

大気分子モデルを利用したインバージョン境界値の推定

五百旗頭 健吾 豊田 啓孝 古賀 隆治 和田 修己

岡山大学工学部

Estimation of a Boundary Condition in the Lidar Inversion with the Atmospheric Model

Kengo Iokibe, Yoshitaka Toyota, Ryuji Koga and Osami Wada

Okayama University

Abstract: An algorithm to search an aerosol-free region in the lidar range is tested with a measured lidar signal. The algorithm determines aerosol-free regions after fitting a measured lidar return to a theoretical return profile calculated with the molecular model. In its application to the lidar signal, it determines the best region. The best estimation, however, derived an unreasonable lidar inversion solution: the retrieved total backscattering coefficients were less than the molecular ones at some heights. A system property, transient response, was discussed as a factor that could cause the unreasonable result.

1. はじめに

ミー散乱ライダのインバージョンでは、境界値とライダ係数を十分な精度で見積ると解が決まり、ライダ観測により大気後方散乱係数および消散係数の高度分布を測定できる。しかし境界値とライダ係数の見積りは本質的に困難な課題であり、これまでに幾つかの報告[1-9]が為されているが、それらを精度良く見積る手法は確立されていない。特に境界値は散乱理論にもとづく推定が不可能であり、*in situ*手法により計測するのも困難である。ただし、何らかの方法でエアロゾルが存在しない高度を特定できるならば、その高度における境界値を大気分子モデルより推定できる。

本報告では、大気分子モデルを使いエアロゾルが分子に比べて十分少ない高度範囲を探索する手法を試みる。測定した距離補正信号強度を分子プロフィールへフィッティングし、エアロゾル密度の十分に小さい高度を推定するアルゴリズムを §2. で示す。また測定データに適用した結果を §3. に示す。最後に、散乱光入力に対するライダ受信系の非線形応答がフィッティング結果に及ぼす影響について考察する。

2. アルゴリズム

ミー散乱ライダの距離補正信号を分子プロフィールでフィッティングする方法と、フィッティング結果よりエアロゾル粒子が大気分子に比べて十分に少ないとみなせる高度を推定する手順について述べる。

2.1 分子プロフィールへのフィッティング

いまエアロゾルが含まれず大気分子のみから成る大気を想定すると、高度 z からの距離補正ライダ信号は

$$X_m(z) = P_0 K \beta_m(z) \exp \left[-2 \int_{z_0}^z S_m \beta_m(z') dz' \right] \quad (1)$$

と表現できる。ここで β_m は大気分子の後方散乱係数、 $T_m(z)$ は送信光が高度 z までの大気を往復する間の透過率、 P_0 は送信パワー、 K はシステム定数である。米国標準大気[10]に拠ると

$$\beta_m(z) = \beta_0 e^{-z/H} \quad (2)$$

と表現できる。ここで $\beta_0 = 1.54 \times 10^{-6} [\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}]$ 、 $H = 7.25 [\text{km}]$ である。もし、エアロゾルが存在せず大気分子のみから成る高度領域が存在すれば、その高度領域におけるライダ信号の傾きは式 (1) と一致する。このことから、もしある高度領域において、測定により取得した距離補正信号 X の傾きが X_m の傾きと十分な精度で一致すれば、その領域にはエアロゾルが存在しないと推測できる。その結果インバージョンにおける境界値を式 (2) より決定できる。

測定した X と分子モデルより計算した X_m の傾きが一致する高度は、フィッティングにより探索する。式 (1) に式 (2) を代入すると

$$X_m(z) = X_m(0) \exp \left[2S_m \beta_0 H e^{-z/H} - \frac{z}{H} \right] \quad (3)$$

を得る。高度区間 $[z_b, z_b + \Delta z]$ において最小二乗法により X を X_m にフィッティングすると、係数 $X_m(0)$ が決まる。その結果分子プロフィールの推定値 $\hat{X}_m(z)$ を得る。ここで $\hat{\cdot}$ はフィッティングに

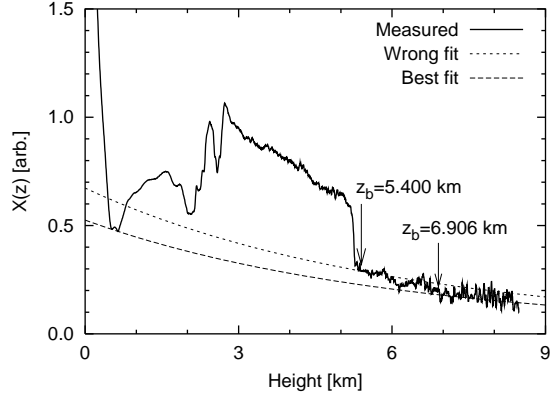


Fig.1 Results of the fitting of the molecular profile, Eq. (3), to the actual lidar return signal. The solid curve is the range-corrected lidar return at 18:15 on Apr. 29, 2004. The dotted and dashed one are the estimated \hat{X}_m fitted in the height ranges [5.400 km, 5.700 km] and [6.906 km, 7.206 km], respectively. The dotted is a failure example because it is greater than measured X in lower range. The dashed is the best one that determined through the optimizing procedure in §2.2.

よる推定値であることを意味する。フィッティング残差を $\epsilon(z)$ で表すと、実測値と推定値の関係は

$$X(z) = \hat{X}_m(z) + \epsilon(z) \quad (4)$$

と表現できる。

2.2 最適フィッティングの決定

高度領域を変えながらフィッティングすることにより、各領域に対する \hat{X}_m が求まる。それらの中から最適な \hat{X}_m を決定し、エアロゾルが十分に少ないと見なせる領域を決定する手順について述べる。

まず最初に、物理的に起こり得ない推定値を排除する。例えば Fig. 1 に点線で示した \hat{X}_m は、高度数 100 m において $X < \hat{X}_m$ となる領域が存在している。なお、この例では $z_b = 5.400$ km ($dz = 300$ m) であり、同図の実線が観測で取得した X を示している。分子成分のみを仮定した \hat{X}_m は、理論的には $z < z_b$ においてエアロゾルおよび分子の両成分から成る X より強度が小さく、この結果はライダ方程式に矛盾する。ただし $z > z_b$ では、雲が存在する時などは雲の上層において $X < \hat{X}_m$ となる。そこで、 $z < z_b$ において $X < \hat{X}_m$ となる高度が存在する時、その \hat{X}_m を推定したフィッティングは排除し、それ以外を有効とする。

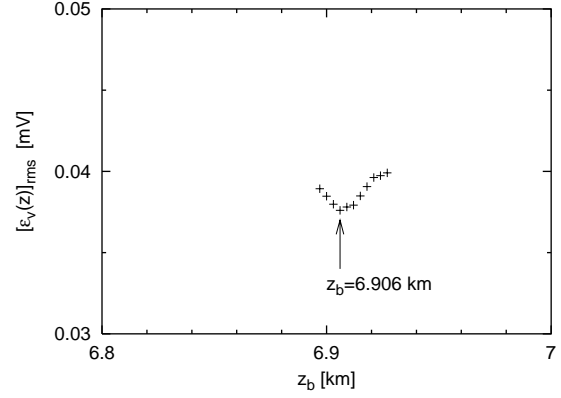


Fig.2 Residuals for the trial range of fittings. The root-mean-squared residual $\epsilon_v(z)$ came to the minimum when $z_b = 6.906$ km.

次に有効と判定されたフィッティングに対して、残差分析により最適な一つを決定する。距離補正信号 X をフィッティングした時の残差 $\epsilon(z)$ は、 z^2 を乗算した影響で距離とともに増加する傾向がある。そのため、異なる z_b に対する ϵ を単純には比較できない。一般に X は、後方散乱光を電圧信号に変換して検出した $v(z)$ に z^2 を乗じて算出する。この v の次元でフィッティング残差を考えると、

$$\begin{aligned} v(z) &= \frac{X(z)}{z^2} = \frac{1}{z^2} [\hat{X}_m(z) - \epsilon(z)] \\ &= \hat{v}_m(z) - \epsilon_v(z) \end{aligned} \quad (5)$$

と表すことができる。ここで $\epsilon_v(z)$ がフィッティング残差に相当する。もし信号雑音が存在しなければ、フィッティング領域にエアロゾルが存在していない場合 $v = \hat{v}$ となる。しかし現実には雑音が存在し、 ϵ_v が雑音成分に相当すると解釈できる。この場合 ϵ_v の発生源は熱雑音や量子化雑音であり、 z には無関係である。そこでフィッティング区間における ϵ_v の実効値が最小となる場合を、最適フィッティングとする。

以上より最適な回帰係数を決定する手順をまとめると、

1. $v(z) - \hat{v}_m(z) > v^{\text{th}}$ for $z < z_b$
2. $\sqrt{[\epsilon_v(z)]^2}$ が最小

でとなる。手順 1 は物理的に起こり得る推定値のみを抽出するための判定基準を示しているが、このアルゴリズムの実際の運用では上述の距離補正信号 X ではなく v を用いる。その理由は判定の閾値 v^{th} を設定し易くするためである。理想としては判定基準は $X > \hat{X}_m$ であるが、現実には z_b 付近で雑音の影響を無視できない場合に、有効とす

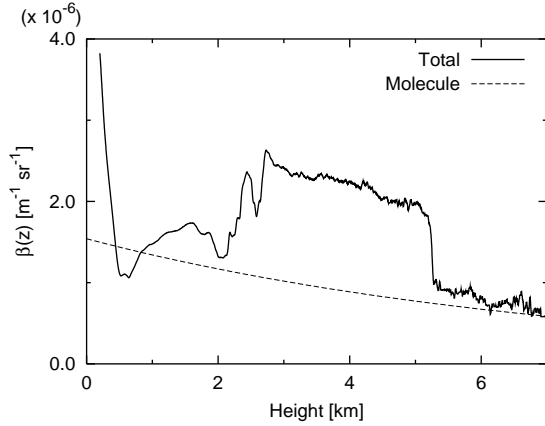


Fig.3 Height profile of the backscattering coefficient obtained with the proposed algorithm. Height profile of total (aerosol and molecular) backscattering coefficient retrieved from X that was modified with those of the best \hat{X}_m from 6.906 to 7.206 km. Boundary condition was assumed as aerosol-free at 7.056 km in the course of the Fernald inversion. The dashed one shows the molecular model.[10]

べき推定値を無効としてしまう可能性がある。そこである閾値を設定したいが、この場合も残差分析の場合と同様、 X より v の方が高度に対し一定の閾値を設定でき、実用的である。

3. 観測データへの適用

ライダー観測で取得した $X(z)$ を式 (3) でフィッティングした結果を示す。フィッティングは $\Delta z = 300$ m とし、 $v(z)$ の信号対雑音比が 10dB 以上の高度で z_b を変化させ、実行した。岡山大学のライダーは高度分解能が 3m であるので、フィッティングに使用したデータ点数は 101 点である。なお閾値 v^{th} は 0.1 mV に設定した。

2004 年 4 月 29 日の 18:15 に取得した $X(z)$ をフィッティングした結果を Fig. 1 および 2 に示す。Figure 1 の実線が $X(z)$ であり、2.2 で示した手順で決定した最適 $\hat{X}_m(z)$ を破線で示している。Figure 2 は z_b に対する残差 ϵ_v の変化であり、 $z_b = 6.906$ [km] で残差は最小となっている。以上より、高度 6.906–7.206 km の区間ではエアロゾル粒子が分子に比べて十分に少ないと判断し、大気分子モデルよりインバージョン境界値を決定する。

実際に Fernald 法[11, 12] により算出した後方散乱係数を Fig. 3 に示す。この時、6.906–7.206 km の区間において $X(z)$ を $\hat{X}_m(z)$ で置換えた。エアロゾルのライダー係数は 30 sr を仮定した。図中の破

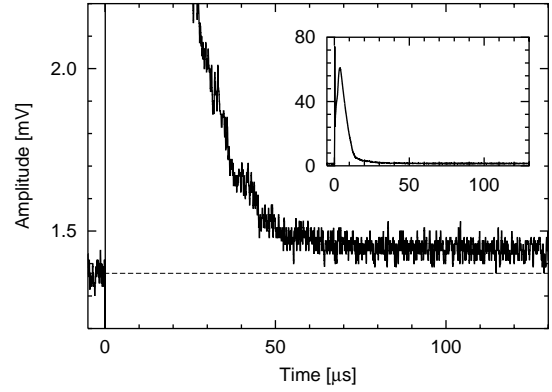


Fig.4 Base line drift in the lidar return. The dashed line is the base level before laser pulse transmission ($t < 0$).

線はモデル[10] に拠る分子の後方散乱係数である。実線で示した算出値はエアロゾルおよび分子両成分の和である。この結果を見ると、444–825 m においてエアロゾルおよび分子成分の和が分子成分のみの値を下回っている。したがって、§2.2 で示した判定手順 1 は、実際に起こり得ない \hat{X}_m を完全には排除できておらず、改善が必要である。

なお、Fig. 3 において $\beta_{total} < \beta_m$ となった要因として、インバージョン時に仮定したエアロゾルのライダー係数 S_a が不適切であったことも考えられるが、ここではその可能性は排除する。Fernald 法において S_a を小さく与えると、低高度における解は増加する。そこで $S_a = 10$ [sr] を仮定しインバージョンしたが、 $\beta_{total} < \beta_m$ となる高度は存在した。したがって Fig. 3 の例では、 S_a の値に関わらず低高度において $\beta_{total} < \beta_m$ となると言える。Fernald インバージョンで解の精度を決定するパラメータは S_a と境界値であるが、ここでは境界値の精度への依存度が大きいと考える。

4. 受信系過渡応答の影響

上述の分子モデルを用いたフィッティングにより適切な境界値を見積れなかった理由として、ライダーで受信した散乱光強度に対する応答の非線形性を考える。Figure 1 で示した $X(z)$ の生データである電圧波形を見ると、高度 20 km における電圧レベルがレーザー送信前より上がっている (Fig. 4)。このことから、光パルス入力に対する受信系の応答において、時定数の長い過渡応答が存在していると推測できる。

もしこの過渡応答が発生すると測定する電圧波形が歪み、その結果、式 (1) においてシステム定

数 K を等価的に高度 z の関数として扱わなければならない。すなわち式 (3) の回帰方程式の修正が必要となる。またベースラインの上昇により、相対的に信号レベルが小さくなり、その結果、境界層上部で実際よりも信号レベルが小さくなる見えている可能性もある。

以上より、大気分子モデルを利用してエアロゾルが分子に較べて十分少ない高度を推定するには、ライダー受信系の散乱光入力に対する過渡応答を補正する必要がある。

5. まとめ

インバージョン境界値の推定を目的として、距離補正ライダー信号の分子プロファイルへのフィッティングによりエアロゾル粒子が十分に少ない高度を見積る手法を試みた。観測データへ適用し、その高度を推定できた。しかしその推定をもとに境界値を与えインバージョンした結果、高度 444–825 m において散乱比が負となった。このように現実には起こり得ない結果が導かれた原因として、ライダー受信系の散乱光入力に対する応答の非線形性を挙げた。今後は、非線形応答がこの手法の適用にどのように影響を及ぼすのかについて検討する。

参考文献

- 1) A. Ansmann, U. Wandinger, M. Riebesell, C. Weitkamp and W. Michaelis, “Independent measurement of extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined Raman elastic-backscatter lidar,” *Appl. Opt.*, **31**, 7113–7131, 1992.
- 2) Z. Liu, N. Sugimoto and T. Murayama, “Extinction-to-backscatter ratio of Asian dust observed with high-spectral-resolution lidar and Raman lidar,” *Appl. Opt.*, **41**, 2760–2767, 2002.
- 3) H. Kinjo, H. Kuze, T. Takamura, M. Yabuki and N. Takeuchi, “Determination of aerosol extinction-to-backscattering ratio from multiwavelength lidar observation,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40**, 434–440, 2001.
- 4) S. A. Young, “Analysis of lidar backscatter profiles in optically thin clouds,” *Appl. Opt.*, **34**, 7019–7031, 1995.
- 5) M. Yabuki, H. Kuze, H. Kinjo and N. Takeuchi, “Determination of vertical distributions of aerosol optical parameters by use of multi-wavelength lidar data,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42**, 686–694, 2003.
- 6) J. Ackermann, “The extinction-to-backscatter ratio of tropospheric aerosol: a numerical study,” *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **15**, 1043–1050, 1998.
- 7) F. Rocadenbosch, G. Vázquez and A. Comerón, “Adaptive filter solution for processing lidar returns: optical parameter estimation,” *Appl. Opt.*, **37**, 7019–7034, 1998.
- 8) H. Wei, R. Koga, K. Iokibe, O. Wada and Y. Toyota, “Stable inversion method for a polarized-lidar: analysis and simulation,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **18**, 392–398, 2001.
- 9) K. Iokibe, Y. Itoh, Y. Toyota, O. Wada and R. Koga, “A bidirectional iteration algorithm for determining lidar ratios and its use to evaluate boundary values in the lidar inversion,” to be published in *Jpn. J. Appl. Phys.*.
- 10) NASA, *1976 U.S. Standard Atmosphere Supplement*, U.S. GPO, Washinton D.C., 1976.
- 11) F. G. Fernald, B. M. Herman and J. A. Reagan “Determination of aerosol height distributions by lidar,” *J. Appl. Meteor.*, **11**, 482–489, 1972.
- 12) F. G. Fernald, “Analysis of atmospheric lidar observations: some comments,” *Appl. Opt.*, **23**, 652–653, 1984.