

24. レーザ・レーダにおける多重散乱の影響 The Contribution of Multiple Scattering to Lidar Signals

有賀 規, 五十嵐 隆 (郵政省電波研究所)

T. Aruga and T. Igarashi (Radio Research Laboratories,
Ministry of Posts & Telecoms.)

要旨 モンテカルロ法を用いた行列解析により, 多重散乱の卓越する光学的に厚い汚濁した大気からのレーザ・レーダ・エコーの強度と偏光状態を計算機シミュレーションによって求めた。

§1 はじめに

過去のレーザ・レーダの研究を省くと, 汚れの少ない光学的に薄い大気についての研究(超高層のエアロソルからの散乱, 低層大気のレイリー・ラマン散乱等の散乱断面積の小さい場合の散乱の研究等)は数多くなされこゝろ一応の成役をおさめているように思われる。最近では光学的に厚い汚れた大気(低層のエアロソル, 都会域での煙霧, 雲, 霧等)の研究が意欲的に行われるようになった。これはこれらの微粒子が地球全体の熱収支に大きく影響を及ぼし⁽¹⁾, 異常気象や光化学スモッグの原因としても重要であると考えられるからである。特にエアロソルの複素屈折率の虚数部の値の大小によって地球の熱収支が強く影響を受けることが指摘されており^{(1), (2)} レーザ・レーダ等の手段によって微粒子の空間的分布のみならず, 屈折率, 粒径分布, 形状等の光学的・物理的性質の測定が強く望まれる^{(2), (3)}。

しかし, 光学的に厚い微粒子群からの散乱は多重散乱が卓越してくるのど, 一般のレーザ・レーダ方程式が成立しなくなり非常に困難な問題となってくる。Liou & Schotland⁽⁴⁾ や Eloranta⁽⁵⁾ はレーザ・レーダ方程式を発展させて2次散乱までのエコーを解いたが適用範囲が限られてしまう。Plass & Kattawar⁽⁶⁾, Kunkel & Weinman⁽⁷⁾ はモンテカルロ法によって高次の多重散乱も考慮してエコーを計算した。微粒子についての種々の物理的性質を推測するためにレーザ・レーダ・エコーの偏光状態を調べることは非常に興味ある問題であり, Pal & Carswell⁽⁸⁾, Znev et al.⁽⁹⁾, Werner⁽¹⁰⁾ は実験を行っているが, この実験結果を

有効に利用するために、多重散乱によって偏光状態がどの程度変化するかを理論的に求めることが要求される。

この研究ではモンテカルロ法を用いると同時に、さらに散乱行列を用いて行列解析することによってレーザ・レータ・エコーの強度のみならず偏光状態を計算機シミュレーションによって求めた。可視、赤外の代表的な波長に対し種々の微粒子からのエコー強度、偏光状態を送信ビームの広がり、受信視野、光学的厚さ等を変えて求めた。

§2 数式化

モンテカルロ法を用いた行列解析の数式化については著者によって既に述べられている⁽¹⁾の(1)〜(3)式を示すにとどめる。第1図に示すように点0から出発した光子は微粒子中の点1, 2, 3, ..., n-1, n でn回散乱し、観測点Sに到達するものとする。モノスタティック・レーザ・レータの場合はSは0と一致する。散乱点間の距離を $l_0, l_1, \dots, l_n$ (但し l_0 と l_n は微粒子局内部分の距離)とし、座標軸は送信ビームの中心の方向にZ軸をとり、X-Y-Z軸は図のように定義する。レーザ・ビームはGauss分布で直線偏光しているものと仮定する。n次散乱した後観測点に到達した状態を行列 $\mathbb{I}_n$ で表し、送信時は $\mathbb{I}_0$ とする。一般に $\mathbb{I}$ は、

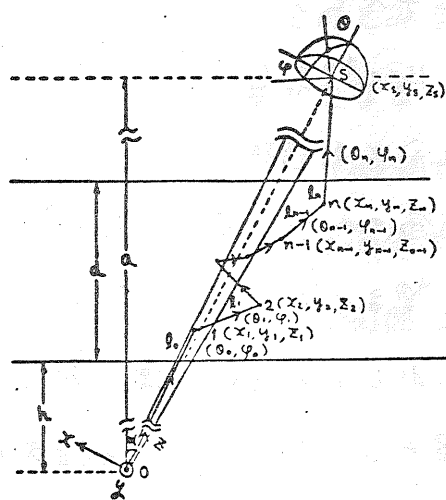
Stokes パラメータ I, I_r, U, V を用いて

$$\mathbb{I} = \begin{pmatrix} I \\ I_r \\ U \\ V \end{pmatrix} \text{ と一列行列で表される。}^{(12)}$$

この研究では $\mathbb{I}_n$ を次のように表して計算を行う。

$$\mathbb{I}_n = \frac{\Delta\Omega}{4\pi} \exp(-\rho_e l_n) P(0_n, \varphi_n; 0_{n-1}, \varphi_{n-1}) \left[\prod_{j=1}^{n-1} P(0_j, \varphi_j; 0_{j-1}, \varphi_{j-1}) \right] \left[\prod_{j=1}^{n-1} C_j \right] \times \omega^n \left[\prod_{j=0}^{n-1} W_j \right] \mathbb{I}_0.$$

ここで、 $(0_j, \varphi_j)$ は各散乱後に進む方向、 $\Delta\Omega$ はn次の散乱点から観測点の集光



第1図

器を臨む微小立体角, β_e : 減衰係数, w : single scattering albedo ($w = \beta_s / \beta_e$), W_j : 光子のエネルギーの重み, $C_j = 1 / \bar{P}(\theta)$ $\bar{P}(\theta)$: phase function

また, 散乱前(b), 後(a)とすると(才2回参照)

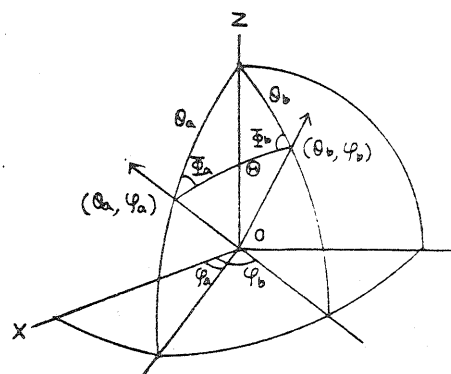
$$P(\theta_a, \varphi_a; \theta_b, \varphi_b) = \mathbb{L}(\pi - \varphi_a) P(\theta) \mathbb{L}(-\varphi_b)$$

$\mathbb{L}$ は座標変換を表す行列で

$$\mathbb{L}(\pi - \varphi) = \mathbb{L}(-\varphi) = \begin{pmatrix} \cos^2 \varphi & \sin^2 \varphi & -\frac{1}{2} \sin 2\varphi & 0 \\ \sin^2 \varphi & \cos^2 \varphi & \frac{1}{2} \sin 2\varphi & 0 \\ \sin 2\varphi & -\sin 2\varphi & \cos 2\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$P(\theta)$ は散乱行列で

$$P(\theta) = \begin{pmatrix} P_1(\theta) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_2(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_3(\theta) & -P_4(\theta) \\ 0 & 0 & P_4(\theta) & P_3(\theta) \end{pmatrix}$$



才2図

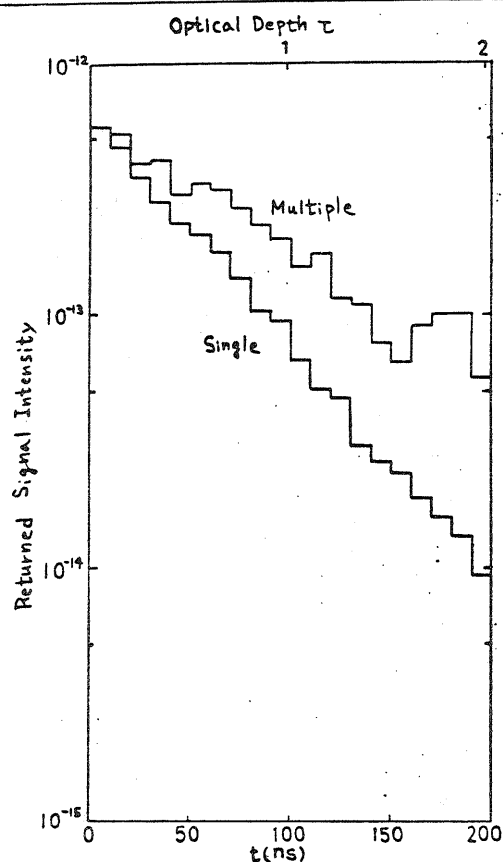
θ : 散乱角, $P_1(\theta), P_2(\theta), P_3(\theta), P_4(\theta)$ は微粒子の複素屈折率と粒径分布および波長を与えられ, 1は Mie の電磁波散乱理論^{(13), (14)} より求められている。

§3 計算モデルシミュレーションの結果

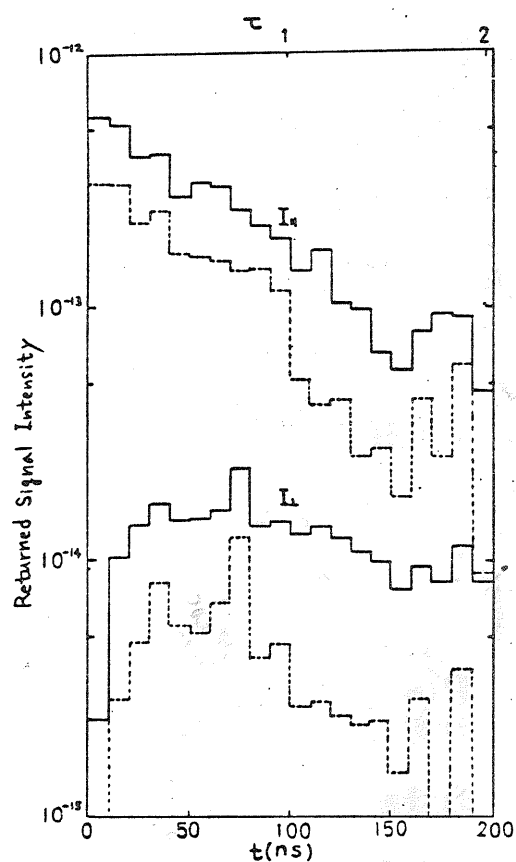
微粒子の散乱行列や, 減衰係数等は備考計算して極大ファイルに入れておいた。
0.5 μm の波長のレーザーで NaCl cloud のエコーを求めた例を図3(a), (b) に示した。 $I_{||}, I_{\perp}$ はレーザーの偏光方向と平行, 直角の成分を示し, 実線は受信視野 20 mrd, 破線は 1 mrd (送信ビームの広がりと同じ) である。雲の底面の高さは 1 km とし, 時間軸の始点は雲の底面に相当する。送信の強度を 1 とし, 受信アンテナの面積を 1 cm^2 とし規格されたエコーの強度を示してある。才4図 (a), (b) には, (全次数の散乱強度 / 1次散乱のみの強度) と $I_{\perp} / I_{||}$ をまとめた。
 $I_{\perp} / I_{||}$ は Degree of Depolarization である。

ここで雲の粒子の屈折率は $m = 1.336 - 0.800 \times 10^{-9}i$ (for 0.5 μm) とし, 粒径分布は Deam の観測値に従う^{(15), (16)}

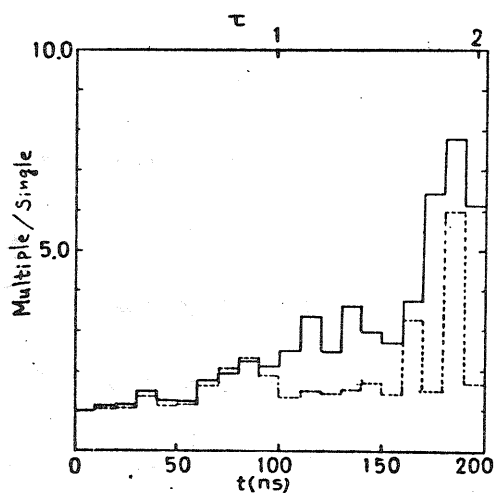
为3图
(a)



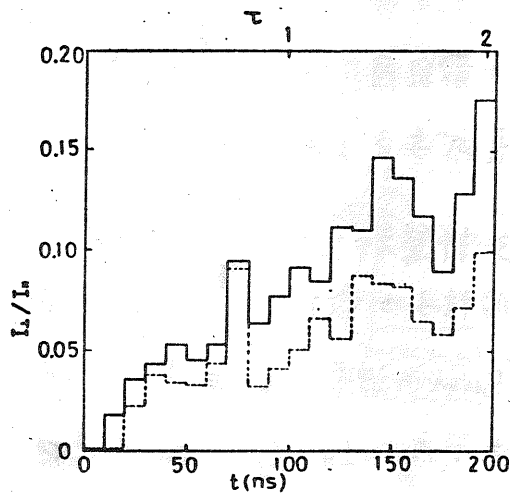
(b)



为4图
(a)



(b)



参考文献

- (1) G. Yamamoto & M. Tanaka; J. Atm. Sci., 29, 1405 (1972)
- (2) M. Tanaka; MAP Symposium (1976)
- (3) M. L. Wright et al. N76-14647 (1975)
- (4) K. Liou & R. H. Scotland; J. Atm. Sci., 28, 972 (1971)
- (5) E. W. Eloranta; Ph.D. thesis, Univ. of Wisconsin (1972)
- (6) G. N. Plass & G. W. Kattawar; Appl. Opt., 10, 2304 (1971)
- (7) K. E. Kunkel & J. A. Weinman; J. Atm. Sci., 33, 1772 (1976)

- (8) S. P. Pal & A. I. Carswell; Appl. Opt., 8, 1990 (1976)
- (9) V. E. Zuer et al.; 6th Conf. R. L. S.
- (10) Ch. Werner; 6th Conf. R. L. S.
- (11) 有贺, 五+崙; 光子工学研究会
信学技報, 76, No. 157, 7 (1976)
- (12) S. Chandrasekhar; "Radiative Transfer"
- (13) Van de Hulst; "Light Scattering by Small Particles"
- (14) D. Deirmenjian; "Electromagnetic Scattering on Spherical Polydispersions"
- (15) M. Deam; Met. Rundschau; 94, 261 (1948)
- (16) L. W. Carrier et al.; Appl. Opt., 6, 1209 (1967)