

# 高密度ヘリコンプラズマの無電極加速と特性評価

石井 大樹\* 勅使河原 直人\* 篠原 俊二郎 桑原 大介

藤埜 弘昌 早稲田 真平 三塩 晃 (東京農工大学)

山形 幸彦 (九州大学)

## 1. 緒言

現在、深宇宙探査ミッションの高度化に伴い、このミッションの推進機には更なる高効率・長寿命化が求められている。従来のホールスラスタ・イオンエンジン等の有電極放電推進法<sup>[1]</sup>は、プラズマと電極間での相互作用があるため、電極の損耗が起き、寿命面で制約が生じる。これを解決するために有望視されているのが、HEAT (Helicon electrodeless advanced thruster) プロジェクト<sup>[2]</sup>に代表されるプラズマと電極が非接触である完全無電極推進法である。本研究室で提案するヘリコンプラズマスラスタでは、プラズマ生成にヘリコンプラズマ源<sup>[3]</sup> (高電離・高密度)、加速部で回転磁場<sup>[4]</sup> (RMF: Rotating Magnetic Field) を用いる。しかしながら、排出するプラズマ流の測定 (特に絶対測定) は未だ不十分であり、生成・推進方法の開発と共に、高精度測定法の確立が望まれる。

## 2. 研究目的

RMF による加速には、回転磁場がプラズマ中へ浸透する必要がある。ヘリコンプラズマの生成と加速には種々の可変パラメータがあり、それらの値は実際運用する際に現実的な値であることが望ましい。

RMF のプラズマ中への浸透度の測定の目的は、さまざまな条件下における測定で、現実的な実験可能な条件を探ることである。これより得られた実験条件でプラズマ生成・加速を行い推力の向上を目指す。

これまで、本研究室ではプローブや分光器等を用いてプラズマ計測を行ってきた。しかし、それぞれの方法には測定対象と接触 (擾乱あり)、比例定数による誤差要因や線積分等の測定法上、解決が難しい課題があった。それに対してレーザー誘起蛍光法 (LIF 法) は非接触計測であること (プラズマに擾乱を与えないこと) や時間・空間分解能が高いという特徴を持つため、無電極推進法の原理実証に有効であると考えている。

## 3. 理論

### 3.1 RMF による推力発生原理

以下の図 1 に加速概略図を示す。二対の対向コイルに位相差 90 度の電流を流すことで回転磁場  $B_{\omega}$  が発生する。磁場の回転角周波数  $\omega$  を  $\omega_{ci} < \omega < \omega_{ce}$  と設定することで、電子のみが回転し周方向電流  $j_{\theta}$  が発生する。ここで  $\omega_{ci}$ : イオン

サイクロトロン角周波数 [rad/s],  $\omega_{ce}$ : 電子サイクロトロン角周波数 [rad/s] である。周方向電流  $j_{\theta}$  と、外部より印加した発散磁場の径方向成分  $B_r$  との外積方向に、軸方向ローレンツ力  $F_z = j_{\theta} B_r$  が発生し、プラズマは加速できると考えられる。

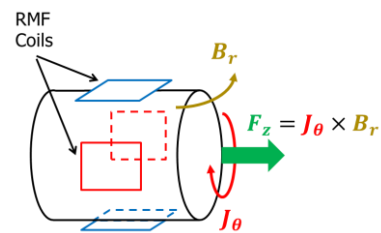


Fig. 1 Schematic drawing of the principle of thrust generation by RMF

### 3.2 LIF 法の原理

LIF 法の原理とイオン温度、相対的イオン密度、プラズマ流速の測定法について述べる。これは準安定準位  $N_1$  に存在する特定粒子をレーザー入射により上準位  $N_2$  へ励起させ、上準位  $N_2$  から下準位  $N_3$  へ遷移する際に発せられる蛍光を計測する方法である (図 2)。本研究では推進剤として Ar ガスを採用しており、Ar II ラインの LIF スキームを図 2 に示す。

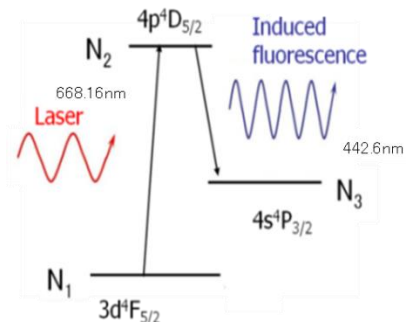


Fig. 2 LIF scheme of Ar ion in vacuum

LIF 法は入射するレーザーの波長を掃引することで、イオン速度分布関数を示す蛍光スペクトルを得る。このスペクトルの半値幅からイオン温度、蛍光スペクトルのドップラーシフトから Ar イオン流速がそれぞれ以下の式から求まる。

$$\Delta\lambda_{FWHM} = 7.7 \times 10^{-5} \lambda_0 \sqrt{T[eV]/A} \quad (1)$$

$$v = c\Delta\lambda/\lambda_0 \quad (2)$$

ただし、 $\Delta\lambda_{FWHM}$  : 半値幅[nm],  $\lambda_0$  : 静止状態の中心波長 [nm],  $T$  : イオン温度[eV],  $A$  : 質量数[-],  $v$  : プラズマ流速 [m/s],  $c$  : 光速[m/s],  $\Delta\lambda$  : ドップラーシフトによる中心波長のずれ[nm]とする. LIF 信号は非常に微弱であるため, 背景光から分離する必要がある. 本研究室では電気光学変調器 (EOM : Electro-Optic Modulator) を用いて, 発振レーザの出力強度を変調し, それに同期する LIF 信号を高速フーリエ変換 (FFT) で抽出する.

#### 4. 実験装置

##### 4.1 プラズマ生成系

本実験は, 直径 45 cm, 長さ 170 cm, 最大磁場~1 kG の LMD: Large Mirror Device 装置<sup>[5]</sup>を使用した. プラズマ生成はシングルループアンテナおよびハーフヘリカルアンテナを用いた.

##### 4.2 RMF 生成コイル

加速は回転磁場を生成できる 2 対のコイルを用いた. RMF を生成するコイルは 2 種類あり, RMF の浸透を測定する場合は,  $7 \times 14$  cm で巻き数 10 のコイル, 流速を測定する場合は,  $23 \times 10$  cm で巻き数 1 のコイルを用いる. RMF の外観を図 3 に示す.



Fig. 3 RMF coils: (a)10 turn, (b)1 turn

##### 4.3 LIF 計測システム

本研究で行った LIF 計測システムを図 4 に示す. さらに, 本計測で使用する半導体レーザ (TOPTICA 社製 TA100) の仕様を表 1 に示す.

本 LIF 法計測システムでは, 測定対象であるプラズマ流に対して, 軸方向(プラズマ流)または周方向からの入射選択ができ, それぞれの方向によるプラズマパラメータを計測できる. (図 5)

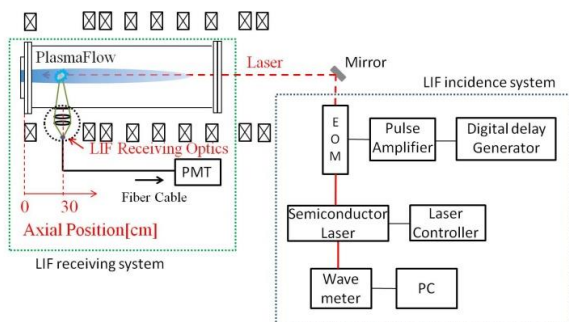


Fig. 4 Laser injection / LIF receiving system

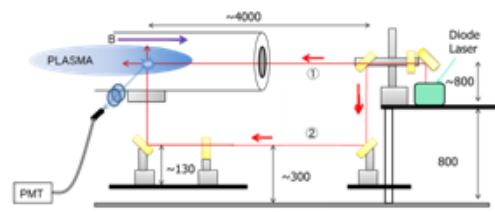


Fig. 5 Laser injection and receiving system(side view)[① axial laser injection ② perpendicular laser injection]

Table 1 Typical specification of TA100 (TOPTICA company)

	オシレータ (LD-0665-0060-1)	アンプ (TA-0670-0500-6)
レーザ出力 最大値	30 mW	500 mW
発振中心波長	668.43 nm	668.43 nm

#### 5. 実験結果と考察

##### 5.1 RMF の浸透の測定結果

回転磁場の浸透は, Milroy によりシミュレーションが行われている<sup>[6]</sup>. シミュレーション上で完全浸透条件と部分浸透条件で, 磁気プローブによる回転磁場の振幅強度の測定結果についてそれぞれ以下の図 6, 図 7 に示す.

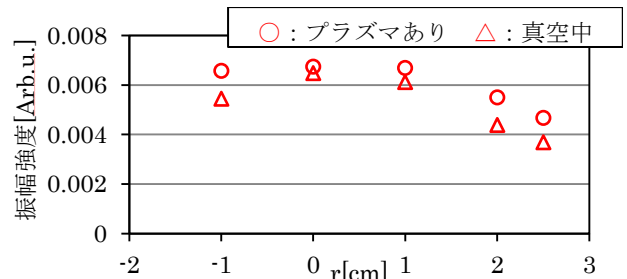


Fig. 6 Radial distributions of the amplitude spectrum (in the full penetration region)

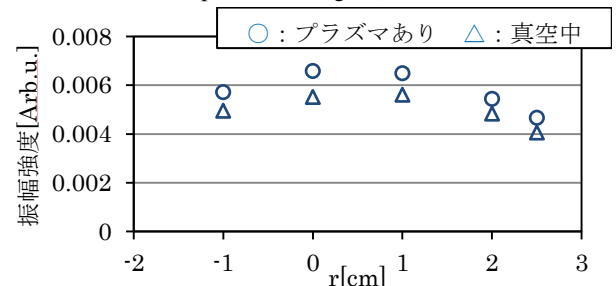


Fig. 7 Radial distributions of the amplitude spectrum (in the partial penetration region)

部分浸透条件の場合, プラズマ中心( $r = 0$ cm)付近では, 真空中のときよりもプラズマがある場合, RMF の振幅強度は小さい値を示すことが考えられる. しかし, 完全浸透条

件・部分浸透条件のどちらの実験条件においても図 6, 図 7 より, プラズマがある場合と, 真空の場合で振幅強度の大きさに大きな違いはない. このことから, シミュレーション上では部分浸透条件でも完全浸透していると考えられる. 実験結果とシミュレーションとの違いの原因として以下の点が挙げられる.

- (1) プラズマ中の中性粒子の衝突周波数の評価に誤差がある点
- (2) Milroy のシミュレーションは RMF コイルの長さを無限としている点
- (3) 本実験ではプラズマ抵抗が等方的であるとしている点
- (4) Milroy の浸透条件式は,  $\lambda \leq 6.5$  の範囲はシミュレーション結果に不明瞭な点がある点

## 5.2 プラズマ流速の測定結果

電磁加速の効果が発生しているかを確認するために, RMF コイルに流れる電流の位相差を変え, そのときのプラズマ流速を, マッハプローブを用いて測定した. 位相差 90 度で加速効果, 270 度で減速効果が期待できる条件である. したがって, 電磁加速効果が発生する場合, それぞれの位相差において流速は増加, 減少すると考えられる.

RF パワーが 1,500 W, 2,800 W のときの, 軸方向プラズマ流速の測定結果をそれぞれ以下の図 8, 図 9 に, イオン飽和電流量  $i_{is}$  の測定結果を図 10, 図 11 に示す.

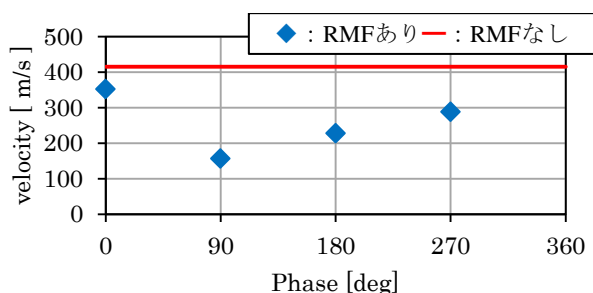


Fig. 8 Phase dependence of velocity (RF power: 1,500 W)

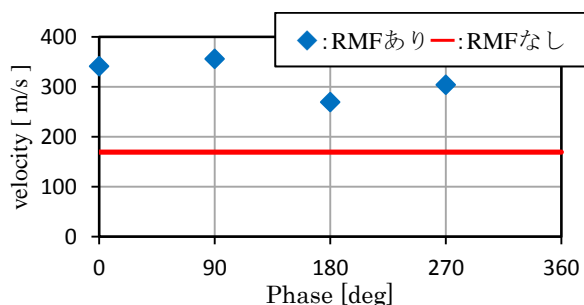


Fig. 9 Phase dependence of velocity (RF power: 2,800 W)

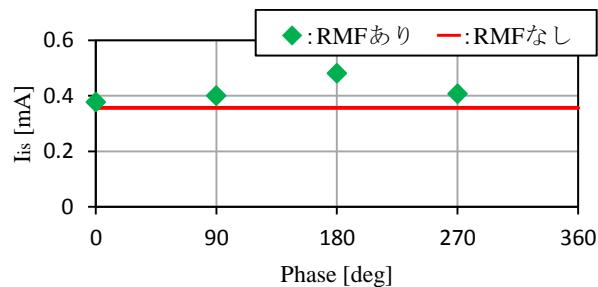


Fig. 10 Phase dependence of ion saturation current (RF power: 1,500 W)

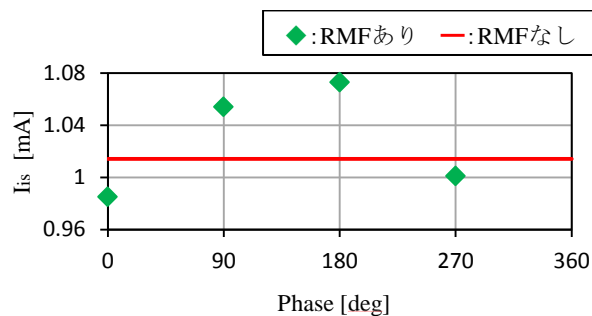


Fig. 11 Phase dependence of ion saturation current (RF power: 2,800 W)

図 8 より, RF パワーが 1,500 W の場合, いずれの位相でも RMF 無しの方が, 流速は大きいことがわかる. 図 9 より, RF パワー 2,800 W で RMF ありの場合, すべての位相差で速度上昇を示していることがわかる. また, 図 10, 図 11 より, ほとんどの条件において, 電子密度に比例するイオン飽和電流が RMF ありの場合で上昇している. 流速の増加は見られず, 密度 (イオン飽和電流) の増加があることから, 現在の運転条件では RMF のパワーは加速ではなく, プラズマ生成のみに寄与している可能性がある.

## 5.3 LIF による実験結果

本研究での実験結果は主に以下である.

- (1) LIF 信号の確認
- (2) LIF スペクトルの計測 (垂直方向入射)
- (3) LIF スペクトルの計測 (軸方向入射)

まず, 垂直方向入射において LIF 信号の有無を確認するために, 電気光学変調器の変調周波数を三種類 (20.16 kHz, 22.5 kHz, 27.6 kHz) でレーザ入射がある場合とない場合で比較を行った. その中の一例を図 12 に示す. 図より, 偏重したレーザの入射に伴ったピーク値の変化がわかるため, これを LIF 信号であると確認した. 他の周波数においても同様の結果が得られた.

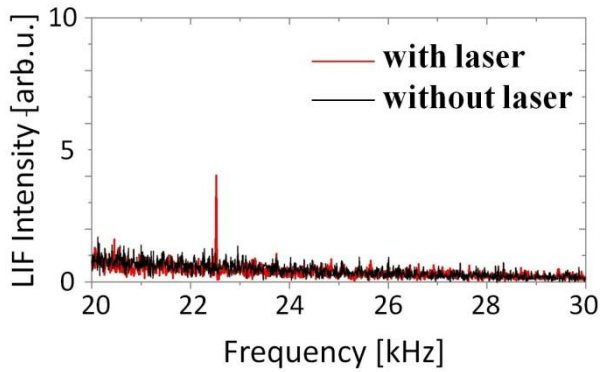


Fig. 12 Power spectrum of LIF signal (EOM  $\approx$  22.5 kHz)

次に、垂直入射における実験条件を表 2 に、LIF スペクトルの測定結果を図 13 に示す。

Table 2 experimental condition

プラズマパワー	2800 W
ガス流量	25 sccm
磁場電流	500 A
計測時間	0~75 ms(全放電時間 75 ms)
各測定点平均	256 回

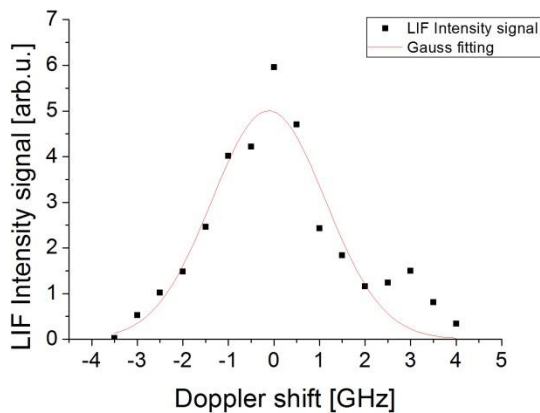


Fig. 13 Measurement result of LIF spectrum  
(RF power: 2,800 W, measurement time: 75 ms,  
frequency: 0.5 GHz)

本計測で得られた LIF スペクトルより半値幅 $\Delta\lambda_{FWHM} = 2.61$  GHz, ピーク波長からのズレ $\Delta\lambda \sim 0.165$  GHz が得られた。つまり、イオン温度  $T \sim 0.22$  eV, プラズマ流速  $v \sim 110$  m/s である。各測定点のバラつきや中心波長以外の小さなピークが生じる要因としては、プラズマ生成に用いる高周波放電によるノイズの影響、プラズマが不安定であるプラズマ放電開始直後も計測に含めている事が挙げられる。

次に軸方向入射における実験条件を表 3 に、LIF スペクトルの測定結果を図 14 に示す。

Table 3 experimental condition

プラズマパワー	2800 W
ガス流量	25 sccm
磁場電流	400 A
計測時間	50~60 ms(全放電時間 75 ms)
各測定点平均	128 回

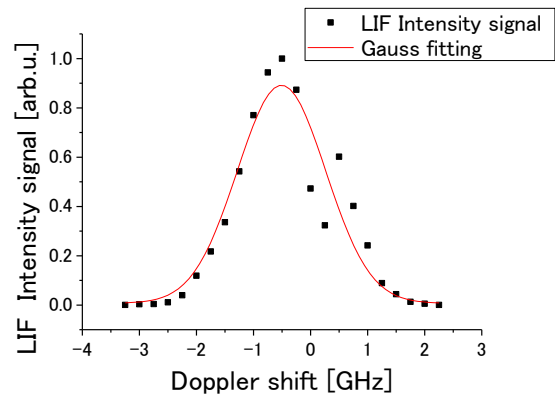


Fig. 14 The measurement result of LIF spectrum  
(RF power: 2,800 W, measurement time: 10 ms  
frequency interval: 0.25 GHz)

本計測で得られたイオン速度分布関数より半値幅 $\Delta\lambda_{FWHM} \approx 1.35$  GHz, ピーク波長からのズレ $\Delta\lambda \sim 0.64$  GHz が得られた。つまり、イオン温度  $T \sim 0.06$  eV, 軸方向プラズマ流速  $v \sim 420$  m/s である。垂直方向入射に比べ、イオン温度が低い要因としては実験条件（生成アンテナ、磁場配位等）が異なる点、計測時間が 10 ms と狭い時間で計測している点が挙げられる。今後は、エラーバーの設定も含め、計測を複数回行う事が必要である。プラズマ流速については、垂直入射に比べドップラーシフトによる効果が表れている。これは現象上、容易に理解できる。ただし、今回は無電極加速機構を作動させずに測定した。

## 6. 結言

本研究で取り扱うプラズマ生成・加速方法は、従来の推進法で問題となるプラズマと電極間の直接的作用による寿命面の制約を解決する方法であり、高効率・長寿命化が期待される。

RMF による加速には、それがプラズマ中に浸透する必要がある。本実験ではその評価を行い、シミュレーション上では部分浸透条件でも、実際には完全に浸透している可能性があることを確認した。RMF のありなしでプラズマ流速の比較を行った。現在の運転条件では、電磁加速の効果はなく、磁場配位や径方向の磁場強度などのパラメータの変更が必要であることがわかった。

本推進法の原理実証のためのプラズマ流速計測として、

有用であるレーザ誘起蛍光 (LIF) 法の計測システム設計・構築に取り組んだ。垂直方向・軸方向入射の両方向での妥当な初期実験結果が得られ、LIF スペクトルの計測システムの開発が完了した。そこから、得られたイオン温度とプラズマ流速は従来の研究結果とほぼ矛盾しない値が得られた。

今後は、受光系の最適化や抵抗回路による周波数応答性の改善による SN 比の向上、マッハプローブやイオンセンチタイププローブによるクロスチェック法の開発、RMF の作動による加速効果の計測を通し、完全無電極推進法の開発を進める。

## 文 献

---

- (1) 栗木恭一・荒川義博：「電気推進ロケット入門」，東京大学出版会，(2003)。
- (2) S. Shinohara, H. Nishida, T. Tanikawa, H. Hada, F. Otsuka, T. Motomura, E. Ohno, I. Funaki, T. Matsuoka, K. P. Shamrai, R. S. Rudenko : IEPC-2011-056, Wiesbaden.
- (3) 篠原俊二郎：「ヘリコンプラズマ源の開発と応用ー広域プラズマ科学への展開」，日本物理学会誌 64, 7 (2009)。
- (4) I. R. Jones : Phys. Plasmas 6, 1950 (1999)。
- (5) S. Shinohara, Y. Miyauchi and Y. Kawai: Plasma. Phys. Control. Fusion 37, 1015 (1995)。
- (6) R. D. Milroy : "A numerical study of rotating magnetic fields as a current drive for field reversed configurations", Phys. Plasmas, 6, 7, 2771(1999)。