

高出力ホールスラスタの地上試験設備

Ground Test Facility for High Power Hall Electric Thrusters

○小紫 公也・伊藤 彦(東大)

○Kimiya Komurasaki・Gen Ito (The University of Tokyo)

Abstract (概要)

Along with the increase in the demand for the high power Hall Electric Thrusters (HETs), the necessity for large-scale ground test facility has been actively discussed. When developing a 100 kW class HETs in the future, the pressure in the vacuum chamber will be the order of 10^{-2} Pa even if the ground facility which has the best exhaust performance in the world is used. In order to clarify the requirement for ground test facility to test high power HETs, the relationship between facility pressure effect on HETs performance and facility geometries has been summarized. It shows that the facility pressure effect may depend on facility aspect ratio and/or pump location and ratio of pump surface area to facility surface area.

記号の説明

p : 圧力
 Q 流量
 S 排気量

1. はじめに

人工衛星の軌道制御には推進系が必要不可欠であり、衛星の発電電力の増加などの背景から電気推進機が今注目を浴びている。中でもホールスラスタは、比推力が 1500-2000 秒程度で推進効率が 55 %前後、推力電力比は 50-60 mN/kW ほどの性能を持ちイオンスラスタに比べて電力当たり発生可能な推力が大きく、軌道遷移の短時間化や軌道間物資輸送ミッションに適した推進機といえる。全電化静止衛星(姿勢制御維持に従来の小型化学ロケットエンジンを使わず、すべて電気推進エンジンで行う衛星)では 5 kW, 小惑星捕獲ミッションでは 10 kW, 太陽発電衛星建造物資輸送では 25 kW, 有人火星探査では 50 kW クラスが必要不可欠であり、大型電気推進機の世界的な機運が高まっている。

近年、日本では様々な高出力ホールスラスタの開発が進められている。東大、九州大学などの研究機関を中心に進められている Japanese IN-space propulsion system (RAIJIN) project では Thruster with Anode Layer (TAL)について、5 kW 級の RAIJIN94 と 2 kW 級の RAIJIN66 を試作、試験している¹⁾。また、JAXA と IHI, IHI エアロスペース、首都大学東京は全電化衛星で姿勢制御と軌道遷移の両方に対応したデュアル作動の SPT 型 2-6 kW 級ホールスラスタの開発を実施している²⁾。双方の研究開発では ISAS が所有する直径 2 m, 長さ 5 m の電気推進耐久試験装置が主に用いられてきた。これは国内最大級の設備であり、アルバック社製ク

ライオポンプ U30H4 台を搭載し、排気速度はキセノン換算で 35,000 l/s である。しかしながら、5 kW 級以上の推進機の試験には不十分であることが指摘されており、SPT 型の開発では排気速度がキセノン換算で 350,000 l/s とおよそ 10 倍もあるジョージア工科大学の VTF-2 で性能試験が実施されている。このような状況に対し、国内でも大型電気推進機開発向けの大型設備が検討されてきた。本項ではホールスラスタの更なる大電力化を見据え、試験設備への要求とそれに応えるために必要な要素技術の研究について述べる。

2. 大型ホールスラスタ開発への設備要求

地上設備では一般に、クリーンかつ高真空の条件を達成するためクライオポンプによってガスを排気し、真空環境を作り出す。試験中の圧力は軌道での推進機の性能を正確に予測するために、 6.7×10^{-3} Pa 未満に保つことが推奨されている³⁾。電気推進機の推進剤の量はその出力に比例して増加し、近年増加している大型推進機の試験を推奨圧力下で実施するためには相当な排気速度が必要となる。

ここでホールスラスタとしてさかんに研究が行われている 1 kW 級^{4,5,6)}と将来の大電力推進機として研究が行われている 100 kW 級⁷⁾について考えてみる。それぞれのスラスタの放電電圧がともに 300 V だとすると放電電流はそれぞれ 3.33 A, 333 A となる。3.33 A, 333 A のイオンビーム電流に相当するキセノンガスは 4.53 mg/s (46.1 sccm), 453 mg/s (4610 sccm) となるため、1 kW 級, 100 kW 級のホールスラスタを真空設備で試験する際にはこれらのキセノンガスを排気する必要がある。真空設備の排気量, 電気推進機の推進剤キセノンガス流量, 真空設備内部の圧力の間には式(1)の関係が成り立つ。

$$p = \frac{1.013 \times 10^5 \times 10^{-3}}{60} \times \frac{Q}{0.0983} \times \frac{1}{S} \quad (1)$$

真空ポンプの排気速度として国内大学の研究機関で達成可能な 20000 L/s と現在世界最大の排気速度を持つ NASA 所有の VF-5 の排気速度 700000 L/s を考える。式(1)より排気速度 20000 L/s の真空設備で 1 kW 級、10 kW 級のホールスラストを試験した際の試験設備内部の圧力はそれぞれ、 3.9×10^{-3} Pa, 3.9×10^{-1} Pa 程度になると予想される。また排気速度 700000 L/s の試験設備で 1 kW 級、100 kW 級のホールスラストを試験した際の試験設備内部の圧力はそれぞれ、 1.11×10^{-4} Pa, 1.11×10^{-2} Pa 程度になると予想される。将来の大型化に対応するためには世界最大の設備を用いた場合でも推奨圧力を達成することは困難であり、大型推進機の開発には排気速度を最適化させる工夫を凝らした設備の設計が必要不可欠である。

3. 設備が性能に及ぼす影響

設備がホールスラストの試験に与える影響は大きく背圧効果、壁面材料のバックスパッタ、電気的結合の3つに分類される。ホールスラストの性能評価を実施する際は特に背圧効果が重要であり、現在業界で最も問題視されている。

背圧効果の初期の研究では試験設備内の残留ガスは室温の試験設備壁と完全に熱平衡であると想定した場合(熱モデル)に見積もった逆流ガス流量で説明ができると報告されている⁸⁾。しかし近年の研究では、熱モデルでは実際に観測された圧力効果の10%しか説明できなかったという報告があり、試験設備内に流れが生じているという主張がある^{9,10)}。

ここで、圧力効果が実験的に観測されている国内外の設備について、概要を表1にまとめた。圧力効果が熱モデルで説明できるという報告で使われた設備は VF-5 であり、アスペクト比が大きい and/or 試験設備表面積に占めるポンプ入口面積割合が大きいと熱モデルで説明できる可能性がある。アスペクト比の効果だとするならば、物理的には粒子と壁との反射による熱交換で説明ができる。一方、ポンプ入口面積の割合であるならばポンプの配置や排気機構が関係している可能性がある。試験設備内の粒子の状態とそれに起因する流れを把握するために、3次元粒子軌道解析や1次元モデルによる調査が実施されている^{10,11)}。

表1 国内外の試験設備比較

試験設備 名称	長さ, m	直径, m	アスペクト 比	Pump 入 口面積, m ²	Pump 入 口面積 積, %
VF-5 @LeRC	19	4.6	4.13	41	14%
LVTF @UM	9	6	1.5	7.26	4%
VTF-2 @GIT	9.2	4.9	2	15.39	10%
Hayabusa @ISAS	5	2	2.5	1.81	5%
New chamber @ISAS	9	3	3	9.28	10%

4. まとめ

ホールスラストの大電力が進んだ場合には世界最高水準の排気速度を持つ試験設備でも内部の圧力が 6.7×10^{-3} Pa を超えてしまう可能性があり、排気速度を最適化する設備の設計が必要不可欠である。

試験設備がホールスラストの試験に与える影響の中でも背圧効果が重要視されており、その現象は試験設備内に残存するガスの流れに起因している。

残存するガスの流れは試験設備のアスペクト比や、ポンプの配置、排気機構に強い相関があると考えられる。これらを明らかにして設備効果の現象を理解するためには、3次元粒子軌道解析で試験設備内の流れを可視化して議論する必要がある。

参考文献

- 1) Hamada, Y., Bak, J., Kawashima, R., Koizumi, H., Komurasaki, K., Yamamoto, N., Egawa, Y., Funaki, I., Iihara, S., Cho, S., Kubota, K., Watababe, H., Fuchigami, K., Tashiro, Y., Takahata, Y., Kakuma, T., Furukubo, Y., and Tahara, H., (1972) *Transactions of JSASS.*, **60**(5), pp. 320-326.
- 2) Funaki, I., Iihara, S., Cho, S., Kubota, K., Watanabe, H., Fuchigami, K., and Tashiro, Y., (2016) *52nd Joint Propulsion Conference*, AIAA 2016-4942.
- 3) Dankanich, J. W., Walker, M. L. R., Swiatek, M. W., and Yim, J. T., (2013) *33rd International Electric Propulsion Conference*, IEPC 2013-358.
- 4) Garner, C. E., Polk, J. C., Goodfellow, K. M., Pless, L. C., and Brophy, J. R. (1993). *23rd International Electric Propulsion Conference*, IEPC 1993-091.
- 5) Szabo, J., Tedrake, R., Kolencik, G., and Pote, B. (2017) *35rd International Electric Propulsion Conference*, IEPC 2017-026.
- 6) Gnizdor, R., Komarov, A., Mitrofanova, O., Saevets, P., and Semenenko, D. (2017) *35rd International Electric Propulsion Conference*, IEPC 2017-040.
- 7) Hall, Scott J., Sarah E. Cusson, and Alec D. Gallimore. (2015) *35rd International Electric Propulsion Conference*, IEPC 2015-125.
- 8) Randolph, T., Kim, V., Kaufman, H. R., Kozubsky, K., Zhurin, V. V., and Day, M., (1993) *23rd International Electric Propulsion Conference*, IEPC 1993-093.
- 9) Cai, C., Boyd, I. D., and Sun, Q., (2006) *Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum Surfaces and Films*, **24**(1), pp. 9-19.
- 10) Frieman, J. D., Liu, T. M., and Walker, (2016) *Journal of Propulsion and Power*, **33**(5) pp. 1087-1101.
- 11) Ito, G., Kawashima, R., Komurasaki, K., Koizumi, H., and Fuchigami, K. (2017) *35rd International Electric Propulsion Conference*, IEPC 2017-340.