

Na ライダーによる MLT 領域の温度プロファイル観測

江尻 省¹、中村 卓司¹、Gordon G. Shepherd²、川原 琢也³、塩川 和夫⁴

¹京都大学生存圏研究所 (mitsumu@rish.kyoto-u.ac.jp, nakamura@rish.kyoto-u.ac.jp)

²ヨーク大学 (gordon@yorku.ca)

³信州大学工学部 (kawahara@cs.shinshu-u.ac.jp)

⁴名古屋大学太陽地球環境研究所 (shiokawa@stelab.nagoya-u.ac.jp)

1. はじめに

中間圏・熱圏下部 (MLT) 領域の大気の力学・化学過程を議論するためには、背景の風速と共に温度、特に温度の鉛直分布情報が必要不可欠である。例えば、下層 (対流圏や成層圏) 起源の大気重力波は、その伝搬・消滅に際して、背景の風速や温度場との相互作用により輸送してきたエネルギーを背景場に供給することが知られている。MLT 領域ではこの大気重力波によって供給されるエネルギーが全球的な大気大循環 (子午面循環) をも引き起こしていると考えられているため、大気重力波と背景場の相互作用が特に重要視されており、背景場の詳細な観測が求められている。大気圏と電離圏につなぐ物質輸送の議論に不可欠な MLT 領域の鉛直流についても、温度の鉛直分布の時間変化が分かれば、空気塊の断熱圧縮・膨張を考慮することで情報を得ることが出来るため、時間的に連続した MLT 領域の温度プロファイル観測が求められている。また、夜間大気光に代表されるような大気微量成分の化学反応や、中層大気の寒冷化の指標として注目されている中間圏雲の生成・成長過程にも背景温度は大きく寄与しており、正確かつ詳細な温度の観測情報が求められている。

ところが、MLT 領域の温度、特に温度プロファイルは観測が非常に難しく、現在のところ金属原子の共鳴散乱を利用したライダー観測が、これを高い時間・高度分解能で測定出来るほぼ唯一の観測手法である。この金属原子ライダーの一つに Na 温度ライダーがある。Chu 等[2005 [1]] による報告では、米国のニューメキシコ州 Starfire Optical Range (35.0°N, 106.5°W) とハワイ Maui MALT(20.7N, 156.3W)での Na 温度ライダー観測による中間圏温度の月毎の夜間平均プロファイルは、モデル大気 (MSIS) から予想される月毎の夜間平均温度プロファイルと、温度も鉛直構造も異なることが示された。具体的には、月毎の夜間平均温度プロファイルとして、モデル大気では中間圏界面の上下で温度が単調に増加する一山の温度構造を与えるのに対して、観測された温度プロファイルは途中で温度の逆転層を持つ二山構造であり、かつモデル大気より高温であることなどが示された。さらに、Na 温度ライダー観測データを風速データと共に用いることで、詳細な議論が可能になった MLT 領域の大気の安定度に関する研究では、大気的不安定性には季節依存性があること[Zhao et al., 2003 [2]]、逆転層、シアー不安定、対流不安定の順に高い高度に発生する傾向があること[Li et al., 2005 [3]]、温度の観測時間分解能が高いほど不安定構造をより多く捉えることが出来ること[Sherman and She, 2006 [4]]などが示され、MLT 領域の大気力学における温度プロファイルの高い時間・高度分解能での観測データの重要性が再確認されている。また、MLT 領域には、狭い高度領域 (半値数 km) に突発的に発生するスボラディック Na 層 (Nas) の存在が知られているが、この発生頻度は緯度的・経度的に異なることが分かっている[e.g., von Zahn et al., 1987 [5]; Kwon et al., 1988 [6]; Batista et al., 1989 [7]; Senft et al., 1989 [8]; Nagasawa and Abo, 1995 [9]]。これは大気安定度や大気波動の活動度等に地域差 (緯度差のみならず経度差も) があることを示唆しているが、Nas の成因や成長条件等が解明されていないため、十分な議論がなされていない。Na 温度ライダーは、温度プロファイルと同時に Na 密度プロファイルについても高い高度・時間分解能で観測出来るため、背景風

速や電子密度変動とあわせて観測することで、 Na s の発生・成長・生滅の原因・過程を解明することも期待されている。

京都大学生存圏研究所では、信州大学と国立極地研究所によって共同開発され、2000-2003 年に南極で中間圏温度観測を行った実績のある Na 温度ライダーを 2005 年に宇治キャンパス内に移設し、京都大学信楽 MU レーダー及び名古屋大学太陽地球環境研究所の超高層大気イメージングシステム (OMTI) とのキャンペーンベースでの同時観測を行ってきた。2007 年 8 月からは、さらに中間圏界面温度や高度、 Na 密度等々の季節変動なども議論可能にするべく、毎月数晩程度 (50 時間を目標) の準定常観測を始めて、2008 年 2 月までに 55 晩 (約 500 時間) の観測データを取得している。本論文では、これまでの観測で取得された温度・密度プロファイルデータの概要と、大気波動に伴う物質の鉛直移送と温度上昇と Na 密度増加が同期していた Na s のイベント解析を紹介する。

2. Na 温度ライダー (信州大学) 観測

Na 温度ライダーは、 Na 原子の共鳴波長である 589 nm のレーザ光を大気中に射出し、高度 80 - 110 km に存在する Na 原子層によって散乱された光を望遠鏡で受信することにより、その散乱光強度から Na 密度と温度を推定するものである。 Na D_2 の散乱断面積は、 Na 原子の熱運動によりドップラー広がりを持っている。レーザの発振波長を Na D_2 スペクトルの極大 (f_a) と極小 (f_c) の 2 波長に設定して交互に射出し、 Na の受信強度比 (すなわち散乱断面積比) が温度に依存することを用いて、温度の高度分布を導出する。

信州大学の Na 温度ライダーは、2000 - 2003 年に南極で MLT 領域の温度観測に成功した実績があり [Kawahara et al., 2002 [10]; 2004 [11]]、現在も世界でも数少ない MLT 領域の温度プロファイル観測が可能なライダーである。この Na ライダーでは、2 台の Nd:YAG レーザを用いて増幅させた、1064 nm と

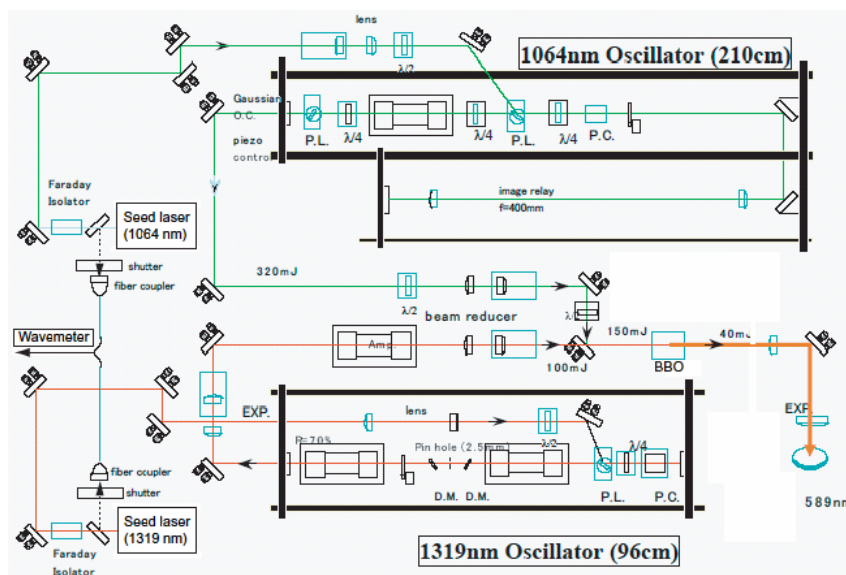


図 1. Na 温度ライダー (信州大学) 送信系の光学系図面。

1319 nm のパルスレーザを、非線形結晶 BBO に入射させることにより、これらの和周波である 589 nm レーザを発生させる (Fig.1 参照)。出力は <30 mJ/pulse で繰り返しは 10 Hz である。パルスレーザの狭帯域化と波長制御のため、それぞれの共振器には Seeder Laser を用いている。Seeder Laser の波長は波長計 (Burleigh, WA-1500, 精度 1 pm) でモニタしており、観測時にはこの波長計による測定値を用いて 1064 nm の Seeder Laser の波長を切り替え (1064.6221 nm, 1064.6187 nm)、2 つの和周波 f_a (589.1589 nm) と f_c (589.1579 nm) を発生させている。1 時間の積算値による温度精度は、最も Na 密度の高い 90 km 高度で 1-2 K、 Na 層の上下端で 2-4 K 程度である。散乱光は直径 50 cm のカセグレン型望遠鏡を用いて集光し、光電子増倍管で受信している。観測時の望遠鏡視野角は 2 mrad、受信信

号のサンプリング間隔は 96 m である。fa と fc の積算時間はそれぞれ 90 秒で、30 秒で fa と fc を切り替えて観測を行っている。

3. 観測結果

3. 1. 準定常観測

2007 年 8 月から、毎月数晩（目標 50 時間）程度の観測データを取得・蓄積する準定常観測を開始し、2008 年 2 月までに 55 晩（約 500 時間）の観測データを取得した。各月の観測時間数の詳細を表 1 にまとめた。

表 1. 2007 年 8 月から 2008 年 2 月までの月毎の観測時間数

2007 年					2008 年	
8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月
5 晩 (32 時間)	8 晩 (67 時間)	9 晩 (83 時間)	7 晩 (74 時間)	8 晩 (72 時間)	9 晩 (93 時間)	9 晩 (75 時間)

2007 年 8 月から 2008 年 2 月までの Na 温度ライダーによる観測結果を図 2 に示した。図 1a は温度の夜間平均高度分布の日々変化を示した図で、中間圏界面付近 (95-105 km) の温度の典型的な季節変化である、冬 (11-2 月) より夏 (8 月) に低温になる様子が得られている。図 1c は高度 87 km の温度の地方時依存性の日々変化を示した図で、特に 10 月以降、夕方から明け方にかけて温度が上昇する傾向が見られた。図 1b と d はそれぞれ、Na 密度の夜間平均高度分布と Na コラム量 (800-110 km) の地方時依存性の日々変化を示している。図 1b からは 10-11 月に Na 密度が高くなる様子が見られ、図 1d には、特に 10 月以降、夕方より明け方にコラム量が多くなる傾向が見られる。

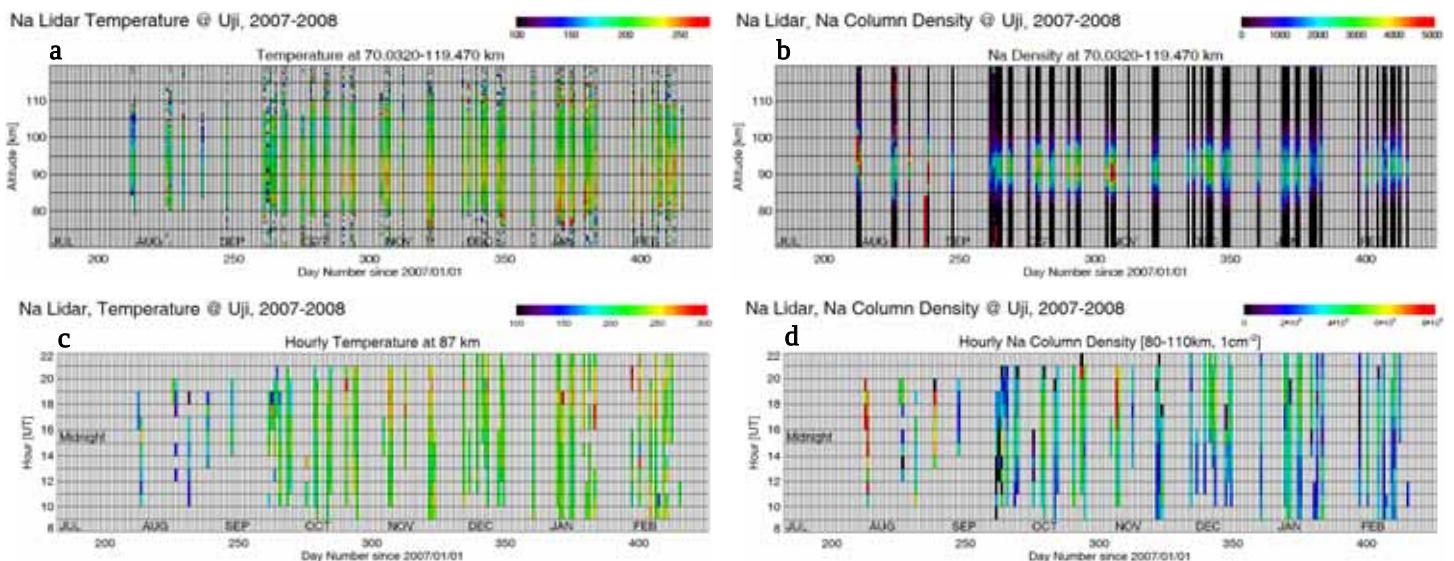


図 2. 2007 年 8 月から 2008 年 2 月までの Na 温度ライダーによる観測結果。a と b はそれぞれ温度と Na 密度の夜間平均高度分布を時系列で示したものの。c と d の縦軸は UT (= LT - 9 hr) で、c は 87 km 高度の温度、d は 80-110 km 高度の Na のコラム量の地方時依存性の日々変化を示したもの。

3. 2. 波動に伴う物質輸送

図3に2007年12月9-10日にNa温度ライダーによって観測された温度プロファイル (a) と Na 密度プロファイル (b) の時間変化を示す。温度プロファイルに大気波動に伴う位相の下降が見られ、これと同期して Na 層のピーク高度も下降している。Na ピーク層では同時に Na 密度の増加が見られるが、このときの 80-110 km の Na コラム量の時間変化を調べたところ、ピーク層の密度だけでなくコラム量も時間と共に増加していたことが分かった。これらの観測結果から、大気波動の位相の下降に伴って Na が生成されていたことが示唆される。また、信楽で観測を行っていた名古屋大学太陽地球環境研究所の超高層大気イメージングシステム (OMTI) のフォトメーターは、この日の夕方から明け方にかけて、OI-557.7 nm 大気光が増光していたことを示していた。OI-557.7 nm 大気光は、通常 97 km 付近にピークを持つ酸素原子 (O) 層の発光現象だが、この O 層が下降すると発光の化学反応が進み増光することが知られている。また、Na のリザーバーの一つである NaO は O との化学反応により Na を生成する。これらの知見と観測結果を総合すると、大気波動の位相の下降に伴って O が下方に 10 km 近く移送され、OI-557.7 nm 大気光の増光と Na コラム量の増加を引き起こしたことが考えられる。これについては、温度と Na 密度で観測された大気波動の位相関係や鉛直位相速度、大気光の増光との関係等々を含め、より詳細な解析を行う予定である。

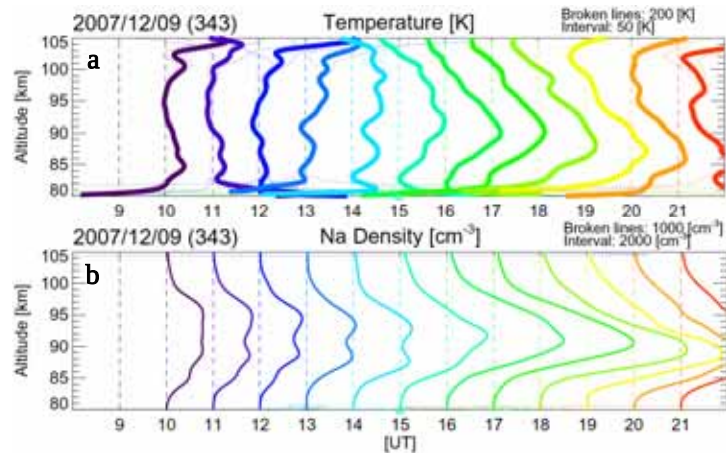


図3. 2007年12月9-10日に宇治のNa温度ライダーで観測された温度とNa密度のプロファイル。時間分解能は1時間、高度分解能は~2 km。

3.3. スポラディック Na 層 (Nas)

これまで日本やコロラド上空で観測された Nas 層は、スポラディック E 層や背景風速のシアーに関係して発生したと考えられたものの報告はあるが[Senft et al, 1989 [8]; Nagasawa and Abo, 1995 [9]; Miyagawa et al., 1999 [12]], 背景温度と相関の良い Nas 層の報告は無く、中緯度帯で観測される Nas に関しては、温度とは関係なさそうだと考えられている。ところが、2007年10月21日1時(10月20日16 UT)に宇治のNa温度ライダーで高度95 km 付近に観測された Nas 層では、Nas 層ピークの温度が、Nas 層の上下の温度より約 20 K も高くなっており(図4)、Nas 層の発生・成長と背景温度になんらかの関連があったことを示唆している。これについては、より高い時間分解能で再解析するなどして、温度と密度の対応関係をより詳細に調べる必要がある。

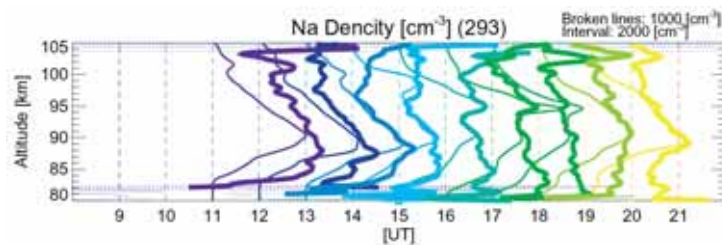


図4. 2007年10月20-21日に宇治のNa温度ライダーで観測された温度(太線)とNa密度(細線)のプロファイルを時間ごとに重ね書きしたもの。時間分解能は1時間、高度分解能は~1 km。

4. まとめと今後の予定

京都大学生存圏研究所では、2007年8月からNa温度ライダー（信州大学）による毎月数晩（50時間程度）を目標とした準定常観測を始め、2008年2月までに55晩（約500時間）のMLT領域の温度とNa密度のプロファイルデータを取得した。これにより、中間圏界面付近の温度が冬（11-2月）より夏（8月）の方が低い、10-11月にNa密度が高くなる等の典型的な季節変化を得つつあると共に、大気波動に伴う物質の鉛直移送やスプラディックNa（Nas）層に関する特徴的なイベントも観測されている。今後は、中間圏界面温度や高度、Na密度などの季節変動等の議論を目指して、少なくとも1年はこの準定常観測を続けると共に、すでに取得されている特徴的なイベントについて、さらに詳細な解析・議論を行う予定である。また、より高時間分解能で質の良いデータを取得するために、長時間観測によりダメージを受けたレンズの交換や、より量子効率の高い光電子増倍管の導入なども行う予定である。

5. 参考文献

- [1] Chu, X., C. S. Gardner, and S. J. Franke, 2005: Nocturnal thermal structure of the MLT region at Maui, Hawaii (20.7N), and Starfire Optical Range, New Mexico (35N), *J. Geophys. Res.*, **110**, doi:10.1029/2004JD004891.
- [2] Zhao, Y., A. Liu, C. S. Gardner, 2003: Measurements of atmospheric stability in the mesopause region at Starfire Optical Range, NM, *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, **65**, 219–232.
- [3] Li, F., A. Z. Liu, G. R. Swenson, 2005: Characteristics of instabilities in the mesopause region over Maui, Hawaii, *Journal of Geophysical Research* **110**, doi:10.1029/2004JD005097.
- [4] Sherman J. P. and C.-Y. She, 2006: Seasonal variation of mesopause region wind shears, convective and dynamic instabilities above Fort Collins, CO: A statistical study, *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, **68**, 1061–1074.
- [5] von Zahn, U. and T. L. Hansen, 1987: Forced release of sodium from upper atmosphere dust particles, *Geophys. Res. Lett.*, **14**, 76–79.
- [6] Kwon, K. H., D. C. Senft, and C. S. Gardner, 1988: Lidar observations of sporadic sodium layers at Mauna Kea Observatory, Hawaii, *J. Geophys. Res.*, **93**, 14,199–14,208.
- [7] Batista, P. P., B. R. Clemesha, I. S. Batista, and D. M. Simonich, 1989: Characteristics of the sporadic sodium layers observed 23S, *J. Geophys. Res.*, **94**, 15,349–15,358.
- [8] Senft, D. C., R. L. Collons, and C. S. Gardner, 1989: Mid-latitude lidar observations of large sporadic sodium layers, *Geophys. Res. Lett.*, **16**, 715–718.
- [9] Nagasawa, C. and M. Abo, 1995: Lidar observations of a lot of sporadic sodium layers in mid-latitude, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 263–266.
- [10] Kawahara, T. D., T. Kitahara, F. Kobayashi, Y. Saito, A. Nomura, C.-Y. She, D. A. Krueger, and M. Tsutsumi, 2002: Wintertime mesopause temperatures observed by lidar measurements over Syowa Station (69S, 39E), Antarctica, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, doi:10.1029/2002GL015244.
- [11] Kawahara, T. D., C. S. Gardner, and A. Nomura, 2004: Observed temperature structure of the atmosphere above Syowa Station, Antarctica (69S, 39E), 2004: *J. Geophys. Res.*, **109**, doi:10.1029/2003JD003918
- [12] Miyagawa H., T. Nakamura, T. Tsuda, M. Abo, C. Nagasawa, T. D. Kawahara, K. Kobayashi, T. Kitahara, and A. Nomura, 1999, Observation of mesospheric sporadic sodium layers with the MU radar and sodium lidars, *Earth Planets Space*, **51**, 785–797.