

UV Rayleigh Scattering Lidar for Three-Dimensional Measurement of  
Atmospheric Temperature Profiles of the Troposphere福井大学 華 灯鑫、劉 君、平等 拓範、小林 喬郎  
Fukui University., D. Hua, J. Liu, T. Taira, T. Kobayashi

**Abstract:** Development of a high-resolution Rayleigh scattering lidar system operating at 355nm wavelength is reported for measuring atmospheric scatter ratio and temperature profiles. Differential spectroscopic technique is used to compare two different frequency signals using the etalon and to make the measurement insensitive to the influence of intense aerosol backscattered signal in the lower troposphere. Preliminary experiments are in progress to measure temperature profiles and atmospheric scattering ratio. The system is eye-safe and can be used for various fields of meteorological and environmental instrumentation.

## 1. まえがき

最近に至り、地球環境問題に関連して大気重要なパラメータである気温の遠隔計測技術の必要性が高まってきた<sup>1)</sup>。現在まで大気温度の測定法には、差分吸収法<sup>2)</sup>、回転ラマン散乱法<sup>3)</sup>などが主に研究されてきたが、いずれも対流圏での計測精度が低いことにより実用化に至っていない。これに対して、大気分子の熱運動によるレイリー散乱のスペクトル広がりより気温を求めるレイリー散乱法<sup>4,5)</sup>は散乱断面積が大きく、また大気の透過率の影響を受けないことが特長であるが、対流圏での高精度化のためのミー散乱の影響を取り除く分光技術の問題が残されていた。

我々は、UV域での高分解能のFPエタロンを使用し、参照信号とレイリー散乱光スペクトル2波長信号を同時検出することにより、ミー散乱の影響を差分演算で取り除くレイリー散乱気温計測ライダーの開発を行ってきた<sup>6)</sup>。本報告では、このライダーシステムの中で最も重要となる分光技術の開発と予備実験の結果を報告する。

## 2. 計測原理

狭帯域スペクトルのレーザー光を用いた場合のライダーの後方散乱光とレーザー光のスペクトル特性をFig. 1に、これに対する分光器の構成図をFig. 2に示す。参照光としてのレーザー光(周波数 $\nu_0$ )をビームスプリタ(BS)で二つのビームに分光してから、検出器(0)とエタロンに入射する。エタロンの中心透過周波数の角度依存性によって、中心透過周波数 $\nu_1$ と $\nu_2$ の二つのフィルターを設置する。このとき、三つの検出器で計測する参照光出力をそれぞれ $N_{0i}(i=0,1,2)$ とする。さらに、後方散乱光の検出される三つの信号をそれぞれ $N_i(i=0,1,2)$ とする。検出器(1)と(2)で検出される

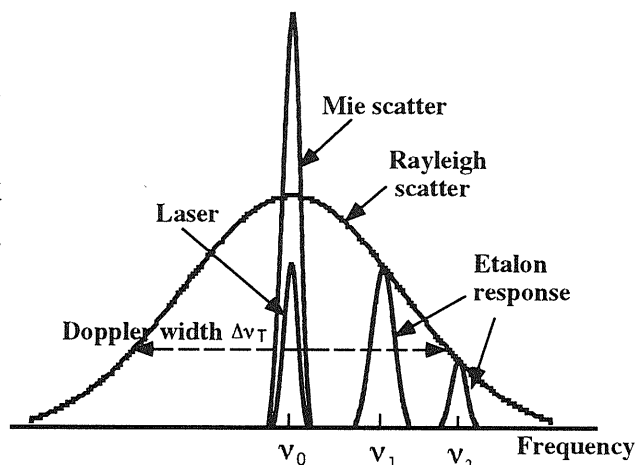


Fig. 1 Lidar return signal spectra and the filter spectral response functions.

散乱信号 $N_i$ と参照光 $N_{i0}$ の相対値 $P_i$ は

$$P_i = \frac{N_i}{N_{i0}} = \frac{n_m F_{im}}{n_0 F_{i0}} + \frac{n_r F_{ir}}{n_0 F_{i0}} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $n_m, n_r$ はそれぞれミー散乱信号とレイリー散乱信号のゲート時間当たりの光子数、 $F_{i0}, F_{im}, F_{ir}$ はそれぞれ、参照光、ミー散乱信号とレイリー散乱信号のスペクトル分布とフィルターの透過スペクトルとの畳み込み積分である<sup>7)</sup>。

さらに、ミー散乱光のスペクトル分布関数をレーザーのスペクトル分布関数と等しいと仮定することができるため、上式で $F_{im} = F_{i0}$ と仮定でき、上式は

$$P_i = \frac{N_i}{N_{i0}} = \frac{n_m}{n_0} + \frac{n_r}{n_0} H_i \quad (2)$$

となる。ここで、 $H_i$ はレイリー散乱光に対するフィルターの透過率比で

$$H_i = F_{ir} / F_{i0} \quad (3)$$

と定義される。さらに、レイリー散乱スペクトルの幅が気温で決められるので、 $H_i$ も気温の関数である。

ミー散乱光、またはレイリー散乱光のスペクトル強度分布関数はガウス分布形状で、フィルターとしてのF-Pエタロンの中心干渉リングの透過率はローレンツ形<sup>7)</sup>と仮定したときのフィルターの透過率 $F_i$ とフィルターの中心透過周波数 $(\nu_i - \nu_0)$ との関係をFig. 3に示す。さらに気温関数 $H_i$ の計算値をFig. 4に示す。これにより、二つのフィルターを用いる場合に、気温300 Kに対して0.45%/Kの計測感度 $\Theta$ が得られる。

次に、検出器(1), (2)で検出される出力 $P_1, P_2$ の差分演算をとって、次の様な応答関数 $R_s$ を定義する。

$$R_s = \frac{(P_1 - P_2)}{(P_1 + P_2)} = \frac{H_1 - H_2}{(2n_m/n_r) + (H_1 + H_2)} \quad (4)$$

上式において温度の関数 $H_i$ の他に、大気散乱比 $n_m/n_r$ も含まれるが、UV波長を用いる場合には雲などの強い散乱体がなければ、 $n_m/n_r$ の値が0.1より小さく、 $(H_1 + H_2)$ と比べると、無視できる。または検出器(0),(1)の出力を用いて、実際の散乱

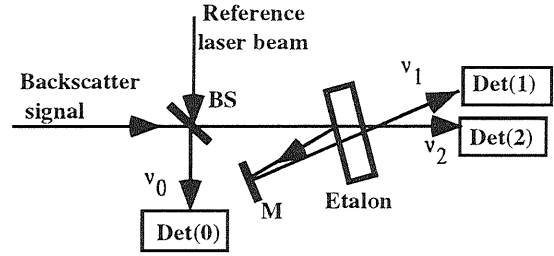


Fig. 2 Block diagram of the spectrometer using three channel detectors and a solid etalon.

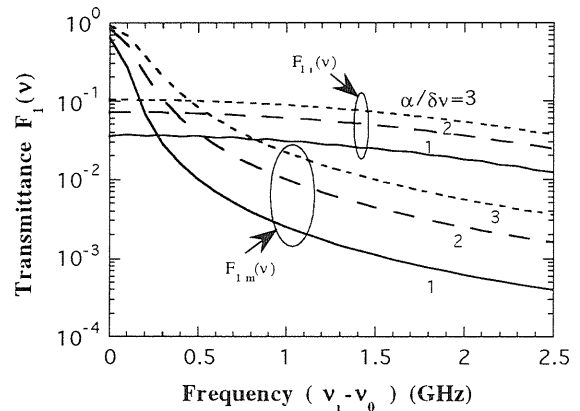


Fig. 3 Filter transmittances of Mie and Rayleigh backscatter for different ratios of the etalon half-width (FWHM) to laser spectral width (FWHM):  $\alpha/\Delta\nu$ .

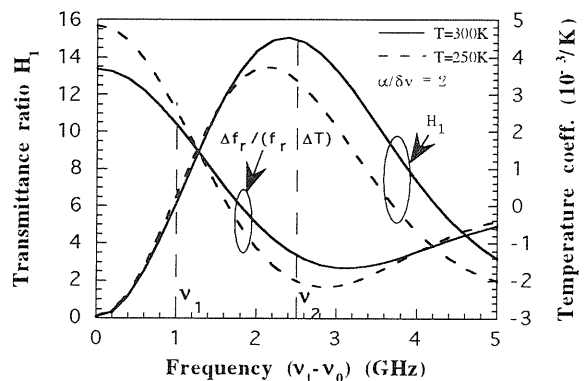


Fig. 4 Transmittance ratio and temperature coefficient of Rayleigh spectral function as a function of the central frequency of the filter for different atmospheric temperature.

比を計測して、応答関数におけるミー散乱光の影響を修正することができる。これによって対流圏での大気温度と散乱分布を高精度で計測することができるようになる。

また、温度の計測精度 $\Delta T$ は

$$\Delta T = \frac{\Delta R_s}{(\partial R_s / \partial T)} = \frac{1}{(S/N) \cdot \Theta} \quad (5)$$

と与えられる。よって、 $\Delta T=1K$ を得るためにはシステムの全S/Nが220以上必要であることがわかる。また、Fig. 3とFig. 4により、ミー散乱光に対する透過率を小さく、応答関数の感度を高めるため、対応する二つのフィルターの中心透過周波数のシフトをそれぞれ $\nu_1=1.0GHz$ 、と $\nu_2=2.5GHz$ に設定することが適当であることが分る。

### 3. システムの構成と予備実験

気温計測用UV域レイリー散乱レーザーレーダーシステムの構成例をFig. 5に示す。実際のシステムのパラメータをTable 1に示す。本システムの受信系設計では受信効率の距離変化を解消するため、光ファイバを用いる。さらに、熱によるエタロンの共振周波数の変動を除去するため、 $\pm 0.1^\circ C$ の精度で温度制御を施した。

Table 1. Lidar system parameters

Laser: Injection seeded Nd:YAG laser	
THG wavelength	355 nm
Energy	30mJ
Laser FWHM	100 MHz
PRF	20 Hz
Receiver:	
Teles. Dia.	20 cm
Optical efficiency	0.03
Etalon FWHM	200 MHz
Filter FWHM	1nm
Fiber core Dia.	50 $\mu$ m
Detector : Photomultiplier	

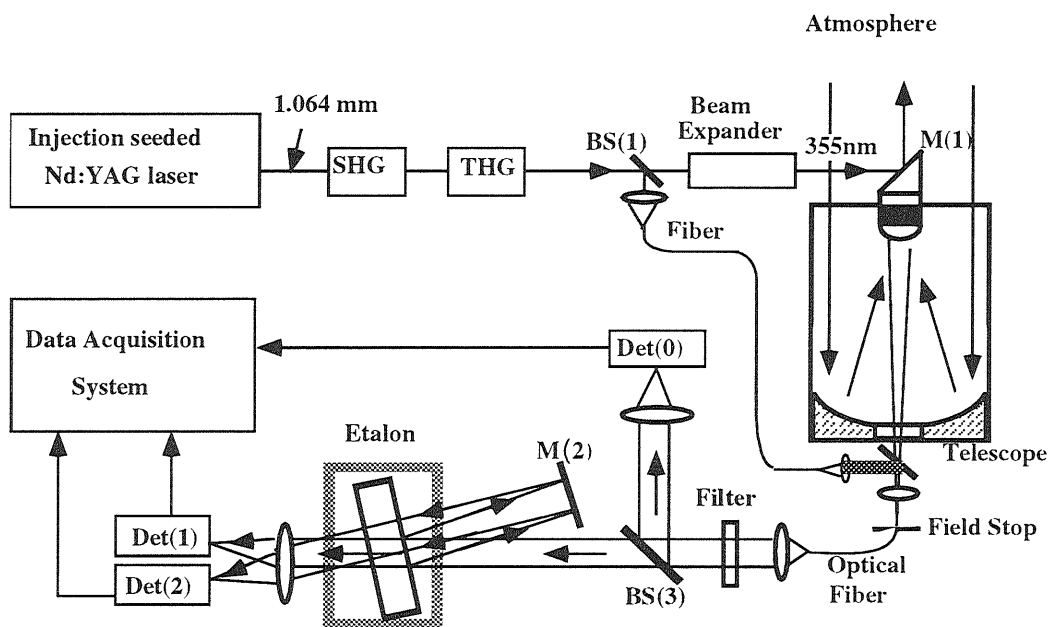


Fig. 5 Block diagram of the UV high-resolution Rayleigh scattering lidar

#### (1). エタロンの分光特性と校正

エタロンの角度依存性の計測結果をFig.6に示す。これにより、28%のエタロンの最大透過率が得られた。さらに、最小二乗法でそのデータを校正して、フィネス値が計算値より低くなることがわかる。その原因はレーザーの線幅によるものと考えられる。

## (2). ミー散乱とレイリー散乱の分離実験

Fig. 5の構成において、予備実験としての大気のミー散乱とレイリー散乱の分離の計測実験を行った。距離3.5km までの計測結果をFig.7に示す。距離2Kmにおけるレイリー散乱信号に対するSNRは200であった。さらに計測感度を0.45%/Kとすると、約1Kの温度計測精度が得られる。

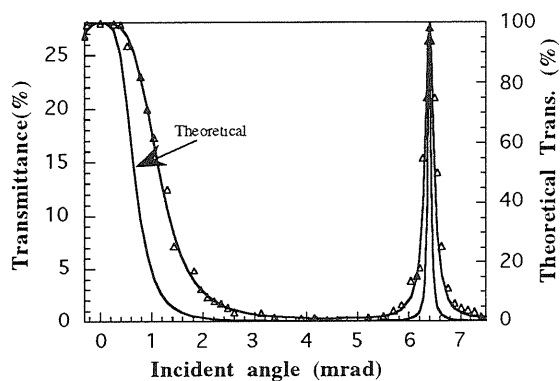


Fig. 6 Etalon transmittance as a function of incident angle.

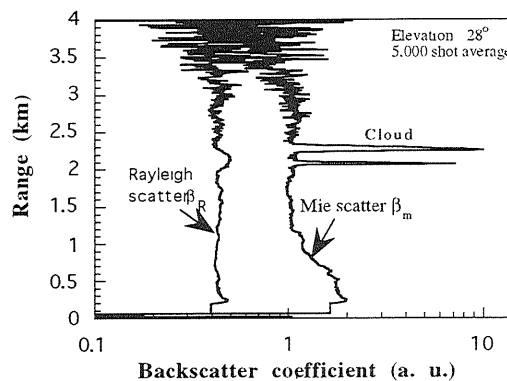


Fig. 7 Backscatter coefficient profiles of Mie and Rayleigh scatter

## 4. むすび

従来のレイリー散乱ライダーは、エアロゾルによるミー散乱光の影響が大きい低層対流圏において計測の誤差が多くなり、実際の動作が困難とたれてきた。本レイリー散乱ライダーではUV波長を用いることにより、分子によるレイリー散乱強度が増大し、エアロゾルによるミー散乱の影響が大きい低層の対流圏においても効率良く気温が計測することが従来のレイリー散乱ライダーに比した特長である。レイリー散乱のスペクトルを計るため、まず予備実験としての低層対流圏におけるミー散乱とレイリー散乱の分離実験を行った。これによってシステムの動作が確認された。今後の課題として、実際の温度感度の計測とシステムの効率の向上などによって、高精度な気温の計測を実現して行きたい。

## 5. 参考文献

- 1) 小林喬郎：日本リモートセンシング学会誌、5, pp. 1-5 (1985).
- 2) F.K. Theopold, and J. Bosenberg: J, Atmospheric and Oceanic Technology, 10, pp.165-179 (1993).
- 3) T. Kobayashi, and T. Taira: Abstracts of 15th Int. Laser Radar Conf., pp. 290-293, Tomsk, USSR, II (1990).
- 4) C.Y. She, R. J. Alvarez II, L.M. Caldwell, and D.A. Krueger: Opt. Lett. 17, pp. 541-543 (1992).
- 5) R.L.Schwiesow and L.Lading: Appl.Opt. 20, pp.1972-1979 (1981).
- 6) 華、平等、大高、小林： 福井大工報, 45, 1, 33-44, (1997).
- 7) C. L. Krob, Bruce M. Gentry, and Chi Y. Weng: Appl. Opt. 31, pp. 4202-4213 (1992).