

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656524

研究課題名(和文)海底漏出気泡サイズの数式モデル開発

研究課題名(英文)Development of mathematical model of the size of bubbles seeping from seabed

研究代表者

佐藤 徹(Sato, Toru)

東京大学・新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：30282677

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：海底でCCSを行うにあたり、圧入したCO₂の漏えいによる周辺生物への影響が心配されている。気泡サイズは海中の気泡上昇速度や気体の海水への溶解速度に大きく関わるため、海水への環境影響にとって重要なパラメータとなる。そこで様々な砂を底部に詰めた縦長の水槽を用い、底部から気体を注入して、堆積物上層から水中に漏出する際の気泡サイズを計測した。また気固液三層流の数値計算法には格子ボルツマン法を用い、流体が粒子に与える力を計算して運動方程式を直接解き、さらに粒子同士の衝突を扱うことのできるアルゴリズムを開発した。

研究成果の概要(英文)：sub-seabed storage has the risk of seepage due to the accidental failure of pipeline infrastructure or large diastrophism like a big earthquake. CO₂ bubble size is an important parameter to estimate its environmental impact, because it affects the rise velocity of the bubbles and the dissolution rate of CO₂ into seawater. Using the water tank, in which various sand is packed with water, air was poured in from the bottom and, then, the bubble size was measured when they seeped out from the sediment surface.

Moreover, a numerical simulation code was developed adopting the lattice Boltzmann method to analyze gas-water-sand three-phase flow. In the model, an equation of motion of each sand grain was solved directly, considering the collision of particles each other.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：CO₂海域地中貯留 CO₂漏洩の環境影響 海底堆積層 気泡径 砂粒子径 気固液三相流 水槽実験 格子ボルツマン法

1. 研究開始当初の背景

二酸化炭素の海域地中貯留やメタンハイドレートからのガス生産などの技術が開発されつつある。これらを含め、海洋を利用した大規模技術の実施に当たっては、環境影響評価が必須となっている。環境影響評価では、海洋に漏出した気泡状となった気体の挙動と溶解、海水に溶解した気体の移流拡散の数値モデル解析¹⁾が重要となる。このような解析では、気泡サイズは入力値であり、これが解析結果に大きく影響を及ぼすことが知られている²⁾。しかし現時点で、実際の海中での観測以外、これを正しく決定することはできないが、実際に海域での漏洩実験はコストや社会的受容性の観点から簡単ではない。すると海域で対象気体の海底漏出気泡サイズを測る手段は自然漏洩海域での観測となるが、実際の貯留(採掘)サイトの堆積物と同じである可能性はまれである。

2. 研究の目的

気体が海底堆積物から海水中に漏出する際の気泡サイズは、海底堆積物の性状や海水の性状によって変化する。そこで物理場を決定するパラメータを振って、さまざまなマイクロスケールのガラスビーズや実際の砂粒子を縦長さ 2m 程度の水槽の底に敷きつめ、その下のチャンバーに気体を注入し、砂層表面から水中に漏出する気泡系を画像処理³⁾によって計測する。

またマイクロスケールの気固液三相流格子ボルツマン法を用いて、気固液界面での接触角を考慮した、砂層あるいはガラスビーズ層から漏出する気泡径を解析する数値解析法を開発し、シミュレーションを行う。上記実験により数値計算結果を検証する。

3. 研究の方法

3.1 実験手法

(1) 実験装置

実験には外径 10cm×10cm、内径 9cm×9cm で高さ 138cm の水槽を用いた。図 1 に示すように、まず水槽内に砂をいれ上から水を注ぐ。そして水槽の下部から乾燥させた空気を圧入し、砂表面から出てくる気泡を CCD カメラで撮影した。カメラのピントは水槽の中心に合わせたが、それによる気泡サイズの誤差は±7.8%ほどであった。気泡は各ケースについて 50~300 個の気泡について計測をし、流量は 100, 200, 300, 400, 500ml/min の 5 段階で実験をした。砂は全て 1.0kg ずつ用意し砂の高さを 8.1(±0.5)cm、砂表面からの水の高さを 92(±0.5)cm とした。

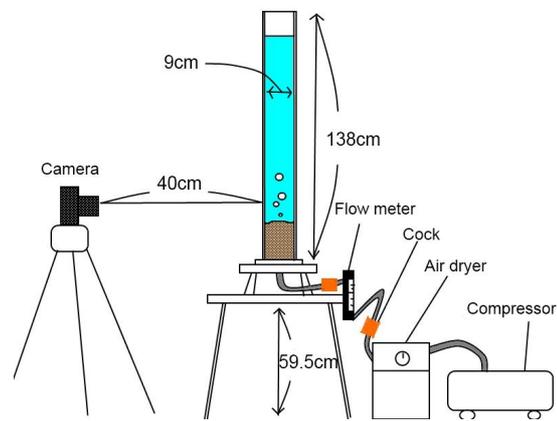


図 1 実験装置の概要

(2) 使用する砂の種類と物性値

実験には細砂(粒径 ~ 3000 μ m)、珪砂(粒径 75 ~ 1200 μ m)、豊浦砂(粒径 ~ 300 μ m)、苫小牧の海底砂の 4 種類を用意し、さらにふるいを用いて粒径分布の異なるいくつかの試料に分けた(Table 1)。さらに苫小牧の海底砂を精細にふるい分けしたところ 0 ~ 4750 μ m 程度の幅広い粒度分布を持つことがわかった。

表 1 砂の性状

名称	径サイズ (μ m)	孔隙率	密度 (g/cm^3)
1 細砂(小)	~ 600	0.3393	2.4207
2 細砂(中)	600 ~ 1180	0.2695	2.4691
3 細砂(大)	1180 ~ 2000	0.3373	2.5195
4 珪砂(小)	~ 600	0.3418	2.5195
5 珪砂(大)	600 ~ 1200	0.3241	2.3741
6 珪砂(大)	600 ~ 1200	0.4092	2.5195
7 豊浦砂(小)	~ 250	0.3186	2.5720
8 苫小牧砂	~ 4750	0.2797	2.3742

(3) 気泡サイズの計測法

粒子画像解析ソフトを用いて写真から気泡の最大径 $2 \times a$ と最少径 $2 \times b$ を求め気泡を回転楕円体と見なして体積 V の計算を行う。

$$V = \frac{4}{3} \pi a b^2 \quad (1)$$

またこれにより求めた体積を球体の体積と仮定したときの球の直径 D は以下である。

$$D = 2 \times \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}} \quad (2)$$

以後 V と D を大きさを評価する基準とする。

3.2 計算手法

(1) 気液二相流格子ボルツマン法

海底堆積物中をガスが上昇すると、未固結の砂粒子を押し上げガス道形成する。この現象を解くために、気固液三相シミュレータを開発する。シミュレータには全領域を立方体格子に分割した上で、各格子点において速

度分布関数方程式を解く格子ボルツマン法 (LBM) を用いる。

(2) 固体粒子にかかる力

気液二相流では粒子の表面は移動壁として扱われる。単相流中における移動壁の境界条件を二相流に展開すると、流体ノードから方向 i にある移動壁との距離比を用いて表わすことができる。

(3) 固体粒子の衝突

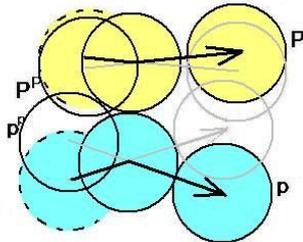


図 2 粒子の衝突モデル

気固液三層流のシミュレーションを行う際、粒子同士の衝突および粒子と壁面の衝突が起きる。粒子同士および粒子と壁面の衝突の過程としては、運動方程式による粒子の移動と位置の記憶、衝突の有無の判定、一番目に衝突するものの選定、衝突後の位置への移動 (図 2) といった手順で、1 タイムステップ内に複数粒子と衝突することも扱えるアルゴリズムを開発した。

4. 研究成果

4.1 実験結果と考察

(1) 気泡径分布

図 3 に砂層から放出された気泡の径の計測値のヒストグラムの典型例として、細砂 (大) のものを示す。さらに計測した気泡の体積の中央値を以下に示す。流量分けをした珪砂 (小) (大) は煩雑となるため別のグラフに載せている (図 4)。このグラフから砂の粒径の小さい豊浦砂や細砂 (小) を使用したときは大きい気泡が多くなり、逆に細砂 (大) や苦小牧の砂など粒径が大きい砂で比較的小さい気泡が出ていることがわかる。

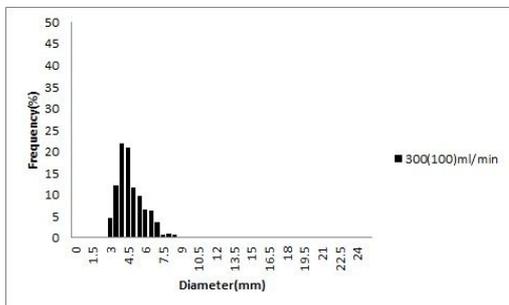
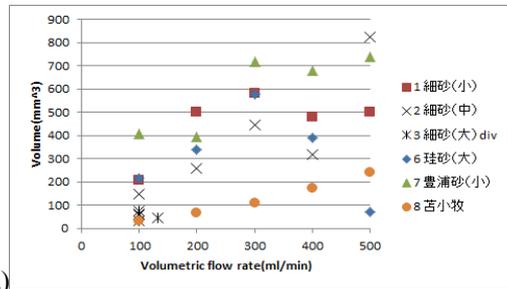
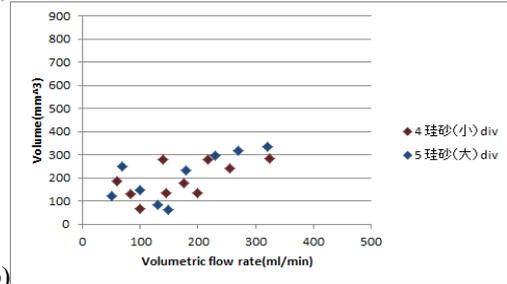


図 3 細砂 (大) の場合の気泡径分布 (流量 100 ml/min)



(a)



(b)

図 4 流量に対する気泡体積の中央値

(2) 気泡形成メカニズムの推定

前章の結果から、砂の種類が同じであってもふるい分けをすることでまったく別の気泡サイズの分布をとることが示された。砂の粒径が小さい場合、気泡は大きいものから小さいものまで広く分布しつつ、平均値や中央値は大きくなる傾向があるが、砂の粒径が大きい場合は比較的小さい気泡が大半を占め、平均値や中央値は小さくなる傾向にあった。

結果として出てきた気泡の大きさではなく、気泡が放出される際の砂が動く過程を観察すると大きく 3 つのタイプに分けられる。



図 5 豊浦砂からの気泡放出の様子

単独放出型

比較的粒径の小さい砂で多く観察された。下から圧入される気体が砂の表面近くで空気の層を形成し、ある程度大きくなった後に勢いよく放出されるタイプである。空気が集まり膨らんだ砂中の空気層は表面の砂を持ち上げ、放出される直前の砂表面はアーチのように曲がる。粒径の大きい砂では隙間が多く、このような砂の空気層ができづらいものと推察される。空気層がどこまで成長するかによって放出される気泡の大きさに違いが出ると考えられ、放出の間隔も空気層の形成に左右されるためまばらなことが多い。持ち上がった砂の塊と、動かない砂の塊の接触部分から気泡が吹き出すパターンも確認されている(図5)。

断続放出型

粒径が中程度(600 μm ~1200 μm 近く)の砂で多く観察された。単独放出型ほどではないものの、気泡放出の際に小規模の砂表面の膨らみが見える。放出の間隔は一定ではないが、連続で放出された後に一度止まり、同じ場所(もしくは違う場所)から放出が再開するという特徴がある。単独放出型よりも長い時間継続して放出されるため表面の砂を何度も巻き上げる。また、断続放出型に分類される砂は流量が増えるにつれて複数箇所から放出されるパターンが多かった(図6)。断続放出型の気泡放出パターンを推測すると以下ようになる。小規模の気泡が砂を押し分けており、放出後砂が再び覆いかぶさるため放出ペースが断続的になりやすいものと考えられる。



図6 苦小牧砂からの気泡放出の様子

連続放出型

粒径が大きい細砂(大)で観察された。吹き出し口近くが気泡によって大きく膨らむ

ことはほぼなく、表面近くの砂粒が少しずつ動くのみである。動いている砂は気泡により上部に押し上げられたり、空いた隙間に滑り込んだりしながらも大きな移動はしない。吹き出し口の近くは短い管のような空気の通り道ができ、そこから安定した空気の輸送がなされる。複数箇所から気泡が出る場合がほとんどで、その場合はどの吹き出し口もほぼ同じような気泡分布となる。気泡は連続して放出される傾向があり、表面での砂の巻き上げはほとんど無い。放出される気泡の大きさは他と比較して小さい(図7)。



図7 細砂(大)からの気泡放出の様子

以上の3種の放出パターンを実験に使用した砂に当てはめ、砂の粒径ごとに並べ替えたものが以下である(表2)。3つの放出タイプの中で最も適当と思われるもの1つを「 \square 」で表し、場合によって見られるケースがあるものを「 \triangle 」、今回の実験では観測されなかった状態を「 \times 」で表している。

粒径の小さい豊浦砂(小)、細砂(小)は単独放出型に分類される。逆に粒径の比較的大きい細砂(大)は連続放出型の挙動のみとなる。珪砂(小)(大)と細砂(中)は単独放出型と連続放出型の間とも言えるが、細砂(中)は流量により3パターンすべての挙動が観察された。しかし細砂(中)で連続放出型が見られることは稀で、多くの場合断続放出型が観察される。苦小牧の砂は含んでいる砂の粒径分布が幅広いものの、流量が低い時は連続放出型の挙動に近く、分裂せずに300ml/min以上の高い流量を与えた時は断続放出型としての振る舞いを見せた。

単独放出型に分類される豊浦砂(小)、細砂(小)が気泡サイズで第一位と第二位となっている。逆に粒径の大きい細砂(大)は気泡のサ

イズは小さいものが大半を占めた。単独放出型は気泡放出の過程からわかるように、砂中である程度大きな気泡の塊ができていたため放出される気泡は他のタイプと比較して大きい。連続放出型は表面の砂を動かす程度でほぼ連続的に放出され続けるため、ひとつひとつの気泡は小さいが気泡の数が多くなる。気泡サイズのばらつきは小さかった。

表2 各砂からの気泡放出の分類

	粒径 (μm)	連続放出型	断続放出型	単独放出型
苦小牧 1kg	~ 4750	△	△	×
細砂(大) 1kg	1180 ~ 2000	○	×	×
細砂(中) 1kg	600 ~ 1180	△	○	△
珪砂(大) 1kg	600 ~ 1200	×	○	×
珪砂(小) 1kg	~ 600	×	○	×
細砂(小) 1kg	~ 600	×	△	○
豊浦砂 1kg	~ 250	×	△	○

4.2 計算結果と考察

図8はシミュレータで表3に示される単相一様流中の球にかかる抗力の再現を確認したものである。Re < 10の領域では $C_D = 24/Re$ の関係が成り立つ。Table 4のパラメータでは Re = 0.3であり、 $C_D = 80$ となる。シミュレーションの結果では定常状態に達した時の C_D は約150となっており、概ねの再現が確認できた。

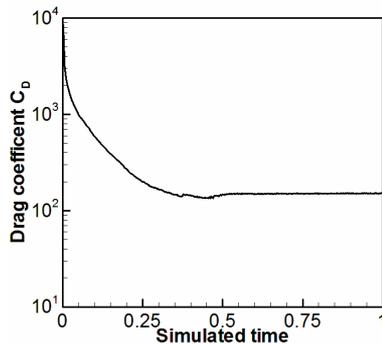


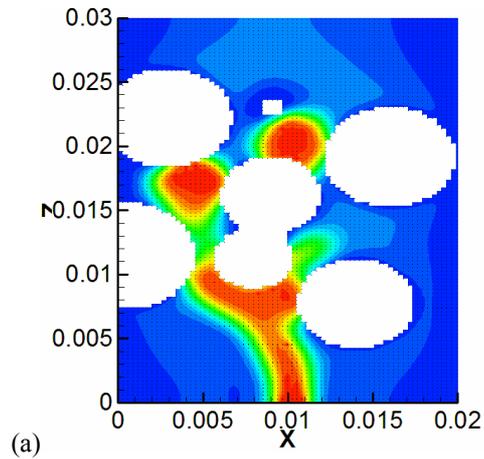
図8 球の抵抗係数

三相流 LBM では固相の移動により新たな流体セルが生じた時、そこに式における前ステップの流体情報が欠落している。このため、本手法では新たに生じたセルの流体情報を周囲の流体セルから単純平均で補間して与

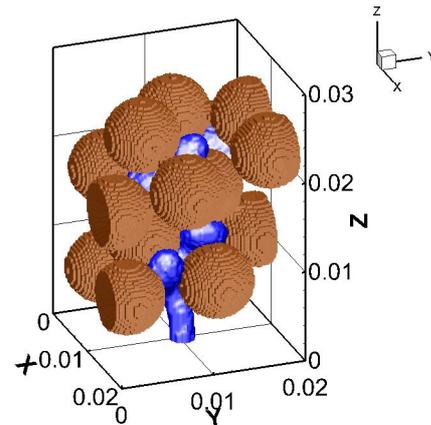
えている。図9は、液相で満たされた砂層中を、気相が砂粒子を押し退けながら上昇しつつ、分断されて気泡が発生しているシミュレーション結果を示している。

表3 シミュレーションパラメータ

パラメータ	
密度 ρ (kg/m ³)	1000
粘性係数 μ (Pa-s)	1.0×10^{-3}
流速 U (m/s)	1.0×10^{-4}
球径 d (m)	3.0×10^{-3}



(a)



(b)

図9 液相で満たされた砂層中を気相が上昇するシミュレーション結果

(a)鉛直断面、(b)鳥瞰図

4.3 結論

底面 9cm×9cm、高さ 138cm の縦長水槽を用いて砂堆積物から漏出する気泡サイズの計測を、砂の種類、砂の粒径、気体の流量などを変えて行ってきた。そして砂の粒径と生成される気泡サイズにはある程度関係があり、粒径の小さい砂ほど大きい気泡を放出する頻度が高く、粒径の大きい砂を用いた時よりも気泡分布の中央値、平均値で上回っていることがわかった。また気泡の放出タイプを

3タイプに分けそれぞれに放出される気泡の大きさに傾向があることの予測も打ち立てた。そして流量を大きくすると気泡径は大きくなる傾向があるが、単調な増加ではないことがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 7 件)

Chiaki Mori, Toru Sato, Yuki Kano, Dmitry Aleynik : Numerical simulation of the diffusion of CO2 purposefully seeping from seabed in a small bay . American Geophysical Union 2013 fall Meeting, 2013年12月9日~12月13日、San Francisco, USA

森 千晶、佐藤 徹、加野友紀、ALEINIK, Demity : 半閉鎖湾内の CO2 拡散に関するマルチスケール数値モデリング . 第18回動力・エネルギー技術シンポジウム、2013年6月20日、千葉大学西千葉キャンパスけやき会館

佐藤 徹 : 砂状堆積物から漏出する気泡サイズに関する研究 . 船舶海洋工学会海洋環境研究会、2013年4月3日、大阪大学U2棟2階会議室

佐藤 徹、森 千晶 : CCS の環境影響評価法の現状 . 平成24年度資源素材学会春季講演会(招待講演) 2013年3月28日~3月29日、千葉工業大学津田沼キャンパス6号館

佐藤 徹 : CO2 海域貯留技術の環境影響評価について . 第16回海洋深層水利用学会全国大会(招待講演) 2012年11月8日~11月9日、東京都大島町開発総合センター2F大集会室

Honoka Torii, Yuki Kano, Ayako Fukumoto, Toru Sato : Lattice Boltzmann simulation of gas-water two-phase interface and estimation of relative permeability in spherical grain sediment . 11th Int. Conf. on Gas in Marine Sediments, 2012年9月4日~9月7日、Nice, France

佐藤 徹 : 海洋開発と混相流 . 第31回混相流シンポジウム(招待講演) 2012年8月8日~8月9日、東京大学柏キャンパス環境棟FSホール

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 徹 (SATO, Toru)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号 : 30282677