

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月30日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360219

研究課題名（和文） 表層型ガスハイドレート地盤の安定性評価と地球環境変動

研究課題名（英文） Evaluation of Stability of Shallow Type Gas Hydrate-Bearing Grounds and Global Change

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(和文):表層型ガスハイドレートが存在している海底地盤から堆積土を採取し、調査船上で力学試験を行った。また、採取試料の品質を評価するために溶存ガス濃度と強度の関係を求めた。さらに、試料採取から室内試験までを再現した実験を行った。その結果、間隙水溶存ガスの濃度が高いほど、船上試験と再現実験の両方において強度低下が大きくなる。また、気化により乱れた試料からも、実際の強度をある程度推定可能であり、安定性を評価できることがわかった。

研究成果の概要(英文): Core samplings were conducted from sea bottom grounds, where shallow gas hydrates existed. Some kinds of mechanical tests were performed for the core samples on board. To evaluate the sample quality, the relations between the concentration of dissolved gas and the strength were also examined. Moreover, laboratory tests which simulate the stress relief during the sampling were also performed. Test results showed that the strength of soils become lower with the increase of gas saturation on both on-board and laboratory tests. It was also showed that the in-situ strength can be estimated roughly from the disturbed sample.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2010年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2011年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	13,800,000	4,140,000	17,940,000

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：海底・湖底堆積土，ガスハイドレート，試料の乱れ，溶存ガス，応力解放

1. 研究開始当初の背景

ガスハイドレート（以下GH）は、将来のエネルギー資源の一つとして注目され、温度・圧力条件により安定に存在する領域（HSZ: Hydrate Stability Zone）の下部に分布する深層型とよばれるGHは、資源化をターゲットとして各国でプロジェクトが進行してい

る。我が国においても、南海トラフでの資源化プロジェクトMH21が実証実験の段階に入っている。一方、HSZ上部から海底付近に存在する表層型GHは、日本周辺海域では上越沖で存在が確認され多数の試料が採取されている。北海道の北に広がるオホーツク海においても、パラムシール島沖やサハリン島沖

において、ロシアや韓国、日本（北見工大）によってGHが採取されている。表層型GHの資源化については、その採取方法が確立されていないが、研究代表者も参加した2008年のロシア・バイカル湖調査では、世界で初めて表層型GHからのガス回収実験に成功しており、将来の資源化の可能性もある。

一方、GHの主成分であるメタンは二酸化炭素の20倍もの温室効果ガスでもあり、GHの分布・集積形態・生成・解離動態は、地球規模の環境変動に重要な役割を果たす要素でもある。また、エネルギー資源としての採取時の地盤変動や、地球環境変動に伴う海水温上昇によるGHの解離による海底地すべりなどの地盤災害のトリガーとも成り得る。このように、GHは、資源、環境、災害という3つの側面で人類社会と密接な関わりを持っている。

したがって、資源採取時のGHの分解・回収に伴うGH層や周辺地盤の強度特性の変化や沈下特性を評価することに加えて、地球環境変動の面からもGHが存在している地盤の力学特性を把握し、地盤の安定性を評価する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では表層GHが存在しているオホーツク海やバイカル湖などにおいてGHおよび海底堆積物を採取し、表層型GH賦存地盤の生成環境・条件や物理的・化学的特性を明らかにする。また、GHが存在している地盤から堆積土を採取した場合、応力解放による間隙溶存ガスの気化などにより、強度が著しく低下することがこれまでの研究結果から明らかにされている。そこで、応力解放に伴う試料の乱れの評価を行うために、高压条件である海底地盤での試料採取から室内試験に至るまでの応力条件を再現した実験を行い、海底地盤の強度特性の推定やGH解離に伴う海底地盤強度特性の変化を調べる。

以上の研究により、表層型GH堆積地盤の安定性評価を行い、資源開発時の評価のみならず地球環境変動に及ぼす影響を地盤工学的な見地からも評価し、今後の当該研究分野の発展と拡張を図る。

3. 研究の方法

(1) 現地調査と試料採取

① オホーツク海調査

2009年7月(LV47調査)と2010年6月(LV50調査)に、オホーツク海サハリン島北部沖において調査を行った。調査ではエコーサウンダーにより海底面からのガスフレアが確認された地点において、ハイドロコアラ（長さ約5m）を使用して試料採取を行った。コアラは2重管式になっており、内管は塩化ビニル製のパイプ（内径110mm）である。採取

したコアは、LV47調査では19本、LV50調査では22本採取した。

② バイカル湖調査

2010年9月に、ロシア・バイカル湖において調査を行った。バイカル湖では、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にGHが多く存在することが知られている。そこで、泥火山においてガスフレアが確認された地点周辺において、重力式コアラ（長さ約5m、総重量約700kg）を使用して試料採取を行なった。採取したコアは、バイカル湖の中央湖盆を中心として、13領域（主として泥火山）で合計64本である。

(2) 船上での試料採取および試験

船上に引き上げたコアは、内管を縦に半割にし、GHおよび堆積物の観察を行った。写真1に採取されたGHの典型例を示す。GHは主としてコア下部の粘性土中に塊状、層状、脈状に存在していた。コア観察後、半割コアから10~40cm間隔で含水比およびガス濃度測定のための試料採取、小型ベンセン断試験、小型コーン貫入試験を行った。なお、GHが採取されたコアでは、GHが存在していない部分において堆積土の採取と試験を行っている。

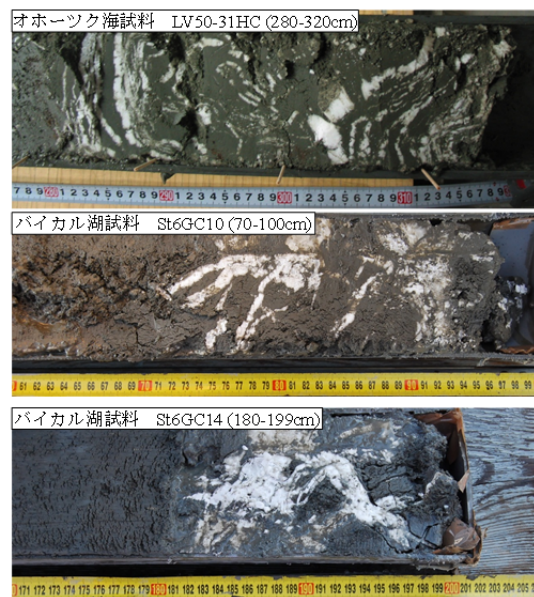


写真1 採取されたGHの典型例

(3) 輸送試料での室内試験

オホーツク海で採取した試料については、試料を日本に持ち帰り、含水比試験、液性・塑性限界試験、土粒子の密度試験、強熱減量試験、粒度試験を行った。なお、バイカル湖で採取した試料は輸入できなかったため、含水比試験以外の試験は行っていない。

(4) 溶存ガス気化再現実験

GH賦存地盤から採取した試料は、コア引き上げ時の間隙水溶存ガスの気化による試料

の乱れにより強度が低下することが推察される。このことを確認するために、高水圧条件である海底・湖底地盤での試料採取から船上試験に至るまでの圧力変化条件を再現した実験を行い、間隙水溶存ガスの気化に伴う試料の乱れによる強度変化を評価した。

①試験装置と試料

再現実験には、図1に示す圧密試験装置を用いた。圧密容器の寸法は、内径70mm、高さ330mmである。圧密圧力（鉛直応力）はペロフラムシリンダーにより载荷し、鉛直荷重はロードセルにより測定した。鉛直変位は载荷ロードに取り付けたダイヤルゲージにより測定した。圧密容器上部と下部には圧力計が取り付けられており、圧密容器内部の圧力を測定できるようになっている。

また、装置には背圧およびガス溶存水循環のため、耐圧容器3個を用意した。上方にそれぞれ脱気水およびガス溶存水供給用の耐圧容器を設置した。上方と下方の耐圧容器の水頭差は約2mで背圧を加えた状態で脱気水またはガス溶存水を試料に循環できる構造となっている。なお、溶存水は試料下部から通水している。

再現実験に用いた試料は、過去にバイカル湖で採取した試料を混合したものである。混合試料を圧密時の初期含水比が液性限界の1.6倍となるよう蒸留水を加えスラリー状にし、攪拌容器内で真空に近い状態で約24時間程度攪拌し準備した。また、間隙水に溶存させるガスは二酸化炭素(CO₂)を用いた。これは、GH賦存域の堆積土に含まれるガスは主にメタンガス(CH₄)であるが、CH₄と同程度の溶存度とする場合、CO₂を用いることによって低背圧での試験が可能であるためである。なお、水深1000m(約10MPa)、水温4℃でのCH₄の水に対する溶解度は、室温20℃、圧力500kPaでのCO₂の溶解度と同程度である。

②再現実験方法

再現実験では、攪拌したスラリー状の試料を圧密容器内に流し込み、3条件で再現実験を行った。すべての条件において各圧密段階(20, 50, 100kPa)で24時間圧密を行った。なお、20kPaの圧密終了後、背圧を加えている。試験条件1では空気圧を介して背圧を500kPa加えているが、試験条件2と3ではCO₂ボンベ圧を介して背圧を加えている。また、ガス溶存水を通水する試験条件2と3では、ガス溶存度の違いによる試料の乱れの影響も調べるため、背圧を100, 300, 500kPaの3条件で試験を行っている。最終段階の圧密(100kPa)終了後、試験条件1は脱気水を試料下部から水頭差で通水させ、試験条件2と3ではCO₂溶存水を水頭差で通水させている。また、すべての試験条件において約10日間試料に通水を行っている。

試験条件2と3の違いは、試験条件2では

最終段階の圧密圧力(100kPa)の状態では背圧を大気圧まで減圧した後に鉛直応力を除いているが、試験条件3では、圧密圧力を20kPaまで低下させた後に背圧を減圧している。したがって、試験条件3の方が試験条件2よりも応力解放(背圧減圧)時の鉛直応力が低いので、試料に乱れが生じやすいことが推察される。

背圧および鉛直応力を除いた後に試験装置を解体し、取り出した試料を用いて一軸圧縮試験(直径50mm、高さ100mm、载荷速度1mm/min)を行った。

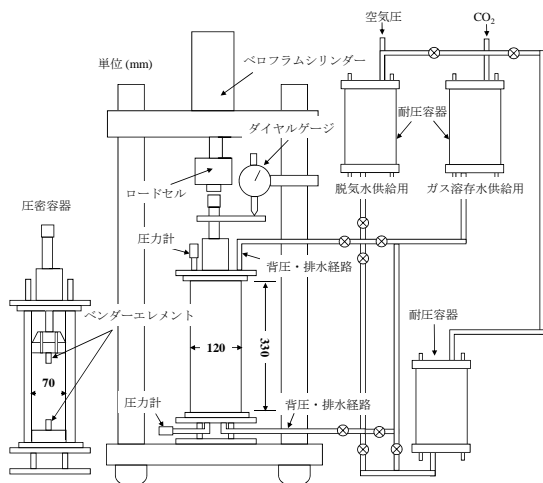


図1 再現実験装置の概略図

4. 研究成果

(1) 船上試験結果

図2は、採取試料から求めた含水比と船上試験から求めたベーンせん断強度、コーン貫入抵抗を海底面からの深度に対してプロットした一例である。GHをコア下部に採取できた試料での試験結果を赤で示している。

含水比は50%程度から250%程度まで、採取コアによって大きく異なっているが、同一コアでの含水比の変化は少なく、全体的には深度方向にわずかに低下している程度である。一方、ベーンせん断強度やコーン貫入抵抗は、深度方向の含水比の低下に伴って、深度とともに増加すると考えられるが、必ずしもそのような傾向は認められない。全体的な傾向としては、2~3m程度までは深度とともに強度や抵抗に増加傾向が認められるものの、それ以上の深さでは逆に低くなる傾向も認められる。

また、13HC、17HCの試料では、含水比の深度方向の変化が少ないのにも関わらず、表層部分での強度が高く、深度が大きくなるにつれて逆に低くなっている。このように、採取コアによって含水比と強度の関係は一義的な関係とはなっていない。なお、物理・化学的性質は、深度方向に違いが認められなかった。

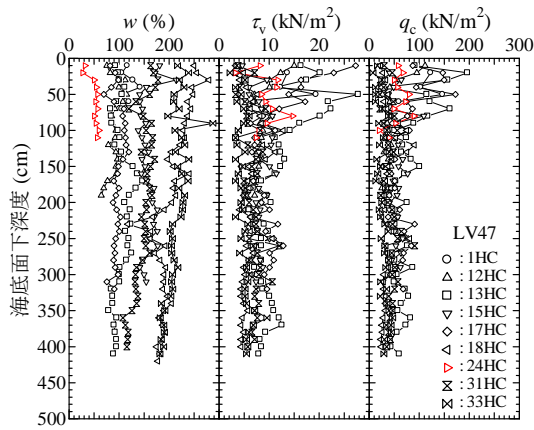


図2 船上試験結果の一例 (LV47)

(2) ガス濃度と強度の比較

上述のように、含水比と強度の関係に必ずしも一義的な関係は認められなかった。これは、同一コアでも深度方向で堆積土の間隙水に溶存しているガス濃度が異なるため、コア引き上げ時の応力解放による試料の乱れや間隙水圧の上昇に伴う有効応力の低下の程度が異なっていたことが原因ではないかと推察した。そこで、各採取試料のガス濃度を測定し、ガス濃度の違いが強度に及ぼす影響を調べた。

図3は、採取試料の堆積物 1L あたりのメタンガスの濃度と深度との関係を示したものである。図より 18HC, 33HC では、対数軸上では深さ方向にややガス濃度が増加しているように見えるが、他の試料よりもガス濃度がはるかに低い。それに対し、GHを採取できたコア (24HC) では、表層付近からガス濃度が高くなっていることがわかる。その他の試料では、表層付近でガス濃度が低いのにに対し、ある深度から急激にガス濃度が高くなっている。このように採取コアによって堆積物中のガス濃度は深度方向で異なっている。なお、図中に示したガス濃度はコアを船上に引き上げ後、大気圧状態で試料を採取して測定した結果であり、海底面下の地盤中におけるガス濃度を表すものではない。そのため、ガス濃度の最大値が 100mL/L 程度の値で頭打ちになっているが、ガス濃度の高低の相対的な評価は可能である。

図4は、ベーンセン断強度と液性指数の関係にガス濃度の高低により比較したものである。図よりガス濃度の高い試料 (20mL/L 以上) は、ガス濃度の低い試料 (1mL/L 以下) の強度よりも低い値に分布している。したがって、ガス濃度の高い試料の強度が低くなる傾向にあったのは、コア引き上げ時の応力解放に伴い、間隙水に溶存していたガスが気化したことにより、ガス濃度が高いほど採取試料に乱れが生じたためと考えられる。

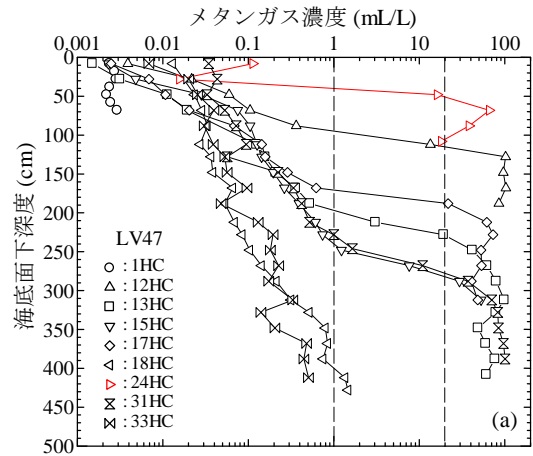


図3 メタン濃度と深度の関係の一例 (LV47)

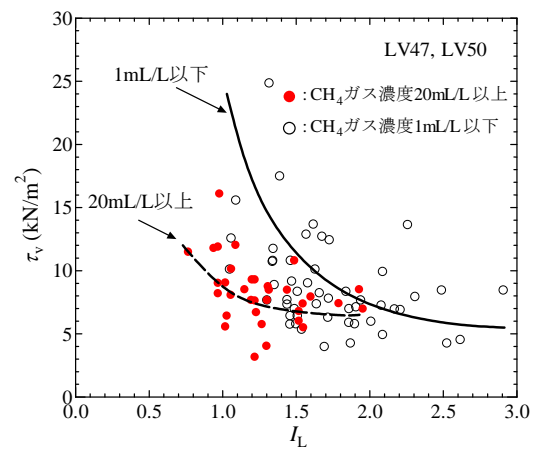


図4 ベーンセン断強度と液性指数の関係

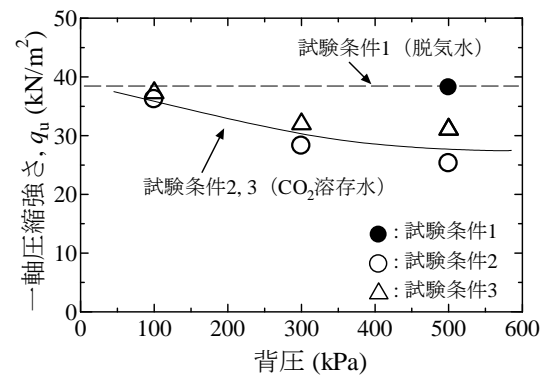


図5 一軸圧縮強さと背圧の関係

(3) 再現実験での一軸圧縮試験結果

図5は、各条件で圧密し作製した供試体を用いて行った一軸圧縮試験から求めた、一軸圧縮強さと圧密時の背圧の関係を示したものである。ガス溶存水を通水させた試験条件2および3の強度は、脱気水を通水させた試験条件1の強度に比べ低い傾向にあり、背圧が大きくなるほどすなわち CO₂ の溶存量が多いほど低下割合が大きい。ただし、乱れの影

響が大きいと考えられた背圧減圧時の鉛直応力が低い試験条件3で作製した供試体の強度は、試験条件2の強度よりも低くなることはなかった。これは、試験条件2および3において、試料の乱れは背圧と鉛直応力を除去した後に生じたため強度差が特に認められなかったものと考えられる。

(4) ガスの乱れによる強度評価

間隙水にガスが溶存している場合、応力解放による溶存ガスの気化によって強度が低下することが、船上試験および再現試験から明らかになった。この強度低下と採取試料の水深（水圧）の関係を比較するために、ガスの溶存していない試料（試験条件1）とガスを溶存させた試料（試験条件2, 3）の一軸圧縮強さ比とCO₂溶存濃度をメタン溶存濃度に換算した場合の水深との関係を図6に示す。例えば、500kPaでのCO₂の溶解度は、10MPaでのCH₄の溶解度にほぼ等しいので、背圧500kPaでの試験結果を水深1000mに相当するとしている。

図中には、Kataokaら(2009)が実際にバイカル湖で採取した試料を用いて船上で一軸圧縮試験を行った結果と、Lunneら(2001)が本実験と同じように溶存ガスの気化による乱れを評価するために、陸上で採取した2種の不攪乱粘性土（Lierstranda粘土とBothkennar粘土）を用いてメタンガス溶存濃度の異なる供試体を作製し、三軸圧縮試験から強度変化を調べた結果も示している。

図に示すように、水深が大きくなるにつれて強度比が低下しており、水深が大きい（ガス溶存度が高い）ほど乱れの影響が大きいことがわかる。Kataokaらの結果は、実試料であるためかばらつきが見られるが、再現試験結果よりも強度低下が大きくなっている。これは、本実験では再構成試料を用いているのに対し、実試料（不攪乱試料）の場合は本来の強度が高く、乱れの影響が大きく現れたものと考えられる。さらに、本実験の再現試験では応力解放による乱れは、圧密装置内では軸方向の変位として現れるのに対し、実際の湖底からの試料採取時には、側方向にもある程度の膨張が可能であることなどから、乱れの影響が大きかったものと推察される。また、Lunneらの強度比の低下が少ないのは、三軸圧縮試験結果であり再圧密によって乱れの影響が減少したためと考えられる。なお、Bothkennar粘土の強度比が水深300mにおいて1よりも大きくなっているが、これは不攪乱試料相互の不均質性のためばらついているとしている。しかし、水深（溶存度）の増加に伴う強度低下は認められている。

このような結果から、水深の大きい海底や湖底から採取した試料からも、乱れの影響のない強度をある程度推定可能となると考え

られる。また、溶存ガスの気化による乱れの有無を判断するためには、間隙水に溶存しているガス濃度を測定することが必要である。さらに、GH賦存地盤に限らず水溶性ガス田や温泉地帯など、地下水にガスが溶存している地盤から採取した試料の評価において、本研究結果を参考にできる。

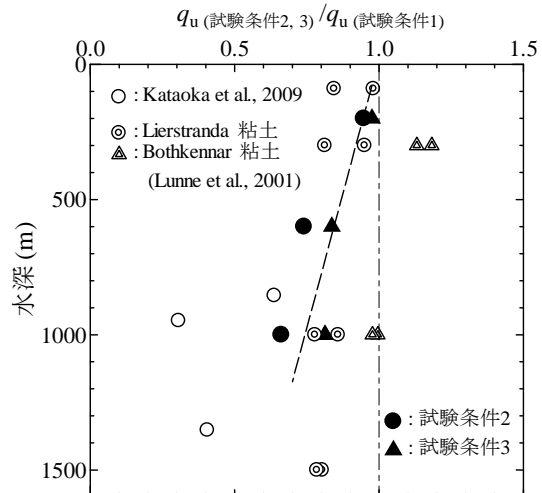


図6 強度低下率と水深の関係

(6) 結論

- ① ガスハイドレートが存在している海底・湖底地盤から採取した試料の力学特性は、試料引き上げ時の応力解放に伴い間隙水溶存ガスの気化により試料が乱れ強度が低下する。その低下割合は、溶存ガス濃度が高いほど大きくなる傾向にあった。
- ② 高水圧条件である海底・湖底地盤での試料採取から室内試験に至るまでの応力条件を再現した実験を行った結果、ガス溶存水を通水させた試料は、応力解放時の間隙水溶存ガスの気化により強度の低下が認められ、ガスの溶存度が高くなるほど試料の乱れは大きくなり強度は低くなった。
- ③ 水深の大きい海底や湖底から採取した試料からも、乱れの影響のない強度を概略推定可能であることが示された。また、溶存ガスの気化による乱れの有無を把握するためには、間隙水に溶存しているガス濃度を測定することが必要である。

地盤工学が対象としなければならない工学的諸問題は、既存分野のみでは対処できない複雑さと広がりを持つようになり、その解決には、横断的かつ総合的な学問と技術が必要になってきている。本研究では、GHを対象として、地球物理学、地球化学の分野と融合・協力し、個々の分野独自では困難な総合的な評価を行う足がかりとなった。これらの成果は今後の表層型ハイドレート資源開発や環境評価において、有用な情報を与える。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 15 件)

- ① Yamashita, S., Moriwaki, T., Hachikubo, A., Minami, H., Shoji, H., Kawaguchi, T. Kataoka, S., Strength change of seabed soils due to the vaporization of dissolved gas in the pore water, Proc. of 4th Inter. Symp. on Deformation Characteristics of Geomaterials, Vol. 2, pp. 905-910, 2011, 査読有.
- ② Hachikubo, A., Takeya, S., Chuvilin, E. and Istomin, V., Preservation phenomena of methane hydrate in pore spaces, Physical Chemistry Chemical Physics, Vol. 13, pp. 17449-17452, 2011, 査読有, doi:10.1039/c1cp22353d
- ③ Hachikubo, A., Khlystov, O., Krylov, A, Sakagami, H., Minami, H., Yutaka Nunokawa, Yamashita, S., Takahashi, N., Shoji, H., Nishio, S., Kida, M., Ebinuma, T., Kalmychkov, G. and Poort, J., Molecular and isotopic characteristics of gas hydrate-bound hydrocarbons in southern and central Lake Baikal, Geo-Marine Letters, Vol. 30, pp. 321-329, 2010, 査読有, doi:10.1007/s00367-010-0203-1
- ④ Kataoka, S., Yamashita, S., Kawaguchi, T. and Suzuki, T., The soil properties of lake-bottom sediments in the Lake Baikal gas hydrate province, Soils and Foundations, Vol. 49, No. 5, pp. 757-775, 2009, 査読有
- ⑤ Kataoka, S., Yamashita, S., Suzuki, T. and Kawaguchi, T., Soil properties of the shallow type methane hydrate-bearing sediments in the Lake Baikal, Proc. of 17th Inter. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 1, pp. 299-302, 2009, 査読有

[学会発表] (計 37 件)

- ① 八久保晶弘, バイカル湖天然ガスハイドレートのゲストガスの多様性, 雪氷研究大会 (2011・長岡), 2011. 9. 21, 長岡
- ② 出羽寛信, 溶存ガスの気化に伴う試料乱れが粘性土の変形強度特性に及ぼす影響, 第 46 回地盤工学研究発表会, 2011. 7. 7, 神戸
- ③ 森脇友裕, オホーツク海サハリン沖海底地盤から採取した堆積土の土質特性, 第 46 回地盤工学研究発表会, 2011. 7. 7, 神戸
- ④ 片岡沙都紀, 日本海東縁域より得られた海底表層土の土質特性, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011. 5. 22, 千葉

- ⑤ Yamashita, S., The soil properties of sediments obtained from offshore Sakhalin, the Sea of Okhotsk gas hydrate province, 10th International Conference on Gas in Marine Sediments, 6th Sep. 2010, Listvyanka Russia
- ⑥ Hachikubo, A., Crystallographic properties of natural gas hydrate in the southern and central Lake Baikal, 10th International Conference on Gas in Marine Sediments, 6th Sep. 2010, Listvyanka Russia
- ⑦ 小川美穂, 溶存ガスの気化に伴う海底堆積土の強度変化特性, 第 45 回地盤工学研究発表会, 2010. 8. 18, 松山
- ⑧ 森脇友裕, オホーツク海サハリン沖海底堆積土の土質特性, 第 45 回地盤工学研究発表会, 2010. 8. 18, 松山

[図書] (計 1 件)

- ① Shoji, H. and Jin, Y.K., New Energy Resources Research Center, Kitami Institute of Technology, Gas Hydrate Studies in Okhotsk and Lake Baikal, 2011, 266p.

[その他]

<http://www-ner.office.kitami-it.ac.jp/>

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

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
川口 貴之 (KAWAGUCHI TAKAYUKI)
北見工業大学・工学部・准教授
研究者番号: 20310964

(H22→H23: 連携研究者)

(3) 連携研究者

庄子 仁 (SHOJI HITOSHI)
北見工業大学・工学部・教授
研究者番号: 50201562

(4) 研究協力者

片岡 沙都紀 (KATAOKA SATSUKI)
函館工業高等専門学校・助教
研究者番号: 50552080
(H21→H22: 研究分担者)