

## アスベスト濃度測定の精度向上のために\*

小坂 浩\*\*

**キーワード** ①アスベスト ②濃度測定 ③メンブランフィルター法 ④位相差顕微鏡  
⑤精度管理

### 要 旨

気中アスベスト濃度測定の精度について考察した。位相差顕微鏡法は分析者間のデータのばらつきが大きいですが、分析の迅速性が求められるアスベスト除去工事現場での漏えい監視では当面は同法に頼らざるを得ない。精度の向上には、欧米で以前から続けられているような精度管理を日本でも始めなければならない。またアスベスト繊維判定基準も、幾何学的定義に加えて形態学的判定を取り入れることを検討する必要がある。その際、走査型電子顕微鏡による分析を活用すべきである。

### 1. はじめに

昨年6月に全国規模で深刻なアスベスト被害が顕在化したことに伴って、気中アスベスト濃度の実態調査が全国で行なわれるようになった。また「石綿障害予防規則」の施行に伴って、7月以降吹付けアスベスト除去工事現場での濃度の自主測定も以前より増加したように思われる。さらに、アスベスト含有吹付け材のある学校・公共施設などの建物での室内濃度測定も行なわれるようになった。ところが、その室内濃度測定で高濃度事例が各地で報告され、それを検証したところ、多くのケースで顕微鏡観察時の計数ミスが原因で濃度の過大評価があったことが明らかになった。現在アスベスト濃度測定データの信頼性が問われており、その精度向上は喫緊の課題である。そこで、ここでは日本の公定法である位相差顕微鏡法の精度について考えてみたい。

### 2. アスベスト計測技術の現状

#### 2.1 精度が確認できなかった自動計測機

アスベスト濃度測定に一度でも携わったことのある人ならだれでも、精度の高いアスベスト濃度自動測定機が一日も早く開発されることを望んでいるのではないだろうか。十数年前に環境庁(当時)によって「FAM(Fiber Aerosol Monitor)」と呼ばれる自動測定機の導入が検討されたことがあり、当研究センターもそのフィールド試験に参加したことがある<sup>1,2)</sup>。しかし、環境大気の濃度範囲での精度が確認できず導入は見送られた。自動測定機については技術革新が早い時期にあることを期待しつつ、当面は位相差顕微鏡法に頼らざるを得ないと筆者は考えている。

#### 2.2 除去工事現場では簡便で迅速な位相差顕微鏡法

課題の多い位相差顕微鏡法であるが、一方で同法でなければならないという測定環境がある。そ

\*How to Improve Quality of Airborne Asbestos Fiber Counting

\*\*Hiroshi KOSAKA (兵庫県立健康環境科学研究所 大気環境部) The Hyogo Prefectural Institute of Public Health and Environmental Science, Atmospheric Environment Division

これは吹付けアスベスト除去工事現場である。兵庫県では吹付けアスベスト除去工事の届出義務(面積の制限なし)が、大気汚染防止法改正より1年早く1996年に条例で定められた。当センターでは除去工事現場の漏えい監視をその時以来始めたが、97年からは顕微鏡を現場に持ち込んでサンプリング終了後できる限り早くデータを出し、漏えいが認められた場合は工事を中止させるなど濃度測定の実効性を高めるようにしている。除去工事現場の漏えい監視は新たな被害者を出さないためにきわめて重要であり、今のところ「迅速性」では位相差顕微鏡法に勝る方法はない。

### 3. 位相差顕微鏡法の有効性とその限界

#### 3.1 位相差顕微鏡法データの影響評価に対する指標性

メンブランフィルターによるサンプリングと位相差顕微鏡による繊維の計数を組み合わせたアスベスト濃度定量法は、1960年代後半から作業環境での測定法として欧米で使われ始めた。ところでアスベストが原因の疾病は、吸入したアスベスト繊維の長さや太さと関係があると考えられている。図1にLippmann<sup>3)</sup>の提案した指標を示す。位相差顕微鏡では分解能の制約があり、フィルターに捕集されたすべての繊維が観察できるわけではない。もっとも性能のよい顕微鏡を使っても太さおよそ0.25 $\mu\text{m}$ 以下の繊維は判別できないし、長さ5 $\mu\text{m}$ 以下の繊維は計数ルールによってカウントしないことになっている。つまり位相差顕微鏡での計数データは、図1からもわかるように、アスベスト肺・肺がんの原因となる繊維の一部または全部をカバーしているが中皮腫発症に関わると考えられる繊維についてはまったく計数していないことがわかる。したがって位相差顕微鏡による計数データはアスベストばく露の一つの指標であり、その指標性は前記各疾病の発症と計数データに相関があるとの仮定を前提としている。また中皮腫発症に関わる微細繊維の検出は電子顕微鏡に頼らざるを得ない。

#### 3.2 改良が続けられた作業環境での計測法

位相差顕微鏡法では分析者ごとのデータのばらつきが大きいことが知られている<sup>4)</sup>。ばらつきの要因については作業環境計測において多くの検討

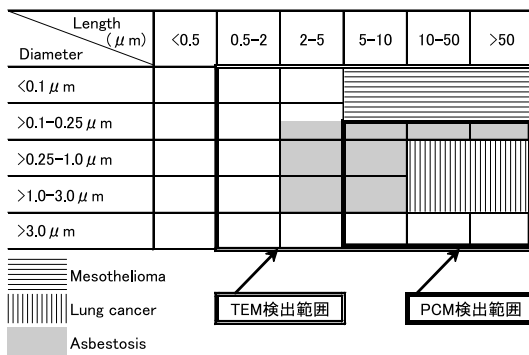


図1 Lippmann<sup>3)</sup>が提案したアスベスト関連疾病と繊維サイズとの関係および位相差顕微鏡・TEMの検出範囲

が加えられてきた。計数視野面積が精度に及ぼす影響については全視野計数よりも直径100 $\mu\text{m}$ の視野内を計数するほうが精度が高いことがわかり、Walton-Beckett グレイティクルが使われるようになった<sup>5)</sup>。HSE/NPL テストスライドが開発され、顕微鏡の分解能と分析者の視力のチェックができるようになった<sup>6)</sup>。そのような改良が加えられても、精度の鍵を握るのはやはりアスベスト繊維の判定基準である。位相差顕微鏡では、「形態」という数値化できない主観的要素の強い情報が得られる。そこでできる限り主観的判断を排してアスベストを判定するために、「長さ5 $\mu\text{m}$ 以上・幅3 $\mu\text{m}$ 以下・アスペクト比(縦・横の比)3:1以上の繊維をアスベストとして計数する」という幾何学的定義が定められた<sup>7)</sup>。アスベストが浮遊していることが前提となる作業環境測定では、捕集された繊維はアスベストである可能性が高いと見なせることから幾何学的定義を機械的に当てはめることができる。さらに、その結果たとえ非アスベスト繊維をアスベストとカウントしてしまっても労働者の健康を守るという安全サイドに立った判断が許される。実際、米国労働安全衛生局(OSHA)の“Sampling and Analytical Methods No.: ID-160, Asbestos in air”には「迷った時はアスベストとして計数せよ(“WHEN IN DOUBT, COUNT.”)」と明記されている。

#### 3.3 作業環境測定と大気環境測定との条件の違い

しかし一般大気環境濃度測定あるいは室内濃度測定においては、合成有機繊維や生物由来繊維状

粒子などの非アスベスト繊維の割合が作業環境よりはるかに多くなるため幾何学的定義を単純に適用すると非アスベスト繊維をアスベストとしてカウントしてしまう危険性が高くなり、結果として冒頭で述べた室内高濃度事例のような濃度の過大評価が生じることになる。室内濃度の過大評価があったある中学校では、在校生・卒業生の希望者に胸部X線検査を実施した。それは不必要なX線被曝であり、濃度の過大評価は「アスベスト被曝の危険」を「X線被曝の危険」に置き換える結果となった。一般環境や室内濃度測定の場合、作業環境のような「安全サイドに立つ(=過小評価を最小限にする)」という考え方は許されないということであり、分析者はよりシビアなアスベスト判定を求められることになる。

**3.4 見直しが必要な「モニタリングマニュアル」法**

ところで環境省の「アスベストモニタリングマニュアル」で定められている計数法(いわゆる公定法)では、日本の産業界で利用された3種のアスベストのうちクリソタイルのみを対象としており、そのため前記の幾何学的定義に加えて生物顕微鏡下で消える繊維をアスベストとする判定基準が入っている。これは透明化されたメンブランフィルターの屈折率が1.50程度でクリソタイルの屈折率に近いことを根拠としているが、浸液のトリアセチンの屈折率は1.43であり、それがメンブランフィルターに浸透した時の屈折率は不明である。したがってクリソタイルの判定に限っても生物顕微鏡下で消える・消えないがアスベスト判定の根拠となるかどうかは疑問があると筆者は考える。さらにアスベスト除去工事現場では角閃石系のアモサイト、クロシドライトの漏れも起こり得る。ちなみに当センターでの約50件の除去工事現場における調査例では図2に示すように半数弱で角閃石系アスベストが使われていた。このような実情に対応するためにも公定法の見直しが早急になされなければならないと考える。

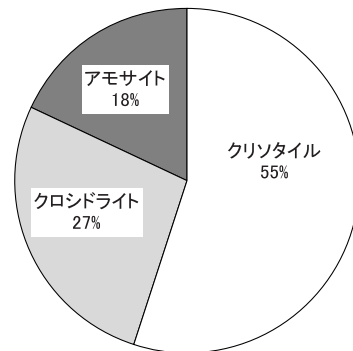
**4. 位相差顕微鏡法の精度向上のために**

**4.1 欧米での精度管理に学ぶ**

それでは「よりシビアなアスベスト判定」を行なうための判定基準を作ることができるのだろう

**表1 英国の6研究機関によるクロスチェックの結果 (Beckett 等<sup>8)</sup>より)**

研究機関	クリソタイル		角閃石系アスベスト		判定基準
	平均との比	研究機関	平均との比	研究機関	
A	1.24				幾何学的定義(geo.def.)
B	0.58	B	0.81		geo.def.+形態上石綿のみ
C	0.82	C	0.84		geo.def.+形態上石綿のみ
D	1.51	D	1.75		幾何学的定義(geo.def.)
E	1.32	E	1.70		5 $\mu$ +3:1+形態上非石綿除外
F	0.86	F	0.49		geo.def.+形態上石綿のみ



**図2 吹付け材中のアスベストの種類の内訳 (兵庫県下で1997年~2004年に行なった49件の除去工事現場での漏れ監視調査より)**

か?そしてその基準を全国のアスベスト分析者が共有できるようになるのだろうか?

Beckett 等<sup>8)</sup>は英国内の6研究機関で同一スライドによるクロスチェックを行なった結果を表1のように報告している。ばらつきの最大要因は「各機関でのアスベスト判定基準の違い」で、幾何学的定義のみを判定基準にした機関は平均値に比べて高い値に、幾何学的定義に合致する繊維のうちでも明らかにアスベストと見なされる繊維のみを計数した機関は平均値より低い値になった。前者の判定基準の2機関と後者の判定基準の1機関で基準を後者に統一して再度計数を行なうと、ばらつきはほとんどなくなった(表2)。この結果は、形態学的判定を採用することによってアスベスト類似繊維を除外し計数精度を高めることができる可能性を示唆していると筆者は考える。ただしどのような形態学的判定基準を使ったのか、この報告では示されていない。

表2 「表1」のA・C・Dによる再クロスチェック結果  
(Beckett等<sup>8)</sup>より)

	研究機関		
	A	C	D
アスベストのみ計数	1.00	1.06	0.95
幾何学的定義に合致する全繊維	0.95	0.99	1.06
表1の計数値比較	1.07	0.71	1.31

今後国内の公的研究機関のデータの精度を向上させるためには、①研究機関内(分析者が複数の場合)、②研究機関相互、③国際的、の3つについて精度の評価を行い、さらに精度向上のためのトレーニングの方法を確立することが必要である。欧米では研究機関相互や国際的なクロスチェックが1970年代から行われてきた<sup>9,10)</sup>。米国ではAIHA(American Industrial Hygiene Association)が公的研究機関および民間計測会社の精度管理をPAT(Proficiency Analytical Testing, 検定試験)プログラムとして継続している。今年度NIOSHとAIHAは共同でPATの精度向上のための“Initiative to Improve Quality of Fiber Counting”というプロジェクトを実施している。クロスチェックは同一のスライドを各分析者が計数するのであるが、顕微鏡の試料台のXY動の微調整には限界があり、全員が同一視野を観察することは非常に難しい。それはクロスチェックの誤差の要因の一つになる。Pang<sup>11)</sup>は電子顕微鏡用メッシュを利用して視野が正確に再現できるスライド(Relocatable Slide)を開発した。Harper等<sup>12)</sup>は6人の熟練分析者にRelocatable Slideを計数させ、そのばらつきを調べた。その結果をもとに、複数の熟練分析者の合意によって各視野の繊維数を決定しその値を「合意基準(Consensus Standard)」としてクロスチェックの基準値とすることを提案した。もともと位相差顕微鏡だけでは試料中のアスベスト繊維数の「真値」はわからないし、フィルターを透明化し浸液を滴下して位相差顕微鏡用の試料としてしまうと「真値」を他の方法(たとえば電子顕微鏡)で調べることもできない。そこで、より多くの分析者に受け入れられる「合意基準」を熟練者に出してもらい、それをクロスチェックの基準値とするという考え方である。NIOSH-AIHAのプロジェクトはPang, Harper等の

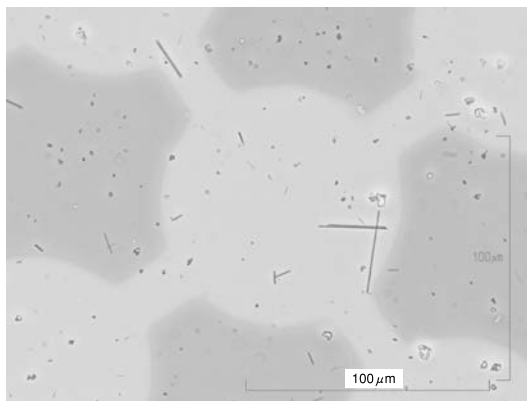


図3 Relocatable Slideの位相差顕微鏡写真(400倍)

研究結果をもとに精度管理の手法を改良しようとする試みである。筆者に送られてきたアモサイトのRelocatable Slideを図3に示す。円は直径100 $\mu$ mで、グレイテイクルの小さい円にぴったり重なる。まぎらわしい繊維は含まれていないが、5 $\mu$ m前後の繊維が多く観察され繊維長の計測の正確さが計数精度を左右する。筆者も実際に計数してみて非常に教育的効果の大きいスライドであると感じた。日本でも諸外国の精度管理を学びそれを実践する必要があると考える。

#### 4.2 精度向上のためのデータベース作りと電子顕微鏡の活用

前出の「合意基準」という考え方を筆者は支持するが、熟練者に頼りきることは問題があると考え。大気中にはさまざまな形態をした繊維状粒子が存在する。分析者がアスベストか否かの判断を迷った時、できるだけ多くの繊維状粒子を同定した画像データベースがあれば大いに役立つのではないだろうか。位相差顕微鏡の形態画像とその繊維の電子顕微鏡による分析結果をセットにしたデータ集を全国の分析者がサンプルを持ち寄って豊富なものにしていくという作業が行なわれることを期待したい。電子顕微鏡は進化しており、低真空SEMでは無蒸着でフィルター上の繊維の観察と元素分析ができるようになっていて、若干の技術的問題点を克服すれば同一繊維の位相差像とSEM像とを対応させることが可能であると思われる。SEMでは個々の繊維の元素分析ができ、アスベスト同定の精度は高まる。今後電子顕微鏡の活用をもっと積極的に考えなければならない。

アスベストの判定を単に経験に頼るのではなく、そのようなデータベースによって科学的根拠を持った形態判定を可能なものとし、判定基準を幾何学的定義からさらに精度の高いものにすることが濃度測定の精度向上につながると考える。なお、分散染色法による気中濃度測定については十分な基礎的検討がなされていないと考えている。同法は米国 EPA の含有率分析の公定法になっており、筆者等<sup>13)</sup>も1988年に同法による吹付け材中微量アスベストの検出法の検討を行なったことがある。しかしメンブランフィルターのサンプルについて筆者等が最近行なった予備の実験では細いアスベスト繊維の発色の確認が難しかった。実用化の可能性について多くの研究の蓄積が待たれる。

## 5. おわりに

微粒子の顕微鏡観察データ集は、1970年代に W. C. McCrone が “The Particle Atlas” をまとめており、筆者等も大気微粒子の調査・研究に大いに参考にさせてもらった記憶がある。その経験から、前述のアスベストについてのデータベースがもしできたなら、必ず精度向上に役立つと考える。また McCrone は同書の中で分散染色法についても詳しく解説しており、顕微鏡によるアスベスト分析では草分け的存在である。彼が設立した McCrone 研究所は現在も全米に多くのアスベスト分析者を輩出している。先日筆者はシカゴにある同研究所を訪問し、偏光顕微鏡によるアスベスト分析についての実に合理的なレクチャーと実習に感銘を受けた。

新たな被害者を出さないために、日本においても今後長きに渡ってアスベストの気中濃度監視が必要になると考えられる。そして濃度監視のために精度の高いデータを出す分析者が求められる。分析者の質の維持・向上のためには、McCrone 研究所で行なわれているような基礎的な研修や、

全国的な精度管理システムの構築が必要である。アスベスト被害が深刻であるにもかかわらず、調査・研究体制は遅れをとっていることを認めざるを得ない現状であるが、すぐにも実行可能なことは多くあり全国の分析者担当者の奮起を期待する次第である。

## —引用文献—

- 1) 財団法人ヘルス・サイエンス・センター：「石綿の簡易測定法の開発調査」報告書。1990
- 2) 兵庫県：石綿の簡易測定法の実用性調査報告書(平成2年度環境庁委託業務)。1991
- 3) Lippmann M.: Effects of fiber characteristics on lung deposition, retention, and disease. *Environ. Health Perspec.* **88**, 311-317, 1990
- 4) 環境庁大気保全局大気規制課監修：アスベスト排出抑制マニュアル(増補版)。83-84, ぎょうせい, 1988
- 5) Walton W. H., Beckett S. T.: A microscope eyepiece graticule for the evaluation of fibrous dusts. *Ann. Occup. Hyg.* **20**, 19-23, 1977
- 6) LeGuen J. M. M., Ogden T. L., Shenton-Taylor T., Verrill J. F.: The HSE/NPL phase-contrast test slide. *Ann. Occup. Hyg.*, **28**, 237-247, 1984
- 7) Asbestos Research Council: The measurement of airborne asbestos dust by the filter method (Revised). A. R. C. (Technical Note No. 1), Rochdale, Lancs., 1971
- 8) Beckett S. T., Attfield M. D.: The effect of non-asbestos fibres and sample fibre density on the agreement between laboratories evaluating membrane filter samples of airborne asbestos dust. *Atmos. Environ.*, **14**, 565-569, 1980
- 9) Beckett S. T., Attfield M. D.: Inter-laboratory comparison of the counting of asbestos fibres sampled on membrane filters. *Ann. Occup. Hyg.*, **17**, 85-96, 1974
- 10) Arroyo M. C., Rojo J. M.: National versus International asbestos fibre counting schemes: Comparison between the Spanish interlaboratory quality control program (PICC-FA) and the asbestos fibre regular informal counting arrangement (AFRICA). *Ann. Occup. Hyg.*, **42**, 97-104, 1998
- 11) Pang T. W. S.: Precision and accuracy of asbestos fiber counting by phase contrast microscopy. *AIHAJ*, **61**, 529-538, 2000
- 12) Harper M., Bartolucci A.: Preparation and examination of proposed consensus reference standard for fiber-counting. *AIHAJ*, **64**, 283-287, 2003
- 13) 小坂浩, 山本匡利, 宇野泰章: 分散染色法による吹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集, 67, 1988