

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25249065

研究課題名(和文) 深海底におけるメタンハイドレートの高度な生産手法の開発と地層変形の評価

研究課題名(英文) Development of high expoiment technology for methane hydrate and evaluation of deformation of reservoir

研究代表者

兵動 正幸 (Hyodo, Masayuki)

山口大学・創成科学研究科・教授(特命)

研究者番号：40130091

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,800,000円

研究成果の概要(和文)：種々の細粒分を含む粒度分布の異なる砂にMHを生成し、その後MH生産を模擬して減圧法により砂中のMHを分解し、それに伴う温度および圧力変化および地盤の変形を調べた。さらに、生産終了後の間隙水圧回復に伴う地盤変形挙動についても評価を行った。本研究では、実生産に見立てた円筒型のガスハイドレート生産模型実験装置を試作し、ガス生産実験を行うとともに、温度制御高圧平面ひずみせん断試験装置を用いて減圧法によるガス生産実験を行い、それぞれのガス生産時の挙動を調べるとともに、両者における挙動の比較を行った。

研究成果の概要(英文)：In order to investigate the production of methane hydrate, a model testing apparatus was developed which can simulate in-situ pressure, temperature and stress conditions of methane reservoir in a cylindrical chamber. The production well set up in the center is used to mimic the hydrate production by depressurization method. The pore pressures, temperatures are measured by 6 pressure sensors and 6 thermocouples respectively, which set up around the wellbore. The variations of pore water pressure and temperature were detected by installed sensors in the specimen. The MH dissociation tests by plane strain testing apparatus were also performed on sand specimen with various fines content with the measurement of localized deformation. During depressurization, marked deformation was not observed, because of an increase of effective stress. However, after depressurization, re-pressurization caused the specimen to fail in the case of high initial shear stress conditions.

研究分野：Geotechnical Engineering

キーワード：メタンハイドレート 生産模型実験 砂 細粒分含有率 圧力 温度 平面ひずみせん断 局所変形

1. 研究開始当初の背景

南海トラフにおいて、メタンハイドレート(MH)貯留層が発見され、メタンガスを採取する技術開発が進められている。有望な採取方法として坑井から減圧法による採取方法が導入され有効性が検討されている。しかしながら、減圧法によるMH固結力の消失に伴う地層変形や効率的生産方法について明確でない状況にあった。

2. 研究の目的

種々の細粒分を含む粒度分布の異なる砂にMHを生成し、その後MH生産を模擬して減圧法により砂中のMHを分解し、それに伴う温度および圧力変化および地盤の変形を調べる。さらに、生産終了後の間隙水圧回復に伴う地盤変形挙動についても評価を行う。本研究では、実生産に見立てた円筒型の

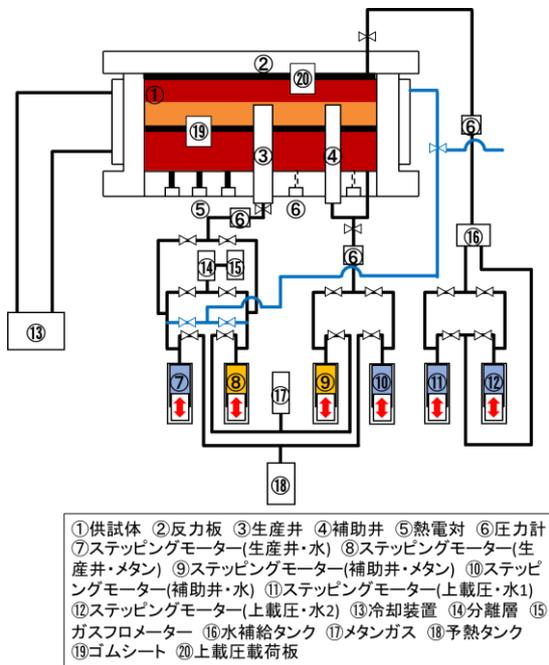


図-1 MH 生産模型実験装置配管図

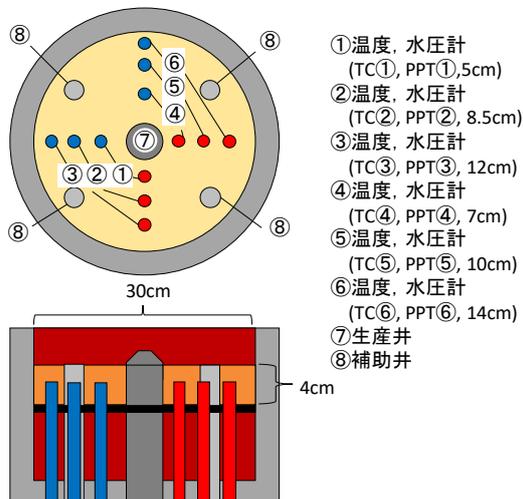


図-2 MH 生産模型実験装置の供試体およびセンサー概観

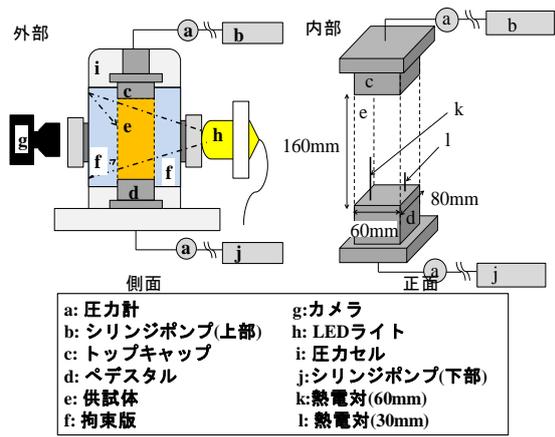


図-3 平面ひずみ実験装置概観

ガスハイドレート生産模型実験装置を試作し、ガス生産実験を行うとともに、温度制御高圧平面ひずみせん断試験装置を用いて減圧法によるガス生産実験を行い、それぞれのガス生産時の挙動を調べるとともに、両者における挙動の比較を行った。

3. 研究の方法

図-1 に本研究で試作した MH 生産模型実験装置の断面と配管システムを示す。また、図-2 には、供試体断面および温度、圧力センサーの配置を示している。供試体は、直径 30cm、高さ 4 cmの円筒であり、供試体中央に直径 2cm の生産井を設置し、ここから減圧によりガスを吸引できる仕組みになっている。供試体 4 か所に補助井を設置し、生産井と補助井から、ガスの注入を可能とした。放射状に水圧計と温度計を各 6 か所に設置した。この装置を用いると、供試体作成からハイドレート

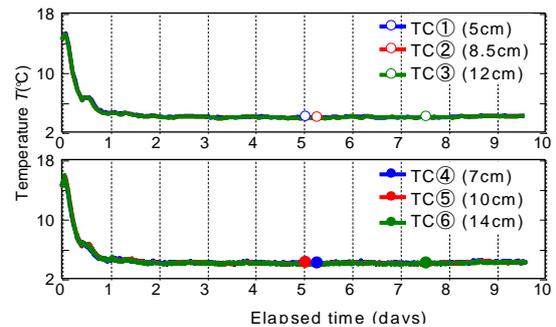


図-4 CO₂ ハイドレート生成中の温度と時間の関係

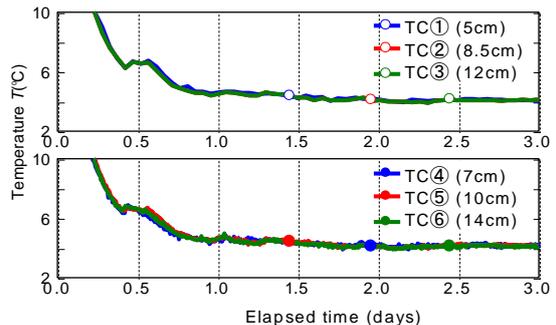


図-5 生成中の温度と時間の関係 (生成開始から 3 時間後までの拡大図)

の生成、水飽和、減圧法によるハイドレートの分解までに約1か月を要することから、実験の安全性のために、CO₂ハイドレートによる試験を行った。

一方、図-3の温度制御高圧平面ひずみせん断試験機を用いて、砂供試体中にMHを生成し、その後上部ペダスタルより減圧法によりMHを分解してMHの固結力の消失に伴う砂の変形挙動を調べた。実験装置は、恒温室内に設置されており、空調によって温度管理を行っている。供試体の寸法は、高さ16mm×幅60mm×奥行80mmである。供試体の前後に観察窓が設けられており、観察側のメンブレンには5mm×5mmのメッシュが描かれている。供試体の観察は、デジタル一眼レフカメラ(g)を用いてリモート制御によるタイマー撮影によって行う。供試体の下端に熱電対が設置され、MH生成時および分解時の供試体内の温度が測定される。

4. 研究成果

図-4～図-9にMH生産模型実験装置を用いた実験結果を示す。実験に長時間を要することから、ここではメタンガスの代わりにCO₂ガスを用いて実験を行った。飽和度Sr=50%で締固めた砂供試体を準備し、CO₂ガスを注入し温度4℃、圧力3MPaにおいて、CO₂ハイドレートにした。ハイドレート生成後、間隙水圧を9MPaまで上昇させ、有効応力3MPaで圧密した。その後、生産井内の圧力が2MPaとなる様に圧力を低下させてハイドレートを分解してガスにした。図-4にCO₂ハイドレート生成中の温度と時間の関係を示す。実験は供試体内の間隙をCO₂ガスで十分に飽和させるために、ハイドレート安定領域外の温度でまずCO₂ガスを3MPの圧力で圧入している。その後室温を減少させ、CO₂

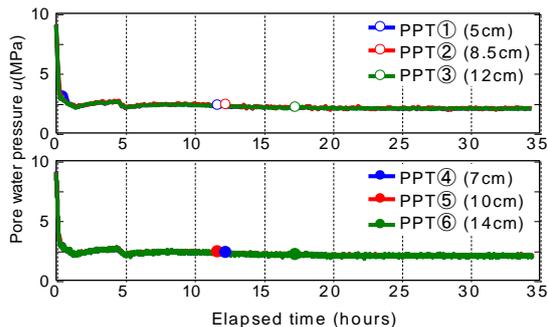


図-6 分解中の圧力と時間の関係

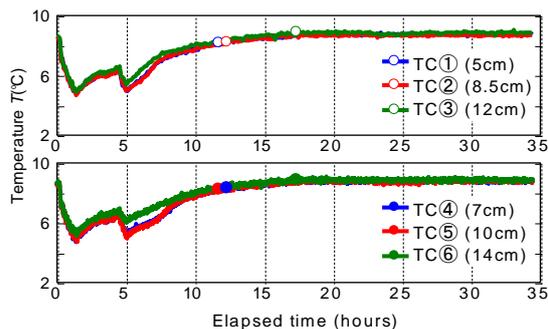


図-7 分解中の温度と時間の関係

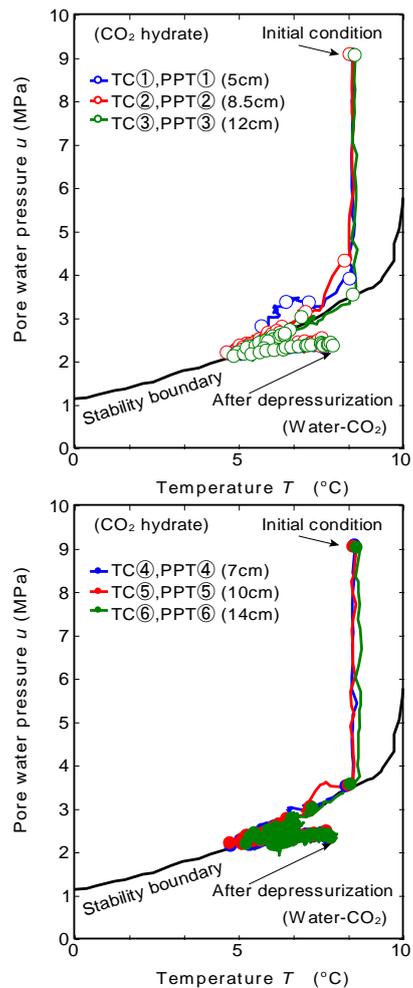


図-8 ハイドレート分解中の圧力と温度の関係

ハイドレートを生成した。図-5に生成開始から3時間後までの温度と時間の関係を拡大した図を示す。図から、CO₂圧入から約0.5日で温度がやや上昇した後、平衡状態を経て温度が減少している。これは、CO₂ハイドレートの生成熱によるものであり、ガス圧入開始から0.5日ではハイドレートが急激に生成したために上昇し、その後徐々に生成が穏やかになり空調による室温低下量がハイドレートによる生成熱を上回ったために徐々に温度が低下している。

図-6は、ハイドレート分解試験における間隙水圧の時間的変化である。中央の生産井から初期に9MPaであった間隙水圧を2MPa

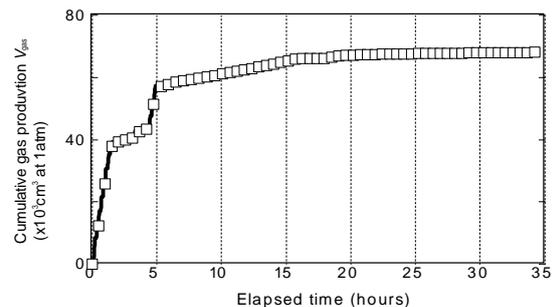


図-9 ハイドレート分解中のガス発生量(ポンプの移動量)と時間の関係

表-1 分解実験の CO₂H 飽和率およびガス回収率

ポンプ移動量から求めた CO ₂ H飽和率 (%)	35.4
大気圧下でのポンプ中のガス量 (cm ³)	68059.8
供試体間隙を考慮した CO ₂ H飽和率 (%)	47.0
大気圧下でのガス量 (cm ³)	90340.0
ガス回収率	75.3

まで減圧したところ、供試体内に配置した圧力計はほぼ同時に減圧を観測している。

図-7は、分解中の温度と時間の関係を示している。図から、減圧を開始すると、温度はいずれの圧力計でも同様に減少している。その後少し温度は上昇し再び減少している様子が認められる。これは、減圧目標とした間隙水圧 2MPa まで減少する際、間隙水圧が 3MPa 付近まで達すると CO₂ハイドレートが大量に分解されたためポンプで 2MPa まで減圧できず、ガス回収の過程で CO₂が再生成したためと推察される。その後ガスの発生量が穏やかになったことで、ポンプで 2MPa まで減少することができた。2 回目の温度減少はポンプの引く量がガスの発生量を上回り、減圧されたことで再び CO₂ハイドレートが分解されたことで温度が減少したものと推察される。この際、生産井からもっとも遠い熱伝対③、⑥がやや遅れて温度が減少している。これは、CO₂ハイドレートが再生成し、ある領域の間隙率が低くなり、圧力の伝播が遅れ CO₂ハイドレートの分解が少し遅れたことによると考えられる。

図-8は、間隙水圧と温度の関係を表すものであり、図中 CO₂ハイドレートの平衡曲線を黒い曲線で示している。初期の水圧、温度条件から温度一定で 2MPa まで減圧したが、安定曲線と交差する 3MPa 付近でハイドレートが分解し、パスが平衡曲線を沿って下降し、温度が低下する様子が認められる。

図-9はガスの発生から分解終了までのガスの発生量(ポンプの移動量)を示している。先述の通り、ガスが大量に発生したために、発生開始から 5 時間までは不規則なポンプが不規則に動いているが、その後ガスの発生が穏やかになり、開始 35 時間で分解が終了した。

表-1は、分解実験で得られたガスの発生量および CO₂ハイドレート飽和率を示している。表に示すとおり、ポンプに回収できたガス量は大気圧状態で約 69000cm³であった。これに、供試体内の間隙が CO₂で満たされていると仮定して供試体に含まれていた CO₂量を計算すると、約 90000cm³となり、目標値の CO₂ハイドレート飽和率である CO₂H=50%に近い 47.0%となった。これに基

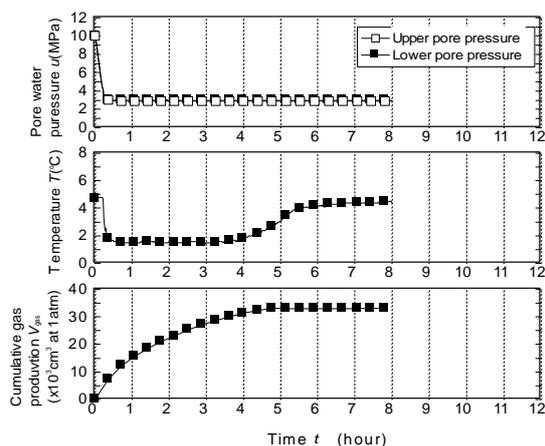


図-10 分解中の豊浦砂の間隙水圧、温度、ガス発生量の経時変化

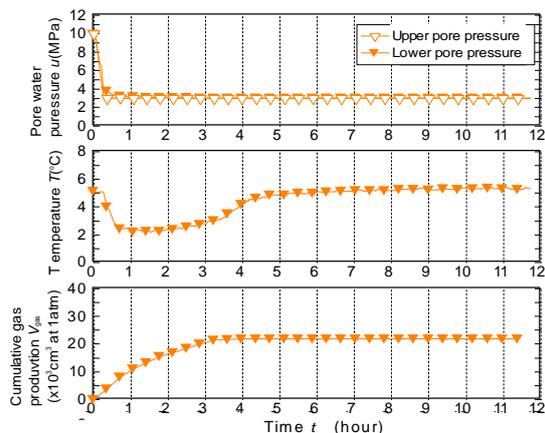


図-11 分解中の T_cの間隙水圧、温度、ガス発生量の経時変化

づいてガスの回収率を算出すると、75.3%となった。

温度制御高圧平面ひずみせん断試験装置を用いた分解実験においては、MH 含有砂は、所定の MH 飽和率となるようにあらかじめ含水比を調整した豊浦砂および南海トラフの MH 濃集層の模擬試料 T_cを用いた。

MH 分解実験の実験手順を簡略的に示す。まず、それぞれの試料の間隙にメタンガスを圧入し間隙水を MH に置換し MH 供試体を作製した。試料は湿潤突き固め法により、12 層に分けてタンパーで密な供試体を作製するために相対密度 $D_r=90\%$ となるように作製した。供試体作製後、まず冷蔵室内の室温を 5°C の状態で供試体内にメタンガスを圧入し、5MPa に達した後に圧力を保ちながら時間をかけて MH を生成させた。MH 生成後通水を行い、間隙内のガスを水と置換し水飽和状態とした。その後シリンジポンプを用いて間隙水圧を 10MPa まで上昇させ、有効拘束圧 $\sigma'_c=3\text{MPa}$ の条件で圧密を行った。その後、別途行ったせん断試験結果から、ホスト砂の軸差応力以上かつ MH 含有砂以下の軸差応力を与えた。

その後、せん断応力を保持しつつ供試体上部側からのみ間隙水圧を MH が安定して存在できる 10MPa から安定境界外である 3MPa まで減圧を行った。減圧によって完全

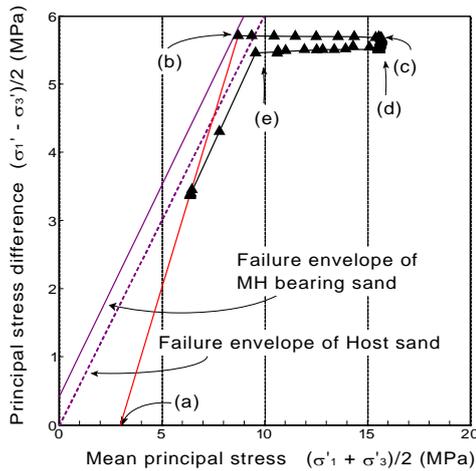


図-12 実験中の豊浦砂の有効応力経路

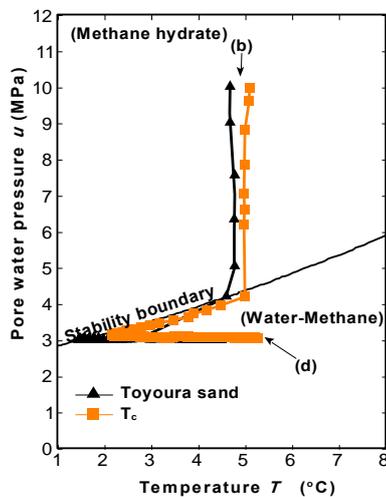


図-13 減圧中の温度 - 圧力履歴

に MH が分解した後に MH 生産井廃坑を想定し水圧を元の圧力まで回復させた。なお、せん断試験中のせん断速度は 0.1%/min、分解実験時の減圧速度および水圧回復速度は 0.5MPa/min とした。用いた MH 胚胎砂の MH 飽和率は豊浦砂では $S_{MH} = 60.3\%$ 、 T_c では $S_{MH} = 41.3\%$ であった。

図-10 および図-11 に MH 分解中の豊浦砂、 T_c の間隙水圧、温度、ガス発生量の経時変化をそれぞれ示す。図から圧力を減少させると、両試料ともにガスの発生とともに温度が減少し、ガスの発生が終了すると徐々に温度が回復している様子が分かる。これは、MH の吸熱反応によるものと推察される。なお、温度制御高圧平面ひずみせん断試験装置を用いた実験では温度の減少は一度きりであり、円筒型模型のように再生成と思われる挙動は示さなかった。これは、供試体が円筒模型の供試体と比較して小さく、発生したガスを十分にポンプで回収できたためと推察される。

MH 分解実験中の有効応力経路の一例として、豊浦砂の場合を図-12 に示す。図中の記号はそれぞれ、せん断を開始した時点(a)、分解を開始した時点(b)、間隙水圧が 3MPa にな

った時点(c)、MH が完全に分解し、水圧回復を始めた時点(d)、供試体が完全に破壊した時点(e)を示している。以降、図中に示す(a)から(d)の記号は、同様の意味を示している。概略図に示すように、両試料ともに MH が分解した供試体は、間隙水圧を回復させるとホスト砂の破壊線に至ると、ホスト砂の破壊線に沿うようにして破壊した。

減圧中の温度と圧力の関係を図-13 に示す。図から、いずれの試料においても、円筒模型と同様に減圧すると間隙水圧が MH の安定領域より低い圧力に達すると、安定境界に沿うようにして温度が減少していることが明らかである。

せん断開始から水圧回復までの応力比と軸ひずみの関係を、豊浦砂の結果を図-14 に、 T_c の結果を図-15 にそれぞれ示す。なお、各ホスト砂のせん断試験の応力比も併せて示している。また、各図中のプロットはそれぞれ応力比の低い順に間隙水圧が 3MPa から 10MPa の点を示している。

図より、両試料ともに間隙水圧が 3MPa になった時点である(c) から MH が完全に分解し水圧を回復する(d)までに応力比一定のまま軸ひずみが進行している。これは、MH の分解とクリープによる変形であると考えられる。次に、間隙水圧回復過程に着目すると、いずれの試料もホスト砂より高い応力比に達すると、応力比一定のまま軸ひずみが進行し破壊に至っていることが確認される。

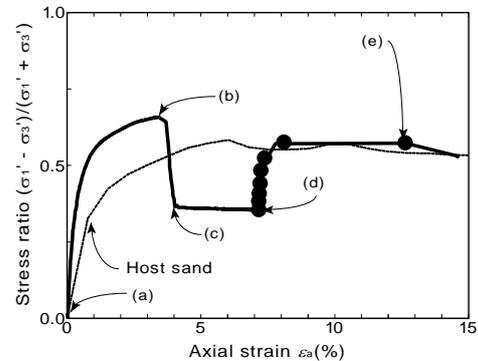


図-14 分解実験中の豊浦砂の応力比-軸ひずみ関係

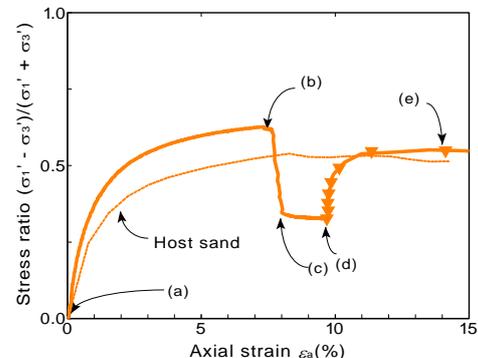


図-15 分解実験中の T_c の応力比-軸ひずみ関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

1. M. Hyodo, Y. Wu, N. Aramaki and Y. Nakata (2017), Undrained shear response and particle crushing of silica sand at low and high pressures, *Canadian Geotechnical Journal*, **54**(2), 207-218. 査読有.

2. M. Hyodo, Y. Wu, S. Kajiyama, Y. Nakata and N. Yoshimoto (2017), Effect of fines on the compression behaviour of poorly graded sand, *Geomechanics and Engineering, An international Journal*, **12**(1), 127-138. 査読有.

3. S. Kajiyama, M. Hyodo, Y. Nakata, N. Yoshimoto, Y. Wu and A. Kato (2017). Shear behaviour of methane hydrate bearing sand with various particle characteristics and fines, *Soils and Foundations*, **57**(2) (online). Doi: 10.1016/j.sandf.2017.03.002. 査読有.

[学会発表] (計 4 件)

1. M. Hyodo and Y. Wu, Stress-dilatancy relationship and simple constitutive model for methane hydrate bearing sand, Proceeding of 19th International Conference on soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul, Korea, 2017.9.23.

2. Y. Wu and M. Hyodo, Simply modelling of the mechanical behaviour of methane hydrate bearing sediments, Proceeding of 9th International Conference on Gas Hydrate, Denver, USA., 2017.6.27.

3. M. Hyodo, Y. Wu, S. Kajiyama (2016), Challenge in Geotechnical Engineering for Methane hydrate production in deep sea bed, Proceeding of the 5th International Conference on Forensic Geotechnical Engineering, Bengaluru, India, 56-77, 2016.12.9.

4. Y. Wu, M. Hyodo, Y. Nakata, N. Yoshimoto, S. Kajiyama, Influence of methane hydrate saturation on the location of critical state line of methane hydrate-bearing sediments, Proceeding of the 8th methane hydrate symposium, Tokyo,

Minato-Ku, 111-114, 2016.12.7.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

兵動 正幸 (HYODO, Masayuki)
山口大学大学院創成科学研究科教授
研究者番号: 40130091

(2) 研究分担者

中田 幸男 (NAKATA, Yukio)
山口大学大学院創成科学研究科教授
研究者番号: 90274183

鈴木 素之 (SUZUKI, Motoyuki)
山口大学大学院創成科学研究科教授
研究者番号: 00304494

田中 一宏 (TANAKA, Kazuhiro)
山口大学大学院創成科学研究科准教授
研究者番号: 30188289

吉本 憲正 (YOSHIMOTO, Norimasa)
山口大学大学院創成科学研究科准教授
研究者番号: 00325242

川村 喜一郎 (KAWAMURA, Kichiro)
山口大学大学院創成科学研究科准教授
研究者番号: 50321675

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

()