

## クリソタイル (Chrysotile Asbestos) (原著、全197頁、1998年発行)

### 1. 要約

#### 1.1 同定、物理的・化学的特性、試料採取および分析

クリソタイル(白石綿、chrysotile)は多くの工業用製品に用いられている繊維状の含水ケイ酸マグネシウム鉱物であり、今日、世界的貿易で広く取り扱われている。鉱物としての物理的・化学的特性は採掘された地質学的鉱床間で異なることが認められている。鉱石中に繊維状物質を伴う鉱物は多く、それらの中にも、種々の繊維状カクセン石(角閃石、amphibole)があるとされている。この点で、トウセン石(透閃石、tremolite)は特に重要であると考えられている；その形状と濃度はおおいい変動する。

作業所におけるクリソタイルの分析には、現在、光学顕微鏡と電子顕微鏡の使用が必要になっている。環境中の総塵埃と繊維状物質の存在と濃度をモニターするため、以前には種々の器機と装置が使用されていた。今日、メンブレンフィルター法と位相差光学顕微鏡は作業所における試験(繊維数/ml 空気として表す)に一般的に使用されている；透過型電子顕微鏡も用いられている。環境における試験には透過型電子顕微鏡を使用する必要がある。組織負荷量試験は暴露に関する情報を改善させるために利用されている。これらの試験の細部に注意を払う程度によるが、機序と因果関係に関する結論が得られている。

重力およびサーマルプレシピテーターとミゼットインピンジャー(midget impinger)法が以前には作業所の特徴の説明に用いられ、これらの塵埃(繊維ではない)値は暴露-反応相関の評価に役立つ初期の暴露指標としてだけ使用されている。これらの値を繊維数/空気容積に変換する試みが多くなされたが、これらの変換が達成できたのは非常に限られている。換算係数は工業-特異的であり、さらに、作業過程-特異的であることが判明している；普遍的な換算係数は大きい変動を伴っている。

#### 1.2 職業的および環境の暴露源

低濃度のクリソタイルは地殻環境(空気、水、氷冠および土壌)の至る所で検出されている。自然界および人間の行為の両者が繊維状物質の煙霧質化と分布の一因となっている。人為的発生源には、鉱石の回収と加工、製造、利用、取扱いと最終処分に及ぶ、産業活動からの塵埃が含まれる。

25 カ国で生産され、主要 7 生産国がある。アスベストの世界年間生産量は 1970 年代中頃において 500 万トン以上でピークにあったが、その後、約 300 万トンの現在のレベルまで減少した。クリソタイル製品の製造は 100 カ国以上で行われ、日本は主な消費国である。クリソタイルへ暴露される可能性のある最近の主な事業は：(a) 採鉱と粉碎；(b) 製品(摩擦物質 friction material、コンクリート管と板、ガスケットと密封材、紙と織物類)への加工；(c) 建設、修繕と解体；(d) 輸送と廃棄である。アスベスト-セメント工業は全

使用量の約 85%と考えられ、クリソタイル繊維の断然多い利用者である。

繊維状物質は場合によっては通常の衣類の着用によって放出されるだけでなく、アスベスト含有製品の加工、取り付けおよび処分中に放出される。もろい製品の処理はクリソタイルの重要な排出源になることがある。

### 1.3 職業的および環境中暴露濃度

主に北米、欧州と日本のデータに基づけば、大部分の生産部門において、1930 年代初期における作業所での暴露が非常に高かった。1970 年代後期にはその暴露レベルが著しく低下し、今日の値まで大幅に減少した。ケベックの採鉱および粉碎工場において、1970 年代においては大気中平均繊維数濃度が繊維 20 本/ml (f/ml) をしばしば超えたが、現在は一般的に 1 f/ml よりかなり低い。日本のアスベスト-セメント生産において、1970 年代における基準的平均濃度は 2.5-9.5 f/ml であったが、1992 年には平均濃度が 0.05-0.45 f/ml と報告された。日本のアスベスト織物製造において、1970 年と 1975 年の間の期間における平均濃度は 2.6-12.8 f/ml であったが、1984 年と 1986 年の間の期間においては 0.1-0.2 f/ml であった。摩擦物質の生産においても傾向は同じである：日本から入手したデータに基づけば、1970 年と 1975 年の間の期間において、平均濃度、10-35 f/ml が測定され、1984 年と 1986 年の間の期間においては 0.2-5.5 f/ml であった。大規模の死亡調査を実施した英国の工場において、1931 年以前の期間においては濃度が一般に 20 f/ml 以上であったが、1970-1979 年の間では一般に 1 f/ml 以下であった。

作業者にとって最も暴露されやすい所であるが、クリソタイル含有製品の取り付けと利用に関連した繊維数濃度のデータはほとんど入手されない。自動車整備において、1970 年代には 16 f/ml までの最高濃度が報告されたが、1987 年以後に測定された全ての濃度は事実上 0.2 f/ml 以下であった。1980 年代の乗用車修理中に暴露される時間加重平均値は一般に 0.05 f/ml 以下であった。しかし、規制はなく、ドラムからの破片の吹き出しによって短時間、高濃度の塵埃が生じた。

作業所における大量のもろいアスベストのため、アスベスト繊維の混合物に整備員が暴露される可能性がある。管理設計された建物において、米国における建物整備員の個人暴露の 8 時間の時間加重平均値は 0.002-0.02 f/ml の間であった。家事作業(掃除機などを使用した作業、utility space work)(0.5 f/ml)においてはより高い濃度が報告されていたが、これらの値は電話交換作業 switchwork(0.009 f/ml)と天井の上での作業 above-ceiling work(0.037 f/ml)をしている間の典型的暴露と同じ規模の大きさである。管理設計を採用していない場合には濃度が著しく高くなることがある。一例において、もろいクリソタイル含有表面剤 surface formulation を施した建物における短時間の一時的濃度が、掃除中には 1.6 f/ml、図書館の書籍のほこりを払う際には 15.5 f/ml であった。大部分の他の 8 時間の時間加重平均値は約二桁低い値である。

1986 年以前に実施した調査によれば、オーストリア、カナダ、ドイツ、南アフリカおよび米国で測定された野外大気中の繊維数濃度(繊維の長さ $>5 \mu\text{m}$ )は 0.0001-約 0.01 f/ml の範囲であり、大部分の試料中濃度は 0.001 f/ml 以下であった。カナダ、イタリア、日本、スロバキア共和国、スイス、英国および米国における最近の測定に基づけば、平均値または中央値は 0.00005-0.02 f/ml の間であった。

公共建造物における繊維数濃度は、もろいアスベスト含有資材を用いた建物でも大気中

で測定される濃度の範囲内である。1986 年以前に報告されたドイツとカナダの建造物中濃度(繊維の長さ>5 μm)は一般的に 0.002 f/ml 以下であった。ベルギー、カナダ、スロバキア共和国、英国および米国における最近の調査において、平均値は 0.00005-0.0045 f/ml の間であった。クリソタイル繊維の 0.67%だけが 5 μm より長かった。

#### 1.4 取込み、消失、貯留と移動

吸入されたクリソタイルアスベストの沈着は繊維の空気力学的直径、長さおよび形状に依存している。繊維の直径が約 10μm の空気力学的直径に等しい 3μm 以下であるため、大部分の浮遊クリソタイル繊維は吸入されると考えられる。実験用ラットにおいて、クリソタイル繊維は主として肺胞管分岐部に沈着される。

鼻咽頭および気管支部位において、クリソタイル繊維は粘液線毛クリアランスによって消失される。肺胞管分岐部においては、繊維は上皮細胞に取込まれる。繊維の長さはクリソタイル繊維の肺胞におけるクリアランスの重要な決定要素である。短い繊維(5 μm 以下の長さ)は長い繊維(5 μm 以上の長さ)より速やかに消失されることが動物を用いた試験で詳しく証明されている。アンフィボールと比較して、クリソタイル繊維のクリアランスが比較的速い機序は十分には知られていない。長いクリソタイル繊維は主に破壊または溶解によって消失されるのに対して、短いクリソタイル繊維は肺胞マクロファージの食作用によって消失されると仮定されている。クリソタイル繊維はどの程度まで間質、胸膜組織および他の胸腔外の組織に移動するかは十分には理解されていない。

クリソタイルアスベストに暴露された作業者の肺の分析で、一般に、クリソタイルより少ない量が工業用クリソタイルに混入しているアンフィボールアスベストの透セン石の方が多く貯留することを示している。クリソタイル繊維のヒトの肺からの排除が速いことは、クリソタイルはクロシドライト(青石綿) crocidolite とアモサイト(アモサ石綿) amosite を含むアンフィボールより肺から速やかに消失することを示している動物試験の知見によってさらに支持されている。

入手されるヒトおよび動物試験データは、経口摂取されたクリソタイル繊維の可能な取込み、分布および排泄を評価するには不十分である。クリソタイル繊維が消化管壁を透過するとしても非常に限られているという有用な事実が示されている。職業的にクリソタイルに暴露された作業者の尿中のクリソタイル繊維の量が増加することが 1 試験で示されている。

#### 1.5 動物および細胞に及ぼす影響

種々の実験的クリソタイル繊維試料は、多くの長期吸入試験において実験ラットに線維形成および発がん作用を誘発することが示されている。これらの作用には肺および胸膜の間質性線維症とがんが含まれる。大部分の症例において、ラット肺の線維症と腫瘍の間に関連があるとみられている。線維形成および発がん作用は他の投与方法(たとえば、気管内点滴注入および胸膜内または腹腔内注射)を用いた長期動物試験(主にラット)においてもみられている。

クリソタイル誘発肺線維症、肺がんと中皮腫の暴露/用量-反応の相関関係は長期動物吸入試験で適切に試験されていない。主に単回暴露濃度を用いて始める吸入試験は浮遊繊維

濃度が 100—数千本の繊維/ml の範囲において線維形成と発がん性を示す。種々のデータを合わせると、浮遊繊維濃度と肺がん発生率との間に相関性があるようである。しかし、入手された試験には異なる実験条件が用いられているので、この種の解析は科学的ではないように思われる。

吸入でない実験(胸膜内および腹腔内注射試験)において、中皮腫の用量-反応相関がクリソタイル繊維について証明されている。この種の試験データは、しかし、繊維状物質への吸入暴露に関するヒトのリスクを評価するにはふさわしくないとと思われる。

工業用クリソタイルに少量含む鉱物成分の透セン石アスベストもラットにおける単回吸入実験と腹腔内注射試験において発がん性と線維形成を示している。暴露/用量-反応のデータは透セン石とクリソタイルの発がん能の直接的比較には利用できない。

繊維状物質の線維形成および発がん誘発能は、ある程度は物理化学的特性によって決まる繊維の次元と持続性(すなわち、標的組織における生物学的持続性)を含むそれら繊維の個々の特性によるとと思われる。短い繊維(5 $\mu\text{m}$  以下の長さ)は長い繊維(5 $\mu\text{m}$  以上の長さ)より生物学的活性が弱いことが実験的試験でよく実証されている。しかし、短い繊維が意義のある生物活性を有しているかどうかは今もなお不確かである。さらに、アスベストに関連したがんの発生は一般に動物の生涯の遅い時期に起こるため、前がん効果を誘発するには繊維状物質が肺にどの程度長く留まる必要があるかは不明である。

クリソタイルおよび他の繊維状物質が線維形成および発がん作用を起こす機序は十分には解明されていない。繊維状物質の線維形成作用の可能な機序として、成長因子(例えば、TNF- $\alpha$ )と反応性酸素種の産生によって起こる慢性炎症過程が含まれる。繊維状物質誘発の発がん性に関して、幾つかの仮説が提唱されている。それらの仮説には繊維状物質によって生じる反応性酸素種による DNA 損傷; 繊維状物質と標的細胞間の物理的相互作用による直接の DNA 損傷; 繊維状物質による細胞増殖の亢進; リソソーム酵素、反応性酸素種、サイトカインおよび成長因子の持続的な遊離を導く繊維誘発の慢性炎症反応; および発がん補助剤または標的組織への化学発がん物質の担体としての繊維状物質の作用が含まれる。このような作用はヒトおよび哺乳動物細胞を用いた各種 *in vitro* 系においてみられるので、これらの全ての機序がクリソタイル繊維の発がん性に寄与していると思われる。

総合的に、入手される毒学的データは、クリソタイル繊維がヒトの線維形成および発がん性の原因になっていることを明らかに証明している。しかし、これらのデータはヒトに及ぼすリスクを定量的に推定するには十分ではない。これは吸入試験の不適切な暴露-反応データとヒトのリスクを予測するには動物試験の感受性に関して不確実性があるためである。

クリソタイル繊維は幾つかの経口的発がん性試験によっても調べられているが、有用な試験において発がん作用は報告されていない。

## 1.6 ヒトに及ぼす影響

工業用クリソタイルは暴露された作業者の多くの疫学的調査において、じん肺症、肺がんと中皮腫のリスクの増加に関連している。

クリソタイルへの暴露に関連する非悪性腫瘍性疾患には、疫学的調査では容易に明確に出来ない多少複雑な混合型の臨床的、病理学的症候群が含まれている。最も重要な疾病は石綿(沈着)症で、胸膜に種々の程度に影響するびまん性間質性肺線維症に関連した疾病

が一般に含まれている。

色々な部門においてクリソタイルに暴露された作業者の調査で、暴露量の増加が疾病の発生率と重篤度を高める点では、クリソタイル誘発石綿（沈着）症の暴露-反応または暴露-効果の相関関係が広く証明されている。しかし、診断の不確実性と暴露中止後に疾病を進行させる可能性などの要因のため、この相関関係を明らかにすることは困難である。

さらに、リスクの推定が変動することが入手された調査の間で明らかである。変動の理由は完全には明らかにされていないが、暴露の推定における不確実性、諸工業部門における浮遊繊維サイズ分布と統計モデルに関係していると考えられる。アスベストによる変化は一般に、5-20 f/ml への長期暴露後にみられる。

全般的に肺がんの相対的リスクは、アスベスト-セメント製造の作業者に関する調査およびアスベスト-セメント製造作業のある群において一般に高まらない。クリソタイルと肺がんの暴露-反応の相関は採鉱および粉碎工場の作業者についての調査より、織物の作業者についての調査の方が 10-30 倍高いようである。そこで、推定累積暴露に関して、織物製造部門における相対的肺がんリスクはクリソタイル採鉱でみられるより 10-30 倍高い。このリスク変動の理由は明らかでないが、繊維サイズ分布の変動を含めた幾つかの仮説が提唱されている。

中皮腫のリスクの推定はこの疾病は珍しいこと、対照集団の死亡率が欠けていること、および診断と報告に関する問題などの要因によって、疫学的調査を複雑にしている。多くの場合、そこで、リスクは算出されておらず、症例と死亡の絶対数、中皮腫と肺がんまたは総死亡数との比のように不完全な指標が用いられている。

このモノグラフに概説したデータに基づけば、中皮腫はクリソタイル採鉱と粉碎部門に最も多く発生している。診断の正当率が低く、胸膜-腹膜性であった 1 例を除いて、観察された 38 症例の全例が胸膜性であった。暴露が 2 年以下の作業者には起らなかった。35 億 3 千万粒子/m<sup>3</sup>(mpcm)-年(<1 億粒子/立方フィート(mpcf)-年)以下の累積暴露で 0.15 から、10,590 mpcm-年(>300 mpcf-年)以上の暴露で 0.97 の範囲の中皮腫粗罹患率 crude rate(症例数/1,000 人-年)で、明らかな用量-反応相関があった。

多数の採鉱および製造部門におけるコホート研究において中皮腫に起因している死亡の比率は 0-0.8%の範囲である。調査には死亡を暴露量、暴露期間または最初の暴露からの時間によって層別化した比較できるデータがないため、これらの比率の解釈に当たっては注意を払うべきである。

繊維状透セン石はヒトに中皮腫を発生させるという証明がある。工業用クリソタイルには繊維状透セン石を含むことがあるので、主としてクリソタイルに暴露されたある集団にみられる中皮腫の誘発は繊維状透セン石が引き起すことがあると仮定されている。観察された過剰中皮腫(excess of mesothelioma)が繊維状透セン石含量に起因している程度は決定されていない。

クリソタイルへの暴露が肺または胸膜以外の部位のがんのリスクの増加に関連しているという疫学的証明は決定的ではない。アスベスト暴露(全種類)と喉頭、腎臓および消化管がんとの間の関連についての証明には一致しない点があるので、本質的にクリソタイルの問題に関する情報には制約がある。有意な過剰胃癌(excess of stomach cancer)はケベックのクリソタイル鉱夫および粉碎業者の調査でみられているが、おそらく、食事、感染または他のリスク因子が混同(交絡)していることは検討されていない。

クリソタイルに暴露された作業者の疫学的調査は主として採鉱、粉碎、および製造部門

に限られているが、西洋諸国における繊維状物質の混合物への暴露に関連した歴史上の疾病例に基づき、建設およびおそらく他の利用業における作業者の間でリスクが大きいらしいことを認識すべきである。

### 1.7 環境中における運命および生物相におよぼす影響

蛇紋石の露出が世界的に起こっている。クリソタイルを含む鉱物成分は地殻の変化によって浸食し、水の循環、堆積物集団と土壌断面の成分になるように移動する。クリソタイルの存在と濃度は水、空気および他の地殻構成集団について測定されている。

クリソタイルとそれに関連した蛇紋石鉱物は表面で化学的に分解され、これが土壌のpHに十分な変化を与え、種々の微量金属が環境中に取り入れられる。これが次に植物の成長、土壌の生物相(微生物と昆虫を含めて)、魚類と無脊椎動物に相当重要な作用を引き起こす。あるデータは、草食動物(ヒツジとウシ)が蛇紋石の露出部にはえた牧草を摂取後、血液化学的变化がみられることを示している。

## 2. 結論およびヒトの健康保全のための勧告

- A) クリソタイルアスベストへの暴露は用量依存的に石綿(沈着)症、肺がんと中皮腫のリスクの増加を引き起こす。発がんリスクについての閾値は確認されていない。
- B) 安全なクリソタイルの代替資材が利用できる場合には、それらの使用を考慮すべきである。
- C) ある種のアスベスト含有製品は特別に懸念されており、このような状況下でのクリソタイルの使用は推奨されない。これらの使用には暴露の可能性が高いもろい製品が含まれる。建設資材は幾つかの理由で特に懸念される。建設産業従業員は多く、アスベストを規制する対策は実施困難である。きちんとした建築資材でも、改築、営繕および解体の実施時にリスクを引き起こす。きちんとした資材は劣化し、暴露の原因となる可能性がある。
- D) クリソタイルへの職業的暴露が起こる状況においては、工業技術管理と作業規範を含めた規制対策を行使すべきである。技術管理を実施している事業所からのデータは、一般に繊維0.5本/ml以下のレベルに暴露を抑えることが実現可能であることを証明している。個人用の防護用具は工業技術管理と作業規範が不十分な場合にも個々の暴露をさらに軽減させることができる。
- E) アスベストへの暴露と喫煙は肺がんリスクを非常に高めるように相互に作用していることが示されている。アスベストに暴露されている人々は喫煙を避けることによって肺がんリスクを十分に低下させることができる。

## 3. 今後の研究

- (a) 発展途上国においてアスベストへの暴露を抑えるための工業技術管理と作業規範の行使だけでなく、クリソタイルアスベストの代替品の経済上および実際上の実現可能性に関する研究とガイダンスが必要である。
- (b) アスベストが線維症とがんを誘発する分子および細胞機序をより十分に理解する

ための今後の研究が必要である。繊維状物質の物理的・化学的特性(たとえば、繊維の次元、表面特性)と生物学的、病因学的作用に対する肺における生物学的持続性の意義を今後解明する必要がある。種々のアスベスト繊維類についての動物試験による用量-反応に関する情報が、クリソタイルと透セン石への暴露のリスクの差異を評価するために必要とされる。

- (c) 純クリソタイル(すなわち、かなりの程度のアンフィボールを含まない)に暴露された人々の疫学的調査が必要である。
- (d) クリソタイルと他の吸入可能な不溶性粒子の併用効果をさらに調べる必要がある。
- (e) アスベストに暴露された人々の状況を見守り続けるだけでなく、繊維 1 本/ml 以下の繊維数濃度に暴露された人々についての発がんリスクに関して、さらに多くの疫学的データが必要である。

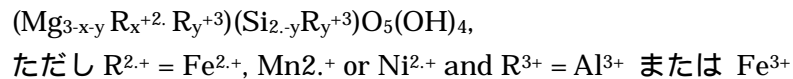
## 1.1 物質の同定、物理的・化学的特性、サンプリング、分析

### a 同定

#### a.1 化学的組成

白アスベストとして知られるクリソタイルは、蛇紋石類に属する線維質の水和ケイ酸マグネシウムで、自然に産出する物質である。蛇紋石類鉱物の化学的組成、結晶構造、ポリタイプ（多形）形態は Langer & Nolan (1994) に記述されている。

クリソタイルの組成は理想単位格子胞式 (ideal unit cell formula)  $(\text{Mg}_{3-x-y}\text{R}_x^{+2}\text{R}_y^{+3})(\text{Si}_{2-y}\text{R}_y^{+3})\text{O}_5(\text{OH})_4$  に近いもので、結晶構造中の他の元素による置換が可能である。Skinner et al. (1988) によれば以下のような置換の可能性が考えられる：



化学分析の結果の例が Environmental Health Criteria 53 (IPCS, 1986) の表 1 に示されている。

Na、Ca、K など他の若干の元素も微量が含まれているが、恐らく鉱石中に他の鉱物が混入しているためと思われる(2.1.6 参照)。

#### a.2 構造

クリソタイルは、各正四面体基底の酸素原子 3 個を同一層の隣接する正四面体と共有している  $(\text{Si}_2\text{O}_5)_n$  の基本構造要素を有する面状ケイ酸塩である。ケイ素面の正四面体の殻頂酸素は、上に重なるブルーサイト層  $(\text{Mg}(\text{OH})_2)$  の成分要素となる (Speil & Leineweber, 1969)。ケイ素面とブルーサイト面では陽イオンの大きさが異なるので、ひずみが生じるが、これは渦巻き構造の形成により調整される。Yada (1967) はこの形態的特徴の視覚化を可能にする透過電子顕微鏡写真を作製した。外面のブルーサイト層には湾曲が生じる。その結果生じる毛管は大抵の試料に共通であったが、ただし固体の核が見られた。

オルソクリソタイル(斜方晶構造)、クリノクリソタイル(単斜晶構造)、パラクリソタイル(円筒形または多角形 Povlen 式構造)など複数の構造が存在する場合にはポリタイプと呼ばれる (Wicks, 1979)。大抵のクリソタイルはオルソおよびクリノポリタイプがさまざまな比率で混合された物質である (Speil & Leineweber, 1969)。

#### a.3 鉱石中の繊維形態

クリソタイルは母岩中に「クロス繊維」(層または鉱脈に直交する繊維軸)、「スリップ繊維」(層に平行の繊維軸)または塊状繊維(米国のニューイドリア鉱脈中のように認識し得る繊維配列の存在しないもの)として存在する。



#### a.4 繊維の性質

可撓性の強弱に応じて、繊維は「硬」「軟」2種類に分けられる。クリソタイル繊維は一般に硬軟両極端の中間の性質のものが多い (Badollet, 1948)。角閃石の繊維は一般に硬質なのに対して、クリソタイル繊維は大抵軟質だが、中間的な性質のものも見られる。硬質性は繊維中の水分に関連する、すなわち水分が多いほど繊維は「軟質」になる (Woodroffe, 1956)、またクリノクリソタイルとオルソクリソタイルの構成比、微細な鉱物連晶 (mineral intergrowth) にも関連する (Speil & Leineweber, 1969) という報告がある。

硬質クリソタイル繊維は軟質繊維より直線的で、可撓性が低い傾向がある。吸引可能な直繊維が実際に吸入されると、「巻毛状」の繊維の場合よりも、終末細気管支 (terminal bronchioles) に達する深い浸透につながり易いと報告されている (Timbrell, 1965, 1970)。

クリソタイル繊維は、粗クリソタイル (実質的に原状のまま、または繊維化されていない形態の手選の繊維) と精製クリソタイル繊維 (鉱石を機械で処理したもの) に分類することができる。各種の製品に適用される繊維の品位区分は国によって異なる。カナダの制度については Cossette & Delvaux の記述がある (1979)。カナダの格付け制度は国際的に広く採用されている。

2.0 世紀の初め頃には、商品価値の高い繊維は数センチの長さのものだったが、やがて新用途が開発されると、短めの繊維の重要性が増した。この変化により、いくつかの環境で暴露の性格が変わってきた。

#### a.5 UICC の試料

国連対がん連合 (UICC) では実験に使用するクリソタイル・アスベストの標準試料を2種類提供している。その一つはジンバブエ (クリソタイル A)、もう一つはケベック州 (カナダ) 東部の町の鉱山から採取した繊維の混合試料 (クリソタイル B) である。これらの試料の物理化学的性質は明らかにされていて、その組成と性質については詳細な報告がある (Timbrell et al., 1968; Rendall, 1970)。これらは人為的な混合物であって、何らかの市販の繊維を反映したものではない。

#### a.6 クリソタイル鉱石中の関連鉱物

鉱山労働者や加工労働者が暴露する可能性のある鉱塵は、クリソタイル鉱石の各鉱床に付帯する鉱物によって判定される。これらは本来の岩石種の組成と、地質学的事象の表面風化過程で加わったり除去されたりした鉱物に依存する。鉱石本体内部のこれら各成分間の空間的關係は、鉱床により大きな差がある。

鉄は超苦鉄質岩石系のクリソタイル鉱床に遍在している。その一部では磁鉄鉱がクリソタイル繊維と密接に関連して存在する (例えばケベック州において)。その他の種類の鉱床、例えば炭酸塩岩では鉄分は少ない (例えばアリゾナ州において)。ブルーサイトや繊維水滑石 (nematolite) が一部の鉱床で見られる。雲母、長石、変質長石、滑石、炭酸塩鉱物などが存在する可能性もある。Langer & Nolan (1994) はクリソタイルを含有する超苦鉄質岩石に関連する可能性のある鉱物の一覧を明らかにし、Gibbs (1971a) はケベック州内のクリソタイル産出地区で見出される鉱物 70 種以上を挙げた。磁鉄鉱、方解石、沸石などの

鉱物も繊維状の形態で存在することがある。

角閃石も、一部繊維状で現われることがある。後から挙げたこれらの鉱石は、暴露した労働者の肺組織の検査で検出された。透閃石、鉄透閃石、アクチノ閃石、直閃石、その他の角閃石鉱物についても記述がある。これらの鉱物が鉱石本体に現れる態様は、分布が不均質で、しかも濃度もさまざまである。Addison & Davies (1990)は81種の鉱石試料中2.8例に透閃石を検出したが(率にして34.6%)、その濃度(検出された場合)は0.01から約0.6%とされている。平均濃度は約0.09%。角閃石の形態は、アスベスト状とも、塊状とも、記述されていない。この情報は、疾病、特に中皮腫の原因物質としてこの鉱物種を考察する際に、決定的な要素とも考えられるものである。

繊維に関連して、微量の金属、特にクローム、コバルト、ニッケル、鉄、マンガンに関する記述がある(Cralley et al., 1967; Gibbs, 1971a; Morgan & Cralley, 1973; Oberdoerster et al., 1980)。1960年代末期に加工工場内で検出された濃度は、当時、繊維製品工場で検出された濃度より数倍高い数値を示していた(Gibbs, 1971a)。

天然のクリソタイルは微量の有機化合物を含むことが示されているが、中でも直鎖状アルカンが圧倒的に多い(Gibbs, 1971b)。加工繊維にも多環式芳香族炭化水素など、有機化合物が含まれている(Gibbs, 1971a; Gibbs & Hui, 1971)。クリソタイル加工工場内の空気中の多環式芳香族炭化水素濃度は、市街地の濃度より低いことが判明した(Gibbs, 1971a)。ポリエチレン袋で保存されている間に、繊維がアルカンや酸化防止剤に汚染される可能性もある(Commins & Gibbs, 1969; Gibbs & Hui, 1971)。

ケベック州内のクリソタイル鉱山におけるラドンの濃度は標準作業レベルで0.3未満と報告されている(Gibbs, 1971a)。これは鉱山労働者の疾病、特に肺ガンの原因物質ではないとされている。

## b 物理・化学的特性

クリソタイルの鉱物学的特色と性質は Wicks (1979)、Pooley (1987)および Langer & Nolan (1994)が要約している。

### b.1 物理的特性

人間の健康に影響を及ぼすクリソタイルの物理的性質については、Langer & Nolan (1986,1994)と IPCS (1986)による記述がある。

硬さについては2.1.4にて論じた。

クリソタイル繊維を700°Cにて1時間加熱すると、非晶質の無水ケイ酸マグネシウム材に変換される(Speil & Leineweber, 1969)。乾燥状態で強力な粉砕を行ってもクリソタイルの構造は破壊される。アスベスト製のプレーキ・ライニングの磨耗くずを分析したところ、クリソタイル繊維が、鉱物質苦土かんらん石(フォルステライト;再結晶生成物)とともに、ほぼ全面的に非晶質物質に変換されていることが判明した。この変換は、プレーキ・ライニングとドラムとの間の接触点で局所的に1000°C以上の高温が発生するためとされる(Lynch,1968; Rowson, 1978; Williams & Muhlbaier, 1982.)。プレーキの磨耗くず中に検出された繊維は、その大半(99%)が長さ0.4 μm未満である(Rohl et al., 1977; Williams & Muhlbaier, 1982.)。Rodelsperger et al. (1986)によれば、検出された繊維の

うち 5  $\mu\text{m}$  より長いものは 1%に満たない。

繊維の吸引可能性を判定するに当っては、その寸法と形状が最も重要な特性となる。作業環境の規制の問題としては、縦横比(繊維の長さ対直径の比)を 3:1 以上と規定する場合が最も多い。規制寸法としては、通常、現場計測で長さ 5  $\mu\text{m}$  以上と定めている。

クリソタイルの束を縦に裂いて、より細い繊維を得ることもできる。最も細く加工した繊維は微小繊維(フィブリル)と呼ばれる。Yada (1967)は高解像度透過電子顕微鏡を使って、クリソタイルの基本的螺旋状要素が、単一微小繊維の 0.007  $\mu\text{m}$  の壁を形成する約 10 個のシリカマグネシア単位を伴う、5 個のシリカマグネシア単位からなることを示した。最も微細化した微少繊維の直径は約 0.03  $\mu\text{m}$  である。

健康に対する危険度の評価において重要な繊維は、吸入される可能性のある繊維である。Timbrell (1970, 1973)は直径約 3.5  $\mu\text{m}$  未満のクリソタイル繊維が肺の誘導気管支に入り得ることを実証した。繊維が誘導気管支沿いの遠隔部位にまで浸透する能力の強弱において、クリソタイル繊維の曲率半径が一定の役割を果たすものと思われる。

同じ細い繊維でも長短の差があり得るので、含繊維エアゾールについて「平均的または中央値の直径」とか「平均的または中央値の長さ」を示しただけでは十分な情報といえない。したがって、被検者が暴露する含繊維エアゾールの比較は制約されることになる。寸法の測定は時間のかかる作業であり、完全なデータは乏しい。

分布観察に関する報告は大半が不完全である。非常に長い繊維を評価するために特に措置が講じられない限り、透過電子顕微鏡検査(TEM)では長繊維(>2.0  $\mu\text{m}$ )の数を過少評価することになる。非常に長い繊維は比率が低く、無作為な操作ではそれに遭遇することが稀だからである。走査電子顕微鏡検査(SEM)は通常、試料の被覆を必要とする。大抵の調整手法では単独のクリソタイル微小繊維の存在を明確にできない。しかも個別繊維の化学分析をしていない場合には、他の繊維をクリソタイルと誤認して報告する恐れもある。

空気によって伝播されるクリソタイル繊維は、その圧倒的多数が短繊維であることが指摘されている。採掘や鉱石の加工で生じる繊維では、長さが 5  $\mu\text{m}$  を超えるものの比率がそれぞれ 1.3、4.1%と報告されている(Gibbs & Hwang, 1980)が、データの示すところ一部の紡糸作業で生じる繊維の 24%は、長さが 5  $\mu\text{m}$  を超えている可能性がある(Gibbs, 1994)。空中の繊維はほぼすべてが直径 3  $\mu\text{m}$  未満で、したがって吸入される恐れがある。

クリソタイル微小繊維の断面はほぼ円形をなしている(Yada, 1967 中の図参照)。これは個々の繊維の質量を計算する上で重要な知見である。一般に表面積は繊維の開放性(度)に依存する。New Idria (Coalinga) 産の繊維では表面積が約 78  $\text{m}^2/\text{g}$  で、平均微小繊維直径は 0.0275  $\mu\text{m}$  であるが、カナディアン 7R では表面積が約 50  $\text{m}^2/\text{g}$ 、平均微小繊維直径は 0.0375  $\mu\text{m}$  である(Speil & Leineweber, 1969)。生物学的潜在性の分与において、表面積が一定の役割を果たすことが示唆されている。

Timbrell (1975) は各種繊維の磁性について報告している。クリソタイルの場合、特に磁場に配向性は見られないとしている。

異なった供給源からの繊維を工業的に加工すると、空気によって運ばれる塵埃の総濃度に影響することが観察されている。

## b.2. 化学的性質

クリソタイルは中性または酸性の水中の環境において、顕著な溶解性を示す(Langer

& Pooley, 1973、 Jaurand et al., 1977、 Spurny, 1982.)。pH 10 未満の希釈酸または水性溶媒との接触下において、外側のブルーサイト層からマグネシウムが溶脱する (Nagy & Bates, 1952.; Atkinson, 1973; Morgan & Cralley, 1973)。マグネシウムの喪失は生体内でも実証されている。溶脱したクリソタイルの表面積は大幅に拡大する (Badollet & Gannt, 1965)。体液中におけるクリソタイルの外側のブルーサイト層の溶解性は、肺組織における生物学的蓄積に大きな影響を及ぼす。クリソタイルの生物学的挙動における化学的性質の役割が最近の文献で論じられている (Langer & Nolan, 1986, 1994)。

極性有機薬剤のクリソタイル表面への吸着は、極性が低いか、あるいは皆無の薬剤の場合よりも高いと報告されている (Speil & Leineweber, 1969; Gorski & Stettler, 1974)。Harvey et al. (1984)はベンゾ(a)ピレン、ニトロソノルニコチン、N-アセチル-2-アミノフルオレンなどの発ガン物質のクリソタイルへの結合について研究した。クリソタイル繊維表面への巻きタバコ煙の吸着が、繊維に暴露する喫煙者における肺ガンの病因に一定の役割を果たすことが示唆されている。クリソタイル繊維が標的細胞の膜を越えて多環式芳香族炭化水素を運ぶ媒体として作用する可能性がある (Gerde & Scholander, 1989)。

#####