

F 1 光散乱による石綿リアルタイムモニタ の開発 II

Asbestos Fiber Real-Time Monitor by detection of Polarized Scattering Light II

廣本宣久*、伊東繁夫**、前野 恭*、板部敏和*

(N.Hiromoto*, S.Ito**, T.Maeno*, T.Itabe*)

* 郵政省通信総合研究所、** 東洋大学工学部

(*Communications Research Laboratory, **Toyo University)

Abstract: We studied a new method of monitoring asbestos fiber aerosol, which measures polarization of scattered laser light at a scattering angle of 170° for discrimination between a cylindrical particle and a spherical particle. We have estimated intensity of polarized scattering light on real experimental conditions including a particle radius, laser wavelength and power, and a field of view of the detector, and we have concluded the measurement of the scattering intensity is effective to discriminate a cylindrical particle in addition to the polarization measurement. We have also found through computation using the Mie scattering theory that discrimination between serpentine and amphibole asbestos can be made by measurement of polarization at two wavelengths.

1. はじめに

現在、通信総研では環境庁のサポートを受けて、新しい石綿リアルタイム・モニタの開発に関する研究を進めている。その目的は、①リアルタイム測定ができ、②石綿粒子の識別が可能であり、また③微小な石綿繊維も検出できるシステムの開発である¹⁾。このため、大気中に浮遊する粒子を吸い込み、高電場によって配向させ、垂直に入射したレーザー光の散乱を特定の散乱角で偏向を含めて測定し、石綿粒子を他の粒子から識別して計数する装置の開発を行っている。

ここでは後に述べるように偏光が重要であるので、偏光度 (Polarization) の定義をまとめる。 $|S_1|^2$ 、 $|S_2|^2$ および $|T_1|^2$ 、 $|T_2|^2$ を、それぞれ球粒子および円柱粒子に対する散乱面に垂直、平行に直線偏向した入射光に対する単位入射光強度あたりの散乱光強度として以下の様に定義する。すなわち、球粒子では、

$$P = \frac{|S_1|^2 - |S_2|^2}{|S_1|^2 + |S_2|^2}, \quad (1)$$

また、円柱粒子では、

$$P = \frac{|T_1|^2 - |T_2|^2}{|T_1|^2 + |T_2|^2} \quad (2)$$

である。

2. 散乱角 170° での偏向度による球粒子と円柱粒子の判別

我々のこれまでの研究によって、後方散乱に近い散乱角 170° での偏光度 (Polarization) によって、球粒子と円柱粒子の判別が可能であることが明らかになった²⁾。Fig. 1(a)に球粒子、Fig. 1(b)に円柱粒子の散乱角 170° での粒子の半径 (r) に対する偏光度の依存性を、ミー散乱理論³⁾に基づいて計算した結果を示す。Fig. 1(a)およびFig. 1(b)に示すように散乱角 170° での偏光度は、球半径が $1.2 \mu\text{m}$ 以下で負、円柱半径が $0.6 \mu\text{m}$ 以下で正と言うように、偏向度にはっきりとした差があるのが分かる。したがって、球が半径 $r = 1.2 \mu\text{m}$ 程度以下、円柱が半径 $r = 0.6 \mu\text{m}$ 程度以下であるならば、円柱と球との区別が可能である。

粒子が十分に小さい領域ではレイリー近似が成り立ち、その偏向度は、球では

$$P = \frac{(1 - \cos \theta)}{(1 + \cos \theta)} \approx 0.015 \quad (\theta = 170^\circ) \quad (3)$$

また、円柱では、

$$P = \frac{(|m+1|^2 - 4 \cos \theta)}{(|m+1|^2 + 4 \cos \theta)} \approx 0.25 \quad (m=1.55, \theta=170^\circ) \quad (4)$$

となり、粒子が小さい領域に於いても差は明確であることが分かる。従って、粒子の大きさを限定できれば、散乱角 170° での偏光度の計測によって、球粒子と円柱粒子の識別が可能であるといえる。

3. 石綿リアルタイムモニターにおける実験パラメータと散乱光強度

石綿リアルタイムモニターでは光源として、Ar レーザ (波長 $\lambda = 0.488 \mu\text{m}$ 、強度 $P = 45 \text{mW}$ 、ビーム径 $d = 0.61 \text{mm} \phi$) と He : Ne レーザ (波長 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 、強度 $P = 10 \text{mW}$ 、ビーム径 $d = 0.68 \text{mm} \phi$) を用いる。検出器の視野は $F/10$ の対物レンズを用いて、電界によって配向した円柱粒子に垂直な面 (この面が散乱面) 内で、後方散乱に近い散乱角 170° を中心として、 $\Delta \theta = 0.1 \text{rad} \phi$ (約 $5^\circ \phi$)、立体角で $\Delta \Omega = 7.96 \times 10^{-3} \text{sr}$ である。

このとき、測定される散乱光強度 P_{mes} [W] は、入射レーザ光の波長 λ [μm] および波数 k ($= 2\pi/\lambda$) [μm^{-1}] エネルギー密度 I_i [$\text{W}/\mu\text{m}^2$]、粒子の半径 a [μm]、散乱角 170° での平行、垂直の二つの偏光に対する球粒子の散乱振幅を S_1 、 S_2 とすると、

$$P_{mes} = \frac{I_i (|S_1|^2 + |S_2|^2)}{2k^2} \Delta \Omega \quad (5)$$

と表される。また、円柱粒子の散乱振幅を T_1 、 T_2 とすると、測定される散乱光強度は、

$$P_{mes} = \frac{I_i L (|T_1|^2 + |T_2|^2)}{\pi k} \Delta \theta \quad (6)$$

となる。ここで、 L [μm] は円柱の長さで、粒子の半径 a [μm] より十分大きい。

ミー散乱理論を用いて、球粒子、円柱粒子の各々に対して散乱角 170° での散乱強度 ($S_{11} = \{|S_1|^2 + |S_2|^2\} / 2$ および $T_{11} = \{|T_1|^2 + |T_2|^2\} / 2$) を計算した結果を、Fig. 2(a) および Fig. 2(b) に示す。これらの散乱強度 S_{11} 、 T_{11} を用いて、(5) 式、(6) 式より測定される散乱光強度を計算した結果を表 1 にまとめる。ここで、球の半径 $1.2\mu\text{m}$ 、円柱の半径 $0.2\mu\text{m}$ 、長さを $5\mu\text{m}$ としている。また、石綿の屈折率は、蛇紋石系のクリソタイルが 1.55、角閃石系のアモサイトとクロシドライトがそれぞれ 1.68、1.70 程度である⁴⁾ ので、これらの値を用いている。実験装置では、粒子は管中を約 $4.2 \times 10^2 \text{ mm/s}$ で流れるので、表 1 の散乱光強度 [W] に $\sim 10^{-3} \text{ s}$ を掛けたエネルギー [J] の光パルスが出ることになる。

4. 散乱光強度を加えての球粒子と円柱粒子の識別

大気中を浮遊している球粒子の半径は、 $1 \sim 1.5\mu\text{m}$ 以下、 $0.05\mu\text{m}$ 程度が中心と考えられるので、表 1 より球粒子の散乱光強度は円柱粒子のそれよりもかなり小さく、2 節で述べた偏光度を考え合わせると、偏光度が負で散乱光強度が小さい粒子は球粒子とみなしてほとんど間違いないと考えられる。円柱粒子では、偏光度が負であるのは、Fig. 1(b) より半径が $0.6\mu\text{m}$ 程度より大きい粒子であって、大きな散乱光強度を与えるからである。逆に、偏光度が正であるだけで、(ある程度の散乱強度があれば) ほとんど円柱粒子と判断して良いと考えられる。

5. 2 波長のレーザー光による蛇紋石系アスベストと角閃石系アスベストの識別

3 節に述べたように蛇紋石系アスベストと角閃石系アスベストはそれぞれ屈折率が 1.55 程度、1.68 \sim 1.70 程度であり、屈折率に少し差がある。しかし、2 節で検討した様な偏光度だけからでは、両者の差は小さく、区別することができない。そこで、2 波長のレーザーを用いることとし、円柱粒子の軸に平行な偏光成分 (TPA) と垂直な偏光成分 (TPE) の散乱振幅を、2 つの波長 ($\lambda_1 = 0.488\mu\text{m}$ 、 $\lambda_2 = 0.6328\mu\text{m}$) に対してミー散乱理論より計算を行い、2 系統のアスベストの識別の可能性を調べた。Fig. 3 は、粒子半径を $0.1\mu\text{m}$ まで変化させて求めた、波長 $0.488\mu\text{m}$ の偏光の垂直成分 / 波長 $0.6328\mu\text{m}$ の偏光の平行成分 (TPE_1 / TPA_2) という異なる波長での異なる偏光成分の比を、屈折率 $m = 1.58, 1.68, 1.70$ に対して示したものである。この図より、2 つの異なる波長での異なる偏光成分の比である TPE_1 / TPA_2 を測定することにより、蛇紋石系アスベストと角閃石系アスベストの識別が可能であることがわかる。しかし、同じ角閃石系アスベストであるアモサイトとクロシドライトの識別は、この方法でも難しいといえる。

参 考 文 献

- 1) 廣本宣久、小暮晋祐、伊藤繁夫、板部敏和, "光散乱による石綿リアルタイムモニタの開発", 第15回レーザーセンシングシンポジウム, P 23, 予稿集, p.103 (1992).
- 2) 廣本宣久、伊藤繁夫、板部敏和, "ミー散乱の偏光による石綿状粒子と球状粒子の識別法", 第40回応用物理学関係連合講演会, 30a-ZA-4, 予稿集 No.3, p.890 (1993).
- 3) Creig F. Bohren and Donald R. Huffman, "Absorption and Scattering of Light by Small Particles", A Wiley-Interscience Publication (New York) (1983).
- 4) 神山宣彦, "アスベストの鉱物学", 労働衛生 Vol.29, No.2, p.32 (1988).

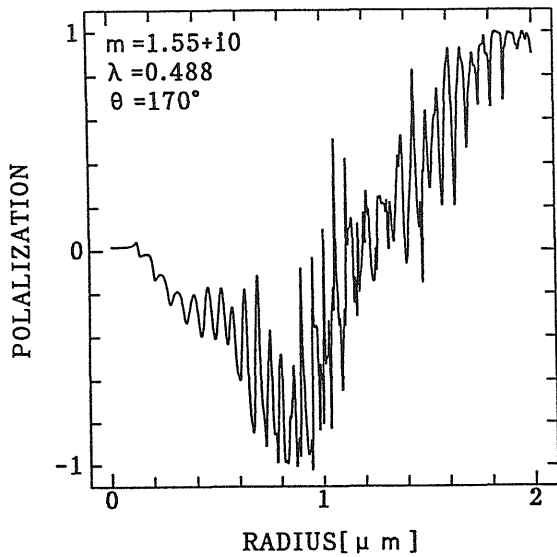


Fig. 1(a) Polarization of a sphere

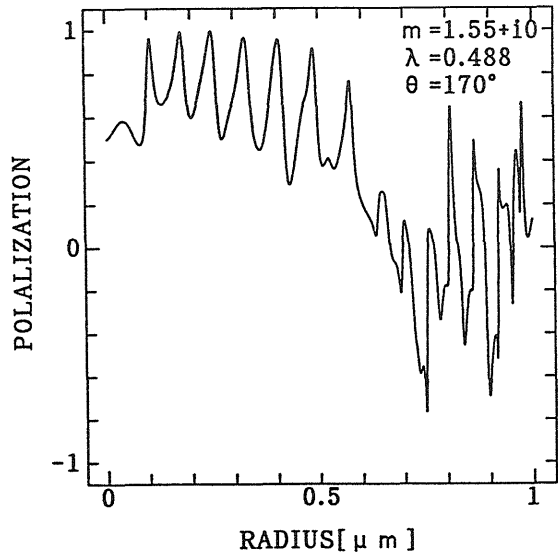


Fig. 1(b) Polarization of a cylinder

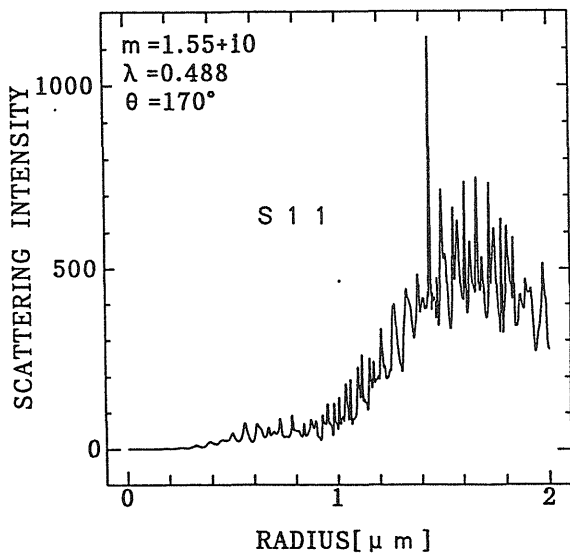


Fig. 2(a) Scattering intensity of a sphere

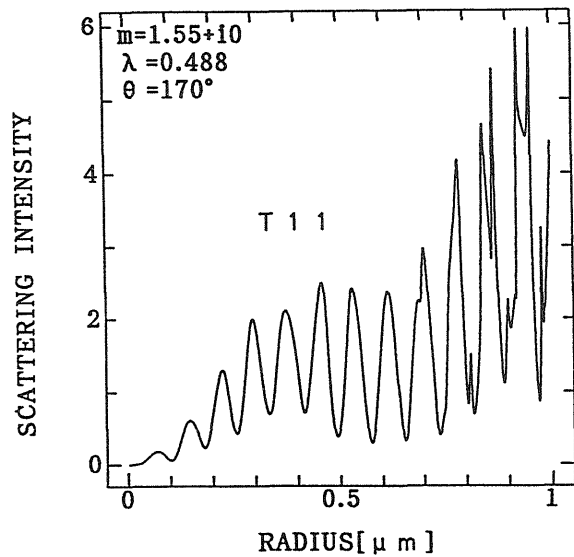


Fig. 2(b) Scattering intensity of a cylinder

Table.1 Scattering Intensity Expected for the Asbestos Real-Time Monitor

Wavelength λ [μ m] (*)	Refractive Index (**)	P_{\dots} [$10^{-4}W$]	
		Sphere (radius = 1.2 μ m)	Cylinder (rad. = 0.2 μ m, length = 5 μ m)
0.488	1.55	0.153	2.44
	1.68	0.092	6.29
	1.70	0.201	6.95
0.6328	1.55	0.202	0.509
	1.68	0.176	0.556
	1.70	0.227	0.552

* Wavelength $\lambda = 0.488 \mu$ m implies a Ar laser ($P=45mW$, Beam Dia. = 0.61mm ϕ).
Wavelength $\lambda = 0.6328 \mu$ m implies a He:Ne laser ($P=10mW$, Beam Dia. = 0.68mm ϕ).
* Refractive index of 1.55 corresponds to chrisotile of serpentine, minerals and refractive indexes of 1.68 and 1.70 correspond to amosite and crocidolite of amphibole minerals.

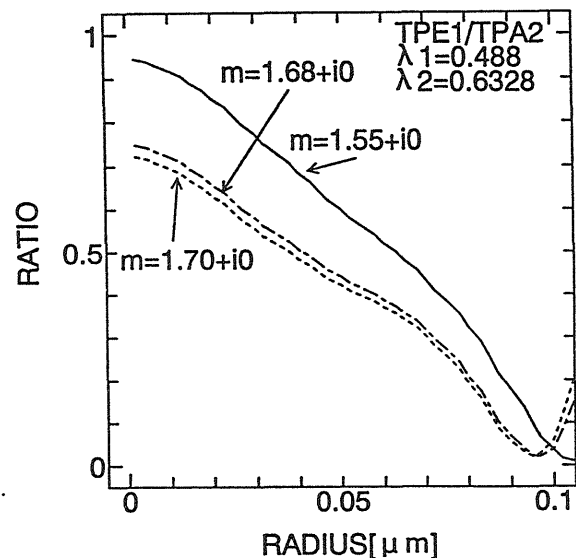


Fig. 3 Ratio of perpendicular to parallel polarization at two wavelengths