

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：14501  
 研究種目：若手研究  
 研究期間：2020～2021  
 課題番号：20K14452  
 研究課題名（和文）先進的無電極プラズマ電磁加速法の電磁加速力に支配的な条件解明に基づく設計理論構築

研究課題名（英文）Design theory construction based on clarification of dominant conditions of electromagnetic plasma acceleration of advanced electrodeless, electromagnetic plasma acceleration

研究代表者  
 古川 武留（Furukawa, Takeru）  
 神戸大学・工学研究科・助教

研究者番号：70845122

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）： $m = 0$ 半周期加速に関して、自作大電流共振インバータ回路と、電磁加速型スラストテストセクションを構築した。電磁加速力の評価に必要な $m = 0$ 加速コイルが誘起する時間変動磁場を小型3軸磁気プローブにより計測し、理論解析と同等の変動磁場を確認した。作成された2次元周方向駆動電流の計算コードを活用し、各条件における周方向電流駆動分布を評価した。回転磁場加速では、特に高い電子密度増加がみられ、周方向駆動電流の効果を上回る反磁性電流による電磁力上昇を得た。加速アンテナ下流部で高いイオン流速上昇も見られ、完全浸透とならない条件においても推力増強可能性を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義  
 提案する2種類の電磁加速型無電極プラズマスラスト実現は、将来型の宇宙開発ミッションで要求される推進機の長寿命化と高推力化の両立を可能にすると考えられる。本研究課題で作製した大電流電源回路は高推力化をはかるものであり、大電流化に伴うプラズマ加速への影響調査、および時空間的に変動する物理挙動の解明は、電気推進分野のみならず、他の学術分野においても新たな知見をもたらす、その産業応用へのきっかけになりうるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In the study of the  $m = 0$  half-cycle plasma acceleration method, a high-current power supply was newly developed to investigate the dependence of the acceleration effect on strength and frequency of time-varying magnetic fields induced by the  $m = 0$  coil. We confirmed the amplitude of the magnetic field increased with increasing the applied current. Furthermore, a two-dimensional numerical analysis revealed the spatial profiles of the azimuthal current driven in the present experimental setup. A high plasma-density increment was obtained by spatial probe measurement in the Rotating Magnetic Field (RMF) plasma acceleration method. Depending on the RMF operational conditions, diamagnetic current effect due to the high-density profile exceeds the original current driving effect using the RMF method. We found the further thrust increment even in a partial penetration condition of the RMF, since high ion-velocity profiles were also obtained in the downstream of the RMF acceleration antenna.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：電気推進機 高周波プラズマ生成  $m = 0$ 半周期加速法 回転磁場加速法 電流電源インバータ回路 静電・電磁プローブ法 発光分光計測

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

電気推進機は、電気エネルギーによりプラズマ生成・加速する推進手法だが、実用電気推進機にはプラズマ加速用電極損耗による推進性能低下や、寿命制限の問題を抱えている。これは推進機高出力化の障害となり、有人火星探査や新宇宙探査、宇宙太陽発電といった将来の宇宙ミッション実現を困難にする要因となる。

推進機寿命問題の解決策として、無電極 RF (radio frequency: 高周波) プラズマスラスタが提案されている。無電極 RF 放電によるプラズマ生成と、磁気ノズル(発散磁場)による熱的プラズマ加速から成る推進法である。プラズマの生成・加速過程で電極がプラズマと接触しないため、次世代型の電気推進機として開発が進められている。しかしながら現状の推進性能は実用レベルに未だ及ばず、今後宇宙開発で主流となる数十 kW 級での運用に向けて、推進性能向上を目的とした研究開発が進められている。

その一つに、無電極 RF スラスタ下流部に追加加速アンテナを設け、無電極でプラズマを電磁加速させる手法が提案されている。 $m = 0$  半周期加速法 ( $m$ : 周方向モード数) は、図 1(a)のように加速アンテナはループ型アンテナで簡便な構造であり、電磁誘導の効果によりプラズマ内部に周方向の電流を誘起する。また図 1(b)に示す回転磁場 (Rotating Magnetic Field) 加速法は、プラズマ内部に回転磁場を駆動することで非線形効果による周方向電流を駆動する。いずれも外部発散磁場の径方向成分に由来する軸方向電磁加速力により、プラズマを軸方向に加速させる。しかしながら、電磁加速効果を最大化する条件、およびこれらスラスタ構造を決定する要因の具体的な解明が課題となっている。

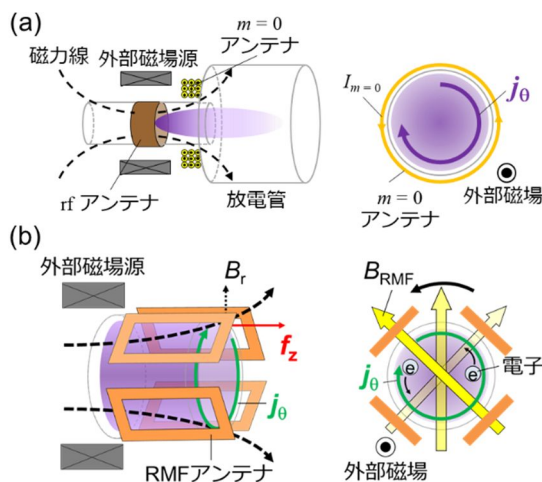


図 1 提案電磁加速型スラスタ概要[(a)  $m = 0$  半周期加速法, (b) RMF 法]。

### 2. 研究の目的

上記 2 つの電磁加速型無電極プラズマスラスタにおける電磁加速力を支配するパラメータを、プラズマ流の時空間分布計測により明らかにし、推進機としての設計理論を構築することを目的とする。数 kW クラスの小型スケールスラスタを構築し、実験的な研究により上記目的を達成する。いずれの加速法は、外部アンテナにより時間変動磁場を誘起する。特に、この時空間分布を変動周波数変化のもとで計測し、その結果から駆動周方向電流を評価する。さらに、磁場の浸透条件のモデル化を目指す。プラズマ流の時空間分布を計測し、周方向電流の時空間分布計測結果と合わせて考察、さらに熱的加速と電磁加速を切り分けて評価することで、電磁加速理論の構築を行う。また、電磁加速型スラスタ適用の前段階として、発散磁場を有する小型カスプ磁場型無電極 RF プラズマスラスタモデルにおけるプラズマ流計測を行い、加速させるターゲットプラズマのプラズマ流特性を明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) $m = 0$ 半周期加速法の電磁加速力増強に向けた大電流電源の作製

加速アンテナ用電流を増強するべく、大電流 (1 kA<sub>pp</sub> 以上) 電源回路を作製する。LC 共振インバータ回路により、設定電流周波数に応じて最適な  $m = 0$  加速駆動条件の導出が可能な電源仕様にする。 $m = 0$  加速アンテナは、図 2 に示す東京農工大所有の宇宙空間模擬真空装置の側面に新規設置の放電テストセクションにて設置する。テストセクションは 2 種類の管径 (i.d.70, 140 mm) をもつ段付き石英管を有し、小径部をスラスタの部と見立てて、プラズマ生成アンテナおよび  $m = 0$  コイルを取り付けている。また外部発散磁場源として電磁石コイルを使用し、パルス駆動により加速実験を行うことができる。

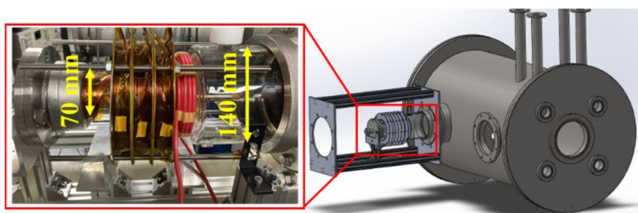


図 2 東京農工大スラスタテストセクション(左). 赤いコイルが  $m = 0$  コイル, その左が発散磁場用電磁石コイル。

また外部発散磁場源として電磁石コイルを使用し、パルス駆動により加速実験を行うことができる。

#### (2) RMF 法の加速効果を決める RMF 駆動パラメータ依存性調査

RMF 加速法において、RMF 磁場の回転周波数条件によってはプラズマ加速効果に加えて高い

プラズマ密度の上昇が得られる条件の存在を先行研究で得ている。プラズマ密度上昇は推力密度の増加にも寄与するため、この密度増加メカニズムを調査し、RMF 加速法における副次的加速効果と電磁加速効果の比較・切り分けを行った。なお当実験は中部大学設置野大型ミラー装置 (Large Mirror Device) にて行った。

### (3) 電磁加速型スラスタ搭載に向けた小型無電極カスプ磁場型スラスタのプラズマ流計測

電磁加速には外部発散磁場の条件が重要となる。小型スラスタにおいて性能向上が期待されるカスプ磁場型スラスタへの適用を検討しているが、これに関して図3に示す東京農工大提案の小型カスプ磁場型 RF プラズマスラスタモデルを使用した。このスラスタモデルは図2の真空チャンバー内部でスラスタ駆動が可能であり、容器内部に設置した駆動型静電プローブ法によるプラズマ流の空間分布計測および電子エネルギー確率関数計測を行い、磁気ノズル下のプラズマ流特性評価を行った。

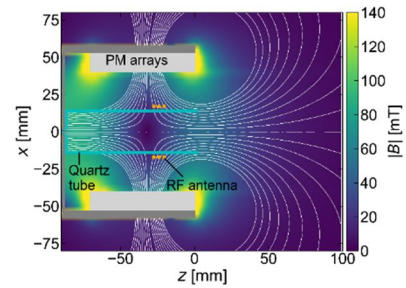


図3 小型カスプ磁場型 RF スラスタの磁場配位。

## 4. 研究成果

### (1) $m=0$ 半周期加速用の大電流電源作製と磁場強度計測

図4に示す  $m=0$  コイル用大電流電源回路を作製した。今回 1.5 kHz ~ 100 kHz の交流周波数帯域で最大振幅 1 kA<sub>pp</sub> の交流電流印加を達成するべく、コンデンサバンクによる充電と高速ゲートドライバ+IGBT による Hブリッジによる LC 共振方式をとっている。設定共振周波数に応じて共振用負荷コンデンサ [図4(a)の  $C_{res}$ ] を変更することで、所望の共振電流駆動を実現する。図4(c)に小型3軸磁気プローブによる変動磁場の計測結果を示す。周波数 1.5 kHz において、 $m=0$  交流電流振幅値に応じた変動磁場振幅の増大を確認した。これより、加速コイルの磁場強度を増強できたと考える。

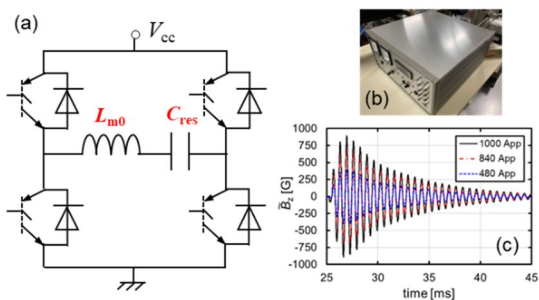


図4 (a)  $m=0$  アンテナ用 Hブリッジ回路, (b) 電源外観, (c) 時間変動磁場強度分布計測例。

今後はこの電源を使用し、誘導電流計測に加えて静電プローブ計測による3次元プラズマ流分布計測を進めることで、プラズマ放電下での  $m=0$  プラズマ加速条件依存性の検証と電磁加速力評価を進めていく。これらに基づき、電磁加速力を予測可能なスケーリング則導出を引き続き行う。

### (2) RMF 加速法における時空間磁場・プラズマパラメータの2次元空間分布計測

静電プローブ法によるプラズマ密度とイオン流速の2次元分布計測結果を図5に示す。RMF アンテナ下流で高いイオン流速の増加がえられた他に、RMF アンテナ領域で空間的なプラズマ密度の高い増加が見られた。これにより、プラズマの圧力勾配に起因する加速力が増大し、RMF 由来の電磁加速効果を上回る条件が存在することも明らかとなった。

RMF 法の電磁加速力を最適化する上で、このプラズマ密度増加に起因する副次的なプラズマ加速効果とのバランス、つまりプラズマ密度(圧力)分布の制御も必要となると考える。今後は、外部発散磁場条件を変化させ、ターゲットプラズマの密度分布を調整した実験研究を行う。

図6には、上述の密度上昇が得られた条件での RMF 法駆動時とプラズマ生成アンテナ単体放電において、総投入電力を等しくした場合のプラズマ密度の軸方向分布比較を示す。RMF アンテナと同位置に設置したシングルループ型生成アンテナ(図6の紫帯)と比較して、RMF 駆動時により高いプラズマ密度がアンテナ下流で得られていることが分かる。この密度分布が下流で得られる理由として、RMF アンテナ投入電力の一部が、プラズマ生成に利用されて

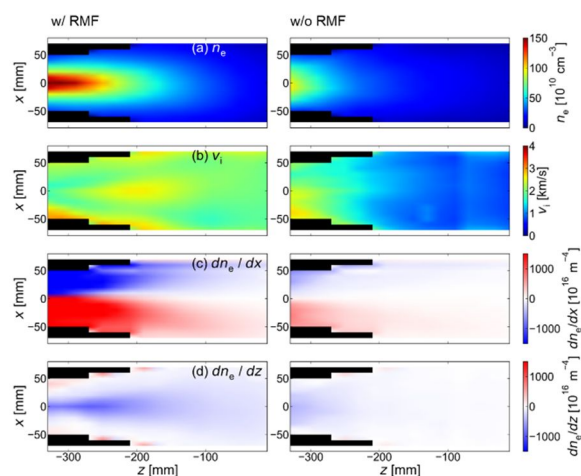


図5 RMF アンテナ近傍における高密度上昇とイオン流速増加の計測結果。密度勾配によるプラズマ加速効果も示唆。

いることが明らかとなった．高密度プラズマ生成が可能なヘリコンプラズマ源特有の波動伝搬現象の傾向も見られており，更なる密度上昇をもたらす可能性があると考えられる．

(3) 小型カスプ磁場型スラスタにおけるプラズマ流計測と電子エネルギー分布関数計測

カスプ磁場形状を有する小型 RF スラスタにおいて，プラズマパラメータ計測を行った結果を図7に示す．図7(b)より，放電管出口からアンテナ設置位置を通る磁力線に沿うプラズマの圧力分布を得た．

また今回周方向電流駆動に関連する電子のふるまいに着目し，電子エネルギー確率関数計測も行った．外部磁場強度に依存した関数形状の変化が得られたが，詳細な電子挙動の解明に未だ至っていない段階にある．特に RMF 加速法の場合，非線形効果により電子電流を周方向に駆動することで電磁加速を発生させるため，今後もプラズマパラメータと併せて，発散磁場領域の電子エネルギーの評価を進めていく．

また，プラズマ生成用 RF 電源とインピーダンス整合器の改良を行った．これにより最大投入電力3 kW での放電実験が可能になり，今後はプラズマ生成側の電力条件を変化させてのプラズマ流調査も行っていく．

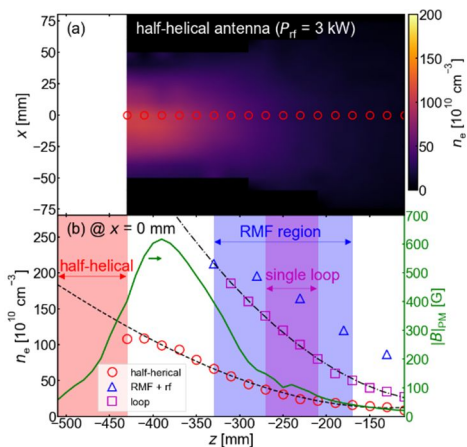


図6 総投入電力を3 kW としたときの軸方向電子密度分布の比較．

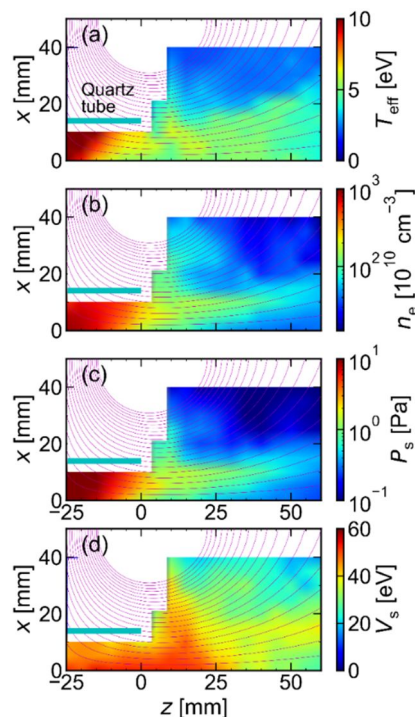


図7 カスプ磁場型スラスタのプラズマパラメータの2次元分布計測．

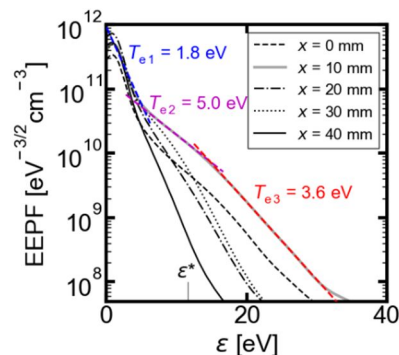


図8 カスプ磁場型スラスタの排気プラズマ流における電子エネルギー確率分布関数計測結果例．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Furukawa T., Yarita Y., Aoyagi H., Nishida H.	4. 巻 131
2. 論文標題 Measurement of plasma flow and electron energy probability function in radio frequency plasma thruster with a magnetic cusp	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 173302 ~ 173302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0071606	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Furukawa T., Kuwahara D., Shinohara S.	4. 巻 28
2. 論文標題 Spatial characteristics of rotating magnetic field (RMF) plasma acceleration method in open magnetic field configuration under partial RMF penetration	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 073507 ~ 073507
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0035383	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Furukawa T., Torin T., Kuwahara D., Nishida H., Shinohara S.
2. 発表標題 Dependence of Electromagnetic Force on Applied Current in Electrodeless Plasma Thruster Using $m = 0$ Half-cycle Acceleration Method
3. 学会等名 33rd ISTS, 10th NSAT & 14th IAA LCPM (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古川武留、東林泰佑、桑原大介、西田浩之、篠原俊二郎
2. 発表標題 $m = 0$ 半周期加速法を使用した無電極電気推進機の電磁加速効果の検証
3. 学会等名 第38回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Furukawa T., Kuwahara D., Shinohara S.
2. 発表標題 Spatial Profiles of Ion Flow Accelerated by Using Electromagnetic Plasma Acceleration Method in Electrodeless RF Plasma Thruster
3. 学会等名 63rd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古川武留、東林泰佑、桑原大介、西田浩之、篠原俊二郎
2. 発表標題 無電極電磁加速型スラスタの電磁加速力増強調査
3. 学会等名 第65回宇宙科学連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古川武留、桑原大介、篠原俊二郎
2. 発表標題 無電極回転磁場法における回転磁場周波数がプラズマ加速に与える影響調査
3. 学会等名 令和2年度 宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古川武留、桑原大介、篠原俊二郎
2. 発表標題 無電極回転磁場法による回転磁場周波数がプラズマ加速に与える影響調査
3. 学会等名 令和2年度 宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古川武留, 桑原大介, 篠原俊二郎
2. 発表標題 無電極回転磁場加速法による電磁加速効果の回転周波数依存性検証
3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Furukawa, D. Kuwahra, and S. Shinohara
2. 発表標題 2D Spatial Profiles of Ion Velocity Distribution Functions in Rotating Magnetic Field Plasma Acceleration Method
3. 学会等名 62nd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Virtual DPP meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Furukawa, D. Kuwahra, and S. Shinohara
2. 発表標題 Experimental Study of Additional Plasma Acceleration Method Using Rotating Magnetic Field in Electrodeless Plasma Propulsion
3. 学会等名 4th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古川武留, 桑原大介, 篠原俊二郎
2. 発表標題 RMF加速法をもちいた無電極RF電気推進のRMF回転周波数依存性調査
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Furukawa, D. Kuwahra, and S. Shinohara
2. 発表標題 Electrodeless Plasma Propulsion with Electromagnetic Acceleration Effect by Using Rotating Magnetic Field Current Drive Method
3. 学会等名 AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	桑原 大介  (Kuwahara Daisuke)		
研究協力者	篠原 俊二郎  (Shinohara Shunjiro)		
研究協力者	西田 浩之  (Nishida Hiroyuki)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------