

マイクロ波放電式イオンエンジン $\mu 10$ における

電場分布と性能の関係

The Relation between Electric Field Distribution and Thrust Performance of Microwave Discharge Ion Engine $\mu 10$

○伊勢俊之, 月崎竜童(東大院), 小泉宏之(東京大学), 西山和孝, 國中均(ISAS/JAXA)

Key Words: EO, electric field, $\mu 10$, microwave

概論

マイクロ波放電式イオンスラスタの内部現象解明のためには、プラズマ生成に直結するスラスタ内部のマイクロ波電場測定が非常に重要である。本研究では電気光学素子ファイバプローブ (EO プローブ) をイオンスラスタの電場測定に適用することを提案した。EO プローブは金属を含まず微小なため、内部状態に擾乱を与えず非破壊で放電室に挿入することが可能である。本研究では (1) EO プローブを用いたビーム加速下のプラズマ中電場測定技術の確立と (2) 未解明現象である高流量時の推力低下メカニズムおよび推進剤投入位置による性能変化メカニズムの解明を目標に研究を行った。電場測定結果は、FDTD 解析結果と一致した。またプローブ挿入によるスラスタへの影響は 8% 以下、加速プラズマ下でのプローブ感度変動は 10% 以下であった。現象解明では中心軸上および ECR 領域の電場分布を測定し考察を行った。その結果、導波管投入の際、高流量時に導波管内でマイクロ波の反射が起こり、電子加熱が行われる ECR 領域の電場強度が低下することがわかった。また推進剤を放電室より投入することは導波管内で反射が起きる流量をより高流量側へシフトさせる効果があり、その結果 ECR 領域での電場強度が最大になる流量がより高流量側へシフトし、推力増強につながったことがわかった。

1. 序論

マイクロ波放電式イオンエンジン $\mu 10$ は小惑星探査機はやぶさのミッションを通じて 4 機累計約 40000 時間の宇宙作動を達成し、実践的なイオンエンジンとして確立された^[1]。しかし開発段階において実験的に最適化されたエンジンであり、その内部現象は完全には解明されていない。未解明現象の一つとして高流量時のビーム電流の低下が挙げられる。図 1.1 に推進剤を導波管および放電室から投入した際のビーム電流および反射電力と推進剤流量との関係を示す。導波管から推進剤を投入した際、ビーム電流は流量が 2 sccm 以降、推進剤流量を増やしても低下する。また先行研

究により、推進剤を放電室から投入することでビーム電流のピークの位置を高流量側へシフトさせビーム電流を増大できることが示されている^[2]。しかし推進剤投入位置変更による性能変化メカニズムも未だ解明されていない。 $\mu 10$ の内部診断を行い、未解明現象である高流量時のビーム電流低下現象および、推進剤投入位置変更によるビーム電流向上メカニズムを解明することは $\mu 10$ の推力レンジを広げ、新たなイオンスラスタの設計指針を得ることにつながる。特にスラスタ内部のマイクロ波電場分布測定は、プラズマ生成に直接関連するため非常に重要である。先行研究として、西山らは LUXTRON 社製の光ファイバ温度計を

利用した電場プローブを用いて口径が 20 cm のマイクロ波放電式イオンエンジン $\mu 20$ の電場測定を行った³⁾。しかし外径が 1 cm と大きく、加速グリッドの穴を通すことが出来なかった。そのためパンチングメタルを用いた非加速下でのみの測定となった。また中井らは金属プローブを用いて $\mu 20$ の電場測定を行った⁴⁾。しかし金属を含む電場プローブではマイクロ波電場に擾乱を与えてしまうため正確な測定ができなかった。そこで本研究では微小で非金属の電気光学素子ファイバプローブ (EO プローブ) をマイクロ波放電式イオンエンジンの電場測定に適用した。EO プローブを用いる利点は以下の通りである。

1. 誘電体のためマイクロ波電磁場への影響が小さい。
2. 絶縁体のため高電圧プラズマへの近接性が良い。
3. 小型のためグリッド孔からの導入が可能。
4. 小型のため非破壊で高分解能の測定が可能。

本研究ではまず FDTD 法による解析結果と大気下における中心軸上電場測定結果とを比較することで、EO プローブを用いた電場測定の妥当性を検証した。次に冷却システムを構築し、加速プラズマ下での EO プローブの使用を可能にした。またプローブを挿入することによるスラストへの影響を評価するため、中心軸上にプローブを挿入した際のビーム電流および反射電力の変化を測定した。最後にビーム加速下でのエンジン内部のマイクロ波電場分布を測定することで高流量時の推力低下現象および、推進剤投入位置変更による推力向上メカニズムを解明した。

2. 実験装置

2.1 マイクロ波放電式イオンエンジン $\mu 10$

図 2.1 に $\mu 10$ の構成図を示す。 $\mu 10$ はマイクロ波の導波路である導波管、プラズマ生成を担う放電室、生成したプラズマを加速する加速グリッドから構成される。放電室には 2 列の永久磁石列があり、ECR 加熱によりプラズマを生成する。推進剤は導波管および放電室に設けられたガスポートより投入することが出来る。

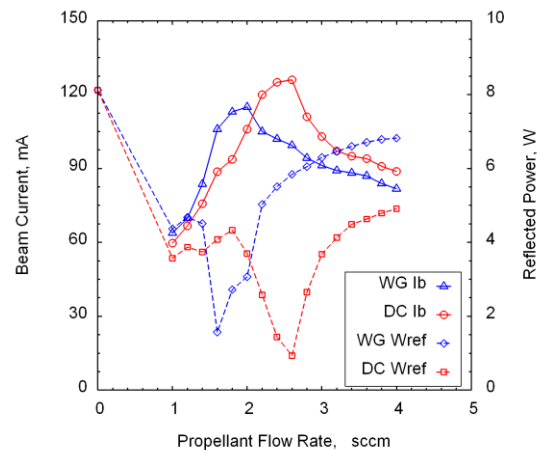


図 1.1 導波管および放電室から推進剤を投入した際のビーム電流及び反射電力と推進剤流量との関係。WG:導波管投入, DC:放電室投入, Ib:ビーム電流, Wref:反射電力。導波管投入した際、高流量時にビーム電流が低下する。放電室投入の際、ビーム電流が増加する。

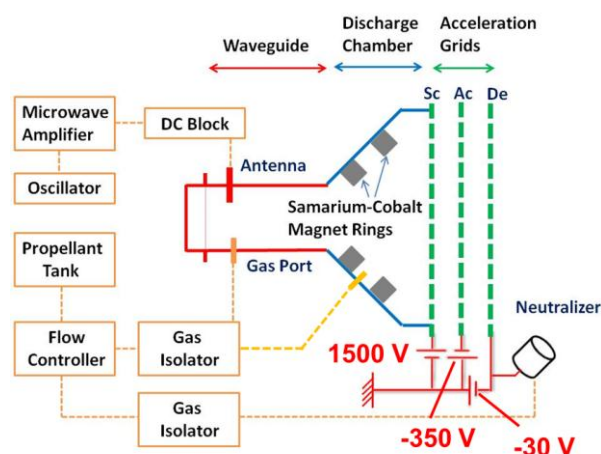


図 2.1 マイクロ波放電式イオンスラスト $\mu 10$

2.2 EO プローブ

図 2.2 に EO プローブの写真を示す⁵⁾。EO プローブは印加された電場強度に比例して屈折率の変化する EO 結晶を利用したプローブである。EO 結晶に電場を印加すると、印加した電場に比例して結晶の屈折率が変化する。屈折率の変化した結晶を光が透過すると透過光の位相が変化する。その際光の位相変化は電場に比例しているため、往復光の位相変化を読み取ることで電場を求めることが出来る。結晶の大きさは 1 mm³ である。

2.3 測定系

図 2.3 に EO プローブを用いた測定系を示す。真空チャンバ内において、EO プローブを直径 3mm の石英ガラス管に挿入し、水平及び回転ステージ上に固定した。ステッピングモーターにより、プローブをグリッド孔からスラスタ内へと遠隔的に挿入した。回転ステージを用いて、EO プローブの検出方向を調整した。

LD から出射された光は偏光子によって直線偏光となり偏光保持ファイバー (PMF) へと入力される。入射光はサーキュレーターを通過してプローブの先端へ到達する。光は EO 結晶を通過し、誘電体反射膜で反射され再び EO 結晶を通過する。その過程で、光の位相は印加された電場に比例して変化する。偏光処理部で偏光の大きさが光の強度に変換される。強度に変換された光は PD へ入力され、電気信号へと変換される。PD の出力はスペクトラムアナライザーを用いて電圧表示される。

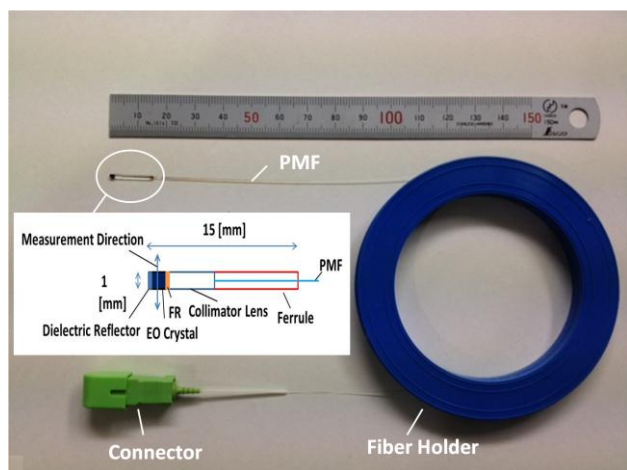


図 2.2 EO プローブ。EO 結晶は印加された電場強度に比例して屈折率が変化する。光は光ファイバを通過して EO 結晶へと入射し、誘電体反射膜により反射される。光は往復の過程で位相が変化する。位相変化を読み取ることで電場強度を測定する。光の進行方向に対して垂直に振動する電場を検知する。

2.4 冷却システム

図 2.4 に冷却システムの構造を示す。冷却システムはプラズマ源に挿入するリジッド部と配管部であるフレキシブル部からなる。リジッド部及びフレキシブル部は、直径 3mm の石英ガラス管、直径 1.8mm のパイレックスガラス管、直径 1/4 in の配管用 PTFE チ

ューブ、直径 1mm の水導入用 PTFE 細管から構成される。PTFE 細管により石英ガラス管内に水を流し込むことでビーム加速下のプラズマ中においてプローブ雰囲気温度を約 25°C に維持した。

3. 実験方法

3.1 FDTD 解析結果との比較

EO プローブによるマイクロ波電場測定の妥当性を検証するため、FDTD 法による $\mu 10$ の電磁場シミュレーションを行い、実験結果と比較した。投入電力は 34W でプラズマなしの解析を行った。

測定では、電場強度が最大になるアンテナ方向と平行に振動する電場を測定した。投入電力 34 W、プラズマなしの状態、中心軸上を測定間隔 1 cm で測定した。

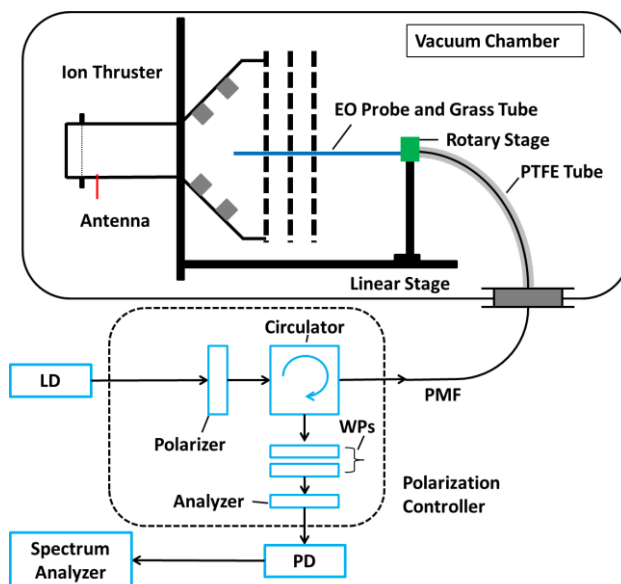


図 2.3 測定系。プローブはグリッド孔を通して遠隔的にスラスタ内に挿入した。LD から出射された光は EO 結晶を通過し位相変化を受け戻ってくる。戻り光は偏光処理部を通過後、位相変化を光強度に変換され、PD に入力する。PD の出力はスペクトラムアナライザーに電圧表示される。

3.2 エンジンへの影響評価

プローブを挿入することによるエンジンへの影響を評価するため、中心軸上にプローブを挿入した際のビーム電流およびマイクロ波反射電力の変化を測定

した。投入マイクロ波電力は 34 W、推進剤流量は 1 sccm である。測定は 1 cm 間隔で行った。

剤流量は、導波管投入時では 1, 2, 3, 4 sccm、放電室投入時は 1, 2, 2.4, 3, 4 sccm で測定した。

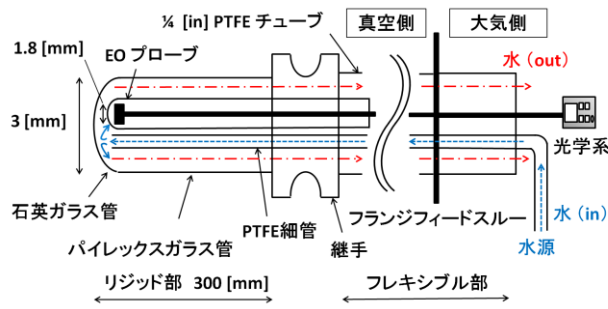


図 2.4 石英ガラス管を用いた冷却管。プラズマ源内に挿入するリジッド部及び配管であるフレキシブル部よりなる。ガラス管内を水冷却することで、加速プラズマ中においてもプローブの雰囲気温度を 25°C に保つことができた。これにより加速プラズマ下においても大気中と同精度の測定が可能になった。

4. 実験結果及び考察

図 4.1 の FDTD 解析との比較結果に注目する。電場強度のエラーバーは ±10% 以下であり、EO プロブの感度変動に起因する。電場分布および電場強度ともエラーバーを含めた実験値は解析値と一致した。これにより分布および絶対値において EO プロブを用いた電場測定の妥当性が示された。

図 4.2 のエンジンへの影響評価結果に注目する。プローブを挿入していない時と比較して、変動量は最大 8% 以内に抑えられていた。つまりプローブによるビーム電流およびの変動率は、プローブの感度変動率 (10%) と同程度で小さかった。

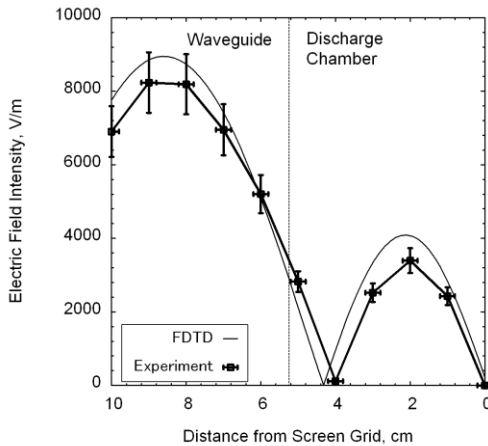


図 4.1 FDTD 解析結果と中心軸上電場測定結果との比較。投入電力 34 W。推進剤流量 0 sccm。アンテナに対して平行に振動する電場を測定している。横軸方向のエラーバーはプローブ初期位置設定の際に生じる実験誤差に起因する。縦軸のエラーバーは、プローブ感度変動およびマイクロ波アンプ出力変動に起因する。

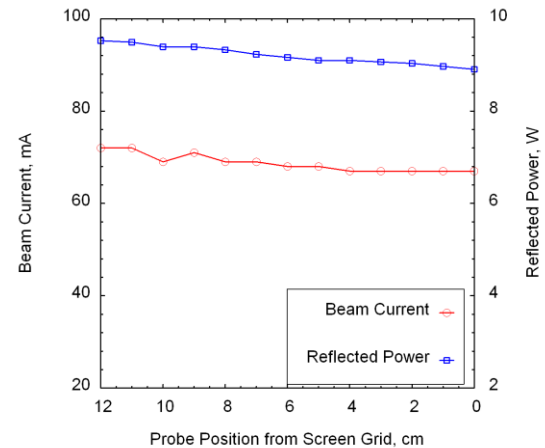


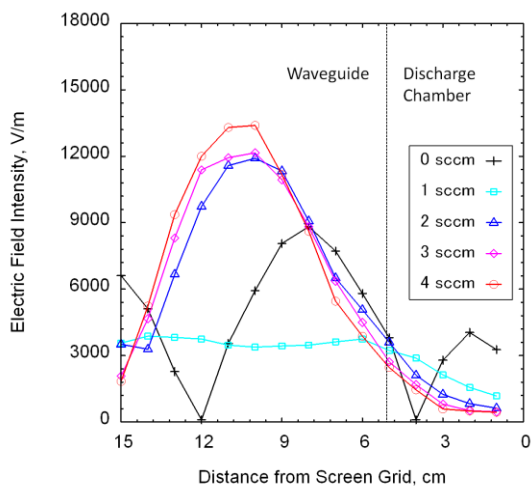
図 4.2 プローブをスラスト内に挿入した際のビーム電流および反射電力の変動量。0 cm の位置がプローブを挿入していない時の状態を示す。投入電力は 34 W、推進剤流量は 1 sccm

3.3 エンジン内電場分布測定

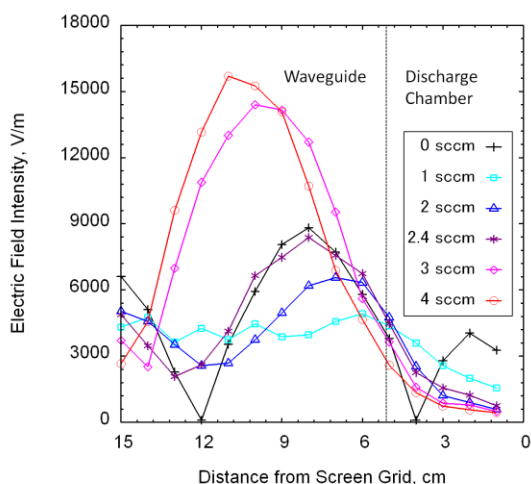
導波管および放電室より推進剤を投入した際のプラズマ中における中心軸上および ECR 領域のマイクロ波電場分布を測定した。測定間隔は 1 cm で行った。電場強度が最大になるアンテナ方向と平行に振動する電場を測定した。マイクロ波投入電力は 34 W。推進

図 4.3 の中心軸上マイクロ波電場分布に注目する。放電室から推進剤を投入した際、ビーム電流がピークとなる 2 sccm 以降に導波管内で強電場が生じた。また流量が増加するに従って導波管内の電場強度は大きくなった。ここで図 1.1 に注目すると、ビーム電流のピーク後に反射電力が増加している。この事実と合わせ、導波管内で反射が起き、流量の増加とともに導波管内の反射が大きくなったと仮定すると実験結果の説明がつく。一方放電室投入時では、導波管内で強

電場が生じる流量が 2 sccm の時から 3 sccm へと高流量側へシフトした。従って、推進剤を放電室から投入することは、導波管内での反射が発生する流量を高流量側へシフトさせる効果があると推察できる。



(a)



(b)

図 4.3 (a) : 導波管導入時の中心軸上電場分布. 推進剤流量は 1, 2, 3, 4 sccm. (b) : 放電室導入時の中心軸上電場分布. 推進剤流量は 1, 2, 2.4, 3, 4 sccm. アンテナ方向と平行に振動する電場を測定していた. 投入電力は 34W. 測定間隔は 1 cm でスクリーングリッドからの距離が 15 cm の位置まで挿入した.

最後に図 4.4 の電子加熱に直接寄与する ECR 領域電場強度に注目し、図 1.1 のビーム電流および反射電力と比較する。ビーム電流が最大になる流量よりも高

流量側、つまりビーム電流が減少する流量では、反射電力の増加とともに電場強度が減少した。これはマイクロ波の反射により、ECR 領域へのマイクロ波エネルギーの伝達が減少したためと仮定すると説明がつく。ECR 領域の電場強度低下は、電子加熱量の低下を意味する。電子加熱量の低下はビーム電流の低下につながる。したがって、ビーム電流がピークとなる流量以降では、マイクロ波の反射が生じることで、ECR 領域の電場強度が低下し、ビーム電流の低下につながったと推察できる。また、放電室から推進剤を投入すると、導波管から投入した時と比べ、ECR 領域の電場強度が最大になる流量がより高流量側にシフトした。このことが放電室投入時のビーム電流増大につながったと考えられる。

5. 結論

EO プロブをビーム加速下におけるマイクロ波電場測定に適用した。その結果、感度変動 10%以下、ビーム電流及び反射電力の変動 8%以下の電場測定技術を確立した。

スラスタ内電場測定により、高流量時に導波管内でマイクロ波の反射が起き、放電室へのエネルギー伝達を妨げていることが分かった。また、推進剤投入位置を変更することで、反射の起きる流量を高流量側へシフトできることが分かった。

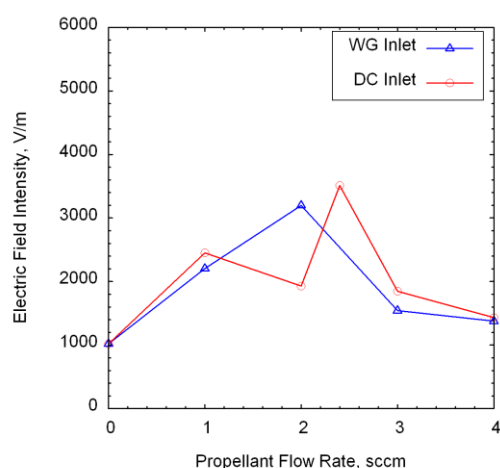


図 4.4 導波管投入 (WG inlet) および放電室投入 (YK inlet) 時の ECR 領域における推進剤流量と放電室内電場分布. マイクロ波投入電力は 34 W.

参考文献

- [1] H.Kuninaka,, S.Satori. “Development and demonstration of cathode-less electron cyclotron resonance ion thruster.” *Journal of Propulsion and Power* **14** (1998), pp 1022-1026
- [2] K. Nishiyama., S. Hosoda., M. Usui., R. Tsukizaki., H. Hayashi., Y. Shimizu., and H. Kuninaka., : Feasibility Study on Performance Enhancement Options for ECR Ion Thruster μ 10, *Trans. JSASS SpaceTech. Japan*, **7** (2009), pp.Pb_113-Pb_118.
- [3] 西山和孝. “電子サイクロトロン共鳴型イオンスターの放電プラズマ” 東京大学博士論文, 1998.
- [4] 中井達也, 西山和孝, “マイクロ波放電 型イオンエンジンの電界強度分布計測” 平成 15 年度宇宙輸送シンポジウム.
- [5] H.Togo, N.Shimizu, , T.Nagatsuma. “Near-Field Mapping System Using Fiber-Based Electro-Optic Probe for Specific Absorption Rate Measurement.” *IEICE Trans. Electron* **90-C**, (2007), pp 436-442.