

アスベストの鉱物学

九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門

上 原 誠一郎

1. はじめに

アスベストは石綿（いしわた、せきめん）とも呼ばれています。これは地球が作った鉱物です。多くの人は鉱物といえば金、銀、ダイヤモンド、ルビー、水晶などの宝飾品・宝石として価値のあるものや鉄鉱石などの工業的に利用価値の高いものを思い浮かべるかもしれません。しかし、天然に産する鉱物には多種多様のものがあります。鉱物を狭く定義すると「天然に産出し、無機質で、かつ結晶質の物質」です。それで鉱物ごとに化学組成や物理的性質が異なり、これまでに4,000種以上の鉱物が報告されています。鉱物の中で、オパールやコハクなどの原子配列が不規則な固体は非晶質（アモルファス）と呼ばれますが、化学組成がほぼ一定しているときは鉱物種とされています。有機物のコハクやシユウ酸カルシウムなどの有機物も上記の定義からはずれますが、一般には有機鉱物として鉱物種として認められています。さらに、自然水銀のような液体も鉱物として認められています。現在、国際的には“鉱物種”名は国際鉱物学連合（International Mineralogical Association : IMA）の中の新鉱物および鉱物名委員会（Commission on New Minerals and Mineral Names : CNMMN）がとりまとめを行っています。CNMMNは新鉱物の審査だけではなく従来の鉱物名の再定義や不適切に記載された鉱物名の破棄などの作業のとりまとめも行っています。日本では日本鉱物学会に新鉱物・鉱物名国内委員会があり、その窓口になっています。

アスベストは天然に産する綿のように柔らかな鉱物繊維で、人類は長い間、この熱に強い不思議な繊維を利用してきました。この鉱物繊維は耐熱性・耐薬品性・絶縁性などの優れた性質を持っているために20世紀にはいると大規模に採掘されます。建設

資材、電気製品、自動車や家庭用品など約3,000種を超える形態で利用され、「奇跡の鉱物」と呼ばれてきました。ところが、1970年代からアスベスト繊維を人間が肺に吸い込むと、20~50年後にガンになる恐れがあることが医学的に明らかになってきました。それで「奇跡の鉱物」は、新たに「静かな時限爆弾」とも呼ばれるようになりました。

ここでは鉱物学的な面からアスベスト、特にクリソタイルを中心に解説をします。

2. アスベストの定義

アスベストの定義は分野により少し違いますが、一般的には「岩石を形成する蛇紋石族および角閃石族に属する繊維状の珪酸塩鉱物」です。鉱物学上の定義は天然に産する鉱物群のうちで、高い抗張力と柔軟性をもつ綿糸状で光沢があり、繊維状の集合(asbestiform)をなすものの俗称です。クリソタイル(chrysotile)の別名としてアスベスト(asbestos)を用いることもあります。chrysotileの語源はギリシャ語の chryso (gold), tilos (fiber) で、“黄金の繊維”です。工業上の定義では、繊維状の集合(asbestiform)をした鉱物を採掘、加工して得た工業原料をアスベストといい、鉱物種を特定していません。環境大気中の定義は微小な繊維又は繊維束の状態で浮遊するクリソタイル、クロシドライト、アモサイト、アンソフィライト、トレモライト及びアクチノライトをいうことが多いようです（国際労働機関（ILO）や米国環境保護庁（EPA）等）。このため環境問題の観点からはアスベストは単一の種類ではなく、クリソタイル（白石綿、温石綿）、クロシドライト（青石綿）、アモサイト（茶石綿）、アンソフィライト、トレモライト、アクチノライトの6種類があります。このなかでク

リソタイル, クロシドライト, アモサイトが主に採掘され利用されました。その90%以上はクリソタイルです。

3. アスペストの種類と特徴

鉱物は化学組成(元素の組み合せ)と結晶構造(原子の並び方)で分類されています。そして、類似した結晶構造を持つ鉱物種は族(グループ)としてまとめられています。

クリソタイルは蛇紋石族(グループ), そのほか

のアスペストは角閃石族(グループ)に属します(図1, 表1)。蛇紋石族(Serpentine group)の理想化学式は $M_3T_2O_5(OH)_4$ で, Mは2価の陽イオンMg, Fe²⁺, Mn, Ni, 一部に3価の陽イオンAl, Fe³⁺がはいります。TはSi, Al, Fe³⁺です。角閃石族(Amphibole group)の理想化学式は少し複雑ですが, $A_{0-1}B_2C_5T_8O_{22}(OH)_2$ です。AはNa, K, または空席で, BはNa, Li, Ca, Mg, Fe²⁺, Mn等, CはMg, Fe²⁺, Mn, Al, Fe³⁺等, TはSi, Alです。表1ではアスペスト名

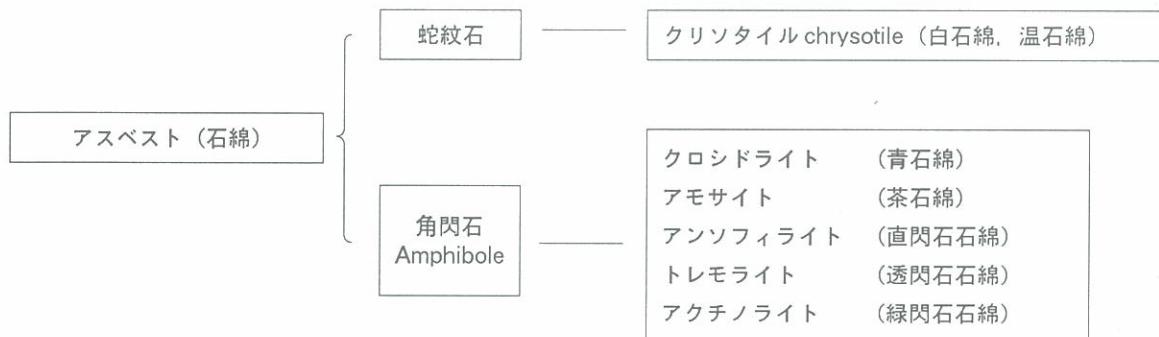


図1 アスペストの分類

表1 アスペストの種類と鉱物学的分類

アスペスト種	鉱物属名/鉱物名	理想化学式
蛇紋石石綿 (Serpentine asbestos)	蛇紋石族 (Serpentine group)	$M_3T_2O_5(OH)_4$ M = Mg, Fe ²⁺ , Mn, Ni, Al, Fe ³⁺ 等 T = Si, Al, Fe ³⁺ 等
クリソタイル(白石綿) chrysotile	クリソタイル(温石綿) chrysotile クリノクリソタイル(Clinochrysotile) オルソクリソタイル(Orthochrysotile) パラクリソタイル(Parachrysotile)	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$
角閃石石綿 (Amphibole asbestos)	角閃石族 (Amphibole group)	$A_{0-1}B_2C_5T_8O_{22}(OH)_2$ A = Na, K, または空席 B = Na, Li, Ca, Mg, Fe ²⁺ , Mn等 C = Mg, Fe ²⁺ , Mn, Al, Fe ³⁺ 等 T = Si, Al
クロシドライト(青石綿) Crocidolite	リーベック閃石 Riebeckite	$Na_2(Fe^{2+}, Mg)_3Fe^{3+}Si_8O_{22}(OH)_2$
アモサイト(茶石綿) Amosite	グリュネル閃石 Grunerite	$(Fe^{2+})_2(Fe^{2+}, Mg)_5Si_8O_{22}(OH)_2$
アンソフィライト石綿 Anthophyllite asbestos	直閃石(アンソフィライト) Anthophyllite	$(Mg, Fe^{2+})_7Si_8O_{22}(OH)_2$
トレモライト石綿 Tremolite asbestos	透閃石(トレモラ閃石, トレモライト) Tremolite	$Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2$
アクチノライト石綿 Actinolite asbestos	緑閃石(アクチノ閃石, アクチノライト) Actinolite	$Ca_2(Mg, Fe^{2+})_5Si_8O_{22}(OH)_2$

とそれに対応する鉱物名、理想化学式をあわせて示しました。

鉱物名の和名（日本名）は近代的な鉱物学が日本に入ってきた明治初期から昭和中期までは漢字を当てることが多くありました。それで古い文献ではクリソタイルを温石綿と表記してあることがあります。また、角閃石族の鉱物の和名は“閃石”をつけることが一般的で、クロシドライトの鉱物名 Riebeckite はリーベック閃石（リーベッカイト）、アモサイトの鉱物名 Grunerite はグリュネル閃石（グリュネライト）といいます。他の角閃石族の Anthophyllite は直閃石（アンソフィライト）、Tremolite は透閃石（またはトレモラ閃石、トレモライト）、Actinolite は緑閃石（アクチノ閃石、陽起石、アクチノライト）と呼ばれています。このように鉱物の和名は統一されていませんので、文献等を調べるときは注意が必要です。

図1に示した6種の石綿の名前が鉱物種名のように思われていますが、クリソタイル、クロシドライト、アモサイトは鉱物の種名ではありません。クリソタイルにはクリノクリソタイル、オルソクリソタイル、パラクリソタイルの3種があることが1950年代にX線回折法や電子顕微鏡観察から知られています。ただし、天然のクリソタイルの多くはクリノクリソタイルです。また、クロシドライトはリーベック閃石、アモサイトはグリュネル閃石の纖維状の形状をなすものの変種名で、鉱物種名ではありません。

図2にクリソタイル、クロシドライトの鉱石の写真を示します。いずれも岩石中に脈状に産出するのが特徴です。これらの鉱石のアスベストは簡単に手でも細かく纖維状に分離することができますが、単纖維にまでほぐすのは大変です。図3はこれらの鉱石を手でほぐして走査電子顕微鏡で撮影した2次電子像です。クリソタイル、クロシドライトとともに細く長い纖維状をなしている様子がよくわかります。クリソタイルの方が柔らかく纖維が曲がっているものも見られます。クリソタイルに比べるとクロシドライトの方が直線的で硬い纖維であることもわかります。さらに透過電子顕微鏡を用いて観察しますと幅 $0.1\mu m$ 以下の単纖維が束状になっている様子、さらに観察倍率を上げるとクリソタイルでは中空のチューブ状組織をなしていることが確認されます（図4、5）。また、纖維の幅はクロシドライトの方が大きいことが多いようです（図6）。

商業的に利用されているクリソタイル石綿の化学組成を表2に示します。天然のクリソタイルは一般に理想化学式 $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ に近い値を持つことが多いのですが、常に少量の鉄やアルミニウムを含みます。産地により副成分元素の量に違いがありますが、これは原岩となっているカンラン岩の化学組成やクリソタイル形成に関与した熱水の成分の違いによると考えられます。また、表2に示した化学分析値の中の CaO 、 Na_2O 、 K_2O 、 CO_2 はクリソタイルの結晶構造中には入りませんので不純物として存在する鉱物の影響でしょう。

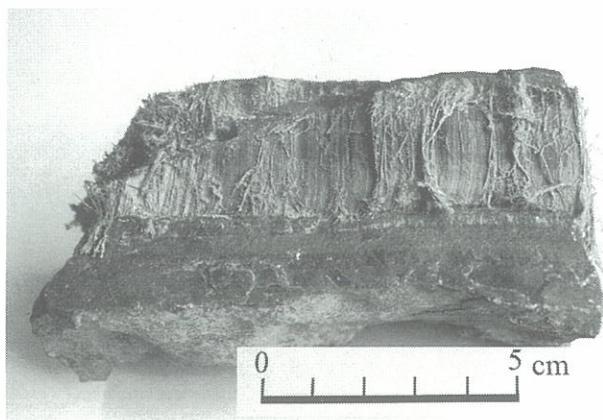
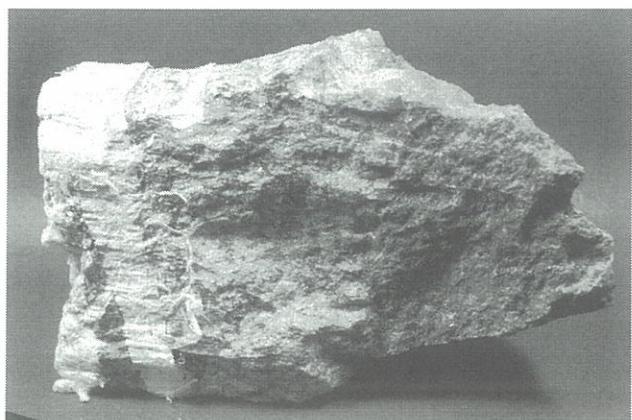


図2 アスベスト鉱石 左：蛇紋岩中のクリソタイル（左側の白色脈）右：縞状層状鉄鉱中のクロシドライト（上半分の纖維状部の部分）（榎原・上原、2006）

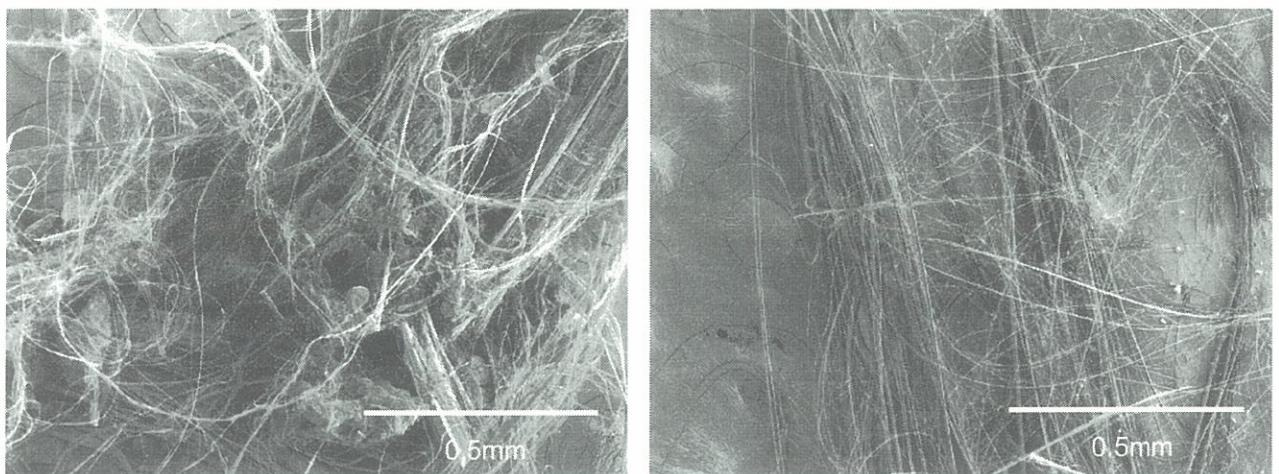


図3 アスベストの走査電子顕微鏡写真 左：クリソタイル 右：クロシドライト (榎原・上原, 2006)

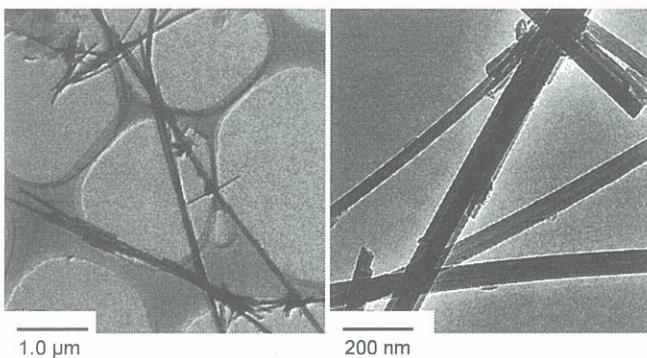


図4 クリソタイルの透過電子顕微鏡写真

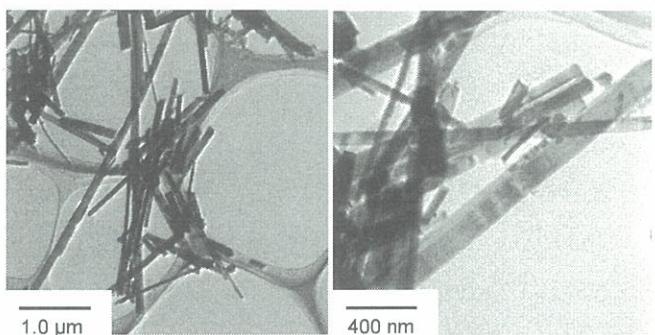


図6 クロシドライトの透過電子顕微鏡写真

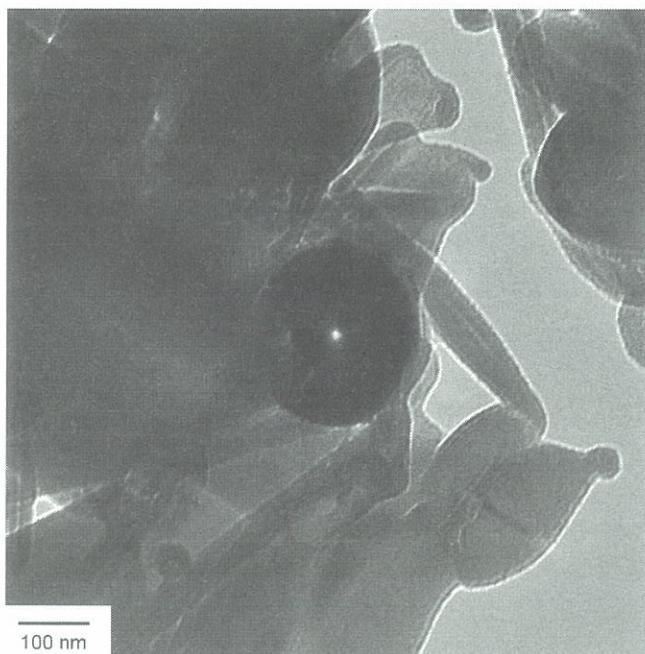


図5 クリソタイルの透過電子顕微鏡写真

4. クリソタイルの産状

クリソタイル石綿は世界のアスベスト生産額の

90%以上を占めています。クリソタイルは蛇紋岩中および、マグネサイト（菱苦土石）、ドロマイ特（苦灰石）あるいはドロマイ特質石灰岩と貫入岩体との接触部に産出します。随伴鉱物としては、磁鉄鉱、ブルース石、マグネサイト、タルク、緑泥石などがあります。他の蛇紋石鉱物（リザード石、アンチゴライト）が混在することもあります。

蛇紋岩中のクリソタイルに大規模なものが多くの重要なものです。このタイプのクリソタイルは主にカンラン（橄欖）岩が変質して蛇紋岩化するとき生じた岩体の割れ目に纖維軸が直交する状態で産出します（図2a）。これを直交纖維脈（cross-fiber vein）とよび、主要なクリソタイル鉱床はほとんどこのタイプで、カナダのQuebec州の鉱床、ロシアウラル山地 Bazhenovo鉱床、南アフリカの鉱床などがあります。

カナダの鉱床は、ア巴拉チア山地の北東端に位置

表2 クリソタイル石綿の化学分析値と構造式

	Canada (1)	USSR (2)	Zimbabwe (3)	Swaziland (4)
SiO ₂	38.75	39.00	39.70	39.93
Al ₂ O ₃	3.09	4.66	3.17	3.92
Fe ₂ O ₃	1.59	0.54	0.27	0.10
FeO	2.03	1.53	0.70	0.45
MnO	0.08	0.11	0.26	0.05
MgO	39.78	38.22	40.30	40.25
CaO	0.89	2.03	1.08	1.02
K ₂ O	0.18	0.07	0.05	0.09
Na ₂ O	0.10	0.07	0.04	0.09
H ₂ O ⁺	12.22	11.37	12.17	12.36
H ₂ O ⁻	0.60	0.77	0.64	0.92
CO ₂	0.48	1.83	2.13	1.04
total	99.79	100.20	100.51	100.22

酸素数を7とした時の陽イオン数 理想式Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ に基づく				
Si	1.845	1.851	1.885	1.882
Al	0.155	0.149	0.115	0.118
sum	2.000	2.000	2.000	2.000
Al	0.018	0.112	0.062	0.100
Fe ³⁺	0.057	0.019	0.010	0.004
Fe ²⁺	0.081	0.061	0.028	0.018
Mn	0.003	0.004	0.010	0.002
Mg	2.823	2.704	2.853	2.827
Ca	0.045	0.103	0.055	0.052
K	0.011	0.004	0.003	0.005
Na	0.009	0.006	0.004	0.008
sum	3.047	3.013	3.025	3.016

Skinner, Ross and Frondel (1988) p32より引用

し、延長100km、幅5~10kmの地帯にあります。この鉱床は、ケベック市の約70km南のEast Broughtonに始まり、南西に向かってThetfordおよびBlack Lakeを経て、Asbestos町の世界最大のクリソタイル石綿の採掘がなされたJeffrey鉱山まで達しています。

図7はカナダ・ケベック州Black Lakeのアスベスト鉱山の採掘の様子と鉱石です。1997年当時には露天掘りで大規模に採掘され、管理された工場の中で鉱石からクリソタイルを分離し製品としていました。鉱山近くにはクリソタイルを分離した蛇紋岩の廃石が山のように積み上げられており、ボタ山のようでした。

カンラン岩は地球の上部マントルを構成する岩石で苦土カンラン石((Mg, Fe)₂SiO₄)、頑火輝石((Mg, Fe)SiO₃)、透輝石(CaMgSi₂O₆)を主

成分鉱物とします。このカンラン岩が比較的低温で水と反応すると蛇紋石を生じます。これを蛇紋岩化作用と呼びます。この反応が進むと密度が下がり断層に沿って蛇紋岩は上昇することになります。

日本のアスベスト鉱床は蛇紋岩と密接に関係しています。海外の鉱床に比べると小規模なものですですが、九州中部から静岡に至る中央構造線沿い、秩父山地、阿武隈山地、北上山地、北海道日高山脈における産出が知られています。鉱床として採掘されない極小規模のクリソタイルは各地の蛇紋岩中に含まれることがあります。図8に西南日本の蛇紋岩の分布を示します。日本のような造山帯では変成帯・構造帯と呼ばれる地帯に蛇紋岩が分布しています。北部九州の福岡県篠栗・八木山、佐賀県巣木では三郡変成岩に伴って、長崎県西彼杵半島・野母半島では

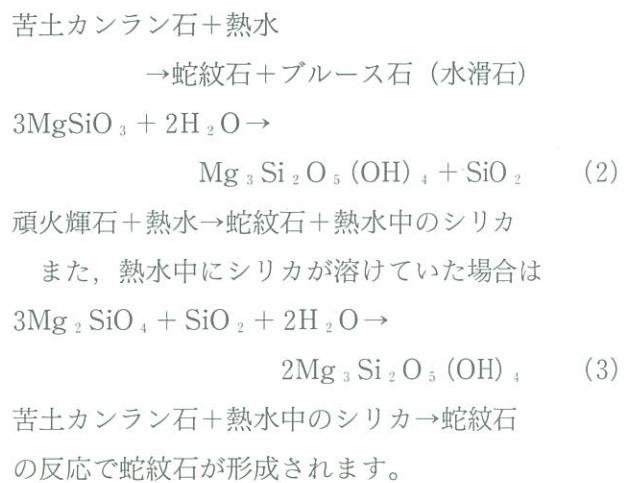
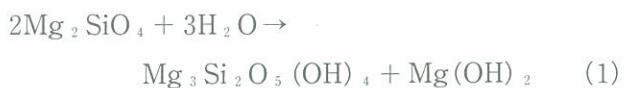


図7 カナダ ケベック州のアスペスト鉱山 (a, b), クリソタイル鉱石 (c), 蛇紋岩のボタ山 (d)

長崎変成岩と共に産出します (Uehara & Shirozu, 1985; 上原, 1987; Uehara, 1995; Uehara, 1998)。中部九州では中央構造線の西端をなす臼杵一八代構造線が北東から南西方向に走っていますが、それとほぼ平行にある黒瀬川構造帯中に不規則に分布しています。また、大分県佐賀関半島では三波川変成岩中に産出します (Uehara & Kamata, 1994)。このように小規模ですが蛇紋岩が分布している地域での岩石の採掘や土木作業ではクリソタイル石綿に注意が必要かもしれません。

$MgO - SiO_2 - H_2O$ 系の合成実験によると蛇紋石は高温では不安定です。カンラン石と水の反応の場合は $500^{\circ}C$ 以下で生成します (図9)。

それらの反応は次式で表せます。



また、後に述べるように蛇紋石にはクリソタイル、アンチゴライト、リザード石の三種類の多形が存在します (厳密にはアンチゴライトは多形ではありません)。上記の反応で、苦土カンラン石からはクリソタイル、あるいはリザード石が出来ることが多く、

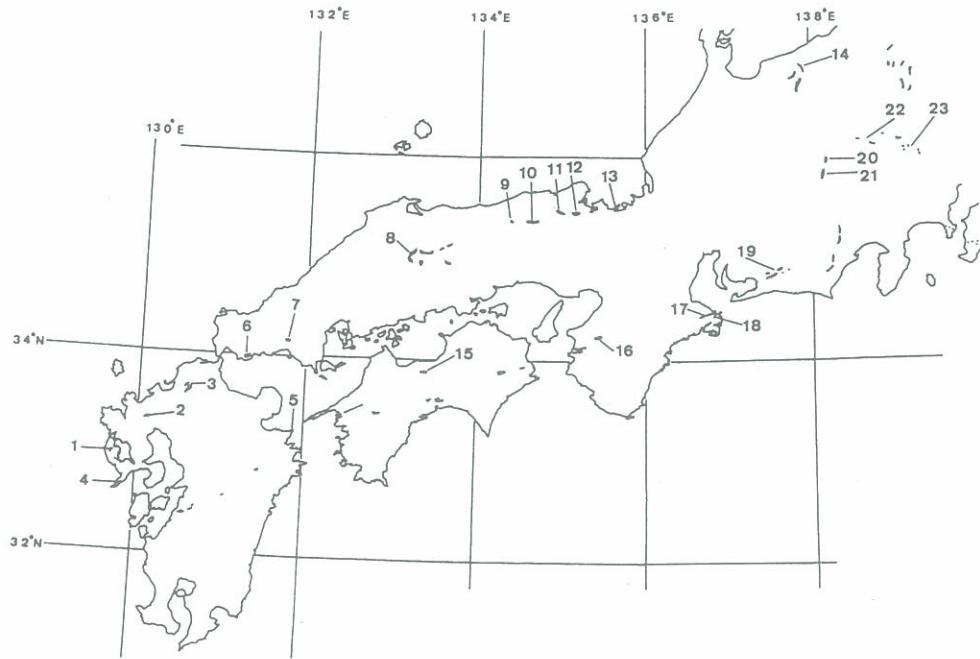


図8 西南日本の蛇紋岩の分布 (Uehara, 1995)

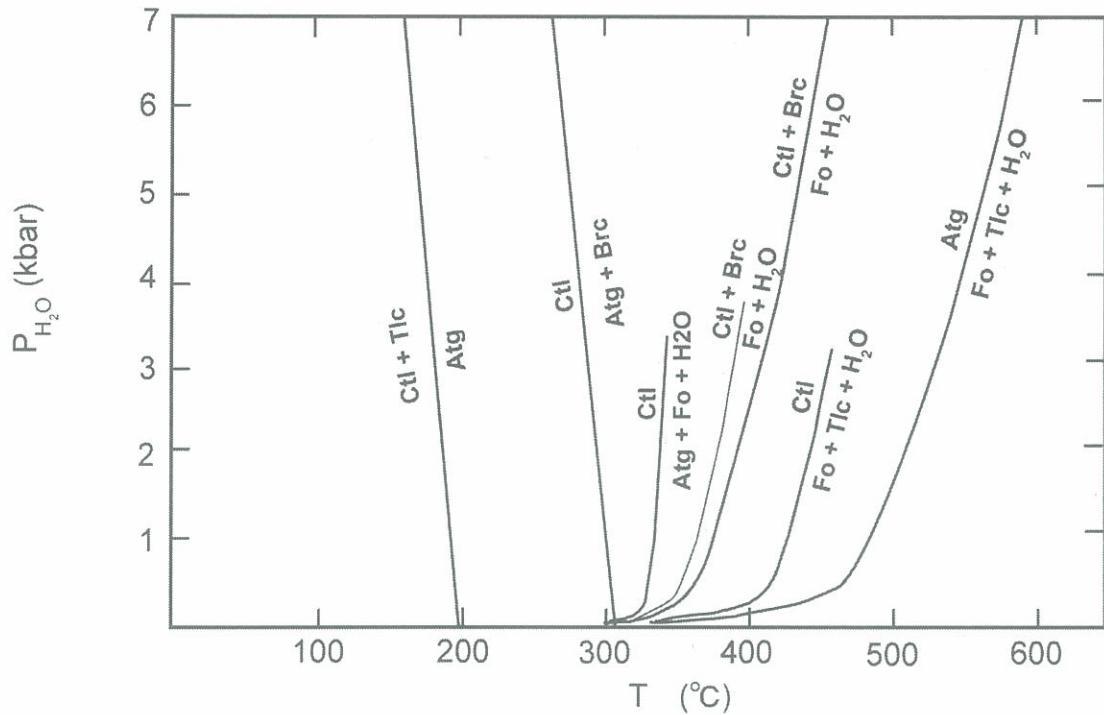


図9 蛇紋石とその他の鉱物の安定関係を示す温度-圧力図 (Evans ら, 1976)

Ctl : クリソタイル, Tlc : タルク, Atg : アンチゴライト, BrC : ブルース石, Fo : 苦土カンラン石

アンチゴライトはクリソタイルやリザード石が変成作用をうけて生成することが多いようです。実験的に求められた蛇紋石とその他の鉱物の安定関係は図9のようになります。300°C以下ではクリソタイル

あるいはリザード石が安定で、それよりも高温ではアンチゴライトが安定です。天然の蛇紋岩の調査からは200°C程度の変成作用をうけた蛇紋岩中にアンチゴライトが産出するようで必ずしも図9に示した

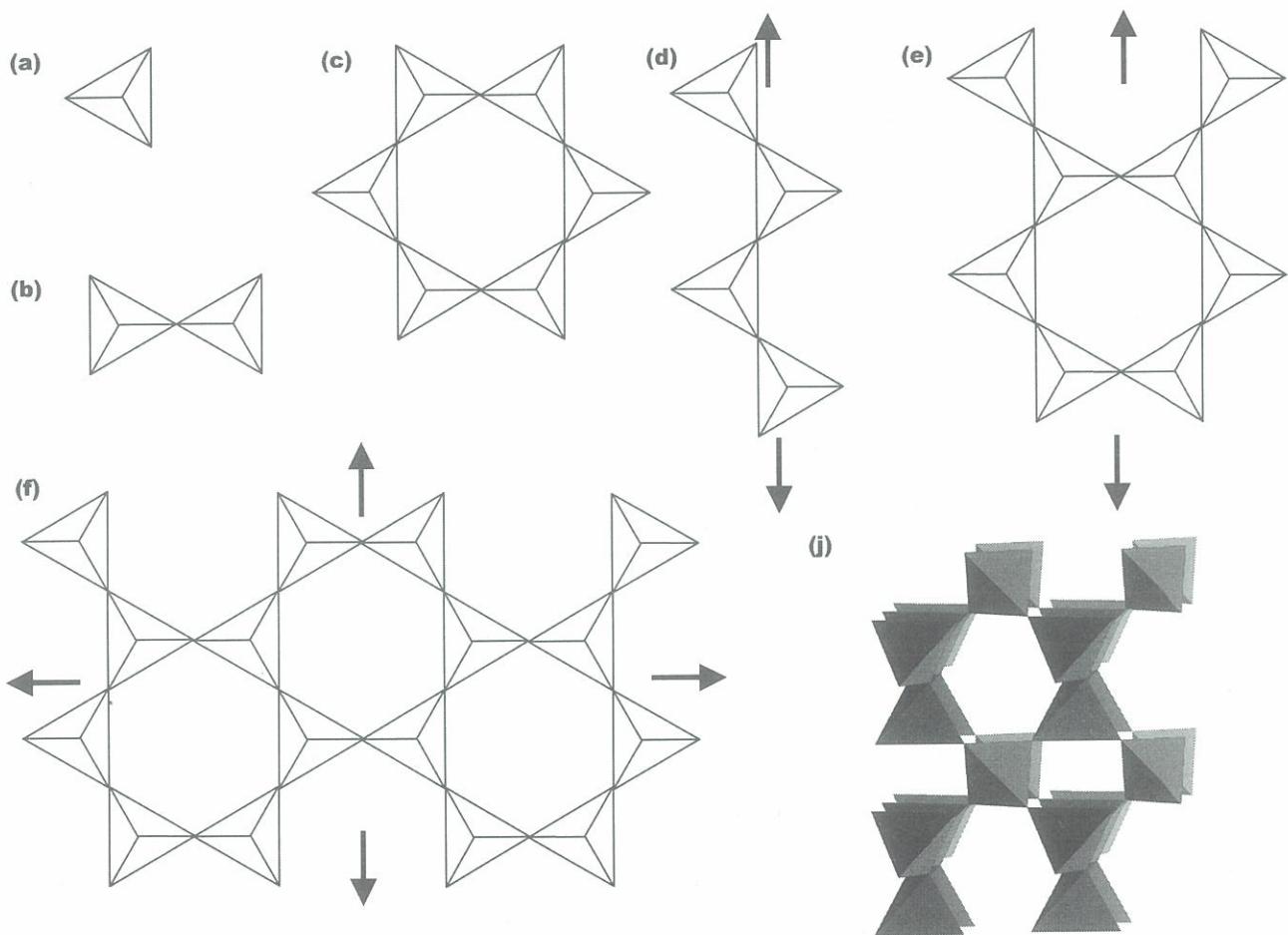


図 10 硅酸塩鉱物の分類

合成実験の結果や熱力学計算結果とは一致しません。また、最近ではクリソタイルを熱力学的に安定領域を持たない準安定相と考える研究者もいます。

5. SiO_4 四面体と硅酸塩鉱物の基本構造

アスペストはすべて硅酸塩鉱物 (SiO_4 四面体を基本とする) と呼ばれる分類群に属するものです。

珪酸塩鉱物は地球の地殻・マントルを構成する重要な鉱物です。 SiO_4 四面体のつながり方によって分類されています。主なものに図 10 に示した結合様式があり、ネソ珪酸塩、ソロ珪酸塩、サイクロ珪酸塩、イノ珪酸塩、フィロ珪酸塩、テクト珪酸塩と分類されています。

ネソ珪酸塩の SiO_4 四面体は一つずつ独立しどの頂点も共有しないもので、 $(\text{SiO}_4)^{4-}$ が基本単位となります(図 10a)。カンラン石族 (Olivine group) やざくろ石族 (Garnet group) がこれに当たります。ネソとは、ギリシャ語の nesos で「島」の意味

です。

ソロ珪酸塩は二つの SiO_4 四面体が一つの頂点を共有して $(\text{Si}_2\text{O}_7)^{6-}$ を基本単位としています(図 10b)。ソロとは、ギリシャ語の soros から来ていて、「積み重ね」の意味です。緑レン石族 (Epidote group) が代表的な鉱物です。

サイクロ珪酸塩の SiO_4 四面体は二つの角を共有してつななり、リングを作ります。一つのリングをつくる四面体の数は、3個、4個、6個などがあります。図 10c では6員環を示しました。この場合では $(\text{Si}_6\text{O}_{18})^{12-}$ が基本単位になります。サイクロの語源は、ギリシャ語の kyklos (輪) から来ています。電気石 (トルマリン) 族 (Tourmaline group), 緑柱石 Beryl などがあります。緑柱石の変種として宝石に利用されるエメラルド、アクアマリンがあります。トルマリンも宝石として利用されるものがあります。

イノ珪酸塩の SiO_4 四面体は二つの頂点を共有し

てつらなり長い鎖をつくります(図10d, f)。その鎖が二つ連結して複鎖をつくっているものもあります。イノは、ギリシャ語のinos(ひも)から来ています。鎖が1本と2本のものは、それぞれを一重鎖構造(Si_2O_6)⁴⁻、二重鎖構造(Si_4O_{11})⁶⁻といいます。一重鎖構造の代表的なものに輝石族(Pyroxene group)、二重鎖構造に角閃石族(Amphibole group)があります。アスベスト鉱物のクロシドライト、アモサイトはこの二重鎖構造になります。この鎖の伸びの方向が纖維軸となります。

フィロ珪酸塩の SiO_4 四面体は三つの角を共有して、平らな層状構造を作ります。フィロは、ギリシャ語のphylion(葉)からきています。 $(\text{Si}_4\text{O}_{10})^{4-}$ が基本単位になります。基本的には層状構造になりますから層状珪酸塩(Sheet silicate)と呼ばれることもあります。蛇紋石族(Serpentine group)や雲母族(Mica group)が代表的なものです。アスベスト鉱物のクリソタイルはこのフィロ珪酸塩に分類されます。これが纖維状の形状を示す理由は後に述べます。

テクト珪酸塩の SiO_4 四面体は四つの頂点をすべて共有し、3次元的につながりフレーム状構造を作ります(図10j)。構造の単位は $(\text{SiO}_2)^0$ 、 $(\text{Si}_3\text{AlO}_8)^{-}$ 、 $(\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_8)^{2-}$ などとなります。テクトとは、ギリシャ語のtecton(建設者)から来ています。シリカ鉱物(SiO_2 group)、長石族(Feldspaper group)が代表的なもので、私たちの身の回りの岩石中に普通に見ることの出来る鉱物です。

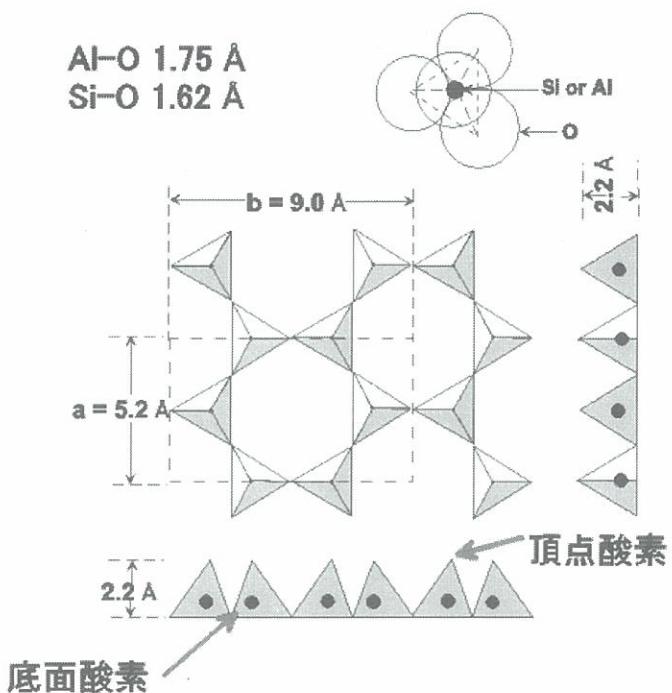
6. フィロ珪酸塩鉱物の構造

6. 1 基本構造—四面体シートと八面体シート

ここではクリソタイルの属するフィロ珪酸塩鉱物の結晶構造について説明します。フィロ珪酸塩を作っている SiO_4 四面体の2次元的なつながりを四面体シート(tetrahedral sheet)といいます(図11)。この四面体シートと組み合う $\text{Al}-\text{O}$ 、 $\text{Mg}-\text{O}$ 等の八面体の網状のつながりは八面体シート(octahedral sheet)と呼ばれます(図12)。八面体

シートに入る陽イオンが Al^{3+} など三価のイオンの場合は図11に示したように1/3の空席ができますが、 Mg^{2+} など二価のイオンの場合はすべての八面体陽イオン位置が満席になっています。これらはそれぞれ、2八面体(dioctahedral)、3八面体(triocatahedral)と呼ばれます。四面体シートと八面体シートは陽イオンを幾つかの陰イオンが囲むことによりできる多面体がつながった構造をとります。二次元的な周期a、bはそれぞれ約5.2、9.0 Åです。両シートともその厚さは約2.2 Åです。この両シートが組み合って1:1層あるいは2:1層と呼ばれる複合層(珪酸塩層、silicate layer)が作られます。1:1層が積み重なってできる構造を1:1型構造、2:1層が積み重なってできる構造を2:1型構造といいます。

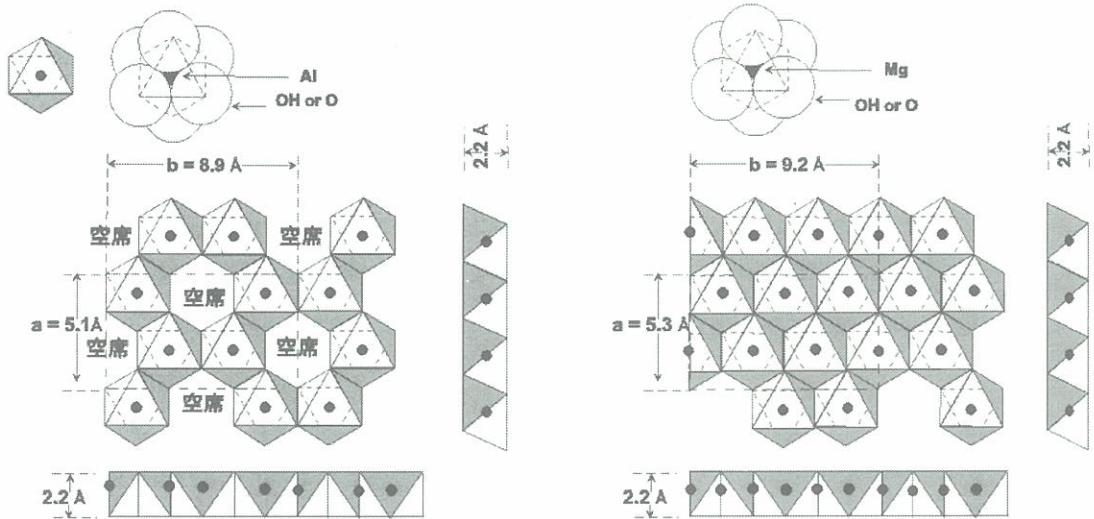
図13に1:1層の構造を示します。代表的な1:1層の鉱物は蛇紋石とカオリンがあります。化学式はそれぞれ $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ 、 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ となります。四面体側の表面は底面酸素、八面体側の表面はOH基からなります。底面酸素と表面OH



四面体シートを作る陽イオンのイオン半径

Fe^{3+} 0.64, Al^{3+} 0.51,
 Si^{4+} 0.42, P^{5+} 0.35, B^{3+} , 0.23 Å

図11 四面体シート



八面体シートを作る陽イオンのイオン半径

Al^{3+} 0.51, Fe^{3+} 0.64

Mg^{2+} 0.66, Li^+ 0.68, Ni^{2+} 0.69, Fe^{2+} 0.74, Mn^{2+} 0.80 Å

図 12 八面体シート

とは配列はちがいますが、個数は同じで積層するときにOとOHの対を作り水素結合が形成されますので、1:1層のみで3次元的な結晶ができます。しかし、層の広がりは極性のためにバランスを失いやすく、層が湾曲することもあり大きな平板結晶はできにくいと考えられています。実際、粘土サイズとして产出することが多く、肉眼的サイズの単結晶の产出は極めてまれです。X線単結晶法による構造解析の報告例は余り多くありません。

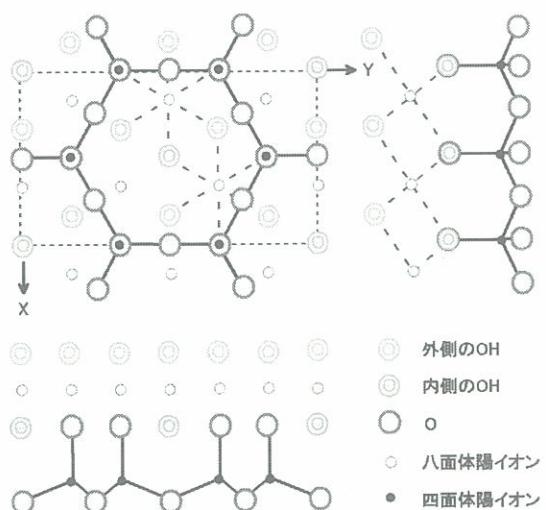


図 13 1:1層の構造

6. 2 ミスフィット構造の変形

ここまででは理想構造を示しましたが、現実の構造では四面体シートと八面体シートの横方向の大きさに違いがあります。これをミスフィットと呼び、正多面体からなる理想構造からの変形が認められます。水酸化鉱物のギブサイト ($\text{Al}(\text{OH})_3$) とブルース石 ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) の値を基に2八面体シートと3八面体シートのb軸の長さを求めるべとそれぞれ8.64 Åと9.36 Åになります。四面体シートは $\text{Si}-\text{O}=1.618$ Åとして理想構造をとるとすれば $b=9.15$ Åになります。四面体のSiはAlにより置換されますので、 $\text{Al}-\text{O}=1.748$ Åとして計算すると $b=9.89$ Åとなります。この関係から $b(\text{Si}_{1-x}\text{Al}_x)=9.15 + 0.74x$ と近似され、 (Si_3Al) 組成の四面体シートでは $b=9.40$ Åとなりブルース石から求めた3八面体シートの値に近くなります。

両シートのミスフィットを層が湾曲して解消している場合があります。1:1層の鉱物では大きい方のシートを外側にして層が湾曲し、チューブ状の形態をとることさえもあります。3八面体型のクリソタイルは八面体シートを外側にして、2八面体型のハロイサイトは四面体シートを外側にしています。図

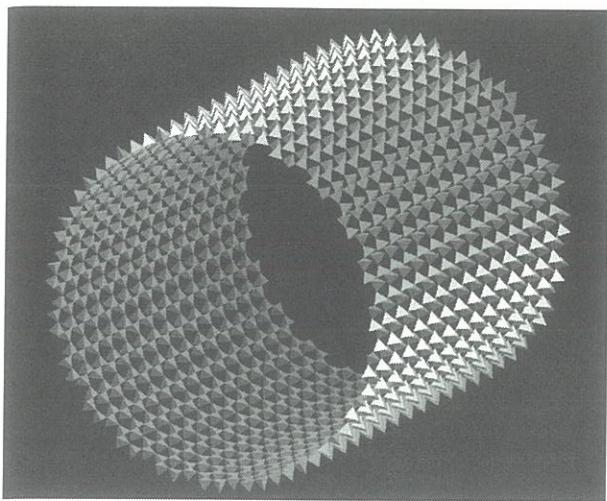


図14 クリソタイルの四面体シート（上原, 2000）

14にクリソタイルの四面体シートを示します。内直径60 Åで一枚の四面体シートのみを示し、八面体シートは省略しています。電子顕微鏡を用いて観察された結果では外直径150–500 Å、内直径20–150 Åのチューブ状の外形をなしています。その断面は同心円状またはらせん状です。

また、3八面体シートを外側に湾曲した1:1層が四面体シートを反転しながらつながり、緩やかな波の大きな周期(35–50 Å)を持った超構造を作ることもあります(アンチゴライト、図15)。この場合には四面体と八面体の組成比は理想式からずれて、四面体の割合が僅かに大きくなります。さらに、Mgよりもイオン半径の大きなFeやMnからなる蛇

紋石族鉱物のグリーナライトやカリオピライトでは2次元的に四面体シートの反転が起こってさらに複雑な構造をとっています。

6. 3 ポリタイプ層の重なり方

フィロ珪酸塩の単位構造は次々に積み重なって3次元の立体構造を作ります。このとき単位構造層は同じであっても、積み重なりの上下間の位置関係が異なる場合があります。その結果、結晶構造全体では、単位胞の形・大きさやその中に含まれる単位構造層の数が異なる多くの構造が形成されます。層状構造をもった物質にみられるこのような現象をポリティピズム(polytypism)と呼びます。そして、個々の構造をポリタイプ(polytype)といいます。同一の化学組成で異なる結晶構造を示す現象を多形(同質異像)といいます。例えば、石墨とダイヤモンド(何れも炭素から出来ている鉱物)の関係です。ポリティピズムは多形の一種になりますが、多形は温度や圧力などの生成条件が異なるときに生じます。一方、ポリタイプはこれらの条件の差が無いか、あってもわずかなものです。

カオリン鉱物は2八面体型1:1層が積み重なる構造をとっています。1930年代の始めにその中に3種類の構造の異なる鉱物、カオリナイト、ディッカイト、ナクライトがあることが明らかにされました。これらはポリタイプの関係にあります。現在ではポリタイプは独立した鉱物種としては認めないこ

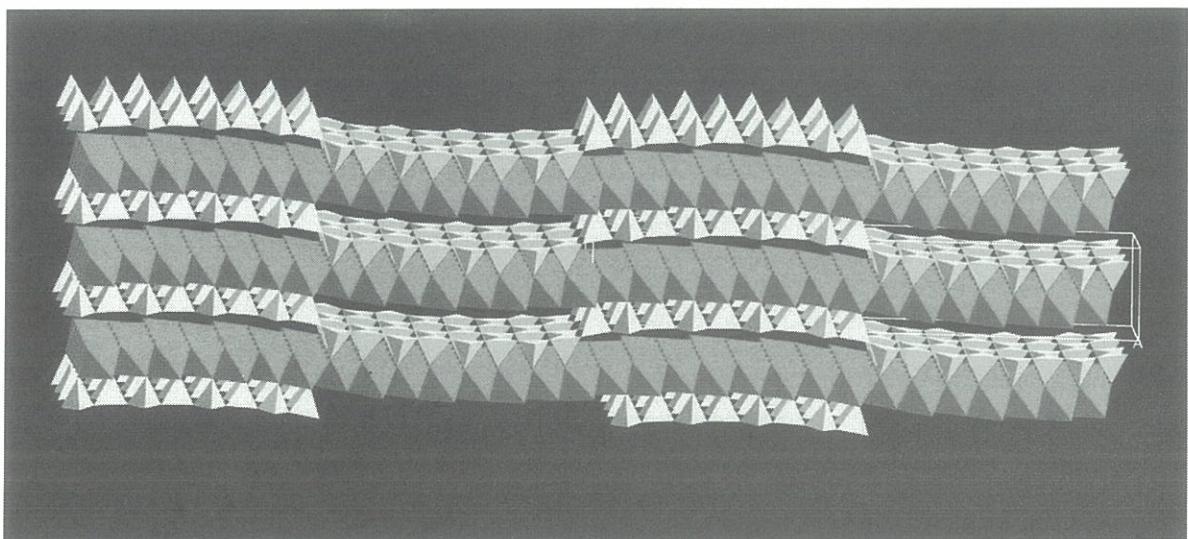


図15 アンチゴライトの超構造（上原, 2000）

とになっていますが、歴史的な経緯もあり、カオリシ鉱物の場合は例外的に独立した鉱物名が与えられています。同様にクリソタイルでもクリノクリソタイル、オルソクリソタイルがポリタイプの関係になることが1950年代に明らかになりました。それで、それぞれchrysotile 2Mc1, chrysotile 2Orc1と記述されることがあります。この記号の“2”は2層構造、MはMonoclinic(单斜晶系)、OrはOrthorhombic(斜方晶系)、cはcylindrical(円筒状)1は報告された順番を示しています。クリノクリソタイル、オルソクリソタイルの纖維軸はa軸ですが、パラクリソタイルは纖維軸をb軸とする多形の関係になります。

7. おわりに

ここでは鉱物学的な側面からアスベストを解説しました。アスベストは天然が作った鉱物で、その鉱物が岩石に存在すること自体で人間に対して健康被害を及ぼすことはありません。人類が行ってきた産業としての利用の手段に問題があり、適切な防塵対策を行っていればと思います。WHOの下部機関であるIARC(国際癌研究機関)の分類で発ガン性物質として“認定”されたグループ1にアスベスト鉱物(6種)、エリオン沸石、石英、さらに、ヒ素、クロム、ニッケルなどを含む鉱物などがあります。他には太陽光、X線、アルコール飲料、タバコなど皆さんのが普段接する機会のあるものも多数あります。

政府がアスベストを1%以上含む製品に表示を義務づけたり、すべてのアスベスト鉱物を含む製品を有害物質として取り扱い、さらに除去することを命令することは多くの税金や資本を使うことになります。このような規制を行う際に、問題となる鉱物の存在する場やその量、化学的な性質などの自然科学的な知識を正確に知る必要があります。もちろんある種の鉱物の塵に長期間さらされることは健康上問題になることは確かです。しかし、“健康に対する危険にしきい値はない”と言う理論に基づく政策が進められるときには環境問題に含まれる鉱物を研究する者としては自然に対する無知と戸惑いを覚えま

す。

参考文献

- Brindley, G. W. and Brown, G. ed. (1980) Crystal Structure of Clay Minerals and Their X-ray Identification. Mineralogical Society, London, pp495.
- Fleischer, M. and Mandarino, M. (1995) Glossary of Mineral Species, 1995. The Mineralogical Record Inc. Tucson. pp280.
- 榎原正幸・上原誠一郎(2006)アスベストとは何か?, 岩石鉱物科学, 35, 3-10.
- 白水晴雄(1988)粘土鉱物学, 朝倉書店, pp185.
- Skinner, H.C.W., Ross, M. and Frondel, C. (1988) Asbestos and other fibrous materials – Mineralogy, crystal chemistry, and health effects. New York, Oxford University Press, pp. 204.
- Uehara, S. and Shirozu, H. (1985) Variations in chemical composition and structural properties of antigorites. Mineralogical Journal, 12, 299-318.
- 上原誠一郎(1987)福岡県篠栗地方の蛇紋石鉱物, 岩石鉱物鉱床学会誌, 82, 106-118.
- 上原誠一郎(1994)層状珪酸鉱物および関連鉱物研究における透過電子顕微鏡法, 鉱物学雑誌, 23, 111-125.
- Uehara, S. and Kamata, K. (1994) Antigorite with large supercell from Saganoseki, Oita Prefecture, Japan. Canadian Mineralogist 32, 93-103.
- Uehara, S. (1995) Superstructure and crystal chemistry of antigorite. Dr. Thesis, Kyushu University. P61.
- Uehara, S. (1998) TEM and XRD study of antigorite superstructures. Canadian Mineralogist 36, 1179-1189.
- 上原誠一郎(2000)粘土の構造と化学組成, 粘土科学, 40, 100-111.