

ヘリコン源を用いた先進的無電極プラズマロケットエンジンの研究開発

Research and Development of a Novel Electrodeless Plasma Rocket Engine Using a Helicon Source

篠原 俊二郎 (SHINOHARA SHUNJIRO)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授



研究の概要

プラズマロケットエンジンは化学推進ロケットエンジンに比べ燃費が格段に良いが、プラズマと接触する電極群があり、それらの損耗で寿命が決まっていた。本研究では高効率で損耗箇所の無い完全無電極(プラズマとの直接には無接触)で長寿命のロケットエンジンの研究開発を、高密度ヘリコンプラズマを用いた電磁推進法などで試み、工学的体系化を目指すものである。

研究分野：航空宇宙工学、プラズマ科学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：推進・エンジン、プラズマ応用、航空宇宙流体力学、ヘリコン、無電極

1. 研究開始当初の背景

プラズマ推進法は化学推進法より推力は小さいものの、比推力が高く圧倒的に燃費が良い。しかし従来のものはプラズマと電極群との接触による損耗で運転寿命が決まっており、深宇宙探査等への使用に支障があった。

これを克服するためには、高効率の無電極(プラズマとの直接には無接触)プラズマ生成・加速の研究が必要である。しかしながら装置の一部で無電極の例があるが、全て無電極でのプラズマ推進という提案が殆どなく、その研究の進展が望まれていた。

2. 研究の目的

本研究は上記の問題を解決するために、完全無電極で高密度プラズマを生成・加速する研究開発を行い、その工学的体系化を目指すものである。

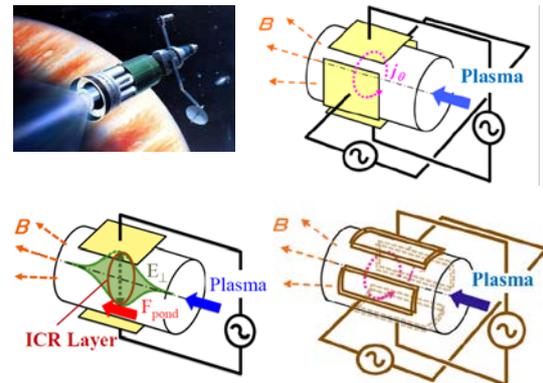
ここで高密度プラズマ生成は、本研究者が世界をリードしているヘリコン波 (10^{13} cm^{-3} にも及ぶ高密度が可能で最近注目を集めている) 放電を用い、プラズマ加速は新提案をしている電磁推進法を主として用いる。

3. 研究の方法

異分野の研究者らで統合組織し、実験と理論・シミュレーションの相互連携研究を、以下の方法で行う。

i) 各種高密度ヘリコンプラズマの高効率生成と機構説明(プラズマ診断開発も含む)、ii) 種々の新提案によるプラズマ加速研究(パラメータサーベイ、異なる推進剤性能評価、設計相似則導出や長時間運転実証を含む)。

図1に、将来の先進無電極ヘリコンプラズマロケットのイメージ例と、典型的な新提案の加速スキームの3例を示す。



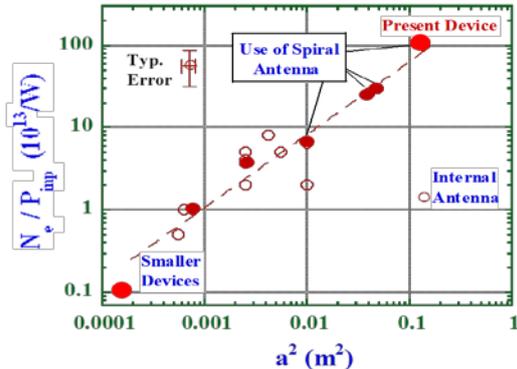
[図1：左上から時計回りに、将来の先進無電極プラズマロケットのイメージ、プラズマ加速提案例として、回転電場 (REF)、回転磁場 (RMF)、ポンドロカ/イオンサイクロトロン共鳴 PM/ICR、による加速の原理図]

4. これまでの成果

高密度ヘリコンプラズマ生成研究

プラズマ推進のソース部は重要であり、高密度ヘリコンプラズマを、種々のスケール(世界最小サイズから最大サイズまで：直径 2 cm-74 cm、軸長 5.5 cm-486 cm、容積 23 cm³-2 m³ や、建設当時は世界最強磁場の 10 kG など)で効率良く生成することに成功した(図2)。また重要なアスペクト比(軸長と直径の比)も、世界最小の 0.075 で、かつ古典拡散と変わらない理想的な閉じ込め(高効率の高密度ヘリコンプラズマ生成)を達成した。

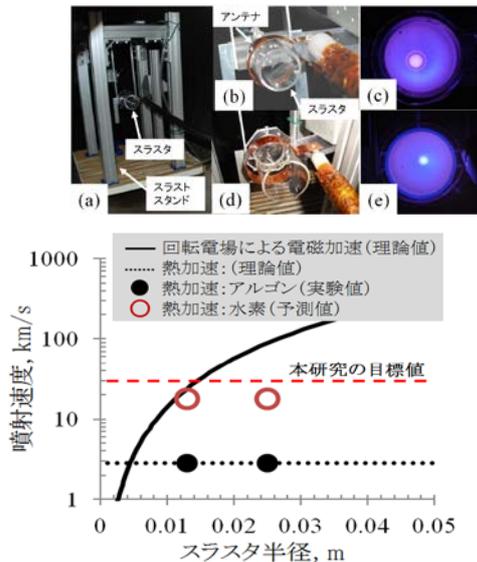
工学的に明快なソリューション (高効率化) となるための波動解析 (モード変換現象や定在波) を進め、装置整備や長時間・高空間分解能となるプラズマ診断開発も行った。



[図 2: 高効率ヘリコンプラズマ生成データ例。赤丸は本研究者の得たもの (N_e : 全電子数、 P_{inp} : 入力高周波パワー、 a : プラズマ半径)]

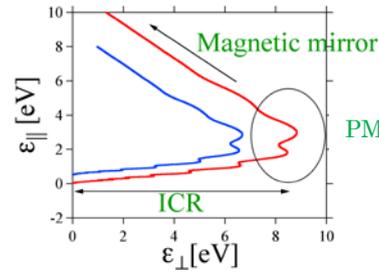
先進ヘリコンプラズマ加速研究

回転電場では、i) 本電磁加速方式の異なる寸法間での推力相似則の構築、ii) プラズマ流速の増加の検証、iii) 実験室モデルスラスタ、推力計測システムの開発と初期測定を行い、電磁加速なし (熱加速) でも高比推力が可能であることが示された (図 3)。



[図 3: (上) 開発したスラスタスタンドとプラズマ光、(下) 理論噴射速度と実験結果 (熱加速) との比較]

回転磁場では、i) 回転磁場の浸透の確認、ii) プラズマ流速の増加の検証、を行った。ポンデロカ/イオンサイクロトロン共鳴では、粒子シミュレーションで双方の効果による加速効率や中性粒子の影響を調べた (図 4)。



[図 4: 粒子エネルギーの変化]

5. 今後の計画

提案した個々のプラズマ加速スキームでの原理実証、相互比較・検討を更に進め、スキーム間で最良の選択を行い、設計相似則の確立、目標パラメータ達成と長時間運転実証へと進める。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

1. 篠原俊二郎、谷川隆夫、K. P. Shamrai、高密度ヘリコン波プラズマの物理現象と工学的応用の研究、平成 22 年度科学技術分野における文部科学大臣表彰科学技術賞 (研究部門)。
2. 篠原俊二郎、ヘリコンプラズマ源の開発と応用、日本物理学会誌、**64**、519-526 (2009)。解説論文 (会誌表紙写真含)
3. S. Shinohara, T. Motomura, K. Tanaka, T. Tanikawa and K. P. Shamrai, Large Area High-Density Helicon Plasma Sources, Plasma Sources Sci. Technol. **19**, 034108-1~7 (2010)。
4. T. Matsuoka, I. Funaki, T. Nakamura, K. Yokoi, H. Nishida, K. P. Shamrai, T. Tanikawa, T. Hada, S. Shinohara, Scaling Laws of Lissajous Acceleration for Electrodeless Helicon Plasma Thruster, Plasma Fus. Res., **6**, 246103-1~4 (2011)。
5. S. Shinohara, H. Nishida, K. Yokoi, T. Nakamura, T. Tanikawa, T. Hada, F. Otsuka, T. Motomura, E. Ohno, I. Funaki, T. Matsuoka, K. P. Shamrai, T. S. Rudenko, Research and Development of Electrodeless Plasma Thrusters Using High-Density Helicon Sources: The Heat Project, 32nd Int. Electric Propulsion Conf., IEPC-2011-056, pp. 1-10 (2011) Wiesbaden, Germany.
6. T. Motomura, S. Shinohara, T. Tanikawa and K. P. Shamrai, Characteristics of Low-Aspect Ratio, Large-Diameter, High-Density Helicon Plasmas with Variable Axial Boundary Conditions, Phys. Plasmas **19**, 043504-1~12 (2012)。

ホームページ等

<http://www.tuat.ac.jp/~sinohara/>