

## 塩類溶脱によるクイッククレーの生成とイオン組成 の関係

安部, 宏

九州大学大学院生物資源環境科学府環境農学専攻生産環境科学教育コース土環境学研究室

へ, パニー

九州大学大学院生物資源環境科学府（国際開発特別研究コース）環境農学専攻生産環境科学教育コース土環境学研究室

大坪, 政美

九州大学名誉教授

東, 孝寛

九州大学大学院農学研究院環境農学部門生産環境科学講座土環境学研究室

他

<https://doi.org/10.15017/27347>

---

出版情報：九州大学大学院農学研究院学芸雑誌. 68 (2), pp.25-34, 2013-09-20. 九州大学大学院農学研  
究院

バージョン：

権利関係：

## 塩類溶脱によるクイッククレーの生成とイオン組成の関係

安部 宏<sup>\*1</sup>・ヘ パニー<sup>2</sup>・大坪 政美<sup>3</sup>  
東 孝寛・金山 素平

九州大学大学院農学研究院環境農学部門生産環境科学講座土環境学研究室  
(2013年4月26日受付, 2013年5月9日受理)

### Relation between Quick Clay Formation by Salt Leaching and Pore-water Ion Composition

Hiroshi ABE<sup>\*1</sup>, Phanny HE<sup>2</sup>, Masami OHTSUBO<sup>3</sup>,  
Takahiro HIGASHI and Motohei KANAYAMA

Laboratory of Environmental Soil Engineering, Division of Bioproduction Environmental Sciences,  
Department of Agro-environmental Sciences, Faculty of Agriculture,  
Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

#### 緒 言

粘土層に塩類溶脱が生じて、間隙水の塩濃度が低下した場合、粘土の地盤工学的性質が変化することが知られている。ノルウェー粘土においては、間隙水中の塩濃度がおよそ10g/L以下になると、乱さない粘土と練返し粘土のせん断強度、および液性限界が低下する(Mitchell, 1976)。また、練返しせん断強度と液性限界の低下は、カナダ東部粘土や有明粘土においても報告されている(Torrance, 1975; Ohtsubo *et al.*, 1982)。Torrance (1974) は、ノルウェー粘土の間隙水中の塩濃度が2g/L以下に低下すると圧密降伏応力が減少し、沈下が生じることを報告した。塩類溶脱による圧密降伏応力の低下は有明粘土にも見られた(大坪ら, 2008)。塩類溶脱が粘土層に起こる原因として、粘土層への被圧地下水の浸透、人為的要因として、地下水の汲み上げ、干拓に伴う表層水の粘土層への浸入、淡

水湖の建設による淡水の粘土層への浸透などが挙げられる(大坪, 2001)。

塩類溶脱による地盤工学的性質の変化の中で最も顕著なものは、練返し強度の減少である。練返し強度は、粘性土の骨組構造の指標である鋭敏比との関連で論じられることが多い。鋭敏比は、練返しした粘土試料のせん断強度に対する乱さない粘土試料のせん断強度の比として定義される。塩類溶脱により乱さない粘土の強度はほとんど変化せずに練返し強度のみが減少し、その結果鋭敏比は増加する。塩類溶脱が進行すると、練返し粘土は液状を示すようになり、鋭敏比は急激に増加する。このような粘土はクイッククレーと呼ばれる。Torrance (1983) は、クイッククレーを論じる際にノルウェーにおける鋭敏比の分類(*Norsk Geoteknisk Forening*, 1974)が有効であると述べている。これによるとクイッククレーは、鋭敏比が30以上、練返し後のせん断強度が0.5kPa以下の粘土と定義されている。

<sup>1</sup>九州大学大学院生物資源環境科学府環境農学専攻生産環境科学教育コース土環境学研究室

<sup>2</sup>九州大学院生物資源環境科学府(国際開発特別研究コース)環境農学専攻生産環境科学教育コース土環境学研究室

<sup>3</sup>九州大学名誉教授

<sup>1</sup>Laboratory of Environmental Soil Engineering, Course of Bioproduction Environmental Sciences, Department of Agro-environmental Sciences, Graduate School of Bioresource and Bioenvironmental

<sup>2</sup>Laboratory of Environmental Soil Engineering, Course of Bioproduction Environmental Sciences, Department of Agro-environmental Sciences(International Development Research Course), Graduate School of Bioresource and Environmental Sciences, Kyushu University

<sup>3</sup>Professor Emeritus, Kyushu University

\*Corresponding author (E-mail: whitefirebear@gmail.com)

クイッククレイは、スカンジナビア、カナダ東部、佐賀県有明海沿岸部の塩類溶脱を受けた粘土地盤に分布している (Bjerrum, 1954; Torrance, 1983; Ohtsubo *et al.*, 1982). また、塩類溶脱により粘土の練返し強度が著しく低下して、クイッククレイが形成されることが室内試験によって実証されている (Rosenqvist, 1953; Torrance, 1975; 大坪ら, 2008). 今回クイッククレイの強度特性を調べる目的で、サンプリングで得た自然状態の有明粘土に塩類溶脱を施し、クイッククレイの作成を試みたが、予想に反して練返し強度はほとんど低下せずクイッククレイは生成されなかった (He, 2012). その原因を探るために使用した粘土試料の溶脱前後の間隙水中の陽イオン組成を調べたところ、2価の陽イオンが卓越することがわかった. そこで間隙水の陽イオン組成がクイッククレイの発達を支配していると想定し、乱さない有明粘土を海水で飽和させ、その後塩類溶脱を行ったところクイッククレイが形成された. 本研究ではこのような実験結果をもとに、クイッククレイの生成と間隙水中のイオン組成との関係について報告する.

## 材料と方法

### 1. 試料

本研究で使用した乱さない状態の有明粘土は、2012年5月24日、佐賀県杵島郡白石町宮ノ下地内 (北緯33° 11' 8.5", 東経139° 6' 4", 標高4.39m) でシンウォールサンプリングにより採取した. 実験には、深さ5.00m～5.90mの乱さない試料を使用した. 試料の物理的性質は、表2の自然粘土の溶脱前の項に示す.

乱さない試料を5cm間隔に切り出し、計16個の粘土供試体を作製した. その後、各供試体の自然含水比を測定し、似通った含水比を持つ供試体を選定した. 次にこれらの供試体を135～145%、145～155%の含水比をもつ2つのグループに分けた. 間隙水中の塩濃度を考慮した含水比の計算には、(1)式 (大坪ら, 1987) を用いた.

$$w = \frac{1}{100/w' - m} \times 100 \quad (1)$$

$w$ : 真の含水比 [%]

$w'$ : 実測による含水比 [%]

$m$ : 間隙水中の水1g当りに含まれる塩の質量比 [g/g]

### 2. 塩類溶脱試験

#### (1) 海水飽和粘土の作製

自然含水比が145～155%の乱さない供試体群に人

工海水 (MARINE ART SF-1, 富田製薬株式会社) を浸透させて海水飽和粘土を作製した. 海水の浸透期間は15日間とした. 人工海水のイオン組成は表1に示す. 浸透の要領は以下の通りである. まず図1のように供試体を標準圧密試験容器にセットした. この時、供試体は直径6cm、高さ2cmの円柱状に成形した. その後、80cmの初期水頭水位のもとで供試体に下方から上方に向かって人工海水を浸透させた. 通水期間中は24時間ごとに水頭が80cmとなるように、圧密試験機に繋がれたビュレットに給水した. 80cmの水頭 (7.85 kPa) に起因する透水力により供試体が圧密される恐れがあるが、実際には一面せん断試験において25～26kPaの有効土被り圧に相当する垂直応力が載荷されるので水頭の影響は無視できる.

#### (2) 塩類溶脱試験

塩類溶脱試験では、自然粘土と海水飽和粘土に蒸留水を浸透させ、間隙水中の塩類を溶脱させた (図1). 自然粘土とは、海水飽和の処理を施していない粘土試料 (自然含水比135～145%の供試体) である. 自然粘土の間隙水中のイオン濃度は、表2の溶脱前の項に示す通りである. 海水飽和粘土の間隙水中のイオン濃

表1 人工海水のイオン組成 (実測値)

MARINE ART SF-1	
pH	8.3
NaCl [g/L]	27.7
Na <sup>+</sup> [mg/L]	11000
K <sup>+</sup> [mg/L]	350
Ca <sup>2+</sup> [mg/L]	340
Mg <sup>2+</sup> [mg/L]	7.6
Cl <sup>-</sup> [mg/L]	19800
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> [mg/L]	2420
EC [mS/cm]	79

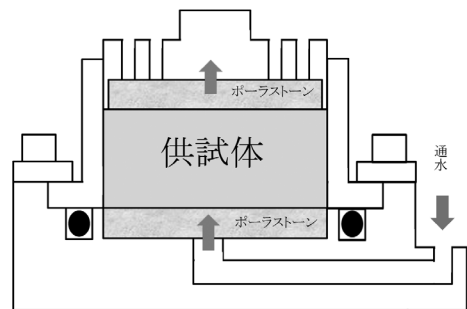


図1 供試体への通水

表2 自然粘土の工学的性質と間隙水のイオン組成

		溶脱前	溶脱後
粒度組成	[%]		
粘土	(< 5 $\mu$ m)	62	-
シルト	(5 ~ 75 $\mu$ m)	32	-
砂	(> 75 $\mu$ m)	6	-
液性限界	[%]	102.9	98.6
塑性限界	[%]	44.6	48.6
自然含水比	[%]	144	140
液性指数		1.70	1.83
不攪乱強度	[kPa]	19.05	17.32
練り返し強度	[kPa]	0.420	0.404
鋭敏比		45	43
pH		8.6	8.5
NaCl 濃度	[mg/L]	500	200
電気伝導度	[mS/cm]	6.2	2.8
陽イオン濃度	[mg/L]		
	Na <sup>+</sup>	150	49
	K <sup>+</sup>	39	22
	Ca <sup>2+</sup>	440	270
	Mg <sup>2+</sup>	232	162
陰イオン濃度	[mg/L]		
	Cl <sup>-</sup>	71	117
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	5000	350
陽イオン総量	[mg/L]	861	503
2価陽イオンの割合	[%]	78	86

度は、表3の溶脱前の項に示されている。塩類溶脱においても、24時間ごとに水頭が80cmになるように、蒸留水をビュレットに給水した。溶脱期間は自然粘土、海水飽和粘土ともに16日間とした。溶脱期間中に、24時間ごとに図1の上部ポーラストーンから浸出する供試体の間隙水を採取し、各種のイオン濃度を測定した。Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、NaCl濃度、電気伝導度 (EC)、pHの測定には、コンパクト水質計 (ユーエスアイ(株)、LAQUAtwinシリーズ) を用いた。Na<sup>+</sup>についてはLAQUAtwin B-722、Ca<sup>2+</sup>についてはLAQUAtwin B-751、K<sup>+</sup>についてはLAQUAtwin B-731、NaCl濃度についてはLAQUAtwin B-721を使用した。上記4つの水質計はすべてイオン電極法を原理としている。ECについてはLAQUAtwin B-771 (交流2極法)、pHについてはLAQUAtwin B-712 (ガラス電極法) を使用した。Mg<sup>2+</sup>の測定には原子吸光分光分析装置 (サーモエレクトロン(株)、HM-30G) を使用した。Cl<sup>-</sup>イオンとSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>イオンの測定には吸光光度計 (メルク(株)、硫酸セルテストスペクトロクォント) を使用した。

溶脱試験中の浸透水量の時間的変化をもとに、各供

試体に浸透した蒸留水の体積と時間に応じた透水係数を算出した。時間ごとの蒸留水の減少量、つまりスタンドパイプ内の水位 (水頭) 変化から、変水位透水試験で用いられる (2) 式をもとに透水係数を計算した。

$$k = \frac{2.3 aL}{A(t_2 - t_1)} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad (2)$$

$k$ : 透水係数 [cm/s],  $a$ : スタンドパイプの断面積 [cm<sup>2</sup>],  $t$ : 時間,  $L$ : 供試体の高さ [cm],  $A$ : 供試体の断面積 [cm<sup>2</sup>],  $h_1$ :  $t=t_1$  のときの水頭 [cm],  $h_2$ :  $t=t_2$  のときの水頭 [cm]

### 3. 強度試験

#### (1) 圧密定体積一面せん断試験

自然粘土と海水飽和粘土の溶脱前後の供試体に対して圧密定体積一面せん断試験を行い、非排水せん断強度  $S_u$  ( $= \tau_f$ : せん断応力  $\tau$  の最大値) を求めた。圧密圧力としては、サンプリング前に原地盤で各供試体を受けていた有効土被り圧を用いた。

#### (2) ベーンせん断試験

圧密定体積一面せん断試験後の各供試体を十分に練

表3 海水飽和粘土の工学的性質と間隙水のイオン組成

		溶脱前	溶脱後
粒度組成	[%]		
粘土	(< 5 $\mu$ m)	62	-
シルト	(5 ~ 75 $\mu$ m)	32	-
砂	(> 75 $\mu$ m)	6	-
液性限界	[%]	98.4	70.1
塑性限界	[%]	49.5	45.7
自然含水比	[%]	146	151
液性指数		1.65	4.32
不攪乱強度	[kPa]	15.92	15.01
練り返し強度	[kPa]	0.493	0.0154
鋭敏比		32	974
pH		8.35	8.3
NaCl 濃度	[mg/L]	27749	575
電気伝導度	[mS/cm]	44	0.34
陽イオン濃度	[mg/L]		
	Na <sup>+</sup>	9300	110
	K <sup>+</sup>	320	5
	Ca <sup>2+</sup>	390	3
	Mg <sup>2+</sup>	246	0.2
陰イオン濃度	[mg/L]		
	Cl <sup>-</sup>	18900	69
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	4100	53
陽イオン総量	[mg/L]	10256	118
2価陽イオンの割合	[%]	6.2	2.7

返し、その試料を使用してベーンせん断試験を行った。非排水せん断強度（ベーンせん断強度） $S_{ur}$ は(3)式を用いて測定した最大トルクより求めた。

$$S_{ur} = \frac{M_{max}}{\frac{\pi D^2 H}{2} + \frac{\pi D^3}{12}} \quad (3)$$

$M_{max}$ ：最大トルク [kNm]， $H$ ：ベーンの高さ [cm]，

$D$ ：ベーンの直径 [cm]

鋭敏比 $S_r$ は、一面せん断試験とベーンせん断試験で得た $S_u$ と $S_{ur}$ を用いて(4)式で求めた。

$$S_r = \frac{\text{乱さない試料のせん断強度 } S_u}{\text{練り返し試料のせん断強度 } S_{ur}} \quad (4)$$

### (3) 塩類溶脱前後の供試体の間隙水に含まれるイオン濃度の測定

強度測定試験終了後の供試体の間隙水を採取し、イオン濃度を測定した。間隙水の採取方法については、練返した供試体の間隙水をミニポアフィルターを介して真空ポンプで吸引し、フィルターから浸出する間隙水を収集する方式を採用した。

### (4) 液性限界と塑性限界の測定

供試体の含水比は液性限界に比べて極めて高いため、まず供試体の間隙水を真空ポンプによって吸引して含水比を液性限界以下に下げ、その後蒸留水を添加して液性限界を測定した。また、同じ試料を用いて塑性限界も測定した。いずれの測定も、JIS規格(JIS A 1205)に従った。

## 結 果

### 1. 間隙水のイオン組成の変化

#### (1) 塩類溶脱前後の間隙水のイオン濃度

塩類溶脱前後の自然粘土および海水飽和粘土の間隙水のイオン濃度をそれぞれ表2と表3に示す。海水飽和粘土の溶脱前の間隙水は、海水飽和のために用いた人工海水の塩濃度(36.4g/L、表1)の影響を受けて高いNaCl濃度、Na<sup>+</sup>濃度、電気伝導度を示した。これに比べて自然粘土のNaCl濃度、Na<sup>+</sup>濃度、電気伝導度は著しく低い値を示した。一方、2価陽イオンの総量は両粘土の間に大きな違いはなかった。しかし、2価陽イオンの割合は海水飽和粘土より自然粘土が際立っ

表4 塩類溶脱前後の各供試体の鋭敏比

		含水比 [%]	乱さない粘土強度 [kPa]	練返し粘土強度 $S_{ur}$ [kPa]	鋭敏比 $S_u/S_{ur}$
自然粘土	溶脱前	144	19.05	0.420	45
		141	18.43	0.420	44
	溶脱後	140	17.32	0.404	43
		116	16.71	0.578	29
		119	16.46	0.542	30
		148	15.67	0.473	33
海水飽和粘土	溶脱前	144	16.16	0.512	32
		139	17.05	0.488	35
		150	14.50	0.017	843
	溶脱後	152	14.64	0.019	790
		150	15.88	0.010	1513

で大きかった。

## (2) 塩類溶脱試験時の浸出水中のイオン濃度の時間的变化

塩類の溶脱試験中のイオン濃度の変化と pore volume (pv) の関係を図2から図6に示す。pore volume とは、供試体を通じた蒸留水の体積を、供試体の間隙の体積で除した値である。つまり、 $pv=1$  が示す意味は、供試体の間隙の体積と同じ量（体積）の蒸留水が流れたということである。両粘土の浸出水中のイオン組成の推移には様々な差異が見られた。その一つにイオン濃度がほぼ一定となるときの pv の違いがある。即ち、同じ期間蒸留水を浸透させたにもかかわらず、海水飽和粘土では自然粘土の約半分の pv の蒸留水しか流れていない。この原因は両者の透水係数の違いにある。図8に示す通り、海水飽和粘土は自然粘土よりも一貫して透水係数が小さい。この透水係数の差が両粘土の pv の違いを生じさせた原因である。

各試料の塩類溶脱の程度は、NaCl 濃度の変化（図3）、EC の変化（図4）、陰イオン濃度変化（図6）から知ることができる。NaCl 濃度、EC はいずれも pv の増加とともに低下しているの、各試料の塩類溶脱は確実に進んでいるといえる。Cl<sup>-</sup> 濃度と NaCl 濃度の変化は類似しているの、Cl<sup>-</sup> 濃度の減少は NaCl 濃度の減少と同義である。pH は、自然粘土で 7.6～8.1、海水飽和粘土で 7.9～9.0 の範囲で変化した。このように、自然粘土と海水飽和粘土の塩類溶脱の低下は、同様の傾向を示す。

## 2. せん断強度

### (1) 乱さない粘土のせん断強度

図9は、各試料の圧密定体積一面せん断試験による、乱さない試料のせん断強度  $S_u$  ( $\tau_f$ ) の測定結果を示す。いずれの試料についても、溶脱前の  $S_u$  が溶脱後の  $S_u$  より大きい傾向が認められる。また、溶脱前と溶脱後の試料の間に、 $\tau_f$  (最大せん断応力) が生じるせん断変位に違いが見られた。溶脱後のせん断応力のピークは、溶脱前のそれと比べて大きなせん断変位で現れている。一面せん断試験は、複数の試料について行ったので、その結果を表4に示す。溶脱前と溶脱後の試料の  $S_u$  とせん断変位については、図9と同様の傾向が認められた。表2と表3には、表4の強度と鋭敏比の平均値を示している。

### (2) 練返し粘土のせん断強度

練返しした自然粘土と海水飽和粘土についてのベーンせん断試験の結果を図10と図11に示す。自然粘土（図10）では、溶脱前と溶脱後のせん断強度はあまり変わらないが、海水飽和粘土（図11）では溶脱後のせん断強度が著しく低下している。この時の溶脱後の練返しした海水飽和粘土は液状を示した。以上の結果も含め、その他複数の供試体について求めた練返しせん断強度（以下、練返し強度と記す）ならびに鋭敏比の結果を表4に示す。溶脱により海水飽和粘土の鋭敏比は著しく上昇したが、自然粘土のそれはほとんど変化しなかった。

### (3) 液性限界、塑性限界の変化

表2と表3に、各試料の溶脱前後の液性限界、塑性限界、液性指数を示す。海水飽和粘土では、溶脱により液性限界が約3割低下し、液性指数は2.6倍に増加した。一方自然粘土では、溶脱による液性限界の変化はほとんど見られなかった。

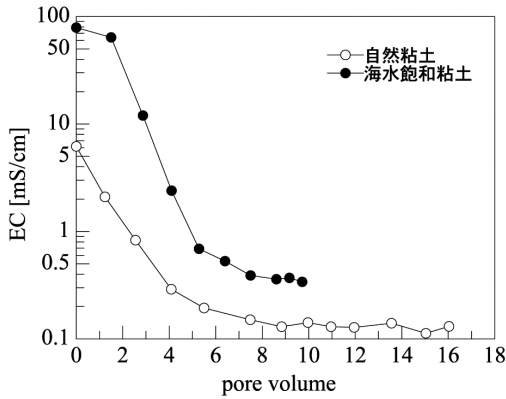


図2 電気伝導度 (EC) の変化

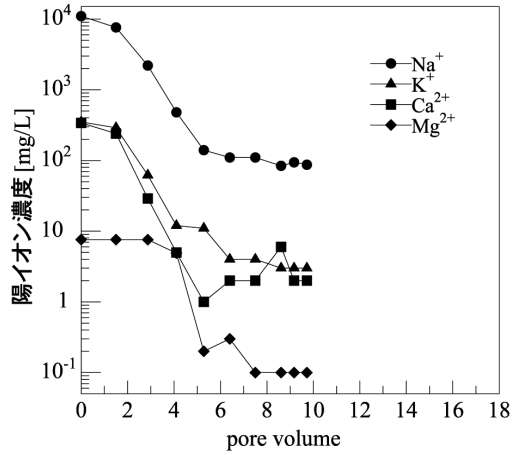


図5 海水飽和粘土の間隙水の陽イオン濃度変化

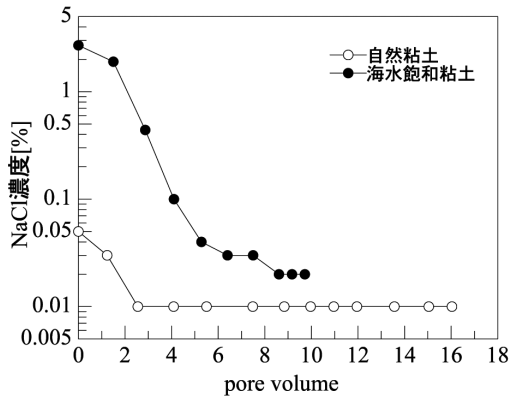


図3 NaCl濃度の変化

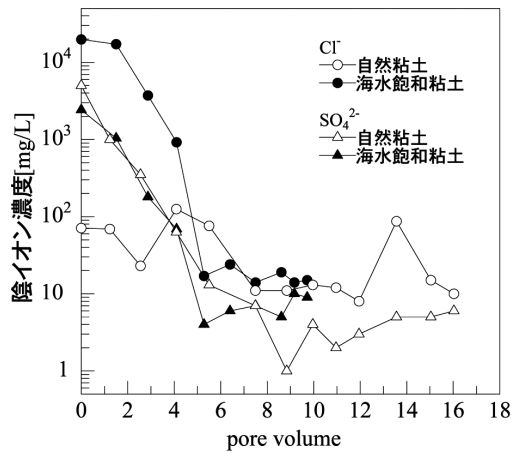


図6 陰イオン濃度変化

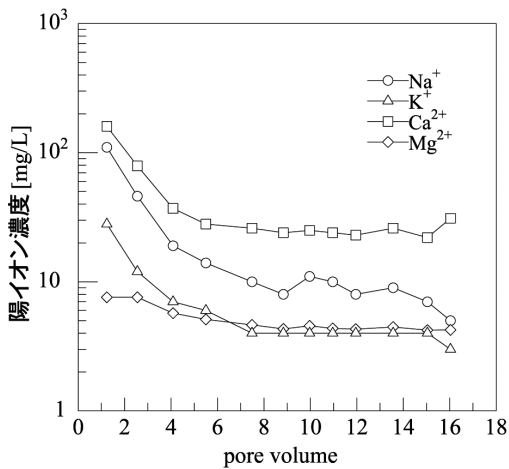


図4 自然粘土の間隙水の陽イオン濃度変化

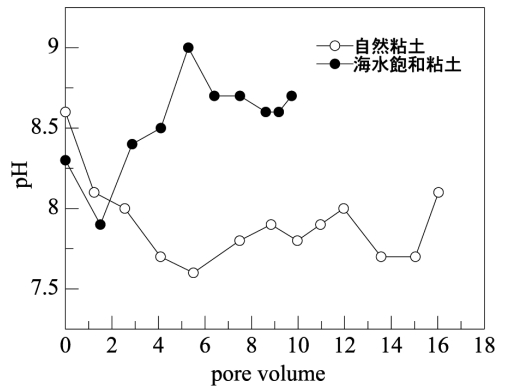


図7 pHの変化



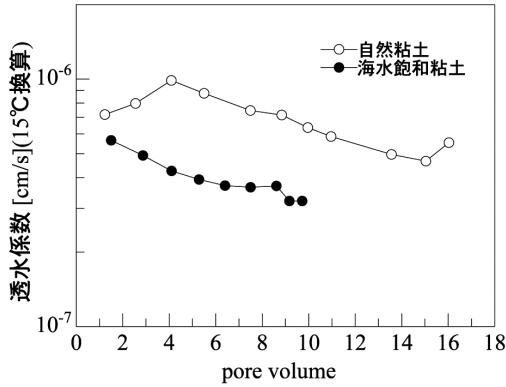


図8 透水係数の変化

## 考 察

本研究では、間隙水の陽イオン組成が自然粘土とは異なる供試体を人為的に作製することに成功した。具体的には、乱さない状態の粘土試料に海水を浸透させることで2価陽イオンの割合が高い供試体を作製した。(表3)。これは1価陽イオンの割合が低い自然粘土(表2)とは対照的である。

表4によると、塩類溶脱により海水飽和粘土の鋭敏比は著しく増加したが、自然粘土の鋭敏比はほとんど変化しなかった。これは2つの粘土の練返し強度の違いに起因する。海水飽和粘土の練返し強度は、自然粘土のそれに比べて際立って低い値を示しており、これ

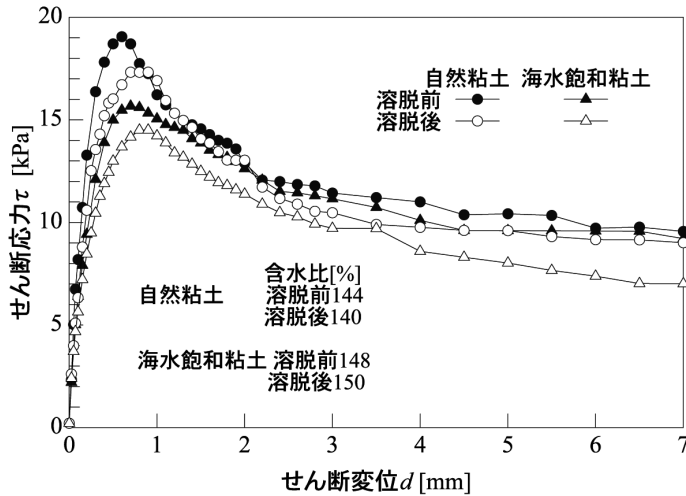


図9 圧密定体積一面せん断試験結果

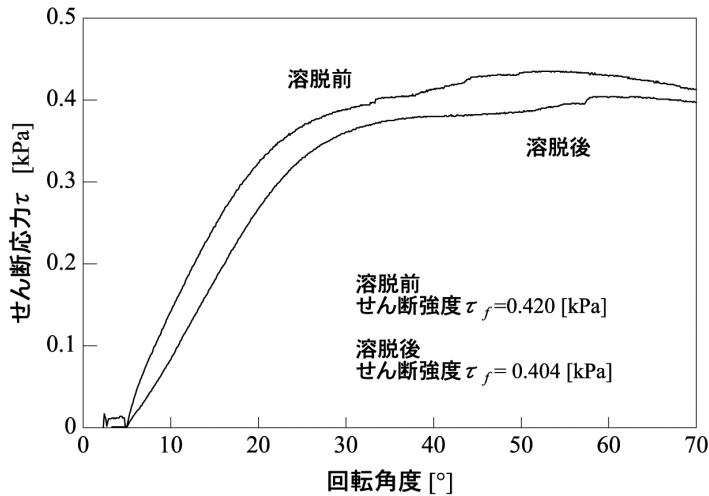


図10 自然粘土のバーンせん断試験結果



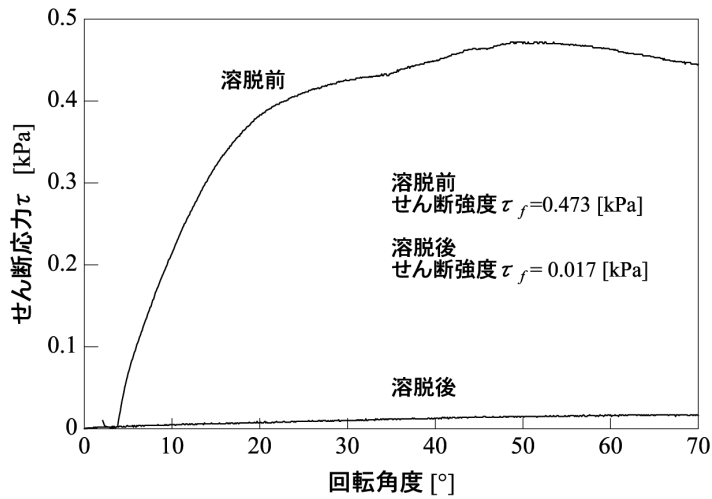


図11 海水飽和粘土のペーンせん断試験結果

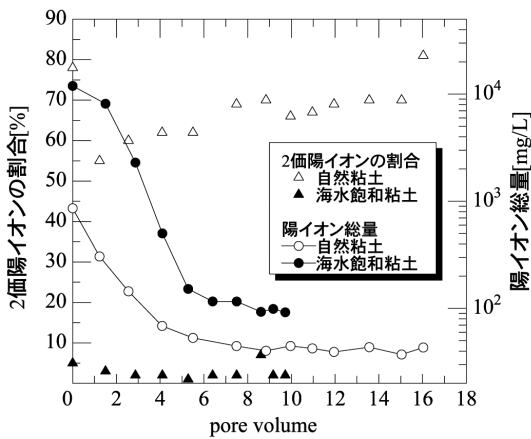


図12 陽イオン総量と2価陽イオンの割合

が鋭敏比を大幅に高めている。練返し強度は、粘土の粒子間力によって決まる。粒子間力はファンデルワールス力による引力と拡散二重層の重なりによって生じる斥力の総和である。ファンデルワールス力は、粒子間距離が一定の場合、陽イオン濃度やその種類とは関係なく一定である。一方斥力については、間隙水の陽イオンの濃度が低いほど、拡散二重層は厚くなり、その結果浸透圧に起因した斥力は増加する。したがって粒子間力は斥力が優勢となり、練返し強度は低下する(足立・岩田, 2003; Tan *et al.*, 2007)。これまでの研究において、練返し粘土の間隙水の陽イオン組成を変化させることで、練返し強度の増加と減少が生じることが確認されている(大坪ら, 1987)。

海水飽和粘土の陽イオン濃度は、溶脱により非常に低い値まで低下し、しかも1価の $\text{Na}^+$ が支配的である(表3)。これが練返し強度の著しい低下に寄与している。一方自然粘土については、溶脱により $\text{Na}^+$ 濃度は著しく低下したが、2価の陽イオンはそれほど低下せず、陽イオン総量に占める2価陽イオンの割合は、86%と極めて高い(表2)。この値は海水飽和粘土での3%に比べてはるかに大きい値である。これが溶脱後の自然粘土の練返し強度が減少しない理由である。ノルウェー粘土においても、塩類溶脱により練返し強度が低下せず、クイックレーが生成されていない例が報告されている(Moum *et al.*, 1971)。

液性限界も溶脱により変化したが、その程度は自然粘土より海水飽和粘土が大幅に大きい(表2, 表3)。これも練返し粘土の場合と同様に、陽イオン総量に占める2価陽イオンの割合が両粘土の間で異なることに起因している。

電気二重層の考え方をもとに、海水飽和粘土の透水係数が溶脱とともに、自然粘土のそれよりも低下した原因を説明できる。溶脱により間隙水(自由水)の陽イオン濃度が低下した上に、二つの粘土の間隙水中の1価陽イオンの割合を比べると、自然粘土より海水飽和粘土がより大きい(表2, 表3)。そのため、海水飽和粘土の拡散二重層が自然粘土のそれと比べて厚くなり、間隙を流れる水の動きがより拘束されるため、その結果透水係数が著しく低下する。

図12は、間隙水中の陽イオン総量と2価陽イオンの割合の変化である。陽イオン総量は、自然粘土、海水

飽和粘土とともに溶脱により急激に減少した。一方、2価陽イオンの割合については、両粘土とも溶脱終了まで溶脱初期の割合が概ね維持されている。つまり、陽イオン総量が減少しているにもかかわらず、1価の陽イオンと2価の陽イオンの比率は大きく変化しなかった。また、各陽イオン濃度の変化を示す図4と図5によると、自然粘土、海水飽和粘土ともに、各陽イオンの曲線は交わることはなく、溶脱直後の濃度比率が維持されつつ陽イオン濃度は減少した。この事実は、乱さない粘土における溶脱前の間隙水の陽イオン組成から、溶脱による練返し強度の低下、鋭敏比の増加の程度を推測できることを示唆している。

## ま と め

本研究で得られた成果は、以下のようにまとめることができる。

- (1) 自然粘土、海水飽和粘土の間隙水中のNaCl濃度は、塩類溶脱によりそれぞれ0.50g/Lから0.20g/Lに、27.7g/Lから0.58g/Lに低下した。
- (2) 自然粘土の間隙水の陽イオン組成は、溶脱前も溶脱後も2価陽イオンが支配的であり、その割合はそれぞれ78%と86%であった。一方、海水飽和粘土の間隙水中の陽イオンの割合は溶脱前で6.2%、溶脱後で2.7%であった。
- (3) 塩類溶脱中の供試体の透水係数は、海水飽和粘土より自然粘土の方が大きかった。これは両粘土の2価陽イオンの割合が違うことに起因する。
- (4) 乱さない状態の自然粘土、海水飽和粘土のせん断強度は、塩類溶脱によりわずかに低下し、ピーク強度が現われるせん断変位は大きくなった。
- (5) 塩類溶脱により自然粘土の練返し強度はほとんど変化しなかった。従って鋭敏比の変化も認められなかった。これは間隙水中の2価陽イオンが支配的であることに起因する。一方海水飽和粘土では、塩類溶脱により練返し強度が著しく低下し、鋭敏比は790～1500となり、クイッククレーが形成された。これは、Naが間隙水中の主要な陽イオンであることに起因する。
- (6) 塩類溶脱により自然粘土の液性限界はほとんど変化しなかったが、海水飽和粘土の液性限界は大幅に減少した。これに対応して海水飽和粘土の液性指数も大きく増加した。

## 要 約

乱さない有明粘土に人為的に塩類溶脱を施すことにより、クイッククレーが形成されることがこれまで報

告されている。しかし、佐賀県白石町から採取した乱さない有明粘土に塩類溶脱を施したが、クイッククレーは形成されなかった。その原因を明らかにするために粘土の間隙水の化学性を調べた結果、クイッククレーが形成されないのは2価陽イオンが支配的であることが理由であった。そこで、間隙水の陽イオン組成がクイッククレーの発達を支配していると想定し、乱さない有明粘土を海水で飽和、その後塩類溶脱を行ったところクイッククレーが形成された。本報告では、これらの実験結果をもとに、陽イオン組成がクイッククレー形成にどのように関係しているかを記している。採取直後の粘土試料の間隙水は78%の2価陽イオンから成り、試料に塩類溶脱処理を施した後も2価陽イオンの割合はほとんど変わらなかった。そのため塩類溶脱によっても練返し強度はほとんど変化せず、鋭敏比も変化しなかった。一方、海水で飽和した粘土試料の間隙水はナトリウムが支配的であり、2価陽イオンはわずか6%であり、塩類溶脱後も3%に維持された。塩類溶脱により練返し強度は著しく低下し、その結果、鋭敏比は790～1500まで増加した。

キーワード：有明粘土、鋭敏比、塩類溶脱、クイッククレー、せん断強度

## 文 献

- 足立泰久・岩田進午 2003 土のコロイド現象 土・水環境の物理化学と工学的基礎。学会出版センター、74-80、310-334頁
- Bjerrum, L. 1954 Geotechnical properties of Norwegian marine clays. *Geotechnique*, 4 : 46-69
- He, P. 2012 Consolidation characteristics of artificially prepared quick clay. *Urban Geotechnics for Sustainable Development*, JS-Seoul 2012 : 99
- Mitchell, J. K. 1976 *Fundamentals of soil behavior*. John Wiley & Sons Inc., New York City (USA), pp.61-69
- Moum, J., T. Løken, T. and Torrance, J. K. 1971 A geochemical investigation of the sensitivity of a normally consolidated clay from Drammen, Norway, *Geotechnique*, 21 (4) : 329-340.
- Norsk Geoteknisk Forening 1974 Retningslinjer for presentasjon av geotekniske undersøkelser, Oslo, 16
- Ohtsubo, M., M. Takayama and K. Egashira 1982 Marine quick clays from Ariake Bay area, Japan. *Soils and Foundations*, 22 (4) : 71-80
- 大坪政美・高山昌照・江頭和彦 1987 低膨潤性スメクタイト質海生粘土の練返し強さに及ぼす塩濃度、陽イオン種の影響。土質工学会論文報告集, 27 : 85-92
- 大坪政美 2001 塩類溶脱が有明粘土の圧密特性に及

- ぼす影響. 低平地研究, **10** : 25-30
- 大坪政美・大原広宣・東 孝寛・金山素平・中野晶子  
2008 塩類溶脱が有明粘土の圧密特性に及ぼす影響. 粘土科学, **47**(2) : 76-81
- Rosenqvist, I. T. 1959 Consideration on the sensitivity of Norwegian quick-clays. *Geotechnique*, **3** : 195-200
- Tan, T. S., Phoon, K. K., Hight, D. W. and Leroueil, S. 2007 *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*. Taylor & Francis Group, New York City (USA), pp.1893-1927
- Torrance, J. K. 1974 A laboratory investigation of the effect of leaching on the compressibility and shear strength of Norwegian marine clay. *Geotechnique*, **24**(2) : 155-173
- Torrance, J. K. 1975 On the role of chemistry in the development and behavior of the sensitive marine clays of Canada and Scandinavia. *Canadian Geotechnical Journal*, **12** : 326-335
- Torrance, J. K. 1983 Towards a general model of quick clay development. *Sedimentology*, **30**, 547-555

## Summary

Several studies have reported that quick clay can be formed artificially by salt-leaching treatment on undisturbed Ariake clay. In the present study, however, artificial salt-leaching on the undisturbed clay taken from a site in Shiroishi-cho of Saga Prefecture failed to produce quick clay. To identify the cause, pore-water chemistry of the clay was assessed and the predominance of divalent cation in pore water was found to be responsible for the poor development of quick clay. Assuming that cation composition in pore water controls the development of quick clay, the undisturbed Ariake clay was saturated with seawater followed by artificial salt-leaching, resulting in the formation of quick clay. Based on these findings, how cation composition in pore water is related to whether quick clay develops or not is described in the present paper. Pore water of the original undisturbed Ariake clay after sampling was occupied with as much as 78% divalent cation, which was almost maintained after salt-leaching. Because of this, the remolded strength of the clay was not changed due to salt-leaching, leading to unchanged sensitivity as well. On the other hand, pore water of the seawater-saturated clay was dominated with sodium and divalent cation percentage was only 6%, which was maintained at 3% after salt-leaching. The remolded strength of the seawater-saturated clay dropped dramatically due to salt-leaching, resulting in an increase in the sensitivity of the clay up to the level of 790 to 1500.

**Key words:** Ariake clay, quick clay, salt leaching, sensitivity, shear strength