

◆ 報 文 ◆

# 泥岩地帯における地すべり土塊の風化に関する検討

丸山清輝\* 花岡正明\*\*

## 1. まえがき

近年、地すべり災害を防止するための対策として、ソフト対策が重要視されるようになってきた。ソフト対策では、地すべりの滑動に対する危険度把握が重要な項目の一つであり、このための方法の確立が大きな課題となっている。地すべりは、地すべり土塊を構成している物性により岩盤地すべり、風化岩地すべり、崩積土地すべり、粘質土地すべりに分類される<sup>1)</sup>。これらの地すべりはある程度の時間をおいて滑動を繰り返しているが、その原因の一つとして地すべり土塊の物性が風化の進行により変化し、地すべり土塊の強度が低下して行くことが考えられる。

そこで、新第三紀層泥岩地帯における地すべり土塊の風化状態及び、地すべり土塊の風化と地すべり再滑動との関連性を明らかにするために、融雪期に再滑動した地すべりにおいて、地すべり土塊の地質、地下水流動状況、化学成分、粘土鉱物などについて調査分析を行ったので報告する。

## 2. 地すべり地の概要

### 2.1 地すべり地の地形及び地質

調査した地すべりは、融雪期の平成14年3月に再滑動した新潟県上越地方妙高市の中栗地すべりである。本地すべりを含む一帯の基盤地質は、新潟油田標準層序による新第三系上部中新統～鮮新統椎谷層相当の主に泥岩で構成されている。

図-1には、中栗地すべりの平面図を示した。本地すべりの規模は、長さ約120m、幅約100m、移動土量約120,000m<sup>3</sup>である。なお、移動量は地すべり斜面中間部で約1.5mであり、地すべり土塊は、その移動ではほとんど攪乱されていない。

### 2.2 地すべり斜面の地質及び地下水状況

図-2は、中栗地すべりの主測線縦断面図を示したものである。調査ボーリングは、平成14年3月に移動した地すべりブロック内 (BV14-2及び

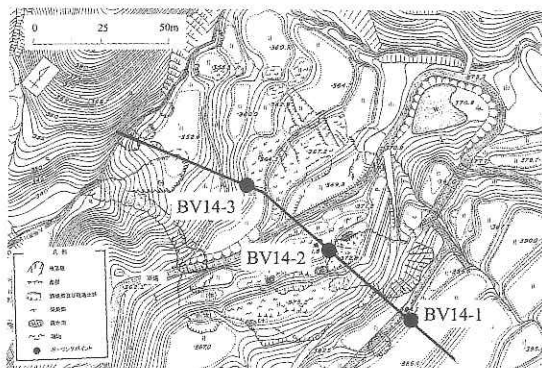


図-1 中栗地すべり平面図

BV14-3) とその上部 (BV14-1) で実施された。

図-3には、地質柱状図と簡易揚水試験揚水量を示した。基岩は、新第三系鮮新統西山層の硬質な黒色泥岩であり、移動層は風化の進んだ軟質の泥岩と岩片混じり粘土及びシルトからなる。また、移動層は、軟質で茶褐色の酸化層と軟質で暗灰色の還元層に分けられる。移動した地すべりブロック内に掘削されたボーリングBV14-2及びBV14-3のすべり面は、コア観察により新鮮な泥岩の上面と推定され、風化還元層の下面に位置する。また、簡易揚水試験結果からは、揚水量が0.1 l/min以上のものがBV14-1では深度5m付近に、BV14-2では深度2m、5m、8m及び17m付近に、BV14-3では深度14m付近に各々認められた。この中で、BV14-3の深度14m付近の揚水量は2.29 l/minであり、すべり面を含む深度に位置する。また、この区間の回復水位はG.L.-4.13mと高いため、地下水が被圧されていることが推定される。

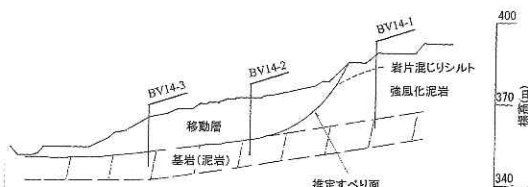


図-2 中栗地すべり主測線縦断面図

A Study on Weathering of the Landslide Sliding Soil Mass in Mud Stone Zone

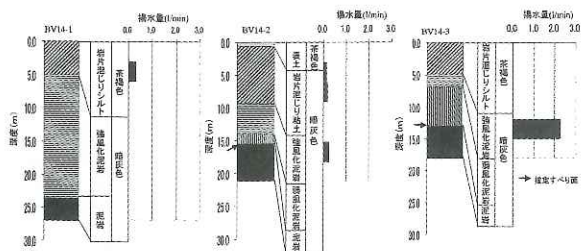


図-3 地質柱状図と簡易揚水試験揚水量

### 3. 研究方法

#### 3.1 地すべり土塊の化学分析及びX線回折

化学分析及びX線回折に用いた試料は、BV14-1、BV14-2及びBV14-3の3ヶ所における風化状態毎のボーリングコアである。化学分析では、土塊の主な化学成分16項目について分析を行った。化学成分中のアルカリ成分（Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、CaO、MgO）は、堆積軟岩を構成する鉱物に含まれており、堆積軟岩の風化の進行にともなって溶出され、そのことにより土塊の空隙率が大きくなる。土塊からのアルカリ成分の溶出は、空隙率の増大による強度低下を意味する<sup>2)</sup>と言われており、アルカリ成分の溶出状態に注目した。また、X線回折結果からは、黄鉄鉱、方解石、緑泥石の深度別含有の有無及びスメクタイトの深度別含有量について注目し求めた。なお、黄鉄鉱は地下水を酸性化させ、土塊の風化を促進させると考えられ、方解石はその消失により土塊内の空隙が増大するため、土塊の強度を低下させると考えられる。また、緑泥石は、風化によりスメクタイトに変化する。この他、スメクタイト強度（量）は土の内部摩擦角の大きさに影響し、その量が多い場合は内部摩擦角が小さくなると言われている<sup>3)</sup>。

##### 3.1.1 化学分析の方法

表-1は、化学分析の項目及び方法を示したものである。この他、pHは、試料を溶かした懸濁水のpHをpHメーターにより測定した。

##### 3.1.2 X線回折の方法

X線回折では、黄鉄鉱、方解石及び緑泥石の深度別含有の有無は不定方位試料により、スメクタイトの深度別含有量は定方位試料によりそれぞれ求めた。また、黄鉄鉱、緑泥石及び方解石の各深度別含有の有無は、黄鉄鉱については $2\theta = 56^\circ$ 付近の黄鉄鉱反射ピーク、緑泥石については $2\theta = 13^\circ$ 付近の緑泥石反射ピーク、方解石については $2\theta = 29^\circ$ 付近の方解石反射ピークの各有無によ

表-1 化学分析の方法

分析項目	分析方法
FeO	O-フェナントロリン法
H <sub>2</sub> O (+)	ベンフィールド法
S, SO <sub>3</sub>	イオンクロマトグラフ
C	高周波誘導加熱炉燃焼赤外線吸収法
CO <sub>2</sub>	赤外線吸収法
Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O	原子吸光法
SiO <sub>2</sub>	アルカリ溶融重量法
TiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ICP発光分光法
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MnO	
CaO, MgO	モリブデン青吸光光度法
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	

り判断した。この他、スメクタイトの深度別有無は、無処理とエチレングリコール処理をした各X線回折結果の対比により判断し、スメクタイトの相対的含有量は無処理のX線回折結果における $2\theta = 6^\circ$ 付近のピーク強度を読み取って求めた。

なお、X線回折はCuK $\alpha$ を使用し、管電圧/管電流30kV/10mAで実施した。

### 4. 研究結果

#### 4.1 地すべり土塊の化学分析結果

図-4には、基岩である泥岩の化学成分を示した。泥岩の化学成分は、含有量の多い順にSiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、FeO及びMgOであり、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、MnO及びCO<sub>2</sub>の含有量は非常に少ない。また、各ボーリング位置における泥岩の化学成分含有量はSiO<sub>2</sub>が最大値と最小値で約10%の違いがあるものの、他の成分はほぼ同じ値であり、各ボーリング孔の基岩はほぼ同質のものと判断できる。

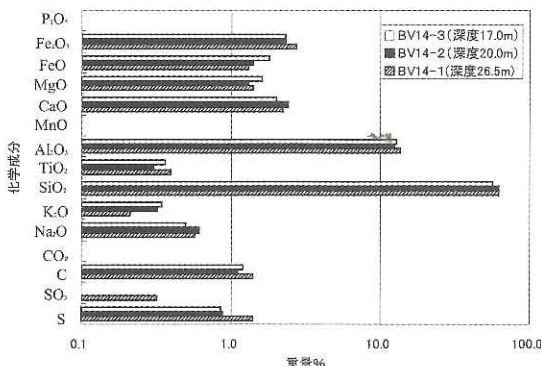


図-4 泥岩（基岩）の化学成分



4.1.1 地すべり移動層内におけるpHの変化と化学成分溶出・集積状況

図-5は、地すべり移動層内のpHの変化と基岩に対する化学成分の変化率（溶出・集積状態）を示したものである。なお、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、MnO及びSO<sub>3</sub>は、含有量が非常に少ないので示していない。

岩石の化学成分含有量は試料全体の重量に対する重量%として表され、これらの比較では風化による各成分の増減を知ることができない。そこで、①風化前の各深度における土塊は全て同質の岩石が風化したものであること及び、②化学成分TiO<sub>2</sub>は化学的風化により移動しないことを各々仮定し、TiO<sub>2</sub>に対する各成分の増減を調べた。なお、①については、図-4に示した各ボーリング位置における基岩の化学成分含有量がほぼ同じであることから、各深度における土塊は同質の基岩が風化したものと判断して仮定した。また、②については、TiO<sub>2</sub>は一般的な風化作用が生じるpH4~9の水との接触では溶解しないと考えられている<sup>4)</sup>ことをもとに仮定した。

ある化学成分の新鮮岩（基岩）に対する相対的变化率CC（%）は、(1)式により表される。

$$CC = \left( \frac{T_f}{T_w} \cdot E_w - E_f \right) \cdot \frac{1}{E_f} \times 100 \quad (1)$$

- ここで、T<sub>f</sub> : 新鮮岩 TiO<sub>2</sub> 重量%
- T<sub>w</sub> : 風化岩 TiO<sub>2</sub> 重量%
- E<sub>w</sub> : 風化岩のある化学成分重量%
- E<sub>f</sub> : 新鮮岩のある化学成分重量%

である。CCの値は、化学成分が溶出された場合はマイナス、集積された場合はプラスの値を示す。なお、新鮮な岩石の化学成分には、BV14-1の深度26.5m、BV14-2の深度20.0m及びBV14-3の深度17.0mの各試料の値を用いた。

pHについては酸化層下面で4前後であり、還元層下面の推定すべり面で8前後である。また、基岩のpHは、すべり面のものより大きい傾向がある。

化学成分については、酸化層で溶出されているものはCaO、Na<sub>2</sub>O、FeO、CO<sub>2</sub>及びSである。また、酸化層で集積されているものはFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>Oである。一方、還元層で顕著に溶出されているものはCO<sub>2</sub>、CaO及びNa<sub>2</sub>Oで

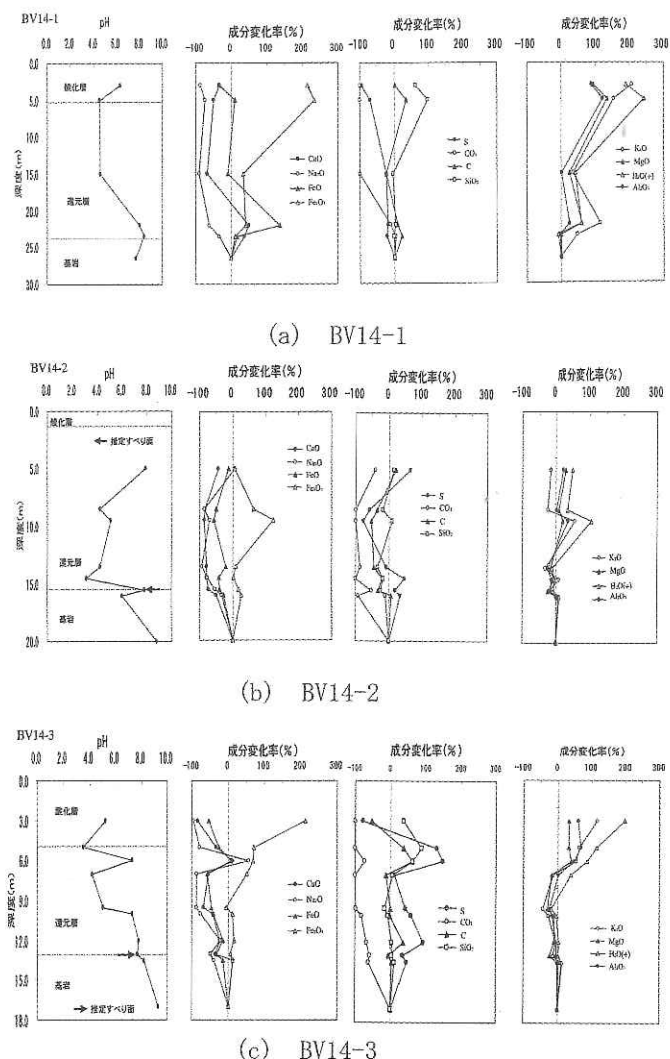


図-5 地すべり移動層内のpHと化学成分の溶出・集積状況

あり、FeO、S、C、SiO<sub>2</sub>、MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>については還元層内で明確な変化が読み取れない。この他、全体的には、化学成分の基岩に対する相対的变化率は地表面付近で大きく、深度が増すにしたがって小さくなる傾向がある。

4.2 地すべり土塊のX線回折結果

図-6には、BV14-1、BV14-2及びBV14-3の各ボーリングコアの土塊の風化状態毎における不定方位試料X線回折結果を示した。黄鉄鉱の2θ = 56° 付近の反射ピーク及び方解石の2θ = 29° 付近の反射ピークは、基岩に認められるが、移動層には認められる部分と検出限界未満の部分がある。なお、緑泥石については、全ての不定方位試料X線回折結果に2θ = 13° 付近の反射ピークが認められ、移動層及び基岩に含まれていることが分か

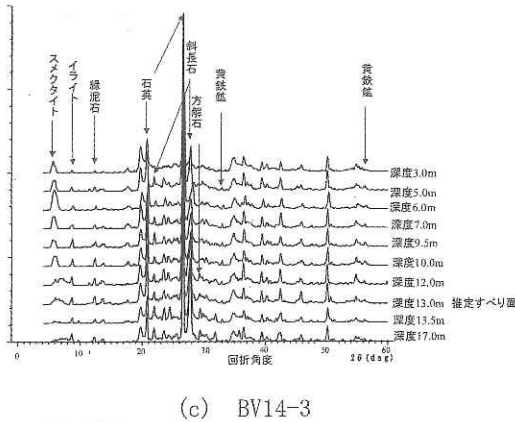
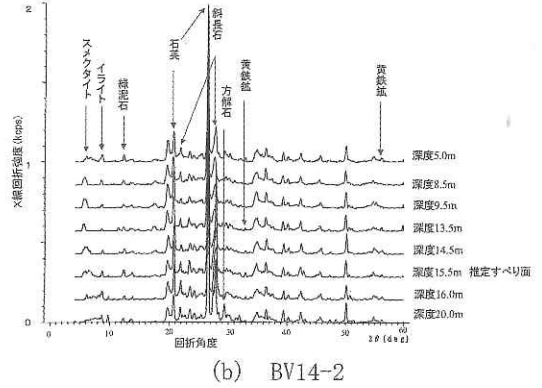
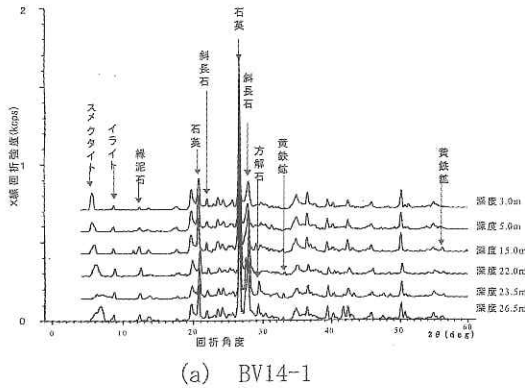


図-6 地すべり土塊のX線回折結果

る。スメクタイトについては、全ての無処理定方位試料X線回折結果に $2\theta = 6^\circ$  付近の反射ピークが認められ、その反射ピークがエチレングリコール処理により $2\theta = 5^\circ$  付近に移動したことが確認されスメクタイトの特性を示したことから、その含有が認められた。

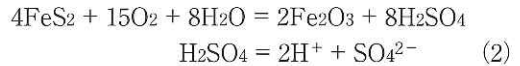
#### 4. 2. 1 pHと鉱物組成の変化

図-7～9は、地質柱状図、簡易揚水試験揚水量、pH、黄鉄鉱の有無 ( $2\theta = 56^\circ$  付近の黄鉄鉱反射ピークの有無)、スメクタイトの相対的含有量を示すバックグラウンドを除去した $2\theta = 6^\circ$  付近の反射ピーク強度 (スメクタイト強度とする) 及び方解石の有無 ( $2\theta = 29^\circ$  の方解石反射ピークの有無) の各関係について示したものである。

BV14-1については、黄鉄鉱は深度3.0mと5.0mでは無しであり、深度15.0m以深では有りとなっている。BV14-2については、黄鉄鉱は深度5.0mでは有りであるが、深度8.5m及び9.5mでは無しであり、深度13.5m以深では有りとなっている。BV14-3については、黄鉄鉱は深度3.0mでは無し

であり、深度5.0m以深では有りとなっている。

なお、黄鉄鉱は、反応式 (2) に示されるように、地下水を酸性化させる<sup>5)</sup>。



すなわち、黄鉄鉱は酸素及び水と反応して酸化鉄と硫酸になり、この酸により土塊の風化が促進される。

各ボーリングコア中の泥岩におけるpHと黄鉄鉱の有無との関係を以下に示す。BV14-1の酸性となっている深度3.0～15.0mでは、黄鉄鉱は3.0mと5.0mでは検出限界未満であるが、15.0mでは含まれている。一方、アルカリ性となっている深度22.0～26.5mでは、すべての深度で黄鉄鉱が含まれている。

BV14-2の酸性となっている深度8.5～14.5mでは、黄鉄鉱は8.5mと9.5mにおいて検出限界未満であるが、13.5mと14.5mにおいては含まれている。一方、アルカリ性となっている深度5.0m及び15.5～20.0mでは、すべての深度で黄鉄鉱が含まれている。

BV14-3の酸性となっている深度3.0～5.0m及び7.0～9.5mでは、黄鉄鉱は深度3.0mにおいて検出限界未満であるが、それ以外においては含まれている。一方、アルカリ性となっている深度6.0mと10.0～17.0mでは、すべての深度で黄鉄鉱が含まれている。

これらのことから、黄鉄鉱が含まれていない深度区域の下面及びその下方では泥岩が酸性化しており、黄鉄鉱が酸化鉄に変化する際に生じる硫酸が泥岩内を浸透し、泥岩を地表面から徐々に酸性化させて行くことが分かる。また、BV14-3では、黄鉄鉱が含まれていない深度と下方で隣接する黄



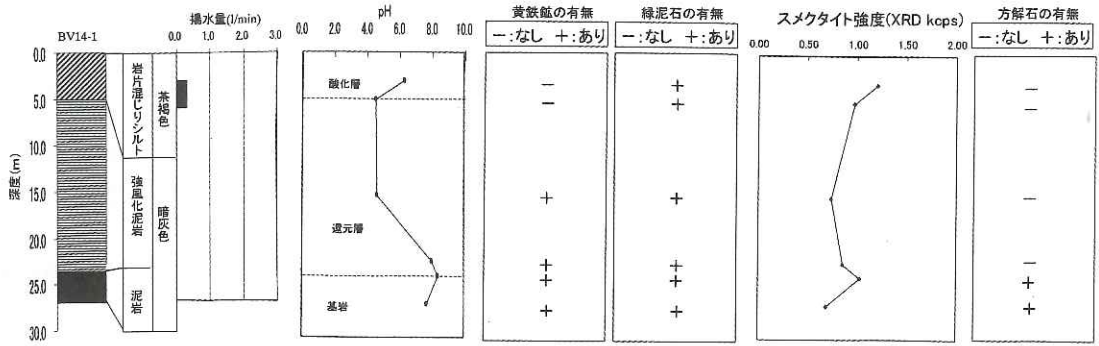


図-7 pHと鉱物組成の変化 (BV14-1)

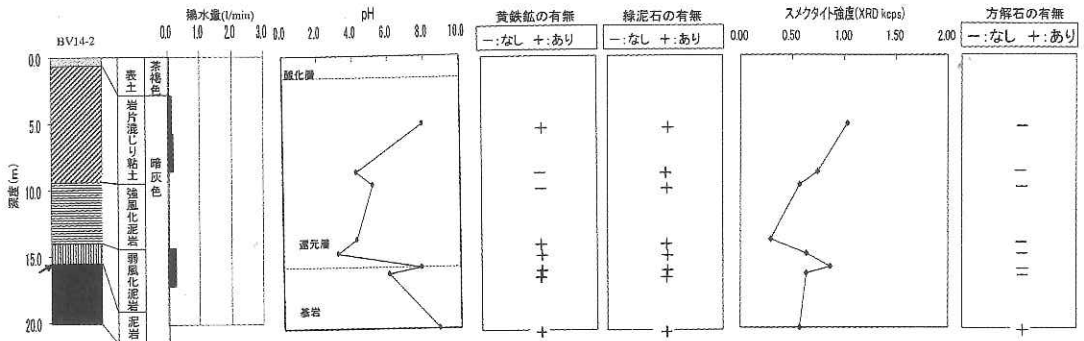


図-8 pHと鉱物組成の変化 (BV14-2)

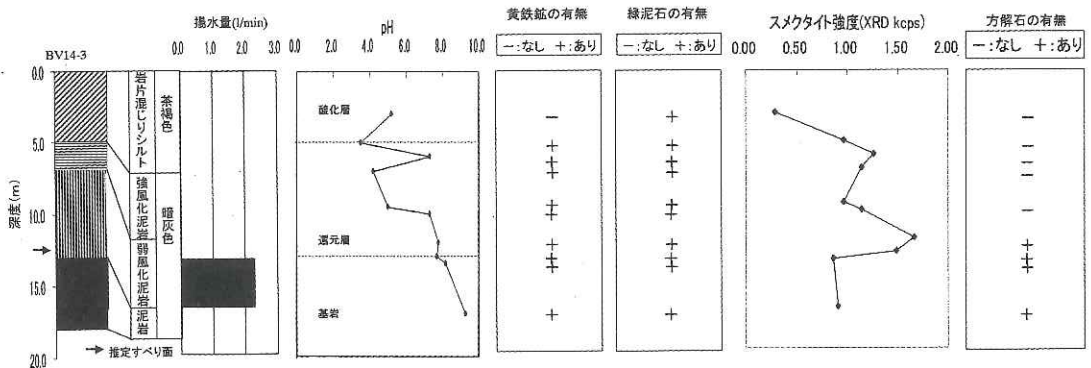


図-9 pHと鉱物組成の変化 (BV14-3)

鉄鉱が含まれている深度でも酸性を示しているが、これは土塊の他の場所から硫酸が浸透してきて酸性化していると考えられる。土塊の酸性化は土塊の風化を促進させるものであり、泥岩中の黄鉄鉱の酸化が地すべり土塊の風化を促進させていることが分かる。

スメクタイト強度は、BV14-1については基岩上面がその周辺より大きくなっており、BV14-2及びBV14-3については推定すべり面付近がその周辺より大きくなっている。この他、各ボーリング

位置のすべり面付近におけるスメクタイト強度は、BV14-3がBV14-1及びBV14-2より大きくなっている。スメクタイト強度(量)は土の内部摩擦角の大きさに影響し、その量が多い場合は内部摩擦角が小さくなる<sup>3)</sup>。これらのことから、今回滑動した地すべりブロックでは、ブロック中間部すべり面の内部摩擦角がブロック上部より小さく、斜面の不安定化はBV14-3が位置するブロック中間部から始まった可能性がある。また、スメクタイト強度が推定すべり面付近でその周辺より大きく

なっていることについては、すべり面が不明瞭な地すべりでのすべり面判定のための有力な判断材料になると考える。

方解石は、BV14-1及びBV14-2の移動層及びBV14-3の深度12.0m以浅の移動層では消失しており ( $2\theta = 29^\circ$  付近のピークが認められない)、BV14-1及びBV14-2の基岩及びBV14-3の深度12.0m以深のすべり面付近と基岩では含まれている。また、方解石の消失している深度区域の下面は、スメクタイト強度の増加している深度である推定すべり面付近と概ね一致しており、移動土塊内の方解石が消失していることが分かる。方解石の消失は土塊の空隙を増大させ、土塊の強度低下を生じさせると考えられることから、移動土塊は方解石の消失により強度低下が促進されていると考えられる。

#### 4.3 すべり面付近におけるアルカリ成分の溶出・集積状況と地すべり滑動との関連性

図-10は、推定すべり面付近におけるアルカリ成分 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$ 及び $\text{MgO}$ の基岩に対する成分変化率をボーリング孔別に示したものである。これらのアルカリ成分は、堆積軟岩を構成する鉱物に含まれており、堆積軟岩の風化の進行にともなって溶出され、そのことにより土塊の空隙率が大きくなる。土塊からのアルカリ成分の溶出は、空隙率の増大による強度低下を意味する<sup>2)</sup>。

今回、地すべりが滑動した斜面内のBV14-2及びBV14-3では、4つのアルカリ成分の溶出が生じており、滑動斜面外のBV14-1では $\text{Na}_2\text{O}$ の溶出と他の成分の集積が生じている。また、今回の地すべりにおける滑落崖はBV14-1とBV14-2の間で生じている。これらのことから、すべり面強度は、アルカリ成分の溶出率が大きい滑動斜面内より、アルカリ成分の溶出率が小さいまたは集積している滑動斜面外の方が大きいことが推定され、

アルカリ成分の溶出と地すべりの滑動とが関連していることが考えられる。

#### 5. あとがき

本報告では、新第三紀層泥岩地帯で発生した再滑動型地すべりである中栗地すべりにおける地すべり移動層の化学的風化について検討した。その結果、スメクタイト強度が推定すべり面付近でその周辺より大きくなっていることが分かった。このことは、すべり面が不明瞭な地すべりにおけるすべり面判定のための有力な判断材料になると考える。この他、すべり面付近におけるアルカリ成分の溶出と地すべりの滑動が関連していることが推定された。このことは、地すべり斜面の危険度を判定するための情報になると考える。今後は、他の地すべりについてのデータも蓄積し、地すべり斜面の危険度判定法に結びつけて行きたい。

本研究を進めるに際しては、新潟県上越地域振興局妙高砂防事務所から御支援を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 渡 正亮、小橋澄治：地すべり・斜面崩壊の予知と対策, pp.41-46, (株)山海堂
- 2) 前田寛之：地すべりと変質帯(その3)―地すべりと風化帯との関係―、地すべり技術, Vol.29, No.3, pp.15-21, 2003.
- 3) 濱崎英作、守随治雄、白石一夫：地すべり粘土の残留強度とX線分析結果(スメクタイト含有量)の比較、第26回地すべり学会研究発表講演集, pp.54-57, 1987.
- 4) 木村進一、鹿園直建、野原昌人、岩井修平：化学的風化に伴う微量・希土類元素の挙動―男鹿半島、女川層堆積岩の例―、応用地質, Vol.40, No.5, pp.281-294, 1999.
- 5) 千木良雅弘：泥岩の化学的風化―新潟県更新統灰爪層―、地質学雑誌, Vol.94, No.6, pp.419-431, 1988.

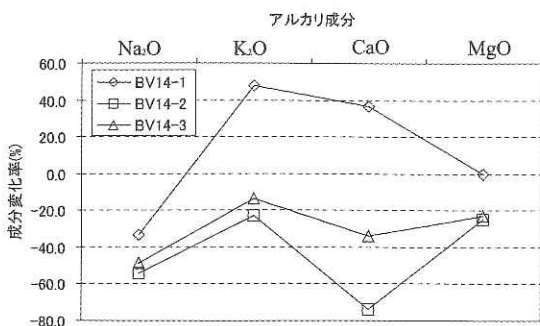


図-10 すべり面付近のアルカリ成分変化率

丸山清輝\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所土砂管理研究グループ雪崩・地すべり研究センター主任研究員、博士(学術)  
Kiyoteru MARUYAMA

花岡正明\*\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所土砂管理研究グループ雪崩・地すべり研究センター上席研究員  
Masaaki HANAOKA