

## Shear Stiffness of Lake-Bed Clay in Baikal Lake

兵動正幸	Masayuki HYODO	(山口大学大学院)
宮北志野	Shino MIYAKITA	(山口大学大学院)
鈴木素之	Motoyuki SUZUKI	(山口大学大学院)
金郁基	Uk-Gie KIM	(山口大学大学院)
吉本憲正	Norimasa YOSHIMOTO	(山口大学大学院)
西尾伸也	Shinya NISHIO	(清水建設技術研究所)
山下 聡	Satoshi YAMASHITA	(北見工業大学)

ロシアバイカル湖湖底から採取した堆積粘土を対象にベンダーエレメント試験を行いせん断波速度および初期せん断剛性率を求めわが国の海成粘土と比較を行った。その結果、バイカル粘土のせん断波速度  $V_s$  およびせん断剛性率  $G$  は他の海成粘土のもの比べて高い値を示した。SEM 観察を行ったところ、バイカル粘土においては堅固な骨格構造が認められ、比較的粒径の大きい土粒子すなわち破碎した石英がリンケージを構成していることが明らかとなり、このことがバイカル湖底堆積土の剛性が海成粘土と比べて高くなった原因の一つであると考えられた。

キーワード：バイカル粘土，ベンダーエレメント試験，せん断剛性率，SEM 観察 (IGC : B-11, D-02, E-8)

## 1. はじめに

ロシアのバイカル湖湖底泥火山のメタンハイドレート堆積環境調査の一環として、堆積粘土の一連の物性を調べた<sup>1)</sup>。バイカル湖は、水深が最大で 1500m を超える淡水湖である。その湖底堆積粘土を採取して、三軸試験機においてベンダーエレメント試験（以下、BE と略記）を行いそのせん断波速度を測定した。土のせん断波速度や初期せん断剛性率は、室内および原位置いずれにおいても計測可能な物性であり、動的な情報を与えるだけでなく、他の土質定数との相関を得る上でも重要なパラメータであると考えられる。山田ら<sup>2)</sup>は、これまで様々な塑性を有する粘土や砂粘土混合土についての動的変形に関する一連の実験を行ってきた。本ノートは、バイカル湖湖底粘土のせん断波速度  $V_s$  および初期せん断剛性率  $G$  と山田らの行ったわが国の海成粘土のそれらとを比較しその違いについて考察を行ったものである。

## 2. 試料採取現場の概況および試料

バイカル湖は、中央シベリアの南西部に位置し、世界の淡水の 20% を蓄える湖である。最大透明度は 40m を超えるとも言われ、その大きさは、長さ 639km、幅は最大で 80km、平均 48km、湖面積は 4 万 6000km<sup>2</sup> で琵琶湖の約 64 倍、深さは最大 1643m、平均で 730m という大きな淡水湖である。今回用いた試料は、筆者らがバイカル湖で 2005 年に採取した不攪乱試料である。試料

のサンプリングは船上より、長さ 5m、総重量約 700kg の重力式コアサンプラーを船上からウインチでつないで湖底に落下させて行った。その際、バイカル湖でも表層型のメタンハイドレートが存在する水深 1000m 超の泥火山において、エコーサウンダーにより水やガスの湧出により発生するとされるガスフレアーを確認してその付近において行った。いくつかのコアでメタンハイドレートが確認されたが、今回実験に用いたコア試料はメタンハイドレートが含まれないものについて、出来るだけ乱さないようにして持ち帰ったものである。しかしながら、これらはメタンハイドレートが存在する付近での試料であり、メタンハイドレート分解によるガスの移動など少なからずその影響を受けているものと推察される。1 本のコアの中から、湖底より深度方向に 3m まで 100cm 毎に試料を取り出して供試体を作成し、BE 試験を行った。一方、海成粘土は、日本の港湾で採取した粘土<sup>2)</sup>を攪拌し、予圧密セルで 3t 法により再構成したものである。採取地点はそれぞれ、Ariake A: 熊本県緑川河口、Ariake C: 佐賀県六角川河口、Itukaichi: 広島県五日市港、Onoda: 山口県小野田港である。各試料の物理的性質を表-1 に、バイカル粘土 (Baikal Clay) の粒径加積曲線を図-1 に示す。バイカル粘土の 100, 200, 300 の表示はそれぞれ湖底からの深さ (cm) を意味する。表-1 から、バイカル粘土の土粒子比重  $G_s$  は、海成粘土のそれに比べ大きい値であることがわかる。また、細粒分含有率  $F_C$ 、粘土分含有率  $P_C$  および図-1 の粒径加積曲線が示すように、有明、五日市粘土に比べ  $P_C$  はやや低いが、塑性指数からは中塑性粘土とみなされることから、バイ

カル粘土は活性の高いスメクタイト成分をより多く含んでいるものと推察される。また、SEM による観察から珪藻遺骸も発見されたが、浅い部分に少量しか見られなかった。Baikal100 の比重が他より小さいのは、珪藻遺骸を含む影響と考えられる。

表-1 各試料の物性的性質

試料名	G <sub>s</sub>	F <sub>C</sub> (%)	P <sub>C</sub> (%)	W <sub>L</sub> (%)	W <sub>p</sub> (%)	I <sub>p</sub> (%)
Ariake A	2.604	98.3	75.2	89.09	41.36	47.73
Ariake B	2.593	100.0	61.5	155.34	44.33	111.01
Itsukaichi	2.691	98.6	77.0	109.59	34.54	75.05
Iwakuni	2.610	98.0	38.8	77.34	29.80	47.54
Onoda	2.601	84.5	37.5	84.04	35.70	48.34
Baikal 100	2.640	96.3	44.8	73.92	29.48	44.44
Baikal 200	2.748	97.6	41.6	83.40	33.38	50.03
Baikal 300	2.700	98.4	49.3	61.71	24.19	37.53

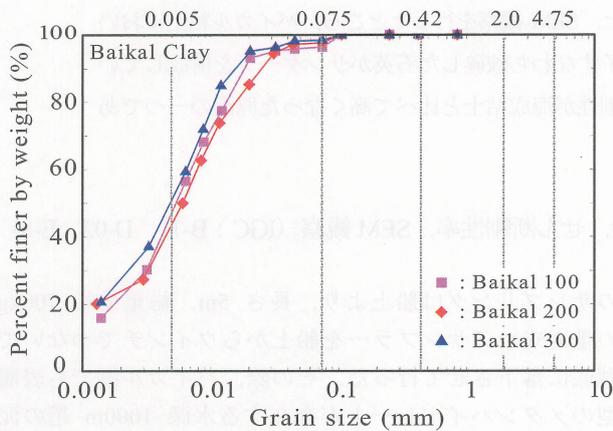


図-1 バイカル粘土の粒径加積曲線

### 3. 試験条件および結果の整理方法

BE 試験は、三軸試験機を用いて、等方圧力状態で有効拘束圧  $\sigma'_c = 50, 100, 200\text{kPa}$  において行った。試料の圧密前に  $b$  値検定を行ったところ、いずれも 0.96 以上を示し飽和状態と判断された。下部ペDESTALからの送信波として、正弦波で電圧: 10V, 周波数: 2.5~30kHz を用いた。得られた送受信波電圧時刻歴より伝達時間  $\Delta t$  を求め、せん断波速度  $V_s = L/\Delta t$  およびせん断剛性率  $G = \rho_t \cdot V_s^2$  を算定した。ここで、 $L$ : ベンダーエレメント先端間の距離、 $\rho_t$ : 湿潤密度である。せん断弾性波伝達時間決定法は、Start-to-start 法によった。

### 4. 実験結果と考察

図-2 は、三軸試験における等方圧密時の間隙比  $e$  と有効拘束圧  $\sigma'_c$  の関係を示す。バイカル粘土の等方応力載荷に対する  $e$  の変化は小野田粘土および岩国粘土等とほぼ同じ傾向を示しており、同等の圧縮性を有していることを示している。図-3 は、有効拘束圧  $\sigma'_c = 100\text{kPa}$  に

おける、BE 試験および中空ねじり繰返し単純せん断試験 (CTS 試験) より得られたせん断波速度  $V_s$  と間隙比  $e$  の関係を示す。バイカル粘土は、他の粘土に比べて  $V_s$  が高く現れている。

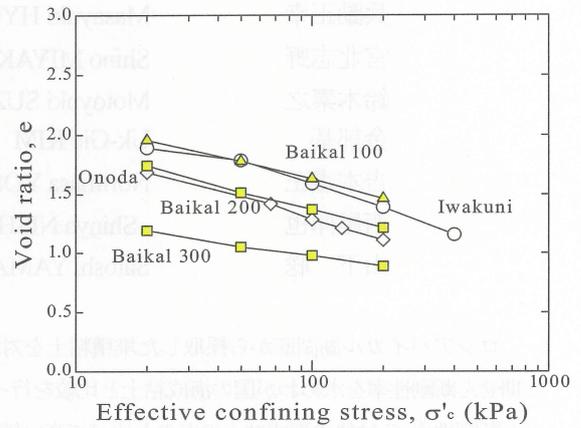


図-2 間隙比と有効拘束圧の関係

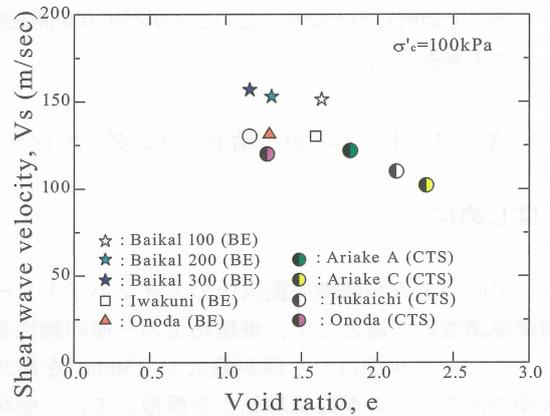


図-3 せん断波速度とせん断剛性率の関係

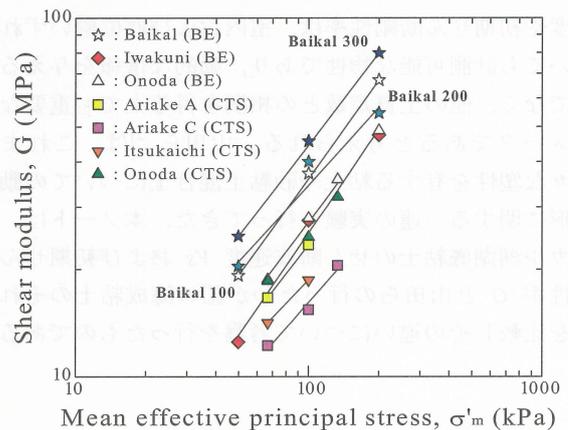


図-4 せん断剛性率と平均有効主応力の関係

図-4 は、せん断剛性率  $G$  と平均有効主応力  $\sigma'_m$  の関係を示す。バイカル粘土の  $G$  は他の粘土よりもかなり高い値を示すが、その傾きはほぼ同程度を示している。また、 $G$  の拘束圧依存性は他の粘土とほぼ同程度で、 $\sigma'_m$  と比例関係を示している。

図-5 は、平均有効主応力  $\sigma'_m = 100\text{kPa}$  におけるせん断

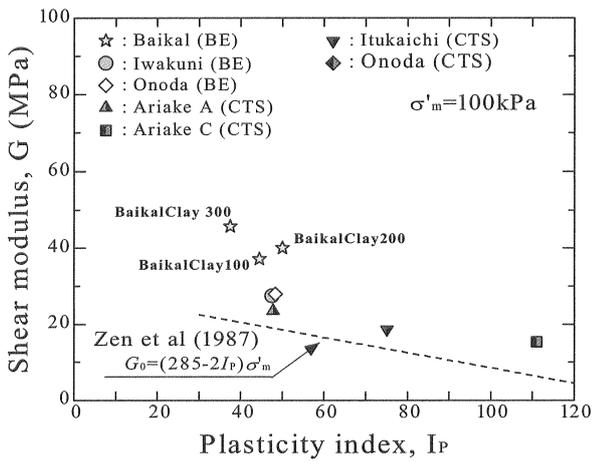


図-5 せん断剛性率と塑性指数の関係

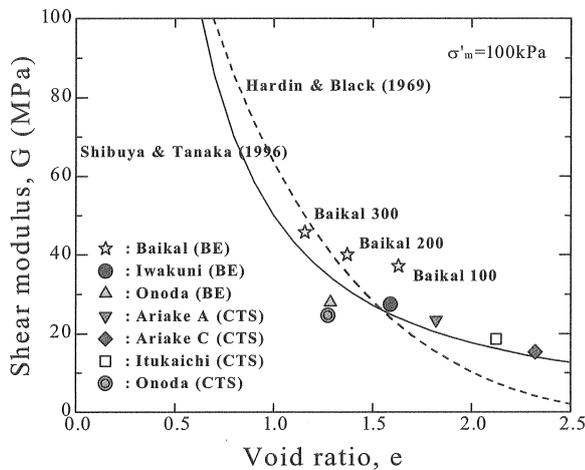


図-6 せん断剛性率と空隙比の関係

剛性率  $G$  と塑性指数  $I_p$  の関係を示す。今回のコア試料の中にも塑性指数の違いが若干あるが、この関係より、他のデータ同様、 $I_p$  が低い程  $G$  は高くなる傾向が認められる。「港湾の施設および技術上の基準・同解説」において、善ら<sup>3)</sup>の提案した式を用いると  $I_p \geq 30$  の粘性土の  $G$  は平均有効主応力  $\sigma'_m$  が一定であれば  $I_p$  のみで推定できるとされている。図中の直線はこの式から求めた  $\sigma'_m = 100 \text{ kPa}$  における  $G$  と  $I_p$  の関係を描いたものである。この式は、粘性土の  $G$  が  $I_p$  の低下に伴って直線的に増加することを示している。図のように、この式で与えられる  $G$  は、既存および今回のバイカル粘土の実験結果の下限に位置しており、 $I_p$  のみで  $G$  を推定することは難しいことがうかがえる。図-6 は、平均有効主応力  $\sigma'_m = 100 \text{ kPa}$  における、せん断剛性率  $G$  と空隙比  $e$  の関係を示す。図中、Hardin-Black、澁谷らの式による近似曲線を描いた。これらの式によれば海成粘土、バイカル粘土ともに比較的良く近似できることがわかる。一般的に土の  $G$  は拘束圧が等しければ、 $e$  が小さいほど高くなることが知られている。バイカル粘土の場合も例外ではないが、同一の  $e$  においても他の粘土に比べ高い  $G$  の値を示している。

## 5. SEM による観察

バイカル湖底堆積土が有す高いせん断剛性について土粒子の骨格構造の観点から検討するために、走査型電子顕微鏡（以下、SEM と略記）を用いて微視的構造の観察を行った。一般に SEM 画像は供試体中のごく微小な範囲の定性的な評価に限って使用されるが、SEM 画像は試料に含まれる土粒子の種類や形状、骨格構造の成り立ちや空隙の形状・分布の把握に有用なツールとして位置づけられる。これまでにメタンハイドレート生成環境と関連するバイカル湖底粘土が含む土粒子の種類や微視的構造についてはほとんど明らかにされていない。

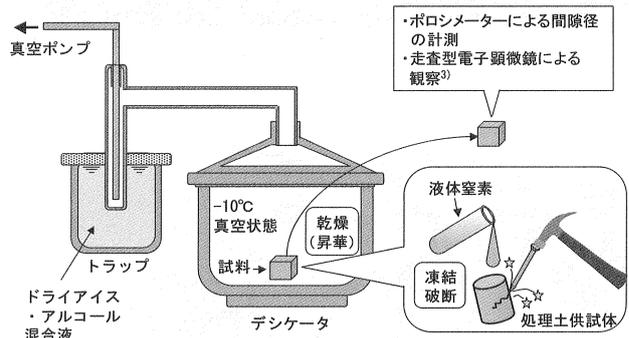
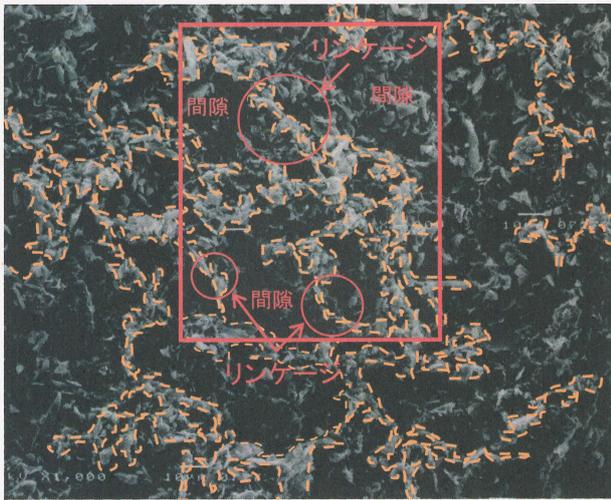
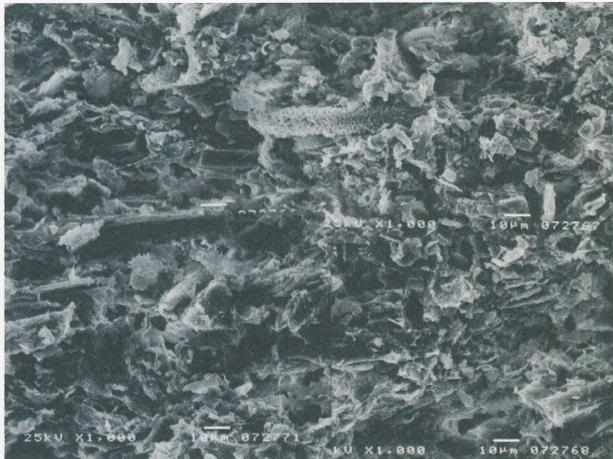


図-7 真空凍結乾燥法

観察試料は図-7の真空凍結乾燥法<sup>4)</sup>ならびに  $110^\circ\text{C}$  炉乾燥法による2種類の方法で作成した。真空凍結乾燥法は  $110^\circ\text{C}$  炉乾燥法よりも乾燥に伴う供試体の体積収縮を抑制することが可能とされ、液体窒素で瞬間凍結させた試料をテンションクラック法で所要の大きさに破断し、 $-10^\circ\text{C}$  の下で凍結状態のまま昇華・乾燥させた。真空凍結乾燥条件について、山口<sup>5)</sup>は泥炭に対して  $-109^\circ\text{C}$  の下で2日間、三浦ら<sup>6)</sup>は有明粘土に対して  $-45^\circ\text{C}$  の下で5日間としている。本試料の場合には、 $-85^\circ\text{C}$  の下で質量が一定になるまでの7日間とした。一方、 $110^\circ\text{C}$  炉乾燥法は試料を7日間程度デシケーター内で自然乾燥させた後、24時間  $110^\circ\text{C}$  炉乾燥させたものである。両方法による画像を比較した結果、乾燥条件の違いによる微細構造特性に明瞭な変化は認められないことから、本研究では  $110^\circ\text{C}$  炉乾燥法により採取深度が異なる5試料の準備を行った。写真-1にバイカル湖底堆積土の代表的な SEM 画像を示す。試料は湖底から深度  $0.5 \sim 1.0 \text{ m}$ 、 $1.0 \sim 1.5 \text{ m}$ 、 $1.5 \sim 2.0 \text{ m}$ 、 $2.0 \sim 2.5 \text{ m}$ 、 $2.5 \sim 3.0 \text{ m}$  の5箇所採取されたものである。写真-1には代表的な写真として深度  $1.0 \sim 1.5 \text{ m}$  の試料の4枚の SEM 画像を合成したものを示している。観察方向は堆積面に対する鉛直断面であり、撮影倍率は1,000である。深度が異なるいずれの試料においても珪藻遺骸は少なく、堆積層のほとんどが泥火山噴出物であることが示唆される。

同写真から粒径が大きい角片状の土粒子（長径  $20 \mu\text{m}$  以上）が見られ、比較的大きな土粒子からなるリンケージが形成されているように見える。リンケージの幅は数

写真-1 バイカル湖底粘土の SEM 画像(Scale:0.1 $\mu$ m)写真-2 岩国粘土の SEM 画像(Scale:0.1 $\mu$ m)

$\mu\text{m}$ ~10 $\mu\text{m}$  程度であり、その構成粒子の形状は角張っているものも多く、エックス線回折試験の結果から細粒分中に占める石英分の破砕物であると推定される。一方、間隙の形成は、骨格の形成と対応して、堆積面よりも若干斜め方向に卓越しており、1 $\mu\text{m}$  以下のマイクロポアも観察されるが、大部分はそれよりも大きなポアである。写真-2 には比較のために海性粘土の一例として岩国粘土の SEM 画像を示している。画像中心よりやや上方に珪藻遺骸が見られ、土粒子は堆積面に沿って平行に配置しているように見える。また、バイカル湖底堆積土とは違って、土粒子の骨格構造は明瞭ではない。写真-1 と 2 の比較から、バイカル湖底堆積土においては、岩国粘土とは異なり、粒径が大きく、摩擦やインターロッキング効果が生じる土粒子によって堅固なリンケージが形成されており、その結果として他の海成粘土よりもせん断剛性が高く測定されたと考えられる。なお、このようなリンケージは他の画像においても観察された。

以上より、SEM 観察の結果、バイカル湖底堆積土においては堅固な骨格構造が認められ、比較的粒径の大きい土粒子すなわち破砕した石英がリンケージを構成して

いることが判明した。このことがバイカル湖底堆積土の剛性が海成粘土と比べて高くなった原因の一つであると考えられる。Collins<sup>7)</sup>は、自然粘土におけるリンケージの構成粒子は砂やシルトであると述べており、本試料においては非活性の細粒分すなわち石英がリンケージの構成粒子となったと考える。沈降堆積した海成粘土においては分級作用が働いているので、成因の異なる粗大な土粒子は入りにくいだが、バイカル湖底粘土の堆積環境では泥火山の存在により堆積土に石英分の破砕物が混入する環境であったと見られる。なお、この他の原因として、堆積環境下で発達したセメンテーションの可能性があげられるが、BE 試験条件である 200 kPa の拘束圧下ではセメンテーション特性が残るとは考えにくい。

## 6. まとめ

本研究結果より、以下の知見が明らかとなった。

- (1) バイカル湖底粘土は、他の海成粘土と比べて、せん断波速度  $V_s$  およびせん断剛性率  $G$  が高い値を示す。
- (2) SEM バイカル湖底堆積土においては堅固な骨格構造が認められ、比較的粒径の大きい土粒子すなわち破砕した石英がリンケージを構成していることが観察された。このことがバイカル湖底堆積土の剛性が海成粘土と比べて高くなった原因の一つであると考えられる。

## 参考文献

- 1) 西尾ら：バイカル湖における表層型メタンハイドレート，土木学会第 61 回年次学術講演会概要集，pp. 341-342, 2006.
- 2) 山田ら：広範な粒度と塑性を有する土の動的変形特性，土木学会論文，No. 806/III-73, pp. 155-168, 2005.
- 3) 善ら：地震応答解析のための土の動的特性に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，Vol. 26, No. 1, 1987.
- 4) 加藤舜朗：食品冷凍の理論と応用，光琳書院，pp. 945-960, 1972.
- 5) 山口晴幸：不攪乱泥炭の等方圧密および排水せん断過程での間隙径分布の変化，土木学会論文集，No. 448/III-19, pp. 1-8, 1992.
- 6) 三浦哲彦，山寺 彰，日野剛徳：間隙径分布の測定に基づく海成粘土の圧縮特性に関する考察，土木学会論文集，No. 624/III-47, pp. 203-215, 1999.
- 7) Collins, K. and McGown, A.: The form and function of microfabric features in a variety of natural soils, *Geotechnique*, Vol.24, No. 2, pp.223-254, 1974.

(2007年6月29日 受付)