

# 電気推進機推進剤の真空槽内流れ —数値真空槽の実現に向けて—

## Electric Propulsion Propellant Flow within a Vacuum Chamber —Investigation toward Achievement of a Virtual Test Facility—

○中山宜典(防衛大)・中村真大(防衛大・院)

○Yoshinori Nakayama (National Defense Academy)・Masahiro Nakamura (Graduate School, NDA)

### Abstract

In the development of electric propulsion, it is important to investigate its performance difference between in space operation and in test facilities operation. Through a numerical simulation of rarefied gas flow within large test facilities, in this study, it seemed that a virtual test facility was beneficial, and that both rarefied gas flow measuring devices and some physical data/model were necessary to accomplish the virtual test facility.

### 1. はじめに

**1.1 研究背景** 電気推進機の研究開発や耐久試験のためには地上試験装置(真空排気装置)が必要である。真空排気装置内における電気推進機の推進剤は中性粒子が支配的である。真空排気装置内で電気推進機を作動させると、推進機から排出された推進剤ガス(中性粒子)は、真空ポンプで排気されるまで真空槽壁面で反射し、真空槽内に滞留する。したがって地上試験時の電気推進機周囲圧力は、宇宙空間作動時のそれよりも高くなる。電気推進機周囲、特に電気推進機下流の推進剤は、電気推進機のイオン生成やイオン排出加速に影響を与えるため、地上試験時と宇宙空間作動時では推進性能や耐久性が異なることとなる。これは見積誤差となり、必要以上の重量増加(たとえば推進剤の過積載や電源系の重量増大)、あるいは想定寿命よりも短時間で故障によるミッション不成立を招くことが考えられる。それゆえ、こうした見積誤差をできるだけ小さくする、または誤差の程度をあらかじめ知っておくことは有意である。

見積誤差を小さくするには、地上試験環境をできるだけ宇宙空間に近づければよいが、そのためにはできるだけ大きな真空槽、かつ多くの真空ポンプをもった真空排気装置が必要となる。国内には、10~100 mN級の静電加速型電気推進機用の地上試験装置が3台整備されているが、今後計画されているより大型な電気推進機の試験に使用できる地上試験装置は無く、整備する必要がある。しかし真空槽の大型化も排気ポンプの多数化も多大なコストを要求するため、その大型化や多数化には限界があり、複数台の大型真空槽を整備することにも限界がある。したがって限られた真空槽整備コストを最大限活用するには、大型真空槽の

最適化設計が必要であると考えられる。

また、電気推進機の耐久寿命は1~2年であり、妥当な耐久性評価のためには作動中断はできるだけ避けなければならないことから、耐久評価中の電気推進機1台のために地上試験装置を長時間占有させなければならない。これは、たとえ大型真空槽を整備しても、電気推進機の基礎開発時に利用できる機会はきわめて限定的であることを意味する。したがって現有の小型真空槽を用いて作動評価することは今後も必要である。作動評価によって得られた推進性能をもとに宇宙空間作動時の推進性能を推定できれば研究開発には有用であると考えられる。

そこで、小型真空槽から大型真空槽までの真空槽内推進剤流れを模擬できる「数値真空槽」が有用ではないかと考えた。真空槽形状や真空ポンプ配置に関する知見を取得することにより大型真空槽の最適化設計に寄与でき、宇宙空間作動時と真空槽内作動時の推進剤流れ・圧力の違いを取得することにより宇宙空間作動時の推進性能推定に寄与できると考えたからである。

**1.2 研究目的** 数値真空槽を実現するためには、多くの研究と時間が必要であり、それらに投ずるだけの価値が数値真空槽にあるかどうかをまず示さなくてはならない。そこで、数値真空槽の有用性を評価するため、現時点における希薄流数値解析コードをもとに、「大型真空槽の最適化」に関する知見(設計指針)を得られるかどうか確かめることを考えた。

本研究の目的は、現時点における希薄流数値解析コードを適用し、大型真空槽およびホールスラストを対象として、(1) 真空槽形状や真空ポンプ配置が槽内推進剤流れに与える影響評価を行い、(2) 数値真空槽の有用性評価と課題の検証、を行うことである。

## 2. 数値解析結果および数値真空槽検討

**2.1 数値解析コードおよび数値解析モデル** 防衛大では、数値真空槽の根幹となる希薄流数値解析コードを開発してきており、その妥当性も評価してきている。本研究ではこのコードを真空槽解析ができるように改良し使用することにする。

図1に国内外の電気推進機用地上試験装置（真空槽）の形状を示す<sup>1-3</sup>。現在、国内で整備されている装置は16～63 m<sup>3</sup>であることを踏まえ、解析対象真空槽の容積をより大型の100 m<sup>3</sup>とする。解析対象真空槽の諸元を表1に示す。

真空槽設計のうち、特に真空槽形状や真空ポンプ配置が推進剤の壁面反射や効率的な排気に強い影響を与えると考えられるため、これらに着目することとした。

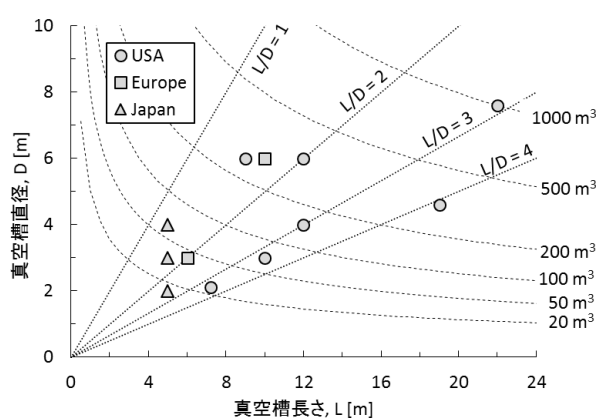


図1 電気推進機用地上試験装置の形状

また静電加速型電気推進機の一つであるホールスラスタは、イオン生成部の開口部が大きく、推進機周囲圧力の影響を受けやすいと考えられるため、ホールスラスタを数値計算対象とする。解析対象のホールスラスタ諸元（大型ホールスラスタ SPT-140 をもとにしたモデル、文献4 参照）を表2に示す。

表1 解析対象諸元（円筒型真空槽）

| 槽名称                    | D5L5                            | D4L8  | D3L10 |
|------------------------|---------------------------------|-------|-------|
| 直径 D [m]               | 5.0                             | 4.0   | 3.5   |
| 長さ L [m]               | 5.0                             | 8.0   | 10.5  |
| 形状比 L/D [-]            | 1.0                             | 2.0   | 3.0   |
| 容積 V [m <sup>3</sup> ] | 98.2                            | 100.5 | 101.0 |
| ポンプ総数 [台]              | 24                              |       |       |
| @1/4L                  | 4 or 8 or 12                    |       |       |
| @2/4L                  | 4 or 8 or 12                    |       |       |
| @3/4L                  | 4 or 8 or 12                    |       |       |
| スラスタ設置位置               | 上流面から 0.5 m or 1.0 m<br>真空槽中心軸上 |       |       |

真空ポンプは真空槽側面の 1/4L, 2/4L, 3/4L 上に等配

表2 解析対象諸元（ホールスラスタ）

|             |          |
|-------------|----------|
| 参考モデル       | SPT-140  |
| 直径          | 20 cm    |
| 長さ          | 20 cm    |
| 推進剤流量（スラスタ） | 160 sccm |
| 推進剤流量（中和器）  | 20 sccm  |
| ビーム拡がり角     | 40°      |
| 推進剤利用効率     | 75%      |
| 加速電圧        | 300 V    |
| 推力（参考）      | 300 mN   |

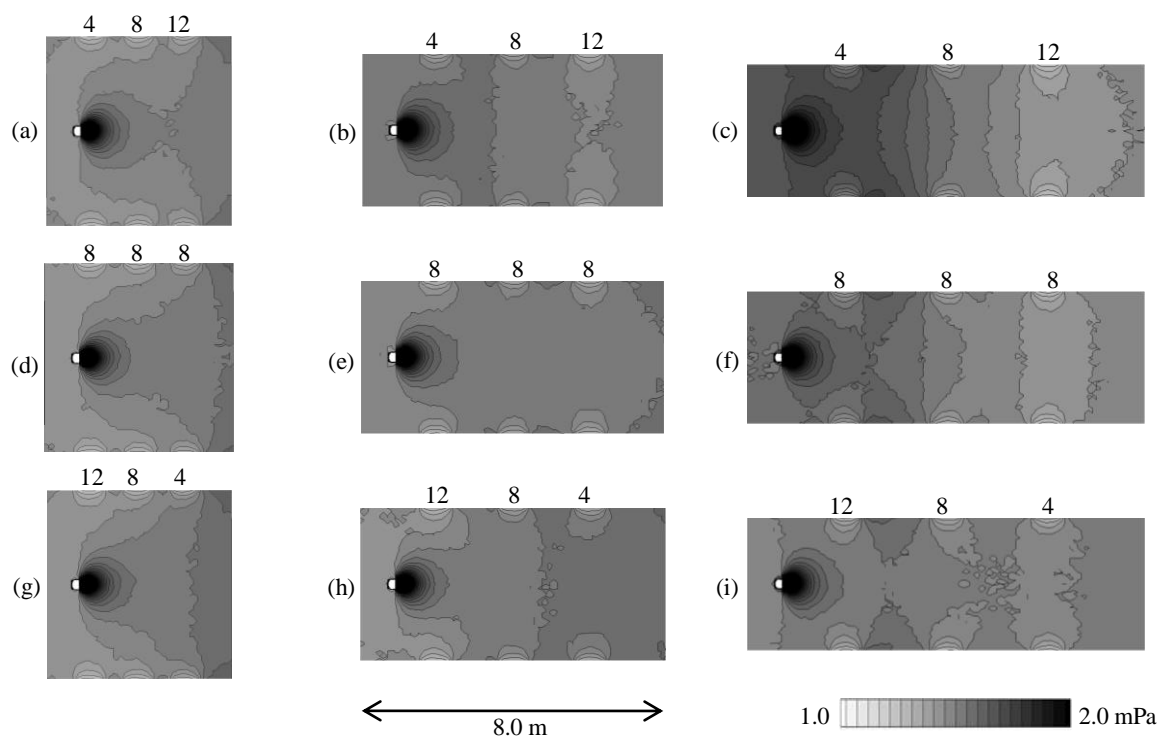


図2 地上試験装置内圧力分布（上流面から 1.0 m にスラスタ設置，4, 8, 12 はポンプ台数を示す）

**2.2 数値解析結果** 数値解析結果の一部を図2に示す、真空ポンプ配置が同じであっても、真空槽形状によって槽内圧力分布が異なることがわかる。真空槽のアスペクト比が大きくなるほど、スラスタに近い上流部とスラスタから遠い下流部との圧力差が大きい傾向がある。また図3からわかるように、アスペクト比が1に近いほど、槽内平均圧力もスラスタ直下圧力も低くなることがわかる。さらにアスペクト比が大きくなるほど、ケースによって槽内平均圧力もスラスタ直下圧力も差が大きくなっており、ポンプ配置による影響が大きくなることもわかる。

また図2から、真空ポンプ数がすべて同じであるにもかかわらず、真空ポンプ配置によって槽内圧力分布が異なることがわかる。真空ポンプが上流側に多く配置されているケースの方が槽内圧力分布が均様になる傾向がある。また既述のように、アスペクト比が大きくなるほど、ポンプ配置による影響が大きくなることもわかる。図4は、スラスタと真空ポンプの平均距離を横軸として槽内平均圧力およびスラスタ直下圧力を再プロットした図である。この図からわかるように、この平均距離とこれらの圧力はほぼ比例関係にあり、強い相関関係であることがわかる。

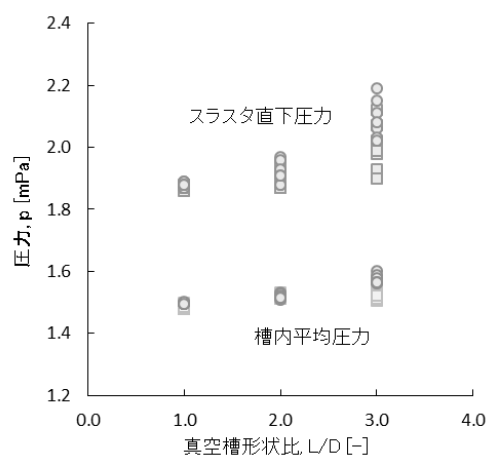


図3 真空槽形状が槽内圧力に与える影響  
スラスタを上流面から0.5 m (○), 1.0 m (□) に設置

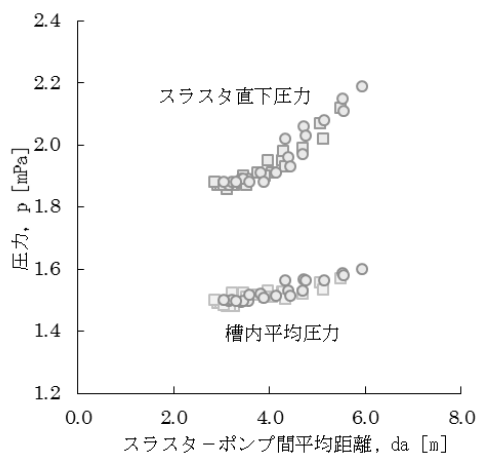


図4 真空ポンプ配置が槽内圧力に与える影響  
スラスタを上流面から0.5 m (○), 1.0 m (□) に設置

**2.3 電気推進機作動に与える影響** ホールスラスタのイオン生成部からイオン抽出加速部までほぼ同じ開口面積を有しており、推進剤およびイオンの流出を妨げる部品・要素は無い。これはスラスタ下流からホールスラスタチャネル部への推進剤流入も同様に妨げることがない。すなわち、スラスタ周囲の圧力はイオン生成およびイオン抽出加速部に直接影響を与えることが十分考えられる。チャネル部の推進剤圧力が高いほどイオン生成率が高くなるが、電荷交換反応も増加し、チャネル部やスラスタ周囲への損耗も増加する。したがって、地上試験環境下における推進性能は、宇宙空間作動時よりも、(1) イオン生成に要する電力が小さくなり推力/電力比が向上する、(2) 損耗が増え、耐久性が低下する、ことが考えられる。これらから、(1) 地上試験環境下でチューニングしたホールスラスタを宇宙空間で作動させると推力が低くなる、または消費電力が増大し、推力/電力比が低下する、(2) 耐久性担保するため、結果としてスラスタ重量が大きくなり、推力/重量比が低下することが考えられる。他の電気推進機においてもイオン生成および抽出加速は行われており、ホールスラスタよりは影響が少ないが、無視しえない影響があるものと推察される。

**2.4 数値真空槽の有用性と課題** 以上のことから、真空槽形状や真空ポンプ配置が推進剤流れに影響を与え、それが電気推進機の推進性能にも影響を与えうることがわかった。したがって、数値真空槽が実現すれば、電気推進機の推進性能評価に与える影響が少ない真空槽設計に寄与でき、その発展として、宇宙空間作動時と真空槽内作動時の推進性能差異の推定に寄与できる、と推察される。すなわち、数値真空槽は電気推進機の研究開発に有用であると推察できる。

数値真空槽の実現には、真空槽内推進剤流れを模擬できる希薄流数値解析、推進剤流れに影響を与える壁面反射や真空排気等の物理データ・物理モデル、そしてこれらの妥当性評価に有用な希薄流計測装置が必要であると考えられる。しかし現時点では、電気推進作動時における希薄流計測は精度が不足しており、妥当な物理データ・物理モデルも取得不十分・検証不十分である。数値真空槽を実現するには、これらそれぞれの知見取得や評価検討を進める必要がある。

防衛大では、電気推進作動時における希薄流計測を行うため2種類の計測装置を開発中である。1つは隔膜式微差圧計を用いた計測装置であり、イオンエンジン内部の推進剤流れを妥当に計測できている<sup>5)</sup>。もう1つは、発光ダイオード光を導いた光ファイバを懸架し、下方からカメラで撮像する計測装置である。どちらも真空槽内の推進剤流れを捉えることができており、妥当性評価をさらに進めた後、次報にて報告する予定である。これらの計測装置を用いて物理データを取得し、物理モデルを評価し、様々な地上試験装置やスラスタに対して計測評価を進めれば、数値真空槽の実現に近づくものと思われる。

### 3. ま と め

大型真空槽およびホールスラストを対象とした希薄流数値解析を行い、下記を得た。

- (1) 真空槽形状および真空ポンプ配置は電気推進機作動に影響を与える。
- (2) 数値真空槽が実現できれば、電気推進機の推進性能評価に与える影響が少ない真空槽設計に寄与でき、宇宙空間作動時と真空槽内作動時の推進性能差異の推定に寄与でき。すなわち、数値真空槽は電気推進機の研究開発に有用であると推察できる。
- (3) 数値真空槽の実現には、真空槽内推進剤流れを模擬できる希薄流数値解析、推進剤流れに影響を与える壁面反射や真空排気等の物理データ・物理モデル、これらの妥当性評価に有用な希薄流計測装置が必要である。

### 参 考 文 献

- 1) 荒川義博, 國中均, 中山宜典, 西山和孝 : イオンエンジンによる宇宙動力航行, コロナ社, 2006 年.
- 2) Gonzalez, J. and Saccoccia, G.: ESA Electric Propulsion Activities, 32th IEPC, IEPC-2011-329, Germany, 2011.
- 3) Saverdi, M., Signori, M., Milaneschi, L., Cesari, U. and Biagioni, L.: The IV10 Space Simulator for High Power Electric Propulsion Testing: performance Improvements and Operation Status, 30th IEPC, IEPC-2007-321, Italy, 2007.
- 4) Manzella, D.: Performance Evaluation of the SPT-140, NASA TM-206301, 1997.
- 5) Nakayama, Y. and Narisawa, K.: Neutral Pressure Measurement in an Ion Thruster Discharge Chamber, 33th IEPC, IEPC-2013-106, USA, 2013.