

断層や地すべり地に介在するスメクタイト粘土の電気物性

高倉伸一
(地質調査所)

Electrical properties of smectites in faults and land-slip areas

Shinichi Takakura
(Geological Survey of Japan)

1. はじめに

断層や地すべり地には粘土鉱物が存在することが多い。粘土鉱物は含水量の多寡によって、液性の状態から塑性、半固体、固体の状態に変化する。粘土鉱物を含む岩盤や地盤は、一般に含水量が大きくなるとせん断抵抗が小さくなる。とくにスメクタイトのような膨張性粘土は、吸水膨潤により体積が増加し、間隙圧を増大させるため、岩盤崩壊や地すべりなどの地質災害を起こす原因となるので、その分布を求めることが必要とされている。

地表における粘土鉱物の分布は地質調査で把握することができるが、地下深部を対象とする場合には物理探査法が必要となる。電気・電磁気探査法は、岩石・土壌の比抵抗が粘土鉱物の影響を受けやすいことから、地下深部の粘土鉱物の分布を求める有望な手段の一つといえる。

しかし、岩石・土壌の比抵抗は孔隙率や孔隙水の比抵抗などの影響を受け、含有される粘土鉱物の量や種類にも大きく左右される。現状ではそれぞれの影響の大きさが定量的に把握されていないため、電気・電磁気探査の結果から解釈される粘土鉱物の分布には曖昧な点が多いということは否めない。そこで、地質調査所では、粘土鉱物の含有量を調整したサンプルを作成し、他の条件が一定になるようにできるだけコントロールしながらサンプルの比抵抗を測定することにより、粘土鉱物の比抵抗への影響だけを把握することを試みている。

ここでは、断層破碎帯や地すべり面に介在する膨張性粘土であるスメクタイトを対象にして実施した比抵抗測定について概説するとともに、その測定結果を示し、スメクタイトが比抵抗に及ぼす影響について考察する。

2. スメクタイトについて

本章では、日本粘土学会(1987)および白水(1988)に参考に、スメクタイトの特徴と構造について概説する。

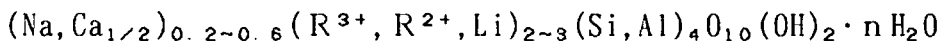
2.1 スメクタイトの特徴

スメクタイトは代表的な膨張性粘土鉱物の一つで、非常に微粒で、表面積が大きい。スメクタイトはイオン交換性や膨潤性など化学的活性が顕著であることから、工業的に重要な粘土であり、その用途はボーリング用泥水、土壌改良剤、吸着剤、触媒など多岐にわたる。この鉱物は一般には低温の中性もしくはアルカリ性の環境下で生成される。自然界では風化、熱水あるいは続成作用下で多量に生成されるので、軟弱な地

盤や岩盤、金属・地熱・石油鉱床に伴って存在することが多い。そのため、スメクタイトは各種探査の指標となる。

2.2 スメクタイトの構造

スメクタイトは化学組成で、



〈 R^{3+} は Al^{3+} と Fe^{3+} 、 R^{2+} は Mg^{2+} と Fe^{2+} を主とする〉

と表される。スメクタイトの構造は第1図に示すように、2枚の四面体シートと八面体シートが連結する2:1型の層状珪酸塩鉱物である。化学組成で示されている $(\text{Na}, \text{Ca}_{1/2})_{0.2 \sim 0.6}$ および $n \text{H}_2\text{O}$ は、第1図に示すようにスメクタイト鉱物自体を構成するものではなく、その層間に吸着して存在する。一般に前者を層間陽イオン（または交換性陽イオン）、後者を層間水と呼ぶ。スメクタイトは構造的に負電荷が過剰であり、これは外圍条件の影響を受けず一定である。そのため、イオン溶液と接すると、その電氣的不安定を中和するために Na^+ や Ca^{2+} などの陽イオンがスメクタイトの表面に吸着する。これを模式的に示すと第2図のようになり、スメクタイト表面の過剰な負電荷とそれに引き寄せられる陽イオンによりイオン濃度が高くなっている領域を電気二重層と呼ぶ。また、層間水が吸着するのは、水分子は全体としては中性だが、極性があるため、スメクタイトの表面の酸素イオンと水素結合をして水和層を形成するからである。この層間に結合している交換性陽イオンや層間水が、スメクタイトが示すイオン交換性や膨潤性などの原因になっており、また電氣的物性を支配していると考えられる。

3. スメクタイトの比抵抗の測定

3.1 測定試料

本研究で比抵抗の測定を実施したスメクタイトは、クニミネ工業から提供された5種類のベントナイト(KN-1、川崎原鉱、川崎酸白、クニボンド、クニピア)である。各粘土鉱物の代表物性値を第1表に示す。クニピアとKN-1はNaスメクタイト、川崎原鉱はNa・Ca混合スメクタイト、川崎酸白とクニボンドはCaスメクタイトに分類される。ここで膨潤度は自由に膨潤させた場合の吸水量を乾燥重量で除した値である。液性限界、塑性限界および塑性指数は日本工業規格に準拠して求めた。比表面積はBET多点法によって求めた。粘土の力学的性質に関係のある膨潤度および塑性指数は川崎酸白<クニボンド<川崎原鉱<KN-1<クニピアの順に大きくなり、その順に膨張性が大きくなるのがわかる。スメクタイトの膨張性は層間に含まれる交換性陽イオンに左右されており、 Na^+ イオンが多く含まれるほど膨張性が高いことが知られている(白水, 1988)。

3.2 測定機器

測定機器には米国Zonge社のGDP-16とLDT-10および自作のサンプルホルダーを用いた。サンプルホルダーに試料を入れ、LDT-10より振幅が0.1mA程度の周波数1024Hzの矩形波を流し、GDP-16で電流値および電位差を計測した。サンプルホルダーの概略を第3図に示す。このホルダーは本体電極部、コック電極部、ピストン電極部から構成され、全体では注射器の形状をなす。本体電極部は内径40mm、長さ100mmの円柱管で、その内側には50mm離して2本の溝が切っており、電位電極となる直径0.7mmの白金線が埋め込まれている。コック電極部はその上部が本体電極部と密着連結ができるよう

になっており、中ほどに電流電極となる直径約39mmの白金網が取り付けられ、下部より水が排出できるようになっている。ピストン電極部のピストンの外径は39mmで、その先端に電流電極となる直径約39mmの白金網が張り付けられている。なお、ピストンの外径が本体電極部の内径より1mm小さいのは、その差がそれ以下になると、測定時に本体電極部の中でピストンを動かすのが難しくなるからである。また、水が抜けやすいようにピストンには多数の小さな穴が開いている。本体電極部およびコック電極部には、圧力による変形、電解質による腐食、および温度による膨張が少ない強化ガラスを用いている。また、ピストン電極部の材質は強度の強いアクリルである。測定では本体電極部とコック電極部を連結し、その中に試料を入れて、上からピストン電極部で試料を押さえながら、試料の両端から電流を流し、電位電極間に生じる電位差を計測し、4端子法により比抵抗を求める。すなわち、電流値を I 、測定電位差を ΔV とすると、試料の比抵抗 R_0 は、

$$R_0 = 0.0251 \cdot \Delta V / I$$

となる。なお、上式により正確な比抵抗を求めるためには、電位電極間では電流が試料の軸方向に平行となる必要がある。ピストンの直径が本体電極部の内径より小さいことから、ピストンが多少傾くことがあるので、ピストン電極部の電流電極と本体電極部の電位電極とが近づき過ぎると、上記の条件が満たされなくなる危険性がある。これを回避するために、第3図には示していないが、実際の測定では本体電極部と同じ大きさの円柱管を用意し、本体電極部の上に連結する。

このサンプルホルダーに0.001、0.01、0.1、1、3.3Nの塩化カリウム(KCl)溶液を入れ、ピストン電極の位置や傾きを変えながら比抵抗を測定したが、いずれの測定値も標準値との差は2%以内であった。したがって、実用上の精度は十分といえる。

3.3 測定方法

上記のスメクタイトの比抵抗への影響を検討するため、粘土を直径約1mmのビーズ300gとイオン溶液200gに混合させた人工試料を作成し、粘土の含有比による比抵抗の変化を測定した。ここで、イオン溶液には濃度が0.1、0.01、0.001mol/lの塩化カリウム(KCl)の溶液を用いた。測定では、まずガラスビーズとイオン溶液だけの試料を作成し、サンプルホルダーに入れてその比抵抗を計測した。このときのガラスビーズが作る間隙率は37%(±1%)である。次にその試料をサンプルホルダーから出し、乾燥させた粘土鉱物を加えて十分に攪拌して均一に混合させた後、ガラスビーズどうしが十分に接触するように、圧力をピストン電極に加えながら試料をサンプルホルダーに押し込み、その比抵抗を測定した。測定後は試料をホルダーから出し、粘土を追加するごとに同じ作業を繰り返して比抵抗を測定した。粘土は3, 3, 3, 3, 3, 3, 6, 6, 6, 9, 15gずつ加えた。なお、ガラスビーズの間に入った粘土が膨潤し、ガラスビーズどうしの接触が離れ、つまり当初の間隙が維持できなくなったら、その時点で測定を中止した。

本実験で測定される比抵抗は、間隙水(間隙中の溶液)の領域をスメクタイト粘土自体および層間水の領域に置換した場合の測定値である。これを模式的に表したのが第4図である。粘土鉱物および層間水の領域がもとの間隙の領域を超えたときに測定を中止するため、測定サンプルはほぼ水に飽和した状態にある。非飽和の状態も測定する方が望ましいが、含水状態によって膨潤の程度が大きく異なり、また非飽和ではなかなか水と粘土が均質に混ざらないため、実験では上述のような方法をとった。

3.4 測定結果

濃度が0.001、0.01、0.1mol/lのKCl溶液を用いた場合の測定結果を第5図、第6図、第7図に示す。ここで、グラフの横軸は粘土の重量をガラスビーズの重量に対する含有比である。本測定により把握された粘土の比抵抗への影響の特徴は以下の通りである。

- (1)スメクタイトの含有量が多いほど比抵抗は低くなる。
- (2)溶液のイオン濃度が低い方が、スメクタイト含有量による比抵抗の変化が大きい。
- (3)比抵抗を下げる効果は、川崎酸白<川崎原鈇<クニボンド<KN-1<クニピアの順に大きくなる。

4. 考察

4.1 スメクタイトの含有量と比抵抗の関係

溶液の濃度が高い場合を除いて、スメクタイトの量が増えると比抵抗は下がる。これは、スメクタイトの含有量が増えるにつれて、イオン濃度の高い電気二重層の領域が増えるからと考えることができる。

4.2 溶液のイオン濃度による比抵抗の変化

溶液の濃度が低い場合には比抵抗の変化が大きく、溶液の濃度が高くなるほど比抵抗の変化が小さくなる。そして、溶液の濃度が0.1mol/lの場合には、いずれのスメクタイトにおいても、含有量の増加に伴い比抵抗は増加する。この原因として、次のように考えることができる。

溶液の濃度が高くなるとイオン密度が上昇するため、イオン間に働く斥力により電気二重層は薄くなる。また、溶液のイオン濃度はもともと高いため、電気二重層内のイオン濃度との差は小さい。そのため、スメクタイトを混合しても溶液全体のイオン濃度はほとんど増加しない。逆にスメクタイト自体は絶縁体であるため、スメクタイトを混合すると電流の流れる領域の割合が減少する。以上の効果により、溶液の濃度の増加に伴い、比抵抗の低下の抑制や比抵抗の上昇が起こると考えることができる。

4.3 スメクタイトの種類と比抵抗の関係

試料の比抵抗を下げる効果は、Naスメクタイトが大きい。これは、 Na^+ と Ca^{2+} を比較した場合、 Na^+ の方が原子価が小さく、イオン半径が小さいので、 Na^+ を交換性陽イオンに持つスメクタイトの方が水を吸着しやすく、電気二重層は厚くなるからである。また、電気二重層が厚くなるほどその中に拘束される水の量が増えるため、膨潤力も大きくなる傾向がある。実際、川崎原鈇とクニボンドの順番が異なるものの、比抵抗を下げる効果の大きさと膨潤度および塑性指数の大きさととは整合的である。川崎原鈇とクニボンドの順番が異なる一因として、クニボンドの陽イオン交換容量（CEC）が川崎原鈇のそれより大きいことがあげられる。このように力学的性質とは関係の小さい要因も比抵抗を左右するので、比抵抗から力学的性質を定量的に評価するには注意が必要と考えるが、電気・電磁気探査の示す比抵抗構造はスメクタイトの存在やその力学的性質を評価できるという可能性を示唆するものとする。

5. おわりに

本研究では、種類の異なる5つのスメクタイト粘土鈇物を対象に、それらの含有量による比抵抗への影響を考察した。また、膨潤度と塑性指数との関連性を検討し、比

抵抗から力学的性質の評価が可能であることを示した。今後はせん断強度など直接的な力学的物理量を測定し、比抵抗との関係を考察していきたい。

謝辞

クニミネ工業(株)の伊藤雅和氏には、実験に用いるスメクタイト粘土およびその物性値を提供して頂いた。(株)ダイヤコンサルタントには液性限界および塑性限界の測定をして頂いた。また、(株)セイシン企業には比表面積の測定をして頂いた。比抵抗の測定では、筑波大学(現、(株)興和)の小酒欽弥氏に協力して頂いた。ここに厚く謝意を表します。

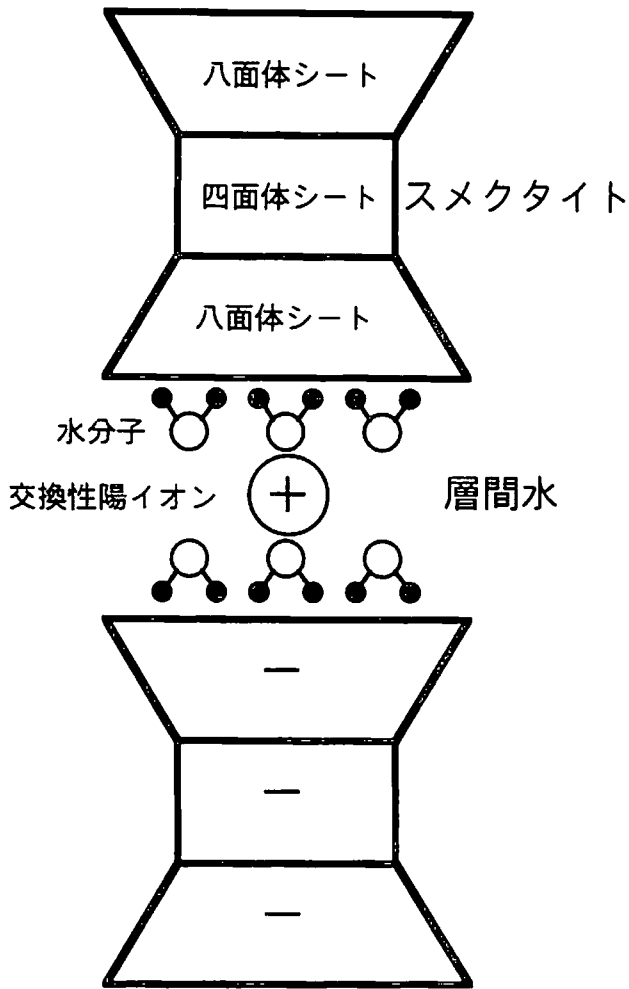
参考文献

日本粘土学会編(1987): 粘土ハンドブック(第二版), 技報堂出版, 1354p.
 白水晴雄(1988): 粘土鉱物学 -粘土科学の基礎-, 朝倉出版, 185p.

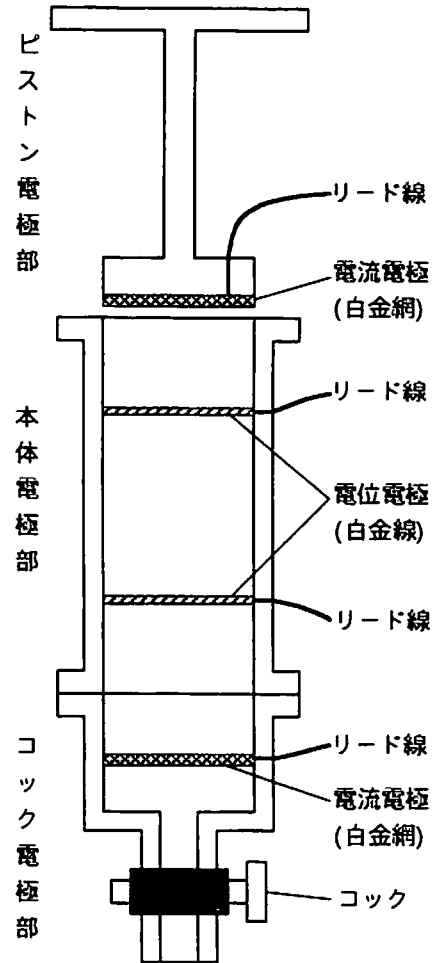
第1表 各スメクタイトの代表物性値

	KN-1	川崎原鈹	川崎酸白	クニボンド	クニピア
膨潤度(ml/2g)	20	11	6	7	65
液性限界(%)	412.5	277.0	141.0	205.6	846.1
塑性限界(%)	30.4	44.0	45.3	46.0	37.0
塑性指数	382.1	233.0	95.7	159.6	809.1
外比表面積(m ² /g)	34.2	65.8	72.4	80.4	22.1
総比表面積(m ² /g)	423.3	417.7	393.7	431.0	577.2
pH	10.3	10.2	9.4	9.5	10.0
CEC*(meq/100g)	85.6	79.6	75.4	86.5	115.0
化学組成(%)					
SiO ₂	65.20	70.90	72.20	70.90	61.30
Al ₂ O ₃	16.90	13.50	12.80	14.90	21.90
Fe ₂ O ₃	2.16	1.95	1.77	1.61	2.21
MgO	3.45	4.09	3.72	3.85	3.43
CaO	1.84	1.35	1.56	2.15	0.46
Na ₂ O	2.94	1.20	0.29	0.37	4.06
Ig-loss	5.87	6.16	6.34	5.08	6.24
Total	98.36	99.15	98.68	98.96	99.60
主な交換性陽イオン	Na ⁺	Na ⁺ , Ca ²⁺	Ca ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺

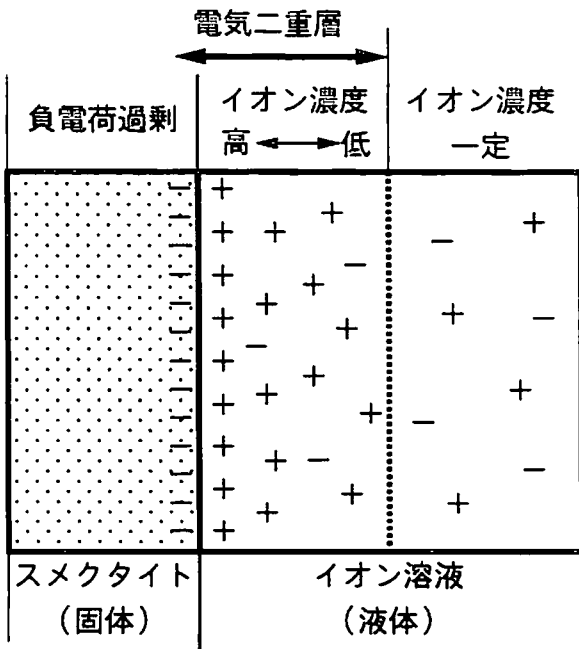
* 陽イオン交換容量



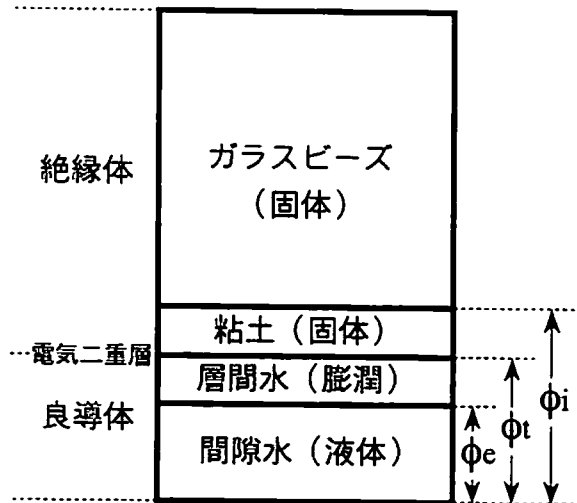
第1図 スメクタイトの構造模式図



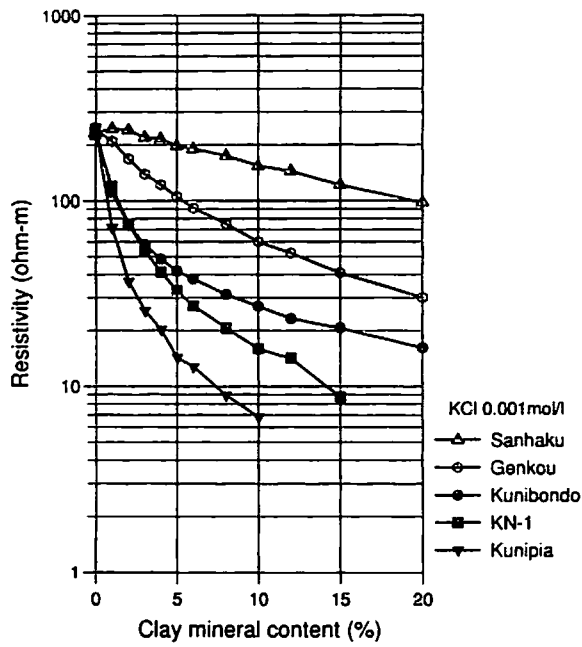
第3図 サンプルホルダーの概略



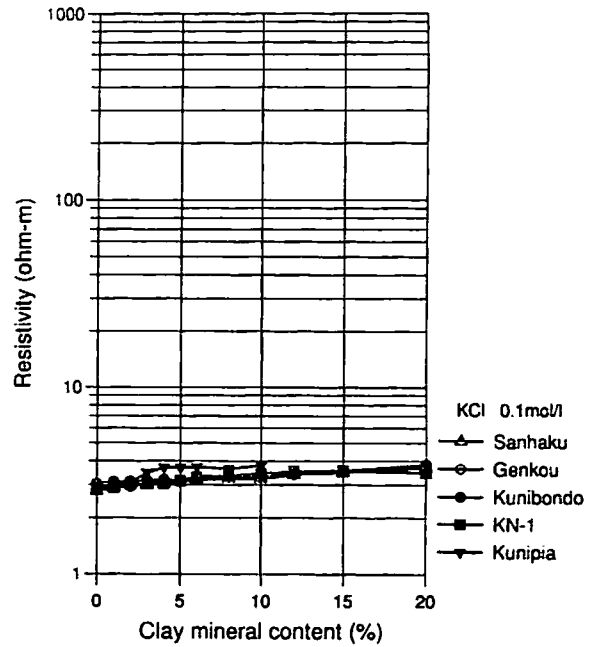
第2図 電気二重層の模式図



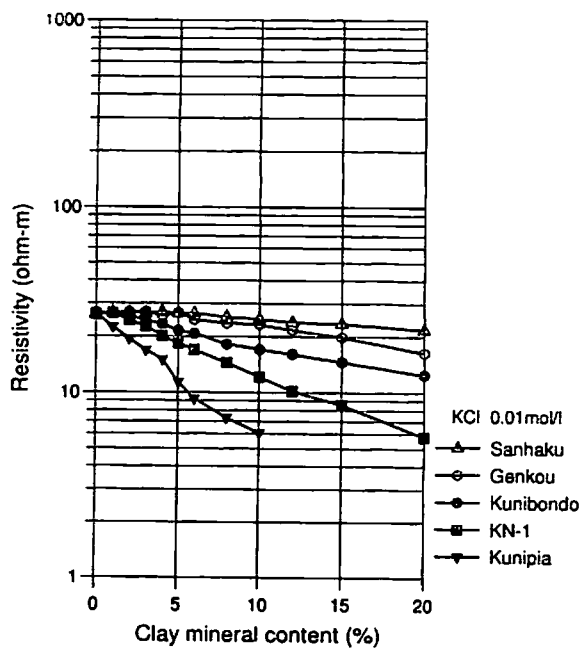
第4図 サンプル中のガラスビーズと溶液と粘土の関係図。
 ϕ_i :初期の間隙率、 ϕ_t :全間隙率、 ϕ_e :有効間隙率。



第5図 スメクタイトの種類と比抵抗の関係。溶液は0.001mol/lのKCl溶液である。



第7図 スメクタイトの種類と比抵抗の関係。溶液は0.1mol/lのKCl溶液である。



第6図 スメクタイトの種類と比抵抗の関係。溶液は0.01mol/lのKCl溶液である。