

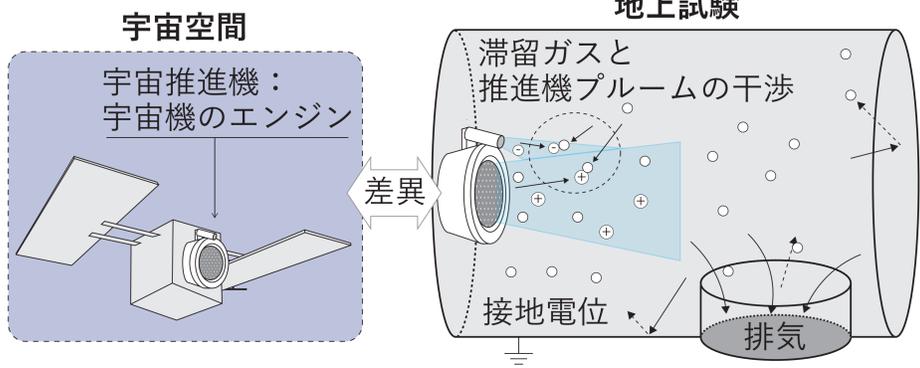
# 数値真空槽の実現に向けた中性粒子流れモデリング手法の確立

jh250022

代表：西井啓太，東京都立大学，システムデザイン学部，航空宇宙システム工学科 (E-mail: knishii@tmu.ac.jp)

## 研究背景：宇宙推進機の試験設備影響

宇宙作動と地上試験の環境差で発生する現象 (Facility effect) により宇宙性能予測が不確かに



## 研究目的：数値真空槽

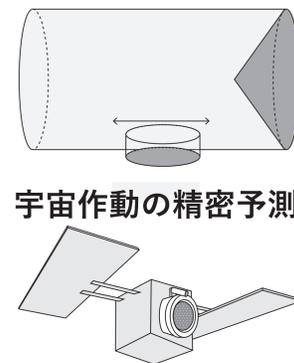
シミュレーションと実験のデジタルツイン的アプローチで「数値真空槽」を実現

シミュレーション：大規模希薄流・プラズマ計算 (Nishii, PSST, 2023)

実験：物理データ取得  
三次元中性粒子速度場 (中山, JSASS, 2020)

試験環境の最適化設計

相補的にモデルを改善した予測装置「数値真空槽」



## 研究フローチャート及び FY2025 JHPCN による実施内容

数値真空槽実現までのロードマップ

FY2025 までで達成予定

大規模並列ソルバーの構築

希薄ガスの精密モデル化

プラズマのモデル化

実利用

実用ツールとしてコミュニティに還元

真空槽環境 (希薄プラズマ環境) では  
・密度の不均一性： $10^{15} - 10^{18} / \text{m}^3$   
・巨大な計算領域： $\sim 1-10 \text{ m}^3$

プラズマモデル化にも中性粒子の分布の把握が不可欠  
壁面反射や真空ポンプのモデル化に存在する不確かさを低減する試みを実施

電気推進機地上試験と比較し、最終妥当性検証  
・背景中性粒子の密度に応じたプルームの変化  
・真空槽との電氣的結合による作動モードの変化

## 数値計算手法：Cuda を用いた Direct simulation Monte Carlo (DSMC) 法

DSMC 法： $Kn > 0.1$  の流れを計算する代表的手法で超粒子追跡を行う (Bird, Oxford press., 1994)

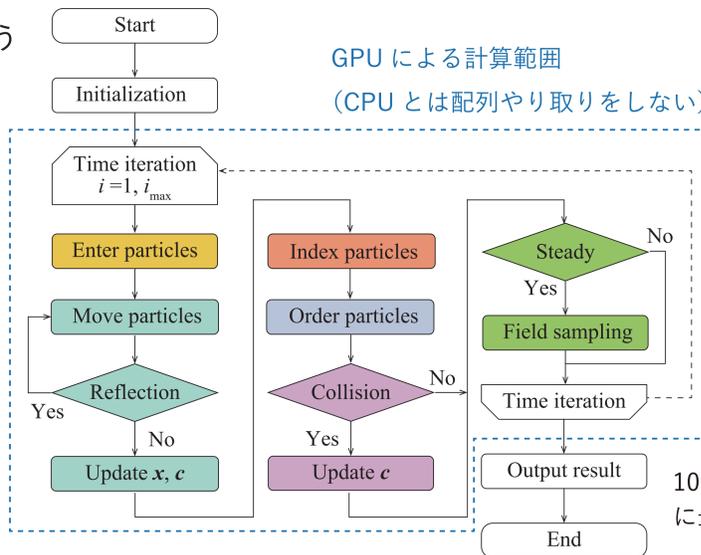
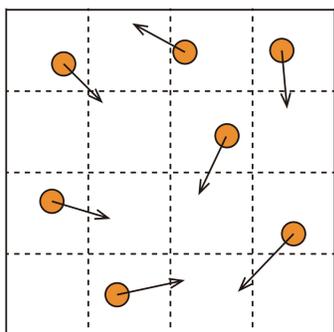
・粒子の移動が完全排他的  
・衝突・サンプルはセルごとに排他的  
=> Cuda による大規模並列化が容易 (Kashkovsky, AIP conf, 2012)

In-house の DSMC コードを構築

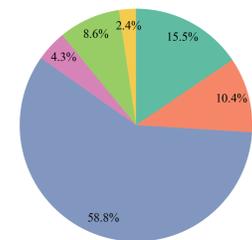
・Open MP コード (Nishii, JPP, 2025) をベースに Cuda 化※

・Octree/Adaptive mesh refinement により 1000 倍程度の密度差に合わせた直交格子

※FY2024 の萌芽型共同研究で実施 (EX24302)



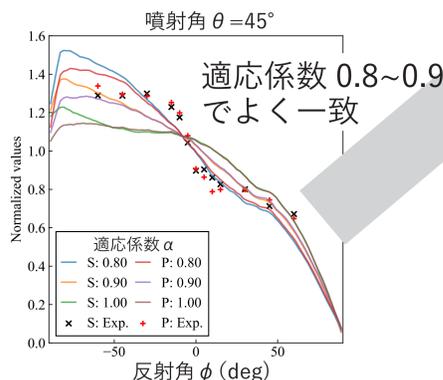
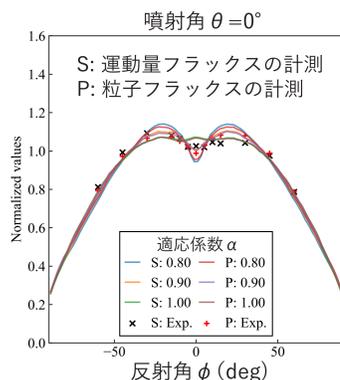
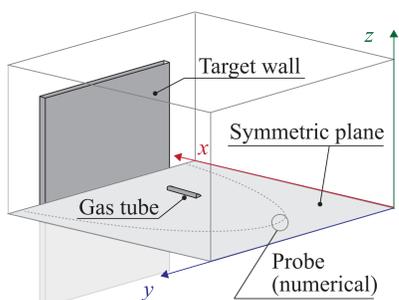
各ルーチンにかかる計算コストの割合 (例)



10 M x 64 byte 程度のソートに最も時間がかかっている

## 実施経過および今後の研究予定

▼壁面噴射ガスの反射について、実験と数値モデル (Maxwell model) を比較 (Nishii, ISTS, 2025)



現状の課題：

・適応係数では説明の付かない傾向差が一部見られる  
=> CLL model (二方向適応係数) を使用

今後の予定：

・計測・計算を真空槽全体に拡大し、特にポンプ近傍のモデル化を行う