

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18360222

研究課題名（和文） 浅層型メタンハイドレート地盤の地盤工学的評価に関する研究

研究課題名（英文） Study on Geotechnical Evaluation of Shallow Type Methane Hydrate-Bearing Grounds

研究代表者

山下 聡 (YAMASHITA SATOSHI)

北見工業大学・工学部・教授

研究者番号：00174673

研究成果の概要：メタンハイドレートが海底や湖底の表層部に存在している地盤の特性を明らかにするために、主としてロシア・バイカル湖で採取した堆積土試料に対して各種物理試験や力学試験を行い、ハイドレート有無による地盤特性の共通点や相違点を比較検討した。その結果、ハイドレート有無による土質特性に顕著な差は認められず既存の式でも十分評価できること、またガスの気化によって乱れた試料の強度からも原地盤強度が推定可能であることが示された。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2007年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2008年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：地盤工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：メタンハイドレート、堆積土、土質力学、物理試験、力学試験、応力解放

1. 研究開始当初の背景

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である。メタンハイドレートは天然に広く分布し、現在最も注目されている次世代エネルギー資源であるとともに、温室効果ガスの巨大貯蔵庫でもある。地球上のメタンハイドレートの大部分は、海底下の堆積物中に存在している。メタンハイドレートの存在量推定には音波探査等が用いられ、海底深部のハイドレート層の下にフリーガスが存在する場合、その境界面は良い音波反射

面となり、BSR（海底擬似反射面）として検出される。メタンハイドレート開発については、現在進行中の大型プロジェクトとしては、南海トラフやカナダのマッケンジーデルタの研究があるが、何れもBSR深度のハイドレートであり、特殊調査船による深層ボーリング等の最新技術と莫大な経費が導入されている。日本近海でメタンハイドレート試料が直接採取されたのは、この南海トラフと奥尻沖であり、ともに深層ボーリングが必要であった。浅層型メタンハイドレートについては、2004年に日本海においてわが国としては始

めて試料採取に成功しているのみであった。

一方、北海道の北に広がるオホーツク海においては、1986年にパラムシール島沖で、1991年にはサハリン島沖で、浅層型メタンハイドレートがロシアの研究者によって採取されている。さらに、2003年には、ロシア、ドイツ、ベルギー、韓国、日本の研究機関が参加した国際共同研究において、サハリン沖で浅層型メタンハイドレートを採取している。また、ロシア・バイカル湖においても湖底下数 m の表層部分から浅層型メタンハイドレートが採取されている。

今後、メタンハイドレートを次世代エネルギー資源として活用するためには、その掘削方法とともにメタンハイドレートの解離（分解）に伴う地盤の安定性を評価することは必須の課題であるが、特に浅層型ハイドレート堆積地盤に対する地盤工学的な見地に立った研究はほとんど行われていなかった。

2. 研究の目的

メタンハイドレートは高圧・低温下で安定な状態で存在し、海底下に存在するメタンハイドレートを採取するには、一般に温度を上昇または圧力を低下させることによってメタンガスを解離させ採取する方法が考えられている。しかし、メタンハイドレートの解離現象には、メタン濃度、温度、圧力、不純物の含有量、堆積物の粒度・組成などが大きく影響し、将来のエネルギー源として利用するためには、メタンハイドレート堆積地盤の物理的・化学的特性を把握するとともに、解離に伴う力学的特性の変化に及ぼす種々の因子の影響を評価する必要がある。また、海底、湖底表層部にガスハイドレートが存在している場合、採取時や地震活動などに起因して、解離したガスによる地球環境への影響も懸念されている。したがって、メタンハイドレート賦存地盤の安定性を評価するためには、実際にメタンハイドレート堆積地盤から堆積土を採取し、その力学的特性を明らかにする必要がある。しかし、日本近海に存在しているメタンハイドレートは深層型が主体であり、試料採取には高度な技術と費用が必要である。また、採取した試料も限られており十分な地盤工学的特性を把握することは難しい。

それに対して、オホーツク海サハリン沖やロシア・バイカル湖には海底下数 m 程度に浅層型メタンハイドレートが存在しており、深層型よりも低費用で多くの実試料の採取が可能である。また、浅層型ハイドレートは深層型とその生成過程が異なっており、物理・化学的および地盤工学的な立場からの研究はほとんど行われていないのが現状である。そこで、浅層型ハイドレート堆積地盤の地盤工学的特性を評価するために、オホーツクサ

ハリン沖やロシア・バイカル湖においてメタンハイドレート堆積地盤からコア試料を採取し、採取したガスハイドレートや堆積土の観察、および各種物理、力学試験を行い、メタンハイドレートの有無による堆積土の土質特性の共通点や相違点などを比較検討し、メタンハイドレート堆積地盤の地盤工学的評価を行うことを目的とする。これらの研究は、今後メタンハイドレート開発における海底地盤の安定性評価に貢献し、これらの成果は今後の日本近海の浅層型ハイドレート研究のモデルともなる。

3. 研究の方法

(1) 堆積物の採取とコア観察

ロシア、バイカル湖において複数の領域においてコア採取を行う。バイカル湖のメタンハイドレートは、ガスや堆積土を含む冷湧水が湖底面に噴出して形成された泥火山の表層部に存在していることが報告されている。そこで調査では事前に、反射法地震探査によって湖底面上の泥火山位置を特定し、サイスミックプロファイルを得る。その後、泥火山が確認できた位置において、重力式コアサンプラーを使用してガスハイドレートおよび表層堆積土の採取を行う。試料を船上まで引き上げた後は、内部のパイプを取り出して 1~2m ごとに切断し、鉛直方向に二分したコアの切断面で試料の観察と船上試験を行う。

(2) 採取直後の試料に対する船上試験

採取直後の堆積土試料の強度を把握するため、堆積土の観察後すぐに船上にて各種試験（ベーンせん断試験、小型コーン貫入試験、一軸圧縮試験、ベンダーエレメント試験）を行い、深度方向の強度特性を把握する。

(3) 輸送試料を用いた物理試験と室内試験

①表層部からメタンハイドレート層までの連続的な物理特性を把握するために、採取した試料に対して粒度・土粒子の密度試験、液性・塑性限界試験、自然含水比測定、X線回析、電子顕微鏡撮影等を行い、メタンハイドレート堆積層の物理的性質と構成堆積物を調べる。

②輸送した試料を用いて、船上試験と同様の方法で一軸圧縮試験を行う。また、ベンダーエレメントを設置した圧密試験装置と三軸試験装置により、堆積層の小ひずみ剛性、強度特性、圧密特性を調べる。

4. 研究成果

(1) ハイドレート堆積地盤の調査とコア採取

3年間に亘るロシア、バイカル湖調査でのコアの採取領域は、図1に示すようにバイカル湖南側の6領域である。3年間の調査を通して、表層堆積土コアは泥火山地盤で135本（内部観察、船上試験用コア121本、輸送用コア14本）、リファレンス地盤で12本（内

部観察，船上試験用コア 8 本，輸送用コア 4 本) 採取した。また観察を行った泥火山コア 121 本のうち，34 本のコアでガスハイドレートが観察された。

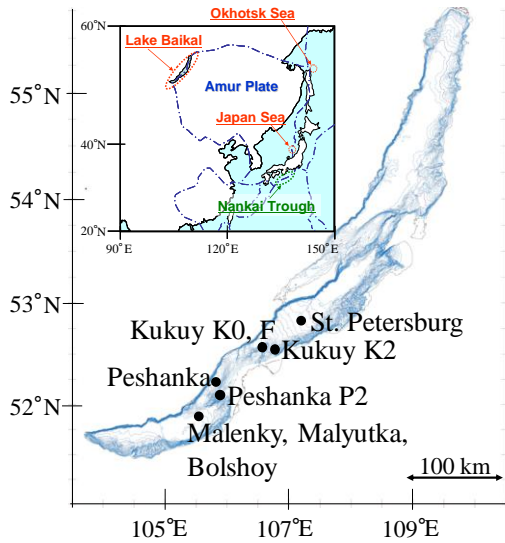


図 1 バイカル湖での試料採取地点(●印)

(2) コア観察

①泥火山地盤より採取した堆積土中にハイドレートが確認でき，その大きさは目視観察が可能な大きさで，図 2 に示すようにその形状は塊状，粒子状など様々であった。また，確認できたハイドレートは粘土層中に存在しており，砂質土中に形成されることが多い深層型ハイドレートの形状とは異なるものであった。

②ハイドレートが観察されたコアでは，0.1～0.5cm 程度の空隙が多く見られた。これはコア引き上げ時の溶存ガスの気化や昇温，減圧による微小なガス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泥火山試料では，リファレンス試料に見られるような明確な層構造が確認できなかった。これより泥火山地盤では，ガスの湧出によって地盤が攪乱されている可能性が考えられる。

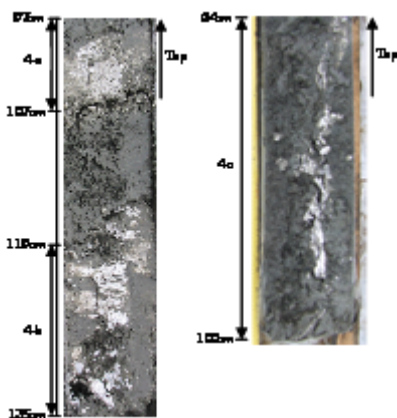


図 2 観察されたメタンハイドレートの一例

(3) 物理的性質

各種物理試験結果より，今回採取したバイカル湖堆積土においては，採取領域や深度による物性値の顕著な差はなかった。一例として図 3 に Kukuy K2 領域で採取した堆積土試料の物理試験(含水比 w ，液性指数 I_L ，土粒子の密度 ρ_s ，粒度分布)の深度分布を示す。物性値は，深度約 150cm まではばらつきがあるものの，150cm 以深では泥火山，リファレンス試料とも深度に依存せず一定の値を示していることから，同一領域から採取した堆積土の物性値ではハイドレートの有無による相違は大きくはないと思われる。

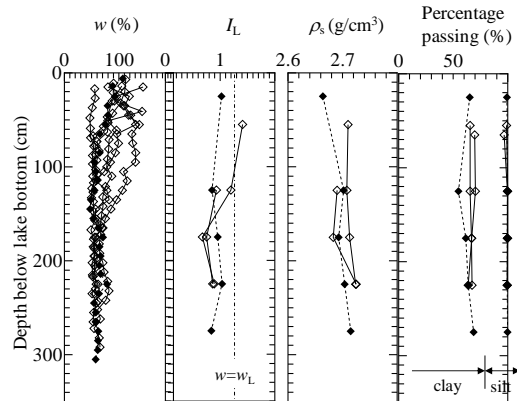


図 3 Kukuy K2 領域より採取した堆積土の物理試験結果 (◇:泥火山試料, ◆:リファレンス試料)

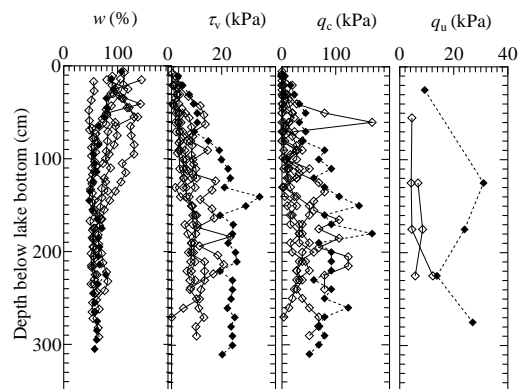


図 4 Kukuy K2 領域より採取した堆積土の船上試験結果 (◇:泥火山試料, ◆:リファレンス試料)

(4) 船上試験結果

①採取直後の試料で行った各種力学試験結果から，泥火山試料はリファレンス試料に比べて強度が低下していた。一例として図 4 に Kukuy K2 領域で採取した堆積土試料の船上力学試験結果(ベーンせん断強さ τ_v ，コーン貫入抵抗 q_c ，一軸圧縮強さ q_u)の深度分布を示す。力学試験結果から，リファレンス試料では深度増加に伴い強度も増加しているのに対し，泥火山試料では深度方向に関係なく一様に低い値を示している。これはサンプリング時の応力解放によって堆積土中に空隙

が形成したこと、生じた空隙によって間隙水圧が一時的に上昇し、それに伴って有効応力が低下したことが原因であると考えられる。またコアの回収率などから、ガス湧出に伴う地盤の攪乱によって、泥火山地盤の強度が低くなっている可能性も示唆された。

②上記の原因を検討するために、含水比 w と非排水せん断強さ $S_u (=q_u/2)$ との関係を図 5 に示すと、同一 w における泥火山試料の S_u がリファレンス試料に比べて低くなった。また Koumoto & Houlsby が示した関係式で双方の強度を近似したところ、リファレンス試料では近似値(破線)と測定値(●印)がほぼ等しくなったのに対し、泥火山試料では測定値(○印)が近似値(実線)よりも低くなった。泥火山試料では試料採取時の応力解放によって間隙水中の溶存ガスが気化し、内部に空隙を生じてリファレンス試料よりも大きな乱れを受けたため、測定値が低くなったことが考えられる。

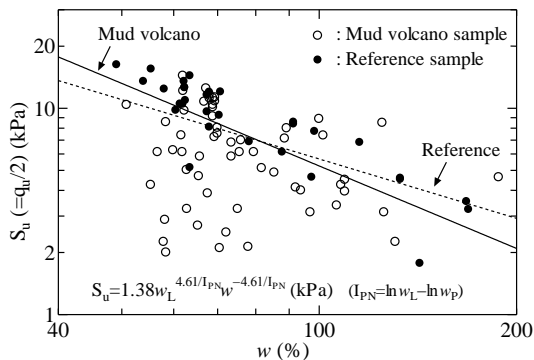


図 5 w と S_u との関係

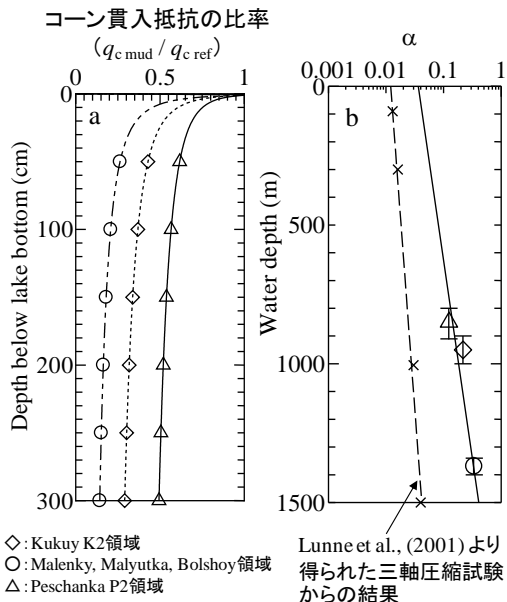


図 6 a: q_c より算出した強度比と深度の関係、
b: 係数 α と水深との関係

③乱れた泥火山試料の強度を用いて原地盤強度(リファレンス試料)の推定(リファレン

ス強度 = 泥火山強度 / 堆積深度^{- α})を試みたところ図 6a のようになり、泥火山試料の強度を堆積深度の定数 α で除することにより、原地盤強度がある程度推定可能であることがわかった。また図 6b より、定数 α は採取場所の水深に依存することが示された。なお、図中に示した Lunne らの結果は、室内で最大 15MPa の高背圧条件の下でメタンガスを間隙水に溶解させたのち応力解放した試料に対して三軸試験を行ったものである。本研究では拘束圧の無い状態での強度を比較しているので Lunne らの結果から求めた α の値よりも大きく乱れの程度が大きくなっているが、人工的に高背圧の海底条件を模擬した Lunne らの結果と同様に、実際に湖底から採取した試料でも水深が深くなり溶存ガス濃度が高くなるにしたがって、ガスの気化に伴う乱れによる強度低下割合が大きくなっている。

(5) 室内試験結果

採取した直後の泥火山試料では、試料採取時の溶存ガスの気化による試料の乱れや地盤下部からのガスの湧出による地盤の攪乱によってリファレンス試料よりも強度が低下していた。そこでガス抜き後、および再圧縮後の泥火山試料、リファレンス試料の力学特性を評価するために、輸送試料を用いて一軸圧縮試験、圧密試験を行い、各試料の一軸圧縮強さや圧密特性を比較した。また圧密試験の各圧密段階終了時にはベンダーエレメント試験を行い、圧密圧力と各試料から得られたせん断剛性率との関係を比較した。

①一軸圧縮試験結果

リファレンス試料では、船上試験の一軸圧縮強さと室内試験の一軸圧縮強さには顕著な差は見られず、輸送後の試料の強度と同程度の値を示した。しかし泥火山試料では、船上試験で低かった一軸圧縮強さが、室内試験では船上試験の値よりも高く、リファレンス試料とほぼ同じであった。泥火山試料における不攪乱試料の強度変化原因として、輸送試料は内部のガス抜きをするためにコアを数日立てて保管するので、保管時お輸送時に試料採取時の応力解放で形成された空隙が縮小したため、室内試験での強度が船上試験よりも高くなったことが考えられる。また、コアサンプラーを船上に引き上げた際に、パイプと試料の間に形成された隙間の水が抜けて浮力がなくなり、これによって採取した試料の土被り圧が原位置の土被り圧よりも増加したため、試料が再圧縮されていることも考えられる。このため、泥火山試料では、溶存ガスの気化によってコア内部に空隙ができるために、圧縮される割合がリファレンス試料よりも大きく、輸送後の試料の強度が増加したことも一因となっているものと思われる。

②圧密試験結果

泥火山試料がリファレンス試料に比べて、異なる深度の試料の圧縮性に明確な差が見られなかった。その原因として、深度方向の物性値に差がないことや、コア切断面に層構造が見られなかったことから、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による試料の乱れによって堆積土が深度方向に関係なく均質化していることが考えられる。

③ベンダーエレメント試験結果

せん断剛性率に関しては、多くの異なる粘性土のせん断剛性率を一つの式で表すことを目的として、いくつかの推定式が提案されている。図7は、圧密試験時の圧密圧力が現地土被り圧以下である9.8kPaと、土被り圧以上である78.5kPa、314kPaで測定したせん断剛性率と、提案されているいくつかの推定式から算出した計算値との関係を示したものである。図より、過圧密領域(9.8kPa)では圧密圧力が低いために推定式によって若干差が生じているが、全体的にはどの推定式で求めた場合も計算値が測定値の0.5~2.0倍の範囲に収まっていることがわかる。また、泥火山試料、リファレンス試料によるせん断剛性率の差はほとんど見られない。

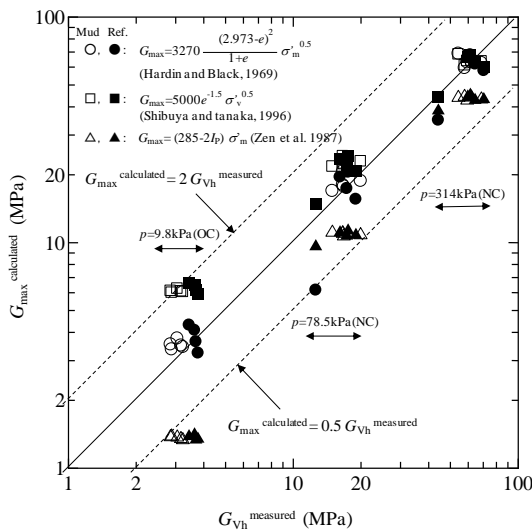


図7 せん断剛性率の実測値と推定値の比較

④室内試験結果による評価

バイカル湖における表層堆積土の圧密特性やせん断剛性率は、他領域の堆積土の土質特性と大きな差はなく、現存する推定式によってある程度地盤強度を推定することが可能であるといえる。

さらに、力学試験結果に基づき、応力解放を伴う方法でガスハイドレートを海、湖底面表層から採取した場合に、採取直後の地盤の強度は乱れの影響を大きく受けて原地盤の強度よりも過小評価されることがわかった。

このことは、現在深層型ガスハイドレート賦存地盤での採掘手法である昇温、減圧により地盤中でガスハイドレートの解離を伴う採掘を、表層型ガスハイドレート賦存地盤でも行った場合には、地盤強度が著しく低下して海底や湖底地盤の不安定化を引き起こす可能性も示唆された。

(6)日本海海底地盤の土質特性

淡水域のバイカル湖堆積土の土質特性と比較するために、海水域である日本海直江津沖および北海道後志沖の日本海において、浅層型メタンハイドレート賦存海底地盤から堆積土を採取し、コア観察および各種現地船上試験を行った。日本海海底地盤から採取した試料では、炭酸カルシウムや珪藻土の含有量の違いなどにより、ハイドレート存在地盤の土質特性が淡水域の場合と異なることが示唆された。

今後、エネルギー資源としてのハイドレート採取時はもとより地球温暖化に伴う海水温の変動などにより、海底地盤表層部に存在しているハイドレートが解離し、海底地盤を不安定化する可能性についても検討し、地盤工学的な立場から地球環境変動に及ぼす影響も含めたガスハイドレート地盤の安定性評価も行う必要がある。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計13件)

- ① Kida, K., Hachikubo, A., Sakagami, H., Minami, H., Krylov, A., Yamashita, S., Takahashi, N., Shoji, H., Khlystov, O., Poort, J. and Narita, H.: Natural gas hydrates with locally different cage occupancies and hydration numbers in Lake Baikal, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q05003, doi:10.1029/GC002473, 2009, 査読有
- ② 庄子仁, Young K. JIN, Anatoly OBZHIROV, Alexander SALOMATIN, Boris BARANOV, Vyacheslav GLADYSH, 八久保晶弘, 南尚嗣, 山下聡, 高橋信夫: オホーツク海のメタンハイドレートとプルーム, *地学雑誌*, 118(1), 175-193, 2009, 査読有
- ③ 片岡沙都紀, 山下聡, 川口貴之, 鈴木輝之, 松本良: 日本海東縁域における海底表層地盤の土質特性, *土木学会北海道支部論文報告集*, 65, CD-ROM, 2009, 査読無
- ④ Kataoka, S., Yamashita, S., Minami, H., Nishio, S. and Grachev, M.: Geotechnical characteristics of the methane hydrate-bearing sediments in the Lake Baikal, *Proc. of the 3rd Inter. Conf. on Site Characterization*, 1, 609-614, 2008, 査読有
- ⑤ Kataoka, S., Yamashita, S., Suzuki, S. and Nishio, S.: Soil properties of the gas hydrate-bearing sediments in Lake Baikal, *Proc. of the 4th Inter. Sym. on Deformation Characteristics*

- of Geomaterials, 2, 565-572, 2008, 査読有
- ⑥ Krylov, A., Khlystov, O., Zemskaya, T., Minami, H., Hachikubo, A., Shoji, H., Kida, M., Pogodaeva, T., Naudts, L. and Poort, J.: Crystallization of Authigenic Carbonates in Mud Volcanoes at Lake Baikal, *Geochemistry International*, 46(10), 985-995, 2008, 査読有
- ⑦ 片岡沙都紀, 山下聡, 西尾伸也, 八久保晶弘, 小西裕樹, 鈴木輝之: 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, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 48, 127-136, 2008, 査読無, <http://hdl.handle.net/10213/1541>
- ⑧ Krylov, A., Khlystov, O., Zemskaya, T., Minami, H., Hachikubo, A., Nunokawa, Y., Kida, M., Shoji, H., Naudts, L., Poort, J. and Pogodaeva, T.: First discovery and formation process of authigenic siderite from gas hydrate-bearing mud volcanoes in fresh water: Lake Baikal, Eastern Siberia, *Geophysical Research Letters*, 35, L05405, doi:10.1029/GL032917, 2007, 査読有
- ⑨ 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, GRACHEV Mikhail: 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, 地盤工学ジャーナル, 2(2), 95-105, 2007, 査読有, <http://hdl.handle.net/10213/1540>
- ⑩ 庄子仁, 南尚嗣, 八久保晶弘, 山下聡, 高橋信夫: オホーツク海のメタンハイドレート調査, 地盤工学会誌, 55(10), 5-8, 2007, 査読有
- ⑪ Hachikubo, A., Kosaka, T., Kida, M., Krylov, A., Sakagami, H., Minami, H., Takahashi, N. and Shoji, H.: Isotopic fractionation of methane and ethane hydrates between gas and hydrate phases, *Geophysical Research Letters*, 34, L21502, doi:10.1029/GL030557, 2007, 査読有
- ⑫ 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, 47, 255-264, 2007, 査読無, <http://hdl.handle.net/10213/1395>
- ⑬ Kida, M., Khlystov O., Zemskaya, T., Takahashi, N., Minami, H., Sakagami, H., Krylov, A., Hachikubo, A., Yamashita, S., Shoji, H., Poort, J. and Naudts, L.: Coexistence of structure I and II gas hydrates in Lake Baikal suggesting gas sources from microbial and thermogenic origin, *Geophysical Research Letters*, 33, L24603, doi:10.1029/GL028296, 2006, 査読有, <http://hdl.handle.net/10213/1443>

[学会発表] (計7件)

- ① Hachikubo, A.: Formation process of structure I and II gas hydrates discovered in Kukuy, Lake Baikal, Proc. of the 6th Inter. Conf. on Gas Hydrates, July 6-10, 2008, Vancouver, CANADA
- ② 片岡沙都紀: バイカル湖の湖底表層地盤から採取した試料の力学特性, 第43回地盤工学研究発表会, 2008年7月9日, 広島
- ③ 南尚嗣: Chemical/isotopic analyses of hydrate/pore water samples from gas hydrate-bearing sediment cores at Lake Baikal: 2005-2007, 日本地球惑星科学連合2008年大会, 2008年5月28日, 千葉
- ④ Hachikubo, A.: Isotopic composition of hydrate-bound and sediment gases in Lake Baikal, Inter. Conf. on Gas Hydrate Study, 3-8 September, 2007, Listvyanka, RUSSIA
- ⑤ Kataoka, S.: Geotechnical characteristics of gas hydrate-bearing sediments in Lake Baikal, Inter. Conf. on Gas Hydrate Study, 3-8 September, 2007, Listvyanka, RUSSIA
- ⑥ Minami, H.: Chemical analysis of hydrate water and pore water samples from gas hydrate-bearing M7, VER 05-03 and VER 06-02 cores retrieved at Lake Baikal, Inter. Conf. on Gas Hydrate Study, 3-8 September, 2007, Listvyanka, RUSSIA
- ⑦ 片岡沙都紀: 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, 2007年7月5日, 名古屋

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山下 聡 (YAMASHITA SATOSHI)
北見工業大学・工学部・教授
研究者番号: 00174673

(2) 研究分担者 (2008年からは連携研究者)

鈴木 輝之 (SUZUKI TERUYUKI)
北見工業大学・工学部・教授
研究者番号: 30003205
庄子 仁 (SHOJI HITOSHI)
北見工業大学・工学部・教授
研究者番号: 50201562
南 尚嗣 (MINAMI HIROTSUGU)
北見工業大学・工学部・准教授
研究者番号: 40241426
八久保 晶弘 (HACHIKUBO AKIHIRO)
北見工業大学・工学部・准教授
研究者番号: 50312450

(3) 研究協力者

片岡 沙都紀 (KATAOKA SATSUKI)
北見工業大学大学院・博士後期課程・学生