

酸素を推進剤に用いたホールスラストの研究*¹

Experimental Investigation of a Hall Thruster Using Oxygen as the Propellant

中川 貴史*^{2,3}・山本 直嗣*⁴・小紫 公也*⁵・荒川 義博*⁴
Takafumi NAKAGAWA, Naoji YAMAMOTO, Kimiya KOMURASAKI and Yoshihiro ARAKAWA

Key Words: Electric Propulsion, Hall Thruster, Oxygen

Abstract: Thrust performance and internal efficiencies of a Hall thruster using oxygen as the propellant were investigated experimentally. The thrust efficiency reached at 9% with the specific impulse of 1,000 s. The relatively poor performance is due to low propellant utilization, which is 45%, in comparison with that in the case of xenon propellant. The propellant utilization increased with mass flow rate and discharge voltage. The optimum channel length for oxygen was found longer than that for xenon, which was 12 mm. The use of BN・AlN for the channel wall results in higher propellant utilization than that of BN for channel wall.

1. はじめに

現在の宇宙活動は全て地球を起点としたものであるため、打ち上げのための推進剤に多くの重量を割かねばならず、必然的にペイロードは少なくなる。このため将来的には打ち上げに必要な推進剤重量が少ない月や宇宙ステーションを起点とする地球から独立した宇宙活動が展開されるものと考えられている。

この宇宙活動に月資源を利用することが古くから提唱されているが、月資源の候補として最も注目されているのが酸素である^{1,2)}。月面の表土(レゴリス)は各種の固体酸化物で構成されているため、これらを還元することで酸素が入手可能である。またクレーター内の永久暗黒域に存在するといわれる氷塊を電気分解することでも酸素が手に入る。

月製酸素を用いたミッションとしては、LEOより上の軌道間輸送、あるいは月面を中継点とした火星等への航行等が従来から提案されているが、最近では地球～LEO間の往復輸送における垂直離着陸型SSTOのLEOから地球への「帰還用酸化剤」として月製酸化剤を用いるミッションも提案されている³⁾。これらのミッションでは、月面～月低軌道間の輸送に月製液体酸素を酸化剤に用いた化学推進ロケットを利用し、月低軌道からの輸送には月製酸素を推進剤に用いた電気推進機を利用することが有効と考えられている。

このミッションに最適な電気推進機として考えられているのがホールスラストである。他の電気推進機と異なり、推進剤をジュール加熱し空気力学的に加速する機構ではなく

電磁的に加速する機構であるため酸化の影響が少ないこと、イオン加速部にグリッドを使用していないため酸素イオンの衝突による劣化・損耗がないことから、酸素を推進剤に用いるのに適しているといえる。ホールスラストは、比推力1000～3000sで50%を超える推進効率(推進剤:キセノン)を達成しており⁴⁾、ロシアを中心に既に100機以上の宇宙機搭載実績を持っている^{5,6)}。

酸素をホールスラストの推進剤に用いる場合、予想される課題として電離度の低下が考えられる。第1図に示すように酸素とキセノンの電離電圧はほぼ同じであるが、電離断面積⁷⁾には大きな差があり、酸素はキセノンに比べ電離しにくい。

本研究では、酸素を用いたホールスラストで十分な性能を得るための設計指針を得ることを目的に、推進性能と内部効率の測定を行い、キセノンを用いた場合と比較した。さらにスラストの作動パラメータが電離に与える影響を調べた。

2. 実験装置

2.1 ホールスラスト

実験には1kW級マグネティックレイヤ型ホールスラストを使用した。このタイプのホールスラストはロシアにおいてSPT(Stationary Plasma Thruster)と呼ばれるものである。この断面図を第2図に示す。このスラストのチャンネル外径は60mm、幅は5mmで、チャンネル長はアノードを取り替えることで4mmから14mmまで変化させることができる。本実験では特に言及しない限りチャンネル長は12mm、チャンネル壁のセラミックの材質はBN・AlN複合焼結体(BN:AlN=4:6)である。チャンネル内にはソレノイドコイルによって半径方向に磁場が印加される。磁束密度は加速チャンネル内でほぼ一様となるように設計さ

*1 © 2003 日本航空宇宙学会

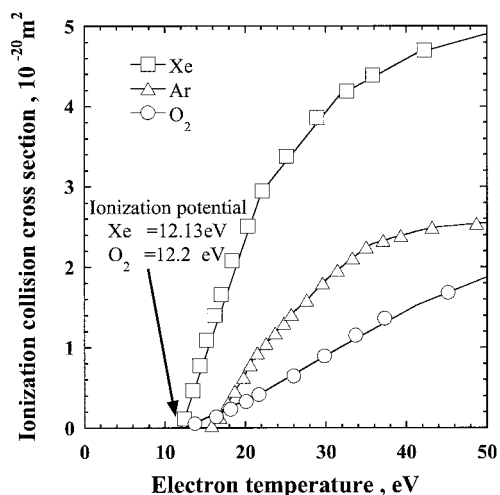
平成14年10月29日原稿受理

*2 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻

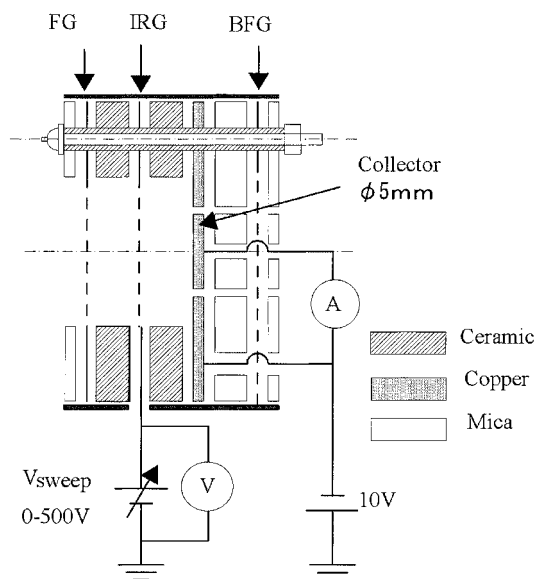
*3 現三菱電機(株)

*4 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻

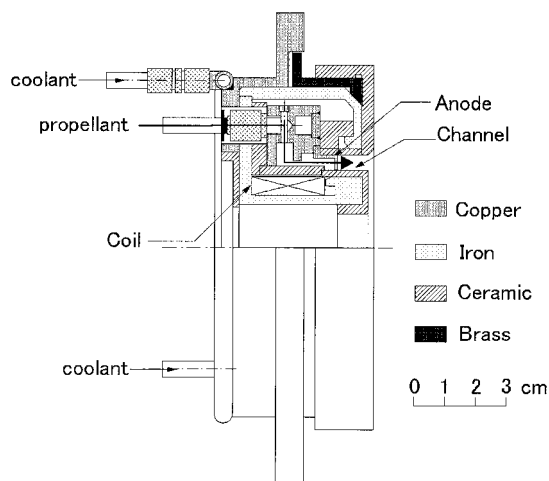
*5 東京大学大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻



第1図 各推進剤の電離断面積 (出所: L.J.Kieffer: Atomic data vol.1 Low-Energy Electron-Collision Cross-Section Data Part I, Academic Press ISSN)



第3図 エネルギーアナライザ概略図



第2図 ホールスラスト断面図

れており、コイル電流 1 A で 0.014 T 程度となっている。
 アノード部分は直接酸素に晒されるため、酸化の影響を受けやすい。本実験では、アノード部分は水冷されていること、作動時間が短いことから、白金被膜等の酸化対策は行わなかった。

また、カソードにはホローカソード (イオンテック社製 7HCN-001-001) を用いているため、アノード同様酸化には十分注意しなければならない。本実験中はホローカソードにキセノンを常に 0.27 mg/s 流したが、カソードチップに若干の劣化が見られた。

2.2 実験設備

実験は直径 0.8 m 長さ 2.5 m の真空チャンバを用いて行った。この真空チャンバは排気速度 $1.2 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ の拡散ポンプ 1 台で排気しており、到達圧力は $1.3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ である。スラスト作動時の圧力は $3.3 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 以下であった。推力の測定には振り子式スラストスタンド⁸⁾を用いた。

2.3 ダブルプローブ

チャンネル内の電子密度・電子温度の測定にはダブルブ

ローブを用いた。プローブによる擾乱を小さくするため、本実験ではプローブをリニアモータ (オリエンタルモータ UCM640-7PU) に取り付け高速で往復させた。これによりチャンネル内部 7.5 mm までの測定においてプローブのチャンネル内滞在時間は 100 ms であった。

2.4 エネルギーアナライザ

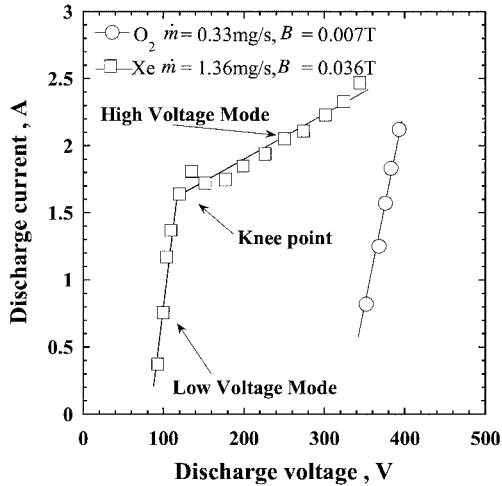
本実験では第 3 図に示すエネルギーアナライザを使用して、イオンビーム電流量・イオンエネルギー分布を測定し電離度、イオンビームプロファイル、イオンエネルギー分布を求めた。2 枚目のグリッド (IRG: Ion Retarding Grid) に電圧を正に掃引することで掃引電圧以下のエネルギーを持つイオンを追い返すことができる。コレクタには電子を追い返すために -10 V を印加した。イオンエネルギー分布は、エネルギーアナライザをスラスト正面に設置し、IRG に 0 ~ +500 V まで掃引したときのコレクタに流れる電流を測定し、これを微分することで求めた。

イオンビーム電流量及びイオンビームプロファイルは、エネルギーアナライザをスラスト中心に半径 300 mm で -30 ~ 90° 回転させ半球面積分することで求めた。真空チャンバ内では雰囲気ガスが存在するために、CEX (Charge Exchange: 電荷交換) が起こり、イオンビームプロファイルが宇宙空間での真のビームプロファイルと異なる。このため IRG には +100 V を印加して CEX したエネルギーの低いイオンを捕集しないようにし、CEX していないイオンのみを捕集し、真のビームプロファイルを求めた。このままでは実際よりもイオン電流量が少なくなるので、中性粒子の密度から CEX の影響を補正した⁹⁾。

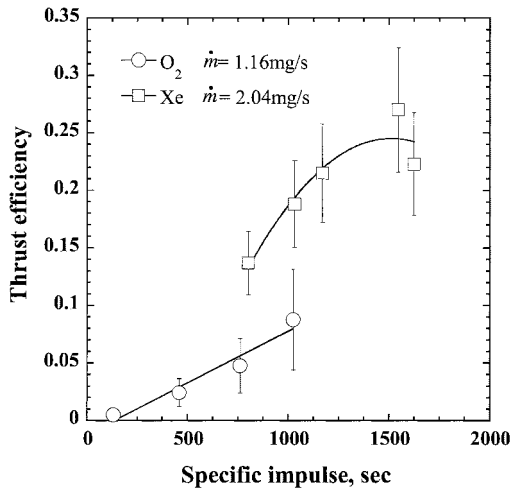
3. 実験結果と考察

3.1 推進性能の測定

放電特性を第 4 図に示す。推進剤流量は 0.33 mg/s、磁束密度は 0.007 T である。比較のためにキセノンの放電特性を



第 4 図 放電特性



第 5 図 推進性能

示している．推進剤流量は 1.36 mg/s，磁束密度は 0.036 T である．流量は 1 Aeq. でそろえた．酸素の場合この流量では磁束密度をこれ以上上げると放電を維持することができなかった．また，磁束密度を 0.007 T では放電電圧は 340 V から 400 V とキセノンと比較すると狭い範囲でしか作動しなかった．磁束密度を下げると放電電圧 200 V でも作動するが，放電電流が大きく最適な作動とはいえない．

一般に，ホールスラストの放電特性には，放電電圧が上昇するにつれて放電電流が急増する領域（低電圧モード）と，放電電圧を上げて流れる放電電流がほぼ増えない領域（高電圧モード）が存在する．低電圧モードは電圧の上昇に伴い電離が促進される領域であり，高電圧モードはほとんど電離が行われた後の領域である．この低電圧モードから高電圧モードに移行する放電特性上の点を Knee Point と呼ぶ¹⁰⁾．酸素ではキセノンのような Knee Point は確認できず，キセノンの低電圧モードに酷似した放電特性が得られた．これは酸素が放電電圧 400 V でもまだ電離が不十分であるためと考えられる．

第 5 図に推力から測定された推進性能を示す．推進剤流

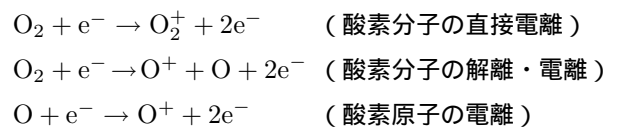
量を酸素は 1.16 mg/s (3.5 Aeq.)，キセノンは 2.04 mg/s (1.5 Aeq.) に固定し，放電電圧を変化させて測定した．ホールカソードの使用限界雰囲気気圧は 3.3×10^{-2} Pa であり，実験室の排気系の容量よりこれ以上の推進剤流量では実験は行わなかった．また磁束密度は各放電電圧に対して最適な点を選んでいる．なお比推力・推進効率の算出にはカソードに流れるキセノンの流量及びコイル，カソードの消費電力は考慮されていない．放電電圧 350V で推進効率 9%，このとき比推力 1000 s が得られた．酸素の性能がキセノンに及ばないのは，後述する推進剤利用効率の低さ，すなわち電離が不十分であるためである．放電電圧の増加に伴い推進効率は増加しているが，これは放電電圧の増加に伴い電子温度が増加し，推進剤利用効率が改善されたためと考えられる．

3.2 内部効率の定義

一般にホールスラストの推進効率 η_t は，以下の推進剤利用効率 η_u ，加速効率 η_a ，ビームエネルギー効率 η_e ，ベクトルロス補正係数 γ_θ の各内部効率の積で表すことができる¹¹⁾．

$$\begin{aligned} \eta_a &= \frac{I_b}{I_d} \\ \eta_u &= \frac{MI_b}{em} \\ \eta_e &= \frac{\frac{1}{2}M \langle v_i^2 \rangle}{eV_d} = \frac{E_m}{eV_d} = \frac{\left\{ \int f(E_i) \sqrt{E_i} dE_i \right\}^2}{eV_d} \\ \gamma_\theta &= \frac{\langle v_i \cos \theta_b \rangle}{\langle v_i \rangle} \\ \eta_t &= \gamma_\theta^2 \eta_u \eta_a \eta_e \end{aligned} \tag{1}$$

ただし I_b はイオンビーム電流， I_d は放電電流， M はイオン質量， e は素電荷， m は推進剤質量， v は速度， θ_b はビームの発散角， V_d は放電電圧， E_m はイオンの平均運動エネルギーであり E_i はイオンのエネルギーを表している．酸素を推進剤に用いた場合，以下の電離過程が存在する．



このように電界によって加速されない酸素原子 O が生成され，さらに O^+ と O_2^+ が存在するため補正が必要である．この解離・電離による推力損失を考慮するために， α を次のように定義する．

$$\alpha = \frac{I_{b-O^+}}{I_b} = \frac{I_{b-O^+}}{I_{b-O^+} + I_{b-O_2^+}} \tag{2}$$

F^* を解離が存在しない場合の推力とすると，解離が存在する場合， n, S をそれぞれイオン密度，加速チャンネル面積とすると推力 F は，

$$F = \dot{m}_{O_2^+} v_{O_2^+} + \dot{m}_{O^+} v_{O^+}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{M_{O_2}}{e} I_{b-O_2^+} v_{O_2^+} + \frac{M_O}{e} I_{b-O^+} \sqrt{2} v_{b-O_2^+} \\
 &= \frac{M_{O_2} v_{O_2^+}}{e} \left(I_{b-O_2^+} + I_{b-O^+} / \sqrt{2} \right) \quad (3)
 \end{aligned}$$

イオンビーム電流量 I_b は,

$$I_b = I_{b-O_2^+} + I_{b-O^+} \quad (4)$$

よって推力は,

$$\begin{aligned}
 F &= \left\{ 1 + \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - 1 \right) \alpha \right\} \frac{1}{e} I_b M_{O_2} v_{O_2^+} \\
 &= \left\{ 1 + \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - 1 \right) \alpha \right\} \frac{\gamma \theta I_b \sqrt{2} M_{O_2} E_m}{e} \\
 &= \left\{ 1 + \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - 1 \right) \alpha \right\} F^* \quad (5)
 \end{aligned}$$

のように書ける. したがって, 解離による補正係数は,

$$\gamma_d = 1 + \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - 1 \right) \alpha \quad (6)$$

と表され, 推進効率 は 次のように書ける.

$$\eta_t = \gamma_d^2 \gamma_\theta^2 \eta_u \eta_a \eta_e \quad (7)$$

3.3 内部効率の測定

内部効率の測定において, 推進剤は酸素で流量 1.16 mg/s, 磁束密度 0.014 T, キセノンで流量 2.04 mg/s, 磁束密度 0.036 T とした.

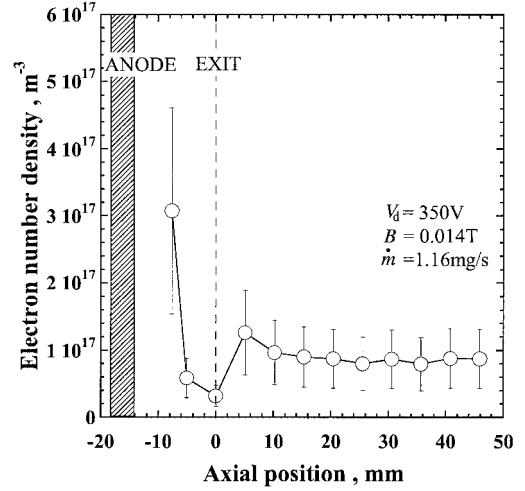
まず, 解離による損失を見積もった. O^+ 及び O_2^+ の連続式は以下ようになる.

$$\begin{aligned}
 n_{O_2^+} v_{O_2^+} &= \int_V \langle \sigma v_e \rangle_{O_2 \rightarrow O_2^+} N_e N_{O_2} \\
 n_{O^+} v_{O^+} &= \int_V \langle \sigma v_e \rangle_{O_2 \rightarrow O^+} N_e N_{O_2} \\
 &\quad + \int_V \langle \sigma v_e \rangle_{O \rightarrow O^+} N_e N_O \quad (8)
 \end{aligned}$$

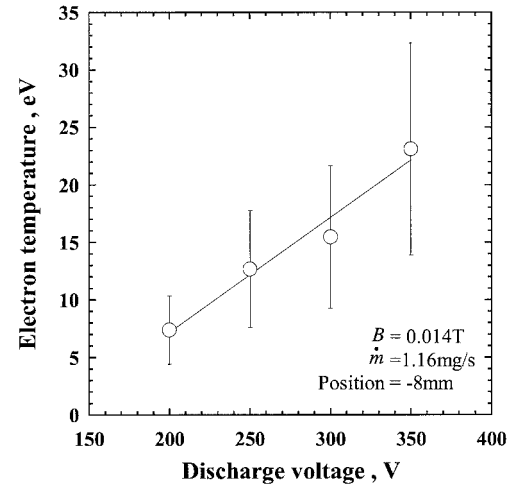
V は電離領域体積

よって (2) 式で定義された α は以下のように見積もった. この算出のため, 電離領域の電子温度, 電子密度, イオン生成領域を測定した.

$$\begin{aligned}
 \alpha &= \frac{I_{O^+}}{I_{O^+} + I_{O_2^+}} = \frac{n_{O^+} v_{O^+}}{n_{O_2^+} v_{O_2^+} + n_{O^+} v_{O^+}} \\
 &= \frac{\int_V \langle \sigma v_e \rangle_{O_2 \rightarrow O^+} N_e N_{O_2} + \int_V \langle \sigma v_e \rangle_{O \rightarrow O^+} N_e N_O}{\int_V \langle \sigma v_e \rangle_{O_2 \rightarrow O_2^+} N_e N_{O_2} + \int_V \langle \sigma v_e \rangle_{O_2 \rightarrow O^+} N_e N_{O_2} + \int_V \langle \sigma v_e \rangle_{O \rightarrow O^+} N_e N_O} \\
 &\approx \frac{\langle \sigma v_e \rangle_{O_2 \rightarrow O^+} N_e N_{O_2} SL + \langle \sigma v_e \rangle_{O \rightarrow O^+} N_e N_O SL}{\langle \sigma v_e \rangle_{O_2 \rightarrow O_2^+} N_e N_{O_2} SL + \langle \sigma v_e \rangle_{O_2 \rightarrow O^+} N_e N_{O_2} SL + \langle \sigma v_e \rangle_{O \rightarrow O^+} N_e N_O SL} \\
 &\approx \frac{\langle \sigma v_e \rangle_{O_2 \rightarrow O^+} + \langle \sigma v_e \rangle_{O \rightarrow O^+} + \langle \sigma v_e \rangle_{O_2 \rightarrow O^+} N_e L / v_{O_2}}{\langle \sigma v_e \rangle_{O_2 \rightarrow O_2^+} + \langle \sigma v_e \rangle_{O_2 \rightarrow O^+} + \langle \sigma v_e \rangle_{O \rightarrow O^+} + \langle \sigma v_e \rangle_{O_2 \rightarrow O^+} N_e L / v_{O_2}} \quad (9)
 \end{aligned}$$



第6図 電子密度分布

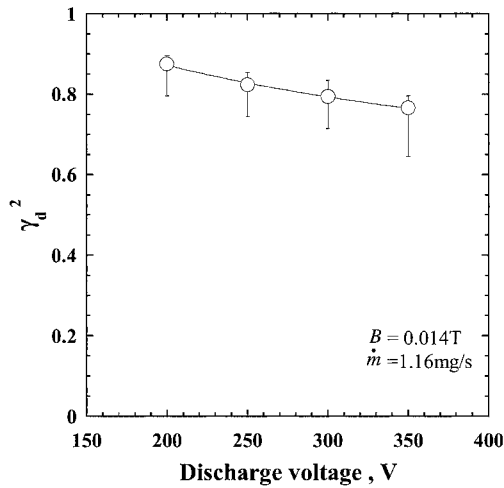


第7図 アノードから 4mm の点における電子温度

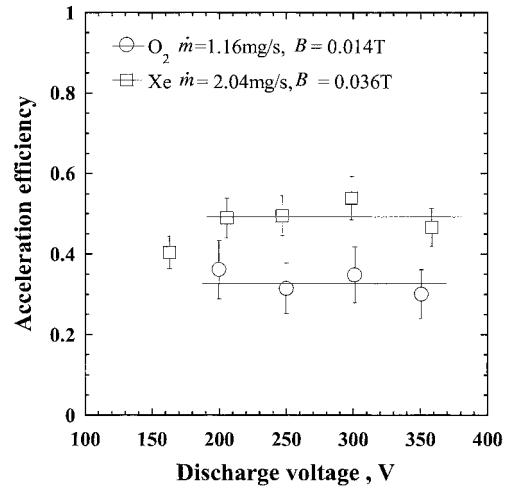
ダブルプローブから得られた電子密度のスラスト軸方向分布を第6図に示す. このように電子密度はスラスト出口から約 8mm 上流の点で急増するため, これより上流がイオン生成領域であると見なし, 電離領域の長さを 4mm とした. またスラスト出口から 8mm の点における電子温度及び電子密度を電離領域の電子温度及び電子密度として α を算出するのに用いた (第7図). このとき α は 0.15~0.3 となり (3) 式から解離による損失 $1 - \gamma_d^2$ は第8図のように 10~25%とわかった.

エネルギーアナライザを用いて算出した酸素とキセノンの推進剤利用効率及び加速効率を第9, 10図にそれぞれ示す. 推進剤利用効率は放電電圧の増加に伴い増加している. これは第7図に示すとおり, 放電電圧の増加に伴い電子温度が上昇し, 電離断面積が増加するためである. キセノンがほぼ 100%に達するのに対して酸素は最も電圧の高い 350V でも 45%であった. これは電離断面積の差が推進剤利用効率の差となって現れたものと考えられる. また加速効率はキセノンで 50%, 酸素では 35%となった.

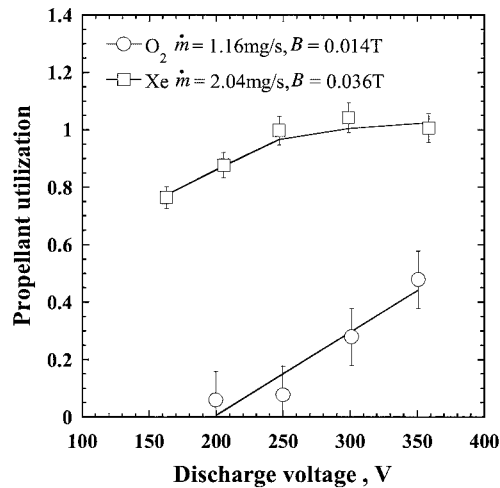
酸素での加速効率がキセノンよりも劣るのは, 印加磁束



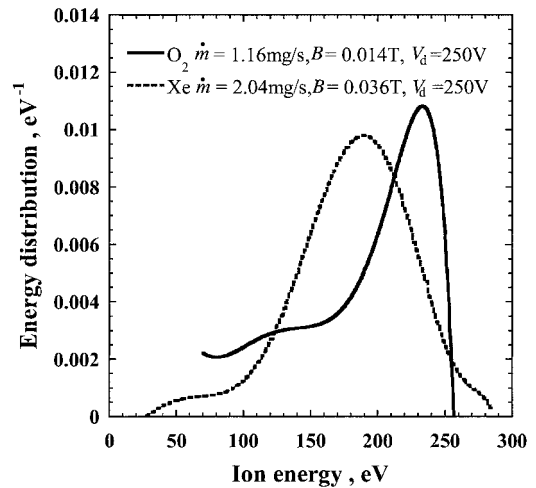
第 8 図 解離による損失



第 10 図 加速効率



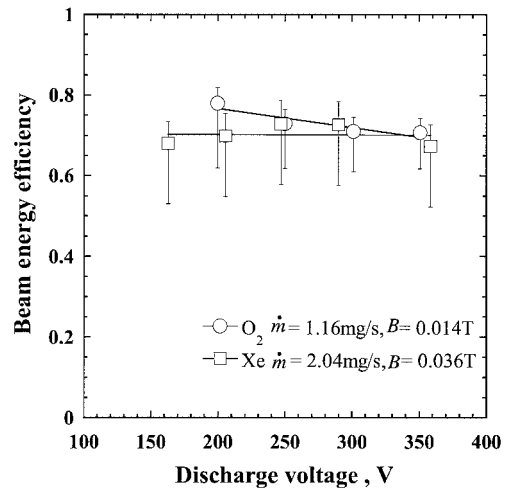
第 9 図 推進剤利用効率



第 11 図 イオンエネルギー分布

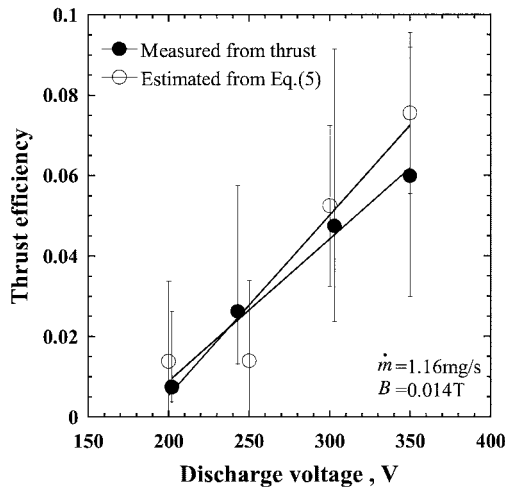
密度がキセノンでの磁束密度よりも低く、電子が流れやすいためである。磁束密度を上げると放電電圧の作動範囲は狭くなるが、酸素でも磁束密度を 0.017 T にすることで加速効率 60% を達成した。このときの推進剤利用効率は 34% であった。

酸素とキセノンのイオンエネルギー分布を第 11 図に、ビームエネルギー効率を第 12 図に示す。ビームエネルギー効率の値はキセノンと酸素でほとんど差はないが、イオンエネルギー分布関数は全く異なった。酸素のイオンエネルギー分布は、ピークが放電電圧に近いことから大部分のイオンはポテンシャルの高いアノード近辺で生成されていると思われる。しかし推進剤利用効率の結果からもわかるとおり、チャンネル内にはまだ多くの中性粒子が存在するため、これがチャンネル内全体で電離するため、ポテンシャルの低い領域でも電離が起こり、結果的にエネルギーが低いイオンが存在すると思われる。放電電圧を上げるほど電子温度が増加し、ポテンシャルの低い場所で生成されるイオンが増加し、ビームエネルギー効率は減少すると考えられる。

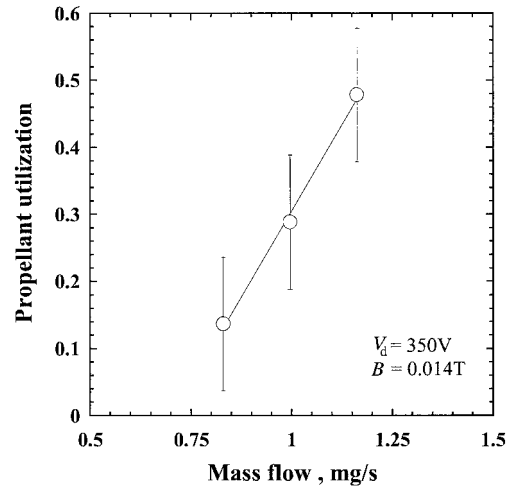


第 12 図 ビームエネルギー効率

一方、キセノンもアノード付近で電離しているが、チャンネルが長いので電離したイオンがチャンネル壁に衝突して中性粒子に戻ってしまう。ところがキセノンは電離しやすいのでチャンネル内で再び電離が行われる。このため酸



第 13 図 推力から実測した推進効率と内部効率の積



第 14 図 推進剤流量と推進剤利用効率の関係

素よりもピークが低くなったと考えられる。

発散角としてイオンビームの半値半幅を用いたところ、酸素とキセノンの発散角はほぼ同じで $10 \sim 15^\circ$ になった。このため発散によるベクトルロスもキセノン同様 5% 以下になりほぼ無視できる。推進剤による相違が見られなかったのはビームプロファイルがチャンネル内の電界形状によって決まり、電界形状は磁場形状等によるがキセノンと酸素でそれほど差がなかったためと思われる。

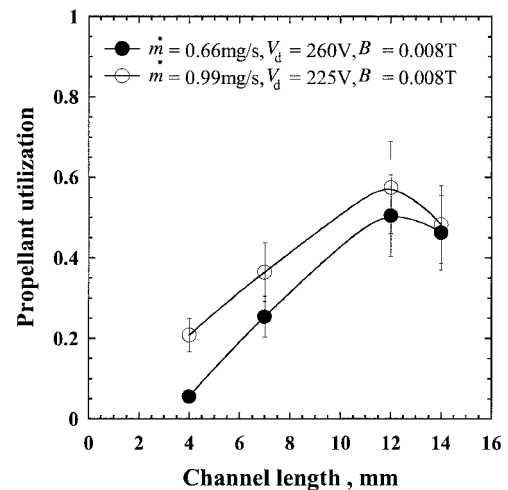
第 13 図は、内部効率の積で求まる推進効率と推力から実測した推進効率の比較である。ほぼ一致していることから、これまでの内部効率の見積りが妥当であったといえる。

3.4 推進剤利用効率の改善

内部効率の測定からキセノンと比較して酸素での推進性能が低下する要因として推進剤利用効率、解離による損失、加速効率の低下が考えられる。しかし解離による損失や加速効率の低下はせいぜい 2 割程度であるのに対して推進剤利用効率の低下は 6 割と非常に大きい。ゆえに推進性能の向上には推進剤利用効率の改善が最も有効である。そこで推進剤流量、チャンネル長、チャンネル壁材質を变化させることで推進剤利用効率にどのような影響を与えるかを調べた。

第 14 図は推進剤流量を变化させたときの推進剤利用効率の変化を示したものである。磁束密度は 0.014 T である。推進剤流量を増加させるほど推進剤利用効率は向上した。これは推進剤流量を上げることでチャンネル内の中性粒子密度が増加し、電離度が増加したためと考えられる。

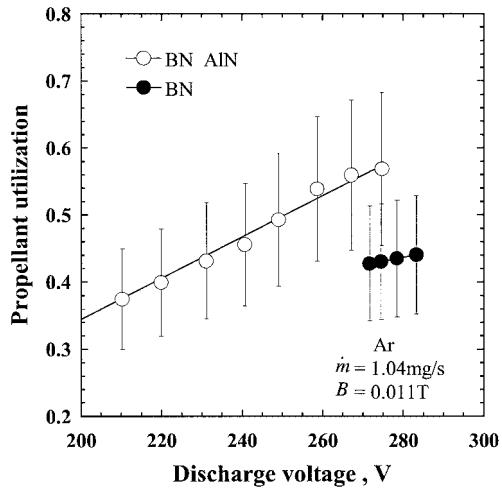
チャンネル長を变化させたときの推進剤利用効率の変化を第 15 図に示す。磁束密度は 0.008 T である。チャンネル長が $4 \sim 12 \text{ mm}$ まではチャンネル長が長くなるほど推進剤利用効率が向上するが、 12 mm で最大値となる結果が得られた。これはチャンネル長が長くなると、チャンネル内で中性粒子と電子が衝突する確率が増えるため生成するイオンの量は増えるが、同時に生成したイオンがチャンネル壁面に衝突して中性粒子に戻るイオン損失も増えるためだと考えられる¹²⁾。



第 15 図 チャンネル長と推進剤利用効率の関係

チャンネル長の最適値が 12 mm とキセノンよりも長い。これはキセノンを用いた場合、放電電圧 150 V での電子温度は 10 eV であり、電離断面積から求まる中性粒子の平均自由行程はおよそ 0.5 mm 程度となる。一方、酸素は電子温度が 25 eV の場合でも平均自由行程は 9 mm になる。このためチャンネル長の最適値がキセノンよりも長くなったと考えられる。

チャンネル壁面の材質を $\text{BN} \cdot \text{AlN}$ と BN とで比較したところ、 BN では放電振動が非常に激しくなり、酸素で安定に作動することはできなかった。このため酸素よりは電離しやすいアルゴン (第 1 図参照) を用いて推進剤利用効率を測定した。測定結果を第 16 図に示す。このように $\text{BN} \cdot \text{AlN}$ を用いた場合の方が BN を用いた場合よりも、推進剤利用効率が高く、電離がより行われていることがわかった。これは 2 次電子放出係数が電離に大きく影響しているためであると考えられる¹³⁻¹⁷⁾。すなわちエネルギーの高い電子がシースのポテンシャルを超えて壁面に衝突すると壁面から電子が飛び出す。この飛び出した電子はシースのポテンシャル程度のエネルギーしか持たない。よって 2 次電子放



第16図 チャンネル壁材質と推進剤利用効率の関係(推進剤: アルゴン)

第1表 BNとBN・AlNの2次電子放出係数(衝突電子のエネルギー: 10eV)

セラミック材質	2次電子放出係数
BN・AlN	0.33
BN	0.76

出係数の大きい材質を用いると、プラズマ中には電離に大きく寄与するエネルギーの高い電子が減り、シースのポテンシャル程度のエネルギーを持った電子が増加する。結果として、電離度が低下すると考えられる。BNはBN・AlN複合焼結材よりも2次電子放出係数が大きい¹⁸⁾(第1表)ため電離しにくく、酸素では作動しなかったと考えられる。また2次電子放出係数のより小さい物質を壁面に使用することによりさらなる推進剤利用効率の向上が見込まれる。

4. ま と め

酸素を推進剤として用いて1kW級ホールスラストの安定作動に成功した。さらに以下のことがわかった。

1) キセノンを推進剤として用いた場合よりは狭いがある程度広い範囲での作動を確認し、最大で推進効率9%、比推力1000sを得た。

2) 内部効率を測定し、推進剤利用効率45%、加速効率35%、ビームエネルギー効率75%を得た。さらに解離電離の影響による効率の低下は20%と見積もられた。これより酸素での低い推進効率の最大の要因は低い推進剤利用効率であることがわかった。

3) 推進剤利用効率の向上には放電電圧、推進剤流量だけ

でなくチャンネル長さやチャンネル壁材質も考慮する必要がある。

参 考 文 献

- 1) Hepp, A. F.: Production and Use of Metals and Oxygen for Lunar Propulsion, *J. Propul. Power*, **10** (1994), pp. 834-840.
- 2) Rosenberg, S. D.: Concepts in Lunar Resource Utilization, AIAA Paper 91-2446, 1991.
- 3) 長島隆一: 推進薬(LOX)製造を核とする月面産業の成立性に関する研究, 博士論文, 東京大学, 1998.
- 4) Garkusha, V., Lukiaschenko, V., Semekin, A., Tverdokhlebov, S., Kim, V., Popov, G., Maslennikov, N. and Murashko, V.: Modern Status of Hall Thrusters Development in Russia, AIAA Paper 99-2157, 1999.
- 5) Kim, V., Popov, G., Arkhipov, B., Murashko, V., Gorshkov, O., Koroteyev, A., Garkusha, V., Semekin, A. and Tverdokhlebov, S.: Electric Propulsion Activity in Russia, IEPC Paper 01-005, 2001.
- 6) Kim, V., Popov, G., Tikhonov, V., Garkusha, V. and Murashko, V.: Modern Trends of Electric Propulsion Activity in Russia, IEPC Paper 99-004, 1999.
- 7) Kieffer, L. J.: Atomic Data, Vol.1, Low-Energy Electron-Collision Cross-Section Data Part I, Academic Press.
- 8) Sasoh, A. and Arakawa, Y.: A High Resolution Thrust Stand for Ground Tests of Low-Thrust Space Propulsion Devices, *Rev. Sci. Instrum.*, **64** (1993), pp. 719-723.
- 9) Kusamoto, D., Mikami, K., Komurasaki, K. and Gallimore, A. D.: Exhaust Beam Profiles of Hall Thrusters, *Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci.*, **40** (1998), pp. 238-247.
- 10) Hargus, W. A., Jr., Meezan, N. B. and Cappelli, M. A.: The Transient Behavior of a Low Power Laboratory Xenon Hall Thruster, AIAA Paper 97-3050, 1997.
- 11) Komurasaki, K. and Arakawa, Y.: Two-Dimensional Numerical Model of Plasma Flow in a Hall Thruster, *J. Propul. Power*, **11** (1995), pp. 1317-1323.
- 12) Kusamoto, D., Mikami, K. and Komurasaki, K.: Channel Length and Thruster Performance of Hall Thrusters, AIAA Paper 96-3194, 1996.
- 13) Morozov, A. I. and Shubin, A. P.: Electron Kinetics in the Wall-Conductivity Regime I, II, *Sov. J. Plasma Phys.*, **10** (1984), pp. 728-735.
- 14) Morozov, A. I. and Shubin, A. P.: Analytic Methods in the Theory of Near-Wall Conductivity I, II, *Sov. J. Plasma Phys.*, **16** (1990), pp. 711-715.
- 15) Bugrova, A. I., Morozov, A. I. and Khartchevnikov, V. K.: Experimental Investigation of Near Wall Conductivity, *Sov. J. Plasma Phys.*, **16** (1990), pp. 849-856.
- 16) Jolivet, L. and Roussel, J. F.: Effects of the Secondary Electronic Emission on Sheath Phenomena in a Hall Thruster, The 3rd International Conference on Spacecraft Propulsion, Cannes, 2000.
- 17) Makowski, K., Peradzynski, Z., Barral, S. and Dudeck, M.: Influence of the Plasma-Wall Interactions on the Operation of Hall Thrusters, The 3rd International Conference on Spacecraft Propulsion, Cannes, 2000.
- 18) Locke, S., Shumlak, U. and Fife, J. M.: A Numerical Study of the Effect of Channel Insulator Discontinuity on Hall Thruster Discharge, IEPC Paper 01-23, 2001.