

走査型電子顕微鏡によるアスベスト濃度分析に関する検討

—建築物解体工事を事例として—

白井清嗣 三好康彦 鎌滝裕輝
 神山宣彦* (*労働省産業医学総合研究所)

要 旨

アスベスト使用建築物の解体工事においてサンプルを採取することにより、走査型電子顕微鏡によるアスベスト繊維濃度の分析方法について検討した。走査型電子顕微鏡法により濃度分析を行う場合には、計数対象とする繊維径をあらかじめ定めておく必要があるが、光学顕微鏡法と同程度の繊維径のものを対象として計数する場合が考えられる。走査型電子顕微鏡で繊維径 $0.4\mu\text{m}$ 以上のものを計数対象として分析した結果、繊維濃度 $10\text{f}/\ell$ を越える高濃度領域において光学顕微鏡との良い相関が得られた。
 キーワード：電子顕微鏡、光学顕微鏡、アスベスト、繊維状粒子、建築物解体工事

Study on the Determination of Concentration of Asbestos Fibers by Scanning Electron Microscopy Method - Case Study on the Dismantling of Buildings -

Kiyotsugu Shirai, Yasuhiko Miyoshi, Hiroki Kamataki and Norihiko Kohyama*
 * National Institute of Industrial Health

Summary

In this paper, the determination of concentration of asbestos fibers by scanning electron microscopy method was studied. The filter samples were collected at the site of dismantling of buildings, and we counted the fibrous particles having diameters more than $0.4\mu\text{m}$ by scanning electron microscopy. It is confirmed that the determination of the concentration of asbestos fibers by scanning electron microscopy method resembles that by optical microscopy method well.

Keywords: electron microscopy, optical microscopy, asbestos, fibrous particles, dismantling of buildings

1 はじめに

(1) アスベスト環境濃度把握の重要性

アスベストは、世界保健機関 (WHO) によって、ヒトに対する発がん性が確実なものとして判定されている物質である¹⁾。また、経済協同開発機構 (OECD) においては、有害大気汚染物質としてアスベスト等の吸入性鉱物繊維を揚げ、それらの削減と監視を提唱している²⁾。

わが国におけるアスベストの利用量は、戦後の経済成長とともに増加し、1970年代及び80年代には年間30万トンを超える輸入量で推移した。1990年代に入ってから

徐々に減少しているが、1995年現在年間約19万トンを入力している^{3),4)}。また、アスベストを大量に消費した時代に建てられた吹き付けアスベスト使用建築物の更新時期が到来することにより、これらの建築物の解体工事が今後増加し、2010年代にピークに達すると予想されている⁵⁾。

アスベストは、いったん大気中に放出されると、その特性から半永久的に消滅せず、地上に降下した後も再発じんを繰り返すことが考えられる。したがって、アスベストは、環境蓄積性のある物質として取り組む必要がある

り、環境中のアスベスト濃度把握は今後とも重要である。

(2) アスベスト濃度分析方法の動向

環境中のアスベストの濃度分析は、これまで環境庁の定めるマニュアル⁹⁾に基づき、位相差光学顕微鏡法 (Phase Contrast Optical Microscopy Method, 以下「PCM法」と言う。) により行ってきた。しかし、1995年に日本工業規格 (JIS K3850) 「空气中の繊維状粒子測定方法」 (以下、「JIS規格」と言う。) が制定され、光学顕微鏡法及び電子顕微鏡法を使用する対象範囲が明記された^{7),9)}。PCM法は、アスベスト取り扱い事業場の敷地境界における測定のように、浮遊繊維状粒子があらかじめアスベストと分かっている場合に用いる方法であり、一般環境のように種々の繊維状粒子が混在する環境中での測定の場合には、繊維状粒子の成分分析を行うことのできる電子顕微鏡法を用いることが規定された。

JIS規格の電子顕微鏡法には、走査型電子顕微鏡法 (Scanning Electron Microscopy Method, 以下「SEM法」と言う。) と透過型電子顕微鏡法 (Transmission Electron Microscopy Method, 以下「TEM法」と言う。) の2法が規定されている。TEM法は、PCM法で観察不可能な極めて細い繊維まで観察できる利点があるが、顕微鏡試料の作成方法及び顕微鏡の操作に高度に熟練した技術を必要とする。これに対し、SEM法は、PCM法と同程度又は少し細い繊維サイズまでの観察しかできないが、試料作成及び顕微鏡操作が比較的容易である。したがって、PCM法と同程度の繊維サイズを対象として環境モニタリングをルーチン的に行う場合には、TEM法よりもSEM法が適していると言える。

2 目的及び方法

(1) 目的

PCM法で計数対象とする繊維状粒子は、長さ5 μ m以上、幅 (直径) 3 μ m未満、アスペクト比3以上のものであり、繊維幅の最小サイズは決っていない。最近の光学顕微鏡は、性能的には繊維幅約0.2 μ m程度まで観察できることになっているが、実際の分析では、どの程度の繊維サイズまで観察しているか定かではない。

したがって、電子顕微鏡によりPCM法と同等サイズの繊維状粒子を計数しようとする際には、計数する最小繊維幅を決めておく必要がある。本報告では、SEMで

計数対象とする繊維幅を0.4 μ m以上として計数した結果を、PCM法の分析結果と比較することにした。

本年度は、アスベスト繊維が浮遊していることがあらかじめ分かっている環境下で捕集したサンプルを用いることにし、アスベスト使用建築物の解体工事を事例に選んだ。次年度は、アスベスト以外の種々の繊維状粒子の浮遊が考えられる一般環境を対象として検討する予定である。

(2) 事例の概要

吹き付けアスベストを使用した建築物の解体工事が、都内のある事業所にて1996年9月から翌年3月にかけて行われた。当事業所の建築物解体工事の届出は、改正大気汚染防止法 (1997年4月施行) の施行前であったので、東京都公害防止条例に基づいて行われた。当事業所には、吹き付けアスベスト使用建築物が計3館があった。以下A館、B館及びC館と呼ぶこととし、各館の吹き付けアスベストの使用状況は、表1のとおりである。

表1 吹き付けアスベストの使用状況

使用建物	使用箇所	使用面積 (m ²)
A館1階	梁	17,988
A館2階	スラブ	13,057
B館	梁、柱、天井	3,546
C館	天井	45

吹き付けアスベストの除去作業についての指導は、東京都環境保全局作成のアスベスト飛散防止マニュアル⁹⁾に基づいて行われた。その概要は表2のとおりである。除去作業の前処理、除去作業及び事後処理の各作業工程は、各館ともほぼ同時期に進められた。アスベストの除去作業後に、3館の建屋全てが解体され、更地となった。

(3) アスベスト材料の同定方法

吹き付けアスベストの除去作業前に、使用アスベストのバルク材を採取し、粉末X線分析装置による定性分析を行った。アスベストのバルク材を乳鉢で細かく粉碎した後、X線分析装置にかけ、X線回折パターンをICDDファイルデータ¹⁰⁾と照合することにより、アスベスト種類を同定した。また、採取したバルク材をSEM試料台に載せ、カーボン蒸着を行った後、SEMによるアスベ

表2 アスベスト除去作業の概略

前処理	施工区画の隔離	プラスチックシートにより施工区画を隔離し、出入り口に前室を設ける。
	↓	
	集塵排気装置の設置	必要な排気能力を有するH E P Aフィルターを設置する。
	↓	
除去作業	作業中の湿潤化	除去作業中は、散水又は薬剤による湿潤化処理を行う。
	↓	
	除去アスベストの固形処理	除去したアスベストをコンクリート固化し、耐水材料により梱包する。
	↓	
事後処理	施工区画の清掃	除去後、清掃し、除去部分へ飛散防止剤を散布する。
	↓	
	隔離シートの撤去	作業所内のアスベストを処理して、隔離を解く。

スト繊維の形態観察を行った。

(4) 浮遊アスベストの採取方法

浮遊アスベストの採取は、アスベスト除去作業前、除去作業中及び除去後建屋解体中の各作業工程ごとに、屋外、屋内及び隔離シート内の各採取場所で行った。

サンプラーは、使用フィルター径47mm用及び25mm用の2種を使用した。47mm用サンプラーは、100V電源を要するので屋外及び屋内での採取に用い、25mm用サンプラーは、電池式であるので主に隔離シート内での採取に用いた。

PCM用フィルターは、孔径0.8μmのセルローズエステル製フィルターを使用した。SEM用フィルターには、孔径0.8μmのポリカーボネイト製フィルターに、イオンスパッターで金をターゲットとして5分間コーティングしたコーテッドフィルターを作成した。PCM用及びSEM用の各フィルターを装着したサンプラー2台を用いて同一場所で採取した。採取高さは、いずれも地上又は床上1.5mである。

(5) アスベスト繊維計数方法

PCM観察用の顕微鏡試料は、アセトントリアセチン法により作成し、位相差型顕微鏡を用いて倍率400倍で観察した。繊維計数は、繊維長さ5μm以上、繊維径3μm未満かつアスペクト比3以上の繊維状粒子を対象として、検出繊維が100本を越えるまで又は50視野に達するまで行った。

SEM観察用の顕微鏡試料は、JIS規格に規定されているSEM-1法により作成した。SEM観察は、観察倍率2,000倍で行った。観察視野数は、50視野又は100視野観察して検出繊維数100本を超えた場合は50視野又は100視

野とし、検出繊維数が100本を越えない場合は200視野とした。繊維計数の対象とする繊維サイズは、繊維長さ5μm以上、繊維径3μm未満0.4μm以上かつアスペクト比3以上の繊維とした。なお、SEM付属のX線分析装置による成分分析は、代表的ないくつかの繊維について行った。

PCM法及びSEM法の繊維数濃度は、いずれの場合も次式から算出した。

$$C_F = \frac{A \times N}{a \times n \times Q}$$

ここに、 C_F ：繊維数濃度 (f/ℓ)

A：フィルター有効面積 (mm²)

N：計数繊維数総数 (f)

a：顕微鏡視野面積 (mm²)

n：計数視野数

Q：吸引空気量 (ℓ)

これらの試料の採取及び分析に使用した装置類は、表3のとおりである。

3 結果及び考察

(1) アスベスト材料の同定分析

粉末X線分析装置及びSEMを用いて、使用アスベスト材料の種類を同定した。A館1館はクロシドライト、A館2階はクリソタイル、B館はクロシドライトであり、C館ではクリソタイルとアスサイトの混合物を使用していた。結果を表4に示すが、表中の鉱物名及び化学式は、粉末X線分析装置付属のICDDのデータベースと照合し

表3 分析装置一覧

用途	分析装置（消耗品）名	メーカー	型式又は材質
バルク材の成分分析	粉末X線分析装置	理学電機	RINT-2200
浮遊粉じんの採取	フィルター（PCM観察用） フィルター（SEM観察用） サンプラー（径47mm用） サンプラー（径25mm用）	ミリポア ミリポア 品川精器 柴田科学	セルロースエステル製（孔径0.8μm） ポリカーボネイト製（孔径0.8μm） DC-5A APS-3
PCM試料作成及び観察	アセトン蒸気発生装置 位相差型光学顕微鏡	柴田科学 オリンパス	クイックフィックス BH-2
SEM試料作成及び観察	イオンスパッター カーボン蒸着装置 走査型電子顕微鏡 エネルギー分散型X線分析装置	エイコー 日本電子 日本電子 Kevex	IB-3 JEE-4X JSM-6100 Delta Class Analyzer

たものである。SEM観察によるアスベスト繊維の形態は、写真1のとおりである。

(2) 浮遊アスベストの濃度分析

浮遊アスベストの採取時に、フィルターに採取される粉じん量をあらかじめ予測して行ったが、予測を超えて粉じん量が発生する場合も多くあった。PCM及びSEM用に作成した各顕微鏡試料は、予備的観察により、顕微鏡観察に適さない試料は除外した。顕微鏡観察に適した試料数は、PCM及びSEM各30検体であった。その内訳は、表5のとおりである。この各30検体について、アスベスト繊維濃度の分析を行った結果は、表6のとおりである。表中のNDの表示は、総観察視野中に繊維が1本も検出されなかったことを示している。この場合の繊維

濃度は、検出繊維1/2本と仮定して計算した。分析した試料のPCM濃度範囲は、最小値0.0865f/lから最大値124,000f/lまであり、SEM濃度範囲は、最小値0.395から最大値204,000f/lまでであった。繊維濃度範囲は、少数点以下2位の桁から10万の位の桁までの7桁に及ぶ広い範囲のデータを得ることができた。PCM及びSEMの顕微鏡観察例は、写真2及び3のとおりである。

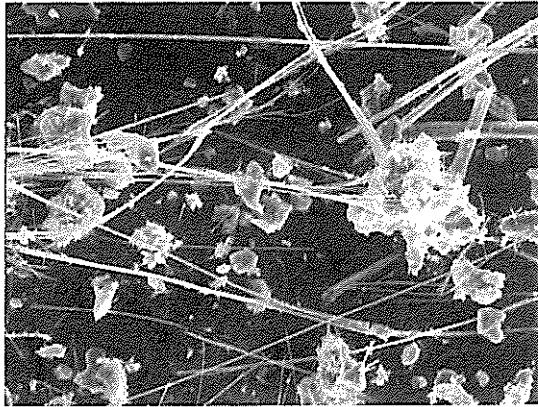
(3) 採取場所別の繊維濃度

採取場所を、屋外、屋内及び隔離シート内の別に分けて、PCM法及びSEM法による各アスベスト繊維濃度を見ると、図1のとおりである。

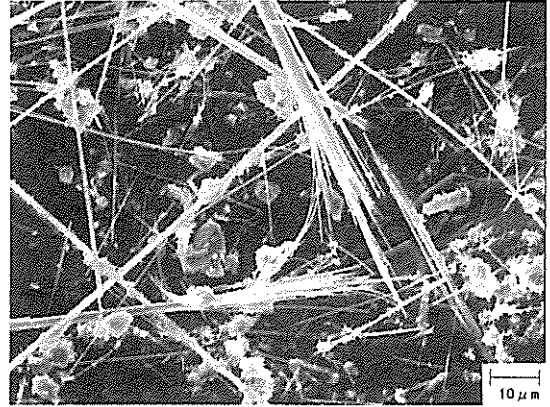
採取場所が屋外のものについて見ると、除去作業前のPCM濃度及びSEM濃度は、1f/l未満であった、一方、

表4 使用アスベスト材料の種類

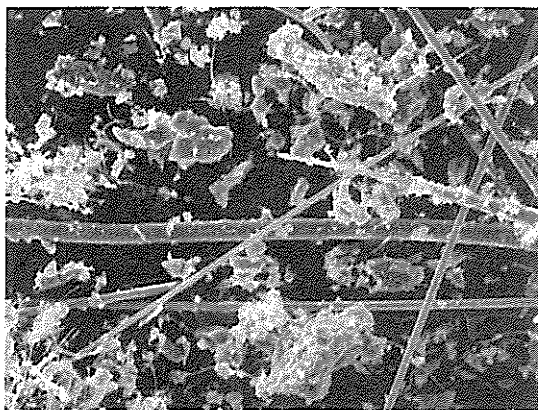
使用建物	アスベスト材料名	鉱物名	化学式
A館1階	クロシドライト	Riebeckite	$(Na, Ca)_2 (Fe, Mn)_3 Fe_2 (Si, Al)_8 O_{22} (OH)_2$
A館2階	クリソタイル	Chrysotile	$Mg_3 Si_2 O_5 (OH)_4$
B館	クロシドライト	Magnesioriebeckite	$Na_2 Mg_3 Fe_2 Si_8 O_{22} (OH)_2$
C館	クリソタイル アモサイト	Chrysotile Grunerite	$Mg_3 Si_2 O_5 (OH)_4$ $(Fe_{0.9} Mg_{0.1})_7 Si_8 O_{22} (OH)_2$



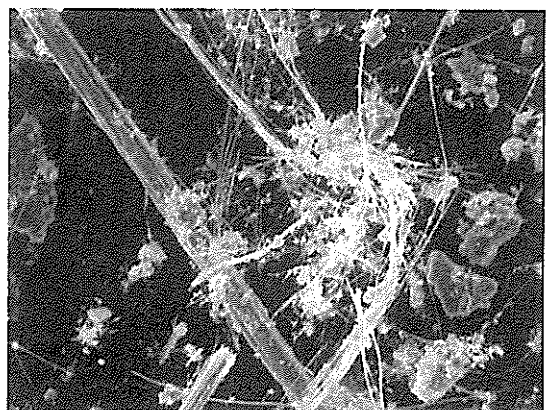
A館 1階 クロシドライト



B館 クロシドライト



A館 2階 クリソタイル



C館 クリソタイル+アモサイト

写真1 バルク材のSEM観察

表5 顕微鏡観察試料数の内訳

作業の種類	屋外	屋内	隔離シート内
除去作業前	1	4	—
除去作業中	6	7	9
建屋解体中	3	—	—

除去作業中では、PCM濃度はいずれも10f/ℓ未満であったが、SEM濃度では10f/ℓを超えるものがあった。除去作業後の建屋解体中では、PCM濃度で77.4f/ℓ、SEM濃度で104f/ℓという高濃度が検出された。この高濃度は、建物外壁の破砕作業時に風下側で捕集したものであるが、除去作業後に飛散防止剤を散布しているにもかかわらず、建築物解体作業時にはその効果が期待できないことによると考えられる。

採取場所が屋内であるものを見ると、除去作業前では

PCM濃度で10.6f/ℓ、SEM濃度で17.5f/ℓの高い濃度が検出された。これは、採取時期に室内設置機材類の撤去作業中に採取したもので、床に堆積していたアスベストが発じんしたと考えられる。他の採取場所の場合には、長期間使用していない状態で採取したもので、吸き付けアスベストのはく離が見られる場合でも低い濃度であった。

隔離シート内は、防じんマスク等の防護服を着用しなくてはならない作業環境である。隔離シート内で除去作業を行っている場合の濃度範囲は、PCM濃度で80,300から124,000 f/ℓ、SEM濃度で122,000から204,000 f/ℓと極めて高い濃度であった。隔離シート内での飛散防止剤の散布時、及び隔離シート前室内での防じん服の着替え時などの濃度範囲は、PCM濃度で388 f/ℓから31,000 f/ℓ、SEM濃度で205 f/ℓから31,500 f/ℓであった。

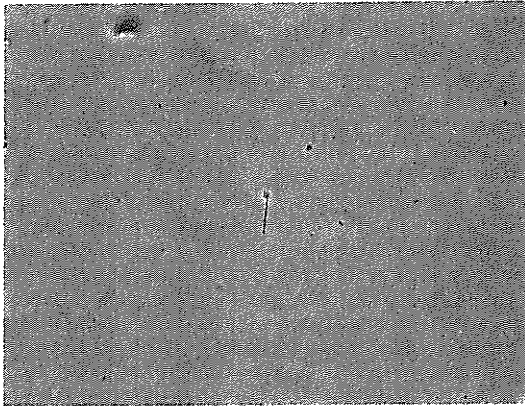
(4) PCM濃度とSEM濃度の比較

PCM濃度とSEM濃度との間の分析誤差について検討するため、PCM濃度をX軸、SEM濃度をY軸にとり、0.01から1,000,000f/ℓまでの範囲を両対数グラフで示

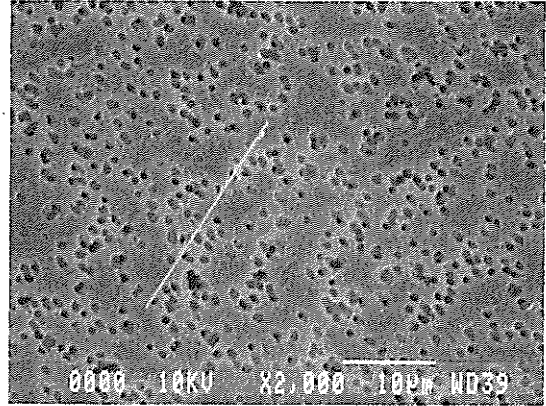
表6 試料分析結果

(上段：PCM法、下段：SEM法)

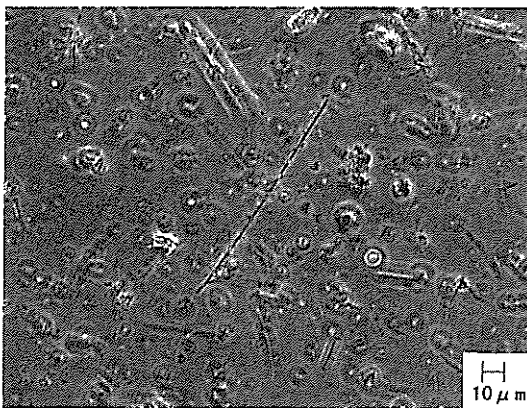
作業種類	対象建物	採取場所	ろ過面積	吸引量	視野面積	視野数	繊維数	繊維濃度
			mm ²	ℓ	mm ²	回	f	f / ℓ
除去作業前	A館1F	屋内	962	2537	0.188	50	264	10.6
			962	2388	0.00253	200	22	17.5
	A館2F	屋内	962	2415	0.188	50	6	0.254
			962	2405	0.00253	200	ND	0.395
	C館	屋内	962	2335	0.188	50	6	0.263
			962	2360	0.00253	200	2	1.61
	B館	屋内	962	2397	0.188	50	15	0.640
			962	2542	0.00253	200	2	1.49
	B館	屋外	962	2367	0.188	50	2	0.0865
			962	2491	0.00253	200	1	0.763
除去作業中	B館	屋外	962	2373	0.188	50	13	0.603
			962	2205	0.00253	200	2	1.72
	B館	シート内	346	12	0.0707	2	394	80,300
			346	12	0.00253	50	614	140,000
	B館	シート内	346	8	0.0707	2	375	115,000
			346	8	0.00253	50	442	151,000
	B館	シート内	346	8	0.0707	2	387	118,000
			346	8	0.00253	50	596	204,000
	B館	シート内	346	8	0.0707	1	203	124,000
			346	8	0.00253	50	358	122,000
	C館	屋外	962	2041	0.188	50	19	0.953
			962	2023	0.00253	200	2	1.88
	B館	屋外	962	1717	0.188	50	88	5.25
			962	1803	0.00253	200	11	11.6
	C館	シート内	346	40	0.188	25	211	388
			346	40	0.00253	200	12	205
	A館2F	屋内	962	497	0.188	50	56	11.5
			962	419	0.00253	200	6	22.7
	A館	屋外	962	570	0.188	50	10	1.80
			962	543	0.00253	200	1	3.50
	A館2F	シート内	346	5	0.188	6	210	12,800
			346	5	0.00253	200	58	11,400
	A館2F	シート内	346	7.5	0.188	7	205	7,190
			346	7.5	0.00253	200	78	7,110
	A館2F	屋内	346	240	0.188	50	188	28.8
			346	240	0.00253	200	15	42.7
	A館1F	屋外	962	826	0.188	50	20	2.37
			962	802	0.00253	200	1	2.37
	A館1F	屋内	962	801	0.188	50	26	3.32
			962	745	0.00253	200	3	7.66
	A館1F	屋内	962	670	0.188	50	47	7.18
			962	651	0.00253	200	4	11.7
	A館1F	屋内	962	556	0.188	50	66	12.1
			962	531	0.00253	200	4	14.3
	A館	屋外	962	481	0.188	50	9	1.91
			962	460	0.00253	200	1	4.13
	A館1F	シート内	346	4	0.188	4	270	31,000
			346	4	0.00253	100	92	31,500
	A館1F	シート内	346	6	0.188	19	203	3,280
			346	6	0.00253	200	18	2,050
A館1F	屋内	346	80	0.188	50	55	25.3	
		346	80	0.00253	200	3	25.6	
A館1F	屋内	346	80	0.188	50	26	12.0	
		346	80	0.00253	200	2	17.1	
建屋解体中	B館	屋外	962	661	0.188	50	51	7.90
			962	625	0.00253	200	3	11.0
	A館	屋外	962	542	0.188	25	205	77.4
			962	567	0.00253	200	31	104
	A館	屋外	346	480	0.188	50	22	1.69
			346	480	0.00253	200	2	2.85



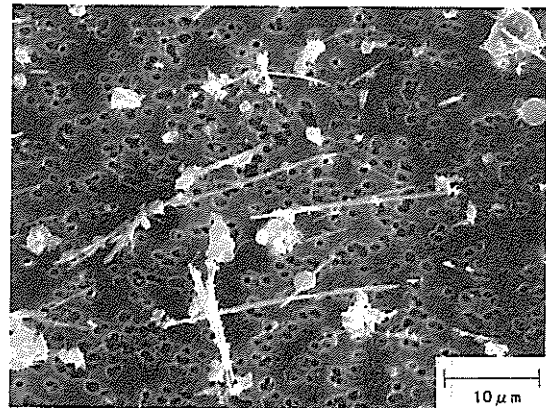
A館 1階 隔離シート内で採取



A館 1階 隔離シート内で採取



C館 隔離シート内で採取



C館 隔離シート内で採取

写真2 浮遊アスベストのPCM観察

したものが図2である。図中の実線は、PCM濃度とSEM濃度が等しい線 ($y=x$) であり、破線は、PCM濃度とSEM濃度が2倍 ($y=2x$) 又は1/2倍 ($y=1/2x$) の線である。PCM濃度及びSEM濃度が10f/lを越える高濃度領域では、両分析方法間の濃度の誤差は1/2倍から2倍の範囲内にある。PCM分析における測定者間の誤差範囲には、この程度の誤差があるとされており¹⁰⁾、PCM濃度とSEM濃度との相関が良いことが分かる。しかし、10f/l未満の低濃度領域では、PCM濃度よりもSEM濃度が2倍以上高くなるケースがある。低濃度の領域において、両分析方法間の誤差が大きくなる原因としては、SEM法の顕微鏡観察総面積がPCM法に比べ、1/20程度と狭いため、検出される繊維数が少ないことが考えられる。

4 まとめ

(1) 建築物解体工事の濃度分布

天井及び梁などに吹き付けアスベストを使用した室内

写真3 浮遊アスベストのSEM観察

の濃度は、長期間全く使用していない場合には、吹き付けアスベストのはく離が見られても、PCM濃度は以外と低く、この調査では0.6f/l以下であった。しかし、室内の設備撤去作業を行うなどの場合には、床等に堆積したアスベストが発じんを起し、PCM濃度で10.6f/lの高濃度なることがあった。

除去作業中は、アスベスト飛散防止対策マニュアルを十分に遵守して行ったと思われるが、屋内でPCM濃度28.8f/lが検出され、屋外ではPCM濃度5.25f/lが検出された。

除去作業後の建屋解体工事においては、破碎作業の直近の風下側で、PCM濃度77.4f/lと極めて高い屋外濃度が検出された。この破碎工事は、散水をしながら行ったが、風のある場合にはアスベスト飛散防止剤の散布効果は乏しいと考えられる。

(2) PCM法とSEM法との分析誤差

SEM法で対象とする最小繊維幅を0.4μm以上として計数を行い、PCM法の結果と比較した。その結果、10

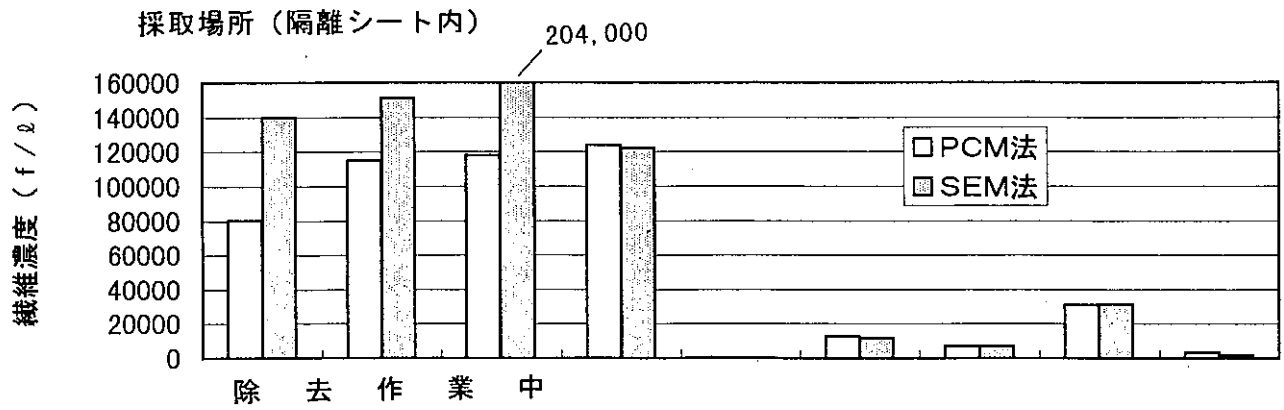
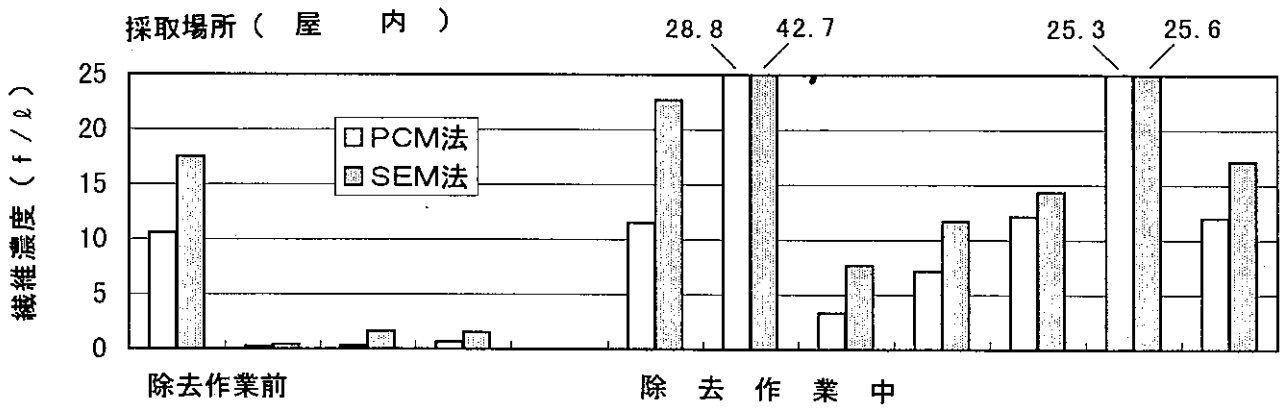
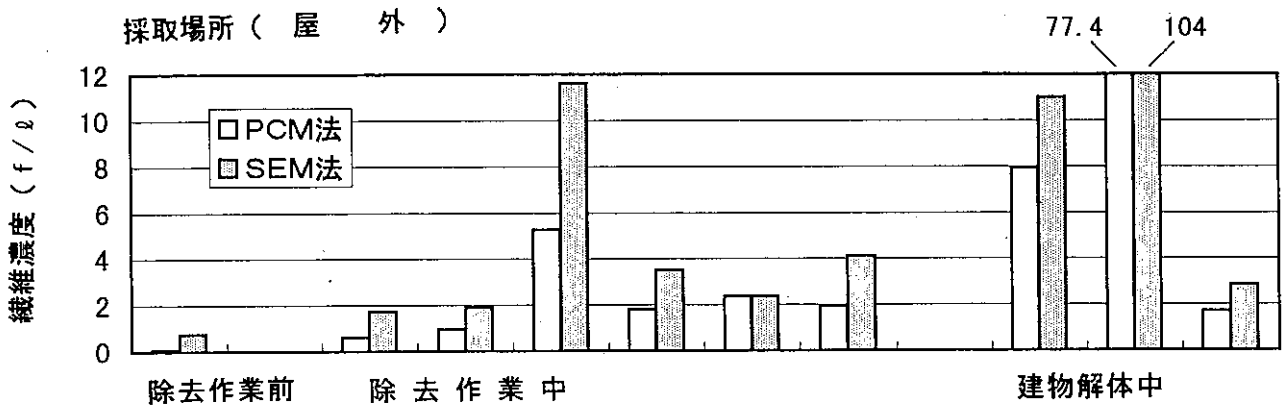


図1 採取場所別繊維濃度

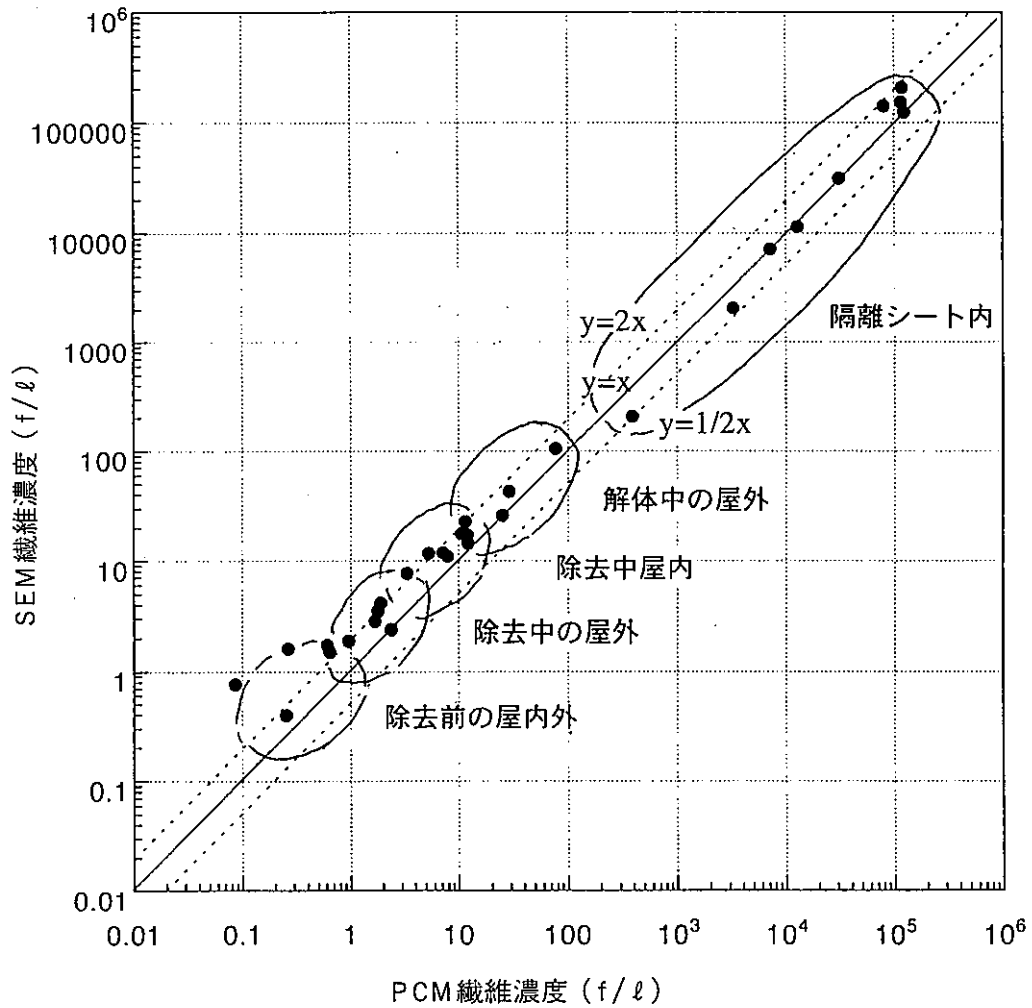


図2 PCM濃度とSEM濃度の比較

f/l を越える高濃度領域では、PCM濃度及びSEM濃度の誤差は、2倍から1/2倍の範囲内に入っていた。このことから、SEM法でPCM法と同等の繊維サイズのものを対象とする場合には、計数対象とする繊維径を0.4μm以上とすることが適当であることが確認できた。一方、10f/l未滿の低濃度領域では、低濃度になるにつれ両者間の誤差が大きくなる傾向が見られた。これは、走査型電子顕微鏡の観察面積が小さいため、検出される繊維数が少ないことによると考えられる。

参考文献

- 1) World Health Organization (WHO) : Environmental Health Criteria 53, Asbestos and Other Natural Mineral Fibers, 1986
- 2) 環境庁大気保全局 : 大気中の有害物質の現状と今後の対策, 日本環境衛生センター, 1995

- 3) 東京都環境保全局大気保全部 : 建築物の解体等に係る石綿飛散防止対策マニュアル, 1997
- 4) 日本石綿協会 : せきめん Vol.618 July 1997
- 5) 東京都環境保全局大気保全部 : 建築解体等アスベスト飛散防止対策調査報告書, 1988
- 6) 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 (改訂版), 1993
- 7) 日本規格協会 : JIS K 3850 空気中の繊維状粒子測定方法, 1995
- 8) 神山宣彦ら : 空気中の繊維状粒子測定方法, 空気清浄 VOL.32 NO.5 1995
- 9) International Centre for Diffraction Data : Powder Diffraction File, Sets 1-42, 1992
- 10) 環境庁大気保全局大気規制課 : アスベスト排出抑制マニュアル, ぎょうせい, 1984