Japan Society of Engineering Geology

55. 泥質片岩の風化メカニズム，および，風化と地すべりとの相互関係について

Mechanisms of the weathering of pelitic schist, and the relationships between weathering and landslide.

○山崎新太郎（京都大学大学院），千木良雅弘（京都大学防災研究所）
Shintaro Yamasaki, Masahiro Chigira

1．はじめに

泥質片岩は我が国に広く分布し，地すべり地形が非常に多く発達することで知られている．また，泥質片岩では片理と呼ばれる面構造が発達しているため，それに沿って剥離して風化しやすく，それが地すべり発生の素因となっている．これは，片理面に沿う微小割れ目が形成されると，それ沿いに地下水が浸透し，風化を促進して，一層片理面沿いにせん断が起こりやすくなると想定されるためである．従って，泥質片岩の風化は地すべりを考えた場合に，非常に重要な現象であるが，これまでに泥質片岩に形成された風化メカニズムは明らかではなく，風化が地すべりの発生過程に，または，逆に地すべりが風化過程に与える影響に関しては議論がなされていない．

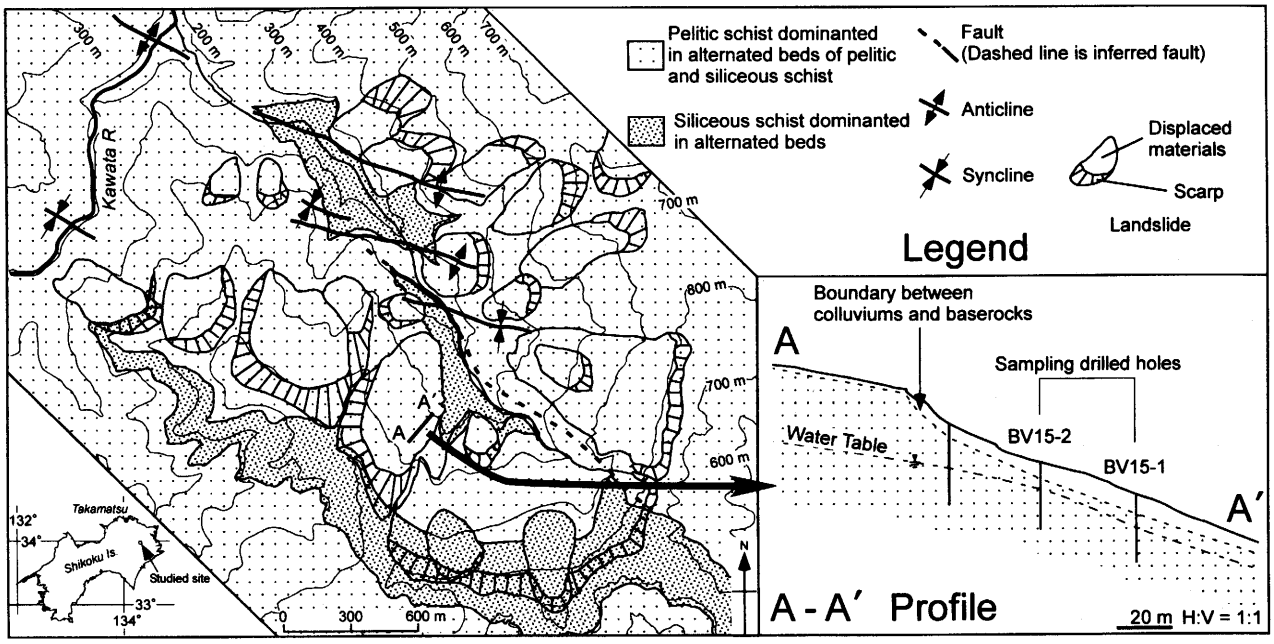
本研究では，以上の問題点について議論するために，最新のボーリング技術である気泡ボーリング法により泥質片岩風化帯から連続的に採取された不撹乱コアに注目し，新鮮岩石から風化岩石の連続的な物理・鉱物・化学的性質の測定・分析と岩石組織の観察を行ない，泥質片岩の風化に伴う性状の変化を報告してきた[1]．今回，それらの結果を統合して泥質片岩の風化メカニズムについて合理的な風化モデルを構築することが可能になり，さらに本調査地域における風化帯の形態から風化と地すべりが相互に関係して発展していることを指摘できたので報告したい．

2．試料および試料採取地点の概要と風化分帯

検討対象とした試料は，徳島県中央部の吉野川市美郷倉羅（北緯 33 度 59.9 分，東経 134 度 16.5 分）に発達した地すべりの移動体内部で採取されたボーリングコアである．本調査地周辺には三波川帯に属する黒色の泥質片岩と珪質片岩が互層を成して分布し，地すべりが多数分布する（図－1）．

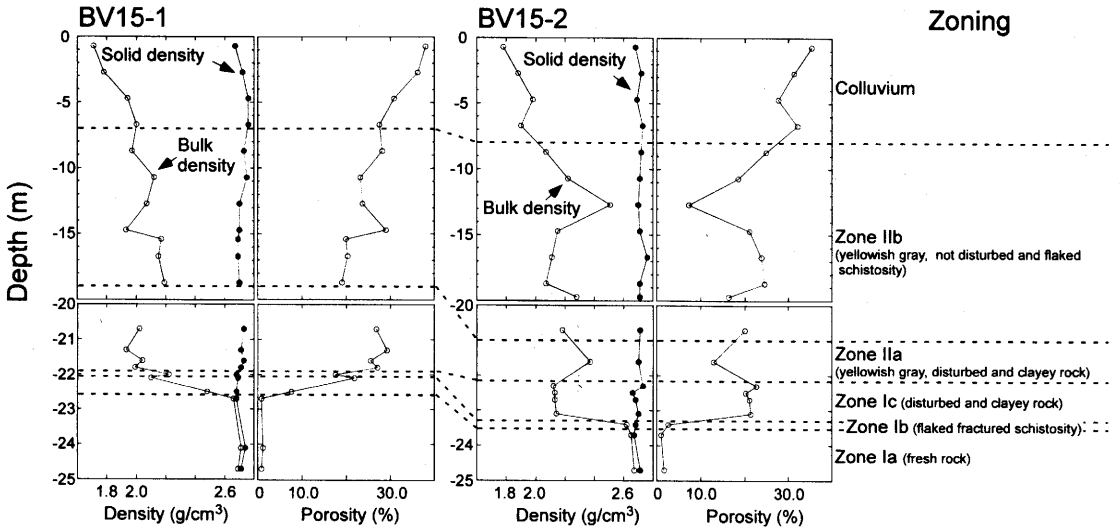
研究試料であるボーリングコア（BV15-1, BV15-2）は，いずれも新鮮岩から淡黄灰色の風化岩，それを覆う崩積土が観察される．コア孔底の新鮮岩は 20° ～ 50° 片理面が傾斜した大部分が黒色の泥質片岩と一部分に淡緑色の泥質片岩が分布するが，ボーリングコアに認められる黄色の風化岩の大部分は，周辺の状況から考えて，黒色の泥質片岩が起源であると思われる．新鮮岩部分の傾斜はこの地域における大局的な傾斜とおおよそ一致し，風化した部分においては局所的に，片理面が急傾斜になっており，これらは地すべりなどの作用で機械的に変形していると思われる．

後述する分析・測定に先立ち，コアの性状により崩積土より下位の岩石に対し分類を行なった．その結果，コアは，第一に色により黒灰色部分と，淡黄灰色の部分に大別できた．さらに，黒灰色のコアは，さらに岩石組織から，新鮮岩と同等で密である部分（Ia），岩石が葉片状に剥離を呈する部分（Ib），岩片を含んだ細粒分（粘土やシルト）に富む部分（Ic）に分類でき，淡



図－1　ボーリングコア試料の採取地点とその周辺の地質および地すべり地形分布

NII-Electronic Library Service



図－2 各種物理特性値の分布と風化分帯との対応

黄灰色のコアも同様に，岩片を含んだ細粒分に富む部分（IIa），細粒分が少なく原岩の組織を留め，葉片状に容易に剥離する部分(IIb)に分類できた．これらを，各コアについて，孔底から表層にかけて適用すると，Ia，Ib，Ic，IIa，IIb の各コア性状を主体とするゾーンが存在することが明らかになった．各ゾーンは特に，ゾーン Ia 上部からゾーン IIb の下部境界までは，1 m 程度の狭い範囲で急速に変化し，それらの境界は地表面にほぼ並行に，そして本地域では特徴的に非常に明瞭に境界が分布する．また，地下水位は地表から地下 10m 付近のゾーン IIb 内に分布すると推定される．

3．研究方法

本研究では前述した各ゾーンの境界で，物理・化学・鉱物学的変化が生じていると仮定し，一連のボーリングコアから，基本 2 m 間隔，または，コアの性状が変化する部分で適宜間隔を変えて試料を採取し，次に述べる方法により分析，測定および観察を行った．

物理的性質としては，パラフィン法によりかさ密度を求め，ガスピクノメータにより粉末にした全岩試料の体積を測定することで固相密度を求めた．また，間隙率は両密度値から算出した．

鉱物組成については，薄片および研磨片の偏光・反射顕微鏡観察，X 線回折法，さらに黄色風化岩の原因を知るため鉄鉱物の同定法として，中嶋 [2]に従い分光測色法を用いた．X 線回折法，分光測色法による測定は，いずれも粉末にした全岩試料に対して行ない，X 線回折法では，変質鉱物を同定するために定方位試料を作成し，後述する各種処理を行った．また，黒色泥質片岩には炭質物が含まれていることが推定されたため，板谷 [3]などの方法に従い，HF-HCl 処理により炭質物が疑われる黒色物質を分離し，分析を行った．

化学組成については，吸着水，強熱減量および蛍光 X 線分析により主要 10 成分の定量を行なった．また，CNHS 元素分析装置において炭素，窒素，硫黄の含有量を定量し，炭素は全炭素（TC）含有率の他に，炭酸塩に含まれる無機炭素（INC）を求め，両者の差から単体炭素と有機炭素の総量（TC-INC）を求めた．

岩石組織の観察は，パラフィン固定した柱状コアの切断標本と薄片，研磨片により行った．

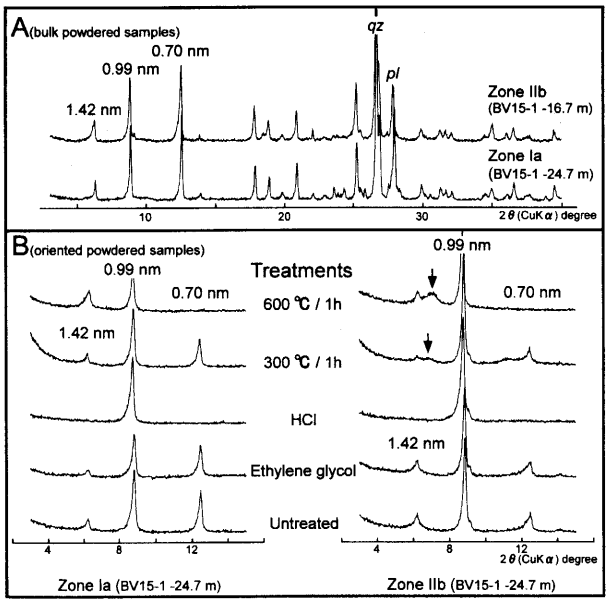
4．風化による物理・鉱物・化学的性質の変化

両試料採取孔における各物理特性値の鉛直分布と，前述したゾーンとの対応関係を図－2 に示す．ここで最も注目すべきは，かさ密度のゾーン Ia(約 2.7 g/cm^3)から Ib または Ic（約 2.1 g/cm^3）への急激な減少である．一方，固相密度には全体を通じて大きな変化が無く，この区間における間隙率の増大から分かるように，かさ密度の減少は間隙の増加に伴うものである．

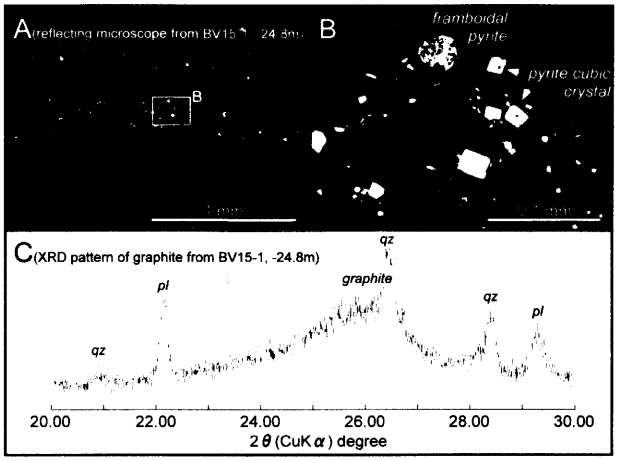
X 線回折分析により，得られた新鮮岩と風化岩（ゾーン IIb）のパターンを第 3 図に示す．同図 A で示した，3-40° 2θ の不定方位粉末回折では，各ゾーンの新鮮岩，風化岩共にほぼ同様の鉱物パターンを示し，広義の粘土鉱物に対応する 1.42 nm，0.99 nm，0.70 nm のピークと石英，片岩で一般的な斜長石である曹長石が検出された．図－3 B で示した，新鮮岩と風化岩の粘土画分粒子の定方位試料を各種処理した結果からは，1.42 nm，0.99 nm，0.70 nm のピークは新鮮岩に含まれる一次鉱物として緑泥石と白雲母，そして黄色風化岩では加えて Al-バーミキュライトの特徴を示すと推定される．また，分光測色法ではゲーサイト（α-FeOOH）が黄色風化岩に検出された．以上から風化による変化が明瞭に現われた，緑泥石と Al-バーミキュライトの相対量とゲーサイトの有無を各孔毎に並記して示したのが表－1 である．同表では，黄色に変化するゾーン IIa 以上のゾーンにおいて緑泥石が減少し，ゲーサイトと Al-バーミキュライトが晶出していた．

偏光顕微鏡下では，以上の鉱物に加えて，風化岩，新鮮岩のいずれもスフェンが検出され，加えて，黒色の岩石のみに帯状または粒状の不透明鉱物が認められた．さらに，反射顕微鏡では粒子結晶の帯を成す木苺状または立方体結晶の黄鉄鉱（図－4 A,B）と，HF-HCl

NII-Electronic Library Service



図－3　黄色風化岩と新鮮岩の不定法位・定方位X線回折パターン



図－4　新鮮岩の反射顕微鏡像と石墨の存在を示すX線回折パターン

表－1　緑泥石・Al-バーミキュライトのXRD反射強度による相対量とゲーサイトの有無

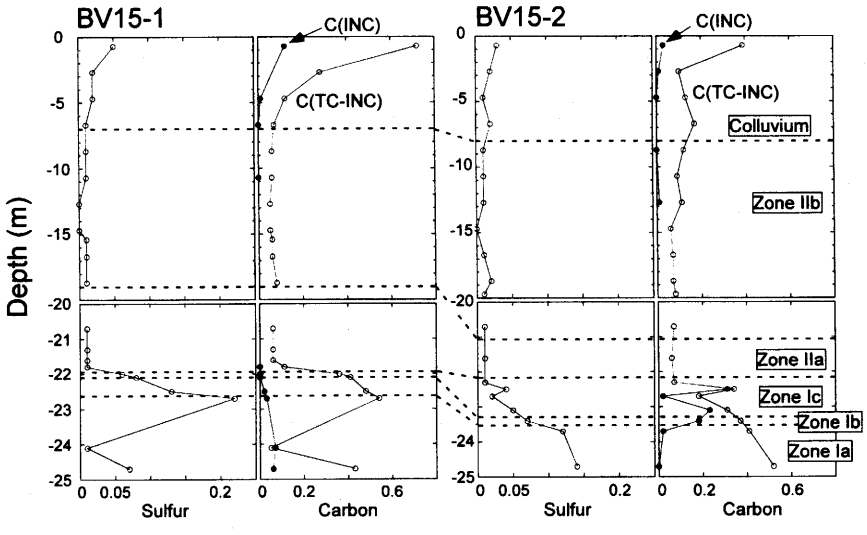
BV15-1 drilled hole core samples

Zone	Depth (m)	Chlorite	Al-Vermiculite	Goethite
IIb	-8.7	+	++	d
	-10.7	++	+	d
	-12.7	(+)	(+)	d
	-14.7	(+)	(+)	d
	-15.4	+	+	d
	-16.7	+++	++	d
	-18.7	++	+	d
IIa	-20.7	++	++	d
	-21.3	(+)	+	d
	-21.6	+	(+)	d
	-21.8	(+)	+	d
Ic	-22.0	+++	-	
Ib	-22.1	+++	-	
	-22.5	+++	-	
Ia	-22.7	+++	-	
	-24.1	+	-	
	-24.7	+++	-	

BV15-2 drilled hole core samples

Zone	Depth (m)	Chlorite	Al-Vermiculite	Goethite
IIb	-8.7	+	-	d
	-10.7	++	(+)	d
	-12.7	+++	-	d
	-14.7	(+)	+	d
	-16.7	+	-	d
	-18.7	+	++	d
	-19.7	+	+	d
	-20.7	++	++	d
IIa	-21.6	+	+++	d
Ic	-22.3	+++	-	
	-22.5	+++	-	
	-22.7	+++	-	
	-23.1	+++	-	
Ib	-23.4	+++	-	
Ia	-23.7	+++	-	
	-24.7	+++	-	

+++: strong reflection; ++: moderate; +:week; (+): very week; -:no reflection d: detected (in cace of Goethite)



図－5　有機・単体炭素（TC-INC）と無機炭素，硫黄の元素分析値の分布

処理により分離できた黒色細粒物質からは，石墨を示すX線回折パターンが認められた（図－4　C）．

化学分析結果のうち，炭素および硫黄の定量結果を，図－5に示す．化学組成のうち新鮮岩から風化岩の間で明瞭な変化が認められたのは，本図に示すTC-INCと硫黄のみであった．これらは，ばらつきがあるものの，ゾーンIaからゾーンIcにかけて漸減し，ゾーンIIaではほぼ消失していた．

NII-Electronic Library Service

5．泥質片岩の風化帯構造とその形成メカニズム

以上から，泥質片岩における風化帯の形成メカニズムを考察した図を，図－6 に示す．以下，本図に基づき泥質片岩の風化過程を新鮮泥質片岩から順次述べる．

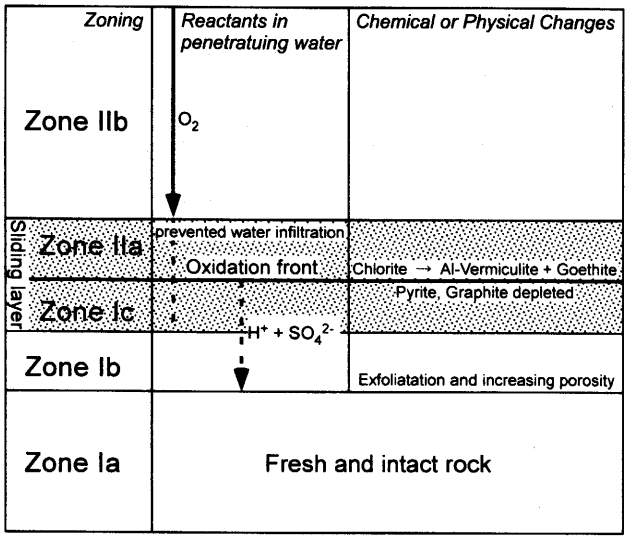
新鮮泥質片岩（ゾーン Ia）から，片理が葉片状に剥離するゾーン Ib への変化として考えられるのは第一に上載荷重が開放による，割れ目の形成である．泥質片岩の場合，片理面が離れるように片理に平行に割れ目が形成され，片理面間の強度が低下すると推定される．また，割れ目が形成されると，反応表面積が増大し，それに沿って地下水が浸透して，岩石と水との反応が一層加速され，剥離が容易になると推定される．

ゾーン Ib の上位のゾーン Ic とゾーン IIa は岩石が破砕，粘土化したものであり，間隙率の増加は顕著になる．他にも脆性的な剪断破壊により生じたと推定される構造が認められることから，これらのゾーンは地すべりによるすべり層と判断される．つまり，すべり層内部では新鮮岩の黒灰色から黄灰色に変化している．この変化境界を挟む化学組成変化は，硫黄と TC-INC が黄色風化岩でいずれも大きく減少し，これらは黄鉄鉱と石墨の酸化消失を示している．即ち，この境界は酸化フロント [4]に相当すると考えられ，ここでは黄鉄鉱の酸化により硫酸を生じてそれがさらに下方に浸透することにより風化が進行すると考えられる．同時に岩石の酸化で帯状に分布する黄鉄鉱と石墨が消失するために，これが片理面間の結着力を低下させ，容易に剥離する岩石に物性が変化する．また，黄色化は，ゲーサイトの析出によるものであり，これは，遊離 Fe^{2+} の Fe^{3+}への酸化により生じる．この Fe^{2+}は黄鉄鉱の分解，または，おそらく硫酸酸性の浸透水による緑泥石の溶解により遊離し，その結果，緑泥石の変質により Al-バーミキュライトが生じたものと推定される．

一方，黄鉄鉱の酸化消失は，既に酸化フロントの下位のゾーン Ic でも起きているが，これは，黄鉄鉱が自身を消費しながら Fe^{3+}を Fe^{2+}へ急速に還元していると考えられ [5]，従って，酸化フロントは，黄鉄鉱が十分減少したところで形成されると説明できよう．フロントにおける黄鉄鉱の酸化と黄鉄鉱による Fe^{2+}の還元反応では，いずれも硫酸が生じて，低 pH の地下水を形成し深部に浸透して岩石の剥離を助長し，おそらくは，ゾーン Ib の形成に影響を与えると考えられる．

6．風化と地すべりとの相互関係

本調査地の風化帯の形態は，岩石が剥離し易くなったゾーン Ib の上部に地すべりによる粘土化したすべり層が形成されていた．さらに，本調査地の酸化フロントは，このすべり層内部において数 cm 幅で変化し，極めて明瞭なフロントを成していた．これらの事実から，調査地の斜面内部で 20 m に及ぶ厚い風化帯の形成後，ゾーン Ib において剪断によるズレが生じてすべり層が形成され，その後，そこにフロントが到達したか，またはフロントが地すべり運動と同時進行しながら形成されたと推察される．これは，すべり層上位に破砕を受けていないゾーン IIb が存在ために，すべり層は現在の位置に固定されて形成されたと考えられるのが妥当であるから，風化帯の発達により斜面内部で岩盤強度が低下し，それが地すべり発生の素因になっていると考えられる．明瞭な酸化フロントの形成は，すべり層と関係していると考えられ，酸化的である地表水が粘土の少ないゾーンを容易に浸透できるものの，粘土を多分に含むすべり層では下方浸透が妨げられるために，すべり層内部で明瞭なフロントが形成されたと推定される．以上の事実は，本調査地において岩石の風化と地すべりが互いに密接にその形成に関与していることを示唆していると言えよう．



図－6　本調査地における泥質片岩風化帯形成メカニズム

謝辞

本研究に用いた試料および業務報告書は徳島県川島農林事務所および国土防災株式会社徳島支店に提供頂いた．また，蛍光 X 線分析に際し，京都大学地質学鉱物学教室の方々に全面的に協力して頂いた．CNS 元素分析は，株式会社エイトコンサルタントにて実施し，同社の磯野陽子氏，木村隆行氏に使用法を御指導頂いた．以上の方々に深謝いたします．

文献

1）山崎新太郎・千木良雅弘，2005. 泥質片岩風化帯における風化生成物の鉛直変化，応用地質学会平成 17 年度研究発表会講演論文集，24，87-90.

2）中嶋悟，1994. 実験地球化学（飯山敏道 編著）. 223 p.

3）板谷徹丸，1985. 変成堆積岩中炭質物の大量迅速分離法（TI 法），岡山理科大学蒜山研究所報，11，47-57.

4）千木良雅弘，1988. 泥岩の化学的風化 －新潟県更新統灰爪層の例－. 地質学雑誌，94，6，419-431.

5）Stumm, W. and Morgan, J. J., 1981. Aquatic Chemistry, 2nd Edition. p.780, Wiley-Interscience, New York.

NII-Electronic Library Service