

岩盤中の弱層を構成する粘土の鉱物化学的性質

脇坂安彦* 小原雅人** 原田政寿*** 高橋 努****
田中政司***** 古市久士***** 大神昭徳*****

1. はじめに

岩盤中には粘土を挟在する種々の弱層が存在する。弱層の分布形態や性状はその種類によって異なっている。これらの弱層は分布位置および連続性、強度定数や透水性などの地質性状によっては、ダム建設上問題となるものである。したがって、ダムの地質調査においては、出来るだけ早い段階で弱層に関する地質情報を得ておく必要がある。しかし、ボーリング調査が主体となっている地質調査の初期段階では、弱層の種類を特定することが困難な場合があるために、分布形態もわからないことがある。したがって、ボーリングコア程度の試料で弱層の種類が判断できる手法の開発が望まれていた。そこで、筆者らは弱層を構成する粘土の性質に弱層の種類毎の特徴があるのではないかと考え、弱層の化学的、鉱物学的性質を調べてみた。その結果、弱層を構成する粘土にはそれぞれを識別する指標となりうる特徴があることがわかった。

2. 弱層の種類と産状

粘土を挟在する弱層には、風化帯、熱水変質帯、断層、地すべりのすべり面、流入粘土がある。それぞれの特徴は次の通りである。

- 1) 風化帯：風化作用によって形成された弱層である。地表面からの物理的、化学的作用によって形成されるので、地表面に近いほど風化の程度は高い。岩盤全体が風化している場合と亀裂沿いに風化している場合とがある。亀裂沿いに風化している場合は亀裂面付近の風化の程度が最も高く、亀裂から離れるにしたがって程度は低くなる。
- 2) 熱水変質帯：岩盤中の亀裂などを熱水溶液が流動することによって形成される。熱水溶液や作用を受ける岩石の化学組成などによって生成する鉱物の種類が異なる。岩盤全体が変質作用を受けている場合と、熱水溶液の通り道となった亀裂周辺のみが変質している場合とがある。風化と異なり地表面からの距離と変質の程度には因果関係はない。分布は不規則である。

- 3) 断層：地殻応力下で岩盤が変位するときに形成される。したがって、断層の両側の岩盤には食い違いが認められる。せん断変位で形成された場合には周辺の岩盤は破砕されている。変位の方向に応じて条線が認められる。平面的な連続性がよい。
- 4) 地すべりのすべり面：地すべりの滑動によって形成される。断層、熱水変質帯、不整合、層理、節理などの元々の岩盤中の不連続面が起源になっていることがある。連続した曲面状を呈す。
- 5) 流入粘土：流入粘土とは1965年に緒方によって命名されたもので¹⁾、成因は不詳である。亀裂中を充填するように存在する。亀裂面には風化、熱水変質が認められないことがほとんどである。粘土を挟んだ亀裂面は元は一体の岩盤であったことが示唆される場合が多い。

以上の弱層に挟在される粘土をそれぞれ風化粘土、熱水変質粘土、断層粘土、地すべり粘土、流入粘土と呼ぶことにする。これらの粘土の主成分である粘土鉱物を生成する作用は、基本的には風化作用、熱水変質作用である。風化粘土、熱水変質粘土がそれぞれの作用で生成されていることは自明のことであるが、これら以外の粘土もそれぞれの作用単独か、あるいはこれらの作用の複合で生成されているものである。

3. 実験方法

3.1 試料の収集および調製

実験に供した弱層を構成する粘土試料は全国76箇所の直轄ダムおよび補助ダムの現場から採取した。採取した粘土の試料数は、風化粘土：22、熱水変質粘土：33、断層粘土：165、地すべり粘土：44、流入粘土65、計329である。断層粘土は活断層とそれ以外に区分し、さらに活断層以外の粘土については、明らかに風化しているもの、熱水変質しているもの、両者以外のもの(新鮮と表記)に区分した。収集した粘土試料には採取時に周囲の岩石(壁岩と呼ぶ)が混入している。そこで、混入した壁岩と粘土を分離するために、粘土試料を蒸留水で溶いたものを22 μm のふるいに通し、22 μm 以下の部分を以降の実験に供す粘土試料とした。また、壁岩のみの試料も採取した。

Mineralogical and Chemical Properties of Clays as Constituents of Weak Zones in Rock Masses

3.2 実験項目選定の考え方

弱層の種類を識別する粘土の特徴を知ることが目的であるので、あらかじめ識別するのに有効と考えられる指標の検討を行った。

1) 感覚的な指標

野外で挟在される粘土から弱層の種類を識別する際には、まず、粘土の色が着目されている。そこで、色彩を実験項目として選定した。

2) 粘土の生成作用を識別する指標

弱層中の粘土の生成作用のうち、風化作用は基本的には酸化作用であるので、風化作用と熱水変質作用を識別する項目として鉄の2価、3価の比および色を選定した。また、風化作用、熱水変質作用のそれぞれに独自の鉱物が生成されることがあるので鉱物組成も選定した。さらに両作用とも化学組成の変化を伴うので化学組成を選定した。

3) 弱層の形成時の応力を識別する指標

弱層のうち断層は他に比べ大きな応力下で形成されている。そこでこの形成時の応力の違いを見るために石英の結晶度指数を選定した。鉱物の結晶度は応力履歴を保存していることがあるからである。

3.3 実験方法

1) 色彩

色彩は土色計 (Minolta SPAD-503) を使用して測定した。測定結果は図-1 のように L^* 、 a^* 、 b^* 色空間で表示される。 L^* は色の明度、 a^* 、 b^* は色度 (色相と彩度) を表す。また、 a^* 、 b^* から彩度 C^* を次式により算出した。

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (1)$$

測定に当たっては、粘土試料を湿潤状態とした。

2) 鉄の2価、3価

鉄の2価、3価の化学分析は後藤²⁾に従って湿式法にて行った。

3) 鉱物組成

鉱物組成は不定方位試料と定方位試料を作製し、X線回折により求めた (JEOL JDX 3530 を使用)。定方位試料については未処理、エチレングリコール処理、グリセロール処理を行って粘土鉱物の同定を行った。

4) 化学組成

化学組成は粉末試料を用いて、蛍光X線分析により求めた (JEOL JSX-3200 を使用)。

5) 石英の結晶度指数

石英の結晶度指数は、Murata & Norman の方法³⁾に従って五重線の重なり具合から求めた。

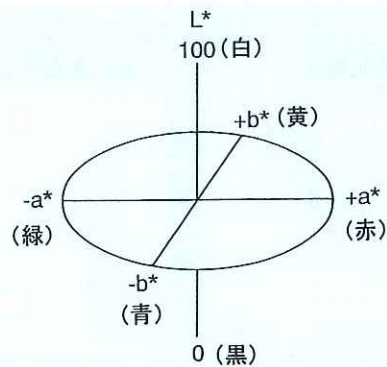


図-1 L^* a^* b^* 色空間による色彩の表示

4. 実験結果

4.1 色彩

図-2 は弱層の種類毎に粘土の色彩のうち、 a^* と b^* との関係を示したものである。図のように風化粘土の a^* は 10 以上、 b^* は 20 以上のようにともに大きな値を示し、他方、熱水変質粘土では a^* は 10 以下、 b^* は 20 以下のようにともに小さな値を示している。このように a^* 、 b^* によって風化作用と熱水変質作用で形成される粘土は識別が可能である。流入粘土の a^* 、 b^* は風化粘土と同様の領域に分布している。地すべり粘土と断層粘土の a^* 、 b^* は風化粘土と熱水変質粘土の双方を合わせた領域の値を示している。

図-3 は C^* と L^* との関係を示したものである。図中に示したように熱水変質粘土、流入粘土、断層粘土の中には、それぞれ他種類の粘土と共存しない領域に分布しているものがある。

4.2 鉄の2価、3価

図-4 は粘土の Fe_2O_3 (3 価の鉄) と FeO (2 価の鉄) との関係を示したものである。流入粘土では Fe_2O_3 の含有量が FeO に比べてかなり高く、断層粘土では逆に FeO が Fe_2O_3 よりも高いものが多い。

4.3 鉱物組成

粘土の主な構成鉱物は粘土鉱物である。弱層中の粘土鉱物を生成する作用には既述のように風化作用、熱水変質作用がある。そこで、弱層中に挟在されている粘土を構成する粘土鉱物を成因毎に分類し、整理してみた (表-1)。続成作用は弱層を構成する粘土の成因とは考えられないが、壁岩起源の鉱物の混入が考えられることから、表には加えた。粘土を構成する粘土鉱物をみると、当然のことながら、風化粘土には熱水変質作用、続成作用のみで生成される粘土鉱物は含まれておらず、

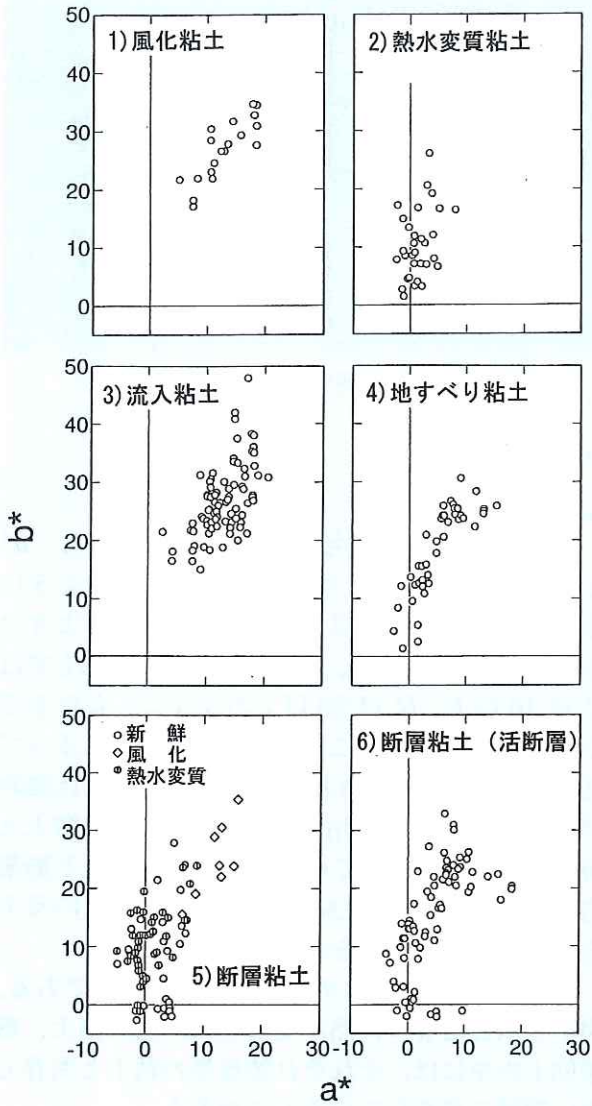


図-2 a* と b* で表した粘土の色彩

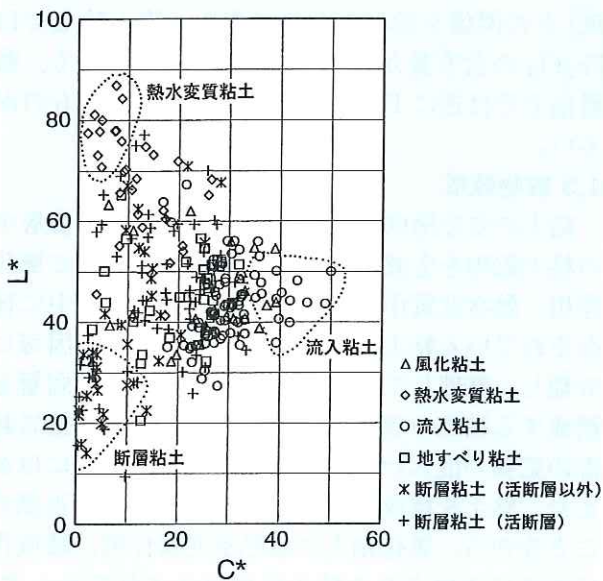


図-3 C* と L* で表した粘土の色彩

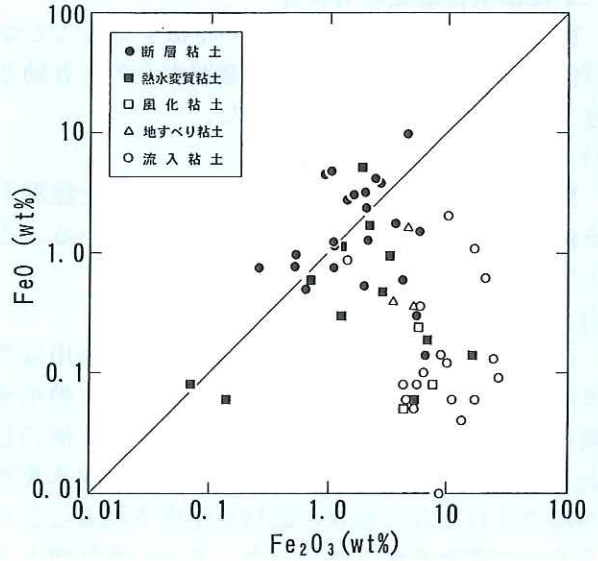


図-4 粘土の Fe₂O₃ と FeO との関係

風化作用のみで生成される鉱物が含まれている。同様に、熱水変質粘土には風化作用のみで生成される粘土鉱物は含まれておらず、熱水変質作用のみで生成される鉱物が含まれている。流入粘土には風化作用のみで生成される粘土鉱物が含まれていることが特徴である。地すべり粘土、断層粘土にはいずれの作用でも生成される粘土が含まれており、他との識別に指標となる粘土鉱物は含まれていない。

図-5 は壁岩起源と思われる粘土中の石英含有量を各粘土の壁岩中の石英含有量と比較したものである。風化作用や熱水変質作用に対して抵抗力がある石英を指標とすることにより、弱層中の粘土が原位置で壁岩から生成されたものか、他からもたらされたものかを判断することが出来ると思われる。すなわち、粘土中の石英含有量が壁岩中と同様な場合には、粘土は壁岩が粘土化して生成されたものであると推測される。他方、粘土中の石英量が壁岩と異なっている場合には、粘土は他からもたらされたか、風化作用や熱水変質作用が著しく進行して生成されたものと考えられる。このような観点で図-5 をみると、熱水変質粘土、地すべり粘土、断層粘土では、粘土中の石英含有量は壁岩と同じものからかなり低いものまでがあり、各粘土は壁岩から生成されたものから、他からもたらされたものか、風化・熱水変質作用が著しく進行して生成されたものまでである。他方、流入粘土中の石英含有量は壁岩に比べ低いものが多く、原位置で壁岩から生成されたものとは思われない。

4.4 石英の結晶度指数

図-6 は粘土中の石英の結晶度指数を壁岩中の

表-1 粘土を構成する粘土鉱物の組み合わせ

粘土化作用	風化				風化・熱水変質・続成					風・熱		続・熱		熱水変質		
	Hy	Gb	Ge	Lp	Sm	Mx	I1/S	S/C	I1-Sr	Ka	Ch	Lm	Py	Gy	T1	C1
風化粘土	○				△				○		△					
熱水変質粘土					◎		◎	△	△	△	△	△		○		○
流入粘土	○	△	△	△	◎	○	○	○	○		△					
地すべり粘土					◎	○	○									
断層粘土					◎	○	○		○			△	△		△	

◎：含まれていることが多い、○：含まれていることがある、△：含まれていることがまれである、空欄は含まれていないことを示す。
 Hy：ハロサイト、Gb：ギブサイト、Ge：針鉄鉱、Lp：レピドクロサイト、Sm：スメクタイト、Mx：混合層鉱物、
 I1/S：イライト/スメクタイト混合物、S/C：スメクタイト/緑泥石混合層、I1-Sr：イライト-セリサイト、Ka：カオリナイト、
 Ch：緑泥石、Lm：獨沸石、Py：パイロフィライト、Gy：石膏、T1：滑石、C1：方解石

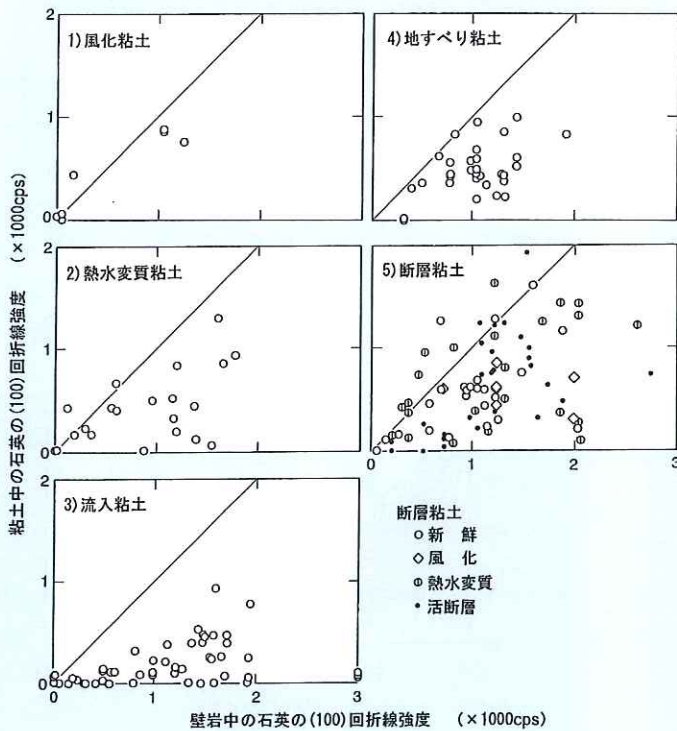


図-5 粘土中と壁岩中の石英量の比較

石英の結晶度指数で除したもの(結晶度指数の比と呼ぶ)の頻度分布を示したものである。石英の結晶度指数は応力を受けて結晶がひずんだ場合と粒径が微細になった場合に低くなる。粘土中の石英は壁岩起源であると考えられるので、結晶度指数を壁岩と比べることにより応力履歴や粒径変化を知ることが出来る。風化粘土と流入粘土では、結晶度指数の比は1に前後のものが多い。断層粘土では結晶度指数の比は1よりも低いものも多く、0.5程度のももある。熱水変質粘土では1よりも低いものもあるが、他の粘土に比べると1よりも高いものがあることが特徴である。

5. 弱層の種類を識別する粘土の特徴

5.1 識別する粘土の全般的な特徴

以上の実験結果のように、各粘土が明瞭に識別

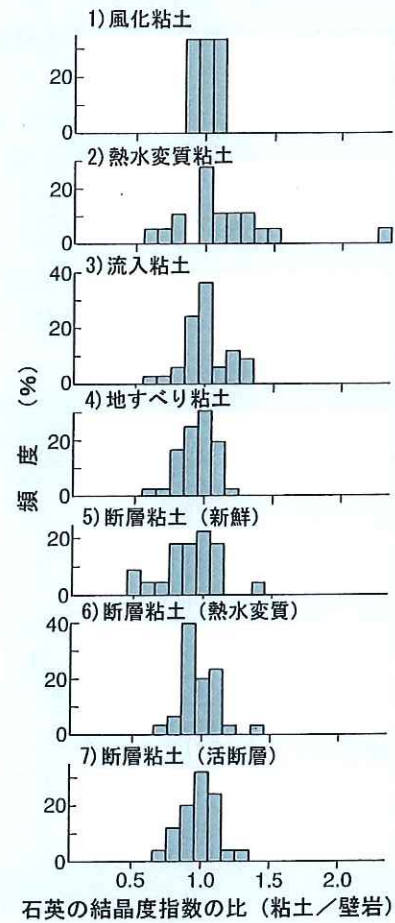


図-6 粘土と壁岩中の石英の結晶度指数の比

できるのは、次の項目を指標とした場合である。

- 1) 色彩の C^* と L^* との関係：熱水変質粘土、断層粘土、流入粘土の一部が識別できる。 L^* が70以上で C^* が10以下のものは熱水変質粘土、 L^* が10~35で C^* が10以下のものは断層粘土、 C^* が35以上のものは流入粘土である。粘土の色彩が粘土のどのような性質を反映したものかについては、後述する。
- 2) Fe_2O_3 と FeO との関係：流入粘土と断層粘土の一部が識別できる。 FeO 含有量が Fe_2O_3 よりも高いものは断層粘土、逆に Fe_2O_3 含有量が FeO

よりも著しく高いものは、流入粘土である。このような特徴が認められるのは、断層粘土では水素やメタンなどの還元性のガスが断層沿いに上昇してくることがあるため⁴⁾、流入粘土では強度の風化作用を受けているためであると考えられる。ただし、流入粘土の高 Fe₂O₃ 含有量には、鉄酸化細菌の関与も示唆される。例えば、田崎⁵⁾ は鉱山廃水中のオレンジ色や褐色の物質は、微生物およびその付着物がマット状に集合した構造物(バイオマット)であり、一部には Fe の濃集が認められることを述べている。

3) 石英の結晶度指数：断層粘土の一部が識別できる。壁岩に対する粘土の石英の結晶度指数比が 0.5 以下の場合には断層粘土である。このように断層粘土中の石英の結晶度指数が壁岩に比べて低いのは、石英結晶が断層運動の影響を受けてひずんでいるか、粒径が細くなったためであると考えられる。相川・青山⁶⁾ は中央構造線に近づくほど差応力が大きくなることから、石英結晶の回折線幅の解析からわかることを報告しており、今回の結果と調和的である。

5.2 同一産地の粘土を識別する特徴

これまでに述べてきた特徴では弱層中に挟在される粘土の一部が識別されるに過ぎない。このように一部の粘土しか識別されないのは、粘土の壁岩が多種にわたっていることが一因であると考えられる。そこで、壁岩の問題を除去するために、同じ壁岩の箇所異なる種類の粘土の特徴を比較してみた。その結果、色彩、石英含有量の壁岩との比を指標とした場合に各粘土が明瞭に識別されることがわかった。図-7 は色彩のうち a* と b* との関係を生産地毎に示したものである。図-2 に比べると明瞭に各粘土が識別されることがわかる。

5.3 粘土の色彩が反映する粘土の性質

これまでにみてきたように各種弱層に挟在される粘土を識別するには、色彩が有効な指標となる。そこで、色彩が粘土のどのような性質を反映しているのかを検討してみた。まず、粘土鉱物の種類との関係を見てみたが、関係は認められなかった。そこで、粘土の化学組成との関係を見てみた。その結果、SiO₂、Al₂O₃、全 Fe₂O₃ 含有量と色彩との間に相関が認められた。

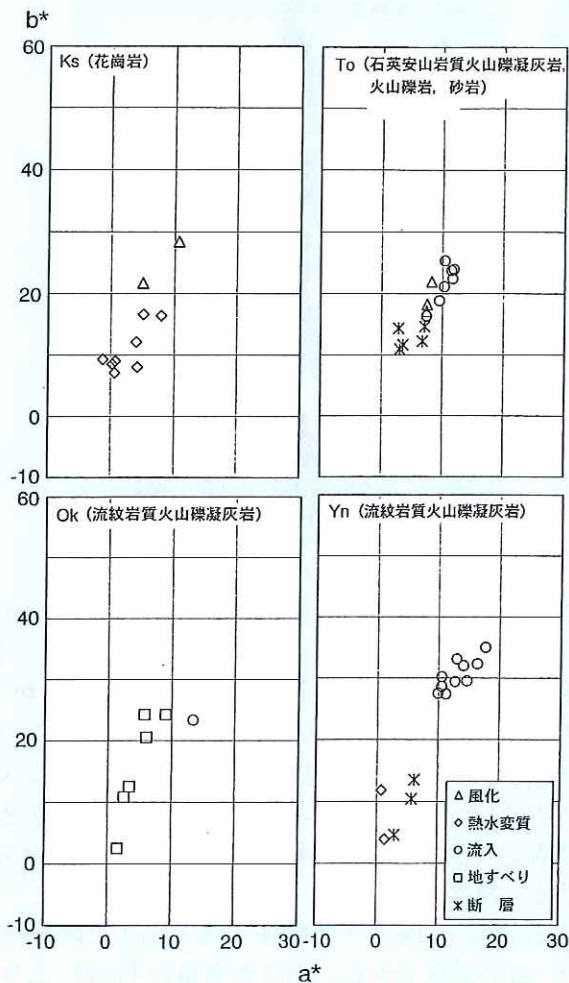


図-7 同一産地での粘土の色彩

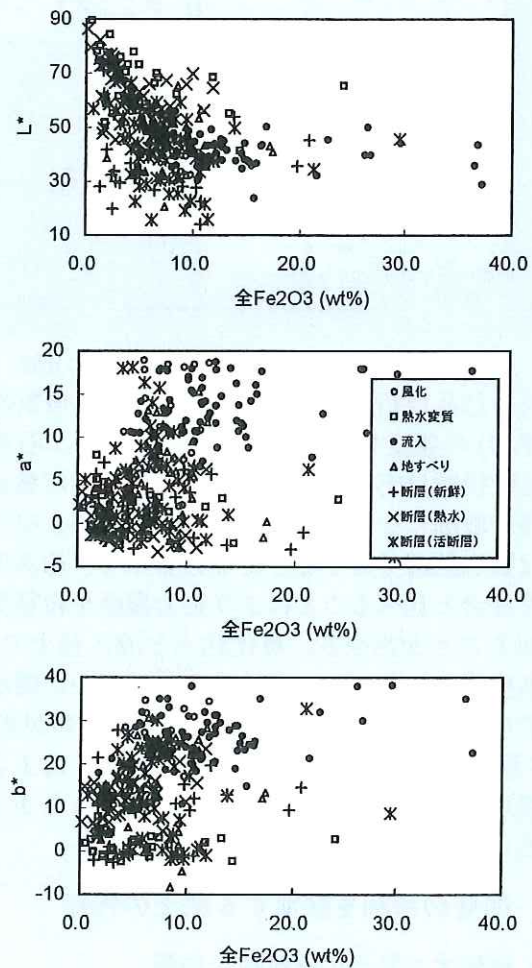


図-8 粘土の全 Fe₂O₃ 含有量と色彩との関係

図-8は全 Fe_2O_3 含有量 (FeO も Fe_2O_3 として合算されている) と色彩との関係を示したものである。 Fe_2O_3 含有量と色彩との間にはばらつきは大きい、 L^* との間には負の相関、 a^* 、 b^* との間にはそれぞれ正の相関が認められる。すでに図-4に示したように、流入粘土や風化粘土では Fe_2O_3 含有量が多く、これらの粘土が風化作用の影響を強く受けていることが推定された。西山・松倉⁷⁾は年代が既知の段丘礫の色彩を計測し、風化継続時間が12万年までには b^* が増加し、風化継続時間がそれ以上になると a^* が増加することを報告している。このように、全 Fe_2O_3 含有量と a^* 、 b^* とがそれぞれ相関しているのは、粘土が風化作用を受けることにより全 Fe_2O_3 が増え、これに伴ってまず b^* 、次いで a^* が増加している現象を表しているものと考えられる。

6. まとめ

岩盤中の弱層の種類をボーリングコア程度の試料で判断するための手法を開発することを目的に、弱層中に挟在されている粘土の分析を行った。その結果、次のような粘土の性質が弱層の種類を判断する指標となることがわかった。

- (1) 色彩の C^* と L^* との関係。熱水変質粘土、断層粘土、流入粘土の一部が識別できる。
- (2) Fe_2O_3 と FeO との関係。流入粘土と断層粘土の一部が識別できる。

- (3) 石英の結晶度指数。断層粘土の一部が識別できる。
- (4) 壁岩の種類が同一の場合には、色彩によって各粘土は識別できる。
- (5) 各粘土を識別するのに有効な指標である色彩は、粘土の化学組成を反映していると考えられる。

参考文献

- 1) 角田隆彦、宮腰勝義、緒方正慶：断層破碎帯内に存在する流入粘土について、日本応用地質学会シンポジウム予稿集, pp.56-59, 1979.
- 2) 後藤隼次：鉄、地球科学的試料の化学分析法 1, 地質調査所化学分析法, No.50, pp.100-104, 1976.
- 3) Murata, K. J. and Norman, II, M. B.: An Index of cryatallinity for quartz, American Jour. Sci., Vol.276, pp.1120-1130, 1976.
- 4) Sugisaki, R., Anno, H., Adachi, M. and Ui, H. : Geochemical features of gases and rocks along active faults, Geochemical Jour., Vol.14, pp.101-112, 1980.
- 5) 田崎和江：微生物がつくる鉱物, 地質ニュース, 489号, pp.17-30, 1995.
- 6) 相川信之、青山俊宏：中央構造線に近接する花崗岩類の変形, 鉱物学雑誌, 第16巻, 特別号第1号, pp.251-255, 1983.
- 7) 西山賢一、松倉公憲：四万十帯砂岩の風化, 色彩および鉱物化学的性質の変化, 地形, 第22巻, 第1号, pp.23-42, 2001.

脇坂安彦*



独立行政法人土木研究所材料地盤研究グループ地質チーム
上席研究員
Yasuhiko WAKIZAKA

小原雅人**



(前) 建設省土木研究所環境部地質研究室交流研究員
Masato OHARA

原田政寿***



(同) 地質研究室交流研究員
Masatoshi HARADA

高橋 努****



(同) 地質研究室交流研究員
Tsutomu TAKAHASHI

田中政司*****



(同) 地質研究室交流研究員
Masashi TANAKA

古市久士*****



(同) 地質研究室交流研究員
Hisashi FURUICHI

大神昭徳*****



(同) 地質研究室交流研究員
Akinori OOGA