

観測ロケット搭載用真空計の開発

大早田 翼 (東海大), 阿部 琢美 (JAXA), 三宅 互 (東海大)

1. まえがき

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, 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の衝突によって運動量が輸送される. この運動量輸送がこの領域特有の電子密度擾乱など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.

そこで本研究では観測ロケットに搭載することを前提とした, 熱圏下部での中性大気密度の測定および中性風の推定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 150 km に相当する真空度 10^{-4} Pa まで測定可能な測定器の開発を目的とし, 現在はキャノンアネルバ社製の電離真空計 MG-2F (Fig.1) をその候補としている.



Fig.1 Ionization gauge MG-2F

測定における MG-2F の最適な形状を設計するために, 希薄気体のシミュレーションが可能な DSMC (Direct Simulation Monte Carlo) 法を用いた真空計周辺の流れのシミュレーションを検討している. まずはチャンバー内に圧力差を与え, その圧力差によって駆動される流れの圧力分布を真空計を用いて計測する. 次にその実験系を 2 次元の DSMC 法を用いて再現し, シミュレーション結果と実験値を比較することで DSMC 法の有効性を検討する. DSMC 法の有効性を確認した後, DSMC 法を用いて真空計の構造設計を行う.

2. 実験の概要

2.1 実験方法

Fig.2 に実験の概略図を示す. 本実験では ISAS/JAXA が有するスペースサイエンスチェンバー (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ェンバーの中に小チャンバー (Fig.3) を設置し, 小チャンバーには外部から窒素ガスの流入が可能なチューブとガスを放出できるノズルが接続されている. 電離真空計 MG-2F はスペースサイエンスチェンバー

の中を3軸方向に動かすことができるアームに治具を用いて接続されている。3軸アームの座標軸はFig.2に示している通りであり、MG-2Fのフィラメント部分がノズルの正面から1cmの位置にある状態を各座標が0の原点と定義した。

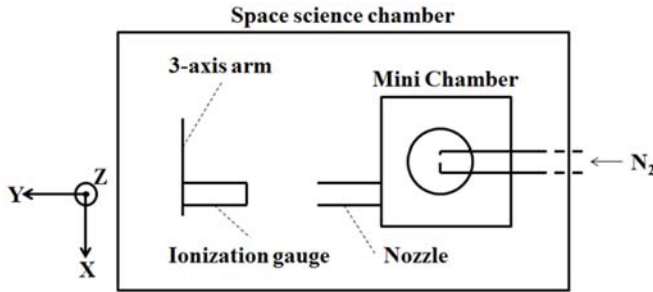


Fig.2 Schematic of pressure distribution measurement

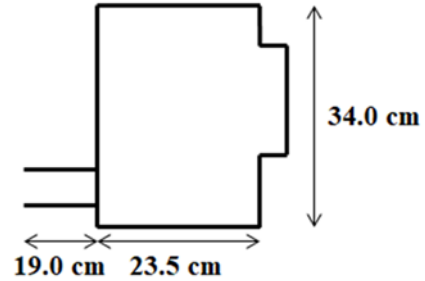


Fig.3 Schematic of the mini chamber

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真空度を 10^{-5} Pa 程度まで下げる。
- (2) 小チャンバー内部に窒素ガスを流し、小チャンバー内部の真空度を 10^{-1} Pa 程度まで上昇させる。
- (3) 3軸アームを用いて、ノズル周辺の真空度を測定する。

2.2 実験結果

スペースサイエンスチェンバー内部の真空度が 6.39×10^{-5} Pa、小チャンバー内部の真空度が 1.24×10^{-1} Pa の時のノズル前の真空度分布を Fig.4, Fig.5 に示す。Fig.4 は3軸アームのZ座標を0と固定した場合、Fig.5 はX座標を0とした場合である。Fig.4, 5より、電離真空計がノズルから離れていくにしたがって真空度が低くなっていることがわかる。

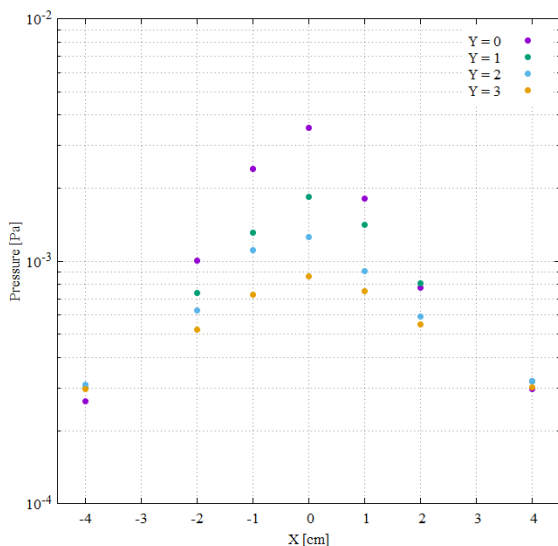


Fig.4 Pressure distribution in front of nozzle (Z=0)

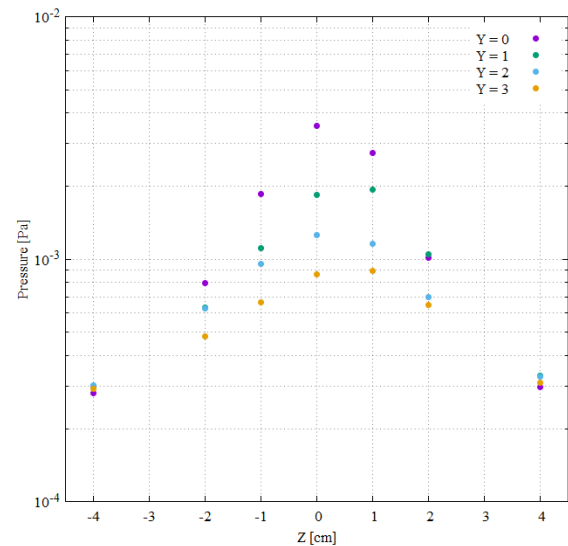


Fig.5 Pressure distribution in front of nozzle (X=0)

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下の領域や、平均自由行程が長い領域では、気体を連続体として扱うことができなくなり、Navier-Stokes 方程式が使用できなくなる。大気平均自由行程の例として高度 86 km で 1 cm となり、高度の上昇につれてさらに大きくなっていく¹⁾。DSMC 法はこのような希薄気体の流れを実在する粒子数よりも少ない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

本研究では実験における X 座標を 0 とする 2 次元による DSMC 法を適用し、電離真空計を設置するために使用した治具を考慮しない場合と考慮する場合でシミュレーションを行った。Fig.6 にシミュレーションに用いた流れ場の形状を示す。

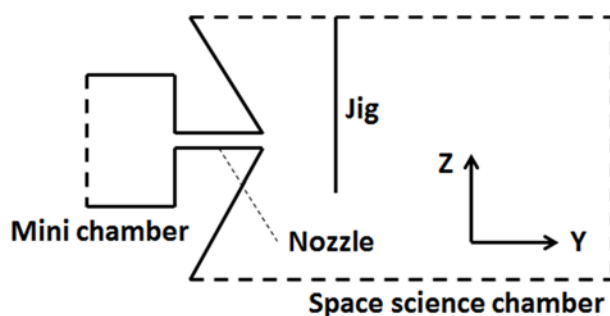


Fig.6 Schematic of flow field

実験における小チャンバーを模擬した領域は 11.0×5.00 cm、ノズル直径は 1.00 cm、ノズルの長さは 10.0 cm とした。ノズル右端からスペースサイエンスチャンバーを模擬した領域の右端までの距離は 50.0 cm である。治具の厚さは 1.00 mm で、治具はノズルの中心から 5.00 cm 下まで伸びている。これは実験において治具を最も下げた状態を模擬している。小チャンバー左端の圧力は 1.24×10^{-1} Pa で一定とし、スペースサイエンスチャンバー内部の真空度の初期状態は 6.39×10^{-5} Pa とした。温度の初期条件は 293.15 K である。スペースサイエンスチャンバーの右端および上下端の境界条件は、粒子の流出はあるが流入はないものとしている。

3.3 シミュレーション結果

Y 座標を 0~3 cm まで 1 cm 刻みで変化させた場合の 3 軸アームの Z 座標に対する圧力分布の DSMC 法による計算値と実験値を比較するグラフを Fig.7~10 に示す。ここで、DSMC(Board)のプロットは治具ありの計算結果を、DSMC のプロットは治具なしの計算結果を、Ionization gauge のプロットは実験値を示している。Fig.7~10 から、治具がないと仮定した場合の DSMC 法による計算値と、治具があると仮定した場合の計算値の間に実験値があることがわかる。これは実験においては治具を使用しているため、治具がないと仮定すると実験よりも粒子の拡散が広がるために計算値が実験値よりも低くなり、また、治具があると仮定すると 2 次元シミュレーションでは紙面に直行する方向の粒子の拡散がないために計算値が実験値よりも高くなるのだと考えられる。

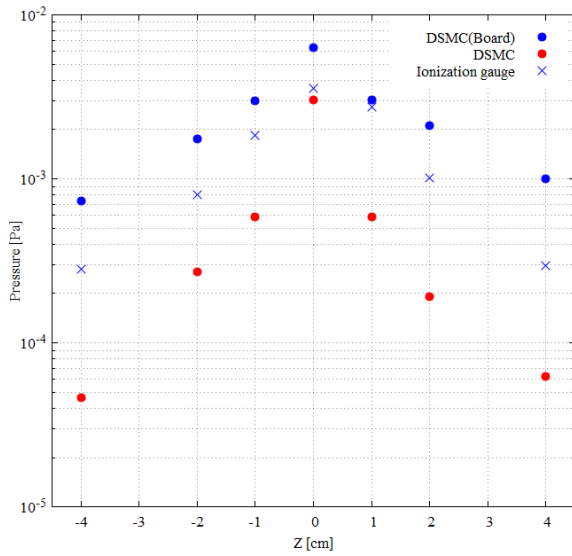


Fig.7 Results of DSMC and experiment (Y=0)

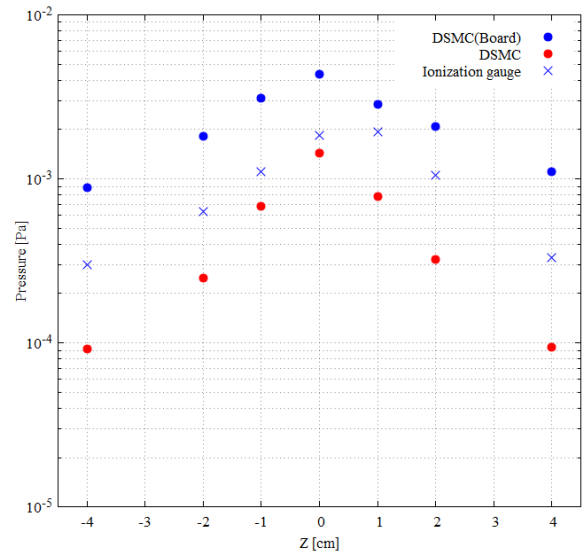


Fig.8 Results of DSMC and experiment (Y=1)

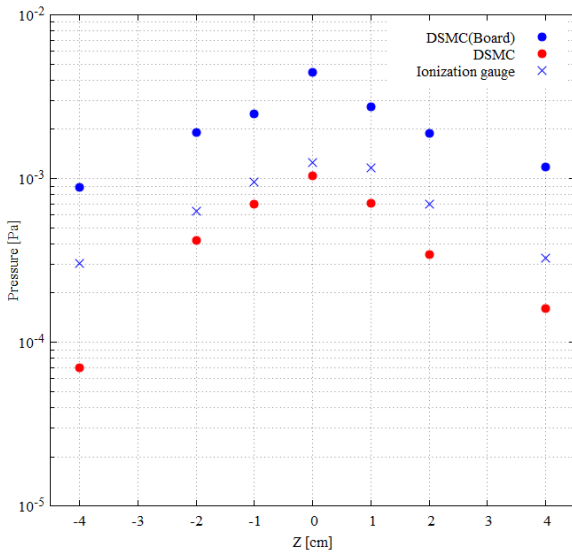


Fig.9 Results of DSMC and experiment (Y=2)

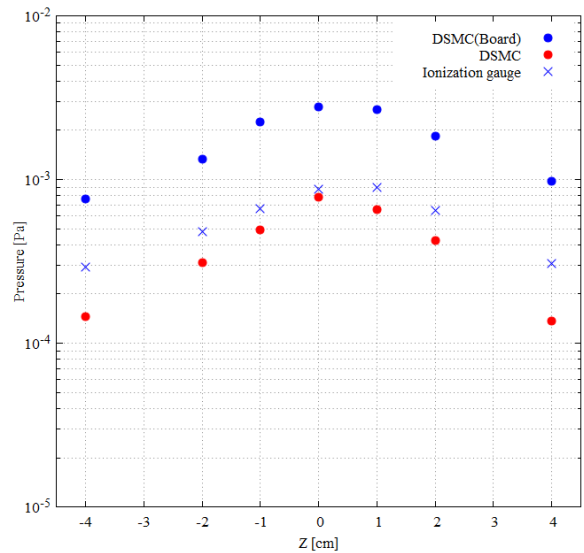


Fig.10 Results of DSMC and experiment (Y=3)

4. まとめと今後の展望

本研究では、2つのチャンバー間に与えた圧力差によって駆動される流れの圧力分布を測定する実験を行い、その実験系を2次元のDSMC法で再現した。計算値と実験値を比較すると、治具がないとした場合の計算値と治具があるとした場合の計算値の間に実験値があるという結果を得られた。

今後はシミュレーションを3次元に拡張するなど、計算精度の向上を図り、DSMC法の妥当性を確認した後は真空家の構造設計に取り組む。

参考文献

- 1) Quanhua Sun et al.: Computational Analysis of High-Altitude Ionization Gauge Flight Measurements, JOURNAL OF SPACECRAFT AND ROCKETS, Vol.43, pp.186-193(2006).
- 2) G. A. Bird: The DSMC Method, (2013).