

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04683

研究課題名(和文)メタンハイドレート生産に加熱法は適さないのか？ - 熱・流体移動特性の解明と評価 -

研究課題名(英文)Is Heating Method Unsuitable for Methane Hydrate Production? -Heat and Fluid Transfer Characteristics and Evaluation-

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：メタンハイドレートを含む砂の場合、砂のみの場合と比べて、温度挙動が変化し一定時間温度が停滞または低下する現象が確認された。メタンハイドレート分解時には圧力上昇がみられ、上昇した圧力が元に戻る瞬間とメタンガス産出率が急激に増加する瞬間が対応していることが確認された。一次元温度制御透水カラム実験結果から、豊浦砂、Tcの熱挙動には大きな差異がないことが確認され、キセノンハイドレートを含む砂の場合、熱の伝達が早くなることが確認された。熱損失項を考慮した一次元熱伝導解析を実施し、キセノンハイドレート含有砂の加熱分解時の温度特性を概ね表現することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

加熱法の適用を想定した解析的検討に必要なと考えられるハイドレートを含む砂の熱特性や間隙流体の移動特性等について多くの知見を得ることができた。本研究では、境界条件の明確な室内実験のシミュレーションでの検証に留めているが、シミュレーションに必要なパラメータは決定できており、実地盤環境でのシミュレーションも可能といえる。このように、MH資源開発の加熱法による生産に係わる基礎的な研究については、その実現の可能性の目途がついたといえる。ただし、減圧法では確認されなかった挙動が確認されており、実地盤での産出試験において、その挙動が生産に悪影響を与えうるかどうかについて、今後、更なる研究が必要といえる。

研究成果の概要(英文)：In the case of methane hydrate-bearing sand, it was confirmed that the temperature behavior stagnated or decreased for a certain period of time. During the decomposition of methane hydrate, it was observed that the pore pressure increased. Then, it was confirmed that the amount of methane gas produced increased rapidly at the moment when the increased pore pressure returned to normal. From the results of the one-dimensional temperature-controlled permeability column tests, it was confirmed that there was no significant difference in the thermal behavior of Toyoura sand and Tc. It was also confirmed that heat transfer was faster in the case of the xenon hydrate-bearing sand. One-dimensional heat transfer analysis considering the heat loss term was performed, and the temperature characteristics of the xenon hydrate-bearing sand during thermal decomposition were generally expressed.

研究分野：地盤工学

キーワード：メタンハイドレート 生産 熱 地盤 流体 減圧 間隙比 粒子破碎

## 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 (以後、MH と称す) は、日本が自給出来るエネルギー資源として開発が期待されている。その 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 からのメタンガスの生産は、地盤中で MH を、MH の安定領域から外し、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。間隙中に固体として存在していた MH が消失すること、分解されたメタンガスが間隙中を移動することから、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。

物理的な生産手法としては、「減圧法」と「加熱法」に大別できる。現状では、2000 年代に検討されたエネルギー収支の関係から「減圧法」が選定され、減圧法を基準にした種々の研究が進められている。特に、MH の資源開発においては、MH21 研究コンソーシアムが組織され、海洋産出試験に代表されるように、「減圧法」を想定した規模の大きな実際の生産を想定したような検討や実規模でのメタンガスの生産や地盤変形を表現可能なシミュレーターの開発<sup>1)</sup>、「減圧法」による MH 層からの生産を対象とした世界最大の室内模型実験装置を用いた研究<sup>2)</sup>が実施され、「減圧法」による生産の可能性について検討し、次の海洋産出試験へとつながるような取り組みが実施されている。

海外の研究者らは、MH のモルフォロジー<sup>3)</sup>に主眼が置かれ地盤中での MH の存在形態の違いと、それが全体の力学挙動に与える影響について、非常にミクロな視点からの研究に主眼が置かれている。そして、その挙動を表現するモデルの開発が積極的に行われ、生産を考慮した研究はほとんど実施されていない現状にある。

著者らは、これまでに MH を含む砂の力学特性に関する研究<sup>4)</sup>を先駆的に実施し、また、MH を含む地盤の力学特性の解明とそのモデル化の研究を実施してきており、加えて、「減圧法」を想定した実験的・解析的検討を実施してきた。それらの研究成果は、他の研究機関に活用され第 2 回の海洋産出試験にも活かされた。

減圧法はその方法から、必然的に地盤の有効応力が高くなる。その結果、粒子破碎を伴い地盤は収縮し密度が高くなる。それにより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。2017 年に実施された海洋産出試験では、出砂による生産障害により産出試験が中断され、生産技術の確立に至らなかった。また、2000 年代前半の研究成果を拠り所としてのエネルギーバランスから「減圧法」が生産手法の基準とされていることから、「加熱法」の可能性を再検討することは意味があると考えられる。現有の装置による加熱実験においても、特徴的な結果<sup>5)</sup>が得られ、現状、それを説明する十分な知見がないことから「加熱法」についての研究は必要であると考えられる。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、上述したような問題が生じる可能性は低くなると考えられる。

## 2. 研究の目的

2000 年代に MH の生産手法として、「減圧法」を基準にすることが決定され、それに関連した研究が実施されてきている。一方で「加熱法」については、上述したように、十分な研究が実施されていない状況にある。つまり、「加熱法」を MH の生産に適用できるか？との問いについて適切な解答を得るためには、基礎的な研究が必要である。本当に MH 生産に「加熱法」は適さないのか？という疑問を精度よく検討することを目指し、既往の実験結果を踏まえ、以下の「問い」を着想した。

- 1) MH を含む砂において、熱の移動はどのように進むのか？ 既往の実験結果の観察から、MH の有無によって熱の伝わり方が異なる。MH が分解する前の MH を含む砂において、熱の移動がどのように進むのか？を解明することは重要である。
- 2) 砂中の MH の分解速度は、何に依存しているのか？ MH の安定境界付近において、熱の移動が停滞する時間が存在する。その時間は、供試体の上部と下部において異なっている。この違いは何に依存しているのかを明らかにし、定量的に評価する必要がある。
- 3) 分解したメタンガスは、どのように進むのか？メタンガスと熱の移動速度の関係は？ 実験結果で観察された供試体上部と下部の圧力差が生じた原因が、分解したメタンガスが熱の伝達より速く供試体上部に移動し、MH の安定領域で再生成し、供試体内に MH と砂で作られた壁のようなものが構築され、下部の方で分解されたメタンガスの膨張圧であると推定するとメタンガス等の流体と熱の移動速度の関係を明確にする必要がある。

上述した「問い」の答えを見つけるために、本研究の目的を以下とした。

- 1) 「MH を含む砂における熱の移動特性の解明」
- 2) 「砂中の MH の分解速度に及ぼす影響要因の抽出と定量的評価」
- 3) 「分解したメタンガスの砂中の移動特性の解明とメタンガスと熱移動のモデル化」

### 3. 研究の方法

本研究では、一次元のカラム実験装置を用いて、砂のみ及びMHを含む砂において、熱及び分解したメタンガス等の流体の移動特性を実験的に解明し、それらのモデルを構築する。供試体の周面に低熱伝導素材を用いた真空断熱壁を設け、熱や浸透において一次元の境界条件を満足するカラム実験装置を開発する。その実験装置を用いて、研究目的を達成するように、以下に示す研究計画を実施する。

- 1) MHを含む砂における熱の移動特性の解明  
カラム実験装置を開発し、それを用いた熱拡散実験を種々の条件で実施し、熱伝導率等を定量的に求め、熱の移動特性を解明する。
- 2) 砂中のMHの分解速度に及ぼす影響要因の抽出と定量的評価  
カラム実験装置を用い、分解領域に達する熱を供給し、種々の条件でハイドレートの分解速度を評価する実験を実施する。分解速度に影響を与える要因の分析とそれらの各要因に対する定量的評価を実施する。
- 3) 分解したメタンガスの砂中の移動特性の解明とメタンガスと熱移動のモデル化  
カラム実験装置を用い、分解したガスの浸透実験を行い、ガス移動の定量評価と浸透モデルを構築する。また、熱移動やハイドレート分解速度についてもモデルの構築を実施し、最終的にそれらの連成モデルを構築する。

### 4. 研究成果

本研究では、海底下のメタンハイドレート濃集層を模擬し、加熱法によるハイドレート分解実験を行うことで、ハイドレート分解中の温度・圧力挙動について調べ、生産時に生じる現象を確認することと試料の熱物性を獲得することを目的としている。加えて、減圧法によるハイドレート分解によって生じる有効応力の変化とそれに伴い生産性に影響する間隙比変化を明らかにすることを目的としている。本研究の成果として、得られた結果をまとめる。

#### A) 恒温高圧平面ひずみ実験機を用いた加熱分解実験

供試体内にメタンハイドレートを含む場合、砂のみの場合と比べて、温度挙動が変化し一定時間温度が停滞または低下する現象が確認された。また、メタンハイドレート分解時には圧力上昇がみられ、その大きさは供試体を形成する細粒分含有率に依存することが確認された。上昇した圧力が元に戻る瞬間とメタンガス産出率が急激に増加する瞬間が対応していることが確認された。そして、細粒分が含まれない場合、メタンハイドレートが分解した際に生じるガスが、メタンハイドレート安定境界線よりも低い温度の供試体上部に急速に移動するため、メタンハイドレートが再生成され、間隙を閉塞し、供試体内の連続性が失われることで、結果として産出終了時間が遅くなることが考えられる。

供試体内の温度分布から推定される分解されたメタンガス量の理論計算値と実験での分解メタンガス量の差の検討からメタンハイドレートの再生成が示唆された。

#### B) 一次元の温度制御透水カラム実験機を用いた加熱分解実験

一次元の温度制御透水カラム実験機の実験結果から、豊浦砂、 $T_c$ の熱挙動には大きな差異がないことが確認され、供試体内にキセノンハイドレートを生成した場合、熱の伝達が早くなることが確認された。熱損失項を考慮した一次元熱伝導解析を実施し、キセノンハイドレート含有砂の加熱分解時の温度特性を概ね表現することができ、逆解析からキセノンハイドレート含有砂の熱伝導率が豊浦砂よりも高いことが確認できた。

#### C) 減圧法を想定した三軸圧縮試験

メタンハイドレート含有砂に対して、減圧法を想定した水圧変化を与えた実験を実施し、有効応力と間隙比の関係を取得した。その結果、減圧することで有効応力が大きくなり、間隙比が大きく低下することが確認された。また、その際に、粒子破砕を伴うことも確認された。

減圧法を想定した水圧変化を与えた実験を実施し、有効応力と間隙比の関係を取得した。

加熱法の適用を想定した解析的検討に必要と考えられるハイドレートを含む砂の熱特性や間隙流体の移動特性等について多くの知見を得ることができた。本研究では、境界条件の明確な室内実験のシミュレーションでの検証に留めているが、シミュレーションに必要なパラメータは決定できており、実地盤環境でのシミュレーションも可能といえる。このように、MH資源開発の加熱法による生産に係わる基礎的な研究については、その実現の可能性の目途がついたといえる。ただし、減圧法では確認されなかった挙動が確認されており、実地盤での産出試験において、その挙動が生産に悪影響を与えうるかどうかについて、今後、更なる研究が必要といえる。

#### 参考文献

- 1) 天満則夫: メタンハイドレート開発に係る地層特性評価技術の開発 — 現場への適用を目指して—, *Synthesiology*, Vol.7, No.4, pp.228-237, 2014.
- 2) 天満則夫: メタンハイドレート層からのガス生産手法の研究開発の現状について, *日本マリンエンジニアリング学会誌*, Vol. 51, No. 1, pp.97-101, 2016.
- 3) S. Dai, J. C. Santamarina, W. F. Waite, and T. J. Kneafsey: Hydrate morphology: Physical properties of sands with patchy hydrate saturation, *Journal of Geophysical Research - Solid Earth*, Vol. 117, Issue B11, 2012.
- 4) Hyodo, M., Nakata, Y., Yoshimoto, N. and Ebinuma, T.: Basic Research on the Mechanical Behavior of Methane Hydrate-sediments Mixture, *Soils and Foundations*, Vol.45, No.1, pp.75-85, 2005.
- 5) 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.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yoshimoto, N., Wu, Q., Fujita, K., Kajiyama, S., Nakata, Y. and Hyodo, M.	4. 巻 116
2. 論文標題 Hydrate dissociation and mechanical properties of hydrate-bearing sediments under local thermal stimulation conditions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Gas Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 205045
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jgsce.2023.205045	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Xu, J., Xu, C., Yoshimoto, N., Hyodo, M., Kajiyama, S. and Huang, L.	4. 巻 148
2. 論文標題 Experimental Investigation of the Mechanical Properties of Methane Hydrate-Bearing Sediments under High Effective Confining Pressure	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering	6. 最初と最後の頁 04021190-1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002728	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 中田幸男, 吉本憲正, 米田純, 梶山慎太郎, 中島晃司	4. 巻 68
2. 論文標題 メタンハイドレート生産に関わる最近の室内試験および模型実験	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 地盤工学会誌	6. 最初と最後の頁 19-22
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 バトオチルトムルドラム, 呉起, 吉本憲正
2. 発表標題 平面ひずみ条件下でのメタンハイドレート含有砂のせん断特性に及ぼす載荷速度の影響
3. 学会等名 第73回土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 呉起, 吉本憲正, 中田幸男
2. 発表標題 平面ひずみ条件下におけるメタンハイドレート胚胎砂のせん断速度依存性に及ぼす細粒分の影響
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Wu, Q., Yoshimoto, N., Tumurdulam, B., Kajiyama, S., Nakata, Y. and Hyodo, M.
2. 発表標題 Effect of fines content and hydrate saturation on the shear rate dependence of methane hydrate-bearing sediments
3. 学会等名 the 31st (2021) International Offshore and Polar Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Wu, Q., Yoshimoto, N., Nakano, N., Kajiyama, S., Xu, J. and Nakata, Y.
2. 発表標題 Image Analysis of Natural Gas Hydrate-bearing Sand during Shear with Different Plane Strain Shear Rate
3. 学会等名 the 3rd International Symposium on Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Wu, Q., Yoshimoto, N., Nakano, N., Kajiyama, S., Xu, J., Nakata, Y.
2. 発表標題 Time-dependent behaviors study on natural gas hydrate-bearing sediments under plane strain shear test
3. 学会等名 the 30th (2020) International Offshore and Polar Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	中田 幸男  (Nakata Yukio)  (90274183)	山口大学・大学院創成科学研究科・教授   (15501)	
研究 分担者	梶山 慎太郎  (Kajiyama Shintaro)  (50803532)	山梨大学・大学院総合研究部・助教   (13501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
中国	China University of Geosciences			
中国	Beijing Univ. of Technology			