

バイカル湖表層堆積土を用いたメタンハイドレート賦存地盤の力学特性の評価

北見工業大学大学院	○ 学生員	片岡沙都紀
北見工業大学工学部	正会員	山下 聡
清水建設株式会社	正会員	西尾 伸也
北見工業大学工学部		八久保晶弘
北見工業大学工学部		小西 裕樹
北見工業大学工学部	正会員	鈴木 輝之

1. はじめに

近年、メタンハイドレートの調査、試掘が世界各地で進められており、日本周辺でも南海トラフ¹⁾や日本海直江津沖²⁾、オホーツク海サハリン沖³⁾などでその存在が確認されている。著者らは2005年からロシア・バイカル湖を調査対象として、その湖底表層土中に存在するメタンハイドレートの探査および試料の採取を行ってきた。昨年度までの研究では、メタンハイドレート賦存地盤の工学的特性を検討するために、図1中●印で示すバイカル湖の5つの領域において調査を行い、メタンハイドレートの採取、および湖底の表層堆積土を使用して各種船上試験（ベーンせん断試験、コーン貫入試験、バンダーエレメント（BE）試験、一軸圧縮試験）、物理試験を行った。その結果、メタンハイドレートを含有する泥火山の堆積土と泥火山周辺の堆積土を比較すると、物理試験結果には大きな差がないにもかかわらず、船上試験で得られた泥火山試料の測定値がどの堆積深度でも一様に低い値を示すことがわかった⁴⁾。

2007年度の研究は、バイカル湖の Peschanka (P2) 領域（図1中▲印で示す）、および2005、2006年度も調査を行った Malenky 領域において、メタンハイドレートの探査と表層堆積土の採取を行った。また今年度は、メタンハイドレート賦存地盤の強度低下原因をより詳細に検討していくために、船上、物理試験に加えて、採取した不攪乱試料を持ち帰り、室内試験（一軸圧縮試験、BE付き圧密試験装置による段階載荷圧密試験）を行い、メタンハイドレート賦存地盤の力学特性を総合的に評価した。

2. メタンハイドレートと環境問題との関連性

メタンハイドレートはエネルギー資源の将来性として注目されている資源であるが、その一方でメタンハイドレートの主成分であるメタンガスは二酸化炭素の約20倍もの温室効果を持つガスであり、ガスの大気への放出による地球温暖化助長への懸念が存在する。ガス放出の主な原因としては、エネルギー資源としての採取時の遺漏や、地震活動に伴う海底斜面の崩壊、地球温暖化による水温の上昇に伴うメタンハイドレートの解離などが挙げられる。現在確認されている日本周辺の主なメタンハ

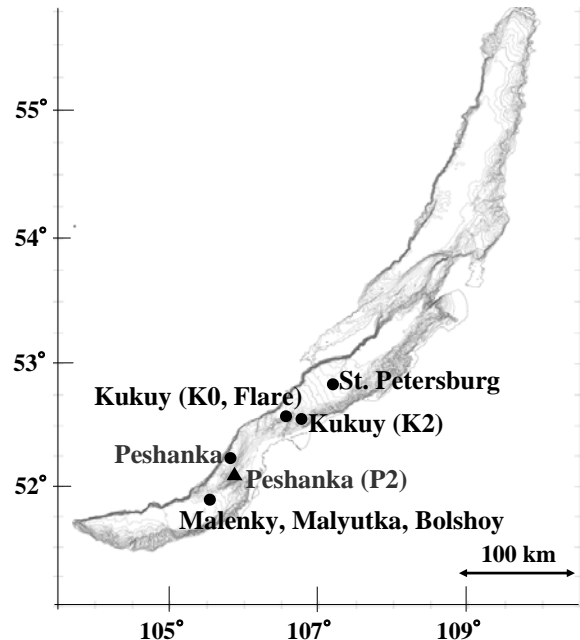


図1 バイカル湖地図と試料採取箇所（2005、2006年調査領域を●、2007年新たに調査した Peshanka (P2) 領域を▲で示す）

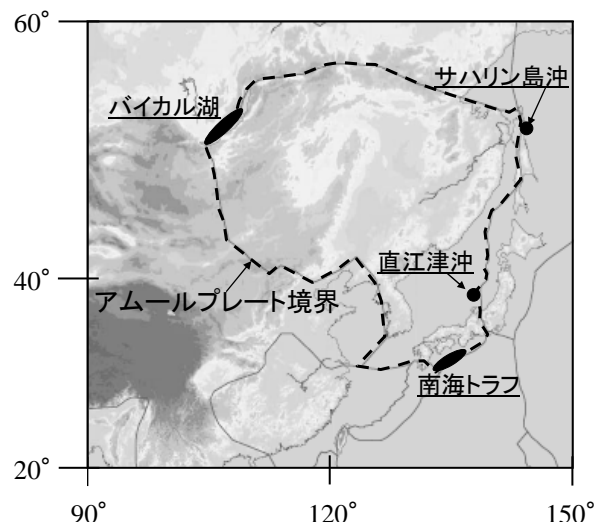


図2 日本周辺におけるメタンハイドレート存在地域とアムールプレート境界（破線部分）

イドレートは、アムールプレート境界に沿って存在しており（図2）、メタンハイドレートと地震活動域として考えられるプレート境界とが密接に関係していることがわかる。特に表層型メタンハイドレートは、地殻変動に伴って発生した過剰間隙水圧により、地下から湧出したガス、水を用いてハイドレートが形成されていると考えられているため、地球環境変動との関連性がより高いと考えられる。しかし、現在の地盤工学的な見地でのハイドレート研究は、資源開発のための研究が主となっており、地球環境を考えた地盤工学的な研究はほとんど行われていないのが現状である。よって環境問題との関連性を考慮したハイドレート賦存地盤の研究、特に表層型メタンハイドレート賦存地盤の工学的特性を早急に検討していく必要がある。

3 試料採取概要

調査およびメタンハイドレートを含む湖底堆積土の採取には、ロシア・陸水学研究所が所有する調査船「Vereshcagin号」を使用した。バイカル湖に存在するメタンハイドレートは、ガスや水の湧出に伴って上昇してきた堆積土が、湖底面に噴出したことにより形成された泥火山の表層部に多く存在していることが報告されている⁵⁾。従って、はじめにサイドスキャンソナーを使用して泥火山の存在位置の確認を行った。そのときに捉えられた Peschanka (P2) 領域の泥火山を図3に示す。泥火山の存在が確認できたのちに、重力式コアサンプラー（長さ 3.5m (2005, 2006 年度), 5m (2005~2007 年度), 外径 12.5cm, 総重量 700kg) を使用して湖底堆積土の採取を行った。このコアサンプラーは2重管式になっており、内部には塩化ビニル製のパイプ（内径 10.4cm）が入っている。試料採取後は、コアを 1m ごとに切断したのち、鉛直方向に二分してその切断面でコア観察、各種船上試験を行った。また、室内力学試験用試料に関しては、コアを 50cm ごとに切断したのちに上下面をパラフィンで固定して輸送した。ここで昨年同様、同領域内において泥火山が存在していない地盤からも試料の採取を行い、泥火山から採取した堆積土との物理的性質、強度等の比較を行った。本文中では、この地盤より採取した試料をリファ

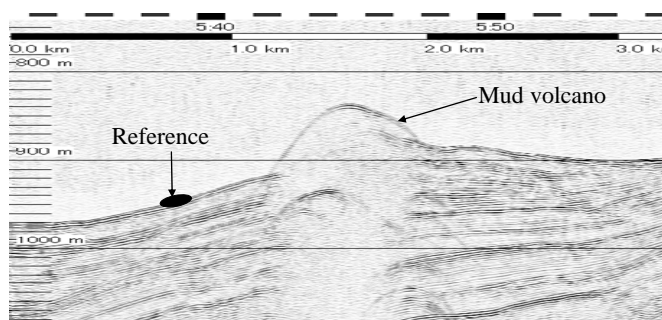


図3 反射法地震探査で捉えた Peschanka (P2) 領域の湖底断面図

表1 船上、室内試験用に採取したコア

Sampling site	Year	Water depth (m)	Core length (m)	On-board tests sample			Laboratory test sample	
				Mud volcano		Reference	Mud volcano	Reference
				With gas hydrate	Without gas hydrate			
Kukuy (K2)	2005, 2006	900~1000	1.35~3.30	4	2	1		1
Kukuy (K0, F)	2006	500~510	3.24~4.00	1	1			
St. Petersburg	2006	1420~1430	4.38		1			
Peschanka	2006	930~960	4.60		1			
Malenky, Malyutka, Bolshoy	2005~2007	1290~1400	1.26~2.80	4	1	2		
Peschanka (P2)	2007	800~910	2.90~4.60	7	13	1	1	1

レンス試料と記載する。ここで、Peschanka (P2) 領域でのリファレンス試料採取位置を図3中に示す。なお、この領域における泥火山とリファレンス試料採取場所とは、直線距離にして約700m離れている。

3年間の調査を通して、堆積土試料は泥火山、リファレンス合わせて125本採取した（2005年19本、2006年61本、2007年45本）。このうち、34本のコアで堆積土中にメタンハイドレートが観察されている。また、2007年度の調査で採取されたメタンハイドレートは昨年採取されたものと同様に⁴⁾、塊状や層状などの形状を示しており、目視観察が容易に出来る大きさのものが堆積土中に存在していた。

表1には、船上、室内の両試験に使用したコアの本数を領域別に示してある。なお本文中では、3年間に採取した6領域における船上試験結果、およびPeschanka (P2) 領域、Kukuy (K2) 領域の試料における室内力学試験結果を記載している。

4. 各種試験概要

4.1 船上試験

2007年度の調査では、船上試験としてベーンせん断試験、コーン貫入試験、一軸圧縮試験を行った。採取したコアの切断面で堆積土、メタンハイドレートの観察を行ったのちに、深度方向に10cm間隔でベーンせん断試験(写真1)、コーン貫入試験⁶⁾(写真2)を行い、その後、50cm間隔に試料を取り出して一軸圧縮試験を行った。なお、一軸圧縮試験に関しては、供試体を高さ6cm、直径3.5cmに整形し、荷重速度を1cm/minとした。

また各船上試験終了後に、深度方向に10cm間隔で含水比測定用の堆積土を採取した。



写真1 ベーンせん断試験



写真2 コーン貫入試験

4.2 室内試験

輸送した不攪乱試料において、各種室内試験(物理試験、一軸圧縮試験、段階荷重圧密試験、BE試験)を行った。図4に、Peschanka (P2) 領域で採取した泥火山、リファレンス試料における室内試験(一軸圧縮試験、段階荷重圧密試験、BE試験)の実施深度を示す。

輸送試料の一軸圧縮試験は、船上試験と同じ条件下で供試体を整形し、荷重を行った。また各種物理試験は、船上および室内で行った一軸圧縮試験用の供試体を作製した際に残った堆積土を用いて、粒度試験、土粒子の密度試験、液性・塑性限界試験を行っている。

図5には、圧密試験に用いた装置の概略図を示す。使用した圧密試験装置(直径6cm、高さ4cm)の上下部には一対のBEが取り付けられている。BE試験は、各圧密段階の終了時に行い、測定した供試体内の伝播速度およびBE間距離Lからせん断波速度 V_s およびせん断剛性 $G(=\rho_s \cdot V_s^2)$ を算出した。ここで ρ_s は湿潤密度を示している。なおBE試験は、送信電圧を±10V、送信波をsin波とし、周波数 $f=10, 15, 20\text{kHz}$ で試験を行い、得られた結果を平均して V_s を算出している。またBE間距離はブレードの先端間とし、せん断波の伝播時間は送信波および受信波の立ち上がりを時間差とするstart-to-start法によって求めた⁷⁾。

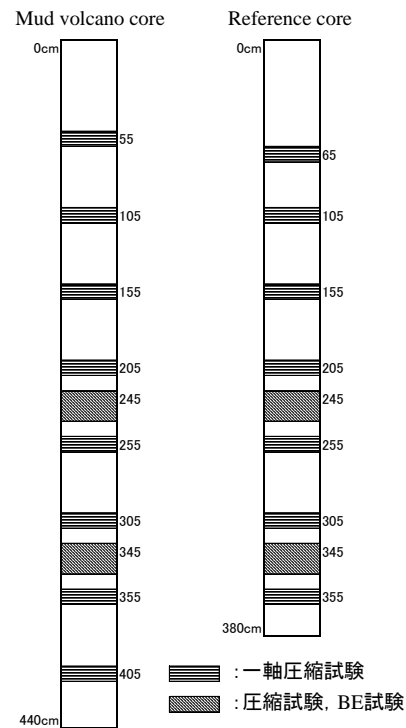


図4 室内力学試験試料の採取深度 (Peschanka (P2) 領域)

5. 試験結果, 考察

5.1 物理試験結果

図6は、2007年度の調査領域であるPeschanka (P2) 領域から採取した堆積土の各種物理試験結果(a)含水比 w 、(b)土粒子の密度 ρ_s 、(c)液性指数 I_L 、(d)粒度分布を深度方向にプロットしたものである。図より、含水比 w 、 ρ_s では湖底面から約200cmまではばらつきが見られているが、それ以降では泥火山試料(○印)、リファレンス試料(●印)に関係なく $w=60\sim 80\%$ 、 $\rho_s=2.6\sim 2.8\text{g/cm}^3$ と安定した値となった。 I_L は深度方向に関係なく $I_L \approx 1.0$ となり、軟弱な堆積土であることがわかる。また、粒度分布ではシルト以下の粒径割合が試料の90%以上を占めていた。

次に、堆積土を構成している鉱物の組成に違いがある

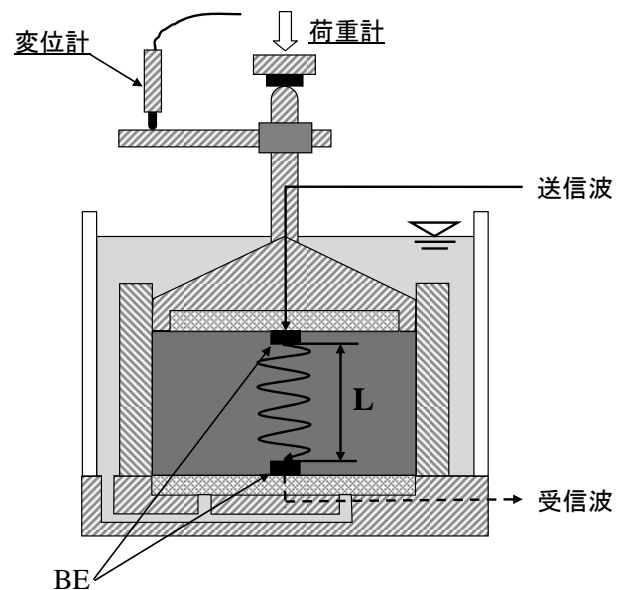


図5 BE付き圧密試験装置の概略図

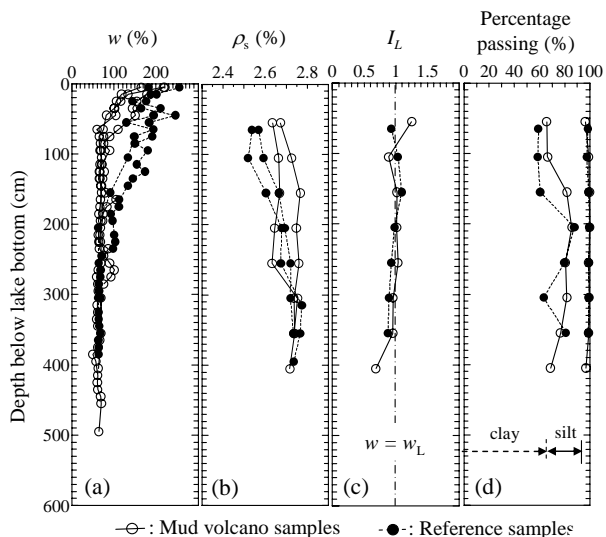


図6 Peschanka (P2) 領域より採取した堆積土の物理試験結果

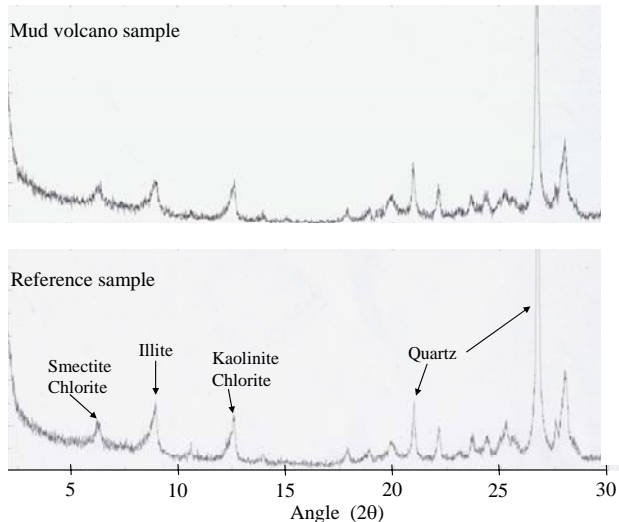
のかを調べるために、Peschanka (P2) 領域、および2005、2006年度に調査した Kukuy (K2) 領域の泥火山、リファレンス地盤から採取した、深度245cmの堆積土試料を用いてX線回折試験を行った。ここで、X線回折に用いた試料は全て、室温にて乾燥させたのち、0.075mmふるいに通した堆積土である。この測定で得られたチャートを、図7に示す。これらの図から、堆積土の構成鉱物には採取領域、場所などに関係なくどれも石英を多く含み、加えてイライトやカオリナイトなどの粘土鉱物も確認できた。また、各々のピークが出現している入射角の値を比較すると、おおよそ同じような値を示していることから、鉱物組成に関する違いはないと考えられる。確認できた値の中には、スメクタイトとクロライトが混在している部分 ($2\theta \approx 6.00$) も示されていた。スメクタイトは膨潤性が高く、地すべりの素因となる鉱物であるため、今後は鉱物組成のみではなく、含有しているスメクタイトの量を詳細に示すために、エチレングリコール処理を行ってスメクタイトとクロライトを分離した上でX線回折試験を行い、堆積土中のスメクタイト含有量を特定していく予定である。

以上の結果より、調査領域や同領域での場所の違いによる物理的性質の違いはないものと考えられる。ただし、バイカル湖の表層堆積土には、多くの珪藻が含有していることが報告されている⁸⁾ため、今後は電子顕微鏡などを使用した堆積土の微細構造の観察なども詳細に行っていく必要がある。

5.2 船上試験結果

図8、9、10には、2005、2006年度に調査した Kukuy (K2) 領域、Malenky, Malyutka, Bolshoy 領域に加え、2007年度に調査した Peschanka (P2) 領域、Malenky 領域での各採取堆積土で実施した船上試験結果(ベンゼン断試験 τ_v (図8)、コーン貫入試験 q_c (図9)、一軸圧縮試験 q_u (図10))を、深度方向にプロットしたものである。各々の領域における各測定値を見ると、Kukuy (K2) 領域、Malenky, Malyutka, Bolshoy 領域では、泥火山試料(○印)のほうがリファレンス試料(●印)よりも深度に関係なく値が低くなっている。一方 Peschanka (P2) 領域では、深度の深いところ(約200cm)では Kukuy (K2) 領域、Malenky, Malyutka, Bolshoy 領域と同じような傾向を示しているが、深度が浅いところ(0~200cm)では泥火山、リファレンス試料ともに同程度に低い値を示している。図6の物理試験結果で、深度の浅いところではリファレンス試料の含水比が泥火山試料よりも高く、 ρ_s は低い値を示していたこと、また深度が深くなると Kukuy (K2) 領域、Malenky, Malyutka, Bolshoy 領域の物理試験結果と同様に、リファレンスと泥火山の物理的性質

(Peschanka (P2) site)



(Kukuy (K2) site)

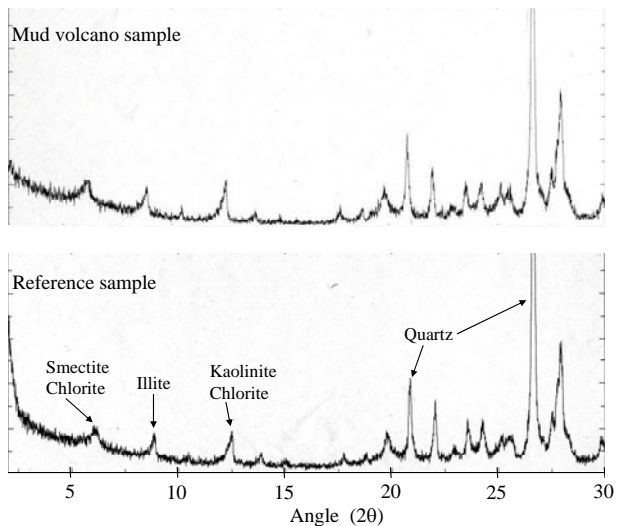


図7 Peschanka (P2), Kukuy (K2) 領域より採取した堆積土の含有鉱物の比較(深度245cm)

が同程度であったことから、深度の浅いところでは物理的性質の違いが船上試験の測定値に大きく影響を与えていると考えられる。

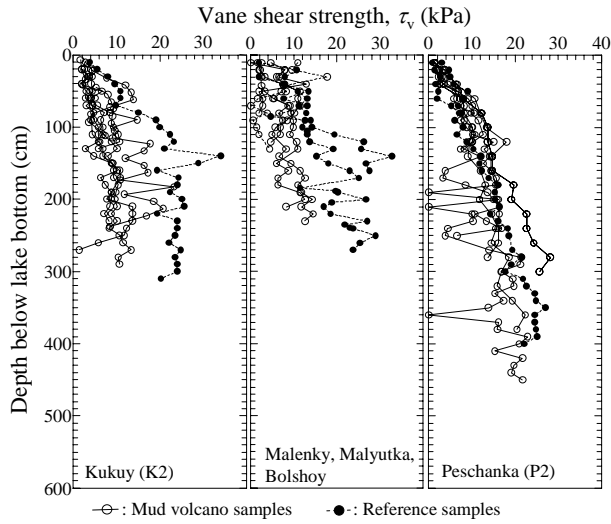


図 8 ベーンせん断試験結果

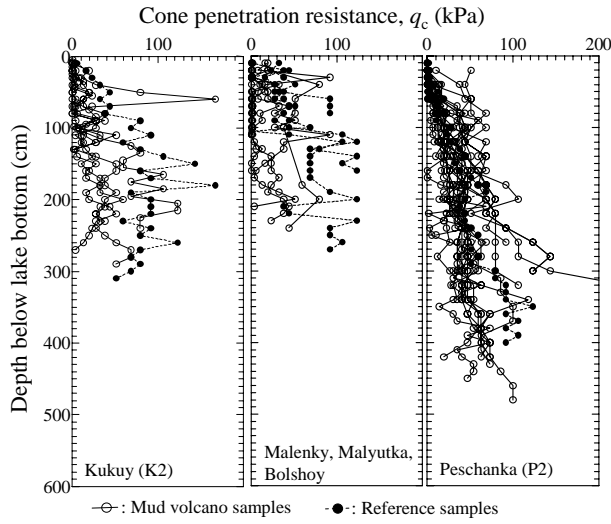


図 9 コーン貫入試験結果

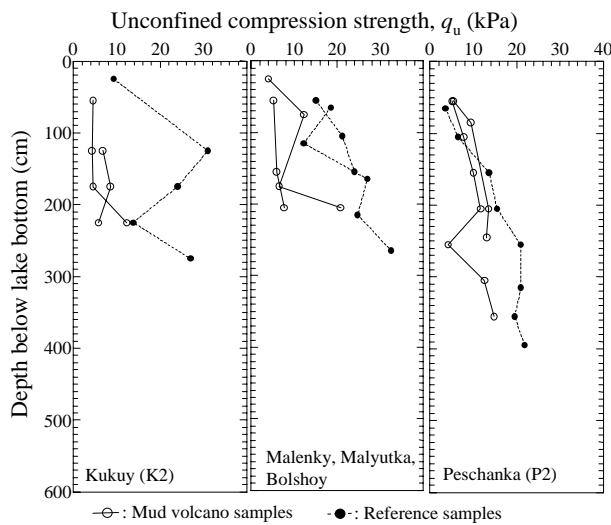


図 10 一軸圧縮試験結果

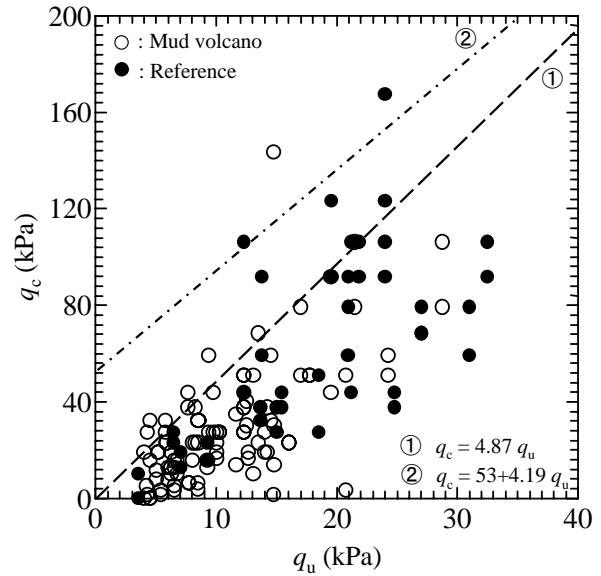


図 11 2005～2007年に調査行った全6領域における q_u と q_c の関係 (○：泥火山試料, ●：リファレンス試料)

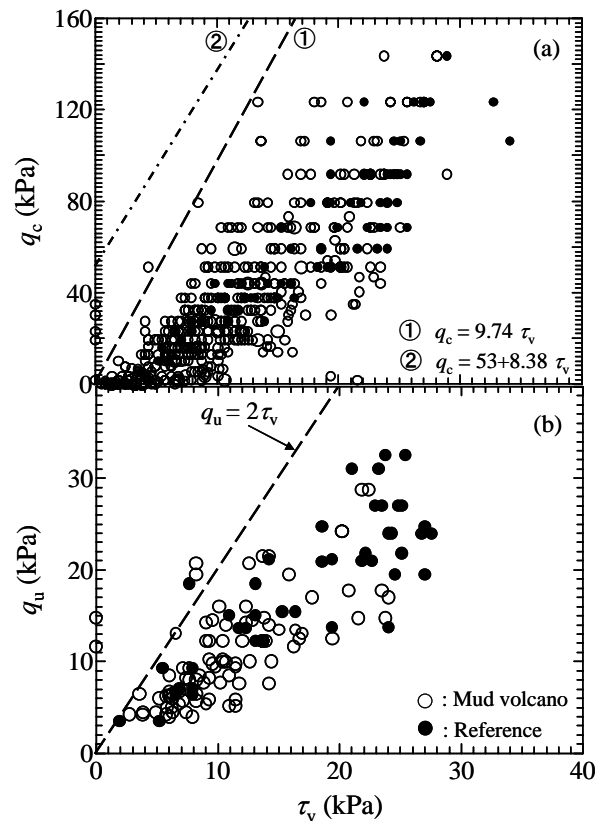


図 12 2005～2007年に調査を行った全6領域における τ_v と (a) q_c および (b) q_u との関係 (○：泥火山試料, ●：リファレンス試料)

次に 2005～2007 年度の調査で行った各種船上試験の測定値が、一般に原位置で使用されている試験装置を用いて求めた既存の式と相関性があるのかを検討した。まず図 11 には調査した全 6 領域における q_u と q_c の関係を示し、既存の式 ($①q_c = 4.87 q_u$, $②q_c = 53 + 4.19 q_u$)⁹⁾ との関係を見たところ、泥火山 (○印)、リファレンス (●印) 試料に関係なく、既存の式よりも低い値を示した。加えて図 12 には τ_v と (a) q_c , (b) q_u との関係を示し、図 11 で示した式と $q_u = 2 \tau_v$ から求めた式 ($①q_c = 9.74 \tau_v$, $②q_c = 53 + 8.38 \tau_v$) および $q_u = 2 \tau_v$ との関係を見た。これより、図 11 同様にどちらも既存の式より低い値を示した。この原因として、測定に使用した堆積土が湖底表層のものであり、既存の式で示す深度のごく一部しか示していないこと、また写真 1, 2 にも示したが、使用した土壌硬度計、ペーンブレードがともに小型であるために、寸法効果によって一般に使用されている装置で求めた測定値よりも強度が低くなったことなどが考えられる。しかし図 11, 12 で示す q_c , q_u , τ_v の関係は、泥火山、リファレンスともに比例関係を示していることから、今回の船上試験に使用した装置に適した式を求めることで、行った船上試験の有効性を示すことができると思われる。

5.3 室内試験結果

5.3.1 一軸圧縮試験結果

図 13 は、Peschanka (P2) 領域で採取した、深度約 150cm および 300cm の試料における応力-ひずみ曲線を、船上試験、室内試験に分けて示し、試料採取直後と輸送後の試料とで、泥火山、リファレンス試料の強度の比較を行った。まず両深度の船上試験結果を見ると、リファレンス試料では深度の増加に伴い q_u も増加しているのに対し、泥火山試料では深度増加に伴う強度の増加が見られず、リファレンス試料よりも低い値を示した。次に室内試験結果を見ると、150cm の試料においては泥火山、リファレンス試料ともに同深度の船上試験結果よりも q_u が増加している。しかし 300cm の試料では、泥火山試料で深度増加に伴う強度の増加が見られるのに対し、リファレンス試料では強度増加が見られず、その値は泥火山試料で得られたものとあまり差がなかった。

上述した結果が深度方向でどのように分布しているのかを見るために、得られた q_u を深度方向にプロットしたものを図 14 に示す。船上試験と室内試験の結果を比較すると、泥火山試料では輸送試料での強度増加が深度に関係なく一様に見られているのに対し、リファレンス試料においては、輸送試料で強度増加が見られたのは深度が浅いところ (~200cm) であり、深度が深くなっていくと q_u が船上試験で得たリファレンス試料の q_u と同様の値を示している。

船上試験と室内試験で強度に差が生じた原因を検討するために、使用しているコアサンプラーのキャッチャー内径と内部の塩ビ管パイプの内径に着目した。塩ビパイプの内径 (10.4cm) は試料を取り出しやすくするために、試料径となるコアキャッチャーの内径 (9.8cm) よりも大きくなっている。そのため、試料採取後に塩ビパイプ内の水が排水されて試料と塩ビパイプの側面にわずかではあるが空間ができる。加えて、輸送試料では試料採取後、船上にて数日間コアを立てて堆積土内部のガス抜きを行ったのちにパラフィンでシールしているため、この作業工程で土の自重圧密によって強度が増加しているものと思われる。また泥火山試料では、湖底でガスや水の湧出を受けているために間隙水中に多くのガスを溶存しており、これが試料採取時の応力解放によって気化して内部に間隙を多く生成したと考えられる。以上より、泥火山試料では土の自重圧密を大きく受けているために、輸送試料の q_u が一様に大きくなったと考えられる。一方リファレンス地盤では、泥火山のようなガスや水の湧出を受けていないために溶存ガス量が泥火山に

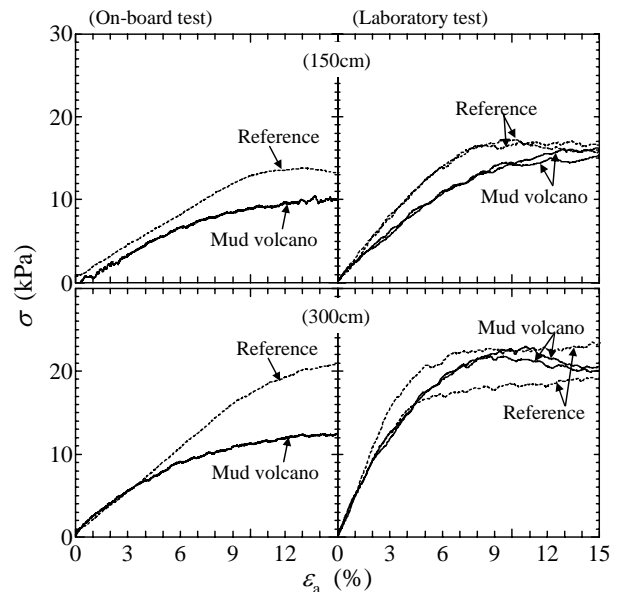


図 13 深度約 150, 300cm の試料における船上および室内試験から得られた応力-ひずみ曲線の比較 (Peschanka (P2) 領域)

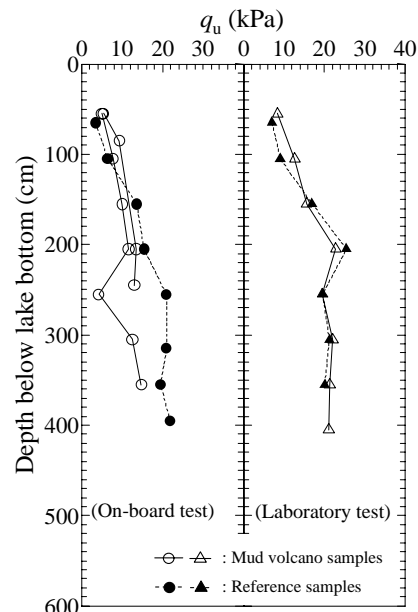


図 14 船上試験および室内試験で得られた深度方向における q_u の分布 (Peschanka (P2) 領域)

以上より、泥火山試料では土の自重圧密を大きく受けているために、輸送試料の q_u が一様に大きくなったと考えられる。一方リファレンス地盤では、泥火山のようなガスや水の湧出を受けていないために溶存ガス量が泥火山に

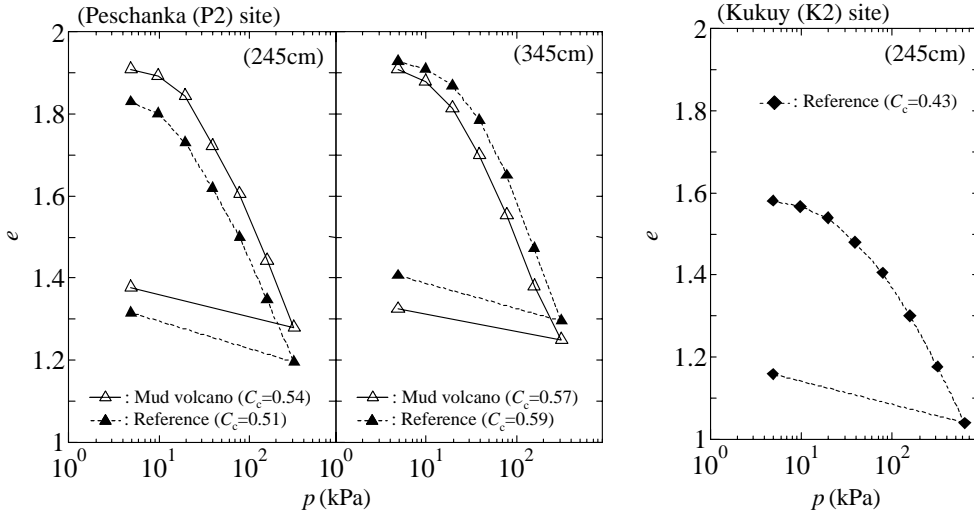


図 15 Peschanka (P2) 領域, Kukuy (K2) 領域より採取した試料の圧密曲線

比べて少なく、応力解放による気化も小さいと考えられる。よって、深度が浅いところでは土かぶり圧が小さいために、土の自重圧密による強度増加が見られるが、深度が深くなると土かぶり圧が大きくなるために圧密が促進されず、その結果、輸送試料の q_u が船上試験の q_u とほぼ同様の値を示したものと考えられる。

5.3.2 圧密試験, BE 試験結果

図 15 に、Peschanka (P2) 領域, Kukuy (K2) 領域で採取した試料による、段階載荷圧密試験で得られた圧密曲線を示す。まず Peschanka (P2) 領域の深度 245cm, 345cm の試料を比較すると、泥火山 (\triangle 印), リファレンス (\blacktriangle 印) に関係なく、間隙比 e , 圧縮指数 C_c が同程度の値を示しており、同領域内の採取場所による圧縮性の違いは見られない。次に同深度 (245cm) での Peschanka (P2) 領域, Kukuy (K2) 領域のリファレンス試料における圧密曲線を比較すると、Kukuy (K2) 領域の試料 (\blacklozenge 印) では e , C_c とともに、値が Peschanka (P2) 領域の試料よりも低くなっていることから、Peschanka (P2) 領域の堆積土の圧縮性が Kukuy (K2) 領域の堆積土に比べて高いと考えられる。

図 16 には、図 15 の圧密曲線より求めた圧密降伏応力 p_c と湖底地盤での有効土かぶり圧 $\sigma'_{v \text{ in-situ}}$ との関係を示し、採取した試料の圧密状態を検討した。その結果、圧密試験を行った試料全てで p_c が $\sigma'_{v \text{ in-situ}}$ を約 1.5~3.0 倍上回る結果となり、使用した堆積土が過圧密状態であることがわかった。しかし、今回使用した堆積土は湖底面表層のものであるため、地盤が過圧密状態になっているとは考えにくい。よって 5.3.1 でも示したが、試料採取後の土の自重圧密が原因で p_c が高くなったと考えられる。

また図 17 は、Peschanka (P2) 領域, Kukuy (K2) 領域の試料における C_c と液性限界 w_L との関係を示したものである。図中には、以下に示す 2 つの式

$$C_c = 0.009(w_L - 10) \quad (1) \text{ 式}^{10)}$$

$$C_c = 0.015(w_L - 19) \quad (2) \text{ 式}^{11)}$$

から求められた直線を示した。なお、日本の海性粘性土の多くはこの 2 直線の間位置することが報告されている¹²⁾。

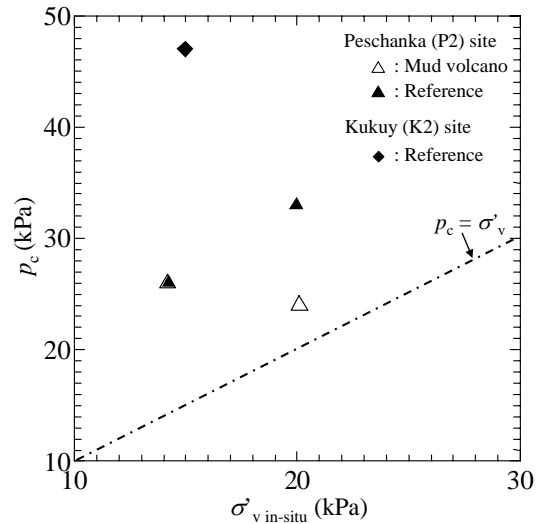


図 16 $\sigma'_{v \text{ in-situ}}$ と圧密試験より得られた p_c との関係

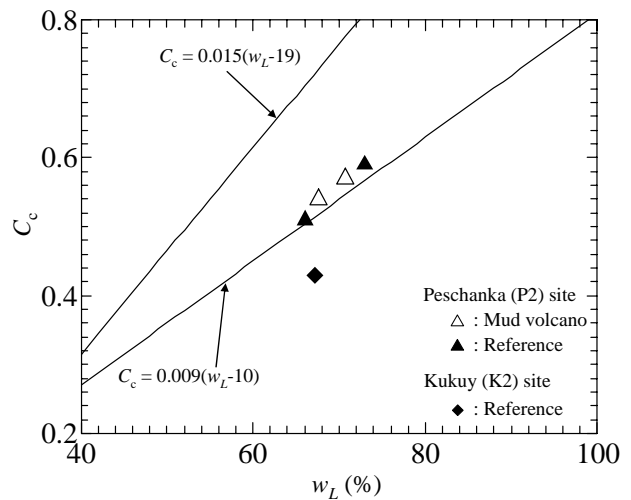


図 17 w_L と C_c との関係

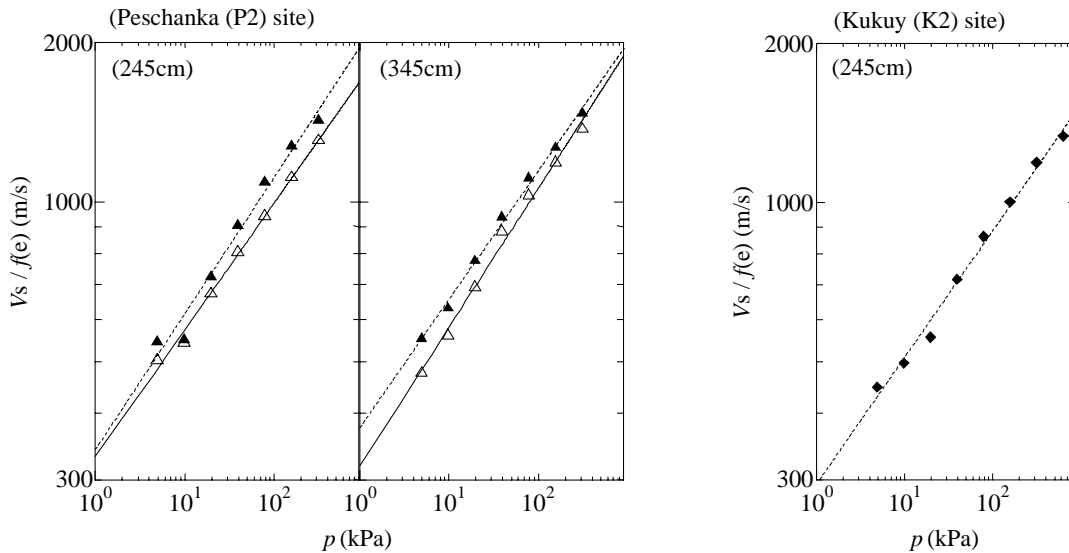


図 18 Peschanka (P2) 領域, Kukuy (K2) 領域における p と $V_s/f(e)$ の関係

図より、測定した Peschanka (P2), Kukuy (K2) 領域から採取した堆積土とともに (1) 式で求めた直線付近に位置していることがわかった。

図 18 には、各圧密段階終了時に行った BE 試験より得られたせん断波速度 V_s と圧密圧力 p との関係を示す。図中の V_s は、各試料の間隙比の影響を除くために、 V_s を Shibuya ら¹³⁾ によって提唱された間隙比係数 $f(e)$ ($= (1+e)^{-2.4}$) で割った値 $V_s/f(e)$ で示す。Peschanka (P2) 領域の結果を見ると、同じ p における $V_s/f(e)$ は、リファレンス試料 (▲印) のほうが泥火山試料 (△印) よりも高い値を示している。また同深度 (245cm) の Peschanka (P2) 領域, Kukuy (K2) 領域のリファレンス試料を比較すると、Peschanka (P2) 領域から採取した試料の $V_s/f(e)$ (▲印) のほうが Kukuy (K2) 領域から採取した試料 (◆印) よりも高い。

図 19 には平均有効主応力 $\sigma_m=100\text{kPa}$ におけるせん断

剛性 G と間隙比 e との関係を示す。図中には Hardin ら¹⁴⁾ および Shibuya ら¹⁵⁾ によって提唱された式による近似曲線を示した。また本研究は圧密試験より測定した G のため、静止土圧係数を $K_0=0.5$ として計算している。これより、求めた G がこれら 2 本の式に比較的良く近似できていることがわかる。

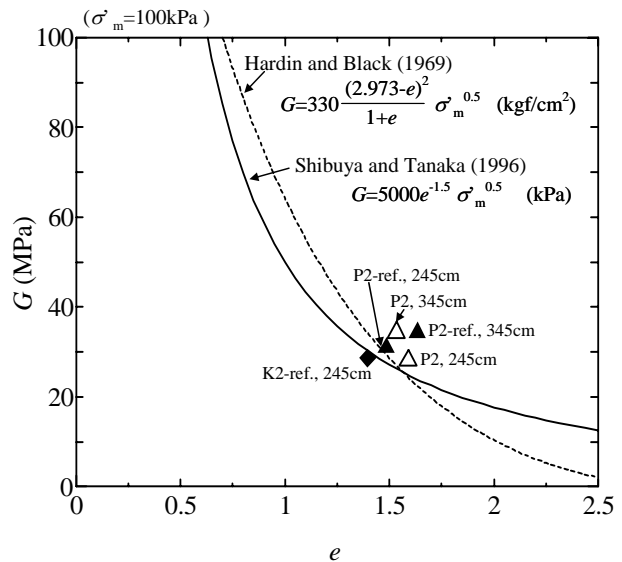


図 19 e と G の関係

5.4 泥火山地盤の力学特性

5.1~5.3 までの結果から、同領域内における堆積土の物理的性質と圧密特性は泥火山、リファレンス地盤に関係なく同程度の値を示したが、その力学特性には違いが生じた。この原因を視覚的にも検討していくために、写真 3 に Peschanka (P2) 領域より採取した泥火山、リファレンス試料の同深度 (236~250cm) における切断面の状態を示す。写真より、泥火山試料の切断面に空隙が見られる。また 5.3.1 でも示したが、輸送試料における泥火山試料の q_u とリファレンス試料の q_u に変化が見られなかったことから考えて、各試験における泥火山の強度低下の原因として、試料採取時の応力解放が大きく影響していることがいえる。

図 20 には、Peschanka (P2) 領域, Kukuy (K2) 領域の湖底堆積土で採取した際のコアサンプラーの貫入深度を示している。なお図中は全て 5m のコアサンプラーを使用したときの貫入深度を示しており、泥火山試料

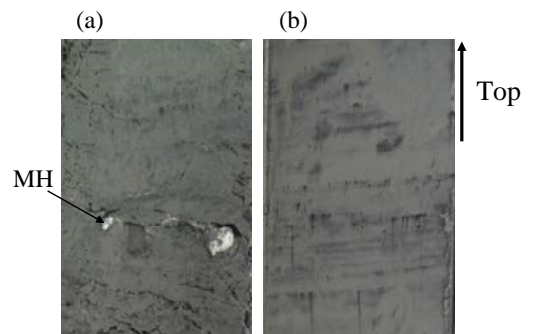


写真 3 Peschanka (P2) 領域で採取した (a) 泥火山試料および (b) リファレンス試料の切断面 (236~250cm)

の貫入深度に関しては、リファレンス試料との比較のため、堆積土中にMHが観察されなかったコアのみ示している。まず Peschanka (P2) 領域の貫入深度は泥火山 (3.82m) もリファレンス (3.93m) も同様の深さであるため、泥火山試料の強度低下に応力解放が大きく影響しているといえる。一方 Kukuy (K2) 領域を見ると、泥火山の貫入深度 (3.70m) のほうがリファレンス (3.33m) よりも深いことがわかる。ここで図8~10から、Kukuy (K2) 領域の泥火山とリファレンスの船上試験の強度値を見ると、その強度差はPeschanka (P2) 領域よりも大きいため、Kukuy (K2) 領域の泥火山試料の強度低下原因が応力解放の影響のみとは考えにくい。またKukuy (K2) 領域の試料においても、リファレンス試料では写真3にみられるような層構造が観察できたが、泥火山試料の切断面には見られなかったことから、泥火山で湧出するガスや水により湖底の地盤が攪乱を受け、泥火山がリファレンス地盤よりも軟弱となったために、泥火山試料の強度低下に影響を与えたことも考えられる。

6 まとめ

2005~2007年度にバイカル湖で行った表層型メタンハイドレート賦存堆積土の物理、力学試験から示された結果を以下にまとめる。

- 1) バイカル湖の湖底表層土 (0~5m) の物理的性質 (含水比, 土粒子密度, 液性指数, 粒度分布) は、深度方向や採取場所などに関係なく、一様に同程度の値を示していた。またX線回折試験で得られた結果から、鉱物組成も泥火山試料とリファレンス試料では違いが見られなかった。
- 2) 船上試験結果において、泥火山試料はリファレンス試料よりも全体的に強度が低下した。また輸送試料の一軸圧縮強さでは、泥火山、リファレンス試料で差は見られなかった。しかし物理的性質や圧密特性は泥火山、リファレンス試料ともに同程度の傾向を示していることから、船上試験における泥火山試料の強度低下の原因として試料採取時の応力解放が大きく影響していると考えられる。
- 3) Kukuy (K2) 領域において、試料採取時の泥火山、リファレンス地盤で試料を採取する際のサンプラー貫入深度の結果を見ると、泥火山の貫入深度のほうがリファレンスに比べて深く貫入していた。これより、泥火山におけるガスや水の湧出による地盤の攪乱が強度低下を引き起こす要因の1つとなっていることが示唆された。

本研究より、泥火山がリファレンス地盤に比べて軟弱であることがより詳細に検討された。今後は低温、高圧条件化の湖底状態を再現して、メタンハイドレートの生成から分解までにいる過程での地盤強度の変化を示し、表層型メタンハイドレート賦存地盤の不安定化が地球温暖化などの環境問題に与える影響を地盤工学的な見地から評価していく。

謝辞

本研究を進めていくにあたり、ロシア・陸水学研究所 Oleg Khlystov 氏, Mikhail Grachev 氏, 北見工業大学 Alexey Krylov 氏, 南尚嗣氏, 清水建設安部透氏, 応用地質横山幸也氏, 山口大学兵動正幸氏に現地調査, 船上試験でのご協力をいただいた。記して敬意を表します。また、本研究は文部科学省科学研究費 (基盤研究 (B) : 18360222) の補助を受けたものである。

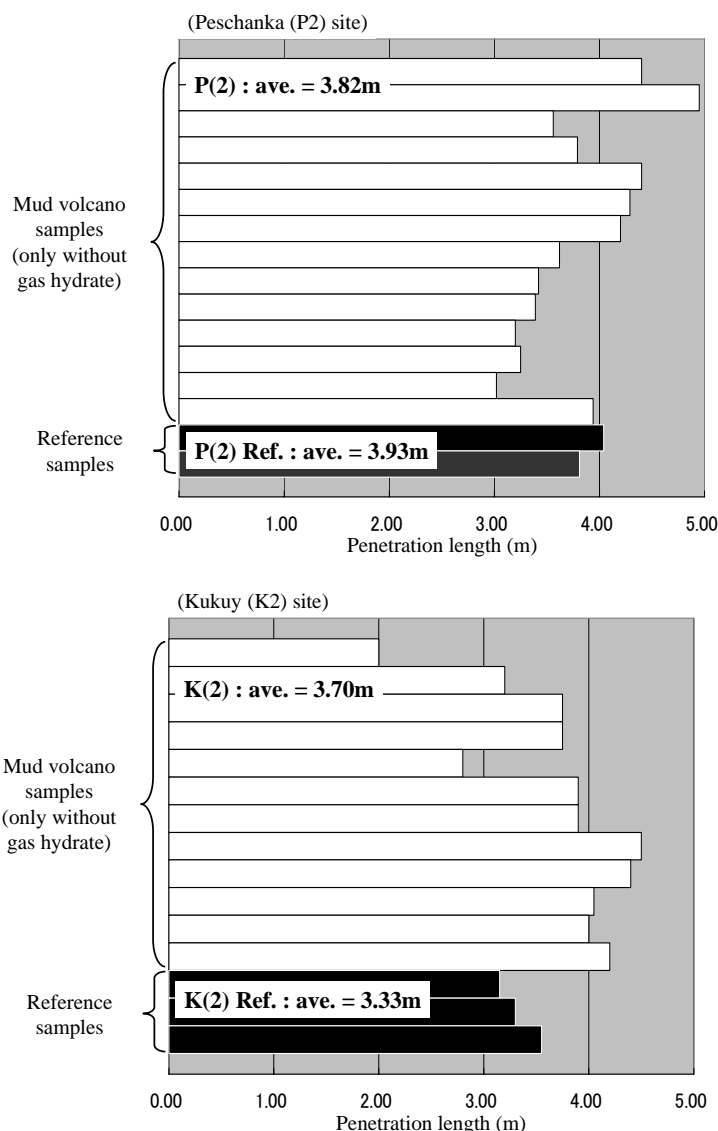


図20 Peschanka (P2), Kukuy (K2) 領域におけるサンプラーの貫入深度 (=コア長)

参考文献

- 1) Matsumoto, R., Tomaru, H. and Hailong, L.: Detection and evaluation of gas hydrates in the eastern Nankai Trough by geochemical and geophysical methods, *Resource geology*, Vol. 54, No. 1, pp. 53-67, 2004.
- 2) 松本良：メタンブルームがメタンを表層に運ぶ：ハイパードルフィンによる現場観測，日本地球惑星科学連合 2007 年大会，G211，2007.
- 3) Shoji, H., Soloviev, V., Matveeva, T., Mazurenko, L., Minami, H., Hachikubo, A., Hyakutake, K., Kaulio, V., Gladysch, V., Logvina, E., Obzhairov, A., Baranov, B., Khlystov, O., Biebow, N., Poort, J., Jin, Y. K. and Kim, Y.: Hydrate-bearing structures in the sea of Okhotsk, EOS, American geophysical Union, Vol. 86, No. 40, pp. 13-18, 2005.
- 4) 片岡沙都紀，山下聡，南尚嗣，西尾伸也，安部透，横山幸也，兵動正幸，Mikhail, G.: バイカル湖における表層型メタンハイドレート賦存地盤の工学的特性，地盤工学会北海道支部技術報告集，第 47 号，pp. 255-264，2007.
- 5) Matveeva, T. V., Mazurenko, L. L., Soloviev, V. A., Klerkx, J., Kaulio, V. V. and Prasolov, E. M.: Gas hydrate accumulation in the subsurface sediments of Lake Baikal (eastern Siberia), *Geo Marine Letter*, Vol. 23, pp. 289-299, 2003.
- 6) 山中金次郎，松尾憲一：土壌硬度に関する研究（第 1 報），日本土壌肥科学雑誌，Vol. 33, No. 7, pp. 343-347, 1962.
- 7) Yamashita, S. and Suzuki, T.: Small strain stiffness on anisotropic consolidated state of sands by bender elements and cyclic loading tests, *Proc. of 15th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Istanbul, pp.325-328, 2001.
- 8) 箕浦幸治，星野耕一：8. 生物情報による堆積環境の復元，井上源喜・柏谷健二・箕浦幸治編「地球環境変動の科学：バイカル湖ドリリングプロジェクト」，古今書院，196p，1998.
- 9) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，889p，2004.
- 10) Skempton, A. W.: The consolidation of clays by gravitational compaction, *Geological Society*, Vol. 125, pp. 373-411, 1970.
- 11) 小川富美子，松本一明：港湾地域における土の工学的諸係数の相関性，港湾技術研究所報告，第 17 卷，第 3 号，pp. 3-89，1978.
- 12) 田中洋行，榊原基生，港湾地域における土の一次的性質の統計解析，港湾技研資料，No. 719，36p，1991.
- 13) Shibuya, S., Hwang, S. C. and Mitachi, T.: Elastic shear modulus of soft clays from shear wave velocity measurement, *Géotechnique*, Vol. 47, No. 3, pp. 593-601, 1997.
- 14) Hardin, B. O. and Black, W. L.: Vibration modulus of normally consolidated clay, *Jour. of the SMF Div., Proc. ASCE*, Vol. 95, No. SM6, pp. 1531-1537, 1969.
- 15) Shibuya, S. and Tanaka, H.: Estimate of elastic shear modulus in Holocene soil deposits, *Soils and Foundations*, Vol. 36, No. 4, pp. 45-55, 1996.