

酸素を推進剤に用いたホールスラスタの研究

中川, 貴史
三菱電機 (株)

山本, 直嗣
東京大学大学院工学系研究科宇宙工学専攻

小紫, 公也
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

荒川, 義博
東京大学大学院工学系研究科宇宙工学専攻

<https://hdl.handle.net/2324/16995>

出版情報 : 日本航空宇宙学会論文集. 51 (698), pp.606-612, 2003-11-05. 日本航空宇宙学会
バージョン :
権利関係 :

酸素を推進剤に用いたホールスラストの研究

Experimental Investigation of a Hall Thruster using Oxygen as the propellant

中川 貴史 山本 直嗣 小紫 公也 荒川 義博

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 1000s. 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 12mm. 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薬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薬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開発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。

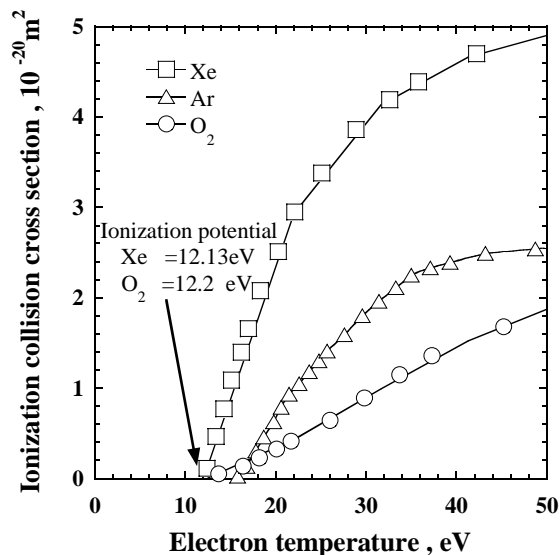
月製酸素を用いたミッションとしては、LEOより上の軌道間輸送、あるいは月面を中継点とした火星等への航行等が従来から提案されているが、最近では地球~LEO間の往復輸送における垂直離着陸型SSTOのLEOから地球への「帰還用酸化剤」として月製酸化剤を用いるミッションも提案されている³⁾。これらのミッションでは、月面~月低軌道間の輸送に月製液体酸素を酸化剤に用いた化学推進ロケットを利用し、月低軌道からの輸送には月製酸素を推進剤に用いた電気推進機を利用することが有効と考えられている。

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言える。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。



第1図 各推進剤の電離断面積

2. 実験装置

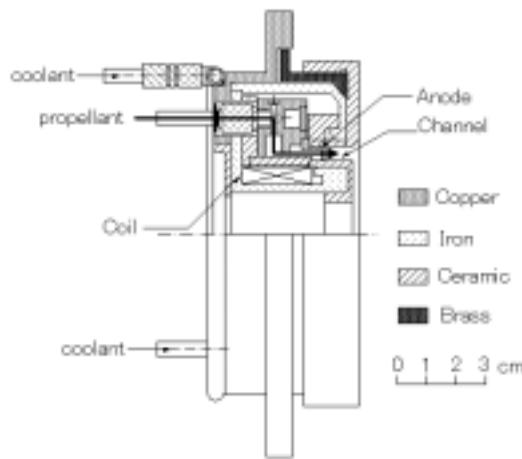
2.1 ホールスラスト

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。このスラスタ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れており、コイル電流1Aで0.014T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0.27mg/s流したが、カソードチップに若干の劣化が見られた。



第2図 ホールスラスタ断面図

2.2 実験設備

実験は直径0.8m長さ2.5m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。スラスタ作動時の圧力は $3.3 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 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

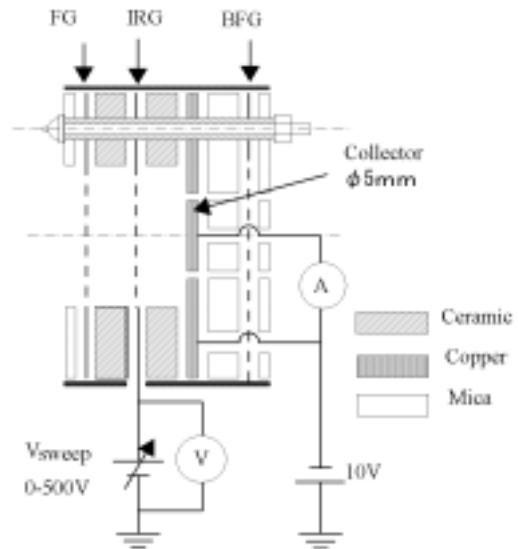
チャンネル内の電子密度・電子温度の測定にはダブルプローブを用いた。プローブによる擾乱を小さくするため、本実験ではプローブをリニアモータ(オリエンタルモータUCM640-7PU)に取り付け高速で往復させた。これによりチャンネル内部7.5mmまでの測定においてプローブのチャンネル内滞在時間は100msであった。

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-10V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タ正面に設置し、IRGに0~+500V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およ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タ中心に半径300mm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+100Vを印加し、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⁾。



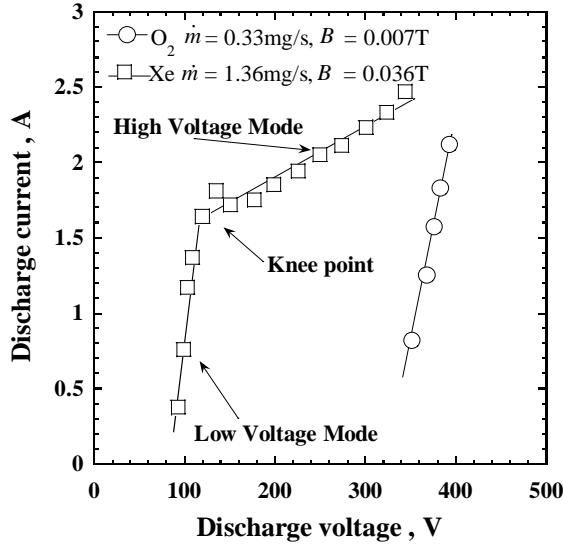
第3図 エネルギーアナライザ概略図

3. 実験結果と考察

3.1 推進性能の測定

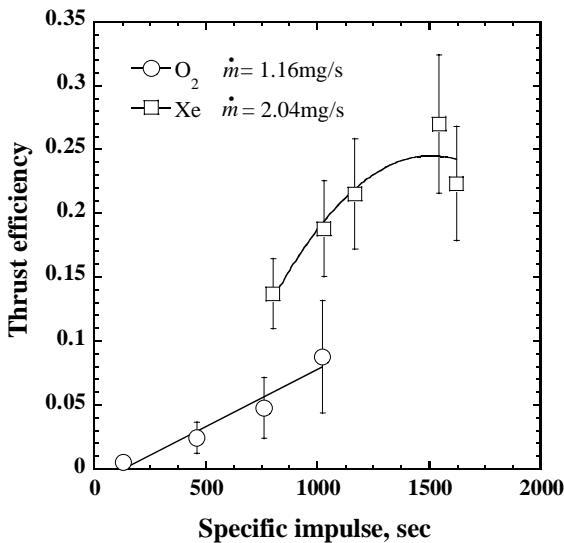
放電特性を第4図に示す。推進剤流量は0.33mg/s、磁束密度は0.007Tである。比較のためにキセノンの放電特性を示している。推進剤流量は1.36mg/s、磁束密度は0.036Tである。流量は1Aeqで揃えた酸素の場合この流量では磁束密度をこれ以上上げると放電を維持することができなかった。また、磁束密度を0.007Tでは放電電圧は340Vから400Vとキセノンと比較すると狭い範囲でしか作動しなかった。磁束密度を下げると放電電圧200Vでも作動するが、放電電流が大きく最適な作動とはいえない。

一般に、ホールスラスタの放電特性には、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400Vでもまだ電離が不十分であるためと考えられる。



第4図 放電特性

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1.16mg/s (3.5Aeq.), キセノンは2.04mg/s (1.5Aeq.)に固定し, 放電電圧を変化させて測定した ホローカソードの使用限界雰囲気気圧は 3.3×10^{-3} 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およ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1000s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.



第5図 推進性能

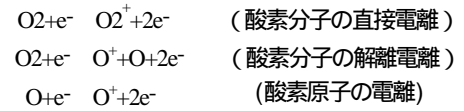
3.2 内部効率の定義

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 , エネルギー効率 η_e , ベクトルロス γ_θ の各内部効率の積で表すことができる¹⁰⁾.

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

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_i はイオン速度, 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.

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

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,

$$\begin{aligned} F &= \dot{m}_{O_2^+} v_{O_2^+} + \dot{m}_{O^+} v_{O^+} \\ &= \frac{M_{O_2}}{e} I_{b-O_2^+} v_{O_2^+} + \frac{M_o}{e} I_{b-O^+} \sqrt{2} v_{b-O_2^+} \\ &= \frac{M_{O_2} v_{O_2^+}}{e} (I_{b-O_2^+} + I_{b-O^+} / \sqrt{2}) \end{aligned} \quad (3)$$

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,

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

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、酸素で推進剤流量 1.16mg/s、磁束密度 0.014T、キセノンで流量 2.04mg/s、磁束密度 0.036T とした。

まず、解離による損失を見積もった。O⁺及びO₂⁺の連続式は以下ようになる。

$$n_{O_2^+} v_{O_2^+} = \int_V \langle \sigma v_e \rangle_{O_2 \rightarrow O_2^+} N_e N_{O_2} \quad (8)$$

$$n_{O^+} v_{O^+} = \int_V \langle \sigma v_e \rangle_{O_2 \rightarrow O^+} N_e N_{O_2} + \int_V \langle \sigma v_e \rangle_{O \rightarrow O^+} N_e N_O$$

Vは電離領域体積

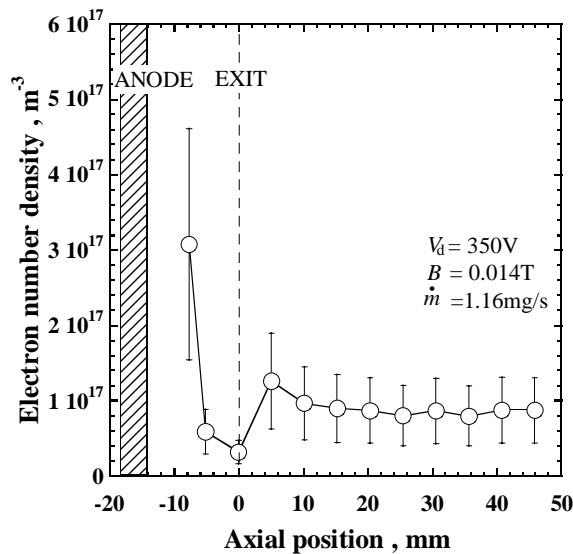
よって、第(2)式で定義されたは以下のように見積もった。この算出のため、電離領域の電子温度、電子密度、イオン生成領域を測定した。

$$\alpha = \frac{I_{O^+}}{I_{O^+} + I_{O_2^+}} = \frac{n_{O^+} v_{O^+}}{n_{O_2^+} v_{O_2^+} + n_{O^+} v_{O^+}} \quad (9)$$

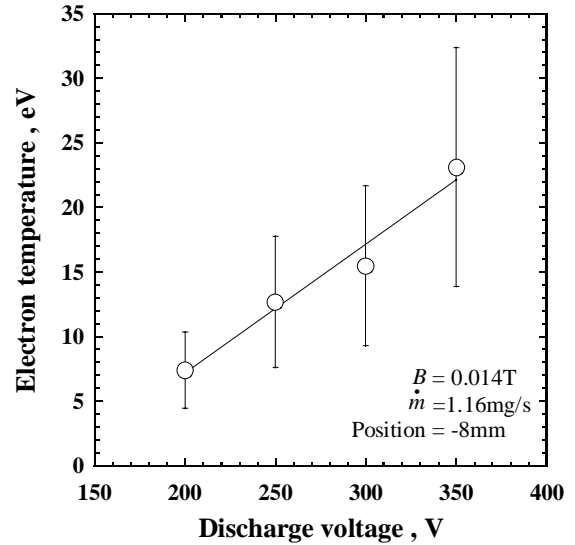
$$\begin{aligned} &= \frac{\int_V \langle \sigma v_e \rangle_{O_2 \rightarrow O^+} N_e N_{O_2} + \int_V \langle \sigma v_e \rangle_{O \rightarrow O^+} N_e N_O}{\int_V \langle \sigma v_e \rangle_{O_2 \rightarrow O_2^+} N_e N_{O_2} + \int_V \langle \sigma v_e \rangle_{O_2 \rightarrow O^+} N_e N_{O_2} +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

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、式(3)から解離電離による損失

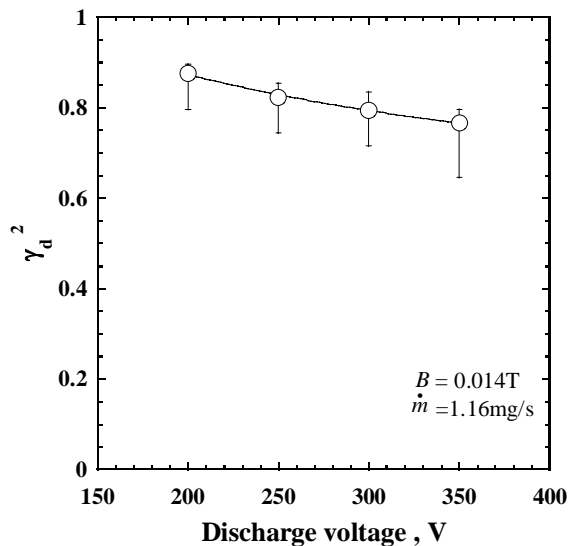
1-γ_d²は第8図のように10~25%とわかった。



第6図 電子密度分布



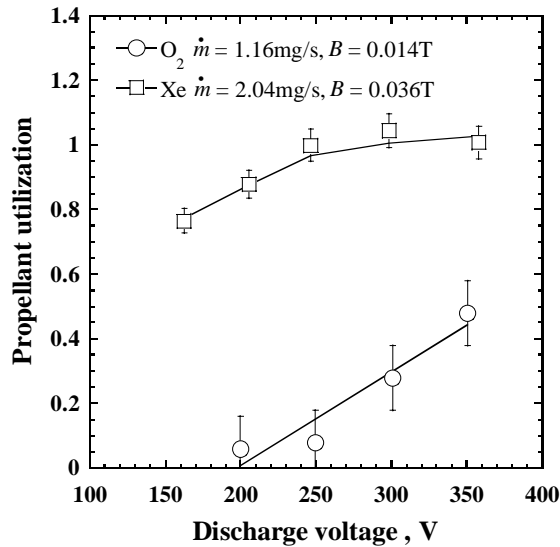
第7図 スラスト出口から8mm上流の点における電子温度



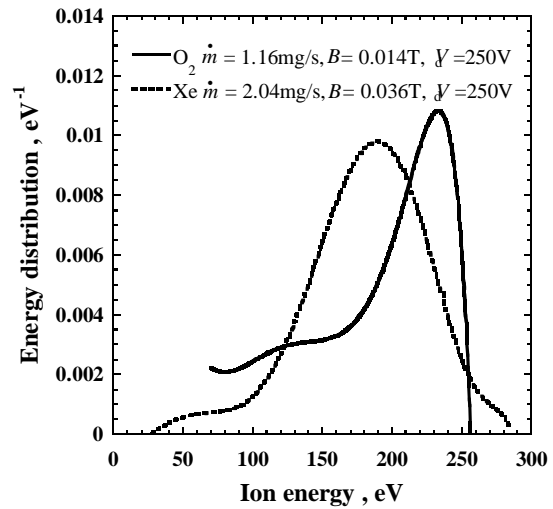
第8図 解離による補正係数

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および加速効率を第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。これは図7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。

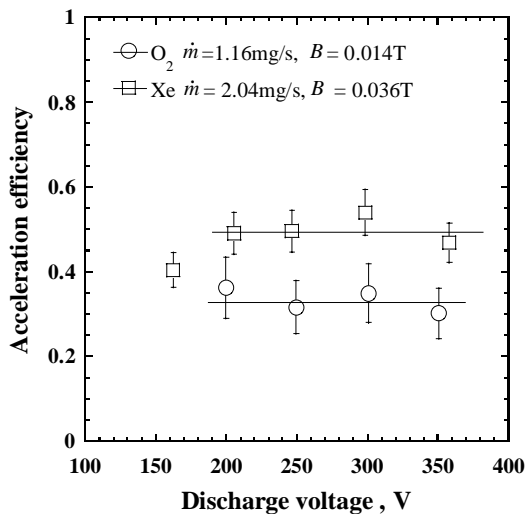
酸素での加速効率がキセノンよりも劣るのは印加磁場がキセノンでの磁束密度よりも低く、電子が流れやすいためである。磁束密度を上げると放電電圧の作動範囲は狭くなるが、酸素でも磁束密度を0.017Tにすることで加速効率60%を達成した。このときの推進剤利用効率は34%であった。



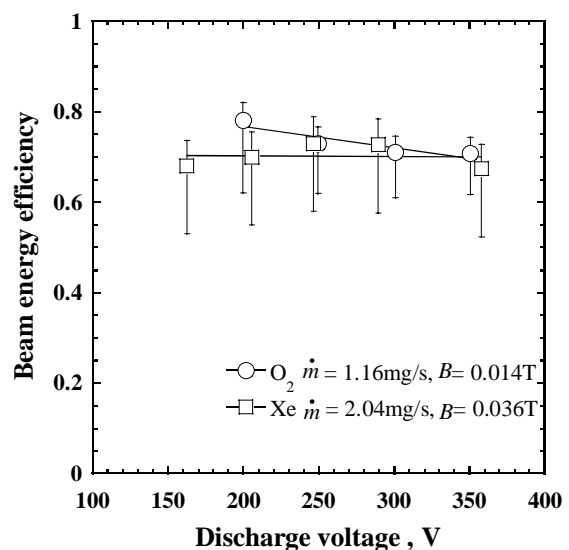
第9図 推進剤利用効率



第11図 イオンエネルギー分布



第10図 加速効率



第12図 エネルギー効率

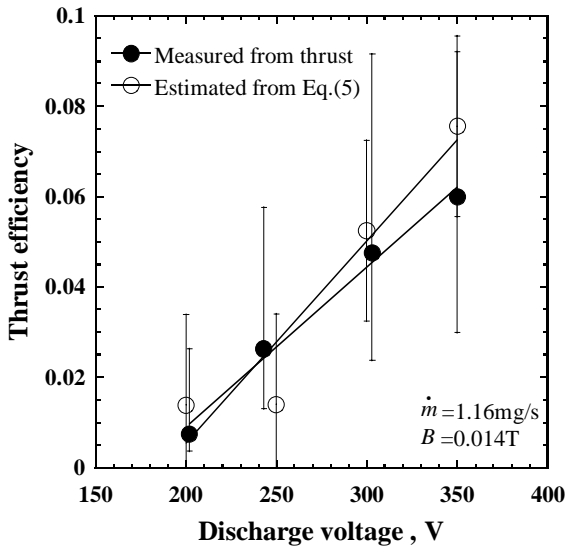
酸素とキセノンのイオンエネルギー分布を第11図に、エネルギー効率を第12図に示す。エネルギー効率の値はキセノンと酸素でほとんど差はないが、イオンエネルギー分布関数は全く異なった。酸素のイオンエネルギー分布は、ピークが放電電圧に近いことから大部分のイオンはポテンシャルの高いアノード近辺で生成されていると思われる。しかし推進剤利用効率の結果からみられるとおり、チャンネル内にはまだ多くの中性粒子が存在するため、これがチャンネル内全体で電離するため、ポテンシャルの低い領域でも電離が起これ、結果的にエネルギーが低いイオンが存在すると思われる。放電電圧を上げるほど電子温度が増加し、ポテンシャルの低い場所で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

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ためチャンネル

内で再び電離が行われる。このため酸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10~15°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もりが妥当であったといえる。

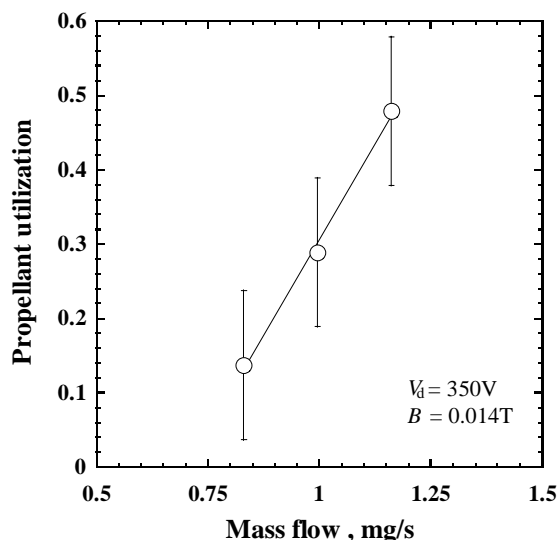


第 13 図 推力から実測した推進効率と内部効率の積

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, 乖離による損失, 加速効率の低下が考えられる。しかし乖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最小でも 6 割と非常に大きい。そこで推進性能の向上には推進剤利用効率の改善が最も有効とわかった。そこで推進剤流量, チャンネル長, チャンネル壁材質を変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。

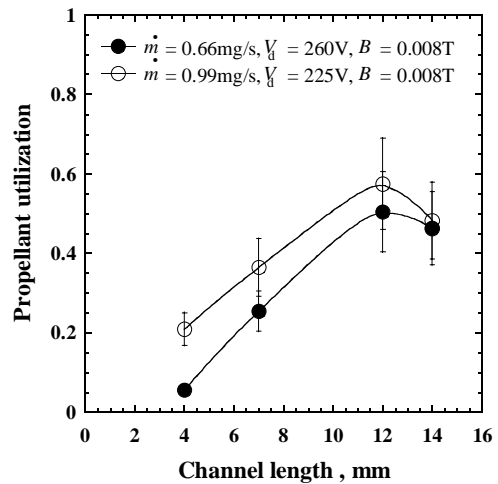
第 14 図は推進剤流量を変化させたときの推進剤利用効率の変化を示したものである。磁束密度は 0.014T である。推進剤流量を上げるほど推進剤利用効率は向上する。これは推進剤流量を上げることでチャンネル内の中性粒子密度が増加し、電離度が増加したためと考えられる。



第 14 図 推進剤流量と推進剤利用効率の関係

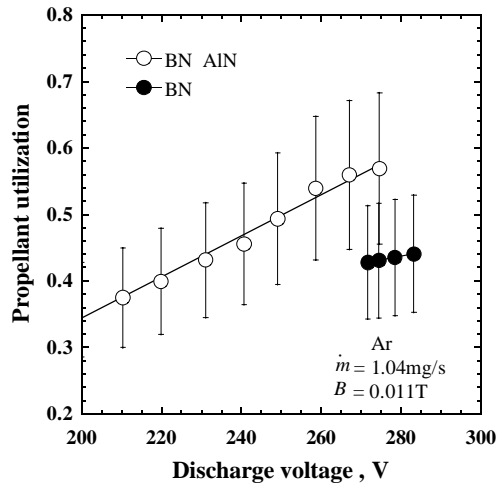
チャンネル長を変化させたときの推進剤利用効率の変化を第 15 図に示す。磁束密度は 0.008T である。チャンネル長が 4~12mm まではチャンネル長が長くなるほど推進剤利用効率が向上するが、12mm で最大値となる結果が得られた。これはチャンネル長が長くなると、チャンネル内で中性粒子と電子が衝突する確率が増えるため生成するイオンの量は増えるが、同時に生成したイオンがチャンネル壁面に衝突して中性粒子に戻るイオン損失も増えるためだと考えられる¹²⁾。

チャンネル長の最適値が 12mm 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 150V での電子温度は 10eV 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およそ 0.5mm 程度となる。一方、酸素は電子温度が 25eV の場合でも平均自由行程は 9mm 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。



第 15 図 チャンネル長と推進剤利用効率の関係

チャンネル壁面の材質を BN・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 BN・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もたない。よって 2 次電子放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も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。



第 16 図 チャンネル壁材質と推進剤利用率の関係 (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 |

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率であることがわかった。
- 3) 推進剤利用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) A.F.Hepp : Production and Use of Metals and Oxygen for Lunar Propulsion, Journal of Propulsion and Power, **10**(1994), pp.834-840
- 2) S.D.Rosenberg : 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) V.Garkusha, V.Lukiaschenko, A.Semenkin, S.Tverdokhlebov, V.Kim, G.Popov, N.Maslennikov, and V.Murashko : Modern Status of Hall Thrusters Development in Russia, AIAA Paper 99-2157, 1999
- 5) V.Kim, G.Popov, B.Arkipov, V.Murashko, O.Gorshkov, A.Koroteyev, V.Garkusha, A.Semenkin, and S.Tverdokhlebov : Electric Propulsion Activity in Russia, IEPC Paper 01-005, 2001
- 6) V.Kim, G.Popov, V.Tikhonov, V.Garkusha, and V.Murashko : Modern Trends of Electric Propulsion Activity in Russia, IEPC Paper 99-004, 1999
- 7) L.J.Kieffer : Atomic data vol.1 Low-Energy Electron-Collision Cross-Section Data Part , Academic Press ISSN

- 8) Sasoh A. Arakawa Y.: A high resolution thrust stand for ground tests of low-thrust space propulsion devices, Review of Scientific instruments Vol.64, No. 3, March 1993, pp. 719-723.
- 9) Kusamoto, D., Mikami, K., Komurasaki, K., Gallimore, A.D.: Exhaust Beam Profiles of Hall Thrusters, Trans. of Japanese Soc. for Aeronautical and Space Sci., Vol.40, No. 130 (1998), pp. 238-247.
- 10) W.A.Hargus, Jr., N.B.Meezan, and M.A.Cappelli : The Transient Behavior of a Low Power Laboratory Xenon Hall Thruster, AIAA Paper 97-3050, 1997
- 11) K.Komurasaki and Y.Arakawa : Two-Dimensional Numerical Model of Plasma Flow in a Hall Thruster, Journal of Propulsion and Power, **11**(1995), pp.1317-1323
- 12) Kusamoto, D., Mikami, K., Komurasaki, K., : Channel Length and Thruster Performance of Hall Thrusters, AIAA Paper 96-3194, 1996
- 13) A.I.Morozov and A.P.Shubin : Electron Kinetics in the wall-conductivity regime , , Sov. J. Plasma Phys., **10**(1984), pp.728-735
- 14) A.I.Morozov and A.P.Shubin : Analytic methods in the theory of near-wall conductivity , , Sov. J. Plasma Phys., **16**(1990), pp.711-715
- 15) A.I.Bugrova, A.I.Morozov, and V.K.Kharchevnikov : Experimental investigation of near wall conductivity, Sov. J. Plasma Phys., **16**(1990), pp.849-856
- 16) L.Jolivet and J.F.Roussel : Effects of the Secondary Electronic Emission on Sheath Phenomena in a Hall Thruster, the 3rd international conference on SPACECRAFT PROPULSION, Cannes, 2000
- 17) K.Makowski, Z.Peradzynski, S.Barral, and M.Dudeck : Influence of the Plasma-Wall Interactions on the Operation of Hall Thrusters, the 3rd international conference on SPACECRAFT PROPULSION, Cannes, 2000
- 18) S.Locke, U.Shumlak, and J.M.Fife : A Numerical Study of the Effect of Channel Insulator Discontinuity on Hall Thruster Discharge, IEPC Paper 01-23, 2001