

# メタンハイドレート生産時における出砂現象に関する実験的検討

早稲田大学 学生会員 柴山 周也○ 早稲田大学 国際会員 赤木 寛一  
早稲田大学 船橋 知希  
石油天然ガス・金属鉱物資源機構 安部 俊吾

## 1. はじめに

メタンハイドレート（以下 MH と略す）は日本近海の下海底下に存在する国産のエネルギー資源として注目されている。低温・高圧の環境下で安定的に存在可能であり、永久凍土地帯や世界各地の大陸近辺の下海底下に存在することが知られている<sup>1)</sup>。MH の生産手法として、坑井内の水をポンプで汲み上げることで、坑井内の圧力とともに MH 胚胎層の圧力を低下させて MH を分解する減圧法が有望視されており、第 1 回海洋産出試験においてもその有効性が確認されている<sup>2)</sup>。しかし、減圧法適用により、メタンガスや水とともに砂粒子が坑内に流入する出砂現象が確認されている。出砂現象は、MH 胚胎層が未固結であることに起因し、坑井や周辺機器の損傷、坑井内の閉塞を引き起こす可能性があるため、MH の長期的な生産を考えた時極めて重要な課題となる。この出砂現象を評価すべく、Uchida らによって解析モデルの構築が進められているが、計算では導出が困難なパラメータが存在する<sup>3)</sup>。他方、大山らは、MH 胚胎層の条件を再現した人工供試体への通水試験を行い、出砂発生の有無を検証している<sup>4)</sup>。本報告では、Uchida らの解析モデルに必要なパラメータを実験的に導出すべく、大山らの使用した実験装置を利用した検討を行った結果を報告する。

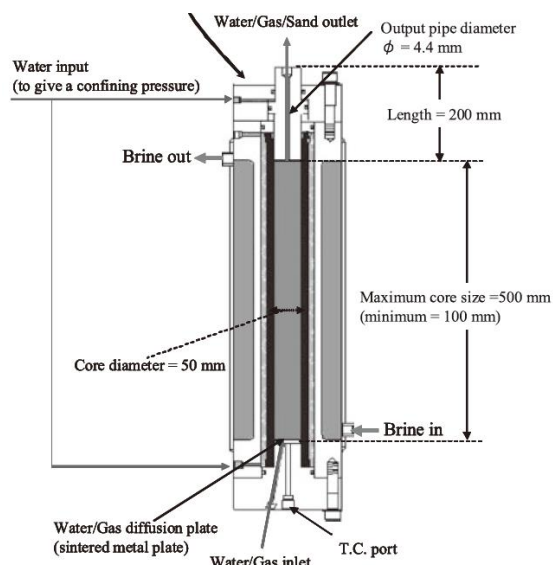


図-1 実験装置概要図

## 2. 実験装置および実験方法

### 2-1. 実験装置

図-1 は、大山らが使用した実験装置の概要図である。本実験装置はゴムスリーブに充填した供試体に対して、シリンジポンプを用いて制御された側圧/軸圧を載荷することで、異方圧を加えることができる構造となっている。また、側圧載荷部分のさらに外側に温度制御したナイブラインを循環させることができる構造となっており、フィールドの温度・圧力条件を模擬した通水実験が可能であるほか、圧力容器の入口/出口には圧力計が設置されており、供試体に生じる圧力勾配を計算することができる。

一般、通水により流出した砂の質量を測定可能なシステムを追加した。上部エンドプラグに L 字型の配管を接続し、水道水で満たしたシリンダーに挿入する、すなわち流出した砂がシリンダー内に堆積することで、質量を測定することが可能である。また、供試体から砂が流出した場合には、骨格を形成する要素が失われ供試体全体の体積が減少する。本装置では、三軸応力が載荷されているので、供試体は圧縮されることになり、圧縮の主たる発生方向は供試体長を短くする方向に働く。装置上部には変位計を設置しており、出砂時の供試体長の変化を測定することができる。

### 2-2. 試料の作製

本研究では、第 1 回海洋産出試験より得られた海底地盤コアサンプルの粒度分布を模擬した供試体を対象に出砂実験を行う。模擬供試体は、豊浦砂・東北珪砂 8 号・カオリンの三種類の砂を配合することで作製する。表-1 に配合比を、図-2 にコアサンプルおよび模擬供試体の粒度分布を示す。

### 2-3. 実験手順

本実験では MH 胚胎層の環境再現のため、循環させるナイブラインを 12°C、水平方向の流動を模擬するため圧力チャンバーを横向きとし、供試体に載荷する側圧/軸圧を (I) 4MPa/4MPa および (II) 6MPa/4MPa とした。供試体を水飽和させた後、0.1mL/min で軸方向の通水を開始する。その後、送水量を徐々に上昇させ、出砂が確認された時点で送水量を固定し、出砂が終了するまで観測を継続する。

表-1 模擬供試体配合比

	豊浦砂	東北珪砂8号	東北珪砂8号(106 μ)	カオリン
配合比	20	68	11	1

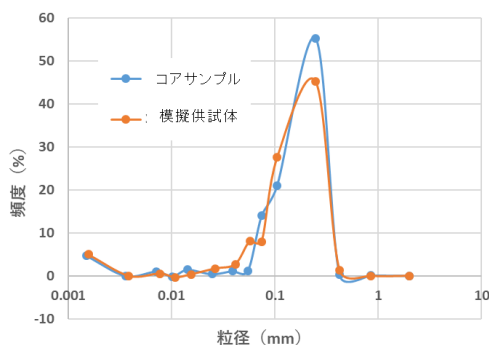
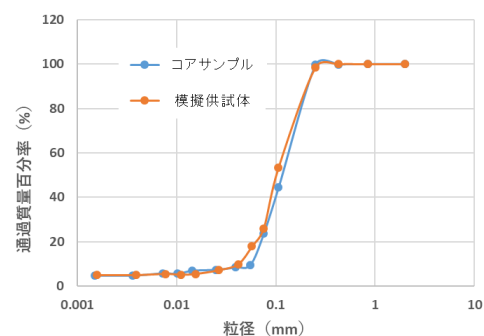


図-2 粒度試験結果

### 3. 実験結果

#### (I) 側圧：4MPa・軸圧：4MPa(Run①-③)

側圧・軸圧ともに4MPaにおける出砂実験の結果を図-3に示す。

3 ケースのうち、Run①②では、約 25kPa の差圧で細粒分の流出が確認された。その後、約 30kPa の時点でより粗い成分(砂粒分)の流出が開始したため、この時点の差圧を、後述する限界動水勾配値の計算に用いることとした。一方、Run③では、差圧の上昇に伴い細粒分が流出と停止を繰り返した後、約 44.4kPa の時点で砂粒分の流出が開始した。

#### (II) 側圧：6MPa・軸圧：4MPa(Run④-⑤)

側圧が6MPa、軸圧が4MPaにおける出砂実験の結果を図-4に示す。

Run④⑤では、側圧・軸圧ともに4MPaの状態では圧密したのち、側圧のみ6MPaに昇圧している。どちらも約30kPaの差圧で細粒分が流出し、約36kPaの時点で砂粒分の流出が開始した。また、出砂量はRun④で約25g、Run⑤で約20gと異なる結果が得られた。

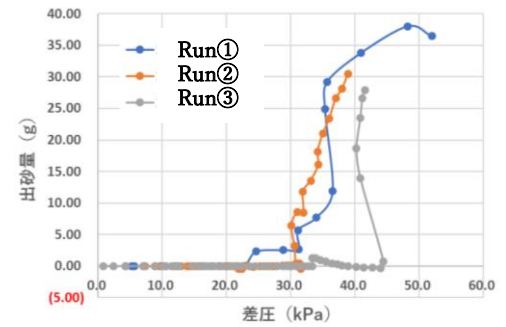


図-3 実験(I)結果

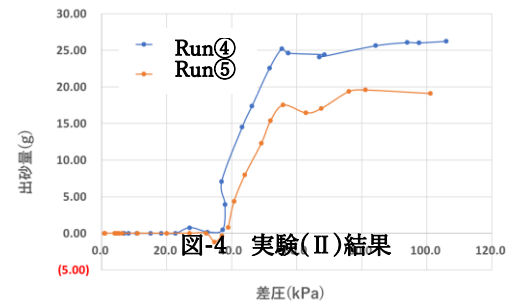


図-4 実験(II)結果

### 4. 考察

実験(I)の結果より、限界動水勾配 $i_{crit0}$ を算出すると、以下の式よりそれぞれRun①で6.36(m/m)、Run②で6.39(m/m)、Run③では9.06(m/m)と算出された。

$$i_{crit0} = \frac{\Delta P / \gamma_w}{L}$$

$\Delta P$  : 差圧(kPa)  
 $\gamma_w$  : 水の単位体積重量(kN/m<sup>3</sup>)  
 $L$  : 供試体長(m)

今後、細粒分流出が生じると考えられる直前から送水量の上昇幅を狭める等、効率的な実験手順を検討することで、実験の再現性を高めていきたい。

また、実験(II)の結果より、限界動水勾配 $i_{crit0}$ は、Run④で7.73(m/m)、Run⑤で7.47(m/m)と算出された。ここで、昇圧過程における側圧载荷用シリンジポンプ送水量の変化量が14.73mL(Run④結果)であり、既往研究<sup>5)</sup>より得られた圧力载荷による実験器具の体積変化量および水の圧縮量を差し引くことで、供試体の体積変化量が算出できる。2MPaの昇圧による体積変化量は、実験装置で2.18mL、ゴムスリーブで0.68mL、水で2.94mLであるため、供試体の体積変化量は8.93mLとなる。ここで別途測定した模擬供試体の土粒子密度(2.661g/mL)から、この体積変化量は23.8g程度と換算され、出砂量と同程度の値となることがわかった。Uchidaらは、出砂モデル内で、せん断変形の生じた部分が出砂に寄与するという仮定をおいていることから、今後体積変形量と出砂量の関係についても検討していきたい。

### 5. まとめ

今回の実験では、等方圧および異方圧条件下における限界動水勾配の算出を行った。また、昇圧過程における体積変化量の補正手法を提案した。今後、実験の再現性を高めるべく、検討を深めたい。

### 6. 参考文献

- 1) 「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」フェーズ2及びフェーズ3総括成果報告書、メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム、2019。
- 2) Yamamoto et al., Operational overview of the first offshore production test of methane hydrates in the Eastern Nankai Trough, OTC25243-MS, 2013.
- 3) Shun Uchida, Assaf Klar, Koji Yamamoto, Sand production model in gas hydrate-bearing sediments, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 86, p.303-316, 2016.
- 4) 大山裕之、長尾二郎、鈴木清史、成田英夫、減圧法適用時におけるメタンハイドレート胚胎供試体の出砂現象の実験的解析、Journal of MMIJ, Vol. 126, No. 8, 9, p.497-502, 2010.
- 5) 柴山周也、船橋知希、赤木寛一、安部俊吾、メタンハイドレート生産時の出砂現象のモデル実験実施に係る事前検討、地盤工学会関東支部発表会2019

※本内容は、経済産業省の委託により実施しているメタンハイドレート研究開発事業において得られた成果に基づいています。