

光学顕微鏡によるアスベストの分析・同定*

宇野 泰章**

キーワード ①アスベスト ②分散染色 ③偏光顕微鏡 ④屈折率 ⑤浸液

要 旨

アスベストを含む試料を分析し、その鉱物種を同定するために、偏光顕微鏡および分散染色法を併用することにより分析精度を高めることができる。最近普及しつつある分散染色顕微鏡による観察では被検体の屈折率に適合した浸液を用いることにより目的の試料を発色させ、アスベストを検出できる。しかし屈折率の類似した共存物が多い場合は判別が困難な場合も多い。その場合、同じ試料を偏光顕微鏡で観察し、複屈折性の有無、消光角、伸張性の正負、ベッケ線観察などを行えば、アスベストの判別・同定がより確実になることを事例について示した。

1. はじめに

アスベストは古くて新しい問題である。最近1年余りアスベスト問題が社会的に関心を集めているが、わが国のアスベスト対策は欧米に比べて20年以上遅れており、分析測定技術も検討課題が山積している。欧米ではすでに1970年代にアスベストの危険性が社会的に認識され、工業材料への使用が抑制されたが、わが国では「管理して利用する」という発想のもとに使用が続けられた。1980年代後半に全国各地の学校など公共施設の建材中のアスベストによる健康障害が問題視され、除去・封じ込めなどの処置がなされたり、一部の製品に対する使用規制がなされたが、多くの素材についてそのまま最近に至るまで使用が続けられた。

このような対策の遅れも一因となって、環境中のアスベストを検出・同定する技術も不十分なまま今日に至っている。筆者は1986年当時在職していた大坂大学で建材中アスベストの飛散が問題になったのを機にアスベストの分析測定に関わりを

持つことになった。当時、欧米では光学顕微鏡を用いた dispersion staining method と呼ばれる方法が普及していたが、わが国の顕微鏡メーカーではこれに対応できる機材が製造されていなかった。そこで筆者は通常の対物レンズに特別な付属品を加えて dispersion staining を行う方法を考案し、またメーカーに位相差法と共通のリング絞りに対応したリング型マスクを備えた分散染色用対物レンズの試作を依頼し、兵庫県公害研究所など他機関とも協力して分析を行った。

欧米では顕微鏡によるアスベスト分析の長い歴史と経験の蓄積がある。わが国でも作業環境での大気中粉塵の分析には位相差顕微鏡が使用されてきたが、これをそのまま一般環境での測定法として応用するには種々の問題がある。最近、厚生労働省のアスベスト測定指針に分散染色法が取り入れられたのを機に急速に分散染色顕微鏡が普及しつつあるが、この分野ではこれまでなじみの薄かった装置であるだけに、それを有効に活用する

*Analysis and Identification of Asbestos by Optical Microscope

**Yasuaki UNO (名古屋工業大学) Ngoya Institute of Technology

ためにはその原理と特色，できることとできないことを十分に理解した上で使用する必要があると思われる。分散染色法は万能ではない。位相差法に比べて解像度が劣るため，細い繊維の識別が難しい。また分散染色法で判定し難いものでも偏光顕微鏡観察では明瞭に区別できる場合も多い。これらを考慮して本稿では分散染色法と偏光観察を併用したアスベスト分析について検討した。

2. アスベストの種類

アスベストは繊維状の形態を有する一群の珪酸塩鉱物に対する名称である。鉱物学的にはこれをさらに蛇紋石族と角閃石族の2つのグループに分けることができる。いずれのグループでも組成または結晶形態の異なる複数の鉱物種を含み，そのうち繊維状の形態を示すもののみをアスベストと称する。蛇紋石族の鉱物の組成は $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ である。これには結晶形態の異なる3種類の鉱物，クリソタイル，アンチゴライト，リザルダイトが含まれるが，このうちクリソタイルのみが繊維状形態を有し，アスベストに該当する。アンチゴライトやリザルダイトは板状または短冊状になるため，アスベストではない。つまりアスベストを判別するためには対象とする素材の化学組成を知るだけでは不十分であり，形態的な観察が欠かせないことがこれからも理解できるであろう。

一方，角閃石族には組成の異なる複数のアスベストが知られている。その代表的なものはアモサイト(茶石綿，鉱物名はグリュネル閃石)とクロシドライト(青石綿，鉱物名はリーベック閃石)であり，ほかに直閃石，カミングトン閃石，アクチノ閃石などがある。角閃石の組成は蛇紋石より複雑で，結晶中のMg, Fe, Alなどの元素により「同型置換」が生ずる結果その組成は一定の範囲で変化し，同種の鉱物でも組成が厳密に一定であるとはいえない¹⁾。

一般に使用されているアスベストはクリソタイルがもっとも多く，アモサイトとクロシドライトがそれに次ぎ，直閃石やカミングトン閃石は少ない。角閃石は安山岩や閃緑岩などの岩石に含まれ，またこれらの岩石は骨材や石材などの建設材料として広く用いられている。これらの岩石中の角閃石は一般に角柱状の結晶塊として産出し，織

維状形態をとらないため，アスベストの定義には該当しない。これらの角閃石をアスベストと混同しないよう注意が必要である。

重金属や，ある種の有機化合物などの有害物質の多くはスペクトル分析やクロマトグラフィーによる機器分析が行われるが，アスベストではこれらの機器分析は適用できない。その理由は上述のアスベストの定義からわかるように，化学組成が同じでも繊維状形態でなければアスベストに該当せず，化学分析のみでは判定できないためである。アスベストの有害性はそれが珪酸塩鉱物であるため，生体内に取り込まれても分解されず，しかも細い繊維であるため，細胞を損傷し続ける点にある。繊維が細いほど，また長いほど有害性が高いというStanton-Pottの仮説に従えば，太い繊維が1本あるより，これがへき開して細い10本の繊維に分裂した場合の方が10倍以上の有害性を有する。

このような理由により，顕微鏡観察により繊維の本数を計測する作業が欠かせないことになる。無機材料学の分野では鉱物成分の定量法としてX線回折法が広く行われているが，アスベストの検出限界は1%程度で，それ以下の存在量では検出できない。またX線回折法では類似の回折パターンを示す鉱物をアスベストと誤認する例も多く，現状では分析法として決定的な方法とは言えない。以上の理由によりアスベストの分析には顕微鏡による判定が不可欠である。

判別・同定には一種類の方法に頼るよりは偏光顕微鏡，位相差顕微鏡，分散染色法など種々の方法を組み合わせて行うことにより一層精度の高い結果が得られる。このうち位相差観察は既に関係者の多くが周知の事項が多いと思われるので，ここでは偏光顕微鏡ならびに分散染色法の問題点を検討した。

3. 偏光顕微鏡による観察

3.1 偏光顕微鏡を使用する意義

偏光顕微鏡は結晶など複屈折を示す物質を観察するのに適し，岩石学や鉱物学の分野で広く使用されている。前述のようにアスベストはいずれも通常の岩石中の鉱物と同様に珪酸塩鉱物であるから，その判別・同定に偏光顕微鏡を有効に活用す

ることができる²⁾。アスベストと混合して、またはその代替品として利用されるロックウール(岩綿)はガラス繊維であるため、偏光顕微鏡では簡単に識別できるし、繊維状石膏の識別も容易である。米国の Mc Crone の分析法には偏光顕微鏡による種々の判別の仕方が詳細に述べられている。

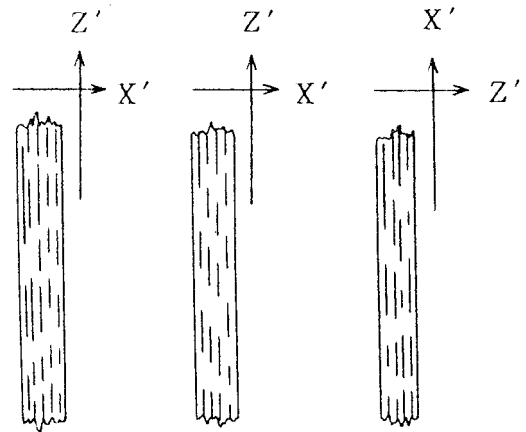
わが国ではアスベストに関する主要な試験・測定機関で偏光顕微鏡が十分活用されてきたとはいえない。その理由は、作業環境では発生源が特定できるため測定はもっぱら繊維状物質が存在するか否かが問題にされ、繊維の鉱物種を同定することには注意が払われなかったこと、また環境関係の検査・測定機関の大気部門の担当者は化学、医学、生物学分野の専門家がも多く、そのため岩石・鉱物分野で使用されている偏光顕微鏡になじみが薄かったことなどが考えられる。

欧米では早くから位相差顕微鏡と並んで偏光顕微鏡による分析が重視されてきた。また後述の分散染色法については相差法と偏光に関する予備知識が必須であり、そのどちらが欠けても分散染色法を十分に使いこなすことは望めない。

3.2 結晶の光学的性質

アスベストなどの結晶質物質に1本の光線を入れると、速度および屈折率の異なる2つの光線に分かれて進む。この現象を複屈折と呼ぶ。普通の光は進行方向に垂直な平面内のあらゆる方向に振動しているが、上のようにして得られた2つの光線はおおの一方方向のみに振動する偏光であり、しかもその振動方向は互いに直交している。結晶光学では結晶中を通る二つの光のうち、低い屈折率(これを n_1 で表す)に対応する光の振動方向を X' とし、高い屈折率(これを n_2 で表す)に対する光の振動方向を Z' で表している。

図1に示すようにアスベストでは繊維軸に平行な方向とそれに垂直な方向の2方向に振動している。クリソタイルやアモサイトでは繊維軸方向の光の屈折率が高い(n_2)ため Z' にあたり、クロシドライトでは繊維軸の方向の光が X' にあたる。繊維の伸張方向の光が Z' になる(屈折率が n_2)場合を伸張性が正であるといい、 X' になる(屈折率が n_1)場合を伸張性が負であるという。アモサイトとクロシドライトは屈折率が比較的近いが、伸張性の正負は逆であるため、この点に着目すれば



クリソタイル アモサイト クロシドライト

図1 主なアスベスト中での光の振動方向(X' は速い光、 Z' は遅い光)

両者を見誤ることはない。

3.3 偏光顕微鏡による鉱物の同定

3.3.1 観察用試料の準備

建材などの固形物質中のアスベストを判定するためには必要に応じて試料を酸や有機溶媒により処理し、加熱または低温灰化処理し、粉末状試料をスライドガラス上で浸液に浸して観察する。また大気中の粉塵の場合は、メンブランフィルター上に採取し、アセトンにより透明化したものをそのまま観察に使用できる

3.3.2 複屈折性の有無の判定

アスベストの代替品としての使用頻度が高い岩綿(ロックウール)は珪酸塩ガラスであり、アスベストのような複屈折を示さない。そのため偏光顕微鏡の直交ニコルの下では光を遠ざけ暗黒に見える。アスベストその他の結晶質物質でも、偶々消光位にある場合は暗黒に見えるが、顕微鏡のステージを回転すればそれぞれの鉱物のレターレーションに応じた干渉色を呈し、明るく見える。これによってロックウールとアスベストを簡単に識別できる。

3.3.3 消光角の測定

アスベストは偏光観察で直消光であるが、繊維状石膏は斜消光で、その消光角は 20° 前後でありアスベストとは著しく異なる³⁾。石膏ボードから採取した粉末を観察したところ、短冊形の細長い鉱物が多数観察された。それらはすべて消光角が

20°前後であり、アスベストではなく、石膏であると判定された。

3.3.4 伸張性の正負の判定

前述のように、クロシドライトは伸張性が負であり、アモサイトは逆に伸張性が正である。直交ニコルでアスベスト繊維を観察すると、細い繊維ではレターデーションが小さいので干渉色はおおむね暗い灰色程度である。ステージを回して1つの繊維を対角位に置き、鋭敏色検板を挿入して色調の変化を見れば、伸張性の正負を判定できる⁴⁾。この方法により建築材料から採取した繊維状試料の判定を行ったところ、伸張性が負であることが判明した。この結果からこの試料はアスベストのうちクロシドライトであることが明らかになった。

3.3.5 ベック線による屈折率の測定

顕微鏡下で鉱物の輪郭に沿って見えるいわゆるベック線を観察して屈折率を測定する手法は岩石学分野ではよく知られている⁵⁾。ここでは屈折率1.550から1.560の間の浸液(0.001間隔)のシリーズを用いて吹きつけ材の繊維を観察し、その屈折率が1.550と1.559であるとの測定結果を得た。このことから繊維はクリソタイルであると確認された。

4. 分散染色法による観察

4.1 分散染色法の歴史

顕微鏡による観察において、アスベストのみを発色させることが可能であれば検出が容易になる。この目的のため考案されたのが分散染色法(dispersion staining method)である。その歴史は古く、Crossmon⁶⁾らにより物理的染色法として考案された。さらにBrown and McCrone⁷⁾によりアスベスト判定のための技法として改良が行われ、その結果は写真を添付したデータ集として刊行されている⁸⁾。

わが国では分散染色観察のできる装置が市販されていなかったが、1987年に宇野が分散染色に使用できる対物レンズの改良を試みた。Dispersion stainingを「分散染色」と称することを同年の粘土科学討論会で提案した⁹⁾。それ以後この用語が一般に用いられている。さらに小坂・山本・宇野ら^{10~12)}により大気中および建設材料中のアスベ

スト分析結果が報告されるようになった。当時、ニコルに依頼して試作したリング絞り型分散染色用対物レンズも、一部の研究者の間で使用されたのみで、最近に至るまで一般に市販されることはなかった。

4.2 分散染色の原理

分散染色法の発色のメカニズムは色素吸着などによる化学的染色ではなく、光学的原理による物理的発色である。一定の屈折率を有する固体物質を、それに近接した屈折率の液体中に浸し、分散染色型対物レンズを装備した顕微鏡で観察すると試料が発色する。正しく発色させるためには試料に適合した浸液を選択する必要がある。発色のメカニズムと浸液の調整法の詳細については宇野の報告¹³⁾に記載してあるので参照されたい。

すべての物質はそれぞれ固有の屈折率を有し、その値は密度、融点などと並んで物質のもっとも基本的な性質である。したがってある特定の物質を判別し同定するためには屈折率の値を手がかりにすることができる。屈折率は光の波長や温度に応じて変化する。そのため、物質の定数表に記載されている屈折率の数値は光の波長589.3nm、23℃(300K)での屈折率で表されている。(古いデータ表では20℃のものもある)。屈折率が光の波長に応じて変化する現象を屈折率分散と呼ぶ。図2に示すように分散の程度は一般に固体より液体の方が大きい。図の太線Cnは固体の屈折率を、細線Ln, Ln'…は液体の屈折率を表す。固体と液体は分散の大きさが違うので、たとえば赤色光について固体と屈折率が一致しても他の波長領域の光では一致しない。分散染色型顕微ではこの屈折率が一致する波長領域の光をカットする仕組みになっている。そのため上の例では赤色光がカットされてその補色である青色に着色して見える。このとき黄色光(D光)については液体の屈折率のほうがわずかに低い。逆に青色領域で固体と液体の屈折率が一致すれば青色光がカットされて赤に着色する。この場合は黄色光については液体の屈折率の方がわずかに高い。アスベストは繊維軸方向とそれに垂直な方向では屈折率が異なるので、黄色光についてその2つの屈折率の中間の値の液体に試料を浸して軸方向と垂直方向の光を観察すると、一方は赤、他方は青に着色する(図3)。

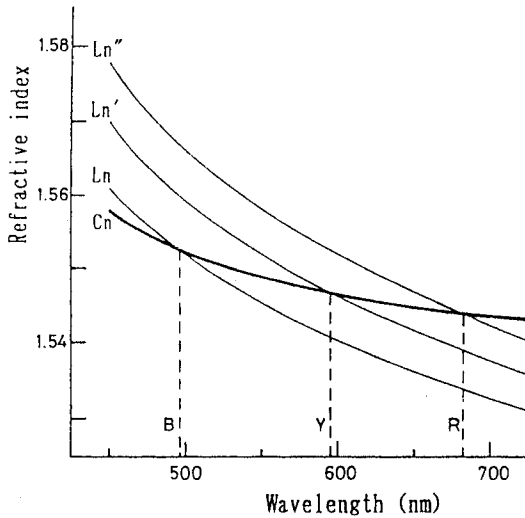


図2 光の波長による屈折率の変化(Cnは固体, Ln, Ln', Ln''は液体の屈折率, Bは青色光, Yは黄色光, Rは赤色光)

これによって屈折率の概略値がわかり、試料の種類を同定できる。

4.3 アスベストの判別

以上の方法により、アスベストの検出を行う際に、次の点に注意が必要である

4.3.1 アスベストの組成には一定の範囲内で変動があり、それに応じて屈折率も変化幅がある。予想されるアスベストにつき、それぞれ数種類の浸液で試みる必要がある。筆者は0.001間隔の液のシリーズを自作して常に準備している。

4.3.2 発色するか否かは固体と液体の屈折率の値に依存している。非アスベストでも屈折率がほぼ同じなら発色する。発色したものがすべてアスベストとは断定できないので、偏光顕微鏡観察など他の方法を合わせて検討するのが望ましい。

土砂の主成分である石英はクリソタイルと屈折率が近似しているため、当然発色する。また繊維状の非アスベストとしてロックウールや繊維状石膏がある。ロックウールは屈折率が製品により違うが、おおむね1.500から1.510程度のもが多く、アスベストと誤認する可能性はほとんどないが、石膏の屈折率 n_2 は高いものでは1.531のものが報告されている¹⁴⁾。一方、クリソタイルの n_1 は低いものでは1.532になり、ほとんど差がない¹⁵⁾。分散染色法だけに頼ると繊維状石膏をアス

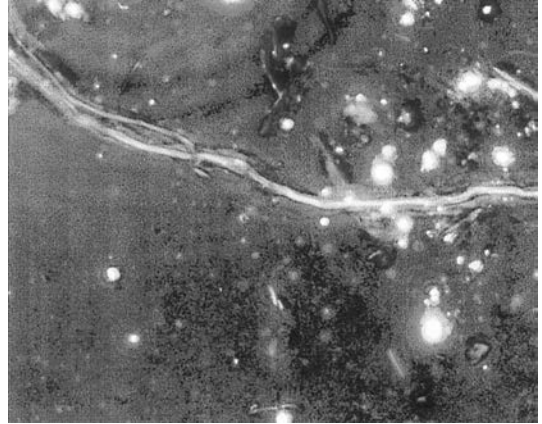


図3 クリソタイルの分散染色写真(偏光子を繊維軸に平行または垂直にすると色調が変化する)

ベストと見誤る危険性はきわめて高い。

4.3.3 発色する非アスベスト物質をアスベストと誤認しないよう注意が必要である。アスベストを観察する場合に、もっとも障害になるのは有機物の繊維である。有機系繊維は大気中にも建設材料中にも至る所に存在し、しかもその屈折率がクリソタイルなどのアスベストに近いものも少なくない。その中には形態的な特徴により識別できるものもあるが、アスベストとの判別が困難な場合も多いので、あらかじめ有機物を分解除去しておくのが望ましい。大気サンプルをフィルターに採取したものはアセトン透明化処理後低温灰化処理し、壁材料、スレート板などの建設材料は電気炉で加熱し、分解処理する必要がある。

5. 顕微鏡観察法の諸問題

分散染色法により試料を正しく発色させるには、各試料に適合した浸液を用いる必要がある。クリソタイルは試料による屈折率の変動は比較的少ないが、角閃石族のアスベストは化学組成、とくにFe-Mg置換により屈折率がかなり変化するので、数種類の浸液を準備しておいた方がよい。丁字油、桂皮油などの原液を混合して自作すれば、市販の液よりはるかに安価である。

どのような分析でも単一の方法に頼るよりは、異なる方法で試験して、総合的に判定する方が確実な結果が得られることは当然である。分散染色法と位相差法の光学系は共通する点が多く、また

従来作業環境中のアスベスト分析は主に位相差法で行われてきたこともあって長年のデータの蓄積がある。したがって分散染色による観察を行うに際しては、同時に位相差法を試みて両者を比較検討すべきであり、さらに偏光顕微鏡観察法を併用すれば前述のようにより確実な判定結果が得られる。それ故最も望ましい顕微鏡システムは偏光顕微鏡に位相差および分散染色レンズを組み込んだものであり、筆者はすでに20年来この方式を用いている。しかし、最近国内で市販されている分散染色顕微鏡はいずれも位相差顕微鏡に分散染色対物レンズを装填したものであり、偏光観察ができるシステムになっていない。

筆者は3年前にA社から分散染色顕微鏡の試作機につき意見を求められ、偏光顕微鏡としての使用が同時にできるシステムにするべきことを主張したが、メーカーの容れるところとならなかったのは残念である。A社の最新の偏光顕微鏡には構造上の問題で、位相差用コンデンサーが装填できない。B社の製品も位相差方式であり、しかも標準仕様に偏光装置が組み込まれていない。インストラクターの説明などでは「分散染色顕微鏡は偏光を使わないのが原則ですからこれで大丈夫です」などと聞かされる。これらのメーカーの製作担当者は分散染色で何ができるのか、ユーザーから何を求められているのかを本当に理解したうえで製作に当たっているのだろうか。今後に残された課題は多いと言わざるを得ない。

—引用文献—

1) Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J.: Rock Forming

- Minerals, Vol. 2, chain silicate 235-351 (1963), Longmanns, London.
- 2) 黒田吉益, 諏訪兼位: 偏光顕微鏡と岩石鉱物. 125-205, (1983) 共立出版, 東京都
- 3) Middleton, A. P.: On the occurrence of fibers of calcium sulphate resembling amphibole asbestos in samples taken for the evaluation of airborne s, Ann. Occup. Hyg., 21, 91-93. (197)
- 4) 坪井誠太郎: 偏光顕微鏡 170-179, (1961) 岩波書店 東京都
- 5) Winchell, A. N. and Winchell, H.: Elements of Optical Mineralogy Part II, 551, (1951), Academic Press, New York
- 6) Crossmon, G. C.: The Dispersion staining method for the selective coloration of tissue. Stain Technology, 24, 61-65, (1949)
- 7) Brown, K. M. and McCrone, W. C.: Dispersion staining Part I. The Microscope, 13, 311-321, (1963)
- 8) McCrone, W. C., Delly, J. G. and Palenik, S. J.: The Particle Atlas (2nd ed.) 97-114, Ann Arbor Science Pub. (1973), Ann Arbor
- 9) 宇野泰章: Dispersion staining 法による粘土鉱物の工学的同定, 第31回粘土科学討論会講演要旨集 61, (1987) 日本粘土学会
- 10) 小坂浩, 山本匡利, 宇野泰章: 分散染色法による吹き付け岩綿中の微量アスベストの検出. 第32回粘土科学討論会講演要旨, 67 (1988) 日本粘土学会
- 11) 山本匡利, 小坂浩, 宇野泰章: 分散染色法を用いた空気中アスベストの測定. 第32回粘土科学討論会講演要旨集 68 (1988) 日本粘土学会
- 12) 山本匡利, 小坂浩, 宇野泰章: 分散染色法による空気中アスベストの同定法. 第40回大気汚染学会講演要旨集 405. (1989) 大気汚染研究協会
- 13) 宇野泰章: 分散染色法によるアスベストの光学的同定. 粘土科学, 32, 42-52, (1992)
- 14) Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J.: Rock Forming Minerals, Vol. 3, sheet silicate, 170-190 (1963), Longmanns, London.
- 15) Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J.: Rock Forming Minerals, Vol. 5, non silicate 203-218 (1963), Longmanns, London.