## ミー散乱関数の微細構造を利用した アイセーフライダーによる微粒子の粒径測定法に関する研究 A study on the size measurement of small particles by the eye safe lidar using fine structures of Mie scattering function 首都大学東京 〇坪根周平,長澤親生,柴田泰邦 OShuhei Tsubone, Chikao Nagasawa, Yasukuni Shibata Tokyo Metropolitan University

Abstract: In this paper, we examine a technology which identifies the small particles with around dozens of micron diameters in the atmosphere using fine structures of Mie scattering function which are found in the receiving echoes of the 1.5  $\mu$  m band eye safe lidar. As a result of simulation, we show a method of the size measurement of the small particles using the scattering cross section ratio of two specific wave lengths of the near-infrared region.

1. はじめに

レーザの波長依存性を利用した微粒子の粒径分布を測定する装置はこれまで多くの研究があり、すで にそのような装置も市販されている。しかしながら、そのような装置は、波長と同程度の粒径を持つ粒 子には感度が良いが、波長より1桁以上も大きい粒径を持つ粒子の粒径測定に対して感度を得ることは 難しい。一方、大気中では、花粉や黄砂や雨滴など一般にライダーに用いる波長より1桁以上も大きな 粒径を持つ粒子の粒径をライダーにより推定することが求められている。

本研究では、1.5µm 帯の近赤外波長を用いたアイセーフライダーの受信信号中のミー散乱関数の微 細構造を利用して、大気中に浮遊する粒径が数十ミクロン程度の粒子の粒径測定手法に関してイノベー ショナルな提案を行う。

2. ミー散乱強度の数値計算

球粒子を仮定すると、粒子に対する入射光強度と散乱強度の関係を Mie 理論に従って、以下のように 表すことができる 1)。

$$I = \frac{I_0(S_1 + S_2)}{x^2}$$
(1)

Iは散乱光強度、 $I_0$ は入射光強度、xはサイズパラメータ(= $2\pi r/\lambda$ )、rは粒子の半径、 $\lambda$ はレーザ波長、 $S_1 \ge S_2$ は入射光の偏光が散乱面に対して、それぞれ垂直、平行の際の散乱の振幅に当たる関数である。Mie 散乱の概念図を図.1 に示す。



Fig.1 Conception diagram of the Mie scattering

 $S_1 \geq S_2$ は次のように表す。

$$S_{1}(\theta,\lambda) = \sum \frac{2n+1}{n(n+1)} \left\{ a_{n} \pi_{n}(\cos\theta) + b_{n} \tau_{n}(\cos\theta) \right\}$$

$$S_{2}(\theta,\lambda) = \sum \frac{2n+1}{n(n+1)} \left\{ a_{n} \tau_{n}(\cos\theta) + b_{n} \pi_{n}(\cos\theta) \right\}$$
(2)

 $\pi_n(\cos\theta)$ と $\tau_n(\cos\theta)$ は Legendre の方程式を用いて表せる関数となっている。 $\theta$  は散乱角である。本研究 では送受信を1箇所で行なうライダー利用(Monostatic lidar) を考慮して、後方散乱光のみを扱い、 $\theta$ =  $\pi$ として計算を行う。この場合、後方散乱の振幅関数は垂直成分と平行成分の大きさが等しくなるの で、 $S_1 = S_1$ が成り立つ。(2)式で用いる Mie 係数を次のように示す。

$$a_{n} = \frac{\{A_{n}(mx)/m + n/x\}\phi_{n}(x) - \phi_{n-1}(x)}{\{A_{n}(mx)/m + n/x\}\zeta_{n}(x) - \zeta_{n-1}(x)}$$

$$b_{n} = \frac{\{A_{n}(mx)m + n/x\}\phi_{n}(x) - \phi_{n-1}(x)}{\{A_{n}(mx)m + n/x\}\zeta_{n}(x) - \zeta_{n-1}(x)}$$
(3)

上式において  $A_n(mx) = d[\log \phi_n(mx)]/d(mx)$  と表される式で、  $\phi_n(x)$  と $\zeta_n(x)$ は Ricatti-Bessel 関数、m は粒子の屈折率である。

前出の式を用いて、散乱効率 Qs を求める式を以下に示す。

$$Q_{s} = \frac{\sigma_{s}}{\pi a^{2}} = \frac{2}{x^{2}} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \left( \left| a_{n} \right|^{2} + \left| b_{n} \right|^{2} \right)^{2}$$
(4)

 $\sigma_s$ は散乱体が有効に散乱に寄与する散乱断面積、 $\pi a^2$ は散乱粒子の幾何学的断面積である。(4)式を用いて数値計算した散乱効率の結果を図.2 に示す。



Fig.2 Calculated scattering efficiency Qs

サイズパラメーラが6程度までは単調増加しているが、それよりも大きな粒子の場合は減衰振動して 約2に漸近する。一般にこの単調増加を利用して粒径測定が行われてきた。しかし、サイズパラメータ が大きくなるにつれ Qs 値の変化は小さくなり、大きい粒子の粒径を測定するためには、長いレーザ波 長を用い、また2波長の間隙を大きくする必要がある。大気中ではレーザ波長が長くなるに連れて、ミ 一散乱効果の影響で、受信信号の距離による減衰が大きいことと、波長間隙の大きい2波長のレーザを 用いることは、未知の消散係数による大きな誤差のためにライダーへの利用に適さない。 3. ミー散乱断面積の微細構造のシミュレーション

アイセーフライダーに用いる波長 1.5~1.6µm 付近において、粒径 30µm の球粒子を仮定し、波長 きざみを 1nm(左上)100pm(左下)10pm(右上)1pm(右下)と変化させた時の散乱断面積の計算機シミュレ ーション結果を図.3 に示す。波長きざみが 100pm 以下になると散乱断面積に急激な変化がみられる。 我々はこの急激な散乱断面積の変化を利用することで、粒径測定が可能ではないのかと考えた。以下の 章では、全て 1pm の間隔でシミュレーションを行った結果を用いる。



Laser wavelength  $\lambda$ 

Fig.3 Calculated scattering cross section for each wavelength interval around  $1.5\,\mu$  m

## 4. 粒径測定の可能性

従来、ミー散乱ライダーには、紫外線レーザあるいは、可視レーザが用いられて来たが、我々はアイ セーフを考慮して、水の吸収線の影響の少ない波長領域である  $1.6 \mu$  m 周辺の波長を用いた粒径  $30 \mu$  m と粒径  $10 \mu$  m のミー散乱断面積の計算を行った。その結果を図.4 に示す。粒径  $30 \mu$  m に対して、粒径  $10 \mu$  m において微細構造は見られない。

図.5 に、粒径が 10 µ m から 40 µ m に対する波長 1.561379 µ m と波長 1.561579 µ m の散乱断面積の 比を示す。この結果から、粒径が 25 µ m から 30 µ m の粒子の粒径の特定が可能なことが分かる。



Fig.4 Calculated scattering cross section  $\sigma$  for laser wavelength w3



Fig.5 Calculated scattering cross section ratio for the particle size

## 5. まとめ

アイセーフライダーにおいて、近赤外線領域の特定の2波長のレーザによる散乱断面積比より微粒子 の粒径測定の可能性があることがわかった。今後、波長による散乱断面積比の組み合わせにより、より 多くの粒径情報の取得が可能かを検討する。本研究では微粒子が理想的な球状を呈していることや屈折 率の虚数項を考慮しない等の仮定しているが、雨滴やすぎ花粉を用いて室内実験により、その仮定の妥 当性を検証する予定である。

## 参考文献

1) Hong Du, "Mie-scattering calculation" Appleid Optics, Vol.49, No.9, 1951-1956(2004)