

新潟県東頸城地域の新第三紀層地すべり泥岩の 化学風化作用とせん断強度特性

児玉貴幸*¹・渡部直喜*²・丸井英明*²

Chemical Weathering and Shear Characteristics of Neogene Mudstone
from Landslides in the Higashikubiki Area, Niigata Prefecture

by

Takayuki KODAMA, Naoki WATANABE and Hideaki MARUI

Abstract

Landslides show intermittent activities in a long period. Such repeat of slip and stop might depend on the changes of shear resistance of the slip surface of landslides during chemical weathering. Several non-weathered and weathered mudstone samples were collected from same outcrops in the landslide area. Simple shear tests were carried out on these samples that were powdered and regulated on grain size and on water/rock weight ratio (W/R). Weathered mudstone samples having $W/R > 0.3$ exhibited higher shear strength than non-weathered mudstone samples. Clay-mineral assemblage and chemical composition of these samples were determined by XRD method and XRF analysis, respectively. Clay-mineral assemblage and chemical composition of smectite in weathered mudstone samples are different from those in non-weathered mudstone samples. This suggests that clay-mineral assemblage and chemical composition of smectite influence to the shear strength of mudstones. Landslide activities are probably controlled by the changes of clay-mineral assemblage and chemical composition of smectite in the sheared mudstones formed by landslides during chemical weathering under the groundwater table.

Keywords : *landslide, Neogene mudstone, chemical weathering, shear strength,
the Higashikubiki area*

キーワード：地すべり，新第三紀層泥岩，化学風化作用，せん断強度，東頸城地域

1. は じ め に

調査地域である新潟県の東頸城地域は全国でも有数の地すべり多発地帯である(図-1)。特に新第三紀寺泊層の泥岩，椎谷層の砂岩泥岩互層，西山層の泥岩を基岩とする地域で地すべり発生頻度が高い(例えば，岩永，1986)。過去に撮影された空中写真を判読すると，新たに発生したように見える新第三紀層泥岩地すべりも，実は古い地すべりの再活動である場合が多い。活動の繰り返しは，新

*¹ 株キタック

*² 新潟大学積雪地域災害研究センター

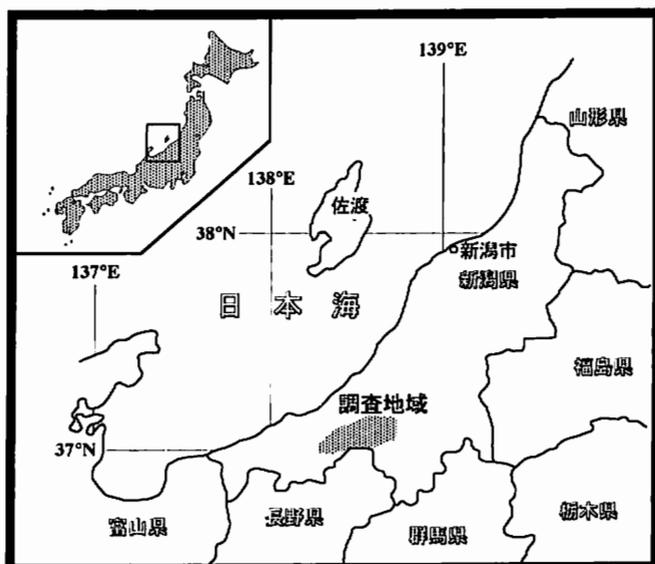


図-1 調査地域位置図

第三紀層泥岩地すべりにおいて特徴的である。地すべりの運動が停止し、安定化する過程におけるすべり面の力学的性質の変化について考察した。地すべり運動によって形成されたすべり面付近の破碎した泥岩は、地下水との相互作用により、時間が経過するにしたがって化学風化が進行する。これによって、泥岩の鉱物組成、化学組成が変化し、その結果として力学的性質も変化すると推察される。本研究では化学風化によるすべり面付近の物性変化を力学試験、化学分析、鉱物分析を行うことにより検討した。

2. 調査地域の概要

調査地域一帯は東頭城丘陵と呼ばれ、全国でも有数の地すべり多発地帯である。調査地域には基岩の種類や褶曲構造を反映した地形が広く分布し、調査地域の南端で険しく、北方向には緩やかな丘陵地形が広がっている。比較的軟弱な岩質である寺泊層の泥岩、椎谷層の泥岩が分布する地域は地すべり地形が卓越し、相対的に緩斜面を形成している（竹内・加藤，1993）。また長倉山(610m)付近では背斜構造を反映した尾根状の地形、浦川原村から北東にかけては向斜構造を反映したゆるやかな谷地形が見られる。

3. 試料について

すべり面付近の泥岩を直接採取することは現実的に困難である。本研究では、地表で採取した未風化で新鮮な泥岩と風化した泥岩を実験に用いた。採取した泥岩について、まず鉄乳鉢を用いて粉碎し、次に粉碎した泥岩をふるいにかけて、0.84mmメッシュ通過分を実験・分析用の試料とした。ここでは、未風化で新鮮な泥岩を粉碎した試料を破碎直後のすべり面泥岩、同様に風化した泥岩を粉碎した試料を化学風化の進行したすべり面泥岩とみてる。椎谷層の同一露頭から採取した未風化で新鮮な泥岩を「805新鮮」、風化した泥岩を「805風化」、西山層の同一露頭から採取した新鮮な泥岩を「104新鮮」、

風化した泥岩を「103風化」と呼ぶことにする。

泥岩の主要な構成鉱物である粘土鉱物は、板状の構造が重なり合った層状珪酸塩であるので、層間に水を保持する。粉碎した泥岩試料を一般的な土質試験法の手順に従って炉乾燥すると、層間水までも逸散させ、粘土鉱物自体が変質してしまう。そこで、室温下で長時間放置する自然乾燥を試みた。試料が十分に乾燥するのに要する時間を検討した。0.84mmメッシュを通過した試料とさらに蒸留水で飽和させた試料をバットに敷き詰め、それらの重量変化を継続的に測定した。飽和試料であっても、28日間経過後は重量変化（減量）が全くみられなくなった。したがって、試料の乾燥期間は1ヶ月間とした。

単純せん断試験においては、自然乾燥した泥岩試料に適量の水を加えて試料調整を行った。本研究では、自然乾燥した泥岩試料と加えた水の重量比を水/泥岩比と呼ぶことにする。

4. 単純せん断試験について

4-1. 試料の調整

0.84mmメッシュを通過した室温乾燥試料を200g用意する。室温乾燥試料200gをせん断容器の体積で除すと、密度が $1.274\text{g}/\text{cm}^3$ と算出され、これを乾燥密度とする。メッシュで分離した試料200gをビーカーに入れ、水/泥岩比に応じた水を加えガラス棒でよく攪拌する。このようにして調整した試料をビーカー4つ分用意し、単純せん断試験に用いる。

同一の露頭から採取した未風化の新鮮な泥岩、風化した泥岩について、いくつかの異なる水/泥岩比に調整し、単純せん断試験を行った。せん断変位は15mmとした。単純せん断試験における垂直応力 $1.0\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、 $2.0\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、 $3.0\text{kgf}/\text{cm}^2$ は、それぞれ約6m、約12m、約18mのすべり面深度に対応すると見積もられる。

4-2. 単純せん断試験の結果

水/泥岩比を0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4の5段階に調整し、単純せん断試験を行った。垂直応力とせん断応力の関係を図-2, 図-3に示す。図-2は805新鮮, 805風化についての試験結果であり、図-3は104新鮮, 103風化の試験結果である。図-2および図-3を見ると、水/泥岩比0, 0.1, 0.2では椎谷層の805新鮮, 805風化, 西山層の104新鮮, 103風化のいずれもせん断強度に大きな違いはない。ところが、椎谷層の805新鮮, 西山層の104新鮮のせん断強度は、水/泥岩比=0.3のとき大きく低下し、水/泥岩比=0.4ではさらに低下する。椎谷層の805風化, 西山層の103風化の場合も、水/泥岩比=0.3のとき、せん断強度が低下する。しかしながら、水/泥岩比=0.3から0.4にかけての805風化のせん断強度は若干の低下を示すのみで、103風化についてはそれらのせん断強度がほとんど変化しない。水/泥岩比=0.3及び0.4の場合を比べると、せん断強度は新鮮泥岩に比して風化泥岩の方が相対的に大きい傾向が見られる。また、西山層は椎谷層よりも相対的にせん断強度が大きい傾向にある。

新鮮泥岩、風化泥岩のせん断強度の違いは、両者の泥岩試料の粒度分布に起因している可能性がある。そこで両者の泥岩について粒度を比較し、せん断強度への影響を検討した。

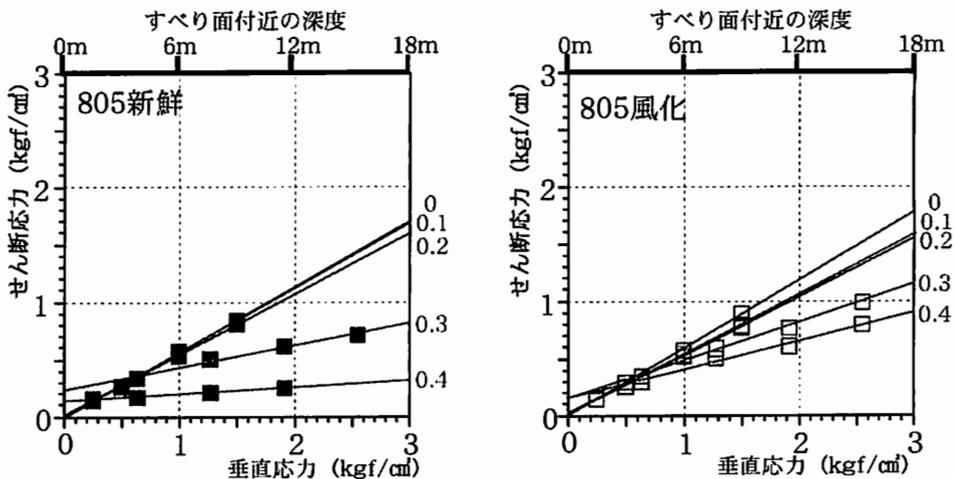


図-2 水/岩石比を調整した椎谷層泥岩の単純せん断試験結果

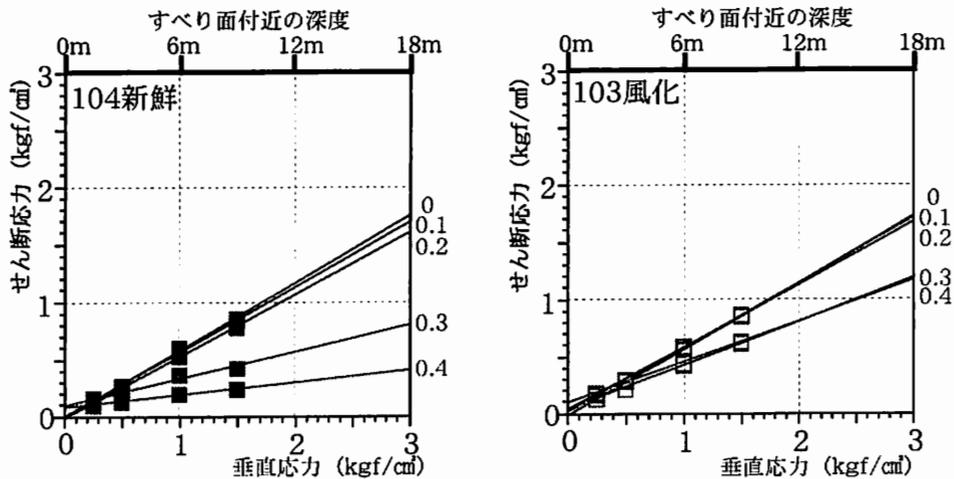


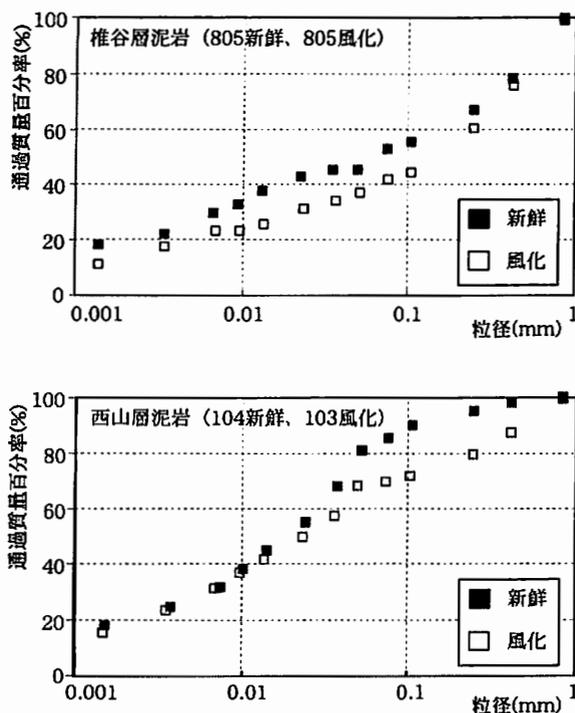
図-3 水/岩石比を調整した西山層泥岩の単純せん断試験結果

5. 粒度の影響についての検証

5-1. 試料の粒度について

粒度の違いがせん断強度に及ぼす影響を検討するため、0.84mmメッシュを通過した未風化で新鮮な泥岩試料、風化した泥岩試料それぞれについて粒径分布を比較した。椎谷層の805新鮮、805風化、西山層の104新鮮、103風化について粒径加積曲線を作成した(図-4)。

粒度構成を数的に示すパラメータとしてD50値を求めた。D50値は全体の重量の50%が通過するふるいの目の大きさに対応し、D50値の大きな土は相対的に粗粒、D50値の小さな土は相対的に細粒である。椎谷層の805新鮮はD50=0.07、805風化はD50=0.15である。805風化の方が相対的に粗粒である。西山層の104新鮮はD50=0.02、103風化はD50=0.023であり、D50値はほぼ同程度である。椎谷層と西山層についてD50値を比較すると、椎谷層の泥岩の方が相対的に粗粒である。椎谷層につ



図－４ 0.84mmメッシュ通過試料の粒径加積曲線

いては新鮮泥岩試料，風化泥岩試料で粒度が異なる。せん断強度に差をもたらした要因として，粒径分布の違いを考慮する必要がある。そこで，新鮮泥岩，風化泥岩について，極力粒度を揃えた上でせん断強度を比較した。

5－2．粒径調整後のせん断強度

850 μ ，425 μ のメッシュを用いて粒径をより厳密に調整した。850 μ を通過し425 μ メッシュに残留する粗い粒子，425 μ メッシュを通過する細かい粒子に分離し，粒径別にせん断強度を比較した。粒度調整した試料について水/泥岩比=0.4に調整し，垂直応力=1.5kgf/cm²に設定して，同様の単純せん断試験を行った。

850 μ を通過し，425 μ に残留した試料のせん断強度の比較を行う。椎谷層の805風化のせん断強度は805新鮮のそれより大きく，また，西山層の103風化のせん断強度も104新鮮のそれより大きい（図－5）。425 μ を通過した試料のせん断強度についても同様の結果が得られた（図－6）。

粒度を調整してせん断試験を実施しても，新鮮泥岩に比して風化泥岩のせん断強度が大きいという傾向は変わらなかった。このことから，前述の0.84mmメッシュを通過した試料におけるせん断強度が新鮮泥岩より風化泥岩で大きくなるという試験結果は，試料調整時に生じた粒度の違いを強く反映しているものではなく，別の要因に大きく支配されていると考えられる。

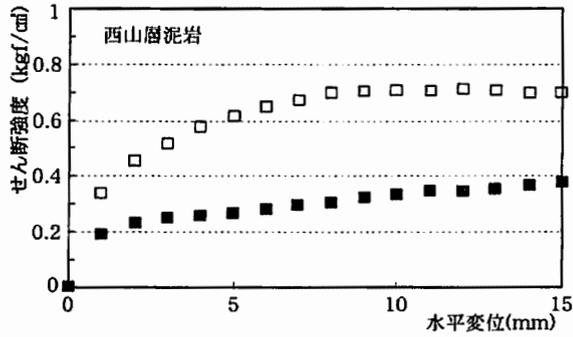
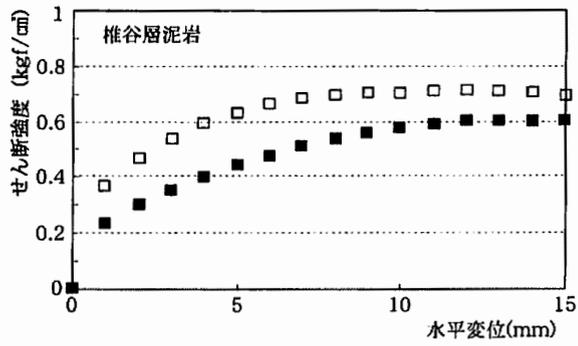


図-5 椎谷層泥岩（上）と西山層泥岩（下）における425 μ 残留試料のせん断強度
（凡例は図-4と同じ）

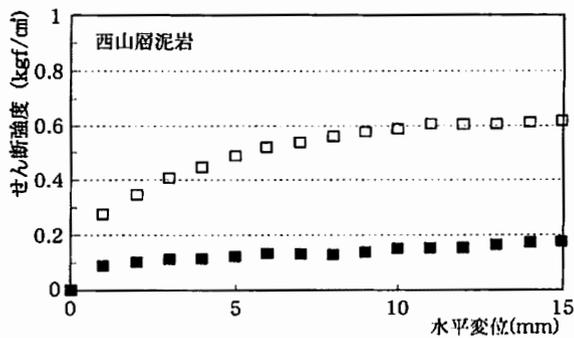
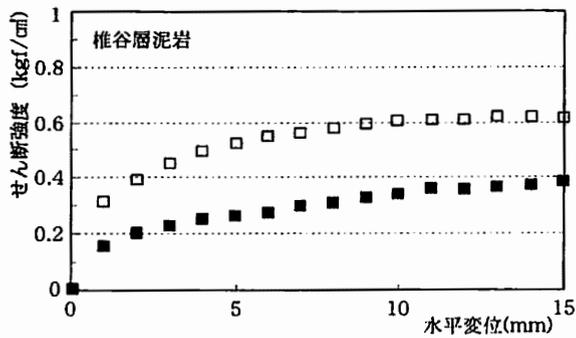


図-6 椎谷層泥岩（上）と西山層泥岩（下）における425 μ 通過試料のせん断強度
（凡例は図-4と同じ）

6. 粘土鉱物による吸水の影響について

6-1. 熱減量実験

モンモリロナイトのような粘土鉱物には膨潤性といった性質がみられる。風化泥岩のせん断強度が相対的に大きくなった要因として、粘土鉱物自体が吸水することによって間隙水が減少し、新鮮泥岩に比して有効応力が大きくなった可能性がある。新鮮泥岩と風化泥岩について熱源量実験を行い、粘土鉱物の層間に保持されている水の量を比較した。熱減量の大きい方が粘土鉱物の層間に保持された水の量が多いとみなす。熱減量実験に用いる試料の前処理として、一定の水/泥岩比に調整した試料をデシケーター内で室温乾燥し、間隙水のみを乾燥除去した。用いた試料は805新鮮と805風化である。熱減量実験には新潟大学理学部設置の示差熱天秤を用いた。

図-7に見られるように、805新鮮に比して805風化の熱減量が大きい結果となった。層間に水を保持する容量は805風化の方が相対的に大きいと考えられる。このことは、805新鮮と805風化について水/泥岩比が等しくなるように試料調整した場合、粘土鉱物による吸水量に応じて、相対的に805新鮮の間隙水量が大きく、805風化の間隙水量が小さくなることを強く示唆する。

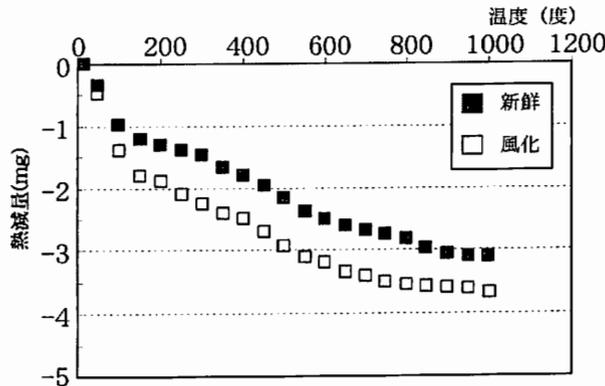


図-7 椎谷層泥岩の全岩試料における熱減量試験結果

6-2. リングせん断試験

熱減量実験の結果から、新鮮泥岩と風化泥岩を同じ水/泥岩比に調整しても、粘土鉱物自体の吸水・保水量に応じて両者の間隙水量に差異が生じ、有効応力、せん断強度に影響している可能性が示唆された。そこで、飽和条件下でリングせん断試験を行い、新鮮泥岩と風化泥岩のせん断強度を比較した。リングせん断試験に用いた試料は、椎谷層の805新鮮と805風化、西山層の104新鮮、103風化である。試料調整は単純せん断試験の場合と同様である。水に飽和させた泥岩試料をリングせん断試験器にセットし、せん断時の垂直加重を垂直変位が安定するまで加えた。垂直変位が安定した後、変位速度 = 1.0mm/分でせん断を行った。

図-8に椎谷層泥岩、西山層泥岩のピーク強度、残留強度の値を示す。椎谷層泥岩のピーク強度は805新鮮に比して805風化の方が大きい。残留強度については両者の間で顕著な違いがみとめられない。西山層泥岩のピーク強度も104新鮮に比して103風化の方が大きい。椎谷層泥岩の場合と同様、残留強度は両者の間で顕著な差はない。飽和条件下で行ったリングせん断試験においても、新鮮泥岩に比して風化泥岩のピーク強度が大きかった。このことは、粘土鉱物の吸水量に起因した間隙水量の違い、あるいは有効応力の違いを直接反映しているものではなく、別の要因にも支配されていると考えられる。

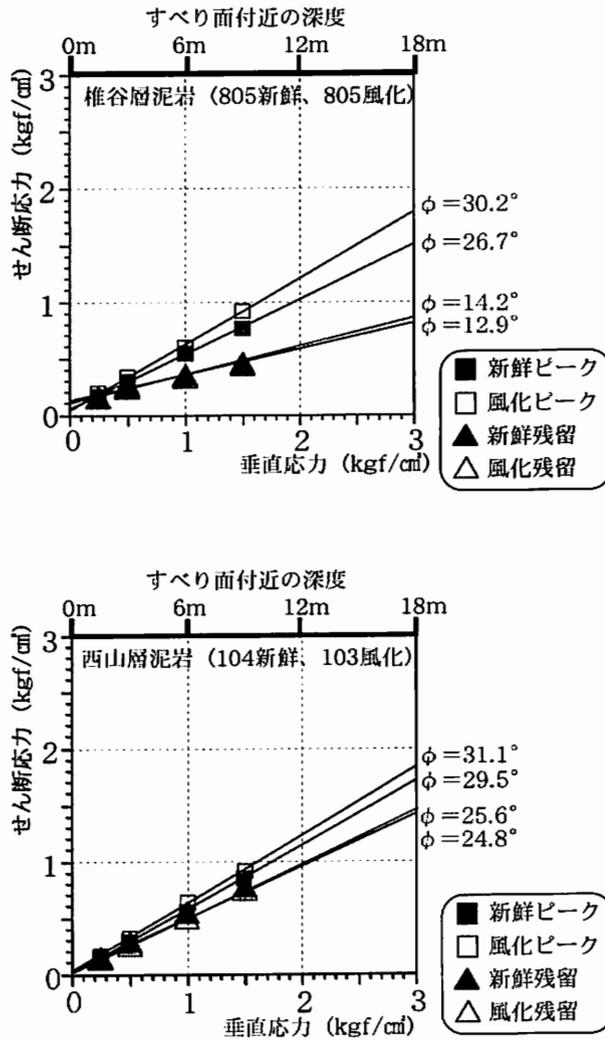


図-8 椎谷層泥岩（上）と西山層泥岩（下）における飽和条件下でのリングせん断試験結果

7. 泥岩の鉱物組成と全岩化学組成

7-1. 鉱物分析

化学風化作用によって泥岩の粘土鉱物組成は変化する。矢田部ほか（1989）は、すべり面粘土を構成する粘土鉱物の種類によって、せん断強度が大きく異なることを報告している。単純せん断試験の結果は、風化泥岩のせん断強度が相対的に大きい傾向を示した。化学風化の進行にともなって、せん断抵抗角の大きな粘土鉱物が生成されている可能性がある。椎谷層の805新鮮、805風化、西山層の104新鮮、103風化について、X線回折による粘土鉱物分析を行った。分析方法は、定方位法、エチレングリコール処理法、塩酸処理法である。分析には新潟大学理学部設置のX線回折装置（XRD）を用いた。

図-9に椎谷層泥岩の定方位分析結果を示す。d値7.2付近のピークは、805風化に比して805新鮮の方が大きい。塩酸処理をした結果、805新鮮と805風化のいずれにおいてもd値7.2付近のピークは

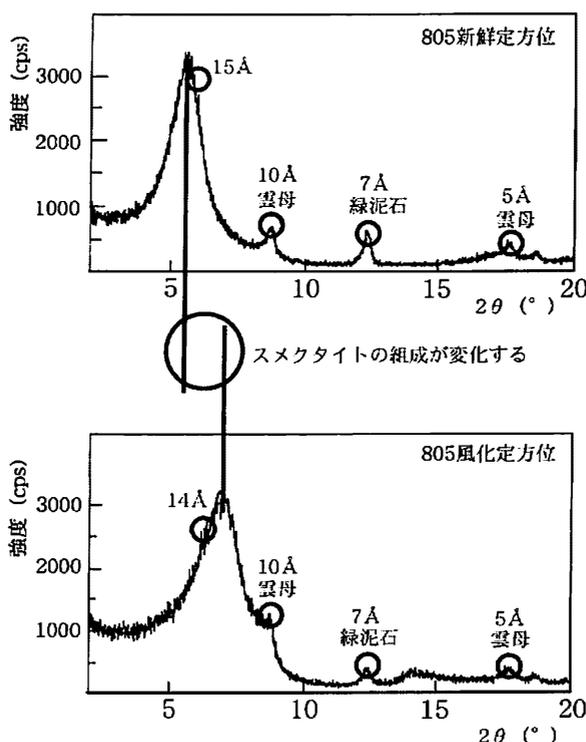


図-9 椎谷層泥岩試料の定向位X線回折分析結果

消滅した。このことより、 d 値7.2付近のピークは緑泥石と同定される。緑泥石はせん断抵抗角の小さな鉱物（横田ほか，1997）である。805風化に比して805新鮮のせん断強度が相対的に小さい要因の1つとして、805新鮮の緑泥石の含有量が805風化よりも相対的に多いことがあげられる。また、スメクタイト類のピークの位置は805新鮮と805風化で異なる。風化の進行にともなってピーク位置が高角側へシフトしており、スメクタイト類の化学組成並びに力学的性質が変化していると推定される。化学風化によるスメクタイト類の組成変化もまた、805風化のせん断強度が相対的に大きくなった要因の1つかもしれない。

西山層の103風化泥岩と104新鮮泥岩についても定向位分析を行った（図-10）。両者の泥岩いずれにおいても d 値7.2付近にピークが現れた。塩酸処理した試料を分析した結果、 d 値7.2付近のピークは若干の減少が見られたが、消滅しなかった。 d 値7.2付近のピークは主にカオリナイトからなると同定される。西山層においてもスメクタイト類のピークの位置は、椎谷層の場合と同様に103風化泥岩と104新鮮泥岩で異なる。上述の椎谷層泥岩の結果も考え合わせると、103風化のせん断強度が相対的に大きい要因の1つは、化学風化作用によるスメクタイト類の組成変化にあるとみられる。

緑泥石は相対的にせん断抵抗角の小さな鉱物であり、カオリナイトは相対的にせん断抵抗角の大きな鉱物（例えば、Skempton, 1985）である。椎谷層に比して西山層の泥岩でせん断強度が相対的に大きいことの要因として、粘土鉱物組み合わせ（特に緑泥石及びカオリナイトの含有量）の違いも一因と考えられる。

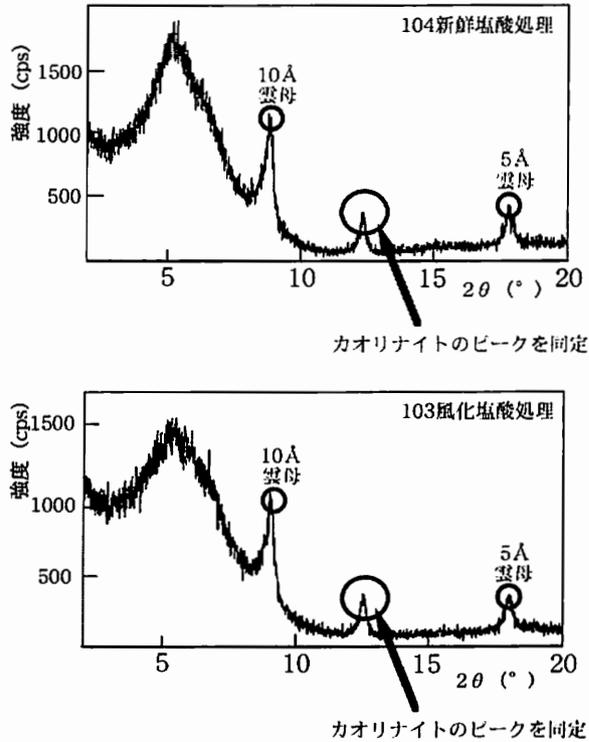


図-10 塩酸処理した西山層泥岩試料のX線回折分析結果

7-2. 化学分析

化学風化作用によって泥岩の全岩化学組成も変化する。椎谷層の805新鮮，805風化，西山層の104新鮮，103風化について，全岩化学分析を行った。分析方法は，高橋・周藤（1997）にしたがった。分析には新潟大学理学部設置の蛍光X線分析装置（XRF）を用いた。

Goldrichの風化系列の考え方を受け入れると，泥岩を構成する鉱物ではCaに富む斜長石が最も水に溶解しやすい。その場合，泥岩からのCa成分の溶脱が期待される。新鮮泥岩と風化泥岩のCaO成分とNa₂O成分の関係を図-11に示す。新鮮泥岩に比べ風化泥岩の方がCaO成分にかなり乏しく，Na₂O成分にやや乏しいことがわかる。化学風化の進行にともない泥岩中のCaに富む斜長石が溶解することでCa成分が溶出され，斜長石は粘土鉱物へと変化する。水中に溶出したCaイオンの一部は粘土鉱物に吸着され，代わって粘土鉱物からNaイオンが放出されること（陽イオン交換反応）によって，風化泥岩はNa₂O成分にもやや乏しくなる。さらに化学風化が進行した場合，泥岩を構成するほとんどの珪酸塩鉱物は，温帯湿潤地域の化学風化作用による最終生成鉱物であるカオリナイトへと変化する。化学風化作用は，様々な鉱物粒子から構成される不均質な泥岩が，最終的にはカオリナイトからなる均質な粘土へと変化するプロセスでもある。

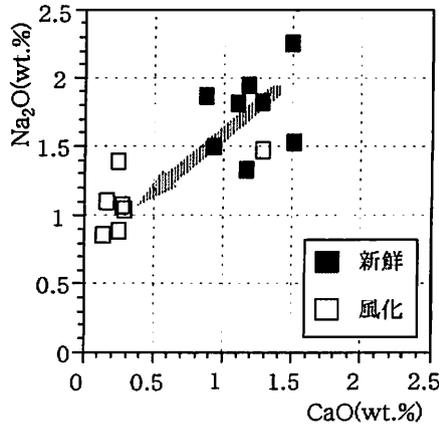


図-11 化学風化の進行にともなう化学成分の変化

8. 泥岩の人工化学風化実験について

8-1. 希硫酸による泥岩の人工風化実験

化学風化作用の過程における、すべり面の強度や粘土鉱物組成の変化について考察したい。希硫酸を用いて、新鮮泥岩の人工風化実験を行った。この実験によって、同一の泥岩試料から化学風化程度の異なる試料を作成できる。希硫酸を用いた理由は、海成泥岩を基岩とする地すべり地では、泥岩に含まれる黄鉄鉱の酸化によって生成した希硫酸が、泥岩の化学風化作用において支配的な役割を果たしている（例えば、千木良, 1988; Chigira, 1990など）からである。実験方法は次の通りである。せん断試験と同様の手順で調整した805新鮮泥岩を約1400g用意する。蛇口付きのポリエチレン容器（容積5.0リットル）に直径5.0mmのガラスビーズを蛇口の高さを超える分量だけ入れる。ガラスビーズの上にガラスワールを敷き詰め、その上に泥岩試料を入れる。pH=4.0に調整した希硫酸を大量に用意する。実験は、試料の入った容器に希硫酸を流すと同時に、泥岩試料を通過し、反応後の溶液を容器の蛇口から排出させるカラム法で行った。流速は毎時約100mlであり、希硫酸を流し続けた期間は3ヶ月間である。805新鮮を出発物質とした人工風化実験後の試料は、化学風化の程度において、805新鮮と805風化のほぼ中間にある。以下、この試料を「人工風化泥岩」と呼ぶことにする。

8-2. 人工風化試料の単純せん断試験

3ヶ月後、泥岩を容器から取り出し、室温乾燥する。その後、水/泥岩比=0.4に試料調整し、単純せん断試験を行った。

せん断試験結果を図-12に示す。せん断強度は大きい方から805風化、人工風化泥岩、805新鮮の順となる。化学風化の程度が大きくなるほど、泥岩のせん断強度が大きくなる傾向にある。

8-3. 人工風化試料の鉱物分析

風化実験後の試料について鉱物分析を行った。その結果を図-13に示す。805新鮮、人工風化泥岩、805風化の順にスメクタイト類のピークが漸次高角側にシフトしている。

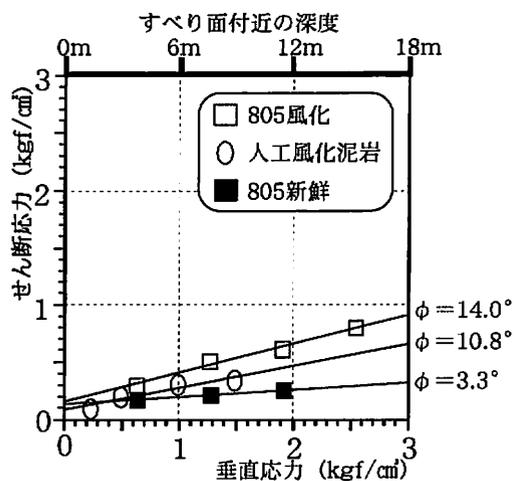


図-12 椎谷層の新鮮泥岩，人工風化泥岩，風化泥岩の単純せん断試験結果

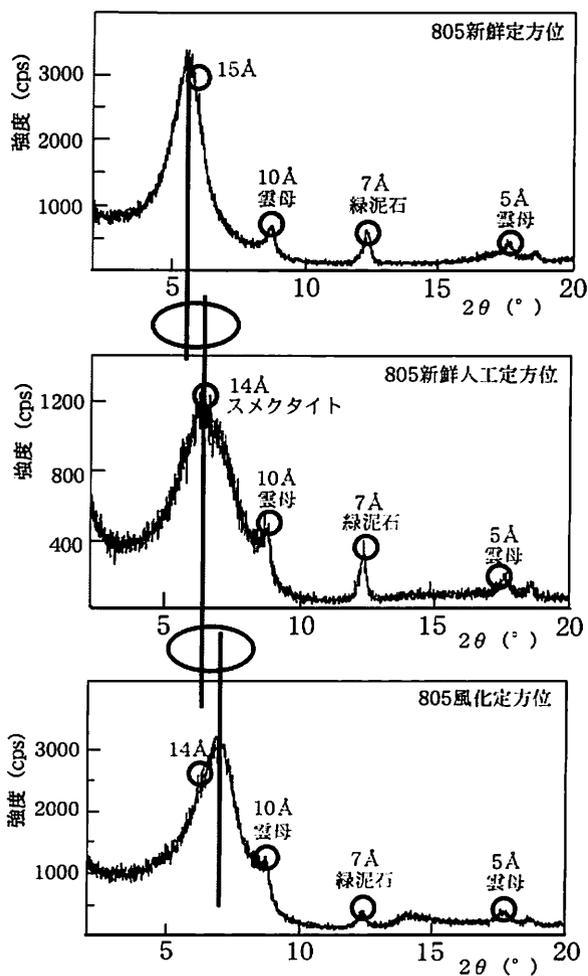


図-13 椎谷層の新鮮泥岩，人工風化泥岩，風化泥岩の定方位X線回折分析結果

9. 考 察

以上、各種の試験・分析結果を踏まえると、化学風化の進行に伴うすべり面付近のせん断強度の増大には、鉱物組成変化が最も支配的であると推察される。椎谷層の泥岩と西山層の泥岩におけるせん断強度の違いは、緑泥石、カオリナイトといった構成粘土鉱物種の違いにあると考えられる。山崎ほか(2000)は、高純度粘土鉱物(クロライト、セリサイト、モンモリロナイト、イライト)を用いたリングせん断試験を実施し、粘土鉱物の種類と量比の違いによるせん断強度特性を明らかにした。それによると、完全軟化強度の摩擦角はクロライト>イライト>セリサイト>モンモリロナイトであり、残留強度のそれは、イライト>クロライト>セリサイト>モンモリロナイトの順であるとされる。さらに、第三系の泥岩を起源とするすべり面粘土の残留強度は、モンモリロナイトの含有率に大きく影響を受けると報告している。

モンモリロナイトの化学組成は、吸着あるいは結合している陽イオンの種類によって実に多様である。同一の泥岩において、未風化で新鮮な泥岩と風化した泥岩のせん断強度の違いは、化学風化の進行に伴うスメクタイト類、特にモンモリロナイトの組成変化に起因している可能性が高い。化学風化作用の進行とせん断強度の変化について、粘土鉱物組成の変化に着目して、一つの仮説を提示することができる。泥岩を構成する主要な粘土鉱物はスメクタイト類、中でもモンモリロナイトであろう。このモンモリロナイトの特徴は、水中で膨潤性を有することと陽イオン交換性を有することである。モンモリロナイトは層間の陽イオンの種類によって、Na型とCa型などに大別される。Ca型に比してNa型モンモリロナイトの方が強い膨潤性を有し、せん断抵抗角も小さいとされる。海底に堆積するモンモリロナイトは海水との相互作用によって、そのほとんどがNa型モンモリロナイトと考えられる。ここで、Na型モンモリロナイトを主要な粘土鉱物とする海成泥岩が陸上で化学風化作用を被る過程を考えてみる。前述のように、Goldrichの風化系列を受け入れると、泥岩を構成する鉱物ではCaに富む斜長石が最も水に溶解しやすい。Caに富む斜長石の溶解によって、水中のCaイオン濃度が増加する。イオンが粘土鉱物に吸着される力はCaイオン>Naイオンであるから、Na型モンモリロナイトにCaイオンが吸着され、代わってNaイオンが放出される。つまり、化学風化の進行する過程で、斜長石の溶解反応とモンモリロナイトの陽イオン交換反応が連続的に起こり、モンモリロナイトの一部はせん断抵抗角の小さいNa型モンモリロナイトから相対的にせん断抵抗角の大きいCa型モンモリロナイトへと変化すると考えられる。こうしたモンモリロナイト組成の変化によって、風化泥岩のせん断強度が相対的に大きくなったものと推定される。化学風化のさらなる進行によって最終的に生成されるカオリナイトは、相対的にせん断抵抗角の大きな粘土鉱物であることにも注目しなければならない。

一方で、本研究では、現時点で説明のつかない問題も残っている。新鮮泥岩に比して風化泥岩の熱源量は大きかった。これを両者の泥岩を構成する粘土鉱物の違いによる吸水性(膨潤性と言い換えられよう)の違いと考えるならば、化学風化の進行に伴って粘土の組成がNa型モンモリロナイトからCa型モンモリロナイトへと変化するとした上述の仮説と矛盾する。また、椎谷層と西山層の風化泥岩のX線回折パターンを見ると、スメクタイト類のピーク位置は、椎谷層の方が高角側にある。化学風化の進行に伴って、スメクタイト類のピーク位置が高角側へ移動することで特徴づけられる粘土鉱物組成の変化のみがせん断強度の増大傾向と関係するならば、西山層風化泥岩のせん断強度が椎谷層のそれより大きいことが説明できない。さらに、乾燥試料では新鮮泥岩と風化泥岩のせん断強度に差違は

なく、含水条件下でその差違が明瞭となる点からも、せん断試験結果が粘土鉱物組成のみに依存しているとは考えにくい。これらの問題点は今後の研究課題としたい。

謝 辞

粘土鉱物の分析に際しては、新潟大学理学部の赤井純治教授に便宜を図っていただいた。泥岩の全岩化学分析に際しては、同大学理学部の周藤賢治教授に便宜を図っていただいた。以上の方々に深く感謝申し上げる。

文 献

- 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巻 6号, 419-431.
- Chigira, M. (1990) : A mechanism of chemical weathering of mudstone in a mountainous area, *Engineering Geology*, 29, 119-138.
- 岩永 伸 (1986) : 新潟県の地すべりと地質との関係, 地質学論集, 第28号, 123-134.
- 岩永 伸 (2000) : 東頸城山地付近の地すべりの特徴—地すべり多発地帯の地質と土質—, 地すべり, 37巻 1号, 44-50.
- Skempton, A. W. (1985) : Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, *Geotechnique*, 35, No. 1, 3-18.
- 高橋俊郎・周藤賢治 (1997) : 蛍光 X 線分析装置 RIX3000 による, 珪酸塩岩石中の主成分元素および微量元素の定量分析, 理学電機ジャーナル, 28, 25-37.
- 竹内圭史・加藤碩一 (1993) : 高田東部地域の地質, 5 万分の 1 地質図幅, 地質調査所.
- 山崎孝成・眞弓貴之・由田恵美 (2000) : 高純度粘土鉱物のリングせん断特性—すべり面粘土とその対比—, 地すべり, 37巻 2号, 30-39.
- 矢田部龍一・八木則男・榎明潔 (1989) : 破碎帯地すべり粘土の力学特性, 土木学会論文集, No. 406, III-11, 43-51.
- 横田公忠・矢田部龍一・八木則男 (1997) : 蛇紋岩地帯の地すべりの発達に及ぼす粘土鉱物とせん断強度の影響, 土木学会論文集, No. 568, III-39, 125-132.