

# 観測ロケット搭載用真空計の開発について

大早田 翼 (東海大学大学院), 阿部 琢美 (JAXA 宇宙科学研究所),  
渡部 重十 (北海道情報大学), 三宅 互 (東海大学)

## 1. はじめに

地球の高度約 70 km 以上の大気では, さまざまな電離過程によって中性大気の一部が電離する. 高度 100 km 付近では電離度はまだ 1% にも満たないが, プラズマである電離大気は電磁気的な力を受けるために中性大気とは異なる方向に運動し, 中性大気と電離大気が衝突することで運動量が輸送される. この運動量輸送が超高層大気領域固有の電子密度擾乱や電離圏ダイナモ等の現象にかかわっていると考えられており, これらの現象を理解するためには中性大気の密度および中性粒子の運動である中性風の情報を精確に把握することが必要である.

本研究では観測ロケットに搭載することを前提に, 熱圏下部での中性大気密度の測定および中性風の情報の検出を可能にする測定器の開発を目的とする検討を行った. 具体的には高度約 150 km に相当する大気圧  $10^{-4}$  Pa までの測定を可能にする電離真空計の開発を目的とし, 現在はキャノンアネルバ社製の電離真空計 MG-2F を測定球の候補としている.

観測ロケット上での測定においては電離真空計をどのような容器に収納するかが大変重要である. これまでに海外で行われた観測ロケット上での真空計による大気密度測定では球形や円筒形状の容器に真空計が収納されていたが, 容器の最適な形状についての共通的な理解は得られていない. 本研究では真空計の収納容器の形状検討のため, DSMC (Direct Simulation Monte Carlo) 法を用いた真空計周辺の気体の流れのシミュレーションを検討している.

DSMC 法によって真空計周辺の流れのシミュレーションが可能かどうかを確かめるため, 室内での真空チャンバーを用いた実験とシミュレーションを比較することで DSMC 法の妥当性を検証した. 実験では真空チャンバーに低圧力かつ気体の流れがある状況を作り出し, 気体の流れによって生じる圧力分布を真空計で測定した. この実験を DSMC 法を用いてシミュレーション空間上で再現し, 実験値と計算値を比較することで DSMC 法の妥当性を検証した.

## 2. 実験の概要

### 2.1 実験方法

Fig.1 に実験装置の概略図を示す. 本実験では ISAS/JAXA が有するスペースサイエンスチャンバー (直径 2.5 m, 長さ 5.0 m の円筒型) を使用した. スペースサイエンスチャンバー内に小チャンバーを設置し, 外部からフランジを介してチューブにより小チャンバーに窒素の導入を可能にした. 小チャンバーにはスペースサイエンスチャンバーへの窒素の放出が可能ないようにノズルを接続した. 電離真空計 MG-2F はスペースサイエンスチャンバー内を 3 軸に動かすことができるアームに治具を用いて設置されている. 3 軸アームの座標軸は Fig.1 に示されている.

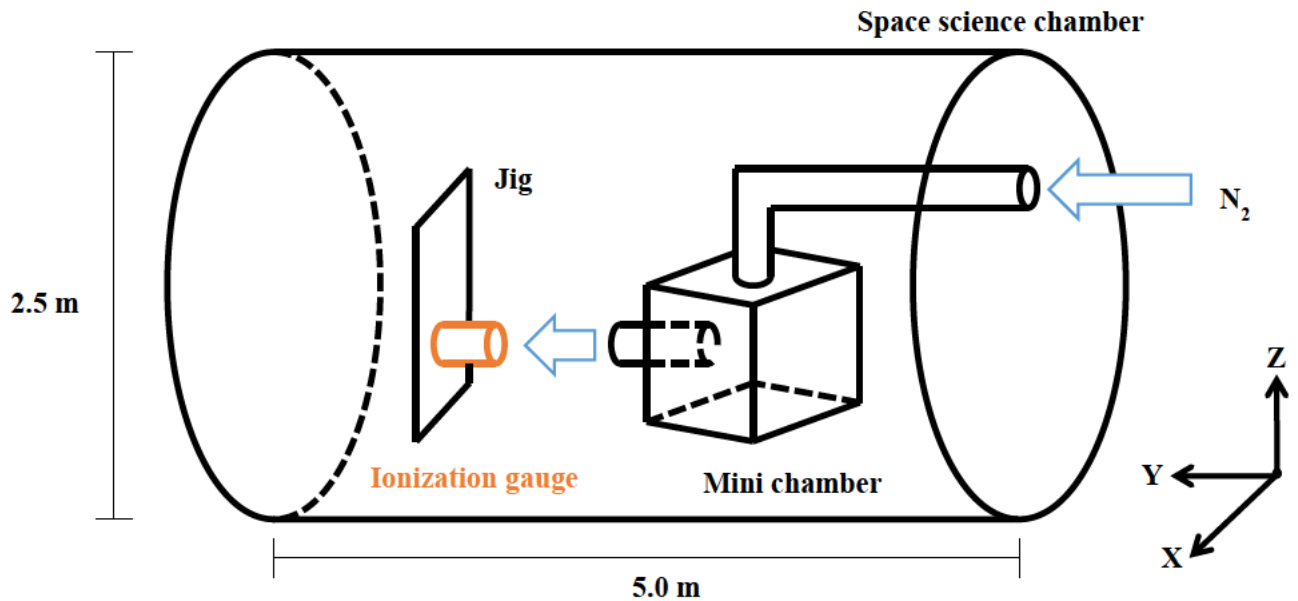


Fig.1 Schematic of pressure distribution measurement

実験の手順は以下の通りである.

- (1) スペースサイエンスチェンバー内部の大気を排気し、大気圧を  $10^{-5}$  Pa 程度まで下げる.
- (2) 小チャンバー内に窒素を導入し、小チャンバー内部の大気圧を  $10^{-1}$  Pa 程度まで上昇させる.
- (3) 両チャンバー間の圧力差により、小チャンバーに設けたノズルから窒素が流出する. この窒素の流れの結果生じるノズル付近の圧力分布を MG-2F を用いて測定する.

## 2.2 実験結果

スペースサイエンスチェンバー内部の大気圧が  $6.39 \times 10^{-5}$  Pa, 小チャンバー内部の大気圧が  $1.24 \times 10^{-1}$  Pa の時のノズル付近の圧力分布を Fig.2, Fig.3 に示す. 3 軸アームの原点の位置は, MG-2F のフィラメントの先端がノズルの正面から 1 cm にある状態と定義した. Fig.2 は 3 軸アームの X 座標を 0 と固定した場合, Fig.3 は Z 座標を 0 とした場合である. Fig.2, 3 より MG-2F がノズルから離れていくにしたがって大気圧が低くなっていることが分かる.

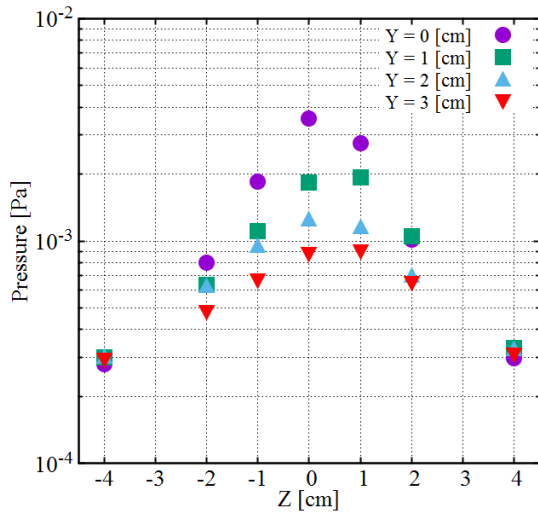


Fig.2 Pressure distribution in front of nozzle ( $X = 0$ )

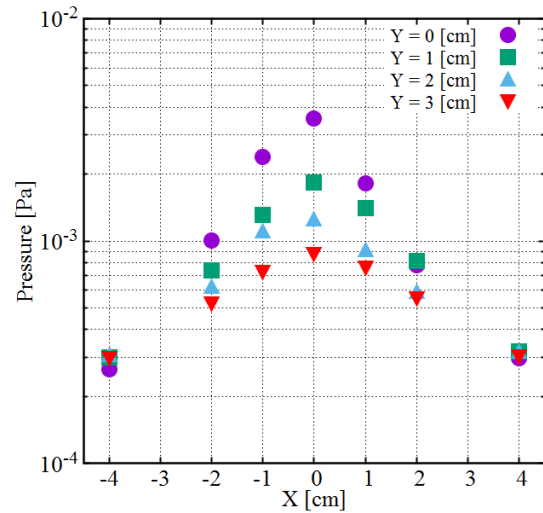


Fig.3 Pressure distribution in front of nozzle ( $Z = 0$ )

### 3. DSMC 法によるシミュレーション

#### 3.1 DSMC 法の概要

熱圏下部のように低圧力で気体の平均自由行程が大きい環境では気体を連続体として扱うことができなくなり，Navier-Stokes 方程式が有効ではなくなる．MSIS-90 によると高度 86 km での平均自由行程は約 1 cm，高度 131 km では 10 m となり，高度の上昇に伴ってさらに大きくなる．DSMC 法はこのような希薄気体の流れを，1 つで多数の気体粒子を表現するサンプル粒子の運動と衝突の計算を通してシミュレーションする手法である．

#### 3.2 シミュレーション方法

Fig.4 にシミュレーションに用いた計算領域の形状を示す．図中の領域 A, B はそれぞれ室内実験における小チャンバーとスペースサイエンスチャンバーを表している．計算の簡単化のため，治具や電離真空計などの構造の詳細は一部簡略している．領域 A の寸法は  $5.0 \times 5.0 \times 15$  cm，領域 B の寸法は  $39 \times 51 \times 51$  cm である．ノズルは角筒型であり，断面は 1 辺 1 cm の正方形，長さは 10 cm である．ノズルの先端と治具までの距離は 4 cm であり，これは室内実験においてノズルと治具の距離を最も近づけた状態を再現している．ノズルの中心を通り，ノズルの先端に位置する点を原点と定義した．

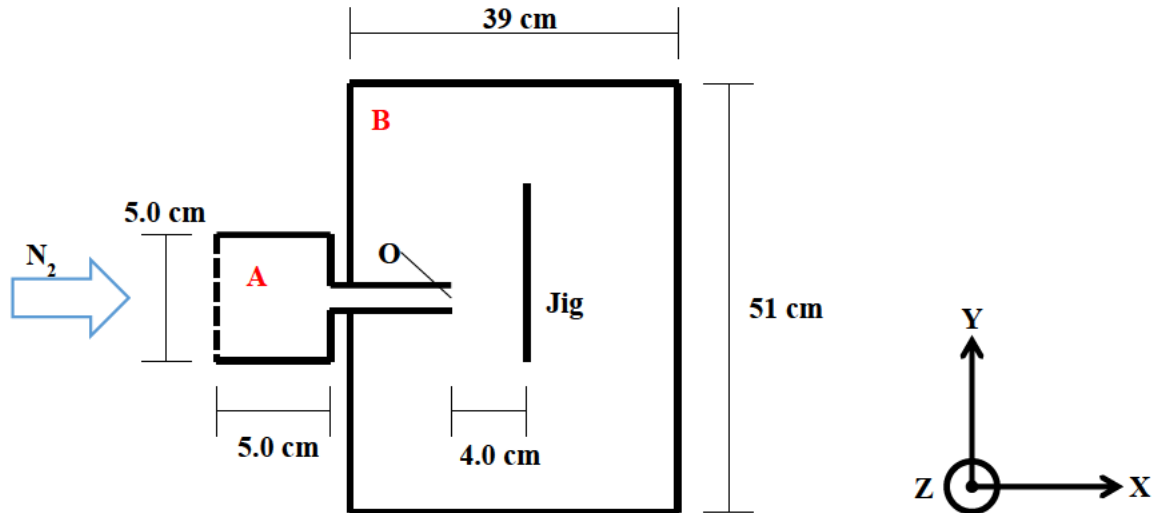


Fig.4 Schematic of flow field

シミュレーションの流れは以下の通りである.

- (1) 計算領域全体の圧力を  $6.39 \times 10^{-5}$  Pa, 壁面の温度を 293.15 K とする.
- (2) 領域 A の左端 (図中破線部) から圧力  $1.24 \times 10^{-1}$  Pa の窒素を導入し, 領域 A を満たす.
- (3) 領域 B と領域 A の間の圧力差により, 窒素がノズルを通して領域 A から領域 B へと流入する.

### 3.3 シミュレーション結果

Fig.5, 6 にシミュレーション結果の一例を示す. 横軸は Y 座標, 縦軸は圧力であり, Fig.5 は Z 座標が 0 cm のときの, Fig.6 は Z 座標が -4 cm のときの結果である. 両グラフの X 座標は 1 cm である. 図中の dsmcFoam というプロットが DSMC 法によるシミュレーション結果であり, experiment というプロットが室内実験における実験値である.

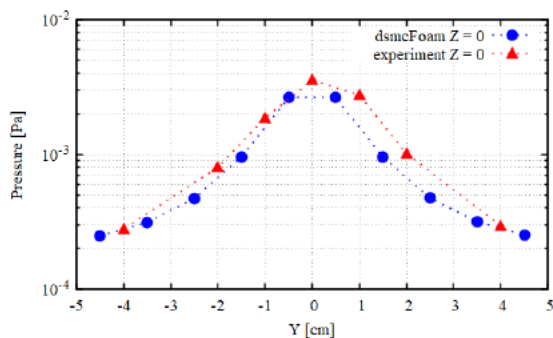


Fig.5 Results of DSMC and experiment  
(Z = 0 cm)

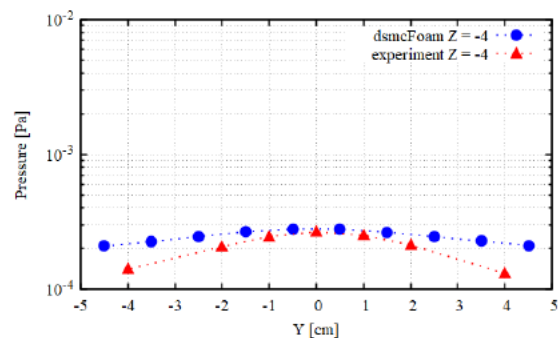


Fig.6 Results of DSMC and experiment  
(Z = -4 cm)

DSMC 法による計算値と室内実験における実験値を比較すると, 両者に概ね一致が見られる. Fig.5 ではシミュレーション結果が実験値よりも多少低いのは, シミュレーションにおける治具位置を実験において治具とノズルを最も近づけた状態として再現しているため, 実際に実験値

を取得した治具の位置とシミュレーションにおける治具の位置に差が生じていることや、電離真空計などの構造の詳細を簡略化したことによる影響が生じているためだと考えられる。Fig.6ではシミュレーション結果が実験値よりも若干高いが、これは領域 B の体積が実際のスペースサイエンスチェンバーよりも小さく、ノズルから流出した窒素が領域 B の壁に衝突して反射してノズル方向へ再び運動する効果によるものと考えられる。多少の相違は見られるものの、シミュレーション結果と実験値が概ね一致していることから、DSMC 法の妥当性を検証することができた。

#### 4. まとめと今後の展望

観測ロケット上での真空計を用いた大気密度の測定においては真空ゲージをどのような容器に収納するかが大変重要である。これまでに海外で行われた観測ロケット上での真空計による測定では球形や円筒形状の容器に真空ゲージが収められていたが、最適な形状についての共通認識は未だ得られていない。

真空ゲージを収納する容器には開放型と閉鎖型が考えられる。前者では容器に入ってきた大気粒子が真空ゲージ付近を通過した後に外部に流れ出すのに対し、後者では容器内にいったん留まる。これらは測定対象である大気密度や測定環境により使い分ける必要がある。閉鎖型の容器の場合には流入する大気量によっては背景の大気密度と一致しない真空度が計測される可能性があって、精確な測定のためには両者の関係を定量的に理解しておくことが必要になる。このため、背景の大気密度および真空計を収納した容器への大気流入量と真空ゲージによって得られる真空度（大気密度）との関係が明確に示せるような形状の真空計を設計することが重要である。

本研究では、観測ロケットに搭載して測定を行う電離真空計を収容する容器の形状検討のため、DSMC 法を用いた真空計周辺の気体の流れのシミュレーションを行った。DSMC 法を用いて真空計周辺のシミュレーションが可能かどうかを確かめるため、大気の流れが存在する状況を室内実験とシミュレーションで模擬し、実験値と計算値の比較により、DSMC 法を用いて真空計周辺の気体の流れを再現できることを検証することができた。

今後の方針としては、観測ロケット上で中性大気密度の測定を可能にする真空計の構造を DSMC 法を用いて検討を行い、さらには中性風に関する情報の検出を可能にするような真空計の構造についての検討を行っていく予定である。