

# CO<sub>2</sub>-DIAL による大気境界層内での気温分布測定法

柴田 泰邦, 長澤 親生, 阿保 真

東京都立大学 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

## Studies on measurement methods of the temperature profiles in the atmospheric boundary layer using CO<sub>2</sub>-DIAL

Yasukuni SHIBATA, Chikao NAGASAWA, and Makoto ABO

Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

**Abstract:** Some lidar techniques, such as high spectral resolution lidar (HSRL), rotational Raman (RR) lidar and differential absorption lidar (DIAL) have been developed for temperature profile measurements in the lower atmosphere. However, when the Mie scattering signal becomes dominant under the occurrences of an aerosol layer or thin cloud in the atmosphere, it is impossible to achieve a high measurement accuracy using the HSRL and the RR lidar. The RR lidar requires a high power laser due to its small rotational Raman scattering cross section, however it is very difficult to improve the low signal to noise ratio for especially daytime observations. On the other hand, DIAL techniques are not influenced significantly by the occurrences of aerosol layers or thin clouds in the lower atmosphere. H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub>, which have the wider absorption spectral widths than O<sub>2</sub>, are outstanding candidates for DIAL temperature measurements.

**Key Words:** temperature, boundary layer, DIAL, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>

### 1. はじめに

都市気候やヒートアイランド、大気拡散の研究目的のため、テレビ塔などの高層建造物を使った気温鉛直分布の連続観測が行われている。しかし、高さは地上から数百 m までしか観測できず、大気境界層内のすべての気温鉛直分布を把握できているわけではない。そこで我々は下部対流圏の気温鉛直分布を連続観測するため、気体分子吸収スペクトル強度の温度依存性を利用する差分吸収ライダー (DIAL: Differential absorption lidar) に着目した<sup>1,2)</sup>。高分解能スペクトルライダー (HSRL: High Spectral Resolution Lidar) や回転ラマンライダー (以下、RRライダー) による気温測定法のようにエアロゾルの影響を受けないため、低高度での測定精度が向上する利点がある。本研究では、対流圏下部をターゲットに、気温分布測定を行うライダー手法について比較、検討を行った。

### 2. ライダーによる気温測定

#### 2.1 HSRL、RR ライダー

HSRL と RR ライダー技術は、下層大気温度測定用に開発された。HSRL は、大気からのレイリー散乱信号のドップラー広がり温度依存性を利用する。大気温度は、透過幅の異なる 2 つのヨウ素蒸気吸収フィルタを透過して得られる 2 つの受光信号強度の比から取得される<sup>3)</sup>。しかし、エアロゾル層や薄い雲がある場合、ミー散乱信号の漏れが大き

なり、測定誤差が大きくなる。

RR ライダーは、窒素分子と酸素分子の回転ラマンスペクトル強度の温度依存性を利用する<sup>4,5)</sup>。Figure 1 にレーザ波長 532.4 nm における弾性散乱 (ミー散乱+レイリー散乱) スペクトル、回転ラマンスペクトル (アンチストークス線)、後述するバンドパスフィルタ (BPF) の関係を示す。レーザラインに近い回転ラマン強度は温度の上昇とともに減少するが、レーザラインから遠い回転ラマン強度は温度の上昇とともに増加する。したがって、大気温度は、2 つの BPF で得られる異なる温度依存性を持つ 2 つの RR ライダー信号  $I_{Near}$  と  $I_{Far}$  の比  $R (= [I_{Near} - I_{Far}] / [I_{Near} + I_{Far}])$  から取得できる。レーザ波長と異なる波長の非弾性散乱信号を用いるため、エアロゾル層や薄い雲を含む気象条件下で適用できる。ただし、信頼性の高い結果を得るには、弾性散乱光の透過率を非常に低く (< -70dB) する必要がある。結果、BPF の透過率を高くすることが困難となり、信号対雑音比が低くなる。したがって、背景光の多い昼間の観測は困難である。

Figure 2 に散乱比に対する、各 BPF 透過強度とミー散乱信号の漏れの割合を示す。ここで、各フィルタのレーザラインにおける透過率は Near が -68dB、Far が -58 dB とした。散乱比が大きくなるとミー散乱の漏れが大きくなり、例えば、散乱比 30 では各 BPF を透過する回転ラマンスペクトル強度の約 19% 相当のミー散乱強度が漏れて、比  $R$  に誤差が生じる。ミー散乱を完全に遮断した場合の比  $R_0$  から求めた気温との差  $\Delta T$  は約 1.2 K となる。

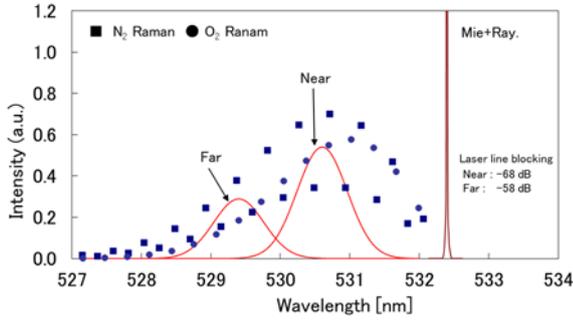


Figure 1 Rotational Raman spectra of atmospheric nitrogen and oxygen, and elastic (Mie and Rayleigh) scattering spectrum for an excitation wavelength of 532.4 nm. Transmission curves of the interference filters are shown for comparison.

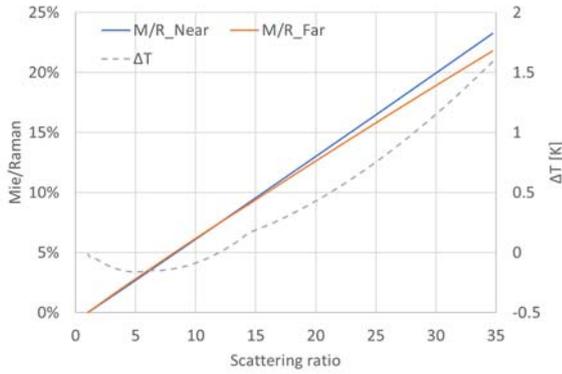


Figure 2 The two solid lines are the leakage intensity of Mie scattering for the intensity of the rotating Raman spectrum transmitted through each bandpass filter. The dash line is the temperature measurement error for a scattering ratio of 1.0.

## 2.2 DIAL

DIAL 技術を使用した温度測定では、気体分子吸収スペクトルの温度依存性が利用される。従来の密度観測に用いる吸収波長 $\lambda_{on}$ と非吸収波長 $\lambda_{off}$ に加え、温度測定用の3番目の波長 $\lambda_T$ が吸収スペクトルのエッジ部分に適用される。温度 $T$ は、式(1)の DIAL 方程式と式(2)の $\lambda_{on}$ と $\lambda_T$ の信号強度比から決定できる。

$$N_{CO_2}(r) = \frac{1}{2\Delta\sigma(r)\Delta r} \ln \left[ \frac{P(r+\Delta r, \lambda_{off})}{P(r, \lambda_{off})} \frac{P(r, \lambda_{on})}{P(r+\Delta r, \lambda_{on})} \right] \quad (1)$$

$$\frac{P(r, \lambda_T)}{P(r, \lambda_{on})} = \frac{E_T}{E_{on}}$$

$$\times \exp \left[ -2 \int_0^r \{ \sigma(r', \lambda_{on}, T) - \sigma(r', \lambda_T, T) \} N_{CO_2}(r') dr' \right] \quad (2)$$

大気中に存在し、適度な吸収強度を持つ気体分子として $O_2$ 、 $H_2O$ 、 $CO_2$ があげられる。Figure 3に各気体分子の吸収スペクトルの例を示す。 $O_2$ のスペクトル幅は約5 pmで、 $H_2O$ と $CO_2$ のスペクトル幅の約

1/10と狭い。したがって、高いスペクトル純度を得るためには狭帯域化されたレーザ光源が必須であり、さらに光源波長の高い安定度が要求される。それに対し、 $H_2O$ と $CO_2$ を利用したDIALに要求されるスペクトル純度と光源波長の安定度は、 $O_2$ を利用するより条件が緩い利点がある。DIALはRRライダーとは異なり弾性散乱を利用するので、対流圏下部の観測に限定すれば、適度なエアロゾルや薄い雲があると、信号雑音比が大きくなり、精度が上がる。また、狭帯域フィルタを用いることで昼間の観測も十分可能である。

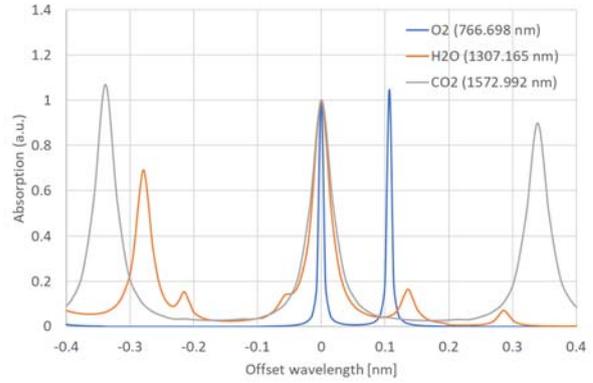


Figure 3 Calculated absorption spectrum of  $O_2$  (766.698 nm),  $H_2O$  (1307.165 nm) and  $CO_2$  (1572.992 nm) derived from the HITRAN database.

## 3. まとめ

対流圏下部をターゲットに、気温分布測定を行うライダー手法について比較、検討を行った。これまで、HSRL、RRライダー、DIALなど、いくつかのライダー技術が開発された。HSRLとRRライダーは、エアロゾルや薄い雲に起因するミー散乱の漏れが気温測定の精度に影響を与える。また、散乱断面積の小さい回転ラマン散乱は信号雑音比が小さく、昼間の観測には高出力レーザの利用が求められる。一方、DIAL方式は弾性散乱を用いるため、適度な吸収量をもつ吸収スペクトルを利用すれば、HSRLとRRライダーと比べて高い信号雑音比が実現でき、昼間の観測も可能である。対象となる気体分子として、 $O_2$ よりスペクトル幅が広く、レーザに要求されるスペック条件が緩くなる $H_2O$ と $CO_2$ が候補となる。

## 参考文献

- 1) Y. Shibata, et al., 2017, *Appl. Opt.*, **56** (2017) 1194-1201.
- 2) 柴田、長澤、阿保、第37回レーザセンシングシンポジウム (2019) 1-2.
- 3) J. W. Hair, et al., *Appl. Opt.*, **40** (2001) 5280-5294.
- 4) R. G. Strauch, et al., *Appl. Opt.*, **10** (1971) 2665-2669.
- 5) P. Keckhut, et al., *Appl. Opt.*, **29** (1990) 5182-5186.