

一般環境大気中に浮遊するアスベスト繊維等の種類及び濃度

白井 清嗣 三好 康彦 神山 宣彦*
(*労働省産業医学総合研究所)

要 旨

一般環境大気中に浮遊するアスベスト繊維及びアスベスト代替繊維等について、JIS規格及びISO規格に定める測定方法である走査型電子顕微鏡法により、それらの種類及び濃度について分析した。

(1) 一般環境大気中には、アスベスト繊維のみならず種々のアスベスト代替繊維等が浮遊している。浮遊するアスベスト代替繊維等は、アスベスト繊維よりも繊維数が多い。アスベスト繊維及びアスベスト代替繊維等を合計した平均濃度は、1.0f/lであった。アスベスト繊維及びアスベスト代替繊維等について継続的モニタリングが必要であり、それに基づく環境リスク評価が急務である。

(2) 一般環境大気中には有機繊維状粒子も多く浮遊しており、アスベスト繊維及びアスベスト代替繊維等の種類は種々雑多である。したがって、電子顕微鏡による繊維種類の識別計数が不可欠である。

キーワード：アスベスト繊維、アスベスト代替繊維、繊維状粒子、有害大気汚染物質、環境リスク、走査型電子顕微鏡

1 はじめに

吹き付けアスベストは建築物の耐火被覆等の目的から建築基準法によりその使用が1974年まで義務づけられていた。また、アスベストスレート等の建築資材も多方面で現在も使用されている。これらのアスベスト使用建築物の建て替え時期が今後到来することにより建築物解体工事が増加し、大気中へアスベストが飛散することが懸念されている。そのため、アスベスト対策は建築物の密集する大都市地域において特に重要な課題であり、東京都は1989年に「東京都アスベスト対策大綱」を策定するなどの施策を講じてきた^{1)~5)}。

アスベスト繊維は、細くて長いという形状自体に発がんに係わる重要な因子があると考えられている¹⁹⁾。アスベスト繊維と同様に、人体内に取り込まれた後も長期間消滅しない鉱物繊維はすべてが危険性を有していることになる。世界保健機関 (WHO) の下部機関である国際がん研究機関 (IARC、以下、「IARC」と言う。) は、発がん物質の発がん性について評価している。IARCの発がん性評価基準によると、アスベスト繊維は

発がん性が確実なものであり、グラスウール、ロックウール、アルミナ繊維などのアスベスト代替繊維は発がん性がある程度確かめられているものである。アスベスト代替繊維は、アスベスト代替用の建築資材として使用されるだけでなく、先端産業などの分野で各種複合材料として開発されている。アスベスト代替繊維は、多種類多用途に及び近年製造量が増加している^{6)~13)}。

過去にアスベスト粉じんを職業上暴露し、肺がん等の呼吸器疾患を発症した多くの事例がある。これらを基にして、アメリカ National Research Council (以下、「アメリカNRC」と言う。)などで、アスベスト繊維の環境リスクを計算している。アメリカNRCでは、非喫煙者の男女がアスベスト環境濃度0.4f/lの暴露を受けた場合の肺がんによる環境リスクは、 $3\sim 6 \times 10^{-6}$ 程度と推定している。一般環境大気中に浮遊するアスベスト繊維及びアスベスト代替繊維等の濃度について正確に把握し、それに基づく環境リスク評価が必要である^{14)~18)}。

一般環境大気中のアスベスト繊維等の濃度測定は、硫酸カルシウム繊維及び有機繊維状粒子などを除外し、アスベスト繊維及びアスベスト代替繊維について繊維種を識別のうえ計数することが必要である。そのための濃度測定方法として、JIS規格及びISO規格に走査型電子顕微鏡法（以下、「SEM法」と言う。また、走査型電子顕微鏡を言う場合は、単に「SEM」と言う。）が規定された^{19)~21)}。そこで、JIS規格及びISO規格に基づくSEM法により、一般環境大気中に浮遊するアスベスト繊維及びアスベスト代替繊維等の浮遊実態について調査することとした。

2 方法

(1) 採取及び試料作成方法

1999年の4月及び9月に都内3測定点（江東区、新宿区及び多摩市）で計6検体の採取を行った。粉じん採取及び顕微鏡試料作成方法は、JIS規格及びISO規格に準じて行った²¹⁾。フィルターサイズ47mm・ポアサイズ0.8 μ mのポリカーボネイトフィルター（ミリポア製ATTPタイプ）に、イオンスパッター（エイコー製IB-3型）を用いて金蒸着を施し、プレコーテッドフィルターを作成した。このプレコーテッドフィルターを捕集用フィルターとし、ポアサイズ5 μ mのメンブランフィルターをバックアップフィルターとして、オープンフェイス型フィルターホルダー（ミリポア製XX50型）に装着し、ローボリュームサンプラー（品川精器製DC-5A型）を用いて、吸引速度10 ℓ /minで4時間捕集した。

採取したフィルターの任意部分約10mm四方を切り取り、直径10mmの真鍮製試料台に導電両面テープを用いて貼付し、フィルター切片の周囲をドータイトで導電処理をした。これに、カーボン蒸着装置（日本電子製JEE4B型）を用いてカーボンコーティングを行い、SEM観察試料とした。

(2) SEM及びEDX分析方法

SEMは、労働省産業医学総合研究所のものを使用して行った。SEM（日本電子製JSM-6100型）による観察は、加速電圧20kV、観察倍率2,000倍で、1,000画面の観察を行った。倍率2,000倍でCRT画面に写されるフィルター面積は0.002463mm²であるので、総観察面積は2.463mm²である。計数対象とする繊維状粒子のサイズはPCM法と同程度の繊維サイズとし、長さ5 μ m以上、幅（直径）0.4 μ m以上3.0 μ m未満で、アスペクト比

（長さとの比を言う。）3以上のものを対象とした^{22)~23)}。繊維サイズの計測は、倍率5,000倍程度でインスタント写真から計測した。繊維状粒子の集合形態を、FIBRE, BUNDLE, CLUSTER, MATRIXの別に分類した²¹⁾。繊維状粒子の成分分析は、SEM付属のエネルギー分散型X線分析装置（Kevex製 Delta Class Analyzer以下、「EDX」と言う。）を用い、SEMの観察倍率を10,000倍に上げスポット分析により行った。SEM観察により計数対象繊維サイズをもつ繊維状粒子を抽出し、これらからEDX分析により硫酸カルシウム繊維及び有機繊維状粒子を除外したうえ、アスベスト繊維及びアスベスト代替繊維等の種類を識別した^{6),7)}。

3 結果及び考察

(1) アスベスト繊維及びアスベスト代替繊維等の計数及び分析結果

計数対象繊維サイズの繊維状粒子から、硫酸カルシウム繊維及び有機繊維状粒子を除いたアスベスト繊維及びアスベスト代替繊維等は、江東、新宿、多摩の3地点で年に2回測定した結果、合計30本が検出された。採取月日及び場所別のアスベスト繊維等のサイズ等、集合形態及び元素成分の分析結果は、表1のとおりである。

これらの検出されたアスベスト代替繊維等のSEM写真及びEDXスペクトルの例は、図1及び図2の通りである。図1のSEM写真は、長さ31.7 μ m、幅0.7 μ m、アスペクト比45.3の長い繊維である。EDXスペクトルによる元素成分は、アルミニウムだけが検出されシリコンなどはほとんど検出されていない。シリカ成分がないか又は少ないアルミナ繊維である。

図2のSEM写真は、長さ27.7 μ m、幅2.7 μ m、アスペクト比10.3の繊維、及び長さ11.8 μ m、幅2.0 μ m、アスペクト比5.9の2本の繊維である。EDXスペクトルでは、シリコンだけが検出された。シリカ繊維又は炭化ケイ素繊維のいずれかである。

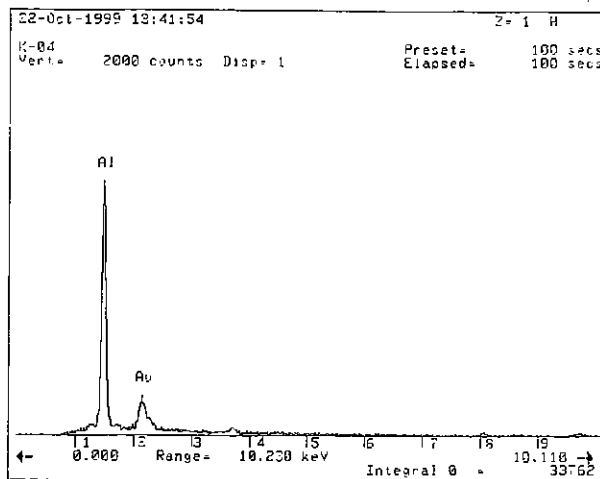
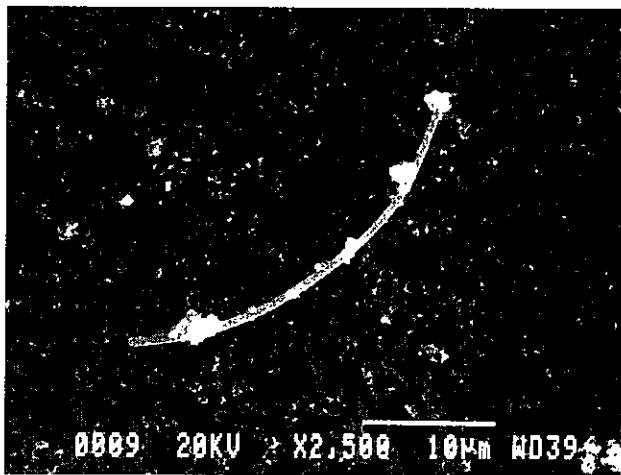
(2) アスベスト繊維及びアスベスト代替繊維等の濃度
検出されたアスベスト繊維及びアスベスト代替繊維等から、式(1)により濃度C(ℓ / ℓ)が計算される²¹⁾。

$$C = \frac{n}{N \cdot V_B} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$V_B = \frac{4 \cdot F_B \cdot V}{\pi \cdot d_{\text{eff}}^2}$$

表1 アスベスト繊維及びアスベスト代替繊維等の計数及び分析結果

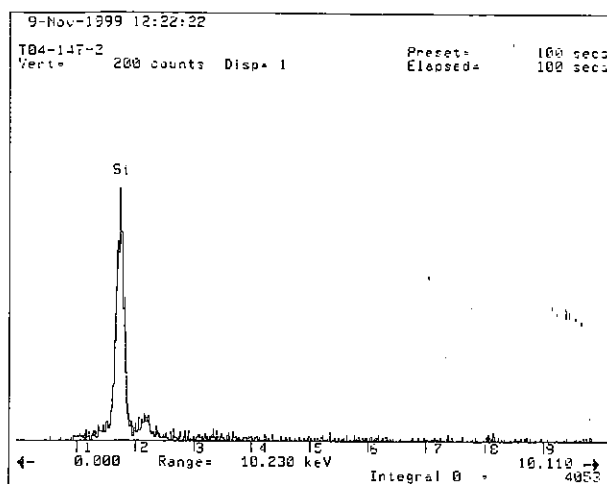
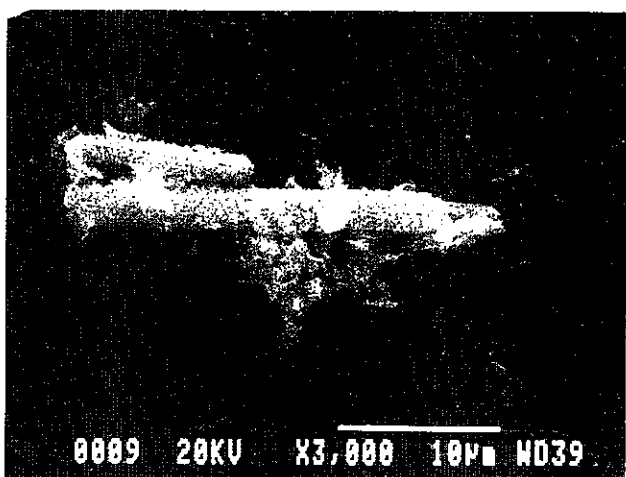
採取月日 採取場所	繊維サイズ		集合形態	元素分析	繊維種類		
	L (μm)	D (μm)					
4/14	江東	31.7	0.7	MATRIX	Al	アルミ繊維	
		5.5	0.5	FIBRE	Al, Si, K	セラミックファイバー	
	新宿	8.1	1.3	MATRIX	Si	シリカ繊維	
		7.6	1.5	SPLIT FIBRE	Mg, Al, Si, Zr, Ca, Fe	ロックウール	
		9.9	1.2	MATRIX	Mg, Si, S	アスベスト繊維	
		5.2	1.1	MATRIX	Mg, Al, Si, Ca, Fe	ロックウール	
		5.0	1.2	MATRIX	Si, S, Ca	シリカ繊維	
		5.5	1.2	MATRIX	Si	シリカ繊維	
		10.8	2.4	FIBRE	Mg, Si, Ca, Fe	アスベスト繊維	
	多摩	7.9	1.2	MATRIX	Mg, Al, Si, Ca, Fe	ロックウール	
		7.6	2.3	FIBRE	Al, Si	セラミックファイバー	
		9.2	1.1	MATRIX	Al, Si, S, Ca	ガラス繊維	
		8.8	2.0	FIBRE	Al, Si, K	セラミックファイバー	
		27.7	2.7	MATRIX CLUSTER	Si	シリカ繊維	
		11.8	2.0	MATRIX CLUSTER	Si	シリカ繊維	
		11.4	1.6	MATRIX	Mg, Al, Si, Ca, Fe	ロックウール	
	5.1	0.9	FIBRE	Na, Al, Si, Ca	ガラスウール		
	9/16	江東	6.8	2.0	MATRIX	Si	シリカ繊維
			23.4	1.4	MATRIX	Mg, Al, Ca, Mn	スラグウール
			13.6	1.6	FIBRE	Si	シリカ繊維
9.4			2.2	MATRIX	Si	シリカ繊維	
15.6			0.8	MATRIX CLUSTER	Zr, Ca	ジルコニウム含有繊維	
25.3			1.6	MATRIX CLUSTER	Zr, Ca	ジルコニウム含有繊維	
12.2			1.4	MATRIX	Mg, Al, Si, Ca, Fe	ロックウール	
新宿		5.3	1.6	FIBRE	Mg, Al, Si, Ca, Fe	ロックウール	
		15.2	2.8	MATRIX	Si	シリカ繊維	
多摩		10.4	2.2	FIBRE	Si	シリカ繊維	
		27.2	2.4	MATRIX	Mg, Al, Si, Ca, Fe	ロックウール	
		7.8	1.8	FIBRE	Si	シリカ繊維	
		8.8	0.9	FIBRE	Fe	鉄質繊維	



(1) SEM写真

(2) EDXスペクトル

図1 アルミナ繊維のSEM写真及びEDXスペクトル



(1) SEM写真

(2) EDXスペクトル

図2 シリカ繊維 (又は炭化ケイ素繊維) のSEM写真及びEDXスペクトル

- ここに、C : 濃度 (f/l)
 n : 計数繊維数 (f)
 N : 観察画面数 (1,000画面)
 V_B : 観察画面あたり採気量 (l)
 F_B : 観察画面面積 (0.002463mm²)
 V : サンプルング採気量 (l)
 d_{eff} : フィルターの有効直径 (35mm)

また、平均濃度C_A (f/l)は、式 (2) により求められる²¹⁾。

$$C_A = \frac{\sum n}{\sum N \cdot V_B} \dots\dots\dots (2)$$

式 (1) 及び式 (2) により計算した採取月日・地点別のアスベスト繊維及びアスベスト代替繊維等の濃度及び全体の平均濃度は、表2のとおりである。各採取地点の平均濃度は江東0.90f/l、新宿0.94f/l、多摩1.20f/lであった。

1地点あたり2回採取したアスベスト繊維及びアスベスト代替繊維等の平均濃度の検出下限値E (f/l)は、式 (3) により算出される²¹⁾。

$$E = \frac{2.99}{\sum N \cdot V_B} \dots\dots\dots (3)$$

一方、位相差光学顕微鏡法 (以下、「PCM法」と言う。) による繊維状粒子の濃度は、表3のとおりである。

SEM濃度の方がPCM濃度より高かった。

表2 アスベスト繊維及びアスベスト代替繊維等の濃度 (f/l)

場所 \ 月日	4/14	9/16	平均濃度	検出下限値
江 東	0.40	1.40	0.90	0.30
新 宿	1.52	0.39	0.94	0.31
多 摩	1.83	0.79	1.20	0.30
平均濃度	1.17	0.85	1.01	---

表3 位相差光学顕微鏡法による繊維状粒子の濃度 (f/l)

場所 \ 月日	4/14	9/16	幾何平均
江 東	0.19	0.32	0.25
新 宿	0.37	0.11	0.20
多 摩	0.32	0.16	0.23
幾何平均	0.28	0.18	0.23

(3) アスベスト繊維及びアスベスト代替繊維等の種類及びサイズ分布

IARCは、各種の物質の発がん性について評価し、グループ分類をしている。アスベスト繊維は、グループ1（発がん性が確実にある。）に分類されている。アスベスト代替繊維のうちロックウール、グラスウール、アルミナ繊維などは、グループ2B（発がん性がある程度確かめられている。）に分類されている。アスベスト代替繊維のうち、現在まだ評価されていないものもある^{6),7)}。

今回検出されたアスベスト繊維及びアスベスト代替繊維等を繊維種類別に分類するとともに、IARCの発がん性評価基準によるグループ分類を付記すると、表4のとおりである。

計数対象繊維サイズ（長さ $L \geq 5 \mu\text{m}$ 、 $0.4 \mu\text{m} \leq \text{幅} D < 3.0 \mu\text{m}$ 、アスペクト比 $A \geq 3$ ）をもつアスベスト繊維及びアスベスト代替繊維等の繊維種類別の長さ対幅のサイズ分布は、図3のとおりである。長さ $15 \mu\text{m}$ 程度以下の短いものと、長さ $25 \sim 30 \mu\text{m}$ 程度の長いものの長さによる2極化が見られる。

表4 アスベスト繊維及びアスベスト代替繊維等の種類及び検出本数（IARCの発がん性評価基準のグループ分類）

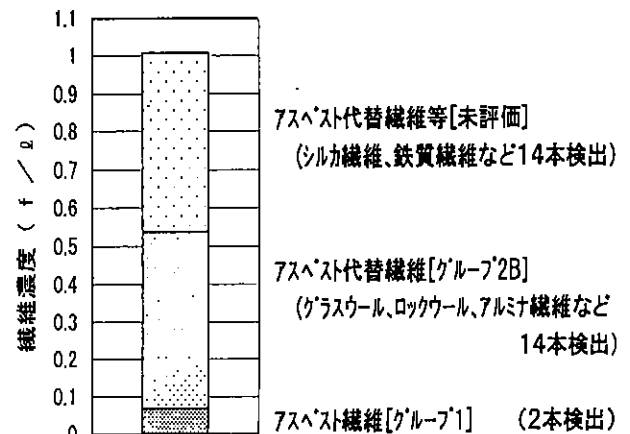
繊維種類	検出本数	IARC発がん性評価基準グループ分類
アスベスト繊維(クリソタイル, アンフィボール)	2	1
ロックウール, スラグウール	8	2B
アルミナ繊維, セラミックファイバー	4	2B
グラスウール	2	2B
ジルコニウム含有繊維	2	
シリカ繊維, 炭化ケイ素繊維	11	
鉄質繊維	1	
合 計	30	

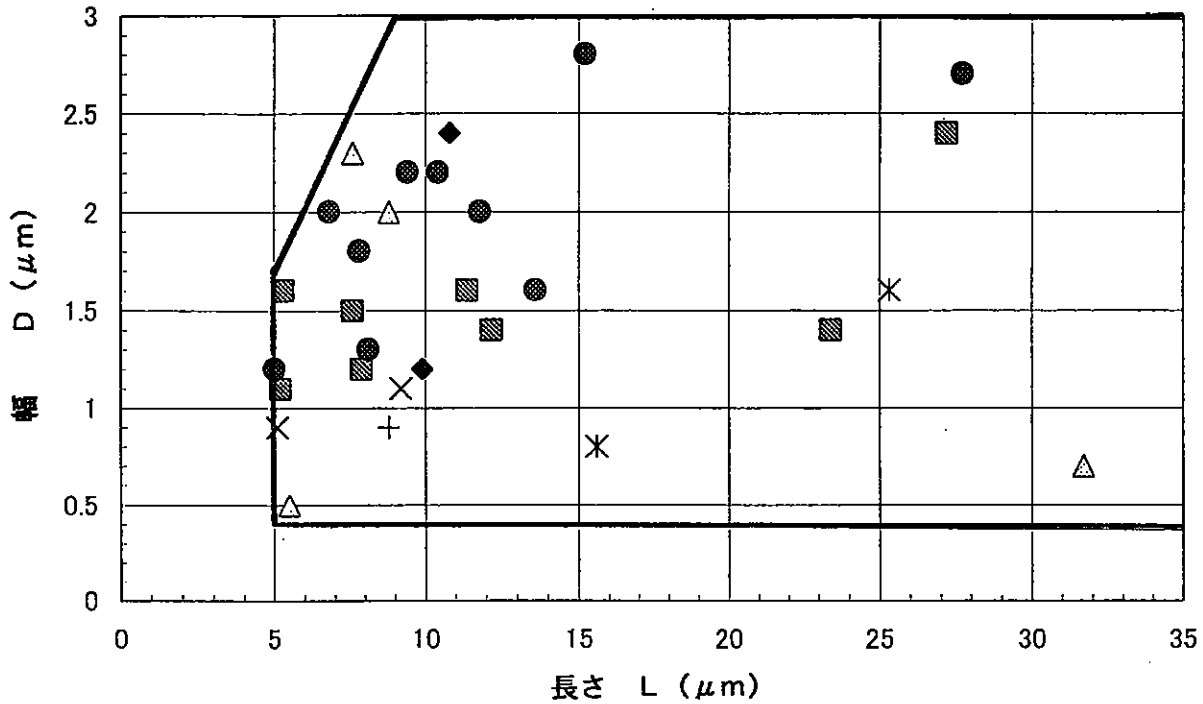
(IARC発がん性評価基準グループ分類)

- 1 : 発がん性が十分に確かめられている。
- 2B : 発がん性がある程度確かめられている。

IRACの発がん性評価基準分類によるアスベスト繊維及びアスベスト代替繊維等の平均濃度は、図4のとおりである。グループ1のアスベスト繊維のみの平均濃度は、計算上では $0.07f/l$ 、これにグループ2Bとして評価されているアスベスト代替繊維を加えた平均濃度は、 $0.54f/l$ であった。さらに、まだ評価されていないアスベスト代替繊維等を加えた平均濃度は、計算上 $1.01f/l$ となった。

図4 アスベスト繊維及びアスベスト代替繊維等の濃度 (IARC発がん性評価基準グループ分類による)





凡例

◆アスベスト繊維	▨ロックウール, スラグウール
△アルミナ繊維, セラミックファイバー	×ガラスウール
＊ジルコニウム含有繊維	●シリカ繊維, 炭化ケイ素繊維
+鉄質繊維	

図3 アスベスト繊維及びアスベスト代替繊維等の種類及びサイズ分布

4 まとめ

一般環境大気中に浮遊するアスベスト繊維及びアスベスト代替繊維等について、JIS規格及びISO規格に基づくSEM法により繊維種類及び濃度分析を行い、次のことが分かった。

- ① 一般環境大気中には、アスベスト繊維のみならず種々のアスベスト代替繊維等が浮遊している。浮遊するアスベスト代替繊維等の繊維数は、アスベスト繊維より多い。アスベスト繊維及びアスベスト代替繊維等を合わせた平均濃度は、1.01f/lであった。アスベスト繊維及びアスベスト代替繊維等について継続的モニタリングが必要であり、それに基づく環境リスク評価が急務である。
- ② 一般環境大気中には、有機繊維状粒子も多く浮遊しており、アスベスト繊維及びアスベスト代替繊維等の種類も種々様々に及んでいる。したがって、電子顕微鏡による繊維種識別計数が不可欠である。

参考文献

- 1) 東京都衛生局：アスベストの基礎知識と指導マニュアル（改訂版），p.8～17，1996
- 2) 東京都環境保全局：建築物解体等アスベスト飛散防止対策調査報告書，p.99～112，1988
- 3) 東京都環境保全局：アスベスト関係法令・通達・要綱・技術資料集，p.3～10,p.19～52，1994
- 4) 環境庁大気保全局：構築物の解体・撤去等に係わるアスベスト飛散防止対策について，p.70～75，1995
- 5) 村山武彦ら：建築物解体に伴う環境へのアスベスト排出量の将来予測－環境汚染リスク見積りのための基礎的研究－，公害研究 Vol.18 No.2，p.54～61，1988
- 6) 中央労働災害防止協会労働衛生検査センター：平成8年度ガラス繊維等の疫学的調査研究に関するデータベースの作成および有害性試験のための標準繊維の作成方法の研究委員会報告書，1997

- 7) 神山宣彦：微粒子吸入による健康影響，セラミックス，Vol.29 No.2, p.111～117, 1994¹
- 8) 労働省労働基準局：石綿代替繊維とその生体影響，中央労働災害防止協会，p.18～80, 1996
- 9) 環境庁大気保全局：アスベスト代替品のすべて，(財)日本環境衛生センター，p.389～444, 1989
- 10) 竹本和夫ら：アスベスト代替繊維の生体影響，労働の科学，Vol.42 No.12, p.27～30, 1987
- 11) 神山宣彦ら：アスベスト代替繊維のリスク評価のための研究，平成9年度環境保全研究成果集（Ⅲ），p.82.1～82.42, 1998
- 12) World Health Organization：Environmental Health Criteria 53, Asbestos and Other Natural Mineral Fibres 1986
- 13) World Health Organization：Environmental Health Criteria 77, Man-made Mineral Fibres, 1988
- 14) National Research Council, Committee on Nonoccupational Health Risks of Asbestiform Fibers：Asbestiforms fibers - Nonoccupational health risks, National Academy Press Washington, p.200～235 (1984)
- 15)¹ G. K. Monitizaan et al.：Asbestos = Toxicology and Risk Assessment for the General Population in the Netherlands, Fd. Chem. Toxic., Vol.27 No.1, p.53～63 (1989)
- 16) 村山武彦ら：居住環境におけるアスベスト汚染リスクの一推定，環境情報科学，Vol.18 No.1, p.81～90 1989
- 17) 岩井和郎ら：アスベスト暴露量と悪性腫瘍発生率との量・反応関係データばらつきの要因分析と一般環境大気中繊維によるリスクの試算，大気汚染学会誌，Vol.23 No.3, p.181～191, 1990
- 18) 厚生省生活衛生局：廃石綿等処理マニュアル，p.68～73, 1993
- 19) 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, p.53～65, 1995
- 20) JIS K 3850 - 1995：空気中の繊維状粒子測定方法
- 21) ISO 14966 - 1998：Ambient air - Determination of numerical concentration of inorganic fibrous particles - Scanning electron microscopy method
- 22) 神山宣彦ら：走査電子顕微鏡による石綿測定法の検討，日本労働衛生工学会・作業環境測定研究発表会，p.62～63, 1998
- 23) Kiyotsugu Shirai, et al.：Comparative measurements of airborne asbestos at demolition sites of big buildings, International Symposium on Electron Microscopy in Medicine and Biology, p.134～137, Korea, 1999