繊維状鉱物の人体影響

——職業環境暴露から一般環境暴露まで——

神 山 宣 彦*

Biological Effects of Mineral Fibers

——From Occupational Exposure to Non-occupational Exposure——

Norihiko KOHYAMA*

Abstract

Asbestos and many other fibrous minerals are extremely important materials for our modern industrialized society to keep it safely and comfortable. However, the adverse health effect of asbestos, especially its carcinogenicity, has been revealed during recent 15 years. In this symposium paper, the author reviewed 1) definition of asbestos because the term can not be defined by mineralogy, 2) diseases due to the exposure of asbestos, such as asbestosis, lung cancer, and mesothelioma as well as synergism effect of asbestos exposure and cigarette smoking, 3) current problems of asbestos in Japan, such as asbestos concentration in working environment controlled by current regulation, chances of asbestos exposure including general people, and 4) biological effect of asbestos substitutes, especially in reference to the cases of mesothelioma due to fibrous erionite in Turkey and the hypothesis by Drs. Stanton and Pott. In conclusion, we should consider now how to cope with asbestos and other mineral fibers safely for our life.

1. はじめに

鉱物が原因となった健康被害は、石英、雲母、石綿などによる塵肺が古くから良く知られているが、これらは主に限られた労働環境の問題である。一般環境で鉱物が関係した健康被害例としては、イタイタイ病や水俣病がその原因となったカドミウムや水銀が鉱物を加工したものという意味で挙げられるが、鉱物そのものが直接関係した例ははっきりしていない。石綿が発がん物質であることが判明してから、極く低濃度でも健康影響が懸念される様になり、石綿の健康影響の問題は限られた労働環境から一般環境の問題へと目が向けている。ただ、一般環境での個々の健康被害例となると特定するのが極めて難しい。

従来のが国の環境問題は、一般の住民に健康被害が出て初めて指摘され、その環境基準などの

1987年11月10日受理

* 労働省産業医学総合研究所

* National Institute of Industrial Health, Ministry of Labor, 6-21-1 Nagao, Tamaku, Kawasaki 214

対策も実際の健康影響の知見に基づいて設定されているが、地球規模の大気汚染や海洋汚染などについては、こうした事後的な対応に対して、特に事前の予防的対応が必須である¹⁾。一般環境問題に直接関わったはじめての鉱物と言える石綿をはじめ繊維状鉱物は、長期に渡って変質しない極めて環境蓄積性の高い物質であり、事前の予防的対応が重要となるであろう。

現在、生体鉱物学は多くの鉱物学者の興味と参加を得て活発化しており学問体系も出来つつあると思われるが、環境鉱物学となると果たしてその様な学問があるのかさえ怪しい段階である。本小文では、鉱物の吸入で生じた疾患の原因解明や環境中に浮遊している極微量の石綿の定量などに鉱物学の知識と研究手法が如何に貢献しているかなどを中心に紹介して、大方の「環境鉱物学」への興味を喚起したい。まず、石綿とは何かを石綿の法的定義と関連して述べた後、労働環境だけでなく一般環境へも石綿の人体影響の懸念が拡大していることなどの石綿問題の現況、そして石綿に替わる安全な繊維状物質の開発が急がれている折から、こうした石綿代替品と健康影響との問題を述べる。

2. 石綿の光と影

石綿（アスベスト、アミアントス）は、かんらん岩や縞状鉄鉱層などに束状で産出する繊維状鉱物であり、その繊維はほぐすと木綿や羊毛と同じように容易に糸や布に織れるし、ほぐした細い繊維を丸めれば、「綿のような石」の名が示すようにまさに木綿や羊毛の綿と見間違ふしなやかさを持っている。また、引っ張り（抗張力）や摩擦（耐摩耗性）に強く、かなりの高温でも燃えたり変化せず（耐熱性）、さらに薬品にも強く（耐薬品性）かつ豊富に産出するなど、種々の優れた性質を兼ね備えた極めて特徴的な鉱物である。人間は長い間この様な石綿の種々の性質を有効に利用する技術や分野を開拓し、それによって我々の生活は快適かつ安全に守られてきた。まさに、石綿は、人類の進歩を支えた代表的な有用鉱物と言えるであろう。

こうした石綿の光の部分とは逆に、その影の部分すなわち有害性について、我々はどの様な知識を持ち対応をしてきたのか。石綿紡織労働者などの職業病として、かなり大量の石綿粉塵を吸入した人々（高濃度暴露者）が石綿肺と呼ばれる塵肺の一種になることは、石綿の有害性として古くから知られていた。石綿の発がん性は、石綿工場労働者の肺がんが1935年に米国と英国で発見され²⁾、一部の研究者によって指摘されてはいたが、石綿の使用量も当時それほど多くなく限られた労働者の疾病ということで一般には余り知られていなかった。ところが、石綿の大量使用の先き駆けであった第二次世界大戦中の海軍工廠やその後の造船業、および戦後の先進工業国を中心とする急激な産業発展に伴う大量生産と大量消費によって、戦後各国の造船業労働者あるいは石綿鉱山や石綿工場労働者などから石綿肺とともに肺がんが頻繁に発見されるようになった。さらに、1960年頃からは極めてめずらしい病気である胸膜や腹膜の悪性中皮腫が石綿暴露によって起きるという報告が増え始めた³⁾。このような状況から石綿の健康影響の研究が活発になり、1970年代初頭には疫学的にもまた動物実験的にも石綿の発がん性は立証され⁴⁾、同時に石綿を吸入してから20—40年後に発がんが急増することもはっきりしてきた。まさに忘れた頃に発病するのである。こうしたことから、極めて優れた天然繊維素材である石綿は「静かな時限爆弾」として恐れられる鉱物になってしまっ

表 1 石綿の種類と鉱物学的分類⁶⁾

石 綿 種	化 学 構 造 式	鉱 物 名
蛇 紋 石 族 (Serpentine group)		
クリソタイル (温石綿・白石綿) Chrysotile (white)	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	クリソタイル Chrysotile
角 閃 石 族 (Amphibole group)		
クロシドライト (青 石 綿) Crocidolite	$Na(Fe^{2+} > Mg)_3Fe_2^{3+}Si_8O_{22}(OH)_2$	リーベック閃石 (曹 閃 石) Riebeckite
アモサイト Amosite	$(Mg < Fe^{2+})_7Si_8O_{22}(OH)_2$	カミングトン閃石- グリュネ閃石 Cummingtonite- Grunerite
アンソフィライト Anthophyllite asbestos	$(Mg > Fe^{2+})_7Si_8O_{22}(OH)_2$	直 閃 石 Anthophyllite
トレモライト- アクチノライト Tremolite- Actinolite asbestos	$Ca_2(Mg, Fe^{2+})_5Si_8O_{22}(OH)_2$	透角閃石-陽起石 Tremolite- Actinolite

た. もちろん, 石綿自身は昔も今も変わっていないのであるが, 我々がその発がん性に気付くのがあるいはそれを認めるのが遅過ぎてその間に不注意な使い方をし過ぎたためである.

3. 石綿とは何か——石綿の定義——

今までに工業的に使われてきた石綿は, 鉱物学の分類では蛇紋石族のクリソタイルと角閃石族のグリュネ閃石(アモサイト)とリーベック閃石(クロシドライト)などである. 現在はこの内, クリソタイルの消費量が圧倒的に多く(95%以上), その他はアモサイトであり, クロシドライトは極く限られた用途以外わが国ではほとんど使用されていない. 近代鉱物学の分類によれば石綿は単一の鉱物でなくいくつかの異なる鉱物の総称ということになる. 歴史的には, 石綿として色々な繊維状の鉱物が使われてきた. 例えば, 非常に繊維の長いセピオライトが産出する中国のある地方では, 最近までそれを石綿として使用していたという. 表1に現在一般的に認められている石綿の種類とその鉱物学上の分類とを対比させて示した. 表1の各石綿の鉱物名は右端の様であるが, 逆に右端の鉱物学で定義された各鉱物がすべて石綿ではない. すなわち, 石綿としてはそのうちの繊維状形態を成しているものだけを利用しているのである. 近代鉱物学の分類は結晶構造と化学組成の差異によってなされており, 結晶形態の違いは問題でない. その結晶形態は肉眼で見た時と, 光学顕微鏡や電子顕微鏡などで見た時とで変わってくるからである. したがって, 「繊維状の」と言ってもどのレベルで見たものでか実際の内容は変わってしまう. 例えば, 肉眼的に塊状に見える角閃石も顕微鏡下では細長く壁開して繊維状に見える場合は時々あるし, 同じく肉眼レベルで全く繊維状には見えない塊状で産出するクリソタイルもある. 逆に, 肉眼でも顕微鏡下でも明瞭な繊維状形態

を示す Chrysotile の一種 Picrolite は、しなやかさが無いため石綿としては価値がなく工業的に使用されたこともなく石綿とは呼べないといった例もある。

現在、世界各国とも石綿労働者の健康を守るため作業環境中の浮遊石綿濃度を規制する法律を決めているが、石綿の定義が現在の鉱物学の分類体系の下では不可能であるので、欧米の法律では最初にまず石綿の定義をしている。それらのうち、NIOSH-OSHA Asbestos Working Group(1980)⁵⁾の「石綿とは、クリソタイル、クロシドライト、および繊維状カミングトン閃石——グリュネ閃石(アモサイトを含む)、繊維状トレモライト、繊維状アクチノライト、繊維状アンソフィライトと定義し、これらの繊維状形態は顕微鏡レベルでアスペクト比 (aspect ratio) が3:1 かそれ以上の粒子として確認された場合」というのが妥当なところであろう。昨年の ILO 第 72 回総会で採択された「石綿の使用における安全に関する条約および勧告」では、「石綿」「石綿粉塵」「浮遊石綿粉塵」「呼吸吸入される石綿繊維」などの定義を行なっているが、「石綿」の定義のなかに「……それらの(繊維状のクリソタイルやアモサイトを指す) 1 または 2 以上含有する混合物」(any mixture containing one or more of these) とあり、これは疑問である。これでは、クリソタイルを 0.1% でも含むタルクも石綿になってしまう。現在、わが国の法律で石綿の定義がされたものは見あたらない。今まではそれでも問題は生じなかったであろうが、後述の様に、今後増す増す石綿代替品の開発と使用が盛んになる状況にあるので、石綿と石綿代替品を区別するためにも石綿の法律的な定義が必要であろう。なお石綿の定義に関しての筆者のまとめ⁶⁾およびその鉱物学的立場から見た歴史的背景が Zoltai (1978)⁷⁾によってまとめられている。

一方、作業環境中の浮遊石綿濃度を測定する方法として、現在世界各国とも位相差光学顕微鏡または X 線回折計による測定が決められている⁸⁾が、前者では、石綿の種類あるいは石綿以外の繊維との区別が難しいし、後者では繊維状形態か否かが分からないという欠点がある。実際には前者の位相差光学顕微鏡の使用が圧倒的に多いが、今後石綿代替品が石綿と一緒に作業環境で使用された場合、石綿をそれ以外の繊維と区別して測定することが不可能になる。その欠点を補える唯一の測定方法として、個々の繊維の種類と形態を把握しかつ繊維数を計数定量できる分析電子顕微鏡の応用が現在考えられるが、将来に向けてその具体的な測定方法の検討とマニュアル作りが今必要である。

4. 石綿関連疾患

石綿暴露で生じる疾患は、石綿肺 (Asbestosis)、肺がん (Carcinoma of Bronchus)、胸膜と腹膜の悪性中皮腫 (Malignant Mesothelioma of Pleura and Peritoneum)、および胸膜肥厚斑 (プラーク) (Pleural Plaque; thickening of pleura) などがある (Fig. 1)。Fig. 1 に小文字で示された胃がんや喉頭がんなどの消化器系のがんは、石綿暴露との関連が強く疑われているが、それを疑問とする意見もあり今後の研究課題となっている。

石綿肺は、石綿暴露によって生じた肺胞間質の繊維増殖性病変で、進展すると肺の広範囲の繊維化や胸膜病変による肺容量の減少のために呼吸不全をきたす。管理 4 と認定された石綿肺患者の半数以上が 5 年以内に死亡するなど石綿肺患者の予後は良くなく⁹⁾、また石綿肺は、石綿暴露後かな

りたってからも進展することが知られている¹⁰⁾。Fig. 2 と Fig. 3 に、経気管支肺生検 (TBLB) で得た石綿肺患者の厚さ $4\text{ }\mu\text{m}$ の肺組織試料中に存在していた石綿繊維群の様子を示した。

石綿暴露と肺癌発症との因果関係を証明する疫学調査は、Doll (1955)¹¹⁾ によるものが嚆矢とされている。彼は英国の石綿紡織工場に 20 年以上働いたことのある男子 113 人の中に 11 人の肺癌死

SOURCE: Illustration by Mr. Jerry Farrell, Audio-Visual Centre, McMaster University; consultative assistance by Dr. David C.F. Muir, Director, Occupational Health Program, Health Sciences Centre, McMaster University, Hamilton, Ontario.

Fig. 1 Asbestos-related diseases and their sites in the human body.

Fig. 2 Crocidolite fibers and the asbestos bodies found in the TBLB specimen taken from an asbestos worker diagnosed as asbestosis. (Male, 49 yrs, worked in an asbestos factory and a railway company for 25 years, PS-12 A, Case 5).

Fig. 3 Chrysotile fibers found in the TBLB specimen taken from an asbestos worker diagnosed as asbestosis.
(Male 69 yrs, worked in asbestos carding and milling for 24 years, PS-11 A, Case 6).

亡者を認め、それが同観察期間内の同年齢の英国一般男子の肺癌死亡率に比較して 13.8 倍高い癌発生率であると報告した。その後、英国、米国、カナダなど各国から石綿労働者の疫学調査結果が相次いで報告され、いずれも肺癌死亡率が高いことを示している¹²⁾。それらのなかで Selikoff, Hammond ら (1979)¹³⁾ の米国とカナダの 20 年以上石綿（主にクリソタイルとアモサイト）暴露歴のある断熱作業従事者 17800 人を対象にした 1967 年から 1976 年までの 10 年間の追跡調査によると、観察期間内の 2271 人の死亡者のうち、486 人が肺癌であった。そのうち喫煙歴のある者を差し引いて一般人と比較した石綿暴露者の肺癌発生率は 4.60 倍であった。

石綿暴露による肺癌の発症で特に注意すべきことは、喫煙の影響である。Hammond, Selikoff ら¹⁴⁾の研究によると、喫煙が石綿暴露と重なると肺癌の発生率は相乗的に増加している。たばこも石綿も吸っていない人の肺がん死亡率を 1 とすると、石綿暴露を受けた人は 5.2 倍、たばこを吸う人は 10.9 倍、たばこを吸う石綿暴露者は 53.2 倍であった。たばこにはベンツピレンなど様々な発がん物質が含まれており、受動喫煙だけでも 2 倍以上の肺がん死亡をもたらすといわれている。さらに一般大気中には排ガスやその他様々な発生源からのベンツピレンやひ素などの発がん物質が確認されているので、石綿もこれらとの相乗作用で、肺がん発生に大きな影響を及ぼしていると思われる。

中皮腫は、胸膜、腹膜、心膜などの中皮表面およびその下層の組織に発生するめずらしい腫瘍である。Wagner (1969)³⁾による南アフリカのクロシドライト鉱山付近の住民の疫学調査で胸膜中皮腫と石綿暴露との関係が証明されて以来、中皮腫は石綿暴露と極めて密接な因果関係がある悪性腫

表 2 中皮腫症例の分析電子顕微鏡による石棉検索結果¹⁶⁾

No.	年齢	性	部位	喫煙歴	職業歴	§含鉄小体	CHRY	AMOS	CROC	ACT-TRE
1	73	女	右胸膜	—	石綿工場 1 年勤務	(+)	++	+++	—	—
27	49	男	左胸膜	—	石綿工場 1 2 年勤務	(+)	—	+++	—	—
34	57	男	左胸膜	10本 / 日	石綿工場 2 年勤務	(+)	+~++	++	—	—
11	66	男	右胸膜	15本 / 日	造船業	(+)	—	++	+++	—
15*	46	男	右胸膜	10×26年	造船業・電気技師	(+)	++~+++	+++	—	—
40	71	男	右胸膜	15×35年	造船業・技師	(+)	+	++	++	+
19	60	男	左胸膜	20×35年	電気配線工	(+)	+	+++	+	—
25	68	男	右胸膜	15本 / 日	会社事務 (詳細不明)	(+)	—	+++	—	+
28	61	男	右胸膜	20×40年	製鉄所勤務	(—)	+++	+++	—	—
35	64	男	左胸膜	+	電灯製造	(—)	—	++	—	++
39	70	男	右胸膜	40×47年	会社事務 (お製造業)	(—)	—	++~+++	—	—
46*	56	男	右胸膜	20×34年	塗装工	(+)	—	++~+++	—	—
8	76	男	右胸膜	20×40年	メッキ工	(+)	++	—	—	—
22*	69	女	右胸膜	—	石綿工場近隣 9 年居住	(—)	+~++	—	—	—
32	69	男	右胸膜	20本 / 日	プラスチック成型	(—)	+++	—	—	—
38*	70	男	右胸膜	+	外科医	(—)	+~++	—	—	—
2	62	男	右胸膜	5本 / 日	溶接工	(+)	+	—	—	—
26	54	男	左胸膜	15×30年	機械設計技師・鉄工業	(—)	+	—	—	—
41*	64	女	左胸膜	—	会社事務	(—)	—	+	—	—
5	65	女	心膜	—	ビル清掃業	(—)	—	—	—	—
29*	48	男	心膜	—	機械設計技師	(—)	—	—	—	—
31	31	男	左胸膜	10本 / 日	豆腐製造業	(—)	—	—	—	—
49	73	男	右胸膜	+	石工	(—)	—	—	—	—

§ 通常の病理組織標本 (H-E 染色) での判定,
CHRY:クリソタイル, AMOS:アモサイト, CROC:クロソドライト, ACT-TRE:アクチノライト/トレモライト
+++ : 多い, ++ : 中位, + : 少ない, - : ない。

瘍として重視されている。森永¹⁵⁾によれば、米国、英国、オランダ、西ドイツなどの欧米諸国の中皮腫発生頻度は、人口 100 万人当たり年間 2—3.5 人程度とわが国の数倍であったが、わが国の場合は昭和 52 年から 59 年の間に男は 0.89 から 1.80 人へ、女も 0.35 から 0.74 人に倍増しているという。しかし中皮腫は、依然として最も診断の難しい腫瘍といわれ、確定診断には多くの専門病理医の検討が必要になっている。わが国には、大阪に中皮腫研究会（代表：近畿中央病院、瀬良好澄名誉院長）があり、その中の中皮腫パネル（座長：大阪赤十字病院、佐々木正道病理部長）ですでに 50 例を越す症例の検討が行なわれている。筆者らはそのパネルで definite または probable mesothelioma とされた症例の肺組織の鉱物学的検索を行なっている。表 2 に今までに検索した結果の一部を示す¹⁶⁾。検索試料は厚さ 20 μm の切片からカーボン抽出法で作製した。石棉暴露歴のはっきりしている症例はもちろん暴露歴の不明なものにも石棉が検出されている。普通の病理組織切片で含鉄小体が見つからなくても、筆者らはこの検索方法で (++) 以上の石棉が検出された場合、職業性暴露あるいはそれに近い副次的職業暴露があったと推定している。Fig. 4 は、プラスチック成型作業に従事して中皮腫を発症した例で、検索の結果強化プラスチックに混入していたクリソタイルに暴露していたことが判明した。Fig. 5 は、外科医の中皮腫例で、検索の結果大量の微小クリソタイルが発見された。外科医という職業から石棉職業暴露はあまり考えられず、暴露歴の解明には居住歴や趣味など広範囲の調査が必要である。またこれらの症例は、クリソタイルのみが肺組織から発見されたので、クリソタイルのみの暴露によっても確かに中皮腫は発症するという証明になる貴重なものである。

Fig. 4 (left). Chrysotile fibers found in the lung specimen of the preural mesothelioma case.
(Male, 65 yrs, worker of plastic products processing, PS-55, No. 32). Bar indicates 5 μ m.

Fig. 5 (right). Short chrysotile fibers found in the lung specimen of the preural mesothelioma case.
(Male, 70 yrs, surgeon, PS-60, No. 38).

石綿暴露による肺がんと中皮腫は、石綿肺と異なり少量の暴露量でも数10年後に発生することが知られている。肺がん発生の急増時期は暴露後20—30年後であるのに対して、中皮腫の場合は更に遅れて30—40年後である¹⁷⁾。なお、中皮腫の発生に対して喫煙の影響は認められていない。胸膜ブランクは、中皮腫と同様に少量の石綿暴露で発生するが、胸膜ブランク自体は肺機能障害も少なく治療不要であり、むしろ石綿暴露を受けていることを示す指標としての意義が大きい。

5. 石綿問題の現況

(1)わが国の消費動向：現在石綿の世界総生産量は400—500万トン／年で、わが国の消費量は約28万トン／年である。そのうち国内産は約3000トン／年で大部分を輸入に頼っている。Fig. 6に示す様にわが国の消費量は、1960年代に急増し1970年代初めには30万トンに達し、その後現在まで15年間以上25—28万トンのレベルで推移している。一方、米国の消費はわが国の急増期より約20年早くすでに1950年代初頭に80万トンに達し、その後20年間そのレベルが続いていた。しかし、1972—1973年頃を境に急激に減少し、現在は、20万トンを下回っている。従って、わが国

Fig. 6 Annual consumption of asbestos in U.S.A. and Japan.

はソ連をのぞく自由諸国第一位の石綿消費国となっている。

その用途別の消費量は、70% が屋根瓦、防火壁、天井、間仕切り、床タイルなどの建造物材料（家屋建材）に消費され、自動車のブレーキなど耐摩擦材に、約 8% が使われている。その他は、用途が把握されていない小口使用の約 14% は別として、ほとんどが産業用である。

(2)法的問題点：わが国の石綿労働者の健康管理は、じん肺法および労働安全衛生法に基づく特定化学物質等障害予防規則（特化則）によって行なわれており、労働省はこの他幾つかの通達で障害予防措置の徹底を要請している。これまで米国や英国で決められた石綿の許容濃度は、石綿肺を 1% の危険率で予防することを基本に設定されたもので、石綿の肺がんを予防するために定められたものではない。わが国の石綿の許容濃度も、米国や英国に準拠して出された行政措置である。昭和 51 年に労働省通達で作業環境中の石綿粉塵濃度を 2 f/cc（クロシドライトは 0.2 f/cc）以下に抑制するように要請した。また、昭和 59 年には「管理濃度」という概念を導入し、石綿の管理濃度は 2 f/cc と定めた。一方、米国では 1976 年に米国職業安全衛生研究所（NIOSH）が、石綿のがんに対する安全閾値が存在するという証拠はないので、作業環境基準は現行の分析法で測定できる最低のレベルに設定すべきで、そのレベルは 0.1 f/cc であるという勧告を行なった。そして、1986 年米国労働省の職業安全衛生局（OSHA）は、石綿粉塵の出るすべての労働環境での許容暴露濃度を（PEL）0.2 f/cc とする法律を設定した¹⁸⁾。

わが国でも現在日本産業衛生学会の許容濃度委員会で石綿の許容濃度値の改訂が議題として提出されている。いずれにしても、各国とも現行の労働環境の法規は、それを守っていれば肺がんや中舌腫などの健康障害を完全に予防できるものでない点に問題が残されている。

(3)石綿暴露の機会；じん肺法や特化則に定められた作業環境以外でも石綿暴露を受ける機会は様々ある。Fig. 7 に職業環境から一般環境に至る様々な石綿暴露の機会の概念図を示した。図の下

石綿暴露状況概念図

Fig. 7 Various kinds of chances of asbestos exposure in the occupational and non-occupational environments.

に行くほど暴露濃度は低くなるが、暴露人口は多くなる。そのうち、いまなお比較的高濃度で暴露人口も多いと見られるのが、石綿スレートやボード、床材などの新建材を扱う大工・左官などの建築作業者と石綿が大量に使われている建築物を解体する作業者などである。昭和50年から建物への石綿吹付けは禁止されているが、それ以前の建造物の取り壊しが次第に増えており、そこに携わる作業者が多くなっているとみられる。

Nicholson ら (1982)^{19,20)}は米国でのアスベストによる肺がんと中皮腫の職種別の死亡数の今後の予測を報告している。それによると造船と断熱作業者の肺がん・中皮腫はほぼピークを越えたが、建築作業者は2000年と2007年にそれぞれピークを迎えるとしている (Fig. 8)。残念ながら我が国ではこうした職種別の危険率評価の研究はまだないが、現在石綿を含有した新建材が積極的に一般民家にまで使用されていることから、このまま行くと20—30年後には建築作業者にとって米国以上に悪い状況が予測される。今、建築作業者や建材廃棄物処理業者などに対する早急な対策が必須である。

また、米国でのデータによると石綿を吹付けたビルの室内石綿濃度は、空気の流れや破損の度合いによって外気レベルから作業環境に近いレベルまで様々であるが、一般にかなり石綿暴露の危険性の高い環境とされている^{17,21)}。そして、実際に米国政府は公共の建物や学校内に吹き付けられている石綿の除去や封じ込め対策を、10年ほど前から積極的に進めている。いわゆる、環境問題に於ける事後対策でなく事前の対策である。

わが国でも吹き付けの最盛期からすでに10数年が経過し、吹き付け石綿の劣化による石綿の飛

Fig. 8 Excess deaths of lung cancer and mesothelioma due to occupational asbestos exposure, 1967–2027 in U. S. A.
(Data from Nicholson, et al., 1982¹⁹).

Fig. 9 Four kinds of asbestos fibers and a talc fiber identified by analytical electron microscopy in the TBLB specimen.
(The same case of Fig. 3, a: crocidolite, b: amosite, c: tremolite, d: talc e: chrysotile).

散と将来の健康への影響が懸念される時期になっているが、こうした環境での石綿濃度測定データは残念ながらまだみあたらない。建物や使用の状況あるいは施工方法など必ずしも米国と同様ではないので、こうした環境でのリスクを考え対策をするうえにも早急に基礎的な環境石綿濃度の測定とデータ蒐集をする必要がある。

(4)一般環境中の石綿：取り扱っている繊維状物質が石綿だけで、浮遊している繊維が総て石綿と考えられる作業環境中の石綿濃度は、光学顕微鏡で計数することができるが、一般環境の場合は、石綿以外の様々な繊維状物質が混在するので、一本一本の石綿を同定できる分析電子顕微鏡で計数するのが望ましい。分析電子顕微鏡は複数の繊維が集合していても個々の繊維のX線スペクトルを得ることができ種類の識別ができる (Fig. 9)。環境庁によるわが国最初の一般大気中の石綿濃度調査は、光学顕微鏡と分析電子顕微鏡の両方の手段を用いて、立地特性別に分類した全国の主な地域を対象に行なわれた²²⁾。光学顕微鏡による測定数は約700点、分析電子顕微鏡の測定は約100点である。Fig. 10 にそれらの結果 (石綿繊維数濃度) を log. スケールで表わした。さらに表3には、おもな地域の光学顕微鏡による結果を示した。光学顕微鏡による石綿繊維の判定は、位相差型顕微鏡のとき見えて位相差板を除くと見えなくなる長さ $5\mu\text{m}$ 以上の繊維を石綿とし、位相差板を除外しても見える繊維は石綿でないとした。この判定基準によって計数された繊維は、石綿とは断定できないまでもかなりその可能性が強いと考えられる。その結果、住宅地や商店街の一般大気から 1 f/l

Fig. 10 Fiber concentration of airborne asbestos in various environments measured by phase contrast microscopy (PCM) and analytical transmission electron microscopy (ATEM)²⁴⁾.

Solid circles: PCM data, open circles: ATEM data,
A-T and 1-2: sampling locations.

表 3 光学顕微鏡による一般大気中の石綿濃度測定結果²²⁾

地 域	石綿濃度 (f / l)
内陸山間地域	0 . 4 3
住宅地域	1 . 0 4
商業地域	1 . 4 2
内陸工業地域	2 . 0 9
廃棄物処分場周辺	3 . 1 6
解体ビル周辺	3 . 2 4
蛇紋岩採石場周辺	2 0 - 7 0

程度の石綿繊維数濃度が測定された。その他、蛇紋岩採石場は特別として解体ビル周辺や廃棄物処理場周辺で 2-3 f/l のやや高い値が記録された。

一方、分析電子顕微鏡による測定結果では、わが国の大気中石綿濃度は、測定下限値 (4 本/l) 以下から 370 本/l までの範囲にあり、幾何平均で 41 本/l であった。そのうち、特に幹線道路沿線 (I) の濃度の高いのが目立ち、ブレーキからの飛散または路面からの再飛散が原因と考えられた。この他に、住宅地域が比較的高かったが、高速道路は逆に低い値であった。さらに、石綿の発生源がはっきりしている特定の高汚染地域 (蛇紋岩採石場 (R)、アスベスト鉱山のある町内 (S)、石綿スレ

Fig. 11 Mass concentration of airborne asbestos in various environments measured by ATEM²⁴⁾.
A-T: sampling locations coincidence with Fig. 10).

ート工場周辺 (T) など) でかなり高い石綿濃度が測定された。これらの一般大気中の石綿濃度を諸外国のデータと比較するには、今までの多くの報告が質量濃度で表現されているため、上記のデータを質量濃度で表わす必要がある。分析電子顕微鏡による測定では、繊維のサイズ (長さと幅) も同時に記録することができるので、そのサイズから質量に直接変換できる。その結果を Fig. 11 に示したが、質量濃度で表わしてもやはり幹線道路沿線 (I) の値は高かった。また、高汚染地域 (R, S, T) はそれよりさらに高い質量濃度である。米国環境保護庁 (EPA) は米国、カナダ、フランス、英国などのデータをまとめた図を公表している²³⁾ が、その図に今回の日本のデータを一緒に示すと (Fig. 12)、幹線道路を除くわが国の一般大気中の石綿濃度は、特に諸外国の測定値に比べて高くないようである²⁴⁾。

Fig. 12 Comparison of measured airborne asbestos concentrations in various environments in U.S.A. (upper, compiled by U.S. EPA) and Japan (lower)²⁴⁾.

人間が石綿を大量消費するようになってまだ 20—30 年であるが、それが現在の大気中の石綿濃度にどの程度影響したかは、それ以前の大気中石綿濃度と比較しなくてはならない。そこで、過去の大気中の石綿濃度はその時々降り積もった雪の中の石綿濃度として残されていると考え、試みに南極に降り積もっているいろいろの深さの雪氷と最近南極と東京に降った雪を溶かして、その中の石綿を測定した²⁴⁾。東京に降った雪には南極に降った雪に比べて 2 桁高い濃度の石綿が含まれており、さらに、南極に 1 万年前に降った雪の中の石綿濃度は、最近降った雪の中の値よりも 1 桁低かった。この差は、多分人間による大気汚染の影響によるものと思われる。また、1 万年前の雪からも少ないながら明らかに石綿が検出されたことから、地球大気中には、風化などで自然飛散した石綿があるレベルで浮遊していることも把握された。しかし、大気中のデータと雪の中のデータとの定量的な比較は難しいので、現在の大気中の石綿濃度から自然由来の石綿濃度を差し引くことは

無理である。いずれにしても、狭い国土で既に 600 万トン以上もの石綿を消費したわが国は、一般大気中の石綿濃度をそれ以前に比べてわずかながら上昇させたことは確かのものであり、欧米でもこの傾向は同様と思われる。

石綿を大気中に排出する可能性のある発生源は、自動車のブレーキの他に、石綿の吹き付けや建材が使われている建物の取り壊しとか、石綿を含む建材で建築する住宅の建築時など、いろいろ予想される。今後、大気中への石綿排出を抑えるためには、そうした所からの排出をなくすることが特に必要と思われる。

6. 石綿代替品の健康影響の問題

石綿の健康障害への対策の一つとして、石綿に代わる繊維状材料の開発と使用が盛んになっている。ガラス繊維やロックウール（岩綿）の製造と使用は既に長い歴史を持っており、さらにアタパルジャイト、ボラストナイト、セラミック繊維、チタン酸カリウム繊維、炭化ケイ素繊維、カーボン繊維、アラミド繊維など様々な天然および人造の繊維も盛んに使われはじめている。石綿の発がん性は証明されたものの、その発がんメカニズムは依然として不明な点が多いため、現在この様な石綿以外の繊維の安全性の証明は難しい状況にある。しかし石綿の失敗を繰り返さないためにも石綿代替品の安全性の研究は重要な問題である。

米国の Stanton らは、石綿の発がん因子としてその繊維状形態が重要であるという仮説のもとに石綿および石綿以外の無機繊維の様々なサイズの試料を準備し、それらの発がん性の実験的研究を早くから進めていた²⁵⁾。その結果、生体内で安定な細くて長い繊維状物質であれば化学組成や結晶構造に関係なく中皮腫を発生させることを発見し、とくに直径が $0.25\ \mu\text{m}$ 以下で長さ $8\ \mu\text{m}$ 以上のサイズの繊維が最も高い中皮腫発生率を示すこと、および $5\ \mu\text{m}$ 以下の短い繊維でも大量に投与すると中皮腫の発生がみられることも明らかにした^{26, 27)}。同じ頃、西ドイツの Pott も同様な研究成果を報告しており^{28, 29)}、これらの研究はひろく世界の注目するところとなった (Fig. 13)。

このような状況から、石綿以外の繊維状鉱物を吸入した人間に実際に中皮腫が発症していないかということに大きな感心が持たれていた。そこに、Baris らにより中央トルコの Cappadocia 地方に胸膜中皮腫が多発していることが報告された^{30, 31)}。同地方には石綿工場や石綿鉱山はなく、職業環境あるいは一般環境からの石綿暴露は考えられない。一方、同地方には繊維状ゼオライト（エリオナイト）を含有する凝灰岩が広く地表を覆っており、さらにそれを家屋の壁材にも長年使用してきた。そのような環境で生活していた住民は長い間にかなりのエリオナイトを吸入していると考えられ、繊維状エリオナイトが中皮腫の原因物質と考えられた。その後、Baris はそれらの地方から更に多数の中皮腫患者を確認し、繊維状ゼオライトは石綿よりも危険性が高いと述べた³²⁾。このトルコの中皮腫症例は、世界中の研究者によって注目され集中的に調査された。中皮腫患者の肺組織から実際にエリオナイトやエリオナイトを核とするゼオライト小体が検出され^{33, 34, 35)}、さらに動物実験でもエリオナイトは確かに中皮腫を発症させることが証明された³⁶⁾。こうしてエリオナイトの発がん性は、疫学的にも動物実験的にもさらに鉱物学的検索でも証明された。このことは、石綿以外の繊維状鉱物の発がん性を初めて示すとともに、Stanton と Pott の実験的仮説が実際に人間に

Fig. 13 Carcinogenicity of fibrous minerals by Pott (1980)²⁹⁾.

His animal experiments revealed that thin and long fibers being stable in the body showed high carcinogenicity in spite of the crystal structure and chemical composition.

於いても成り立つことが証明されたという重大な意味を持っている。

現在すでに使用されている繊維状物質の中には人間への発がん性が疑われるものがあり、石綿代替品すべてが安全とは云えない状況になっている^{37,38,39)}。神山ら⁴⁰⁾と興ら⁴¹⁾は、種々の石綿および石綿代替品を準備し、それらの生体影響を *in vitro* および *in vivo* の実験で調べているが、その詳細はここでは省略する。いずれにしても、現在活発に開発研究が進められている石綿の代替品の使用に際しては、石綿での失敗を繰り返さないためにも、事前に有害性の厳密な調査が必要であり、かつ十分安全性を考えた使い方をすべきである。また、安価で有用な天然繊維材料である石綿も、今後、人間が絶対に暴露しない様な用途への使用など厳重な管理のもとに使用して行けば、重要な天然資源としての価値を有効に生かせるであろう。

7. おわりに

石綿は、鉱物学者やそれを工業利用する技術者のみならず、医学、法律、行政、司法、その他、様々な方面の人々に関心を持たれ、おそらく最も良く研究・調査された鉱物の一つであろう。世界保健機構 (WHO) では、1972 年に「石綿の生体影響」のシンポジウムを開き⁴⁾、石綿が発がん物質であると結論して以来、1979 年に「鉱物繊維の生体影響」³⁷⁾、1982 年に「人造鉱物繊維の生体影響」³⁸⁾の各シンポジウムを開き、鉱物繊維の有害性についても世界中の研究成果をまとめた。さらに、本年 1987 年 9 月には一般環境に於ける石綿及び鉱物繊維一般の低濃度暴露の生体影響のリスク評価を中心にした「非職業性環境の鉱物繊維」のシンポジウムを開催した。これらからも石綿などの鉱物繊維の人体影響の関心が職業環境から一般環境へと推移していることが分かる。その間の研究成果には多数の鉱物学者が貢献してきているが、未解決の課題は多々あり、ますます難しい問題が残されている感がある。今後も鉱物研究者のこの方面への研究参加は不可欠であり、大い

に期待されている。

文 献

- 1) 橋本道夫：大気保全の今後の方向，大気汚染第 25 回地域連絡委員会講演要旨，P. 1-10，大気汚染研究協会 (1986)。
- 2) Lynch, K. M. and Smith, W. A.: Pulmonary asbestosis III; Carcinoma of lung in asbesto-silicosis. *Am. J. Cancer*, 24, 56-64 (1935)。
- 3) Wagner, J. C., Sleggs, C. A. and Marchand, P.: Diffuse pleural mesothelioma and asbestos exposure in the north western Cape Province. *Br. J. Industr. Med.*, 17, 260-271 (1960)。
- 4) Bogovski, P., Gilson, J. C., Timbrell, V. and Wagner, J. C. (eds.): *Biological Effects of Asbestos*. IARC Scientific Publications No. 8, IARC, Lyon, pp. 346 (1973)。
- 5) NIOSH-OSHA Asbestos Work Group: Workplace Exposure to Asbestos; Review and recommendations. DHHS (NIOSH) Publication No. 81-103 (1980)。
- 6) 神山宣彦：石綿の鉱物学的特性と産業利用，石綿・ゼオライトのすべて (環境庁大気保全局企画課監修)，日本環境衛生センター，川崎，3-82 (1987)。
- 7) Zoltai, T.: History of asbestos-related mineralogical terminology. In: Gravatt, C. C., et al., *Proceedings of the workshop on asbestos Definitions and measurement methods*, NBS Special Publication No. 506, 1-18 (1978)。
- 8) 労働省安全衛生部労働衛生課編：作業環境測定ガイドブック 1 —— 鉱物性粉じん関係 ——，日本作業環境測定協会，東京，pp. 101, (1980)。
- 9) Morinaga, K., Yokoyama, K., Yamamoto, S., Matsuda, Y. and Sera, Y.: Mortality and survival of workers receiving compensation for asbestosis in Osaka, Japan. In: *Proceedings of VIth Internatl. Pneumoconiosis Conference*, ILO, 768-774 (1984)。
- 10) 横山邦彦，森永謙二：石綿取り扱いの労働衛生管理概論 (まとめ)，産業医学シリーズ 2 石綿，産業医学振興財団，東京，P. 81-100 (1987)。
- 11) Doll, R.: Mortality from lung cancer in asbestos workers. *Br. J. Industr. Med.*, 12, 81-86 (1955)。
- 12) 瀬良好澄，横山邦彦，森永謙二：アスベストによる健康障害，住友産業衛生，19, 1-13 (1983)。
- 13) Selikoff, I. J., Hammond, E. C. and Seidman, H.: Mortality experience of insulation workers in the United States and Canada, 1943-1976. *Ann. New York Acad. Sci.* 330, 91-116 (1979)。
- 14) Hammond, E. C., Selikoff, I. J. and Seidman, H.: Asbestos exposure, cigarette smoking and death rates. *ibid*, 473-490 (1979)。
- 15) 森永謙二：石綿がんの現状と将来，第 35 回日本災害医学会シンポジウム 1 「職業がん」 (1987) (印刷中)。
- 16) 原一郎，神山宣彦，桜井幹己，森永謙二，土岐純子，横山邦彦：アスベスト等粉塵の低濃度暴露による人体影響に関する分析電顕的・疫学的研究，文部省科研費特研「環境科学」研究広報 No. 37, 61 年度研究成果報告，P. 235-237 (1987)。
- 17) Nicholson, W. J.: Airborne asbestos health assessment update. Environmental Criteria and Assessment Office, U. S. EPA, EPA/600/8-84/003 F (1986)。
- 18) Occupational Safety and Health Administration (OSHA), Department of Labor: Occupational exposure to asbestos, tremolite, anthophyllite, and actinolite. *Federal Register*, Vol. 51, No. 119, 22612-22789 (1986)。
- 19) Nicholson, W. J., Perkel, G. and Selikoff, I. J.: Occupational exposure to asbestos: population at risk

- and projected mortality..... 1980-2030. *Am. J. Industr. Med.* 3, 259-311 (1982).
- 20) Medical News & Perspectives: Mesothelioma; has patient had contact with even smal. amount of asbestos?. *JAMA*, 257, 1569-1570 (1987).
- 21) Nicholson, W.J.: Tumor incidence after asbestos exposure in the U.S.A.; cancer risk of the non-occupational population. *VDI-Berichte* (475), 161-177 (1983).
- 22) 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, ぎょうせい, 東京, pp 221 (1985).
- 23) U.S. EPA: Guidance for controlling asbestos-containing materials in building. U.S. EPA, EPA 560/5-85-024 (1985).
- 24) Kohyama, N.: Airborne asbestos levels in non-occupational environments in Japan, IARC Symposium "Mineral Fibers in the Non-Occupational Environment". Lyon (1987) (in press).
- 25) Stanton, M.F.: Some etiological considerations of fibre carcinogenesis. In: Bogovski, P., et al., ed., *Biological Effects of Asbestos*. IARC Scientific Publications No.8, Lyon, 289-294 (1973).
- 26) Stanton, M.F., Layard, M.: The carcinogenicity of fibrous minerals. In: Gravatt, C.C., et al., *Proceedings of the Workshop on Asbestos: Definitions and Measurement Methods*. NBS Special Publication, 506, 143-151 (1978).
- 27) Stanton, M.F., Layard, M., Tegerin, A., Miller, E., May, M., Morgan, E. and Smith, A.: Relation of particle dimension to carcinogenicity in amphibole asbestoses and other fibrous mineals. *J. Natl. Cancer Inst.*, 67, 965-975 (1981).
- 28) Pott, F.: Some aspects on the dosimetry of the carcinogenic potency of asbestos and other fibrous dusts. *Staub-Reinh. Luft*, 38, 486-490 (1978).
- 29) Pott, F., Huth, F. and Spurny, K.: Tumor induction after intraperitoneal injection of fibrous dusts. In: Wagner, J.C., ed., *Biological effects of mineral fibres*. IARC Scientific Publication No. 30, Vol. 1, 286-302 (1980).
- 30) Baris, Y., Artvinli, M. and Sahin, A.A.: Environmental mesothelioma in Turkey. *Ann. New York Acad. Sci.*, 330, 423-432 (1979).
- 31) Baris, Y., Simonato, L., Saracci, R., Skidmore, J.W. and Artvinli, M.: Malignant mesothelioma and radiological chest abnormalities in two villages in central Turkey. *Lancet*, 1, 984-987 (1981).
- 32) Baris, Y. and Artvinli, M.: Natural mineral fiber-induced chest diseases in Turkey. *Arch. Immunol. Ther. Exper.*, 30, 161-168 (1982).
- 33) Pooley, F.D.: Evaluation of fiber samples taken from the vicinity of two villages in Turkey. In: Lemen, R. and Dement, J.M. ed., *Dusts and Disease; Proc. Conf. Occup. Exp. to Fibrous and Particulate Dust and their Extension into the Environment*. Pathodox Publ. Inc., Illinois, 41-44 (1979).
- 34) Sebastien, P., Gaudichet, A., Bignon, J. and Baris, Y.I.: Zeolite bodies in human lungs from Turkey. *Lab. Invest.*, 44, 420-425 (1981).
- 35) Sebastien, P., Bignon, J., Baris, Y.I., Awad, L. and Petit, G.: Ferruginous bodies in sputum as an indication of exposure to airborne mineral fibers in the mesothelioma villages of Cappadocia. *Arch. Envir. Halth*, 39, 18-23 (1984).
- 36) Suzuki, Y. and Kohyama, N.: Malignant mesothelioma induced by asbestos and zeolite in the mouse peritoneal cavity. *Envir. Research*, 35, 277-292 (1984).
- 37) Wagner, J.C. (ed.): *Biological effects of mineral fibres, vol.1 and 2*. Proceedings of a symposium organized by IARC, et al., Lyon, France 25-27 September 1979, IARC Scientific Publications No. 30,

pp.1007 (1980).

- 38) WHO: *Biological effects of man-made mineral fibres, Vol. 1 and 2*. Proceedings of a WHO/IARC Conference, Copenhagen, 20-22 April, 1982, pp. 442 & pp. 406 (1984).
- 39) WHO: *Asbestos and other natural mineral fibres*. Environ. Health Criteria 53, published under the joint sponsorship of the United Nations Environ. Programme, ILO and WHO, Geneva, pp.194 (1986).
- 40) 神山宣彦, 興貴美子, 明星敏彦, 福田一男: アスベストおよびアスベスト代替品の生体影響の研究(1)——試料の調製とその鉱物学的性質について——, 昭和 60 年度環境保全研究成果集, 98-1/20, 環境庁企画調整局 (1986).
- 41) 興貴美子, 神山宣彦, 明星敏彦, 福田一男: アスベストおよびアスベスト代替品の生体影響の研究(2)——in vitro における細胞毒性, 溶血性, 染色体異常誘起性について——, 昭和 61 年度環境保全研究成果集, 94-1/19, 環境庁企画調整局 (1987).