

ラマン散乱レーザーレーダーによる水蒸気分布計測

Measurement of water vapor profiles by a Raman scattering laser radar

福地 哲生 名雪 琢弥 藤井 隆 根本 孝七

Tetsuo Fukuchi, Takuya Nayuki, Takashi Fujii, Koshichi Nemoto

(財)電力中央研究所

Central Research Institute of Electric Power Industry

Abstract

A laser radar system using Raman scattering for measurement of water vapor profiles was developed. The system can detect Raman scattering from atmospheric N_2 , O_2 , or H_2O for a laser wavelength of 280 nm. Vertical profiles of water vapor in the lower troposphere were measured with a range resolution of 15 m or 30 m. The correction due to O_3 absorption was found to be $<3\%$. Continuous measurement of Raman scattering from H_2O and Mie scattering showed that uncondensed and condensed water vapor can be identified by comparing the profiles of the water vapor mixing ratio and the Mie backscatter coefficient.

1. はじめに

大気汚染の機構解明には大気下層におけるオキシダント(O_x)や窒素酸化物(NO_x)の濃度分布の計測が必要とされており、これまで我々は差分吸収レーザーレーダー(DIAL)を用いて代表的な O_x と NO_x であるオゾン(O_3)と二酸化窒素(NO_2)の濃度分布の連続同時計測を行い、双方の濃度の増減に負の相関が現れる結果を得ている[1,2]。しかし、 O_3 と NO_2 の大気化学反応の観測およびこれに基づく大気汚染の解明には当該物質の濃度分布のほかには水蒸気・温度・エアロゾル分布等の気象条件の計測も必要となる。大気下層における水蒸気分布の計測にはラマン散乱を用いたレーザーレーダーが有効であるため、既存の DIAL 装置に紫外域におけるラマン散乱計測系を増備し、水蒸気計測機能を加えた。本報告では大気下層における水蒸気分布の計測結果について述べる。

2. ラマン散乱レーザーレーダーの概要

紫外域のラマン散乱計測では Nd:YAG の第四高調波(266nm)が従来用いられているが[3]、この波長は大気中における減衰が大きく、測定距離が制限される。ここではローダミン色素の第二高調波として安易に得られる波長 280nm を選択し、高度約 2000m までの計測を可能とした。開発したラマン散乱レーザーレーダーの概念図を図 1 に示す。レーザー光源に用いた Nd:YAG レーザー励起色素レーザーの繰り返しは 10Hz であり、280nm におけるパルスあたりのエネルギーは 15-30mJ である。後方散乱光は口径 500mm のニュートン型望遠鏡によって集光し、視野絞りとコリメータを介して平行光にした後、約 85%をラマン散乱計測系、約 15%をミー散乱計測系へ導く。ラマン散乱計測系では干渉フィルタによって N_2 , O_2 , 又は H_2O によるラマン散乱光を選択し、光電子増倍管(PMT)で検出する。ミー散乱光、レイリー散乱光、およびレーザー迷光を効果的に除去するために各フィルタの 280nm における透過率は $<10^{-4}$ となっている。ミー散乱計測系では同様に 280nm における散乱光を検出する。PMT からの信号はデジタル変換速度 10MHz にて A/D 変換され積算される。

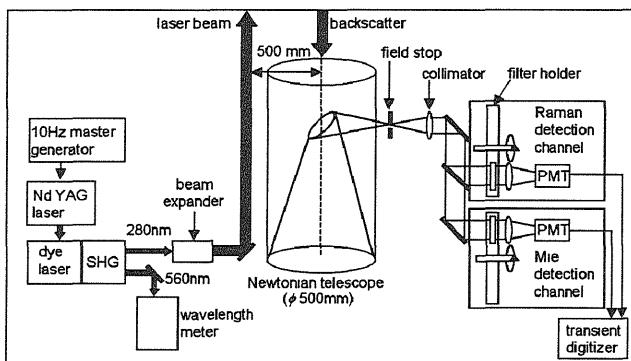


Fig. 1. Schematic diagram of the Raman scattering laser radar (SHG: second harmonic generator, PMT: photomultiplier tube)

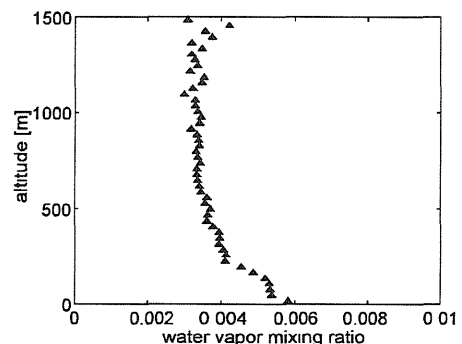


Fig. 2. Vertical profile of the water vapor mixing ratio (relative to N_2) with a range resolution of 30 m

3. 計測結果

ラマン散乱レーザーレーダーの場合、水蒸気混合比 w (大気中 N_2 に対する体積あたりの分子数比) は以下の式から求められる[3]。

$$w = \frac{[H_2O]}{[N_2]} = C \frac{P_{H_2O}}{P_{N_2}} \left[\frac{P_{N_2} [O_2]}{P_{O_2} [N_2]} \right]^\gamma, \quad \gamma = \frac{\sigma(\lambda_{H_2O}) - \sigma(\lambda_{N_2})}{\sigma(\lambda_{O_2}) - \sigma(\lambda_{N_2})} \quad (1)$$

ここで $P_{N_2}, P_{O_2}, P_{H_2O}$ と $\lambda_{N_2}, \lambda_{O_2}, \lambda_{H_2O}$ は N_2, O_2, H_2O によるラマン散乱の信号強度と波長、 C はフィルタの透過率などを含む装置定数、 σ は O_3 の吸収断面積である。レーザー波長 $\lambda=280\text{nm}$ に対応するラマン散乱波長は $\lambda_{N_2}=299.6\text{nm}, \lambda_{O_2}=292.8\text{nm}, \lambda_{H_2O}=311.4\text{nm}$ である。式(1)にある項 $[P_{N_2}/P_{O_2}]^\gamma$ は O_3 による差分吸収を考慮した補正項であり、 σ の文献値[4]から求めた係数 γ は -0.568 である。 C は地表上付近のラマン散乱光強度と地上に設置した湿度計などの計測機器が示す値の比較から求められる。

N_2, O_2, H_2O によるラマン散乱光を順次計測し、式(1)を用いて得た N_2 に対する水蒸気混合比を図2に示す。積分時間は各波長毎 40 分、高度分解能は 30m である。また、補正項 $[P_{N_2}/P_{O_2}]^\gamma$ を評価したところ、 $r=30\text{-}1500\text{m}$ における変動は $<3\%$ であり、 w の統計的ばらつき ($\sim 7\%$) よりも小さかった。よって、水蒸気混合比計測にはより簡素化した式 $w=[H_2O]/[N_2]=C'(P_{H_2O}/P_{N_2})$ を用いることができる。

水蒸気混合比 w の高度分布の連続計測結果を図3に示す[5]。積算時間は 10 分、高度分解能は 15m とした。また、同時に得たミー散乱信号から Fernald 法を用いて算出したミー後方散乱係数 β_M との比 w/β_M を図4に示す[5]。測定開始直後の $r=1500\text{-}2000\text{m}$ において w が比較的高いのに対し β_M はほぼ一定であり、 w/β_M は平均的に高い値となっている。この時間と高度における水蒸気は飽和蒸気圧に達しておらず、凝縮していない。測定後半の $r=1400\text{-}2000\text{m}$ においては雲が観測されており、 w と β_M の時空間分布は一致し、 w/β_M は平均的により低い値となっている。以上の結果より、 w と β_M の同時計測結果から水蒸気の凝縮状態が判別可能である。

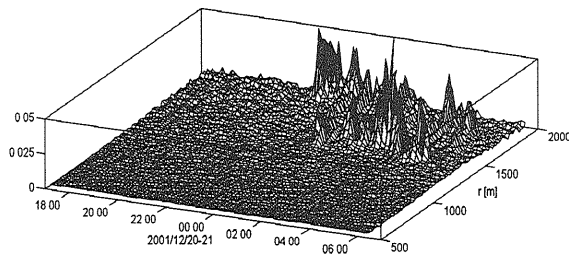


Fig. 3. Measurement result of w , the water vapor mixing ratio relative to N_2

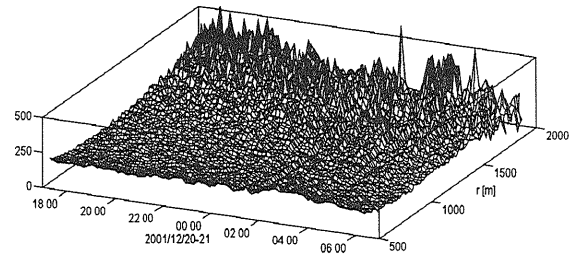


Fig. 4. Measurement result of w/β_M , the water vapor mixing ratio relative to N_2 divided by the Mie backscatter coefficient

4. まとめ

紫外域におけるラマン散乱光を検出するレーザーレーダーを用いて大気下層における水蒸気混合比の高度分布を得た。 O_3 による差分吸収による誤差は 3% 以下であった。また、水蒸気混合比とミー後方散乱係数の同時計測結果から水蒸気の凝縮状態が判別可能であることを示した。今後は回転ラマン散乱を用いた温度計測機能を付加し、 O_3/NO_2 /水蒸気混合比/温度の複合計測を行う予定である。

参考文献

- [1] 名雪, 曹, 森, 福地, 藤井, 根本, 竹内, 「大気中 $O_3 \cdot NO_2$ 同時計測用 DIAL システムの開発」, 第 21 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集, pp. 4-7 (2001); 福地, 名雪, 曹, 藤井, 根本, 竹内, 「DIAL による大気中 $O_3 \cdot NO_2$ 同時計測および測定誤差評価」, 同上, pp. 96-99 (2001).
- [2] T. Fukuchi, T. Nayuki, N. Cao, T. Fujii, K. Nemoto, H. Mori, and N. Takeuchi, "Differential absorption lidar system for simultaneous measurement of O_3 and NO_2 : system development and measurement error estimation", *Opt. Eng.* **42**, 98-104 (2003).
- [3] D. Renaut, J. C. Pourny, R. Capitini, "Daytime Raman-lidar measurements of water vapor", *Opt. Lett.* **5**, 233-235 (1980).
- [4] L. T. Molina and M. J. Molina, "Absolute Absorption Cross Sections of Ozone in the 185- to 350-nm Wavelength Range", *J. Geophys. Res.*, **91**, pp. 14,501-14,508 (1986).
- [5] T. Fukuchi, T. Fujii, T. Nayuki, K. Nemoto, "Simultaneous Raman and Mie-Rayleigh lidar measurement in the lower troposphere", *Proc. SPIE* **4893**, 70-77 (2003).