

論文内容の要旨

論文題目 Energetics and structure of the lower thermosphere observed by sounding rocket experiment

(ロケット実験で観測された下部熱圏の構造とエネルギー収支)

栗原 純一

下部熱圏の鉛直温度分布は、複雑なエネルギー収支の上に成り立っており、この領域における力学過程の理解にとっても非常に重要だが、測定が極めて難しいため、MSIS モデルに代表される経験的な大気モデルでは簡単な関数で代用されている。また、この高度領域では過去にロケット観測で中性大気温度よりもはるかに高い電子温度が観測されており、その熱源として振動励起された窒素分子 (N_2) が寄与している可能性が 1970 年代より示唆されている。

そこで、2002 年 2 月 6 日 19:30JST に鹿児島宇宙空間観測所で行なわれた S-310-30 号機ロケット実験において、改良した窒素振動温度測定器を用いて高度 100–150km における窒素分子の振動温度・回転温度・数密度の測定を行なった。

本研究では、①窒素分子の振動温度測定による電子温度上昇の解明、②観測データの乏しい下部熱圏の中性大気温度構造の検証、③ロケット観測における空力効果の定量的な評価、を目的としている。

窒素振動温度測定器は電子線蛍光法を応用した測定器で、大気中の窒素分子を電子ビームによって電離励起した際に得られる蛍光スペクトルが振動温度・回転温度・数密度の関数としてあらわされることを利用している。測定器には、①ビーム電流値を 5 倍、②レンズ口径を 2 倍、③ミラーを 4 枚から 1 枚に減らす、などの改良を施すことで S/N 比にして 5.2 倍の向上を実現した。また、スペクトルの解析手法上の欠点を見直すことで、より信頼性の高い回転温度推定が可能になった。

観測された振動温度の高度プロファイルを図 1 に示す。振動温度は MSIS モデルの中性大気温度よりも数 100K 以上高いことが有意に示された。過去の研究と比較すると、Pavlov [1994] による振動温度のモデル計算と高度 100km 付近で同程度の温度である。この Pavlov [1994] によるモデルでは電子温度も計算しているが、中性大気温度より数 100K 程度高い振動温度では電子温度の上昇を引き起こせないという結果が得られている。したがって、今回の観測結果は励起された窒素分子が電子温度上昇にほとんど寄与していないことを示しており、電子温度上昇の問題については他の原因を考える必要があると言える。

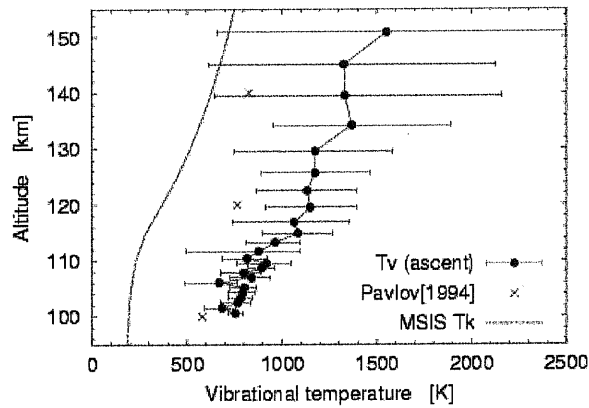


図 1. 振動温度観測結果と Pavlov [1994]によるモデル計算.

回転温度の高度プロファイルを図 2 に示す。観測された回転温度は MSIS モデルの中性大気温度とは大きく異なり、その差は高度 115km で最大となり、150K にも達している。さらに、図 3 に示した数密度の高度プロファイルも回転温度と同様に MSIS モデルからかけ離れていて、高度 115km で MSIS モデルの 50% である。

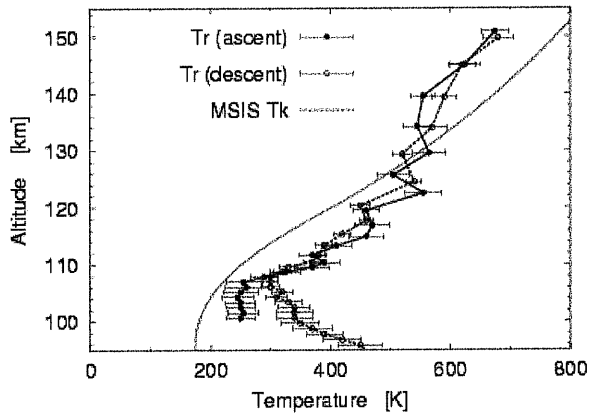


図 2. 回転温度観測結果.

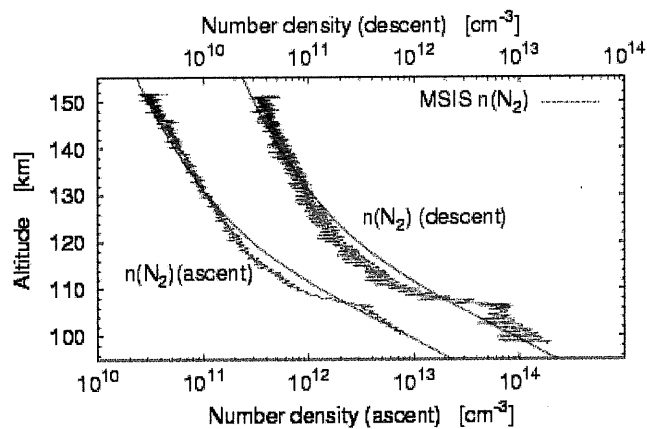


図 3. 数密度観測結果.

一方、数密度のプロファイルに見られる周期的な変動はスピン周期と一致しており、これがロケットの飛翔に伴う空力効果によるスピン変動であると推測される。そこで、この変動を平滑化した値との相対的な密度変動をスピンの位相に対して解析すると、ロケット前面の ram 側で高く、背面の wake 側で低いことがわかった。

このような空力効果を定量的に解析するため、希薄気体における分子運動のシミュレーション手法である DSMC (Direct Simulation Monte Carlo) 法を用いて、ロケット周囲の 3 次元密度場の再現を試みた。これまで DSMC 法をロケット観測結果に応用した研究では 2 次元計算が限界とされており、3 次元特有の現象であるスピン変動を再現することは初めての試みである。その結果、図 4 のように再現されたスピン変動は観測結果とよく一致し、今回の応用が妥当であったことが示された。この再現結果を利用して測定数密度を補正し、絶対数密度に変換することが可能となった。

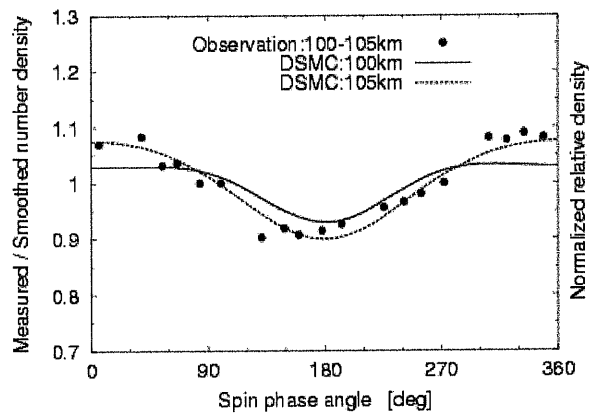


図 4. 観測された数密度の相対的なスピン変動と DSMC 法による再現結果との比較。

下部熱圏から中間圏の領域では、数密度測定から静水圧平衡の関係を用いて温度を求める手法が落下球観測などで良く利用されている。図 5 は静水圧平衡の式に上記で求めた絶対数密度を代入して得られた温度と回転温度観測結果の比較で、両者は非常に良く一致した。これはこの温度構造が実在することを示している。

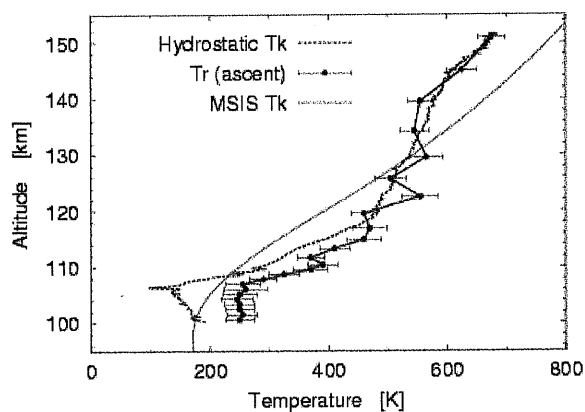


図 5. 密度観測から静水圧平衡の関係を用いて得られた温度と観測された回転温度との比較。

今回観測された経験的モデルから乖離した下部熱圏の大気構造は *Trinks et al.* [1978]の質量分析計による観測などと類似の点が多いが、これまではこの高度領域で卓越する重力波や潮汐波の大気波動による擾乱として説明されることが多かった。しかし、*Rapp et al.* [2001]の電離真空計による観測結果の統計的な傾向に見られるように、高緯度において経験的モデルが不正確であることが明らかになってきている。本研究は、中緯度においてもその可能性があることを示すものである。この結果はNOやCO₂などの微量成分の混合比を求める際に大きく影響するため、下部熱圏のエネルギー収支を考える上で重要な要素となりうることを示唆している。