

マイクロ波放電式イオンスラスタのイオン旋回流に関する研究

Ion azimuthal velocity of Microwave Discharge Ion Thruster

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

○Yusuke Yamashita (The University of Tokyo)・Ryudo Tsukizaki (JAXA),
Yuta Yamamoto (Shizuoka University)・Daiki Koda・Kazutaka Nishiyama・Hitoshi Kuninaka (JAXA)

Abstract (概要)

Through space operation of "Hayabusa", it was found that the ion engine produces roll torque around the central axis. In order to reveal physical phenomena that generates roll torque, ion azimuthal velocity is measured by using the laser induced fluorescence spectroscopy. Moreover, we calculate the influence of the grid misalignment and the Lorentz force generated by the magnetic field leaked from discharge chamber due to investigate inside ion azimuthal velocity. It was thought that influence of the grid misalignment was large in the past. However, this research reveals that the influence of inside magnetic field is main factor of the roll torque.

記号の説明

V : 速度
 c : 光速
 λ_0 : 励起波長
 $\Delta\lambda$: 波長のシフト量
 θ : 粒子の速度方向とレーザー光のなす角
 f : 変調周波数
 V : 速度
 c : 光速

1. はじめに

1.1 研究背景・目的

イオンエンジンは電気推進機の一つであり、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。JAXA 宇宙科学研究所が開発したマイクロ波放電式イオンエンジン $\mu 10$ は、推進剤をマイクロ波放電により加熱・電離させ、高電圧が印加されたグリッド状の電極を用いて加速噴射させることで推力を発生している。

マイクロ波放電式イオンエンジンのみならず、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が推進方向のみに噴射されるのではなく、推進方向軸に対しトルクを発生させていること

が判明した^{1,2,3}。このトルクは「ロールトルク」と呼ばれ、従来の地上試験では確認できないほど弱く、宇宙運用を通じて初めて観測された。特に、小惑星探査機「はやぶさ」やNASAの「Deep Space1」や「Dawn」などの新宇宙探査機では、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いるため、ロ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ている。実際の宇宙運用においては、化学スラスタやリアクション・ホイールによりアンローディングされており、電気推進機の大きな制約となっている。イオンエンジン以外の電気推進機のロールトルクの地上環境下での研究は、2010年にアメリカ空軍の研究チームによりホールスラスタでイオンの旋回速度が変化していることが報告されている⁴。また、フランスの研究チームが中和器によってイオンの旋回速度が変化していることを報告している⁵。イオンエンジンにおけるロールトルクの発生原因は、以下の要素に分けることができる。

- (1) イオンエンジン内部のドリフト
- (2) グリッドのミスアライメント
- (3) 漏れ磁場によるローレンツ力
- (4) 中和器によるビームの偏向

本研究はイオンエンジンにおけるロールトルク解明に向けた実験的研究である。このロールトルクは、数 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ と直接計測が難しい³⁾。そこで本研究では、旋回流速の計測のためにレーザー誘起蛍光法をマイクロ波放電式イオンエンジン $\mu 10$ のプルーム中に適用し、蛍光の取得を試みた。さらにグリッドのミスアライメントと漏れ磁場の影響を数値計算によって、計算し実験結果との比較を行った。

2. 実験手法

2.1 レーザー誘起蛍光法

レーザー誘起蛍光法では、可変波長レーザー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発生させることにより、粒子がレーザー光のエネルギーを受けて上準位に励起される。その後、再び電磁波を放出して下準位へ遷移する。この放出電磁波を蛍光と呼ぶ。この誘起蛍光強度の測定を行い、適切な方法で光学系を校正すれば、レーザー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。

レーザー誘起蛍光法において対象粒子が運動している場合、その蛍光信号の周波数がシフトするドップラー効果が発生する。その他に自然幅など蛍光信号の広がりを出す効果は複数存在するが、ドップラー効果に比べて無視できる^{6,7,8,9)}。粒子の速度と波長の変化の関係を式(1)に示す。

$$v = \frac{-c \Delta \lambda}{\lambda_0} \quad (1)$$

本研究では、対象であるマイクロ波放電式イオンエンジンの波長のシフト量を求めるための基準として、キセノン放電管のキセノンイオンの蛍光信号取得を行う。この両者を同時に行うことで、ドップラーシフト量を算出することができ、旋回速度を求めることができる。

2.2 測定対象

本研究では、XeIIの複数の準安定準位の中で、 $5p^4(^3P_2)5d^2[4]7/2$ の準安定順位から $5p^4(^3P_2)6p^2[3]^0 5/2$ の順位へ834.724nmの半導体レーザーを用いて励起させる。その後、 $5p^4(^3P_2)6p^2[3]^0 5/2$ から $5p^4(^3P_2)6s^2[2]3/2$ の準位への541.915nmの蛍光を測定する。このXeIIの準安定準位に対しては、電気推進機にレーザー誘起蛍光法が適用された例^{10,11)}がある。使用する半導体レーザーは、比較的安価で入手可能であり、取扱いも容易である。

2.3 実験装置

本研究の対象としているマイクロ波放電式イオン

エンジン $\mu 10$ の作動条件を表1に示す。

表1 $\mu 10$ の作動条件

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

図1に本研究で使用したレーザー誘起蛍光法の実験の概要図を示す。半導体レーザー(DL100)から出力されたレーザー光は、増幅器(BoosTA)により増幅される。このとき、半導体レーザーと増幅器の偏光方向が90度ずれている為、偏光子を用いて偏光方向を変えている。増幅されたレーザー光は、ビームスプリッターにより分割され、それぞれ真空チャンバー、波長計、放電管に導入される。真空チャンバー内へ導入する際は、シングルモードの光ファイバで導入している。発生した蛍光信号は、2枚の対物レンズと蛍光波長付近の $542 \pm 2\text{nm}$ の光のみを通すバンドパスフィルターを通じてフォトマルに集光される。その集光された蛍光信号は、フォトマルによって増幅される。増幅された信号は、ロックインアンプに導入される。参照周波数用に設置されたチョッパーの参照周波数を用いてノイズの除去を行い、オムニエースへと記録される。

チャンバー内にはステージを設置し、その上にレーザーの出射口と集光系を設置している。このステージは可変式であるので、このステージを動かすことで、グリッド全体の旋回速度分布を得ることができる。

測定点は、0mmから $\pm 48\text{mm}$ までの範囲を6mm間隔と、0.6mm間隔の2種類で行った。6mm間隔の実験では、グリッドの全体の速度分布を得るために行い、0.6mm間隔は加速されたイオンがビーム軌道の影響を受けると考えられたためにその検証を行う目的で行った。

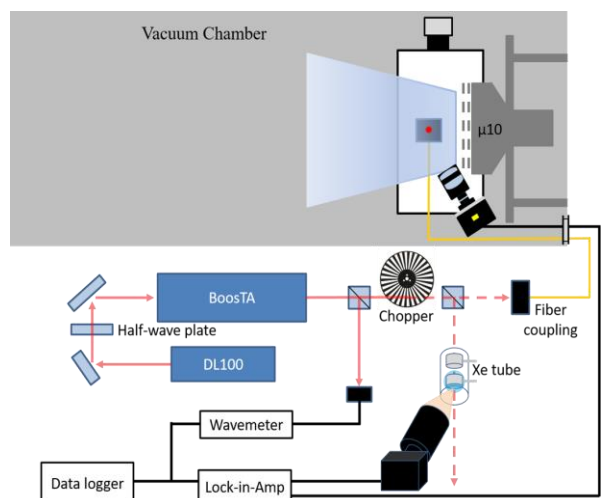


図1 マイクロ波放電式イオンエンジンへのレーザー誘起蛍光法の適用

3. 実験結果

例として、中心部での $\mu 10$ と Xe 放電管の蛍光波長の結果を図 2 に示す。

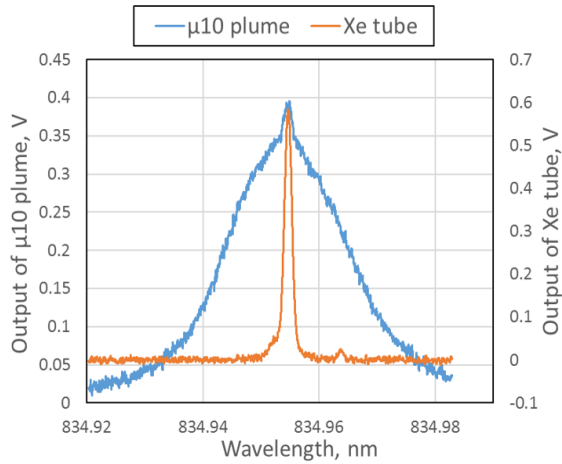


図 2 $\mu 10$ プルーム(青)と Xe 放電管(オレンジ)における蛍光信号の結果

図 2 を見ると、ある波長で蛍光信号がピークを取ることが分かる。 $\mu 10$ プルームの 834.95~834.96 nm あたりが存在するピークは、CEX(電荷交換衝突)によるものである。したがって、ここでは低速イオンの蛍光とグリッドによって加速されたイオンの蛍光の重ね合わせである。そこで、この付近の蛍光を除去し、ガウシアンフィッティングすることでピーク波長を算出している。また、キセノン放電管の蛍光信号もガウシアンフィッティングを行い、そのピーク波長のずれから回転速度を導出することができる。

グリッドの各点で、蛍光信号を取得することで、グリッド全体の回転速度分布を得ることができる。その結果を図 3 に示す。

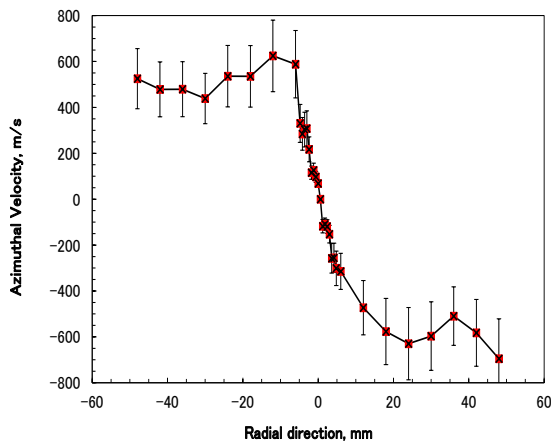


図 3 レーザー誘起蛍光法によるイオンエンジン回転速度分布の測定結果

図 3 の結果より、 $\mu 10$ のプルームの回転速度の分布は、中心部に対して概ね対称となっていることが分かる。また、本研究では複数回データ取得を行ったが、図 3 に示すように誤差は約 25%程度に収まる結果となった。

4. 考察

4.1 イオン源外部の影響

この結果を利用して、グリッドのミスアライメントを求める。本研究では、図 3 の結果とは反転した場合の磁性でも回転速度分布を取得している。そこで、この結果と図 3 に示す結果を合わせることで、ミスアライメントの結果を求めることができる。

また、グリッド下流では静電加速されたイオンがイオン源から漏れ出た磁場によって、回転速度を受ける。初期条件は、シース端に入る速度であるボーム速度を代入している。

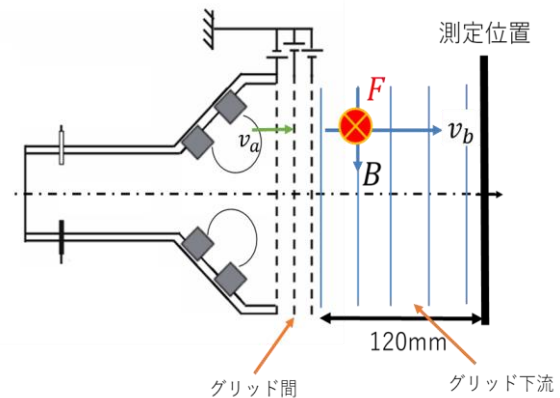


図 4 イオンエンジン放電室内の磁石によるローレンツ力

4.2 イオン源内部の影響

イオン源内部では、イオンは電磁場の影響を受けて、ドリフト運動が発生する。 $\mu 10$ の磁場構造は典型的なミラー磁場なので、湾曲ドリフト、勾配ドリフトの影響が発生する。また、プラズマ内では電位が発生するため、 $E \times B$ ドリフトが発生する。この影響を調べるために、イオン源内部での回転速度分布を求めた。この結果と先ほどのイオン源外部の影響を加えて実験値と比較すると、概ね実験値と計算値が一致するようになった。

5. 結言

本研究より得られた結論を以下にまとめる。

1. エンジンルームにおいて、レーザー誘起蛍光法による蛍光信号の所得に成功した。

2. 蛍光信号をデコンボリューションすることで、-700m/s から 620m/s の旋回流の速度測定を誤差 25%で実現した。
3. 旋回流の主な原因は、グリッドのミスアライメント、漏れ磁場、イオン源内部のドリフトである。

6. 謝 辞

本研究は日本学術振興会若手研究 B (26820376)の助成を受けたものである。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) William A.Hargus,et al. :Near-plume laser-induced fluorescence velocity measurements of a medium power Hall thruster, of Propulsion and Power, Vol.26, No.1,pp.135-141,2010.
- 5) G. Bourgeois, S. Mazouffre, and N. Sadeghi : Unexpected transverse velocity component of Xe⁺ ions near the exit plane of Hall thruster, Phys.Plasmas , 17, 113502, 2010.
- 6) Huang W, Smith T T B, and Gallimore A D : Obtaining Velocity Distribution using a Xenon Ion Line with Unknown Hyperfine Constants, 40th AIAA Plasma-dynamics and Laser Conference June, AIAA-2009-4226, 2009.
- 7) Ngom B B, Smith T B, Haung W and Gallimore A D : Numerical simulation of the Zeeman effect in neutral xenon from NIR diode-laser spectroscopy, Journal of Applied Physics, 104, 2, 023303, 2008.
- 8) Haung W, Gallimore A D and Thurnau A F : Laser-induced Fluorescence Study of Neutral Xenon Flow Evolution inside a 6-kW Hall Thruster, International electric propulsion conference, pp1-16, 2009.
- 9) Smith T B : Deconvolution of ion velocity distributions from laser -induced fluorescence spectra of xenon electrostatic thruster plumes, Physics of plasma, Ph.D thesis The university of Michigan, 2003.
- 10) W. A. Hargus Jr and M. A. Cappelli. "Laser-induced fluorescence measurements of velocity within a Hall discharge." Applied Physics B B72, 961-969,2001.
- 11) D. H. Manzella. "Stationary plasma thruster ion velocity distribution." In Proceedings of the 30th Joint Propulsion Conference. AIAA-94-3141, June, 1994
- 12) Okawa. Y, Hayakawa. Y, and Kitamura. S : Experiments on Ion Beam Deflection Using Ion Optics with Slit Apertures, Japanese journal of applied physics, 43, pp.1136-1143, 2004.
- 13) Hagg T : Transition Optics for 30 cm Ion Engine Thrust Vector Control International Electric Propulsion Conference ,3016210134, 2001.
- 14) C. Giulio, Tsukizaki. R, Nishiyama. K, and Kuninaka. H : Investigation of the Electron Behavior in ECR Ion Thruster Chamber, 宇宙輸送シンポジウム, STEP-2016-0036.
- 15) Hiramoto. K, Nakagawa. Y, Koizumi. H and Takao. Y : Effects of E × B drift on electron transport across the magnetic field in a miniature microwave discharge neutralizer, Physics of plasma, 24, 6, 064504, 2017.