目次

第一章　序論 1
1.1　研究背景 1
1.2　目的 2

第二章　原理 4
2.1　イオンスラスタの作動原理 4
2.2　マイクロ波放電式イオンスラスタ 9
2.3　ECR プラズマ 11

第三章　実験装置及び実験方法 14
3.1　真空排気系 14
3.2　マイクロ波伝送系 16
3.3　2cm 級イオンスラスタ 17
3.4　実験体系 23
3.4.1　イオンビーム電流計測 23
3.4.2　二価イオン存在比測定 25

第四章　実験結果及び考察 29
4.1　性能評価 29
4.2　イオンビーム電流計測 30
4.2.1　磁場強度依存性 30
4.4.2　マイクロ波周波数依存性 34
4.3　二価イオン存在比測定 39

第五章　結論 40

参考文献 41

謝辞 42

第一章　序論

1.1　研究背景

1957年10月、人類初の人工衛星スプートニク一号の打ち上げにソ連が成功し、宇宙開発が活発に行われるようになった。現在までに、人工衛星は5000個以上打ち上げられ、情報通信、気象観測、地球観測など様々なミッションに利用されている。衛星通信・放送、GPS による船舶・自動車などのナビゲーション、気象衛星を用いた天気予報は、もはや私たちの生活に不可欠なものとなっている。

近年、人工衛星の中でも小型のものが注目されてきている。小型人工衛星とは、明確な定義はないが一般的に質量が 1 ton より小さいか、あるいは 500 kg 以下の衛星のことを指す。人工衛星を小型化できれば、開発期間の短縮やコストの削減が見込める。大型衛星の開発期間は 5 年から 10 年、コストは数百億円である。一方、小型衛星の開発期間は 3 年、コストは数億円から数十億円で打ち上げが可能である(1)。開発サイクルが短縮されると、近年の急速な民生技術開発に対応でき、タイムリーな宇宙開発が可能である。また、低コスト化により、挑戦的なプロジェクトも可能である。

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ンションフライトを行うことで大型衛星並のミッションを行うことも可能となる。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、連携して一つのミッションを実行する方法である。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。

しかしながら、小型人工衛星はそのサイズの制限により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小型の燃費の良いスラスタが必要不可欠である。そこで小型の燃費の良いスラスタとして注目されているのが電気推進である。

電気推進は太陽光エネルギーや原子力エネルギーを一旦電気エネルギーに変換した後、アーク放電などにより推進剤を加熱・電離させ、さまざまな形で推進剤を加速し、その反作用によって推力を発生させる。電気推進は従来の化学推進より比推力が高い。現在使用されている代表的な電気推進機は、イオンスラスタ、アークジェットスラスタ、MPD（Magneto-Plasma-Dynamic）スラスタ及びホールスラスタがある(2)。Fig.1-1 に各種推進器の推力密度（噴射口単位面積当たりの推力）と比推力の関係を示す。これらの電気推進機はミッションによって使い分けがなされており、なかでもイオンスラスタは推力密度は低いものの他の電気推進と比べ比推力が高く、長期間の人工衛星の姿勢制御や惑星探査に適している。

小型のイオンスラスタを人工衛星に搭載できれば、小型衛星の機能を大幅に向上でき、

従来の小型衛星では不可能であった長期間の地球観測や火星探査、また衛星自身が宇宙のデブリとならないための自己廃棄なども可能になる。

イオンスラスタの中でも長寿命が期待できるマイクロ波放電式イオンスラスタに注目した。マイクロ波放電式イオンスラスタにおいてプラズマからのイオン放出能力はプラズマ密度に比例する。なので、プラズマ密度は高いほうがよいがカットオフ密度を超える密度のプラズマはマイクロ波を反射してしまう。低周波より高周波のほうがカットオフ密度が高いため、プラズマ密度が高い条件に対応できる。そのため、一般にマイクロ波放電型イオンスラスタは、4 GHz, 6 GHz の高周波を使用する。2005 年 9 月に小惑星イトカワに到着した小型探査機はやぶさの推進器 μ 10 も 4.2 GHz の高周波を使用している(3)。

しかしながら、本研究対象のイオンスラスタでは過去の研究によりカットオフ密度以上の密度のプラズマが確認された(4)。カットオフ密度の影響が少ないならば、マイクロ波周波数依存性は小さいと考えられる。

1.2　目的

本研究対象のイオンスラスタでは、推進剤流量0.2 sccm，投入マイクロ波電力8 Wにおいて，イオン生成コスト611W/A，推進剤利用効率0.91，推力0.79 mN，推進効率0.58という高い推進性能が得られた(5) 。さらなる性能向上としてシステム全体の効率を考える上で、マイクロ波周波数は大きく影響してくる。投入するマイクロ波の周波数が高くなるとケーブルや部品などでの損失が大きくなる。Fig.1-2 に本研究でも使用したケーブルHuber＋Suhner社のMULTIFLEX MF 86の周波数とケーブル損失の関係を示す。マイクロ波周波数が高くなるにつれてケーブル損出は増えている。本研究で使用したマイクロ波周波数0.9 GHzでは0.7 dB/m、4.2 GHzでは1.6 dB/mと大きく違った。このように低周波数でも高周波数と同様の推進効率が達成できるとシステム全体の効率は向上する。そこで本研究では、マイクロ波放電型イオンスラスタのマイクロ波周波数依存を調査することを目的とする。

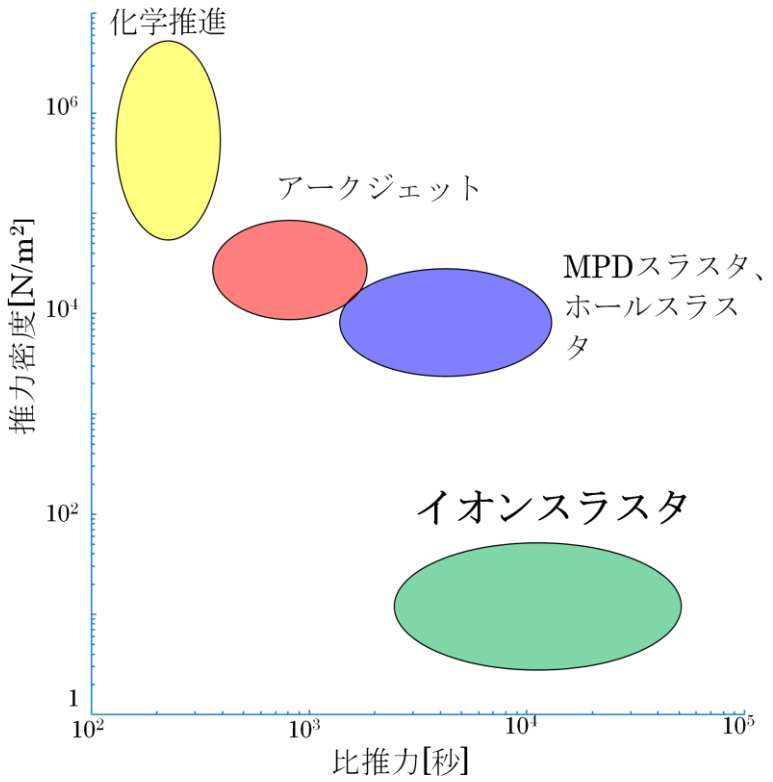


Fig.1-1　各種推進機の推力密度と比推力の関係

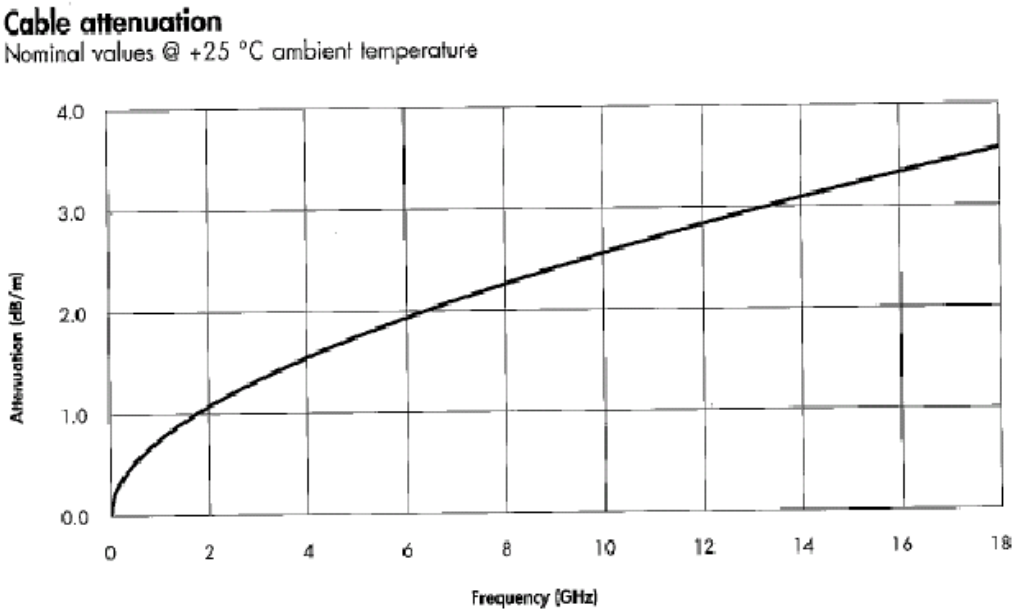


Fig.1-2 周波数とケーブル損出の関係の例

出典：SUNER® MICROWAVACABLE AND ASSEMBLIES GENERAL CATALOGUE

第二章　原理

2.1　イオンスラスタの作動原理[2]

イオンスラスタの概念図をFig.2-1 に示す。イオンスラスタはアーク放電やマイクロ波などで推進剤を加熱・電離させてプラズマを生成し、2枚ないし3枚からなる多孔状の電極に1000 V程度の高電圧を印加させてイオンを加速するという静電加速型の推進装置である。イオンスラスタは主に3つの領域から構成されている。

① 推進剤を電離するイオン生成部　(Ionization)
② 生成されたイオンを静電的に加速して推力を得る加速部　(Acceleration)
③ 放出されたイオンビームを電気的に中和する中和部　(Neutralization)

これらの各過程はそれぞれイオン源，加速電極，中和器によって行われる。

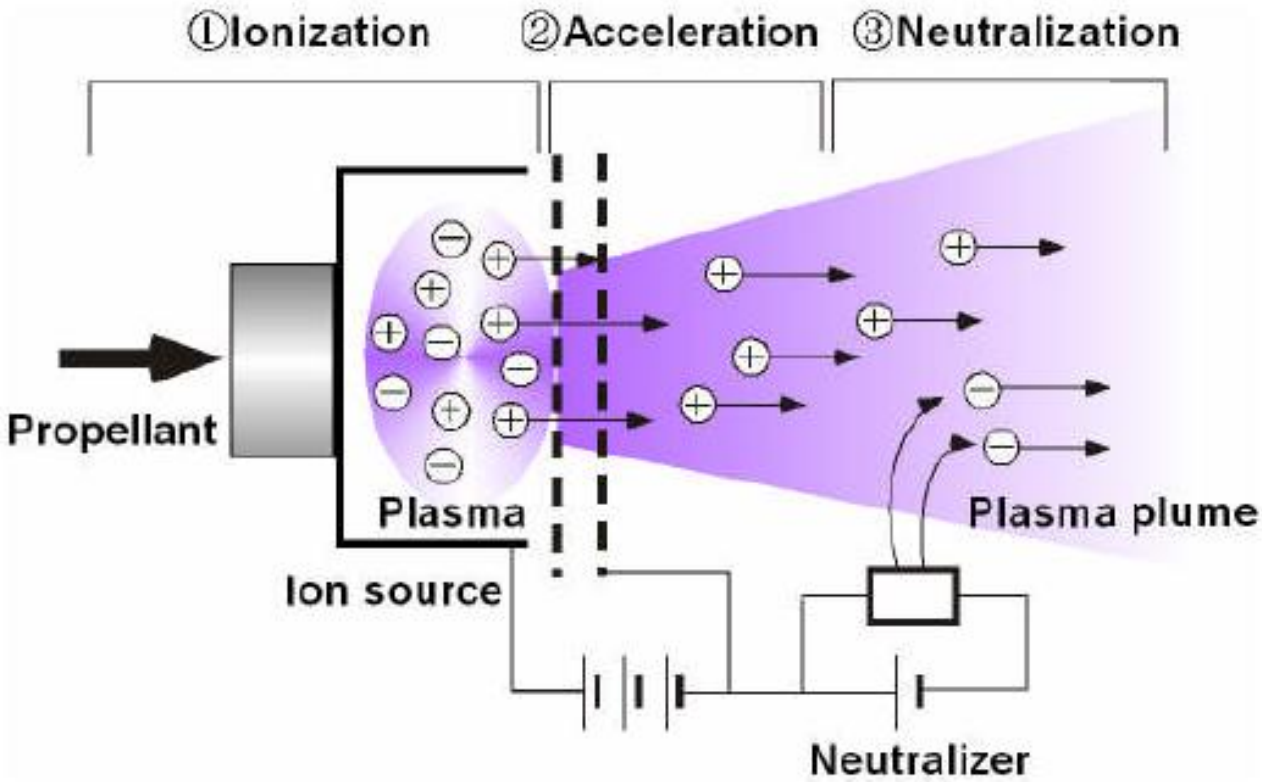


Fig.2-1 イオンスラスタの概念図

ここで，生成されたプラズマ及びそのビーム引き出しについて考えてみる。プラズマは正イオンと電子の密度が等しく，正と負の空間電荷量が釣り合った電位的に安定な状態にある。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，空間電荷のバランスが崩れ電子は反発されて正イオンの空間電荷だけ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，イオンがプラズマから取り出されるときにはイオンはFig.2-2 に示すような遷移領域を経てからイオンシース領域において加速される。このとき，プラズマから取り出されるイオン電流量のこと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（Bohm の条件）から求めることができ，以下の式で表される。

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

ここで，e は素電荷, n_p はプラズマ密度，はBoltzman 定数1.3807×10^{-23} J・K^{-1}，T_e は電子温度，m_i はイオンの質量である。

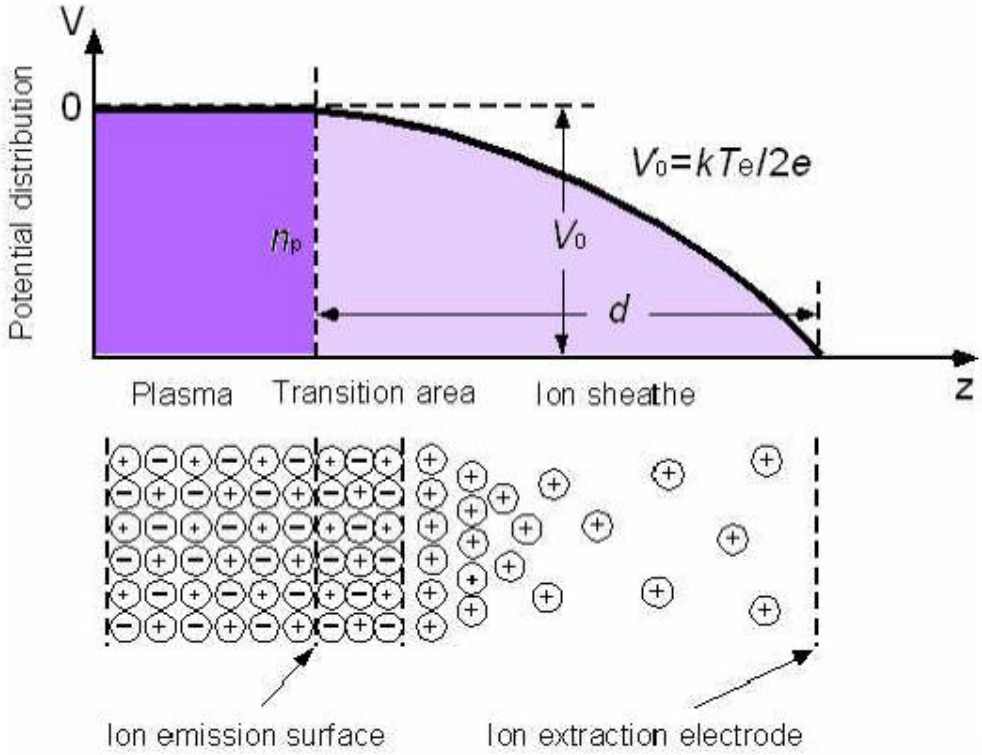


Fig.2-2 イオンシース領域への遷移

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の1乗と電子温度の平方根に比例する。ただしプラズマからイオンを引き出す場合，イオン自らがもつ正の空間電荷により電界が変化し，その電界がイオンビーム電流量を制限する。Fig.2-3 に引き出されるイオンビーム量における，イオン引き出し系の空間電荷とプラズマ源でのイオン放出能力の関係を示す。この空間電荷に制限された電流値のことを空間電荷制限電流値といい，イオンシース領域において，電流密度J_0 と電極間の印加電圧V_0 を用いて以下のような関係式がある。

$$J_0 = \frac{4\varepsilon_0}{9}\left(\frac{2q}{m_i}\right)^{\frac{1}{2}}\frac{V_0^{\frac{3}{2}}}{d^2}\gamma \tag{2-2}$$

ここで，ε_0 は真空の誘電率，q は荷電粒子の電荷量，d は引き出し電極間隙，g は空間電荷制限緩和係数（イオン引き出し領域に電子による空間電荷中和がある場合に空間電荷制限電流が緩和されるときの係数で，1 以上の値をもつ）である。この式は Chaild-Langmuir の式と呼ばれ，荷電粒子ビームの加速進行方向に対して輸送する場合の最大電流密度を表す。

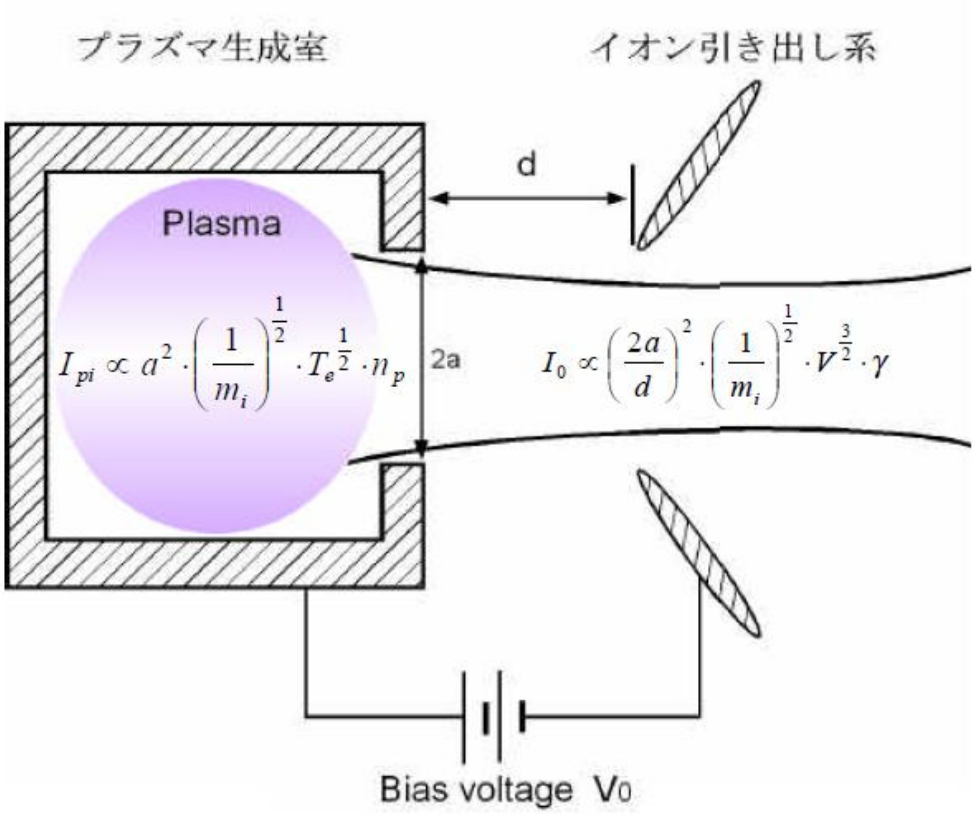


Fig.2-3 イオン源とイオンビーム引き出し

単孔から引き出し得る最大イオンビーム電流は，理想的には引き出し電圧の3/2 乗に比例して増加する。しかし，イオンは質量が大きいために速度が遅く，空間電荷効果の制限を受けやすい。また，与えられた電極間隙に対して絶縁破壊電圧が存在することなどから，その上限値が存在する。そのため多量にイオンビームを得たい場合は，引き出す孔の数を増やせばよい。2 次元的に孔数を増やす方法が多孔電極引き出しであり，孔の数倍だけ電流を増すことができる。

イオンスラスタにおいて，イオンビームの引き出しはプラズマ生成部で発生した正イオンを静電界によって加速することによって行われる。引き出し部はプラズマに接するスクリーン電極と1 mm程度の短い間隙で平行に置かれる加速電極および減速電極で構成される。場合によっては，減速電極を用いない2 枚電極システムで構成されることもある。各電極には内径1～3 mm程度の孔が多数あけられ，その開口率（孔の総面積が占める割合）は，スクリーン電極で約70 %，加速電極で約25 %，減速電極で50～70 %程度である。Fig.2-4 に2 枚電極の場合での，1 組の孔から引き出されるイオンビームを示す。また，軸方向の電位分布の概略をFig.2-5 に示す。イオンビームの下流領域には中和器から放出された電子やイオンとスラスタから漏出した中性粒子との電離反応で生じた電子が存在し，ビームプラズマと呼ばれるイオンビームと，それを取り囲むようにプラズマが存在した状態が形成されている。これらの電子が引き出し部を通ってプラズマの生成部へ逆流しないように，Fig.2-5 に示されるように負の電位領域を形成している。この役割をするのが加速電極である。

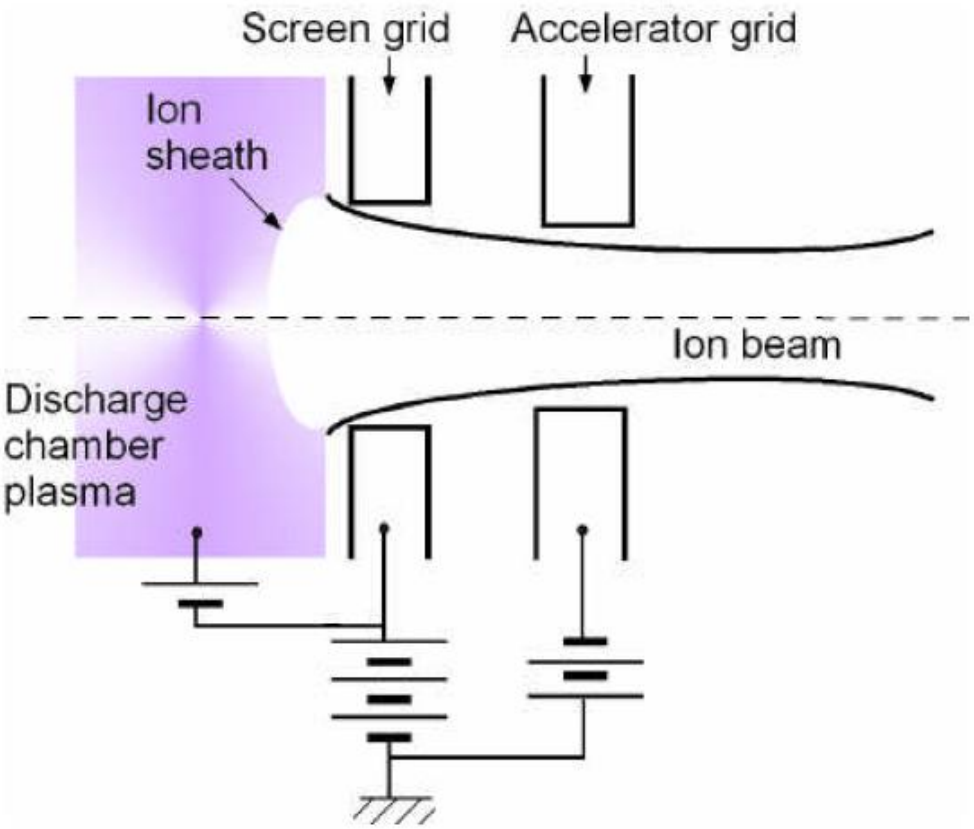


Fig.2-4 単孔から抽出されるイオンビーム

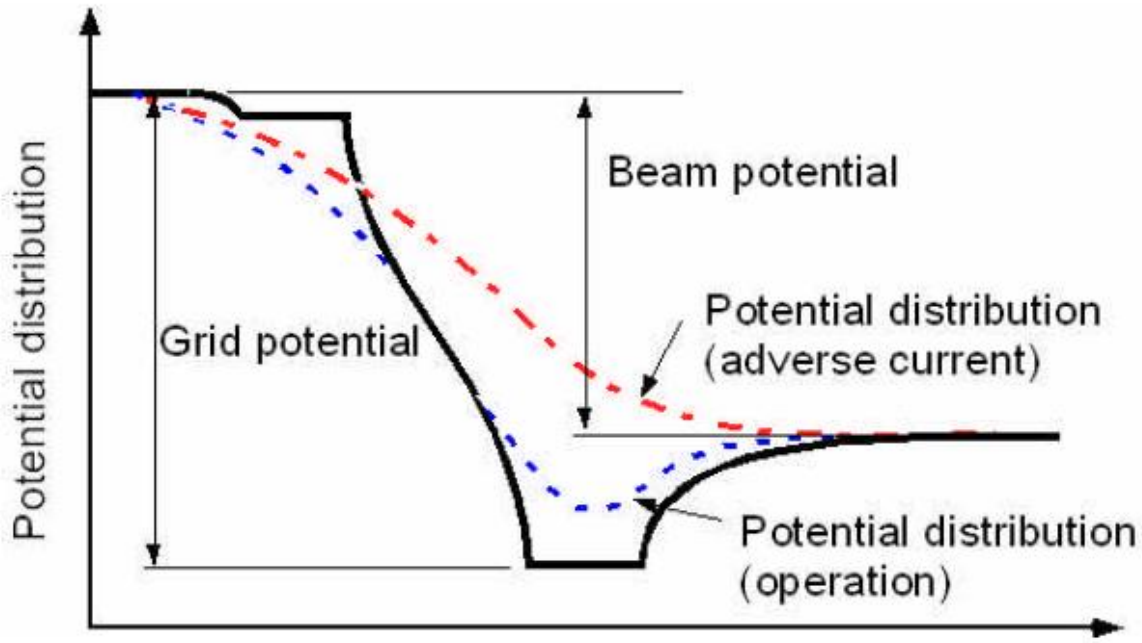


Fig.2-5 イオンビーム引き出し軸方向電位分布

2.2　マイクロ波放電式イオンスラスタ

イオンスラスタはプラズマの生成方法によって直流放電式，RF (Radio Frequency) 誘導放電式，マイクロ波放電式等に大別される。直流放電式イオンスラスタの概念図をFig.2-6に，マイクロ波放電式イオンスラスタの概念図をFig. 2-7に示す。実用化されているもので代表的な直流放電式はNASA（アメリカ航空宇宙局）のDeep Space 1（1998年打上げ），マイクロ波放電式は宇宙科学研究所（現宇宙航空研究開発機構）のHAYABUSA（2003年打上げ）がある．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は，酸化バリウム等を含浸させた多孔質タングステンを内部物質とした陰極（Fig.2-6のMain Cathode）から電離電圧以上のエネルギを持った1 次電子を放電室内へ供給し，中性粒子（推進剤）と衝突させてプラズマを生成する。

マイクロ波放電式とはマイクロ波帯域の交流電界で電子を加速し，この電子が中性粒子と電離衝突してプラズマを生成，放電を維持するというものである。このマイクロ波放電式をイオンスラスタに採用することで以下のようなメリットが得られる。

① 放電用電極を必要としないのでスラスタの長寿命化と構造の簡略化が可能
② 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 絶縁が容易に行えることから単一マイクロ波源による，互いに電位の異なるイオン源・中和器プラズマの同時生成が可能
③ 予備加熱が不要なので，スラスタの迅速なスタートが可能

本研究ではこのような特長を持つマイクロ波放電式イオンスラスタを使用する。マイクロ波電源の性能が直流放電に比べて劣っていることもあり，推進性能の向上にはマイクロ波から電子へのエネルギ伝達効率を上げることが不可欠である。そのため放電においてはECR (Electron Cyclotron Resonance : 電子サイクロトロン共鳴）を利用し，電子の加熱効率を上げている。

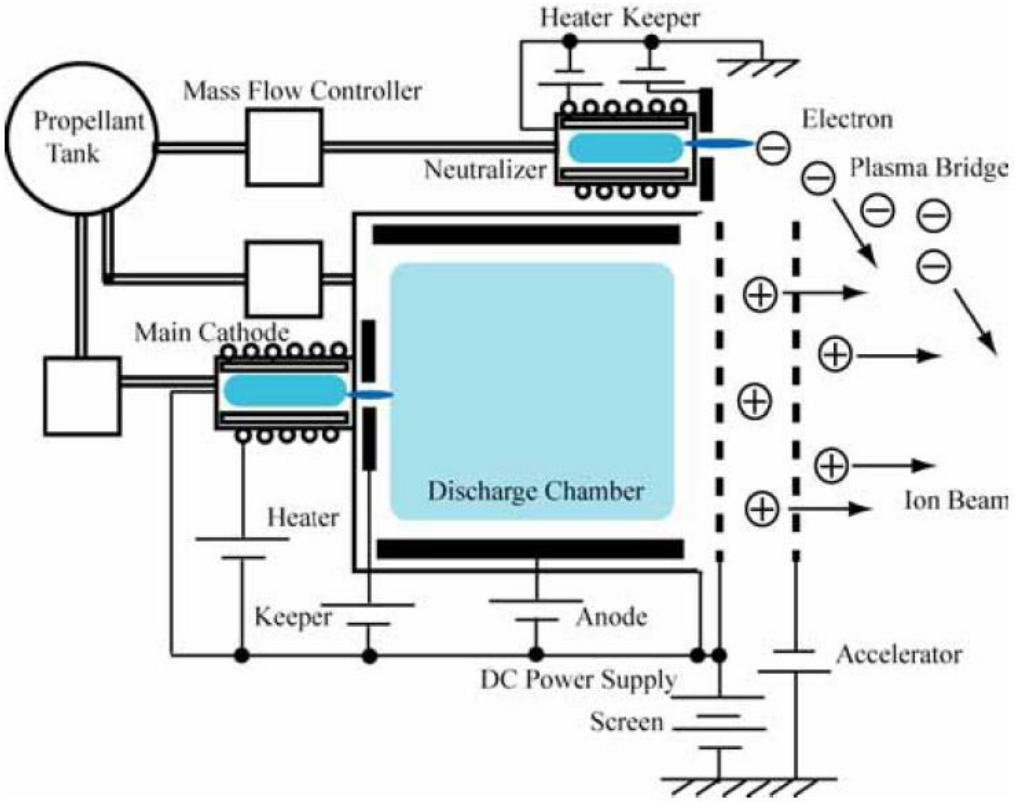


Fig.2-6 直流放電式イオンスラスタの概念図

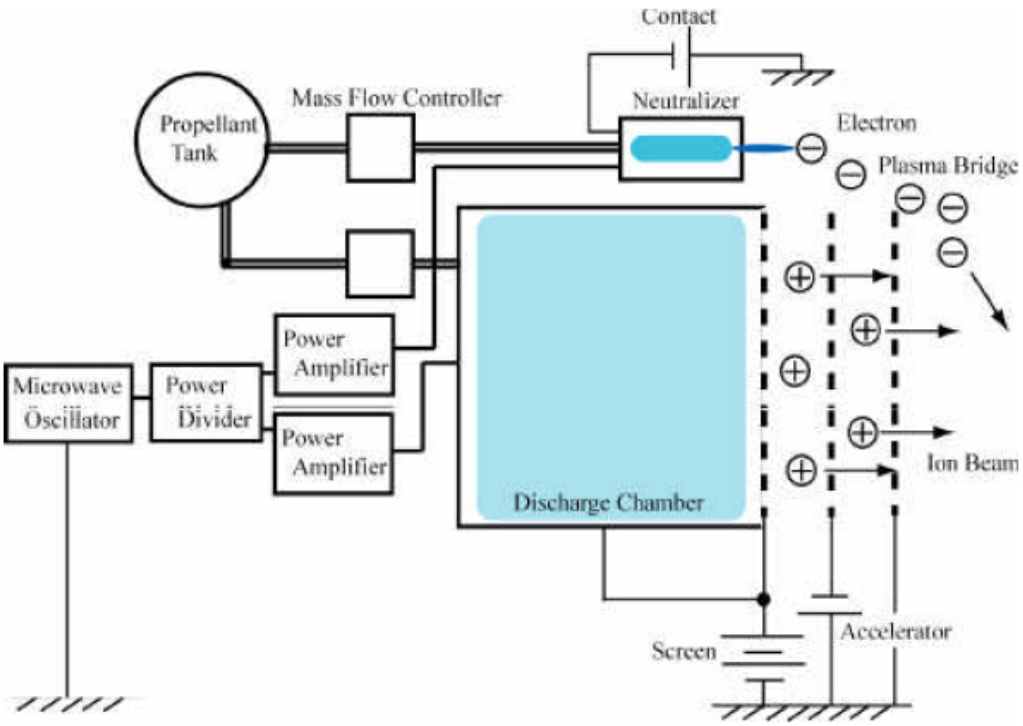


Fig.2-7 マイクロ波放電式イオンスラスタの概念図

2.3　ECR プラズマ

ECRの原理と概念図をFig.2-8 とFig.2-9 にそれぞれ示す。真空中に存在する荷電粒子は磁場中でローレンツ力を受ける。この向心力のため磁力線に巻きつくようなサイクロトロン運動と呼ばれる回転運動が現れる。磁界における電子の運動方程式は次式で表される。

$$m\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = e\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B} \tag{2-3}$$

ここでm は電子の質量，$\boldsymbol{v}$ は速度ベクトル，e は電荷量，$\boldsymbol{B}$ は磁束密度である．このときの円軌道の半径r_L はラーマ半径と呼ばれ

$$r_L = \frac{m\boldsymbol{v}_\perp}{|e|B} \tag{2-4}$$

で与えられる。ここで$\boldsymbol{v}_\perp$は電子の$\boldsymbol{B}$ に対する垂直な速度成分の大きさである。

プラズマを構成している荷電粒子は全て反磁性体である。そのためサイクロトロン運動の回転の方向は，外部磁場の向きに対して荷電粒子の回転によってできる磁場が常に逆を向く方向である。つまり，電子は磁場に対して右回りの回転運動を行う。この回転運動の角周波数はサイクロトロン角周波数と呼ばれ

$$\omega_c = \frac{|e|\boldsymbol{B}}{m} \tag{2-5}$$

で与えられる。電子は電場と逆向きに加速されるため，磁場中の電子の回転方向と逆向きに，回転する速さが等しい電場をか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。これが電子サイクロトロン共鳴現象である。

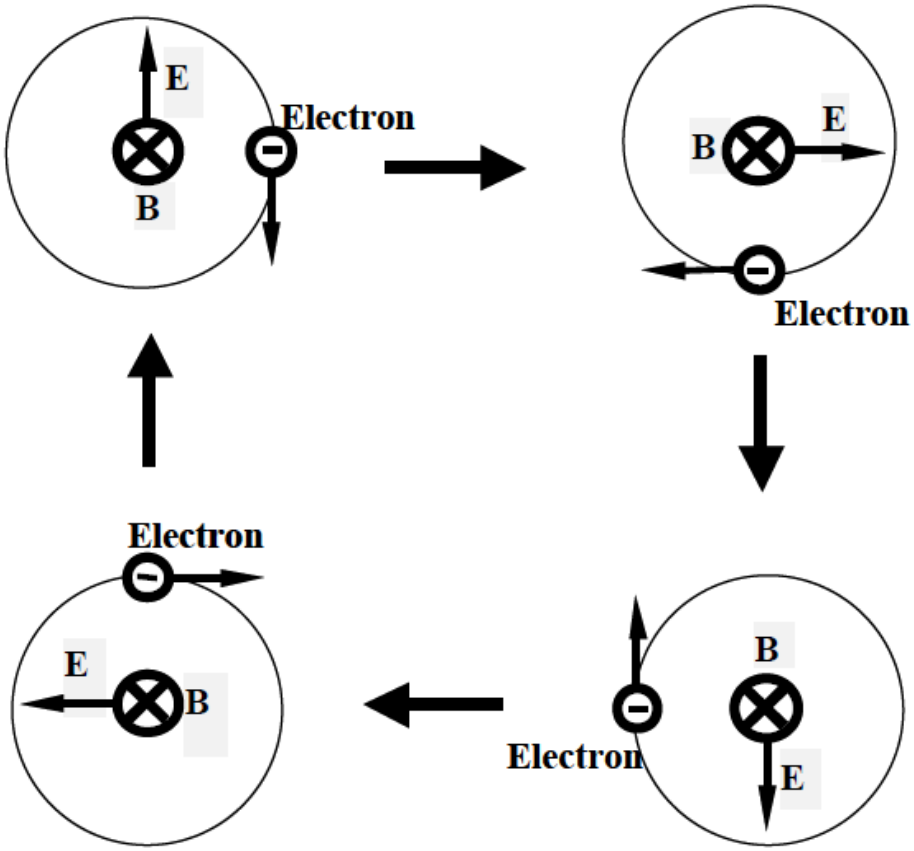


Fig.2-8 ECRの原理

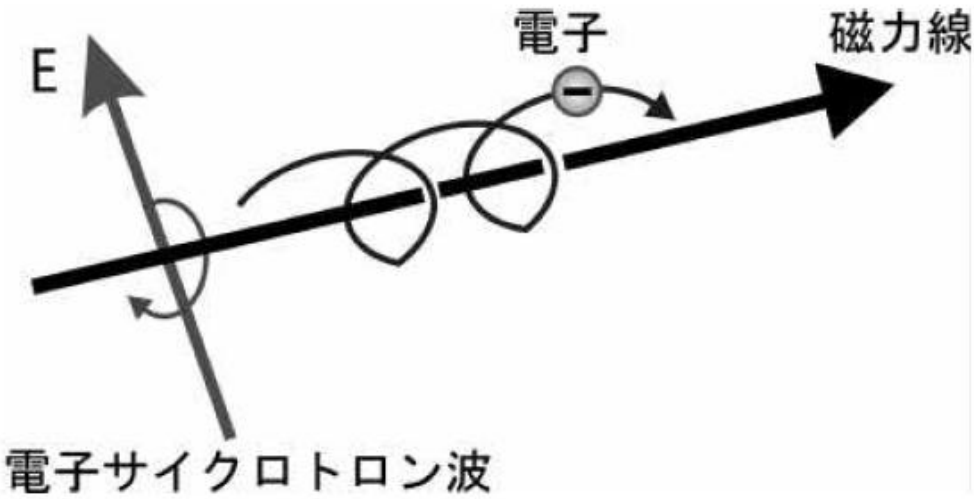


Fig.2-9　ECRの概念図

ECRプラズマ発生装置では，導波管を通して角周波数ω_{rf} のマイクロ波を入射し，プラズマを生成する。生成されたプラズマ中の電子は，サイクロトロン角周波数ω_{ce} に従って磁力線方向に向かって右回りの旋回運動を行う。一方，強磁場側から入射したマイクロ波はプラズマ中を浸透し，電子サイクロトロン波と呼ばれる右回りの円偏波を励起する。この波は弱磁場側へ伝播し，角周波数が電子サイクロトロン角周波数と一致する層で急速に減少してマイクロ波から電子にエネルギが吸収される。つまり， $\omega_{ce} = \omega_{rf}$ の関係が成り立つときにECRが生じる。

また逆に，ECR を起こすときに必要な磁束密度の大きさをB_{res} とすれば (2-4)，(2-5) 式より

$$B_{res} = \frac{m\omega_{rf}}{|q|} \tag{2-6}$$

となる。ECRによってエネルギを増大させた電子は，磁力線に拘束されながら次々と効率よく周辺の中性粒子と衝突電離を繰り返す。このようにして生成されたプラズマがECRプラズマである。

本研究で使用するマイクロ波周波数は0.9 GHz,2.45 GHz,4.2 GHzである。それぞれの条件でECR層となる磁場強度は（2-6）式より32 mT,87.5 mT,150 mTとなる。

第三章　実験装置及び実験方法

本研究の実験装置の概略図をFig.3-1 に示す。実験装置は主に真空排気系，マイクロ波伝送系，イオンスラスタ本体から構成されている。以下，それぞれの系統について説明する。

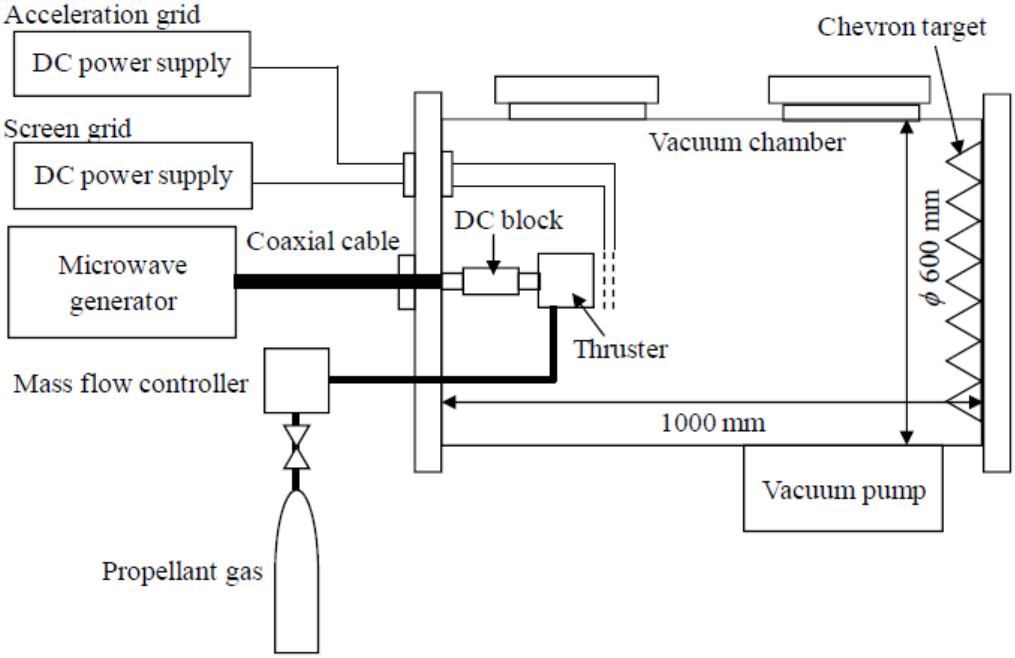


Fig.3-1 実験装置の概略図

3.1　真空排気系

実験に用いた真空容器をFig.3-2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。この真空容器は全実験を通して電気的にアースされ，基準電位となっている．以下に使用した真空排気装置を示す。

・ロータリーポンプ 1 台（排気速度900 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。ロータリーポンプの写真をFig.3-3に、高真空用ポンプの写真をFig.3-4に示す。到達圧力は1.6×10^{-6} Torrで，推進剤Xeガス0.2 sccm流入時の背圧は1.0×10^{-5} Torr であった。

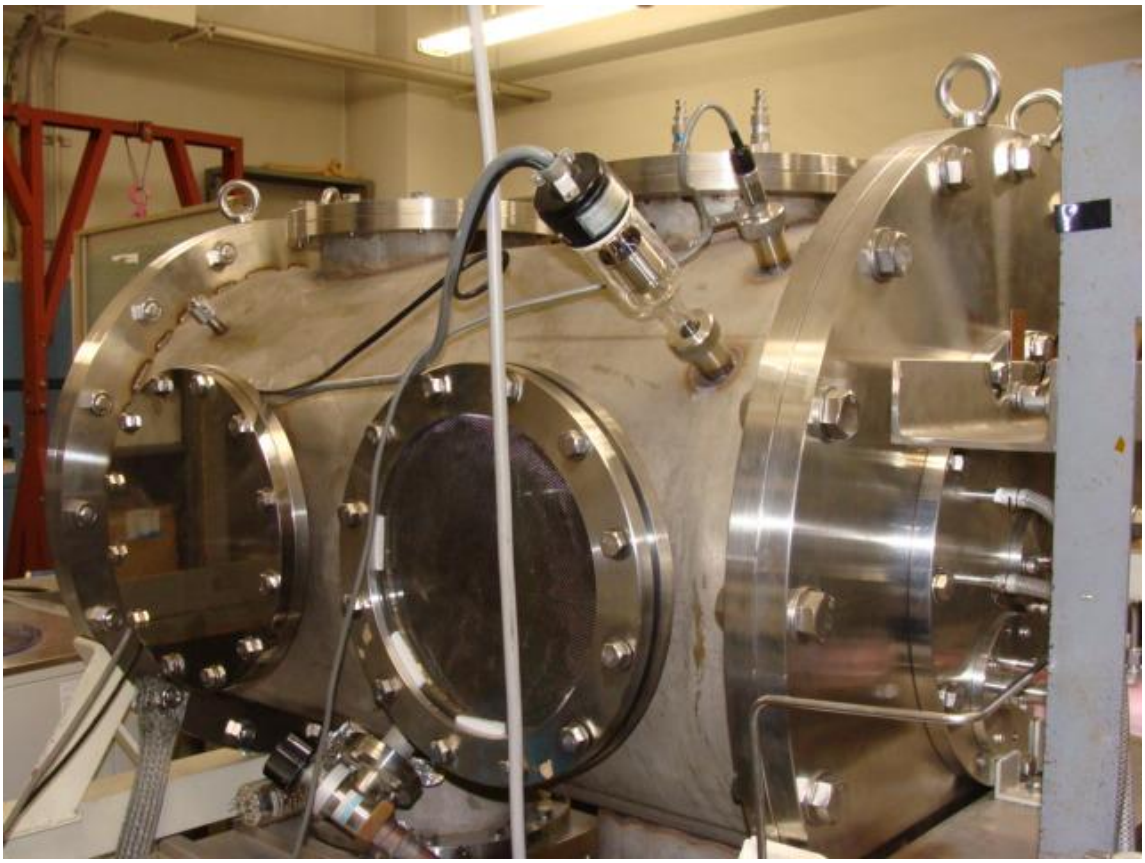


Fig.3-2 真空容器の写真

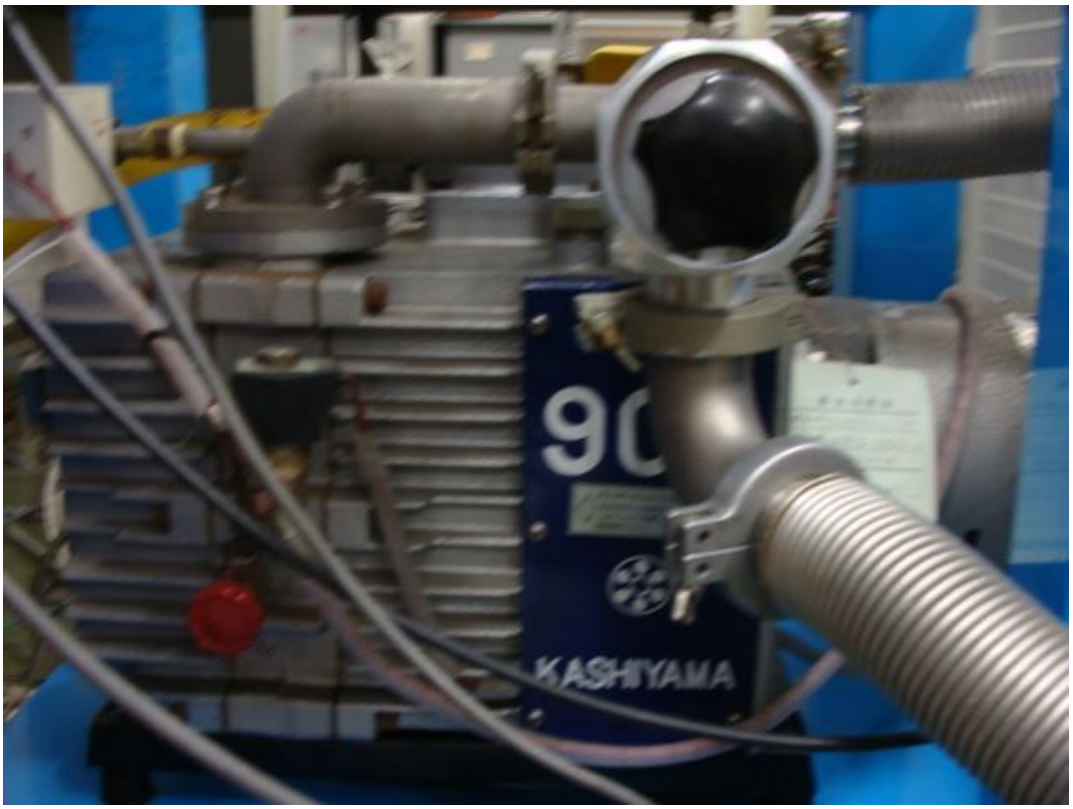


Fig3-3 ロータリーポンプ

Fig3-4 高真空用ポンプ
(左：ターボ分子ポンプ　右：クライオポンプ)

3.2　マイクロ波伝送系

本研究で使用したマイクロ波の周波数は、0.9 GHz,2.45 GHz,4.2 GHzである。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方法をとった。0.9 GHzの信号源はAnritsu 社製 MG 3660A、マイクロ波増幅器はR&K社製A1000-1050S-Rである。2.45 GHzの信号源はサムウェイ社製のT161-48DDA、マイクロ波増幅器はサムウェイ社製T161-48DDAである。4.2GHzのマイクロ波増幅器はスペーテック社製SP5040-40である。

3.3　2cm 級イオンスラスタ

本研究では、2 cm級イオンスラスタを使用した。Fig.3-5 にスラスタの写真をFig.3-6にその構成図を示す。外観は50×50 mmの箱型となっている． Al製円筒放電室の周囲に4×4×12 mmの長手方向磁化磁石を複数設置し，それらを軟鉄製ヨークで挟み込んで放電室内に磁気回路を形成させている。放電室のサイズは、直径φ21mm高さ12 mmである。磁石数を変更することで内部磁場を変更することができる。磁石は永久磁石のサマリウムコバルト(Sm-Co)を使用しており，この磁石は脆くて欠けやすいが、高い磁気特性を持ち, また温度特性に優れ高温での使用にも比較的向いている。アンテナはSMA コネクタ（female）によって固定されており、マイクロ波電力を放電室内部に伝えている。このアンテナには、モリブデン（Mo）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わかっている[5]。このアンテナの写真をFig.3-7に示す。

イオンビームの引き出しを行うグリッドはカーボン製で，スクリーングリッドとアクセルグリッドの2 枚を用いた．その写真をFig.3-8 にそのパラメーターをTable.3-1示す。

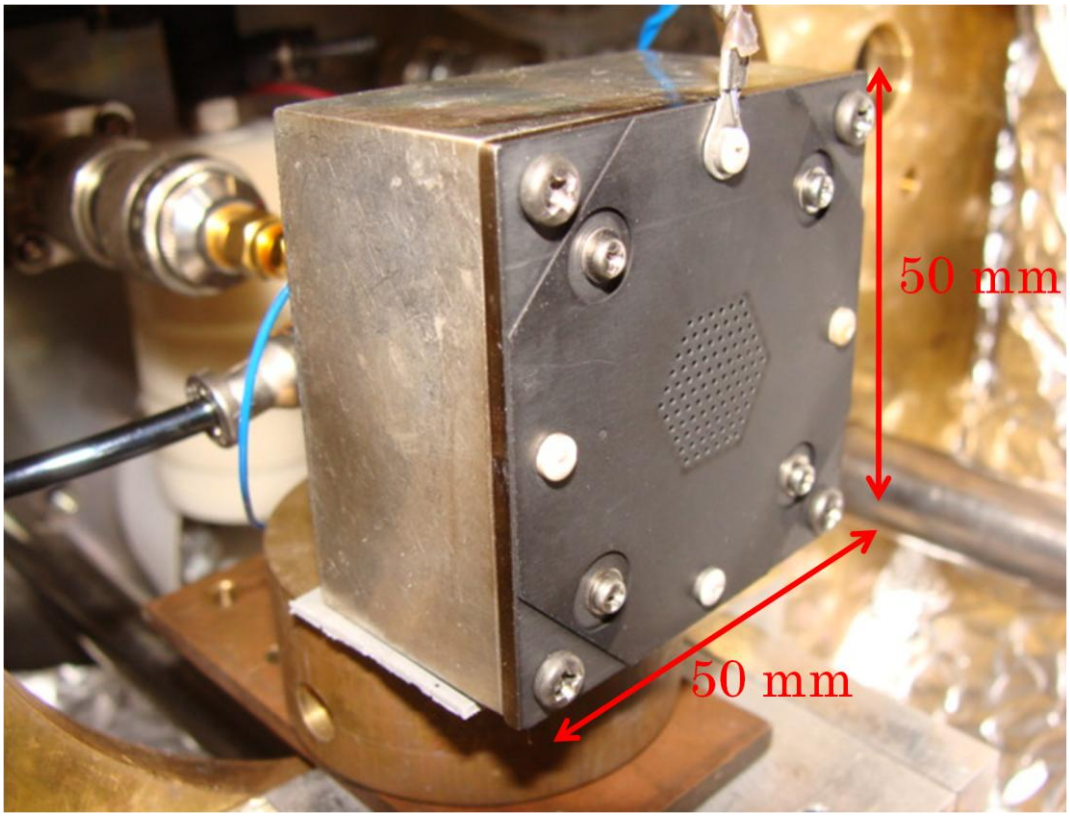


Fig.3-5　2 cm級イオンスラスタの写真

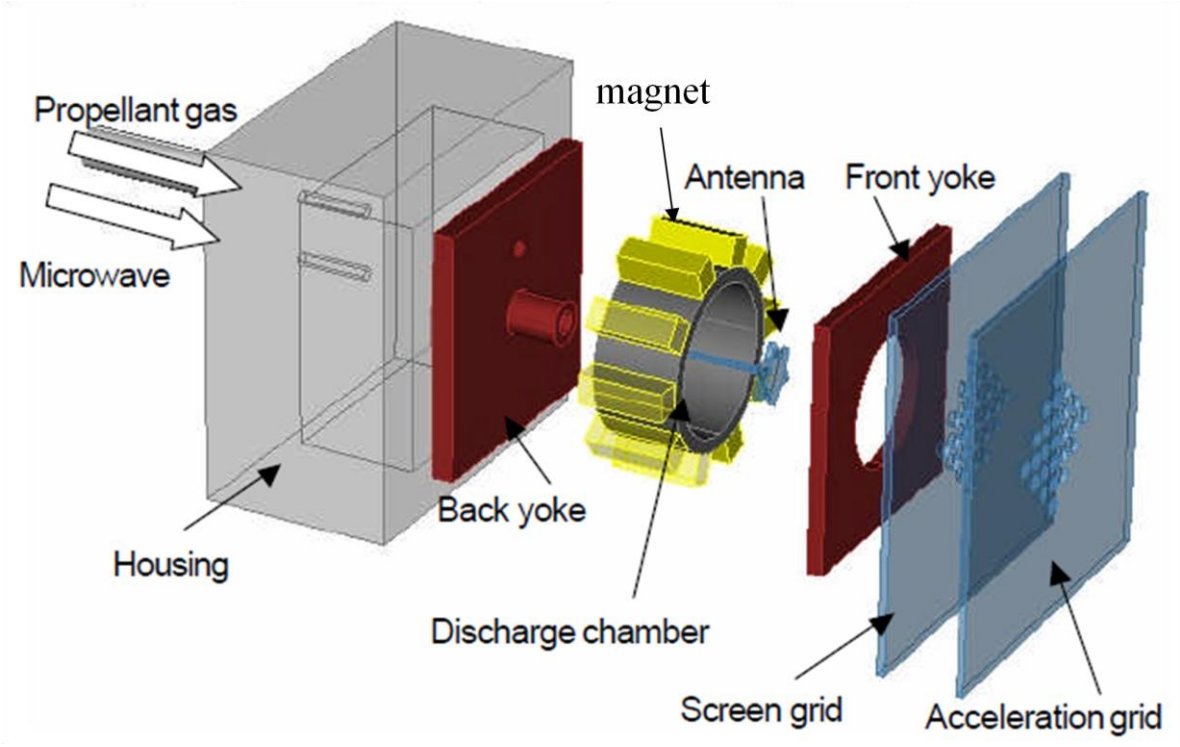


Fig.3-6　2 cm級イオンスラスタの構成図

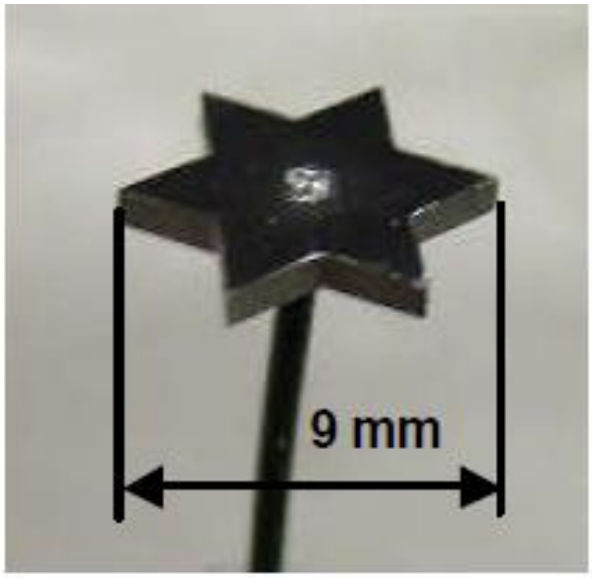


Fig.3-7 アンテナ写真

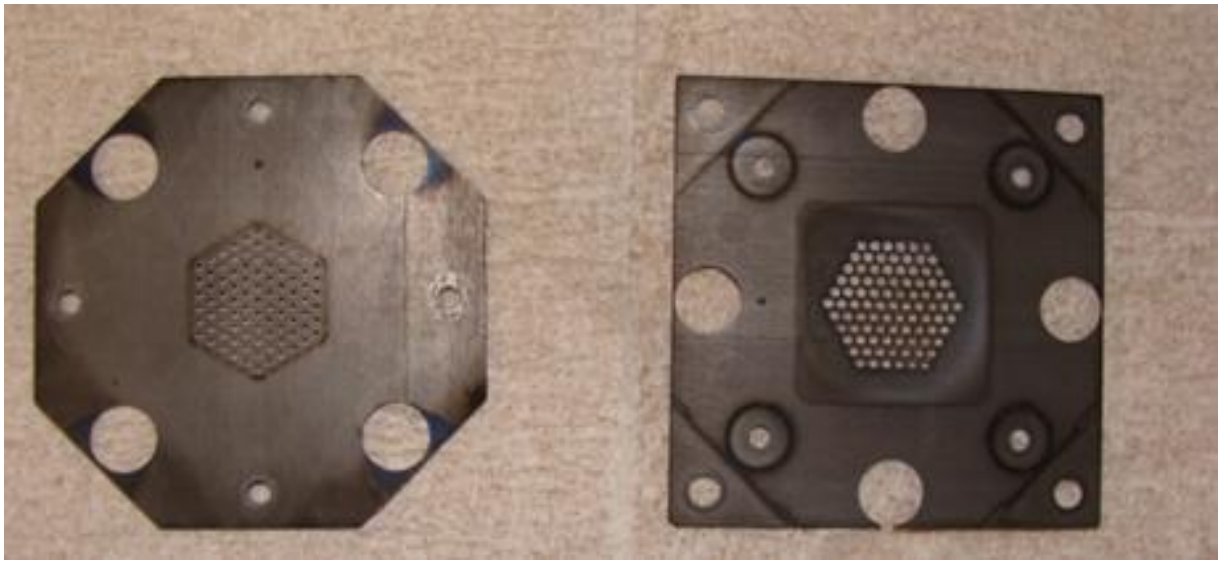


Fig.3-8 グリット写真
(左：アクセルグリット、右：スクリーングリット)

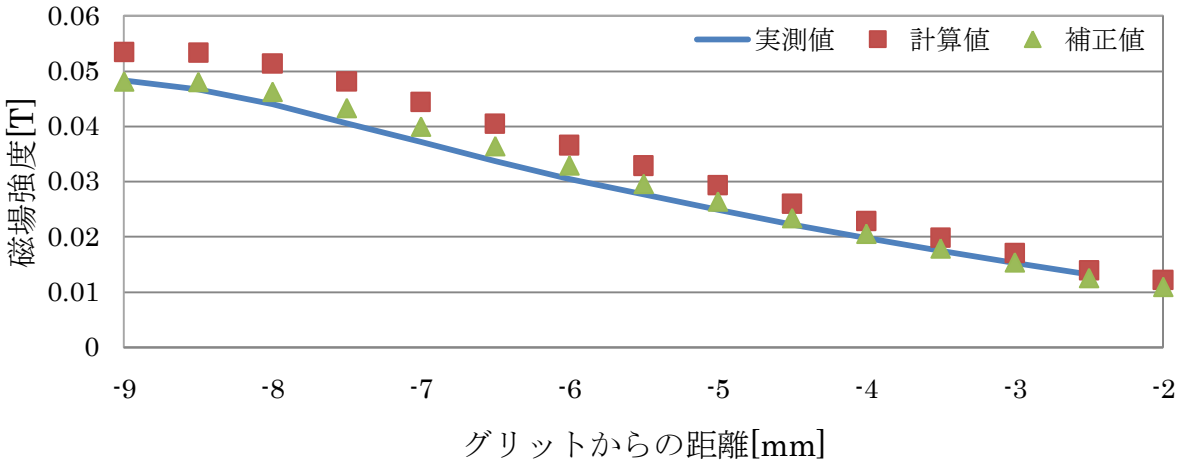
Table.3-1 グリットシステムのパラメータ

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	

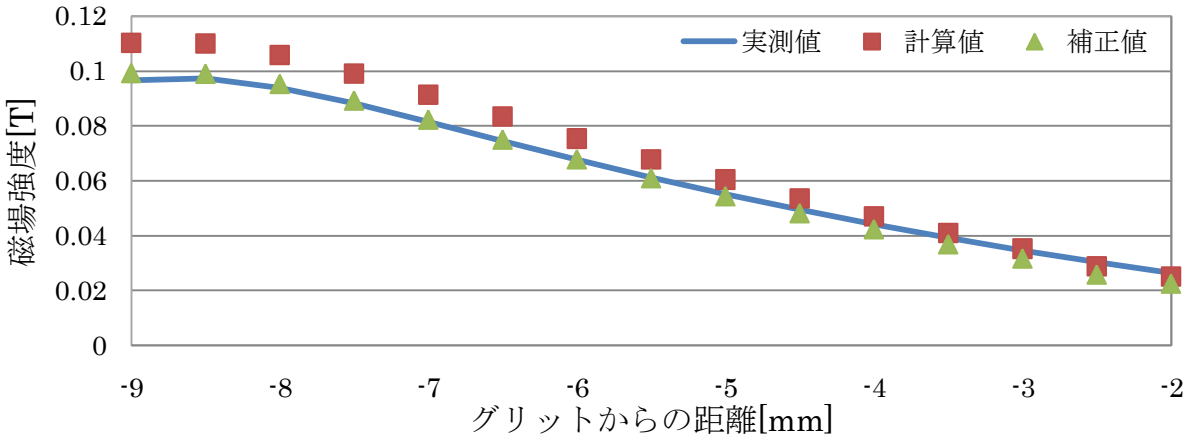
また、2 cm級イオンスラスタの磁場形状を測定するため、磁場計算を3次元有限要素法磁場解析ソフト（AMaze, Advanced Science Laboratory Inc.）を使用して行った。しかし、ガウスメーターで実際に測定した磁場強度とずれがあった。Fig3-9 磁石数6個,磁石12個,磁石22個の磁場強度の実測値と計算値と補正値の比較を示す。実測値にはガウスメーターで計測した値、計算値は磁場解析ソフトにより計算された値、補正値は計算値に0.9をかけたものである。計算値と実測値は、グリットの中心からグリットに垂直方向に2 mmから9mm離れた位置までの結果を使用した。Fig3-10 にその測定位置を示す。

Fig.3-9 より磁場強度の計算値は実測値よりも大きい値となった。これは、長期間の使用によって磁石の劣化し磁場強度が弱くなってしまったためだと考えられる。また、磁石の個数が多い条件でも少ない条件でも計算値と補正値はほぼ等しい値となったので今後磁場解析ソフトによる磁場計算は補正した値を使うことにする。

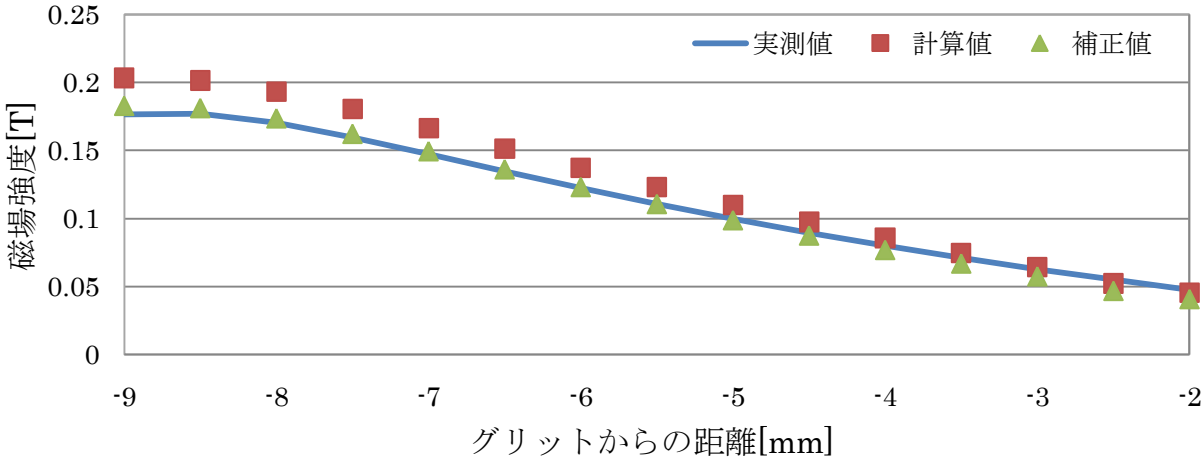
Fig.3-11に2 cm級イオンスラスタの磁石数4個のときの磁場計算結果を示す。白い線は磁力線を示している。Fig.3-11より磁気ミラーが形成されていることがわかる。前述したように電子は磁力線に巻きつくようにサイクロトロン運動を行い、磁力線に沿って移動する。放電室内を磁力線に沿ってヨークへ移動する電子は、ヨーク近くで磁気ミラー効果、もしくはヨーク表面付近のシースにより反射される。結果、放電室内部で電子は磁気ミラーの間に閉じ込められる。この磁気ミラー間を往復する間に、電子はECR 領域を通過する毎に、ECR 加熱によりアンテナから放電室内に投入されたマイクロ波のエネルギーを受け加速する。この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。



(a) 磁石数6個



(b) 磁石数12個



(c) 磁石数22個

Fig.3-9　磁場強度比較

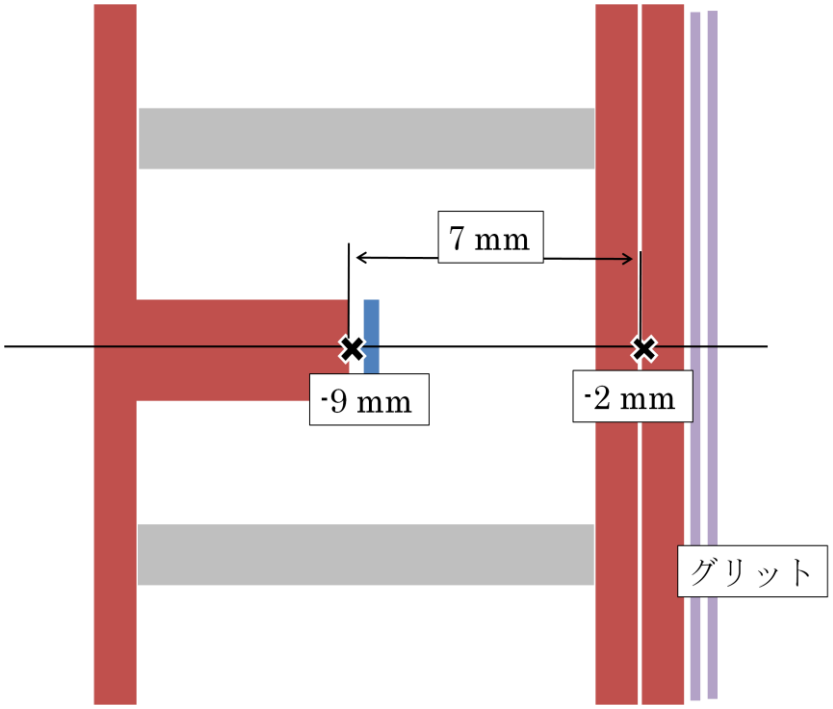


Fig3-10 磁場強度比較の測定位置

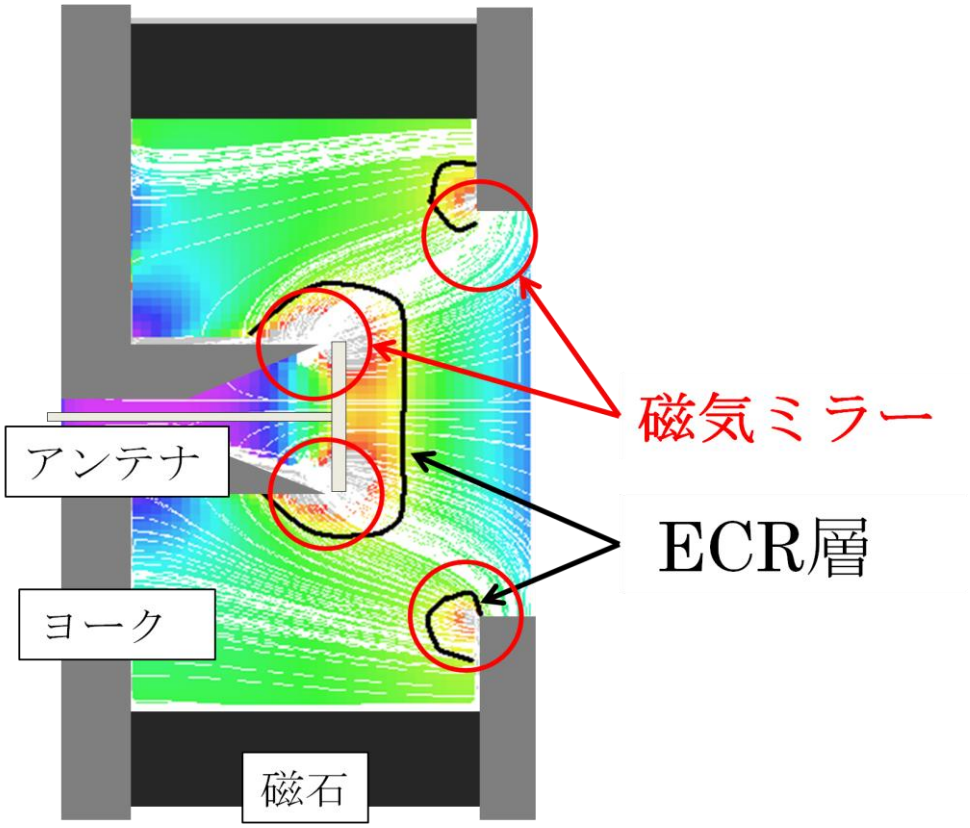


Fig.3-11 2 cm級イオンスラスタの磁場計算結果(磁石数4個)

3.4　実験体系

3.4.1　イオンビーム電流計測

本研究におけるスラスタの性能は，イオンビームを引き出しそのイオンビーム電流量から推進性能を見積もった。本研究でのイオンビーム測定実験の体系をFig.3-12に示す。Fig.3-13にイオンビーム引き出しの様子を示す。イオンビームの引き出しはスクリーングリット及びスラスタ本体に1000 Vの電圧を、アクセルグリットに -150Vの電圧を印加することにより行った。また、条件によってはアクセルグリット及びスラスタ本体に1500 Vの電圧を、アクセルグリットに-300 Vの電圧を印加した。ポテンシャル差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。

$$I_b = I_s - I_a \tag{3-1}$$

ここで I_s と I_a はそれぞれスクリーングリットに流れる電流値とアクセルグリットに流れる電流値である。この式により求められたイオンビームの電流値は、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[6]。

実験には 0.9 GHz, 2.45 GHz, 4.2 GHz の周波数のマイクロ波を使用した。推進剤はXe、推進剤流量は 0.1sccm～0.3sccm, マイクロ波投入電力は2 W～16 W で実験を行った。また、磁石数は、周波数が0.9 GHzのときは4個～6個、2.45 GHzのときは10個～12個、4.2 GHzのときは21個、22個の条件で行った。

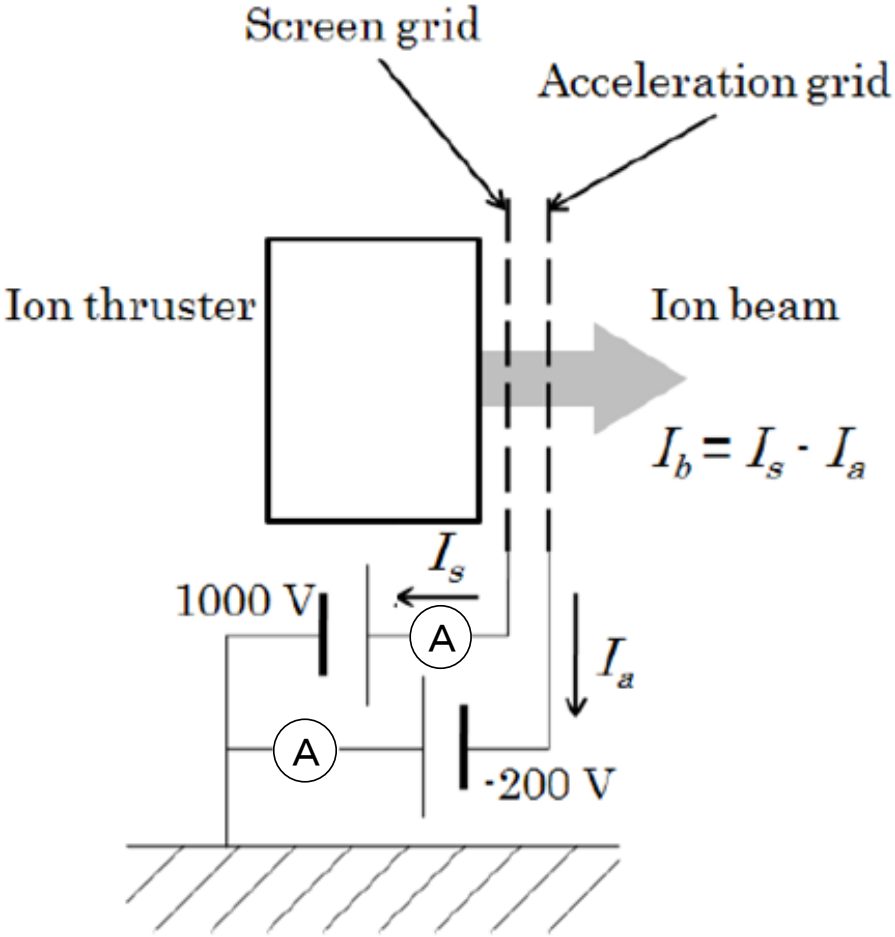


Fig.3-12 イオンビーム引き出しの概略図

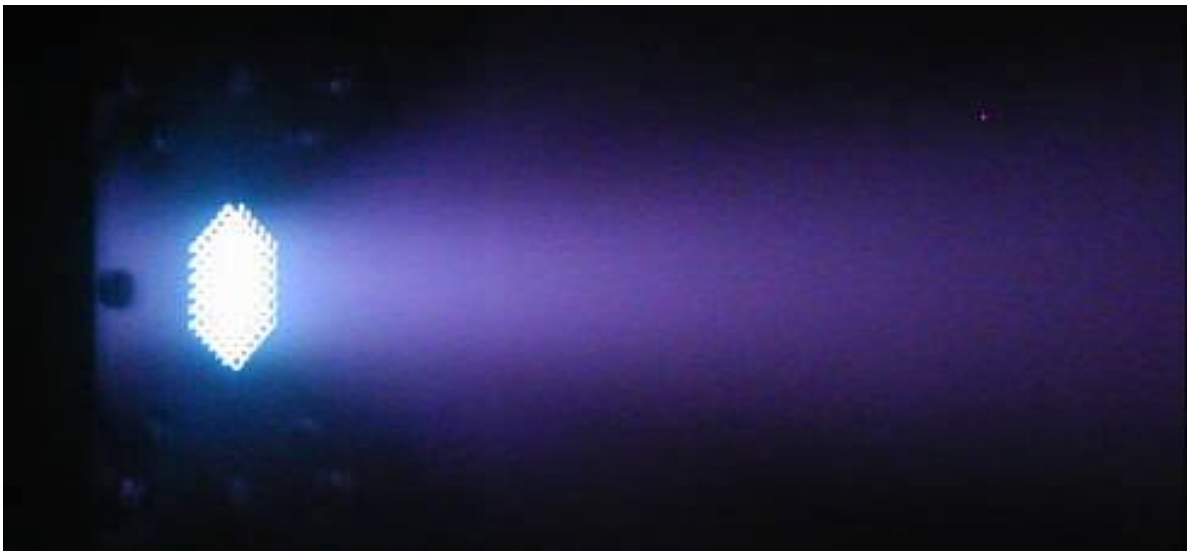


Fig.3-13 イオンビーム引き出し

3.4.2　二価イオン存在比測定[7][8]

放電室で生成されるイオンはすべて一価であることが理想である。しかし、多価のイオンも生成されてしまう。三価以上のイオンの割合は非常にわずかであるので、二価についてのみ考える。二価のイオンが望ましくない理由は２つある。

１つ目は、一価のイオンにくらべ二価のイオンは、スパッタの影響が１０倍程度である。スパッタとは、金属などに不活性ガスを吹きつけると，分子が弾き出されてしまうことである。その弾き出された分子は他の物質に付着してしまう。スパッタがたくさんおこるとイオンスラスタの寿命が短くなる。

２つ目は、推進効率が悪くなるということである。一価と二価のイオンが共存することによって、エネルギーの違う 2 つの粒子群が存在する。これにより推進効率は低下する。

今回、二価イオン存在比を測定するため E×B プローブを製作した。写真を Fig.3-14、概念図を Fig.3-15 に示す。外観は 260mm×85mm×60mm である。コリメーター部 35 mm,偏向部 120 mm, 自由飛行部 90mm,コリメーター部の 2 つの孔とファラデーカップの孔の大きさは直径 1 mm である。偏向部での磁場はＥ×Ｂプローブは、速度の大きく異なるイオンに電場と磁場をかけることにより分離して計測することができるものである。

E×B プローブの原理を説明する。まず、コリメーター部で小さい孔を二つ通過することによりイオンビームは発散角が非常に小さいビーム状に絞られる。次に、偏向部でイオンは電場と磁場がかけられた部分を通る。磁場は永久磁石で発生させるため一定であるが、電場は電極間にくわえる電圧を変えることにより変化させることができる。磁場により受ける力は

$$\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{v}\boldsymbol{B} \tag{3-2}$$

電場により受ける力は

$$\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{E} \tag{3-3}$$

電圧を変化させ、磁場により受ける力と電場により受ける力が釣り合ったときにイオンは力を受けずに直進する。つまり、次式を満たすときである。

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{v}\boldsymbol{B} \tag{3-4}$$

一価と二価のイオンは、速度が異なるため磁場により受ける力が異なる。Fig3-17 のように一価のイオンが直進しているときは、二価のイオンは力を受け進行方向を変えられる。直進したイオンのみがファラデーカップに入り、電流計で電流を測定すれば速度が異なる一価と二価のイオンを分離して計測することができる。

E×Bプローブを製作するにあたり偏向部での磁場計算を行った。Fig3-16 に磁場計算結果を示す。Fig.3-16 より磁場がほぼ一様にできていることがわかる。

一様な磁場0.09 mT、グリット印加電圧1000 V、引き出されたイオンビームがコリメーター部の入り口の孔の中心を通りコリメーター部の出口とファラデーカップの孔を通るイオンが測定されると仮定して計算した。その結果、偏向部の電極にかける電圧が一価のイオンは19.0～22.3V、二価のイオンは25.9～32.6Vのとき測定されるという結果になった。これで一価と二価のイオンは十分に分離して計測できるだろう。

Fig.3-17にE×Bプローブの理想的な測定例を示す。一価と二価のイオンが十分に分離され、各価のイオンがファラデーカップにすべて収まればFig.3-17のような測定結果が得られるだろう。

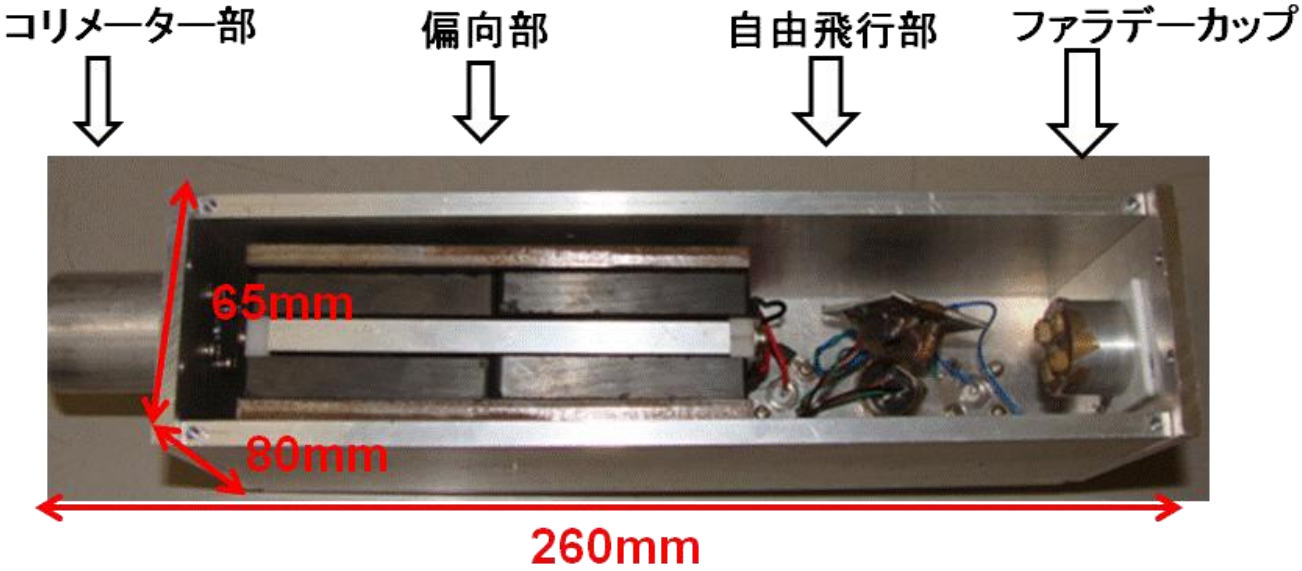


Fig.3-14 E×Bプローブの写真

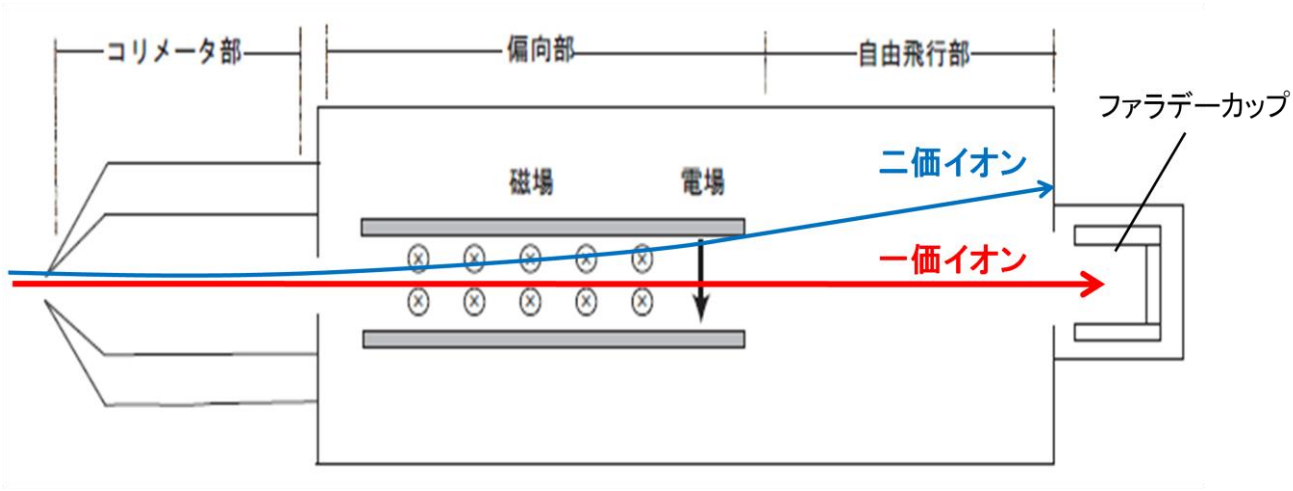


Fig.3-15 E×Bプローブの概念図

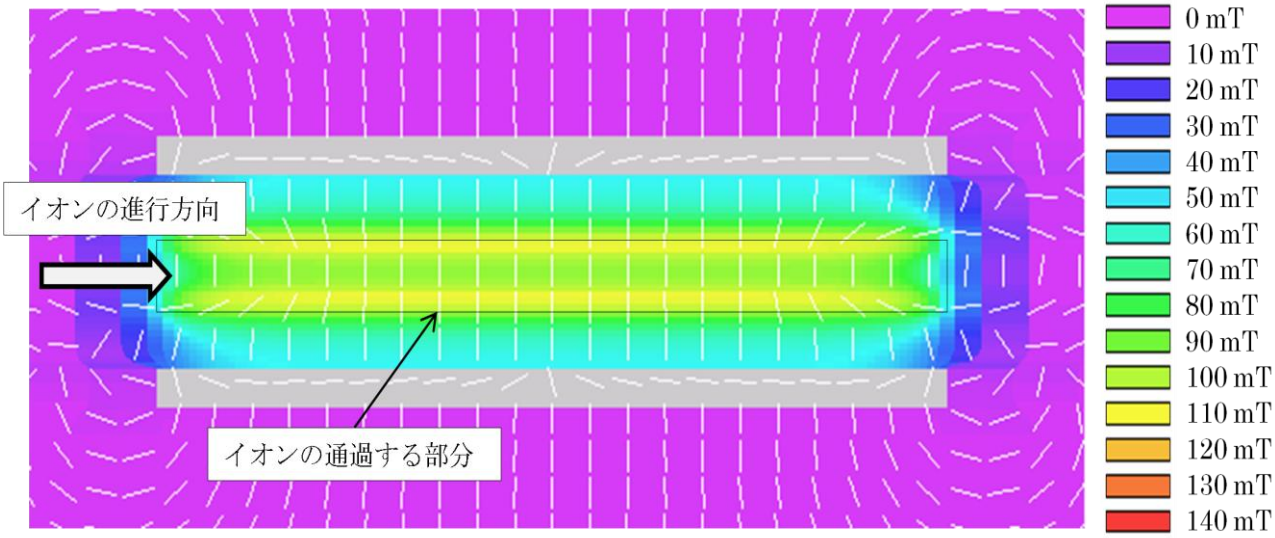


Fig.3-16 偏向部の磁場計算

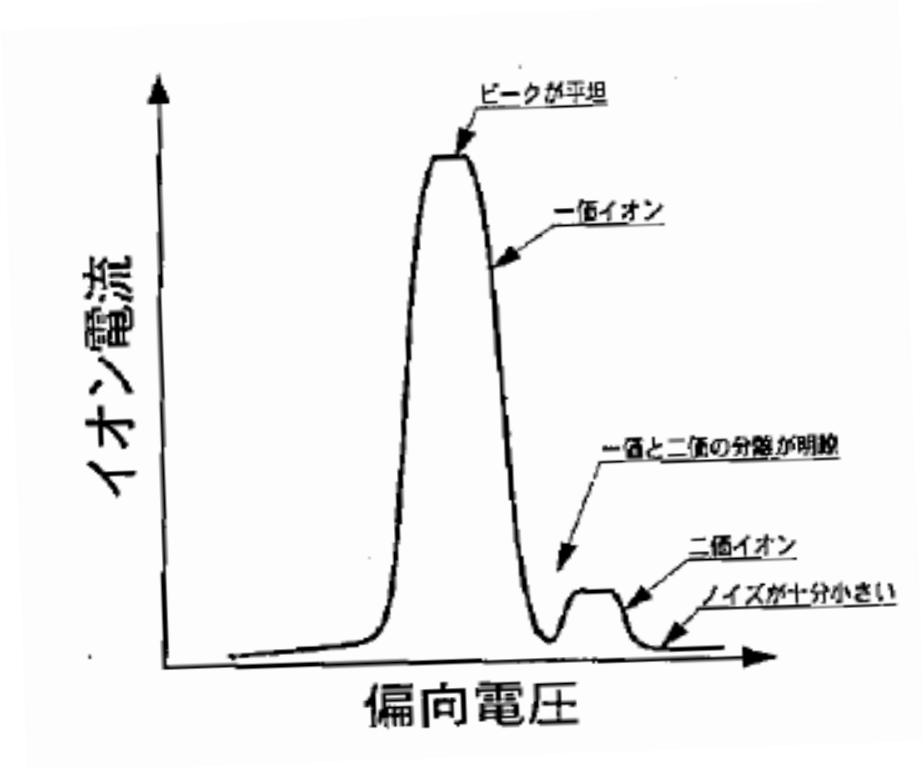


Fig.3-17 E×Bプローブの理想的な測定例

出典：早川幸男,北村正治: “キセノンイオンエンジンの地上設備における運転と評価法”航空宇宙技術研究所資料,2000

第四章　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} [s]、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。

$$F = \gamma_T I_b \sqrt{\frac{2 m_i V_b}{e}} \tag{4-1}$$

$$I_{sp} = \frac{\gamma_T \eta_u}{g} \sqrt{\frac{2 e V_b}{m_i}} \tag{4-2}$$

$$\eta_t = \frac{F^2}{2 \dot{m} P} \tag{4-3}$$

$$\gamma_T = \cos\theta_b \times \frac{1 + \alpha/\sqrt{2}}{1 + \alpha} \tag{4-4}$$

$$\eta_u = \frac{I_b}{\frac{e}{m_i}\dot{m}} \tag{4-5}$$

$$\varepsilon_c = \frac{P_b}{I_b} \tag{4-6}$$

ここで、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/s²]、P は消費電力[W]、$\dot{m}$ は推進剤の質量流量 [kg/s]、θ_b はビーム発散角、α は二価イオン存在比、はP_b プラズマ生成に要する電力 [W]である。

今回の実験では、E×Bプローブの精度不十分であった。そのため、ビーム発散角 θ_b と二価イオン存在比 α をそれぞれ10°と0.15 であるとした。(9)(10)このとき推力係数 γ_T は(4-4)式より0.95 となる。

4.2　イオンビーム電流計測

4.2.1　磁場強度依存性

マイクロ波周波数を変更すると、ECR加熱を利用しているため磁場強度も変更しなければならない。マイクロ波周波数の依存性を調査する前に磁場強度の依存性を明らかにした。ビーム電圧が一定の場合、推力はイオンビーム電流に比例するため、イオンビームで評価した。

周波数 0.9GHzで磁石数を4個から6個に変更してイオンビーム電流測定を行った結果を比較する。グリット印加電圧はすべて1000 Vで行った。推進剤流量0.1 sccm,0.2 sccm,0.3 sccmのイオンビーム電流の磁場強度依存性をFig.4-1, Fig.4-2, Fig.4-3にそれぞれ示す。磁石数4個から6個の磁場計算の結果をFig.4-4, Fig.4-5, Fig.4-6に示す。

推進剤流量0.2 sccm,0.3 sccmのときは磁石数が多いほうがイオンビーム電流が大きいという結果になった。これは、磁場が強い条件のほうが電子の磁場閉じ込めの効果が強く、アンテナや壁面での損出が低下し、その結果プラズマ密度が増えたためだと考えられる。推進剤流量が0.1 sccmのときは磁石数6個がイオンビーム電流は一番大きくなった。これは、先ほどと同様に磁場閉じ込めの影響だろう。しかし、磁石数が5個のときよりも4個のときのほうがイオンビーム電流が大きくなった。これは磁石数5個の条件では実験時間が長く、投入電力も大きくしたためスラスタが熱を持ち、ケーブル等のロスが増加したことに起因すると考えられる。

プラズマ生成効率が良いため、ECR層はアンテナに接するような位置に存在するのが好ましいと考えられてきたが、Fig.4-4 ,Fig.4-5,Fig.4-6の磁場計算結果よりECR層とアンテナの距離が最も離れた磁石数6個が推進剤流量や投入電力がどの条件でもイオンビーム電流が大きかった。プラズマの着火は5個がしやすかった。このことにより、プラズマを生成するためにはECR層とアンテナの距離は重要であるが、イオンビーム電流はECR層とアンテナの距離の影響は少なく、磁場強度を強くするほうが増えるとわかった。そこで、以後の実験ではマイクロ波周波数0.9 GHzのときは磁石数6個とした。

また、マイクロ波周波数2.45 GHz、4.2 GHzのときもイオンビーム電流の磁場強度依存性を調査した。マイクロ波周波数2.45 GHzでは磁石数10個～12個、4.2 GHzでは磁石数21個、22個で実験を行った。その結果、マイクロ波周波数2.45 GHz、4.2 GHzのときも磁場強度の強い条件のほうがイオンビーム電流は大きくなるということがわかった。そこで、以後の実験ではマイクロ波2.45 GH、4.2 GHzの磁石数はそれぞれ12個、22個とした。

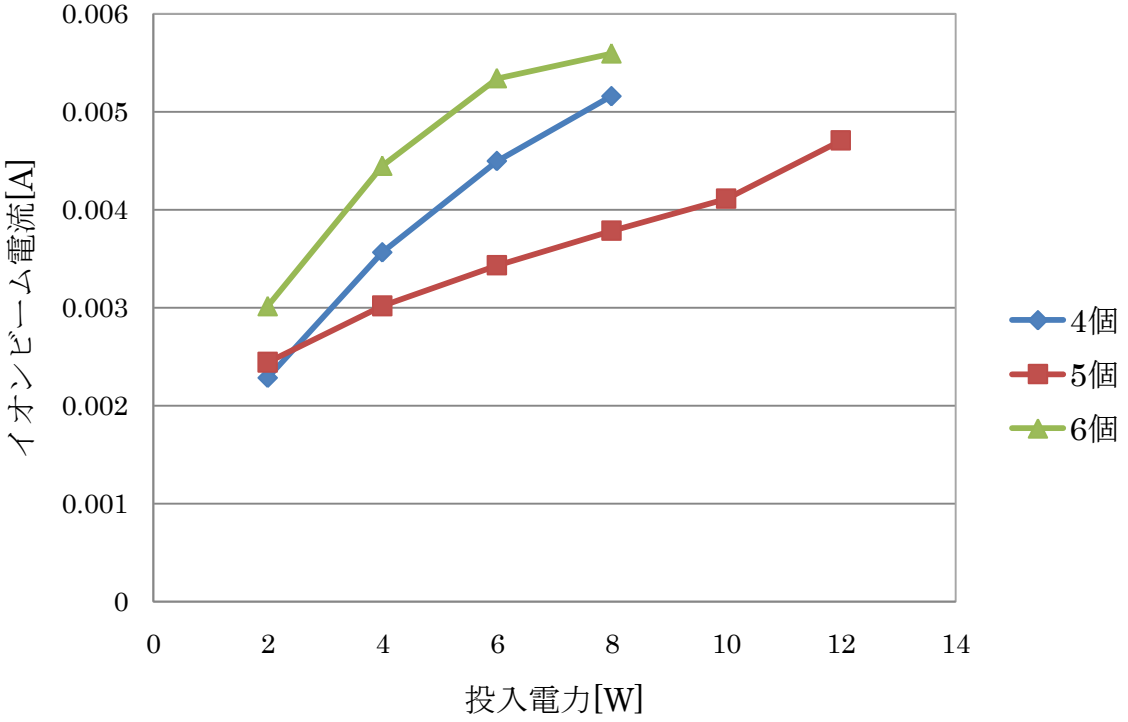


Fig.4-1 イオンビーム電流の磁場強度依存性
（推進剤流量0.1 sccm、マイクロ波周波数0.9 GHz）

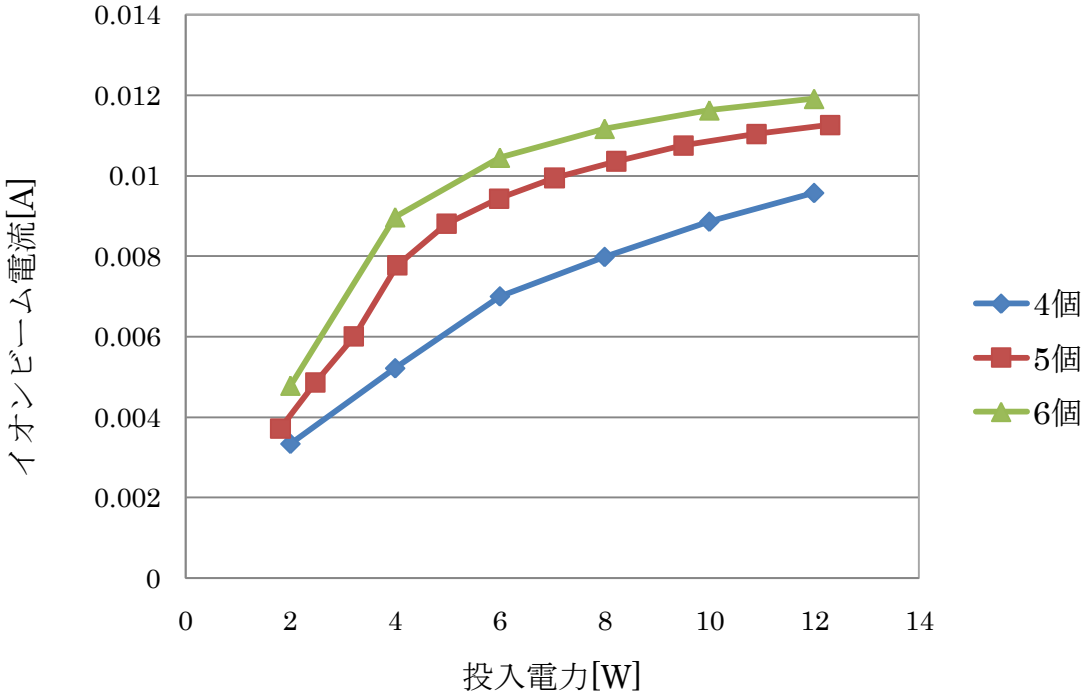


Fig.4-2 イオンビーム電流の磁場強度依存性
（推進剤流量0.2 sccm、マイクロ波周波数0.9GHz）

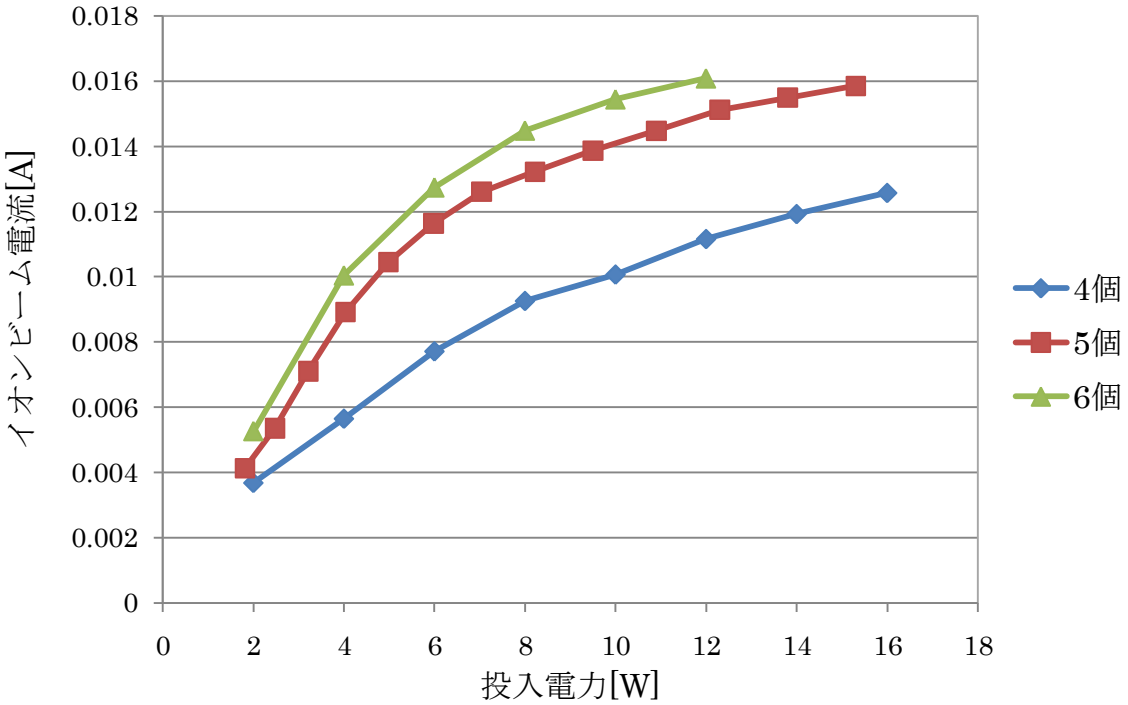


Fig.4-3 イオンビーム電流の磁場強度依存性

（推進剤流量0.3 sccm、マイクロ波周波数0.9 GHz）

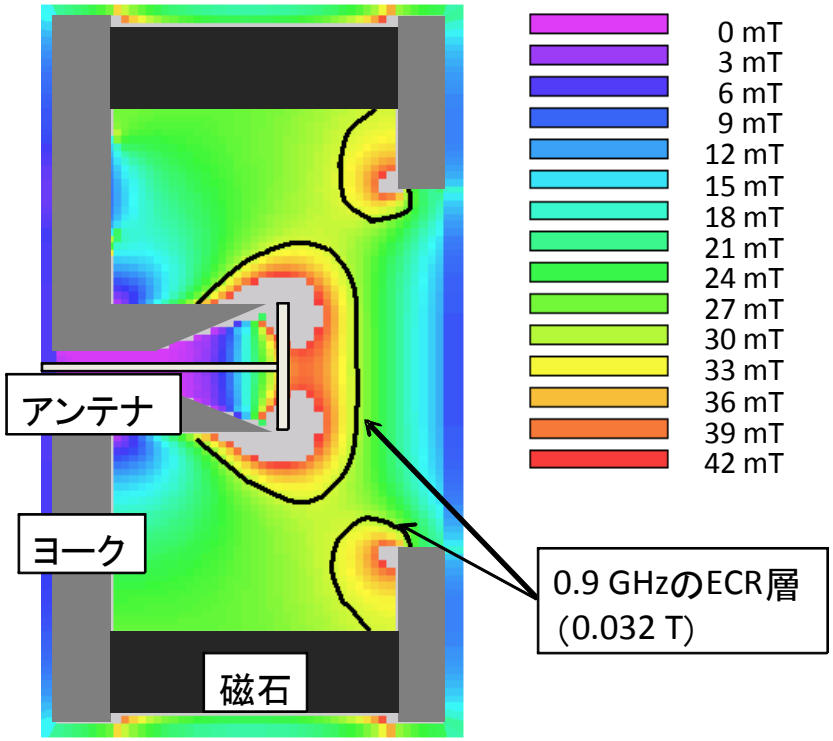


Fig.4-4 磁石4個のときの磁場計算

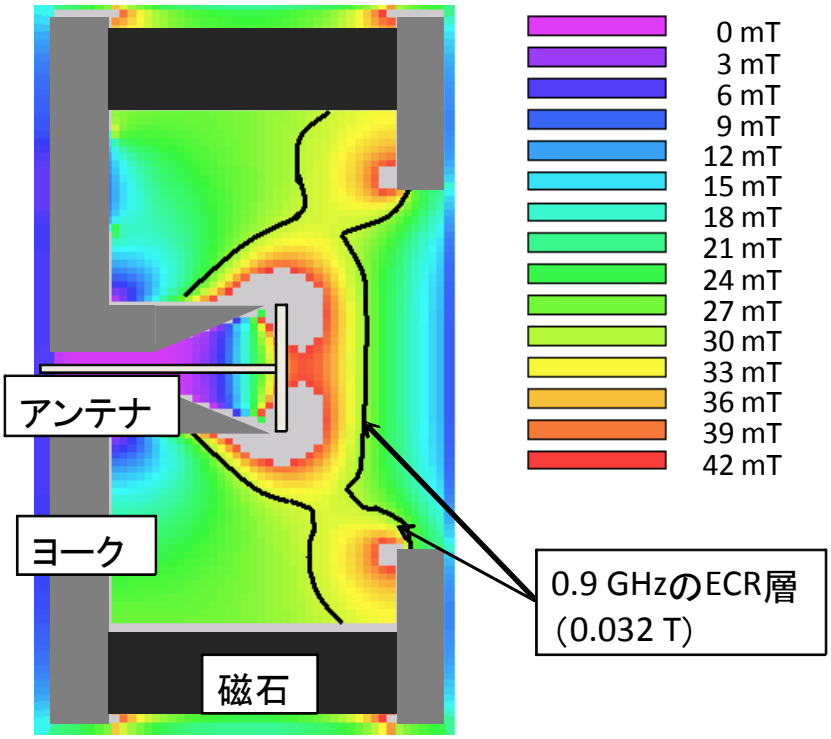


Fig.4-5 磁石5個のときの磁場計算

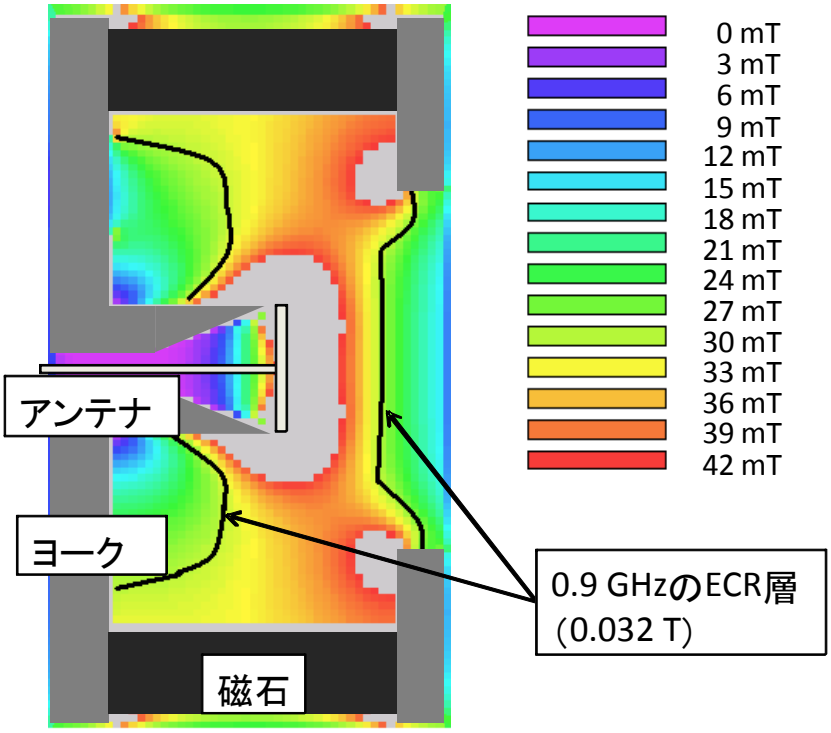


Fig.4-6 磁石6個のときの磁場計算

4.4.2　マイクロ波周波数依存性

マイクロ周波数依存性を調べるためそれぞれのマイクロ波周波数でイオンビーム電流を比べた。推進剤流量0.2sccm, 0.3 sccmのイオンビーム電流の周波数依存性をFig.4-7 ,Fig.4-8にそれぞれ示す。グリット印加電圧は1000 Vで行った。磁石数は0.9GHzで6個,2.45 GHzで12個,4.2 GHzで22個で行った。 投入電力8 W,推進剤流量 0.2sccmでマイクロ波周波数0.9GHz ,2.45 GHz,4.2 GHzのイオンビーム電流は11.2 mA,11.7 mA,7.8 mAと0.9GHzでも他の周波数と同程度もしくは上回るイオンビームが計測された。

(2-1)式及び過去の研究[4]よりプラズマ密度がカットオフ密度以上であると考えられ、カットオフによるマイクロ波周波数の依存性はないと考えられる。よって、各周波数でのイオンビーム電流の違いは磁場強度の違いによるものが大部分であると考えられる。

カットオフ密度n_e は

$$n_e = \frac{\omega_p^2 \varepsilon_0 m}{e^2} \tag{4-7}$$

で表される。ここで、ω_p マイクロ波周波数、ε_0 は真空の誘電率、m は電子質量である。4.2 GHz,2.45 GHz,0.9 GHzのカットオフ密度はそれぞれ1.00×10^{-16}m^{-3},7.45×10^{-16} m^{-3} ,2.19×10^{-17} m^{-3},である。m^{-3}

推進剤流量0.2sccmでは、マイクロ波周波数4.2GHzのイオンビーム電流は、他の周波数と比べて小さかった。これはマイクロ波周波数4.2 GHzでは磁場強度が他の条件よりも強く、イオンが引き出しにくくなっているためだと考えられる。

推進剤流量0.3 sccmでは投入電力が低い条件ではマイクロ波周波数4.2 GHzのイオンビーム電流は他の条件よりも小さかったが、投入電力が高い条件ではマイクロ波周波数4.2 GHzのイオンビーム電流は他の条件よりも大きかった。

高電力・高推進剤流量ではプラズマ密度が高くなるため、壁面、アンテナ表面での損失が多くなる。このため、電子の磁場閉じ込めにより損失をおさえることのできる強い磁場が必要である。しかし、低電力・低推進剤流量ではプラズマ密度は高くならず、電子の磁場閉じ込めの影響が少ないため、イオンビームの引き出しがスムーズに行える弱い磁場で十分であるとわかる。

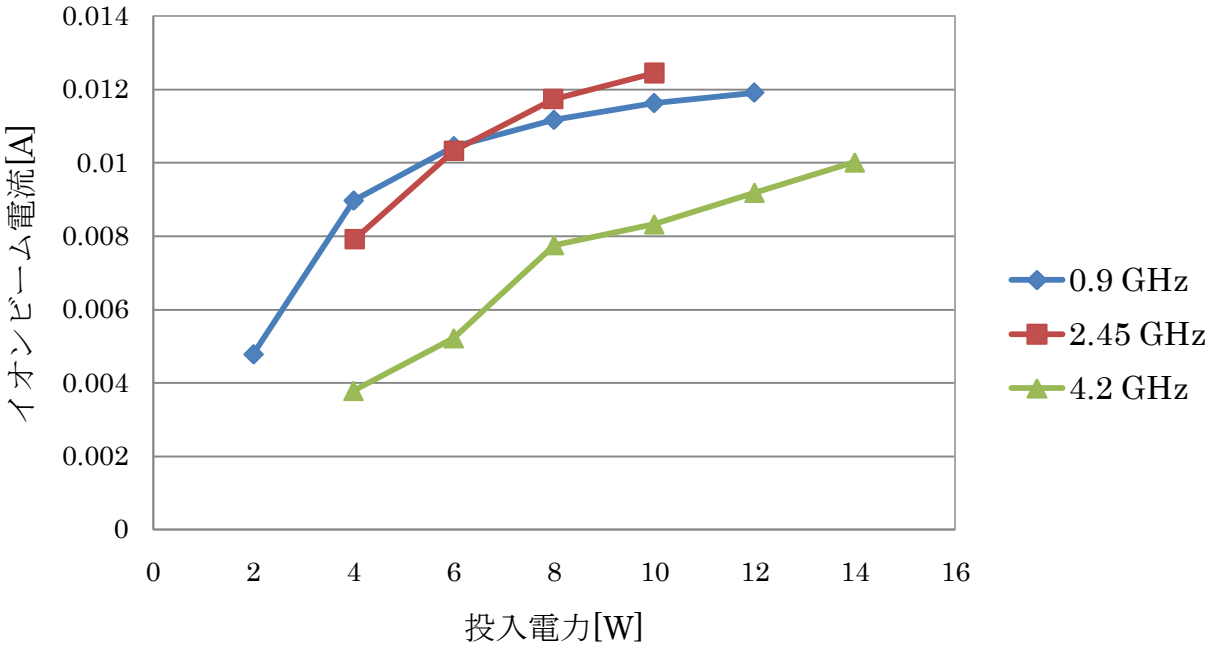


Fig.4-7 イオンビーム電流のマイクロ波周波数依存性
（推進剤流量0.2 sccm、グリット印加電圧1000 V）

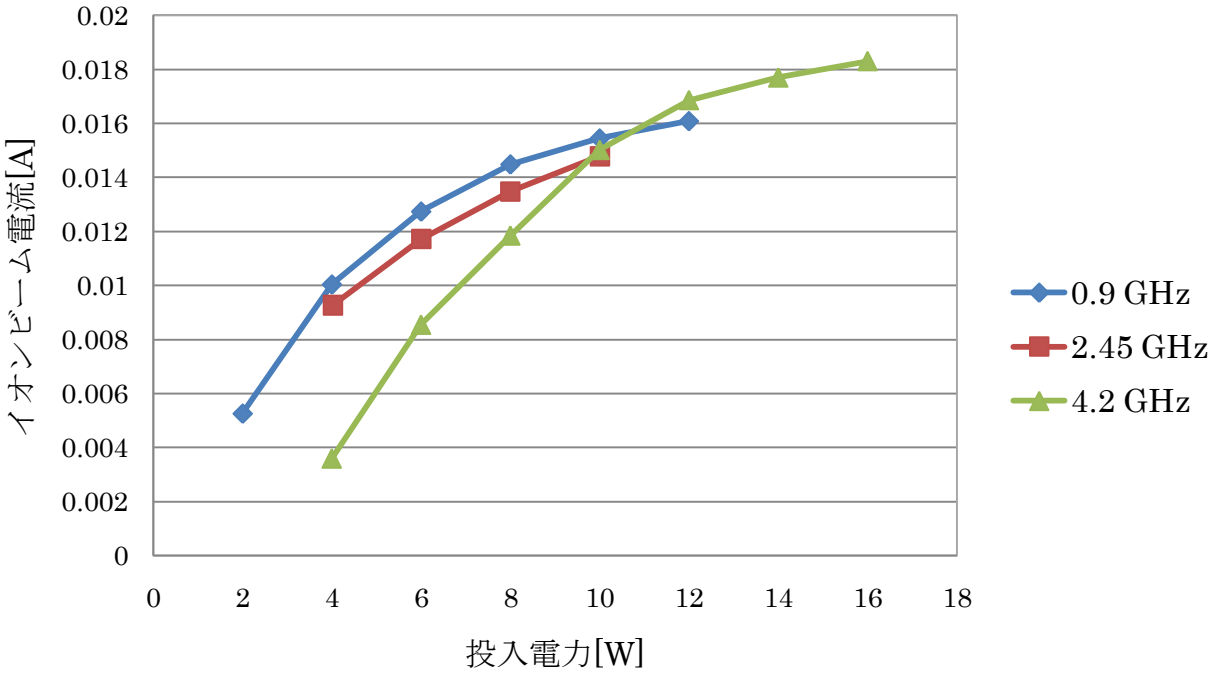


Fig.4-8 イオンビーム電流のマイクロ波周波数依存性
（推進剤流量0.3 sccm、グリット印加電圧1000 V）

推進剤流量が大きい条件では投入電力が大きくなるとアクセル電流が大きくなってしまった。これは、引き出されたイオンがアクセルグリットに衝突してしまっているためだと考えられる。イオンがアクセルグリットに衝突してしまうとイオンビームが効率よく引き出せないだけでなく、グリットがスパッタリング損耗を起こしてしまう。そこで、グリット印加電圧を1500 Vに変更して実験を行った。Fig.4-9にイオンビーム電流の、Fig.4-10に推力の、Fig.4-11に推進効率のマイクロ波周波数依存性を示した。(4-1)、(4-3)式より推力、推進効率はイオンビーム電流から求めた。マイクロ波周波数0.9GHzでは、他の周波数と同程度のイオンビーム電流、推力、推進効率が得られた。

本研究で得られたマイクロ波周波数0.9 GHz、磁石数6個のときの代表性能を(4-1)～(4-6)式よりイオンビーム電流より算出した。

推進剤流量0.2 sccm、マイクロ波投入電力6 W、グリット印加電圧1000 Vの条件でイオンビーム電流値10.5 mA、推力0.52 mN、推進効率41.6 %、比推力2701 s、イオン生成コスト574W/A、推進剤利用効率72.9%を得た。

推進剤流量0.3 sccm、マイクロ波投入電力10 W、グリット印加電圧1000 Vの条件でイオンビーム電流値15.4 mA、推力0.76 mN、推進効率39.2 %、比推力2662 s、イオン生成コスト647 W/A、推進剤利用効率71.8%を得た。

推進剤流量0.3 sccm、マイクロ波投入電力10 W、グリット印加電圧1500 Vの条件でイオンビーム電流値17.2 mA、推力1.04 mN、推進効率51.8 %、比推力3628 s、イオン生成コスト582 W/A、推進剤利用効率79.9%を得た。

システム全体の効率を考えると本研究で使用したイオンスラスタでは、マイクロ波周波数0.9 GHzを使用することが望ましい。

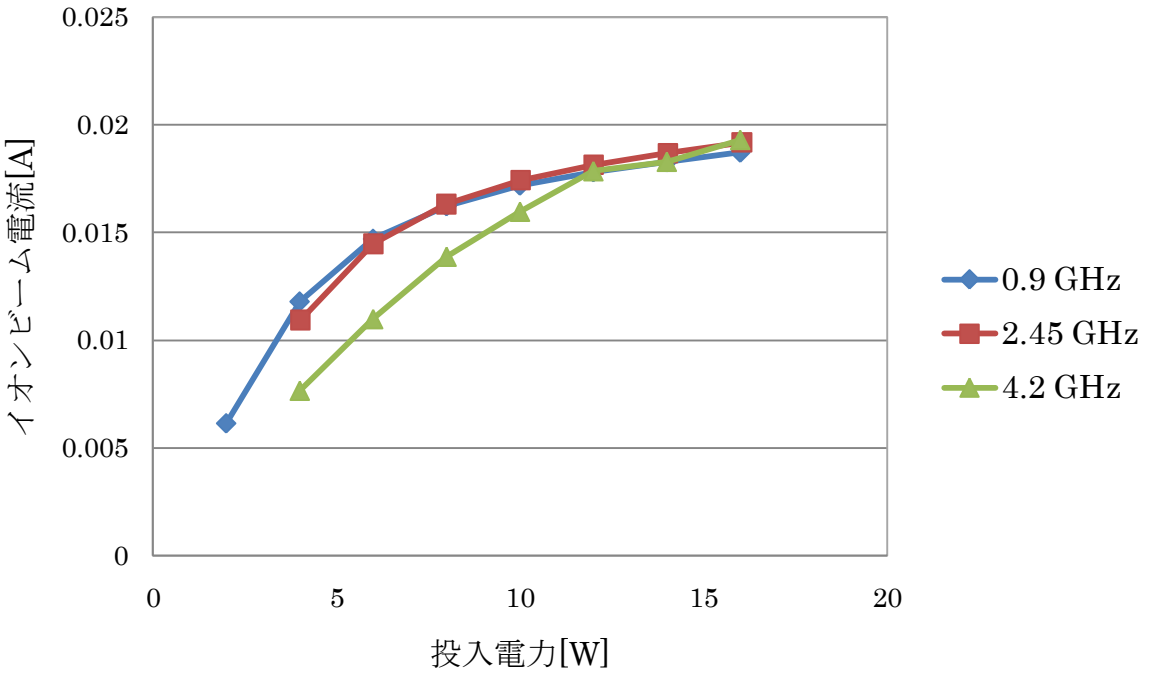


Fig.4-9 イオンビーム電流のマイクロ波周波数依存性
（推進剤流量0.3 sccm、グリット印加電圧1500 V）

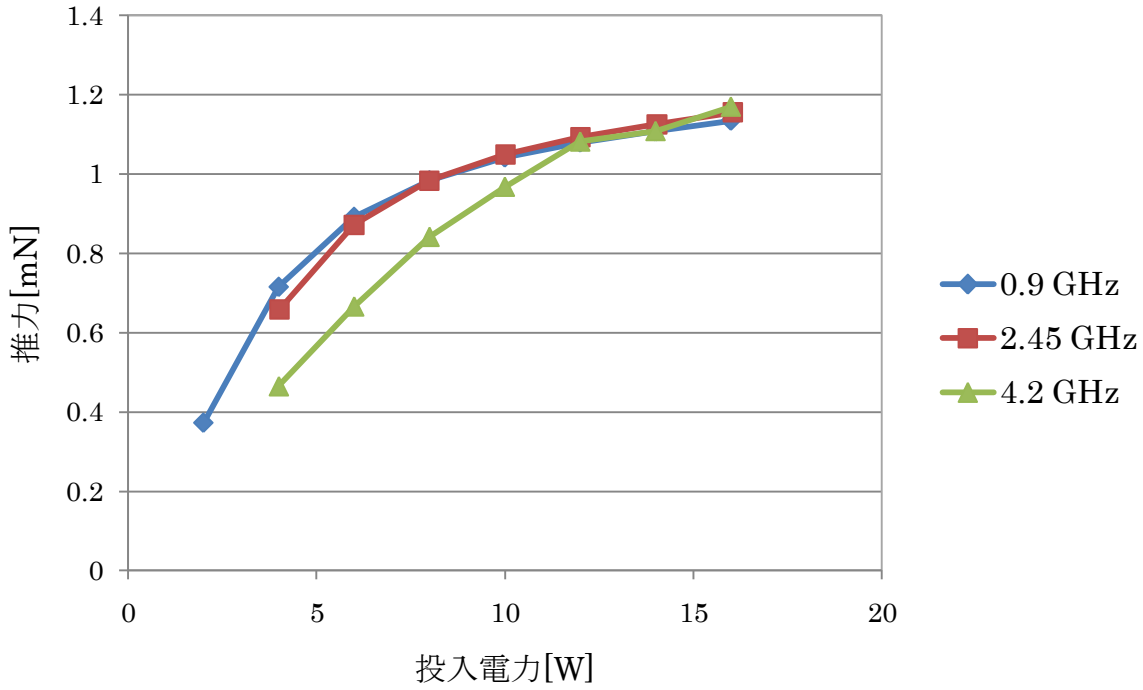


Fig.4-10 推力のマイクロ波周波数依存性
（推進剤流量0.3 sccm、グリット印加電圧1500 V）

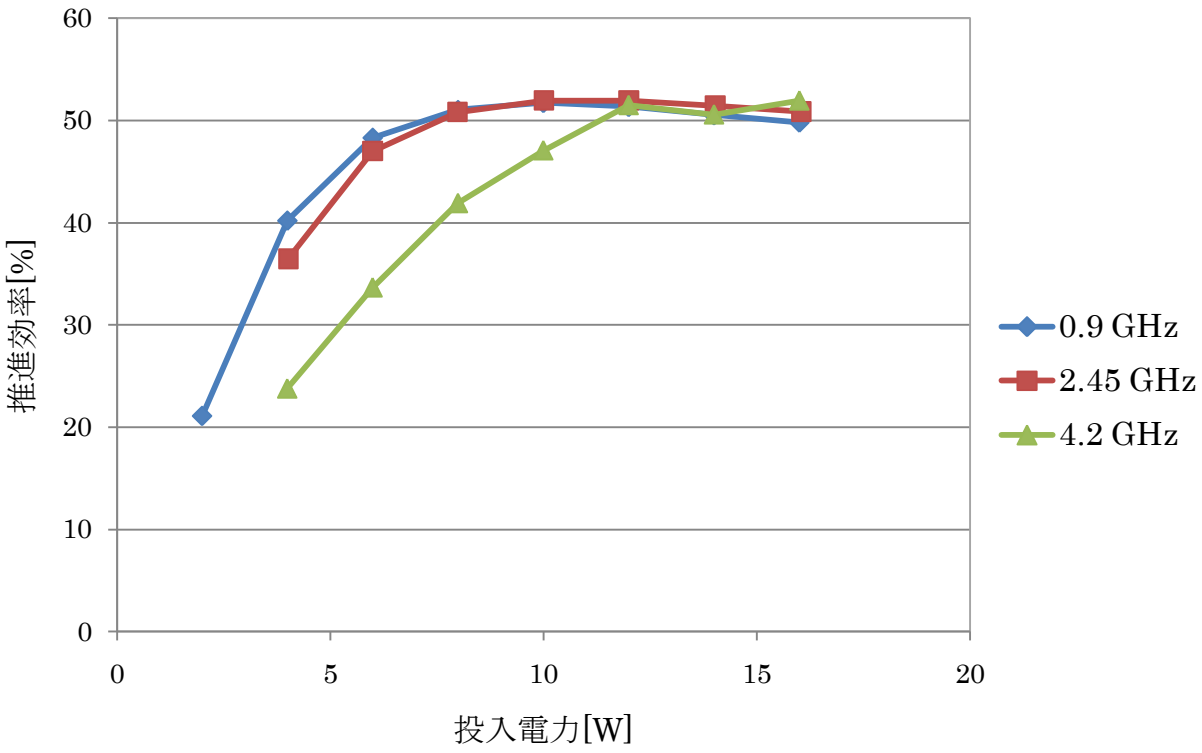


Fig.4-11 推進効率のマイクロ波周波数依存性
（推進剤流量0.3 sccm、グリット印加電圧1500 V）

4.3　二価イオン存在比測定

二価イオン存在比測定の結果をFig.4-12 に示す。Fig.4-12より、ノイズが多くて二価イオン存在比を算出することはできなかった。まず、ノイズを減らすために回路の改良を行う必要がある。また、Ｅ×Ｂプローブの中心軸とイオンスラスタの中心軸が一致していなかったためコリメーター部から入射してくるイオンビームの量が少なく信号が弱かったことも考えられる。そして、絶縁がうまくいっていない可能性もある。

これらの問題点を改善すればＥ×Ｂプローブにより二価イオン存在比αは測定できるだろう。

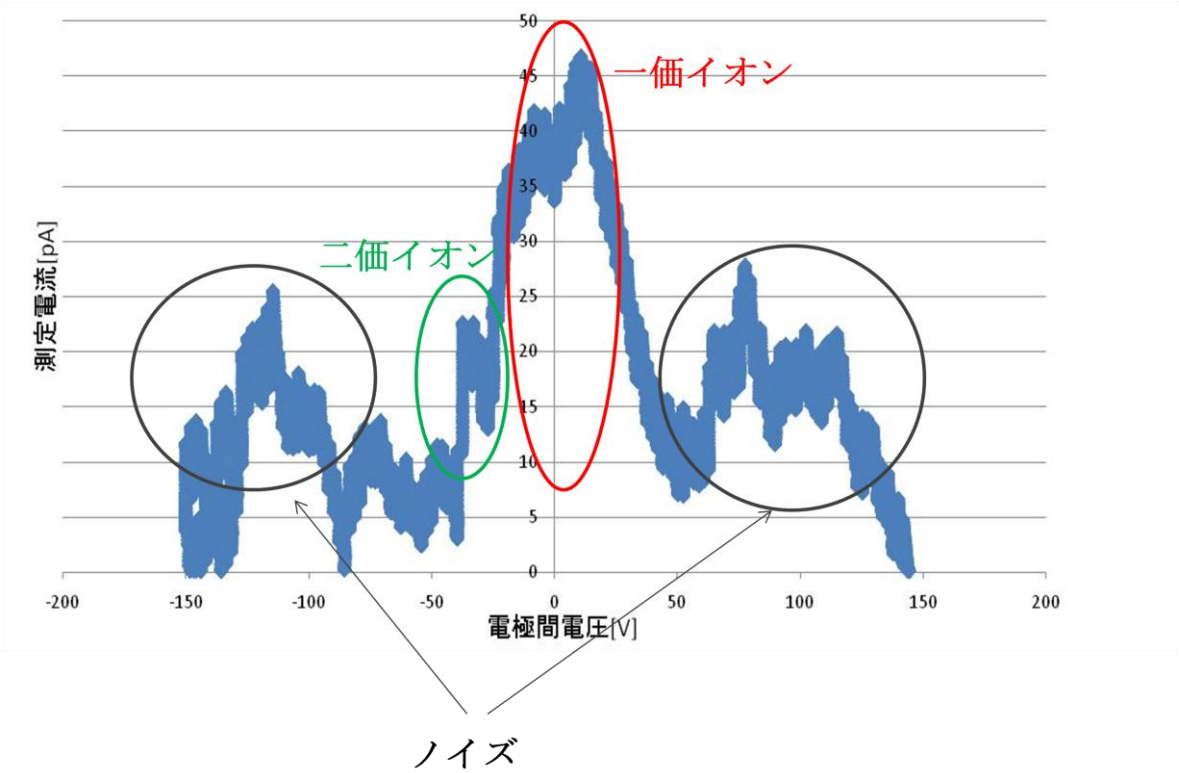


Fig.4-12 二価イオン存在比測定

第五章　結論

本研究では、小型マイクロ波放電型イオンスラスタのマイクロ波周波数依存性を調査することを目的とした。

・マイクロ波周波数0.9 GHzでの磁場強度依存性より、イオンビーム電流はECR層とアンテナの距離の影響は少なく、磁場強度を強くするほうが増えるとわかった。

・各マイクロ波周波数でのイオンビーム電流の比較より、マイクロ波周波数0.9GHzでも2.45 GHzや4.2 GHzと同程度のイオンビーム電流が計測された。プラズマ密度がカットオフ密度以上であると考えられ、カットオフによるマイクロ波周波数の依存性はないと考えられる。よって、各周波数でのイオンビーム電流の違いは磁場強度の違いによるものが大部分であると考えられる。

・各マイクロ波周波数でのイオンビーム電流の比較より、高電力・高推進剤流量ではプラズマ密度が高くなるため、壁面、アンテナ表面での損失が多くなり、電子の磁場閉じ込めにより損失をおさえることのできる強い磁場が必要である。低電力・低推進剤流量ではプラズマ密度は高くならず、電子の磁場閉じ込めの影響が少ないため、イオンビームの引き出しがスムーズに行える弱い磁場で十分であるとわかった。

・マイクロ波周波数4.2GHzと2.45 GHzと比べても0.9GHzで十分に推力、推進効率が得られた。システム全体の効率を考えると本研究で使用したイオンスラスタではマイクロ波周波数0.9 GHzを使うことが望ましい。

参考文献

(1) 茂原正道、鳥山芳夫、‘衛星設計入門’培風館

(2) 栗木恭一，荒木義博，“電気推進ロケット入門”，東京大学出版会，2003.

(3) JAXA ホームページ(http://www.jaxa.jp/)

(4) 鶴哲平: “マイクロ波放電式中和器の性能向上に関する研究”平成20 年度九州大学修士論文

(5) 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.

(6) 提井信力: “プラズマ基礎工学”, 内田老鶴圃, 1995

(7) 早川幸男,北村正治: “キセノンイオンエンジンの地上設備における運転と評価法” 航空宇宙技術研究所資料,2000

(8) Bryan M. Reid, Rohit Shastry, Alec D. Gallimore: “Angularly-Resolved E×B Probe Spectra in the Plume of a 6-kW Hall Thruster” AIAA paper 2008-5287, July 2008.

(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.

謝辞

初めに、このような貴重な研究の場を与えてくださった中島秀紀教授に心から感謝します。グループこそ違いましたが貴重なご意見、助言を頂きました渡辺幸信准教授に心から感謝します。至らない私をいつも丁寧に指導してくださり、研究の行い方、実験や論文、その他あらゆる事でいつも私を導いてくださった山本直嗣助教に心から感謝します。いつも研究室の雰囲気を明るくしてくださった大神めぐみ秘書に心から感謝します。

同じ研究グループでは、研究について方向性などさまざまなアドバイスを頂き、実験、論文、その他あらゆることまで助けて頂いたM2の小谷優介氏に心から感謝します。私の疑問に対して快く答えて下さったM1の栗田知明氏に心から感謝します。

研究室では充実した時間を過ごさせていただきました。安部晋一郎氏、大宅将史氏、新谷將氏、内藤有紀氏、前野旭弘氏、江崎徹氏、西山貴章氏、花屋倫生氏、平山嵩祐氏に心から感謝します。

同じ学部生として互いに切磋琢磨し、公私共に助け合ってきたB4 の下川床潤氏、安永将人氏、矢野貴洋氏に心から感謝します。

最後に、私を支え暖かく見守ってくださった家族に心から感謝します。