

# 論文の内容の要旨

論文題目 海底下貯留CO<sub>2</sub>の漏出を想定した固気液三相流動に関する数値的研究  
(Numerical Study on Gas-Liquid-Solid Three-phase Flow  
Assuming Seepage of CO<sub>2</sub> Stored under the Seabed)

氏 名 加野 友紀

## 1. 背景と目的

海底下 CO<sub>2</sub> 貯留は地球温暖化対策の有力候補である一方、CO<sub>2</sub> 漏洩・漏出に関する安全性評価を行うことが肝要である。海中に漏出する CO<sub>2</sub> の上昇・溶解挙動には漏出レートその他、気泡サイズが重要な決定因子となる。たとえば海底火山活動等で噴気する気泡径は水深によらず多くが数 mm から数十 mm の径を持つ。円管からの気泡形成を考えると、流量が小さい時、気泡径を決定するのはガス密度ではなく、管径である。したがって、未固結の海底堆積物中のガスみち形成が漏出気泡径を決める重要な因子であり、固結多孔質媒体によるガス侵入・気泡形成モデルでは現象を再現できない。未固結層におけるガスみち形成のメカニズムについては多くの室内実験やシミュレーションが行われているが、ガスみちの形成による流動の変化や気泡形成につながるメカニズムの解明は十分とはいえない。本研究では、未固結層中における固気液三相流動を再現し未固結層を通じた気泡形成に与える影響を明らかにするため、砂礫粒子と低粘性流体の固気液三相流動シミュレータを開発し、固結・未固結層におけるガス侵入と気泡形成挙動シミュレーション、および未固結層における気泡形成挙動に係る流量、間隙率、粒径のパラメタスタディを行った。

## 2. 固気液三相流動シミュレータ開発

固気液三相流動の数値計算を行うために、気液二相流系格子ボルツマン法 (LBM) と離散要素法 (DEM) の連成を行う。流体流動及び流体-固体粒子間の運動量授受を気液二相流系 LBM プログラムを用いて解析し、粒子の位置・速度情報を DEM プログラム [1] に受け渡し、固体粒子運動及び境界条件を解き粒子情報を更新して LBM プログラムに返す。模擬砂層の作成では成長法および沈降法を用いた砂のパッキングを行い、層の間隙率を算出する。

### 2.1 移動固体境界を伴う二相流 LBM

二相流 LBM では式(1)のように、二つの粒子分布関数  $f$ ,  $g$  により気液界面インデックス  $\phi$  と流速  $\mathbf{u}$  を解く。また格子点間距離比  $\Delta[0:1]$  に位置する移動速度  $V_p$ 、固気液界面において、接触角  $\theta$  を持つ壁の境界条件を式(2)で解く。また流体から固体へ受け渡される運動量  $\mathbf{P}$  および角運動量  $\mathbf{L}$  は式(3)で表される。

$$f_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i \Delta x, t + \Delta t) = f_i(\mathbf{x}, t) - \frac{1}{\tau_f} [f_i(\mathbf{x}, t) - f_i^c(\mathbf{x}, t)], \quad \phi = \sum_i f_i \quad (1)$$

$$g_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i \Delta x, t + \Delta t) = g_i(\mathbf{x}, t) - \frac{1}{\tau_g} [g_i(\mathbf{x}, t) - g_i^c(\mathbf{x}, t)] + 3\omega_i \left\{ \frac{1}{\rho} \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{u} + \mathbf{u} \nabla)] - (1 - \rho_0/\rho) \mathbf{G} \right\} \cdot \mathbf{c}_i, \quad (2)$$

$$\mathbf{u} = \sum_i g_i \cdot \mathbf{c}_i$$

$$f_r(\mathbf{x}, t + \Delta t) = \begin{cases} 2\Delta f_i^c(\mathbf{x}, t) + (1 - 2\Delta) f_i^c(\mathbf{x} - \mathbf{c}_i \Delta t, t) - 2\Omega_i \Delta \mathbf{c}_i V_p & \Delta < 1/2 \\ \frac{1}{2\Delta} f_i^c(\mathbf{x}, t) + \frac{2\Delta - 1}{2\Delta} f_r^c(\mathbf{x}, t) - \frac{1}{\Delta} \Omega_i \mathbf{c}_i V_p & \Delta \geq 1/2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\mathbf{P} = \sum \rho (g_i^c + g_r) \mathbf{c}_i, \quad \mathbf{L} = \mathbf{x}_i \times \mathbf{P} \quad (4)$$

$f^c$  および  $g^c$  は平衡関数であり， $\omega$  および  $\Omega$  は LBM における方向重み付け係数， $\mathbf{c}$  は単位粒子速度ベクトルであり LBM の格子点構造によって与えられる．本研究では D3Q15 モデルを使用した． $\tau$  は緩和時間， $\rho_0$  は基準密度， $\rho$  は流体密度， $\mu$  は粘性係数， $\mathbf{G}$  は重力加速度ベクトルである．

## 2.2 DEM による固体間相互作用

固体粒子 - 固体粒子の相互作用・運動は，DEM プログラムである ESyS-Particle [5] を用いて計算した．固体粒子を球形要素でモデル化し，要素の運動を逐次追跡して解析する．質量  $m$  および慣性モーメント  $I$  を持ち減衰定数  $C$ ， $D$ ，合力  $\mathbf{F}$ ，トルク  $\mathbf{N}$  が働く球形要素の運動方程式は式(5)および式(6)で表される．また粒子間の相互作用に関し，粒子  $i$  と粒子  $j$  の衝突によって加わる弾性力  $\mathbf{F}_{ij}$  および摩擦力  $\mathbf{F}_{ij}^D$  は，粒子の重なり距離  $\delta_{ij}$  を用いて式(6)および式(7)のように表される．

$$m_i \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{x}_i + C_i \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{x}_i + \mathbf{F}_i = 0 \quad (5)$$

$$I_i \frac{\partial^2}{\partial t^2} \boldsymbol{\theta}_i + D_i \frac{\partial}{\partial t} \boldsymbol{\theta}_i + \mathbf{N}_i = 0 \quad (6)$$

$$\mathbf{F}_{ij} = k_{ij} \delta_{ij} \mathbf{e}_{ij} \quad (7)$$

$$\mathbf{F}_{ij}^D = -\mu_D F_{ij}^n \mathbf{e}_{ij}^T \quad (8)$$

ここで， $k_{ij}$  はバネ定数， $\mathbf{e}_{ij}$  は接触方向の単位速度ベクトルである．また  $\mu_D$  は摩擦係数， $F_{ij}^n$  は法線方向の力の大きさ， $\mathbf{e}_{ij}^T$  は接線方向の単位速度ベクトルである．

## 2.3 物理モデル検証と領域・層厚依存

単相一様流中の球にかかる抗力モデル，単一気泡上昇モデル，円筒における毛管圧モデルといった固気液三相流動における基礎的な物理現象の再現を行い，シミュレータの検証を行った．シミュレーションでは水深 200 m の海底堆積物表面（2 MPa，10℃）を想定した水・CO<sub>2</sub> の物性を用いた．Table 1 にそれらの物性を示す．結果，本研究で開発したシミュレータが固気液三相における基礎的な物理現象をよく再現することが示された（Fig.1）．また，計算領域や設定した砂層の厚さに関し，シミュレーション結果の依存性を検討し，その妥当性と計算コストを考慮し計算モデルを決定した．

Table 1 シミュレーションに用いた物性値

物性	
液相密度 $\rho_L$ (kg/m <sup>3</sup> )	$1.00 \times 10^3$
気相密度 $\rho_G$ (kg/m <sup>3</sup> )	$4.30 \times 10^1$
液相粘性 $\mu_L$ (Pa-s)	$1.00 \times 10^{-3}$
気相粘性 $\mu_G$ (Pa-s)	$1.00 \times 10^{-5}$
界面張力係数 $\sigma_{LG}$ (N/m)	$7.28 \times 10^{-2}$
接触角 $\theta$ (°)	26.0
粒子層間隙率	0.35, 0.43

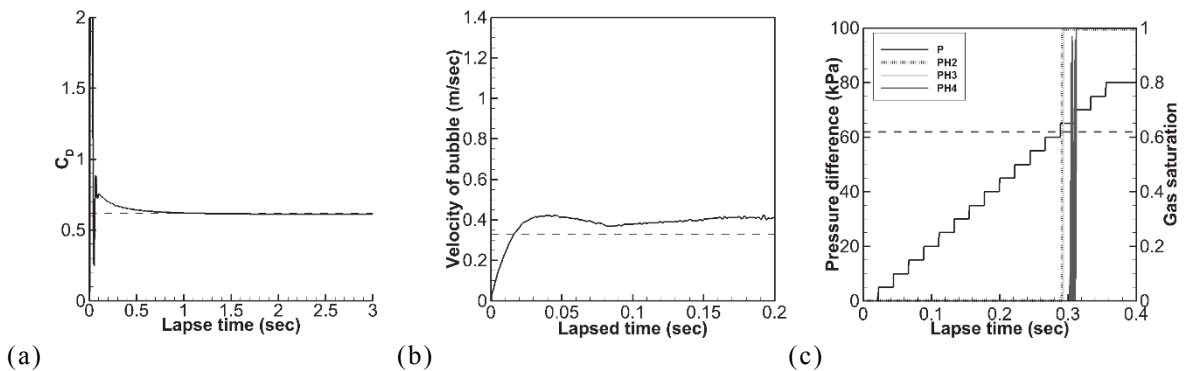


Fig. 1 (a)単一球の抗力，(b)静止水中の単一気泡上昇速度，および(c)円筒における毛管圧に関するモデル検証の結果．破線で示される理論・経験式値とよく整合が取れている．

### 3. 気泡形成に係る固気液三相流動シミュレーション

#### 3.1 固結層と未固結層におけるガス侵入と気泡形成挙動の差異

第2章で構築した固気液三相流動シミュレータを用いて、初期粒子充填を同条件とした固結層および未固結層における気泡形成シミュレーションを行い、その挙動の差異から粒子未固結による固気液三相流動が気泡形成に与える影響を明らかにした。シミュレーションでは Table 1 の各物性および粒径 2 mm で間隙率 0.35 と 0.43 の層を用いた。Fig.2 に間隙率 0.35 の固結層と未固結層におけるガス侵入の違い、および層表面到達時に形成される気泡径の違いを示す。Fig.3 は間隙率 0.43 の未固結層で  $2.67 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{s}$  の流量により形成されたガスみち断面と気泡形成の様子である。同じ粒径・間隙率を有する層でも固結層では毛管圧を超えない限りガスの侵入が進まず、毛管圧を超えた場合は間隙孔から小さなばらつきが少ない気泡を形成する。一方、未固結層では毛管圧より低い圧力で粒子の再配置が起こり、時には粒径よりも大きなガスみちを形成してガスの侵入が進み、形成される気泡も大きくなる傾向にあると同時にばらつきが生じた。

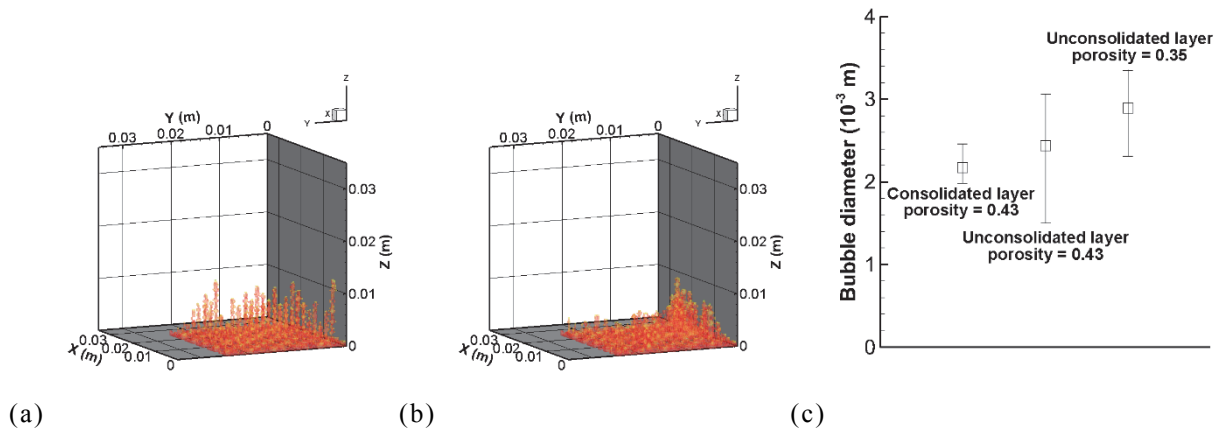


Fig. 2 (a)固結層と (b)未固結層におけるガス侵入の様子および(c)各層で形成される気泡径分布の差。

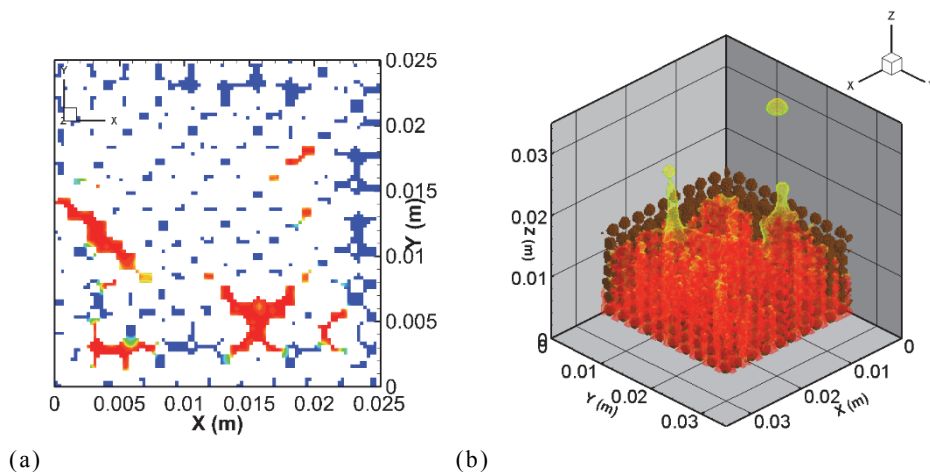


Fig. 3 未固結層において形成される(a) ガスみち断面（白：固相，青：液相，赤：気相）および(b) 気泡（茶：固相粒子，赤～黄：気相）。

#### 3.2 未固結層における気泡形成に係るパラメタスタディと気泡形成メカニズムの考察

流量・間隙率・粒径に関しパラメタスタディを行い、気泡形成挙動に与える影響を明らかにすると共に、未固結層における気泡形成のメカニズムを考察した。Fig.4 に各パラメタが形成されるガスみちサイズに与える影響を示す。海底下貯留  $\text{CO}_2$  の漏出を想定した領域ではガスみちの大きさは単位面積あたりの流量の大きさによらず、間隙率や粒径の影響が大きいことが分かった。シミュレーション結果と円管からの気泡生成理論および河田 (2013) による室内実験[2]との比較を Fig.5 に示す。ガスみちからの気泡形成挙動は大枠として準定常状態の円管理論に準ずることが認められた。理論値に対して全体的に気泡径が小さい傾向にあるのは、Fig.3 に示されるように未固結層において形成されるガスみちはスリット状のもの

も多く、それが生じる気泡径に影響を与えているものと考えられる。また室内実験[6]との比較から、粒径が均一でなく分布を有する場合ガスみちの形成挙動に影響を与えることが示唆された。

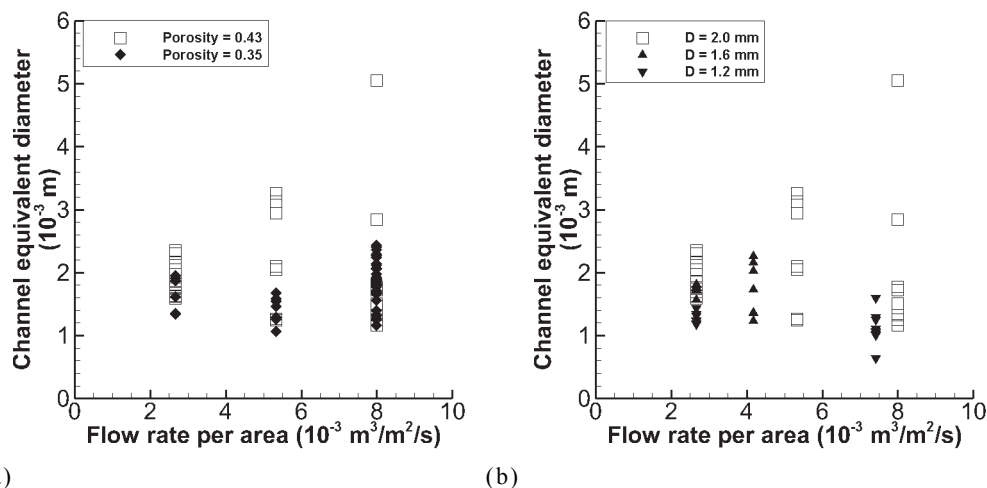


Fig. 4 流量ガスみち等価径の単位面積あたり流量と(a)間隙率および(b)粒径に対する依存性。

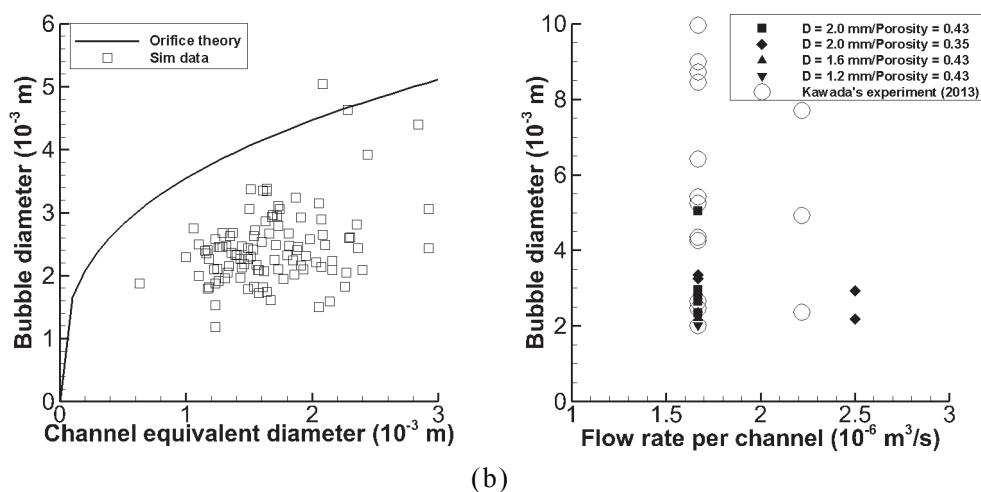


Fig. 5 シミュレーション結果と(a)円管理論におけるガスみち径と気泡径の相関、および (b)河田の室内実験[2]におけるガスみちあたり流量と気泡径の相関との比較。

#### 4. 結論

本研究では地球温暖化対策技術として重要視される海底下  $\text{CO}_2$  貯留における漏出を想定して、その安全性評価に係る気泡形成挙動の重要性に着目した。未固結海底堆積物中の砂礫粒子 - 水 -  $\text{CO}_2$  の固気液三相流動の再現と気泡形成に与える影響を明らかにすることを目的とし、固気液三相流動シミュレータを開発し、固結・未固結層におけるガス侵入と気泡形成挙動シミュレーション、および未固結層における気泡形成挙動に係るパラメスタディを行った。その結果、未固結層における気泡形成挙動は、ガスみち形成に伴うため固結多孔質媒体におけるものとは大きく異なり、また間隙率・粒径といったパラメタが挙動に影響を与えることが示された。特に海底下  $\text{CO}_2$  貯留の漏出において想定される流量オーダーにおいては、これらの影響が顕著に現れることも示唆された。今回は主にガスみちと気泡のサイズに着目して解析を行い円管理論と比較したが、今後の課題としてはガスみち断面の形状が与える影響についての検討や、円管理論とはレジームの異なる粒径やガス漏出レートにおける挙動の解析が求められる。

#### 参考文献

- [1] Centre for Geoscience Computing at The University of Queensland, ESys-Particle in Launchpad, <<https://launchpad.net/esys-particle/>> (accessed June 01, 2016).
- [2] 河田 諒, 砂状堆積物から漏出する気泡サイズ決定メカニズムに関する研究, H24 年度東京大学卒業論文, 2013.