

jh250022

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

西井啓太（東京都立大学）

概要

電気推進機開発における真空槽の影響（ファシリティエフェクト）予測のため、GPU 大規模並列計算を用いた 3 次元 Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) コードを構築した。Adaptive Mesh Refinement (AMR) 法や領域分割型 MPI の導入により、従来の局所計算から真空槽全体を網羅する精密な大規模計算を可能にした。主な成果として、まずマイクロノズルの地上試験で生じる「希薄ガス排斥効果」を解析し、最大 50% に達する推力の見積もり誤差を 3% 以内に補正する予測式を構築した。次に、シミュレーション領域を装置全体に拡張し、実験データとの比較からガスジェット推進機周辺の圧力分布や流量依存性を明らかにした。さらに、実験値に基づき壁面反射適応係数を最適化することで、計算値と実験値の 10% 以内の一致を得てコードの妥当性を検証した。これらの成果によって、宇宙作動状況を地上で高精度に予測する「数値真空槽」の実現に向けて大きな進展がみられた。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

東京大学 情報基盤センター

(2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

(3) 参加研究者一覧と役割分担

西井啓太：シミュレーションコードの開発および研究総括

中山宜典：実験データの提供

各務聡：研究成果に関する議論

2. 研究の目的と意義

近年、ロケットによる宇宙輸送コスト低下から、宇宙開発が急速に進展している。打ち上げられた宇宙機が効率よく軌道を維持・変更するために、電気推進機の存在は不可欠である。電気推進機開発には、真空排気装置を用いた地上試験が欠かせないが、試験時の中性

粒子の真空槽内滞留から、推進機の周囲圧力が宇宙作動時よりも高くなる（図 1）。結果として推進性能や耐久性が宇宙作動時とは異なり、推進剤の過積載・電源系の重量増大・想定より短い寿命での故障といった問題を引き起こす。この見積もり誤差を最小化するためには、地上試験環境を宇宙空間に近づける必要があるが、大規模な真空装置はコストが高い。宇宙開発が拡大する一方で、そのような大型設備を利用できる機関は限られている。また、世界規模で有人宇宙探査向けのメガワット級大電力推進機の開発が進められているが、既存の設備では対応が不十分である。これらの背景から、試験環境が電気推進機に与える影響（ファシリティエフェクト）の考慮はこれからの宇宙開発に必須であり、その最小化を目指す工夫と、数値計算を活用した宇宙との差異予測が求められている。

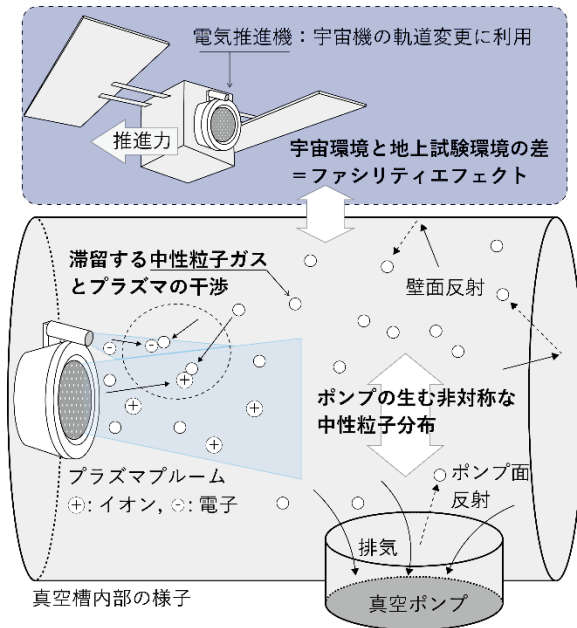


図 1 ファシリティエフェクトの概要

申請者らは、小型から大型の真空槽内部における推進剤流れを模擬できる「数値真空槽」を提唱してきた。数値真空槽により、ファシリティエフェクトに内在する物理現象を詳細に理解し宇宙空間での作動を予測するとともに、試験環境の最適化設計を行うことができる(図 2)。これまでに、代表者である西井は、ファシリティエフェクトを Particle In Cell と Direct Simulation Monte Carlo 法 (PIC-DSMC) による GPGPU を用いた大規模並列計算によって研究してきた。しかし、ポンプを含めた壁面反射モデルには不確かさがあり、定量的な妥当性検証には至っていない。一方で、副代表者の中山は、独自装置を開発し、真空槽内の希薄中性粒子の動圧を mPa オーダーで計測可能にした。この実験データから、壁面反射やポンプのモデルをより厳密化する重要性が示唆されるとともに、数値計算の定量的検証を行う準備が整えられた。

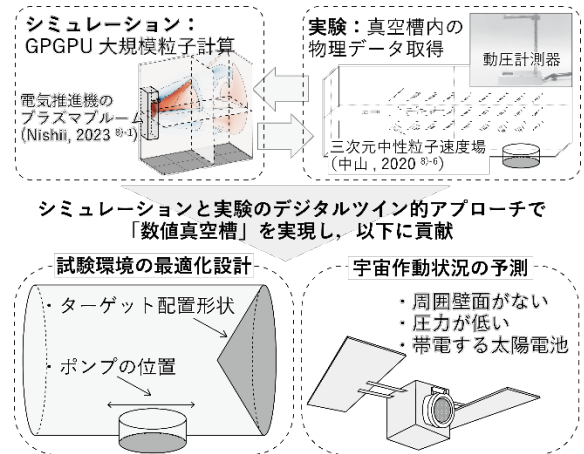


図 2 本研究の目標と数値真空槽の役割

本研究は最終的に、シミュレーションと実験データを相互に利用して数値真空槽を実現し、宇宙開発を活性化することを目的とする。そのため、本研究における 2025 年度の目標は、実験的に取得された希薄流データを利用して、DSMC 計算における真空槽ポンプ及び壁面反射モデルを検証・改善し、真空槽内の希薄中性粒子流れを再現する手法を確立することである。

従来までの電気推進の開発は、実験に基づくフィードバックによってのみ行われており、数値計算はその後の現象理解に利用されるに過ぎなかった。本研究によって実現される数値真空槽では、数値シミュレーションが実機開発に先立ってまたは実験と並行して行われることで、宇宙開発分野における Society 5.0 の実現を促進する。また、本研究では中山らによって得られた三次元的な静圧と動圧分布を用いてモデルの改善を行う。従来は真空槽の圧力はある一点で測定されたものを代表値として大域的な検討しか成されなかった。本研究で真空槽内の状況を完全に再現することで、従来見過ごされてきた局所的な効果を発見することが期待され、試験環境最適化に寄与する。

3. 当拠点の公募型共同研究として実施した意義

本研究は DSMC 法を用いて希薄流体場を計算する。DSMC 法は粒子一つ一つを並列して処理することが可能であり、GPU による大規模並列計算の実装・高速化が容易である。一方、粒子は大量のメモリを使用するうえ、毎ステップごとにソートを行う必要があるため、大量のデバイスメモリと高速のメモリアクセス速度が重要である。当拠点のリソース、特に東京大学 情報基盤センターの Miyabi は最先端の GPU、GH200 Grace-Hopper Superchip を搭載するノードを多数有するため、本研究の円滑な遂行のために利用したいという要望があった。これによってコード構築段階では早いサイクルで検証を回すことができ、また研究本段階では多数のパラメータのデータを短期間で集めることができた。

加えて代表者は、東京大学情報基盤センターの「若手・女性利用」の支援を受けて 2024 年度には研究活動を行っていた。またその課題は JHPCN 萌芽型共同研究課題として推薦を受けている。この背景から、東京大学のスーパーコンピューターリソースとして一般公開前から Miyabi を利用して計算を行っており、円滑に研究を開始することができた。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

該当なし

5. 今年度の研究成果の詳細

本計算で用いるコードはもともと、2024 年度までに構築された、Fortran-Cuda によって書かれた、インハウス 2 次元軸対称 DSMC コードであった。本年度の当初には、本コードをより効果的に活用するために Fortran から C++ への書き換えと、2 次元から 3 次元直交座標の直方体格子への書き換えを行った。またこの直方体格子において、Octree / adaptive mesh refinement 手法を用いて、局

所的な高密度流れに対応できるようにコードの改修を行った。

また、2025 年度後半には、さらなる大規模計算に向けて領域分割型 MPI を導入すべくコード改修を行った。実装は適切に行われ、最大 64GPU の並列実行までを実施した。スケールングについては十分に検討できていないため、コードのさらなる効率化は来年度以降に実施したい。

改修と並行して、2024 年までに行っていたノズルに関するファシリティエフェクト計算を継続し、本課題のリソースを用いて遂行し、学術論文として出版した(K. Nishii, *Aerospace Science and Technology*, 2026)。

本研究ではノズル流れとその下流の希薄流体状況をシミュレーションすることで、マイクロノズルの地上試験で、宇宙推力が過少に見積もられてしまう現象を解析した。これは Gas depletion と呼ばれる希薄ガス排斥効果によって推進機モジュールが圧力推力を受けてしまうことが原因である(図 3)。本研究では、そのガス排斥の古典的な式を拡張し、実際の推力低下を予測し、地上測定推力を宇宙推力へと補正するための立式を行った。その結果、図 4 に示すように、最大 50%程度過少に見積もられてしまう推力を、3%以内の誤差で宇宙推力に補正する式を構築した。

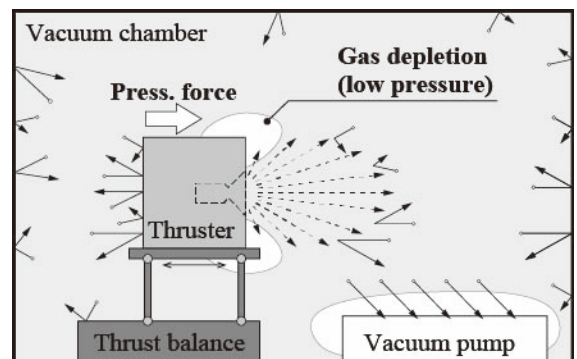


図 3 Gas depletion によるノズル推力の過少見積り機構

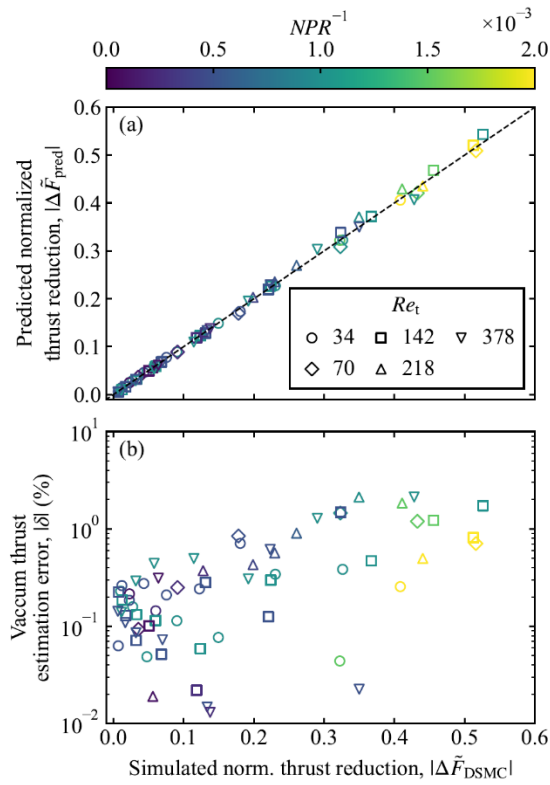


図 4 推力低下の補正結果

本研究で新たに構築したコードでは大きく二つの研究を行った。第一に、これまで OpenMP の計算コストの上限からノズル近傍しか行えなかった計算領域を、真空チェンバー全体へと拡大し(図 5)、より精密なガスジェット推進機のファシリティエフェクト理解の研究を実施し、国際学会において発表した (K. Nishii, 76th International Astronautical Congress, 2025)。本研究では実際の実験データと比較しながら、上述の Gas depletion を推進機全体の周りの圧力分布の観点から明らかにした。加えて測定された圧力データと推力データは実験とシミュレーションでよく一致しており、本シミュレーションコードの妥当性検証と現象理解に役立った。

学会後には MPI の導入を行った。これにより二倍程度の流量までの計算を達成することができるようになり、真空チェンバー全体のガス分布に対する流量依存性を検討できるようになった。本研究成果は現在

Aerospace Science and Technology 誌への投稿に向けて準備を進めている。

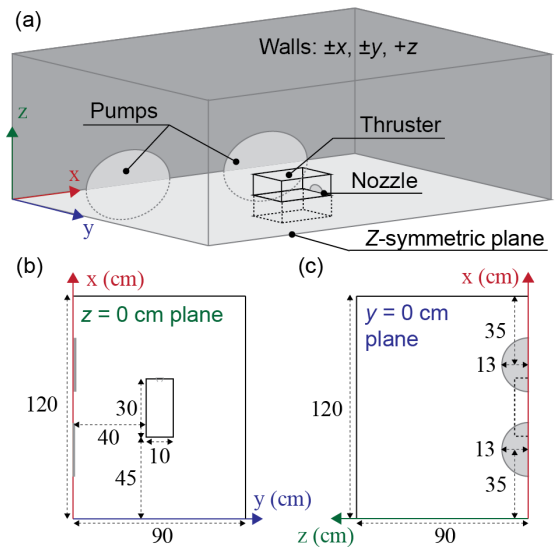


図 5 真空チェンバー全体のシミュレーション概要

第二の研究として、分担者である中山の実験データをもとに、壁面反射モデル改善のため、希薄流が真空槽内で反射した際にどの程度壁面温度に適應するか(壁面反射適應係数)を得る研究を行い、国際学会発表を行った(K. Nishii, et al. 39th IEPC, 2025)。実験環境全体を模擬するシミュレーションドメインを構築し(例:図 6)壁面反射適應係数を変更しながら、最もよく実験結果を再現するパラメータを模索することで、最適な適應係数を導出する。実験データとシミュレーションデータで 10%程度的一致を得てシミュレーションコードの妥当性が検証された。また、本手法による適應係数算出は世界的に新しい方法である。現在本研究内容は Journal of Electric Propulsion 誌に投稿済みである。

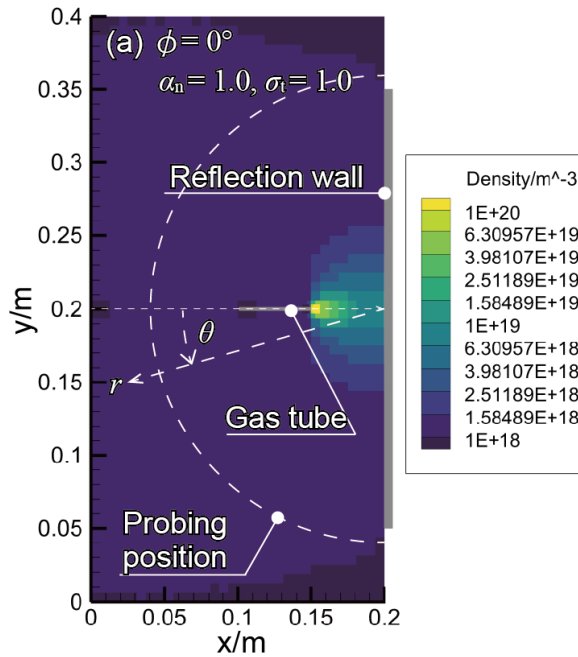


図 6 ガス管から噴出するガスの壁面反射シミュレーション

なお、計算リソースについては、中間報告の時点で全体の 10%程度しか利用していなかったものの、その後 MPI マルチ GPU 計算を取り入れたことで、最終的には当初予定の 50%程度のリソースを活用した。2025 年度は代表者が育児休業を取っていた期間があること、コード改修が完了した年度後半にかけてスパコン上のジョブが busy で想定よりも計算が実行できなかったことから、当初予想リソースに対して実利用が過少となってしまった。次年度以降のリソースは申請時の想定通り活用できると考えている。

※7. 研究業績はウェブ入力です

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

研究の進捗に関しては、当初の想定以上に順調に進行していると自己評価している。コードの改修によって MPI-Cuda w/ AMR の DSMC コードを構築した。この高速ソルバーは国内の研究者では唯一であると自負している。

コードの開発だけでなく、学会発表も国内外問わず複数実施した(国内 2 件、国際 3 件)。一部の発表はその後国際学術論文へ投稿・投稿準備中であり、本共同利用の枠組み内で十分な学術成果を創出したと考えている。

2026 年度も継続課題として jh260016 に採択いただいております、本研究課題を発展させる。2026 年度は新たに希薄ガスだけではなく、プラズマ計算に着手する。研究副代表には、新たに「はやぶさ」等の実際の宇宙推進機利用の経験を持つ JAXA 宇宙科学研究所の山下助教を加える。現象理解に対する助言及び共同でシミュレーションコードを構築することでプラズマを含めた数値真空槽の実現を達成する。