## バイカル湖のメタンハイドレート層からのガス回収実験

森野 仁夫	小田原 卓郎	荻迫 栄治	透	安部	杉山 博一	西尾 伸也
(技術研究所)	(技術研究所)	(技術研究所)	術研究所)	(技	(技術研究所)	(技術研究所)

## Gas Recovery Test from Near-Surface Gas Hydrate in Lake Baikal

#### by Shin'ya Nishio, Hirokazu Sugiyama, Tohru Abe, Takuro Odahara and Kimio Morino

#### Abstract

In August 2008, we successfully demonstrated the recovery of methane gas from the bottom of Lake Baikal where the water depth was about 400 m. A steel chamber with a diameter of 1.2 m and equipped with 32 water jet nozzles was used for the gas recovery. We attempted to recover methane hydrate by dissolving it in water and pumping it up. The water jets were installed to excavate sediments and dissolve methane hydrate in water. According to the measurements of the volume composition and the isotopic composition of recovery gas, most of the recovered methane gas was revealed as to be originated from the methane hydrate layer. This system can be effectively used for gas recovery from near-surface methane hydrate.

#### 概 要

2008 年 8 月、バイカル湖の南湖盆の水深約 400m の湖底で、表層のメタンハイドレートからのガス回収実験に成功した。湖 底に設置した解離チャンバー内で、ウォータジェットによりメタンハイドレートと水を攪拌し、水に溶かしたメタンハイドレ ートを湖上へ運び、ガスを解離・回収した。回収した炭化水素ガス中のエタン濃度およびプロパン濃度は採取したメタンハイ ドレートの解離ガス組成と同一である事、また、回収ガスのメタン安定同位体組成はメタンハイドレート解離ガスの安定同位 体組成に等しい事から、回収ガスの主成分はメタンハイドレートの解離ガスである事を確認した。

## § 1. はじめに

非在来型の天然ガス資源であるメタンハイドレート は、氷のように冷たい物質でありながら燃えるため、 「燃える氷」とも呼ばれる。低温・高圧の条件(相平 衡状態)で水分子が作る「かご構造」の中にメタン分 子が閉じ込められた結晶構造で、永久凍土地帯の深部 地盤や大水深域の海(湖)底深層に豊富に存在する。 天然ガスは、石油や石炭に比べ、燃焼時における二酸 化炭素および窒素酸化物の排出量が少なく、硫黄酸化 物を排出しないため、クリーンエネルギー供給源確保 の観点から世界各国でメタンハイドレートの開発プロ ジェクトが進められている。日本近海にも膨大な資源 量のメタンハイドレートが分布する事が確認され<sup>1)</sup>、 化石資源に乏しく一次エネルギーの輸入依存度が極め て高い我が国では、エネルギーの安定供給を実現する 新たな国産エネルギー資源として期待されている。

南海トラフに存在するメタンハイドレートを対象に、 経済産業省のメタンハイドレート開発促進事業として、 その資源開発に向けた取組みが2001年から始まってお り、2012年以降、日本近海での海洋産出試験が予定されている。また、国の海洋基本計画の枠組みの中、メ タンハイドレート、石油・天然ガス、海底熱水鉱床を 対象とする、海洋エネルギー・鉱物資源開発計画が2009 年3月に総合海洋政策本部会合において了承され、そ の実用化に向けた国のロードマップ(図-1<sup>2</sup>)も提示 された。

南海トラフに存在するメタンハイドレートは海底地 盤深部(深度:100~300m)の未固結砂層の孔隙に存 在している。一方、大水深域において堆積土中のメタ ン湧出が活発な場所では、海(湖)底地盤の表層にも メタンハイドレートが存在する。日本近海では、日本 海の佐渡南西沖やオホーツク海のサハリン沖でこの様 なメタンハイドレートが確認されている。表層のメタ ンハイドレートは断層や泥火山などの地質構造により 集積するため、平面的、深度的に偏在して分布してお り、その集積状況や資源量は具体的には解明されてい ないのが現状である。我が国のメタンハイドレート資 源開発計画のメインターゲットは、南海トラフ海底深 部にある膨大なメタンハイドレートである。しかし、



図-1 メタンハイドレートの開発計画<sup>2)</sup>

より安定的なエネルギー供給源確保の観点から考える と、海底表層部のメタンハイドレートの資源化は有望 な選択肢の一つであり、安全かつ経済的な回収方法が 開発できれば、新たな国産エネルギー資源としての一 翼を担う事が期待できる。

筆者らは、湖底表層部にメタンハイドレートが存在 するバイカル湖において、重力式コアサンプラーで採 取したコア試料の分析、湖底でのコーン貫入試験を行 い、堆積土や含まれるメタンハイドレートの性状につ いて 2005 年より調査を進めてきた<sup>3), 4), 5), 6)</sup>。その結果 を踏まえ、2008 年 8 月、バイカル湖の南湖盆の水深約 400mの湖底で、表層のメタンハイドレートからのガス 回収実験を行った。ここでは、実施した調査の結果と 併せて、ガス回収実験結果を報告する。

# § 2. バイカル湖におけるメタンハイドレートの研究

バイカル湖は南北の長さ 640km、東西の幅 50km、最 大水深は 1,642m におよぶ世界最深の湖である。また、 その貯水量は 23,000km<sup>3</sup>、全世界の淡水の 20%を占めて おり、淡水湖としては世界最大の容積である。地溝帯 上の断層湖であり、3,000 万年~4,000 万年前から形成 された中央シベリアのバイカル・リフト帯の中心域に 位置し、湖底堆積層の厚さは最大 9km に達する<sup>7)</sup>。地 質構造的にはアカデミシャンリッジ(湖嶺)とセレン ガデルタによって北湖盆、中央湖盆、南湖盆に分けら れ、それぞれの最大水深は 904m、1,642m、1,461m で ある。

バイカル湖は淡水湖として唯一、メタンハイドレートの存在が確認されている湖である。湖底堆積土の熱流量の計測結果などから、1979年には既にロシアで、その存在が予期されていたが、1989年にロシア、1992年にロシア・米国共同で実施したマルチチャンネル地震探査において初めて、中央湖盆および南湖盆でBSR(Bottom Simulating Reflector:海底擬似反射面)<sup>注1)</sup>の存在が確認され<sup>8),9</sup>、BSR面の深度や熱流量の値についての検討が行われた<sup>10)</sup>。

注1) 音波を使った物理探査(反射法地震波探査)断面上に海(湖) 底とほぼ平行に出現する反射面で、メタンハイドレート安定 領域の基底に相当し、それより下の堆積土中にはメタンガス が含まれる。その上部にメタンハイドレートが存在する事を 知る手掛かりになる。

その後、1997年にロシア・米国・日本共同で行われ たバイカル湖ドリリングプロジェクト(BDP-97)<sup>11)</sup>で は、南湖盆の水深 1,428mの地点で堆積土コアを採取し、 深度 121m および 161mのタービダイト砂層の中に存在 するメタンハイドレートを確認した。

湖底表層部に存在するメタンハイドレートがバイカ ル湖で最初に確認されたのは2000年であり、南湖盆の Malenky サイト(後述の図-2参照。水深:1,330m)



図-2 バイカル湖の等深図<sup>14)</sup>と実験サイト

から重力式コアラー(長さ:4m)を用いて 1m 以浅の 深度から採取されたものである<sup>12)</sup>。これを契機として、 バイカル湖の表層型ハイドレートに関する研究は 2002 年以降、ロシア・日本・ベルギー共同で本格的に進め られる事になる。

バイカル湖の湖底表層に存在するメタンハイドレートは泥火山<sup>注2)</sup>由来のものであり、泥火山には以下の共通点が見出された<sup>13)</sup>。

- 水深:400m~1,500mのメタンハイドレート安定 領域にある。
- (2) BSR 面の上部に位置する。

(3) 活断層の近傍で地震活動度の高い場所である。

筆者らは、中央湖盆および南湖盆のこうした泥火山 にターゲットを絞り、調査を進めた。

注2) 地下深部の堆積物が間隙流体(水およびガス)と共に海(湖) 底に噴出し、堆積したもの。

## §3. メタンハイドレート調査

#### 3.1 湖底堆積土の試料採取

夏季調査は、ロシア科学アカデミー陸水学研究所所 有の調査船: R/V Vereshchagin 号を用いて実施し、冬季 調査は、氷上で実施した。バイカル湖の等深図<sup>14</sup>と調 査サイト(10地点)を図-2に示す。

重力式コアサンプラー(長さ:5m および 3m)を落 下させて湖底表層の堆積土試料を採取し、メタンハイ



**写真-1** 採取コアに含まれるメタンハイドレート (上:脈状、下:塊状)



図-3 コア試料の含水比とせん断強さ

ドレートの賦存状態を確認すると共にコアを半割して、 深度:10cm 毎に堆積土コアの含水比およびせん断強さ を測定した。**写真-1**は採取コアに含まれるメタンハ イドレートである。バイカル湖の湖底表層には、脈状、 塊状など様々な産状のメタンハイドレートが存在する。

含水比の測定には、TDR 式体積含水率計を用い、試料中にセンサープローブ(2極)を挿入して得られる 誘電率から体積含水率を求め、これより含水比を計算 した。また、せん断強さの測定にはポータブル・ベー ンせん断試験を用いた。ベーンブレードの大きさは



図-4 大水深 CPT

幅:10mm、高さ:20mm であり、これを試料中に挿入 して最大回転トルクをトルクドライバーで計測し、せ ん断強さを求めた。なお、採取コアに含まれるメタン ハイドレートは短時間で分解してしまうため、ここで は、そのせん断強さの測定はしていない。

Goloustnoye Flare サイトでの測定結果を図-3に示 す。図の縦軸は湖底面からの深度である。深度 50cm 以 浅の湖底表層部は高含水比の軟弱層があるが、50cm 以 深では深度方向に含水比の変化は小さく、60%程度の 値である。せん断強さは深度と共に増加し、深度 200cm で約 20kPa である。

## 3.2 大水深 CPT

メタンハイドレートが存在する大水深の湖底から採 取したコア試料では、サンプリング時の応力(水圧) 開放による構造的な乱れやハイドレートの解離が不可 避である。そこで、原位置応力状態の下で物性値を取 得する事を目的に大水深コーン貫入試験(CPT)プロ ーブ<sup>の</sup>を開発し、これを用いて湖底堆積層のコーン先 端抵抗を測定した。

実施した大水深 CPT の概要は図-4のとおりである。 CPT プローブ(直径:36mm、長さ:600mm)には、 先端抵抗測定用のロードセル(20kN)、計測回路、デー タロガー、電池が内蔵されており、最速:200Hz で 2 時間 40 分の連続データ取得・保存が可能である。4m ロッド先端にこのプローブを取付け、最上部の錘重量 で湖底に貫入させた。CPT プローブの水深は船上のエ コーサウンダーで計測しながら、0.5m/s で湖底に貫入、 0.2m/s で引上げを同一地点で3回繰返した。

Goloustnoye Flare サイトでの CPT 測定結果を図-5 に示す。約 500m の測線上に 3 つの調査地点((a) St.8w, (b) St.8wR および(c) St.8wH)を設け、測線から 300m 西 に離れた地点((d) St.8wF)と併せ、合計 4 地点で CPT を実施した。縦軸はコーン先端が地盤に貫入開始して





図-6 ガス回収実験の概要

からの経過時間である。また、測定値の視認性を優先 し、横軸の最大値はコーン先端抵抗の測定値に応じて 適宜調整して示してある。CPT プローブ落下地点を正 確に制御する事は難しいため、3回の測定データにバラ ツキが生じる場合があるが、データの再現性は概ね確 保されている。(a),(b)および(c)の3地点では、コーン 先端抵抗が急増し、2,000kPa以上の高い値を示す地層 が存在する。一方、(d)の地点では、コーン先端抵抗が 急増する地層はなく、その最大も350kPa程度である。 メタンハイドレートは堆積土に比べ非常に固い事から、 (a),(b)および(c)地点はメタンハイドレート層が存在し、 (d)地点はメタンハイドレート層が存在し、いと推定さ れる。しかし、コーン先端抵抗の最大値は異なってお り、堆積土中のメタンハイドレートの産状がコーン先 端抵抗に影響を与えていると考えられる。

大水深 CPT により、原位置応力状態の下でメタンハ イドレート層や堆積土の物性値が測定可能となり、メ タンハイドレートの存在や産状を推定する事ができた。 表層に存在するメタンハイドレート堆積層を調査する ツールとして、開発した大水深 CPT プローブの有効性 が確認できた。

## 3.3 ガス回収実験サイトの選定

表層にあるメタンハイドレートは平面的に偏在して いるため、後述するガス回収方法を検証する実験サイ トの選定が重要であった。そのためには、メタンハイ ドレートの分布や産状、湖底堆積土の物性などが不可 欠な情報となるが、バイカル湖での既存調査データは 限られていたため、上記調査の実施に多くの時間を投 入した。すなわち、重力式コアサンプラーを用いて10 サイトから194本のコア試料を採取すると共に、大水 深 CPT を5サイト36 地点で行った。

こうした調査結果を踏まえ、湖底表面からの深度 lm 以内に塊状のメタンハイドレートの存在が期待できる、



**写真-2** ウォータージェットを装備した メタンハイドレート解離チャンバー

南湖盆の水深約400m、離岸距離約3kmのGoloustnoye Flare サイトを実験サイトとして選定した。

#### §4. ガス回収実験

## 4.1 湖底表層部のメタンハイドレートを対象とした 回収方法

湖底表層では深部に比べ水温が低いため、表層部の メタンハイドレートは、深部に比べ相平衡条件から離 れた領域にある。すなわち、加熱や減圧により相平衡 状態を変化させ、湖底表層にあるメタンハイドレート を解離させるためには大きなエネルギーが必要となる。 また、ガス回収中に予期せぬメタン漏洩が発生した場 合、その水中への放出を抑制する地盤が存在しない。 そのため湖底生態系や地球環境への影響が懸念されて おり、資源開発に際しては深部のメタンハイドレート とは異なる観点からの慎重な検討が必要である。

本研究では、湖底表層部のメタンハイドレートを対 象とした新たな回収方法を検証した。すなわち、メタ ンハイドレート周辺の水の溶存メタン濃度は極めて高 いため、これをメタンハイドレート周辺の水を溶存メ タン濃度の低い水と置換し、メタンハイドレートと攪 拌させる事ができれば、メタンハイドレートからメタ ンが解離するはずである。この回収方法の概念図を 図-6に示す。この方法の特長は以下のとおりである。

- (1) 温度・圧力の相平衡条件を変化させる必要はなく、 効率的である。
- (2) 加熱する方法と異なり、湖底生態系に与える影響 が少ない。
- (3) メタンハイドレート解離は湖底に設置する解離 チャンバーの中でのみ限定的に生じる。したがっ て、予期せぬメタン漏洩が発生する可能性は低い。

## 4.2 ガス回収実験概要

湖底に設置する解離チャンバーは、用いる調査船に

装備されているウィンチの性能から、直径 1,220mm, 長さ 2,000mm の鋼管を加工し、質量約 850kg とした。 チャンバーの先端にはチャンバー下の堆積土掘削用と して 16 本、チャンバー内部の攪拌用として 16 本、計 32 本のウォータージェット・ノズルを交互にチャンバ ー内壁に沿って配置した。**写真-2**は製作した解離チャンバーである。

湖底堆積土のせん断強さを再現して行った室内模型 実験より、堆積土掘削に必要となるウォータージェッ ト流速を設定し、これを確保するウォータージェッ ト・ノズル径および必要流量を求め、送水ポンプを選 定した<sup>15)</sup>。送水はメタン溶存度の低い湖面近くから取 水し、チャンバー内でメタンハイドレートを溶解・混 合させた水を揚水した。揚水過程の減圧によりガス化 し、それを湖上で回収するシステムである。ポンプ近 傍には圧力計、流量計を設置して送水・揚水状態を監 視すると共に、ガス流量計により揚水中に含まれるガ ス体積を計測した。

偏在して分布するメタンハイドレートの位置に精度 良くチャンバーを着底させるため、水中位置検出装置 のSSBL(Super Short Base Line)システムを用いた。船上 から送るトリガー信号に対して水中のトランスポンダ が信号音を返信し、それをトランスデューサーで受信 する事で、まず水深、距離が計測される。次にトラン スデューサーで受信した音波の位相差からトランスデ ューサーからの相対的方向を演算し、最終的に船上の GPS、方位計のデータからトランスポンダの位置(緯 度、経度、深度)を算出するシステムである。当該実 験における位置精度は約 1m である。

## §5. 実験結果と考察

#### 5.1 実験状況

ガス回収実験中の送水ポンプは、流量:約15.5m<sup>3</sup>/h、 ウォータージェット・ノズル先端での流速:10.7m/s と ほぼ計画通りの定常運転した。また、揚水ポンプの総 水量は最終的には17.2m<sup>3</sup>に達した。

実験終了後にチャンバーを引き上げ、その内部を観察したところ、約83cmのところまで堆積土が付着しており、この深さまで湖底堆積土中に貫入していたものと推察された。

## 5.2 ガス流量およびガス濃度

図-7はガス流量計で計測したガス体積を水量で除したガス/水比(大気圧下)の変化を示したものである。40分経過頃から流体中のガス/水比が増加し、最終的には250ml/1=0.25 に達する。

図-8は回収ガスに含まれる炭化水素濃度の時間変化を示す。ガス流量と同様、40分経過頃から急激に炭



化水素濃度が上昇し、最終的には90%以上となる。

## 5.3 ガス回収量

揚水ポンプの流量にガス/水比(図-7)、炭化水素 ガス濃度(図-8)を乗じて積分すると炭化水素ガス の回収量が計算できる。図-9に回収速度、図-10に 総回収量の時間変化を示す。その結果、回収速度は 2.7m<sup>3</sup>/h、100分間で約1.4m<sup>3</sup>の炭化水素ガスが回収でき た事がわかった。

#### 5.4 回収ガスの分析

炭化水素ガス中のエタン濃度は1%程度、プロパン濃度は30ppm程度であり、当該サイトで採取したメタン ハイドレートの解離ガスの組成とほぼ同一であった。

また、当該サイトで採取したメタンハイドレートの 解離ガス、間隙水溶存ガスと、回収実験で回収された ガスについて、メタンの安定同位体(δ<sup>13</sup>C, δD)比を分 析した結果、回収ガスとメタンハイドレート解離ガス の同位体組成は一致する事が示された。

以上の結果から、回収ガスの主成分は堆積土中のメ タンハイドレートの解離ガスである事が判明し、本手 法の有効性を確認した。

#### § 6. おわりに

2008 年 8 月、バイカル湖の南湖盆の水深約 400m の 湖底で、表層のメタンハイドレートからのガス回収実 験を行い、湖底表層部のメタンハイドレートを対象と した新たな回収方法を検証した。すなわち、湖底に設 置した解離チャンバー内で、メタンハイドレートと水 を攪拌し、メタンハイドレートを溶解・混合させた水 を湖上へ運び、ガスを解離・回収した。その結果、最 終的にはガス/水比が 0.25、炭化水素濃度 90%、回収 速度 2.7m<sup>3</sup>/h、100 分間で約 1.4m<sup>3</sup>の炭化水素ガスが回 収できた事がわかった。さらに、回収したガス量、ガ ス組成および安定同位体比を考察した結果、回収ガス の主成分はメタンハイドレート由来の炭化水素ガスで ある事を確認し、本手法の有効性を確認した。

#### 謝辞

本研究は独立行政法人・科学技術振興機構の平成18 年度革新技術開発研究事業の補助を受けて実施したも のである。バイカル湖での調査および実験は、北見工 業大学の八久保晶弘准教授、山下聡教授、南尚嗣准教 授、庄子仁教授、北海道大学の田中洋行教授、三田地 利之名誉教授、ロシア科学アカデミー・陸水学研究所 の Mikhail Grachev 所長、Oleg Khlystov 氏と共同で実施 した。吉田技術士事務所・吉田裕所長にはガス・湖水 サンプリングについて、海洋電子(株)・村上康幸氏に は SSBL 計測について、技術協力を頂いた。また、技 術研究所・三宅紀治リサーチフェロー,同社会基盤技 術センター・奥野哲夫G長には、本稿を改善する上で 有益なコメントを頂いた。ここに記して深甚なる謝意 を表する。

#### <参考文献>

- 1) http://www.mh21japan.gr.jp/
- 2) http://www.enecho.meti.go.jp/topics/090324/sankoushiryou.pdf
- 3) 西尾伸也, 荻迫栄治, 南尚嗣, 八久保晶弘, 山下聡, 片岡沙都紀, Krylov, Alexey, 横山幸也, 兵動正幸, Khlystov, Oleg, Zemskaya, Tamara: "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.
- 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 Grachev: "バイカル湖表層型メタンハイドレート賦存地 盤の調査と堆積土の物理的性質",第42回地盤工学研究発表会講演集,pp.339-340,2007.
- 5) 西尾伸也,安部透,荻迫栄治,山下聡,兵動正幸, Mikhail Grachev: "バイカル湖における表層型メタンハイドレート堆積地盤の力学的性 質",第42回地盤工学研究発表会講演集,pp 343-344,2007.
- 6) 西尾伸也,安部透,山下聡, Oleg Krystov: "バイカル湖メタンハイドレート堆積層における CPT",第43回地盤工学研究発表会講演集, pp.249-250,2008.
- 7) ten Brink, U.S. and Taylor, M.H. : "Crustal structure of central Lake Baikal: Insights into intracontinental rifting", Journal of Geophysical Research, Vol.107, No.B7, pp ETG2-1-15, 2002.
- Hutchinson, D.R., Golmshtok, A.J., Zonenshain, L.P., Moore, T.C., Scholz, C.A. and Klitgord, K.D.: "Depositional and tectonic framework of the rift basins of Lake Baikal from multichannel seismic data", Geology, Vol 20, No.7, pp.589–592, 1992.
- Golmshtok, A.J., Duchkov, A.D., Hutchinson, D.R. and Khanukayev, S.B.: "Estimation of heat flow on Baikal from seismic data on the lower boundary of the gas hydrate layer", Russian Geology and Geophysics, Vol.38, No.10, pp.1714-1727, 1997.
- 10) Golmshtok, A.J., Duchkov, A.D., Hutchinson, D.R. and Khanukayev, S.B.: "Heat flow and gas hydrates of the Baikal Rift Zone", International Journal of Earth Science, Vol.89, pp.193-211, 2000.
- 11) 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,pp 196, 1998.
- 12) Klerkx, J., Zemskaya, T.I., Matveeva, T.V., Khlystov, O.M., Grachev, M.A., Namsaraev, B.B., Dagurova, O.P., Golobokova, L.P., Vorobyova, S.S., Pogodaeva, T.P., Granin, N.G., Kalmychkov, G.V., Ponomarchuk, V.A., Shoji, H., Mazurenko, L.L., Kaulio, V.V., Solovyov, V.A.: "Methane hydrates in the surface layer of deep sediments of Lake Baikal", Dokl. RAN, Vol.393, No.6, pp.822-826, 2003.
- 13) Khlystov O.M: "New fidings of gas hydrates in the Baikal Bottom sediments", Russian Geology and Geophysics, Vol.47, No.8, pp.979-981, 2006.
- De Batist, M., Canals, M., Sherstyankin, P., Alekseev, S. and the INTAS Project 99-1669 Team: "A new bathymetric map of Lake Baikal", Open-File Report on CD-ROM., 2002.
- 15) 杉山博一,西尾伸也,安部 透,八久保晶弘,山下 聡,田中洋行,Oleg Khlystov: "湖底表層に賦存するメタンハイドレート層からのガ ス回収実験",第21回海洋工学シンポジウム講演論文集,OES21-124,2009.