

RAIJIN推進機における放電室出口径と推進性能

学生証番号 47156082 氏名 濱田 悠嗣
(指導教員 小紫 公也 教授)

Key Words : Hall thruster, Anode layer type, Scaling, Oscillation, Efficiency

1. はじめに

宇宙機用推進機として用いられる電気推進機は従来の化学推進に比べて比推力が大きく、搭載する推進剤質量を1/10程度に低減し宇宙機の打ち上げコストを大きく低減する。また宇宙機発電能力の向上を背景に5 kW級の大電力の推進機が利用可能になっている。ホールスラスタは比推力1,500-2000 sにおいて高いエネルギー変換効率(推進効率)を持ち、投入電力に対して発揮する推力の割合(推力電力比)が大きいという特徴を持つため、これを生かして軌道遷移時間を短縮するべく5 kW級ホールスラスタの開発が世界的に行われている。

2. RAIJIN推進機の開発

ホールスラスタはマグネティックレイヤ型とアノードレイヤ型(TAL型)に分類され、RAIJIN推進機はTAL型である。TAL型はイオン生成が放電室出口付近で行われるため壁面損失が少なく、大電力化に際しては高効率かつ長寿命な推進機の開発が期待できる。RAIJINに関わる複数の大学、企業およびJAXAが要素技術の研究開発を行い、低放電振動・高推進効率な5 kW級TAL型推進機の開発が進んでいる。

推進機の作動試験は真空環境下で行われるが、大きな推進剤流量での試験可能な真空施設は限られる。また長期作動試験にあたっては大型の推進機ほど試験コストが増加する。大学施設での技術開発にあたってはより低電力の実験室モデル推進機の需要がある。

3. サイズと推進効率の関係

大型推進機の小型化に関する研究はマグネティックレイヤ型において行われている^[1]。放電室外径に対する推進機性能の変化を表1に示す。サイズが小さくなるに従い設計点での電力、推力が低下し推進効率も小さくなっていることが分かる。本研究でRAIJIN推進機においても放電室内での推進剤密度が等しくなるよう放電室出口径を小さくし、小型推進機RAIJIN66を設計した(図1)。

表1 露SPTシリーズにおける外径と性能

推進機外径	35 mm	50 mm	100 mm
推力	10 mN	20 mN	83 mN
推進効率	30 %	35 %	50 %

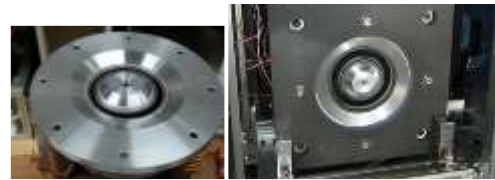


図1 (左) RAIJIN66 (右) RAIJIN94

4. 推進機性能測定

推進機性能は推力及び放電特性を測定し評価した。推力測定は当研究室で開発された2重振り子式推力測定スタンドを用いて行った。大電力の推進機では測定に伴う熱ドリフトが大きくなるが、このスタンドはその作用を低減することができる^[2]。推力と放電特性は次式に示す放電振動強度と推進効率の2性能指標によって評価した。

$$\Delta = \frac{1}{\bar{I}_d} \sqrt{\frac{\int_0^\tau (I_d - \bar{I}_d)^2}{\tau}} \quad (1)$$

$$\eta_t = \frac{F^2}{2\dot{m}P} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \dot{m}_{\text{anode}} + \dot{m}_{\text{cathode}} \\ P &= P_{\text{anode}} + P_{\text{cathode}} + P_{\text{coil}} \end{aligned}$$

式中の I_d 、 τ 、 F 、 \dot{m} および P はそれぞれ放電電流、計測時間、推力、推進剤流量および投入電力である。添え字は機器ごとの流量や電力の値を表している。

5. 性能測定結果

式(1)および式(2)の評価指標を2Dマップ上に反映したものが図2および図3である。ホールスラスタの作動特性は放電室に印加する磁束密度に影響を受けることから、横軸に磁束密度、縦軸に投入電力に相当する無次元量を取っている。図2は振

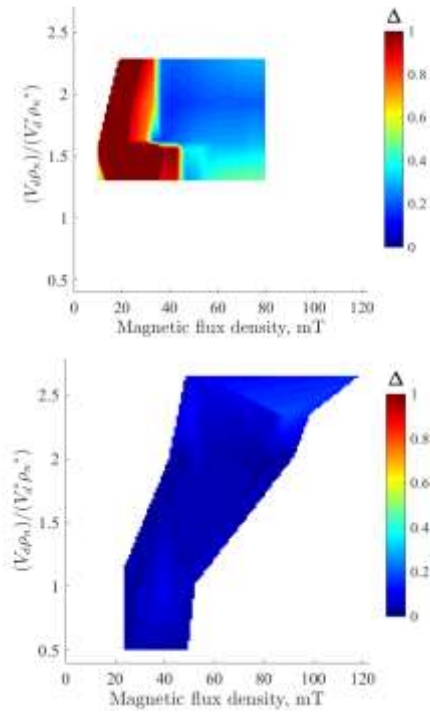


図2 放電振動マップ
(上) RAIJIN66 (下) RAIJIN94

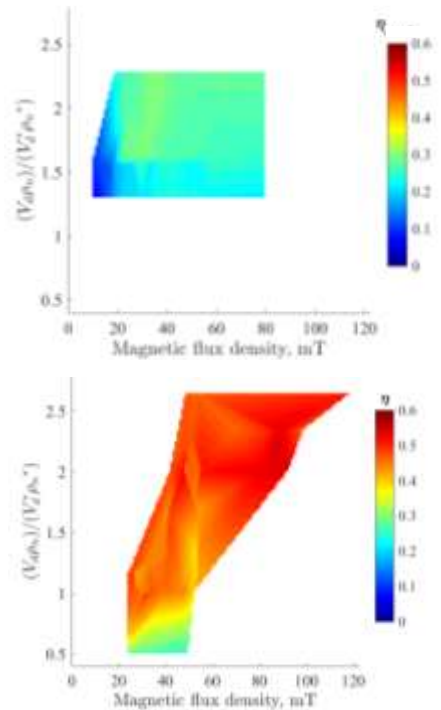


図3 推進効率マップ
(上) RAIJIN66 (下) RAIJIN94

動マップの比較である。RAIJIN66は低磁束密度(～20 mT)においてRAIJIN94よりも振動が大きい。磁束密度40 mT以上ではどちらの推進機も $\Delta < 0.3$ で振動は小さかった。RAIJIN66で流量を下げていくと振動の大きい領域が広がり放電の持続性も悪くなるためRAIJIN94では取得できている低電力領域には実験データがない。図3は同じ作動領域における推進効率マップである。RAIJIN66では振動特性が遷移する磁束密度35-40 mTで推進効率のピークを持つが、その値はおよそ25-30%であった。一方のRAIJIN94は同程度の推進剤流量密度で45-50%の推進効率に達している。

最終的に得られたRAIJIN66とRAIJIN94の放電室外径に対する推進効率の関係を図4に示す。参考として従来推進機の推進効率値を共にプロットしているが、外径を縮小したことによる効率の低下割合は従来の推進機における傾向と近いものであった。壁面近くではシース中で壁面に対してイオンが損失していくが、推進機外径を縮小するとイオン生成領域とプレシースの重なりが増加しイオン損失割合が増加することがマグネティックレイヤ型の数値計算で予測されている。TAL型においても同様にイオン損失が増加すると考えられる。

6. 結論

2つのRAIJIN推進機の性能測定からの知見は

- 5 kW級RAIJIN94推進機は広い磁束密度領

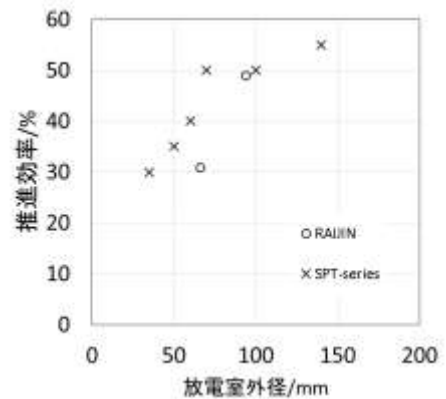


図4 放電室外径に対する推進効率の傾向
域で安定 ($\Delta < 0.2$) かつ高効率 ($\eta > 50\%$)
で作動した。

- RAIJIN66はRAIJIN94に比べ低磁束密度側の放電振動が大きく、推進効率は高々30%程度であった。
- 径の変更はシース効果によるイオン損失と関係があると予測され、数値計算による検証が必要である。

【参考文献】

- [1] Daren, Y., Yongjijie, D., & Zhi, Z. (2005). Improvement on the scaling theory of the stationary plasma thruster. *Journal of Propulsion and Power*, 21(1), 139-143.
- [2] Nagao, N., Yokota, S., Komurasaki, K., & Arakawa, Y. (2007). Development of a two-dimensional dual pendulum thrust stand for Hall thrusters. *Review of Scientific Instruments*, 78(11), 115108.