

〈一般研究課題〉 永久磁石による強発散磁場型  
高周波プラズマスラスターの開発  
助成研究者 中部大学 桑原 大介



## 永久磁石による強発散磁場型 高周波プラズマスラスターの開発

桑原 大介  
(中部大学)

### Development of radio-frequency plasma thruster with strong diverging magnetic source using permanent magnet

Daisuke Kuwahara  
(Chubu University)

#### Abstract :

In conventional electric propulsion systems for space applications, the problems of life reduction and thrust limitation due to wear and tear on the plasma generation and acceleration electrodes, which are in contact with the plasma, have been a problem. Radio-frequency plasma thrusters solve these problems by generating plasma using a radio-frequency antenna that is not in contact with the plasma. However, it is difficult to accelerate the plasma by direct electromagnetic and electrostatic forces, and a 2-3 times improvement in thrust and fuel efficiency is required.

This study proposes a high-frequency plasma thruster using a divergent magnetic field generated by powerful permanent magnets, and aims to prepare an experimental environment, including a vacuum vessel, for the fabrication and performance evaluation of the thruster. For the experimental environment, a new vacuum vessel with a diameter of 750 mm and a length of 1,500 mm was constructed. A simple pendulum-type thrust stand was built to evaluate the thrust force of the thruster. Discharge experiments were carried out on the fabricated thruster, and problems such as backflow of plasma exhaust were solved and preparations for future performance improvement experiments were completed.

## 1. はじめに

近年、SpaceXに代表される新興民間企業による宇宙開発事業が本格化しており、人工衛星を用いた全地球的なブロードバンド通信サービス、高感度カメラを搭載した人工衛星による資源探索、高精度な気象予報、自然保護のための森林観測や駐車場監視など、新たな産業が数多く生まれている。

本研究はこれらの産業で用いられる人工衛星の他、「はやぶさ」等の科学探査機の推進機(スラスタ)で採用が進んでいる電気推進機について、現行のイオンエンジンやホールスラスタを凌駕する長寿命・大推力を持ち、さらに高燃費性能な推進機として提案されている「高周波プラズマスラスタ」[1-4]の実現を目指すものである。図1に示す高周波プラズマスラスタは従来の推進機で問題となっているプラズマと接触するプラズマ生成・加速電極の損耗による寿命低減・大推力化が困難という問題を、プラズマと非接触の高周波アンテナでプラズマ生成を行う事で解決しているが、プラズマへの直接的な電磁力・静電力による加速が難しく、推力や燃費性能で2~3倍程度の向上が求められている。本研究ではこれまで研究がなされていなかった永久磁石による強力磁場源を使用した高周波プラズマスラスタの実験的研究を通して性能向上の道を探るものである。

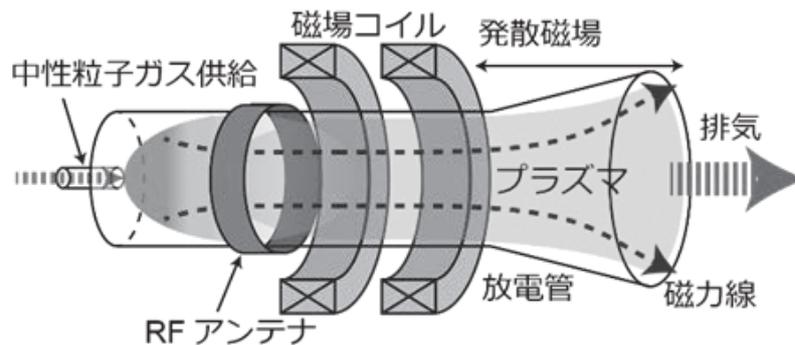


図1. 高周波プラズマスラスタ原理図

## 2. 強力永久磁石を用いた発散磁場型高周波プラズマスラスタ

多くのRFプラズマスラスタの研究では磁場源として、磁場強度や磁力線形状の制御が容易な電磁石を用いている。しかしながらプラズマ損失の主な要因となる放電壁への衝突を防ぐには、強力な軸方向磁場による半径方向拡散抑制が必要であり、強力な磁場を電磁石で生成するためには大型・大重量のコイルや電源装置が必要となるが、宇宙機において重量軽減は大きな要請である。一方、永久磁石は電力を必要とせず、またネオジウム磁石などの希土類磁石は比較的小型・軽量に強力な磁場を生成できる特徴がある。このため、永久磁石による磁場装置を用いたスラスタ研究も行われてきているが、電磁石と違い磁場強度が変更できないことや、永久磁石よりも複雑な磁力線構造となるため磁場設計が難しいこと、強磁場を作る場合は磁石間の吸引・反発力を抑えるための構造が必要と敷居が高く、放電容器内の大半で100 mTを超え、口径100 mm程度のスラスタは研究されていなかった。

本研究は永久磁石型RFプラズマスラスタの推進特性、プラズマ特性を明らかにするため、放電容器内磁場強度100 mT程度、放電容器口径100 mm程度のスラスタに加え、放電実験用真空容器などの実験環境を開発することを目指す。図2に製作した永久磁石型RFプラズマスラスタの磁

場装置、放電容器および高周波アンテナを示す。磁場装置は3つの磁石リングと2つのディスク磁石で構成されている。リング磁石の磁化方向は中心軸側、ディスク磁石の磁化方向は排気方向となっており、円盤磁石の磁力線を石英放電容器の内部に押し込む形の分布をとる。プラズマは磁力線に沿って流れるため、放電容器壁は磁力線に並行するようテーパ形状としている。磁場強度は放電容器内側の上方部で0.4 T、排気端で0.05 Tであり、放電容器内は平均して0.1 T程度の高磁場かつ強力な磁場勾配が形成される。放電容器はコップのような形状の石英製で、上流端は内径80 mm、排気端は内径120 mmとRFプラズマスラスタとしては比較的大口径としている。高周波アンテナはリング磁石2と3の隙間から挿入され、放電容器外側に2巻された単純ループアンテナとしている。なお、推進剤供給については、従来機であれば放電容器上流端の開口部から行うが、本機ではガス供給位置の変化による推進効率変化を評価するため、放電容器排気端からガラス細管を挿入して行う設計である。

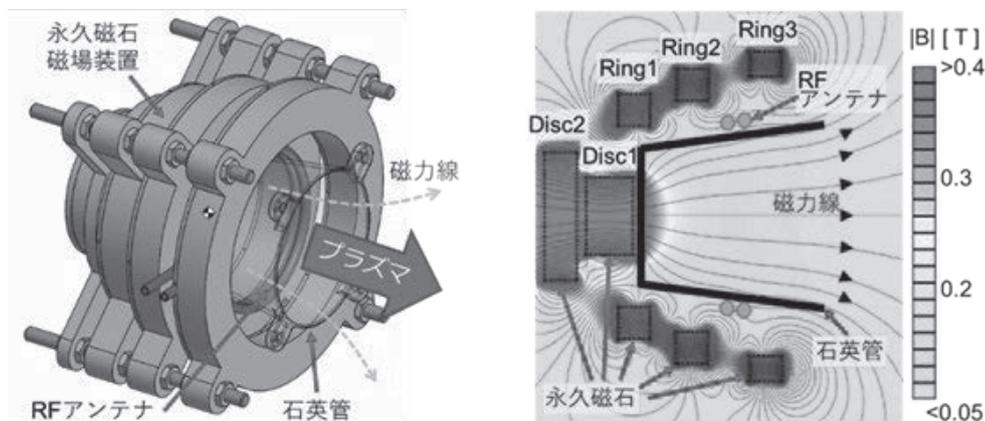


図2. 開発した永久磁石型高周波スラスタと磁場形状

永久磁石装置は3つのリング磁石と2つのディスク磁石で構成されるが、磁化方向が内側のリング磁石は製造が難しいため、リングを45度で8分割したC型磁石を8個組み合わせることでリング磁石を構成している。Fig.3に磁石構造と放電容器、これらの断面図およびリング2用のネオジム磁石を示す。リング磁石、ディスク磁石はネオジム磁石であり、それぞれには吸引・反発の強力な磁気力が作用する。とくにリング磁石を構成するC型分割磁石は同じ極同士で隣接するため、強力な反発力が働く。この反発力を抑えるため、リング毎にアルミ合金製のホルダーで保持し、それぞれのリング、ディスク磁石はFig.2に示されるように4本のM10ステンレスボルトで連結される。

### 3. 電気推進機評価用真空容器

本研究用に新設した真空容器(ChuChamber: Chubu University Vacuum Chamber for Electric Propulsion)を図3に示す内径750 mm、長さ1,500 mmのステンレス製で、本体にはVG300フランジ3箇所、VF150フランジが12箇所あり、スラスタ設置側フランジと後端フランジはVF750フランジとなっている。真空ポンプに排気量2,400 l/sのターボ分子ポンプ1台、ガス供給はAr用100 sccmのマスフローコントローラ、真空計はピラニゲージ(105 ~ 10<sup>-2</sup> Pa)、電離真空計(10<sup>-10</sup> ~ 10<sup>-7</sup> Pa)が設置されている。真空容器内にはM6タップが施されたレールが4本設置されており、3軸電動ステージや様々な機器が設置可能である。スラスタ設置側VF750フランジは角度調整機能を持つ

たレールによるスライド機構の上に設置されている。また、このフランジの真空側には多数M6タップ穴が施されており、これを使ってスラスタを設置する推力スタンド、スラスタ本体、高周波アンテナ、ガス供給系、計測器などが取り付けできるようになっている。この構造によってフランジを開けてスラスタ機構を調整したのち、そのままフランジをスライドさせて真空封止でき、従来の真空容器で難しかった調整と封止の間の位置ずれなどを抑制することが可能となっている。

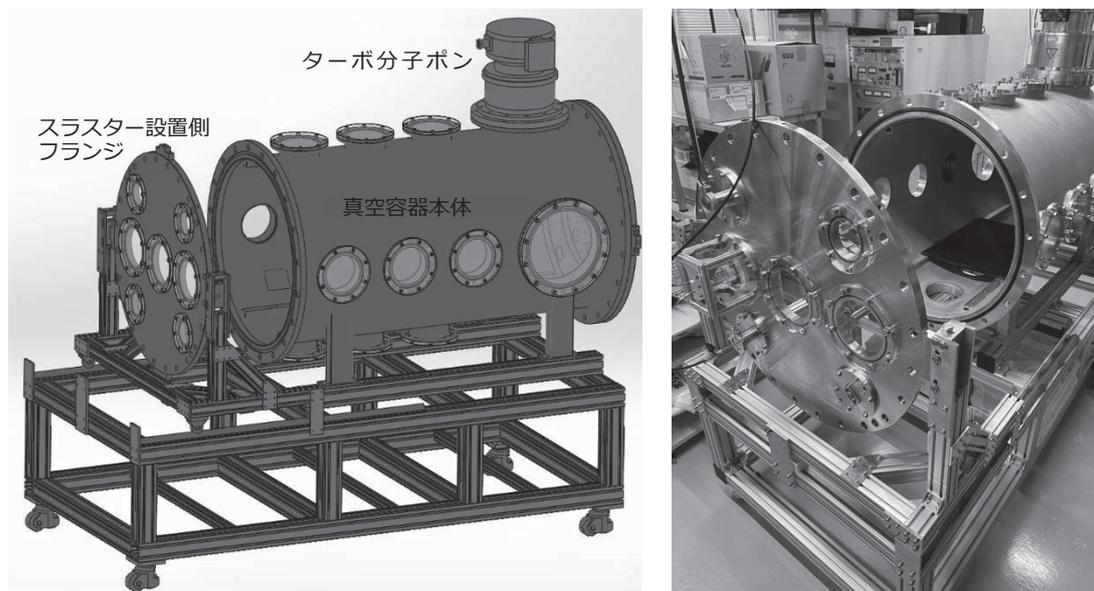


図3. 開発した永久磁石型高周波スラスタと磁場形状

推力計測は振り子型推力スタンドを採用した。この方式は、スラスタを振り子構造に吊るし、推力による振り子の振れから推力算出するものである。図4に真空容器スラスタ設置側フランジに設置された、製作したスラスタおよびスラストスタンドを示す。

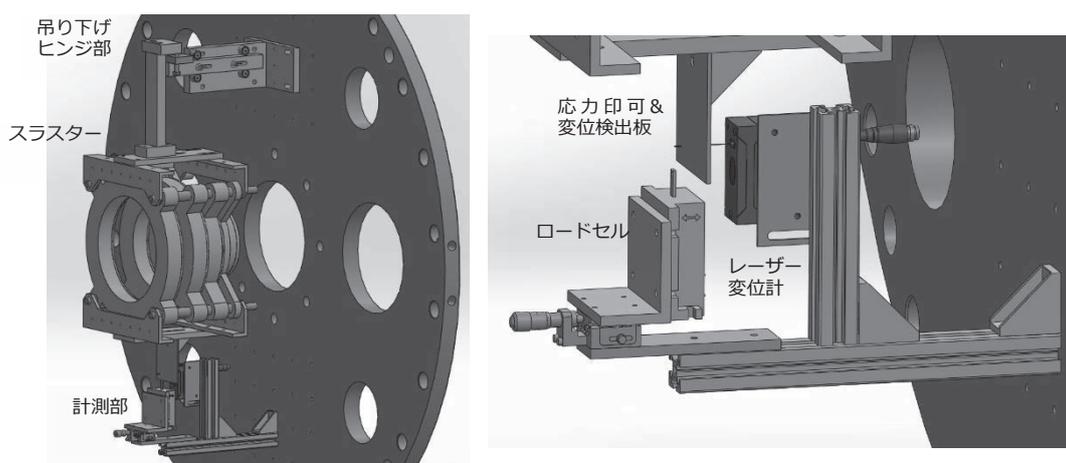


図4. 開発した永久磁石型高周波スラスタと磁場形状

スラスタ設置側フランジには2個のスパイクで振り子を支持する支持台が取り付けられており、振り子はスパイク頂点を結ぶ直線を回転軸に推力で回転振動する。スラスタは同じくスラスタ設置フランジに設置されるRFアンテナと結合するが、真空容器や磁石ホルダーとのクリアラ

ンスは1 mm程度であるため、支持台は左右・上下、軸方向に位置調整機構を有する。また、スラスタを含めた振り子構造は11 kg程度の重量があるため、歪みが発生しないよう位置調整機構に剛性を持たせている。振り子構造はスパイク2個に合致する円錐状の凹みに噛み合う。振り子構造はスラスタと一体化しており、スラスタの軸中心は真空容器軸中心と合致している。スラスタ下部には振り子の振幅を計測するレーザー変位計(計測範囲30 mm, 精度1  $\mu$ m)と、校正用に既知応力を振り子に印可するロードセル(定格100 mN)が設置されている。振り子に働いた応力、すなわちスラスタの推力は回転運動方程式にスラスタを含めた振り子構造の慣性モーメントを入力し、レーザー変位計で振幅を計測することで算出できる。校正のためのロードセルは計測部に加わった応力を電圧で出力するもので、微動ステージでロードセルをスラスタの応力印可板に押し当て、出力電圧から応力を算出し、その際の変位をレーザーセンサーで計測することで推力(トルク)-変位の変換式を得る。

#### 4. 初期放電実験

完成した磁場装置を備えた高周波スラスタを整備した真空容器において放電試験を行った。プラズマ生成高周波は7 MHz、3 kWとし、ガス供給はアルゴンガス 50 sccmとした。図5左に $\Phi$ 110 mm放電管を用いた際のプラズマの様子を示すが、放電容器を出たプラズマが永久磁石リングに逆流している様子が見て取れる。推力は軸方向にプラズマを噴射した際の反力であるため、逆流は性能低下を招くので抑制する必要がある。このため、逆流を抑えるため磁場装置外周部の磁力線からプラズマが流れないように、より小口径の $\Phi$ 60 mm放電管を製作し放電実験を行った。図5右に結果を示すが、逆流を大幅に減少させることに成功した。

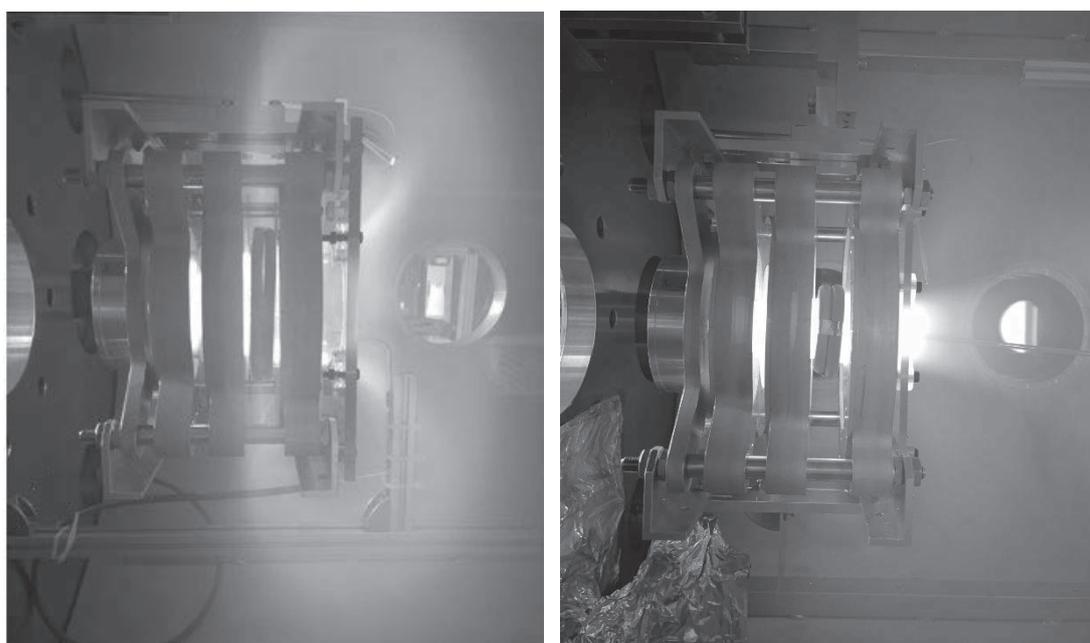


図5. 放電によるプラズマ排気(左： $\Phi$ 110 mm放電管、右： $\Phi$ 60 mm放電管)

## 5. まとめ

長寿命電気推進機として実用化に向けた性能向上実験が行われているRFプラズマスラスタについて、永久磁石を使用した強力発散磁場方式を提案し、その試験機の製作および放電実験のための真空容器などの試験環境の構築、初期放電実験を行い異常放電の抑制に成功した。現在、スラストスタンドの校正作業を行っており、推力計測は近日中に可能となる見込みである。そのほか、本真空容器で用いる3軸電動ステージや推力と強い相関のあるイオン流速を3次元計測するレーザー誘起蛍光法[5]、電子密度を計測する静電プローブやマイクロ波干渉計装置[6]を開発中であり、RFプラズマスラスタの統合試験環境が整いつつある。

## 参考文献

- [1] C. Charles, J. Phys. D: Appl. Phys. 42, 163001 (2009).
- [2] S. Shinohara et al., Phys. Plasmas 16, 057104 (2009).
- [3] D. Kuwahara et al., J. Propul. Power 33, 420 (2017).
- [4] K. Takahashi et al., Appl. Phys. Lett. 109, 194101 (2016).
- [5] D. Kuwahara et al., Plasma Fusion Res. 10, 3401057 (2015).
- [6] D. Kuwahara et al., J. Instrum. 10, C12031 (2015).