

微小スケール数値シミュレーションによるメタンハイドレート堆積層の浸透率解析

東京大学大学院新領域創性科学研究科環境システム学専攻

環境モデリング統合学分野研究室(指導教員 佐藤徹教授)

66757 杉田年男(2008年3月修了)

キーワード：メタンハイドレート，浸透率，格子ボルツマン法

1 背景と目的

メタンハイドレートとはメタン分子と水分子からなる氷状の結晶であり，自然界においても低温高压条件下である海底堆積層中や永久凍土中などに広く存在している．近年，その資源量が在来型天然ガスの埋蔵量を上回ることが確認されエネルギー資源として注目されている．メタンハイドレートの生産量を予測するためには，大規模な生産シミュレーションが行われる．生産シミュレーションにより生産量の予測を行うためには，浸透率を精度よく評価することが不可欠である．特に，メタンハイドレートの生産の際には地層内でハイドレートを分解しガス化させ回収するため，気液相対浸透率を評価することは重要である．また，ハイドレートに分解時に粒径の比較的小さな砂粒が液相中を流動し閉塞を起こす現象が確認されており固液二相流挙動も重要である．本研究ではこれらの浸透率特性を数値シミュレーションを用いて評価する．

2. CT 画像からの砂粒の三次元形状復元

画像処理技法を用いて，砂粒の三次元砂粒形状を CT 画像から復元した．今回，試料として用いたのは東海沖のハイドレート層から試削されたコアの CT 画像である．原画像はグレースケールビットマップであるが，これにノイズ除去を施し，二値化処理を行い白黒ビットマップに変換した．そして抽出する砂以外を削除した(図 1)．

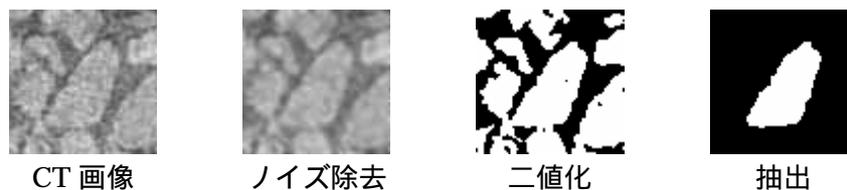


図 1. CT 画像からの砂粒断面輪郭の抽出

得られた砂粒の断面に対し境界線追跡を行い砂粒の断面の二次元輪郭を得た．この二次元輪郭を三次元上に配置し，B-スプライン曲面で近似を行った．これにより，砂粒の三次元輪郭が閉曲面として得られるが，後の処理で扱いやすいように，重心を原点とする三次元極座標上のデータに座標変換した．この操作を，CT 画像内の 32 個の砂粒に対し行い砂粒の三次元輪郭を得た(図 2)．

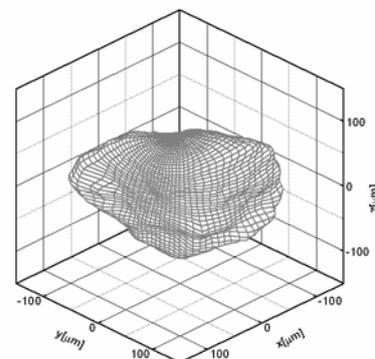


図 2 得られた砂粒形状の例

3. 砂粒の球面調和級数展開

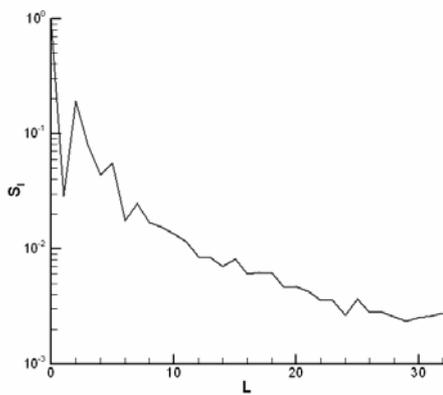


図 3 . 砂粒の球面調和スペクトルの例

CT 画像から得られた三次元砂粒形状を数値化する．本研究では球面調和級数展開法を用いたので，砂粒形状は球面調和関数の線形結合で表すことができる．これにより，砂粒は離散的なデータ点でなく，連続した閉曲面のデータとして扱うことができる．また粒子形状を量子数毎のスペクトルで評価した．また，量子数をカットオフすることにより砂粒を球で近似することができるのでこの球の直径を粒径とした．

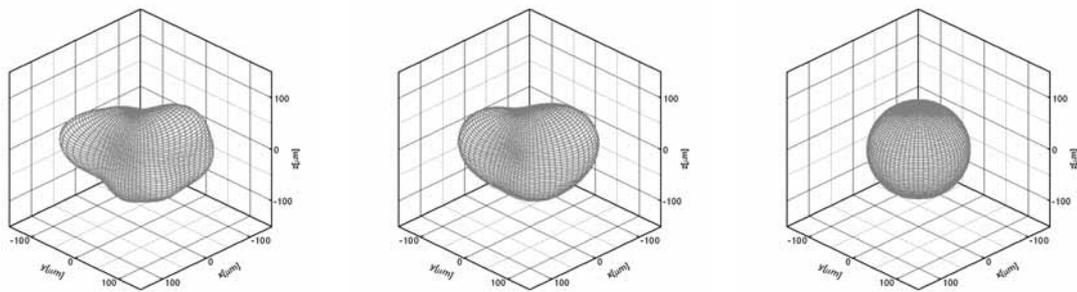


図 4. 波数のカットオフと粒径

4. 砂粒の充填

砂粒の充填を行った.本研究では十分広い砂層を再現するために全方向を周期境界とした立方体空間への充填を行った．粒径に関しては CT 画像をとったコアの粒径分布に従う乱数を棄却法により発生させ砂粒に割り当てた . 充填する砂粒は計算効率上 , 八個とし CT

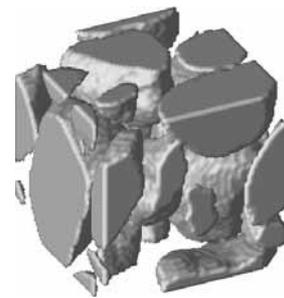


図 5 模擬砂層の例
率はシミュレーテッドアニーリング法により目的の孔隙率が得られるよう逆解析を行った .

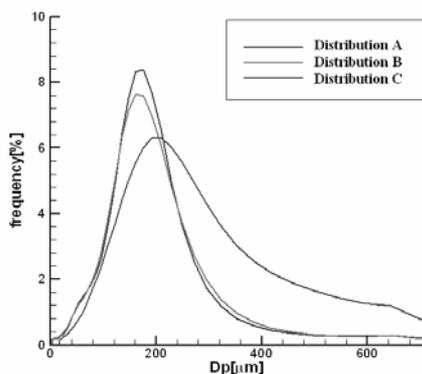


図 6 粒径分布

から得られた 32 個の砂粒の中からランダムに選択し成長法を用いて立方体空間への充填を行った . また , 孔隙格子を複数作成した .

5. 単相流計算

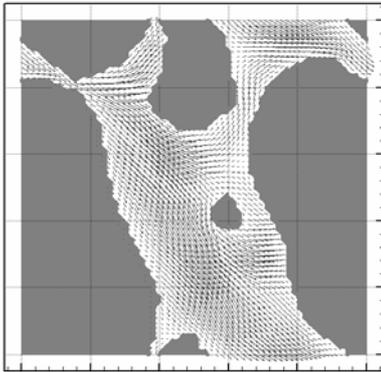


図7 格子断面の流場

作成した格子に対して、格子ボルツマン法を用いて以下の Navier-Stokes 方程式を解き絶対浸透率を測定した。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{dp}{\rho} \quad (1)$$

dp は強制圧力勾配であり、この値に対する定常状態での流速の応答を観測する。今回 dp を 10^3 とした。得られた結果は Cozeny-Karman の式(2)とよく一致した。

$$\nu = \frac{c \phi^3}{M^2} \quad (2)$$

は孔隙率 M は非表面積 c は Cozeny 係数で 0.2 である。また、平均粒径がほぼ同じ豊浦砂充填層の絶対浸透率ともオーダーの一致が見られた。しかし、CT 画像を取ったコアの実験での絶対浸透率測定結果とは 3 桁程度の差異があった。これは、CT をとったコアの中に浸透率の低い粘土などの層が含まれているためだと考えられる。

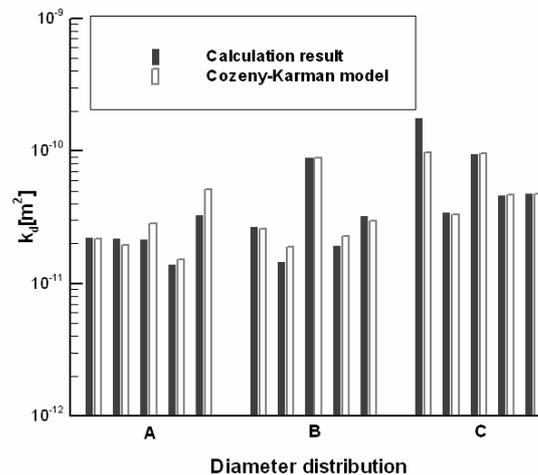


図8 絶対浸透率測定結果

6. 気液二相流計算

次に模擬砂層格子内での気液二相流計算を行い相対浸透率を算出した。気液二相流シミュレーション手法には二相系格子ボルツマンモデル[1]を用いた。気液の飽和率を変化させ浸透率の測定を行った。

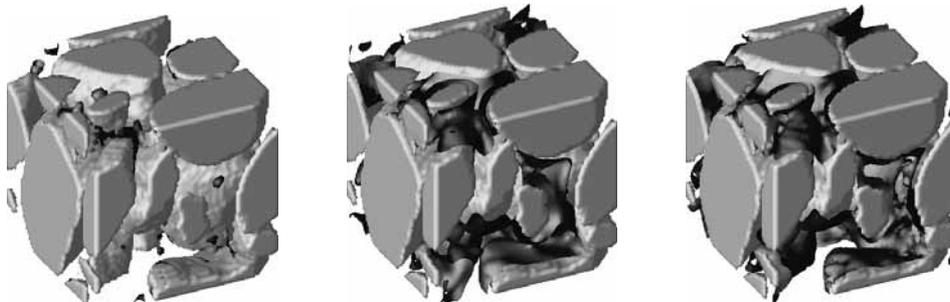


図9. 気液界面の分布(左: $S_w=30\%$, 中: $S_w=50\%$, 右: $S_w=70\%$)

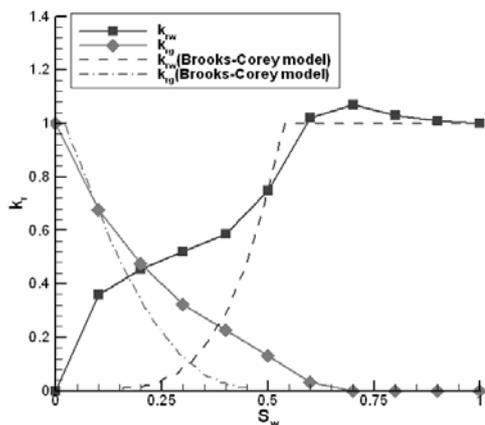


図 10 相対浸透率測定結果

得られた相対浸透率は図 10 のようなものであった。Brooks-Corey の相対浸透率モデルにフィッティングさせた結果、不動水飽和率%、残留ガス飽和率%という多孔質体内での気液二相流に関する物性値を得ることができた。また、不動水飽和率は接触角や粒径を大きく設定すると減少する傾向にあることが確認された。

7. 固液二相流計算

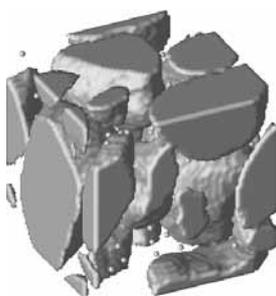


図 11 粒子の分布

粒径が $10\ \mu\text{m}$ と $20\ \mu\text{m}$ の小さな粒子が孔隙内を流れる際の数値シミュレーションを行い、固相濃度の違いによる浸透率の低下を計測した。濃度 1% ~ 3% の範囲で 10% ~ 30% 程度の浸透率低下を観測した。

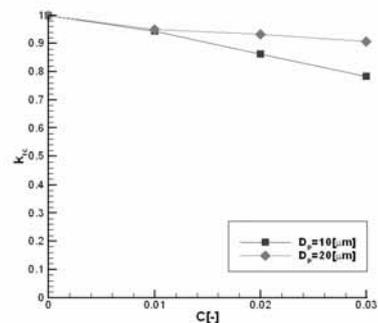


図 12 固相濃度と浸透率低下

8. まとめ

砂粒の形状解析では、ハイドレート堆積層中の 32 個の砂について、体積、表面積、粒径などを得ることができた。また、砂粒形状の球面調和級数展開を行い、砂粒輪郭の三次元的な形状記述を行うことができた。砂粒の充填を行い、それらの充填層に対する絶対浸透率を得た。ここで得られた絶対浸透率は Cozeny-Karman の式とよく一致した。また、ハイドレート堆積層を模擬した豊浦砂充填相の絶対浸透率ともよく一致する。しかし、天然のハイドレート堆積層に対する絶対浸透率では、3 桁程度の差異があった。これは天然の堆積層では粒径分布の異なった層が存在しており、絶対浸透率の低い層が混ざって絶対浸透率を計算値よりも低下させたためと考えられる。また、数値計算による相対浸透率の算出を行った。得られた相対浸透率を Brooks-Corey の相対浸透率モデルにフィッティングさせ、不動水飽和率%、残留ガス飽和率%を求めた。また、粒径 $10\ \mu\text{m}$ 、 $20\ \mu\text{m}$ 、濃度 1% ~ 3% の範囲砂層内での固液二相流計算を行い 10% ~ 30% 程度の浸透率低下を観測した。

参考文献

[1] Inamuro et al. A lattice boltzmann method for incompressible two-phase flows with large density ratio, J. Comput. Phys, 198(2004), 628-644