

粒子解析ソフトウェアの大気中アスベスト濃度測定への適用の検討

安田 知生 笠木 祥弘 原口 健司

Consideration of the Application of Particle Analysis Software to the Measurement of Airborne Asbestos Concentrations

Tomoo YASUDA Yoshihiro KASAKI Kenji HARAGUCHI

要 旨

アスベストの大気中濃度は、アスベストモニタリングマニュアル（第4.2版）（環境省水・大気環境局大気環境課令和4年3月）により測定することとされているが、位相差顕微鏡で観察する方法で総繊維数が1本/Lを超えた場合は走査電子顕微鏡（以下、「SEM」という。）で最大300視野を検鏡することとされており、作業量が多く時間を要する。そこで、SEMに付属している粒子解析ソフトウェアの適用可能性を検討した。使用した粒子解析ソフトウェアは、SEM画像を読み込み、輝度の差により対象物とバックグラウンドに分類し、対象物の形状を計算して選別し、選別した粒子をエネルギー分散型X線分析装置で構成成分を分析することによりアスベストの本数を算出する作業を自動で実施できる。測定条件を検討したところ、正負の誤差要因があり、結果にも影響を及ぼすことがわかったことから、粒子解析ソフトウェアで得られた結果をそのまま採用することは難しいと考えられた。ただし、それぞれの誤差要因を理解したうえで、スクリーニング分析に利用できる可能性が考えられた。

キーワード：アスベスト、走査電子顕微鏡、粒子解析ソフトウェア

Keywords：Asbestos, Scanning Electron Microscope, Particle Analysis Software

はじめに

アスベストは天然に産出する繊維状けい酸塩鉱物で、耐火性、耐熱性、耐薬品性、防音性などに優れた特性を持ち、安価であることから、建材、摩擦材、シール断熱材など様々な用途に用いられてきた¹⁾。しかし、吸入することによって中皮腫、肺がん等の原因になると言われており、平成18年9月にはアスベスト含有製品の製造、使用が全面禁止された。

既設建築物にはアスベスト含有建材が多く使用されている。社会資本整備審議会建築分科会アスベスト対策部会（第5回）資料（国土交通省平成21年6月12日）によれば、0.1重量%以上のアスベストを含む可能性のある民間建築物の年度別解体棟数は、今後増加し2028年頃にピークを迎える²⁾と推計されており、京都府では、毎年、アスベストの大気中濃度の測定を実施している。

アスベストの大気中濃度は、アスベストモニタリングマニュアル（第4.2版）（環境省水・大気環境局大気環境課令和4年3月）（以下、「マニュアル」という。）により測定することとされており、位相差顕微鏡で観察する方法で総繊維数が1本/Lを超えた場合は、走査電子顕微鏡（以下、「SEM」という。）で最大で300視野を検鏡して対象粒子を識別し、全ての対象粒子についてエネルギー分散型X線分析装置（以下、「EDS」という。）で構成成分を確認して同定することとなり、作業量が多く時間を要する。

自動で粒子を識別する方法は、建材中のアスベストの定性

分析に多重解像度解析を用いた方法²⁾や大気中の濃度の測定に人工知能を用いた方法³⁾が研究されているが、容易に利用できる状況ではなく課題も示されている。そこで、容易に利用できるSEMに付属している粒子解析ソフトウェアを用い、作業量の低減及び時間の短縮の可能性を検討した。

検討方法

1. 試料採取及びSEM用試料の作成

検討に用いた試料は、アスベスト断熱材が使用されている煙突内の大気を、マニュアルに準拠し、Merck Millipore製の直径47 mm、孔径0.8 μmのニトロセルローズ製メンブランフィルタに2400 L吸引して採取した。

試料を採取したメンブランフィルタは、10 mm角に切り取り、カーボンテープ及び水溶性のカーボンペーストで試料台に接着し、乾燥後、カーボンコーティングを施しSEM用試料とした。

2. 粒子解析

SEM及びEDSは、日本電子（株）製の走査電子顕微鏡JSM-IT200を使用した。SEM画像を、加速電圧15 kV、反射電子組成像で、コントラストを調整して繊維状粒子が強く光を反射して表面が観察できなくなる状態にした後、ブライトネスを調整して繊維状粒子以外の周囲が暗くなるようにした。粒子解析ソフトウェアは、日本電子（株）製粒子解析ソフトウェアEX-36320PA3（ver.6.0.0.0）を使用した。粒子解析ソフトウェアでは、SEM画像を取り込み、輝度の差により対象物とバックグラウンドに区分し、対象物の形状を計算

（令和6年1月4日受理）

して選別し、EDSで分析して同定しており、各過程の条件を検討した。

繊維状粒子の最大長と最大幅の模式図を図1に示す。粒子解析ソフトウェアで得られる情報である最大長は、画素の頂点間を結んだ時の距離の最大値であり、最大幅は、最大長で得られた画素の頂点間を結んだ線と直角方向に画素の頂点間を結んだときの最大値である。

3. アスベスト

アスベストは、長さ5 μm以上、幅0.2 μm以上3 μm未満で、かつアスペクト比（長さ/幅）が3以上の繊維状粒子で、EDSによる分析で構成成分を確認し同定されたものである。

結果と考察

1. 二値化における輝度の影響

粒子解析ソフトウェアでは、粒子とバックグラウンドを画面上の輝度の差により区分（二値化）している。二値化に影響する要因としては、取り込むSEM画像の繊維状粒子とバックグラウンドとの輝度の差と取り込んだSEM画像のどの輝度までを粒子として扱うかを設定する輝度値が考えられた。

輝度値は0~255まで設定可能であり、設定した値以上の輝度をもつものを粒子と認識する。同一のSEM画像で、輝度値を変化させた場合の認識画像と認識した粒子数を図2に示した。輝度値を低く設定した場合、認識した粒子数は多くなり、繊維状粒子と周囲の粒子との融合が認められた。反対に、輝度値を高く設定した場合、認識した粒子数は少なくなり、繊維状粒子と融合している箇所は減少するが、細い繊維状粒子では、1本の粒子であったものが途中で分断され複数の粒子と認識される現象が見られた。

最適な輝度値は、細い繊維状粒子が分断されない程度に高い値に設定する必要があると考えられるが、その値は、取り込むSEM画像の繊維状粒子とバックグラウンドとの輝度の差によって変化した。そのため、単独で存在する幅が0.2 μmの繊維状粒子をSEM画像で探し出し、繊維状粒子とバックグラウンドとの輝度の差が最大となるようにコントラスト及

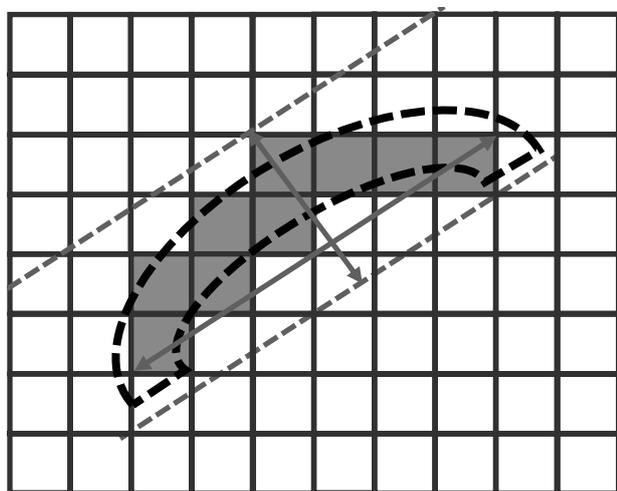


図1. 繊維状粒子の最大長と最大幅の模式図

びブライトネスを調整して取り込み、分断が生じない程度の高い輝度値に設定することとした。

ただし、条件を一定にしても、300視野の中には試料作成時に生じる高低差等や粒子の捕集状態の差により、設定した輝度値でもアスベストと周囲の粒子が融合してアスベストと認識されない場合や細いアスベストが分断されてアスベストと認識されない場合等の負の誤差が生じる可能性があると考えられた。

2. 倍率と解像度の影響

繊維状粒子の認識は、SEM画像を取り込むときの1画素の大きさにも影響を受けると考えられた。1画素の大きさは、観察倍率とSEM画像を取り込む時の解像度により決まる。SEMの機能で計測した最大幅0.7 μm、最大長50.3 μmの繊維状粒子を、倍率を1000倍及び300倍として、解像度を変化させて取り込んだ場合の、認識した最大幅及び最大長を表1に示した。

1000倍で解像度が512×384よりも高い場合及び300倍で解像度が2048×1536よりも高い場合は、繊維状粒子の最大長が50.1~50.4 μmであり同等の結果とみなすことができた。しかし、1000倍で解像度が256×192の場合や、300倍で解像度が1024×768よりも低い場合は、複数の粒子に分断され最大長が短く認識される場合や、繊維状粒子が認識されない場合が生じた。

画像の認識は、1画素の方形内で、対象粒子の占める面積の割合が高ければ対象粒子とみなされ、低ければバックグラウンドとみなされる。1画素の大きさが0.25 μm以下では最大幅や最大長が一定になる傾向がみられたが、より大きくなると1画素の方形内で対象粒子の占める面積の割合が下がり、0.5 μmや0.42 μmと繊維状粒子の最大幅0.7 μmに近くな

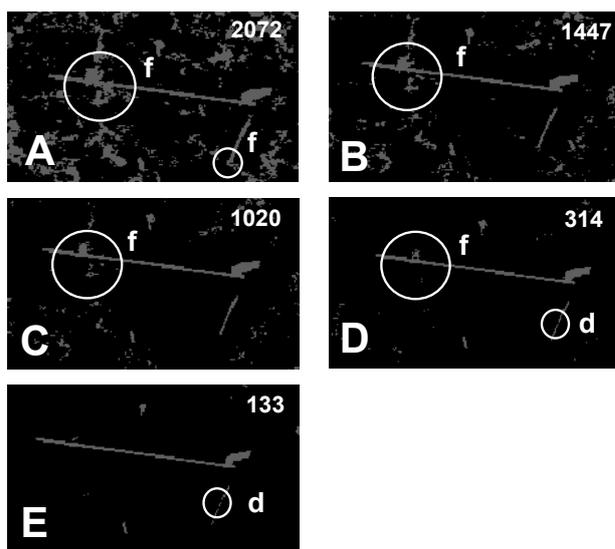


図2. 同一のSEM画像で輝度値を変化させた場合の認識画像と認識した粒子数

A: 輝度値0 B: 輝度値50 C: 輝度値100
D: 輝度値200 E: 輝度値255

数値は認識した粒子数、英小文字は○で囲んだ箇所の認識（融合（f）分断（d））の状態を示す。

表1. 最大幅0.7 μm、最大長50.3 μmの繊維状粒子の認識における倍率及び解像度の影響

解像度	取込時間 (s)	1000倍			300倍		
		1画素の 大きさ (μm/画素)	最大幅 (μm)	最大長 (μm)	1画素の 大きさ (μm/画素)	最大幅 (μm)	最大長 (μm)
256 × 192	6	0.5	1.8	36.5 (分断)	1.7	認識されない	
512 × 384	6	0.25	3.0	50.3	0.83	認識されない	
1024 × 768	30	0.13	2.4	50.3	0.42	3.6	17.5 (分断)
2048 × 1536	54	0.063	2.8	50.4	0.21	2.9	50.1
4096 × 3072	246	0.031	2.1	50.2	0.10	3.2	50.4

ると対象粒子と認識されない画素が生じて繊維状粒子の分断が起り、1.7 μmや0.83 μmと最大幅0.7 μmより大きくなると繊維状粒子が認識されない場合が生じたと考えられた。従って、1画素の大きさが、認識する必要がある繊維状粒子の最大幅の1/2~1/3程度より小さくなる解像度で読み込む必要があると考えられた。

読み込む解像度が高ければ、認識する粒子数は多くなり粒子の形状もより精密に再現できる。しかし、300視野の画像の取り込み時間は、解像度が1024×768で2.5時間程度であるのに対し、解像度が4096×3072では20時間程度かかった。なお、300倍での観察範囲は426.7×320.0 μm (136,544 μm²)であり、1000倍の128.0×96.0 μm (12,288 μm²) の観察範囲の11.1倍であるため、1画素の大きさが同じ程度となる解像度で比較すると、観察範囲が同じ面積の画像を読み込む時間には大きな差はなかった。

アスベストの分析では、幅の平均が0.2 μm以上のものを計数対象としているため、取り込み時間が短く、1画素の大きさが0.13 μmである1000倍で解像度が1024×768で読み込むこととした。

3. 形状の選別条件の影響

粒子解析ソフトウェアでは、粒子を形状により選別し、対象粒子から除去することができる。倍率1000倍で最大長5μm未満、最大幅30 μm以上、0.2 μm未満及びアスペクト比3未満の形状の粒子を除去した場合と除去していない場合に認識した粒子数を表2に示した。形状による選別を行わない場合、対象粒子として認識される数が200~30,000倍多くなり、EDSにより分析を行う時間が長くなるため、分析を行う前に形状により選別することが必要であった。

アスベストの計数対象粒子は、長さ、平均幅及びアスペクト比で規定されているが、粒子解析ソフトウェアで得られる情報は、最大長、最大幅及び最大長と最大幅から計算されるアスペクト比であり、平均幅は取得できない。表1に示した最大幅0.7 μm、最大長50.3 μmの繊維状粒子は、最大幅

表2. 最大長5 mm未満、最大幅30 mm以上、0.2 mm未満及びアスペクト比3未満の形状の粒子を除去した場合と形状により除去していない場合の認識した粒子数

解像度	認識した粒子数	
	形状選別なし	形状選別あり
256 × 192	826	4
512 × 384	2027	2
1024 × 768	2891	1
2048 × 1536	15072	1
4096 × 3072	63017	2

や最大長がほぼ一定になる解像度では、最大長が50.1~50.4 μmであり実際の最大長とほぼ同じであるが、最大幅は2.1~3.2 μmであり実際の最大幅の3.0~4.6倍であった。

これは、図1に示したとおり、粒子解析ソフトウェアで得られる最大幅は、湾曲している繊維状粒子では大きくなることから、対象の繊維状粒子が湾曲していることが原因であると考えられた。対象粒子の選別条件はこれらのことを考慮して設定する必要があった。条件を絞り込めば本来対象である粒子も除去される可能性が高くなり、条件を緩くすれば対象粒子が多くなり、EDSによる分析を行う時間が長くなる。特にやわらかく曲がりやすいクリソタイルでは、影響が大きいと推測された。

4. 粒子の重なりによる影響

粒子が重なった場合のSEM画像と繊維状粒子の認識結果を図3に示した。上段は、繊維状粒子と非繊維状粒子が重なった場合であり、同一の粒子とみなされて最大幅が大きくなりアスペクト比が低くなるため、形状の選別の条件によっては、対象粒子とみなされなかった。下段は、2本の繊維状粒子と複数の非繊維状粒子が重なっていた。この場合、最大幅やアスペクト比による形状の選別条件により除去され、対象粒子とはみなされなかった。

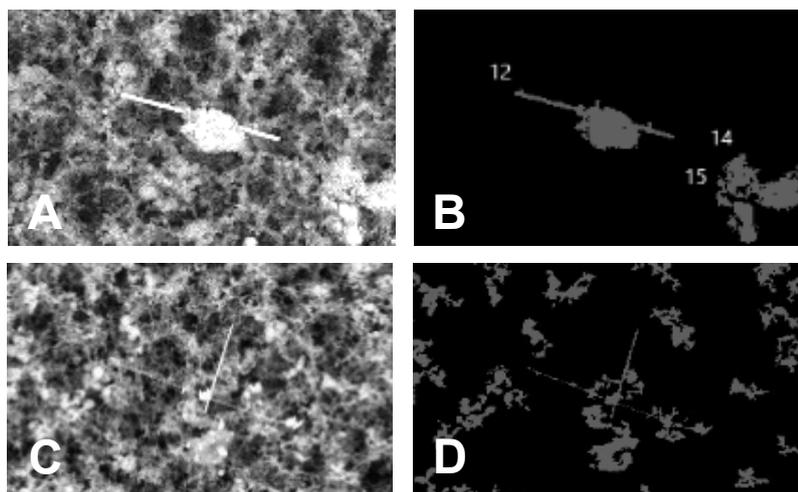


図3. 粒子が重なった場合のSEM画像と認識画像

- A: 繊維状粒子と非繊維状粒子が重なった場合のSEM画像
- B: 繊維状粒子と非繊維状粒子が重なった場合の認識画像
- C: 2本の繊維状粒子と複数の非繊維状粒子が重なった場合のSEM画像
- D: 2本の繊維状粒子と複数の非繊維状粒子が重なった場合の認識画像

粒子同士が重なった場合は、粒子間の輝度の差が少ないため、別々の粒子とみなすのは難しいと考えられた。

5. EDSによる分析における影響

繊維状粒子の幅方向に、中心から端に分析点を移動させてEDSにより分析した結果及び繊維状粒子の周辺の下地の分析結果を表3に示した。繊維の端に近づくと、徐々に下地の組成に近づき、繊維状粒子の端では、割合の低い元素が検出されない場合もあった。

EDSは、照射された電子が物質との相互作用で得られる特性X線を利用し元素を分析するものである。特性X線の発生領域は一般に数 μm と言われており、アスベストのように繊維幅が狭い場合には、下地や隣接粒子の影響を受ける場合があると考えられた。また、分析する点は粒子とみなされた画素の重心であるため、湾曲した繊維状粒子では、分析点が繊維状粒子の端に設定されることも考えられた。

そのため、アスベストであることを判断する含有元素の割合にも誤差を考慮する必要があると考えられた。なお、複数の粒子が重なっている場合は、アスベストと異なる箇所での分析が行われることがあり、アスベストと認識されない場合も考えられた。

6. 試料の粒子解析ソフトウェアによる測定結果

本検討で使用した試料を、倍率1000倍、解像度1024×768、最大長4.5 μm 未満、最大幅0.15 μm 未満及び30 μm 以上、アスペクト比2未満の粒子を除去する形状の選別条件で、アスベストであることを判断する含有元素の割合(%)を、マニュアルを参考に、クリソタイルはMgが2.0以上6.0以下、Siが0.1以上6.0以下、アモサイトはMgが0.1以上4.0以下、Siが0.1以上6.0以下、Mnが3.0以下、Feが0.1以上3.0以下、クロシドライトはNaが3.0以下、Siが2.0以上8.0以下、Feが0.1以上3.0以下、アンソフィライトはMgが0.1以上5.0以下、Siが0.1以上6.0以下、Feが0.1以上3.0以下、トレモライトとアクチノライトはMgが0.1以上5.0以下、Siが0.1以上6.0以下、Caが0.1以上4.0以下、Feが3.0以下として粒子解析ソフトウェアで測定した結果と、マニュアルに準拠して計数した結果を表4に示した。粒子解析ソフトウェアで測定した結果は17本/Lであり、マニュアルに準拠して計数した結果7.0本/Lの2.4倍の濃度が検出された。また、マニュアルに準拠して計数した結果で検出されたアスベストはアモサイトのみであったが、粒子解析ソフトウェアで測定した結果では4種類のアスベストが検出された。これは、粒子解析の各条件で誤差を考慮した値を設定したためであり、アスベストの形状の条件に合致していない粒子や、アスベストの含有元素の割合ではない粒子が検出された。一方、重なった粒子など、マニュアルに準拠して計数した結果では検出されたが、粒子解析ソフトウェアでは

表3. 繊維状粒子のEDS分析箇所による検出元素の割合の変化

位置	元素 (%)						
	C	O	Mg	Si	Fe	計	
繊維上	中心	51.0	41.2	0.9	4.2	2.7	100
	中心寄り	52.1	40.3	0.7	4.1	2.8	100
	端寄り	56.1	37.6	0.8	3.3	2.2	100
	端	67.5	30.5	0.0	2.0	0.0	100
周辺	77.4	22.6	0.0	0.0	0.0	100	

表4. 粒子解析ソフトウェアで測定した結果とマニュアルに準拠して計数した結果

	内訳 (本/300視野)					参考
	アスベスト 濃度 (本/L)	クリソ タイル	アモサイト	クロシド ライト	アクチノラ イト/トレモ ライト	
粒子解析ソフトウェ アで測定した結果	17	9	87	16	46	EDSによる分析実施粒子数： 14,534 個 測定時間：15.5 h
マニュアルに準拠し て計数した結果	7.0	-	64	-	-	

検出されない粒子も存在した。本検討で使用した試料に含まれていたのは、直線的な形状のアモサイトだけであったが、曲がった形状の多いクリソタイルではさらに形状の選別条件で除去される粒子が多くなることも推測された。

また、粒子解析ソフトウェアでの測定時間は15.5時間であった。マニュアルに準拠して300視野を計数するのに必要な時間は、データサンプリング時間と合わせて約7～17時間（うちデータサンプリング時間は2または4時間）と試算されており⁴⁾、今回の試料では粒子解析ソフトウェアを使用しても、時間短縮は見込めなかった。

今回の検討により、粒子解析ソフトウェアで計数した結果は、マニュアルに準拠して計数した結果と比較して、輝度値の設定、形状の選別条件の設定、EDSによる分析結果における含有元素の割合の設定において、対象粒子を検出しない場合や非対象粒子を検出する場合が確認できた。したがって、粒子解析ソフトウェアの結果を、マニュアルに準拠して計数した結果と同様に取り扱うことは難しいと考えられた。しかし、粒子解析ソフトウェアの特徴を理解したうえで、測定時間を短縮するために代表的な数視野を夜間に粒子解析を行うことで、検体数が多い場合にマニュアルに準拠して計数を行う優先順位を決めるためのスクリーニングに使用できる可能性はあると考えられた。

引用文献

- 1) 寺園淳.2018.アスベストによる環境リスクとこれからの課題.保健医療科学,67 (3) ,268-281.
- 2) 森下壮一郎,渡邊岳大,川端邦明,新井義和,山下淳,浅間一,三島健稔.2015.アスベスト定性分析のための多重解像度解析を用いた自動粒子計数.精密工学会誌,81 (10) ,930-935.
- 3) Yukiko Iida, Kenji Watanabe, Yusuke Ominami, Toshiyuki Toyoguchi, Takehiko Murayama, Masatoshi Honda. 2021. Development of rapid and highly accurate method to measure concentration of fibers in atmosphere using artificial intelligence and scanning electron microscopy. Journal of Occupational Health, 63 (1) .
- 4) 飯田裕貴子,村山武彦,錦澤滋雄,長岡篤,本多将俊.2019.アスベスト含有建築物の解体改修時立入検査に自治体を実施する大気中アスベスト濃度測定方法の検討.環境と安全,10 (3) ,165-175.