

下部対流圏気温分布測定における3波長CO₂-DIAL手法の優位性

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)

The notable characteristics of the temperature measurement method by the three-wavelength CO₂-DIAL in the low troposphere

Yasukuni SHIBATA, Chikao NAGASAWA, and Makoto ABO
Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract: We have studied comparatively the characteristics of some lidar techniques of atmospheric temperature measurement in the lower atmosphere such as the high spectral resolution lidar, the rotational Raman lidar, the O₂-DIAL (differential absorption lidar) and three-wavelength CO₂-DIAL. As a result, we can confirm that the three-wavelength CO₂-DIAL which can measure simultaneously the temperature and CO₂ concentration shows its excellent advantages in situations where dense aerosols and rich water vapor present in the lower troposphere.

Key Words: Temperature, lidar, HSRL, Rotational Raman, DIAL

1. はじめに

従来、ライダーによる対流圏下部の温度測定のための主要な方式として、高分解能スペクトルライダー(HSRL: High Spectral Resolution Lidar)¹⁾や回転ラマンライダー²⁾、O₂-DIAL³⁾が開発されてきた。HSRLは狭帯域フィルターを用いて、大気分子散乱(レイリー散乱)と粒子散乱(ミー散乱)をスペクトル的に分離し、レイリー散乱を基に大気中の温度プロファイルを推定するが、エアロゾルが多く存在する環境では、両散乱の分離が困難になる問題がある。回転ラマンライダーは散乱強度が弱いことから背景光などの雑音の影響が大きく昼間観測は困難である。O₂-DIALは酸素分子の吸収を利用した差分吸収ライダー(DIAL: Differential Absorption Lidar)で、O₂の大気混合比が一定であることを利用して吸収係数から温度プロファイルを得るが、水蒸気吸収を含むためその補正が必要となる。我々が提案しているCO₂-DIALによる気温観測はCO₂濃度と気温を反復計算処理によって求解するのが特徴で、水蒸気吸収の影響はない利点がある⁴⁻⁶⁾。本講演では、ここに挙げた各気温測定ライダー手法の特徴を示すと同時に、CO₂-DIALによる気温観測の湯異性について述べる。

2. 気温分布測定用ライダー

本章では、表1に示すこれまでに提案されてきた大気温度測定のためのライダー技術の概要について述べる。

2.1 HSRL

大気からのレイリー散乱信号のドップラー拡がりの温度依存性を利用する。異なる透過幅を持つ2つのヨウ素蒸気吸収フィルターを通過するライダー信号の強度比から温度を測定する。ただし、大気中の濃いエアロゾル層または雲の条件下では、ヨウ素フィルターでのミー散乱の漏れが無視できなくなり、高い測定精度を実現することが難しい。さらに、ヨウ素フィルター通過後の散乱強度が弱いため、測定範囲が制限される場合がある。

2.2 回転ラマンライダー

純粋な回転ラマンバンド内のスペクトル強度の温度依存性を利用する。レーザー波長に近い回転ラマン散乱強度は温度の上昇とともに減少するが、レーザー波長から遠い回転ラマン散乱強度は温度の上昇とともに増加する。この異なる温度依存性を持つ波長域それぞれに狭帯域フィルターを挿入し、2つの回転ライダー信号の比から温度を得る。回転ラマン散乱強度は弾性散乱よりも3桁以上弱いので、OD (Optical depth) 7以上の深いブロッキングにより、弾性散乱信号を除去する必要がある。

2.3 O₂-DIAL

波長 770 nm 前後の O₂ 吸収スペクトル分布の温度依存性を利用する。DIAL は、オンラインと呼ばれる吸収の強い波長 (λ_{on}) と、オフラインと呼ばれる吸収の弱い波長 (λ_{off}) のレーザー光を大気に照射し、それぞれの波長での O₂ 分子による光吸収量の差分からその濃度を求める手法である。大気温度は、既知の O₂ 混合比から得る O₂ 密度と、DIAL 観測から得られた O₂ 密度が一致する温度から得ることができる。ただし、O₂-DIAL 用いる波長は水蒸気による吸収の影響を受けるため、他の機器を使用して水蒸気プロファイルを同時に測定する必要がある。

2.4 3 波長 CO₂-DIAL

この DIAL 技術では、1.57 μm 帯の CO₂ 吸収スペクトル分布の温度依存性を利用する。O₂ とは異なり、CO₂ 混合比分布は不明であるため、CO₂ 密度を λ_{on} と λ_{off} ペアの DIAL から測定する。同様に、CO₂ 密度は、 λ_{on} および第 3 の波長 λ_T の DIAL から測定されます。 λ_T は単一の CO₂ 吸収スペクトルの λ_{on} と λ_{off} の間に位置している。大気温度は、両方の DIAL から求めた CO₂ 密度が一致する温度を反復計算により求めることができる。この DIAL システムの利点は、3 つの波長で水蒸気の吸収係数がほぼ同じであるため、水蒸気の影響を受けにくい。さらに、1.57 μm での CO₂ 吸収係数は 770 nm の O₂ の吸収係数よりも小さいため、長距離にわたって十分な信号対雑音比 (SN) を維持することができる。一方、CO₂-DIAL は複数のレーザー波長を同時に放出することができない課題がある。エアロゾル変動の影響を抑えるには、2 ms 以内でのショットごとの波長スイッチングが必要である。このため DIAL には、正確な波長調整だけでなく、波長スイッチング制御も必要となる。

Table 1. Characteristics of Temperature Lidars

	HSRL	Raman Lidar	DIAL	
Scattering	Rayleigh	Rotational Raman	Mie and Rayleigh	
Temperature dependence	Ratio of Rayleigh scattering signals through two iodine filters with different temperature	Ratio of rotational Raman scattering intensities through two bandpass filters with different central wavelength	Differential lidar signals between absorption and non-absorption wavelengths of target molecules	
Target molecular	Air	N ₂ , O ₂	O ₂	CO ₂
Challenges	<ul style="list-style-type: none"> Leakage of Mie scattering Limited effective scattering signal 		<ul style="list-style-type: none"> Strict wavelength control 	
	<ul style="list-style-type: none"> Strict wavelength control 		<ul style="list-style-type: none"> Strong absorption Water vapor absorption 	

3. まとめ

HSRL、回転ラマンライダー、O₂-DIAL、3 波長 CO₂-DIAL による大気温度測定手法について説明した。3 波長 CO₂-DIAL は、特に水蒸気混合に対する耐性と、長距離にわたって十分な信号対雑音比を維持することにおいて、有益であることを示した。

参考文献

- 1) Z. Liu, D. Bi, X. Song, J. Xia, R. Li, Z. Wang, C. She, Opt. Lett. 34, 2712-2714 (2009).
- 2) P. Di Girolamo, R. Marchese, D. N. Whiteman, and B. B. Demoz, Geophys. Res. Lett., 31, L01106 (2004).
- 3) R. A. Stillwell, S. M. Spuler, M. Hayman, K. S. Repasky, C. E. Bunn, Opt. Express 28, 71-93 (2020).
- 4) D. Sakaizawa, C. Nagasawa, T. Nagai, M. Abo, Y. Shibata, M. Nakazato, T. Sakai, Appl. Opt., 48, 748-757 (2009).
- 5) Y. Shibata, C. Nagasawa, M. Abo, Appl. Opt., 56, 1194-1201 (2017).
- 6) Y. Shibata, C. Nagasawa, M. Abo, M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, Sensors, 18, 4064 (2018).