

気温・水蒸気・エアロゾル計測のためのレイリー・ラマン散乱ライダーの開発

Development of UV Rayleigh-Raman scattering lidar for measuring temperature, water vapor and aerosol profiles

華灯鑫^{*1}、内田清孝^{*1}、加藤正^{*1}、戴琮^{*2}、小林喬郎^{*2}

D. Hua^{*1}, K. Uchida^{*1}, T. Kato^{*1}, C. Dai^{*2} and T. Kobayashi^{*2}

^{*1}. 英弘精機株式会社 Eko Instruments Co. Ltd.

^{*2}. 福井大学大学院 Graduate School of Engineering, Univ. of Fukui

Abstract: A Rayleigh-Raman scattering lidar system at 355nm laser wavelength has been developed for simultaneous measurement of the vertical profiles of atmospheric temperature, water vapor and aerosol in the troposphere. Temperature is determined by the Rayleigh spectral linewidth. Two narrow-band Fabry-Perot filters with a dual-pass optical layout are used to detect the temperature changes. A high-resolution grating is used to separate the vibration-Raman line of water vapor at 407nm spectrally for humidity and to block the rotational Raman interference for temperature measurement. Experiment results show that statistical temperature error is below 1K to a height of 3.5km, and the uncertainty of the water vapor is below 10% at a height of 2.5km with a lidar system which uses a power-aperture product of 0.18Wm² and 3.5min observation time.

1. はじめに

気温、水蒸気は最も重要な気象要素であり、世界中で非常に多くの地上観測が行われている。これらの高度プロファイルの計測には、ラジオゾンデなどが一般的に利用されている。しかし、測位精度、リアルタイム性、コスト、申請等の問題があり、大気動態や温暖化メカニズムの解析手段としては不十分である。さらに、異常気象や都市域のヒートアイランド現象の解明、都市気象の研究においては、リアルタイムかつ高精度な遠隔計測機器の開発が重要な課題となっている。我々はこれらのニーズに応えるために、気温、水蒸気およびエアロゾルを同時に計測できる計測器を開発し、実用化を目指してきた¹⁾。

本研究では、アイセーフな紫外域レーザー波長(355nm)を利用し、高分解能の狭帯域 FP エタロンの光学構成をダブルパスにすることにより、高いミー散乱の遮断率が得られ対流圏の気温分布の計測を可能にした。さらに、水蒸気の振動ラマン散乱波長(407nm)を高分解能に分光し、水蒸気の高度分布も同時に計

Table 1 System parameters

Laser: Nd:YAG	
Wavelength	354.7 nm
Energy per pulse	200 mJ
Pulse Repetition Rate	20 Hz
Spectral line width	90 MHz
Optics:	
Grating Groove	2400gr/mm
Telescope diameter	250 mm
Field of view	0.1 mrad
Solar filter bandwidth	1nm@60%
Filters:	
FP etalon (Freq. Shift, FWHM, Tpeak)	
Filter-1 (Rayleigh-1)	1.0 GHz, 300MHz, 60%
Filter-2 (Rayleigh-2)	3.5 GHz, 600MHz, 80%
Filter-3 (Mie)	0 GHz, 200MHz, 55%
Detector: PMT	Hamamatsu R3896

測し、気温分布との関係から相対湿度の計測も行った。本報告ではそれらのシステムの構成と計測結果を示す。

2. システムの構成

レイリー・ラマン散乱ライダーシステムの構成をFig. 1に、システムの仕様をTable 1に示す。周波数の安定化したNd:YAGレーザーの第3高調波(波長355nm)のビームはビームエクスペンダーを介して、大気へ射出させる。大気からの後方散乱光は直径25cmの集光鏡で受信し、マルチモードファイバーを用いて分光フィルタへ誘導される。高分解能回折格子によりミー散乱・レイリー散乱信号と回転ラマン・振動ラマン散乱信号に分離される。レイリー・ミー散乱信号は3個の高分解能FPエタロン(Filter-1, Filter-2, Filter-3)による分光フィルタ系へ経て、3個の検出器(PMT-1-3)で検出される。レイリー散乱信号検出用のFilter-1,2はミー散乱の遮断率の向上のためには、ダブルパス光路が構成された。ミー散乱信号はFilter-3およびPMT-3により検出される。回折格子による分光された水蒸気の振動ラマン散乱波長(407.5nm)はPMT-4による検出される。検出器

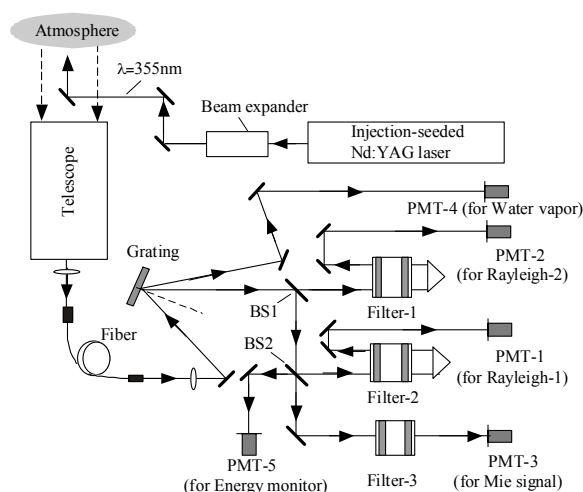


Fig. 1 Schematic of the Rayleigh Raman lidar for profiling of atmospheric temperature, humidity and aerosol properties.

PMT-5 はFilter-2 の表面反射信号を検出し、光学系の調整用のEnergy-Monitorチャンネルとして使用される。すべての信号はパソコンに内蔵したA/Dボードを介して記録され、パソコンで信号処理される。Filter-1 と Filter-2 の中心周波数のシフトは、レーザの周波数に対してそれぞれ 1.0GHz, 3.5GHzと設定され、ミー散乱の遮断率はそれぞれ-43dBと-45dBとなっている。気温計測感度 $\Theta_T=0.62\%/K$ となる。

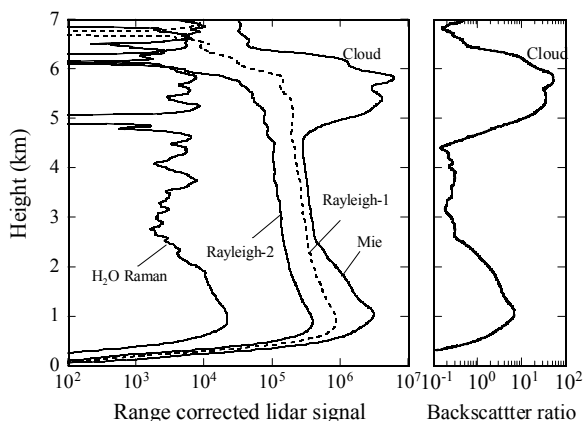


Fig. 2 Range corrected lidar signal and Backscatter ratio vs. height taken in Univ. of Fukui at 19:30 JST on Aug. 13 with 200mJ laser energy and 3.5 min observation time.

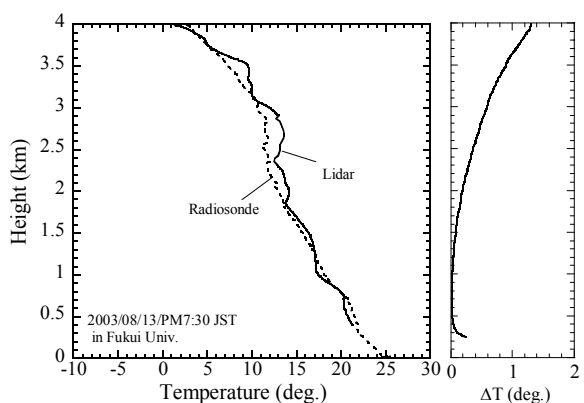


Fig. 3 Temperature profiles of the lidar measurement compared with radiosonde measurements. Temperature errors are due to the signal noise.

3. 計測結果

ラジオゾンデによる校正実験を福井大学で行った。レーザの出力は 200mJ で、測定時間は 3.5 分(4000 ショットパルス積算)で、生データは高度 3.5m の間隔で測定され、高度 60m の 移動平均でデータ処理した。Fig. 2 に距離補正したライダー信号と大気の後方散乱比を示す。高度 5-6km 付近には散乱比 45 を示す雲があり、この吸収によりレイリー散乱信号が減衰したことがわかる。Fig. 3 にはラジオゾンデとの比較した気温分布を示す。高度 2.5km 付近には小さい気温逆転が観測された。気温標準偏差は信号の SNR によるものであり、高度 3.5km においては、1K の 標準偏差が得られた。Fig. 4 には相対水蒸気の高度分布を示す。高度 2.5km におけるライダー測定の不確定度 10% が得られた。ラジオゾンデとの観測結果との違いがあるが、それ

は二つの測定においての時間上、空間上および手法上の差によると考えられる。

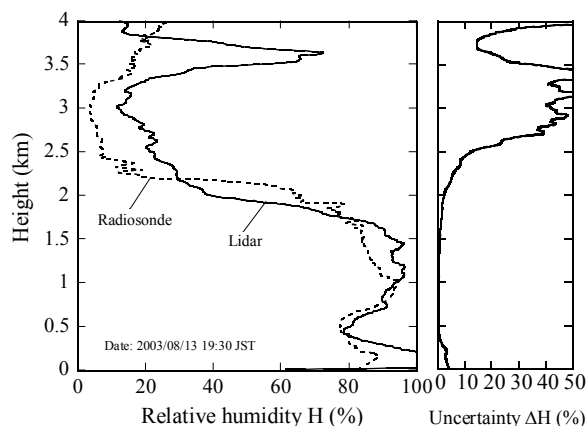


Fig. 4 Relative humidity profiles of the lidar measurement compared with radiosonde measurements. Uncertainties of the humidity profiles are due to the signal noise.

4. エンジニアリングモデルの開発

以上のプロトタイプモデルの開発を成功した後、2号機となるエンジニアリングモデルの開発を行った。そのシステムの仕様特性および観測データは別テーマ(2)で報告する。

モデル機が東京本社の技術研究所に設置され、日常の計測、テストを行っている。2号機の技術上の改良は

- 1) Fig.1 に示した3つの FP フィルタと周波数制御用 FP(示されてない)合計4つのFPを1つのマルチキャビティ FP に設計変更し、制御が簡易となり、安定性が向上された。
- 2) システムの構成の合理化、効率化により、計測高度と精度が向上された。
- 3) 自動制御および測定、解析ソフトの開発。などが挙げられる。さらに、ラジオゾンデなどによるシステムの評価、長時間観測による耐久性の検定などを終えて、実用化を目指す。

5. まとめ

対流圏気温・水蒸気・エアロゾル計測のためのレイリー・ラマン散乱ライダーシステムを開発した。システムの温度計測感度は 0.62%/K、レイリーフィルタのミー散乱遮断率は-43 dBと-45 dBとなる。ラジオゾンデによる校正実験により、高度 3.5km での 1K の気温計測標準偏差と、高度 2.5km での 10%の水蒸気の測定不確定度が確認された。

参考文献

- 1) 華他: 第 22 回レーザセンシングシンポジウム 稿集、O-5-13 35-38 (2003)
- 2) 内田他: 第 23 回レーザセンシングシンポジウム 稿集、EP-1 (2004)