

6. 層状ケイ酸塩鉱物の X 線回折長さの総和と軟化強度

Relation between normally consolidated strength and X-ray diffraction peak length of Sheet silicate clay mineral

○磯野陽子, 小山治香, 木村隆行, 諏訪陽子 (株)エイトコンサルタント)
Yoco N. Isono, Haruka Koyama, Takayuki Kimura, Yoko Suwa

1. はじめに

土の物理的・鉱物学的性質と残留強度 ϕ_r ($C_r=0$) との関係については, Skempton (1964) 以来, 多くの研究がなされている。近年では宜保ほか (2000)¹⁾ (2003)²⁾ などが, 地すべり粘土の残留強度は, そのせん断面を形成する粘土鉱物の総量と, 配向性に支配されることを指摘している。

本論でも層状ケイ酸塩鉱物は, 斜面安定に影響を与えている素因の一つと考え, そのような粘土鉱物を多量に含有する試料は, 岩盤の弱線となり, 強度が小さいと推測し, 検討を行った。

その結果, 試料中の層状ケイ酸塩鉱物の X 線回折長さの総和と, 試料の軟化強度の間に良好な相関が認められたので, 報告する。

2. 基盤岩の強度特性

2. 1) 対象とする基盤岩の強度特性

一般に斜面の強度は, 山地解体から斜面崩壊の過程で, ピーク強度→軟化強度→残留強度に変化すると言われている。ピーク強度は, 過去の応力履歴や岩石の固結度などに左右され, 残留強度はすべり面の配向性粘土鉱物に左右されていると言われている^{1) 2)}。本検討の対象は, 初生地すべりレベルを対象としており, その場合の斜面安定は, 最終的に正規圧密領域の強度である軟化強度に支配されると考えられる。

軟化強度の把握は, スラリー試料の三軸圧縮試験より得ることにし, せん断は間隙水圧を測定, 圧密・非排水条件で行った (CU 試験)。

2. 2) 基盤岩の軟化強度特性に影響与える要因

以下の 2 点が考えられる。

① 岩種の違い

岩石はその形成時代によって固結度が異なる。また, 岩石はその種類によって, 岩石を構成する鉱物に違いがある。そのため, 風化・変質による耐性や二次的に生成する粘土鉱物種やその含有量も岩石の種類に左右される。

そこで検討は岩種を区分して行う。本検討では, 泥質～砂質片岩のみを対象とした。

② 岩盤の風化・変質状況

風化・変質が進行していれば強度は小さい。基盤岩の風化・変質度合いやそれに対する耐性は, その基盤岩に含まれる層状ケイ酸塩鉱物の種類や量に反映されている。軟化強度は過去の応力履歴がリセットされているため, この層状ケイ酸塩鉱物が, 基盤岩の強度特性を支配する主要因と推測できる。

3. 検討基盤岩の鉱物学的特徴とその定量評価

3. 1) 基盤岩の鉱物学的特徴

検討対象は泥質～砂質片岩である。確認された層状ケイ酸塩鉱物は、緑泥石 (Ch) - スメクタイト (M) - セリサイト (Se) - 白雲母 (Ms) - カオリン鉱物 (K) で、その他鉱物としては、斜長石 (Pl) - 石英 (Q) であった。このうち、スメクタイトとカオリン鉱物・セリサイトは、風化や変質作用で生成される二次鉱物である。緑泥石-白雲母-斜長石-石英は基盤岩の造岩鉱物である。代表的な X 線回折図を図-1 に示す。

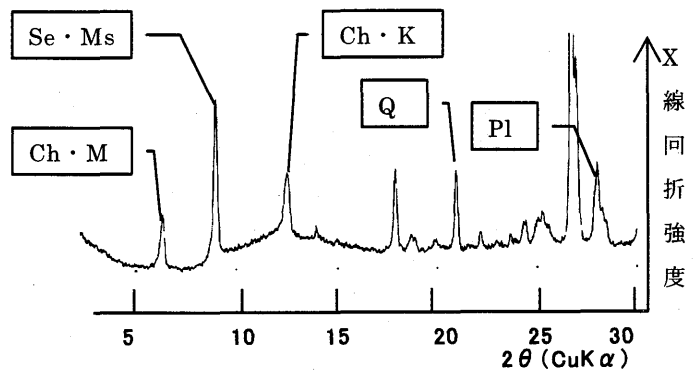


図-1 代表的な X 線回折図と各鉱物の主要回折線

3. 2) 試料の層状ケイ酸塩鉱物の定量評価

層状ケイ酸塩鉱物の定量評価は、X線回折装置を用いたバルク分析（不定方位法）で行う。その分析で得られた結晶の X 線回折強度（回折線長さ）が、その結晶の質量濃度（あるいは量）と比例すると考えられていることを利用する。そこで、各層状ケイ酸塩鉱物の代表的な X 線回折線長さを測り、その長さが粘土鉱物の含有量を間接的に表しているとする。つまり試料を分析し、ある鉱物 (A) の代表 X 線回折線が他の鉱物 (B) よりも長い（回折線強度が強い）場合、試料中には A が B よりも相対的に多く含まれていると考える。

図-1 に示すように層状ケイ酸塩鉱物の回折線は、同じ角度に重なって出現する場合が多い。ここでは緑泥石とスメクタイトが 6.2° 付近に、セリサイトと白雲母が 8.8° 付近、緑泥石とカオリン鉱物が 12.5° 付近に重なって出現する。バルク分析では、定方位分析と違って追加処理によって、それらを分けることができない。

バルク分析のみによる定量評価は、以上のような問題があるが、鉱物量を簡便に評価することが可能な手法であるため、本検討で利用する。

本論では X 線回折線長さが、その回折線をもつ鉱物の間接的含有量を示しているとする。

4. 検討条件と結果

4. 1) 補正方法

各試料の強度・鉱物特性・その回折線長さを表-1 に示す。図-2・3 に軟化強度 ($\phi s'$) と層状ケイ酸塩鉱物の回折線長さの関係を示す。なお、いずれも強度は $\phi s' > 0$, $Cs' = 0$ であった。

X 線回折線の長さは、X 線回折分析条件（電流・電圧・チャートのレンジ・バルク試料の詰め方）に左右される。そのため試料に普遍的に含まれている造岩鉱物の回折線を用いて、以下の 3 パターンで補正を行う。

- ① 岩石の風化・変質状況に左右されない（風化・変質に強い）石英の回折線で除した長さ比。
- ② 造岩鉱物であるが、風化・変質に弱く容易に分解し、その量が減る斜長石の回折線

で除した長さ比。

③石英と斜長石両方の回折線の和で除した長さ比

4. 2) 検討条件

層状ケイ酸塩鉱物の含有量という観点から、確認できた層状ケイ酸塩鉱物 (Ch・M・Ms・Se・K) の回折線長さの総和を考える。次に、鉱物毎に強度と回折線長さの関連性を検討する。

ただし、前述したように回折線が重なる層状ケイ酸塩鉱物があるため、鉱物毎といっても、 $2\theta = 6.2^\circ$ は Ch+M の、 $2\theta = 8.8^\circ$ は Se+Ms の $2\theta = 12.5^\circ$ は Ch+K の間接的含有量を見ることになる。

4. 3) 検討結果

図-2 に、X線回折分析で確認できた層状ケイ酸塩鉱物の回折線長さの総和 (Ch+M+Ms+Se+K)、すなわちすべての層状ケイ酸塩鉱物の間接的含有量と軟化強度の関連性を示す。a 石英補正、b 斜長石補正、c 斜長石+石英補正した回折線比を横軸に示す。

これによると、全てのグラフにおいて、層状ケイ酸塩鉱物の間接的含有量が増加すると、軟化強度は小さくなる傾向が認められる。特に石英の回折線で補正すると、両者は非常に良好な関係を示す (図-2a)。これは以下で示す鉱物毎で行った検討でも同様であり、石英

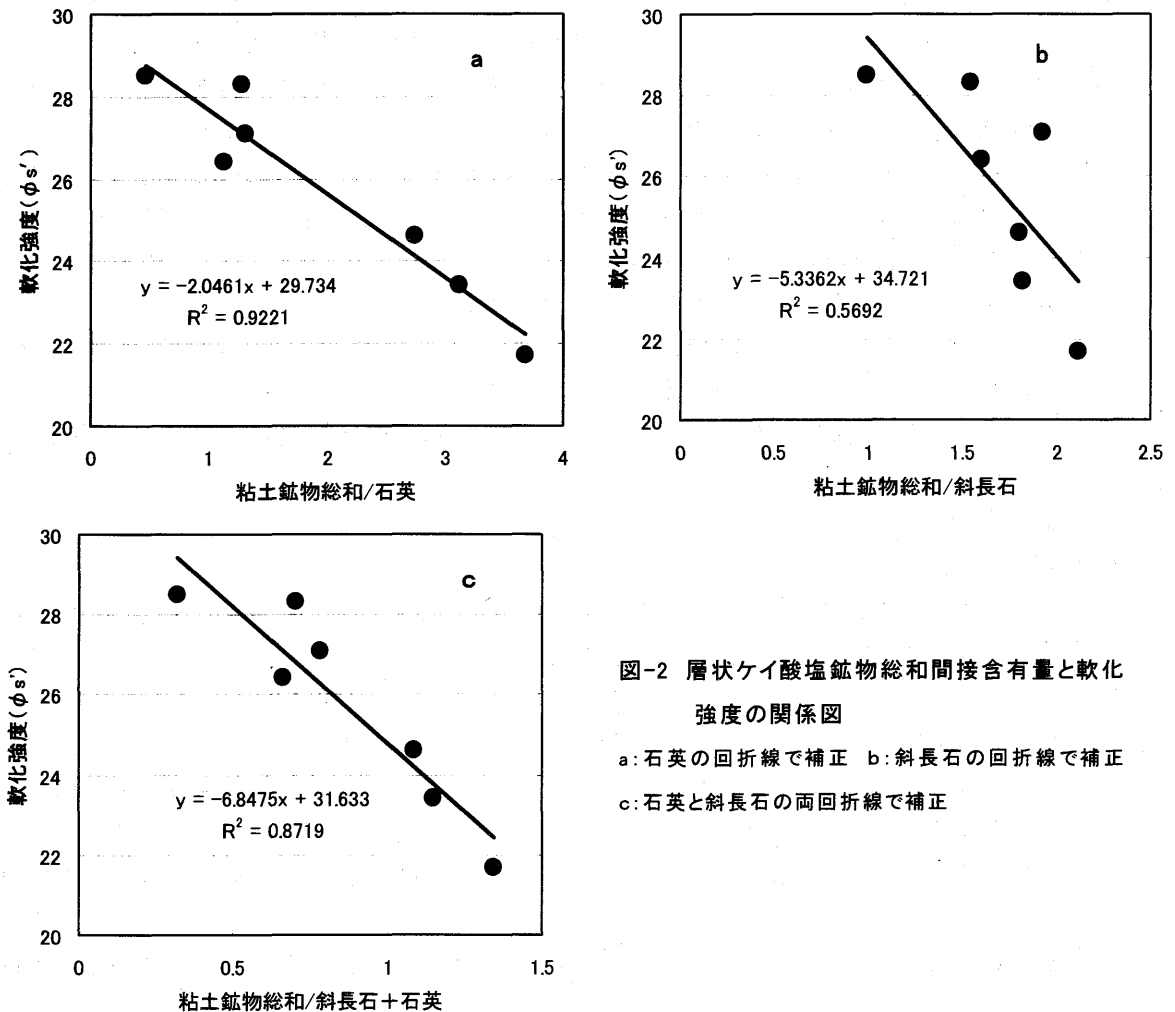


図-2 層状ケイ酸塩鉱物総和間接含有量と軟化強度の関係図

a: 石英の回折線で補正 b: 斜長石の回折線で補正
c: 石英と斜長石の両回折線で補正

の回折線を用いた補正が最も良い相関が得られた。斜長石は粒状の造岩鉱物であるが、風化や変質に弱く、比較的容易にスメクタイト (M) やカオリン鉱物 (K) に加水分解する。従って、このような斜長石の不安定さが補正に適さないためと考えられる。以下、石英の回折線で補正したグラフを中心に示す。

なおここで、造岩鉱物である緑泥石や白雲母が強度低下を促す粘土鉱物と言う事が可能かという問題がある。検討対象の岩石は、山地解体により固結度を失いかけた初生地すべりレベルの基盤岩である。このような基盤岩の場合、緑泥石や白雲母も細粒化してより粘土鉱物としての性質を示し、あるいは弱変質を受けてスメクタイトやセリサイトに変化している。そのためここでは、緑泥石と白雲母の含有量も強度低下の原因の一つと考える。

図-3に $2\theta = 6.2^\circ$ (緑泥石とスメクタイトの回折線が重なって出現する), $2\theta = 8.8^\circ$ (セリサイトと白雲母), $2\theta = 12.5^\circ$ (緑泥石とカオリン鉱物), $2\theta = 6.2 + 12.5^\circ$ (緑泥石+スメクタイト+カオリン鉱物) の回折線長さ比と軟化強度の関連性を示す。

これによると、セリサイトと白雲母の回折線長さ比と強度の間には、明瞭な相関性が認められない (図-3b)。これはセリサイトと白雲母の両性質が混在したデータを見ているためと考えられるが、詳細は今後の検討課題である。

緑泥石とスメクタイトの回折線長さ比と強度の相関関数も $R^2 = 0.67$ と良いとは言いがたい (図-3a)。これは、 $2\theta = 6.2^\circ$ (緑泥石+スメクタイト) 回折線の長さ (絶対値) が小さいため、回折線長さ比 $0 \sim 0.5$ と狭いばらつきで検討しているからと考える。一方、緑泥石とカオリン鉱物の回折線長さ比は、良好な相関が認められる (図-3c)。この両回折線を足して、緑泥石+スメクタイト+カオリン鉱物の回折線長さ比を見ると (図-3d)、図-3中で最も良好な相関が得られ、緑泥石・スメクタイト・カオリン鉱物の間接的含有量が増加すると、軟化強度は小さくなる。

しかし、結果として軟化強度と最も相関性の良かった条件は、個々の回折線ではなく層状ケイ酸塩鉱物の回折線の総和を石英で補正した、図-2aである。宜保ほか^{1) 2)}は、残留強度もスメクタイト単独の含有量よりも、配向性粘土鉱物 (緑泥石・スメクタイト・パーミキュライト・雲母) 総量との間に良い相関が認められたとしており、本検討でも総合的な粘土鉱物量という観点では、同様な結果が得られた。

5. 考察

本論の場合、強度は軟化強度であるため、基盤岩の風化・変質度合いやそれに対する耐性が強度を支配する主要因と考えている。基盤岩の風化・変質度合いは、含有する層状ケイ酸塩鉱物全ての種類や量で推測でき、残留強度で議論されている完全に粘土化した配向性粘土鉱物のみとは考えていない。そのため、カオリン鉱物などの1:1層構造を有する粘土鉱物も含めて考える。

風化・変質が進行しやすく、岩盤の弱線となりうる部分は、先ず緑泥石や白雲母といった造岩鉱物を初生相対的に多く含んでいる可能性が挙げられる。これはこの両鉱物が、細粒化や含水したり弱変質すると結晶構造が乱され、粘土鉱物としての性質を強く示したり、スメクタイト・セリサイトといった粘土鉱物に変質するためである。

また、風化・変質が進行した結果、スメクタイトやカオリン鉱物・セリサイトなど二次鉱物が多いところも、当然、脆弱化し強度も低くやはり弱線となる。

以上の理由から、泥～砂質片岩における初生地すべりの最終的強度と考える軟化強度は、

配向性粘土鉱物にカオリン鉱物・白雲母をなども含めた層状ケイ酸塩鉱物の間接的含有量に支配されている、と推察できる。

6. まとめ

泥～砂質片岩の強度（軟化強度）と層状ケイ酸塩鉱物の関係について検討した。結果を以下にまとめる。

- ① 層状ケイ酸塩鉱物の回折線長さを検討する上で、分析条件に左右されない補正方法は、石英の回折線で除した長さ比とするのが望ましい（図-2）。
- ② 軟化強度と層状ケイ酸塩鉱物の回折線長さの総和との間には、良好な関係が見られる。層状ケイ酸塩鉱物の間接的含有量が増加すると、軟化強度は小さくなる（図-2a）。
- ③ $2\theta = 8.8^\circ$ のセリサイトと白雲母の回折線長さ比と軟化強度は明瞭な相関性が見られない（図-3b）。
- ④ $2\theta = 6.2^\circ$ と $2\theta = 12.5^\circ$ 回折線の和すなわち、緑泥石+スメクタイト+カオリン鉱物の回折線長さ比と軟化強度は、良好な関係が導かれる（図-3d）。
- ⑤ 本論の結果は、確認された層状ケイ酸塩鉱物の回折線の総和を石英で補正した方法が一番良好な関係を示す。これは、軟化強度が岩石の風化・変質度合いやその耐性に支配されており、これを反映するものが、層状ケイ酸塩鉱物だからと言える。
- ⑥ 関係図（図-3a）を用いると、泥質～砂質片岩に関しては、層状ケイ酸塩鉱物の回折線の総和で、軟化強度の推定が可能となることが示唆される。

今後は緑色片岩類など化学組成の異なる片岩や、第三紀の堆積軟岩など続成作用の影響も見られる岩石の、層状ケイ酸塩鉱物と強度の関連性などについても、データを収集し、検討を続けたいと考える。

《参考文献》

- 1) 宜保清一ほか（2000）：地すべり土の残留強度と部地理的・鉱物学的性質との関係，農土論集，210，p. 785-789.
- 2) 宜保清一ほか（2003）：地すべり土のリングせん断強度に及ぼす鉱物組成の影響，地すべり，40（4），p. 1-7.
- 3) 吉村尚久編著：粘土鉱物と変質作用，地学双書

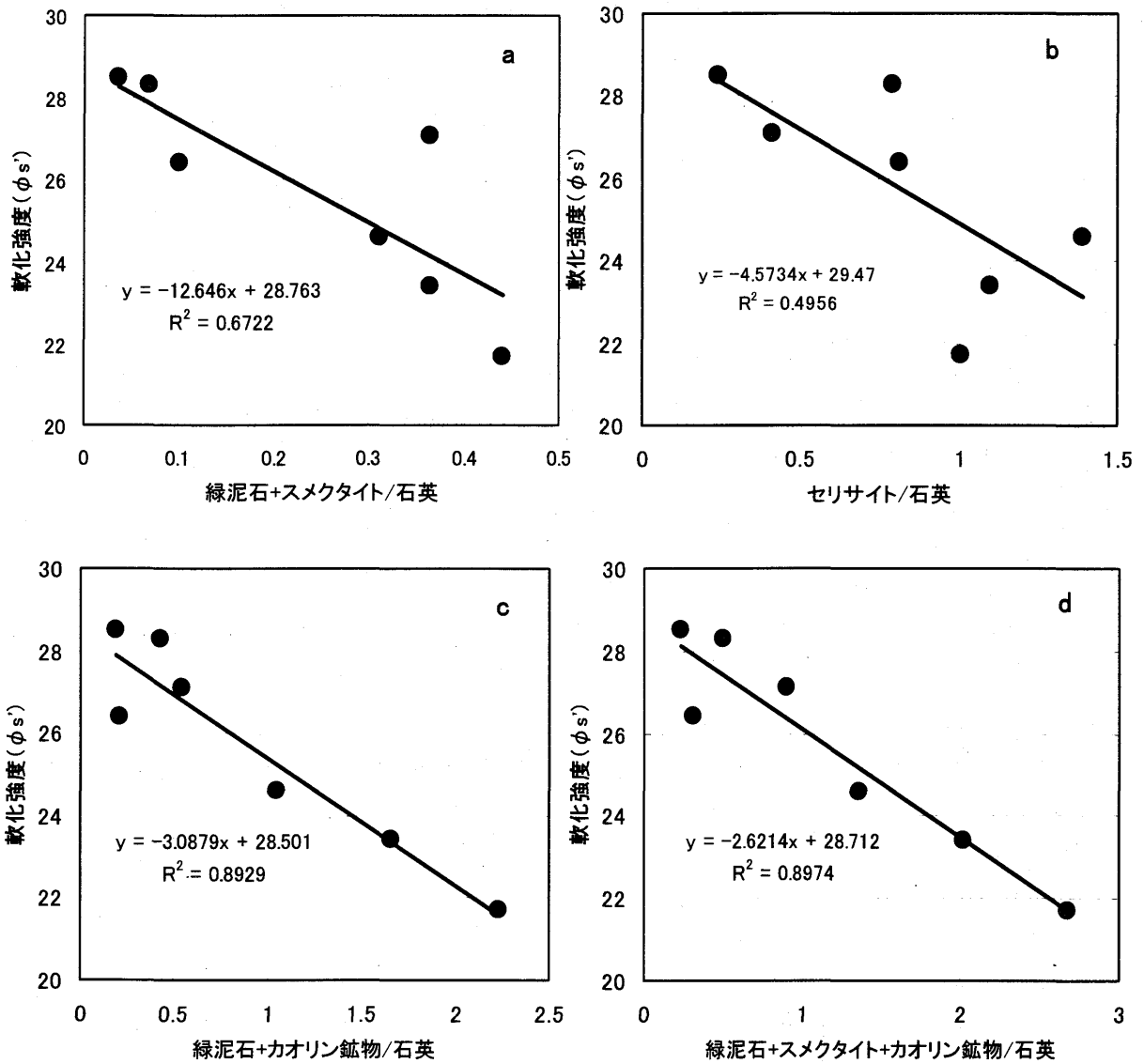


図-3 各回折線長さ比と軟化強度の関係図

a: $2\theta = 6.2^\circ$ 回折線 b: $2\theta = 8.8^\circ$ 回折線 c: $2\theta = 12.5^\circ$ 回折線 d: $2\theta = 6.2^\circ + 12.5^\circ$ 回折線

表-1 試料の回折線長さ・比・強度の一覧表

| 試料名 | 回折線長さ(cm) | | | | | 強度 軟化強度 (ϕ_s) | 長さ比 | | | | | | |
|-----------|-------------|-------------|--------------|--------------|------------|----------------------------|---------------------|----------------------|------------------------|--------|------|--------|--------------|
| | Ch+M | Se+Ms | Ch+K | Q | PI | | Ch+M+ Se+K/ Q | Ch+M+ Se+K/P I | Ch+M+S e+K/Q+ PI | Ch+M/Q | Se/Q | Ch+K/Q | Ch+M+K /Q |
| 鳥根泥質片岩 | 4.60 | 5.20 | 6.80 | 12.60 | 8.60 | 27.10 | 1.32 | 1.93 | 0.78 | 0.37 | 0.41 | 0.54 | 0.90 |
| | 1.65 | 13.30 | 3.50 | 16.40 | 11.50 | 26.40 | 1.13 | 1.60 | 0.66 | 0.10 | 0.81 | 0.21 | 0.31 |
| | 4.00 | 12.10 | 18.25 | 11.00 | 18.85 | 23.40 | 3.12 | 1.82 | 1.15 | 0.36 | 1.10 | 1.66 | 2.02 |
| | 4.50 | 10.25 | 22.80 | 10.20 | 17.70 | 21.70 | 3.68 | 2.12 | 1.35 | 0.44 | 1.00 | 2.24 | 2.68 |
| 鳥取泥質片岩 | 0.80 | 5.20 | 4.12 | 21.50 | 10.20 | 28.50 | 0.47 | 0.99 | 0.32 | 0.04 | 0.24 | 0.19 | 0.23 |
| | 0.80 | 9.15 | 5.00 | 11.60 | 9.70 | 28.30 | 1.29 | 1.54 | 0.70 | 0.07 | 0.79 | 0.43 | 0.50 |
| 松山砂質片岩 | 3.00 | 13.40 | 10.10 | 9.65 | 14.70 | 24.60 | 2.75 | 1.80 | 1.09 | 0.31 | 1.39 | 1.05 | 1.36 |
| 2θ | 6.2° | 8.8° | 12.5° | 20.8° | 28° | — | — | — | — | — | — | — | — |

Ch: 緑泥石 M: スメクタイト Se: セリサイト Ms: 白雲母 K: カオリン鉱物 Q: 石英 PI: 斜長石