

ライダー多重散乱信号のシミュレーション

Simulation of Multiple Scattering Signals of Lidar

○竹内延夫^A、呉 尚謙^B、松本雅雄^C

Nobuo TAKEUCHI^A, Wu Shang-Qian^B, Masao Satumoto^C

A:国立環境研究所、B:筑波大学、C:九州工業大学

A:Nat'l Inst. Env. Studies, B:Tsukuba Univ., C:Kyushu Inst. Techn.

ABSTRACT: Multiple scattering is important for a dense scattering medium. The error of the extinction coefficient due to the multiple scattering, when a lidar is located in a dense fog, was best estimated using a modified Monte Carlo method, which uses the receiving probability when the scattering point is located within the field-of-view of the receiving telescope. Characteristics and the error due to the multiple scattering are estimated in this paper. The error when using the Klett inversion method is also discussed.

1. はじめに

ミー散乱ライダーでは通常、1次の後方散乱のみを扱うが、実際には多数回散乱された後、受信系に戻ってくる2次、3次などの多重散乱信号を含んでいる。散乱媒質が濃いとき、多重散乱を無視して、観測量からライダー方程式を用いて減衰係数を求めると誤差が生じる。本研究では多重散乱が最も顕著に現われる濃霧中を例に取り、モンテカルロ法を使用して多重散乱の影響を考察し、さらに反転解法(Klettの方法)^{1,2)}で減衰係数を求めたときの誤差を推定した。

2. モンテカルロシミュレーション

多重散乱の本計算では、モンテカルロ法を使用する際に、光の減衰は散乱だけを考慮し、吸収は無いものと仮定している(従来の計算はほぼ省略している)。また、散乱媒質(霧)の空間分布が均一であり、レーザー光の広がりゼロ、光子と散乱体粒子の衝突は一対一である(単粒子散乱)とし、同時には多数の散乱を考えない。計算においては乱数と霧の位相関数(Cloud C-1モデル)から光子の軌跡を計算し、散乱点を受光系の視野に入っているときには受信確率を計算して加算していくことによって、計算の効率を高めた。

計算にはライダーを1.2mの高さで霧の中に水平に向けた状況を想定している。受信光学系の半径は0.1mである(これはRM-CWライダー³⁾による視程測定と同じ条件)。地面での反射

があるときはLambert 的であるとして計算している。光子がJ次の散乱において、ライダー受信系に戻る確率は次式によって計算される。

$$P_J = \frac{T(\sum L_j) \rho_i(\theta)}{R^2} \frac{A_r \cos \alpha_n}{4\pi} \prod_{k=1}^{J-1} (1 - P_k)$$

$T(\sum L_j) = \exp(-\beta \cdot \sum L_j)$ はJ次の散乱点まで合計した透過率、Rは散乱点と受信系中心の距離、 $\rho_i(\theta)$ は上記の位相関数(i:散乱,反射)、 $A_r \cos \alpha_n$ は受信系の有効面積である。PkをK次散乱において光子が受信系に戻る確率とすると、(1 - Pk)はK次散乱において光子が受信系に戻らない確率である。次のK + 1次散乱では、K次散乱までの残る確率を光子強度として計算する。散乱計算の概念図をFig.1に示した。

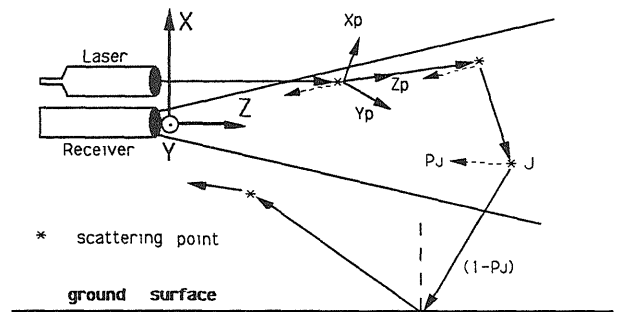


Fig. 1 Concept of multiple-scattering calculation. P_J is the scattering probability, which is calculated when the scatterer is within the field-of-view.

3. 計算結果

本研究では、波長 $0.7\mu\text{m}$ とし、Cloud C-1モデルの位相関数を使用している。この位相関数は前方方向に散乱される確率が非常に大きいのが特徴で、散乱角が10度以下に50%以上が含まれる。

一回の計算に使用した光子数は20万個で、散乱次数は10次以上はほとんど寄与しないので計算を打ち切っている。多重散乱には視野角と減衰係数が大きく影響するが、視野角は $3\sim 50\text{mrad}$ 、減衰係数は $0.001\sim 0.1\text{m}^{-1}$ （視程にして4km $\sim 40\text{m}$ ）を扱った。距離分解能は1mで計算し、平滑化を行なっている。地面の反射率は30%および10%を計算した。また、120mと400mに建物（反射率:30%と90%）がある場合を計算したが、建物の影響については省略する。

計算結果の1例として、全視野角 50mrad （視野半角 25mrad ）で、減衰係数 β が 0.01m^{-1} の場合の多重散乱の様子をFig.2に示す。この図で示すように、視野角が 50mrad のときは片道に相当する光学的厚さ（減衰係数 \times 距離）が約3.3の所で2次散乱信号が単散乱信号を越える。そして光学的厚さが約4.5、6の所でそれぞれ3次散乱、4次散乱が一次散乱を越える。視野角が小さいとこの値はもっと大きく（遠方に）なる。

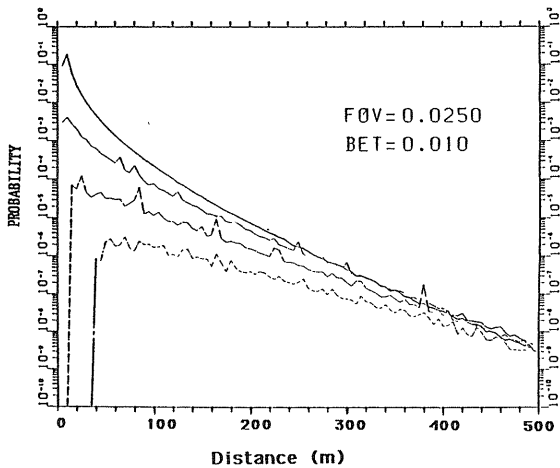


Fig.2 Strength of multiple scattering as a function of distance. The curve shows the single, second, third and fourth scattering from the above.

計算の結果より、霧の中でライダーが水平に向いている場合には多重散乱の大きさはライダーの高さ、地面の反射率、減衰係数、ライダー受信系の視野角等に関係する。また距離とともに多重散乱の影響が大きくなる。

視野角依存性を見るために、地面反射が無い場合の多重散乱（2次以上）／単散乱比の視野角（全視野）依存性を $\beta=0.01\text{m}^{-1}$ について距離をパラメーターとしてFig.3に示した。視野角の増大、距離の増大とともに多重散乱の影響が大きくなるのが見られる。また、地面反射が無く、光路長500m、視野角が 10mrad の条件では、減衰係数 β が 0.01m^{-1} から 0.03m^{-1} になると、多重散乱は約3倍になる。多重散乱の影響は視野角にほぼ比例して増大する。

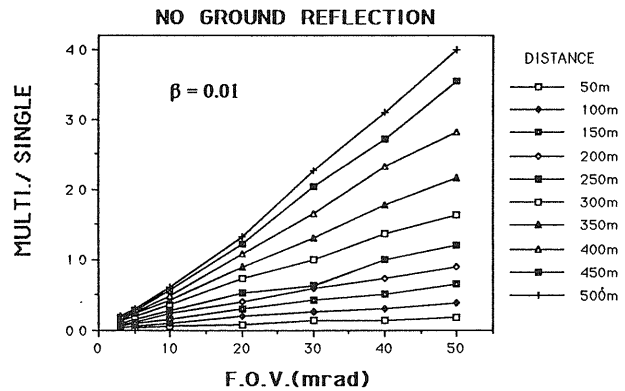


Fig.3 Field-of-view dependence of multiple scattering-to-single scattering ratio as the function of distance for $\beta=0.01\text{m}^{-1}$.

地面反射が無い場合の多重散乱（2次以上）／単散乱比を全視野角 10mrad について、横軸に減衰係数、縦軸に距離を取ったものをFig.4に示した。これから距離が大きくなるとともに多重散乱の影響が増大することが分かる。

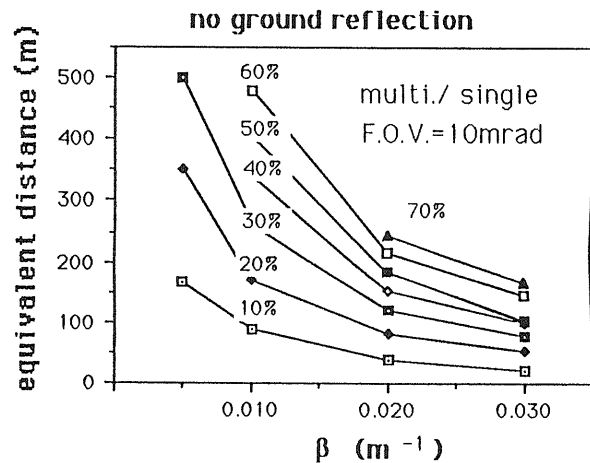


Fig.4 Extinction coefficient dependence of multiple scattering-to-single scattering ratio as the function of distance for 10mrad FOV.

地面の影響がある場合には、地面が視野の中に入るところから多重散乱信号は急に大きくなり、地面反射がない場合の約2倍になる ($\beta = 0.01 \text{ m}^{-1}$ のとき)。距離が500mの場合をFig.5に示した。また、地面の反射率を10%に下げても、地面反射の影響は約1/2が残る。

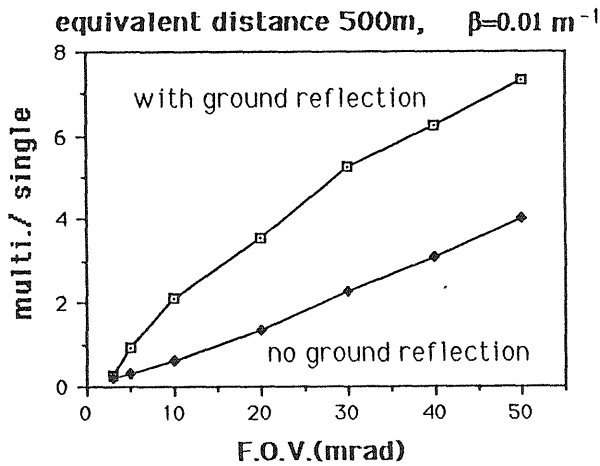


Fig.5 FOV (field-of-view) dependence of multiple scattering-to-single scattering ratio for equivalent distance of 500 m and $\beta = 0.01 \text{ m}^{-1}$.

なお、本研究ではライダーを霧の中に置いてある場合を扱った。雲のように高濃度の散乱体が離れた所にある条件のときと比べると、多重散乱信号の絶対量が大きいが多重散乱信号が単散乱信号を越える距離は雲への侵入距離に比べて遠くなった。

この計算結果から、数百mの距離では視野が3mrad以下では多重散乱の寄与は一次散乱の10%以下になる、また、減衰係数が 0.001 m^{-1} のときには視野角が50mradでも10%以下であることが示された。

4. 反転解法による誤差の検討

ライダーによる減衰係数の導出には、通常、KlettやFernaldによって提案された反転解法が使用される。したがって、モンテカルロ法によってライダー信号をシミュレートし、単一散乱を仮定した反転解法を用いて減衰係数を求め、多重散乱が与える影響を検討する必要がある。

このために、シミュレートされたライダー信号を10点のメディアンフィルターによって平滑化、平均化し、距離分解能を5mとしてからKlett

の方法によって減衰係数の分布を求めた。この場合、境界条件はライダーから500m、またはライダー信号が0になる距離で真値を与えるものとし、後方散乱係数は減衰係数の0.85乗に比例するものとした。Fig.6に受光系視野角50mradの場合の推定された減衰係数分布を示す。(a)、(b)はそれぞれ減衰係数が0.001、および0.1の場合である。図中横軸の矢印は地表面が視野内に入る距離を示す。減衰係数が小さい場合、地表面の影響は顕著であるが、減衰係数が大きい場合、地表面の影響は小さい。このことは他の条件でも確認された。これは減衰係数が大きくなるとライダー信号に与える散乱の寄与が地表面の寄与と同等、もしくはそれ以上になるためであろうと推察される。

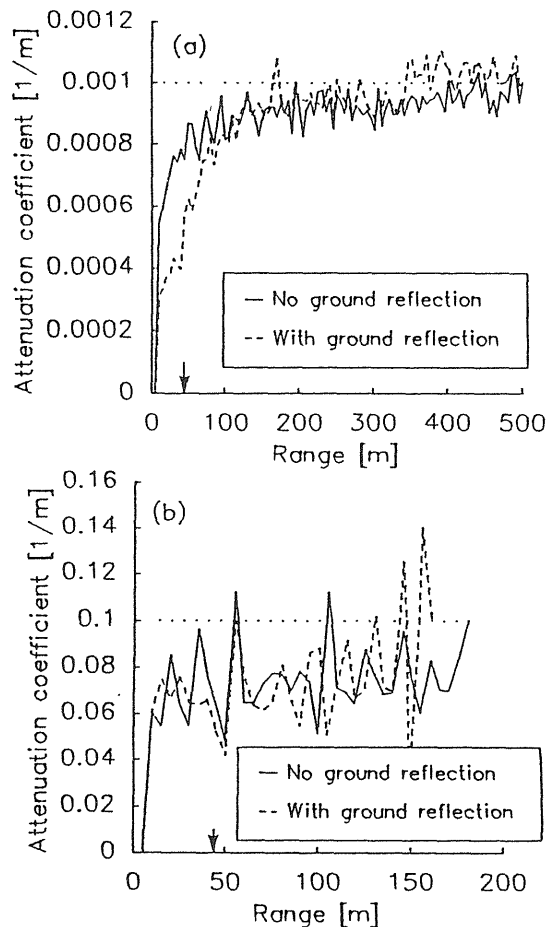


Fig.6 Calculated extinction coefficient by Klett inversion method. (a) for extinction value of 0.001 cm^{-1} , (b) for 0.1 cm^{-1} .

ここで、多重散乱の影響を表わすため、各受光視野角における減衰係数（真値）と減衰係数推定値のバイアス誤差： $(\text{真値} - \text{推定値}) / \text{真値}$ の関係をFig.7に示す。視野角が50mradのときには視程が4km程度の低い濃度でも20%程度の誤差が見込まれるが、3mradでは視程が40mほどの濃い濃度でも誤差は10%以下であることが分かる。受光系視野角が小さくなれば、多重散乱の影響、および地表面の影響が減少し、減衰係数の推定精度が向上することが示された。

5. おわりに

観測点（ライダー）自身が霧の中におかれた状態で、多重散乱がライダー計測における減衰係数の導出に及ぼす誤差についてモンテカルロ法シミュレーションによって検討した。

その結果、多重散乱の影響は距離とともに、また、減衰係数、視野角とともに増大することが確かめられた。Klettによる反転法で減衰係数を求めた場合も、視野角が3mrad程度であると多重散乱の影響は10%以下であることが判明した。

REFERENCE

- 1) J.D. Klett: Appl. Opt. 20 211 (1981).
- 2) K.E.Kunkel, J.A.Weinman: J.Atmos.Sci., 33 1772 (1976).
- 3) N. Takeuchi, et al: Appl. Opt. 25 63 (1986).

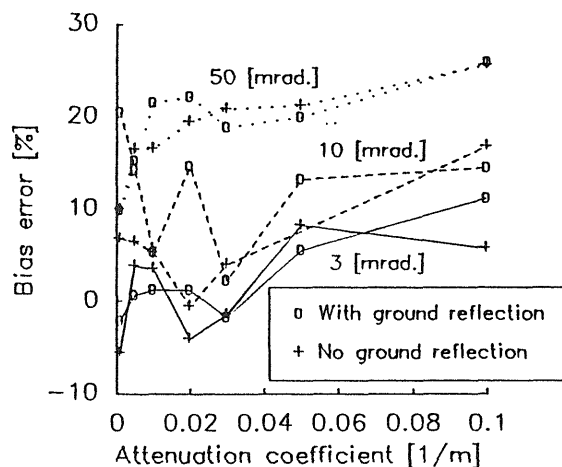


Fig.7 Bias error as a function of extinction coefficient for various field-of-views.