

課題名（和文）数値真空槽の実現に向けた中性粒子流れモデリング  
手法の確立

課題名（英文）Establishing Methods for Modeling Neutral Gas Flows  
towards the Realization of a Numerical Vacuum Chamber

西井啓太  
東京都立大学

1. 研究目的

本研究は、宇宙空間における電気推進機の性能を正確に再現・予測可能とする「数値真空槽」の実現を目的としている。現在、電気推進機の開発には真空試験が不可欠であるが、地上の真空槽では中性粒子が残留するため、実際の宇宙環境とは異なる条件下で試験が行われている。この環境差（ファシリティエフェクト）は、推進性能の過小評価や機器の設計余裕度の誤りを招く。したがって、推進剤流れの精緻なモデリングと計算により、地上試験と宇宙性能の差を補正する数値的手法が求められている。特に、真空槽内の壁面反射やポンプの吸引挙動などを正確に再現するため、Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) 法を用いた高忠実度・高効率な計算手法の確立が本課題の主眼である。

2. 研究成果の内容

本年度は、DSMC 法に基づく粒子計算コードの GPU (NVIDIA H100) への移植と高速化、ならびにそれを用いた壁面反射現象の数値解析を実施した。CUDA による並列化を通じ、従来の CPU 版に比べて最大約 20 倍の高速化を実現し、大規模な計算を現実的な時間内で実行可能とした。

さらに、防衛大学校・中山氏が実施した mPa オーダーの希薄動圧計測実験と対応する形で、Xe ガス流に対する壁面反射係数 (Maxwell モデルに基づく  $\alpha$  値) を変化させた数値解析を行い、DSMC で得られた運動量流束分布が実験値と良好に一致することを確認した (とくに  $\alpha \approx 0.9$ )。また、ガス管出口の速度分布や分子間衝突、背景圧力の影響についてもパラメトリックな評価を行い、施設設計や実験補正に資するデータを得た。これにより、真空槽における中性粒子挙動の高精度予測の実現可能性が実証された。(図 1, 2)

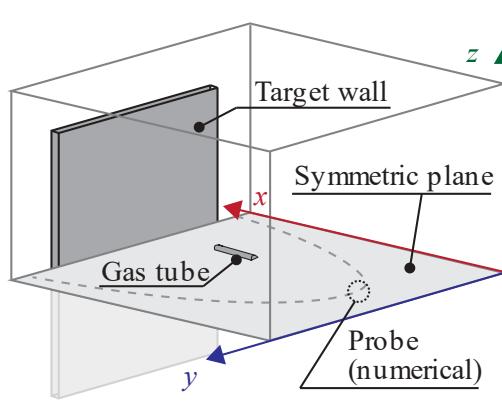


図 1 シミュレーション対象

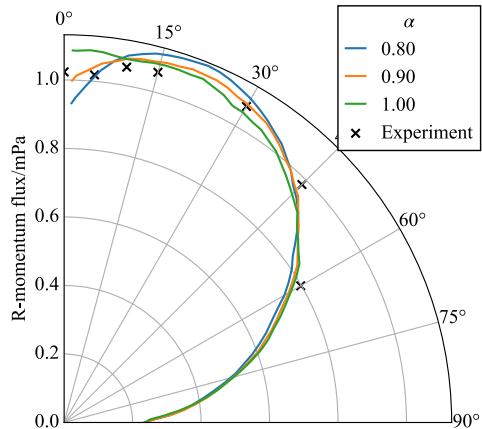


図 2 シミュレーション結果

### 3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

本研究においては、筑波大学計算科学研究センターの「Pegasus」システムを用い、H100 GPU による大規模計算を実施した。本プログラムにより、都立大学や防衛大学校といったスパコンを常時利用できない機関でも、最新鋭の GPU リソースを活用でき、研究の大幅な進展が可能となった。加えて、本共同利用により、計算資源のみならず、数値真空槽という学際的課題に対して、数値計算、電気推進、表面物理、計測技術といった複数分野の知見が融合し、分野横断的な成果創出につながった。さらに、実験との連携により、数値モデルの妥当性が検証され、単なる解析技術ではなく、設計指針として活用可能な枠組みの構築が実現された。

### 4. 今後の展望

今後は、DSMC コードにおけるポンプ吸引モデル（擬似境界条件）の精緻化を進めるとともに、複数の真空槽条件への適用と妥当性評価を実施する予定である。また、壁面反射モデルについては、より現実的な CLL (Cercignani-Lampis-Lord) モデルへの拡張と、その係数同定のための逆解析手法の導入も視野に入れている。最終的には、プラズマを含むモデル化への拡張を通じて、推進機作動中の全体場（中性+荷電）を再現可能とする真の数値真空槽の実現を目指す。これにより、実験の補完にとどまらず、宇宙開発における性能予測や異常診断、試験環境設計に直接貢献する計算基盤技術の構築が期待される。

なお、本課題の継続内容として、FY2025、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (JHPCN)，公募型共同研究に "数値真空槽の実現に向けた中性粒子流れモデリング手法の確立," (jh250022) の研究課題名で採択されている。

## 5. 成果発表

### (1) 学術論文

- Keita Nishii, "Facility Pressure Effects on Thrust Measurement of Micronozzles and Its Correction for Space Application," Aerospace Science and Technology, Submitted.

### (2) 学会発表

- 西井 啓太, 各務 聰, 伊藤 翼, 中山 宜典, "電気推進機推進剤流れ評価に資する壁面反射希薄流の数値解析," 令和 6 年度宇宙輸送シンポジウム, 1 月, 相模原, STEP-2024-030, 2025

### (3) その他

該当なし

使用計算機	使用計算機に <input type="radio"/>	配分リソース*		
		当初配分	移行*	追加配分
Cygnus				
Pegasus	<input type="radio"/>	20000		
Wisteria/BDEC-01				
	※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。 *バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入			