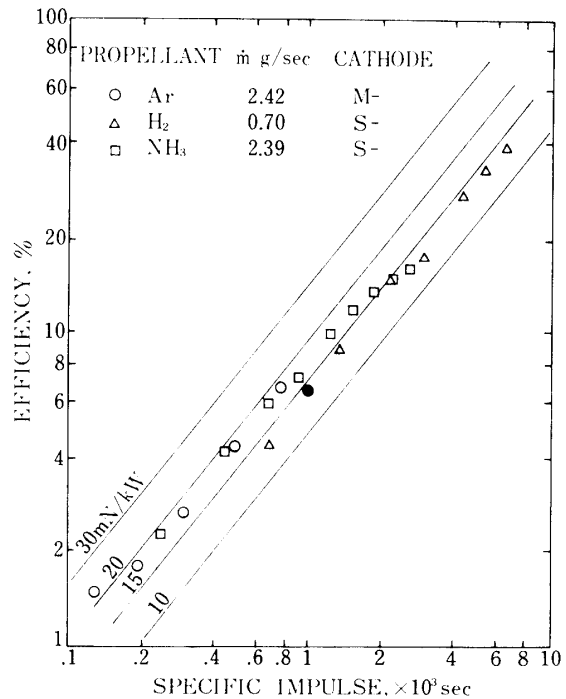


図12 MS-Iの推進効率-比推力の関係

て上限の比推力は軽い気体の方が大きい事が判る。

興味深い事は  $\text{NH}_3$  の場合には、本実験条件の範囲で、 $\dot{m}$  を増加すれば上限電流  $J^*$  ( $\sim J_c$ ) が  $(J^2/\dot{m})_c$  の関係で増加するので、 $\eta$  は  $\dot{m}$  の増加と共に大きくなる。しかし  $\dot{m} = 3 \text{ g/s}$  以上の実験は電源 (PFN) の最大電流に上限があるので、残念ながら行うことができなかった。ここには示していないが  $\text{CO}_2$  も同様の傾向をもつ。

図 11 と図 12 を比較すると、K-III は大型の MS-I より低電流域では空力的加速成分のため、大きな推力-入力比および高効率である。しかし、MS-I は陽極表面積が大きいため、 $\text{H}_2$  の場合には大きな上限電流まで安定な放電が可能であったので、高効率が得られた。MS-I アークジェットで  $\text{H}_2$  を推進剤として用いた時、 $I_{sp} = 6500 \text{ sec}$  で  $\eta = 39\%$  を得た。Ar と  $\text{NH}_3$  を用いた時に、上限電流は MS-I と K-III はほとんど同じであった。

#### (f) 電極のエロージョン

激しい陽極のエロージョンが生じれば、電流路が非定常に変化し、放電電圧波形は矩形ではなくなる。したがって、本論文で定義した上限電流  $J^*$  以下で作動させれば、陽極のエロージョンはほとんど問題にならない。一方、陰極では小電流から大電流まで、MPD アークを安定に維持するために陰極表面にスポットが形成され、電子と陰極蒸気を供給しなければならない。そこで、本実験では  $J = 10 \text{ kA}$  で 200 回のアークジェットの作動の後、 $T_r W$  陰極の重量を天秤で測定することにより、陰極エロージョン損失を決定した。その結果を表 2 に示す。陰極エロージョン率は  $\text{g/C}$  の単位で示す。すなわち、損失率は放電電流と放電時間に比例すると考える。

表 2 によれば、エロージョン率は気体の種類に強く依存し、Ar,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2$  の順に大きくなる。この理由は図 7 の電流分布の結果から考えれば、Ar の場合には陰極全体にわたって比較的一様に放電しているのに対し、 $\text{H}_2$  の場合には陰極先端への電流集中度が非常に強いので、陰極先端での損耗が大きいためと考えられる。

表 2 K-III の陰極エロージョン損失率

Propellant	$\dot{m}$ g/s	J kA	Cathode Loss $\mu\text{g/C}$
Argon	3.00	10	5.1
Ammonia	2.40	10	8.7
Hydrogen	1.38	10	15.1

## 4. 結 論

準定常 MPD アークジェットの推力性能におよぼす推進剤の種類と電極形状の影響が実験的に研究され、次の結果を得た。

- 1) 電圧-電流特性において、電圧の増加率の突然の変化より求めた臨界電流  $J_c$  は臨界電離速度に基づいて理論的に計算された値とよく一致した。
- 2) 電圧波形が矩形でなくなると、激しい陽極エロージョンが生じ、そのために放電路が非定常になる。

- 3) 張り出し電流の割合は推進剤の種類に強く依存する。イオン・ラーマ半径の相違により軽い気体ほど張り出し電流の割合は大きくなる。
- 4) 陰極先端部へ流れ込む電流量が大きいほど、同じ電流では推力、比推力とも良い結果を得た。しかし、陰極先端部の損耗は大きくなる。
- 5) 電圧-電流特性において、 $J_c$  までは  $V \propto J^{0.35 \sim 0.55}$ 、 $J_c$  以上では  $V \propto J^{1.3 \sim 1.5}$  であった。同じ電流値で、電圧の  $m$  依存性には (i) Ar 型, (ii)  $\text{NH}_3$  型, (iii)  $\text{H}_2$  型の 3 種類がある。
- 6) 大型の MS-I の実験結果は MPD アークジェットでは電磁気的な相似則が成り立つ事を示した。陽極放電面積の増大により、 $\text{H}_2$  の場合には上限電流  $J^*$  を上げることが可能であるので、効率は向上した。また、先端のリップは放電を安定させる効果は少なく、むしろ空力加速には不利に作用した。
- 7) MPD アークジェットには 3 種類 (拡散, スポット, エロージョン) のモードが存在し、宇宙で実際に使用する場合は陽極エロージョンが生じない電流範囲で作動させる必要がある。陰極のエロージョンは放電を維持するためには必要なものであるが、できるだけ少ないことが望ましい。将来長時間の繰り返し作動の場合には、陰極材料の改善および陰極を後方より送り出す方式などを考える必要がある。
- 8) 推力特性は強く推進剤の種類に依存し、 $\text{H}_2$  と  $\text{NH}_3$  に対する推力特性は重い Ar よりも良好であった。推進効率は比推力と共に増加し、 $\text{H}_2$  推進剤に対して  $I_{sp} = 6500 \text{ sec}$  で  $\eta = 39\%$ 、 $\text{NH}_3$  に対して  $I_{sp} = 3000 \text{ sec}$  で 27% を得た。宇宙での使用を考えた場合、推進剤としては  $\text{NH}_3$  (現在実験中の  $\text{CO}_2$ ) が優れている。

この研究の遂行に暖かい援助の手を差しのべられた栗木恭一宇宙研教授および石川島播磨重工の森本進治、上松和夫の諸氏に深く感謝します。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Malliaris, A et al., "Quasi-Steady MPD Propulsion at High Power," Final Tech. Report AVSD-0146-71-44, NASA CR-111872, Feb. 1971.
- [ 2 ] Rudolph, L.K. et al., "Onset Phenomena in Self-Field MPD Arcjet," AIAA Paper 78-653, 1978.
- [ 3 ] Yoshikawa T. et al., "Thrust and efficiency of New K-III MPD Thruster," AIAA Paper 82-1887, 1982.
- [ 4 ] Alfvén H., "Collision between a Nonionized Gas and a Magnetized Plasma," Rev. Mod. Phys., Vol. 32, 1960, pp. 710-713.
- [ 5 ] Fahleson, U. V., "Experiments with Plasma Moving through Neutral Gas," Phys. of Fluid, Vol. 4, No. 1, 1961, pp. 123-127.
- [ 6 ] Patrick, R.M. and Schneiderman, A.M., "Performance Characteristics of a Magnetic Annular Arc," AIAA Journal, Vol. 4, No. 2, 1966, pp. 283-290.
- [ 7 ] Kuriki, K. et al., "Thrust Measurement of K-III MPD Arcjet," AIAA Paper 81-0683, 1981.
- [ 8 ] Kunii, Y. et al., "Current Distribution in a Quasi-Steady MPD Arcjet," AIAA Paper 82

- 1917, 1982.
- [ 9 ] Clark, K.E. and Jahn, R.G., "Quasi-Steady Plasma Acceleration," AIAA Journal, Vol. 8, 1970, pp. 216-220.
  - [10] Kuriki, K. and Suzuki, H., "Transitional Behavior of MPD Arcjet Operation," AIAA Journal, Vol. 16, No. 10, 1978, pp. 1062-1067.
  - [11] Bole, M.J. et al., "Flowfield Characteristics and Performance Limitations of Quasi-Steady Magnetoplasmadynamics Accelerators," AIAA Journal, Vol. 14, No. 7, 1975, pp. 955-962.
  - [12] Spitzer, L.Jr., "Physics of Fully Ionized Gases," Interscience Pub., 1962.