

大気光・流星を用いた中間圏界面付近の 温度観測

下舞 豊志

島根大学総合理工学部電子制御システム工学科

Temperature measurement near the mesopause region using airglow and meteor observations

Toyoshi SHIMOMAI

Department of Electronic and Control Systems Engineering, Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University

The Spectral Airglow Temperature Imager (SATI) can measure the rotational temperature by observing nightglow emission of OH and O₂. The MU radar can measure the diffusion coefficients in the mesopause region by observing meteor echoes. The temperature is estimated from this diffusion coefficient. In this study we compared the rotational temperature observed by SATI and the temperature measured with the MU radar meteor observations during PSMOS campaign in 1998. Both observed results show apparent semidiurnal oscillations. From the comparison, very good correspondences are obtained for the amplitude and the phase of the oscillation.

1. はじめに

近年の観測手段の多様化と質的向上により、中層大気（成層圏・中間圏・下部熱圏）において風速・温度に各種の波動現象が観測されるようになった。最近では地上からの複数点におけるレーダー観測や、衛星からの観測により、大気波動のグローバルな特性が研究されている。観測結果から、下層大気中で励起された擾乱が波動の伝播を通じて中層大気に大きく拡大されて反映されることが明らかになりつつある。そのため、下層での人工的・自然界の変動を検出するための研究対象としても中層大気は大変重要であると考えられる。

高度約 60 km までの温度と風速は気象ロケット等を用いて定期的に直接観測されているが、高度約 60 km 以上の観測は一般的に光・電波を用いたリモートセンシングにより行われている。大気乱流により大気の屈折率変動が生じ電波散乱が起こることを用いて、中間圏高度の風速 3 成分を計測することが出来る。ただし、一般には長時間の連続観測が実施されにくく、日照時間中しか測定が出来ない。また、流星飛跡が電波を反射することを利用して、VHF 帯レーダーによる中間圏の電波観測が可能である。一方、近年進展の著しい光学技術を応用して、中間圏界面付近に存在する各種の大気原子・分子からの放射光をフィルターを用いてスペクトルを測定し、大気温度を測定することが出来る。これらの観測方法は

それぞれの観測時間・精度・分解能などに一長一短があり、中間圏を総合的に観測するためにはこれらの手段を用いた複合観測を行う必要がある。

名古屋大学太陽地球環境研究所では、超高層大気の変動を最新式の大気光撮像技術を用いて観測することを目的として、複数の光学観測機器により構成される超高層大気イメージングシステム (OMTI) を製作し (Shiokawa et al., 1999), 1997年度より信楽 MU 観測所において連続観測を実施している。OMTI の観測機器の一つである分光温度計 (SATI) は中間圏界面付近の発光層である OH・O₂ の回転温度の連続観測を行っている。一方、信楽 MU 観測所の信楽 MU レーダーは、流星エコーを用いた中間圏の電波観測が可能である。さらに、流星エコーの時定数より温度変動を推定することが出来る。

1998年1~3月の新月期間に、PSMOS 国内キャンペーン観測が行われ、1月21日~2月2日には MU レーダー流星観測が行われた。そこで、SATI 観測による回転温度、MU レーダー流星観測から得られた温度変動の比較を行った。なお、光学・電波観測による温度変動の比較観測例は少なく、OH 回転温度との MU レーダー流星観測による温度変動の比較は以前に行われているが (Nakamura et al., 1997), O₂ 回転温度との比較は今回がはじめてである。

2. 大気光を用いた温度観測

高度 87 km 付近に分布する OH 層・高度 90 km 付近の O₂ 層からの大気光は温度に依存したスペクトルを持つことが知られている。このことを利用して、大気光のスペクトルを詳細に観測することにより回転温度を推定することが可能である。なお、この高度域では回転温度は大気温度と平衡していると考えられるので、この方法により大気温度を測定することが可能である。

分光温度計 (SATI) は検出器に冷却 CCD を使い、OH・O₂ 分子のバンド発光の数本の輝線を同時に計測することにより、そのスペクトルからそれぞれの分子の温度を時間分解能約 5 分で求めることが出来る (Wiens et al., 1997)。各発光分子の中心高度・中心波長を表 1 に示す。SATI の制御は自動化されており、無人定常観測が可能である。1997年11月の設置以来ほぼ連続観測を続けており、観測データが蓄積されている。

表 1 発光分子とその中心高度および中心波長

分子	中心高度	中心波長	
O ₂	86 km	~866 nm	P-分岐, (0-1) バンド
OH	94 km	~835 nm	Q-分岐, (6-2) バンド

3. 流星を用いた温度観測

流星が大気を通過する際に、摩擦により燃焼して周囲の大気を電離するために高度 70–110 km にプラズマ状態の飛跡を残す。この流星飛跡が約 50 MHz 以下の電波をよく散乱することを利用して、大気の観測が可能である。流星飛跡が周囲の大気に従って動くことによるドップラー変移をレーダーで観測することにより風速が求められる。さらに、流星飛跡によるエコー強度が指数関数的に減衰する時定数から両極性拡散係数が求められ、大気温度の変動成分を推定することが出来る (Tsutsumi et al., 1994, 1996)。流星観測を目的とした VHF レーダーは世界各地で運営されている。信楽 MU レーダーは共同利用施設なので長時間の連続観測は難しいが、観測モードの変更により短期キャンペーンでの流星観測を行うことが出来る。

4. PSMOS キャンペーン観測

1998年1～3月の新月期間に、京都大学 MU レーダー・名古屋大学超高層大気イメージングシステム (OMTI) をはじめとする多くの電波・光学観測機器を用いた PSMOS 国内キャンペーン観測が行われた。同期間中 SATI は連続観測が行われ、夜間・快晴時に OH・O₂ 回転温度が時間分解能約 5 分で得られた。1月21日～2月2日には MU レーダーによる流星観測が行われた。MU レーダー流星観測による風速・温度変動の観測高度範囲は 80–100 km、高度分解能は 1 km、時間分解能は 30 分である。

5. 観測結果

SATI による O₂・OH 回転温度および発光強度の時間変動の観測例を図 1・2 に示す。SATI によって得られた回転温度および発光強度変動は、夜間光学観測のため、最大 10 時間程度のデータしか得られないが、大気潮汐にともなう変動であると考えられる半日周期の波動が全体的に見られる。一方、MU レーダー流星観測からは昼夜間を問わずデータが得られている。図 1・2 の期間中の観測例を図 3 に示す。得られた温度変動には、一日周期成分と半日周期成分が一般的にみられる。また、温度変動は時間的に降りて来る位相構造を持つ。このことは、エネルギーの上方伝搬を示し、下方から伝搬して来る大気波動がこの高度領域で卓越することを示している。

6. 温度変動の比較

SATI 観測による回転温度の絶対値の校正が厳密に行えていないため、平均値からの変動成分 T'/T_0 を用いて MU レーダー流星観測から得られた温度変動との比較を行った。SATI は光学受動観測であるので、1 台で高度を測定することは不可能である。また、発光層の厚みを考えると厳密な高度を推定することは困難であるが、今回は高度 1 km の分解能

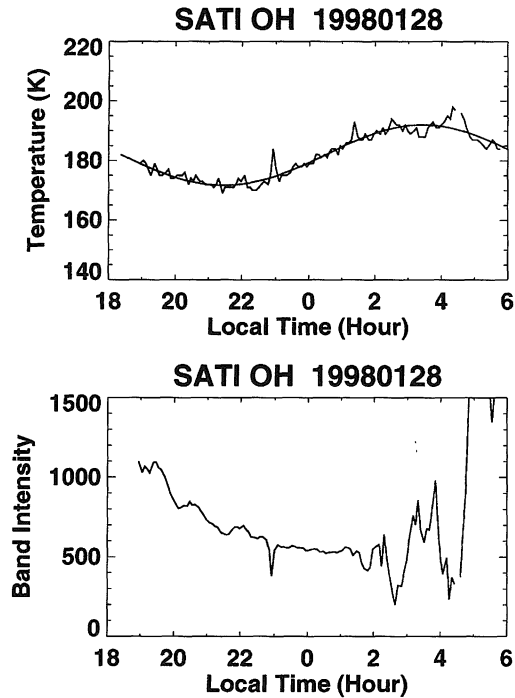


図1 SATI観測で得られたOH回転温度と発光強度．1998年1月28日，信楽での観測例．12時間振動を重ね合わせて表示．

で得られたMUレーダー観測結果の高度3 kmの平均値と比較することにより高度の推定を行った．

図4に1月28日の観測結果の比較例を示す．OH, O₂の発光層の温度変化はMUレーダー流星観測による温度の，それぞれ85–87 km, 90–92 kmの平均との良い一致が見られた．±2 km異なる高度平均を取ると位相が明らかに異なることから，この方法による高度推定精度は±2 km程度と考えられる．OH, O₂各発光層の高度を86 km, 91 kmと仮定し，各層での12時間周期変動成分の位相差を考慮すると，鉛直波長は約20 kmとなる．一方，MUレーダー観測から鉛直波長を見積もると約20 kmであり，SATI観測と良い一致がみられた．

観測期間中の全データを図5に示す．夜間の変動のみならず，日々変化まで近い対応がみられている．MUレーダー流星観測による温度変動の方がやや高い温度を示す傾向があるが，この原因については検討中である．

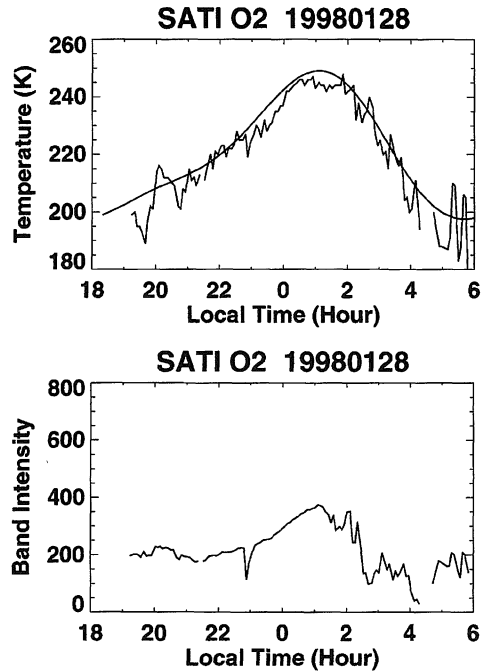


図2 SATI観測で得られたO₂回転温度と発光強度. 1998年1月28日, 信楽での観測例. 12時間+6時間振動を重ね合わせて表示.

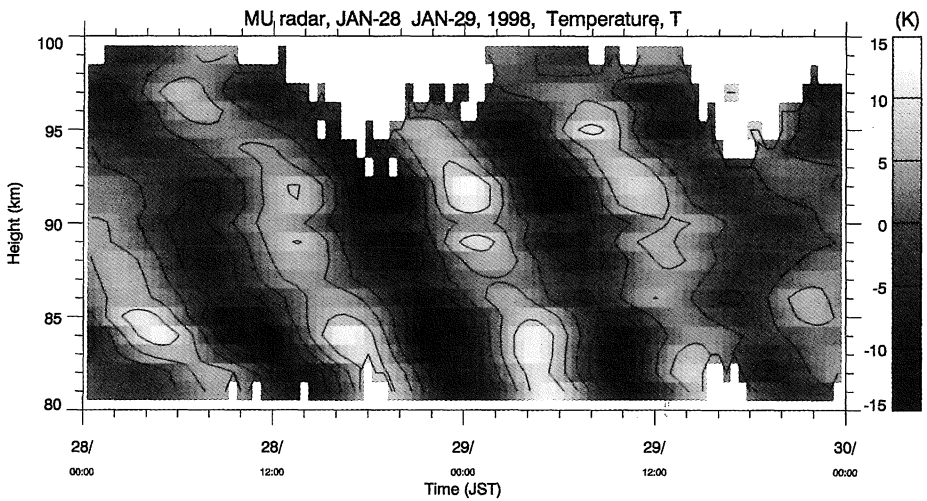


図3 1998年1月28-29日にMUレーダー流星観測により得られた大気温度の変動成分. 9-15時間バンドパスフィルターを使用.

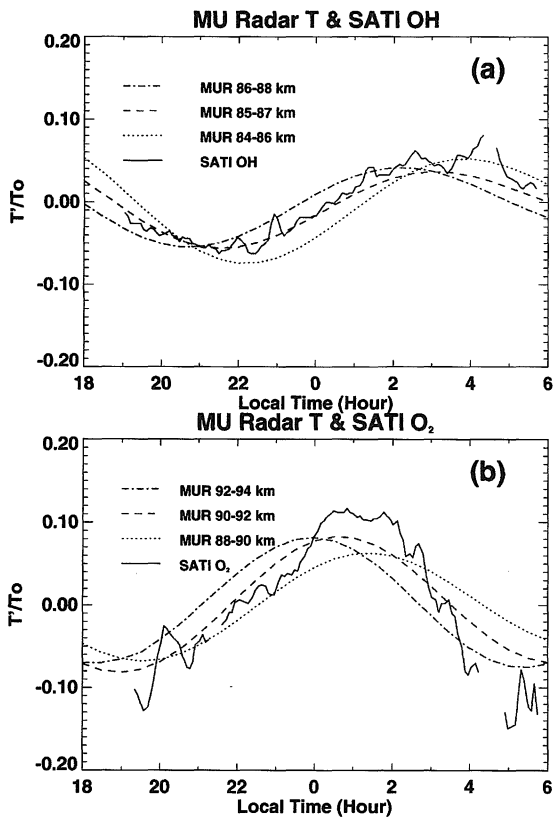


図4 SATI観測により得られた(a)OH(b)O₂回転温度変動とMUレーダー流星観測により得られた大気温度変動の比較。実線はSATI観測結果を、その他の線はMUレーダー観測結果に9-15時間のバンドパスフィルターを用い、3kmの高度平均を行ったもの。

7. ま と め

1998年1~3月の新月期間に行われたPSMOSキャンペーンにおいて得られた、SATI観測によるOH・O₂回転温度およびMUレーダー流星観測により推定された温度変動の比較を行った。各発光層の高度を仮定するとSATI観測・MUレーダー観測で良い一致がみられた。今後は短期間ではあるが詳細なMUレーダーによる観測、夜間のみではあるが長期にわたるSATIの連続観測、さらに多地点の観測結果を用いてグローバルな温度変化を研究する必要がある。

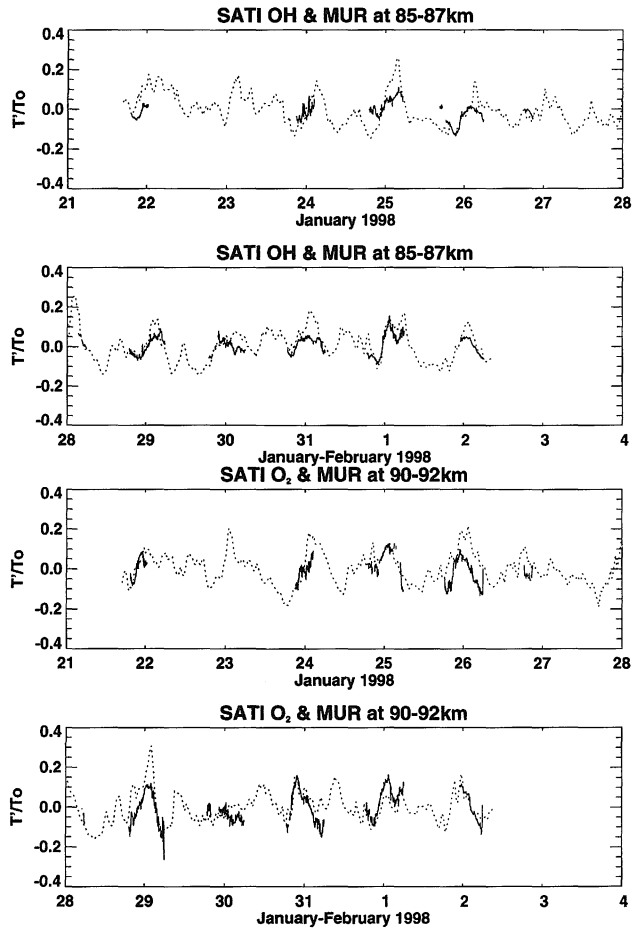


図5 PSMOS全期間中のSATI観測により得られたOHおよびO₂回転温度とMUレーダー流星観測により得られた大気温度の比較。実線はSATI観測結果を示す。点線はMUレーダー観測結果の高度3km平均(上図:85-87km,下図:90-92km)を示す。

参考文献

Shiokawa, K. et al., *Earth Planets Space*, **51**, 887, 1999.
 Nakamura, T. et al., *Adv. Space. Res.*, **19**, 643, 1997.
 Wiens, R. H. et al. *Adv. Space. Res.*, **19**, 677, 1997.
 Tsutsumi, M. et al., *Radio Sci.*, **29**, 599, 1994.
 Tsutsumi, M. et al., *J. Geophys. Res.*, **101**, 9425, 1996.