

成層圏エアロゾルの観測のためのスラントパス法の技術的検討
 Slant Path Method for the Measurement of Stratospheric Aerosol

飯倉善和 清水浩 竹内延夫

Y. Iikura H. Shimizu and N. Takeuchi

国立公害研究所

The national institute for environmental studies

1. 序

従来のレーザーレーダーによる成層圏エアロゾルの観測では主にエアロゾルと空気分子の後方散乱比が求められていた。しかしスラントパス法を用いれば、後方散乱係数が求められると同時に消散係数の値も測定することが可能である。またこれらの値を用いて求められる散乱パラメータは成層圏エアロゾルの性質の解明に有効な情報を提供する。

国立公害研究所では遠距離の測定とともに掃引測定も可能な大型のレーザーレーダーを用いて、成層圏エアロゾル分布の観測を行ってきた。その一環として、スラントパス法の可能性を検討した結果、1) スラントパス法で必要となるデータの精度、2) 成層圏エアロゾル分布の空間変動、3) 空間変動に対する測定・解析上の対策に関して有用な知見が得られたので報告する。

2. スラントパス法

スラントパス法はエアロゾルが水平方向に一様分布しているという仮定のもとに、図1のように高度角 θ を変えてレーザーレーダーの測定を行うものである。このときの受信信号の強度 P は次のレーザーレーダー方程式であらわされる。

$$P(H, \theta) = C \beta(H) \exp \left\{ - \int_0^H \alpha(z) \operatorname{cosec} \theta dz \right\} / (H \operatorname{cosec} \theta)^2 \quad (1)$$

高度 H_1 から H_2 の間の光学的厚さ σ は図上の A ~ D の4点におけるデータから次の式で求められる。

$$\sigma_{H_1}^{H_2} = \int_{H_1}^{H_2} \alpha(z) dz = \ln \left\{ \frac{P(H_1, \theta_1) P(H_2, \theta_2)}{P(H_1, \theta_2) P(H_2, \theta_1)} \right\} / 2(\operatorname{cosec} \theta_2 - \operatorname{cosec} \theta_1) \quad (2)$$

後方散乱係数 β を求めるには、エアロゾルのない高度 H^* における空気分子の後方散乱係数とレーザーレーダーのデータとのマッチングをとることにより、次の式で求められる。

$$\beta(H) = \beta_{\text{air}}(H^*) \frac{P(H, \theta)}{P(H^*, \theta)} \exp \left\{ -2\alpha_{H^*}^{\text{air}} \operatorname{cosec} \theta \right\} \quad (3)$$

上式では(2)式でもとめられる $\sigma_{H^*}^{\text{air}}$ の値が必要となる。

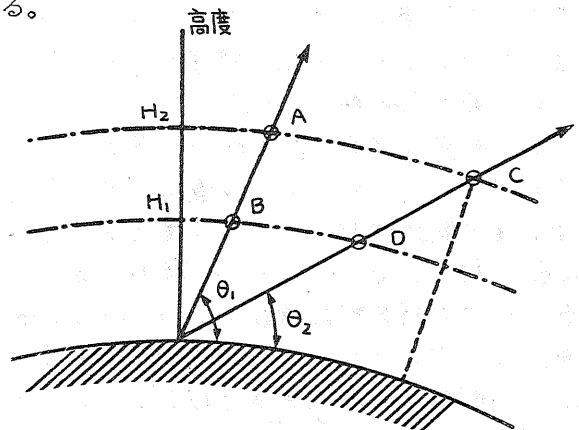


図1. スラントパス法の原理図

3. スラントパス法の精度

光学的厚さ σ および後方散乱係数 β とレーザーレーダーのデータ P の精度との関係は(2), (3)式を用いて次のように近似できる。

$$\frac{\delta \sigma}{\sigma} \approx \frac{\delta P}{P} / \alpha (\operatorname{cosec} \theta_2 - \operatorname{cosec} \theta_1) \quad (4)$$

$$\frac{\delta \beta}{\beta} \approx \frac{\delta \beta_{\text{air}}}{\beta_{\text{air}}} + 2 \left(\frac{\operatorname{cosec} \theta_2}{\operatorname{cosec} \theta_2 - \operatorname{cosec} \theta_1} \right) \frac{\delta P}{P} \quad (5)$$

距離分解能を犠牲にして σ を大きくとれば、 σ の精度は向上する。また高度角 θ_1, θ_2 の差を大きく取ることも有効である。但し遠距離になるにしたがいレーザーレーダーのデータの精度は悪化する。

$\theta_1=90^\circ$, $\theta_2=30^\circ$, $\sigma=0.01$ とすると, σ を10%の精度でもとめるためには, Pの精度は(4)式から0.1%必要となる。したがって測定および解析上の誤差対策が重要である。

β の精度にはPの精度とともに空気分子の信頼できる後方散乱係数の値を得ることが重要となる。季節変化によって空気分子の後方散乱係数の値には約5%の違いが生じ, 日変化も認められている。

4. 誤差要因としてのエアロゾル分布の空間変動とその対策

スラントパス法で必要とされるデータの精度を得るには, 従来の誤差対策を改良するとともに, 新たにエアロゾル分布の空間的変動に対する対策が必要となる。ここでは後者について検討する。

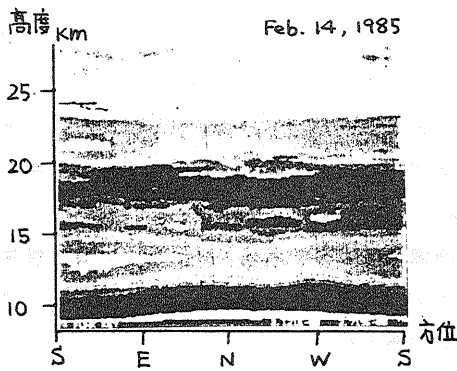


図2. エアロゾルの空間分布

図2に成層圏エアロゾルの空間分布の例を示す。データは図3のように高度角を一定にして方位角を変化させて測定したものである。

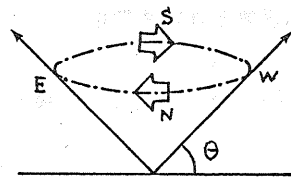


図3. 掃引方法

この図では20km付近に変動がみられる。したがって方位角を一定にした場合, 水平方向への一様性というスラントパス法の前提条件が問題となる。

このような空間的変動による影響をできるだけおさえるための対策として 1) 方位角に関して平均化を行うため図3のような掃引測定を行うこと, 2) 高度角についても複数の測定を行いその統計的平均を用いること, 3) エアロゾルの空間変動

の小さい高度のデータを用いることが考えられる。

5. 測定結果

図4に1984年3月の測定データを示す。高度角については4種, 方位角は南にとった。この例では掃引測定は行っていない。縦軸は距離二乗およびマッチングによる補正を行った後のレーザーレーダーのデータである。横軸は地球の曲率や大気の屈折率の補正を行った後の高度である。

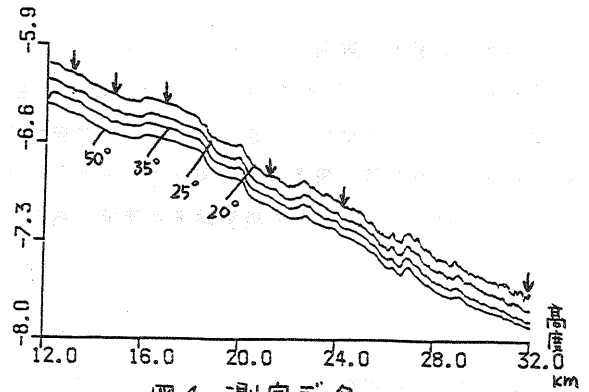


図4. 測定データ

表1はスラントパス法による解析の結果である。図4に示す変動の少ない高度近傍のレーザーレーダーデータの統計的平均および標準偏差を用いて, 各高度間の光学的厚さおよびその信頼区間を求めた。3章で示した精度に関する検討結果との明らかな対応が見られる。

表1 スラントパス法を用いた光学的厚さの測定結果 ($\times 10^{-3}$)
March 9, 1984

高度角 高度 km	20° - 50°	25° - 50°	35° - 50°	空気分子
13-15	8.5 ± 1.1	9.0 ± 1.6	10.8 ± 3.8	4.9
15-17	12.9 ± 0.9	11.3 ± 1.7	6.2 ± 4.7	3.6
17-21	26.4 ± 1.4	24.5 ± 2.3	47.7 ± 4.5	4.4
21-24	2.8 ± 2.4	10.1 ± 4.1	14.1 ± 10.6	1.9
24-32	1.1 ± 3.6	6.0 ± 4.3	59.4 ± 11.1	2.1

この結果から1984年3月における成層圏13~32 kmの光学的厚さは, 約0.05であった。

またエアロゾルの散乱パラメータとして20~70の値が得られており, とくに17km~21kmのエアロゾル層で大きくなっている。