

観測ロケット搭載中性大気測定用真空計の開発

阿部 琢美 (JAXA)、三宅 互 (東海大学)、田中 勇人 (東海大学)

Development of instrument to measure neutral atmosphere on sounding rocket

Takumi Abe (JAXA), Wataru Miyake (Tokai University), Yuto Tanaka (Tokai University)

1. はじめに

我々は高度 70~150km の超高層大気領域において中性大気密度および中性風の測定を行うための観測ロケット搭載用真空計の開発をおこなっている。

真空計を用いた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[1]、日本ではほとんど実績がなく、現在はこれらの物理量について局所的な値を知る手段が無い。熱圏下部においては大気の一部が電離しているが、電氣的磁氣的な力を受けるプラズマと影響を受けない中性粒子間で衝突が生じるため、この領域の粒子は複雑な運動をすることが知られている。この領域に特有な電子密度擾乱等の未解明の現象を理解するためには中性大気の密度や運動を正確に理解することが必要で、そのために測定法の確立が望まれている。

ロケットや人工衛星等の高速で飛行する物体上での大気圧の測定は飛翔体自身の運動が引き起こす大気擾乱により大きく影響を受けることが予想され、測定された圧力値から真の大気密度や中性風の推定が可能かについては大きな不確実性が予想されるため、実験的観点からの検証が必要である。

2. パターソンプローブ

大気測定において、平均自由行程が測定系の特性長に比べて十分に大きく分子間の衝突が無視できる状況を自由分子流と呼ぶこととする。

希薄気体のガス圧を測定する場合にチューブに接続されたゲージ容器の中に設置された測定子を用いることがある。このタイプの圧力測定系としてパターソンプローブがあり、その 2 つの例を図 1 に示す。いずれの場合も球の内部に測定子を置く。(a) のオリフィス型圧力プローブは側面にガスの流入孔をもつチューブをもち、ガスの流れがチューブの中心軸と直角をなす方向に配置される。孔の直径はチューブの壁の厚みに比べ十分大きい必要がある。自由分子流ではこのプローブで測定される圧力はオリフィスの外向き法線とガスの流入方向のなす角 θ に依存する。(b) の長型チューブでは圧力プローブに長さ l 、内径 $2r$ のチューブが連結され、開口面がガスが入ってくる方向に向け

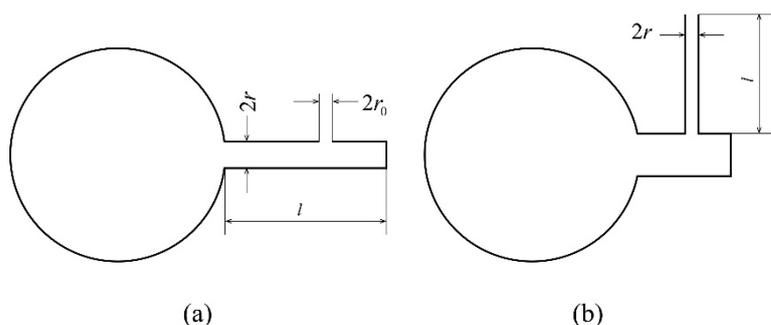


図 1. パターソンプローブの形状

られる。この型のプローブでは測定される圧力は $2r/l$ に応じて変化する。これら2つのプローブにおいて、共に最初にチューブからガスが流入し、その後球形容器に流れ込む構造になっているのは、チューブの内壁にガスを衝突させることで、その並進運動エネルギーを失わせるためである。

観測ロケット上での大気測定においては、ロケットの移動によって生じる見かけ上のガスの並進運動速度が大気粒子の熱速度よりも大きい状況がほとんどである。そのため、飛行中に大気の静的圧力を測定するためには一旦ガスの並進運動エネルギーを失わせた後に、ガスの密度と温度に依存した熱運動による圧力を測る必要がある。飛行体上でこのような測定環境を実現するために我々はパターソンプローブを採用することとし、容器の内部に真空度測定のための素子を設置して圧力測定を行うこととした。

パターソンプローブにおいて、外から流れ込むガスの圧力と球形容器内の圧力の関係は次の式で表される[2]。

$$\frac{p_{\theta}}{p_{out}} \sqrt{\frac{T_{in}}{T_{out}}} = \chi(S \cos \theta)$$

$$\chi(y) = e^{-y^2} + y \sqrt{\pi} (1 + \operatorname{erf}(y))$$

但し、 p_{θ}, p_{out} は内部、外部のガス圧、 T_{in}, T_{out} は内部、外部のガス温度、 θ はガスの入射角、 S は入射するガスのマッハ数である。この式にしたがって内外のガス圧比を計算し、入射角度に対する変化を示したのが図2である。なお、内外でガスの温度は一定としている。入射角が大きくなるにつれガス圧比は小さくなり、マッハ数が5.0の場合は入射角30度で正面からの入射に対し87%、60度で50%、85度で約11%になる。

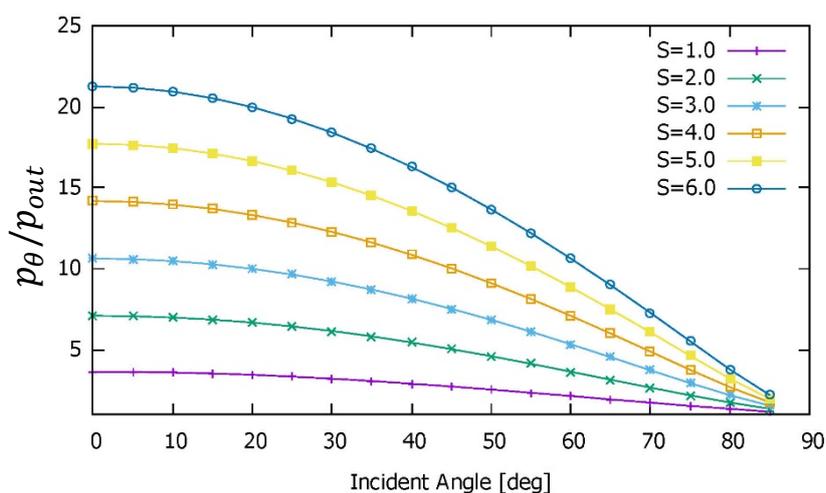


図2. パターソンプローブを用いた場合の容器内外の圧力のガス入射角に対する変化

3. 大型スペースチェンバーを用いた測定実験

我々はパターソンプローブを製作し、大型スペースチェンバー内に設置、ガス流の中で内部に固定された測定用のイオンゲージにより容器内の圧力を測定する実験を行った。実験ではオリフィス型のパターソンプローブを用いたがその外観を図3に、大型スペースチェンバー内部、外部の機器配置を図4に示す。なお、パターソンプローブは寸法を決めた後に3Dプリンタで製作したものである。

ターボポンプ、クライオポンプを用いて、大型スペースチェンバー内を 10^{-5}Pa 程度の高真空にした後、内部に設置したミニチェンバーにテフロンチューブを通して窒素ガスを導入、側面に設けたノズルから外部（大型チェンバー内）に気体を放出し、内部にイオンゲージをもつパターソンプローブを流入孔が正面にくるように配置した。この時、パターソンプローブは回転台に設置し、大型スペースチェンバーの外部から遠隔操作で 360° 回転できるようにした。

実験に用いたイオンゲージはキャノンアネルバ製の MG-2 であるが、汎用品ではフィラメントの外側に外筒があるのに対し、球形容器内には該当なしのフィラメント剥き出しのものを使用した。

実験の手順は以下のとおりである。

- 1) 大型スペースチェンバー内の大気をロータリーポンプで粗挽きした後、ターボポンプおよびクライオポンプで排気を行い、内部の圧力を 10^{-5}Pa 程度にする。この時、圧力はイオンゲージ MG-2 を用いて計測を行う。
- 2) ミニチェンバー内に外部からチューブを通じて窒素を導入し内部の圧力を 10^{-1}Pa 程度にする。これにより、ミニチェンバー内と大型スペースチェンバーとの間に圧力差が発生し、ノズルから窒素が流れ出す。この時、外部からの窒素流入量は、マスフローコントローラ制御ユニット PE-D20 を用いて制御し、ミニチェンバー内の気圧は内部に取り付けたピラニ真空計と MG-2 を用いてモニターする。
- 3) パターソンプローブ内に配置した外筒なしの MG-2 でプローブ内に流入してきた窒素による圧力を計測する。その後、パターソンプローブを載せた回転台を回転させ、プローブの流入孔がミニチェンバーのノズルの正面から $\pm 5^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$ 、 $\pm 15^\circ$ 、 $\pm 20^\circ$ 、 $\pm 25^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ の角度にある時に同様に計測を行う（マイナスを時計回りとする）。
- 4) PE-D20 を用いてミニチェンバーに流入させる窒素の量を 3 sccm から 7 sccm まで 1 sccm 毎に増加させ、同様にパターソンプローブ内の圧力変化を測定する。

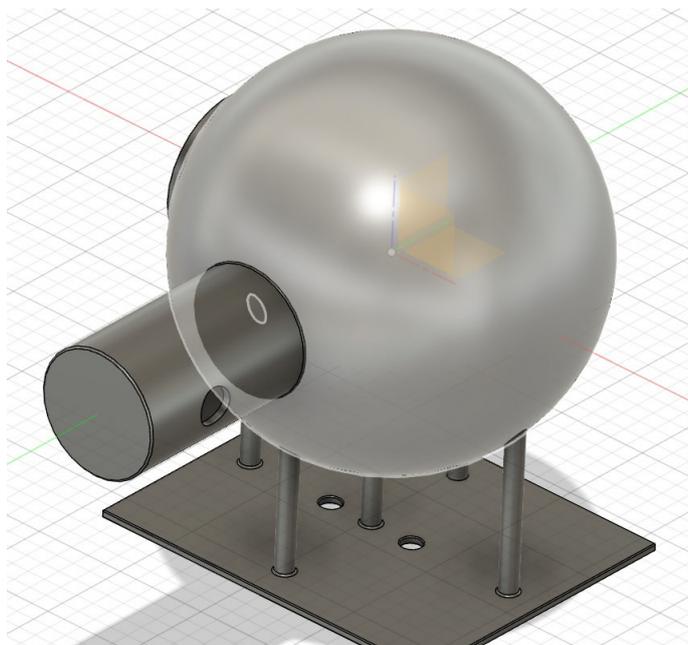


図 3. チェンバー実験に用いたパターソンプローブ

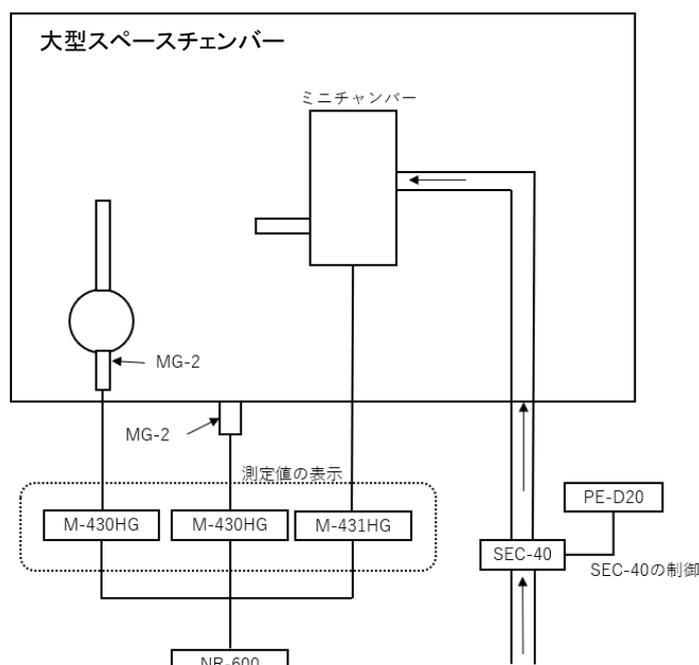


図 4. パターソンプローブを用いた測定実験の機器配置

図 5 a にこのような実験により測定されたパターソンプローブ内の圧力のガス入射方向に対する変化、図 5 b に 0 度方向の圧力により正規化された圧力比を示す。なお、ミニチェンバーのノズル付近では圧力が 10^{-2} Pa 程度であり平均自由行程が数 10 cm とパターソンプローブよりも十分大きく、ガス流は自由分子流と見なしてよい。

測定結果において、容器内圧力は入射角が大きくなるにつれて圧力は小さくなり予想通りの傾向ではある。しかし、図 2 に示した理論計算では入射角 30 度で 87% であり、測定結果はより大きな減少率で圧力が下がっていることになる。この差については様々な理由が考えられるが、最も大きいと考えられる原因はミニチェンバーのノズルから出たガス流が一樣になっていないことである。理論計算では一様なガス流の中にプローブが置かれた場合を想定しているのに対し、我々の測定では内径 10mm のノズルからガスが出ていくために広がりを持ち、位置によりガス流の方向や圧力が異なっている可能性が考えられる。

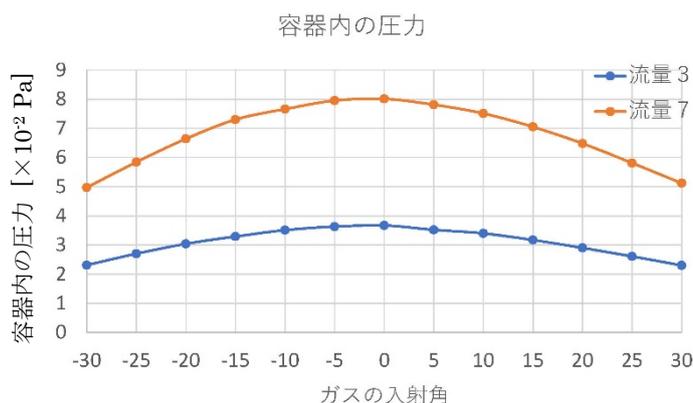


図 5 a. パターソンプローブ内部圧力のガス入射に対する変化

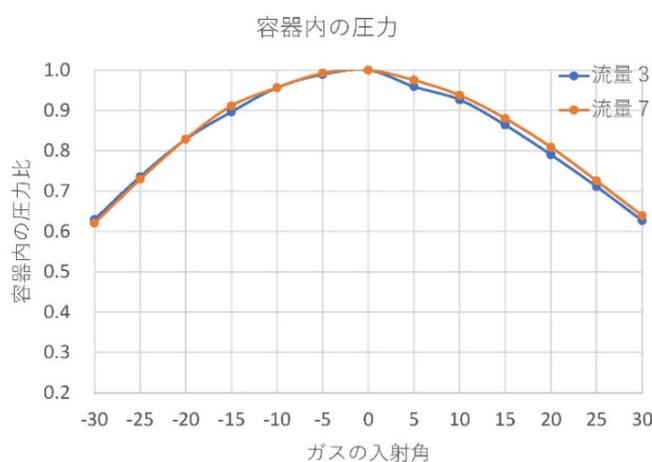


図 5 b. パターソンプローブ内部の圧力比 (0 度方向を 1 とした)

4. まとめ

我々は観測ロケットに搭載可能な中性大気測定用真空計の開発を行っている。昨年度まではロケット上での風速測定に有利な真空計容器の検討を行ってきた。今年度はロケットの飛行速度に影響を受けずに大気圧力の測定を可能にするパターソンプローブを製作し、大型スペースチェンバーを用いて実験を実施、ガス流の入射角度に対するガス圧の依存性を調べた。実験結果は理論値と異なっているが今後はその原因について検討を行っていく予定である。

将来は前者、後者、2つの真空計を共に観測ロケットに搭載し、背景の大気密度および中性風の風向が推定できるよう研究を進めていく予定である。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.