

# P 2 3 光散乱による石綿リアルタイムモニタ の開発

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

廣本宣久\*、小暮晋祐\*\*、伊東繁夫\*\*、板部敏和\*

(N. Hiromoto, S. Kogure, S. Ito, 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. The method includes alignment of aerosol by high electric field and detection of two orthogonal polarization of scattering light of normal incident laser by the aerosol. Through computation using the Mie scattering theory, we have found that measurements of polarization at a scattering angle of  $170^\circ$  discriminate between a cylindrical particle and a spherical particle.

## 1. はじめに

アスベスト（石綿）は、珪酸マグネシウム塩を主成分とする天然産の繊維状鉱石であり、紡績性、耐熱性、不燃性等の優れた性質を持っているので、建築材、耐火材、摩擦材等に多量に使用されている。しかし、非常に有用な物質ではあるが、アスベストは早くから石綿肺等の病気を引き起こすことが報告され、また肺癌や悪性の中皮腫を引き起こす発ガン性物質であることが明らかになっている1), 2), 3), 4)。そのため、アスベストは世界各国で厳しく使用を制限され、我国でも労働省により、特定化学物質等障害予防規則の特別管理物質として労働衛生管理が義務づけられ、作業場において2繊維/cc（クロシドライトは0.2繊維/cc）という管理濃度が決められている。更に、環境庁が作業場の敷地境界で10繊維/㎥以下という規制基準を決めて規制が図られている4), 5)。この規制濃度に対し、一般大気環境中での繊維濃度は1繊維/㎥以下と報告されている6)。

## 2. 大気環境中アスベストの計測法と石綿リアルタイムモニターの開発

現在行われているアスベスト濃度の測定法のうち代表的なものは、位相差顕微鏡（PCM）法、透過型電子顕微鏡（TEM）法、X線回折分析（XRD）法および繊維状エアロゾルモニター（FAM）法である6)。PCM法は、現在アスベスト濃度測定法の標準的方法とされているもので、サンプルの採取方法、試料の作成方法、繊維の計数法が国際石綿協会（AIA）7)、環境庁大気保全局8)、日本作業環境測定協会9)等によって、マニュアル化されて決められている。この方法の欠点は、リアルタイム測定でないこと、測定者による計数値のばらつきや変動によって精度が決ってしまうことである10)。上に述べた方法のうち、リアルタイム測定ができるのは、FAM法11)のみでありアモサイトに対してこう正がなされていて、PCM法と一対一の関係を与えることができる。しかし、工業用として最も多量に使用されているクリソタイルでは直線性の対応が乏しくなるという問題がある12)。そのため、リアルタイム性があり、かつ種類の異なる石綿に対してもよい精度で計数できる測定法の開発が期待されている。

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・モニターの開発を計画し、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

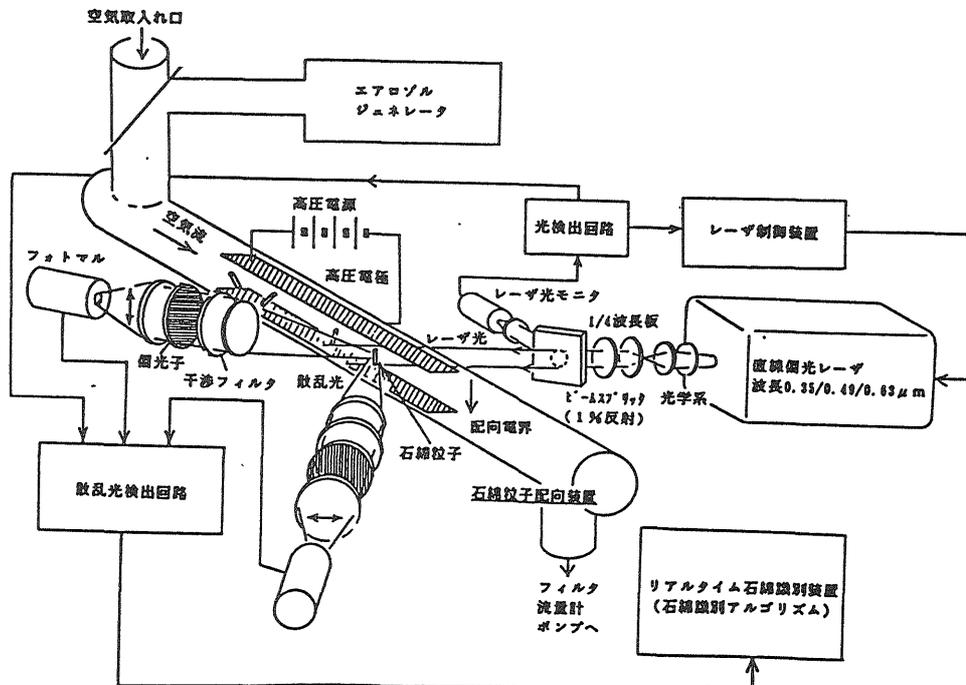


図1. 石綿リアルタイムモニターの概念図

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。このため、図1に示すような、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、レーザー光の散乱を特定の散乱角で偏向を含めて測定する装置を開発することを目指している。

### 3. ミー散乱による円柱状粒子と球状粒子の識別法の検討

石綿は、蛇紋石系と角閃石系に分けられる<sup>13)</sup>。蛇紋石系のクリソタイルは一本の繊維の径が15～40nmと細く、繊維の長さは長く絹状で絡み合って束になっている。また、一本の繊維は珪酸塩鞘の筒型をしていて、中空である。角閃石系は径が80～100nmと比較的太く、長さは一般に短く、刺状である。これらは、不規則形状粒子ではあるが、径に比べて繊維の長さが非常に長いという特性を有している。このため、高電場によって電場方向に配向させることができ、また光散乱特性も丸い形状の粒子とは著しく異なることが期待される。

ここでは、石綿状粒子を円柱と仮定し、ミー散乱理論に基づく計算プログラム<sup>15)</sup>を用いて、円柱と球による光散乱の散乱振幅マトリックスを計算し、光散乱特性の相違から両者が識別可能となり得る観測角(散乱角)を探すことを試みた。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1.70程度である<sup>14)</sup>ので、粒子は均質で屈折率 $m = 1.55 + i0$ とした。また、周囲の媒質は一樣で屈折率が1、入射光は無偏向で波長 $\lambda = 0.6\mu\text{m}$ 、円柱は無限長円柱とし垂直入射とした。粒子半径は円柱が $0.0025\mu\text{m}$ から $1.5\mu\text{m}$ までとし、球の半径を円柱半径の2倍の $0.005\mu\text{m}$ から $3\mu\text{m}$ まで変化させた。

### 4. 偏向度(PoI)の散乱角(θ)及び粒子半径(r)への依存性の検討

図2に、偏光度(PoI)の散乱角(θ)依存性を示す。円柱、球ともに半径rの増加にともなってθに対してPoIの変化量が大きく変動が急激になる。ここで、偏光度(PoI)は、 $|T_1|^2$ 、 $|T_2|^2$ を散乱面に垂直、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、次式で定義される。

$$P_{o1} = \frac{|T_1|^2 - |T_2|^2}{|T_1|^2 + |T_2|^2}$$

図2から、大きさの異なる粒子についても、偏向特性にはっきりとした違いがあり、円柱と球の判別が可能である観測角（散乱角）を検討する。（a）、（b）の図を比較すると、大きな偏光特性の相違は、球による散乱では0度及び180度で $P_{o1}$ が必ず0となるのに対して、円柱による散乱では必ずしも0とはならないということである。特に後方散乱付近（ $\theta = 170^\circ$ ）では球（a）の $P_{o1}$ がほぼ0からマイナスになるのに対して、円柱（b）の $P_{o1}$ は常にプラスとなりはっきりとした差があるのが分かる。さらに、この特性は半径がある程度の変化に対してならば変わらないといえる。

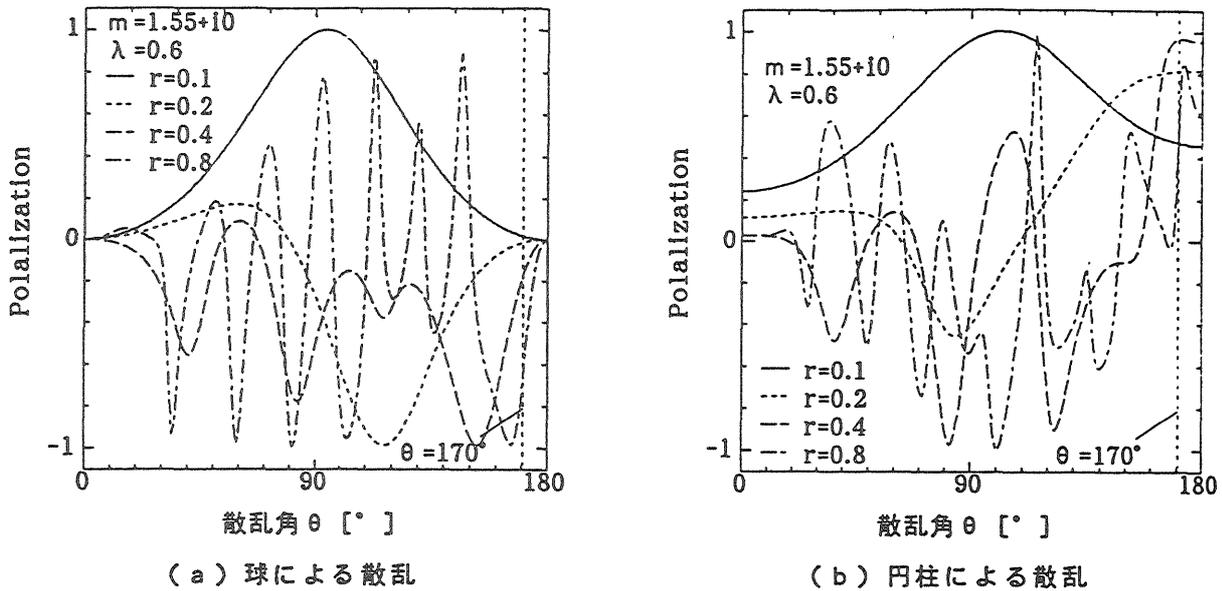


図2. 偏向度（ $P_{o1}$ ）の散乱角（ $\theta$ ）依存性

### 5. 散乱角170度での偏向度（ $P_{o1}$ ）の粒子半径（ $r$ ）への依存性の検討

図3に特定の散乱角（ $90^\circ$ ， $170^\circ$ ）での粒子の半径（ $r$ ）に対する偏光度（ $P_{o1}$ ）の依存性を示した。ここでは、球の半径を円柱の2倍にスケールして示している。図3（a）は、散乱角を90度にとったものであるが、 $r$ の微小変化に対する $P_{o1}$ の変化が大きく、球と円柱にはっきりとした差が認められない。また、10度、30度、60度、90度、120度、150度の散乱角についても同様に判別は難しいことがわかった。ところが、図3（b）に示すように散乱角170度では、 $r$ の微小変化に対する偏向度の変化量が小さく、円柱半径が $0.6 \mu\text{m}$ 以下、球半径が $1.2 \mu\text{m}$ 以下では、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、円柱が半径 $r = 0.6 \mu\text{m}$ 程度以下（球半径は $r = 1.2 \mu\text{m}$ 程度以下）ならば、容易に円柱と球との区別が可能である。

また、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、

$$\text{球} : P_{o1} = (1 - \cos \theta) / (1 + \cos \theta) \approx 0.015 \quad (\theta = 170^\circ)$$

$$\begin{aligned} \text{円柱} : P_{o1} &= (|m+1|^2 - 4 \times \cos \theta) / (|m+1|^2 + 4 \times \cos \theta) \\ &\approx 0.25 \quad (m = 1.55, \theta = 170^\circ) \end{aligned}$$

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  $170^\circ$  での偏光度の計測によって、球と無限円柱の区別が可能であるといえる。

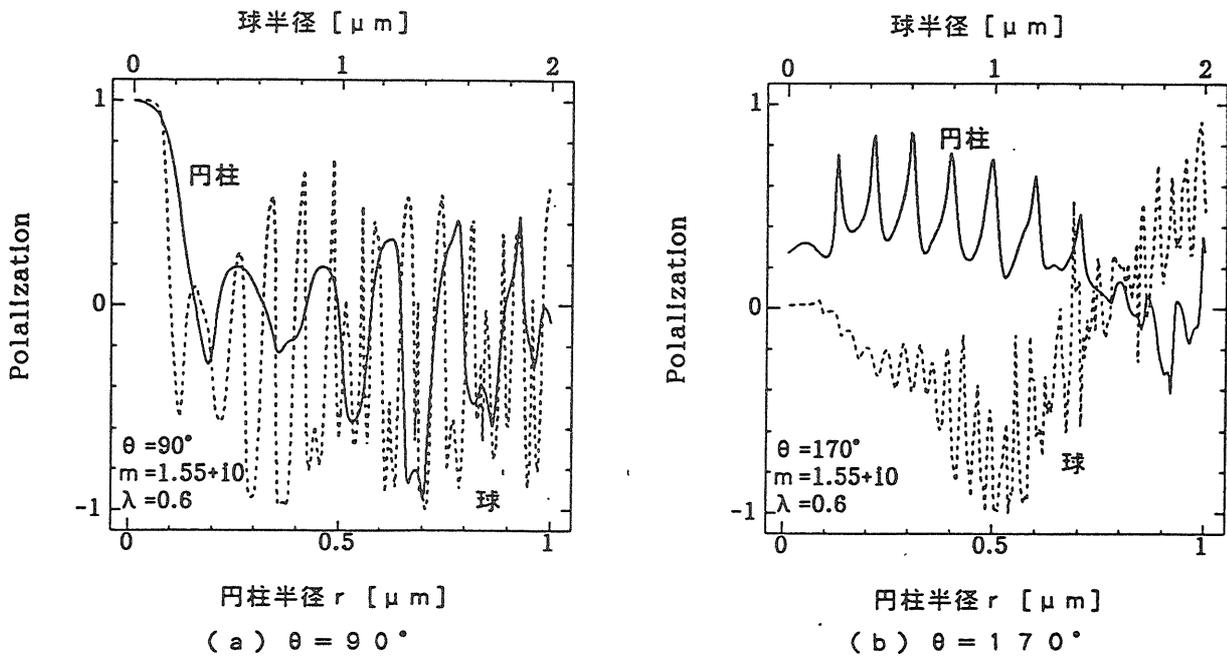


図3. 偏向度 (Pol) の粒子半径 ( $r$ ) 依存性

#### 参 考 文 献

- 1) Mossman, B. T., Bignon, J., Corn, M., Seaton, A., and Gee, J. B. L., "Asbestos: Scientific Developments and Implications for Public Policy", Science Vol. 247, p. 294 (1990).
- 2) 本間克典, "アスベストに関する産業衛生問題", エアロゾル研究 Vol. 1, No. 4 (1986).
- 3) 木村菊二, "アスベストの危険性とその評価", 安全工学 Vol. 27, No. 3 (1988).
- 4) 名古屋俊士, "現代「アスベスト」事情", アスベストの計数分析に係る実務講習会テキスト, p. 159 (1992).
- 5) 本間克典, "アスベスト問題に関する行政対応について", セミナー「アスベスト粒子の濃度測定」テキスト (エアロゾル研究協議会), p. 35 (1989).
- 6) 本間克典, "環境中のアスベスト測定法", 産業公害 Vol. 24, No. 4 (1988).
- 7) Asbestos International Association (AIA), "Reference Method for the Determination of Airborne Asbestos Fiber Concentrations at Workplaces by Light Microscope (Membrane Filter Method)", AIA Health and Safety Publication (1979).
- 8) 環境庁大気保全局大気規制課, "アスベストモニタリングマニュアル", (1987).
- 9) 日本作業環境測定協会, "作業環境測定ガイドブック1-鉱物性粉塵関係-", p. 111 (1983).
- 10) 本間克典, "アスベスト濃度測定用位相差顕微鏡 (PCM) 法の精度", セミナー「アスベスト粒子の濃度測定」テキスト (エアロゾル研究協議会), p. 1 (1989).
- 11) Lillienfeld, P., "Asbestos Monitoring In the U.S.: A Technical Review", セミナー「アスベスト粒子の濃度測定」テキスト (エアロゾル研究協議会), p. 11 (1989).
- 12) 小西淑人, 高田 勲, "繊維状エアロゾルモニターによる大気中アスベストの測定", 公害と対策 Vol. 25, No. 10 (1989).
- 13) 荒木 峻, 沼田 眞, 和田 攻編, 「環境科学辞典」, 東京化学同人 (1985).
- 14) 神山宣彦, 労働衛生 Vol. 29, No. 2 (1988).
- 15) Creig F. Bohren and Donald R. Huffman, "Absorption and Scattering of Light by Small Particles", A Wiley-Interscience Publication (New York) (1983).