

松本 雅雄*, 竹内 延夫**
Masao Matsumoto*, Nobuo Takeuchi**

* 九州工業大学, ** 国立環境研究所

* Kyushu Institute of Technology,

** National Institute for Environmental Studies

ABSTRACT: An attempt is made to establish the unified error formula for 2 kinds of LIDAR inversion solution (Klett & Fernald approach) in terms of modified optical thickness and also to compare the solutions based on 2 kinds of approaches. Except for the certain case that the parameter k_2 of Klett approach is small, the estimation error based on the Fernald approach is smaller than that based on Klett approach.

1. はじめに Klett¹⁾、及びFernald²⁾の提唱したライダー反転解法は広く使われているが、本来未知である遠方の消散係数を境界条件として与えねばならないため、解には境界条件の誤差が含まれている。本研究では、両者の方法においてそれぞれ別個に有効消散係数を定義し、この境界条件の誤差が解に及ぼす影響を統一的に表現し、両者の比較を行なった。

2. 誤差の統一的取り扱い 単一散乱を仮定したライダー方程式は(1)式で表される。

$$P(R) = \frac{C \cdot Y(R) \cdot \beta(R)}{R^2} \exp\{-2 \int_0^R \alpha(r) dr\} + P_b, \quad (1)$$

ここで、 $P(R)$ 、 C 、 $Y(R)$ 、 $\beta(R)$ 、 $\alpha(R)$ 、 P_b はそれぞれ距離 R からの受信信号パワー、装置定数、幾何学的効率、後方散乱係数、消散係数、背景光パワーである。(1)式はそれぞれ(2)、(3)式で表されるKlett、およびFernaldにより提唱された消散係数 $\alpha(R)$ と後方散乱係数 $\beta(R)$ の関係式により、求解可能な微分方程式に変換される。

$$\beta(R) = k_1 \cdot \alpha(R)^{k_2} \quad (2)$$

$$\alpha(R) = \alpha_1(R) + \alpha_2(R), \quad \beta(R) = \beta_1(R) + \beta_2(R), \quad (3)$$

$\beta_i(R) = \alpha_i(R) / S_i$ ($i=1,2$)
添字1、2はそれぞれエアロゾル、大気分子の寄与を表す。変換された微分方程式を、遠方に($R=r_c$)設定した境界条件のもとで解けば、消散係数推定値 $\hat{\alpha}(R)$ (Klettの方法)、または $\hat{\alpha}_1(R)$ (Fernaldの方法)が得られる。両者の方法において、境界条件の推定誤差 $\varepsilon(r_c)$ が $\hat{\alpha}(R)$ に及ぼす影響を統一的に取り扱うため、以下の有効消散係数 $\alpha^*(R)$ 、および推定誤差 $\varepsilon(R)$ を定義する。

Klett Approachの場合:

$$\alpha^*(R) = \alpha(R) / k_2, \quad (4)$$

$$\varepsilon(R) = \frac{\alpha^*(R) - \hat{\alpha}^*(R)}{\alpha^*(R)} = \frac{\alpha(R) - \hat{\alpha}(R)}{\alpha(R)} \quad (5)$$

Fernald Approachの場合:

$$\alpha^*(R) = \alpha_1(R) + (S_1/S_2) \alpha_2(R) \quad (6)$$

$$\varepsilon(R) = \frac{\alpha^*(R) - \hat{\alpha}^*(R)}{\alpha^*(R)} = \frac{\alpha_1(R) - \hat{\alpha}_1(R)}{\alpha^*(R)} \quad (7)$$

推定誤差 $\varepsilon(R)$ は、境界条件の推定誤差 $\varepsilon(r_c)$ と(9)式で表される有効光学的厚さ $\tau^*(R)$ により、(8)式で統一的に表される。

$$\varepsilon(R) = \frac{\varepsilon(r_c)}{\varepsilon(r_c) + [1 - \varepsilon(r_c)] \exp[2\tau^*(R)]}, \quad (8)$$

$$\tau^*(R) = \int_R^{r_c} \alpha^*(r) dr, \quad (9)$$

(8)式より、推定誤差 $\varepsilon(R)$ の絶対値は有効光学的厚さ $\tau^*(R)$ の増加(R の減少)と共に単調に減少し、 $\varepsilon(R)$ は小さくなり、 $\varepsilon(r_c)$ が負(境界条件の過大推定)の場合の方が、 $\varepsilon(r_c)$ が正(境界条件の過小推定)の場合よりも $\varepsilon(R)$ の収束が速いことがわかる。多様な $\varepsilon(r_c)$ における $\tau^*(R)$ と、 $\varepsilon(R)$ の関係をFig.1に示す。

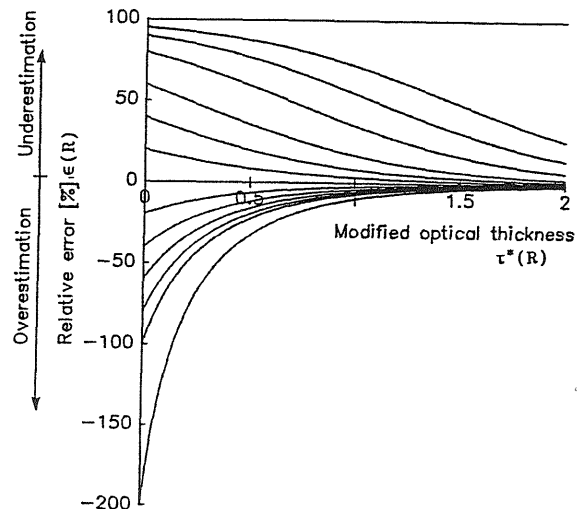


Fig.1 Error $\varepsilon(R)$ vs. modified optical thickness $\tau^*(R)$ with various $\varepsilon(r_c)$.

3. 数値実験 Klett、及びFernaldの方法の推定誤差特性を比較するため、LOWTRAN7³⁾の中緯度冬期清浄大気モデル(地上視程23km)から水平平均質光路、水平正弦波変調光路、及び斜方光路(仰角30°)の3種の光路を設定し、(9)式により $\tau(R)$ と $\varepsilon(R)$ の関係を求めた。なお波長を550nmとし、Fernaldの方法で、 $S_1=50$ 、 $S_2=8.53$ と設定し、比較のためKlettの方法で $k_2=0.67$ 、及び1.0の2種について計算を行った。水平正弦波変調光路、斜方光路の消散係数分布を、Fig.2 (a)、(b)に示す。

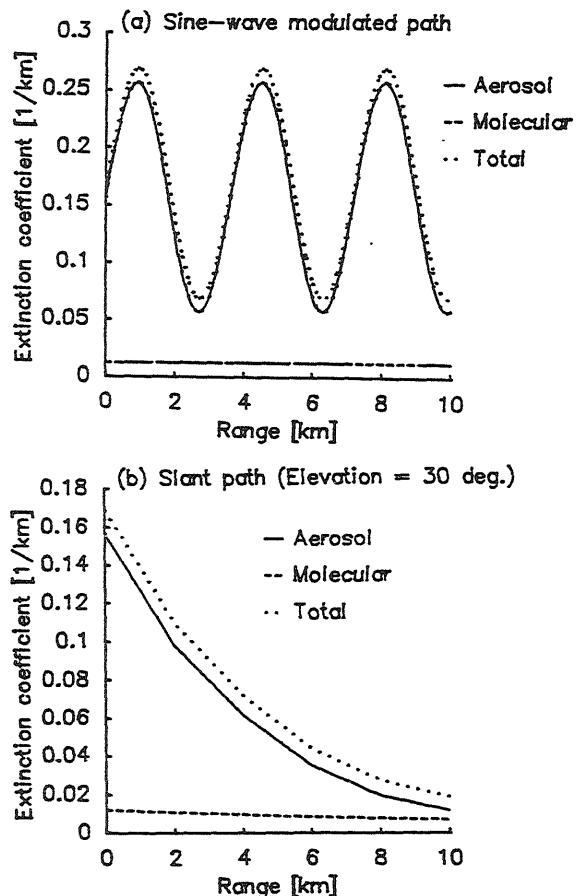


Fig.2 Extinction coefficient as a function of range for the midlatitude winter model (clean air with surface visibility of 23km). (a) Sinusoidal distribution path, (b) slant path with elevation angle of 30 deg.

$\varepsilon(r_c)=80\%$ とした場合の各光路、各方法における推定誤差をFig.3(a)、(b)、(c)に示す、同一の判断基準として横軸は境界からの光学的厚さとした。Klettの方法では、 $k_2=0.67$ とした場合、Fernaldの方法よりも $\varepsilon(R)$ が小さくなるが、この値はほぼ下限である⁴⁾。全域にわたり $\tau(R)$ が小さい斜方光路の場合、Klettの方法では $k_2=0.67$ としてもFernaldの方法よりも $\varepsilon(R)$ が大きくなる。これは清浄大気におけるFernaldの方法の有効性を示している。

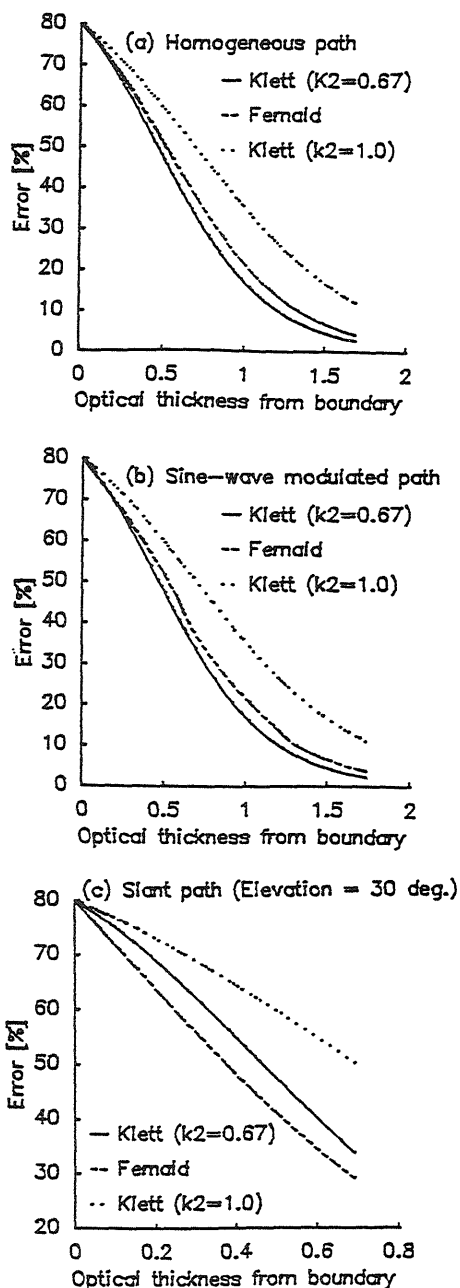


Fig.3 Estimated error for each distribution of extinction coefficient. (a) the path for a homogeneous distribution, (b) sinusoidal distribution path, and (c) slant path.

4. 結論 Klett、及びFernaldの提唱した2種のLIDAR方程式の反転解法において、解に対する境界条件の誤差の感度解析を統一的に行う方法を開発した。清浄大気においては、Fernaldの方法はKlettの方法よりも誤差が小さいことが本方法により容易に理解できる。

参考文献

- 1) J.D.Klett, Appl. Opt. 20, 211(1981)
- 2) F.G.Fernald, Appl. Opt. 23, 652(1984)
- 3) F.X.Kneizys et al, AFGL-TR-88-0177(1988)
- 4) R.M.Measures: "Laser Remote Sensing", Wiley-Interscience, (1984) p.278.