卒　業　論　文

題　　目　　推進剤にアルゴンを用いた小型イオンスラスタの性能向上に関する研究

氏　　名　　江﨑　徹

所属教育分野　　プラズマ理工学

指 導 教 員　　中島秀紀　教授

九州大学工学部エネルギー科学科

提出年月　　平成 21 年 2 月

目次

第 1 章　序論 1
1.1　研究背景 1
1.2　イオンスラスタ 1
1.3　研究目的 2

第 2 章　原理 4
2.1　マイクロ波放電式イオンスラスタ 4
2.2　ECR プラズマ 5
2.3　イオンビーム引き出し 6
2.4　発光分光計測 6

第 3 章　実験装置及び実験方法 12
3.1　真空排気系 12
3.2　マイクロ波伝送系 13
3.3　イオンスラスタ 13
3.3.1　円形イオンスラスタ 13
3.3.2　矩形イオンスラスタ 14
3.3.3　可視化イオン源 15
3.4　実験体系 15
3.4.1　イオンビーム 15
3.4.2　発光分光計測 16

第 4 章　実験結果及び考察 24
4.1　性能評価 24
4.2　推進性能 25
4.2.1　推進剤依存性 25
4.2.2　放電室形状依存性 27
4.3　発光分光計測 33

第 5 章　結論 38

参考文献 39

第 1 章　序論

1.1　研究背景[1][2]

1957 年 10 月、当時のソビエト連邦が世界初の人工衛星スプートニク 1 号を打ち上げ軌道に乗せることに成功して以来、現在まで全世界で 5000 機を超える人工衛星が打ち上げられている。これらの人工衛星は観測衛星、通信衛星などとして運用されている。観測衛星による天気予報や衛星画像、通信衛星による衛星放送や全地球測位システム (GPS) など人工衛星は我々の日常生活に欠かせないものとなっている。

近年、人工衛星の中でも小型のものが注目されている。小型衛星に明確な定義はないが、一般的に 500 kg 以下の人工衛星のことを指す。その小型衛星を用いる利点として開発コストが低いことや開発期間を短縮できることなどが挙げられる。開発コストが低く抑えられるため、民間企業・大学などによる衛星の開発や挑戦的なプロジェクトが可能になる。また、開発期間が短くなることで、開発サイクルも短くなり、最新の技術が投入可能になる。

衛星を小型化した場合、搭載できる機器が減少してしまうが、フォーメーションフライトを採用することにより大型衛星並のミッションも可能となる。フォーメーションフライトとは複数個の衛星がそれぞれ機能を分担し、連携して 1 つのミッションを実行する手法である。フォーメーションフライトを行った場合、衛星が故障したときはその代わりの衛星を打ち上げれば良いためリスクの軽減ができる。

しかし、小型衛星はそのサイズ故に搭載できる燃料が限られ、様々なミッションに対応しようとすると燃費の良いエンジンが必要不可欠である。そこで、近年注目を集めているのが電気推進機の小型衛星への応用である。

1.2　イオンスラスタ

宇宙で推進するためには、推進剤にエネルギーを注入し速度を与えて一方向に噴射し、その反動で宇宙機を加速させることが必要である。宇宙で作動させる場合、推進剤とエネルギーの量が限られてしまう。そこで電気推進システムの開発が進められてきた[3]。

電気推進とは太陽光などから得られた電力をエネルギー源とし、推進剤を加速排気する推進のことである。燃料を燃焼させ発生したエネルギーで燃焼後の生成物を加速排気する化学推進と比較して、電気推進は排気速度が格段に大きい。現在使用されている電気推進システムの中で代表的なものとしてアークジェットスラスタ、ホールスラスタ、イオンスラスタが挙げられる。本研究ではイオンスラスタを扱う。これは同じ電気推進の中でもヒドラジンなどを利用した電熱推進型の推進システムよりも比推力が大きいため、衛星を長期間運用できるなどの利点があるためである[1]。

ここでイオンスラスタの概念図を Fig.1-1 に示す。イオンスラスタはアーク放電やマイクロ波放電などにより推進剤を電離させてプラズマを生成し、2 枚もしくは 3 枚の多孔状の電極に電圧を印加することによって孔よりプラズマ中の正イオンを加速・排出し、その反作用によって推進するという仕組みになっている[1]。

超小型イオンスラスタは 1.1 で述べたような小型人工衛星の姿勢制御などに用いられるべく本研究室を初め、各研究機関で研究開発が進められている[4]。

1.3　研究目的

現在イオンスラスタの推進剤には希ガスであるキセノンが主に用いられている。これは希ガスが反応性に乏しく、機体を汚染しないためである。本研究ではキセノンと同じ希ガスであるアルゴンをイオンスラスタの推進剤を用いることを考える。キセノンを用いることにより以下のことが期待できる。

（1）アルゴンはキセノンの約 1/250 の価格である。キセノンは生産量が少なく高価であるが、アルゴンは大気中に約 1 %も存在するため安価である。

（2）アルゴンのイオン質量の小ささから、同一の引き出し電圧を印加した時にキセノンと比較して高比推力が達成できる。また、同一の比推力時に印加する引き出し電圧を低く抑えることが可能となるため、電極のスパッタによる損耗が抑えられ、スラスタの長時間の稼働が可能になる[3]。

しかし、一方でアルゴンは電離断面積が小さく、そのためプラズマの着火がしにくい、生成コストが大きく性能が悪い等々の欠点があるため、イオンエンジンの推進剤としては使いづらく、実ミッションではキセノンが用いられている。

そこで、本研究の目的はこのような特性をもつアルゴンを推進剤に用いて、スラスタの性能を測定し、得られた知見から設計指針を得て、スラスタを改良し、アルゴンで実用化に耐えうる性能を達成することである。

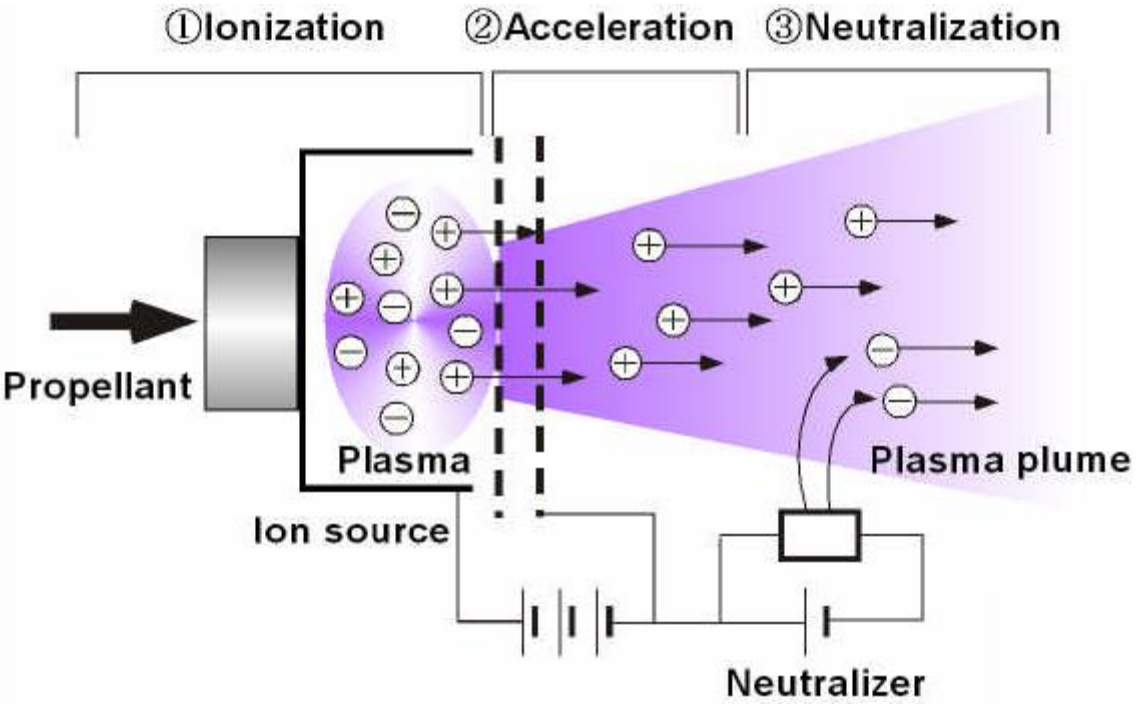

Fig.1-1　イオンスラスタの概念図

第 2 章　原理

2.1　マイクロ波放電式イオンスラスタ[3]

イオンスラスタは、そのプラズマ生成の方法により直流放電式イオン源、高周波放電式イオン源、マイクロ波放電式イオン源などに分類される。直流放電式イオンスラスタの概念図を Fig.2-1 に、マイクロ波放電式イオンスラスタの概念図を Fig.2-2 にそれぞれ示す。現在イオンスラスタの主流となっている直流放電式イオンスラスタでは、ホローカソードなどの陰極電子源から放出された電子がプラズマの空間電位との電位差で加速され、電離電圧以上のエネルギーを持ち、推進剤に衝突することでプラズマを生成する。高周波放電式イオンスラスタは高周波の変動電磁場により電子を往復させることにより容器内に閉じ込め、その電子と推進剤を衝突させることによりプラズマを生成する。本研究で用いるマイクロ波放電式イオンスラスタではマイクロ波帯域の交流電界を用いて電子を加速し、推進剤を衝突電離させプラズマを生成する。

マイクロ波放電を用いることの利点として以下のことが挙げられる。

（1）放電用電極を用いないため、構造の簡略化ができる。

（2）ヒーターを用いないため予備加熱が不要となり、スラスタの迅速なスタートが可能となる。

（3）マイクロ波がその電力を伝送する際に基準電位を必要とせず、DC 絶縁を容易に行なえることから、1 台のマイクロ波電源で、互いに電位の異なるスラスタと中和器の両方にプラズマを生成することができる。また、それにより電源システムの構成を簡素化することができる。

本研究で使用しているマイクロ波放電式イオンスラスタのプラズマ生成には、電子サイクロトロン共鳴（ECR：Electron Cyclotron Resonance）による電子の加熱を利用している。

2.2　ECR プラズマ

真空中の荷電粒子は磁場によってローレンツ力を受ける。この力を受けた荷電粒子は磁力線に巻きつくように回転運動を行う。これをサイクロトロン運動と呼ぶ。その時の電子の運動方程式は次式で表される。

$$m_e \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = e\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B} \tag{2-1}$$

ここで m_e は電子の質量 [kg]、$\boldsymbol{v}$ は速度ベクトル [m/s]、e は電気素量、$\boldsymbol{B}$ は磁束密度 [T]である。このときの円軌道の回転半径 r_L [m]は

$$r_L = \frac{m_e v_\perp}{eB} \tag{2-2}$$

で表され、ラーマー半径と呼ばれる。ここで $v_\perp$ は電子の $\boldsymbol{B}$ に垂直な速度成分である。プラズマ中の荷電粒子はすべて反磁性体なので、サイクロトロン運動の回転方向はその運動によってできる磁場が外部磁場を打ち消す方向である。よって電子のサイクロトロン運動の回転方向は常に磁場に対して右回りとなる。このサイクロトロン運動の角周波数 ω_{ce} [Hz]は

$$\omega_{ce} = \frac{eB}{m_e} \tag{2-3}$$

で表され、サイクロトロン角周波数と呼ばれる。電子は電場に対して逆向きに加速される。そのため磁場中のサイクロトロン運動を行う電子に、回転する速さが等しく逆向きに回転する電場をかけ続けると、電子は連続的に加速され、電場から効率的にエネルギーを受けとることができる。これを電子サイクロトロン共鳴（ECR）と呼ぶ。ECR の原理を Fig.2-3 に示す。

放電室に投入されるマイクロ波の電場の周波数 ω_{rf} が電子のサイクロトロン角周波数 ω_{ce} と一致した時、ECR が発生する。よって ECR を発生させるために必要な磁束密度 B_{res} は次式で表すことができる。

$$B_{res} = \frac{m_e \omega_{rf}}{e} \tag{2-4}$$

この ECR に必要な磁場を満たす領域を ECR 層とする。本研究で使用するマイクロ波周波数は 2.45 GHz である。そのため、ECR 層となる磁束密度は 87.5 mT となる。

2.3　イオンビーム引き出し

プラズマは正イオンと電子の密度が等しく、正と負の電荷が釣り合っており、電荷的に安定な状態にある。そこにプラズマの空間電位に対して負の電位を持つ電極が存在すると、電子は反発され正イオンの空間電荷のみが存在するシースが形成される。プラズマ中の電子はイオンに比べて移動度が大きく、エネルギー分布を持っているため、イオンは Fig.2-4 に示すような遷移領域を経てイオンシース領域で加速されプラズマから引き出される。このときプラズマから取り出されるイオンの流れをイオンビームと呼び、その電流量をイオン飽和電流と呼ぶ。イオン飽和電流密度 J_{pi} はイオンシースが安定に存在する条件である Bohm のシース条件(3)から求められ、以下の式で表される。

$$J_{pi} = en_p \exp\left(-\frac{1}{2}\right)\left(\frac{kT_e}{m_i}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2-5}$$

ここで、e は電気素量、n_p はプラズマ密度、k は Boltzman 定数、T_e は電子温度、m_i はイオン質量である。このようにプラズマからのイオン放出能力はプラズマ密度と電子温度の平方根に比例する。

2.4　発光分光計測(5)

熱平衡状態においては、ボルツマン分布が成り立つ。スペクトル線強度は、ボルツマン分布から定まる励起状態の数密度に比例するため、強度を測定することにより原子(またはイオン) の励起温度が求められる。準位 k から準位 i の遷移で振動数 ν のスペクトル線が発光する場合、そのスペクトル線強度 I_{ki} は一般に次式で表される。

$$I_{ki} = h\nu \frac{g_k}{Z(T)} A_{ki} N \exp\left(-\frac{E_k}{kT}\right) \tag{2-6}$$

ここで g_k は励起準位 k の統計的重価、E_k は励起準位 k の励起エネルギー[eV]、A_{ki} は k から i の遷移に対する遷移確率、$T(Z)$ は温度 T におけるその原子の分配関数をそれぞれ表す。λ を用いて (2-6) 式を変形すると、次式が得られる。

$$\frac{I_{ki}\lambda_{ki}}{A_{ki}g_k} = \exp\left(-\frac{E_k}{kT}\right)\frac{hc_0N}{Z(T)} = K\exp\left(-\frac{E_k}{kT}\right) \tag{2-7}$$

ここで定数 K は、同一温度で同一原子のスペクトル線について共通の定数である。(2-7) 式の対数をとると、次式を得る。

$$\ln\frac{I_{ki}\lambda_{ki}}{A_{ki}g_k} = -\frac{E_k}{kT} + \ln K \tag{2-8}$$

同一原子の複数スペクトル線について、(2-8) 式の左辺の量を縦軸に、横軸に E_k [eV] をとると、直線が得られ、その傾斜は $-1/kT$ に比例する。その傾きを a とすると、電子温度 T [eV]を次式より求めることができる。

$$T = \frac{1}{a}\ \text{[eV]} \tag{2-9}$$

直線にならないときは、熱平衡が成立していないか、あるいはスペクトル線の自己吸収、妨害線の影響、遷移確率の不正確など様々な要因が考えられる。この方法を用いるには、A 係数が既知の複数本のスペクトル線が必要である。ただし、A 係数の絶対値は必ずしも必要ではなく、複数のスペクトル線の A 係数の相対値が分かればよい。

プラズマからの放射をレンズにより集光し、分光器に入力する過程に含まれる系の多くは波長の関数となる減光率を持っている。このため、較正は任意の波長ごとに行われる必要がある。相対的な感度の較正の場合、光源の波長に対する相対的なエネルギーが分かればよい。ここで標準光源の発光強度の実測値を I_{output} 、既知の発光強度を I_{input} とする。

Fig.2-5 に標準光源の波長に対する実測値と既知の発光強度の値を示す。Fig.2-5 より、長波長側で感度が減少していることが分かる。この場合、測定のときに長波長のときの発光強度は見かけ上小さく見えることになる。この図から波長に対する補正係数が求まる。補正係数を c とすると、これは系に入射する I_{input} と最終的な信号出力 I_{output} (実測値) の比、すなわち次式のように表される。

$$I_{input}(\lambda) = c(\lambda)I_{output}(\lambda) \tag{2-10}$$

ここで c を得るためには I_{input} が既知でなければならない。I_{output} が標準光源を測定したものと等しいので c は

$$c(\lambda) = \frac{I_{input}\ (\lambda)}{I_{output}\ (\lambda)} = \frac{I_{lamp}\ (\lambda)}{I_{lamp\ -measured}\ (\lambda)} \tag{2-10}$$

と表される。すなわち Fig.2-5 のそれぞれの信号の比をとればよい。また、それにより得られた較正曲線を Fig.2-6 に示す。

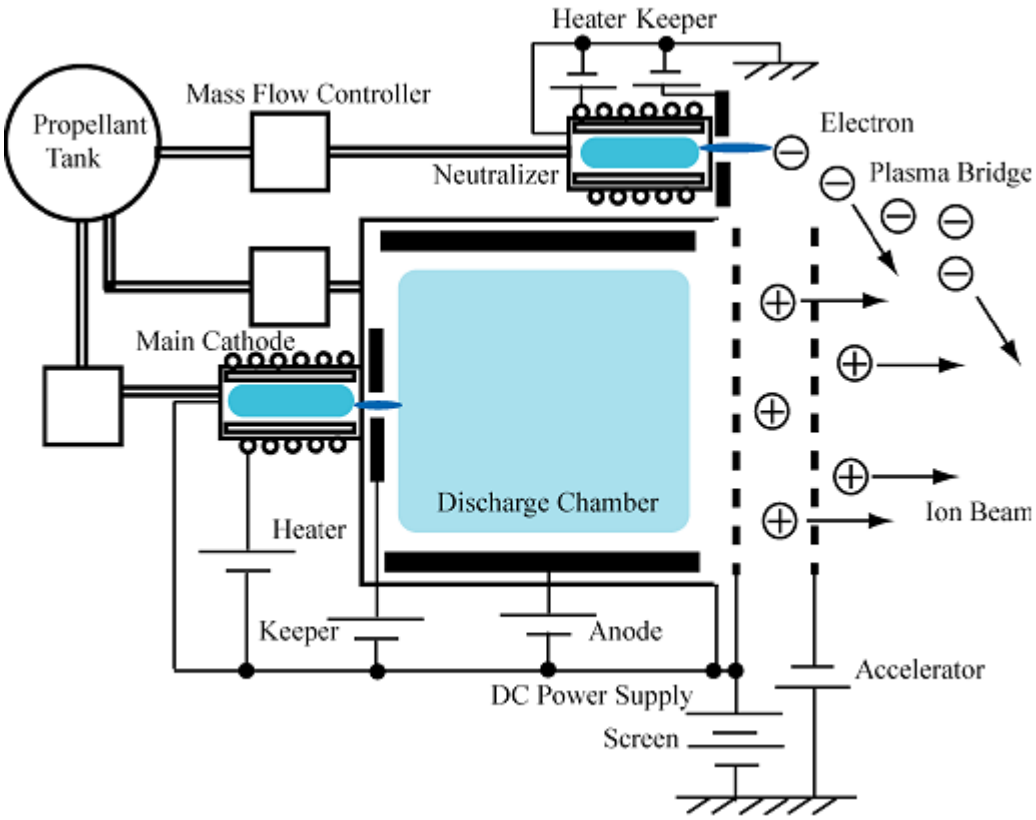

Fig.2-1　直流放電式イオンエンジンの概念図

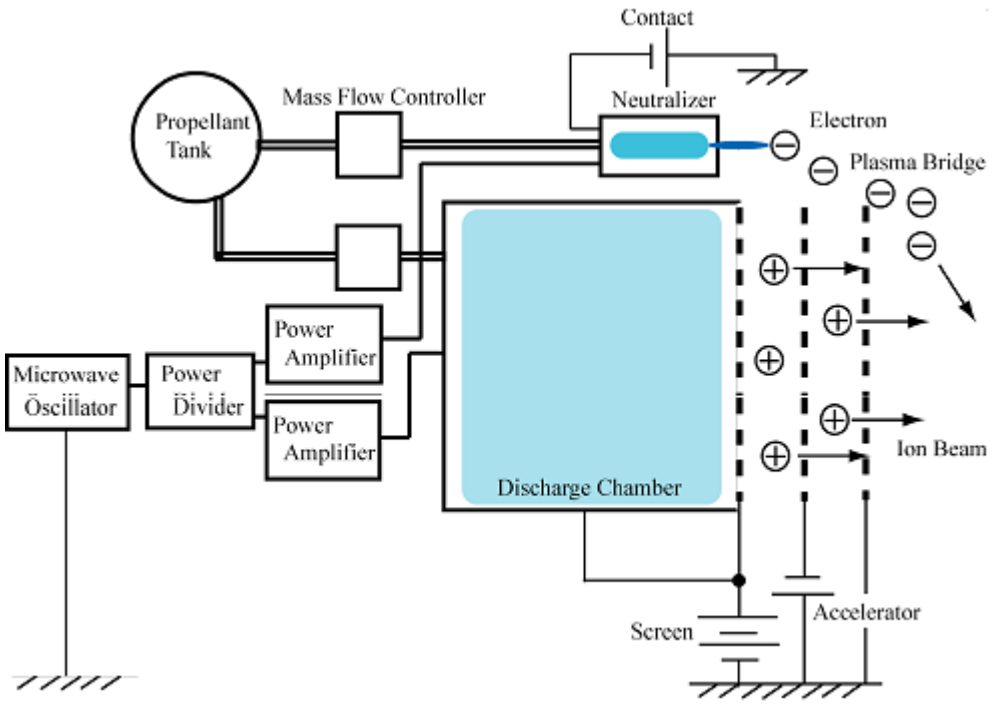

Fig.2-2　マイクロ波放電式イオンエンジンの概念図

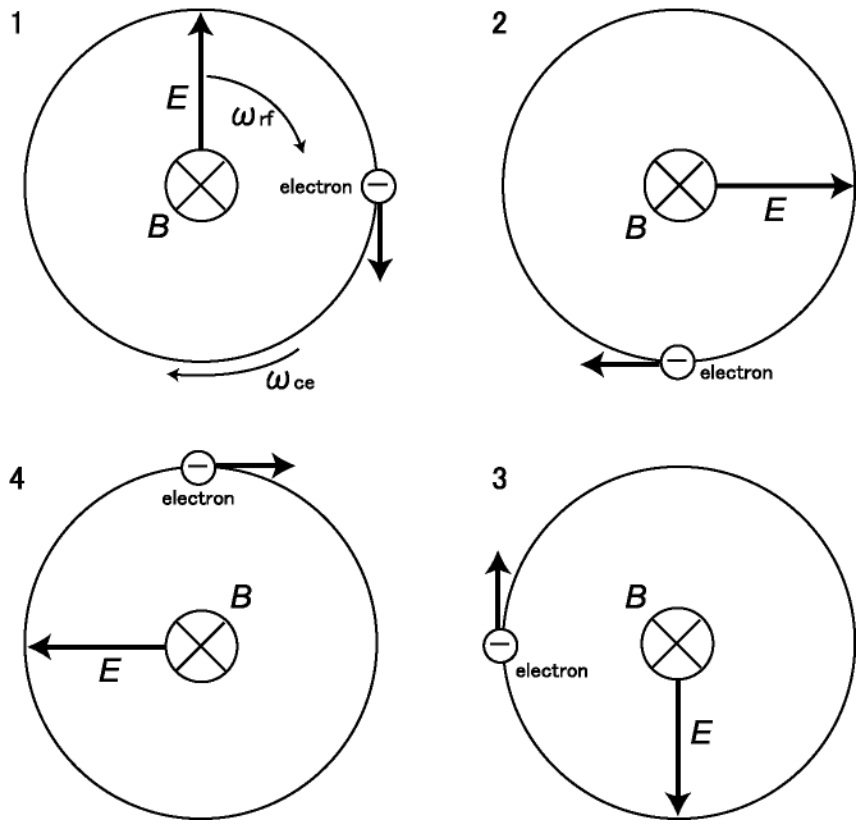

Fig.2-3　電子サイクロトロン共鳴の原理

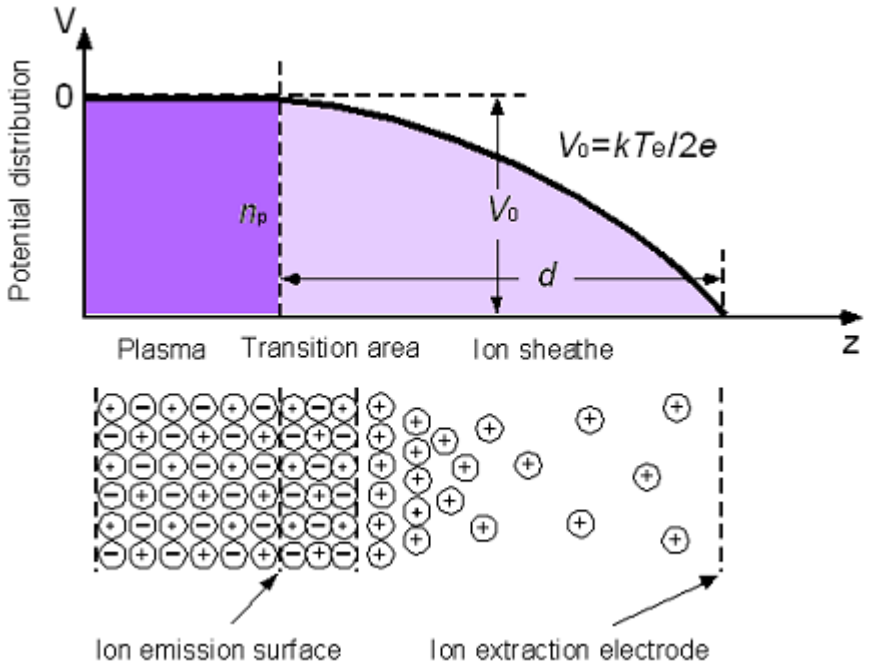

Fig.2-4　イオンシース領域への遷移

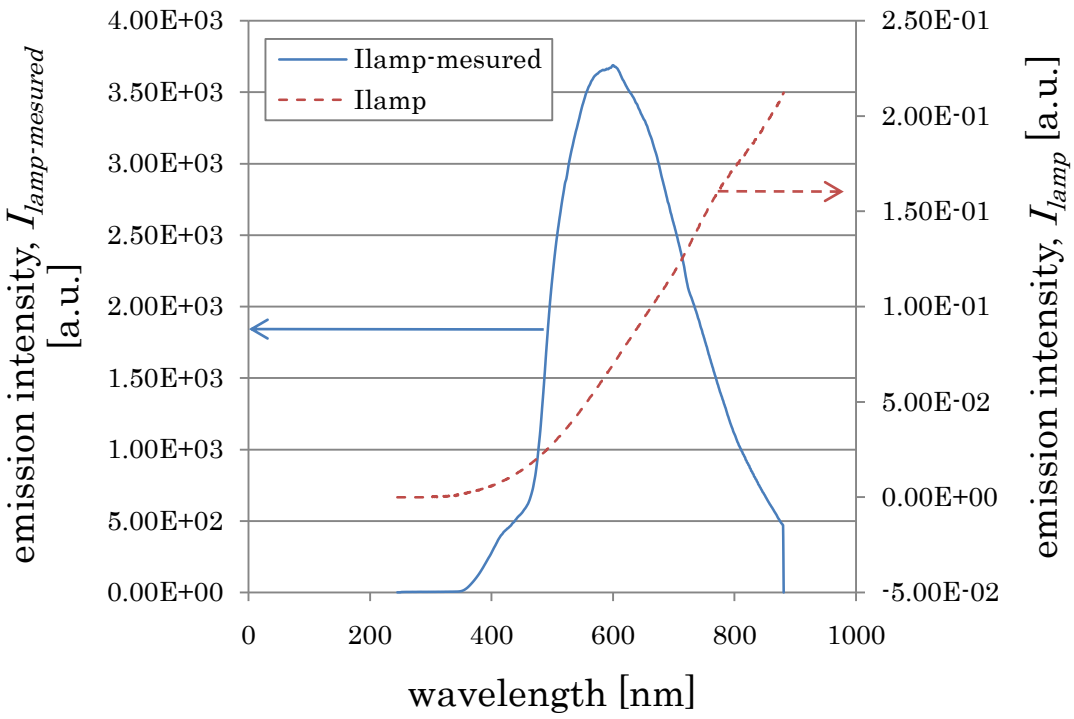

Fig.2-5　波長に対する発光強度の関係

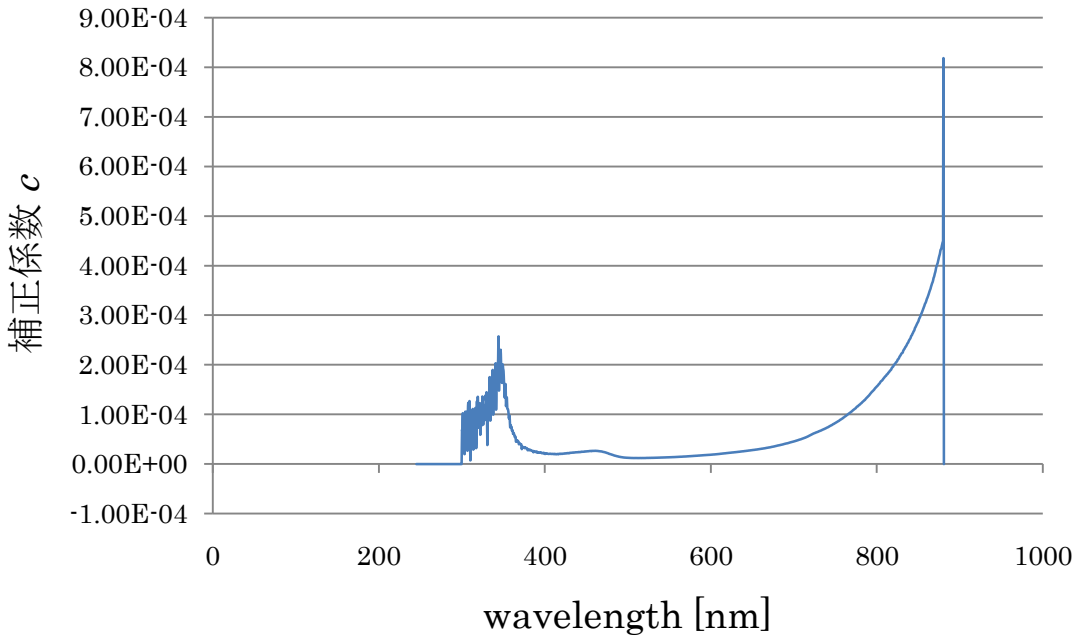

Fig.2-6　較正曲線

第 3 章　実験装置及び実験方法

本研究の実験装置は真空排気系、マイクロ波伝送系、イオンスラスタで構成されている。イオンスラスタは真空容器内に、マイクロ波電源、DC 電源、推進剤タンクは真空容器外にそれぞれ設置している。マイクロ波電源はプラズマの生成に、DC 電源はイオンビーム引き出しのためグリッドに電圧を印加するのにそれぞれ用いる。なお、イオンスラスタは真空容器、マイクロ波電源の両方から電気的に絶縁されている。イオンビーム引き出しを行うときは、イオンスラスタとマイクロ波電源の間に DC Block を設置し、グリッドに印加された電圧がマイクロ波電源に作用せず、交流成分のみ伝播するようにしている。推進剤はマスフローコントローラ（BROOKS 社製 5850S）によって制御され、イオンスラスタに供給される。

3.1　真空排気系

実験に用いた真空容器を Fig.3-1 に示す。真空容器には内径 60 cm、長さ 100 cm の円筒型 SUS 製真空チャンバを用いた。真空状態を作るのに使用したポンプを以下に示す。

ロータリーポンプ　2 台（排気速度 310 l/min）
ターボ分子ポンプ　1 台（排気速度 520 l/sec）
クライオポンプ　　1 台（排気速度 2000 l/sec at air, 800 l/sec at xenon）

ロータリーポンプは粗排気用に、ターボ分子ポンプ及びクライオポンプは高真空用にそれぞれ使用した。

3.2　マイクロ波伝送系

本研究では周波数 2.45 GHz のマイクロ波を使用した。しかし、一般に 2.45 GHz のマイクロ波の発振に用いられるマグネトロン管では、低電力領域で発振が安定しない。そのため、本研究では固体発振器により発振されたマイクロ波をアンプにより増幅することにした。マイクロ波伝送系のフローチャートを Fig.3-2 に示す。ここで使用したマイクロ波増幅器、信号源は THAMWAY 社製 T161-48DDA (2450 MHz, 60 W) である。マイクロ波は発振器から発振された後、フィルタを経てアンプによって増幅される。その後、アイソレータや方向性結合器を経て特性インピーダンス 50 W の N 型同軸ケーブルより出力される。真空容器内へは N 型真空用コネクタを使用し、真空容器内で N 型ケーブルから SMA コネクタを経て放電室内へ導入される。投入電力はパワーモニタにより計測された入射波と反射波の差より算出される。反射波はダミーロードにて熱として外部へ放出される。

3.3　イオンスラスタ

本研究では形状の異なる 3 つのイオンスラスタを使用した。イオンビーム測定実験には円形と矩形の 2 種類のイオンスラスタを、発光分光計測実験には可視化イオン源をそれぞれ用いた。円形イオンスラスタ、矩形イオンスラスタはアンテナ、放電室、永久磁石、グリッドから、可視化イオン源はアンテナ、放電室、永久磁石で構成されている。以下にその詳細を記述する。

3.3.1　円形イオンスラスタ

円形イオンスラスタの概略図を Fig.3-3 に示す。このスラスタの 50×50 mm の箱型取付け用アルミニウム製ハウジングを除いたサイズは 35×35×17 mm である。円形イオンスラスタはアルミニウム製円筒型放電室の周囲に 4×4×12 mm のサイズの 12 mm 方向に磁化されたサマリウムコバルト (Sm-Co) 磁石を 10 個配置し、軟鉄製ヨークで挟み込むことによって磁気回路を形成させている。Sm-Co 磁石は脆く欠けやすいが、高い磁気特性を持っており、温度特性に優れているため高温での使用に比較的向いている。

アンテナは SMA コネクタ（female）に固定されており、マイクロ波を放電室内に伝えている。このアンテナにはモリブデン製の星型アンテナを使用している。過去の研究からこの形状のアンテナが最もカップリングが良いと分かっている[6]。

引き出しに用いるグリッドにはスクリーングリッド、アクセルグリッドの 2 枚を用いた。その写真を Fig.3-4 に、パラメータを Table 3-1 にそれぞれ示す。グリッド同士はアルミナのインシュレータ及びねじで固定されている。

ここで二次元磁場解析ソフトを用いて行った円形イオンスラスタの磁場解析結果を Fig.3-5 に示す。前述したように電子は磁場に巻きついてサイクロトロン運動を行い、磁場に沿って移動する。放電室内を磁力線に沿ってヨークへ移動する電子は、ヨーク近くで磁気ミラー効果、もしくはヨーク表面付近のシースにより反射される。結果、放電室内部で電子は磁気ミラーの間に閉じ込められる。この磁気ミラー間を往復する間に、電子は ECR 領域を通過する毎に、ECR 加熱によりアンテナから放電室内に投入されたマイクロ波のエネルギーを受け加速する。このエネルギーをもった電子が推進剤に衝突し、推進剤を電離させることによってプラズマが生成される。これまでの研究により、この磁気ミラー間で主にプラズマが生成されていることが分かっている[7]。

3.3.2　矩形イオンスラスタ

矩形イオンスラスタの概略図を Fig.3-6 に示す。矩形イオンスラスタは 34×34×29 mm の軟鉄製ケース内に 18×5×4 mm のサイズの 4 mm 方向に磁化された Sm-Co 磁石 4 個と外径 6 mm、内径 3 mm、長さ 3 mm の円筒形 Sm-Co 磁石をそれぞれ配置することによって磁気回路を形成させている。アンテナとグリッドは円形イオンスラスタと同様のものを用いている。

矩形イオンスラスタについても三次元磁場解析ソフトを用いて磁場解析を行った。その結果を Fig.3-7 に示す。ここで円形イオンスラスタと矩形イオンスラスタでは形成される磁気回路の形状の違いから、円形イオンスラスタのヨーク間距離は約 7.8 mm、矩形イオンスラスタの磁石間距離は約 12.5 mm と、矩形イオンスラスタの方が約 4.7 mm 長くなっている。すなわち矩形イオンスラスタの方が円形イオンスラスタよりも磁気ミラー間距離が長く、従ってプラズマ生成領域が大きい。

3.3.3　可視化イオン源

可視化イオン源の概略図を Fig.3-8 に示す。この可視化イオン源は内径 21 mm、長さ 32 mm の石英ガラス製の円筒型放電室の周囲に 4×4×32 mm の Sm-Co 磁石を 13 個配置し、50×50×6 mm の軟鉄製ヨークで挟み込み磁気回路を形成している。このイオン源は放電室が石英ガラス製であるため、放電室内のプラズマを観察できるようになっている。軟鉄製ヨークの内側にはそれぞれ直径 9 mm の軟鉄製のセントラルヨークが取り付けられている。このセントラルヨークを交換することにより、ヨーク間距離を 8~16 mm まで 2 mm ずつ変化させることができるようになっている。このヨーク間距離を変えることにより、磁気ミラー間距離を変化させることができる。なお、ヨーク間の距離を変化させる度にアンテナを取り換え、アンテナがセントラルヨーク端から約 0.5 mm の場所に位置するように設置した。また、可視化イオン源ではイオンビームの引き出しを行わないため、グリッドは取り付けられていない。

3.4　実験体系

3.4.1　イオンビーム

本研究でのイオンビーム測定実験の体系を Fig.3-9 に示す。イオンビームの引き出しはアクセルグリッド及びスラスタ本体に 1000 V の電圧を、アクセルグリッドに-200 V の電圧を印加することにより行った。ポテンシャルによって引き出されたイオンビームの電流値 I_b [A]は次式から求められる。

$$I_b = I_s - I_a$$

ここで I_s と I_a はそれぞれスクリーングリッドに流れる電流値とアクセルグリッドに流れる電流値である。この式より求められた電流値がイオンスラスタ下流約 50 cm の場所に設置されたイオンコレクタによって測定された電流値と一致することが過去の研究からわかっている(8)。

実験には 2.45 GHz の周波数のマイクロ波を使用した。矩形イオンスラスタの場合、推進剤アルゴンで 0.3、0.4、0.5、0.6 sccm、推進剤キセノンで 0.2、0.3、0.4 sccm、円形イオンスラスタの場合、推進剤アルゴンで 0.3、0.4、0.6、1.0 sccm、推進剤キセノンで 0.2、0.4 sccm で実験を行った。実験パラメータとしてマイクロ波投入電力を 4~24 W まで 2 W ずつ変化させ、イオンビームの引き出しを行った。円形イオンスラスタと矩形イオンスラスタのそれぞれの場合において I_s と I_a を測定し、イオンビーム電流値 I_b を算出した。

3.4.2　発光分光計測

発光分光計測実験の体系を Fig.3-10 に示す。分光器（Stellar Net, Inc. 製 EPP200C-XR）を用いて発光スペクトルを測定する。分光器の諸元を Table 3-2 に、測定点を Fig.3-11 にそれぞれ示す。この点を測定点としたのはプラズマが生成される磁気ミラー間に位置しており、ヨーク間距離を変更してもセントラルヨークと干渉しない場所であるからである。ここで得られた発光スペクトルから 2.4 で述べた方法を用いて電子の励起温度を算出する。

Fig.3-1　真空チャンバの写真

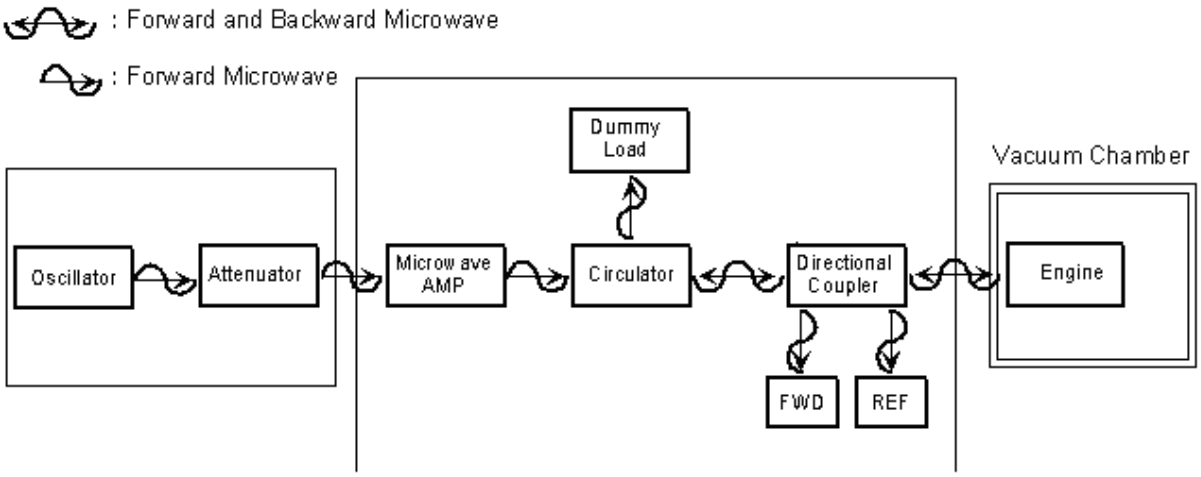

Fig.3-2　マイクロ波伝送系のフローチャート

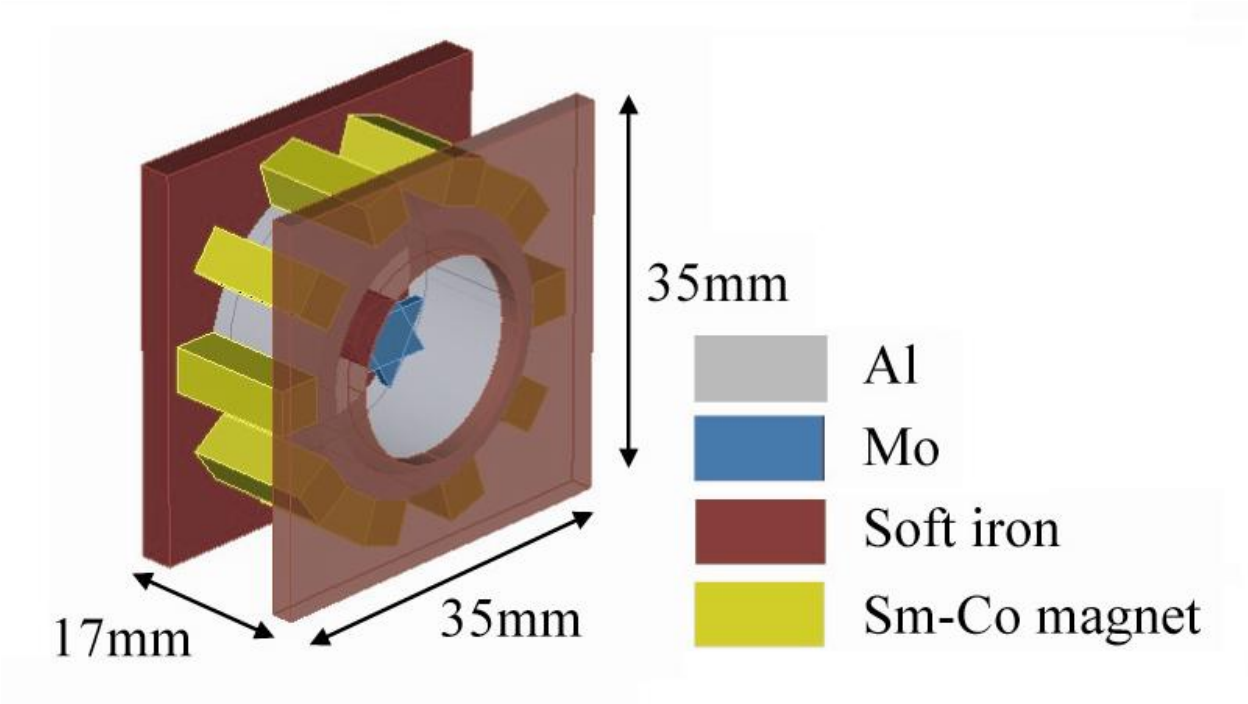

Fig.3-3　円形イオンスラスタの概略図

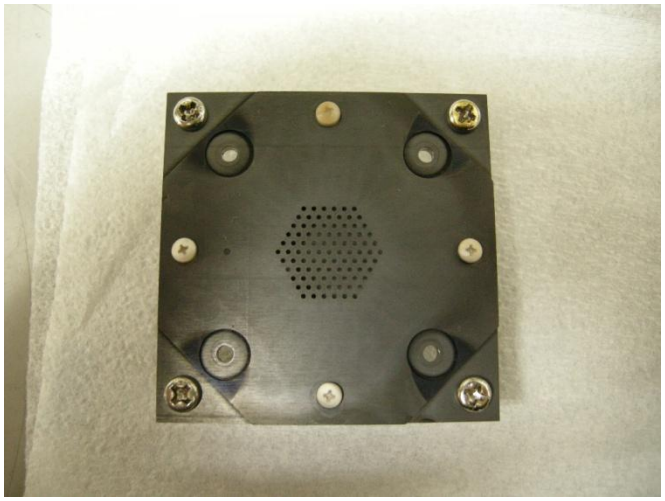

Fig.3-4　グリッドの写真

Table 3-1　グリッドパラメータ

Parameter	Screen	Acceleration
Open area ratio, %	51	16
Hole diameter, mm	1.20	0.70
Thickness, mm	0.30	
Hole pitch, mm	1.20	
Material	Carbon	
Grid gap, mm	0.20	
Number of holes	91	

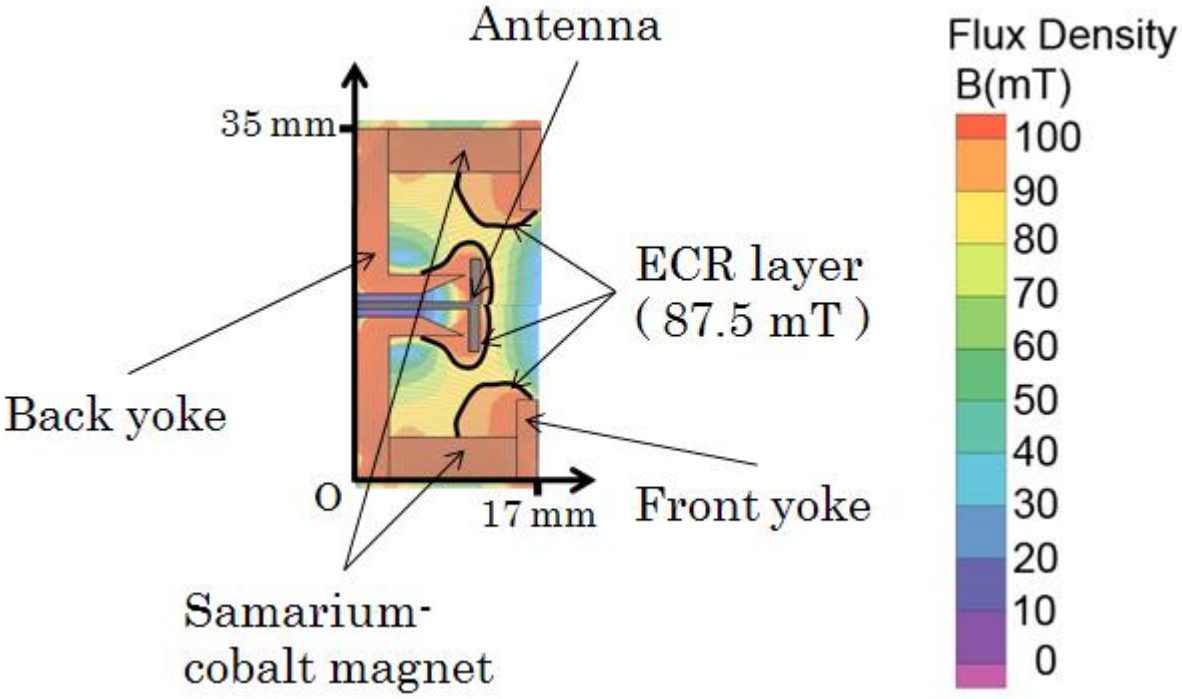

Fig.3-5　円形イオンスラスタの断面図

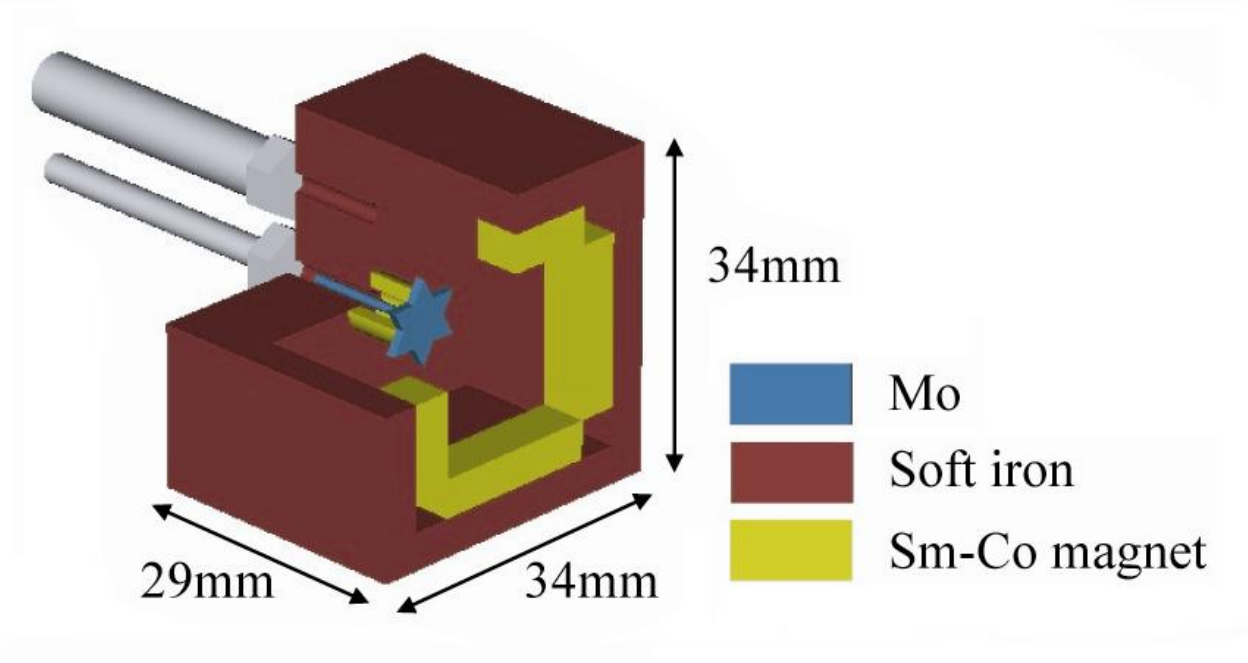

Fig.3-6　矩形イオンスラスタの概略図

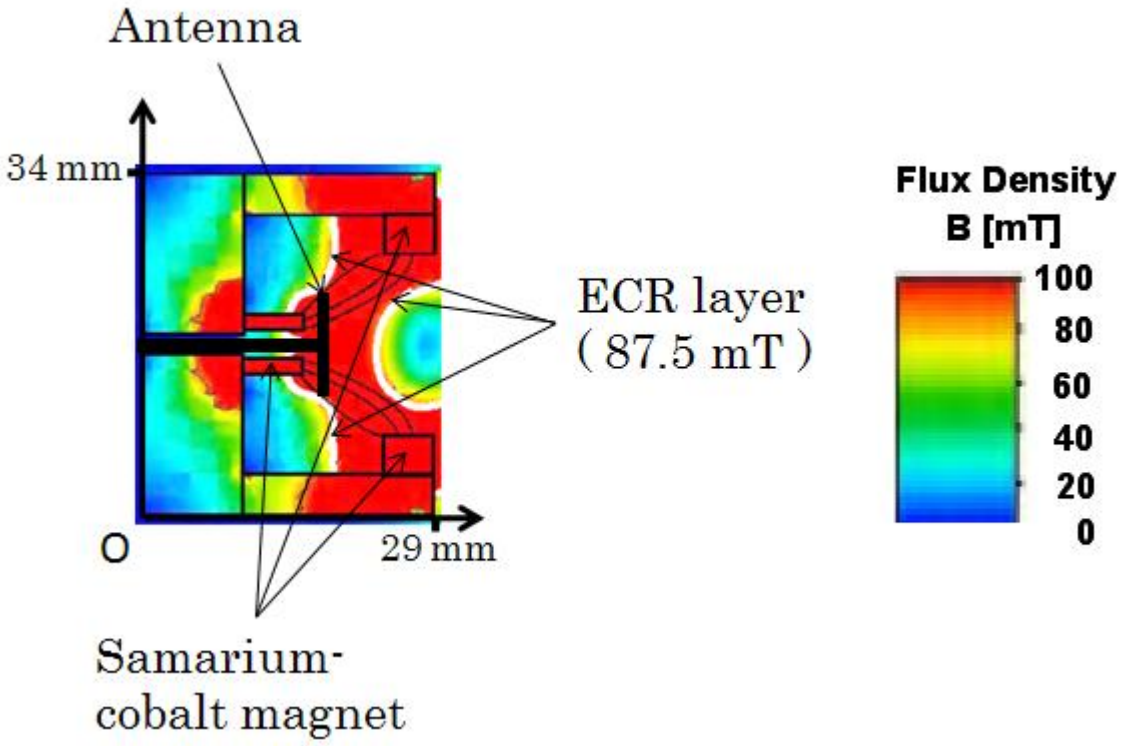

Fig.3-7　矩形スラスタの断面図

Fig.3-8　可視化イオン源の写真

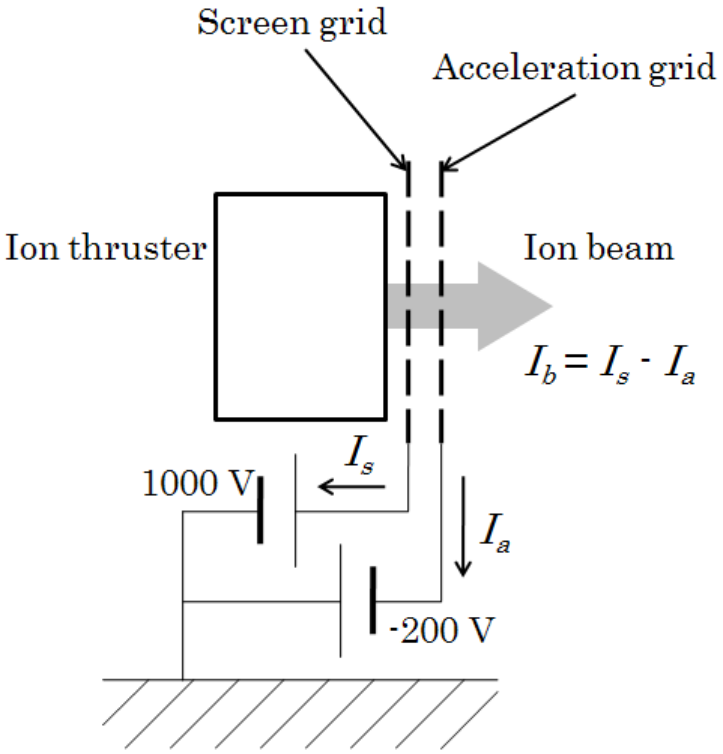

Fig.3-9　イオンビーム引き出しの概略図

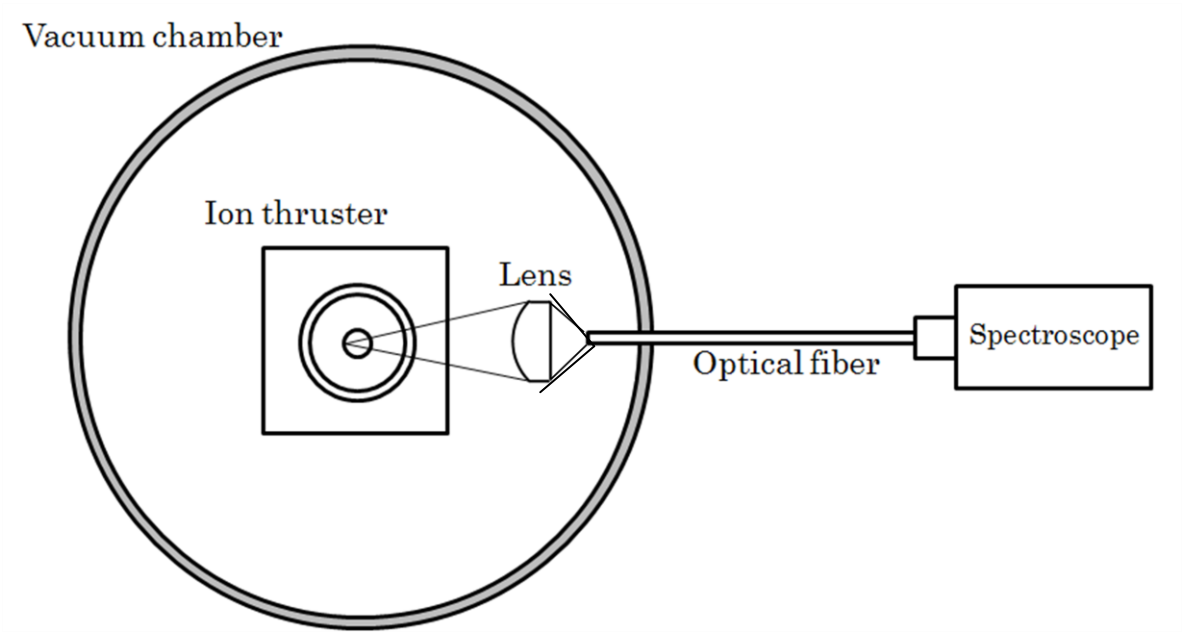

Fig.3-10　発光分光計測の概略図

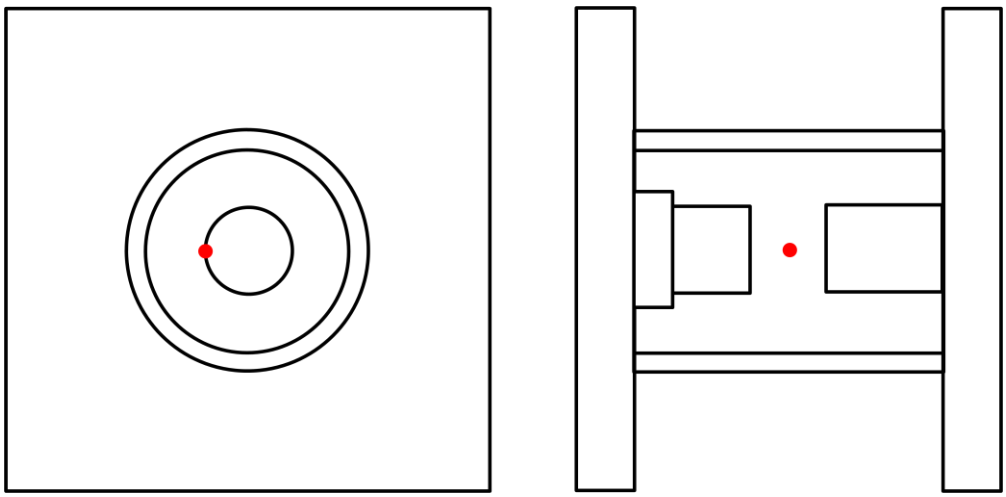

Fig.3-11　発光分光計測の測定点

Table 3-2　分光器の諸元

Specifications	
波長範囲	250 ~ 890 nm
分解能	1.5 nm
SN 比	1000:1 以上
Detector Integration:	4 ms -10s
Digitizer:	16-bit

第 4 章　実験結果及び考察

4.1　性能評価

イオンスラスタの推進性能はイオンビーム電流、引き出し電圧、推進剤流量などから求められる。推力 F [N]、比推力 I_{sp}[sec]、推進効率 η_t、推力係数 γ_T、推進剤利用効率 η_u 、イオン生成コスト ε_c [W/A] はそれぞれ次式より求められる。推力はイオンビーム引き出しにより発生する推進力を表している。比推力は単位推進剤重量あたりに単位推力を持続できる時間であり、ロケットエンジンの燃費を表す指標である。推進効率 η_t は投入した電力のうち推力発生の運動エネルギーに変換された割合を、推進剤利用効率 η_u は投入された推進剤がどの程度イオンビームとして排出されたかを示す割合である。

$$F = \gamma_T I_b \sqrt{\frac{2 m_i V_b}{e}}$$

$$I_{sp} = \frac{\gamma_T \eta_u}{g} \sqrt{\frac{2 e V_b}{m_i}}$$

$$\eta_t = \frac{\gamma_T^2 \eta_u}{1 + {\varepsilon_c}/{V_b}}$$

$$\gamma_T = \cos\theta_b \times \frac{1 + {\alpha}/{\sqrt{2}}}{1 + \alpha}$$

$$\eta_u = \frac{I_b}{\frac{e}{m_i}\dot{m}}$$

$$\varepsilon_c = \frac{P_d}{I_b}$$

ここで γ_T は推力係数、I_b はイオンビーム電流 [A]、m_i はイオン質量 [kg]、V_b は引き出し電圧 [V]、e は電気素量、g は重力加速度 [m/s^2]、θ_b はビーム発散角、α は一価イオンに対する二価イオンの割合、$\dot{m}$ は推進剤の質量流量 [kg/s]である。今回の実験では、ビーム発散角 θ_b と一価イオンに対する二価イオンの割合 α はそれぞれ 10°と 0.15 であると仮定した(9)(10)。このとき推力係数 γ_T は 0.95 となる。

4.2　推進性能

4.2.1　推進剤依存性

はじめに推進剤流量を一定とし、円形イオンスラスタを用いて、推進剤にアルゴンを用いた場合と推進剤にキセノンを用いた場合の性能を比較する。

推進剤流量 0.4 sccm で、円形イオンスラスタにおいて、推進剤にアルゴンを用いた場合と推進剤にキセノンを用いた場合のイオンビーム電流値 I_b を Fig.4-1 に示す。上述のように、ビーム電位が一定の場合、推力はイオンビーム電流に比例するため、推力ではなく、イオンビームで評価する。

マイクロ波投入電力 4 W のところでアルゴンが 3.3 mA、キセノンが 11.0 mA、マイクロ波投入電力 24 W でアルゴンが 15.4 mA、キセノンが 23.2 mA となっており、4~24 W のすべての範囲で推進剤をキセノンとした場合のイオンビーム電流値がアルゴンでのイオンビーム電流値を上回っていた。

ここで測定した電流値をもとに、推進効率 η_t を求めた。円形イオンスラスタ、推進剤流量 0.4 sccm の場合のアルゴンとキセノンの推進効率 η_t を Fig.4-2 に示す。マイクロ波投入電力 4 W のところでアルゴンが 4.8 %、キセノンが 28.2 %、マイクロ波投入電力 14 W でアルゴンが 17.1 %、キセノンが 42.1 %、マイクロ波投入電力 24 W でアルゴンが 19.0 %、キセノンが 43.5 %となっており、4~24 W のすべての範囲で推進剤をアルゴンとした場合と比較して、推進剤をキセノンとした場合の推進効率が上回っていた。これはキセノンの電離断面積がアルゴンよりも大きく、電離しやすいためと考えられる。

実際にイオンビームから算出した推進剤利用効率 η_u を Fig.4-3 に示す。マイクロ波投入電力 4 W のところでアルゴンが 11.4 %、キセノンが 38.3 %、マイクロ波投入電力 14 W でアルゴンが 41.0 %、キセノンが 68.4 %、マイクロ波投入電力 24 W でアルゴンが 53.7 %、キセノンが 80.9 %となっており、4~24 W のすべての範囲で推進剤をキセノンとした場合の推進剤利用効率がアルゴンでの推進剤利用効率を上回っていた。

これより、アルゴンの性能がキセノンよりも劣っている理由は、電離断面積が小さいために、推進剤利用効率が低下しているからである。

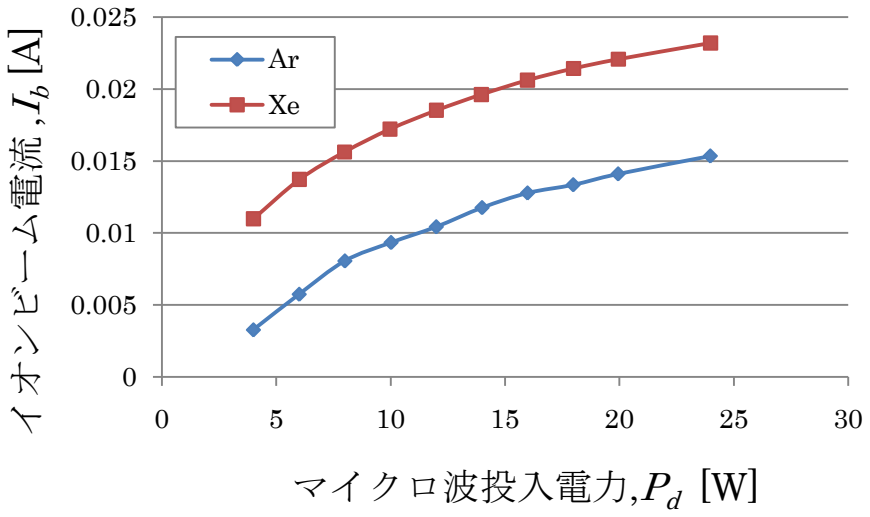

Fig.4-1　円形イオンスラスタ、推進剤流量 0.4 sccm でのイオンビーム電流

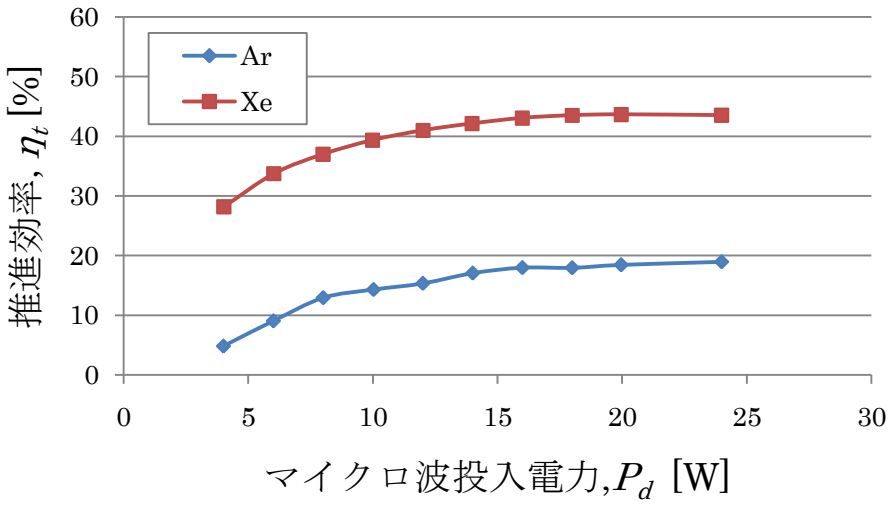

Fig.4-2　円形イオンスラスタ、推進剤流量 0.4 sccm での推進効率

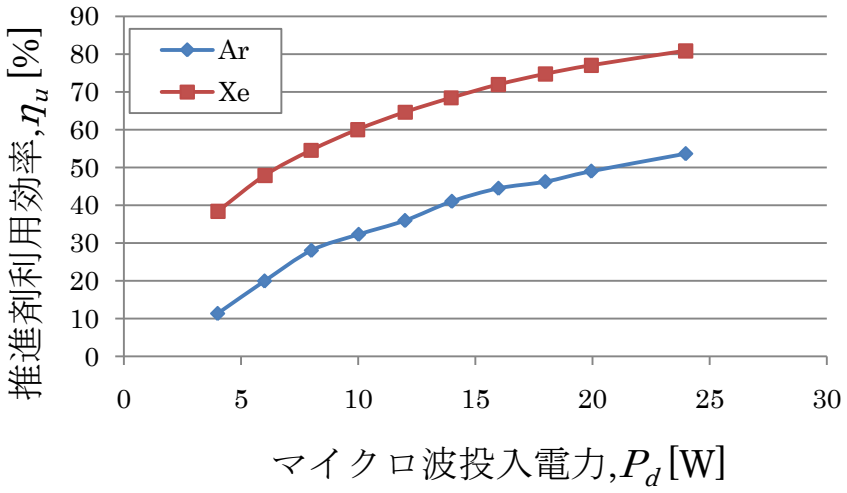

Fig.4-3　円形イオンスラスタ、推進剤流量 0.4 sccm での推進剤利用効率

4.2.2　放電室形状依存性

アルゴンでの性能向上を狙い、矩形イオンスラスタを製作した。これを用いて推進剤流量を 0.4 sccm での、2 つのスラスタの性能を比較する。

推進剤アルゴン、推進剤流量 0.4 sccm とした場合のイオンビーム電流 I_b を Fig.4-4 に示す。マイクロ波投入電力 4~8 W の範囲では、矩形イオンスラスタではプラズマが生成されず、円形イオンスラスタのみプラズマが生成された。そのため円形イオンスラスタのイオンビーム電流しか出ていない。一方、マイクロ波投入電力が 10 W のとき、矩形イオンスラスタと円形イオンスラスタのイオンビーム電流値はそれぞれ 13.3 mA と 9.3 mA、また投入電力 24 W では、矩形イオンスラスタと円形イオンスラスタのイオンビーム電流値はそれぞれ 24.8 mA と 15.4 mA と、マイクロ波投入電力が 10 W から 24 W の範で矩形イオンスラスタのイオンビーム電流値が円形イオンスラスタのイオンビーム電流値を大きく上回っていた。

推進剤アルゴン、推進剤流量 0.4 sccm とした場合の推進効率 η_t を Fig.4-6 に示す。マイクロ波投入電力 4~8 W の範囲では、矩形スラスタは作動しなかったため、円形イオンスラスタのみの値を出している。マイクロ波投入電力が 10 W のとき、矩形イオンスラスタと円形イオンスラスタの推進効率はそれぞれ 24.2 %と 14.3 %、また投入電力 24 W では、矩形イオンスラスタと円形イオンスラスタの推進効率はそれぞれ 40.0 %と 19.0 %と、マイクロ波投入電力が 10 W から 24 W の範囲で矩形イオンスラスタの推進効率が円形イオンスラスタの推進効率を大きく上回っていた。このように、マイクロ波の投入電力の増加に伴い、推進効率が 25 %から 40 %へと、飛躍的に性能が改善されているが、これは以下の理由である。矩形イオンスラスタでは、設計指針として、イオン生成領域を大きくしているため、結果として、同じ投入電力では電子温度が低くなると考えられる。よって、8 W 以下ではプラズマを維持できない。また、マイクロ波投入電力が増加すると、電子が ECR 層を通過する度にマイクロ波から得るエネルギーが増加するため、電離が起こりやすくなり、プラズマ密度が増加する。特にアルゴンは電離断面積が小さいため、マイクロ波電力すなわち電子温度の増加に敏感なためである。そのため、飛躍的に性能が向上したと考えられる。

ここで円形イオンスラスタと矩形イオンスラスタのプラズマ生成領域を Fig.4-7 に示す。矩形イオンスラスタは円形イオンスラスタに比べて磁気ミラー間距離が長い。前述のように磁気ミラー間の領域でプラズマが生成されるので、矩形イオンスラスタの方が円形イオンスラスタと比較してプラズマ生成領域が大きくなっている。そのため矩形イオンスラスタでは電子がプラズマ生成領域に滞在する時間が長くなり、放電室内のプラズマ生成率が上がる。よって矩形イオンスラスタの方が円形イオンスラスタと比較して推進効率が向上している。実際に Fig.4-5 に示す通り、投入電力 24 W において、比較すると、54 %から 87 %へと、推進剤利用効率の向上が見られる。

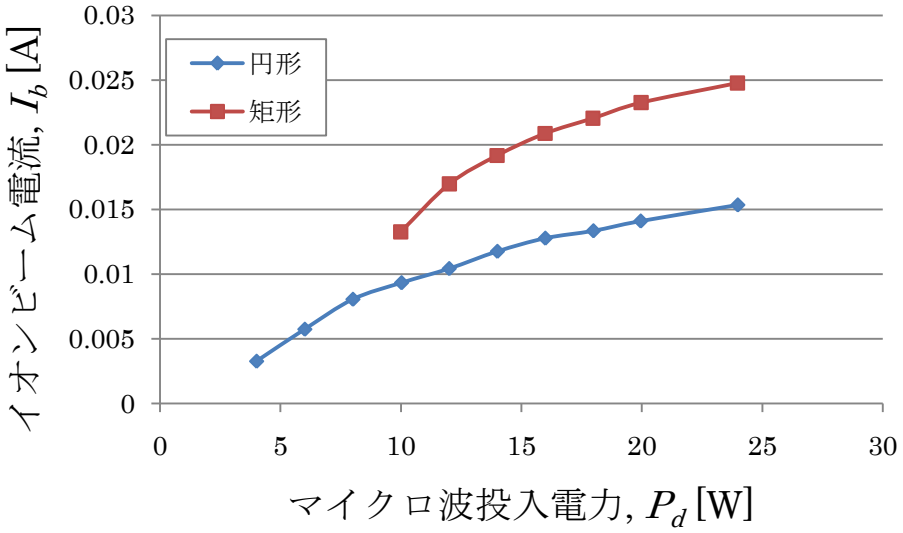

Fig.4-4　推進剤アルゴン、推進剤流量 0.4 sccm でのイオンビーム電流

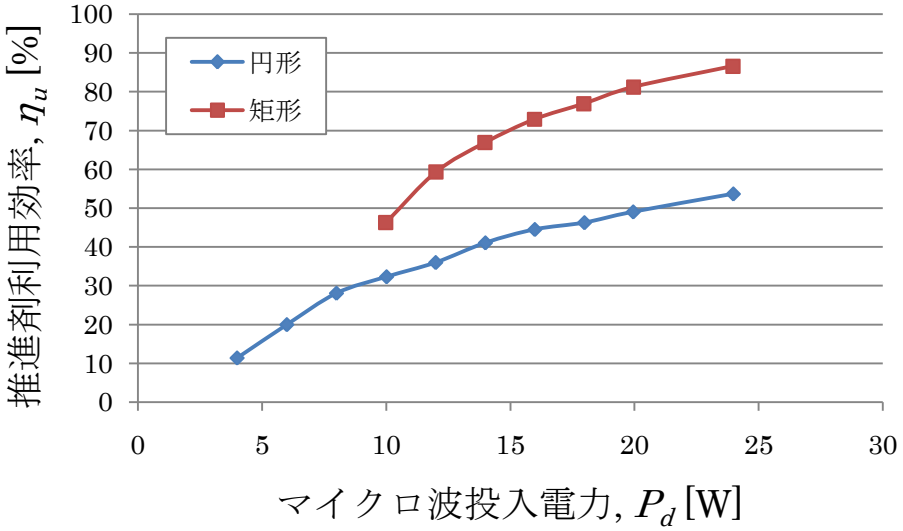

Fig.4-5　推進剤アルゴン、推進剤流量 0.4 sccm での推進剤利用効率

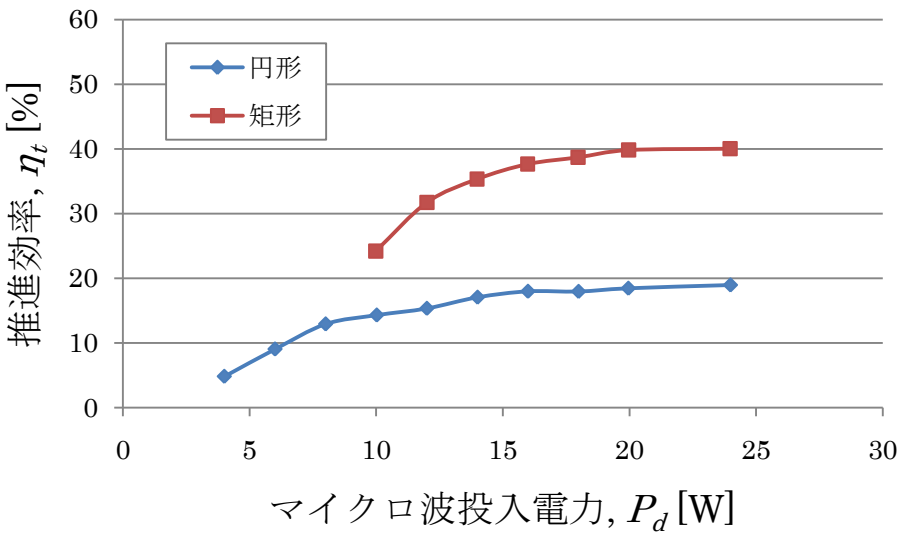

Fig.4-6　推進剤アルゴン、推進剤流量 0.4 sccm での推進効率

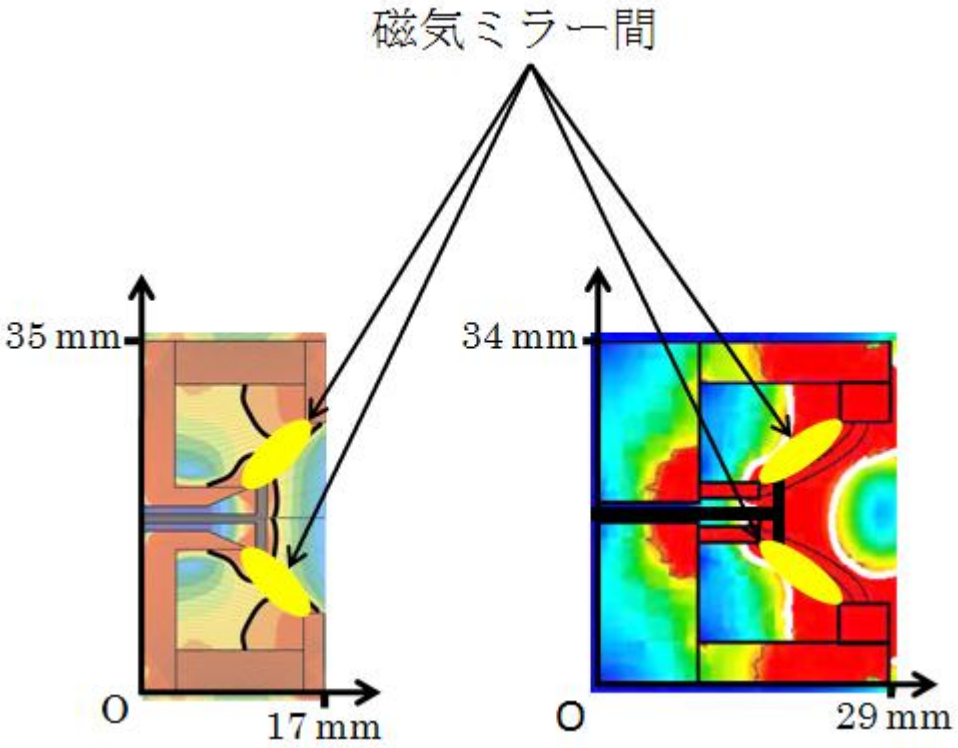

Fig.4-7　プラズマ生成領域

一方、推進剤にキセノンを用い、円形イオンスラスタと矩形イオンスラスタで性能を比較したものを Fig.4-8 に示す。推進剤流量 0.4 sccm において、マイクロ波投入電力が 4 W のとき、矩形イオンスラスタと円形イオンスラスタのイオンビーム電流値はそれぞれ 9.7 mA と 11.0 mA、投入電力 14 W では、矩形イオンスラスタと円形イオンスラスタのイオンビーム電流値はそれぞれ 15.7 mA と 19.6 mA、また投入電力 24 W では、矩形イオンスラスタと円形イオンスラスタのイオンビーム電流値はそれぞれ 19.0 mA と 23.2 mA と、マイクロ波投入電力が 10 W から 24 W の範囲で円形イオンスラスタのイオンビーム電流値が矩形イオンスラスタのイオンビーム電流値を大きく上回っていた。

同じく、推進効率で比較する。Fig.4-9 に推進剤キセノン、推進剤流量 0.4 sccm とした場合の推進効率 η_t を示す。マイクロ波投入電力が 4 W のとき、矩形イオンスラスタと円形イオンスラスタの推進効率はそれぞれ 21.9 %と 28.2 %、投入電力 14 W では、矩形イオンスラスタと円形イオンスラスタの推進効率はそれぞれ 28.2 %と 42.1 %、また投入電力 24 W では、矩形イオンスラスタと円形イオンスラスタの推進効率はそれぞれ 29.7 %と 43.5 %と、マイクロ波投入電力が 10 W から 24 W の範囲で円形イオンスラスタの推進効率が矩形イオンスラスタの推進効率を大きく上回っていた。

さらに、推進剤にキセノンを用い、推進剤流量を 0.2 sccm とした場合で円形イオンスラスタと矩形イオンスラスタで性能を比較する。

推進剤キセノン、推進剤流量 0.2 sccm とした場合のイオンビーム電流 I_b を Fig.4-10 に示す。マイクロ波投入電力が 4 W のとき、矩形イオンスラスタと円形イオンスラスタのイオンビーム電流値はそれぞれ 6.9 mA と 9.2 mA、投入電力 8 W では、矩形イオンスラスタと円形イオンスラスタのイオンビーム電流値はそれぞれ 11.7 mA と 11.5 mA、また投入電力 12 W では、矩形イオンスラスタと円形イオンスラスタのイオンビーム電流値はそれぞれ 13.5 mA と 12.4 mA と、マイクロ波投入電力が 4 W、6 W のときは円形イオンスラスタのイオンビーム電流値が矩形イオンスラスタのイオンビーム電流値をわずかに上回った。逆に 8~12 W の範囲では矩形イオンスラスタのイオンビーム電流値が大きかった。

推進剤キセノン、推進剤流量 0.2 sccm とした場合の推進効率 η_t を Fig.4-11 に示す。マイクロ波投入電力が 4 W のとき、矩形イオンスラスタと円形イオンスラスタの推進効率はそれぞれ 28.0 %と 45.4 %、投入電力 8 W では、矩形イオンスラスタと円形イオンスラスタの推進効率はそれぞれ 44.4 %と 49.5 %、また投入電力 12 W では、矩形イオンスラスタと円形イオンスラスタの推進効率はそれぞれ 45.5 %と 47.3 %と、マイクロ波投入電力が 4~12 W の範囲で円形イオンスラスタの推進効率が矩形イオンスラスタのそれをわずかに上回っていた。

キセノンでは推進剤流量が 0.2 sccm の場合、円形イオンスラスタと矩形イオンスラスタで推進効率にあまり変化はなかった。しかし、推進剤流量が 0.4 sccm の場合、磁気ミラー間距離を伸ばした矩形イオンスラスタの方が円形イオンスラスタと比較して推進効率が悪くなっていた。これはキセノンの電離断面積がアルゴンと比較して大きいため、低流量（0.2 sccm）かつ円形の放電室でも十分なプラズマ密度を保てているが、矩形ではイオン生成領域が広がったことに伴い損失が大きくなっていること、また、電子のキセノンに対する平均自由行程が 20 cm と、アルゴンに対する平均自由行程と比べて短く、磁気ミラー間距離を延ばしたことにより、電子が中性粒子を電離させるのに十分なエネルギーを持つまで加速されずに中性粒子と衝突してしまうことが原因であると考えられる。これより、作動点、作動ガスによって最適な磁気ミラー間が存在することが示唆された。すなわち、平均自由行程を考慮してスラスタを設計する必要があることが示唆された。

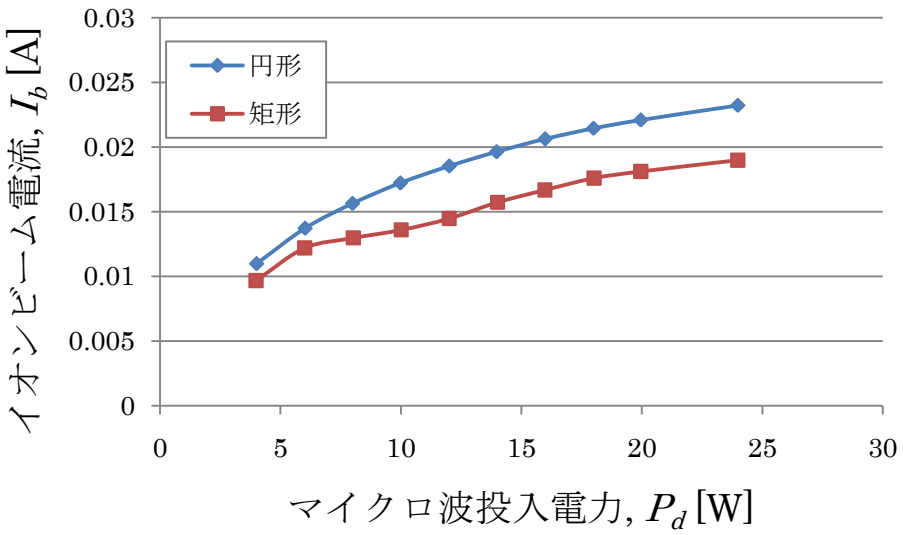

Fig.4-8　推進剤キセノン、推進剤流量 0.4 sccm でのイオンビーム電流値

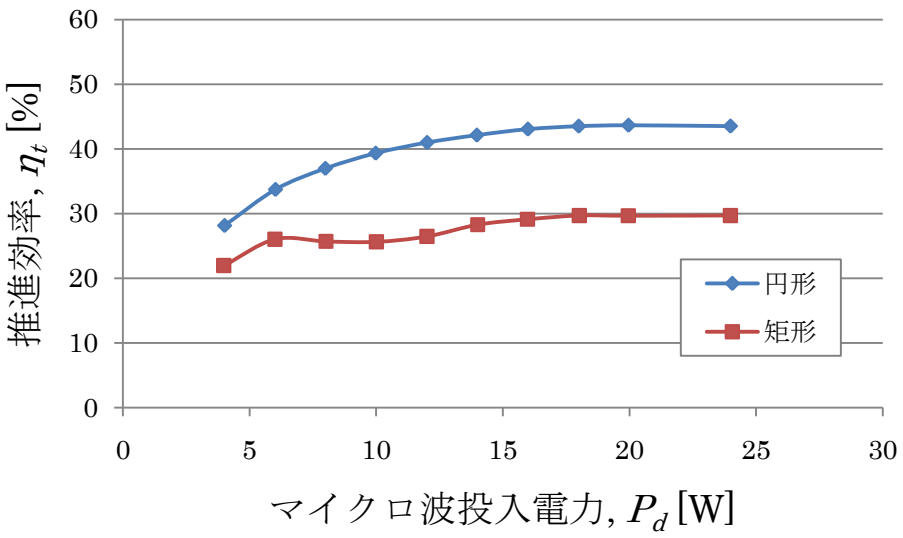

Fig.4-9　推進剤キセノン、推進剤流量 0.4 sccm での推進効率

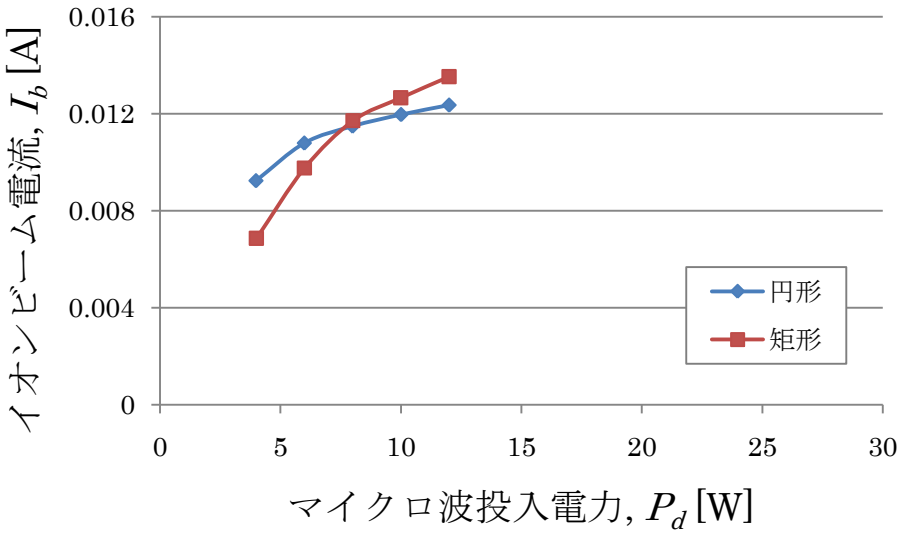

Fig.4-10　推進剤キセノン、推進剤流量 0.2 sccm でのイオンビーム電流値

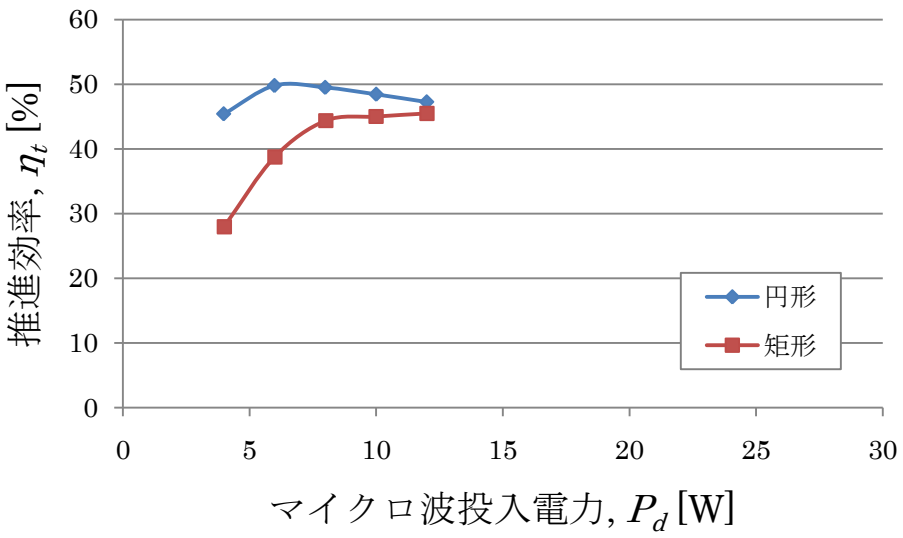

Fig.4-11　推進剤キセノン、推進剤流量 0.2 sccm での推進効率

4.3　発光分光計測

4.2.2 で得られた結果より、磁気ミラー間距離と平均自由行程の比がイオンスラスタの性能に関係性があることが示唆された。そこで、この仮定の妥当性を証明するために、可視化イオン源を製作した。まず可視化イオン源の作動を確認するために、推進剤をアルゴンとし、推進剤流量 0.2 sccm で着火を試みた。Fig.4-12 にその作動の様子を示す。このように、磁気ミラー間すなわち、二つのヨーク間に挟まれた領域でプラズマが維持されていることが分かる。

次に相対強度法を用いて、電子の励起温度の測定を行った。推進剤アルゴン、推進剤流量 0.2 sccm、ヨーク間距離を 8 mm とした場合の、マイクロ波投入電力 10 W のときの発光スペクトルを Fig.4-13 に、そのボルツマンプロットを Fig.4-14 に、マイクロ波投入電力 12 W のときの発光スペクトルを Fig.4-15 に、そのボルツマンプロットを Fig.4-16 にそれぞれ示す。このとき算出に用いたスペクトルに関する諸係数を Table 4-1 に示す[11]。ここで得られた発光スペクトルから、2.4 で述べた方法を用いて、電子励起温度を求めた結果、投入電力 10 W で約 5.0 eV、投入電力 12 W で約 5.2 eV であった。このように、投入電力の増加に伴い、電子励起温度が上昇していることから、電子温度も増加していると考えられる。これはこれまでの傾向と矛盾せず、この手法をこの評価に用いる妥当性が示せたと思われる。よって、この手法を用いて、ヨーク間を変更しな

がら測定することにより、スラスタ性能のヨーク間距離依存性を確かめることが可能であると示された。

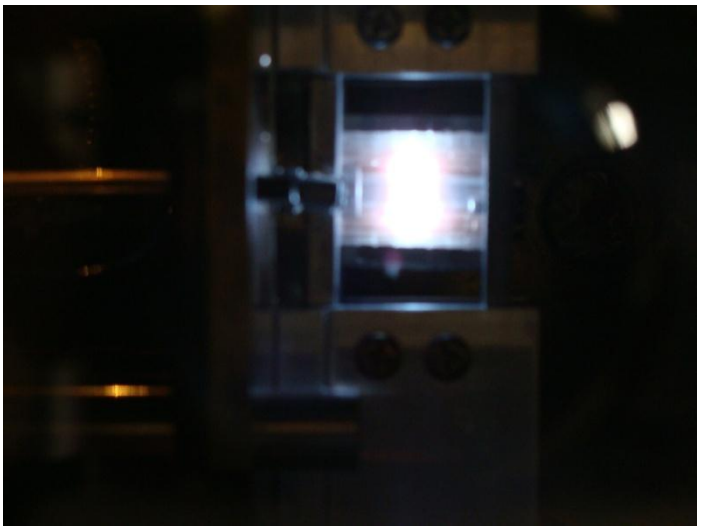

Fig.4-12　可視化イオン源プラズマの発光写真

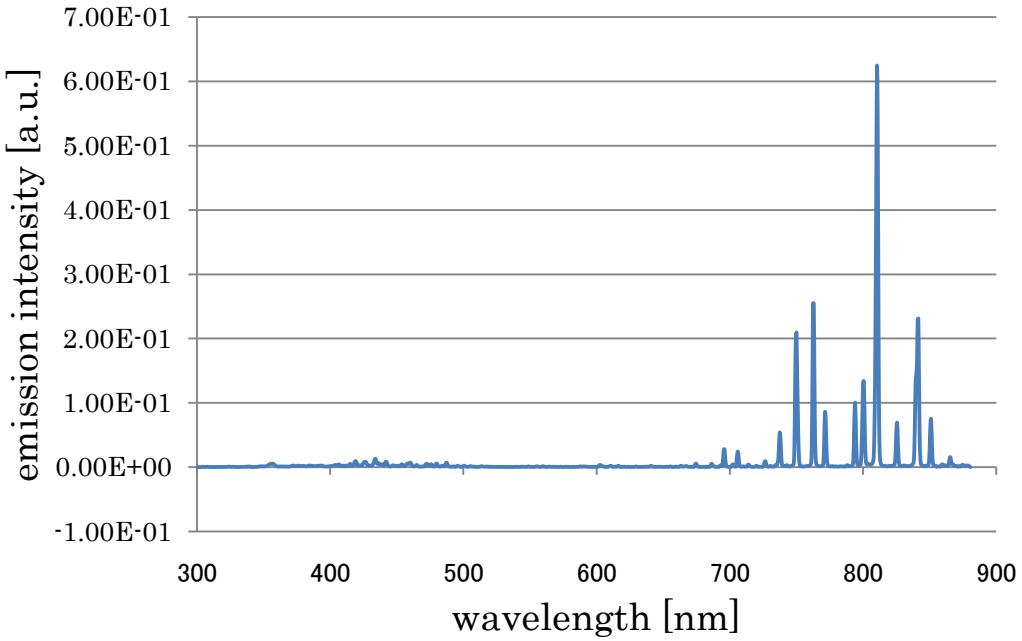

Fig.4-13　推進剤アルゴン、推進剤流量 0.2 sccm、マイクロ波投入電力 10 W
ヨーク間距離 8 mm での発光スペクトル

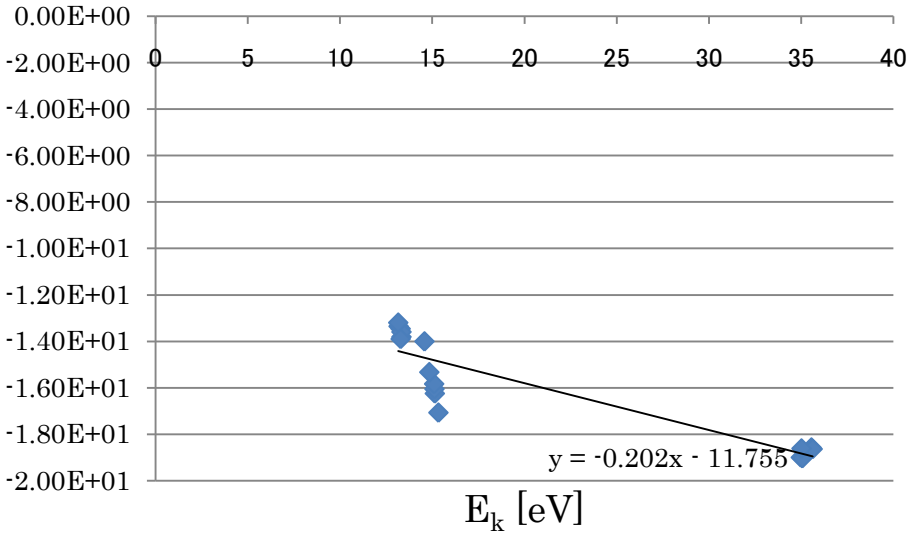

Fig.4-14　推進剤アルゴン、推進剤流量 0.2 sccm、マイクロ波投入電力 10 W
ヨーク間距離 8 mm でのボルツマンプロット

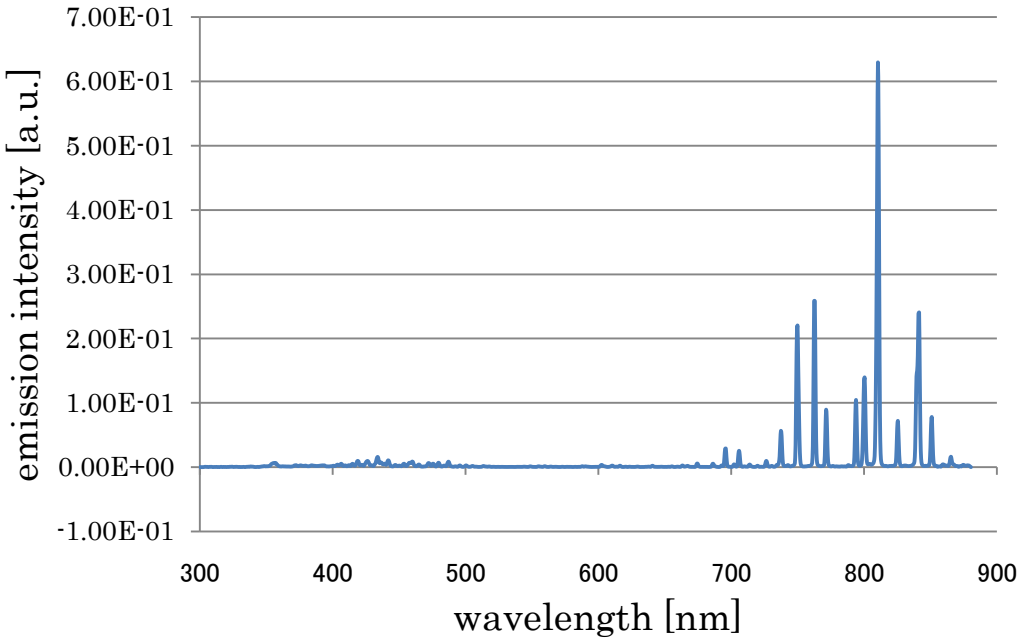

Fig.4-15　推進剤アルゴン、推進剤流量 0.2 sccm、マイクロ波投入電力 12 W
ヨーク間距離 8 mm での発光スペクトル

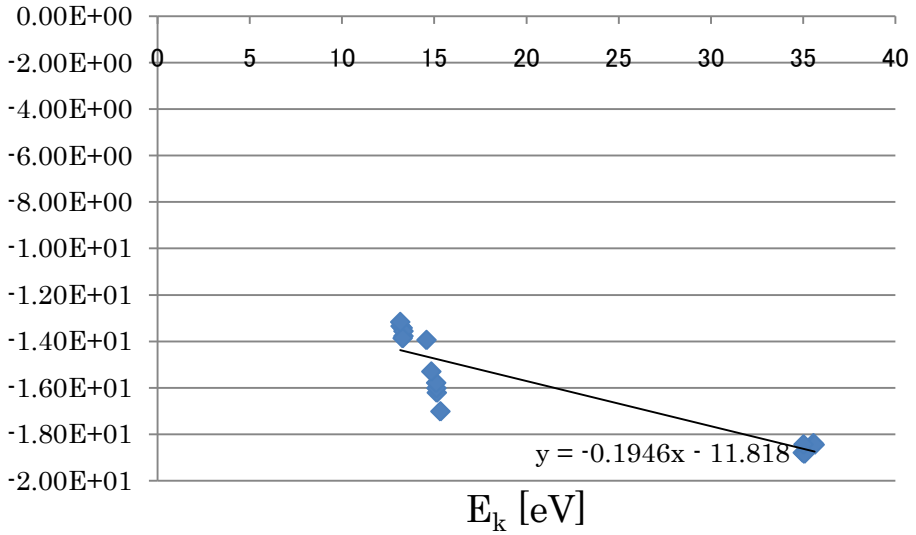

Fig.4-16　推進剤アルゴン、推進剤流量 0.2 sccm、マイクロ波投入電力 12 W
ヨーク間距離 8 mm でのボルツマンプロット

Table 4-1　スペクトル諸係数

	Wavelength [nm]	A_{ki} [s^{-1}]	E_i [eV]	E_k [eV]	g_i		g_k
Ar II	465.79	8.92×10^{7}	17.14	19.80	4	-	2
Ar II	476.49	6.40×10^{7}	17.27	19.87	2	-	4
Ar II	480.60	7.80×10^{7}	16.64	19.22	6	-	6
Ar II	484.78	8.49×10^{7}	16.75	19.31	4	-	2
Ar II	506.20	2.23×10^{7}	16.81	19.26	2	-	4
Ar I	451.07	1.18×10^{6}	11.83	14.58	3	-	1
Ar I	549.59	1.69×10^{6}	13.08	15.33	7	-	9
Ar I	555.87	1.42×10^{6}	12.91	15.14	3	-	5
Ar I	560.67	2.20×10^{6}	12.91	15.12	3	-	3
Ar I	565.07	3.20×10^{6}	12.91	15.10	3	-	1
Ar I	641.63	1.16×10^{6}	12.91	14.84	3	-	5
Ar I	696.54	6.39×10^{6}	11.55	13.33	5	-	3
Ar I	763.51	2.45×10^{7}	11.55	13.17	5	-	5
Ar I	794.82	1.86×10^{7}	11.72	13.28	1	-	3
Ar I	826.45	1.53×10^{7}	11.83	13.33	3	-	3
Ar I	852.14	1.39×10^{7}	11.83	13.28	3	-	5
Ar I	866.79	2.43×10^{6}	11.72	13.15	1	-	3

第 5 章　結論

本研究では推進剤にアルゴンを用いた小型イオンスラスタの性能向上の指針を得るために、イオンビーム測定実験による性能評価を行った。また、その傾向を説明できる物理モデルを構築するために、可視化イオン源を用いて、発光分光を行い、計測実験による電子励起温度の算出を行った。

推進剤にそれぞれアルゴンとキセノンを用い、円形イオンスラスタと矩形イオンスラスタについてイオンビーム測定実験を行った。推進剤アルゴン、推進剤流量 0.4 sccm の場合、マイクロ波投入電力が 10~24 W のとき、矩形イオンスラスタの方が円形イオンスラスタに対して推進効率が上回った。これは円形イオンスラスタと矩形イオンスラスタでは矩形イオンスラスタの方がプラズマの生成領域が大きく、中性粒子が生成領域に留まる時間が増え、プラズマの生成率も上昇し、プラズマ密度が上昇したためと考えられる。

一方、推進剤キセノン、推進剤流量が 0.4 sccm の場合では、磁気ミラー間距離を延ばした矩形の方の推進効率が悪くなった。これはキセノンでは円形の放電室で十分なプラズマ密度を保てているが、矩形では損失が大きくなっていること、また電子のキセノンに対する平均自由行程が 20 cm と、アルゴンに対する平均自由行程と比べて短いため、磁気ミラー間距離を延ばしたことにより、電子が中性粒子を電離させるのに十分なエネルギーを持つまで加速されずに中性粒子と衝突してしまったからであると考えられる。

スラスタの設計をする際には平均自由行程を考慮し、ガス種や推進剤流量から磁気ミラー間距離を決める必要があることが分かった。

次にヨーク間距離を変更することができる可視化イオン源について発光分光計測を行った。ヨーク間距離を 8 mm とし、アルゴン推進剤流量 0.2 sccm、投入電力 10 W と 12 W とした場合、電子励起温度はそれぞれ約 5.0 eV と約 5.2 eV であった。これを用いて、ヨーク間を変更しながら測定することにより、スラスタ性能のヨーク間距離依存性を確かめることが可能であると示された。

参考文献

(1) 栗木恭一・荒川義博: “電気推進ロケット入門”, 東京大学出版会, 2003.

(2) JAXA ホームページ (http://www.jaxa.jp/)

(3) Wirz R., et al.: “Development and Testing of a 3cm Electron Bombardment Micro-Ion Thruster”, IEPC paper 2001-343, 27th IEPC, October 2001.

(4) 荒川義博, 國中均, 中山宜典, 西山和孝: “イオンエンジンによる動力航行”, コロナ社, 2006.

(5) 山本学, 村山精一: “プラズマの分光計測”, 学会出版センター, 1995.

(6) 近岡貴行: “小型衛星用イオンスラスタの開発”,平成 18 年度九州大学修士論文.

(7) Yamamoto N., et al.: “Effects of magnetic field configuration on thrust performance in a miniature microwave discharge ion thruster”, J. Appl. Phys. 102, 123304 (2007)

(8) 提井信力: “プラズマ基礎工学”, 内田老鶴圃, 1995.

(9) 佐鳥新, 國中均, 大滝基之: “マイクロ波放電型イオンエンジンのビーム計測”, 日本航空宇宙学会誌, Vol.46, No.534, pp.406-412, 1998.

(10) Takegahara, H., Kasai, Y., Gotoh, Y., Miyazaki, K., Hayakawa, Y., Kitamura, S., Nagano, H., and Nakamura, K.: “Beam Characteristics Evaluation of ETS-VI Xenon Ion Thruster”, IEPC paper 93-235, Electric Rocket Propulsion Society, Sept. 1993.

(11) NIST Atomic Spectra Database Lines Form (http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html)