成層圏エアロゾルを対象としたレーザーレーダ信号の キャリブレーションと測定誤差の評価†

飯 倉 善 和*・笹 野 泰 弘*・清 水 浩*

Calibration and Error Analysis of Laser Radar Signals for Stratospheric Aerosol Measurements

Yoshikazu IKURA*, Yasuhiro SASANO* and Hiroshi SHIMIZU*

The calibration of laser radar signals required for determining the backscattering coefficients of stratospheric aerosol has been performed by matching the range corrected signals to the Rayleigh backscattering coefficients at the upper stratosphere. But, little attention has been paid to the accuracies of calibrated signals in spite of the many error factors in the measurement and the data analysis.

This paper proposes a new method for matching the measured and simulated signals statistically by the use of the laser radar equation with a systematic error component. The regression analysis is applicable in this method, and the standard deviation of residuals can be estimated in addition to the linear calibration. The standard deviation can be utilized to compare the various processing of laser radar signals, such as the selection of training range of the matching method.

Key Words: laser radar, stratospheric aerosol, calibration, error analysis

1. はじめに

レーザーレーダを用いた大気の光学パラメータの計測では、測定信号に含まれる不確定性やデータ解析のうえで生じる不確定性が、測定誤差の要因として問題となる。測定信号に含まれる不確定性には、レーザーの出力変動、背景光雑音、受信光学系の効率、光検出

器や信号処理系における雑音などがある¹⁾。データ解析上の不確定性には、測定対象の位置決め²⁾や測定信号のキャリブレーションの問題があり、これらは計測値に対して系統的な誤差を与える要因である。

ところで成層圏を対象としたレーザーレーダの測定信号のキャリブレーションは、エアロゾルの影響が少ない成層圏上部における測定信号を空気分子によるレイリー散乱の計算値と比較して得られる校正曲線に基づいて行われる。この方法はマッチング法として知られているが³⁾、多くの不確定な要因を含むため、誤差の評価が問題となる。これに対して、Russell ら⁴⁾は誤差の伝搬理論とシミュレーションを用いた測定誤差の総合的評価方法を提案した。しかし、この方法では測定対象である大気的光学パラメータや、先に述べた多くの不確定要因を正確に設定する必要があり、計測値自体の誤差の評価としては信頼性に問題がある。とくに光の検出に用いられる光電子増倍管からは系統的な雑音が発生することが知られているが^{5), 7)}、この種の誤差成分を事前に評価することは非常に困難である。したがって計測値の誤差としては実測した測定信号とそのデータ処理に基づいた総合的な評価が必要とされる。

本論では、レーザーレーダによる大気的光学パラメータの計測に伴う測定誤差を実測データに基づいて統計的に評価する方法を検討する。はじめに、レーザーレーダのデータ処理の方法を整理する。とくにこれまでのキャリブレーションの方法では、測定信号に含まれる系統的誤差成分の影響が大きいかを指摘し、キャリブレーション法の改良を行う。つぎにキャリブレーションにおける誤差の変動を統計的に取り扱うことにより、実測データにおける測定誤差の事後的な評価を行う。なお本論での分析の対象は国立公害研究所の

† 第 11 回リモートセンシングシンポジウムで発表
(昭 60・10)

* 国立公害研究所 茨城県筑波郡谷田部町小野川 16-2

* The National Institute for Environmental Studies,
Tsukuba-gun, Ibaraki
(Received June 20, 1986)

(Revised September 13, 1986)

大型のレーザーレーダ⁶⁾を用いた成層圏エアロゾルの観測とするが、手法としては一般的なものである。

2. 測定信号のキャリブレーション法の検討

レーザーレーダの測定信号から成層圏エアロゾルの後方散乱係数を定量的に求めるためのデータ処理としては、1) 背景光雑音の除去や距離2乗補正などの前処理、2) 空気分子の後方散乱係数を標準値としたキャリブレーション、3) 後方散乱係数の減衰補正が必要となる。本論ではこの中で測定信号の系統的誤差成分に対する対策を含めたキャリブレーションの方法を検討する。さらに測定上の不確定性やデータ解析上の不確定性をキャリブレーションにおける統計的誤差として総合的に評価する方法を提案する。なおここでは簡単化のため鉛直方向の測定を対象とした検討を行う。

2.1 雑音成分を含む測定信号強度

レーザーレーダでは、高度 h において空気分子やエアロゾル粒子により後方に散乱されたレーザー光が受信望遠鏡により集光される。この信号はフィルタなどの光学系を通して検出され、信号処理系を通したうえで出力信号として取り出される。このとき、出力信号には背景光雑音や光検出器や信号処理系における雑音などの系統的誤差成分が含まれる。このような成分を含んだ測定信号の強度 P は高度 h の関数としてつぎの式により定式化される。

$$P(h) = C\beta(h)\exp\left\{-2\int_0^h \alpha(z)dz\right\}/h^2 + N(h) \quad (1)$$

(1)式の第1項は一般に用いられているレーザーレーダ方程式を簡略化したもので、 β と α はそれぞれ大気の後方散乱係数と消散係数を示す。また測定上の不確定な要因の中でレーザーの出力変動など、測定信号強度に比例するものを(1)式では一括してシステム定数 C として表わした。(1)式の第2項は、測定信号に比例しない系統的誤差成分をまとめて示したものである。(1)式から明らかなように測定信号から大気の後方散乱係数をもとめるためには、未知変数 C の推定と距離2乗の補正が必要となる。

ところで従来は(1)式の第2項の推定は、測定信号の前処理の問題とされ、キャリブレーションの問題としては検討されなかった。さらに通常は、(1)式の第1項が十分小さくなる遠方の測定信号 $P(\infty)$ が高度によらない一定のバックグラウンドレベルとして用いられてきた。しかし測定信号に高度に依存する系統的誤差成分が含まれる場合、その影響はキャリブレーションにおける誤差要因として問題となる。この種の誤差成分として光の検出に用いる光電子増倍管の装置関数

に起因する信号の歪みがあることが著者ら⁷⁾により示されている。また $N(h)$ が一定であっても実際の測定範囲は限られるため、 N の推定値として用いられる測定信号には(1)式の第1項で示した真の信号の成分が含まれる。このため測定範囲が狭い場合には、 N が過剰評価されることになる。

したがってキャリブレーションの方法としてもこの種の系統的誤差成分の影響をできるだけ少なくする必要があり、計測値の誤差の評価にも系統的誤差成分の評価を含んだ統計的な取り扱いが必要となる。

2.2 マッチング法の定式化

成層圏を対象としたレーザーレーダの測定信号のキャリブレーションは、高層の空気分子による後方散乱係数 β_m を標準とした方法が一般的であり、マッチング法として知られている³⁾。ここでも基本的にはこの方法を踏襲するが、その前に以下の分析を容易にするためつぎの量を定義する。

$$\beta^*(h) = \beta(h)\exp\left\{2\int_h^{h^*} \alpha(z)dz\right\} \quad (2)$$

β^* はマッチングにおいて基準となる高度 h^* から対象とする高度までの消散係数の影響を含んだ大気の後方散乱係数である。 β^* を用いれば(1)式はつぎのようになる。

$$P(h) = C^*\beta^*(h)/h^2 + N(h) \quad (3)$$

ただし

$$C^* = C\exp\left\{-2\int_0^{h^*} \alpha(z)dz\right\} \quad (4)$$

(3)式から明らかなようにキャリブレーションは基本的には、測定信号と大気モデルから理論的に計算される後方散乱係数の値から C^* を推定する問題である。とくに空気分子による後方散乱係数 β_m は高度ごとの空気分子密度が与えられればレイリー散乱理論を用いて計算することができる⁸⁾。したがってエアロゾルの影響がない場合、レーザーレーダの受信信号の変化 Q は、システム定数 C^* を1とすればつぎの式から計算できる。

$$Q(h) = \beta_m^*(h)/h^2 \quad (5)$$

(5)式を(3)式に代入すればつぎの式が得られる。

$$P(h) = C^*Q(h) + N(h) \quad (6)$$

ここで h^* の近傍における $N(h)$ の平均的な値を N^* とおけば、 C^* の推定には同時に N^* の推定が必要となる。

マッチング法では測定信号の精度と共に、エアロゾルの影響が誤差要因として問題となる。成層圏エアロゾルは通常は高層に行くほど少なくなるが、火山噴火の影響がある場合などは高度30 km付近まで存在す

る。したがって、マッチングを行う高度の範囲として、実測データの変動から下限 $h_{\min}$ (エアロゾルの影響ができるだけ小さいこと) と上限 $h_{\max}$ (測定信号の精度が十分に高いこと) とを決める必要がある。

2.3 校正曲線の統計的推定

マッチングに用いる i 番目の受信信号の高度を h_i とし, $x_i = Q(h_i)$, $y_i = P(h_i)$ とおけば (6) 式はつぎのように y_i , x_i をそれぞれ目的変数と説明変数とする回帰式と考えることができる。

$$y_i = C^* x_i + N^* \quad h_{\min} \leq h_i \leq h_{\max} \quad (7)$$

したがって C^* , N^* の推定や誤差の評価は基本的には統計処理の問題に帰着される⁹⁾。

最小 2 乗法を用いれば、回帰係数の推定値 $\hat{C}^*$, $\hat{N}^*$ はつぎの式で与えられる。

$$\hat{C}^* = \frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

$$\hat{N}^* = \bar{y} - \hat{C}^* \bar{x} \quad (9)$$

ただし, $\bar{x}$, $\bar{y}$ はそれぞれ x_i , y_i の平均値であり, k はデータ数である。また (8), (9) 式から得られる回帰式の測定データに対する適合性は、次式に示す回帰後の残差の標準偏差 $\hat{\sigma}$ から評価できる。

$$\hat{\sigma}^2 = \left\{ \sum_{i=1}^k (y_i - \bar{y})^2 - \hat{C}^{*2} \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2 \right\} / (k-2) \quad (10)$$

(8), (9) 式から求められる回帰係数を用いて測定信号をキャリブレーションすることにより任意の高度における $\hat{\beta}^*$ の推定はつぎのように行われる。

$$\hat{\beta}^*(h) = \{P(h) - N^*\} h^2 / \hat{C}^* \quad (11)$$

(6) 式で表わされる $P(h)$ を代入すれば

$$\hat{\beta}^*(h) = C^* \hat{\rho}^*(h) / \hat{C}^* + \{N(h) - \hat{N}^*\} h^2 / \hat{C}^* \quad (12)$$

となる。したがって後方散乱係数の推定値は, C^* と N^* の推定誤差 σ_C と σ_N の影響を受ける。これらの誤差は, マッチングの際に得られた $\hat{\sigma}$ を用いて, つぎのように推定される。

$$\hat{\sigma}_C^2 = \hat{\sigma}^2 / \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2 \quad (13)$$

$$\hat{\sigma}_N^2 = \hat{\sigma}^2 \left(\frac{1}{k} + \frac{\bar{x}^2}{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2} \right) \quad (14)$$

また測定信号に含まれる雑音にランダム性を仮定すれば, $\hat{\beta}^*$ の推定誤差 $\hat{\sigma}_\beta$ は近似的にはつぎのように求められる。

$$\hat{\sigma}_\beta^2 = \hat{\sigma}^2 \left\{ 1 + \frac{1}{k} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2} \right\} h^4 / \hat{C}^{*2} \quad (15)$$

ただし $x_0 = \hat{\beta}^* / h^2$ である。

3. 測定誤差の統計的解析

前章においてマッチング法を用いたレーザーレーダの測定信号の校正曲線の推定が統計的には一般の回帰分析の問題に帰着できることを示した。ここでは実測データを用いて、マッチング法による校正曲線の適合性を回帰推定の標準誤差を指標として、定量的に評価する。また、その応用としてデータ処理法の比較やマッチング高度の設定に関する検討を行う。

3.1 測定データ

Fig. 1 に以下の解析に用いる測定データを示す。

このデータは光電子増倍管の出力を 8 bit の精度で A/D 変換した信号の積算平均値であり、積算は 4000 発のレーザーパルスに対して行った¹⁾。横軸に (1) 式に相当する測定信号の強度の対数を取り、縦軸に高度を 15 km から 60 km まで取った。また比較のため (5) 式から計算される空気分子によるレーザー光の後方散乱強度の相対的な変化を破線で示した。測定は国立公害研究所のレーザーレーダを用いて 1984 年 5 月 19 日の夜間に行った。

実線で示した測定データでは高度 30 km 近くまでに小さな変動が見られるが、これは成層圏に存在するエアロゾル粒子によるものである。また高度 45 km から顕著にみられる変動は測定信号に含まれる雑音である。とくに、破線と比較してその傾きが異なるのは、測定信号に含まれる系統的誤差成分によるものである。

3.2 データ処理法の比較

第 2 節で示したマッチングの方法を Fig. 1 に示した測定データに適用して、校正した信号から次式に示す後方散乱比を求めた。

$$r(h) = \hat{\beta}^*(h) / \beta_m(h) \quad (16)$$

Fig. 2(b) に、その結果を後方散乱比の鉛直プロファ

Fig. 1 Measured and calculated signal intensity of laser radar with respect to height
Solid line: measured signal (mV)
Broken line: calculated signal (relative)

Fig. 2 Vertical profiles of scattering ratio calculated from the signals calibrated by the usual method (a) and the proposed method (b). The thin lines show 95% confidence intervals

イルとして表わした。縦軸が高度、横軸が後方散乱比である。また **Fig. 2(a)** には比較のため従来の方法を用いた計算結果を示した。このときバックグラウンドの推定値としては、高度 150 km の測定信号を用い、マッチングではシステム定数のみを推定した。

さらに(15)式から計算した $\hat{\sigma}_\theta$ の推定誤差を用いて、後方散乱比の 95% の信頼区間の上限と下限を細線で示した。なお、ここでのマッチングはエアロゾルの影響の少ない高度 28 km から 38 km までのデータを用いて行った。

(16)式から明らかなようにエアロゾルの影響がない場合には後方散乱比は 1 になることが期待される。しかし従来の方法による結果では後方散乱比は高度 28 km から直線的に増加している。一方、従来の方法に比べて改良した方法ではマッチングを行った高度範囲でよく 1 に一致している。しかし 28 km 以上で後方散乱比は右に凸の傾向が見られ、高度が高くなるにしたがい減少する。これは前節で検討した系統的誤差成分による影響が表われたものであり、従来の方法では系統的誤差成分を過小評価、改良した方法ではいくぶん過大評価していることを示している。

つぎに二つの方法を定量的に評価するため、マッチングにおける回帰後の残差の標準偏差 $\hat{\sigma}$ を計算した。その結果、従来の方法での標準偏差が 0.216 であるのに対して、改良した方法では 0.049 と約 1/4 になり、改良した方法の有効性が定量的に確認された。

3.3 系統的誤差成分の補正の効果

系統的雑音の影響は、**Fig. 1** に示したように遠方の測定信号に顕著に表われており、高度 50 km 以上では破線で示した空気分子からのレーザー光の後方散乱強度の計算値の傾きと明らかに異なる。このような

Fig. 3 Vertical profiles of scattering ratio calculated from the signals after systematic noise correction. The signals are calibrated by the usual method (a) and the proposed method

系統的誤差成分としては光の検出に用いる光電子増倍管で発生する雑音が知られており、筆者ら⁷⁾によりつぎの関数を用いた系統的誤差成分の推定が提案されている。

$$N(h) = a \exp(-\theta h) + b \quad (17)$$

(17)式を用いて高度 50 km, 60 km までの測定信号から系統的誤差成分 $N(h)$ を推定した。これを測定信号から補正したうえで、3.1 と同様に、後方散乱比を計算した結果を **Fig. 3** に示した。二つのマッチングの方法のどちらも、30 km 以上の高度での後方散乱比は **Fig. 2** にくらべて、1 に近づいている。とくに改良した方法を用いた結果では、広い高度範囲で系統的誤差成分が解消されている。また標準偏差はそれぞれ 0.057 と 0.041 になり補正の効果が定量的にも確認された。

さらに雑音のランダム性の仮定の基に計算した後方散乱比の 95% の信頼区間からみて、**Fig. 3(b)** で示した後方散乱比の精度は高度 30 km 以下で非常に高いものとなっている。

3.4 マッチング高度の選定

ここではマッチングを行う高度による校正曲線の回帰推定の誤差の変化を検討することにより、適切なマッチング高度の選定を行う。ただしデータは系統的誤差成分を補正したデータを用い、マッチングは改良した方法を用いて高度範囲を 10 km として行った。

Fig. 4 に、マッチングを行う高度を変化させた場合の(13)式と(14)式を用いて計算した回帰後の残差の標準偏差とシステム定数の変動係数を示した。横軸にはマッチング高度の中心値を示した。これらの値は高度 33 km まで急速に減少する。これは 28 km 以下にみられる成層圏エアロゾルの影響である。また回帰推

Fig. 4 Standard deviations of residuals and derived coefficient of variation of system constant with respect to matching heights

定の標準誤差は高度 28 km 以上からは変化は少なく、測定信号に含まれる雑音はほぼ一定となる。

一方、測定信号自体は高度が高くなるにしたがい指数的に減少するため、システム定数の変動係数は 33 km で最小となり、それ以上で増大している。なお系統的雑音が小さい場合、高度範囲を広く取ることにより、 β^* の推定の統計的な誤差を少なくすることができるが、本論で示したデータでは高度 38 km 以上で系統的な誤差が表われているため、マッチングに用いた高度範囲は 28 km から 38 km とした。この結果、キャリブレーションにおけるシステム定数は約 0.2% の高精度で推定された。

4. ま と め

本論文ではレーザーレーダを用いた大気の光学パラメータの計測におけるキャリブレーションの方法を検討すると共に、測定誤差の統計的な評価方法を提案した。

キャリブレーションの方法としては、従来のマッチング法を改良して、新たに測定信号に含まれる系統的

誤差成分を含めた定式化を行い、それが統計的には一般の回帰分析の問題に帰着できることを示した。またマッチングにおける回帰後の残差の標準偏差がデータ処理の方法の評価の指標として有効であることを示した。

この応用例として、実測データを用いてデータ処理法の比較を行った結果、改良したマッチングの方法や先に提案した系統的誤差成分の補正方法の有効性が定量的に検証された。また、マッチングに対するエアロゾルの影響と系統的誤差成分の影響を検討することにより、本論で用いたデータに対するマッチングの高度範囲として 28 km から 38 km が選択された。

参 考 文 献

- 1) 清水, 飯倉, 笹野, 松井: 遠距離測定用のレーザーレーダに依る高精度測定のための誤差の解析とその低減法, 日本リモートセンシング学会誌, 4-3, 233/244 (1984)
- 2) 飯倉, 笹野, 清水: レーザーレーダの対象領域の正確な位置決め, 計測自動制御学会論文集, 23-1, 11/15 (1987)
- 3) P. B. Russel, W. Viezee, R. D. Hake, Jr. and R. T. H. Collins: Laser Observation of Stratospheric Aerosol, Quart. J. R. Met. Soc., 675/695 (1976)
- 4) P. B. Russell, T. J. Swissler and M. P. McCormick: Methodology for Error Analysis and Simulation of Lidar Aerosol Measurements, Applied Optics, 18-22 3783/3797 (1979)
- 5) W. H. Hunt and S. K. Poultney: Testing the Linearity of Response of Gated Photomultipliers in Wide Dynamic Range Laser Radar Systems, IEEE Trans. Nuclear Science, NS-22-1, 116/120 (1975)
- 6) 清水, 竹内, 笹野, 杉本, 松井, 奥田: 広域大気汚染観測用大型レーザーレーダーの設計と製作, 応用物理, 50-11, 1154/1164 (1981)
- 7) 飯倉, 杉本, 清水: 光電子増倍管に起因するレーザーレーダ測定データの歪みの補正, 計測自動制御学会論文集, 22-12, 1324/1329 (1986)
- 8) K. Ya. Kondratyev: Radiation in the Atmosphere, 171/180, Academic (1969)
- 9) 奥野忠一編: 応用統計ハンドブック, 91/102, 養賢堂 (1978)