■コアの色彩・鉱物・化学的特徴を利用した地すべり評価

—四国御荷鉾帯 田浪地すべりの例—

Landslide evaluation using color, mineralogical and chemical characterization of boring core

—Tanami Landslide in the Mikabu belt of Shikoku—

磯野陽子* Youco ISONO／株式会社エイトコンサルタント Eight Consultants Co., Ltd.

木村隆行 Takayuki KIMURA／株式会社エイトコンサルタント Eight Consultants Co., Ltd.

丹生谷太 Futoshi NYUUNOYA／愛媛県 Ehime Pref.

玉井克明 Katsuaki TAMAI／愛媛県 Ehime Pref.

酒井俊典 Toshinori SAKAI／三重大学 Mie Univ.

キーワード：ボーリングコア、色彩、pH、酸化還元電位、粘土鉱物

Key words: Boring core, Color, pH, Oxidation reduction potential, Clay mineral

1. はじめに

田浪地区は四国西部の八幡浜市中心地より東に3.5kmの所に位置し、基盤岩は御荷鉾緑色岩類で構成されている。地形は標高350m程度の山頂平坦面から急傾斜面を経て、中腹部は地すべり性の緩傾斜面が分布するが、末端は田浪川の侵食作用を被っている。当地区で実施されたボーリングコアを観察すると、様々な形態の緑色岩類が混在するとともに深部まで変質作用を受けていた。そのため基盤岩の岩質は硬軟入り混じり粘土が随所に挟在し、肉眼鑑定のみでは移動層と不動層の区分が難しい状態であった（写真－1）。

地すべりの調査においてすべり面の判定は最も重要であるが、確実な判定には長期の動態観測が必要である。当地区でも早急な地すべりの評価が課題であり、客観性のあるすべり面をコアから把握する必要があった。

本編は、そのような状態のコアから、pH・酸化還元電位測定、色彩測定、X線回折を実施し、可能な限りのデータを集め、従来の地すべり調査手法データと併せ、

総合的に地すべりを評価した試みを報告するものである。

2. 田浪地区の地形・地質の特徴

調査地は標高350m程度の丘陵地の南東斜面に位置し、斜面末端は田浪川が谷頭侵食作用を繰り返す、南西から北東方向に流下している。田浪川は秩父累帯と御荷鉾帯を区分する構造線に相当し、田浪川を境に兩岸の地形・地質は大きく異なる（図－1）。右岸は秩父累帯に相当し、平均勾配30～40°以上の急傾斜面が形成されている。一方左岸は御荷鉾帯に属し、平均勾配15～20°程度の地すべり性緩傾斜面が分布している。弾性波探査や表面波探査では、低速度帯が地形構造に平行に数本確認される。また、左岸の地すべり地形形成の素因として、断層破砕帯の影響も想定される（図－2）。

一方、地すべり誘因の一つには田浪川の谷頭侵食作用があり、それがこの地域に達した時に地すべりが発生し、その繰り返しの結果、今日の地すべり地形が形成されたと考えられる。そのため、山頂部には頂部平坦面を残し、

写真－1 代表的なボーリングコア写真

図－1 田浪地区位置図

* 連絡著者／corresponding author
〒700-8617 岡山市津島京町3-1-21

図-2 田浪地区の微地形区分図

田浪川とほぼ平行に頂部緩斜面・上部急斜面・下部緩斜面・下部急斜面が階段状に配列したと推測される。

調査地に分布する地質は御荷鉾緑色岩類で、枕状溶岩・ハイアロクラスタイト・緑色砂岩、その一部は塩基性片岩化している。枕状溶岩はやや硬質な岩片として採取されたが、ほとんどは破碎化しており、深部まで粘土を介在した軟質なコアであった。また、調査地は随所で湧水が確認され、地下水位が高く豊富である。

3. 田浪地すべり発達史

コア試料を用いてX線回折分析およびpH・酸化還元電位を測定し、田浪地区を構成する基盤岩の鉱物学的・化学的データを中心に、田浪地すべりの発達機構を考察する。

3.1 含有鉱物

ボーリングコアを使用し、X線回折分析によって含有

鉱物を同定した。結果を表-1に示す。ほぼすべてのコアからスメクタイトあるいは緑泥石スメクタイト混合層鉱物が確認でき、調査地が熱水変質作用を被っていることが推測され、これが基盤岩の脆弱化の一要因であることが判明した。

山頂平坦面に近い代表的な側線のコア(3本分)のX線回折結果を、標高で整理した図を示す(図-3)。これによると、標高の高い山頂平坦面から、カオリン帯、バーミキュライト帯が分布し、スメクタイトはほぼ全試料から確認できる。造岩鉱物である緑泥石が、カオリン帯に存在しないことから、風化作用の進行に伴い緑泥石が、混合層鉱物を経てバーミキュライト、さらにカオリン鉱物へと変化していると推測される。バーミキュライトやカオリン鉱物は、風化作用で生成する二次鉱物であるため、その生成環境は酸素や地下水の循環の可能な環境といえる^{1), 2)}。基盤岩においてこれは、亀裂や空隙の発達した緩みが生じている状態と推測できる。調査地は構造帯に近いため、もともと基盤岩は破碎質であり、それが応力開放や山地解体の過程で助長し、その結果深部まで風化作用が進行したと考えられる。

3.2 バーミキュライトの出現深度

図-4はボーリングの位置ごとに整理した、バーミキュライト帯の底面標高と地表標高の関係図である。これによると、下部緩斜面にあるバーミキュライト帯の底面標高は、地表標高とほぼ平行であることがわかる。下部緩斜面は、現世の地すべり活動活発時期に形成され

図-3 代表側線の鉱物出現図

表-1 確認された鉱物一覧表

一次鉱物	造岩鉱物	緑泥石(Ch) 角閃石(Am) まれにセリサイト(Se) スチルブノメン(Sp)
	風化鉱物	緑泥石バーミキュライト混合層鉱物(Ch/V) バーミキュライト(V) カオリン鉱物(K)
二次鉱物	変質鉱物	緑泥石スメクタイト混合層鉱物(Ch/M) スメクタイト(M)

た地形面である。その地形面にバーミキュライト帯が平行に分布していることから、バーミキュライト生成風化作用は現世に進行した、現在も進行しつつある新しいものと想定される。しかし標高320m付近以上、頂部緩斜面に近づくにつれ、バーミキュライト底面標高と地表標高の関係はなくなり、バーミキュライト底面標高はほぼ一定になる。

図-5はバーミキュライト帯の全層厚と標高の関係図である。下部緩斜面ボーリングでバーミキュライト帯の層厚がばらついている原因は、風化の進行を支配する基盤岩の破碎状態や性質を反映しているものと考えられる。上部急斜面のバーミキュライト帯は、層厚が小さく下部緩斜面データに続くものと、厚く頂部緩斜面データに続くものがある。上部急斜面のデータは、頂部および下部緩斜面の漸移部とも位置づけられるが、地形区分の認識誤差もまた含まれている。

図-6は動態観測で確認された、すべり面以深の不動層における、バーミキュライトの層厚とバーミキュライト帯全層厚の関係を示したものである。これによると、下部緩斜面のデータとそれに続くと思われる上部急斜面データでは、不動層内のバーミキュライト帯が薄く、すべり面がバーミキュライト帯内に存在することが示されている。一方、頂部緩斜面および一部上部急斜面データ

図-4 ボーリング位置で整理したバーミキュライト帯の底面標高

図-5 ボーリング位置で整理したバーミキュライト帯の全層厚

は、不動層中にバーミキュライト帯が比較的厚く残存している。

図-4～6の結果から、下部緩斜面で確認されるバーミキュライト帯と頂部緩斜面のそれとは、異なるものであると考えられる。

3.3 pH・酸化還元電位 (Eh)

一般に考えられている、基盤岩の状況とpHと酸化還元電位の変化を表-2に整理する。地表に近い部分あるいは多亀裂な破碎帯や攪乱帯などは、空隙が多く地下水や酸素の循環が盛んであるため、酸性・酸化環境を示す。本地区の基盤岩のpHおよび酸化還元電位の関係を図-7に示す。両者には負の相関があるが、データの分布傾向から、ボーリング孔を大きく2つのグループに分けることができる。グループ1 (△) はグループ2 (○) に比べ、pHに対し高い酸化還元電位を示し、基盤岩の酸化が進行していることから、基盤岩はより多亀裂あるいは風化作用が進行していると想定される。グループ1のコアは図-2より、頂部平坦面の切れる鞍部に位置する。従って、グループ1の基盤岩の酸化は、地形形成に係わった破碎帯の影響と考えられ、グループ1の領域は、より劣化が進行している可能性が指摘できる。

3.4 田浪地すべりの発達史

バーミキュライトの分布や基盤岩の化学的特徴から以下のことが推測される。

本地区で、もともと小起伏風化平坦面として存在していた地形面は、熱水変質作用による脆弱化や破碎帯の存在と、田浪川の谷頭侵食作用の進行に伴って、多くの地すべりが生じた。その結果、次第に下部緩斜面領域が拡大し、その活動は今日なお継続している。そして、その過程で古い地形を頂部平坦面に僅かに残しながら、図-8に示すような階段状の地形が形成された。

図-6 すべり土塊を除去したバーミキュライト帯の層厚と全層厚

表-2 基盤岩の状態変化に伴うpH・Ehの変化表

深部	←	→	地表付近
還元的			酸化的
未風化			風化進行
アルカリ性(値大)			酸性(値小)
還元(値小)			酸化還元電位 酸化(値大)

下部緩斜面のバーミキュライト帯の形成は、頂部緩斜面のバーミキュライト帯（古期バーミキュライト帯）が傾動した可能性、地すべりにより古期バーミキュライト帯が引きずりおろされた可能性、および地すべり活動により新たに形成された可能性が指摘できる。しかしここでは以下に挙げる理由から、下部緩斜面のバーミキュライト帯は、新たに形成された新規バーミキュライト帯と解釈した。

- ・ 図-4より、下部緩斜面のバーミキュライト帯の分布が、現地地形に調和的であること。
- ・ 図-4～6のデータ分布傾向が、頂部緩斜面と下部緩斜面で異なること。
- ・ 風化作用に伴う緑泥石のバーミキュライト化は、現在の地球環境でも比較的容易であること。
- ・ 基盤岩は、スメクタイトにより軟質化し破碎帯の影響も受け多亀裂で、これらは特に攪乱された地すべり土塊内で、風化作用の進行すなわちバーミキュライト化の進行を助長すること。
- ・ カオリン帯が下部緩斜面に残留していないこと。
- ・ 古い地形面の傾動を示す地質学的根拠がないこと。

さらに図-7よりバーミキュライトの存在有無にかかわらず、基盤岩の化学的特徴は大きく2グループに分けられ、基盤岩の酸化が進行しているボーリングがある。このグループの基盤岩は特に亀裂が多く劣化した状態に

図-7 ボーリングコアのpH-Eh関係図

図-8 現地の模式断面図

あると推測でき、場合によっては現在最も活動の活発な、あるいはこれから活発に活動し始める地すべりである可能性が指摘される。

4. 基盤岩の弱線抽出方法

本調査地では、動態観測も行っており地すべりの活動の観測を行っているが、その観測では地すべり面の位置が不明瞭な箇所も多く、ボーリングコアからすべり面を判断する必要があった。そこで、ボーリング試料の鉱物やpH、酸化還元電位等の深度方向の変化に注目した。これらの変化が異常な傾向を示す箇所は、岩盤中の破碎帯や不連続面、変質部あるいは攪乱部といった弱部に相当し、すべり面もその中に含まれる可能性が高い。これら物性値の変化は、客観的に数値として評価できるのが望ましい。そこで表-3に示す9項目について、点数付けを行い、基盤岩の弱線抽出を試みた。

なお、pH等測定値を使用した項目の評価には、一般的な分布範囲を考慮して、絶対値で最大10点となるように評価式を考案した。点数が高いものほど基盤岩の弱線となりうる。

4.1 岩級

基盤岩の状態は岩級区分で判断する。D級岩盤の方がすべり面として選択されやすいと判断し、D級岩盤試料は1点、C級岩盤試料は0点とする。

4.2 正規化N値

軟岩のN値を正規化する手法は提案されていないため、道路橋示方書の式(1)を用いる。N1 = 0の時を10点、N1 = 50の時を0点とし式(2)より評価する。なお、N値を得られなかった試料に関しては、岩級などを考慮して近接深度の値を採用する。

$$N1 = 170 \times N \div (\sigma v + 70) \quad \text{.....(1)}$$

σv : 原位置の有効上載圧kN/m²ただし下限値50

$$y = -0.2 \times N1 + 10 \quad \text{.....(2)}$$

ただしN1 > 100の場合は一律-10点とする

4.2 pHおよび酸化還元電位 (Eh)

一般に移動土塊は攪乱しているため、その化学的性質は酸性・酸化状態にあると考えられる。そこでである試料

表-3 評価項目一覧表

評価項目	評価点絶対値の幅	測定値の幅	備考 評価式	評価手法		
				A	B	C
1 岩級	0~1		C級0:D級1	○	○	○
2 正規化N値(N1)	-10~10	0~100	(0=10:50=0:100=-10) $y=-0.2 \times N1+10$	○		
3 pH	0~10	5~10	(pH小ほど+) $y=-(pH1-pH2) \times 2$	○	○	○
4 酸化還元電位Eh(mv)	0~10	100~600	(Eh大ほど+) $y=(Eh1-Eh2) \div 50$	○	○	○
5 色彩L*	0~10	40~100	(小さいほど+) $y=-(L^*1-L^*2) \div 6$	○	○	
6 色彩a*	0~10	-10~20	(大きいほど+) $y=(a^*1-a^*2) \div 3$	○	○	
7 色彩b*	0~10	0~50	(大きいほど+) $y=(b^*1-b^*2) \div 5$	○	○	
8 バーミキュライトの有無	0~1		なし0:あり1	○	○	
9 地下水位	0~1		なし0:水位以下1	○	○	

pHあるいはEhが、1つ下位の試料のpH (Eh) と比較して酸性(酸化)である場合、ある試料に点数が加算される式とする。

$$y = -2 \times (pH1 - pH2) \quad \dots\dots\dots(3)$$

pH1 : ある深度試料のpH値

pH2 : pH1 の一つ深部試料のpH値

$$y = (Eh1 - Eh2) \div 50 \quad \dots\dots\dots(4)$$

Eh1 : ある深度試料のEh値

Eh2 : Eh1 の一つ深部試料のEh値

4.3 色彩値 (L*a*b*座標系)

基盤岩の色彩変化は、岩種や含有する鉱物種の変化とともに、基盤岩の風化状況を表-4のように反映している³⁾。地すべりの移動土塊は攪乱し風化が進行していると推測できるため、色彩的に風化が進行している試料に点数が加算される式とする。

$$y = -(L^*1 - L^*2) \div 6 \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$y = (a^*1 - a^*2) \div 3 \quad \dots\dots\dots(6)$$

表-4 風化作用の進行に伴う色彩変化表

未風化		風化	
深部	色彩値	地表付近	
白	値が高い	L*	値が低い 黒
緑	値が低い	a*	値が高い 赤
青	値が低い	b*	値が高い 黄

注) L*は岩石種によって逆に未風化ほど黒くなる場合がある

$$y = (b^*1 - b^*2) \div 5 \quad \dots\dots\dots(7)$$

4.4 バーミキュライトの有無

前項で地すべり面がバーミキュライト帯内にある可能性が高いこと、特に新規のバーミキュライトは、新しい地すべり活動に伴う土塊の攪乱により生成した可能性が高いことなどから、バーミキュライトの有無に注目する。本地域の分析試料には、バーミキュライトの有無と色彩値の間に関連性が認められる(図-9)。そこでこのデータの判別分析を実施し、色彩値からバーミキュライトの存在有無を判別できるか検討した。結果は表-5に示すとおりで、高い正答率で色彩値からバーミキュライトの存在有無が判別できることがわかった。これによりバーミキュライトが存在すると判別された試料に、1点を加算する。

4.5 地下水

地下水位が地すべりの挙動に関与していると考えられるため、孔内観測水位以下の試料に1点を加算する。

以上、点数の高い試料ほどより酸性・酸化・風化が進行した基盤岩の弱部であり、すべり面となりうる可能性が高いと判断する。

表-5 判別分析結果

式 (y>0でバーミキュライト無)		正答率
L*	$y=0.27 \times L^*-20.6$	85.10%
a*	$y=-0.61 \times a^*-0.1$	84.50%
b*	$y=-0.30 \times b^*-4.9$	85.10%

図-9 バーミキュライトの存在有無で整理した色彩値の関係図

5. 基盤岩の弱線抽出結果

動態観測によりすべり面が把握されているボーリング孔の分析結果を用いて、表-3より弱線抽出を試みる。なお評価は、(A)9項目全てで評価する、(B)正規化N値を除く8項目で評価する、(C)岩級とpHと酸化還元電位の3項目のみで評価するの、3パターンで検討する。

結果を図-10~12に示す。

これから、(A)および(B)の項目で分析試料を評価する

と、動態観測で確認されたすべり面付近で点数が最も高くなる結果が得られた。従って、ボーリングコアから得られた鉱物・化学的データの点数評価は、本調査地において、地すべり面位置の推測に有効であることが示された。さらに、正規化N値を考慮しない(B)でも、(A)と同じ評価が可能であることから、N値データのないコアでもすべり面の客観的な推測が可能である。これは、本調査地基盤岩の風化の進行に伴う岩盤のゆるみ(正規化N値)

図-10 (A) 9項目評価の結果図

図-11 (B) 正規化N値を除いた8項目評価の結果図

図-12 (C) pH・酸化還元電位・岩級の3項目評価の結果図

図-13 すべり変位量と評価点の関係図

が、色彩やpH等の変化と密接に係わりあっているからと推測される。

岩級+pH+酸化還元電位のみで評価した(C)では、No.15-1とNo.15-7孔ですべり面の推測ができた。これらの2孔に関して評価(C)は、評価項目の多い(A)や(B)の結果よりも、明瞭にすべり面を予測できた。条件によっては、pHや酸化還元電位のみからでも、すべり面の予測が可能であるといえる。

なお、調査地は枕状溶岩やハイアロクラスタイトなど、海底火山噴出物やその二次堆積岩などが分布している。従って、基盤岩の化学組成がほぼ同一で、色調も類似している。そのため本基盤岩は、今回試みた基盤岩の鉱物種や化学的分析・色彩値を用いたすべり面の予測に、適した岩であったことも、良好な結果が得られた一因である。

6. 評価点の定量性

すべり面の評価点と変位量 (mm/年) の関係を図-13に示す。これによると、大半の結果は、変位量が多いほど評価点も高い傾向を示し、この評価点にはある程度の定量性があると考えられる。

傾向から大きく外れたものは、平成16年9月以降の台風災害時に、活発化した地すべりのデータであった。今回、すべり面予測に用いたデータは、基盤岩そのものが有する特性であり、言い換えると基盤岩のもつ地すべりの素因を評価している。そのため本評価法では、稀に生じる大きな誘因事象による急激な変位量までを予測することは、困難であるといえる。従って、図-13のから推測される変位量は、比較的慢性的な地すべり活動に伴う変位量であると考えられる。

また、図-13によると(A)評価法で約14点、(B)評価法で約9点以上の場合に、地すべりは活動し始めると考えることができる。

7. まとめ

ボーリングコアから、含有鉱物種・pH・酸化還元電位・色彩値等のデータを集め、これらを中心に田浪地区

の地すべりの評価を試みた。

最初に、基盤岩の鉱物種の分布標高に注目し、田浪地すべりの発達史を考察した。

当初発生した地すべりは、熱水変質作用によって生成したスメクタイトの存在や、物理探査等で確認された破碎帯、田浪川の谷頭侵食作用などによって発生したと予想される。地すべり活動の過程を通して、地すべり土塊内の風化作用は促進され、新しい地形面にあたる下部緩斜面では、現地形に平行にパーミキュライト帯が形成された。この風化は現在も進行中であるとみられ、土塊はさらにゆるみが生じてきていると考えられる。このような経緯から、現在活発に活動しているすべり面は、新規のパーミキュライト帯内にあると推測できる。

次に、集めたデータを用い分析試料を点数で評価し、すべり面の抽出を試みた。その結果は、動態観測により把握されたすべり面と調和的で、この点数評価は、田浪地区の地すべり面予測に効果的であることが判明した。さらに、評価点と地すべり変位量間に相関性があり、地すべり変位量の推測や、地すべり発生の有無の評価の可能性も示された。

ただしこの点数評価法は、地すべり発生の素因を定量化したものであるため、地震・豪雨などによって誘発される地すべりの定量評価には、問題があることも明らかになった。

我々は田浪地区以外でも、本手法を応用して地すべり評価を実施している^{4), 5)}。また近年の学会活動では、同様に新たな物性値を用いた、すべり面の検討がなされている^{6), 7)}。これらを見ると、物性値は基盤岩の化学組成や構造に左右されることから、評価に利用できる物性値は地域毎に考慮・工夫する必要があるようである。

しかし貴重なボーリングコアから、より多くの利用できるかもしれないデータの取得は、地すべり調査において少なくともマイナスの調査にはならないと考える。

今後とも、同様な考え方でデータの収集・検討を実施したいと考える。

参考文献

- 1) 白水晴雄著 (1988): 粘土鉱物学, 朝倉書店
- 2) 吉村尚久編著 (2001): 粘土鉱物と変質作用, 地学団体研究会地学双書32
- 3) 中嶋悟著 (1994): 地球色変化, 近未来社
- 4) 諏訪陽子・磯野陽子・木村隆行・楠木岳志 (2003): 四国秩父帯大規模地すべりにおける鉱物学的・化学的特徴, 第43回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp45-48
- 5) 磯野陽子・木村隆行・高田正治・諏訪陽子 (2007): 岩石の鉱物・化学的特徴を用いた地すべり調査事例, 第46回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp97-100.
- 6) 吉村辰朗・野間道子 (2005): ボーリングコアの γ 線強度・帯磁率測定によるすべり面検出, 日本地すべり学会誌Vol42, No. 3, pp12-18.
- 7) 佐藤勝也・金折裕司・久永喜代志 (2007): 地すべり堆積物のpHとEC-山口県油谷半島西部物崎地区を例として-, 平成19年度研究発表会講演論文集, pp169-170.

(原稿受付2008年3月27日, 原稿受理2008年11月10日)