

ECR を利用したスターダスト推進機に関する研究

○栗冠 真平, 草間 雄也, 松井 信, 山極 芳樹 (静岡大学)

1 研究背景及び目的

近年, H-2B を用いての宇宙ステーション補給機「こうのとり (HTV)」の打ち上げや, 「はやぶさ」の地球への帰還などを通じて宇宙開発に対する興味関心が高まり, また取り組みが活発になってきている。これらを支えている宇宙推進システムは大きく分けると化学推進と電気推進である。特に長期間ミッションの場合, 比推力の大きい電気推進が選択される。

しかしながら, 現在の推進システムはいずれも推進剤を地球から持参することになり, いかに比推力が大きい電気推進といえどもミッション期間やペイロード質量に大きな制約を与えることになる。そこで, 推進剤として宇宙空間に存在している微粒子 (スターダスト) を利用した推進システムの研究が行われている。宇宙空間に存在している微粒子を電氣的に加速させる固体微粒子加速装置を利用することで, ミッション途中での推進剤の補給を可能とし, 推進剤の初期搭載量の軽減により, ペイロード質量の面で有利になると予想される。本研究では, 粒子を帯電させ静電的に加速させる推進機を作成し実験を実施してきた。本研究室における過去の研究では, 種々の帯電方法のうちプラズマ帯電を用いることで, 固体粒子の帯電率, また得られる帯電量の値が有利であり, 推進剤として利用する際に実用的であることが実験により示された^[1]。しかしながらこの装置ではプラズマを生成する際, フィラメント加熱を用いるため使用する電力が大きくなってしまふという欠点があった。実際にプラズマを生成するのに約 200[W]必要であり, これは推進機全体の 99[%]の割合を占めている^[2]。

そこで, 本研究では, 電子サイクロトロン共鳴 (ECR) を利用してプラズマを生成することで使用電力を削減し, かつ, フィラメント放電のものよりプラズマ密度を濃くすることで推力の向上を目的とする。

2 原理

本推進機の概略図を図 2.1 に示す。この推進機の推進原理として, まず帯電室中にプラズマを生成しその中に粒子供給装置によって固体粒子を供給する。供給された粒子は負に帯電し, それに正の加速電圧をかけることで粒子を加速・排出し推力を得るという装置になっている。以下に帯電原理と加速原理について述べる。

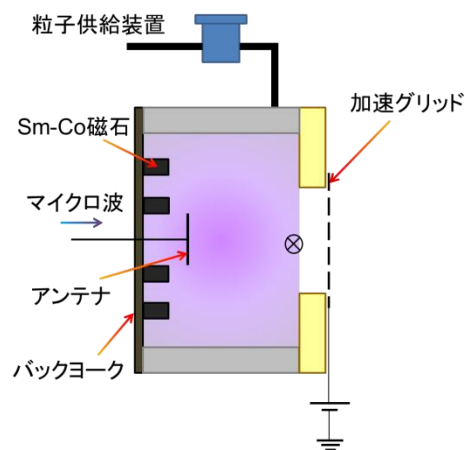


図 2.1 推進機の概略図

2.1 帯電原理

今回, 固体粒子を帯電させるに当たりプラズマ帯電を用いた。図 2.2 にプラズマを利用した帯電の様子を示す。

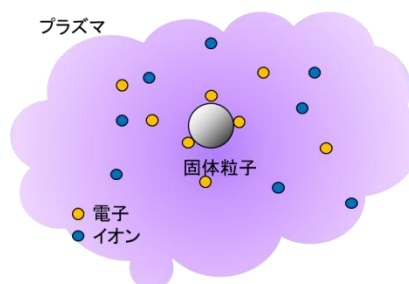


図 2.2 プラズマ帯電の様子

プラズマに固体粒子を投入すると電子とイオンの流

入を受けるが、速さに勝る電子がより早く流入して、集まった負電荷に対し今度はイオンが引き寄せられることでそれ以上の電子収集は起こらなくなる。結果粒子へ流入する電子電流とイオン電流が釣り合うような表面ポテンシャルを得て、固体粒子の電位は負になる。また、固体粒子がプラズマ内に混在している状態をダストプラズマという。この原理を利用し固体粒子を帯電する方法がプラズマ帯電である。

2.2 加速原理

今回、固体粒子を加速させるのに静電加速を用いた。静電加速とは複数枚の電極間に印加した電位差を利用して、帯電した推進剤を高速度で放出し、その反力により加速する方法である^[3]。今回用いた推進機についての加速の概念図を図 2.3 に示す。今回は固体粒子が負に帯電しているため、正の加速電圧をかけている。

このときの固体粒子の排気速度 v_e は

$$v_e = \sqrt{\frac{2Z_d e V_a}{m_s}} \quad (2.1)$$

であり、この時の推力は

$$F = \dot{m} v_e \quad (2.2)$$

で表される。ここで Z_d は固体粒子の電荷数、 e は電荷量[C]、 V_a は加速電圧[V]、 m_d は固体粒子質量[kg]である。

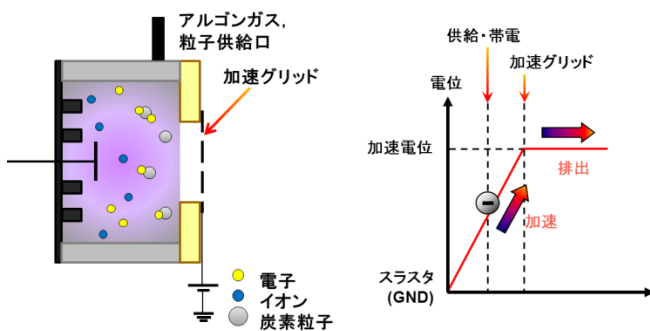


図 2.3 推進機の電位勾配

3 理論帯電量

推力を上昇させる場合、式(2.1)からわかるよう固体粒子の電荷数や推力を増加させてやればよい。そこで、ここでは固体粒子の理論帯電量について述べる。

プラズマ中の固体粒子に流れる電子電流 I_e とイオン

電流 I_i はそれぞれ

$$I_e = -4\pi r_d^2 n_e e \left(\frac{\kappa T_e}{2\pi m_e} \right)^{1/2} \exp\left(\frac{e\phi_d}{\kappa T_e} \right) \quad (3.1)$$

$$I_i = 4\pi r_d^2 n_i e \left(\frac{\kappa T_i}{2\pi m_i} \right)^{1/2} \left(1 - \frac{e\phi_d}{\kappa T_i} \right) \quad (3.2)$$

と表すことができる。ここで、 r_d はダスト粒子半径 [m]、 n_e はプラズマ密度 [m^{-3}]、 e は電気素量 [C]、 κ はボルツマン定数、 T_e は電子温度 [eV]、 m_e は電子質量 [kg]、 ϕ_d はダスト粒子表面ポテンシャル [V]、 n_i はイオン粒子数密度 [m^{-3}]、 T_i はイオン温度 [eV]、 m_i はイオン質量 [kg] である。 $I_e + I_i = 0$ において電荷中性条件

$$\frac{n_e}{n_i} = 1 - Z_d \frac{n_d}{n_i} \quad (3.3)$$

を用いると式(3.2)と式(3.3)は

$$\left(\frac{T_i m_e}{T_e m_i} \right)^{1/2} \left(1 - \frac{e\phi_d}{\kappa T_i} \right) \exp\left(-\frac{e\phi_d}{\kappa T_e} \right) = 1 - Z_d \frac{n_d}{n_i} \quad (3.4)$$

となる。ここで、 n_d はダスト粒子数密度 [m^{-3}] である。また、 Z_d と ϕ_d の間には

$$\phi_d = -\frac{Z_d e}{r_d} \quad (3.5)$$

という関係があり、これを使うと式(3.4)は

$$\left(\frac{T_i m_e}{T_e m_i} \right)^{1/2} \left(1 + \frac{Z_d e^2}{\kappa T_i r_d} \right) \exp\left(\frac{Z_d e^2}{\kappa T_e r_d} \right) = 1 - Z_d \frac{n_d}{n_i} \quad (3.6)$$

となる^[4]。式(3.6)より、ダスト粒子の表面電荷数 Z_d は、ダスト粒子数密度 n_d の関数として表すことができる。図 3.1、図 3.2 にそれぞれ電子温度 T_e 、プラズマ密度 n_i を変化させた時の Z_d と n_d の関係を表したグラフを示す。なお、全てのグラフの x, y 軸は対数となっている。

Z_d は $q = Z_d \times e$ [C] の関係式があるので、図 3.1 から電子温度が高ければダスト粒子の帯電量が高くなることがわかる。しかし、プラズマ密度が一定であれば、ダスト粒子数密度が上がると帯電量は変化しなくなってしまう。

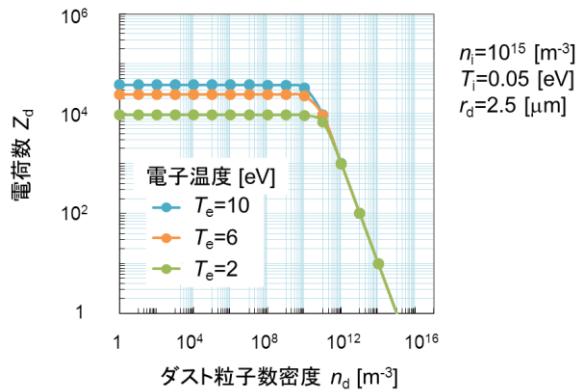


図 3.1 電荷数の電子温度依存性

図 3.2 からは、プラズマ密度が高くなると、帯電量自体は変化しないが、最大まで帯電できるダスト粒子数密度が増加していくことわかる。その変化率は、単純にプラズマ密度が 10 倍になれば、最大まで帯電できるダスト粒子数も 10 倍に増えている。

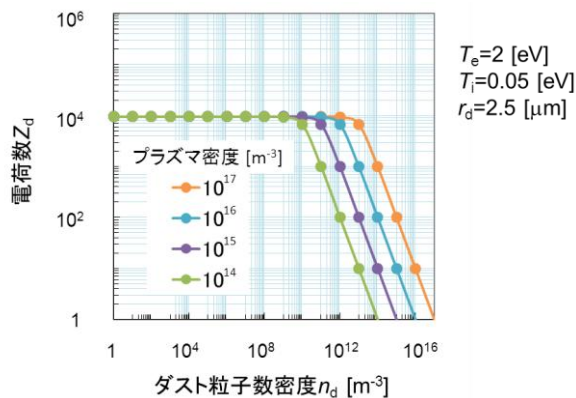


図 3.2 電荷数のプラズマ密度依存性

以上のことからあるプラズマ密度に対して最も効率よく帯電できるダスト粒子数密度というものがあることがわかる。

4 実験装置

4.1 ECR 放電式推進機

本研究で制作した実験装置の写真及び概略図を、それぞれ図 4.1, 図 4.2 に示す。

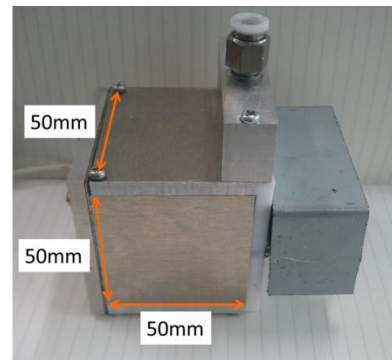


図 4.1 ECR 放電式推進機の写真

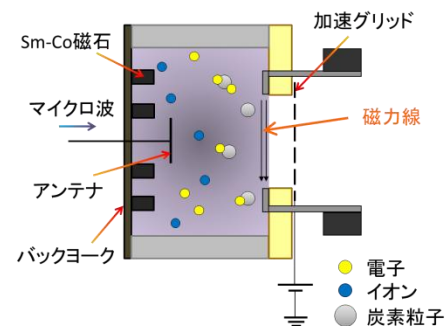


図 4.2 ECR 放電式推進機の概略図

ダストプラズマ状態を作る手順は次の通りである。まず、プラズマ生成装置においてプラズマを生成し、粒子供給装置から固体粒子を一定流量で供給する。供給された固体粒子はプラズマの中に入ると直ちに帯電する。加速グリッドに電圧をかけることで帯電した固体粒子は加速され、推進機の外に排出される。その際固体粒子は電荷を失って電的に中性となる。

プラズマを生成し、固体粒子を帯電させる帯電室の概略図は図 4.2 の通りである。プラズマ生成装置は帯電室となるジュラルミン製の帯電室、マイクロ波を伝播するアンテナ、次項で説明する ECR 層を形成する Sm-Co 磁石および Sm-Co 磁石を固定するための軟鉄板から構成される。

帯電室は市販されているリング状の Sm-Co 磁石が入るよう内径が 50[mm]×50[mm]の四角型とした。奥行き方向を 50[mm]とした理由であるが、50[mm]より近くなると磁場がプラズマを閉じ込めるための磁石と ECR 層を形成する磁石とが干渉しあい、プラズマ閉じ込めが出来なくなるためである。また、帯電室の上部には穴が開けてあり、そこから固体粒子とアルゴンガスの供給を行う。また、プラズマの拡散を防ぐために、

排出口側には厚さ 10[mm]のテフロン板を用いてある.

マイクロ波を伝播するアンテナには銅を用いた. ECR 層と接するようにアンテナを設置することでより効率よくエネルギーの伝搬ができ, より省電力でプラズマ生成ができるようになる. そのためにアンテナは ECR 層と接する位置に配置した. また, アンテナの形状は ECR 層に接しつつ, プラズマとアンテナが接触することでプラズマの損失が起これにくくなるように, 図 4.3 のような十字型の形状とした.



図 4.3 マイクロ波伝搬用のアンテナ

4.2 排出口と加速グリッド

プラズマによって帯電した固体粒子を排出するためにアノード側のテフロン板の中央に排出口を設けた. 本研究では排出口の一辺が 2[cm]のものを使用した. 図 4.4 および図 4.5 にそれぞれ帯電室の内側と外側から見た写真を示す. 加速グリッドにはジュラルミンを用い, 帯電室の外側からテフロン板に張り付ける形で設置されている. 加速グリッドには直径 3[mm]の穴が開いており, その開口率は約 34%である. プラズマを介して固体粒子は負に帯電するため, 加速グリッドには正の電位を与える.

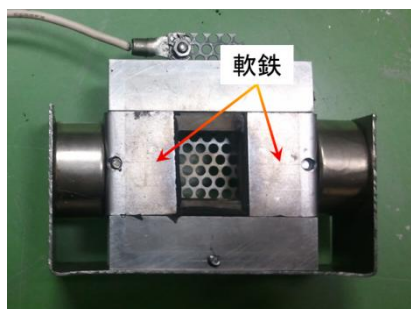


図 4.4 帯電室の内側から見た排出口

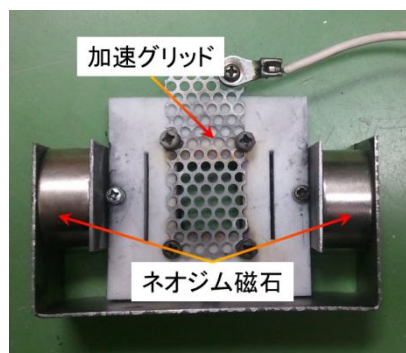


図 4.5 帯電室の外側から見た排出口

ここで正の加速電位を与えると, 負に帯電した粒子だけでなく, 同じように負の電荷を持つ電子も一緒に加速されてしまう. 加速された電子は加速グリッドに流れ込み, 加速電圧を上げることができなくなってしまふ. そこで, プラズマを帯電室内に閉じ込め, 電子が加速グリッドに入らないようにするために排出口部分に磁場をかけている. この時, 負の電荷を持つ電子磁力線に巻きつくような回転運動が起これる.

本研究では表面磁束密度 490[mT]のネオジウム磁石 2個と L 字型の軟鉄版を用いて図 4.6 に示すような磁場回路を形成した. 図 4.5 に示すように磁石間にはコの字型の軟鉄版を挟み, 排出された固体粒子が影響を受けにくいように排出口を避けるように磁力線を繋いでいる.

排出口の中心線上の上下端で磁場は最小となっており, 最小の磁場は約 17[mT]である. このときの電子, 固体粒子の回転半径 (ラーモア半径) はそれぞれ 0.49[mm], 3.2×10^7 [mm]であり, テフロン板の厚みを 10[mm]としたため, 電子は帯電室内に閉じ込められる一方で, 固体粒子のみが帯電室の外に排出される設計となっている.

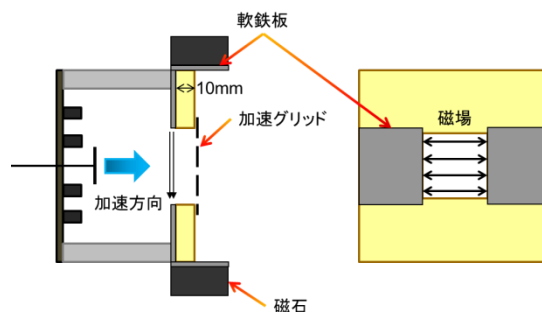


図 4.6 磁場回路の概略図

4.3 固体粒子供給装置

図 4.7 に本実験で用いた供給装置の写真と概略図を示す。

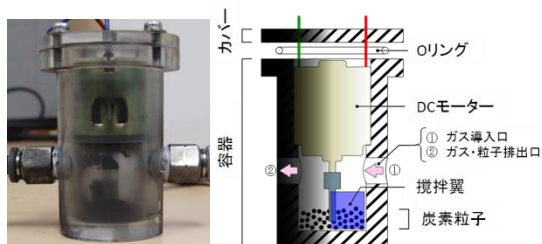


図 4.7 粒子供給装置の写真（左）と概略図（右）

本実験では $5[\mu\text{m}]$ の炭素粒子を用いたが、この粒子は凝集体となっている。その原因は粒子同士の付着力にある。付着力には分子間力、毛管力、静電気力等がある。分子間力は分子同士の間に働く静電相互作用による力で、毛管力とは物質の持つ水分量に依存した力、また静電気力は帯電した粒子間に働く力である。これらの力によって粒子は互いに引き付けあっており、この力が粒子自身の受ける重力に勝っていると、粒子は互にくっ付きあい、凝集体となる。

そこで、本実験で用いた粒子供給装置では、攪拌翼をつけたモーターを回転させることで粒子を攪拌し、粒子を分離した状態にした。これだけでは粒子が推進機に流れないので、作動ガスとして用いているアルゴンガスを、供給装置を経由して推進機に導入することで粒子を運搬する。またモーターの回転数を変化させることで粒子の供給量を変化させている。その時のモーター電圧と供給量の関係を図 4.8、その時得られた粒子供給流量を表 4.1 に示す。

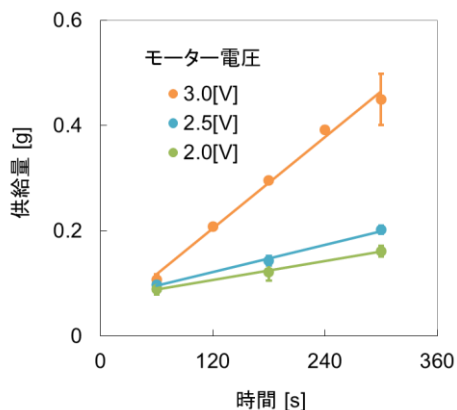


図 4.8 各モーター電圧における供給量の時間変化

表 4.1 モーター電圧と粒子供給量

モーター電圧 [V]	粒子供給流量	
	[g/min]	[mg/s]
2.0	0.018	0.3
2.5	0.030	0.5
3.0	0.090	1.5

5 実験結果

5.1 プローブ測定

今回、推力の測定を行う前に今回作成した推進機がどのようなプラズマを生成することができるかを確認するためにプラズマ診断を行った。今回プラズマ診断を行うにあたりダブルプローブを用いた。

図 5.1 に示すように、推進機の軸上の加速グリッドの位置を 0 として、推進機の内側に向かって $5[\text{mm}]$ おきにプローブ測定を行った。

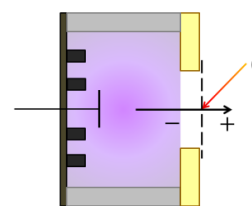


図 5.1 プローブ測定位置

実験条件は、背圧は $2.5 \times 10^{-2}[\text{Pa}]$ 、アルゴンガス流量 $3[\text{sccm}]$ 、マイクロ波電力を $14[\text{W}]$ としプローブ測定を行った。ただし、加速グリッドに高電圧をかけると測定が不安定となりうまく測定することが出来なかったため、今回は加速電圧をかけずに測定を行った。

このとき得られた電子温度分布とプラズマ密度分布をそれぞれ、図 5.2、図 5.3 に示す。図中の青色の部分は粒子が供給されている範囲を示している。

電子温度についてみてみると、ECR 放電式推進機は全体で見ると、フィラメント放電式推進機よりも全体に高い値をとっている。粒子供給範囲で見ると、フィラメント放電式推進機が $4[\text{eV}]$ に対して ECR 放電式推進機の電子温度は $7[\text{eV}]$ であった。

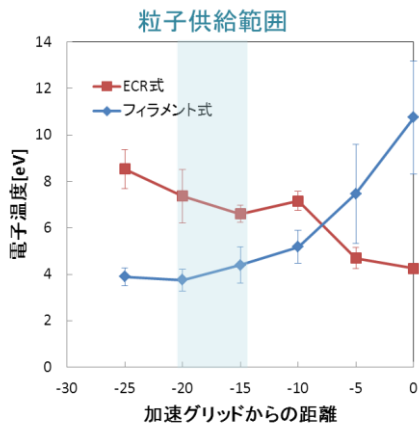


図 5.2 電子温度変化

次にプラズマ密度について見てみる．すると，回の粒子供給範囲においてプラズマ密度は $10^{16}[\text{m}^{-3}]$ のオーダーとなっている．これをフィラメント放電のプラズマ密度と比較を行うと一桁プラズマ密度が上昇しているのが分かる．前に述べたように，固体微粒子をプラズマによって帯電させる際は，プラズマ密度が高ければ高いほど，より多くの粒子を帯電させることができる．また，プラズマ生成に必要な電力も $200[\text{W}]$ から $14[\text{W}]$ と大きく落ちているため推力電力比の改善が見込まれる．

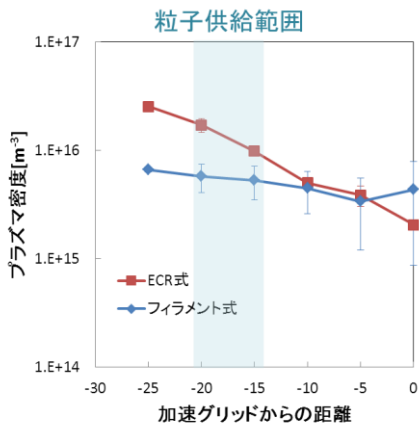


図 5.3 プラズマ密度変化

5.2 推力測定結果

粒子供給量を変更したときの推力変化の様子を示す．実験条件は，背圧が $2.5 \times 10^{-3}[\text{Pa}]$ ，加速電圧が $1000[\text{V}]$ ，ECR 放電式推進機の場合，マイクロ波電力が $14[\text{W}]$ ，フィラメント放電式推進機の場合，放電電

圧を $40[\text{V}]$ ，放電電流を $0.5[\text{A}]$ とした．また，粒子供給系は，アルゴンガス流量が $3[\text{sccm}]$ ，供給装置に入れる初期粒子質量が $1[\text{g}]$ で，モーター電圧を $2, 2.5, 3[\text{V}]$ にして実験した．この時の粒子供給量は表 4.1 に示しているように，それぞれ $0.3[\text{mg/s}]$ ， $0.5[\text{mg/s}]$ ， $1.5[\text{mg/s}]$ である．また，本実験装置で得られると考えられる理論推力を理論値として示している．

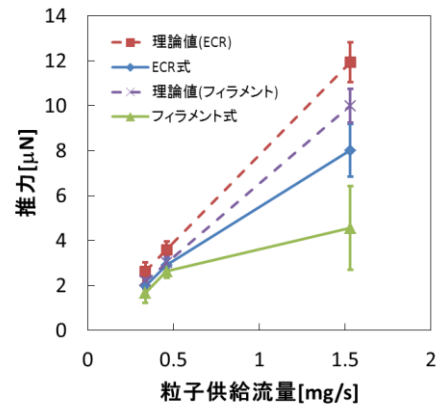


図 5.4 粒子供給量を変化させた際の推力

粒子供給量が $0.3[\text{mg/s}]$ ， $0.5[\text{mg/s}]$ の場合を考える．すると，ECR 放電式推進機とフィラメント放電式推進機共にこの推進機が出すことができる最大の推力とほぼ同じ値を出すことができた．この時 ECR 放電式推進機の推力はフィラメント放電式推進機のものに比べ約 1.2 倍であった．これは電子温度がフィラメント放電式推進の $5[\text{eV}]$ に対して ECR 放電式推進の電子温度は $7[\text{eV}]$ に上がったためと考えられる．前に示したように電子温度が上がるとそれに対して電荷数も上昇する．今回の場合，粒子の電荷数は約 1.4 倍である．電荷数と推力の関係は式(2.1)，式(2.2)で示すように推力は電荷数の平方根に比例するために，今回の場合推力は約 1.2 倍になると考えられる．実際の測定値は約 1.1 倍となった．

次に，粒子供給量が $1.5[\text{mg/s}]$ の場合を考える．まず，今回用いた推進機のプラズマ密度は ECR 放電式推進機の場合， 10^{16} オーダーであり，フィラメント放電式推進機の場合は 10^{15} オーダーであった．このときの粒子の帯電量を考えてみる．先に述べたように，あるプラズマ密度に対して最も効率よく帯電できる粒子供給量が決まっている．今回，粒子供給量を $1.5[\text{mg/s}]$ にし

たとき、効率よく帯電できるプラズマ密度は 10^{16} オーダーである。先に述べたように、フィラメント放電のプラズマ密度は 10^{15} オーダーでのため、粒子供給量が $1.5[\text{mg/s}]$ の場合、効率よく帯電できなかったため、得られると考えられた推力の 45% の値しか得ることができなかった。一方で ECR 放電式推進機はプラズマ密度が 10^{16} オーダーであり、得られると考えられる推力の 67% の推力を得ることができた。

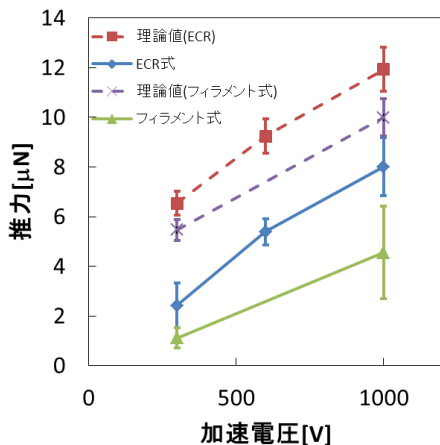


図 5.5 加速電圧と推力の関係

図 5.5 に加速電圧と推力の関係を示す。推力と加速電圧の関係は式(2.1)、式(2.2)から分かるように、加速電圧を上げることにより推力が上昇する。どの加速電圧の状態を見ても理論値に対する実際に得られた推力の割合というものが増加している。これは ECR 放電式推進機のプラズマ密度がフィラメント放電のものに比べプラズマ密度が一桁上がったことで、粒子の電荷数が上昇し推力が上昇したためと考えられる。

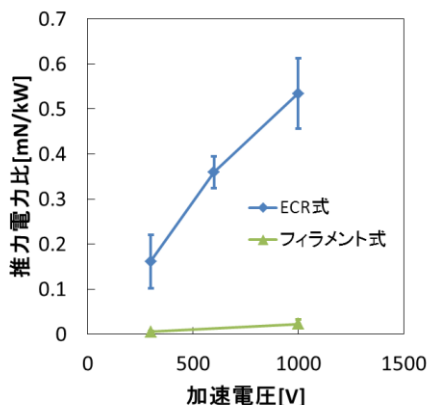


図 5.6 加速電圧と推力電力比の関係

表 5.1 推力電力比の比較

フィラメント放電式推進機	ECR 放電式推進機
0.02[mN/kW]	0.53[mN/kW]

図 5.6 に加速電圧と推力電力比の関係を示す。フィラメント放電式推進機の場合、プラズマ生成に必要な電力は約 $200[\text{W}]$ 程度であったのに対し、ECR 放電式推進機のプラズマ生成に必要な電力は約 $14[\text{W}]$ とおよそ 14 分の 1 であり、加速電力は $1[\text{W}] \sim 3[\text{W}]$ であった。プラズマ生成に必要な電力が大幅に改善されたために推力電力比は大幅に改善され、最も推力電力比が大きい場所で比較すると表 5.1 に示すように、フィラメント放電式推進機の推力電力比が $0.03[\text{mN/kW}]$ に対し、ECR 放電式の推力電力比は $0.53[\text{mN/kW}]$ とおよそ 18 倍と改善することが出来た。

6 まとめ

本研究では ECR 放電プラズマを利用した推進機を新たに開発し、固体粒子加速実験を行った。また、その実験においてどれだけの推力が得られるかスラストスタンドを用いて測定した。

ECR 放電式推進機を用いることでフィラメント放電式推進機のものに比べプラズマ密度を 1 桁上げることができた。それに伴い粒子の電荷数が改善されたため推力の上昇が見られた。その結果最大の推力は約 $8[\mu\text{N}]$ であり、フィラメント放電式のものに比べ約 2 倍となった。また、推力電力比は約 18 倍と改善された。

参考文献

1. 中嶋純一. ダストプラズマを利用した宇宙推進機の基礎研究-プラズマの固体微粒子帯電に及ぼす影響-. 出版地不明 : 静岡大学, 2006. 卒業論文.
2. 松下太朗. プラズマによる帯電微粒子を利用したスターダスト推進機に関する研究. 2010.
3. 荒川義博, ほか, ほか. イオンエンジンによる動力航行. 出版地不明 : コロナ社, 2006, ページ: 50-51.
4. P.K.Shukla, A.A.Mamun. Introduction To Dusty Plasma Physics. Bristol and Philadelphia : Institute of Physics Publishing, 2002. ISBN 0-7503-0653-X.