



膨潤性粘土鉱物として、スメクタイトやモンモリロナイトの言葉を聞きますが、どのように違いますか。また、どのように調べますか。



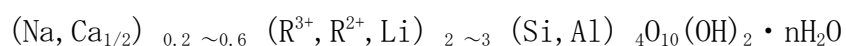
膨潤性の粘土鉱物として、古くはモンモリロナイトの用語が使われていましたが、最近ではモンモリロナイトを含む鉱物の族名であるスメクタイトという名前を使うことが一般的です。スメクタイト族の代表鉱物がモンモリロナイトです。

スメクタイトは一般的にX線回折（分析）でその有無を調べます。

モンモリロナイトは膨潤性のある粘土鉱物の代表として、土木地質の分野で古くから知られていますが、鉱物学的には含水層状鉱物であるスメクタイト族の1鉱物名です。スメクタイト族は、構造や化学組成から大きくは6つの鉱物の総称で、その特定には厳密な分析が必要なため、近年では膨潤性のある粘土鉱物として、属名であるスメクタイトという名称で記載することが一般的となりました。

（１）スメクタイト族の主な種類

スメクタイトは下式¹⁾で表される化学組成の層状ケイ酸塩鉱物で、種名として6種類の鉱物名が付与されています（表-1）。



注：R³⁺はAl、Fe³⁺、R²⁺はMg、Fe²⁺を主体とする

スメクタイトは弱い層電荷をもった鉱物で、水分子と交換性陽イオン（上式のNaとCaの項）をもっています。スメクタイトの天然の産出としては、表-1のうちの2八面体型のモンモリロナイトーバイデライト系列のものが大部分を占めます¹⁾。

表-1 スメクタイト族の主な種類¹⁾

鉱物名	英名	理想式*
2八面体型		
モンモリロナイト	montmorillonite	$\text{W}_{0.33}(\text{Al}_{1.67}\text{Mg}_{0.33})\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
バイデライト	beidellite	$\text{W}_{0.33}\text{Al}_2(\text{Si}_{3.67}\text{Al}_{0.33})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
ノントロナイト	nontronite	$\text{W}_{0.33}\text{Fe}_2^{3+}(\text{Si}_{3.67}\text{Al}_{0.33})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
3八面体型		
サポナイト	saponite	$\text{W}_{0.33}\text{Mg}_3(\text{Si}_{3.67}\text{Al}_{0.33})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
ヘクトライト	hectorite	$\text{W}_{0.33}(\text{Mg}_{2.67}\text{Li}_{0.33})\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
スチーブンサイト	stevensite	$\text{W}_{0.16}\text{Mg}_{2.92}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

*Wは層間陽イオン（1価とみなす）を表し、層間水は省略されている。

(2) スメクタイトの結晶構造

鬼形 (2007)³⁾ によれば、スメクタイトは厚みが約 1 nm の薄い板状結晶が積み重なった層状構造を呈し (写真-1)、結晶の横方向の長さは 200 から 300nm 程度とされています。

写真-1 スメクタイトのうちの
モンモリロナイト積層の透過電
子顕微鏡(TEM)写真⁴⁾

注) モンモリロナイトは、無水状態の基本面間隔が 9.7 Å (0.97nm) つまり約 1 ナノメートルのきわめて薄いシートが積み重なった構造をもっています。



(株)ホーゲンホームページより

図-1 はスメクタイトの結晶構造と膨潤機構を模式的に示しています。スメクタイトは結晶層間にマイナスの電荷を帯びており、水と水和した陽イオンが吸着されています³⁾。図-1 に示すように結晶層間に水分子が入り膨潤がおこります。上記の陽イオンは容易に交換が起き、交換性陽イオンと呼ばれ、1 価では Na^+ 、 K^+ 、2 価では Ca^{2+} 、 Mg^{2+} の 4 種類からなります。 Na^+ イオンが主であるスメクタイトを Na 型スメクタイトと言い、水中での膨潤、増粘、分散性が優れています。 Ca^{2+} イオンが主であるスメクタイトは Ca 型スメクタイトと言い、Na 型スメクタイトよりも膨潤、増粘、分散性は劣りますが、吸着性が優れています。

イオン交換は原子価の高いイオンほど、同じ原子価の場合にはイオン半径が大きいほどより選択的に挿入されるとし、挿入の順列は、 $\text{H}^+ > \text{Fe}^{3+} > \text{Al}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ とされています³⁾。

スメクタイトの膨潤は水に触れることでおきますが、切土で言えば、上載荷重が減少することでスメクタイト含有粘土のもつ膨潤圧が上載荷重より相対的に大きくなり、膨潤圧が開放されて膨潤は発生します (例えば、田村ほか、2006⁷⁾ など)。

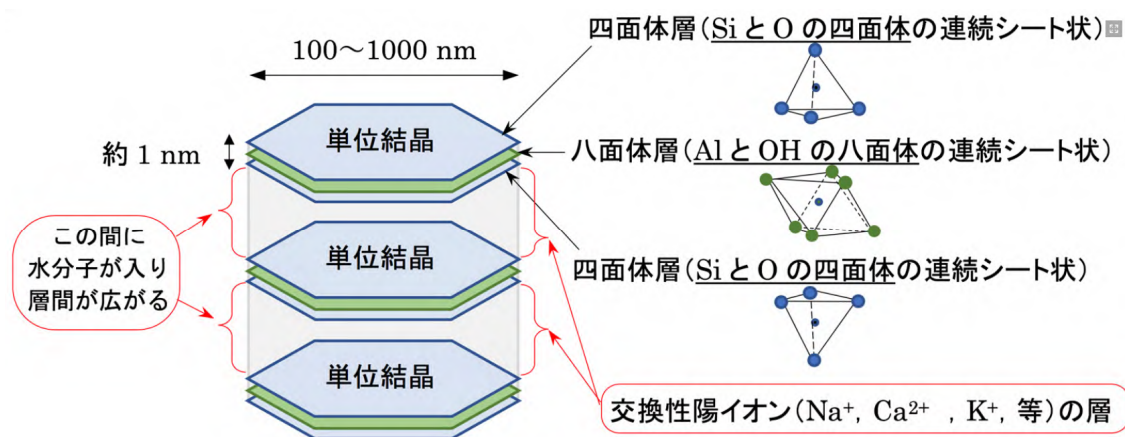


図-1 スメクタイトの結晶構造と膨潤の模式図⁵⁾

(3) スメクタイトの調査、分析の方法

スメクタイトの有無は、一般的にはX線回折（分析）で調べます。Ca型のスメクタイトは15Å付近の(001)面反射が非常に強く現れます。001面反射は湿度や層間陽イオンによって変わり、層間陽イオンがKあるいはNaの場合には12.5Å付近に底面反射が現れます²⁾。

スメクタイトのX線回折パターンは緑泥石やバーミキュライトと似ている点がありますが、高次の反射が弱いため、下記の処理による001面反射の挙動で同定することができます²⁾。

- ・ エチレングリコール処理：d(001)面が15Åから約17Åに膨潤
- ・ Kイオン飽和：d(001)面が12~13Å、バーミキュライトはd(001)面が10~11Åに収縮
- ・ 加熱処理：300~450℃加熱で層間水が脱水し、d(001)面が9.5~10Åに収縮
- ・

また、X線回折以外のスメクタイトの検出方法として、

- 1) パラアミノフェノールによるスメクタイトの呈色反応：須藤（1979）⁷⁾、鈴木（1986）⁸⁾
- 2) メチレンブルーによる呈色反応：粘土ハンドブック編集委員会（1967）⁹⁾、日本ベントナイト工業会（1977）¹⁰⁾
- 3) 赤外線スペクトロメーターを用いた現場判定：紙本ほか（2005）¹¹⁾、中村ほか（2017）¹²⁾
- 4) スメクタイトの指感による判定：吉村ほか（2001）²⁾

がありますが、工事現場等で適用するには様々な課題があり一般化されていません。以上のように、地盤中のスメクタイト等の膨潤性粘土鉱物の有無を現場で判定する簡易手法の開発は今後の課題です。

(4) スメクタイトの性質と利用

スメクタイトは代表的な粘土鉱物のひとつで常に微粒の粘土として産し、イオン交換性、膨潤性、複合体形成能などの化学的活性が顕著です。スメクタイトはその膨潤特性から不透水層を形成することから、産業廃棄物の最終処分技術における遮水材の1つとしてスメクタイトを主成分とするベントナイトが用いられています。ボーリング調査で孔壁保護等に用いられるベントナイト泥水も同様です。

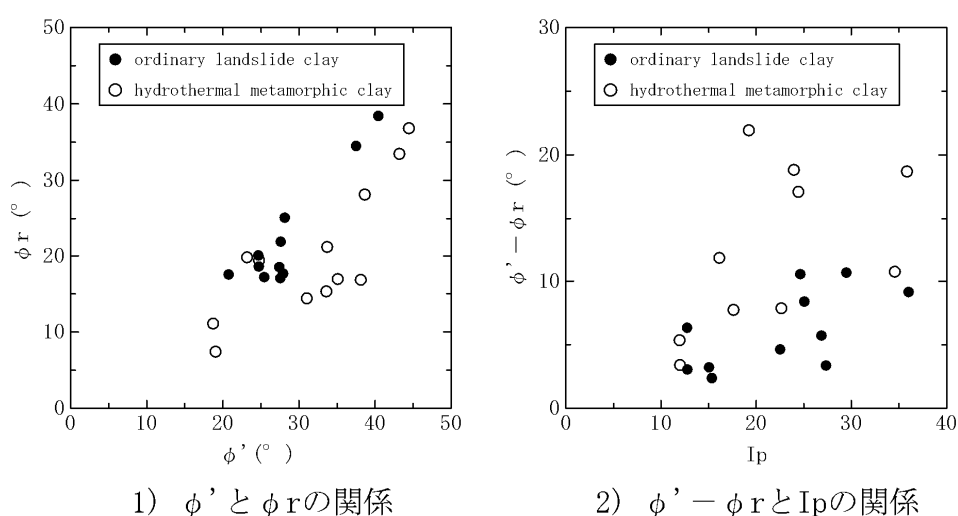
交換性陽イオンとしてNaが主体のNa型スメクタイトは膨潤性が特に顕著で止水性が高いことから、Na型スメクタイトを主体とするベントナイトは高レベル放射性廃棄物の地層処分における多重バリアの1つ（緩衝材）と考えられています。

(5) スメクタイト含有土の土質力学的特性

矢田部(1999)¹³⁾、矢田部(2003)¹⁴⁾は、多数の地すべり粘土についてせん断試験を行い、スメクタイトないしスメクタイト混合層鉱物を含有する粘土のせん断抵抗角のピーク強度

ϕ' と残留強度 ϕ_r との差は 20 度近くと大きく、普通の地すべり粘土のそれが 10 度程度であるのに対して、スメクタイト含有粘土の強度低下がより大きいことを示しています(図-2)。スメクタイト含有粘土は含有しない粘土よりピーク強度がやや小さいとともに、残留強度に示すように強度低下が大きいことは斜面安定等に関して重要な事項です。

また、スメクタイト含有粘土の強度について、スメクタイトの量とともにスメクタイト粒子の配向性の重要さを指摘する研究もあり (Muller-Vonmoos et al、1989¹⁵⁾、宜木、2001¹⁶⁾)、板状鉱物の定向配列は強度に影響を与えると考えられますが十分な研究は進んでいないと思われます。眞弓ほか (2003)¹⁷⁾ は、すべり面と試験時せん断面とを一致させるすべり面せん断試験を用いてスメクタイト含有のすべり面粘土の試験を行い、3~5 度と小さなせん断抵抗角を示すものがあること、すべり面表面がスメクタイトに被覆されていることを示しています。この結果は粘土鉱物の配列も強度に影響することを示唆しています。



ϕ' : 三軸圧縮試験によるせん断抵抗角 (ピーク強度)
 ϕ_r : リングせん断試験によるせん断抵抗角 (残留強度)
 I_p : 塑性指数

図-2 せん断抵抗角のピーク強度 ϕ_r と残留強度 ϕ_r の関係 (矢田部、1999)¹³⁾

【引用文献】

- 1) 白水晴雄 (1989) : 粘土鉱物学—粘土科学の基礎—, 朝倉書店, pp. 185.
- 2) 吉村尚久編著 (2001) : 粘土鉱物と変質作用. 地学団体研究会, pp. 293.
- 3) 鬼形正伸 (2007) : ベントナイトの特性とその応用, 粘土基礎講座 I, 粘土科学, vol. 46, no. 2, pp. 131-138.
- 4) 株式会社ホージュン (2021.01 閲覧) : モンモリロナイトの形態,
<https://www.hojun.co.jp/bentonite/>
- 5) 一般財団法人建設業技術者センター、建設技術者のためのコミュニティサイト CONCOM (202.01 閲覧) : 膨潤性粘土鉱物スメクタイトによるトラブルについて～モンモリロナイトは厄介者、でもベントナイトは役に立つ～
- 6) 田村栄治ほか (2007) : 結晶片岩中のスメクタイト含有破砕帯の膨潤特性と隆起メカニズ

- ム, 応用地質, vol. 48, No. 2, p. 80-89.
- 7) 須藤敏男 (1979) : 粘土鉱物学, 岩波書店, p. 277.
 - 8) 鈴木哲也 (1986) : パラフェニレンジアミンによる変質安山岩の分類について. 土木試験所月報, No. 395, 17-21.
 - 9) 粘土ハンドブック編集委員会 (1967) : 4.2 泥水中の含有ベントナイト量 (MBC 値) の試験方法、粘土ハンドブック、pp. 587-588.
 - 10) 日本ベントナイト工業会 (1977) : ベントナイト (粉状) のメチレンブルー吸着量 測定方法 (JBAS107:91) .
 - 11) 紙本泰樹・長谷川修一・山中 稔・藤川真治・重本直也 (2005) : スメクタイトの現場判定を目的とした予備実験、地盤災害・地盤環境問題論文集、愛媛大学防災情報研究会・地盤工学会四国支部、p. 85-94.
 - 12) 中村研治・門 泰之・石丸卓哉・村上龍介 (2017) : 大分県くじゅう地熱地域のスペクトロメーターによる変質鉱物分析、資源地質, 67(2), 87 ~ 101
 - 13) 矢田部龍一 (1999) : 四国の地すべり粘性土の強度特性, 地盤工学会四国支部 40 周年記念論文, 四国の地すべり, pp. 115-134
 - 14) 矢田部龍一 (2003) : 鉱物から見た地すべり地のすべり層粘土の強度特性, 地盤工学会四国支部, 地盤災害・地盤環境問題論文集, p. 7-27.
 - 15) Muller-Vonmoos, M. and Loken, T. (1989) : The shearing behavior of clays, Applied Clay Science, 4, pp125-141
 - 16) 宜木 清一 (2001) : 残留強度と斜面危険度評価, 地すべり学会関西支部シンポジウム “地すべり・斜面崩壊の予知予測” 論文集, pp115-123
 - 17) 眞弓孝之・柴崎達也・山崎孝成 (2003) : すべり面せん断試験によるすべり面のせん断強度評価、地すべり、Vol. 40, no. 4, p. 15-24.

(回答者 田村 栄治)