

平成 27 年 2 月 修士論文要旨

(東京大学大学院 新領域創成科学研究科 海洋技術環境学専攻)

砂泥互層界面における泥層浸食に関する実験的研究

Experimental study on mud-layer erosion at sand-mud alternation interface

学籍番号 47-136635 安部 俊吾

指導教員 佐藤 徹 教授

(平成 27 年 2 月 2 日発表予定)

Keywords: メタンハイドレート, 砂泥互層, 浸食, 通水実験

Keywords: Methane hydrate, Sand-mud alternation, Erosion, Flow experiment

1. 序論

海底メタンハイドレートは、次世代の国産エネルギー資源として注目されている。2013 年、日本の東部南海トラフ海域において、第 1 回海洋産出試験が実施され、世界で始めて海底メタンハイドレートの生産に成功した。生産手法は、減圧法が用いられた。減圧法とは、坑内に存在する海水をポンプで引き上げる事で坑井周辺のハイドレート胚胎層の圧力を下げ、ハイドレートの平衡温度を低下させる事により、周辺地層や間隙流体の持つ顕熱を利用し分解させる手法である。ここで、石油・天然ガスは、井戸を掘削した後、堆積物中と大気圧下との圧力差により坑井より自噴する。その際、対策を施さない場合、油やガスと共に坑井周辺の砂粒子が運搬され、地上に噴出する。この現象は出砂現象と呼ばれ、坑井や周辺機器の損傷、坑井内での閉塞等を引き起こし、重大な生産障害の一つとして様々な対策が施されてきた。減圧法は、石油・天然ガス生産時と同様に圧力差を利用した手法であるため、出砂現象の発生が懸念されてきた。

減圧法には、出砂現象の他にも、坑井への応力増加による安定性低下や、砂層孔隙内でのスキン形成による生産量の低下、部分的な減圧・ハイドレートの分解による地盤変形等の問題が考えられている。将来の長期的な生産を考えた時、商業的・環境問題的にも、上記の問題は極めて重要な課題となり得る。東部南海トラフ海域における海底メタンハイドレートは、砂泥互層の砂層内に胚胎している事が知られているが、上記の現象うち、スキン形成については砂泥互層内の泥層部分の浸食がトリガーとなっている可能性が指摘されている[1]。また、坑井安定性や地盤変形についても、泥層の浸食挙動が影響を与えていると考えられている。

吉田ら[2]は、気液二相流での泥層浸食シミュレーションを行っている。格子ボルツマンを用い、数値的に形成した孔隙スケールの計算領域に、実際のハイドレート胚胎層と同程度の孔隙率となるように骨格砂と泥層を配置し、孔隙内の水の流れ計算をする。そして、水の流速から泥層表面に働くせん断応力を求め、泥層が削られていく様子を再現する事を目標としている。その中で、以下に示す式(1)に含まれる、ダルシー流速における平均臨界せん断応力 $\bar{\tau}_c$ 及び浸食率に関する係数 α の値が必要とされている。

$$E = \rho_M \cdot \alpha (\bar{\tau} - \bar{\tau}_c) \quad (1)$$

ここで、 E は泥の浸食率($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)、 ρ_M は泥の密度(kg/m^3)、 $\bar{\tau}$ はダルシー流速における平均せん断応力($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)、 $\bar{\tau}_c$ は臨界せん断応力($\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}^2$)である。また、 α (m^2/kg)は泥の種類・詰まり方に依る変数である。数値計算上へのせることで、より長期間の坑井の安定性について議論が可能となる。そのためにも、現在不明な砂泥互層内における泥層浸食に関するパラメータを実験的に定めることは重要な課題である。

本研究では、模擬砂泥互層コアへの通水実験を行う事で、 α 及び $\bar{\tau}_c$ 値の導出をし、泥層浸食過程の傾向を見出す事を目的とする。

2. 実験

Fig.1 に、本実験装置の模式図を示す。また、Fig.2 に、使用する砂泥互層コアの模式図を示す。コア試料は、砂層・泥層共にタッピング法を用いて円柱状に成形し、ペイントナイフを用いて半円柱状に半割した。砂層・泥層コアを、それぞれ界面を貼り合わせるようにし、Fig.2 のように再度円柱状に成形した。

泥層コアには、膨潤性を持つベントナイトと、膨潤性を持たないカオリンを用いることで、泥の詰まり方を示す α を表現した。

水入口側には、塩化ビニル製の 5cm の円柱型スペーサーを 2 つ詰めた。このスペーサーの形状であるが、以下の様な工夫が成されている。一般に、砂層に対し泥層の浸透率は約 1/100 のオーダーである事が

知られているため、本研究では、泥層内部に圧入水を人為的に浸透させないような加工を施している。図 4-4 に、スペーサーの写真を示す。先ず、模擬砂泥互層に接するスペーサーは、左側の写真のように、砂層側に触れる部分を半円状に窪ませてあり、泥層側に触れる部分は水がまわらないようになっている。つまり、砂層側にのみ水が流れやすい構造となっている。さらに、上図のように、コアと接する面に拡散板を貼り付ける。これは、水がコア全体に均質に行き渡るために設置しているが、写真右側のように拡散板の泥層側にはガムテープを貼り付けることにより、泥層側への水の圧入がなされないようにした。以上の工夫により、実際のハイドレート胚胎層と同様、連続的に砂層とその互層界面に水が流れるという構造を模擬した。

Fig.3 に、ゴムスリーブに圧入したコアの様子を示す。このようにコアをゴムスリーブに圧入した後、装置のコアホルダーに挿入する。コアの設置が完了した後、装置本体を横向きに倒す。その後、周圧・軸圧・液体圧入用のホースの他、低温恒温槽のホース、熱電対を装置に取り付ける。装置への配管類の取り付けが全て完了すると、図 4-1 の状態となる。低温恒温槽からの冷却水供給及び、データロガー (OMRON 製、ZR-RX25 型) 用いた熱電対の測定値の記録を開始する。続いて、リザーバタンクより、コンプレッサー (出力 500KPa) を用いて水道水を周圧・軸圧のホースへ送り込む。

次に、拘束圧ポンプから更に水道水を供給し、周圧・軸圧を上昇させる。その際、ポンプへの負荷、及び急激な圧力上昇に依る砂層コア骨格構造

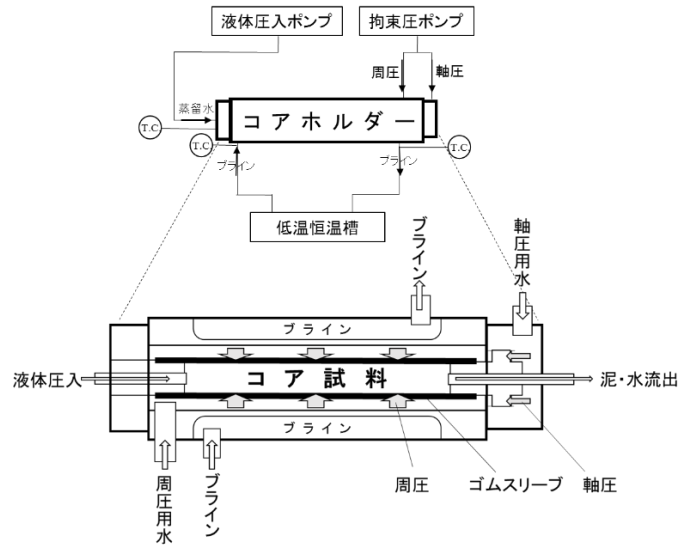


Fig.1. Schematic of experimental device

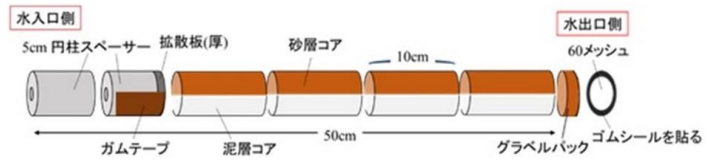


Fig.2. Schematic of core sample

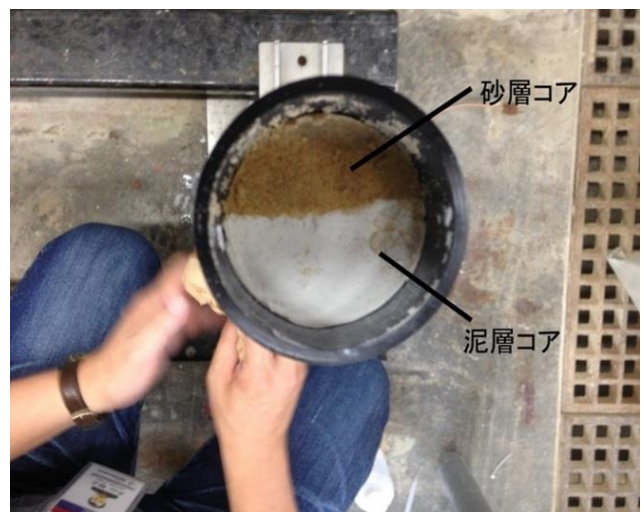


Fig.3. Core sample filled in gum-sleeve

の崩壊を防ぐため、200KPa ずつ上昇させた。そして、その後 4100KPa まで上昇させる。これは、液体圧入圧力に依るゴムスリーブ内部からの押し返しを考慮し、コア内部に 4MPa 加わるよう調節するためである。また、ポンプ内圧力の安定のため、水供給と吸水が連続的に生じるが、これはゴムスリーブでコアを揉んでしまう事につながるため、加圧作業は手早く行う必要がある。

実験条件は Table1 に示

Table1. Experimental conditions

すように、ベントナイトの混合量と圧入流速の組み合わせで行った。表内に○で示した条件の実験を全て行っている。

	液体圧入ポンプ圧入流速入力値(cc/min)						
	0.5	0.7	1	2	3	5	7
	○	○	○	○	○	○	○
	○	○	○	○	○	○	○
ベントナイト混合率(wt%)	○	○	○	○	○	○	○
	○	○	○	○	○	○	○
	○	○	○	○	○	○	○

3. 結果

Fig.4 に実験の結果を示す。

得られた傾向は、以下である。まず、コア内部への圧入流速が速い程、泥層の浸食が生じやすい。また、ベントナイトの混合率が 5wt% の時泥の浸食量が少なく、ベントナイトの混合率が 10wt% の時泥の浸食量が多くなる傾向が得られた。また、大山ら [1] は、豊浦砂のみをコアとして用いた通水試験を行い、流速をステップ状に上昇させる事で、圧入流速が

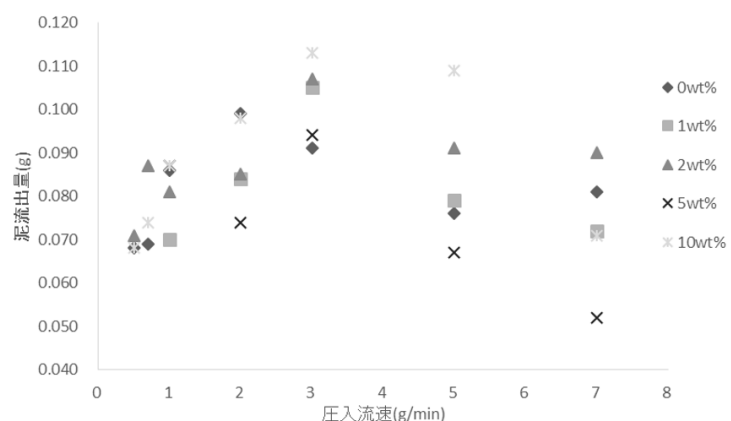


Fig.4, Experimental result

10cc/min を超えると、コア間隙に亀裂(フラクチャ)の発生が起り始める事を確認している。本研究は、模擬砂泥互層コアを用いた通水実験を行っており、且つ泥層部分への水の浸透が生じないような工夫を施している。すなわち、本実験において水が流動する孔隙は砂層コア内のみであり、本研究における孔隙断面積は、大山ら [1] の用いたコアの孔隙断面積の 1/2 となる。ここで、ダルシー流速について示した式より、本研究においてコア間隙を流動するダルシー流速は、Oyama らのダルシー流速の 2 倍程度となる事が予想される。したがって、大山ら [1] が液体圧入ポンプの表示値 10cc/min で亀裂を確認しているため、本研究では 5cc/min 以上の流速においてコア内に亀裂が生じる可能性が考えられる。さらに、本研究ではコア内部で泥粒子の浸食及びその輸送が生じているため、砂層コア内部の浸透率が低下する。そのため、砂層コア内に加わる液体流入圧が増加し、また線流速もさらに増加する事が予想され、この事も亀裂が発生しやすくなる原因となり得る。

4. 考察

通水実験の開始直後から累計圧入流量 140~200cc 程度に達するまでの間、泥の流出と同時に豊浦砂細粒分の流出が確認された。そこで考察では、2 種類の追加実験を行い、その結果から、豊浦砂細粒分流出の様子を検証し、豊浦砂細粒分の流出量について議論した後、それぞれの実験条件に対する F_c 値を再度導出した上で、 α 及び $\bar{\tau}_c$ の再計算を行う。

Fig.5 より、 α は全体的に値が小さくなった。これは、本来の泥流出量が、生データから得られた累積流出量よりも少ない値である事は明らかなため、当然の結果である。

Fig.6 より、ベントナイト混合率 5wt% における値はあまり変化せず、 $\bar{\tau}_c$ は全体的に値が小さくなった。求められた値では、5wt%における値と1wt%における値で、約7倍の差があった。この $\bar{\tau}_c$ の変化率は、その他既存の研究と比較しても、大きすぎると考えられる。従って、再計算により、変化率が減少し、より正確な計算結果になったと考えられる。その上でなお、膨潤性物質の有無に依る影響に依り、 $\bar{\tau}_c$ の値にある程度の傾向の違いが生じる事もわかった。

しかし、いずれのグラフについてもプロット数が少なく、補正をしてもなおデータにバラつきが生じた。今後も同様の実験を行い、データの再現性を得る事が不可欠である。

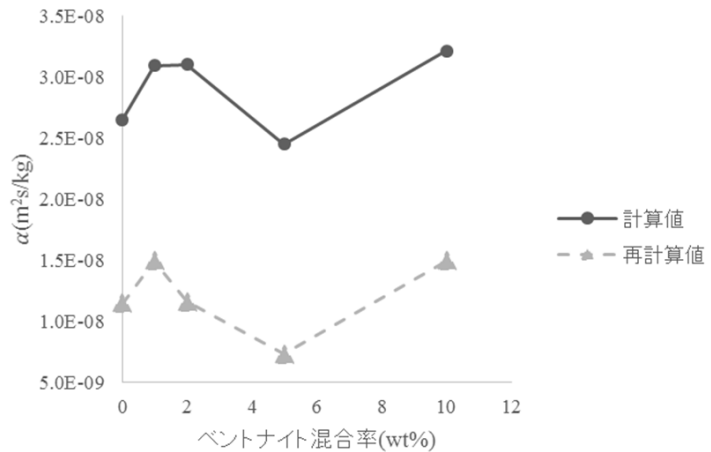


Fig.5, Value of α

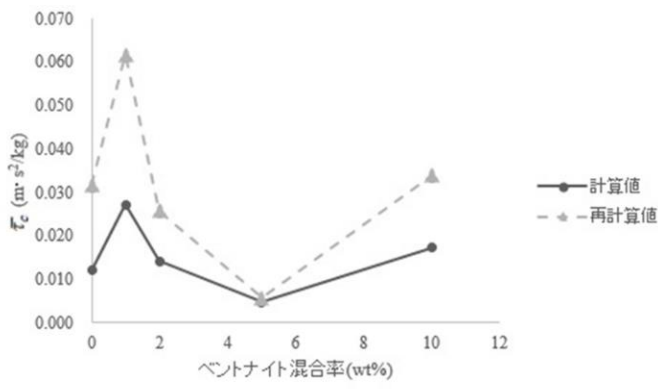


Fig6. Value of $\bar{\tau}_c$

謝辞

本論文は、東京大学新領域創成科学研究科海洋技術環境学専攻、環境モデリング統合学研究室における、2014 年度修士論文として書かれたものです。ここで、本研究を行うにあたってお力をいただいた皆様にこの場を借りてお礼を申し上げさせていただきます。本研究を行うにあたり、指導教官である佐藤徹教授には、ご多忙の中毎週のゼミのみならず、何時でも親身な御指導・御教示を賜り、また非常に有意義で興味深い研究テーマを頂きました。心より感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 大山 裕之, 安部 俊吾, 佐藤 徹 : 砂泥界面での泥層流出に関する実験的検討, 第6回メタンハイドレート総合シンポジウム A-11,2014
- [2] 吉田 毅郎, 佐藤 徹, 大山 裕之, 骨格砂形状を考慮した格子ボルツマン法を用いた泥層浸食シミュレーション, 第6回メタンハイドレート総合シンポジウム A-10,2014

