

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：15501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820216

研究課題名(和文) 深海底地盤中のメタンハイドレートの加熱法による生産性及び地盤安定性の評価

研究課題名(英文) Evaluation of Production and Ground Stability for Methane Hydrate in Deep Seabed Due to Dissociation by Thermal Recovery Method

研究代表者

吉本 憲正 (Yoshimoto, Norimasa)

山口大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：00325242

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：メタンハイドレート(以下MHと称す)を生産する手法の一つとして加熱法が提唱されている。加熱法による生産での地盤内で生じる現象を調査しておく必要がある。本研究では、恒温高圧平面ひずみ型実験装置を用いて、MH胚胎砂の温度および変形挙動を調査した。その結果、供試体内部は熱の移動によって加熱部から温度が上昇し、加熱時に供試体の上下に差圧を与え浸透を誘発させることで、より広範囲まで短時間で温度が上昇する。MHの分解温度まで温度上昇しないMHの安定領域では、分解域から供給されたメタンガスにより、MHが再生成することが示唆された。また、MHの分解に対応して供試体の変形が徐々に生じることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：In this research, the changes in behaviour of methane hydrate bearing sand specimens through dissociation by the thermal recovery method were investigated. An innovative plane strain shear test apparatus, which can replicate in-situ conditions of the Nankai Trough with a state of high pressure and low temperature, was used. Additionally, deformation of the specimen could be observed by the digital camera and the temperature in the specimen could be measured through the use of thermocouples. From the results, it is clear that the heat migrates slowly from the heating points located in the pedestal. The migration of heat was faster in experiments using a flow of water compared to those without a flow of water due to the differential pressure between the top and bottom of the specimen. In the case of a low initial temperature, all of the methane hydrate could not be dissociated because of the low temperature in the upper part of specimen, which lead to the regeneration of methane hydrate.

研究分野：地盤工学

キーワード：メタンハイドレート 加熱法 分解 温度 熱 変形

1. 研究開始当初の背景

深海底地盤中に存在するメタンハイドレート(以下、MH と称する)は、日本が自給出来るエネルギー資源として、その開発が期待されている。特に、東日本大震災を経て、未曾有のエネルギー危機に直面している現状では、MH 開発は喫緊の課題である。エネルギー資源として開発の対象としている MH は、砂等の地盤の間隙を充填するように存在している。そのため、MH からメタンガスの生産は、地盤中で MH をメタンガスと水に分解し、メタンガスのみを生産井から取り出す方法で行われる。このように、間隙中に固体として存在していた MH が消失することから、生産性や地盤の安定性の評価を地盤工学の立場から実施することが必要である。

MH 開発に関する研究は、申請者もメンバーである MH21 研究コンソーシアムにおいて、様々な視点から継続的に研究が実施されてきた。生産手法については、エネルギー収支の関係から「減圧法」が選定され、現在では、減圧法を基準にした種々の研究が進められている。申請者も、その一員として、減圧による MH 生産での地盤の変形特性及びその安定性について検討を進めてきている。同様に、研究分担者として参加した MH の生産に関連する科研費(萌芽、基盤 B、基盤 A)においても、MH の擬似サンプルとしての水の圧縮特性から、MH 堆積砂の小型模型実験による減圧法での地盤の変形特性の評価までを実施してきている。

減圧法の適用により、地盤は必然的に有効応力が高くなる。その結果、地盤は粒子破碎を伴い収縮し密度が高くなる。透水性は大きく低下し、破碎によって生じた細粒分による生産障害も生じる。減圧法ではなく「加熱法」であれば、有効応力の変化は生じないため、これらの問題が生じる可能性は低くなると考えられる。エネルギー収支の問題も、熱水が噴出している近傍等であれば、利用出来ることも考えられる。加えて、CO₂ をハイドレート化して生じる生成熱を利用した生産方法も加熱法の一つとして提案されている。これら生産手法の研究の進展に伴い、「加熱法」を適用することを念頭においた研究も重要である。生産における地盤の挙動は、生産性や安定性に大きく影響を与えることから、地盤工学の視点からの研究が重要と言える。

2. 研究の目的

本研究は、日本近海の深海底地盤に存在し、日本が自給出来るエネルギー資源である MH の生産性と地盤安定性の評価を行うものであり、特に、これまで詳細に検討されていない加熱法に分類される生産法に着目して検討する。特に斬新な点は、温水循環等の温度上昇を利用して MH を分解させる方法を実験的に表現し、生産性と地盤の安定性を評価するところにある。これは、既存の可視化可能

な小型低温高圧平面ひずみ型模型実験装置を改良し、利用することで、初めて可能となり、MH の生産手法の開発の促進には、欠かせない研究になると考えられる。


本研究では、現有の可視化可能な MH 用小型低温高圧平面ひずみ型模型実験装置に温水の注入が可能となるように改良を加え、「加熱法」による MH の生産を模擬した模型実験を実施する。特に深海底地盤を再現した種々の応力・圧力条件を模型実験内で再現し、供試体内での温度挙動や供試体の変形挙動について明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、加熱法による MH の開発に着目し、その際の生産性及び地盤の安定性を実験的に評価することを目的としている。そのために、既存の可視化可能な MH 用小型低温高圧平面ひずみ型模型実験装置を加熱法が再現出来るように改良する。これを使用し、ここでは、

(1) ハイドレート生成時の温度変化計測実験の実施

(2) 温水注入での加熱法による供試体内の温度挙動及び変形挙動の実験的評価を行う。

加熱法による MH の分解実験を行うにあたり、供試体内の温度変化を測定するため、 -1 に示すように、下部のペDESTAL から熱電対を 2 本、トップキャップから 2 本の合計 4 本を供試体下部から、30、60、120、150mm の高さになるように配置した。MH の分解は、ペDESTAL 内に内蔵したヒーターにより、ペDESTAL 及びペDESTAL 内の水を加熱することによる伝熱により行った。加熱時のヒーターの温度は 80 とした。本研究では、MH が存在する深海底の環境を考慮して、温度 273.15K (5)、間隙水圧 10MPa で MH を生成・保持し、その後、加熱により MH を分解した。

用いた砂は豊浦砂であり、代表的な物性は、土粒子密度 $\rho_s=2.655\text{g/cm}^3$ 、平均粒径 $D_{50}=0.210\text{mm}$ 、最大間隙比 $e_{\max}=0.973$ 、最小間隙比 $e_{\min}=0.613$ である。実験時の初期の間隙率は、南海トラフの MH 農集層の間隙率を参考に、目標間隙率を 40% とした。供試体は、目標の MH 飽和率($S_{\text{MH}}=40\%$)になるように、事前に含水比調整を行い、所定の間隙率になるようにタンパーで突き固め形成し、セル内に設置するために一旦凍結した。凍結後、セル内に設置し、所定の有効拘束圧及び背圧を負荷した後、供試体を解凍し、その後、MH の安定条件下でメタンガスを供試体に圧入した。供試体内の間隙水がすべて MH に置き換わった後に、通水し、供試体を飽和した。その後、所定の圧力で圧密した後、安全側での検討のため所定の初期せん断応力を載荷した後、MH を加熱により分解した。

実験は、下部からの伝熱のみで加熱分解を行う Case 1 (差圧なし、間隙水圧 P.P.=10MPa

で保持)と意図的に供試体上部と下部に差圧を与え、伝熱と移流を組み合わせた Case 2 (差圧あり, 上部間隙水圧 P.P.=9.9MPa, 下部間隙水圧 P.P.=10.1MPa の差圧 0.2MPa で浸透) を実施した。実験条件の詳細を表-1 に示す。

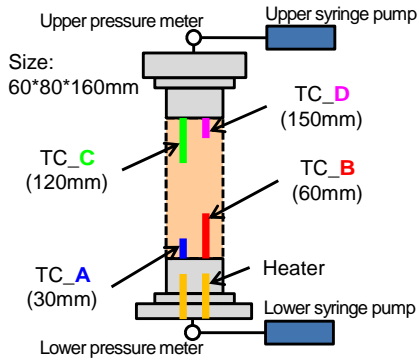


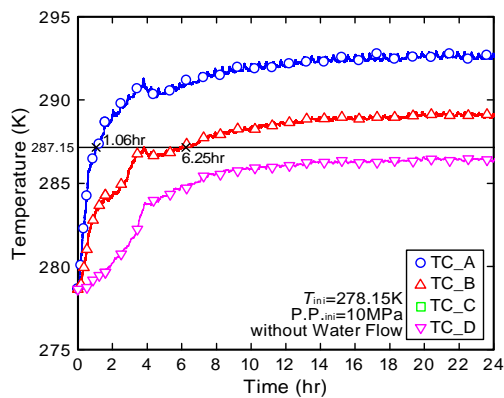
図-1 熱電対の設置位置

表-1 実験条件

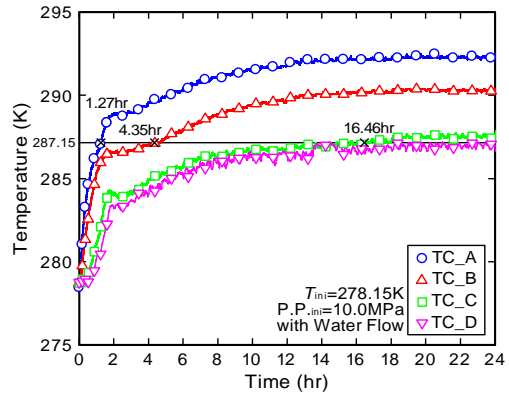
| | Case 1 | Case 2 |
|------------|--------|--------|
| 差圧 | なし | あり |
| MH 飽和率 (%) | 35.8 | 38.6 |
| 間隙率 (%) | 39.2 | 39.8 |

4. 研究成果

加熱時の供試体内の温度の経時変化を図-2 に、差圧なしを(a), 差圧ありを(b)として示す。差圧なしの TC (120mm) の位置の温度変化は、熱電対の接触不良により計測が出来なかった。図中には、圧力 10MPa における MH の分解温度 287.15K を黒実線で示している。加えて、任意の時間における供試体高さ方向の温度分布を図-3 に示す。いずれの図においても、ペDESTALに近い位置の熱電対からの温度上昇が確認でき、熱が下部から上部へと伝わっている様子が確認できる。差圧の有無による温度変化を比較すると、A において、差圧なしが若干早い時間で分解温度に達するが、その他は、概ね差圧ありにおいて温度上昇が早い。水の浸透と共に熱も運ばれている様子が確認できる。



(a) 差圧なし



(b) 浸透あり
図-2 温度の経時変化

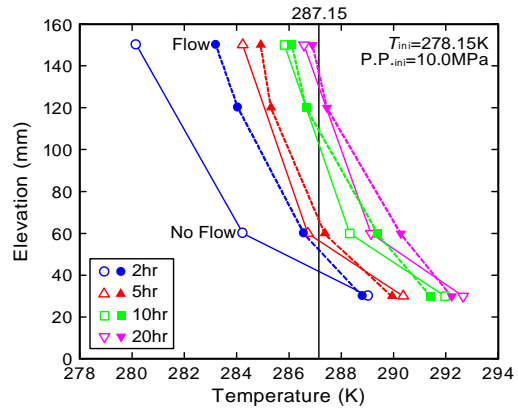


図-3 高さ方向の温度変化

図-4 に MH の分解により発生したメタンガス及び水の流出量の経時変化を、差圧の有無の比較として示した。差圧ありのケースでは、図-5 に示すように、流出量 (Q_{out}) から水の流入量 (Q_{in}) を差し引いた差分 (ΔQ) をメタンガス及び水の流出量とし、図-4 中に示している。MH が分解することで供試体に変形し間隙が変化したが、分解により生じたものと間隙の変化により生じたものを区別することが出来ないため、これらの図中に示した流出量には、両者が含まれている。浸透を生じさせるため、実験中は下部の間隙水圧を 10.1MPa, 上部を 9.9MPa に、シリンジポンプを制御することにより保持している。

図-4 より、差圧の有無による流出量を比較すると、差圧なしの方が早く流出していることがわかる。しかし、図-2, 3 で示したように、熱の伝わり方は、差圧ありの方が早く、分解領域の広がりも差圧ありの方が早いため、MH の分解により生じるメタンガスや水の流出量も差圧ありにおいて早くなると考えられる。図-5 の流入と流出の時間変化に着目すると、約 6 時間経過後辺りから、流出量及び流入量共に頭打ち状態となり、その後流入量においては値が減少していることから、流れが逆向きに変わっていることが確認できる。また、温度分布や間隙水圧の情報やいくつかの仮定の下で計算により算出した想定結果でも、差圧ありにおいて流出量が早くなるこ

とから、供試体内で次のような現象が生じたと考えられる。

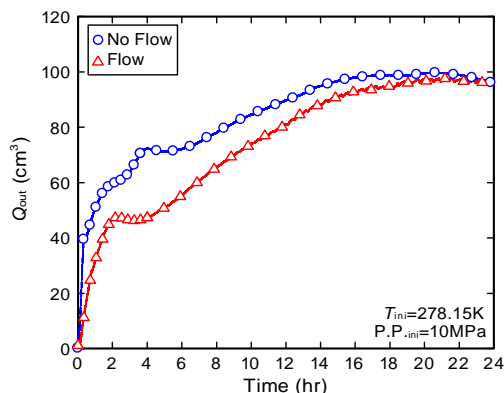


図-4 メタンガス及び水の流出量の経時変化

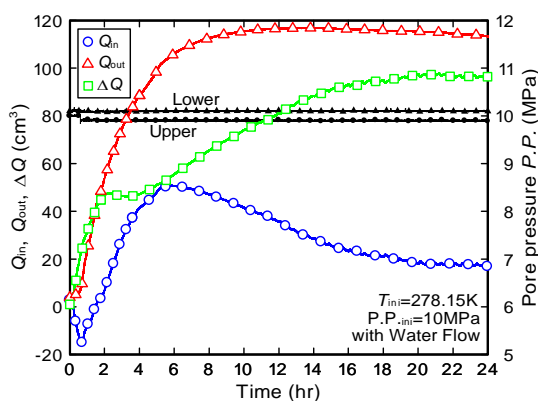


図-5 流入・流出量及び上下水圧の経時変化 (差圧あり)

想定したメタンガス挙動の概念図を図-6に示す。差圧の有無のいずれも最終的には、流出量がほぼ定常状態に至っていること及び分解条件の温度も熱電対のC付近の位置までであることから、それより上部の部分では、MHはまだ残っていることが推察される。差圧ありでは、水の浸透により分解されたメタンガスが上部へ移動するが、熱の移動より早いためメタンガスが安定領域で再生成したと考えられる。再生成することにより、流出量は差圧なしより少なくなり、再生成したMHが間隙を塞ぐため、流出に時間もかかったものと考えられる。6時間以降は再生成量の増加により、より浸透が阻害され、逆流現象が生じたと考えられる。このことから、加熱法を適用し効率よくメタンガスの回収を行うためには、MHの再生成を念頭におきメタンガスを回収する箇所まで分解条件を保つ必要があると考えられる。

加熱による分解実験から、熱の移動により加熱部から徐々に温度が上昇する。加熱と同時に水の浸透を与えることで、より広い範囲を短時間で温度上昇させられる。水の浸透により、短時間、広範囲で温度上昇が確認されたが、分解によるメタンガスや水の流出量は、水の浸透がある場合において少なく、同量流

出する時間が浸透なしと比較して遅い。浸透ありの流入の逆流現象などから、供試体内でのMHの再生成が示唆された。

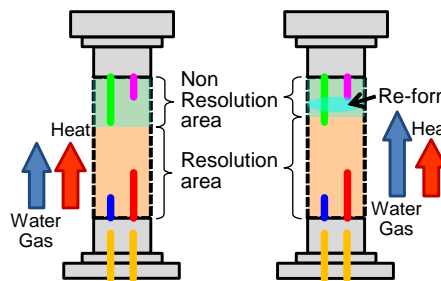


図-6 メタンガス挙動の概念図

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5件)

朝倉さや香, 吉本憲正, 兵動正幸, 中田幸男: 加熱法におけるメタンハイドレート胚胎砂の分解時の温度および変形挙動, 地盤と建設, Vol.33, No.1, pp.71-79, 2015. (査読有)

中島晃司, 兵動正幸, 吉本憲正, 中田幸男: メタンハイドレートを含む砂の力学特性に及ぼす細粒分の影響, 地盤と建設, Vol.33, No.1, pp.53-60, 2015. (査読有)

Nishimura, A., Yoshimoto, N. and Kajiyama S.: Effects of Fines on Triaxial Shear Behavior of Methane Hydrate Bearing Sands, Proceedings of the 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paper ID JPN-131, 4p, 2015. (査読有)

Kajiyama, S., Hyodo, M., Nakata, Y., Yoshimoto, N. and Kato, A.: The Effect of Particle Characteristics on Shear Behavior with Methane Hydrate Bearing Sand, Proceedings of Geomechanics from Micro to Macro, pp.1087-1092, 2014. (査読有)

Hyodo, M., Li, Y., Yoneda, J., Nakata, Y., Yoshimoto, N., Kajiyama, S., Nishimura, A. and Song, Y.: Effects of Dissociation on the Shear Strength and Deformation Behavior of Methane Hydrate-bearing Sediments, Marine and Petroleum Geology, Vol.51, pp.52-62, 2014. doi:10.1016/j.marpetgeo.2013.11.015 (査読有)

[学会発表](計14件)

朝倉さや香, 兵動正幸, 吉本憲正, 中田幸男: 乾燥及び飽和条件における砂の熱特性に関する基礎的研究, 第68回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp.199-200, 2016.5.21, 広島工業大学(広島県広島市)

梶山慎太郎, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正, 日下部真佑: 種々のホスト粒子が

ら成るメタンハイドレート胚胎砂のせん断特性, 第 7 回メタンハイドレート総合シンポジウム講演集, pp.142-145, 2015.12.3, 産業技術総合研究所 臨海副都心センター(東京都江東区)
加藤晃, 中田幸男, 兵動正幸, 吉本憲正: メタンハイドレートの固結力を考慮した弾塑性構成式による要素試験シミュレーション, 第 7 回メタンハイドレート総合シンポジウム講演集, pp.63-64, 2015.12.3, 産業技術総合研究所 臨海副都心センター(東京都江東区)
吉本憲正, 朝倉さや香, 兵動正幸, 中田幸男: 加熱法によるメタンハイドレート胚胎砂の分解時の熱・水・ガス挙動, 第 50 回地盤工学研究発表会講演集, pp.441-442, 2015.9.2, 北海道科学大学(北海道札幌市)
兵動正幸, 西村顕, 梶山慎太郎, 中田幸男, 吉本憲正: メタンハイドレートにより固結した細粒分を含む砂のせん断挙動の評価, 第 50 回地盤工学研究発表会講演集, pp.439-440, 2015.9.2, 北海道科学大学(北海道札幌市)
日下部真佑, 加藤晃, 中島晃司, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正: メタンハイドレートを含む砂のせん断強度に及ぼす粒度分布の影響, 第 50 回地盤工学研究発表会講演集, pp.437-438, 2015.9.2, 北海道科学大学(北海道札幌市)
梶山慎太郎, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正, 加藤晃, 田平一平: メタンハイドレートを含む種々の粒子特性からなる砂の力学および分解特性, 第 50 回地盤工学研究発表会講演集, pp.435-436, 2015.9.2, 北海道科学大学(北海道札幌市)
吉本憲正: 加熱時のメタンハイドレートを含む砂の温度・変形挙動, 海洋メタンハイドレートの資源開発と環境保全に関する新潟フォーラム講演集, pp.13-14, 2015.2.24, 朱鷺メッセ(新潟県新潟市)
吉本憲正: 東海沖, 第二渥美海丘コア試料及びその模擬試料のせん断特性, 第 6 回海洋算出試験に関わる地盤特性評価ワークショップ, No.11, 2014.10.24, 北海道大学(北海道札幌市)
吉本憲正, 中田幸男, 兵動正幸: 深海底資源開発と地盤工学, 第 59 回地盤工学シンポジウム論文集, pp.551-558, 2014.11.28, 長野市生涯学習センター(長野県長野市)
田平一平, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正, 加藤晃, 梶山慎太郎: メタンハイドレートを含む砂の加熱法による分解挙動, 第 49 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.359-360, 2014.7.16, 北九州国際会議場(福岡県北九州市)
梶山慎太郎, 加藤晃, 田平一平, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正: メタンハイドレートの胚胎した種々の細粒分含有率から成る砂の平面ひずみ特性, 第 49 回地盤

工学研究発表会発表講演集, pp.361-362, 2014.7.16, 北九州国際会議場(福岡県北九州市)
西村顕, 加藤晃, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正: メタンハイドレート胚胎砂の強度特性に及ぼす細粒分の影響, 第 49 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.363-364, 2014.7.16, 北九州国際会議場(福岡県北九州市)
加藤晃, 梶山慎太郎, 中田幸男, 兵動正幸, 吉本憲正: メタンハイドレート模擬胚胎砂の平面ひずみ圧縮挙動および局所変形に及ぼす拘束圧の影響, 第 49 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.433-434, 2014.7.16, 北九州国際会議場(福岡県北九州市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
○出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉本 憲正 (YOSHIMOTO NORIMASA)
山口大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 00325242

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: