

バイカル湖表層型メタンハイドレート賦存堆積土の地盤工学的性質

片岡 沙都紀¹, 山下 聡², 南 尚嗣³, 西尾 伸也⁴,
安部 透⁴, 横山 幸也⁵, 兵動 正幸⁶, Mikhail Grachev⁷

- 1 北見工業大学大学院・工学研究科博士後期課程システム工学専攻
- 2 北見工業大学・工学部土木開発工学科
- 3 北見工業大学・機器分析センター
- 4 清水建設(株)・技術研究所
- 5 応用地質株式会社・エネルギー事業部技術センター
- 6 山口大学・工学部社会基盤建設工学科
- 7 ロシア科学アカデミーシベリア支所・陸水学研究所

概 要

2005, 2006年に、ロシア・バイカル湖にて実施した表層型メタンハイドレート賦存地盤調査から、湖底表層土の工学的特性について検討を行った。調査ではメタンハイドレートを含む湖底表層の堆積土採取、コア観察および現地船上試験（コーン貫入試験、ベーンせん断試験、ベンダーエレメント試験、一軸圧縮試験）を行った。その際、試料はメタンハイドレート含有堆積土のほか、音波探査によりメタンハイドレートの存在が確認されなかった地盤からも採取し、各種試験での比較を行った。その結果、メタンハイドレートを含む地盤の表層堆積土は、メタンハイドレートが存在していない地盤の試料に比べて、測定値が堆積深度に依存せず、低い値を示した。この原因として、ガスや水の湧出による地盤の攪乱と試料採取時の応力解放が関係していると考えられた。

キーワード：バイカル湖，メタンハイドレート，現地調査，現場計測，試料の乱れ

1. はじめに

1.1 メタンハイドレートの概要

メタンハイドレートは、水分子が作るかご状の格子中にメタン分子が取り込まれてできた包接水和物のことである。メタンハイドレートは一見すると氷や雪によく似ているので区別は難しいが、その中には大気中に存在するメタンガスの160～170倍の体積が保持できる。

自然界でメタンハイドレートが存在するのに必要な条件として、温度圧力条件と、大量のメタンガスおよび水の存在があげられる。メタンハイドレートの相平衡曲線¹⁾を図1に示すが、メタンハイドレートが安定に存在するためには、温度280K(約7°C)で5MPa(約500気圧)以上の圧力が必要となる。ここで地下の温度は深度が大きくなるほど高く、また地下の圧力は深度とともに増大していくため、この両者を満たす場所は極域の永久凍土分布域や水深が約250m以深の海底、湖底堆積物中に限られてくる。

図2は、水域での圧力および地温、水温とメタンハイドレートの存在領域との関係を模式的に示したものである。先にも述べたが、地温は深度とともに上昇していくため、

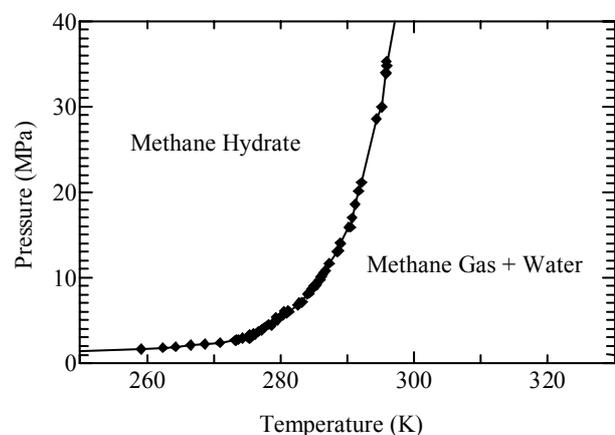


図1 メタンハイドレートの平衡曲線（データは文献1）より参照

海底、湖底堆積物中にメタンハイドレートが存在している場合は、ある深度を超えるとメタンハイドレートが生成できなくなり、フリーガス層が存在する。メタンハイドレート層とフリーガス層の境界面は良い音響反射面となり、BSR (Bottom Simulating Reflector: 海底擬似反射面) として検出される²⁾。

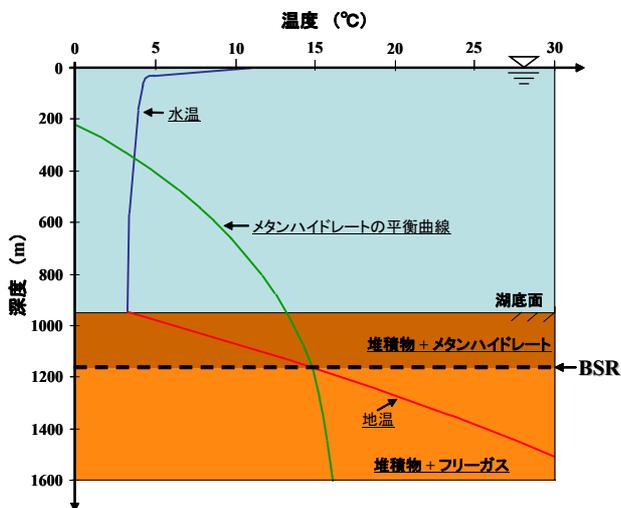


図2 水域の温度圧力分布とメタンハイドレート安定領域 (模式図)

1.2 メタンハイドレート調査

メタンハイドレートは、石油に代わる次世代エネルギーとして注目を受けている資源である。しかしその一方で、大量のメタンハイドレートを採取することによって海底地盤が不安定となり、沈下や地すべりなどの発生やそれに伴うガスの遺漏などが懸念されている。したがって、今後エネルギーとして活用していくためには、開発に伴う周辺環境への影響を十分配慮していく必要がある。

メタンハイドレート開発において、日本近海では南海トラフや奥尻沖での研究がある。これらの領域でのメタンハイドレート存在深はBSR深度上部(海底下約250m以深)であり、その存在状況から深層型メタンハイドレートと呼ばれている。深層型メタンハイドレートは多くが砂層中の空隙に存在している孔隙充填型であり、メタンハイドレートの大きさが微小のため目視観察が難しい。カナダ・マッケンジーデルタなどで採取されているメタンハイドレートもこの深層型メタンハイドレートに属し、現在のガスハイドレート研究において主となっている³⁾⁴⁾。

一方、北海道の北に存在するオホーツク海・サハリン沖やロシア・バイカル湖でもメタンハイドレート調査が行われており、両地域とも海底、湖底下数mからメタンハイドレートが採取されている⁵⁾。これらのメタンハイドレートはその存在状態から表層型メタンハイドレートと呼ばれている。表層型メタンハイドレートは前述した深層型メタンハイドレートとは形成状態が異なり、多くが粘土層中に塊状や層状をなして存在している。

表層型メタンハイドレートは深層型に比べてメタンハイドレートの採取が容易であり、経費も安価に抑えることができるため、エネルギー資源の将来性としても高い可能

性をもっている。しかし表層型メタンハイドレートの生成過程や地盤特性は深層型とは異なり、物理、化学的および地盤工学的な特性に関する研究は、ほとんど行われていないのが現状である。

そこで本研究では、バイカル湖で2005、2006年に行った調査の際に採取した堆積土を使用し、現地船上試験および物理試験を試みた。またその結果をもとに、バイカル湖表層型メタンハイドレート賦存地盤の工学的特徴について検討を行った。

2. 調査概要

2.1 バイカル湖の概要⁶⁾

図3(a)にバイカル湖を示す。バイカル湖はロシアの南側、モンゴルとの国境付近に位置しており、現在の形状は10～40万年前に形成された。湖は南北に680km、東西に40～50km(最大幅80km)、最大水深は1643mであり、世界一の水深をもつ湖である。バイカル湖は、バイカルリフト帯の中央を占める構造湖であり、その構造の違いから、アカデミシャンリッジおよびセレンガ川河口域のデルタ地帯を境に、上から北湖盆、中央湖盆、南湖盆の3つに区分されている。各々の平均水深は北湖盆で900m前後、中央、南湖盆で1400m前後と、アカデミシャンリッジを境に異なっている。また湖底土の堆積が開始した時期も、北湖盆で約3400万年前(堆積層の厚さ4400m)、中央、南湖盆では約5300万年前(堆積層の厚さ7500m)となっており、北湖盆が他の湖盆に比べて形成時期が新しい。

2.2 バイカル湖でのこれまでの調査

バイカル湖の湖底堆積物試料の採取は、1979年からロシア・陸水学研究所が主体となって行われてきた。その後1989年より実施されたバイカルドリリングプロジェクト(BDP)以降、採取した試料によるバイカル湖湖底堆積土の地質調査や、周辺域の環境変動などの研究が進められてきた⁷⁾。1997年のBDP調査の際に採取した試料では、湖底下121mと161mの深層域で、バイカル湖では初となる深層型のメタンハイドレートが採取されている⁸⁾。

バイカル湖で初めて表層型メタンハイドレートが採取されたのは2000年で、南湖盆域より採取された。それ以後この領域を中心に、表層型メタンハイドレート採取を主とした湖底堆積物試料の採取が行われてきた。しかし、これまでの調査の中心はメタンハイドレートの物性に関する研究であり、地盤工学的な立場からの研究は、今回の調査以前ほとんど行われていなかった。

2.3 試料の採取

2005、2006年にロシア、日本、ベルギーの3カ国が共同で実施したバイカル湖調査では、ロシア・陸水学研究所の所有する調査船「Vereshcagin号」を使用した。コアの採取領域は、アカデミシャンリッジ南側の中央湖盆および南

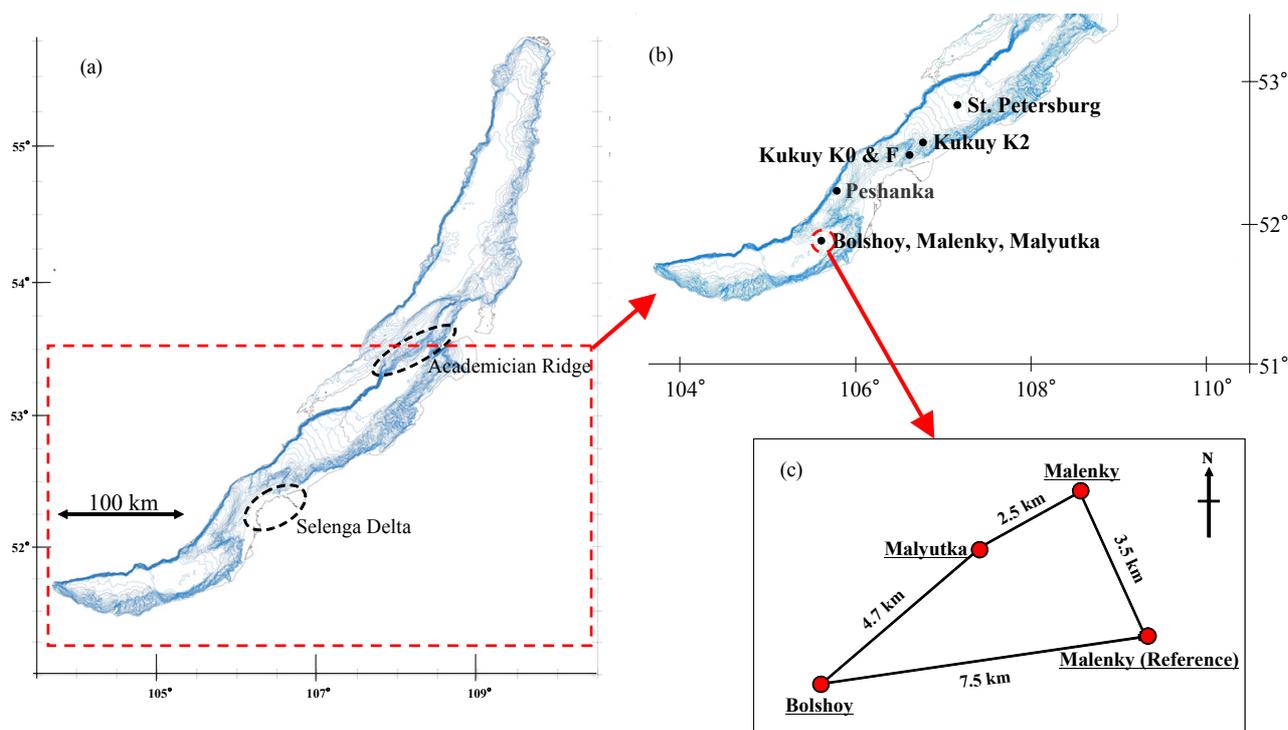


図3 (a) バイカル湖全域地図, (b) 試料採取領域, (c) Bolshoy, Malenky, Malyutka 領域の位置関係

湖盆の7領域で行った。本文ではその位置関係上、Kukuy K0, Kukuy F 領域、および Bolshoy, Malenky, Malyutka 領域を各々1つの領域としてまとめ、全5領域とした。図3(b)に各々の場所を示す(●印)。また Bolshoy, Malenky, Malyutka 領域内での位置関係を図3(c)に示す。今回の調査領域において、北側に位置する St. Petersburg 領域と南側に位置する Bolshoy, Malenky, Malyutka 領域との距離は、直線距離で約160km離れている。

バイカル湖のように湖底面下表層にメタンハイドレートが存在する場所において、その湖底面にはガスや堆積物を含む冷湧水が湖底面上に噴出して形成された、泥火山が多く存在することが知られている。また音波探査により、泥火山の存在する湖底面から湖水中に向かって水やガスの湧出(メタンガス・フレア)も確認できている。これらのことから本調査では、メタンハイドレート含有地盤からコアを採取するために、まず湖底表面の探査を行い、泥火山の位置を特定してサイスマックプロファイルを得た。その後音波探査(エコーサウンダーを使用)を行い、メタンガス・フレアの存在箇所を観察した。メタンガス・フレアの確認ができた場所において、重力式コアサンプラー(外径12.5cm)を用いて表層型メタンハイドレートおよび表層堆積物コアを採取した。コアサンプラーには、長さ5m、総重量約700kgのもの、長さ3.5m、総重量約650kgの2種類使用した。また、このコアサンプラーはどちらも二重管式になっており、内部には塩化ビニル製の円柱パイプ(内径10cm)が入っている。コア採取後は調査船実験室内で1mごとに分割したのちに、鉛直方向に半割にしてコア観察および各種船上試験を行った。船上試験の概要に関

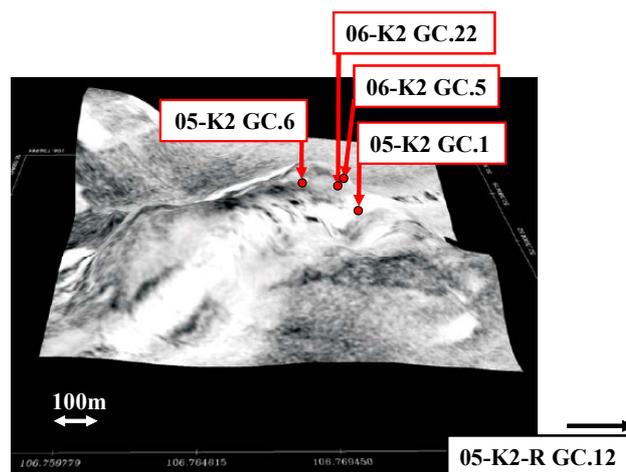


図4 Kukuy K2 領域の湖底面画像(文献9)に加筆

しては3章に示す。また、実際にコア内で観察されたメタンハイドレートの詳細については、4.1に示す。

図4には一例として、Kidaら⁹⁾によって得られたKukuy K2領域の湖底面画像(3Dイメージ)内に、試料の採取位置を記載している。2006年の調査では、中央湖盆にあるKukuy K2領域と南湖盆にあるBolshoy, Malenky, Malyutka領域の2領域で、音波探査により泥火山やメタンガス・フレアが確認されなかった地盤からも、試料を採取した。これらをリファレンス地盤とし、採取した試料とメタンハイドレート含有地盤から採取した試料で、各種試験における比較を行った。Kukuy K2領域のリファレンス地盤は、図4内に示すメタンハイドレート含有地盤(泥火山帯)から直線距離にして約1.7km離れている。

表1 採取したコア試料の領域別内訳

2005年 採取コア		Central Basin				South Basin			
			Kukuy K-2				Bolshoy	Malenky	
Water Depth (about)			900~1000 m				1380~1400 m	1360~1380 m	
Gravity Core (5m length)	With Gas Hydrate		1				2	2	
	Without Gas Hydrate		-				2	-	
	Reference		-				-	-	
Gravity Core (3.5m length)	With Gas Hydrate		2				-	1	
	Without Gas Hydrate		2				1	-	
	Reference		-				-	-	

2006年 採取コア		Central Basin				South Basin			
		St. Petersburg	Kukuy K-2	Kukuy Flare	Kukuy K-0	Peshanka	Malyutka	Malenky	Bolshoy
Water Depth (about)		1420~1430 m	900~1000 m	500~510 m	420~440 m	930~960 m	1340~1360 m	1360~1380 m	1380~1400 m
Gravity Core (5m length)	With Gas Hydrate	-	3	-	-	-	1	-	-
	Without Gas Hydrate	1	1	1	1	1	-	-	-
	Reference	-	1	-	-	-	-	1	-
Gravity Core (3.5m length)	With Gas Hydrate	-	1	-	-	-	-	1	-
	Without Gas Hydrate	-	12	1	1	1	1	-	3
	Reference	-	-	-	-	-	-	-	-

表2 本文で使用したコアの詳細

Site	Area	Year	Core Name	Water Depth (m)	Core Length (cm)	Gas hydrate Depth (cm)
Central Basin	Kukuy K2	2005	05-K2 GC.1	930.0	135	97 ~
			05-K2 GC.6	938.0	252	225 ~
		2006	06-K2 GC.5	908.4	272	241 ~
			06-K2 GC.22	908.4	300	282 ~
			06-K2-R GC.12*	986.9	318	-
	Kukuy K0, Kukuy Flare	2006	06-K0 GC.1	427.2	400	180~
			06-KF GC.1	513.6	324	-
St. Petersburg	2006	06-St. GC.2	1423.9	438	-	
South Basin	Bolshoy, Malenky, Malyutka	2005	05-Malen GC.1	1370.0	126	117 ~
			05-Malen GC.2	1375.0	180	100 ~
			05-Bol GC.1	1345.0	306	-
		2006	06-Malyu GC.1	1346.3	217	123 ~
			06-Malen-R GC.1*	1374.8	280	-
	Peshanka	2006	06-Pesha GC.1	957.5	460	-

*: Reference Core

※ Reference Core とは、音波探査により泥火山やメタンガス・フレアが観察されなかった地盤より採取したコア試料のことを示す。

表1には2005、2006年に各領域で採取した、コア内におけるメタンハイドレート有無の本数を示している。全領域合わせて2005年では13本、2006年では32本のコア採取を行った。そのうちメタンハイドレートが観察されたコアは2005年で8本、2006年で6本であった。本文ではこのうち、船上試験を実施した、中央湖盆8本(メタンハイドレート含有コア5本、メタンハイドレート未含有コア2本、リファレンスコア1本)、南湖盆6本(メタンハイドレート含有コア3本、メタンハイドレート未含有コア2本、

リファレンスコア1本)の計14本の採取コアの試験結果について述べていく。本文で使用したコアを表2に示す。表2にはさらに、領域ごとにコアの詳細な水深、コア長を示してある。なお、今回の調査で観察されたメタンハイドレートの存在深度は、湖底下最浅で60cm(水深1353m)であった。

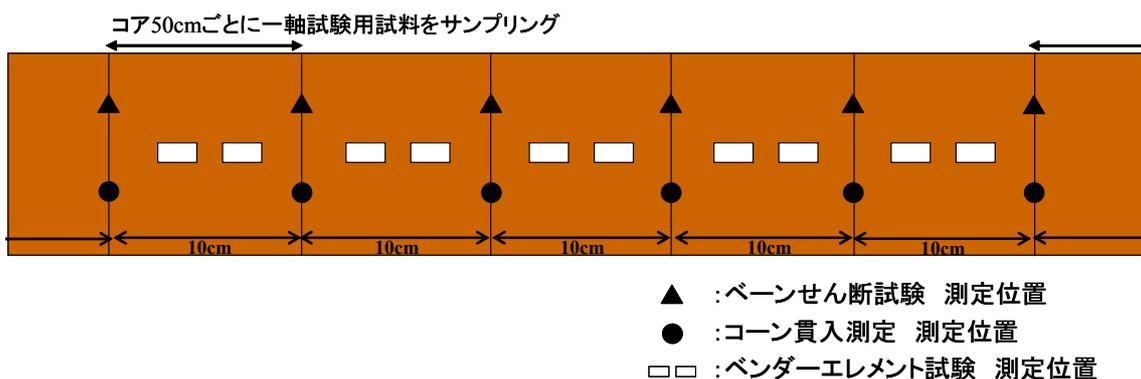


図5 半割コア断面での船上試験位置 (模式図)

3. 船上試験概要

試料採取直後に、船上で行った試験の概要を以下に示す。また各々の試験を行なった位置を図5に示す。

1) 土壌硬度計によるコーン貫入抵抗の測定

使用した小型の山中式土壌硬度計¹⁰⁾を写真1に示す。コーン部分の直径9mm, 長さ20mm, 先端角25°で、バネ強度が1N/10mmである。鉛直方向に2分したコアの切断面に10cm間隔(図5内に●で示す)で、写真2のように硬度計を貫入させてそのときの貫入深を測定し、コーン貫入抵抗 q_c を求めた。



写真1 土壌硬度計

2) ペンせん断試験

直径10mm, 高さ20mmのペーンブレードを、小型のトルクドライバーに取り付けて試験を行った。トルクドライバーは試料の硬さに応じて、トルクの測定範囲が $0.5 \times 10^{-2} \sim 5 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}$ と、 $3 \times 10^{-2} \sim 20 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}$ の2種類を用いた。貫入試験と同様、コアの切断面に10cm間隔(図5内に▲で示す)で、写真3に示すようにブレードを貫入してトルクドライバーを回転させ、このとき得られた最大トルク値よりペーンせん断強さ τ を求めた。



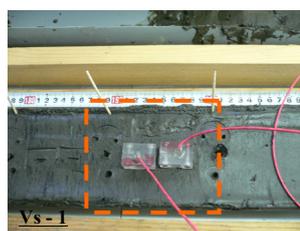
写真2 コーン貫入抵抗の測定



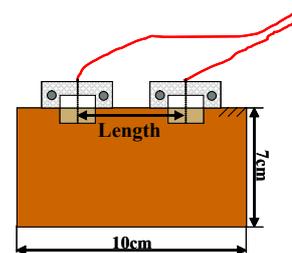
写真3 ペーンせん断試験

3) ベンダーエレメントによるせん断波速度の測定

図6に船上で行ったベンダーエレメント(BE)試験の設置方法を示す。まずコアの切断面に対して水平方向に10cm間隔(図5内に□で示す)でBEを押し込み、せん断波の到達時間およびBE間距離から、せん断波速度(V_{S-1})を算出した(図6-(a))。また50cm間隔で採取する一軸圧縮試験用試料に対しては、さらに上下方向にもせん断波速度(V_{S-2})を算出した(図6-(b))。各々のせん断波速度を測定するために必要なBE間距離は、 V_{S-1} ではBEの中心間距離とし、 V_{S-2} ではBEの先端間距離とした。

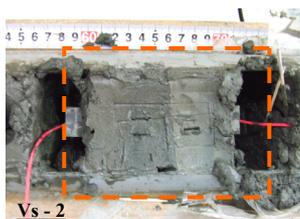


(a)

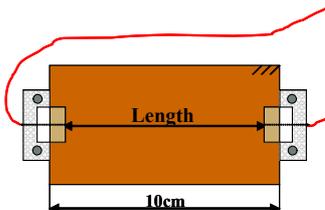


4) 一軸圧縮試験

手動式荷重装置を用いて、採取した直後の試料で一軸圧縮試験を行った。深度方向に50cm間隔で一軸供試体用試料を採り出し、直径35mm, 高さ60mmに整形した供試体を変位速度10mm/minで荷重し、一軸圧縮強さ q_u を求めた。



(b)

図6 BE設置位置 ((a) V_{S-1} , (b) V_{S-2})

4. 試験結果および考察

4.1 採取コア観察結果

図7には2006年に採取したコアのうち、Kukuy K2 領域で採取したコア (06-K2 GC.5, 06-K2-R GC.12) と、Bolshoy, Malenky, Malyutka 領域で採取したコア (06-Malen-R GC.1) の土質柱状図の一例を示す。

Kukuy K2 領域で採取した試料において、メタンハイドレートが観察されたコア (06-K2 GC.5) はほとんど粘性土で構成されており、深度方向での土層変化は見られなかった。これは他のメタンハイドレート含有地盤から採取したコアでも同様であった。Kukuy K2 領域のリファレンスコア (06-K2-R GC.12) では、湖底下 65cm と 200cm の深さで粘土質シルト層が見られたものの、メタンガス・フレアが存在している地盤と同じく粘土層が主であった。一方、Bolshoy, Malenky, Malyutka 領域のリファレンスコアでは、50cm 以深より 200cm 以上にわたってタービダイトの互層構造が確認できた。

本調査で採取されたコア内に確認できたメタンハイドレートは、すべて粘土層に存在していた。その形状は写真4-a-c に示すように塊状、粒状、板状であった。また写真4-a,b のように、同一コア内で深度方向に形状の異なるメタンハイドレートも観察された。これらは、砂層中の孔隙に充填されて存在している南海トラフのような深層型メタンハイドレートとは、存在状態および形状が異なるものであった。

メタンハイドレートが存在していたコアでは、存在深度より 100cm 程度上方まで 1~5mm 程度の空隙が多く見られている (図7中○で示す)。なお写真5に、試料断面に観察された空隙の一部を示す。これらはコア引き上げによる応力解放や、溶存ガスの気化、さらには昇温、減圧によってコア内の微小なメタンハイドレートが分解し、気化したメタンガスで空隙が生じたものと考えられる。また Kukuy K2 領域ではリファレンスコアからも、コア観察を行っている段階で切断面に気泡が出てきた (図7中○で示す)。よって Kukuy K2 領域では、領域全体にわたって間隙水中に多量のガスを溶存しており、よりメタンハイドレートが生成しやすい環境となっていると考えられる。図8には2006年に Kukuy K2 領域、および Bolshoy, Malenky, Malyutka 領域で採取した試料の粘土分割合 (実線) と細粒分割合 (破線) を湖底面からの深度ごとに示したものである。両領域とも、どの深度に対しても全体の 90%以上が細粒分で占められていた。また Kukuy K2 領域において、メタンガス・フレアが存在している地盤から採取した試料では、粘土分が 65~75%含まれていた。ここで、試料を電子顕微鏡で観察したところ、最大径 0.05~0.1mm の大きさの珪藻が観察された (写真6-a,b)。パイカル湖では堆積物内に珪藻が多く存在していることが知られており⁶⁾、これらが沈降分析による粒度試験の結果に影響を及ぼす可能性も考慮する必要がある。

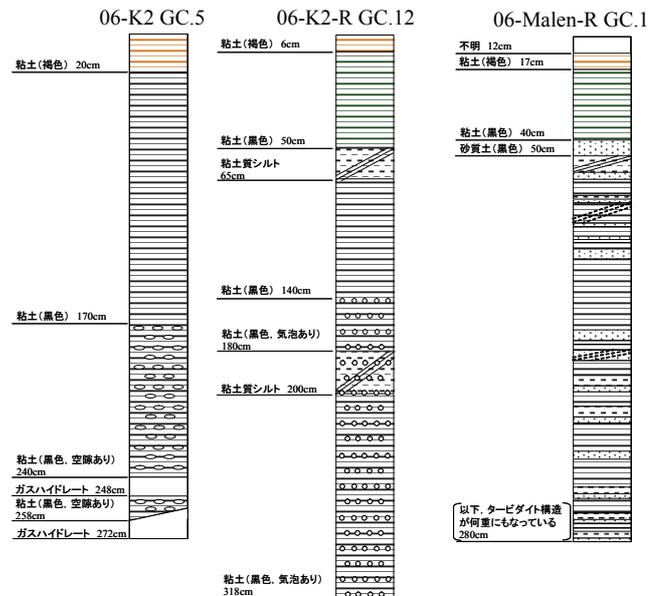


図7 採取コアの土質柱状図

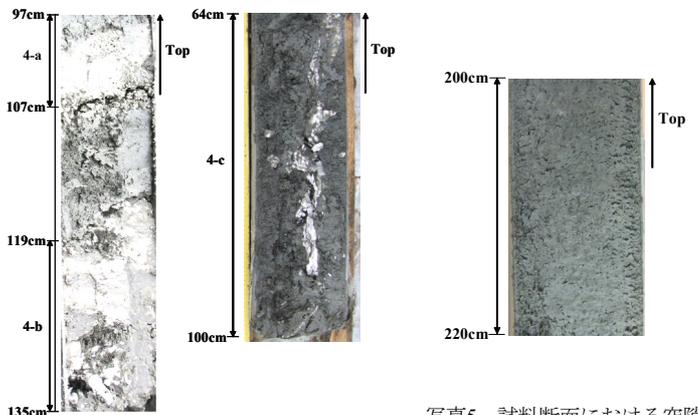


写真4 観察されたメタンハイドレート

写真5 試料断面における空隙の状態 (06-K2 GC.5)

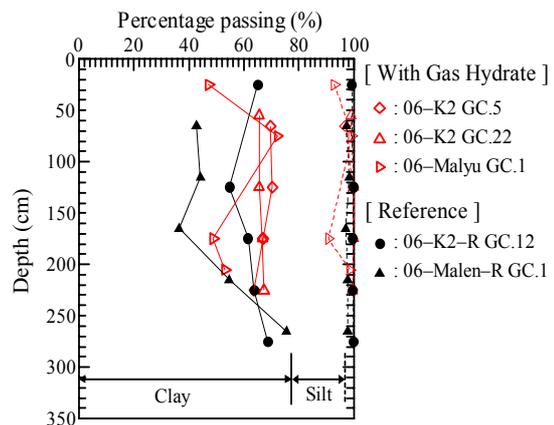


図8 粒度試験結果

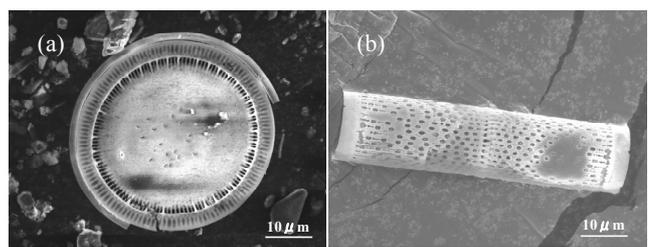


写真6 電子顕微鏡写真

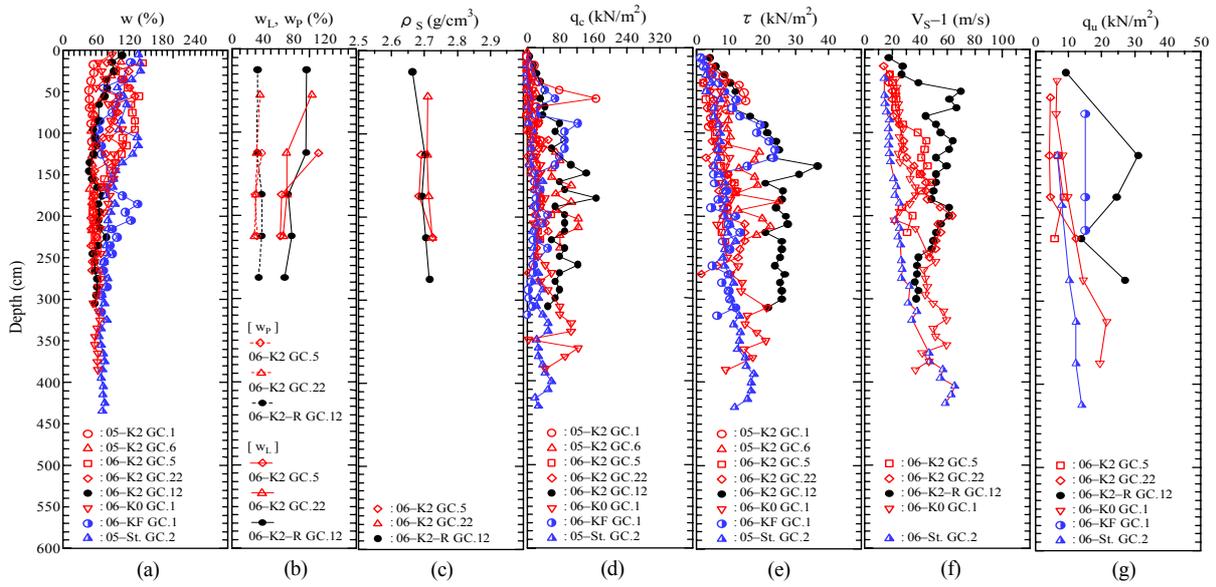


図9 中央湖盆採取コアの試験結果

(赤：メタンハイドレート含有コア，青：メタンハイドレート未含有コア，黒：リファレンスコア)

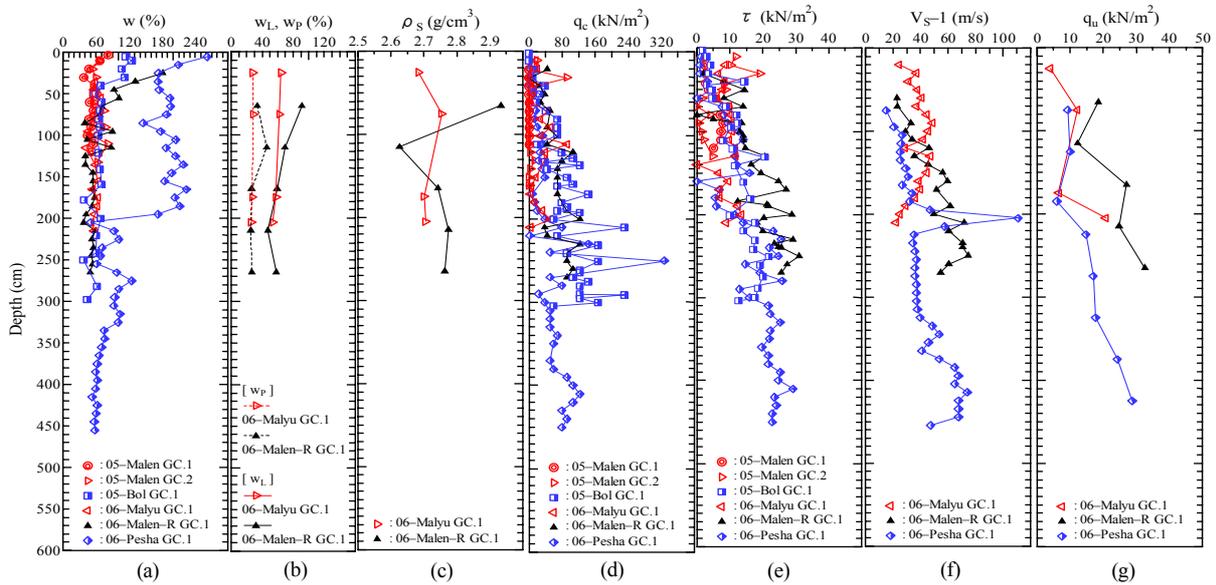


図10 南湖盆採取コアの試験結果

(赤：メタンハイドレート含有コア，青：メタンハイドレート未含有コア，黒：リファレンスコア)

4.2 物理試験および船上試験結果

図 9,10 は、両湖盆から採取したコアの、湖底面下深度における各種試験結果 ((a) 含水比, (b) 液性, 塑性限界, (c) 土粒子の密度, (d) コーン貫入抵抗, (e) ベーンせん断強さ, (f) せん断波速度, (g) 一軸圧縮強さ) を示したものである。ここで記載しているせん断波速度は、深度方向の測定点が多い V_{s-1} を示した。なお、図 11 に試験方法の違いによる S 波の相関性を示す。今回の BE 試験では 3 章でも記述したように、BE をコア切断面に対して水平方向に設置したもの (V_{s-1}) と、上下方向に設置したもの (V_{s-2}) 2 種類の試験方法を行ったが、図 11 よりどのコアに対してもおおよそ相関があると見られ、試験方法の違いによって S 波の値には影響がないことがいえる。

含水比 w (図 9 (a), 10 (a)) は、南湖盆で採取した 06-Pesha

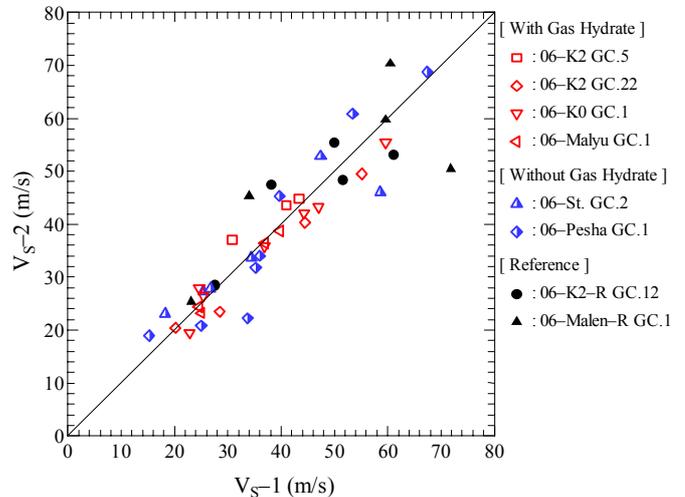


図11 試験方法の違いによる S 波の比較

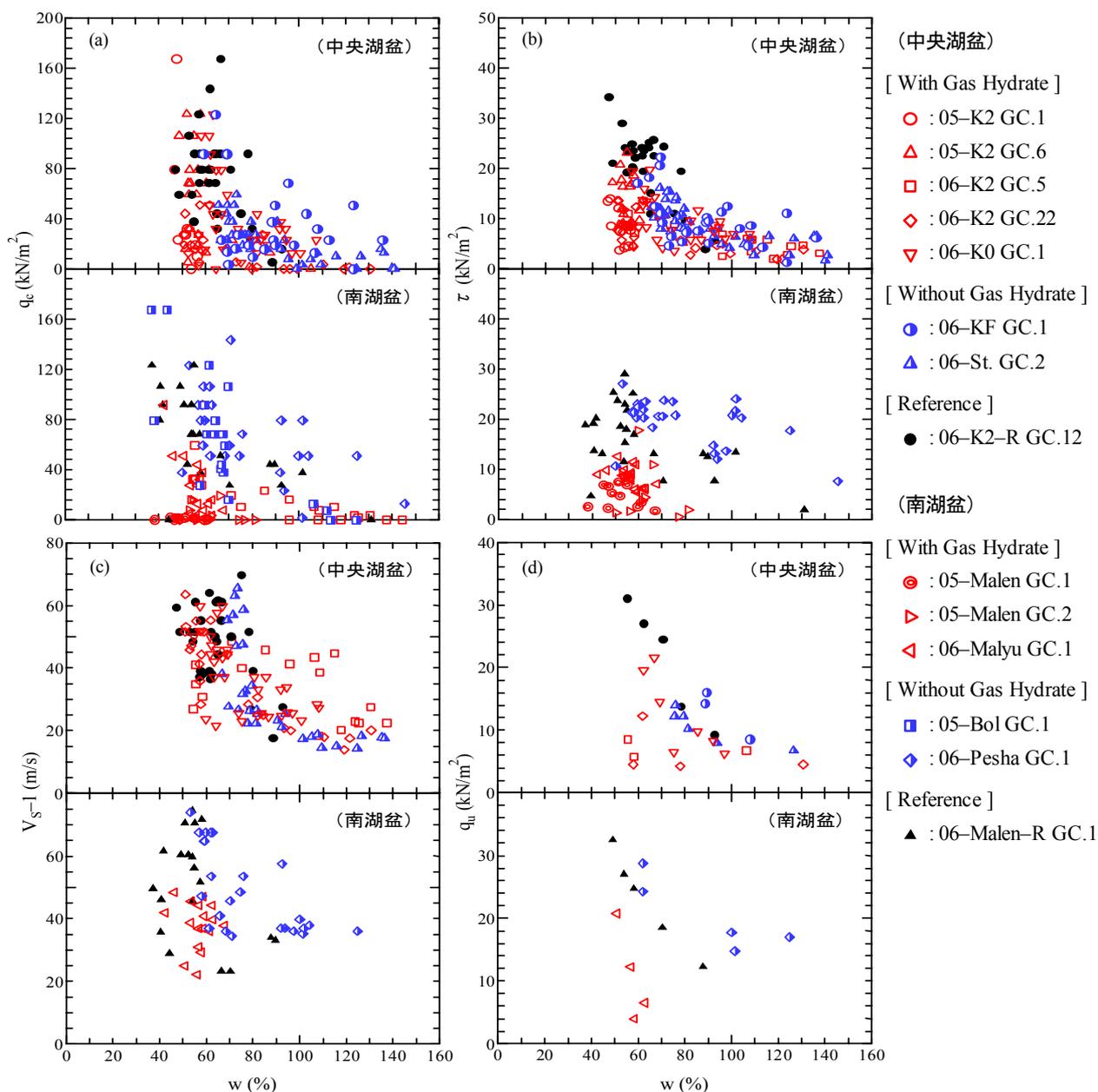


図12 含水比と (a) 貫入抵抗, (b) ベーンせん断強さ, (c) せん断波速度, (d) 一軸圧縮強さとの関係

GC.1 の試料を除くと両領域とも湖底下約 150cm まではばらつきが見られるが、それ以深ではどれも $w=40\sim70\%$ で深度に依らない。06-Pesha GC.1 はコア観察より、湖底面から深さ 200cm に渡って、黒色で比重の大きいトロイライト鉱物 ($\text{FeS}\cdot\text{H}_2\text{O}$, 比重 4.9) が、他の試料に比べて多く含まれていた。よってこのような構成鉱物の違いなどが、物理試験結果に影響を与えていることが考えられる。

2006 年に Kukuy K2 領域で採取した試料(06-K2 GC.5, 22, 06-K2-R GC.12) と、Bolshoy, Malenky, Malyutka 領域で採取した試料 (06-Malyu GC.1, 06-Malen-R GC.1) で液性限界 w_L 、塑性限界 w_p (図 9 (b), 10 (b)) および土粒子の密度 ρ_s (図 9(c), 10 (c)) の測定を行った。その結果、含水比と同様にメタンハイドレートの存在有無やコアの深度に関係なく、どの試料からも $w_L \geq 50\%$, $w_p = 30\sim40\%$, $\rho_s = 2.6\sim3.0\text{g/cm}^3$ という結果を得た。

一方、コーン貫入抵抗 q_c (図 9 (d), 10 (d)), ベーンせん

断強さ τ (図 9(e), 10 (e)), せん断波速度 V_{s-l} (図 9 (f), 10 (f)) および一軸圧縮強さ q_u (図 9 (g), 10 (g)) を見ると、両湖盆ともリファレンスコア (06-K2-R GC.12 (●), 06-Malen-R GC.1 (▲)) では堆積深度が深くなるに従って測定値が増加する傾向が見られるが、メタンハイドレート含有コアではその傾向が少なく、また堆積深度によらず低い値を示した。ここで Tanaka¹¹⁾によって得られた佐賀有明の海成粘土における q_u 値は、深度約 200cm で $q_u = 8\sim18\text{kN/m}^2$ 程度である。この値をバイカル湖試料と比較すると、リファレンス地盤ではほぼ同様か若干高い値を示しているのに対し、メタンハイドレート含有コアでは有明粘土より低い値となった。

図 12 (a)~(d)には、各々の測定値と含水比との関係を示す。両湖盆ともリファレンスコア (黒色) では、含水比の高低に測定値が対応している傾向が見られるのに対し、メタンハイドレート含有コア (赤色) では、測定値が含水比

の高低に依存せず、低い値を示した。メタンガス・フレアの存在する地盤から採取したメタンハイドレート未含有コア（青色）に関しても、メタンハイドレート含有コアとほぼ同様の傾向が見られているといえる。

また図13には、Kukuy K2 領域で採取した3試料(06-K2 GC.5, 22, 06-K2-R GC.12)の125, 225cm地点における一軸圧縮試験の結果を示す。これよりメタンハイドレート含有コアは、リファレンスコアに比べて深度方向に関係なく、強度が一様に低くなっている。

メタンハイドレートが存在していると考えられる、泥火山地帯から採取したコアの強度やせん断波速度がリファレンスのそれよりも低い値を示した原因を考察するために、土の締め具合の指標として用いられる乾燥密度 ρ_d に着目した。

図14は、一軸圧縮試験供試体より求めた ρ_d を、堆積深度方向に示したものである。これより、どの深度でも泥火山地帯より採取したコアの ρ_d (赤色, 青色) が、リファレンスコアの ρ_d (黒色) より全体的に低めの値となっている。また q_u と ρ_d との関係を図15に示すが、泥火山地帯より採取したコア (赤色, 青色) ではリファレンスコア (黒色) に比べて ρ_d が全体的に低い値を示している。

図7に示した土質柱状図で、土層下部(約150cm以深)では、泥火山地帯より採取したコアの切断面に空隙が多く見られている。この原因として、メタンハイドレートが賦存している泥火山地帯では、堆積物中のガス濃度が他の地盤に比べて高く、コア引き上げによる応力解放によって溶存ガスが気化したことと、堆積物内部に存在する微小なメタンハイドレートが分解し、気化したことなどが考えられる。そのため、強度やせん断波速度が低下したと考えられる。

一方土層上部(約150cm以浅)では、どの地盤から採取したコアからも、切断面に目視観察では空隙が認められなかった。図8に示した粒度試験結果から、地盤の違いによって、粒度に顕著な違いは見られていない。しかし図7に示したコア観察から、リファレンス地盤から採取したコアでは層構造が認められたのに対し、泥火山地帯より採取したコアでは全体的に層構造が認められなかった。以上のことから考察して、泥火山地帯では湖底堆積層下部より湧出しているメタンガスや水によって地盤が攪乱を受け、このことが強度やせん断波速度が低くなった一因とも考えられる。

5. 結論

2005, 2006年にバイカル湖で行った表層型メタンハイドレート賦存地盤の調査および試料採取において、コア観察、船上試験、物理試験を試みた。その結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 泥火山やメタンガス・フレアの存在している地盤の表層で、メタンハイドレートを含むコアが採取された。

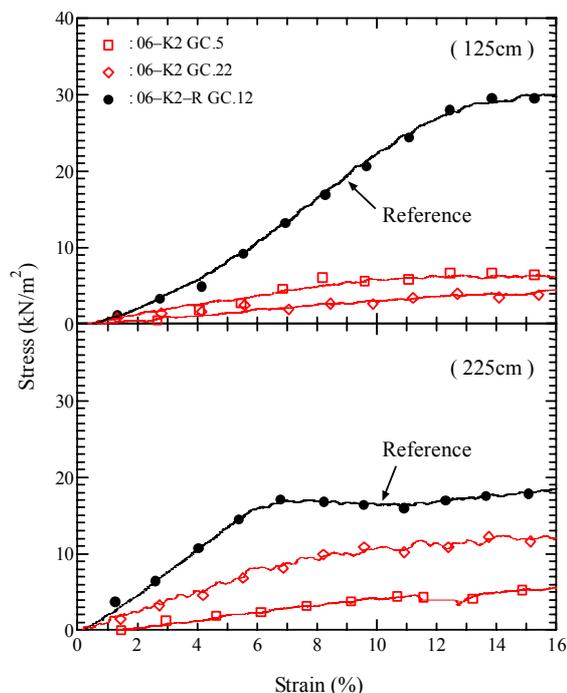


図13 一軸圧縮試験の結果の比較 (Kukuy K2 領域)

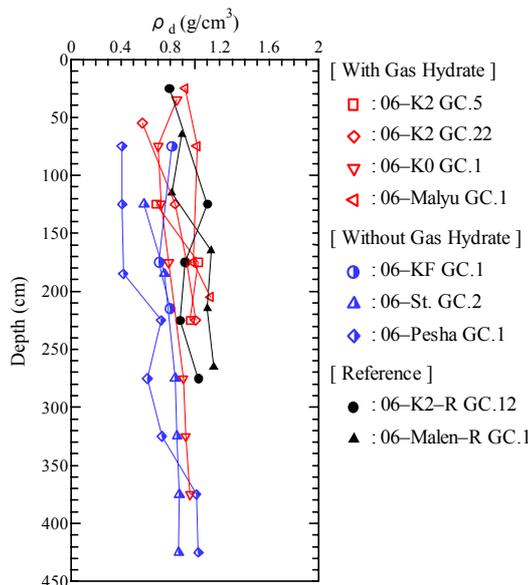


図14 一軸圧縮試験供試体より求めた乾燥密度

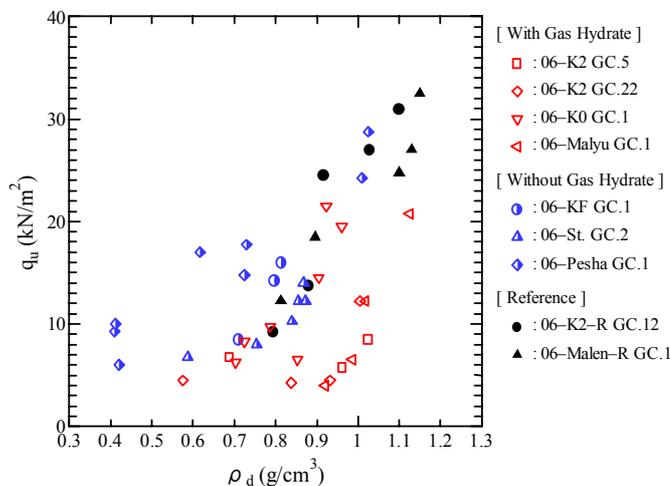


図15 乾燥密度と一軸圧縮強度との関係

コア内に観察できたメタンハイドレートの形状は塊状、粒状、板状であり、多くが砂層の間隙中に形成、存在する深層型メタンハイドレートとは異なるものであった。

- 2) メタンハイドレートが観察されたコアでは、メタンハイドレートが存在していた深度より上部で 1~5mm 程度の空隙が多く見られた。これはコア引き上げ時における溶存ガスのガス化や昇温、減圧による微小なメタンハイドレートの分解などが影響しているものと考えられる。
- 3) 各強度測定値（コーン貫入抵抗、ペーンせん断強さ、一軸圧縮強さ）およびせん断波速度において、泥火山の存在する地盤より採取したコアでは、泥火山の存在しない地盤から採取したリファレンスコアと比較して低い値となった。この原因として、コア内部の空隙の状態から考察されるサンプリング時の応力解放に伴う溶存ガスの気化と、コア切断面に層構造が見られないことなどから考察される堆積層下部からのガスや水の湧出による地盤の攪乱などが挙げられる。

今後は、メタンハイドレート賦存地盤の強度低下原因として考察した応力解放や堆積構造の攪乱の影響を、室内実験で再現することでより詳細に検討していく予定である。

謝辞：本研究において、ロシア・陸水学研究所 Oleg Khlystov 氏、ベルギー・ゲント大学 Jeffery Poort 氏、北見工業大学 Alexey Krylov 氏、山口大学吉川直孝氏、宮北志野さんには現地調査、船上試験でのご協力をいただいた。また試料採取後の物理試験では、北見工業大学名波敬太君にご協力をいただいた。記して敬意を表します。

なお、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。

参 考 文 献

- 1) Sloan, E. D.: Clathrate hydrates of natural gases, 2nd edition, Marcel Dekker, 1998, 705pp.
- 2) 佐藤幹夫・青木豊：ガスハイドレート（Ⅲ）メタンハイドレートの地質と探査, 日本エネルギー学会誌, Vol.80, No.10, pp. 973-995, 2001.
- 3) Clayton, C. R. I., Priest, J. A. and Best, A. I.: The effects of disseminated methane hydrate on the dynamic stiffness and damping of a sand, Géotechnique, No. 6, pp. 423-434, 2005.
- 4) Hyodo, M., Nakata, Y., Yoshimoto, N. and Ebinuma, T.: Basic research on the mechanical behavior of methane hydrate-sediments mixture, Soils and Foundations, Vol. 45, No. 1, pp. 75-85, 2005.
- 5) 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.
- 6) 井上源喜・柏谷健二・箕浦幸治：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, 1998, 269pp.
- 7) Kashiwaya, K., Ochiai, S., Tsukahara, H., Sakai, H. and Kawai, T.: Long-term late Cenozoic global environmental changes inferred from Lake Baikal sediments, Long Continental Records from Lake Baikal, Springer, 2003, 370pp.
- 8) Kuzmin, M. I., Karabanov, E. B., Prokopenko, A. A., Gelety, V. S., Williams, D. F. and Gvozdkov, A. N.: Sedimentation processes and new age constraints on rifting stages in Lake Baikal, Int. J. Earth Sci., No. 88, pp. 183-192, 2000.
- 9) Kida, M., Oleg, K., Tamara, Z., Takahashi, N., Minami, H., Sakagami, H., Alexey, K., Hachikubo, A., Yamashita, S., Shoji, H., Jeffrey, P. and Lieven, N.: Coexistence of structure I and II gas hydrates in Lake Baikal suggesting gas sources from microbial and thermogenic origin, Geophysical Research Letters, Vol. 33, L24603, 2006.
- 10) 山中金次郎・松尾憲一：土壌硬度に関する研究（第1報）, 日本土壌肥料科学雑誌, Vol. 33, No. 7, pp. 343-347, 1962.
- 11) Tanaka, H.: Sample quality of cohesive soils—Lessons from three sites, Ariake, Bothkennar and erammen, Soils and Foundations, Vol. 40, No. 4, pp. 57-74, 2000.

(2007. 2.9 受付)

Geotechnical properties of the shallow type methane hydrate-bearing sediments in the Lake Baikal

Satsuki KATAOKA¹, Satoshi YAMASHITA², Hirotsugu MINAMI³, Shin'ya NISHIO⁴,
Toru ABE⁴, Tatsuya YOKOYAMA⁵, Masayuki HYODO⁶, Mikhail GRACHEV⁷

- 1 Kitami Institute of Technology
- 2 Kitami Institute of Technology
- 3 Kitami Institute of Technology
- 4 Shimizu Corporation
- 5 Oyo Corporation
- 6 Yamaguchi University
- 7 Limnological Institute, SB RAS

Abstract

The site investigation of the shallow type methane hydrate-bearing ground was performed on the Lake Baikal, Russia, in 2005 and 2006, and the geotechnical properties of the bottom sediment were examined. In the investigation, sediments with methane hydrates were sampled, and several kinds of tests (cone penetration, vane shear, bender element, uniaxial compression tests) were performed on the board. At the same time, samples were also retrieved from the grounds without methane hydrates. Then, the soil strengths and physical properties for both samples were compared. As a result, it was found that the soil strengths of surface sediments with methane hydrates were lower than those without methane hydrates regardless of the depth. It would seem that this is because the effect of the disturbance by emission of gas and water and pressure release during the sampling.

Key words: lake Baikal, methane hydrate, site investigation, measurement, sample disturbance