

B1

ラマンライダー・ラジオゾンデ・GPSによる対流圏水蒸気分布の比較観測 A Comparison of Tropospheric Humidity Profiles derived from Raman Lidar, Radiosondes, and GPS Observations

酒井哲¹、永井智広²、中里真久²、松村貴嗣²

Tetsu Sakai¹, Tomohiro Nagai², Masahisa Nakazato², and Takatsugu Matsumura¹

1 科学技術振興事業団、2 気象研究所

1 Japan Science and Technology Corporation, 2 Meteorological Research Institute

We made a comparison study of the tropospheric humidity profiles by using a Raman lidar, two radiosonde sensors (RS2-91, Meisei Electric Co. and RS80-15, Vaisala Oy), and GPS. Good agreements were found in the relative concentration profiles of water vapor obtained with the Raman lidar and the radiosondes up to an altitude of 10 km except for low humidity regions. The lidar-derived water vapor mixing ratio (w) calibrated with the system constant was closer to that obtained with RS2-91 than that obtained with RS80-15 at $w > 0.5 \text{ g kg}^{-1}$, whereas it differed significantly from those sonde data at $w \leq 0.5 \text{ g kg}^{-1}$. We also compared the temporal variation of precipitable water vapor obtained with the lidar and the GPS.

1. はじめに

対流圏水蒸気は地球の大気・水循環過程を規定する重要な要素の一つであり、また赤外放射吸収・射出過程やエアロゾル・雲粒への凝結過程を通して放射収支に影響を及ぼす。これら水蒸気が及ぼす影響をより深く理解するためには、その時間・空間分布を高い分解能で精度良く観測することが必要である。ラマンライダーは、水蒸気鉛直分布を地上から高分解能で連続測定する装置として現在各地で実用化が進められている[1]-[3]。今回は気象研究所で開発されたラマンライダーの検証を目的としたラジオゾンデ・GPSとの比較観測結果について報告する。

2. ラマンライダーによる水蒸気分布の測定

ラマンライダーは、送信レーザー光によって励起される大気中の水蒸気分子と窒素分子の振動ラマン散乱光を受信し、これらの信号強度比を取ることで水蒸気混合比の鉛直プロファイルを測定する。本研究で使用したライダーシステムの諸元を Table 1 に示す。Nd:YAG レーザの第 2 高調波 (波長 532 nm) を射出し、大気諸成分からの後方散乱光を口径 1 m の反射望遠鏡で受信する。受信した光をダイクロイックミラー、干渉フィルター、色ガラスフィルターなどで 3 つの波長成分 (水蒸気ラマン散乱 660 nm・窒素ラマン散乱 607 nm・Mie/Rayleigh 散乱 532 nm) に分離し、光電子増倍管で検出する。信号処理はフォトンカウンティングで行う。

ライダー測定データから水蒸気混合比の絶対値を求めるためには、校正係数 (水蒸気・窒素ラマンチャンネルの装置定数比と有効ラマン後方散乱断面積比の積) が必要となる。通常はこの値をゾンデデータとのフィッティングによって求めることが多いが、今回はゾンデとの比較を行うために、ライダー装置定数とラマン散乱断面積の実験値[4]-[6]から求めた。ただし、ラマン散乱断面積の実験値に少なくとも 10% の不確かさがあるため、この方法で正確な校正係数を決定することは現状では困難である。より確実な校正方法の検討は今後の課題である。

Table 1 Specification of Raman lidar at Meteorological Research Institute at Tsukuba (36.0°N, 140.1°E)

Transmitter:		Receiver:	
Laser type	Nd:YAG	Telescope type	Nasmyth
Wavelength (nm)	532	Diameter (m)	1.0
Energy/pulse (mJ)	800 (maximum)	Field of view (mrad)	0.1-2.0
Repetition rate (Hz)	30	Detector	PMT
Beam divergence (mrad)	0.125 (after collimator)	Signal detection	Photon counting
		Range resolution (m)	6
Detection species	Water vapor Raman	Nitrogen Raman	Mie/Rayleigh
Interference filter			
center wavelength (nm)	660.5	607.3	532.0
FWHM (nm)	0.55	0.49	0.49
Transmission at 532 nm	$<10^{-13}$	$<10^{-10.5}$	-

3. ラマンライダーとラジオゾンデによる比較観測結果

ラマンライダーとラジオゾンデによる比較観測は、2000年10月以降の厚い雲のない夜間、気象研究所構内(36.0°N, 140.1°E)で行われた。ラジオゾンデは静電容量型高分子膜湿度センサーを搭載した明星電気社製 RS2-91 と Vaisala 社製 RS80-15 が用いられた。

Fig. 2 に 2001 年 2 月 28 日に行われた比較観測結果の例を示す。この観測では上記 2 種類のゾンデが一つの気球に縦連結されて放球された。ライダーデータは、ゾンデの放球時刻から 30 分間の積算値を示し、高度分解能は高度 5 km 以下で 100 m、5 km 以上で 300 m である。フォトンカウントによる統計誤差は高度 3, 6, 9 km でそれぞれ 1.5, 3, 30%であった。ライダーとゾンデが観測した空気塊の水平方向の隔たりは、高度 10 km 以下では 35 km 以内であったと考えられる(ゾンデの風測定データから推定)。

高度約 0.2 km から 10 km の範囲でライダーデータと RS2-91 ゾンデデータが良く一致する結果が得られた。一方、RS80-15 ゾンデデータは、相対的な分布は他のデータと良く似ているものの、絶対値は平均で約 15%低く、また高度 5 km 以上でその差が広がる傾向が見られた。ライダー校正係数の不確かさが大きいいため、この比較結果からどちらのゾンデデータがより正しいか言うことはできないが、ラジオゾンデと GPS による可降水量推定データの比較[7]では、RS2-91 ゾンデデータが GPS データにより近いことが報告されていることから、水蒸気積分量としては RS2-91 の方がより正しい可能性が高いと考えられる。

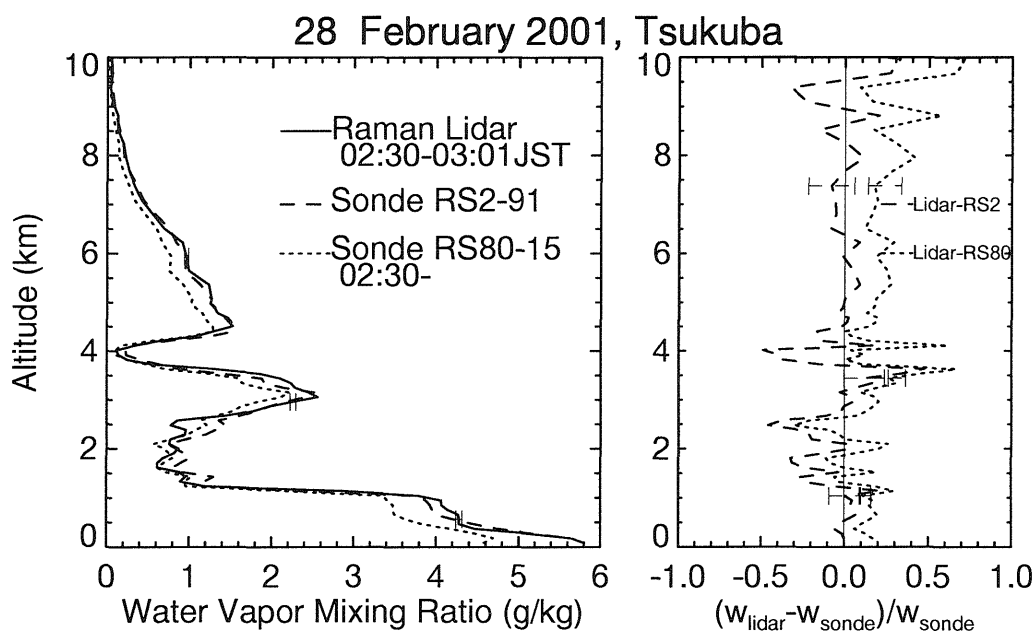


Fig. 2 Comparison of vertical profiles of water vapor mixing ratio obtained with Raman lidar (solid line) and radiosondes (dashed line: Meisei RS2-91; dotted line: Vaisala RS80-15) at Tsukuba on February 28, 2001.

Fig. 3 に 2000 年 10 月-11 月に行われた水蒸気混合比の全比較観測結果を示す。この期間中 RS2-91 ゾンデと RS80-15 ゾンデがほぼ 3 時間おきに放球され、ライダーとの同時観測は RS2-91 ゾンデについて計 21 例、RS80-15 ゾンデについて計 15 例得られた。なおこの図には、できるだけ条件の良い比較を行うために、以下の条件を満たすデータのみプロットした。1)ゾンデの湿度測定保証範囲である気温 233 K 以上、2)ライダーとゾンデが測定した空気の水平方向の隔たりが 30 km 以内、3)水蒸気混合比の鉛直勾配が一定値以下、4)ライダー受信信号の飽和の影響が小さく、かつフォトンカウントによる統計誤差が 30%以下のデータ、である。

水蒸気混合比の比較的大きい(0.5 g kg^{-1} 以上)領域では、ライダーデータと RS2-91 ゾンデデータが良く一致していて(平均差 5%)、RS80-15 ゾンデは全体に低い(平均差 23%)結果が得られた。一方 0.5 g kg^{-1} 以下の領域では、ライダーとゾンデデータの差が大きくなり、ライダーデータは RS2-91 データよりも平均で約 37%低く、RS80-15 データよりも 80%程度高い結果が得られた。このような低混合比の領域では、相対湿度が 10%以下の場合が多く、またライダー測定に湿度依

存性があることは考えにくいことから、低湿度下におけるゾンデ湿度センサーの応答特性が観測された差の原因の一つと考えられる。

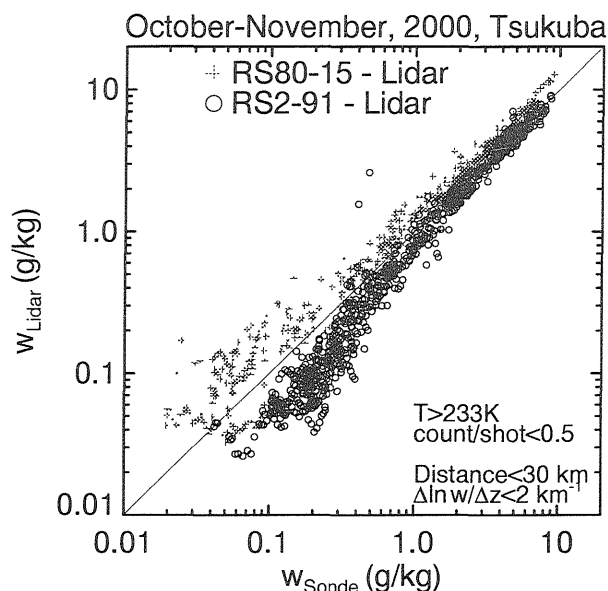


Fig. 3 Scatter plot of water vapor mixing ratio obtained with the Raman lidar and the radiosondes (+: Vaisala RS80-15; o: Meisei RS2-91) at Tsukuba for the period October to November 2000.

4. GPS 可降水量との比較観測結果

GPS は、衛星から地上に発信されるマイクロ波の到達時間の遅れを測定することにより、可降水量を高時間分解能で測定することができる。ライダーで観測される数分スケールの水蒸気量変動を検証するために、GPS とライダーデータで測定された可降水量の比較を行った結果を Fig. 4 に示す。データの時間分解能はライダーが 3.3 分、GPS が 5 分である。なお 20:19-23:17 と 3:16-4:48 のライダーデータについては受信信号が地表付近から高度 1.6-1.7 km まで飽和していたため、この高度範囲の水蒸気量はゾンデ(RS2-91)データを用いた(Fig. 4a 点線)。また 4:10 頃にライダーデータが極端に高い値を示しているが、これは高度 6 km 付近に厚い雲が出現し、それ以上の高度での測定誤差が大きくなっているためである(Fig. 4b)。ライダーと GPS で求めた可降水量は、19:00 から 0:00 頃までは良く対応しているが、その後水蒸気量が増加するにつれて、ライダーが GPS よりも 2~3 mm 高い値を示した。この原因については現在検討中である。

5. まとめと今後の課題

ラマンライダーと 2 種類のラジオゾンデ・GPS による水蒸気混合比分布の比較観測を行い、次のことがわかった。

- 1) ラマンライダーとラジオゾンデで観測された水蒸気混合比の相対的な鉛直分布は、低湿度の領域を除いた高度 10 km までの領域で良い一致が見られた。
- 2) 装置定数とラマン散乱断面積データを用いて校正したライダー測定値は、水蒸気混合比が約 0.5 g kg^{-1} より大きい領域では RS2-91 ゾンデデータと良く一致し、RS80-15 ゾンデデータに比べ平均で約 20% 高い値を示した。また 0.5 g kg^{-1} 以下の領域ではゾンデ測定値との差が大きくなり、RS2-91 データよりも低く、RS80-15 データよりも高い値を示した。
- 3) ライダーと GPS で測定した可降水量は、最大で約 3 mm の差があった。

今回の比較観測では、ライダーの校正係数として装置定数とラマン散乱断面積データから求めた値を用いた。しかし、ラマン散乱断面積実験値の不確かさや受信光学系(フィルターなど)の劣化による装置定数の長期変化を考えると、ライダーでより正確な測定を行うためには、確実な校正方法が必要であると考えられる。校正方法として通常多く用いられるのはゾンデデータとのフィッティングであるが、今回の結果のようにゾンデの種類によって測定値が 10% 近く異なることから、この方法にも問題があると考えられる。今後は絶対濃度が測定可能な差分吸収ライダーや、鉄塔に設置された湿度計との比較観測を行い、ラマンライダーによる水蒸気測定精度向上のための検証を進めていきたいと考えている。

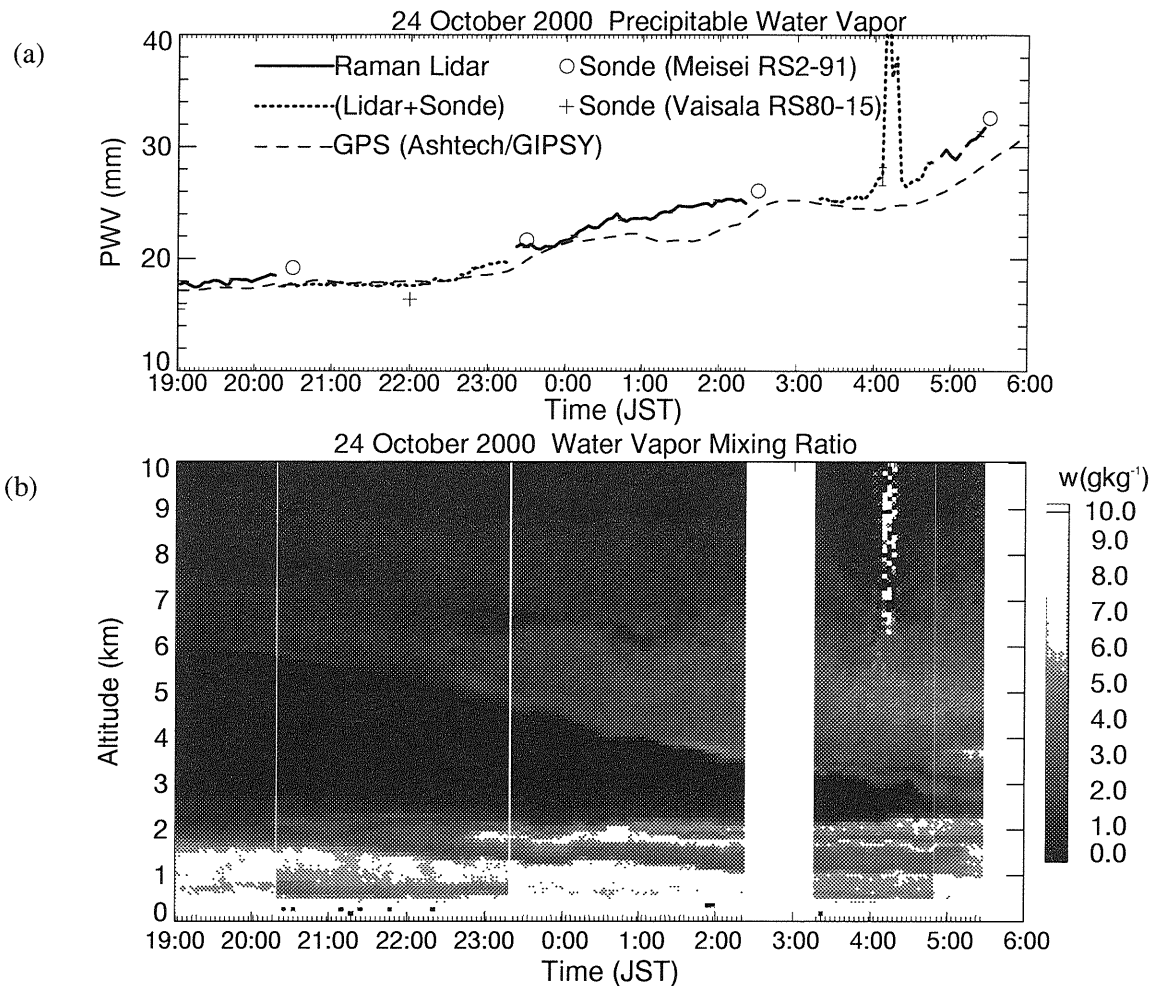


Fig. 4 (a) Temporal variation of precipitable water vapor obtained with the Raman lidar (solid line), GPS (dashed line), and Radiosondes (\circ : RS2-91, $+$: RS80-15) at Tsukuba for the period 24-25 October 2000. The dotted line shows the data calculated from the lidar data above 1.6-1.7 km and from the RS2-91 data below the height because of the saturation of the lidar signal at the lower altitude. (b) Temporal and vertical cross section of water vapor mixing ratio obtained with the Raman lidar for the same period as Fig. 4a.

謝辞

ラジオゾンデ・GPS データを提供して頂いた GPS つくば稠密観測グループの皆様に感謝します。

引用文献

- [1] Whiteman, D. N., S. H. Melfi, and R. A. Ferrare (1992): Raman lidar system for the measurement of water vapor and aerosols in the earth's atmosphere, *Appl. Opt.*, **31**, 3068-3082.
- [2] Goldsmith, J. E. M., F. H. Blair, S. E. Bisson, D. Turner (1998): Turn-key Raman lidar for profiling atmospheric water vapor, clouds, and aerosols, *Appl. Opt.*, **37**, 4979-4990.
- [3] Sherlock, V., A. Hauchecorne, and J. Lenoble (1999): Methodology for the independent calibration of Raman backscatter water-vapor lidar systems, *Appl. Opt.*, **38**, 5816-5837.
- [4] Avila, G., J. M. Fernandez, B. Mate, G. Tejada, and S. Montero (1999): Raman cross sections of water vapor in the OH stretching region, *J. Mol. Spectrosc.*, **196**, 77-92.
- [5] Penny, C. M. and M. Lapp (1976): Raman-scattering cross sections for water vapor, *J. Opt. Soc. Am.*, **66**, 422-425.
- [6] Inaba, H. (1976): Detection of atoms and molecules by Raman and resonance fluorescence, In *Laser Monitoring of the Atmosphere*, edited by E. D. Hinkley, pp.153-236.
- [7] 中村一・瀬古弘 (2001): GPS つくば稠密観測 2000: ヴァイサラゾンデ RS80-15G のドライ・バイアス, 日本気象学会 2001 年度秋季大会予稿集, **80**, 327.