

レーザー光のイメージング計測によるエアロゾルと雲の特性評価

Aerosol and cloud characterization by means of imaging measurement of scattered laser beam

目時洋平, 蒲 靖人, 宮澤周司, 齊藤隼人, 眞子直弘, 久世宏明

Y. Metoki, Y. Kaba, S. Miyazawa, H. Saitou, N. Manago, H. Kuze

千葉大学環境リモートセンシング研究センター

Center for Environmental Remote Sensing (CEReS), Chiba University

Abstract: The scheme of bistatic imaging lidar is employed for the characterization of atmospheric aerosols and clouds and understanding of aerosol-cloud interactions. Since the conventional solution of lidar equation cannot be applied when the far-end boundary is not well defined, the proposed method relies on the determination of aerosol information at the ground level. The combination of the Raman scattering measurement at the ground level and the imaging lidar observation using a CCD camera will be presented.

1. はじめに

地上から高度 1-2 km までの対流圏下部領域は大気境界層と呼ばれ、地表面とそれに接する大気との間にさまざまな相互作用が生じている。この領域における大気は、気象現象を通じて人間の環境にもっとも強い影響を及ぼしている。とりわけ、都市大気においてはエアロゾルや燃焼などに由来する気体物質の濃度が高く、しばしば大気汚染という形で都市住民に健康被害をもたらす。

本研究では、光学的なリモートセンシング計測手法であるライダー計測手法、とりわけ通常のリダー計測では困難な地上付近の計測が可能になるイメージング（撮像）ライダーの手法¹⁾と、水平もしくはそれに近い地上での長光路測定²⁾を複合的に活用することにより、エアロゾルを中心的ターゲットとして、大気汚染気体からエアロゾルへの変化、そしてエアロゾルから雲粒への変化を動的に捉えることを目的としている。最終的に、雲により遠方での積分開始点がとれない状況においても定量的なライダー計測が実現できるように、理論的・実験的に進めている。今回は、レーザー光を用いたイメージング計測手法と、水平な光路による前方Raman散乱について報告する。

2. 理論

後方散乱 Mie ライダーのライダー方程式は

$$P(r) = P_0 \frac{c\tau}{2} AK \frac{G(r)}{r^2} \beta(r) T(r)^2 \quad (1)$$

で与えられる。 r は散乱体までの距離、 P_0 は射出光強度、

τ はレーザー光のパルス幅、 A は望遠鏡の受光面積、 K は光学系の効率、 $G(r)$ は重なり関数、 $\beta(r)$ は後方散乱係数、 $T(r)$ はライダー装置から粒子までの大気透過率である。このライダー方程式では $\beta(r)$ と $T(r)$ が未知パラメータとなるため、単独の観測では解析結果に不定性が残る。そのため、ライダー比 S_1 などを別に指定する必要がある。また、(1)式を解析的に解くためには、遠方での初期値を与える必要がある。このため、雲によって遠方の積分開始点での情報が得られない場合、エアロゾルの高度分布をライダー観測データのみから一意的に決定するのは困難である。

一方、レーザー装置と検出器を離れた位置に置くバイスタティック (bistatic) 配置では、ライダー方程式は

$$P(r) = P_0 AK \frac{\Delta s}{r^2} \beta(\theta_{scat}) T_1(r) T_2(r) \quad (2)$$

となる。³⁾ ここで Δs は検出器の一素子がレーザー光の飛跡を見込む長さで、

$$\Delta s = r \theta_{FOV} / \sin(\theta_{scat}) \quad (3)$$

で与えられる。ここで θ_{scat} は散乱角、 θ_{FOV} は一素子あたりの視野角 (field of view) である。(2), (3)式から信号光強度の距離依存性は r^2 ではなく r^{-1} となるため、検出装置に必要とされるダイナミックレンジは通常の後方散乱ライダーに比べて低減される。また、重なり関数の問題が少ないため、地上付近からの計測が可能である点に特徴がある。¹⁾

一方、前方散乱配置でのRaman散乱光については、受信光強度は次式で表すことができる。

$$P_{Ra}(r) = AKP_0 \exp[-\alpha(\lambda_0)(l-r)] \frac{\beta_{Ra}}{r^2} \times \Delta r \exp[-\alpha(\lambda_{Ra})r] \quad (4)$$

α は消散係数、 l は全光路長、 Δr は光路の微小部分、 λ_0 は散乱前のレーザー光波長、 λ_{Ra} はRamanシフト後の波長、 β_{Ra} は前方Raman散乱係数である。Raman散乱の場合、窒素分子の信号を利用すれば信号強度の校正が可能になる。同様の式がエアロゾルからの前方散乱光についても成り立ち、両者の比からエアロゾル情報が得られる。

3. 実験方法

前方Raman散乱の実験では、8階建建物屋上でNd:YLFレーザー(Photonics Industries、波長351 nm、出力300 mW、繰り返し300 Hz、100 mJ/pulse)を大気中に照射し、約50 mの距離を往復させた。波長 $\lambda_0 = 351.0$ nmのレーザー光に対して、窒素分子および水蒸気のRaman散乱光がそれぞれ382.3、402.7 nmに現れるため、光学フィルターと分光器(日本分光CT25)を利用することで、それぞれに対応した波長選択を行い光電子増倍管によって信号を検出した。

バイスタティック配置の実験では、rawモードでの計測が可能なCCDカメラ(EOS-D1)を用いてレーザー光飛跡の撮像実験を行った。

4. 実験結果

Raman散乱光の信号強度を得るために、380 nmより短波長側を遮光する光学フィルターを分光器の前に設置した。Fig. 1に、分光器の波長を382 nmおよび351 nmに設定して10分間の積算により得られた信号強度を示す。なお、351 nm光を減衰させるため、透過率87.5%のNDフィルターを用いている。この結果から、往復距離105 mに対応して、約350 nsから信号の立ち上がりが見られることから、窒素分子による波長382 nmの

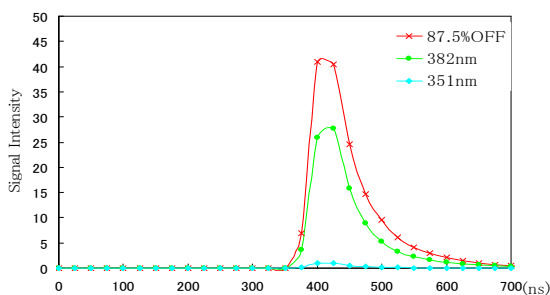


Fig.1: Signal intensity observed at 351 and 382 nm in the forward Raman scattering scheme.

Raman散乱光が取得できているものと考えられる。同様に水蒸気のRaman散乱に対応する403 nmの信号も観測された。

CCDカメラによるレーザー光の飛跡の撮像実験で得られた画像と、強度分布の解析例をFig.2に示す。この実験ではネブライザ(Omron, NE-C28)を用い、室内で水蒸気を噴霧することによって前方散乱に近い画像を取得した。使用したレーザーは波長532 nm(Quantel CFR200, 10Hz, 150 mJ/pulse)、積算時間は3.2sである。

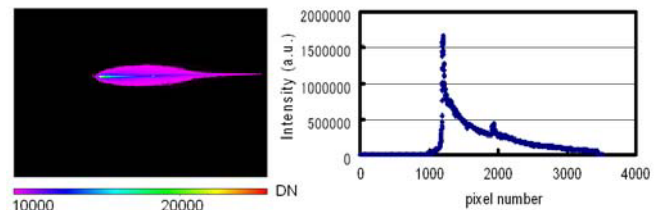


Fig. 2 Scattering of 532 nm laser beam observed in the laboratory.

5. まとめ

Raman散乱から前方散乱係数と消散係数の大きさを測定すれば前方散乱の位相関数が定量化でき、これに基づいて後方散乱係数およびライダー比を推定できる。また、CCDカメラによる画像取得方法を実際の雲からの散乱光取得に活用する。こうした情報を組み合わせることによって、曇天時のライダー観測によるエアロゾル・雲の同時計測をめざした実験・解析を進めていく。

参考文献

- 1) Y. Yamaguchi, I. Kouga, K. Shinomiya, D. Kataoka, N. Takeuchi, H. Kuze, M. Sasaki, Y. Asaoka, S. Ogawa, Development of an Imaging Lidar for Aerosol Monitoring using a Wide Field-of-view, High-resolution Telescope, CLEO Pacific Rim 2007, FG1-3, Seoul, August 26-31, 2007.
- 2) K. Kuriyama, Y. Kaba, Y. Yoshii, S. Miyazawa, N. Manago, I. Harada, H. Kuze, Pulsed differential optical absorption spectroscopy applied to air pollution measurement in urban troposphere, JQSRT, doi:10.1016/j.jqsrt.2010.06.010, 2010.
- 3) K. Meki, K. Yamaguchi, X. Li, Y. Saito, T.D. Kawahara, A. Nomura, Range-resolved bistatic imaging lidar for the measurement of the lower atmosphere, Opt. Lett.21, 1318-1320, 1996.
- 4) S. P. Love, A.B. Davis, C. Ho, C.A. Rohde, Remote sensing of cloud thickness and liquid water content with wide-angle imaging lidar, Atmos. Res. 59-60, 295-312, 2001.
- 5) J.E. Barnes, S. Bronner, R. Beck, N.C. Paikh, Boundary layer scattering measurements with a charge-coupled device camera lidar, Appl. Opt. 42, 2647-2652, 2003.