

レーザー誘起蛍光法によるマイクロ波放電式イオンエンジンプルームの イオン速度測定

Ion velocity measurement of microwave discharge ion thruster plume by laser induced fluorescence method

○山本 雄大(静大・院)・月崎 竜童・西山 和孝(宇宙航空研究開発機構)・神田 大樹(東大・院)・
山極 芳樹(静大)・國中 均(宇宙航空研究開発機構)

○Yuta Yamamoto(Shizuoka University)・Ryudo Tsukizaki・Kazutaka Nishiyama (JAXA)・Daiki koda (University
of Tokyo)・Yoshiki Yamagiwa (Shizuoka University)・Hitoshi Kuninaka (JAXA)

Abstract (概要)

In the ion engine, the ejected ion beam was observed turning around the central axis, and it was found through space operation that this swirling flow is generating swirl torque. In this study, the ion velocity in the swirling direction in the $\mu 10$ ion engine plume was measured by laser-induced fluorescence method. The result shows that the swirling flow velocity exists and the swing direction is clockwise. It is assumed that this swirling flow is caused by the rotation of the ion beam induced by the Lorentz force due to the leaking magnetic field and the deflection of the ion beam is caused by misalignment of the grid.

記号の説明

v :	速度
c :	位置
f :	周波数
λ :	波長
λ_0 :	励起波長
$\Delta\lambda$:	ドップラーシフト量
v_θ :	旋回方向速度
v_b :	推進方向のイオン速度
B :	グリッドに平行な磁場
l :	グリッドからの距離
m :	キセノン質量

1. 緒言

1.1 研究背景・目的

小惑星探査機「はやぶさ」に搭載されたマイクロ波放電式イオンエンジン $\mu 10$ を含むようなイオンスラスタは電気推進機の1つであり、電気エネルギーを運動エネルギーに変換するタイプのスラスタである。イオン生成部で推進剤を放電により加熱・電離させ、加速部である高電圧が印加されたグリッド状電極を用いて加速噴射することで推力を発生する静電加速型の電気推進機である。(図 1-1)

1990年代以降の電気推進機の本格的な宇宙運用を通じ

て、加速されたイオンビームは推進方向にのみ噴射されるのではなく、推進方向軸を中心に旋回しており、粒子がらせん状に噴射されていることが判明した。このような現象は従来の地上試験では確認できず、イオンビーム軸を中心としたイオンの旋回流によるトルクを「スワールトルク」と呼ぶ^{1,2,3)}。このイオンの旋回流により推進方向とは異なる方向にトルクが発生することになる。特に、小惑星探査機「はやぶさ」やNASAの「Deep Space1」や「Dawn」などの深宇宙探査機では、イオンエンジンの運用時間が数万時間と非常に長時間となっており、そのため、スワールトルクによる姿勢制御への影響が無視できないものとなった。このようなスワールトルクの影響はRCS(化学スラスタ)やRWによる姿勢制御を必要とするため、運用に悪影響を与えている。今後、イオンエンジンの深宇宙探査機や静止衛星の南北姿勢制御への活用を進めていく上で、スワールトルクが姿勢制御上、大きな制約の一つとなっている。イオンエンジンにおけるスワールトルクの発生原因として以下のようなものが考えられている(図 1-2)。

- 1) グリッドのミスアライメント
 - 2) イオン源の漏れ磁場によるローレンツ力
 - 3) 中和器によるイオンビームの偏向
 - 4) イオン源内部での $\text{grad}B$ ドリフト
 - 5) スラスタ複数台搭載による取付誤差
- しかしながら、イオンエンジンにおいては、未だ研究報告がない。

本研究では、イオンスラスタにおけるスワールトルクの

解明に向けた実験的研究である。そのため、本研究では、スワールトルクのみならず、メカニズム解明に向けて、レーザ誘起蛍光法をイオンスラストのプラズマへ適用し、蛍光信号の取得を試みた。さらに、ビーム中のイオンの旋回流速度測定を行い、その物理現象を解明することを目的とする。

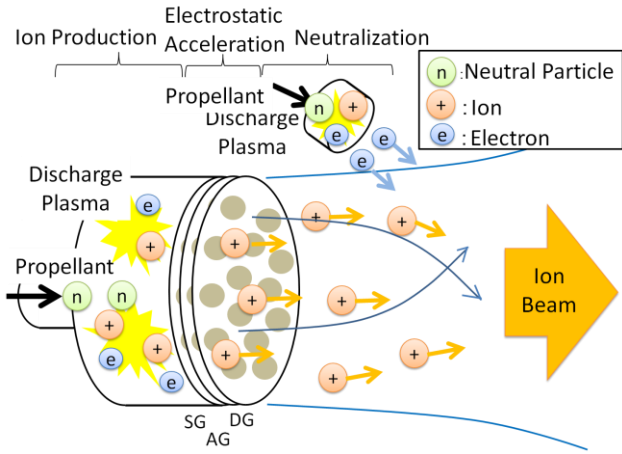


図 1-1 イオンエンジンの概要図

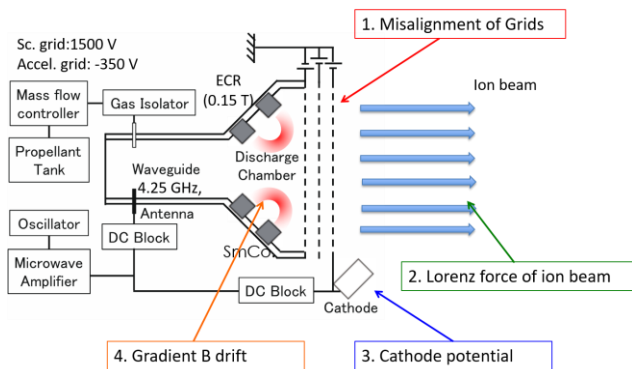


図 1-2 スワールトルクの一因

2. 実験手法

2.1 レーザ誘起蛍光法 (LIF 法)

図 2-1 に示すように可変波長レーザを用いてプラズマ中の粒子の励起準位に相当する波長の光を入射させることで粒子がレーザ光のエネルギーを受けて上準位へ遷移する。この放出電磁波を蛍光と呼ぶ。図 2-2 に示すように、適切な方法で光学系を校正し、誘導蛍光強度の測定を行うことでレーザビームと分光検出系の軸が交差する局所的な場所におけるプラズマの計測が可能となる。これをレーザ誘起蛍光法 (LIF 法) と呼ぶ。

レーザ誘起蛍光法において対象粒子がレーザ光に対し速度を有している場合、その運動により共鳴吸収波長が変化する。すなわち、得られるスペクトル線が特定の方向にズレる (図.2-3)。これをドップラーシフトと呼ぶ。そこで、レーザの波長を掃引することで吸収線のシフト量を測定す

ることにより粒子のドップラープロファイル、すなわち、レーザ軸方向の速度分布を取得することができる。速度はドップラーシフトの量から求めることができ、式(1),(2)から式(3)のようになる。

$$(f + \Delta f)(\lambda + \Delta\lambda) = c \quad (1)$$

$$f + \Delta f = \frac{c+v}{c} f \quad (2)$$

$$v = -\frac{c\Delta\lambda}{\lambda} \quad (3)$$

本研究では、対象であるマイクロ波放電式イオンスラストのプラズマとシフト量計測の基準として、キセノン放電管中のキセノンイオンの蛍光信号取得を行う。この両者からドップラーシフト量を計測し、旋回流速度測定を行う。

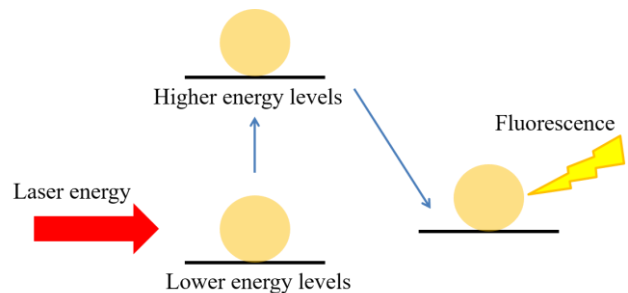


図 2-1 粒子の励起・脱励起に伴う蛍光発生メカニズム

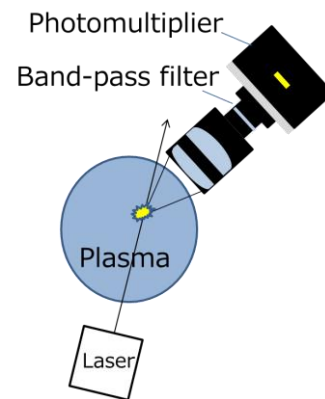


図 2-2 レーザ誘起蛍光法の概要図

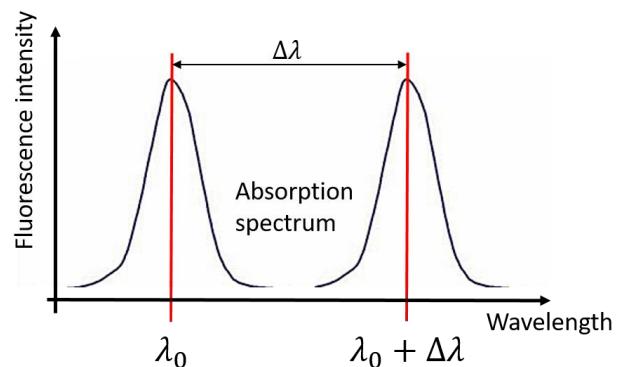


図 2-3 ドップラーシフトによる蛍光波長のシフト

2.2 測定対象

本研究では、XeII の準安定準位のうち、電気推進機にレーザー誘起蛍光法が適用された経緯のある $5p^4(^3P_2)5d^2[4]7/2$ の準安定準位から $5p^4(^3P_2)6p^2[3]^o5/2$ の準位へ 834.724nm のレーザーを用いて励起させ、 $5p^4(^3P_2)6s^2[2]3/2$ から $5p^4(^3P_2)6p^2[3]^o5/2$ の準位への 541.915nm の蛍光信号を測定する(図 2-4)。

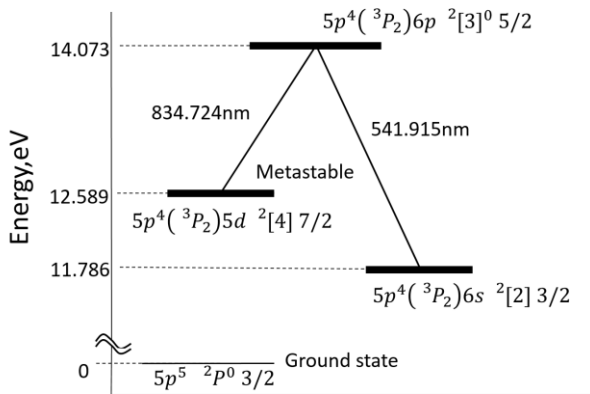


図 2-4 グロトリアン線図

2.3 実験方法

本研究の対象としているマイクロ波放電式イオンスラスタ $\mu 10$ の作動条件を表 2-1 に示す。

表 2-1 $\mu 10$ の作動条件

Propellant [sccm]	Microwave [W]		Current [mA]	
	Input	Reference	Sc	Ac
1.95	30	4	133	1

図 2-4 に構築した実験系の概要を示す。半導体レーザー(DL100)から出力されたレーザー光は 2 枚のミラーにより増幅器(BoosTA)に導入され増幅される。その際、DL100 と BoosTA の偏光方向が異なるため 1/2 波長板を用いて横偏光にしている。増幅されたレーザー光はビームスプリッタにより分割され、波長計・参照セル・真空チャンバ内に導入される。真空チャンバ内にはシングルモードの光ファイバにより導入し、コリメートレンズから $\mu 10$ プルームへと射出される。コリメートレンズによりレーザー径は約 $500 \mu\text{m}$ となる。レーザーにより発生させられた蛍光は 2 枚のレンズより構成された集光系により受光され、フォトマルによって増幅される。フォトマルによる出力はロックインアンプに導入され、参照周波数用に設置されたチョップの参照周波数を用いてノイズ除去を行いオムニエースに記録される。また、参照セルとして、キセノン放電管による蛍光取得も同時に行う。これにより、ドップラーシフト量を算出する際の基準とする。

図 2-5 に真空チャンバ内の実験系の概要を示す。真空チ

ャンバ内にステージを設置し、その上にレーザー出射口と集光系を設置している。レーザー出射口は回転式ロッドホルダを用いて+Z 軸方向に射出している。これにより、Z 軸方向の速度成分、つまり、 $\mu 10$ プルームの旋回流速度成分を測定することが可能となる。さらに、ステージをステップングモータとレールを用いて Y 軸方向に可動させることで、グリッドの半径方向の旋回流速度分布を得ることが可能となる。測定範囲を表 2-2 に示す。Y 軸方向の掃引距離に関しては、図 2-6 に示すように、 $0 \pm 48\text{mm}$ の領域を 6mm 間隔で測定するものと、 $0 \pm 4.8\text{mm}$ の領域を 0.6mm 間隔で測定する 2 種類を行った。6mm 間隔の実験では、グリッド全体での速度分布を取得するためにおこなった。0.6mm 間隔の実験は、測定位置の微小変化による速度変化を検証するために行った。加速されたイオンは分散しながら噴射されているため、X 軸のみでなく Y,Z 軸方向にも速度成分を有する。そのため、測定位置を微小変化させると発散の影響を受け、図 2-7 のような速度分布を有する可能性があるため、検証を行った。

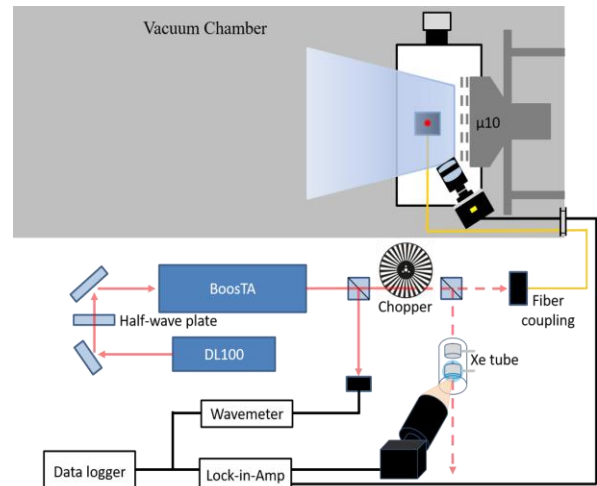


図 2-4 実験系

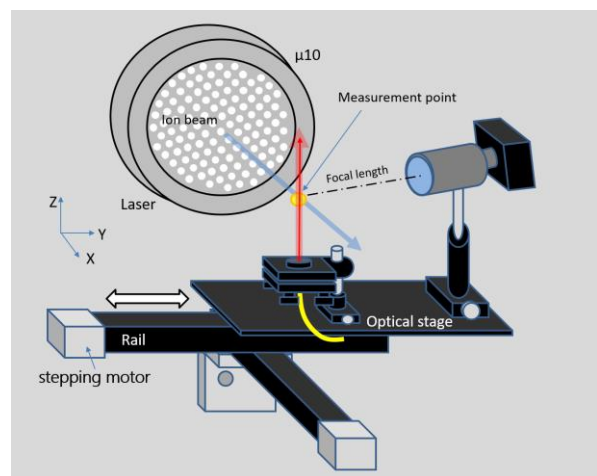


図 2-5 真空チャンバ内の実験系

表 2-2 測定領域

X[mm]	Y[mm]	Z[mm]
120	adjus 表	0

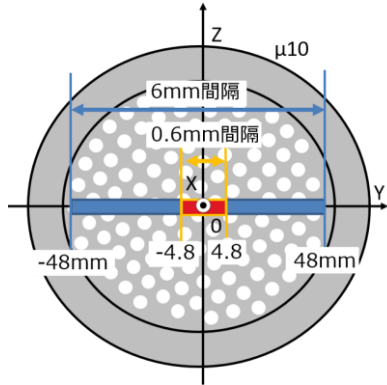


図 2-6 測定領域の概要図

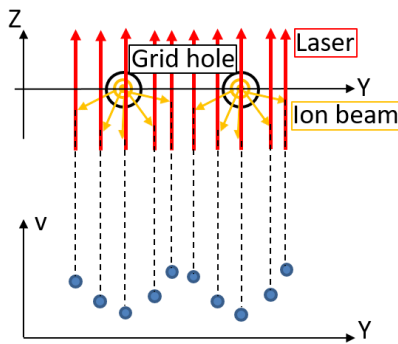


図 2-7 イオンビーム発散による速度分布への影響

3. 実験結果

グリッド中央での蛍光信号取得の結果を図 3-1 に示す。この結果から、波長を掃引することで蛍光強度が変化しており、834.95nm 付近でピークをとっていることがわかる。したがって、本結果より $\mu 10$ プルーム中のイオンを対象としてレーザー誘起蛍光法の適用に成功したことを示している。

また、Y 軸方向に測定点を変化させ、旋回流速度分布を取得した結果を図 3-2 に示す。図 3-2 から Z 軸方向、つまり、旋回方向の速度分布が存在することがわかる。旋回方向は図 3-3 のようにグリッド全体で時計回りに旋回するような分布となることがわかる。さらに、分布の形状は極値を有するような分布になっていることがわかる。また、0.6mm 間隔の微小な測定位置変化における速度変化に関しては、大きな速度変化は見られず、全体の速度分布には影響を与えていないことがわかる。

速度換算に関しては、 $\mu 10$ プルームとキセノン放電管のスペクトルにおいてガウスフィッティングをかけ、ピーク波長を得る。その波長差を用いて式(3)より算出している。

ここで、 $\mu 10$ プルームの蛍光信号において電荷交換衝突が発生しており、プルーム中に低速のキセノンイオンが存在する。したがって、得られるスペクトルは、低速イオンの蛍光信号と測定対象であるグリッドにより加速されたイオンの蛍光信号の重ね合わせとして取得されている。そこで電荷交換衝突による低速イオンの蛍光信号である 834.955nm 付近のピークの影響を除くため、834.95 から 834.96nm のスペクトルを除去し、解析を行っている。

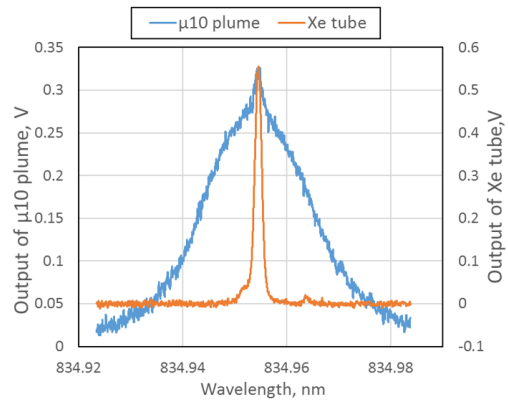


図 3-1 蛍光信号強度取得の結果(グリッド中央部)

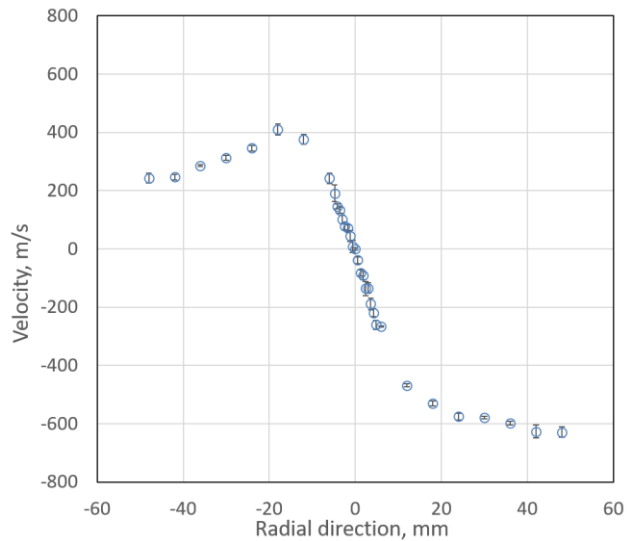


図 3-2 旋回流速度分布の結果

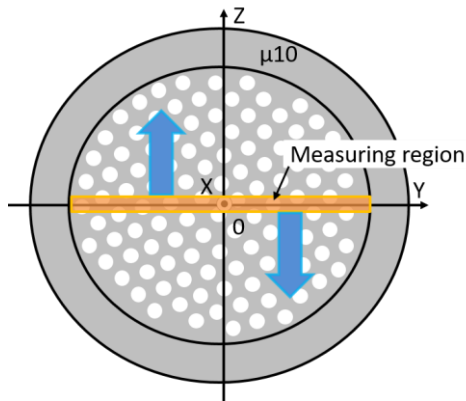


図 3-3 旋回方向の概要図

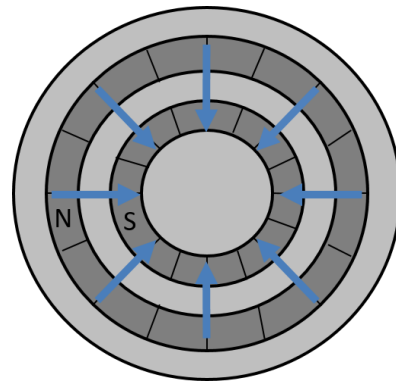


図 4-1 μ10 における磁石配列

4. 考察

図 3-2 における 0.6mm 間隔での微小な測定点変化による速度分布について考察を行う。本実験では測定位置をグリッド下流 120mm に設置しており、測定点では複数のグリッドからのイオンビームが混在することが考えられる。そのため、イオンビームが均一化され、図 2-7 のような速度分布は見られず測定点の微小な変化による影響は見られなかったと考えられる。

図 3.2 における誤差要因に関しては、フィッティング誤差と真空チャンバ内のステージが真空ポンプの影響で振動することが考えられる。得られたスペクトルから速度換算する際にはフィッティングを行っているが、フィッティング誤差が存在する。その誤差が速度誤差として現れたと考えられる。また、本実験ではステージは真空チャンバのフランジに取り付けている。そのため、真空ポンプの振動によりステージも振動することになる。この振動による影響で誤差が生じていることが考えられる。

図 3-2 において、図 3-3 のような時計回りの旋回流速度分布が生じた原因について考察を行う。本研究では、旋回流速度の発生原因として以下の 2 つの要因について検討を行った。

- 1) 漏れ磁場によるローレンツ力
- 2) グリッドミスアライメント

1) 漏れ磁場によるローレンツ力

本研究の対象である $\mu 10$ の磁気回路には図 4-1 に示すように内側/外側の 2 列の磁石が設置されている。この磁気回路による磁場はグリッド下流でも漏れ磁場として存在する。この漏れ磁場とグリッドで加速されたイオンビームによってローレンツ力が発生することが考えられる。また、ローレンツ力により加速されたイオンは時計回りに旋回するように偏向されることが考えられる(図 4-2)。したがって、本実験で得られた旋回方向と一致している。

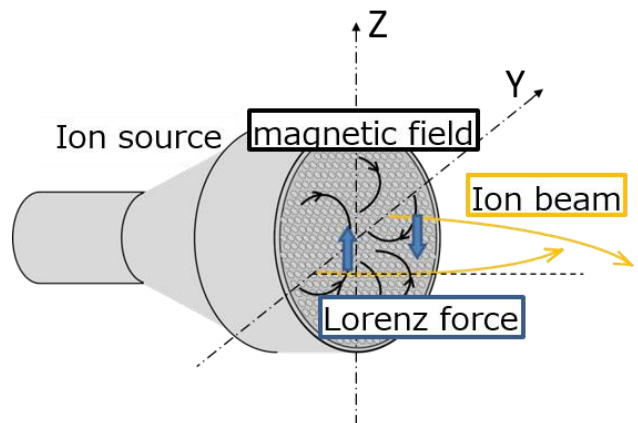


図 4-2 漏れ磁場によるローレンツ力によるイオンビームの偏向の概要図

漏れ磁場とイオンビームで発生するローレンツ力による旋回流速度分布の概算を行う。イオン源からの漏れ磁場によるローレンツ力は、グリッドに平行な磁場とイオン速度から求めることができる。旋回流速度分布の概算は以下の手順で行った(図 4-3)。

- ①各断面のグリッドに平行な磁場を FEMM により計算
- ②各断面で作用するローレンツ力から旋回流速度を算出
- ③測定点までに発生する旋回流速度を足し合わせる

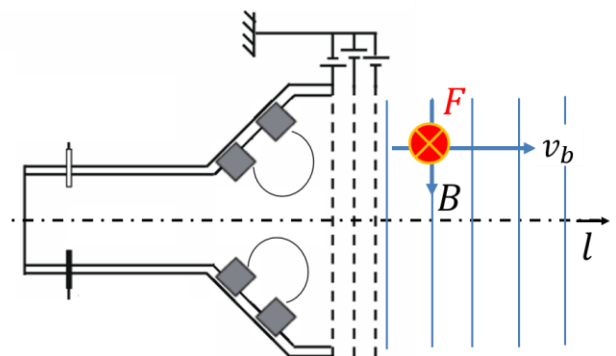


図 4-3 ローレンツ力概算の概要図

図 4-4 に FEMM による磁場解析の結果を示す。ローレンツ力による速度換算は運動方程式より式(4)で表すことができる。

$$m \frac{dv_{\theta}}{dt} \approx q v_b B(t)$$

$$t = \frac{l}{v_b}, dt = \frac{1}{v_b} dl$$

$$dv_{\theta} \approx \frac{qB(l)}{m} dl$$
(4)

図 4-4 の磁場と式(4)を用いてローレンツ力による旋回流速度分布は図 4-5 のようになり、磁場形状の沿うような分布を示し、極値を有するような分布となる。

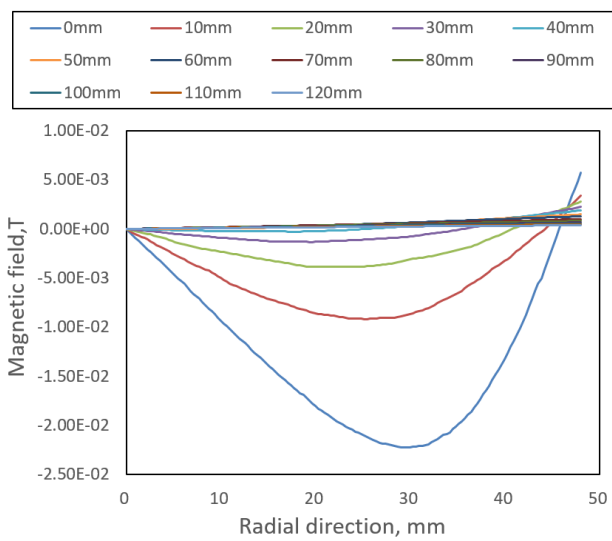


図 4-4 グリッド下流におけるグリッドに平行な磁場強度

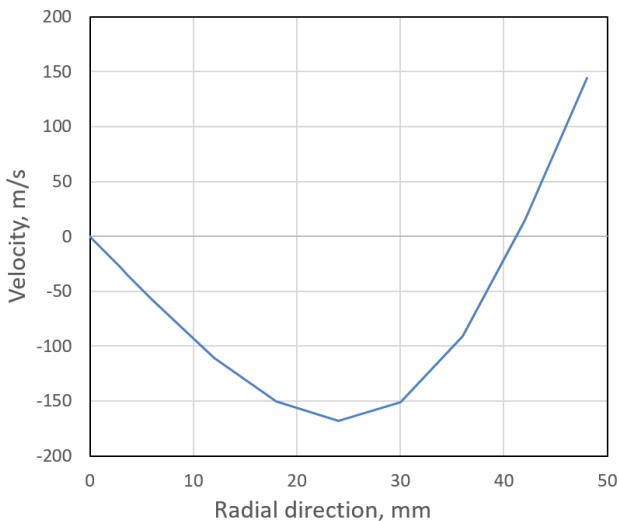


図 4-5 漏れ磁場によるローレンツ力により発生する旋回流速度分布

2)グリッドのミスアライメント

グリッドのずれとイオンビームの偏向角の関係は先行研究がなされており、イオンビームの偏向の概要は図4-6 のようになる⁴⁾。図 4-6 では、アクセラグリッドをビーム中心軸と垂直方向にεだけ下方に動かすと、ビームレットが偏向角βだけ上方に傾く様子を示している。ここで、アクセラグリッドの移動方向とビーム偏向角とが反対になることに注意が必要である。先行研究により得られたグリッドのズレ量とビーム偏向角の関係は以下のような式で表される。

$$\beta = -\frac{\epsilon}{4l_g} \times 1.5$$
(5)

したがって、旋回流速度はビーム偏向角を用いると、

$$v_{\theta} = v_b \sin \beta$$
(6)

と表すことができる。ここで、グリッドのずれはグリッド固定部の寸法公差によるものとし、最大 0.02mm とする。また、本概算では、グリッドのずれは旋回方向のみとし並進ずれはないものとする(図 4-7)。したがって、グリッドのズレ量εは半径方向の距離に比例する。式(6)によりグリッドのミスアライメントによる旋回流速度分布は図 4-8 のようになり、グリッドのズレ量に比例し線形な速度分布を示す。

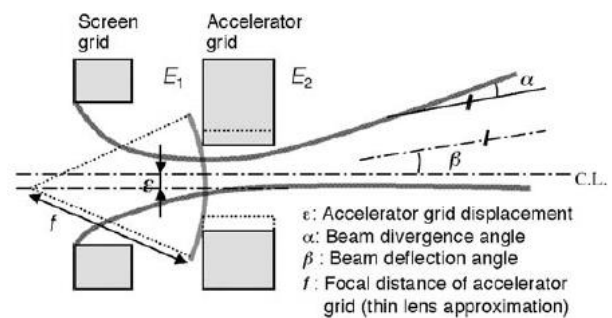


図 4-6 イオンエンジンのビーム偏向原理

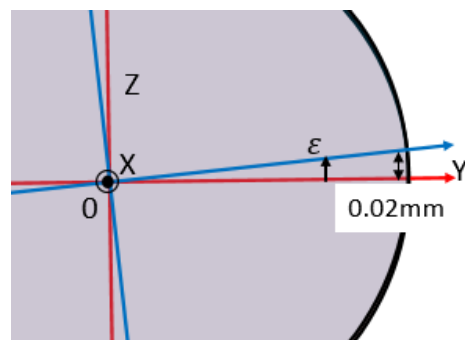


図 4-7 グリッド間のミスアライメント

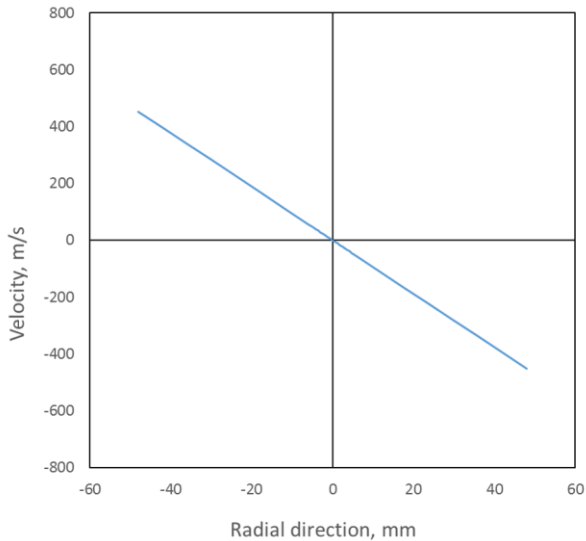


図 4-8 グリッドのミスアライメントによる旋回流速度成分

1)2)により発生する旋回速度分布と実験により得られた旋回速度分布を比較する。概算による結果と実験結果を図 4-9 に示す。概算による結果は、1)と 2)で得られた速度分布の重ね合わせとしている。この結果より、概算結果および実験結果ともに極値を持つような分布となり、両者が同様の傾向を示すことがわかる。したがって、旋回流速度の発生原因として、漏れ磁場によるローレンツ力とグリッドのミスアライメントのビームの偏向の両者が同時に存在することによるものであることが考えられる。

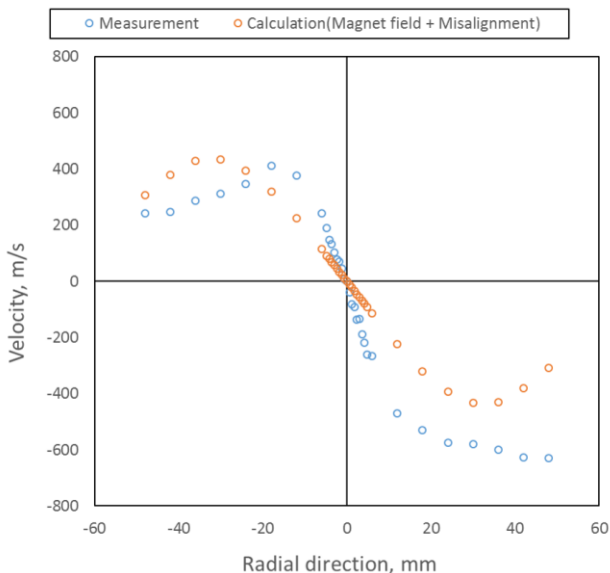


図 4-9 実験結果と概算結果(ローレンツ力+ミスアライメント)

5. 緒言

本研究により得られた結論をいかにまとめる。

- ・マイクロ波放電式イオンスラスタ $\mu 10$ のプルームにおいてレーザ誘起蛍光法を適用した。プルーム中においてキセノンイオンの蛍光信号を検出することを実験的に証明した。
- ・レーザ誘起蛍光法により得られた蛍光信号と基準としたキセノン放電管による蛍光信号とのドップラーシフトからレーザ軸方向、つまり、旋回流成分の速度を計測することに成功した。
- ・複数の測定点において旋回流速度を計測することにより、旋回流速度分布を取得することが可能となり、旋回流は時計回りに旋回していること結果を得た。
- ・旋回流の発生原因として、グリッド下流への漏れ磁場によるローレンツ力やグリッドのミスアライメントによるビームの偏向であると考えられる。

謝辞

本研究は日本学術振興会若手研究 B(26820376)の助成を受けるものである。ここに謝意を記す。

参考文献

- 1) Kozubsky, K., Zhurin, V., Higham, J : Disturbance Torques Generated by the Stationary Plasma Thruster, 29th joint Propulsion Conference, AIAA-93-2394, Monterey, CA, USA, 1993.
- 2) Brophy, J.R. , Garner, C.E. , Mikes, S. : Dawn Ion Propulsion System Initial Checkout after Launch, 44th Joint Propulsion Conference, AIAA-2008-4917, 2008, Hartford, Connecticut, USA, 2008.
- 3) 細田聡, 國中均 : イオンエンジンによる小惑星探査機「はやぶさ」の帰還運用, J. Plasma Fusion Res. , Vol. 86, No.5, pp282-292, 2010.
- 4) 大川恭志, 早川幸男, 宮崎勝弘, 北村正政, ”ビーム偏向によるイオンエンジンの推力ベクトル制御”