

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13830

研究課題名（和文）3Dプリンターを用いた多相系地盤の浸透特性評価手法の開発

研究課題名（英文）Basic study of permeability evaluation for multi-phase geomaterial using 3D printed sediment

研究代表者

米田 純 (Yoneda, Jun)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・主任研究員

研究者番号：40760187

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では多相系地盤の浸透特性を解明することを目的に、デスクトップ3Dプリンターを活用し、多孔質体の複製とその透水性評価を試みた。低炭素資源として期待されるメタンハイドレート(MH)は砂地盤の空隙に氷状の固体として存在している。しかし、その存在形態や含有量の違いで浸透率が大きく異なる。そこで、MH堆積土を対象とし、MH・土粒子の固体部分をプリントし、透水試験を実施することでMHの含有量変化等の影響を評価した。その結果、異なるMH飽和率（含有量）の模擬堆積物モデルを用いた透水試験では、MHの存在に伴う透水性低下の程度が実験と数値解析とで良い相関関係を得られることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地盤材料の浸透特性は土木構造物の建設や地盤災害予測・対策などのために必要不可欠な情報である。これらの材料パラメータは主に既往の基準や経験式で決定されるか、不攪乱試料の採取を行い、各種試験を実施することで得られる。不攪乱試料を用いた試験の場合、基本的に一つのサンプルに対して一つの試験しか適用できない。しかしながら複数の試験を実施したいとするニーズは多い。本研究結果から、不攪乱試料の採取が難しい場面や、数値解析では計算コストが膨大な場合も、複製地盤サンプルを利用することで相対的な変化を捉えられる新たな研究アプローチの提案が期待される。

研究成果の概要（英文）：Permeability evaluation of 3D printed porous media based on desktop type printer was conducted for multi-phase geomaterial. Methane hydrate (MH), which is expected to be a low-carbon resource, exists as an ice-like solid in the pore spaces of sandy soil. However, the permeability differs greatly depending on its existence morphology and content. In this research, the effects of MH content change were evaluated by printing the solid part of MH and soil particles and conducting permeability tests on MH deposited soil model. The results showed that the permeability test using simulated sediment models with different MH saturation showed a good correlation between experiment and numerical analysis in the degree of permeability reduction due to the presence of MH.

研究分野：地盤工学

キーワード：3Dプリンター 透水係数 浸透率 メタンハイドレート 多孔質体

### 1. 研究開始当初の背景

地層の浸透特性は、有効応力解析等に必要不可欠な要素であり、地盤変形を精度良く予測するには透水係数の把握が極めて重要である。対象地盤の不攪乱試料が採取できた場合、通常は透水試験や各種力学試験を実施して地盤の材料定数の把握に努める。しかしながら、例えば透水試験においては内部浸食、力学試験においては試料が破壊した後では、条件の異なる試験を実施することが原理上不可能である。3D プリンターを用いて“不攪乱試料のコピー”が実現できれば画期的な手法として受け入れられることが予想される。更に、発展的な利用法として多相系地盤の浸透特性の評価への応用が考えられる。近年、次世代資源として注目されている MH は、低温高圧で安定する氷状の結晶である。例えば 10℃ の環境で MH が存在するためには約 8MPa 程度の圧力が必要である。実地盤においては、土の間隙に様々な形で存在している。MH の資源開発においては、間隙内の圧力を減圧することによって MH を原位置において分解し、天然ガスとして回収する『減圧法』が最も有効とされている。この減圧法によるハイドレート分解中は、土・水・ガス・ハイドレートの 4 相が同時に存在することになる。しかしながら、ハイドレート分解中は、常に分解が進んでいるため透水・透気試験を実施できない。また、一旦安定境界まで温度圧力条件を戻すと、内部のガスが水と反応して新たなハイドレートを生成してしまう。このようにダイナミックな変化を伴う状況では透水係数の計測が困難なため、間隙内に占めるハイドレート割合の変化によって透水係数がどのように変化するか、未だ結論は出ていない。このような多相系地盤の固体部分を複製し、各種試験に供することが出来れば、新たな研究アプローチとなることが期待される。

### 2. 研究の目的

本研究は、地盤材料の浸透特性評価を目的にして、3D プリンターを用いた新たな評価手法の提案を行うとともに、多相系地盤の浸透特性の解明を目指す。地盤材料の複製という新しい発想によって、一つのサンプルから様々な材料パラメータの取得が可能となる。加えて、本来実験が不可能であるような条件についても内部構造を再現して実験に供することが可能となる。

### 3. 研究の方法

#### (1) X 線 CT データを基にしたプリントと透水試験方法

本研究の透水性評価の対象となる MH 堆積土は MH が砂質土の間隙に充填される形で存在している。既往の研究において、人工的に生成したハイドレート堆積土の  $\mu$  フォーカス X 線 CT 断面(Yoneda et al., 2016)を図 1 に示す。本サンプルは豊浦砂 (平均粒径 0.2mm) を有効拘束圧 1MPa の条件下で内部にクリプトンハイドレートを生成したものである。図上段はハイドレート生成前、図下段は生成後(ハイドレート飽和率  $S_h=65\%$ )を示している。これらの 3 次元 CT 画像の砂及びハイドレート部分を画像処理によって 2 値化し、3D モデル(.stl)を作製した。現在、市場に存在するデスクトッププリンターでは、サブミリメートル以下の粒子を再現することはできない。そのため、モデルの縮尺を 10 倍にして印刷を試みた。3D プリントは fused deposition modeling (FDM)方式の Tiertime 社製 UPbox+ を利用し、積層厚 0.1mm、PLA 樹脂を用いて行った。製作したプリント供試体を図 2 に示す。

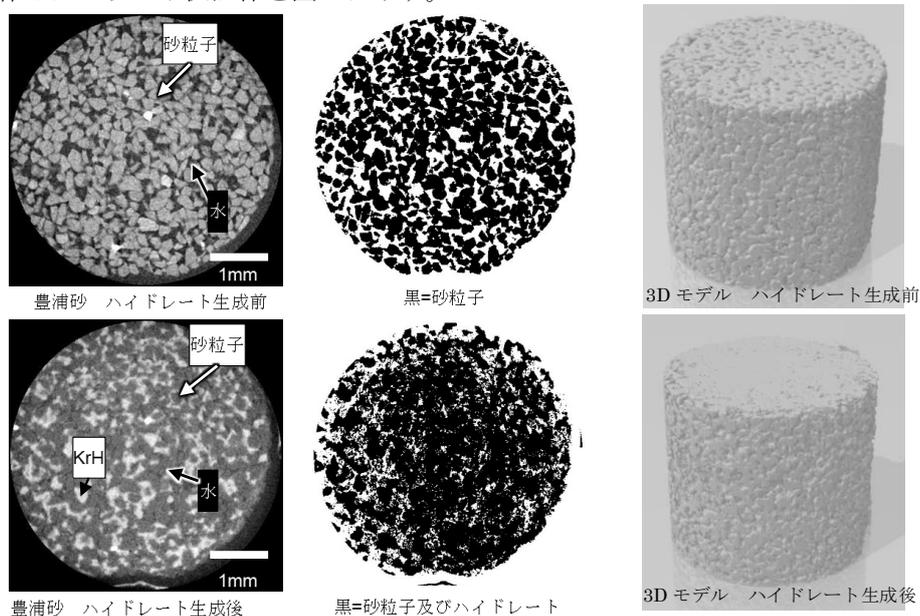


図 1 X 線 CT 画像を基にした 3D モデル作成



図2 3D プリント供試体単体

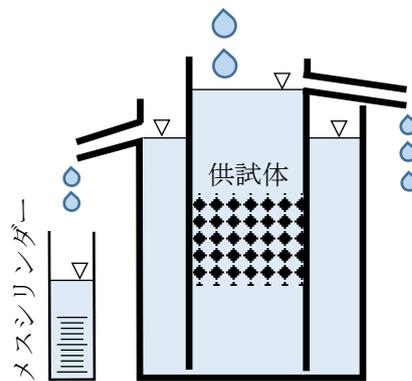


図3 定水位透水試験装置

供試体は、透水試験装置の壁面との密着性を完全にするため、図3に示す定水位透水試験装置の透水円筒と結合した状態でまとめてプリントを行った。

#### (2) デジタルデータを活用した透水特性の相対変化の評価

ハイドレート固相の含有量変化を捉えたデジタル画像が存在しないため、ここではデジタル画像を活用した透水性の相対変化評価を実施する。利用するデータは個別要素法によって自然堆積させた球形粒子モデルである(Katagiri et al., 2017)。このモデルは粒子表面を覆う形でハイドレートが存在しており、ハイドレート含有量の増加と共に間隙中心に向かって閉塞が進んでいく。図4に使用したモデルの3Dモデルを示す。本モデルの作製には、Digital-Light-Processing (DLP)方式のWanhao社Duplicator D8を用いた。印刷条件は、積層厚0.04mm、材質は光硬化レジンである。図3に示す定水位透水試験装置を作製し、透水性評価を行った。なお、モデルサイズは5 x 5 x 5 cmである。試験に用いる流体は水では透水性が高過ぎて測定が困難なため、ここでは粘度約1Pa・sのガムシロップを利用した。また、3Dプリンターは積層してモデルを形成していくため、オーバーハングのあるモデルの印刷は不得意である。本研究においては、ハイドレート飽和率 $S_h=16\%$ を基準モデルとして扱った。

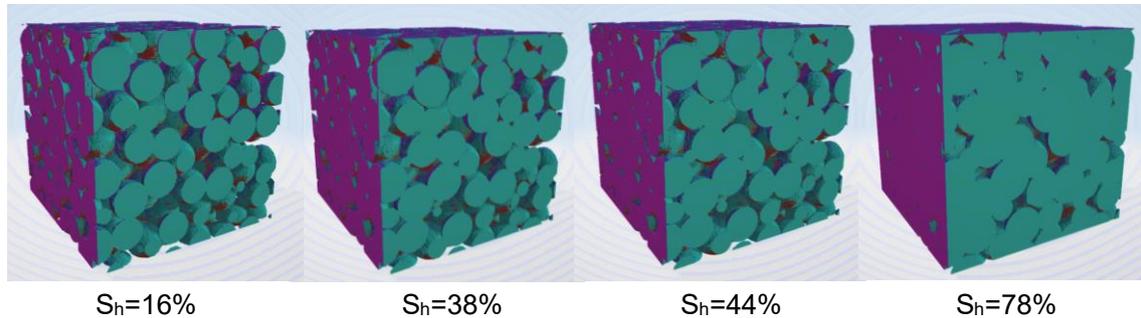


図4 異なるハイドレート飽和率の堆積土モデル

### 4. 研究成果

#### (1) 透水試験結果

得られた結果を図5に示す。プリントされた砂のみの透水係数は $k_{sand} = 5.3 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ 、ハイドレート含有砂の透水係数は $k_h = 2.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ であった。また、初期有効浸透率 $k_h/k_{sand}$ に対する相対浸透率の比は0.006であった。透水試験は、土の粒径と空隙率に依存することが知られている。Kozeny(1927)とCarman(1956)は、多孔質媒体の透水性を予測するために、 $k = (\gamma/\mu)(1/C_{K-C})(1/S^2)\rho[e^3/(1+e)]$ という半経験的、半理論的な式を確立した。この式は、浸透率が流体の単位重量、粘度、粒子の単位体積当たりの比表面積 $S_0$ 、空隙率 $e=n/(1-n)$ に依存することを示している( $n$ は空隙率)。 $C_{K-C}$ は定数。Kozeny-Carmanの式は、粒子を球体と仮定した場合、粒子径に応じて $k = 552D^2[e^3/(1+e)]$ (Carrier, 2003)と書き換えられる。したがって、透過係数は代表的な粒子径の二乗に比例する。本研究では粒子径を10倍に印刷しているため、得られた透水係数は実際の透水量の約100倍になると考えられる。ハイドレートの存在による透水性の低下は、多くの研究者によって調査されてきた。透水性はハイドレートの形態に依存し、 $k_h/k_{sand} = 0.1-0.001$ の範囲にある。本研究の結果、 $k_h/k_{sand} = 0.006$ がこれらの先行研究の幅の範囲にあることが確認された。

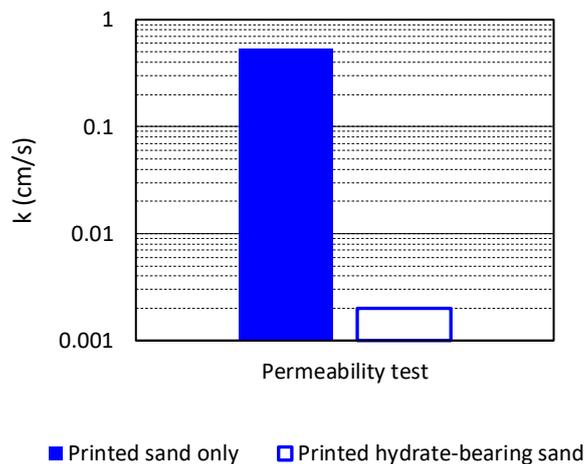


図5 透水試験結果

(2) 透水特性の相対的変化測定結果

異なるハイドレート飽和率を持つ3Dプリント供試体の透水試験結果を図6に示す。基準となる  $S_h=16\%$  から、ハイドレート飽和率の増加と共に相対浸透率が減少していることが確認できる。また、その減少の程度は数値計算の結果と良い相関関係にある。

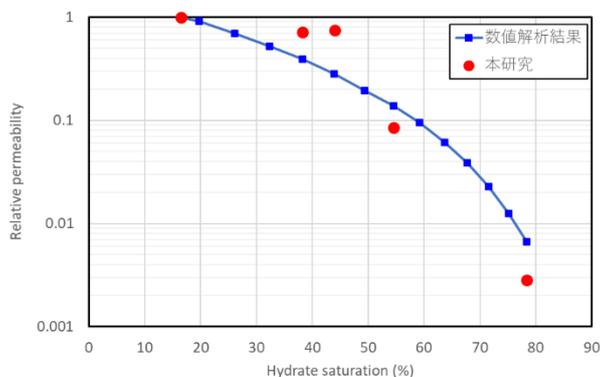


図6 相対浸透率変化（本研究結果と数値解析結果(Katagiri et al., 2017)）

本研究により、デジタルデータからアナログに再現した供試体の利用によって、透水特性の相対的変化を捉えられる新たな手法が示された。不攪乱試料の採取が難しい場面や、数値解析では計算コストが膨大な場合も、複製地盤サンプルを利用することで相対的な変化を捉えられる新たな研究アプローチの提案が期待される。

【参考文献】

- Yoneda, J, Jin, Y, Katagiri, J, and Tenma, N (2016). "Strengthening Mechanism of Cemented Hydrate - Bearing Sand at Microscales," *Geophysical Research Letters*, 43(14), 7442-7450
- Kozeny, J (1927). Ueber kapillare Leitung des Wassers im Boden, Wien, Akad. Wiss. 136(2a), 271-306.
- Katagiri, J, Konno, Y, Yoneda, J, and Tenma, N (2017). "Pore-Scale Modeling of Flow in Particles with Grain-Coating and Pore-Filling Hydrates: Verification of a Kozeny-Carman-Based Permeability Reduction Model," *J Nat Gas Sci Eng*, 45, 537-551.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Jun Yoneda	4. 巻 ISOPE-1-19
2. 論文標題 Application of 3D Printer for Laboratory Soil Tests	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 29th International Ocean and Polar Engineering	6. 最初と最後の頁 198, 1-6
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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Jun Yoneda
2. 発表標題 Application of 3D Printer for Laboratory Soil Tests
3. 学会等名 The 29th International Ocean Polar Engineering Conference（国際学会）
4. 発表年 2019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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------