

にプレパラートをブランク位置（試料が何もない位置）にして視野が最も暗くなるようポラライザを回転させる。さらに接眼レンズをスリーブから抜き、対物レンズの瞳面を見てアイソジャイアの十字の交点が瞳面の中心にあることを確認する。

⑤ グレイティクルについて

通常、位相差／偏光顕微鏡には接眼レンズに偏光顕微鏡観察用の十字線が固定されている。位相差顕微鏡での繊維計数には $300\mu\text{m}$ の円のあるグレイティクル（位相差顕微鏡用グレイティクル）が必要なので同グレイティクルを装着した接眼レンズを用意し偏光顕微鏡用接眼レンズと交換して繊維計数を行なう。位相差顕微鏡用グレイティクルの十字線を水平・垂直の方位に合わせるには、直消光であることが既知の結晶（例えばアモサイト繊維）を水平または垂直の消光位に置きその繊維の伸長方向にグレイティクルの十字線を合わせるとよい。接眼レンズが固定出来ず回転しやすい場合は十字線の方位を合わせたあと粘着テープで本体に固定する。

3) 位相差法による繊維の計数と偏光法による同定

本項は、まず位相差顕微鏡で繊維を確認した後、偏光顕微鏡で同定を行うという操作を繰り返すことで繊維の計数と同定を行う一連の手法を解説したものである。

① 計数手順（図 2 1 の位相差／偏光顕微鏡概略図を参照）

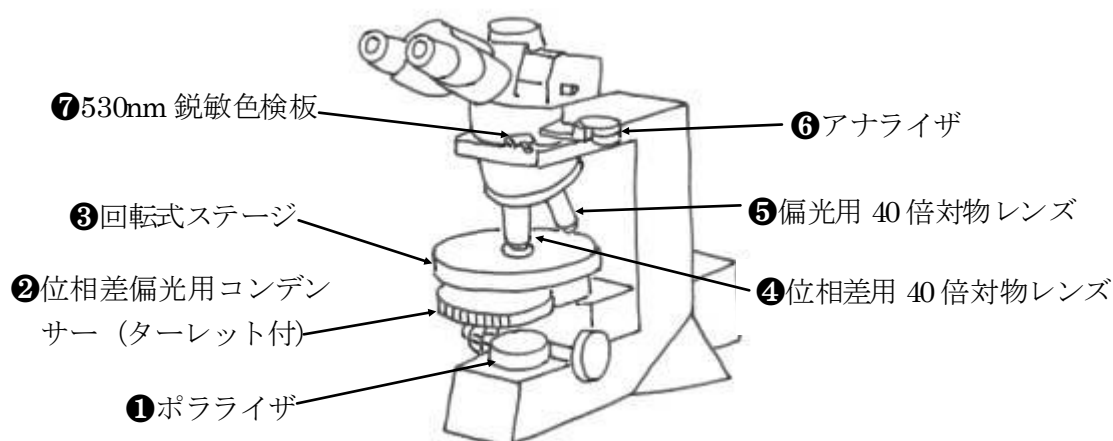
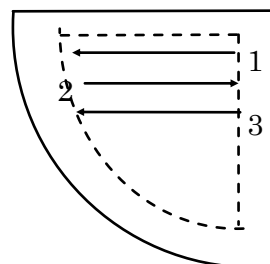


図. 2 1 偏光顕微鏡をベースにした位相差／偏光顕微鏡の概略図

- (a) アナライザ（図 2 1 の⑥）を光路からはずしステージ（③）に標本を載せて、まず位相差法で繊維を計数する。対物レンズを位相差用 40 倍（④）にしてコンデンサターレット（②）を 40 倍対物レンズに対応する位置（通常「PH2」）にする。焦点を捕集面に合わせて繊維の計数を始める。なお、グリーンフィルターを使用するのが望ましい。
- (b) 繊維計数ルールは、(1)長さ： $\geq 5\mu\text{m}$ 、(2)径： $< 3\mu\text{m}$ 、(3)アスペクト比： ≥ 3 、を満たす繊維を計数することとする。また事前に確認した除去対象アスベストの種類に関する情報（「3.1.4 捕集にあたっての注意事項」参照）をもとに繊維の形態についても留意しながら計数す



る。

- (c) グレイティクルの $300\mu\text{m}$ の円内の繊維を計数する。なお、計数は前頁の図のような視野の移動によって行う。フィルター切断線及び粒子付着領域の外縁から 1mm 以内は計数しないこととする。図のような視野の移動を行うためにはスライドガラスの側面またはフィルター切断線を東西方向に方位させなければならない。

視野内で切断線を東西方向に方位させた状態にしてステージ (③) 外縁の目盛で角度を確認しておく、ステージを回転させた時でもスライドガラスの方位を元の状態に戻すことができる。

- (d) 計数視野数は 50 視野とする。なお、50 視野を計数したときの検出下限値は、 0.9 f/L となる。

② 繊維の種類の同定

位相差法で計数すべき繊維をみつける度に偏光法によってその繊維についてアスベスト・非アスベストの判別を行う。偏光法によって観測出来る繊維の光学的性質については別添 1 に示す。アスベストの種類については、形態と光学的性質の観測からクリソタイルと角閃石系アスベストの分別が可能で、光学的性質の観測からクロシドライトを他の角閃石と分別することが可能である。

- (a) 位相差法で計数すべき繊維が見つかりと繊維の位置を記録紙 (別添 2 の 1 に例示) に書き込む。次に視野はそのまま、角閃石系アスベストのような直線状の繊維の場合は斜め 45 度の方位 (右上がり・左上がりのどちらでもよい。アスベストの場合この位置を対角位という) になるようにステージ (③) を回転させる。クリソタイルのように曲率を持っている繊維は繊維の一部が斜めになるように方位させる。対物レンズの芯出しが正確に出来ていれば繊維を視野の中心に移動させなくても偏光法の観察が可能である。

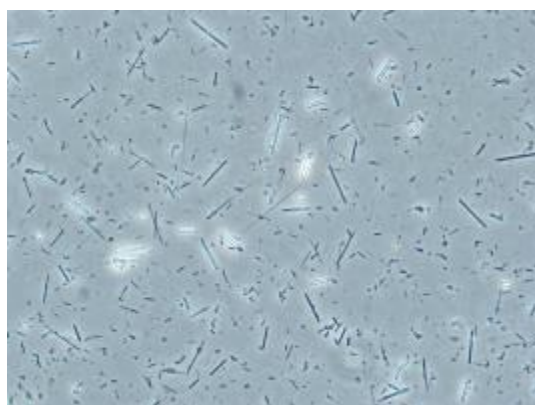


写真 1. アモサイトの位相差像

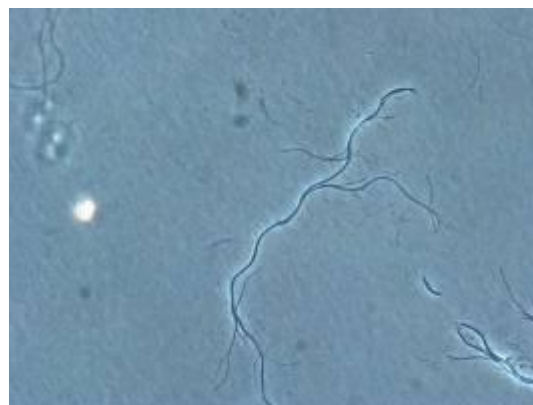


写真 2. クリソタイルの位相差像

- (b) 続いて偏光法による観測を行うためターレット (②) を明視野の状態 (目盛「0」) にして対物レンズを偏光用 40 倍 (⑤) に変え、角度目盛を「0」に合わせたアナライザ (⑥) を光路に入れて直交ニコルにする。「(a)」における対象繊維がアスベストまたは結晶性粒子なら繊維は灰色～白の干渉色を示す。ステージを回転させて繊維の明暗の変化を監察する。ロックウールやグラスウール等の非結晶質なら繊維は明るくならないが、結晶性の付着粒子によ

り一部が明るくなる場合があるので注意が必要である。また高分子繊維も非結晶質であるが複屈折の性質があるため明るくなるので注意が必要である。なお、直交ニコルにした時視野が暗すぎると繊維が判別出来ないのでコンデンサ絞り（②の下部にある）を調節すると背景が明るくなり繊維が見やすい状態になる。「繊維が見やすい状態」には個人差があるので背景と繊維とのコントラストを分析者がもっとも見やすい状態にしたのちに繊維にピントを合わせる。

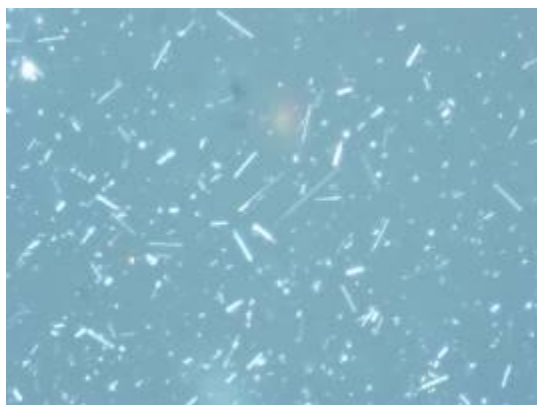


写真 3. 「写真 1.」の直交ニコル像

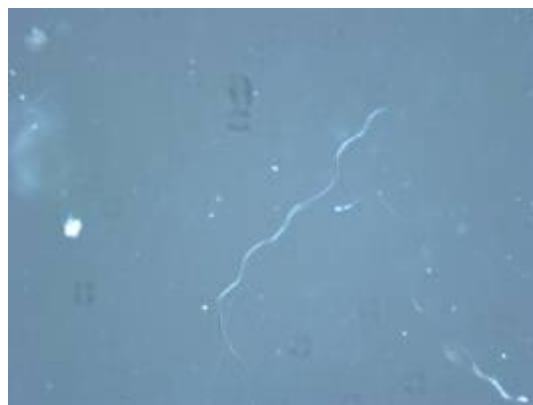


写真 4. 「写真 2.」の直交ニコル像

- (c) 直交ニコルの状態で鋭敏色検板（⑦）を光路に入れると、先に直消光を確認した繊維の伸長性の正負（「別添 1」参照）が確認出来る。バルク状では 6 種のアスベストのうちクロシドライトは伸長性が負でそれ以外は伸長性が正であるが、フィルター上ではクロシドライトも伸長性が正になることがあるので注意が必要である。
- (d) クロシドライトを他の角閃石系アスベストと分別する方法として、直交ニコルの状態からアナライザを反時計方向に 5 度ずらせて繊維の多色性を調べるという方法がある（別添 1 参照）。



写真 5. クロシドライトの多色性。右上がりの対角位では明るくなるが、左上がりの対角位では暗青色になる。

- (e) アスベスト・非アスベストの判別は、上記に示した繊維の光学的特性の観測及び繊維の形態観察から総合的に判定する。

- (f) 繊維を計数した視野番号、その視野の計数繊維数、及びそれぞれの繊維の分別判定の根拠となった光学的性質と判定結果（アスベストと判定した場合は「1 本」と記入し、種類についても記入）を記録シート（別添 2 の 2 に例示）に記入する。
- (g) 偏光法による繊維の観測のためステージの回転や繊維の視野中心への移動を行った場合は、視野を元の状態に戻さなければならない。
- (h) 「(a)」の視野の繊維の種類の同定が終わるとアナライザ(⑥)を光路からはずしコンデンサターレット(②)を「PH2」にし対物レンズを位相差用 40 倍(④)にする。繊維の位置を書き込んだ記録紙を見て視野を元の状態に戻し、位相差顕微鏡による繊維の計数を次の視野について行う。

(3) アスベスト繊維数濃度の算出

アスベスト繊維数濃度は次式によって求める。

$$F_{as} = A \times N_{as} / a \times n \times V \cdots \cdots (i)$$

上式において F_{as} : アスベスト繊維数濃度 (f/L)

A : メンブランフィルターの有効面積 (mm²)

N_{as} : 位相差法で計数した繊維のうち偏光法でアスベストと判定した繊維数 (本)

a : 計数視野 (グレイティクルの円) の面積 (mm²)

n : 計数した視野数

V : 吸引空気量 (L)

(4) 検出下限値

① (i) 式から計算した検出下限値

50 視野計数した時 1 本のアスベスト繊維が検出された場合を濃度の検出下限とすると、検出下限値 E は (i) 式に $A=962\text{mm}^2$ 、 $a=0.071\text{mm}^2$ 、 $n=50$ 、 $V=300\text{L}$ 、 $N_{as}=1$ を代入して得られる ; $E=0.9 f / L$ 。

別添 1. 偏光顕微鏡によって観測出来る繊維の光学的性質

偏光顕微鏡によって観察出来るアスベストと非アスベスト繊維の性状について以下に示す。

・多色性 (Pleochroism)

アスベストのうちクリソタイル、アモサイト、トレモライト、及びアンソフィライトはポラライザ (下方の偏光板) だけでの偏光による観察 (単ニコル観察) ではほとんど無色である。クロシドライトは本来強い光吸収特性を持っており、試料台を回転させて繊維を視野中で水平方向に方位させると暗い青色 (dark blue) を呈し、垂直方向に方位させると淡い青灰色 (pale blue-grey) を呈する。アクチノライトは水平方向に方位させると淡い緑色 (pale green) を呈する。しかし、フィルター中のアスベスト (空気サンプル) は繊維径が数ミクロン以下のものが多いためそれらの特性を観察することは困難である。但しクロシドライトに対してはもっと感度の良い検査法がある。アナライザ (上方の偏光板) を挿入して、さらにアナライザの角度を垂直方向から反時計

回りに 5 度ずらす。その状態でステージを回転させて繊維を右上がりの対角位（視野中の方位を上を北として表わすと「北東—南西」の方位）にすると繊維は黄色を呈する。次に繊維を左上がりの対角位（「北西—南東」の方位）に回転させると繊維は暗い青色を呈する。このような色の变化を示す繊維を「多色性がある」という。アモサイト・トレモライトはどちらの対角位でも黄色のまま多色性は示さないのでクロシドライトとアモサイト・トレモライトとの分別が可能である。

・複屈折

物質内の光学的性質が方向にかかわらず同じである場合その物質は光学的に等方であるという。ロックウール・グラスウール等の非結晶質の物質は光学的等方体である。一方、方向によって光の速度、屈折率、吸収等の光学的性質が違ふ物質もあり、これらは光学的異方体と呼ぶ。アスベストは光学的異方体である。光学的異方体の中に光が入ると速度の異なる 2 つの偏光に分かれて進む。この現象を複屈折という。2 つの光には速度の差があるので物質を通過する際に光路差が生じる。これをレターデーションと呼ぶ。レターデーションの大きさは光学的異方体の厚さと 2 つの屈折率の差の大きさの積によって決まり、長さの単位（通常 nm）で表わされる。また 2 つの光によって生じる干渉もレターデーションの大きさによって決まる。ミシェル・レヴィ干渉色図表はレターデーションの大きさと干渉色の関係を示している。光学的異方体の干渉色は直交ニコル（ポラライザとアナライザを光路に入れた状態）での観察でわかる。空気中のアスベスト繊維や他の鉱物繊維は径が細いため干渉波は灰色～白を呈する。ステージを 360 度回転させて繊維の方向を変えると繊維は 4 回明暗の変化を繰り返して灰色～白の色合いを呈する。

光学的等方体のロックウールやグラスウールでは、ポラライザによって一方向に偏光された入射光（視野の水平方向に振動する光）は物体内でも同じ振動をするだけである。顕微鏡上部のアナライザでは視野の垂直方向に振動する光だけが通過するので、光学的等方体を通過した光はカットされ物体がどの方向を向いても暗いままである。この性質を利用してロックウール・グラスウールの判別が可能である。

・消光角

クリソタイル、アモサイト、クロシドライト及びアンソフィライトは直消光で、トレモライト及びアクチノライトは直消光もしくは直消光に近い（直消光から 5 度以内）。繊維状でない蛇紋石または角閃石のへき開粒子は斜消光を示す。5 度以上の斜消光を示す繊維はアスベストではない^{※9}。但し、アモサイト、クロシドライト、トレモライト、アクチノライト等単斜晶系のへき開粒子はある特定の結晶面（{100} 面）を下にして方位した場合直消光を示すので注意が必要である。また斜方晶系のアンソフィライトはアスベストもへき開粒子も直消光を示す。石膏とワラストナイトは斜消光である。

・伸長性の正負

繊維の伸長方向の屈折率が径方向の屈折率より大きい場合「伸長性が正」という（その逆は「伸長性が負」）。クロシドライトは伸長性：負で、それ以外のアスベストは伸長性：正である^{※10}。伸長性の正負は顕微鏡上部の「鋭敏色検板」を挿入して観測する。

アスベスト代替品であるワラストナイトは方位によって伸長性が変わるので、ワラストナイトが多く捕集されたフィルターでは類似の形態の繊維状粒子が正と負の伸長性を示すことが観察さ

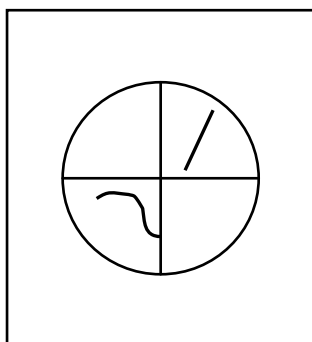
れる。その現象をもとに分別判定が可能になる。

※ 9 : アスベストの消光角について McCrone は、クリソタイル・アンソフィライトについては 0 度、アモサイト・トレモライト・アクチノライトについては 0～4 度、クロシドライトについては 0～5 度としている。(W. C. McCrone 著「ASBESTOS IDENTIFICATION」(1988)等より)

※ 10 : クロシドライトはフィルター上では伸長性が正となることがあるので注意が必要である。
なお、その理由は明らかでない。

別添 2. 記録紙の例

1. 繊維の位置の記録紙の一例



2. 記録シートの一例

測定現場名:			測定日時:		
測定点:			吹き付け材の種類:		
視野番号	視野ごとの繊維数	偏光分析した本数	判定の根拠となった性状	アスベスト本数	アスベストの種類
2	1	1	針状、光学的等方	0	(ロックウール)
5	2	1	針状、直消光、伸長: 正、多色性: 変化なし	1	アモサイト
		1	針状、光学的等方	0	(ロックウール)
7	1	1	針状、直消光、伸長: 正、多色性: 変化あり	1	クロシド
11	1	1	針状、直消光、伸長: 正、多色性: 変化なし	1	アモサイト
15	2	1	針状、斜消光、伸長: 正	0	(ワラストナイト)
		1	針状、光学的等方	0	(ロックウール)
.....					
21	1	1	細い曲線状、直消光、伸長: 正	1	クリソタイル
35	1	1	短冊状、斜消光	0	(石膏)
50	1	1	針状、光学的等方	0	(ロックウール)
合計	50	10	10	4	

注: 視野番号 7 のクロシドライトの「判定の根拠」の欄で伸長性: 正となっていることについては別添 1 の※ 10 を参照のこと。

例2 蛍光顕微鏡法

蛍光顕微鏡法は、蛍光物質で修飾したアスベスト結合タンパク質を用いて、微細なアスベスト繊維を検出する手法として近年開発された方法である。

アスベスト結合タンパク質はクリソタイルに特異的なタンパク質と角閃石系アスベストに広く結合するタンパク質の2種類を利用する。それぞれ蛍光色の違う蛍光物質で修飾すれば、色によってクリソタイルか、角閃石系のアスベストであるかのある程度の識別がつく。ロックウールなどの非アスベスト繊維と識別してクリソタイルおよび角閃石アスベストを同定することが可能である。ただし、存在は少ないもののアスベスト以外の繊維（セラミック繊維、炭化ケイ素ウisker、酸化チタンウisker、ワラストナイト等）にも蛍光タンパクが結合し、角閃石アスベストとの識別が難しい場合があるので注意が必要である。

試料捕集にはメンブランフィルターを使用するため、位相差顕微鏡法と共通のフィルターを利用することができる。フィルターの灰化処理の必要はない。

(1) 測定方法

使用する蛍光顕微鏡は、蛍光フィルターユニットを装備した落射型蛍光顕微鏡を用いる。励起光の光源は水銀ランプ(100W 超高圧水銀ランプ仕様)、あるいはLEDのものを用いる。接眼レンズは倍率 10 倍、対物レンズは開口数 0.65 以上で倍率 40 倍とし、目視計数ではアイピースグレイティクル(大円: $300\mu\text{m}$) を装着したものを用いる。捕集したメンブランフィルターに蛍光タンパク質を滴下することにより、試料を調整する。

1) 試料の前処理 (蛍光染色)

- ① 捕集したメンブランフィルターを切り取り、1/8 片を利用する (11 ページ 2. 3. 2 (1) 2) 項参照)
- ② 切断したフィルターに Pre-wash 液 1、Pre-wash 液 2 を滴下し、続いてアスベスト蛍光染色試薬を滴下する (図 2 2)。

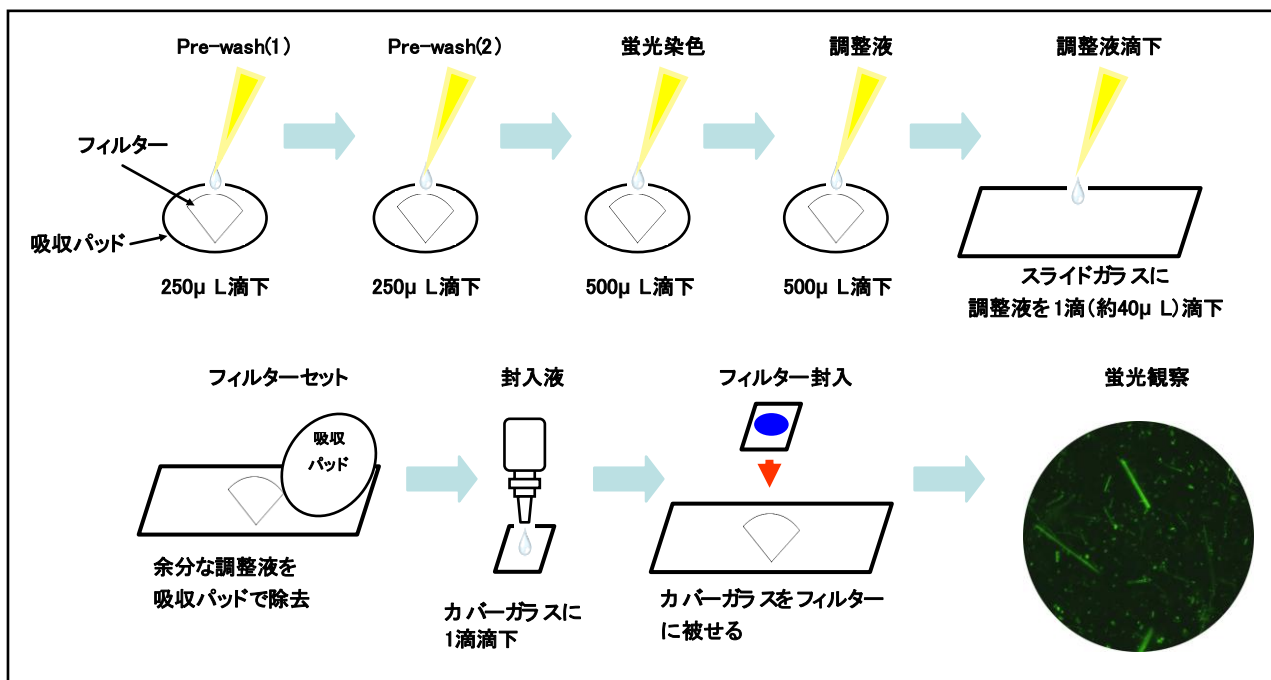


図 2 2 蛍光顕微鏡法の操作方法

- ③ 調整液をフィルター並びにスライドガラスにも滴下し、大気捕集フィルターの捕集面を上にしてスライドガラスに乗せる。
- ④ 封入液をカバーガラスとフィルターの間に挟み込んで試料を作成する。
- ⑤ 蛍光顕微鏡を用い、繊維の計測を行う。

※スライドガラス及びカバーガラスは無蛍光のものが推奨される。

※アスベスト蛍光染色試薬は 2010 年 3 月現在、DS ファーマメディカル社、シリコンバイオ社から販売されている。

(2) アスベストおよび非アスベスト繊維の同定

表3に繊維の蛍光色を示す。自動計数ではデジタルカメラを用いて1視野毎に画像を取得、自動計測ソフトで解析を行い、繊維状粒子の確認及び自動計数を行う。

表3 蛍光タンパク質の特異性と繊維の蛍光色

	繊維の種類	DksA※1 1	GatZ※1 1	色調※1 2
アスベスト繊維	クリソタイル	+	+／－	橙～赤
	クロシドライト	－	+	黄緑～緑
	アモサイト	－	+	黄緑～緑
	アンソフィライト	－	+	黄緑～緑
	トレモライト	－	+	黄緑～緑
アスベスト以外の繊維	ガラスウール	－	－	－
	極細ガラス繊維	－	+	黄緑～緑
	ロックウール	－	－	－
	耐火性繊維（RF1:セラミック、非晶質）	－	－	－
	耐火性繊維（RF2:セラミック、非晶質）	－	－	－
	ケイ酸アルミ繊維（RF3:セラミック、結晶質）	－	+	黄緑～緑
	チタン酸カリウムウイスカー	－	－	－
	炭化ケイ素ウイスカー	+	+	黄緑～緑
	酸化チタンウイスカー	－	+／－	黄緑～緑
	ワラストナイト	－	+	黄緑～緑

※1 1： 使用するアスベスト結合タンパク質はクリソタイルに特異的に結合するDksAと角閃石アスベストに結合するGatZタンパク質の2種類を利用する。例えば、DksAをCy3(550nm付近で励起され、570nm付近の赤色の蛍光を呈する化合物)で修飾したもの（DksA-Cy3）と、GatZをFITC(495nm付近で励起され、520nm付近の緑色の蛍光を呈する化合物)で修飾したもの（GatZ-FITC）を用いれば、クリソタイルは赤色蛍光、角閃石アスベストは緑色蛍光を呈する。また、両アスベストの識別が必要でない場合、DksAとGatZの両方をFITCで修飾したものをを用いてもかまわない。

※1 2： 蛍光フィルターや光源の種類によって、若干色調が変わってくるため、測定前に標準物質を用いて蛍光色を確認しておくことも有効である。標準繊維を用いた場合の画像を参考資料1に示す。感度に関しても蛍光フィルターや光源の種類によって若干変わってくるが、一例を参考資料2に記す。

(3) 繊維の計数

1) 蛍光顕微鏡の調整

蛍光顕微鏡の調整は使用する蛍光顕微鏡の取扱説明書に従い行うこと。

2) 計数の準備

位相差顕微鏡法と同様に、接眼レンズの中にアイピースグレイティクルを装着し、ステージ

に対物測微計をのせて検鏡する（15 ページ 2. 3. 2 (2) 2) 項参照）。

3) 計数対象繊維

長さ $5\mu\text{m}$ 以上、幅（直径） $3\mu\text{m}$ 未満で、かつ長さとの比（アスペクト比）が 3 : 1 以上の繊維状物質を計数の対象とする。

4) 計数の手順

- ① 計数を始める前に水銀ランプ電源装置のメインスイッチを ON にし、水銀ランプを点灯する（点灯後、5～10 分でアーク像が安定する）。このとき、蛍光顕微鏡のシャッターは閉じておく。LED ライトの場合すぐに観察可能。
- ② 二色の蛍光の場合、Dual Band 対応蛍光フィルターユニットを光路に入れた後、倍率を 400 倍にする。
- ③ シャッターを開き、ピントを合わせた後、アイピースグレイティクルの大円（直径 $300\mu\text{m}$ ）を 1 視野の範囲とし、この範囲内に存在する対象繊維を計数する。
- ④ ステージを移動させる（縦横ランダムに移動）。
- ⑤ 再度、シャッターを開きピントを合わせた後、対象繊維を計数する。種々の形態及び集合状態で観察される繊維状粒子の数の判定は、位相差顕微鏡法と同様に行う（17 ページ、2. 3. 2 (1) 5) 参照）。
- ⑥ 検鏡した視野の数が 50 視野になるまで計数を行う。

5) 計数にあたっての注意事項

- ① 蛍光の退色を最小限に留めるため、1 視野あたりの計数は 1 分程度で終了することが望ましい。また計数終了後は直ちにシャッターを閉じた方が望ましい。
- ② 自家蛍光を発する有機繊維やその他の繊維状物質の影響が考えられる場合は、蛍光フィルターユニットを U 励起用（励起波長：330-385nm, 蛍光波長：420nm）などに変更することで確認もできる（FITC は U 励起で励起されない。U 励起で蛍光を発していた場合は自家蛍光であると考えられるので、非アスベストと判定できる）。
- ③ 自家蛍光を有する物質の混入によりバックグラウンドが上昇、コントラストが弱くなり見えにくくなる場合もあるため、この点については十分に注意する必要がある。

(4) 繊維数濃度の算出

前記4) で計数したアスベスト繊維数をもとに、環境大気中に浮遊しているアスベストの繊維数濃度を次式で求める。

$$F_c = A \times N_f / (a \times n \times V)$$

F_c : アスベスト繊維数濃度 (f/L)

A : メンブランフィルターの有効面積 (mm²)

N_f : 蛍光顕微鏡法で計数した繊維数 (f)

a : 視野範囲 (アイピースグレイティクル) の面積 (mm²)

n : 計数した視野数

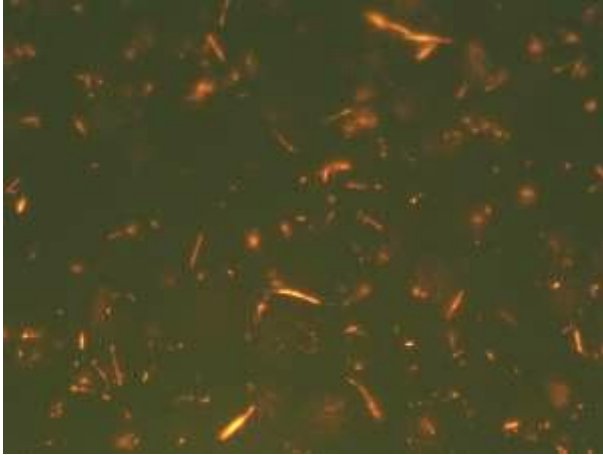
V : 吸引空気量 (L)

(参考資料)

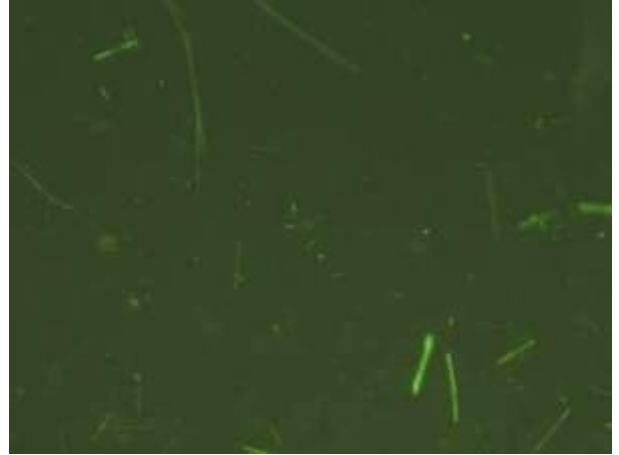
1, 標準繊維の画像

1) アスベスト繊維

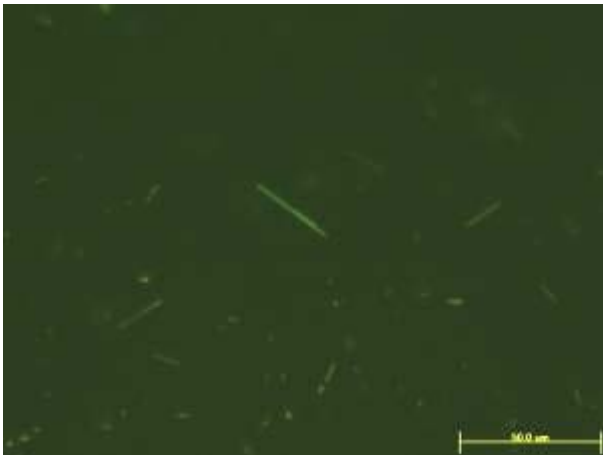
① クリソタイル



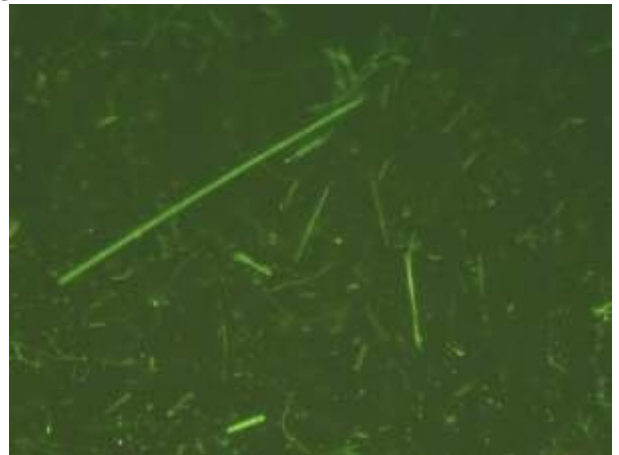
② クロシドライト



③ アモサイト



④ アンソフィライト



⑤ トレモライト



2) アスベスト以外の繊維

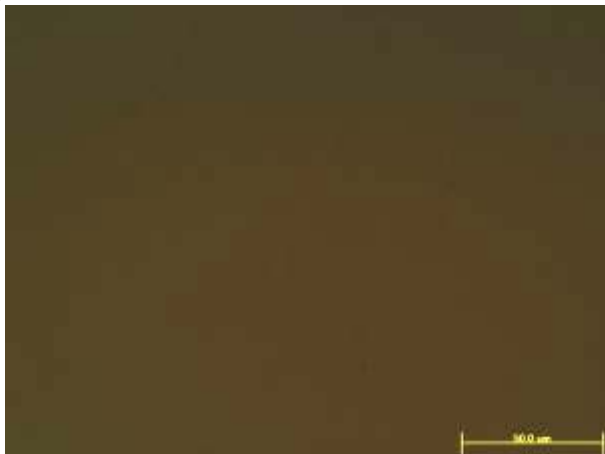
① ガラスウール



② 極細ガラス繊維



③ ロックウール



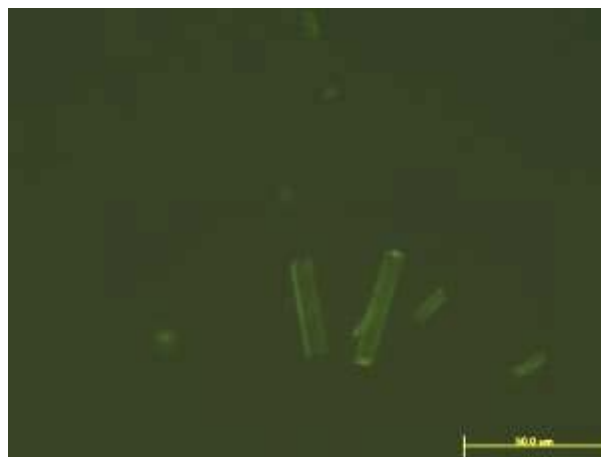
④ 耐火性繊維（RF1:セラミック、非晶質）



⑤ 耐火性繊維（RF2:セラミック、非晶質）



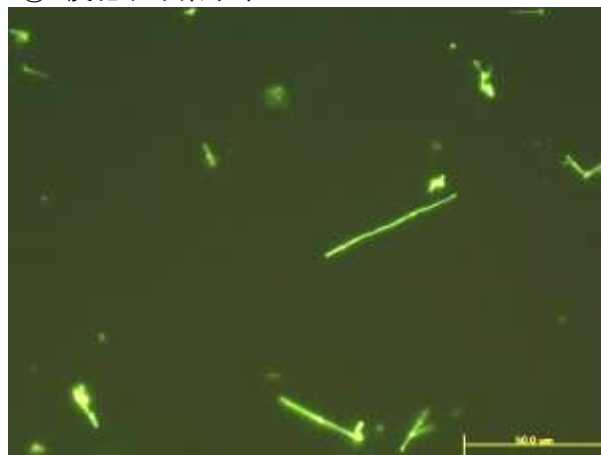
⑥ ケイ酸アルミ繊維（RF3: セラミック、結晶質）



⑦ チタン酸カリウムウイスカー



⑧ 炭化ケイ素ウイスカー



⑨ 酸化チタンウイスカー



⑩ ワラストナイト



2. 蛍光顕微鏡法と光学顕微鏡法の感度比較(標準繊維)

表4に蛍光顕微鏡法と光学顕微鏡法との感度の比較の一例を示す。微細なクリソタイルに関して、光学顕微鏡法による計測よりも感度が高いことが分かる。

表4 蛍光顕微鏡法と光学顕微鏡法の感度比較

(a) クリソタイル※JAWE 111	蛍光 (DksA-Cy3) ※13		光学		蛍光/ 光学※14
	視野数	繊維数(本)	視野数	繊維数(本)	
サンプル 1	17	206	50	73	7.03
	14	201.5	50	112	
サンプル 2	15	205	50	94.5	6.92
	19	210.5	50	82	

(b) アモサイト※JAWE 211	蛍光(GatZ-FITC)		光学		蛍光/ 光学
	視野数	繊維数(本)	視野数	繊維数(本)	
サンプル 1	40	202	38	202	0.96
	37	205	36	202	
サンプル 2	37	205	35	202	0.99
	29	203	30	203	

(c) クロシドライト※JAWE 311	蛍光(GatZ-FITC)		光学		蛍光/ 光学
	視野数	繊維数(本)	視野数	繊維数(本)	
サンプル 1	30	205.5	29	206	0.99
	29	202	30	204	
サンプル 2	29	201.5	30	200.5	1.05
	30	210	31	205	

※13: 電子顕微鏡法との比較から約 80nm のクリソタイル繊維が検出できている。

※14: 鉱物の産地(太さ分布)の違いによって、比較の数値は異なると考えられる。

例 3 可搬型等の分析走査電子顕微鏡法

解体現場等でサンプリングしたサンプルを 1 ～ 2 時間内にアスベストの有無の判定可能な測定ができる可搬型等の分析走査電子顕微鏡（SEM）の条件は、エネルギー分散型 X 線分析装置（EDX）を装着し、加速電圧 15kV 程度を満たし、1 ～ 2 時間程度で位相差顕微鏡で確認ができる繊維と同程度の繊維（概ね長さ 5 μm 以上、幅 0.2 μm 以上 3 μm 未満、アスペクト比 3 以上）の観察及び同定が可能であることとする。

試料の前処理及び試料の計数に関しては、2. 3. 3 の（1）及び（2）に準ずるものとする。

例 4 繊維状粒子自動測定器による測定

繊維状粒子自動測定器は浮遊粒子の中から繊維状粒子だけを識別して、それらの繊維数濃度を算出する計測器として、米国で 1970 年代後半に開発されたものである。この方法はフィルタなどに浮遊状粒子を捕集して計数する方法と異なり、現場の測定場所で簡単に浮遊繊維状粒子の繊維数濃度を知ることができ、建築物等の解体、改修、除去等の工事に伴うアスベスト飛散防止のためのリアルタイム計測や長時間連続監視計測などが可能である。

(1) 繊維状粒子自動測定器の原理

試料空気は吸引ポンプで採気口から内部に導入される。検出部内を通過してサンプリングホルダー、流量センサを通り筐体外部に排気される。検出器には 4 つの電極からなる高圧部があり、高電圧の直流電圧と交流電圧を重ねて加えた電場の中を繊維状粒子が通過すると振動する。繊維状粒子は、検出部内に照射された半導体レーザー光により散乱光を発生し、散乱光は光センサで検出される。繊維状粒子が振動しながら検出部内を通過すると、散乱光強度がパルス状に変化する。一方、非繊維状粒子は検出部内を通過しても電場の振動による散乱光強度の変化はほとんど現れない。散乱光のパルスは繊維状粒子の繊維が長く太いほどピークが高く、パルス面積は繊維の長さが長いほど大きくなる。散乱光パルスとピーク面積の比により、繊維のアスペクト比（長さ/幅）と長さを設定することで、位相差顕微鏡法による計数分析値と一致する繊維を選別して測定できる。

選別された繊維状粒子はリアルタイムに計測され、カウント数として表示される。また、同時にカウント数の積算値と吸引流量の積算流量から総繊維数濃度が算出される。

計測された濃度は位相差顕微鏡法により得られる繊維数濃度と同様に総繊維数濃度であり、必ずしもアスベスト濃度とは一致しない。そのため、計測器にバックアップフィルタが内蔵されている装置であれば、必要に応じて他の分析方法による確認が可能となる。

(2) バックアップフィルタが内蔵されている繊維状粒子自動測定器

現在、わが国で市販されている繊維状粒子自動測定器のうち、バックアップフィルタが内蔵されているものには 4 機種があることが確認されている（機種 A～D とする）。これら 4 機種の共通項目に対する性能の比較表を表 5 に示しておく。

(3) 繊維状粒子自動測定器の較正方法

各機種の較正方法は位相差顕微鏡法（PCM 法）の計数値を基準に較正を行っている。

1) 機種 A の較正方法

本装置は、平成 3～4 年度にかけて当時の環境庁が導入を検討していた米国の MIE 社から市販されていた FM-7400 と同様に、クリソタイルとアモサイトの 2 系統の較正チャンネルを有している。

クリソタイルの 1 次較正には、当時の環境庁の検討会でダストチャンバーに発生させたクリソタイル繊維の長さや太さの分布や形態が、環境大気中に存在するアスベスト繊維に近似できるとして選定された、ジンバブエ共和国産のクリソタイルを粉碎処理したものを使用している。このクリソタイル繊維を内容積約 400 L の専用ダストチャンバーに発生させ、0 ～ 5000 f/L

の範囲で濃度の異なる 35 ～ 50 点の範囲で P C M法との併行測定を 3 ～ 5 回実施し、表示濃度と P C M法によるクリソタイル繊維数濃度の比較から回帰式を計算し、その傾きから係数を求め P C M法の濃度と 1 対 1 になるように補正した機器を基準器としている。2 次較正も同様のクリソタイルを使用して 1 次較正と同様に発生させ、基準器と被検器の併行測定を行い、被検器の表示濃度が基準器の表示濃度と一致するように補正している。

アモサイトの 1 次較正には南アフリカ共和国 Transvaal 州産のアモサイトを粉碎処理したものを使用して、クリソタイルと同様の方法で 1 次較正、2 次較正を行っている。

基準器は日本で保有しており、米国での機器生産に当たっては、日本からの準器を使用して調整し、日本国内で基準器との 1 次、2 次較正を行っている。

2) 機種 B の較正方法

1 次較正用繊維としてアモサイト (JAW E231) を使用し、ダストチャンバーに発生させ、基準器と P C M法との併行測定を行う。

濃度段階は 400 f /L 付近を目安に 1 点測定し、その前後 2 点ずつ計 5 点を P C M法と併行測定して比較する。そこで得られた表示濃度と P C M法によるアモサイト繊維数濃度の比較から回帰式を計算し、その傾きから係数を求め P C M法の濃度と 1 対 1 になるように補正した機器を基準器とする。

次に 2 次較正用繊維として人造鉱物繊維を発生させ、基準器と被検器を同時に併行測定し、そこで得られた基準器の表示濃度と被検器の表示濃度から回帰式を計算し、その傾きから係数を求め基準器の濃度と 1 対 1 になるように補正している。

3) 機種 C の較正方法

1 次較正用繊維としてアモサイト (測定機関から提供してもらった現場試料を使用している。アスベスト濃度は 100%ではなく、他の繊維も混入している可能性あり。) を使用し、ダストチャンバーに発生させ、800f/L 以下の濃度において 30 点～50 点程度、P C M法と表示値の比較測定を行う。そこで得られた表示濃度と P C M法によるアモサイト繊維数濃度の比較から回帰式を計算し、その傾きから係数を求め P C M法の濃度と 1 対 1 になるように補正した機器を基準器とする。

次に 2 次較正用繊維としてチタン酸カリウム (製品名: ティスモ D) をチャンバーに発生させ、500f/L 以下の濃度で 5 点基準器と被検器を同時に併行測定し、そこで得られた基準器の表示濃度と被検器の表示濃度から回帰式を計算し、その傾きから係数を求め基準器の濃度と 1 対 1 になるように補正している。

4) 機種 D の較正方法

1 次較正用繊維としてクリソタイル (JAW E111) を使用し、チャンバーに発生させ、100 f /L 以下の濃度で 2 点測定し、P C M法と表示値の比較測定を行う。そこで得られた表示濃度と P C M法によるアモサイト繊維数濃度の比較から回帰式を計算し、その傾きから係数を求め P C M法の濃度と 1 対 1 になるように補正した機器を基準器とする。

次に 2 次校正用繊維としてグラスウールを使用し、グラスウールを発生させ、基準器と被検器を同時に測定し、基準器の表示値に被検器の表示値を合わせるように反射強度を調整する。

最後に、チャンバー内にクリソタイル（JAWE111）、アモサイト（JAWE121）を別々に発生させて、基準器と被検器を同時に測定し、基準器の表示値に被検器の表示値が合うように反射強度を調整する。

（４）サンプリング（計測）方法

１）測定箇所の設定

測定点は隔離シートによって密閉された解体現場からの粉じん飛散状況を的確に把握・管理するため、粉じん飛散が最も懸念されるセキュリティゾーンの前室入り口近傍及び排気装置（負圧除塵装置）の排気口近傍に設定する。排気口が複数存在した場合は、排気量が最も多い 1 箇所を代表地点として設定する。排気口のダクトが 2 階以上の高さの窓等から出されているような場合は排気口のダクトの直下に設定する。

２）測定装置

繊維状粒子自動測定器による測定には、予めクリソタイル標準繊維で校正され、バックアップとして流路中に白色メンブランフィルター（平均孔径 $0.8\mu\text{m}$ ）が装着できる装置を使用する。

３）捕集時間及び捕集空気量等

原則として先ず除去作業開始前に 30 分間、捕集口を地上 1.5m 以上 2.0m 以内の排出源の方向に向け、吸引流量 $2\text{L}/\text{min}$ で繊維状粒子自動測定器を稼動し、表示された繊維状粒子濃度を記録する。次に除去作業開始直後から 30 分間の連続捕集を行い、表示された繊維状粒子濃度を記録する。

集じん・排気装置（負圧除塵装置）の排気口の測定の場合には、排気口からの風速と繊維状粒子自動測定器の捕集口の面速（ cm/sec ）が等速となる位置で測定を実施する。

（各測定器の捕集口の面速は機種 A、機種 B がそれぞれ $236.2\text{ cm}/\text{sec}$ 、 $42.4\text{ cm}/\text{sec}$ 、機種 C が $38.8\text{ cm}/\text{sec}$ 、機種 D が $58.8\text{ cm}/\text{sec}$ である。）

各測定器で 30 分間（60L）捕集した場合の検出下限濃度は、機種 A が $1.7\text{ f}/\text{L}$ 、機種 B が $1.3\text{ f}/\text{L}$ 、機種 C が $3.3\text{ f}/\text{L}$ 、機種 D が $0.5\text{ f}/\text{L}$ である。

（５）測定結果の取り扱い

測定された繊維状粒子濃度測定結果は次のように記載する。

- １）作業開始前の繊維状粒子濃度測定結果：A f/L
- ２）作業中の繊維状粒子濃度測定結果：B f/L
- ３）作業による繊維状粒子濃度：(B－A) f/L

繊維状粒子自動測定器で測定された濃度（ f/L ）は総繊維数濃度であり、位相差顕微鏡（PCM 法）と同様に、当該繊維状粒子がアスベスト繊維であるか否かの判別は出来ない。そこで、作

業による繊維状粒子濃度が目立った増加傾向を示した場合には、繊維状粒子自動測定器のバックアップフィルターを使用して、電子顕微鏡法（A-SEM, A-TEM）等によって当該繊維がアスベスト繊維か否かの確認分析を実施する。

（６）繊維状粒子自動測定器による測定の留意点

繊維状粒子自動測定器による測定は過去の経験から、位相差顕微鏡法による総繊維濃度よりもやや高い濃度として計測される場合が多い。これは、位相差顕微鏡の場合には繊維の形態を１繊維ごとに確認して計数しているのに対して、繊維状粒子自動測定器の場合は繊維の形態によって発生するパルスの取り扱いにより計測対象の繊維を選別するために、安全側にシフトするような調整が行われているためである。

繊維状粒子自動測定器による測定はリアルタイムで繊維状粒子濃度が把握できるという利点があり、解体現場での隔離シートやセキュリティゾーン、負圧除塵装置の排気口からの飛散等に関する管理を迅速に実施可能となるメリットを有するが、各機器の較正方法の統一や、アスベストのみが存在する作業環境以外の場所における使用における、他の測定方法との相関性の検討など今後さらに検討する課題が残っている。

現在、各機種間での較正方法統一のため、各メーカーが協力して共通の較正方法を構築するため、ジンバブエ共和国産の較正用標準クリソタイルを調製し、その繊維を使用した方法が検討されており、それに基づいた各機種の基準器調整が始まっている。

表 5. 繊維状粒子自動計測器仕様一覧

製造		A 社	B 社	C 社	D 社
型式		機種 A	機種 B	機種 C	機種 D
原理		光散乱方式を使用しファイバーを一列に並べさらに振幅させる動作の組み合わせを誘発させる電場を発生させ、粒子の中から単独に個々のファイバーを検出する。	高電場での粒子振動による繊維状粒子の散乱光検出	FAM-1 の基本原理を使用、ファイバーを高電圧で振動させ、レーザーの散乱パルス波形を解析	He-Ne レーザビーム内を通過する粒子の 170 度後方散乱光を捉え、偏光角度の変化の差で繊維と粒子を識別
長所		繊維状粒子のみを選別して測定可能 キャリブレーションはクリソタイル、アモサイトの 2 系統設定されている	繊維状粒子のみを選別して測定可能	繊維状粒子のみを選別して測定可能	繊維状粒子のみを選別して測定可能 総粉じん個数濃度表示可能
欠点			取り込み試料の一部を検出、流量比で濃度を算出	高温多湿、水厳禁（雨天時屋外等）	精度の高い光学系を使用しているため重量が重い
検出最小長さ		2 μm	5 μm	5 μm（長さ）以上	0.1 μm（直径）× 1 μm（長さ）
最少測定濃度	捕集時間 10 分	3.9 本/L	5 本/L	10 本/L	1.50 本/L
	捕集時間 30 分	1.3 本/L	1.7 本/L	3.3 本/L	0.50 本/L
	捕集時間 60 分	0.7 本/L	0.8 本/L	1.7 本/L	0.25 本/L
	捕集時間 120 分	0.3 本/L	0.4 本/L	0.8 本/L	—
	捕集時間 240 分	0.2 本/L	0.2 本/L	0.4 本/L	0.0625 本/L
	捕集時間 480 分	0.1 本/L	0.1 本/L	0.2 本/L	
最大繊維数濃度		5000 本/L	1000 本/L	1000f/L（9999 カウント）	10000 本/L
捕集流量		2 L/min	2 L/min	2 L/min	2 L/min
検知可能な最小流量		0.02 L/min	0.1 L/min		2 L/min に固定
設定可能な運転時間		1 分～24 時間または連続	9999 時間	分単位で連続まで自由に設定可能	積分時間 1～90 分で設定可能、連続測定回数 1～500 回
記録可能な運転時間		1 分～24 時間	9999 時間	1 件につき 40 時間 99 件まで記録可能	プリンタ出力の場合 同上 コンピュータ出力の場合 無制限
設定時間内での記録項目		年・月・日・時・分、最新繊維数濃度、総繊維数（運転開始から）、平均繊維数濃度（運転開始から）、捕集経過時間、最高繊維数濃度（選択された捕集間隔内での）、繊維濃度又は繊維数のグラフは時間関数として表示	カウント数、繊維状粒子濃度換算値（f/L）、時間（現在時刻、設定・経過・残時間）、吸引流量、各種異常表示	年・月・日・時・分、測定開始時間測定経過時間	測定開始時刻、設定測定時間、測定回数、繊維状粒子計測数、全粒子計測数、繊維状粒子濃度換算値（本/L）、全粒子濃度換算値（本/L）
測定中の繊維数濃度の表示		直近の繊維数濃度	カウント数 繊維状粒子濃度換算値（f/L）	10 分毎の繊維数及び濃度、直近 100 分単位のトータル濃度、総繊維数 総トータル濃度（実稼動時間中）	現在値を 2 回/秒の更新で液晶に表示
データの出力方法		USB（テキストファイル形式）	USB、PS-232C、プリンタ、アラーム	USB ホスト、RS-232C、プリンタ付き	プリンターに印字または RS232C 接続でコンピュータに記録 ※別途専用ソフトウェアが必要
バックアップフィルター		φ25mm メンブランフィルター	φ25mm メンブランフィルター	φ25mm メンブランフィルター	φ25mm メンブランフィルター
電源		100-240VAC、50-60Hz	AC100V	100-240VAC、50-60Hz	AC100V
バッテリー		持続性 4 時間（以上）充電式バッテリー 5～10Ah NiMH	ニッケル水素蓄電池（約 4 時間）	DC12V（約 10 時間稼動）	無
寸法		W36.5cm×D28.2cm×H22.4cm	W38cm×D23cm×H24cm	W446mm×D250mm×H222.8mm	W55cm×D41cm×H18.5cm
重量		7.5Kg（バッテリー含まず）	約 5.2kg	8.0kg（ハードケース 6.5kg、W512mm×D318mm×H331mm）	約 13Kg
設定可能な平均値の間隔		1～60 分	1 分または積算時間	設定不可	
データ記録の間隔		1～60 分	1～999 分	1 分から自由に設定可	1～90 分 1 分単位
アラーム設定有無		有	無	有	無
設定可能なアラーム範囲		TWAPEL（8 時間中）及び STEL（0.5 時間中）	0.1～999.9 f/L（オフコンレタ出力）	自由に設定可	無
アラーム音の大きさ設定		90db（機器から 1m 離れた距離からの測定）	設定不可	内蔵ブザーは変更不可 外部出力端子有り	設定不可
ディスプレイスクリーン		16.3cm TFTLCD、カラータッチスクリーン NEMA4/IP65 規格	タッチパネル式液晶ディスプレイ（バックライト付）	タッチパネル式 TFT5 型カラー液晶ディスプレイ	液晶
コンピュータ		WindowsXP 内蔵、500MHz のプロセッサ付き工業用 PC	通信機能あり	USB 及び RS232 により外部接続 内部専用ソフト	オプション（ソフト込み）
データ記憶容量		2GB（コンパクトフラッシュ）	データ数 5450	1MB	測定結果 500 件
USBポート		USB2.0（×2 ヶ所）	有	有	無（RS232C から変換可能）
捕集口の面速		236.2cm/sec	42.4cm/sec	38.8cm/sec	58.8cm/sec