

超高層大気観測のための真空計開発に関する検討

大早田 翼 (東海大学大学院), 阿部 琢美 (JAXA),
渡部 重十 (北海道情報大学), 三宅 互 (東海大学)

Study on an Instrument Development for Sounding Rocket in the Upper Atmosphere

Tsubasa Oohayata (Tokai University), Takumi Abe (Japan Aerospace Exploration Agency),
Shigeto Watanabe (Hokkaido Information University), Wataru Miyake (Tokai University)

1. まえがき

地球の高度約 70 km 以上の大気では, 極端紫外光 (EUV) をはじめとするさまざまな電離過程により, 中性大気の一部が電離して電離大気となる. 高度約 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氣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関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重要である.

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に関する情報の検出を可能にする測定器の開発に関する研究を行った. 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標とする. 現在はキャノンアネルバ社製の電離真空計 MG-2 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重要である. これまでに海外で行われてき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, 容器の最適な形状は明らかになっていない. 真空計の収納容器の形状検討のために, 熱圏下部のような希薄気体のシミュレーションは有効なツールである. 本研究では希薄気体のシミュレーションを可能にする DSMC (Direct Simulation Monte Carlo) 法を用いて真空計周辺の気体の流れのシミュレーションを行った.

まずは室内実験においてチャンバーに熱圏下部を模擬した高真空環境を作成し, その中に気体の流れを発生させ, その流れによって生じる圧力分布を真空計で測定した. その室内実験を DSMC 法に基づくシミュレーションで再現して計算値と実験値の比較を行ったところ, 両者に概ね一致が見られたことから, この手法の有効性を確認した. つぎに真空計を円筒型の容器に収納して同様の実験およびシミュレーションを実行し妥当な結果を得た. このような手法で, DSMC 法を用いて真空計の収納容器の形状についての検討を行った.

2. 真空計による風の測定実験

2.1 実験の概要

電離真空計を観測ロケットに搭載して測定を行うにあたって, 真空計が大気の流れの中にある場合にどのような値を示すのかを調べるため, 室内実験を行った. 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) を使用した. スペースサイエンスチャンバーの中には小型のチャンバー (ミニチャンバー) を設置しており, ミニチャンバーには外部から窒素を導入するためのチューブおよびスペースサイエンスチャンバー内に窒素ガスを放出するためのノズルを設置した.

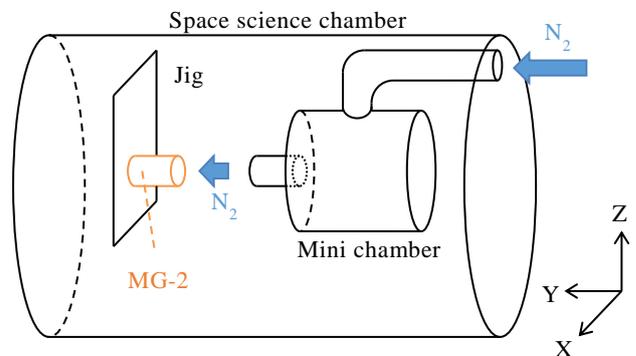


Fig.1 Schematic of pressure distribution measurement

電離真空計 MG-2 はスペースサイエンスチャンバー内部を 3 軸方向に移動できるアームに板状の治具を介して設置した. MG-2 の初期位置 (原点) はミニチャンバーに接続したノズルの正面から Y 方向に 1 cm の位置である. 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ャンバー内の大気を排気し, チャンバー内部の大気圧を 10^{-5} Pa 程度まで下げる.
- (2) ミニチャンバーに窒素を導入し, ミニ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, ミニチャンバーに接続し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可動アームに取り付けた MG-2 で測定する.

2.2 実験結果

スペースサイエンスチャンバー内部の大気圧が 6.39×10^{-5} Pa, ミニチャンバー内部の大気圧が 1.24×10^{-1} Pa のときのノズル付近の圧力分布を Fig.2 に示す. Fig.2 のグラフにおけるアームの Z 座標は 0 である. Fig.2 は, ノズルから離れていくにしたがって大気圧が低くなる傾向を数値として示している.

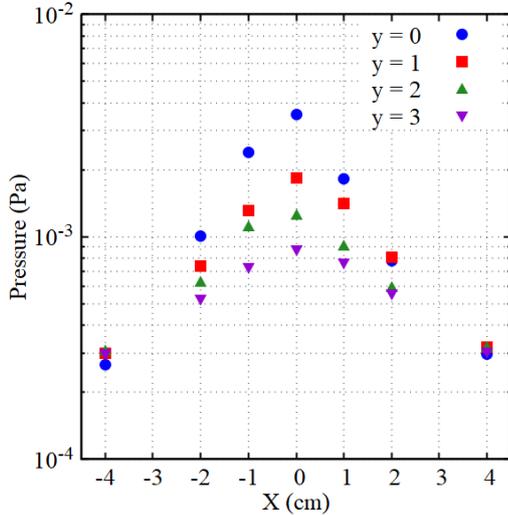


Fig.2 Pressure distribution in front of the nozzle

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ず, Navier-Stokes 方程式が有効ではなくなる. MSIS-90 モデルによると大気平均自由行程は高度 100 km で約 0.1 m であり, 高度 131 km では約 10 m で考えている測定器の大きさに比べて十分大きい. 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す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 真空計による風の測定実験のシミュレーション

DSMC 法に基づくシミュレーションを適用して真空計収納容器の形状検討を行うために, 室内実験の実験値とその実験を再現したシミュレーションの計算値を比較し, 両者の間に大きな差が生じないか検討を行った.

Fig.3 にシミュレーションに用いた計算領域の形状を示す. シミュレーションで与えた条件は以下の通りである.

- (1) チェンバー壁面の温度を 293.15 K とし, 計算領域全体を数密度 $1.58 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ の窒素で満たす.
- (2) ミニチャンバーに数密度 $3.07 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の窒素を導入する.
- (3) 2つのチャンバー間の圧力差により, ミニチャンバーからスペースサイエンスチャンバーへと窒素粒子がノズルから流れ出す.

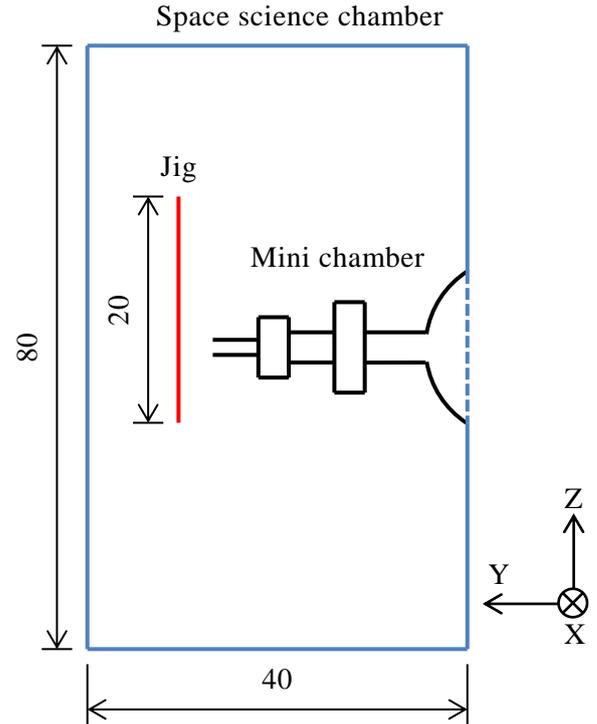


Fig.3 Schematic of flow field

3.3 実験値とシミュレーション値の比較

Fig.4 に実験値と計算値を比較するプロットを示す. dsmcFoam と experiment はそれぞれ計算値と実験値を表している.

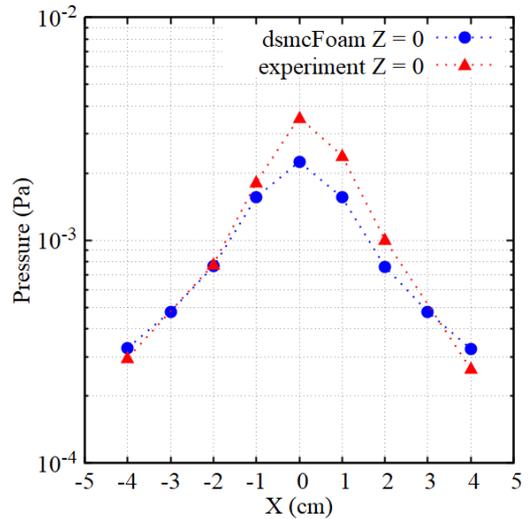


Fig.4 Comparison of DSMC and experiment results

計算値と実験値を比較すると, 両者に概ね一致が見られる. 計算値が実験値よりも低い箇所が見られるが, これは, シミュレーションのモデル作成時に電離真空計 MG-2 の構造の詳細を簡略化したことによる影響が出ていると考えられる.

4. 真空計収納容器の形状検討

4.1 円筒型容器に収納した真空計による測定実験

電離真空計 MG-2 をそのまま観測ロケットに搭載して測定を行っても、中性風の方向や速度に関する情報をその測定値から検知することは難しい。そこで、真空計に対する中性風の到来方向や速度に応じて測定値が変化するような構造の収納容器に真空計を収納することが必要である。本研究では、まず風の到来方向に感度を持つと考えられる円筒型容器を作成し、容器に MG-2 を収納して風の測定実験を行った。

Fig.5 に室内実験で使用した円筒型容器の概略図を示す。左側に直径 10 mm の開口部があり、ここからガスの流入が可能である。

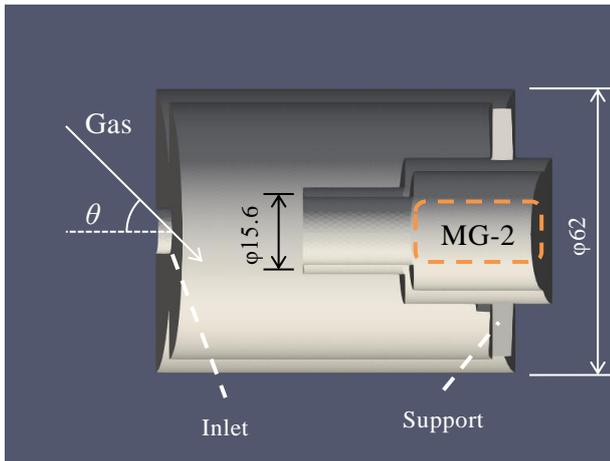


Fig.5 Cross section of the cylindrical case
(The diameter of an inlet is 10 mm)

図中の破線で囲んだ箇所に MG-2 のフィラメントがあり、ここで圧力を測定する仕組みになっている。容器の底面には MG-2 収納部分と容器を接続する支柱 (Support) を 6 つ等間隔に設けた。気体の運動方向と円筒容器の軸 (Axis) の間の角度を θ とすると、 θ が小さいときは気体が MG-2 収納部に到達するが、 θ が大きくなるにつれて MG-2 収納部に到達する気体の量が減少することが予想される。円筒容器の右側底面は面積比 2/3 で開口となっており MG-2 収納部に入ることができなかった粒子はそのまま容器外部へ流れていく。

Fig.6 に Fig.5 に示した真空計容器を用いた室内実験の概略図を示す。本実験もスペースサイエンスチェンバーを用いて行った。ミニチャンバーには外部から窒素を導入するチューブおよび窒素を流出させる 2 つのノズルを接続した。ノズル A の正面には回転台の上に固定した円筒型容器に収納した MG-2 を設置し、ノズル B の正面には板状の治具を介して 3 軸アームに接続した MG-2 を設置した。回転台の角度は円筒型容器の穴がノズル A の正面にある状態を 0° と定義した。

実験の手順は以下の通りである。回転台は Z 軸方向を軸に回転する。

- (1) 2 章の風の測定実験と同様に、スペースサイエンスチェンバー内部の大気圧を 10^{-5} Pa 程度まで下げ、ミニチャンバーには窒素を導入してミニチャンバー内部の大気圧を 10^{-1} Pa 程度まで上昇させる。両チャンバー間の圧力差によってミニチャンバーに設けられたノズル A, B より窒素が流出する。
- (2) 回転台を回転させることで真空計に対する窒素の

流れの角度の変化を再現し、角度による測定値の変化を記録する。

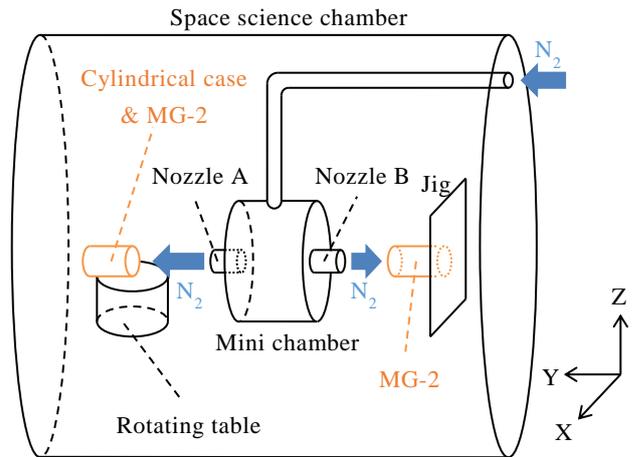


Fig.6 Schematic of pressure measurement in the vacuum chamber

スペースサイエンスチェンバー内部の大気圧が 5.20×10^{-5} Pa, ミニチャンバー内部の大気圧が 6.35×10^{-1} Pa のときの円筒型容器内部の圧力値を Fig.7 に示す。

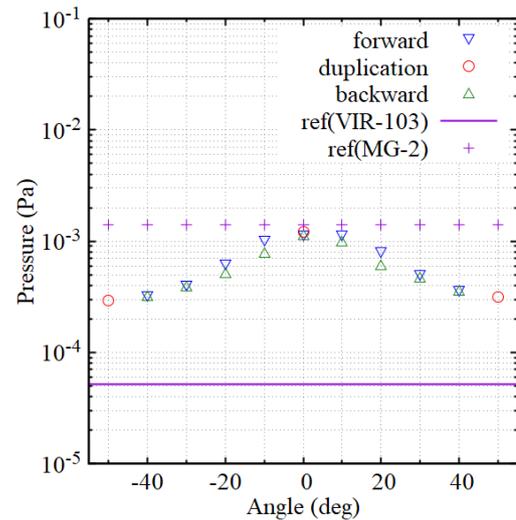


Fig.7 Pressure inside and outside of the cylindrical case

横軸は回転台の角度、縦軸は圧力である。ref(VIR-103) はスペースサイエンスチェンバー内の圧力を、ref(MG-2) は治具に設置した MG-2 の圧力値を示している。forward は円筒型容器の Inlet がノズルから離れるように移動するとき、backward はノズルに近づくように移動するときのプロットである。duplication は回転方向が変化する位置を示している。Fig.7 より回転台の角度が 0° のときは円筒型容器内の圧力値が最も高く、治具に設置した MG-2 に近い値をとっているのに対し、角度を大きくするにつれて容器内の圧力値が小さくなっていることがわかる。これは MG-2 収納部分の圧力が、Fig.5 における θ によって変化するためである。

4.2 測定実験の DSMC 法による再現

4.1 節の実験を DSMC 法によって再現を行い、実験値

との比較を行った。Fig.8 に計算領域を示す。計算領域作成の際には円筒型容器やミニチャンバーの詳細な構造については簡略化した。

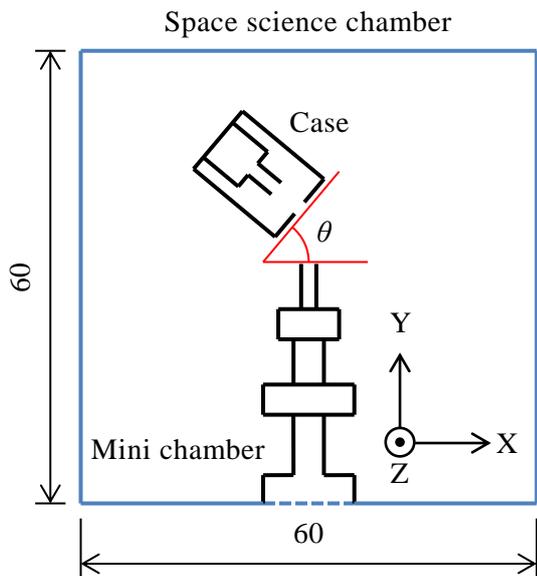


Fig.8 Schematic of flow field and simulation region

計算で与えた条件は以下の通りである。

- (1) 壁面の温度を 293.15 K とし、計算領域全体を数密度 $1.28 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ の窒素で満たす。
- (2) ミニチャンバーに数密度 $1.57 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ の窒素を導入する。
- (3) 2つのチャンバー間の圧力差により、ミニチャンバーからスペースサイエンスチェンバーへと窒素が移動する。

円筒型容器の軸と Y 軸の間の角度が 0° , 25° , 50° となるようにシミュレーションを行った。

Fig.9 に計算値と実験値を比較するグラフを示す。横軸は円筒型容器の軸と Y 軸の角度、縦軸は MG-2 収納部分内の圧力の平均値を示している。dsmcFoam と experiment はそれぞれ計算値と実験値である。

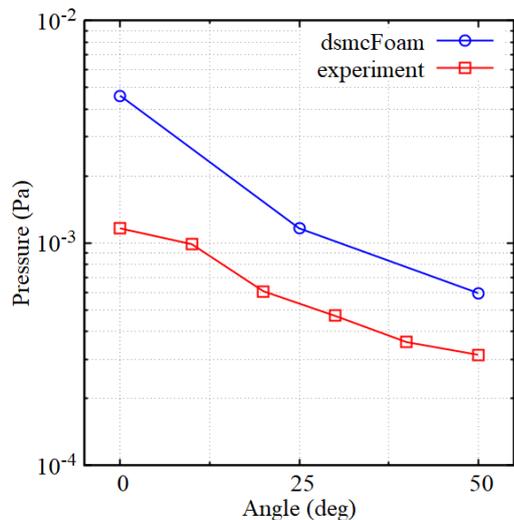


Fig.9 Comparison of DSMC and experiment results

両者を比較すると、計算値のほうが実験値よりも 2~4

倍ほど大きい。実験ではミニチャンバーにはノズルが 2 本設けられているが、本計算でのミニチャンバー領域は円筒型容器付近のみ再現している。ミニチャンバー領域に導入している窒素の数密度は実験で得られた圧力値から理想気体の状態方程式を用いて換算したものであるが、実験でのミニチャンバー内部の圧力測定位置と窒素導入部分の距離が近く、圧力測定位置からノズルにかけて圧力が小さくなる圧力勾配が生じている可能性がある。そのため計算においてミニチャンバー領域の全域に導入した窒素の数密度はノズル付近では実際よりも高くなってしまったために、計算値が実験値よりも高くなってしまった可能性が考えられる。ここで圧力値の角度に対する変化に着目すると、実験値と計算値の間に概ね一致が見られるが、 $25^\circ \sim 50^\circ$ の範囲において圧力の変化の勾配は $0^\circ \sim 25^\circ$ の範囲よりも値が小さくなっている。よって角度が 25° よりも大きい場合、気体の到来方向の検出が難しくなる可能性が考えられる。

4.3 DSMC 法による真空計収納容器の形状検討

円筒型収納容器を使用した実験及びシミュレーションでは、Fig.5 における θ が 25° よりも大きくなると気体の到来方向の検出が難しくなる可能性があった。観測ロケット上で測定を行うことを考えると、以下の要件を満たすような構造の容器が必要であると考えられる。

- ・ $\theta = 45^\circ$ までの中性風の検出が可能
- ・ 連続的に測定を行うため、容器内だけでなく MG-2 収納部分の気体の排気も行えるような構造

以上のような要件を満たすものとして、Fig.10 に示すような構造の容器の検討を行った。Fig.5 の円筒型容器から MG-2 収納部分の入口の直径をおよそ 2 倍にしてより気体を取り込めるようにし、MG-2 収納部分には穴 (Slot) を設けて気体を排気できるような構造とした。また Slot を覆うように Cover を設け、MG-2 収納部分に入らなかった気体が円筒内部の壁から反射して MG-2 収納部分に逆流しないようにした。

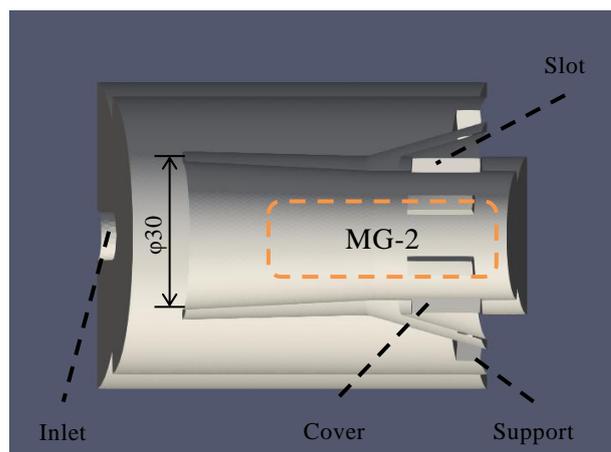


Fig.10 Cross section of the improved cylindrical case

Fig.8 に示した計算領域において Cylindrical case の箇所を Fig.10 のモデルに変更し、その他のパラメータを変更せず DSMC 法によるシミュレーションを行った。Fig.11 に計算結果を比較するグラフを示す。横軸は角度、縦軸は各角度の圧力値を角度 0° のときの値で正規化し

た値を示す。図中の cylinder case は Fig.5 のモデルを使用したもの、improved cylinder case は Fig.10 のモデルを使用したものである。

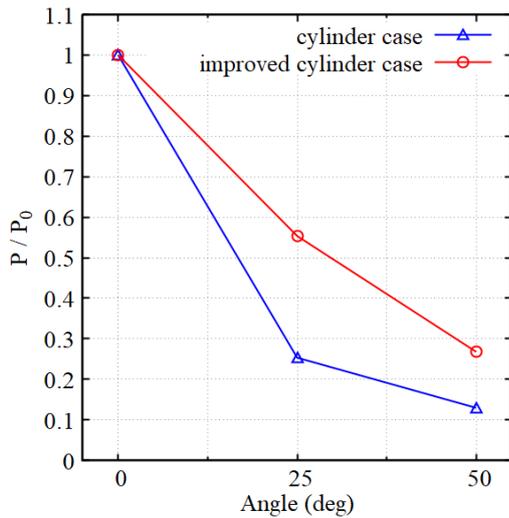


Fig.11 Comparison of normalized pressure inside cases

Fig.11 から、改良前の円筒型容器の場合は粒子の入射角度が 25°よりも大きくなると圧力の変化量が小さくなるが、改良後の円筒型容器では角度 0°~50°まで直線的に変化しており、25°より大きな角度での到来方向の検出精度が改善されていることが確認できた。

5. まとめ

熱圏下部での中性大気密度および中性風のその場観測のために電離真空計を観測ロケットに搭載することを検討しており、観測ロケット上での真空計を用いた測定に

おいては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。

本研究では容器の最適な形状について検討するために DSMC 法の適用を検討した。まずは地上の実験設備に超高層大気を模擬した環境を作成し、真空計を用いた測定実験を行った。その実験を DSMC 法に基づくシミュレーションを用いて再現して実験値と計算値を比較したところ、両者の間に概ね一致が見られ、その妥当性が確認された。

つぎに大気の流れの到来方向の検出を目的として、円筒型真空計収納容器の設計と試作を行い、同様に実験およびシミュレーションを行ったところ、容器の軸と気体の運動方向の間の角度が 25°よりも大きくなると圧力の変化量が小さくなることが分かった。そこでより大きな入射角度に対して感度を持たせつつ、観測ロケット上で連続的に観測を行うための改良を容器に施してシミュレーションにて検討を行ったところ、気体の到来方向に対して圧力が直線的に変化する容器の形状を得ることができた。これは本研究で設計した真空計容器が大気の流れの方向の推定に役立てられる可能性を示している。

参考文献

- 1) J.H. Clemmons et al.: The Ionization Gauge Investigation for the Streak Mission, SPACE SCIENCE REVIEWS, 145, pp.263-283(2009)
- 2) Quanhua Sun et al.: Computational Analysis of High-Altitude Ionization Gauge Flight Measurements, JOURNAL OF SPACECRAFT AND ROCKETS, Vol.43, pp.186-193(2006).
- 3) G. A. Bird: The DSMC Method, (2013)