

ハイドレートモホロジによる浸透率低下特性変化の数値解析的検討

産業技術総合研究所	正会員	○片桐	淳
産業技術総合研究所	非会員	今野	義浩
産業技術総合研究所	非会員	米田	純
産業技術総合研究所	非会員	天満	則夫

1. はじめに

メタンハイドレートを含む地層(MH層)の浸透性は、ハイドレート飽和率(S_h)と相対浸透率(K_r)の関係(以下、浸透率低下特性と呼ぶ)により特徴付けられる。MH貯留層の浸透率低下特性を把握することは、生産ガス量を精度良く予測する観点から極めて重要である。既往の研究によると、MH層の浸透率低下特性はGrain-coating(GC)、Pore-filling(PF)、Patchy(PA)などハイドレートのモホロジに依存すると考えられており¹⁾、特定のモホロジを対象とした浸透率低下モデルが提案されてきた。ところが、これらの浸透率低下モデルは、複数の仮定に基づいて定式化されたものであり、それら既存の浸透率低下モデルの現実のハイドレート胚胎砂への適用性は検証されていない。そこで、本研究では、個別要素法(DEM)を用いて球をパッキングし、その粒子配置を直接用いたCFD解析によって、浸透率低下特性を評価することとした。GC型、PF型およびPA型の単径球集合体の微視構造を用いた浸透流のCFD解析を行い、モホロジが浸透率低下特性に及ぼす影響の定量的な評価を試みた。

2. 微視的数値流体力学解析

DEMの粒子配置を用いたCFD解析の手順を図1に示す。なお、計算手順の詳細については引用文献を参照されたい²⁾。本研究では、DEMで間隙率0.478となる球のランダムパックを生成した。GC型のハイドレートは、パッキングした粒子の半径を一律の割合で拡大することにより表現した。PF型は、土粒子よりも小さいハイドレート粒子を間隙部分に発生させることにより表現した。PA型は、DEMの計算領域の中心部に、単一のハイドレート粒子を発生させ、その粒径を拡大させてゆく方法で表現した。

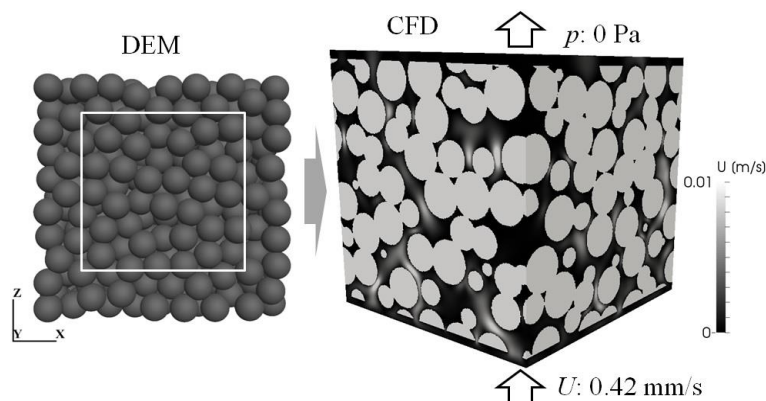


図1 DEMの粒子配置に基づくCFD解析の手順

DEMによって得られた3次元の粒子配置のうち、着目する矩形領域をある格子幅(5 μ m)で分割するとともに、その格子が粒子によって覆われているかを判定した。判定後に、 z 方向に、格子幅おきに x - y 平面を表す2値画像(3次元画像)を作製した。3次元的な粒子配置に対し、立方体状の領域を切り取り、この領域を5 μ mの解像度で2値化(粒子部/間隙部)して3次元画像を構成した。中野が開発したプログラム群を用いて3次元画像を3次元表面ソリッドモデルの一種であるstereo lithography (STL)モデルに変換した³⁾。

本研究では、フリーソフトウェアであるOpenFOAMを用いて、粒子群の間隙部へのメッシュ生成ならびにCFD解析を実施した。6つの境界面のうち、2つの面に流入流速一定(0.42mm/s)および圧力ゼロの条件を与えた。それ以外の4つの面はSlip条件を与え、粒子表面にはNo-Slip条件を与えた。非圧縮性流体ソルバーを用いて、定常のナビエーストックス方程式を数値解析した。浸透流によって流入面と流出面に圧力勾配が生じる。この圧力勾配を用い、ダルシーの法則に基づき、浸透率を求めた。浸透率低下特性は、ある浸透率をハイドレート飽和率ゼロの場合の浸透率で除して求めた。

キーワード ハイドレート, モホロジ, 浸透率低下, DEM, CFD

連絡先 〒305-8569 茨城県つくば市小野川16-1 産業技術総合研究所 創エネルギー研究部門 TEL 029-861-3539

3. 解析結果と考察

図 2には、CFD によって得られた浸透率低下特性を示す。図の凡例における「Exp.」とは室内実験結果のことを指し、Kumar et al. が CO_2 ハイドレートを胚胎したガラスビーズを用いて実施した実験結果⁴⁾ならびに坂本らが MH を胚胎した豊浦砂と 8 号珪砂を用いて実施した実験結果⁵⁾を示している。

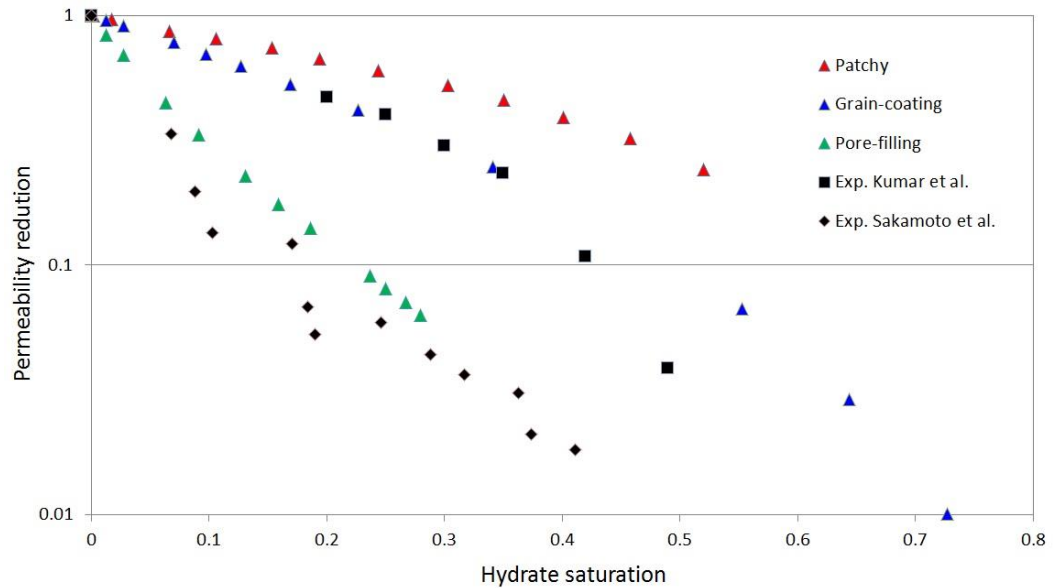


図 2 CFD 解析で得られた浸透率低下特性

図に示すように、PF,

GC, PA 型の順に浸透率低下が大きくなることわかる。なお、既存の浸透率低下モデルでも同様の傾向になるようである。PF 型は、 S_h の増加、即ち、ハイドレート粒子数が増加すると、流動の障害になる。こうして流路の形状が著しく変化してゆくために、大きな浸透率低下を示すと考えられる。一方、GC 型の場合、流路形状は大きく変わらずに流路の体積は減少してゆく。また、PA 型はハイドレートが成長する中心部分を除くと、全く流路の形状ならびに体積は変化しない。以上のことから、PF 型は、GC 型や PA 型よりも浸透率低下が大きくなったと考えられる。

GC 型の CFD 解析結果は、 $S_h < 0.35$ において、Kumar et al. の実験とほぼ一致するが、 $S_h > 0.35$ になると、両者の乖離が大きくなる。一方、坂本らの実験結果は、PF 型の CFD 解析とほぼ一致することがわかる。室内実験でハイドレート胚胎砂を生成する場合、まず、水とガスの不飽和状態にした後、温度や圧力を調節してハイドレートを生成させる。Kumar et al. と坂本らは、異なる方法で不飽和状態を作製したため、浸透率低下特性に違いが生じたものと推察している。

4. おわりに

DEM と CFD を用いた数値解析により、GC 型、PF 型および PA 型のハイドレート胚胎砂の浸透率低下特性を評価した。その結果、流路の形状を著しく変化させるため、PF は GC, PA よりも大きな浸透率低下を示すことを明らかにした。今後はハイドレート胚胎砂の X 線 CT 解析により、モホロジを可視化するとともに、CT 画像群を用いた CFD 解析を実施する予定である。

謝辞

本研究は、経済産業省「メタンハイドレート開発促進事業・生産手法開発に関する研究開発」の一部として実施されたものである。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) Kleinberg et al., J. Geophys. Res., 108, DOI:10.1029/2003JB002389.08, 2003.
- 2) Katagiri et al., Vadose Zone J., 14, DOI:10.2136/vzj2014.10.0138, 2015.
- 3) Nakano, T., GSJ Openfile Report, 448, 26p, 2006.
- 4) Kumar et al., J. Pet. Sci. Eng., 70, pp.114-122, 2010.
- 5) Sakamoto et al., J. MMIJ, 120, pp.85-90, 2004.