

61-2

環境衛生

クライテリア 53

アスベスト、その他の天然鉱物繊維

本書は、世界保健機関 (WHO) が1986年に出版した Asbestos and Other Natural Mineral Fibres (Environmental Health Criteria No. 53) である。

「版權」世界保健機関, 1986年

世界保健機関の理事長は、(社)日本石綿協会に対し、日本語版の翻訳権を許諾した。翻訳に関する全責任は当協会にある。

社団法人 日本石綿協会

目 次

	頁
1. 要約および今後の調査に向けての勧告	5
1. 1 要 約	5
1. 1. 1 アスベストとは；物理的および化学的特性, サンプリングおよび分析の方法	5
1. 1. 2 職業性および一般環境性曝露の発生源	5
1. 1. 3 環境濃度および曝露	6
1. 1. 4 動物に対する毒性作用	6
1. 1. 5 人体への影響	6
1. 1. 6 健康リスクの評価	7
1. 2 今後の調査に向けての勧告	8
2. アスベストの識別, 物理的および化学的特性, サンプリングおよび分析	9
2. 1 アスベストとは；アスベスト鉱石の物理的および 化学的特性	9
2. 1. 1 蛇紋岩－クリソタイル	10
2. 1. 2 角閃石群の鉱石	11
2. 1. 2. 1 クロシドライト（リーベック角閃石 アスベスト）	11
2. 1. 2. 2 アモサイト（グルネライト・アスベスト）	12
2. 1. 2. 3 アンソフィライト・アスベスト	12
2. 1. 2. 4 トレモライトおよび アクチノライト・アスベスト	12
2. 2 同定；その他の天然鉱物繊維の物理的および 化学的特性	12
2. 2. 1 繊維状ゼオライト	12
2. 2. 2 他の繊維状けい酸塩（アタパルジャイト, セピオライト およびワラストナイト）	13
2. 3 サンプリングおよび分析の方法	14
2. 3. 1 サンプルの採取および試料作成	14
2. 3. 1. 1 空 気	14
2. 3. 1. 2 水	16
2. 3. 1. 3 生物組織	16
2. 3. 1. 4 地質学的サンプル	16
2. 3. 2 分 析	16
2. 3. 2. 1 光学顕微鏡検査	17
2. 3. 2. 2 電子顕微鏡検査	17
2. 3. 2. 3 重量分析	18

2. 3. 3	その他の方法	18
2. 3. 4	繊維, 粒子, および質量濃度の間の関係	19
3.	職業性曝露および一般環境曝露の発生源	21
3. 1	自然発生	21
3. 2	人為的発生源	22
3. 2. 1	アスベスト	22
3. 2. 1. 1	生産	22
3. 2. 1. 2	採掘および砕石	23
3. 2. 1. 3	用途	25
3. 2. 2	その他の天然鉱物繊維	26
3. 2. 3	アスベスト含有製品の製造	28
3. 2. 3. 1	アスベストセメント製品	28
3. 2. 3. 2	ビニールアスベスト製床タイル	28
3. 2. 3. 3	アスベスト紙およびフェルト	28
3. 2. 3. 4	摩擦材 (ブレーキライニングおよび クラッチフェーシング)	28
3. 2. 3. 5	アスベスト紡織品	29
3. 2. 4	アスベスト含有製品の使用	29
4.	移動および環境内での回帰	30
4. 1	移動および分散	30
4. 1. 1	大気中における移動および分散	30
4. 1. 2	水中における移動および分散	30
4. 2	環境内における変形, 相互作用および分解過程	30
5.	環境内曝露レベル	32
5. 1	大気	32
5. 1. 1	職業性曝露	32
5. 1. 2	準職業性(para-occupational) 曝露	34
5. 1. 3	一般大気	37
5. 2	他の媒体中での濃度	42
6.	沈着, 転移 (移動), およびクリアランス	43
6. 1	吸入	43
6. 1. 1	アスベスト	43
6. 1. 1. 1	繊維の沈着	43
6. 1. 1. 2	繊維のクリアランス, 滞留および 転移 (移動)	45
6. 1. 2	含鉄小体	48
6. 1. 3	呼吸器内の繊維量	48

6. 2 経口摂取	48
7. 動物および細胞への影響	50
7. 1 アスベスト	50
7. 1. 1 繊維形成能	50
7. 1. 1. 1 吸入	50
7. 1. 1. 2 胸膜腔内および腹腔内投与	53
7. 1. 1. 3 摂取	53
7. 1. 2 発がん性	53
7. 1. 2. 1 吸入	53
7. 1. 2. 2 気管内投与	57
7. 1. 2. 3 体腔内への直接投与	57
7. 1. 2. 4 摂取（経口摂取）	65
7. 1. 3 <u>In vitro</u> 試験	67
7. 1. 3. 1 溶血性	68
7. 1. 3. 2 マクロファージ	68
7. 1. 3. 3 繊維芽細胞	68
7. 1. 3. 4 細胞系ならびにDNAとの相互作用	69
7. 1. 3. 5 アスベストの繊維形成能および発がん性の メカニズム	69
7. 1. 3. 6 発がん性を変化させる要素	71
7. 2 その他の天然鉱物繊維	72
7. 2. 1 繊維状粘土	77
7. 2. 1. 1 バリゴルスカイト（アタパルジャイト）	77
7. 2. 1. 2 セピオライト	78
7. 2. 2 ワラストナイト	78
7. 2. 3 繊維状ゼオライトーエリオナイト	79
7. 2. 4 評価	79
8. 人体への影響	81
8. 1 アスベスト	81
8. 1. 1 職業性曝露	81
8. 1. 1. 1 石綿肺	81
8. 1. 1. 2 肺胸膜および壁側胸膜の肥厚	82
8. 1. 1. 3 気管支がん	82
8. 1. 1. 4 中皮腫	86
8. 1. 1. 5 その他のがん	88
8. 1. 1. 6 免疫系への影響	89
8. 1. 2 準職業性曝露	89
8. 1. 2. 1 近隣住民の曝露	89
8. 1. 2. 2 家庭内曝露	91
8. 1. 3 一般市民の曝露	92

8. 2 その他の天然鉱物繊維	96
8. 2. 1 繊維状粘土	96
8. 2. 1. 1 パリゴルスカイト (アタパルジャイト)	96
8. 2. 1. 2 セピオライト	97
8. 2. 2 ワラストナイト	97
8. 2. 3 繊維状ゼオライト-エリオナイト	97
9. アスベストおよびその他の天然鉱物繊維の曝露による 人間の健康への危険性の評価	98
9. 1 アスベスト	98
9. 1. 1 一般的考察	98
9. 1. 2 質的方法 (アプローチ)	99
9. 1. 2. 1 職 場	99
9. 1. 2. 2 準職業性曝露	99
9. 1. 2. 3 一般住民の曝露	100
9. 1. 3 量的方法 (アプローチ)	100
9. 1. 3. 1 気管支がん	101
9. 1. 3. 2 中皮腫	102
9. 1. 3. 3 女性の中皮腫発生率に基づく危険性の評価	102
9. 1. 4 消化器がんの危険性評価	103
9. 2 その他の天然鉱物繊維	103
9. 3 結 論	103
9. 3. 1 アスベスト	103
9. 3. 1. 1 職業的危険性	103
9. 3. 1. 2 準職業的危険性	103
9. 3. 1. 3 一般住民の危険性	103
9. 3. 2 その他の鉱物繊維	104
10. 国際機関による前回の評価	105
10. 1 I A R C	105
10. 2 C E C	105
参考文献	107
〔参考〕用語の解説、訳語、略語対比	158

1. 要約および今後の調査に向けての勧告

1. 1 要 約

1. 1. 1 アスベストとは；物理的および化学的特性，サンプリングおよび分析の方法

商業用語である「アスベスト」は、抗張力に極めて優れ、熱伝導率が低く、化学薬品に対して比較的耐性のある繊維状の蛇紋岩や角閃石鉱物の一群を指している。商業的に利用されるアスベストの主な種類には、蛇紋岩系であるクリソタイル(chrysotile)と、角閃石系であるクロシドライト(crocidolite)とアモサイト(amosite)がある。アンソフィライト(anthophyllite)、トレモライト(trmolite)、アクチノライト(actinolite)のようなアスベストもまた角閃石系であるが、これらは稀にしか存在せず、アンソフィライト・アスベストの商業ベースの開発は現在行われていない。その物理的、化学的特性ゆえに有害性が予想されるその他の天然鉱物繊維は、エリオナイト(erionite)、ワラストナイト(wollastonite)、アタパルジャイト(attapalgitite)、およびセピオライト(sepiolite)である。

クリソタイル繊維は、円筒状の、細長く柔軟性のある小繊維の集合体からできている。個々のクリソタイル繊維のサイズは、サンプルとしてどの程度まで扱うかによって決まる。角閃石系繊維は通常まっすぐで裂片状をしている。クロシドライトの小繊維は、他の角閃石系的小繊維より細くて短い、クリソタイルの小繊維ほど細くはない。アモサイトの小繊維は、クロシドライトやクリソタイルの小繊維よりも太い。アスベスト粉じんのうち吸入性の部分は繊維の種類や扱い方によって異なる。

職場における大気中のアスベスト繊維濃度を測定するために、光学位相差顕微鏡検査を初め種々の方法が開発された。これらの方法では、アスペクト(縦横)比3:1以上の長さ5 μ mを超える繊維で直径が3 μ m未満のもののみを計数する。したがって、ここで得られる繊維の計数は、サンプル中に存在する繊維の実数の単なる指標とみなされる(光学顕微鏡の解像度では検出できない太さの繊維は、この方法では計数されない)。直径が約0.25 μ mに満たない繊維は光学顕微鏡では観察できないため、これらを計数、同定するには電子顕微鏡が必要である。補助装置を備えた電子顕微鏡によって、構造と成分組成に関する知見が得られる。

光学顕微鏡検査によって出された分析結果を、透過型電子顕微鏡もしくは走査型電子顕微鏡によって検査したものと比較しても差し支えないが、これは、同一計数基準のもとで行われた場合に限られる。

1. 1. 2 職業性および一般環境性曝露の発生源

アスベストは地殻に広範囲にわたって分布している。クリソタイルは、実質的に全ての蛇紋岩中に存在しており、世界中で取引されるアスベストの95%以上を占めている。残りは角閃石(アモサイトおよびクロシドライト)である。クリソタイル鉱床は、今日40カ国以上で採掘が行われているが、その埋蔵量のほとんどはアフリカ南部、カナダ、中国そしてソ連に見られる。伝えられるところによれば、アスベストの商業的、工業的用途は数千もあるという。

天然鉱床からのアスベストやその他の鉱物繊維の拡散が、一般住民の曝露の源になりうると考えられる。残念ながら、定量的なデータはほとんど入手不可能である。大気中や周辺の水域に存在しているアスベストは、そのほとんどがアスベストの採掘、粉碎、加工、もしくはアスベスト含有材料の劣化や破損の結果生じたものである。

1. 1. 3 環境濃度および曝露

産業用に広範囲に利用され、また天然鉱床から繊維が拡散してくるために、アスベストは環境内のいたるところに存在している。サンプリングおよび分析方法に関して現在採用されている方法から得られたデータによると、農村部における繊維濃度（繊維長 $5\mu\text{m}$ 以上）は、概して検出限界（1繊維未満/ℓ）を下回っており、一方、都市部の大気中における繊維濃度は、1繊維未満～10繊維/ℓにわたっており、それを上回る場合もある。アスベストの工業的発生源付近の住宅地域における気中浮遊濃度は、都市部の濃度の範囲内か、あるいはそれよりわずかに高くなることもある。職業性以外の屋内濃度は、概ね周囲の大気中に認められる範囲内におさまっている。職業性曝露濃度は、粉じん制御手段がどの程度有効であるかで変わる。粉じん制御がなされていないか、それが不十分な工場や採掘場においては、数百繊維/mlにいたる可能性があるが、近代的工場においては、概して2繊維/mlをかなり下回っている。

報告によると、飲料水中濃度は 200×10^6 繊維/ℓ（全繊維長を対象）にまで及んでいる。

1. 1. 4 動物に対する毒性作用

クリソタイルおよび角閃石系アスベストの両方を吸入させた場合、多くの動物種に線維症が、また、ラットにおいては気管支がんや胸膜中皮腫が認められた。これらの研究では、他の部位にがんの発生率が一貫して増加することはなく、また、摂取されたアスベストが、動物に対して発がん性があるという確証は得られていない。吸入試験データは、繊維の長さが短いアスベストほど、繊維形成能や発がん性は低いことを示している。

その他の天然鉱物繊維の病原性に関するデータはほとんどない。アタパルジャイトおよびセピオライトを吸入した場合、ラットにおいて線維症が認められている。エリオナイトの吸引後、ラットにおいて中皮腫の極めて高い発生率が認められた。長繊維状のアタパルジャイトを胸膜腔内および腹腔内に投与したところ、中皮腫が引き起こされた。ワラストナイトを胸膜腔内に投与した場合にも中皮腫が誘発された。エリオナイトを吸入曝露および胸腔内、腹腔内投与した後にも、極めて高い率で中皮腫が誘発された。

繊維の長さ、直径および化学組成は、体内における繊維の沈着、クリアランス、転移などを決める重要な要素となっている。動物の胸腔内および腹腔内へ繊維を注入した場合の中皮腫を誘発する能力は、主に繊維の長さと直径の関数になるということを示すデータもある。通常、最も強い発がん性を有するのは、長さが $8\mu\text{m}$ 以上で直径が $1.5\mu\text{m}$ 以下の繊維であると報告されている。

1. 1. 5 人体への影響

主に職業集団に関する疫学的調査によって、あらゆる種類のアスベスト繊維が、びまん性肺線維症（石綿肺）、気管支がん、および原発性の胸膜および腹膜の悪性腫瘍（中皮腫）と関係していることが立証された。アスベストが他の部位にがんを誘発するという点に関しては、十分に立証されていない。胃腸がん及び喉頭がんについては、可能性はあるが、アスベスト曝露との因果関係は未だ確証が得られておらず、他の部位における発がんを十分に裏付けする証拠はない。アスベスト曝露は肺胸膜や壁側胸膜に病変をもたらす可能性がある。

喫煙によって、アスベスト曝露者の石綿肺による死亡率および肺がんの危険が増大するが、中皮腫にかかる危険は増えない。概して、悪性中皮腫の症例は、進行が早く死亡につながる。これらの腫瘍の発生率は、約30年前までは低かったが、工業国の男性において急速に高まりつ

つある。西欧諸国の病理学者にアスベスト関連の中皮腫がさらに広範に認識され、知られるにつれて、中皮腫の報告例が増加した。例えば、1960年以前には、中皮腫の発生は知られていない。クリソタイル・アスベストのみの曝露では、中皮腫はめったに起きない。全てではないが、ほとんどの中皮腫の症例は、角閃石系アスベスト、主にクロシドライト、つまりクロシドライト単独か、もしくは角閃石系アスベストとクリソタイルの混合物に職業的に曝露した経歴がみられる。

アスベスト以外の繊維状鉱物（エリオナイト）が、人間に対して発がん性を有するという有力な証拠がある。この繊維状ゼオライトは、トルコに局在する風土性中皮腫の原因であるように思われる。

悪性でない肺胸膜肥厚がしばしば石綿肺に関連づけられている。時おり石灰化を伴うことがある壁側胸膜の肥厚は、石綿肺が検出されない場合にも発生することがある。肥厚は、職業的にアスベストに曝露されていた人にも認められるし、多くの国で風土病としても発生するが、その原因は十分に定まっていない。トレモライト繊維は、いくつかの地域で病原因子と考えられている。

1. 1. 6 健康リスクの評価

現在のところ、工場もしくは一般住民における過去のアスベスト曝露量の実態は、それを基に、低くなるであろう今後の曝露レベルによる危険性を正確に評価できるほど、十分解明されていない。

単純な危険の評価法はアスベストに適用できない。評価するにあたっては、主たる障害である肺がんおよび中皮腫の発生率が重視される。2つの評価方法が考えられるが、1つは文献上の比較定性評価に基づく方法（定性評価）で、もう1つは、がんの発生率と繊維曝露を関連づける数学的モデルに基づく方法（定量評価）である。数学的モデルを引き出そうとする試みのうち成功したものは少い。いくつかの研究データによって、肺がんに関しては累積曝露量との線型関係が、また、中皮腫に関しては、最初の曝露時からの時間との指数関係が認められている。しかしながら、これらの関係式の中に導入された「係数」は、0（ゼロ）以上の広範囲にばらついた値をとっている。この数値のばらつきは、過去の濃度測定や、一定の繊維濃度に関係した繊維サイズの分布や、繊維種類の違いにより作用が異なること等、多くの不確定要因が存在することを示している。さらに、喫煙習慣と気管支がんとの関連性が明確にされることは稀である。ばらつきは、また数学的モデルの妥当性がはっきりしない点をも示している。このような因子のために、一般環境中の曝露濃度といったレベルに対して、これらの疾患が発症する危険を定量的に外挿することが複雑になっている。というのは、こうした一般環境中の曝露濃度は、推定に用いた母集団の曝露濃度より数桁も低いからである。

以下の結論は、定性評価に基づいて得られるものである。

(a) 職業集団において、アスベスト曝露は、石綿肺、肺がんおよび中皮腫を誘発する可能性のある健康危害を及ぼす。これらの疾患の発生率は、繊維の種類、繊維の曝露量、および工業的加工方法と関連している。このような危険は、適切な制御手段を講じることによって大きく軽減されるはずである。

(b) 家庭での接触を持つ人々、アスベストを生産あるいは使用している工場の近辺に居住する人々等、準職業性曝露集団においては、中皮腫および肺がんの危険は、職業集団よりも一般にはるかに低くなっている。また、石綿肺の危険は非常に低い。これらの危険は制御方法の改善

の結果、更に減少されつつある。

- (c) 一般住民において、アスベストに起因する中皮腫及び肺がんの危険を確実に定量化することはできず、また、危険は検出不可能なほど低いものであると思われる。喫煙は、一般住民における肺がん発生の主要因子であるが、これによる石綿肺発生の危険は事実上ゼロである。
- (d) 入手可能なデータに基づいて、職業的もしくは一般的環境におけるアスベスト以外の天然鉱物繊維の曝露に関係する危険を評価することは、大多数の繊維で不可能である。唯一の例外がエリオナイトであり、一部の集団における中皮腫の高発生率が曝露と関連づけられている。

1. 2 今後の調査に向けての勧告

アスベストの繊維形性能および発がん性に関与する分子・細胞両レベルでのメカニズムについては、不明な点が多い。また、アスベスト繊維に関する量-反応関係を解明する上で必要とされる正確な疫学的データおよび信頼のおける曝露データも不足している。今後必要とされる研究分野は以下の通りである：

- (a) アスベストその他の鉱物繊維の物理的および化学的特性（繊維のサイズ、表面特性および不純物）とその生物学的影響との関連についての意味
- (b) 体内における鉱物繊維の滞留性(durability)の生物学的意味
- (c) アスベストの種類の違いによる悪性腫瘍誘発能の差
- (d) 特性が明確にされているその他の天然鉱物繊維、特にアスベスト代替物質による悪性腫瘍誘発例
- (e) 天然鉱物繊維に対する免疫学的、細胞学的および生化学的反応(イニシエーターおよび/またはプロモーターとしての作用、等)
- (f) 曝露状況に関して信頼のおける測定データがある比較的最近の労働者集団での有病率および罹患率
- (g) アスベストその他の繊維状物質への曝露に関するモニタリング方法の改善および国際的標準化