

# 超高層大気観測用真空計の開発

阿部 琢美(JAXA)、田川 雅人(神戸大)、渡部 重十(北海道情報大)、横田久美子(神戸大)、  
加藤 大志(神戸大)、田中 勇人(東海大)、三宅 互(東海大)

## Development of instrument to observe the upper atmosphere on sounding rocket

Takumi Abe (JAXA), Masahito Tagawa (Kobe Univ.),  
Shigeto Watanabe (Hokkaido Information Univ.), Kumiko Yokota (Kobe Univ.),  
Taishi Kato (Kobe Univ.), Yuto Tanaka (Tokai Univ.), Wataru Miyake (Tokai Univ.)

### 1. はじめに

超高層大気領域には中性大気と電離大気が存在し、各々には異なる力が働き合うのに対し相互に運動量を交換しながら運動を行っているため複雑なダイナミクスが生起し、これに起因して他の領域には見られない興味深い現象が多数存在している。これらを解明するためには各々の運動を理解するとともに両者の間で交換される運動量を定量的に把握することが必要である。我々はこのような目的意識のもと、観測ロケットに搭載し高度 70~200km の超高層大気領域において中性大気を測定する真空計の開発を行っている。真空計による測定を用いた超高層大気領域の中性大気密度および風速の推定は、海外では観測ロケットや人工衛星上で行われているが(例えば Clemmons et al., 2009)、日本ではほとんど実績がない。本稿では超高層大気観測用真空計開発の現状を中心に述べる。

### 2. 超高層大気観測用真空計開発の目的と特長

本開発の目的は超高層大気(熱圏下部)領域において大気圧力(密度)の測定が可能な観測ロケット搭載用真空計の実現にある。真空計を用いた中性大気密度や風速の推定は日本ではほとんど実績がなく、この種の観測は行われていない。地上から光学観測やライダーにより中性

大気を観測する手法はあるが各々対象領域が大規模、観測高度に大きな誤差が伴う等の問題がある。熱圏での中性大気と電離大気の結合を理解する上で局所的な大気密度や中性風を観測することは重要でそのために議論に耐えうる観測手段の確立が望まれている。

一般に超高層大気領域でのその場観測として、ロケットや人工衛星等の高速で飛行するプラットフォーム上で行う大気圧測定の場合、飛翔体自身の運動が引き起こす大気擾乱や機器からのアウトガス等により大きく影響を受けることが予想される。したがって、測定された圧力値から真の大気密度の推定が可能かについては大きな不確定性が予想されるため、このような観点から実験的に検証を行う必要がある。

また、超高層大気空間を飛翔するプラットフォーム上の機器において高電圧を使用する場合には、予想外の放電が生じないよう高度の関数として表される大気モデルを用いて高電圧を印加するタイミングを決定すること多い。しかし、実際の飛翔時に大気圧がどのような時間変化を示すかは構造物からのアウトガスの影響もあり不明な点が多い。このような必要性に鑑み実際に軌道上で大気密度変化をモニタし実測データを取得することが望ましい。

このような観点の下、我々は観測ロケットに搭載し大気圧力変化の実データを取得すること

を目的として、真空計の開発を行っている。本真空計により得られた圧力値はロケット頭胴部における大気環境を表す重要なパラメータとして参照されるであろう。中性大気の圧力に加え、ロケットの移動速度の影響を評価できるよう真空計を2式搭載したいと考えている。

大気圧の測定子としてはキャノン・アネルバ製のクリスタルイオンゲージを用いる予定である。この測定子は高压側（大気圧～4 Pa）ではクリスタルゲージ、低压（4 Pa～ $10^{-6}$  Pa）ではミニチュア B-A ゲージとして動作する。一般に地上で用いる圧力測定用のイオンゲージでは圧力が条件以下になったことを確認した上でフィラメントを ON するが、クリスタルイオンゲージでは圧力が 4 Pa 以下になると自動的に切り替わり内部でフィラメントが ON になるため、タイミングを見極める必要がないというメリットがある。また、測定圧力値は出来るだけ低い高度から得たいがクリスタルゲージは低高度高压側もカバーできるため、この点においても大きなメリットをもっている。

### 3. 真空計測定子の収納容器について

我々は圧力測定子を2種類の異なる容器（パターンソン型、円筒型）に収納して測定を行うことを計画している。パターンソン型ではロケット上で観測されるガス流の入射方向に影響されない状態で圧力を測定、円筒型では入射方向に応じて変化する圧力を測定し、両者の比較を通してロケット上で観測されるガス流による圧力測定への影響を評価するためである。

パターンソン型プローブは希薄気体の圧力測定に用いられるもので、球形ゲージ容器の中に測定子を設置しチューブを通じて容器に流入してくるガスの圧力を測定するものである（Enkenhus et al., 1959）。この型の容器は米国の衛星 Streak mission でも使用された。自由分子流として扱える条件の下では、入射角がある程度の範囲内では容器内の圧力は一定値を示すことが知られている。

円筒型容器は本開発において考え出されたも

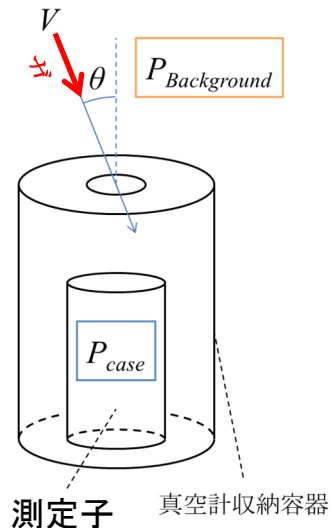


図1. 円筒型容器の構造

ので図1に示すように中空円筒容器の内側に測定子を収納する小円筒を配置した構造となっている。測定子の円筒軸が中空容器に交差する位置に小さな穴を設け、外部からここを通過して入射するガス流を測定子で検出する。ガス流が正面から流入する場合は小円筒に直射し比較的大きな圧力が測定されるが、ガス流の方向が円筒の法線方向からずれていくと圧力は変化することが予想される。このようにガス流と流入角θに依存して測定圧力値が変化するように設計し、圧力値からロケット上での大気流の方向が推定できるようにしたい。

### 4. 円筒型容器を用いた圧力測定実験

我々は宇宙科学研究所先端宇宙科学実験棟にある大型スペースサイエンスチェンバー内にガス流が流れる環境を構築し、その状況下で円筒

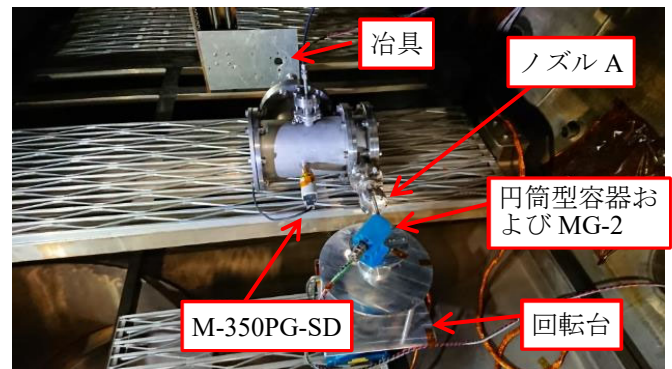


写真1. 大型チェンバー内の実験配置図



写真2. ノズルと円筒型容器の拡大図

型容器内に設置した測定子により圧力を測定する実験を行った。大型スペースサイエンスチェンバーはターボ分子ポンプ1台、クライオポンプ2台を有し、内部の圧力を  $10^{-5}$  Pa 台に保つことができる。内部に小さなチェンバーを置いてガスを導入し内圧を上昇させ、側面に設けたノズルからガスが流れ出すようにした。ガスの導入量はマスフローコントローラにより制御できる。ノズルの正面に内部に真空測定子をもつ円筒型容器を設置し、回転台によりガス流に対する容器の方向を変えながら圧力の測定を行った。写真1は大型スペースサイエンスチェンバー内の実験装置の配置、写真2は円筒容器およびノズルの拡大写真である。

このような測定系を用いて円筒型容器内で測定された圧力値の変化を図2aおよび2bに示す。

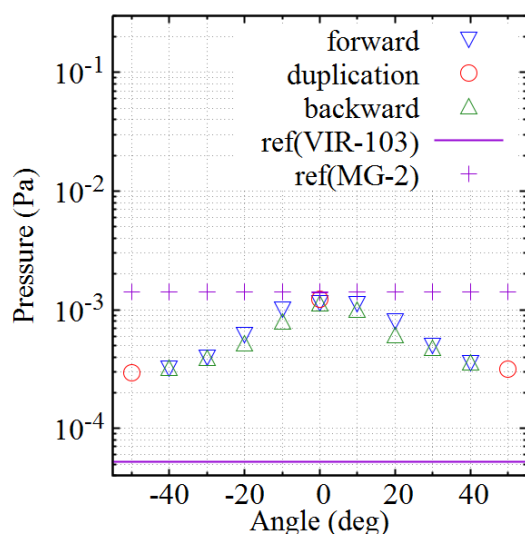


図2a. 円筒型容器を用いた圧力測定結果  
(マスフロー流量が3.0 sccmの場合)

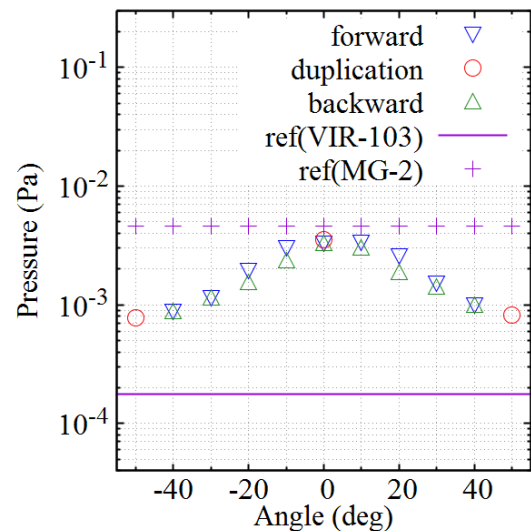


図2b. 円筒型容器を用いた圧力測定結果  
(マスフロー流量が11.0 sccmの場合)

横軸の角度はノズルと円筒型容器の中心軸が同一直線上に位置する場合を0度、プラスの角度は容器を上から見た時に反時計回りの方向と定義した。脚注に forward、backward と書かれたシンボルは0度から離れていく、近づいていく回転の場合の測定値を示している。図に示されるように圧力が高め、低めのいずれの場合においても0度から離れるにしたがって圧力が低くなる傾向が確認された。これは図1の円筒容器の構造から推測されるようにガス流が正面から流入した場合は測定子容器にガスが入るが、角度が大きくなるにつれ容器に入る量が減少していくためであると解釈される。forward と backward に分けて測定したのは圧力の高い状態から遷移した場合と逆の場合では測定値に差が生じるかもしれないことを考えてのことであったが、この角度範囲では圧力に大きな差は見られなかった。

## 5. DSMC 法による数値シミュレーション

大早田(2019)はDSMC(Direct Simulation Monte Carlo)法を用いてこのような測定系で得られる圧力値の数値計算を行った。この計算に用いられた各種条件をTable1に示す。計算結果の一例として円筒容器に対して25度の角度でガス流を

入射させた場合の圧力分布を図 3 に示す。圧力は粒子密度と温度(20℃)から計算し  $2.0 \times 10^{-4} \sim 2.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}$  の範囲をカラーコードで表示した。下側のノズルから出ていく圧力の大気粒子の一部が円筒容器内に入っていく様子が表現されている。

Table 1. DSMC シミュレーションにおける条件

パラメータ	条件
温度境界条件	293.15 (K)
使用する気体の種類	窒素
領域全体の気体の初期数密度	$1.28 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$
領域に侵入する気体の数密度	$1.57 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$
1 つのサンプル粒子が表す粒子数	$5.0 \times 10^9$ 個
壁と粒子の反射モデル	拡散反射
タイムステップ	$10^{-5} \text{ sec}$

このような計算の実行により円筒容器内部圧力のガス流の入射角に対する変化を調べた結果を図 4 に青線で示した。赤線と緑線で示されているのは既に述べたチェンバーでの実験で得られた圧力の測定値で、赤は反時計回りに台を回転した場合、緑は時計回りの場合の圧力を示している。なお、これらの圧力値は角度 0 度の時の最大値で正規化した値として表示されている。計算値と実験値は角度の小さい範囲では比較的良く一致しているが角度が大きくなると差が大きくなる傾向にある。

## 6. 観測ロケットへの搭載検討

2022 年度に打上げが予定されている観測ロケット S-520-32 号機の機器配置検討において頭胴部のスペースに余裕があることが判明したため、この空間に開発中の真空計を搭載できないか検討を行っている。ただし、あくまで余剰スペースを狙った搭載検討であるため、メインの搭載観測装置に影響を与えることがあってはならない。この条件の下で超高層大気観測用真空計の搭載を可能にする配置案を図 5 に示す。ロケッ

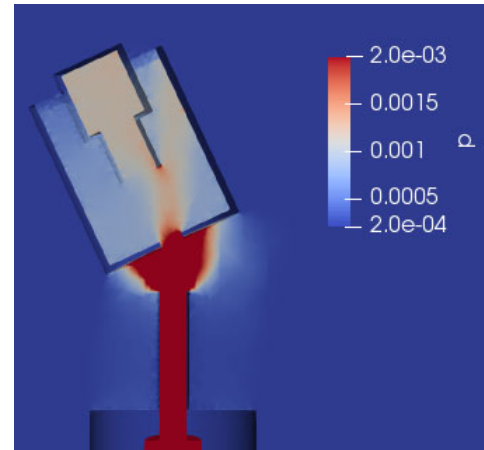


図 3. DSMC 法による数値シミュレーション結果の一例（ガス流の入射角が 25 度の場合）

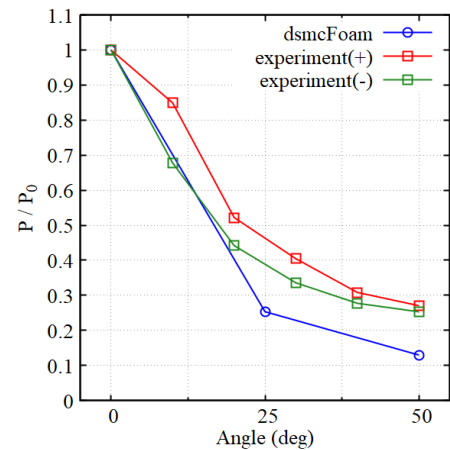


図 4. 角度に対する圧力変化の DSMC 法による計算結果と実験値の比較

ト頭胴部の先端には可視カメラが搭載され、全方位を撮影するためにその視野を遮ることがあってはならない。このため、カメラから見て直下の計器板の外縁内側に真空計が位置するような配置にしている。検討の結果として円筒型容器の場合には比較的大きな体積空間を占めてしまうため、先端の径を小さくした円錐型容器を用いることとした。球形容器、円錐型容器の大気導入口は図面の上側になるが障害物があっては自然の流れを検出できないため、2つの容器の間にある可視カメラ以外に構造物は存在しない位置関係となっている。

図 5 の下部に示されている長方形は真空計の電気回路部であるが、求められる機能的な条件は次の通りである。

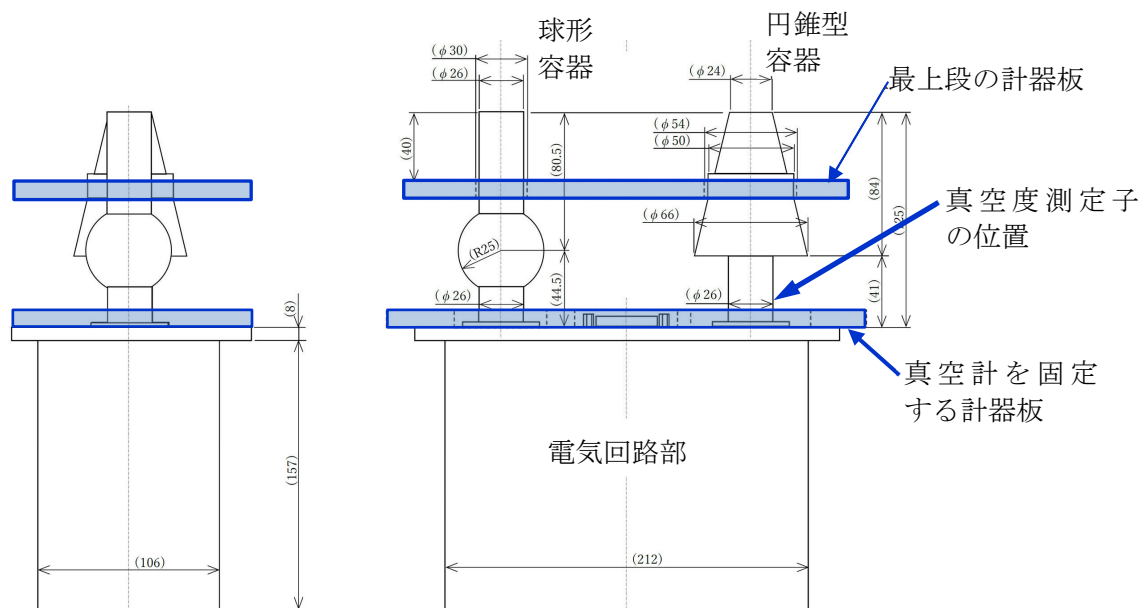


図 5. 超高層大気観測用真空計の観測ロケットへの搭載イメージ

左：側面図、右：正面図

- 1) 2つの真空計測定子の出力を処理するクリスタルイオンゲージのコントローラ2式を筐体内部に収納すること
- 2) 観測ロケットアビオニクスから供給される電源電圧は+28Vであるため、これを+24Vにして真空計コントローラに供給すること
- 3) 真空計コントローラ部からの圧力値に関する出力情報(0~10V)を取り込み、電圧を2分の1(0~5V)にして観測ロケットアビオニクスに出力すること。

#### 参考文献

- J. H. Clemmons, L. M. Friesen, N. Katz, M. Ben-Ami, Y. Dotan, R. L. Bishop, The Ionization Gauge Investigation for the Streak Mission, *Space Science Reviews* **145**:3-4, 263-283, 2009.
- K. R. Enkenhus, E. L. Harris and G. N. Patterson, Pressure probes in free molecular flow, UTIA report No.62, AFOSR TR-59-120, 1959.
- 大早田翼、超高層大気観測のための測定器開発に関する研究、東海大学大学院2018年度修士論文。

#### 7. まとめ

今後解決していくべき課題として、1)ロケット上で観測するガス流の方向を決定するために最適な円筒容器の構造の設計、2)電気回路部、クリスタルイオンゲージ測定子の耐環境性の確認、3)ロケット機体からのアウトガスが真空度測定に与える影響の検討、が残されている。

観測ロケット上で出来るだけ広い高度圏で超高層大気に関する圧力測定が出来るよう真空計の開発を進めていく予定である。