

多波長ライダーおよびサンフォトメーターを組み合わせたライダー定数の導出

金城秀樹, 久世宏明, 高村民雄, 竹内延夫
千葉大学 環境リモートセンシング研究センター

Derivation of Aerosol Extinction-to-Backscattering Ratio
using a Multi-Wavelength Lidar and a Sun photometer

Hideki Kinjo, Hiroaki Kuze, Tamio Takamura, and Nobuo Takeuchi
Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University
1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan

Representative sets of the extinction-to-backscattering ratio for several wavelengths from the actual measurements would contribute to extract more substantial information from remotely sensed aerosol data. Here we propose a method to determine the extinction-to-backscattering ratio using a multi-wavelength lidar (1064, 532, 756, and 355 nm) and a sun photometer data. In our approach, first, the ratio is obtained at 532 nm by comparing the optical thickness derived from the lidar data with optical thickness obtained with the sun photometer. At each altitude, it is assumed that the aerosol extinction coefficient at each lidar wavelength is proportional to the coefficient at 532 nm. The proportional factors are obtained from the sun photometer data. Then we determine the value of the ratio at 1064, 756, and 355nm using the profile as a reference profile.

1. はじめに

反転解法¹⁾を用いた弾性散乱ライダーデータから消散係数への変換において、エアロゾル消散係数と後方散乱係数の比(ライダーレシオ)は重要な役割を果たす。また、ライダーレシオの波長依存性は、エアロゾルの光学的特性の同定に有効である。このライダーレシオは、対流圏に存在するエアロゾルの粒径分布および複素屈折率に対して 10~100 sr の値を示す²⁾。したがって、多波長においてライダーレシオの代表値を求めることは、ライダーデータの解釈において重要である。

弾性散乱ライダー単独ではライダーレシオの導出は不可能であるため、他の観測機器との同期観測が提案されてきた。金城ら³⁾は、エアロゾル散乱係数(波長 530 nm)を地上設置の積分型ネフェロメーター⁴⁾で観測し、ライダーデータ(532 nm)の校正を行った。サンフォトメーターは気柱内エアロゾルの

光学的厚さを計測することが可能であるため、ライダーレシオの決定と消散係数の校正に有効である^{5,6)}。高村ら⁵⁾はサンフォトメーターとライダーの同期観測を行い、532 nm におけるライダーレシオが 30~70 sr であることを示した。本研究では、多波長ライダー^{7,8)}とサンフォトメーターを用いたライダーレシオの導出法について述べる。

2. 理論

単散乱ライダー方程式は、

$$P(z) = K \frac{G(z)}{z^2} [\beta_1(z) + \beta_2(z)] \times \exp \left[-2 \int_0^z \alpha_1(z') dz' - 2 \int_0^z \alpha_2(z') dz' \right], \quad (1)$$

で与えられる。ここで K は装置定数、 $G(z)$ は重なり関数、 z はライダーから対象物までの距離、 β_i および α_i ($i=1,2$) は消散係数と後方散乱係数である。

添字 1, 2 はそれぞれエアロゾル粒子、空気分子を示す。Fernald の解法¹⁾では、 β_i と α_i の間に線形関係 $\alpha_i = S_i \beta_i$ が仮定される。ここでエアロゾルのパラメーター S_1 はライダーレシオと呼ばれる。空気分子の係数 β_2 および α_2 は、標準大気モデル⁹⁾から推定できる。

ライダー信号を距離 2 乗補正した信号を

$$X(z) = P(z)z^2, \quad (2)$$

と定義すれば、エアロゾル消散係数は

$$\alpha_1(z) = -\frac{S_1(z)}{S_2} \alpha_2(z) + \frac{S_1(z)X(z) \exp [I(z)]}{\frac{X(z_c)}{\frac{\alpha_1(z_c)}{S_1(z_c)} + \frac{\alpha_2(z_c)}{S_2}} + J(z)}, \quad (3)$$

で求められる。ここで積分項 $I(z)$ 、 $J(z)$ は

$$I(z) = 2 \int_z^{z_f} \left[\frac{S_1(z')}{S_2} - 1 \right] \alpha_2(z') dz', \quad (4)$$

$$J(z) = 2 \int_z^{z_f} S_1(z') X(z') \exp [I(z')] dz', \quad (5)$$

で定義される。式(3)において、 z_c は参照高度を示す。

3. 観測

多波長ライダーの鉛直方向の観測は Nd:YAG レーザー(1064, 532, 355 nm) および Ti:Sapphire レーザー(756 nm)で行なわれた。繰り返し周波数は 10Hz である。サンフォトメーターによる光学の厚さの観測は 8 波長(368, 420, 500, 532, 675, 778, 880, 1033nm)で行なわれた。これらの測器は千葉大学環境リモートセンシング研究センター(海拔 30 m)に設置された。

対流圏エアロゾルの光学の厚さは気柱内の光学の厚さから成層圏エアロゾルの光学の厚さを差し引くことにより求まる。1991 年 6 月の Pinatubo 山の噴火により、成層圏エアロゾルの光学の厚さは噴火前

に比べると 20-50 倍になっている¹⁰⁾。しかしながら、1997 年には成層圏エアロゾルの光学の厚さが噴火前と同程度になっていることが報告されている¹⁰⁾。Kent ら¹⁰⁾が報告した後方散乱積分値および消散係数と後方散乱係数の比を用いて、本研究では 355 nm、532 nm、756 nm、1064 nm に対して 0.0043、0.0024、0.0014、0.00088 を仮定した。

ライダーおよびサンフォトメーターデータからの S_1 の導出にあたり、光路中の S_1 は一定であると仮定した。解析において、まず、光学の厚さの比較から波長 532 nm における S_1 を求めた。その際、参照高度から対流圏界面までの消散係数プロファイルは、笹野¹¹⁾が筑波において得た大気モデルを利用した。

各高度において、波長 λ_i ($i = 355, 756, 1064$ nm) の消散係数 $\alpha_1(\lambda_i, z)$ が、532 nm 波長の消散係数と線形関係にあると仮定すると、

$$\alpha_1(\lambda_i, z) = K_i \alpha_1(\lambda_{532}, z), \quad (6)$$

で表される。ここで、 $K_i = \tau(\lambda_i)/\tau(\lambda_{532})$ であり、 $\tau(\lambda_{532})$ と $\tau(\lambda_i)$ はサンフォトメーターで計測される波長 λ_{532} と λ_i における光学の厚さである。式(6)により導出された波長 λ_i における消散係数プロファイルは、参照プロファイル $\alpha_1^{(ref)} (= \alpha_1(\lambda_i, z))$ とすることができる。続いて λ_i におけるライダー信号は、Fernald¹⁾の反転解法を用いていくつかの可能な S_1 について消散係数に変換される。このプロファイルを $\alpha_1^{(obs)}$ と記述すると、 $\alpha_1^{(obs)}$ と $\alpha_1^{(ref)}$ の RMS 誤差は

$$D = \left[\frac{\int_{z_0}^{z_c} [\alpha_1^{(obs)}(z') - \alpha_1^{(ref)}(z')]^2 dz'}{z_c - z_0} \right]^{1/2}, \quad (7)$$

で定義される。 z_0 はレーザービームと望遠鏡視野の重なり点、 z_c は参照高度を示す。 D を最小にすることにより、参照プロファイルを最も良く再現する S_1 を決定することができる。

4. 結果と議論

フィッティング区間 $z_0 \sim z_c$ が小さければ、求まる S_1 は局所的なエアロゾルの光学の特性の影響を

受け、逆に $z_0 \sim z_c$ が大きすぎれば $\alpha_1^{(obs)}$ はノイズの影響を受け、 D の最小値を適切に検出できない。これらを考慮し、 z_c は 3000 m に設定した。 z_0 は 750 m である¹²⁾。

Fig.1 に結果を示す。Fig. 1(a)に入力した S_1 に対する D の変化を示す。ここで D の値はその最小値で規格化されている。規格化された D にある閾値を与えた場合、求まる S_1 の範囲は、355 nm が最も大きいことがわかる。Fig. 1(b)には、1064 nm における $\alpha_1^{(ref)}$ と、 D を最小にする S_1 を用いて導出された $\alpha_1^{(obs)}$ が示されている。 $z_0 \sim z_c$ における $\alpha_1^{(obs)}$ と $\alpha_1^{(ref)}$ の光学的厚さを $\tau^{(obs)}$ および $\tau^{(ref)}$ とし、 $\tau^{(ref)}$ に対する $\tau^{(obs)}$ の誤差 ε を $\varepsilon = (\tau^{(obs)} - \tau^{(ref)}) / \tau^{(ref)} \times 100$ とすれば、 D を最小にする S_1 により導出された $\tau^{(obs)}$ と $\tau^{(ref)}$ の誤差は 355 nm で -6% 程度、756 nm および 1064 nm では $\pm 1\%$ 以内であった。

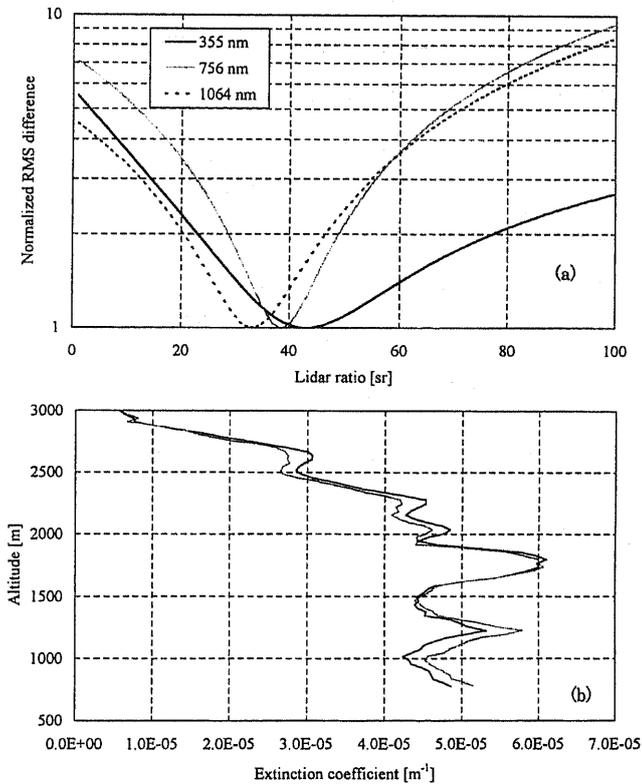


Fig.1 Results of applying the present method to the multi-wavelength lidar and the sun photometer data (Apr. 14, 1999). (a) Normalized RMS difference. (b) The reference profile (gray line) and the observed profile which minimizes the RMS difference (black line) at 1064 nm.

Fig.1 では式(7)を用いて D を評価したが、消散係数の波長依存性が高度に対して一定であるという仮定を厳密に解釈するならば、 $\alpha_1^{(obs)}$ と $\alpha_1^{(ref)}$ の対数をとった

$$D = \left[\frac{\int_{z_0}^{z_c} [\ln \alpha_1^{(obs)}(z') - \ln \alpha_1^{(ref)}(z')]^2 dz'}{z_c - z_0} \right]^{1/2}, \quad (8)$$

で評価するべきであろう。したがって、式(7)、(8)を用いて評価した結果の違いについて議論する必要がある。Fig.2 は 1999 年 5 月 21 日、1998 年 10 月 9 日にそれぞれ観測されたデータについて、式(7)、(8)の評価式を用いて求められた S_1 の相関をとった結果である。1999 年 5 月 21 日の大気は、大気混合層が高度 2600 m 付近まで発達し、 $z_0 \sim z_c$ においてエアロゾルの光学的特性が一定であると考えられる状態であった。それに対し 1998 年 10 月 9 日の大気は高度 1600 m まで大気混合層が発達し、 $z_0 \sim z_c$ においてエアロゾルが光学的特性の異なる 2 層構造をなしていた(Fig.2(a))。Fig.2(b)、(c)において、横軸は式(7)から導出された S_1 、縦軸は式(8)から導出された S_1 である。Fig. 2(b)のケースでは、どちらの評価式を用いても、ほぼ同じ S_1 が得られた。したがって $z_0 \sim z_c$ においてエアロゾルの光学的特性が一樣であるならば、式(7)、(8)で得られる結果は一致するといえる。それに対し、Fig.2(c)のケースでは式(7)で評価した場合に比べ、式(8)で評価した結果が小さくなる傾向にあった。このようなケースでは、 $z_0 \sim z_c$ に均等に重みをかけた式(8)で評価された値は適切とはいえないため、式(7)で評価するのが適当であるといえる。

5. まとめ

本研究では、多波長ライダーとサンフォトメーターのデータからライダーレシオを導出する方法について述べた。提案された手法は、多波長ライダーの解析において、校正された 532 nm 波長の消散係数プロファイルから他のライダー波長の消散係数プロファイルを推定し、そのプロファイルを参照プロファイルとすることによりライダーレシオを求めると

いうものであった。

532 nm の消散係数の校正は、金城ら³⁾が提案したように地上設置の積分型ネフェロメーターにより可能である。Mie 散乱から算出される消散係数の波長依存性とライダーレシオのルックアップテーブルを用いれば、サンフォトメーターデータがない夜間でのライダーレシオの同定が可能になるだろう。

Reference

- 1) F. G. Fernald: *Appl. Opt.* **23** (1984) 652.
- 2) S. J. Doherty, T. L. Anderson, and R. J. Charlson: *Appl. Opt.* **38** (1999) 1823.
- 3) H. Kinjo, H. Kuze, Y. Sakurada, and N. Takeuchi: *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** (1999) 293.
- 4) J. M. Rosen, R. G. Pinnick and D. M. Garvey: *Appl. Opt.* **36** (1997) 2642
- 5) T. Takamura, Y. Sasano, and T. Hayasaka: *Appl. Opt.* **33** (1994) 7132.
- 6) T. Hayasaka, Y. Meguro, Y. Sasano, and T. Takamura: *Appl. Opt.* **37** (1998) 961.
- 7) N. Takeuchi, H. Kuze, Y. Sakurada, T. Takamura, S. Murata, K. Abe and S. Moody: *Proc. 18th Int. Conf. Laser Radar, Berlin, 1996* (Springer-Verlag, Berlin, 1997) p. 71.
- 8) H. Kuze, M. Qiang, Y. Sakurada, T. Takamura, and N. Takeuchi: *Proc. 18th Int. Conf. Laser Radar, Berlin, 1996* (Springer-Verlag, Berlin, 1997) p. 75.
- 9) NASA: 1976 *U. S. Standard Atmosphere Supplement* (U. S. GPO, Washington, D. C., 1976)
- 10) G. S. Kent and G. M. Hansen: *Appl. Opt.* **37** (1998) 3861.
- 11) Y. Sasano: *Appl. Opt.* **35** (1996) 4941.
- 12) H. Kuze, H. Kinjo, Y. Sakurada and N. Takeuchi: *Appl. Opt.* **37** (1998) 3128.

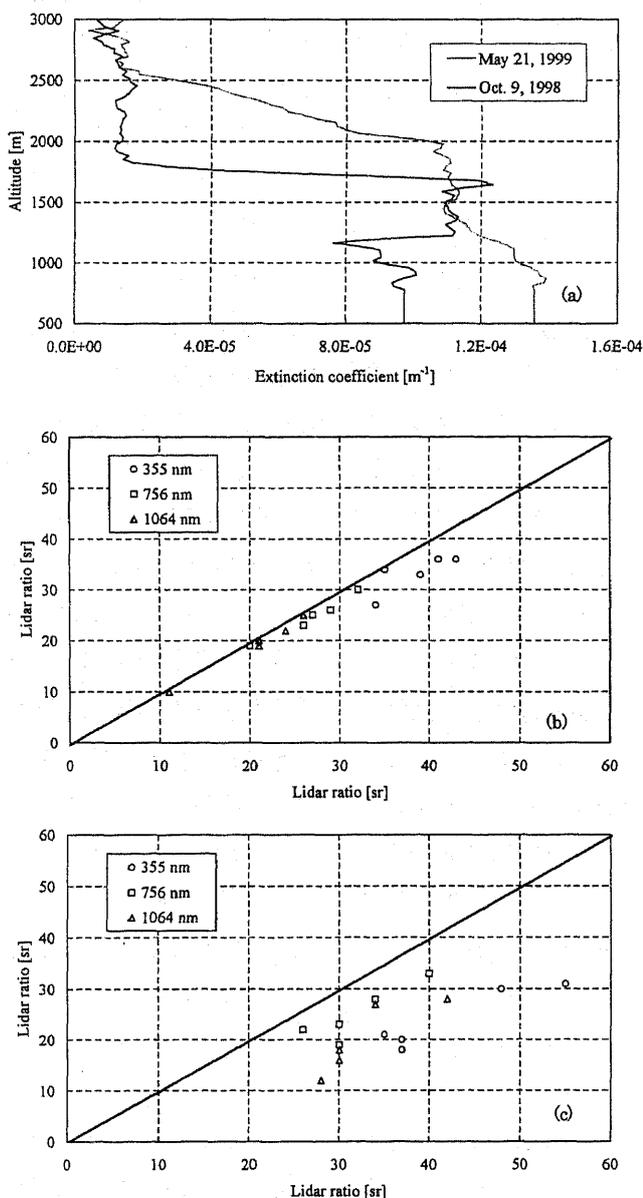


Fig.2 (a) Top panel shows aerosol extinction profiles at 532 nm measured at May 21, 1999 and Oct. 9, 1998. Middle and bottom panels show the comparison of the lidar ratio obtained with Eq.(7) and (8). (a) May 21, 1999. (b) Oct. 9, 1998.