

砂泥互層内に賦存する泥凝集体の水中挙動及び三次元形状の解析

Structural analysis of turbidite mud aggregates and observation of their behavior in water flow

学籍番号 47-146795 荻野 誠也

指導教員 佐藤 徹 教授

(平成 29 年 1 月 30 日発表予定)

Keywords: メタンハイドレート、タービダイト、泥凝集体、ステレオ写真、球面調和関数

Keywords: Methane Hydrate, Turbidite, Mud Aggregate, Stereo Photograph, Spherical Harmonics

1. 序論

メタンハイドレートはタービダイトの砂層部分に多く賦存していることが知られているが、これまでは堆積の際の分級作用により砂層には砂粒とその間に生成したメタンハイドレートしか存在しないと考えられていた。しかし、安田[1]によるメタンハイドレートを胚胎するタービダイトの砂層を対象に循環粒度分析を行ったところ、循環水中で粒径の減少が確認され、フロックと呼ばれる泥の凝集体が砂と共存していることが明らかになった。このフロックは砂粒と共に堆積して骨格構造の一部を形成していると考えられており、メタンハイドレート生産時に生じるガスや真水の流れによって破壊された場合、地層の変形や坑井の閉塞などを引き起こす事が懸念されている。しかし、このようなタービダイト層内のフロック（以降タービダイトフロックと呼称する）に関する研究はほとんど行われておらず、ほぼ全ての物性は未知である。そこで本研究では、日本近海で採掘された天然のタービダイト層に含まれるフロックを用いて観測実験を行い、その水中での安定性を調査した。また、タービダイトフロックの形状を計算機上で表現できるようにするために、顕微カメラを用いて全周撮影を行い写真から 3D モデルの再構成を行った。その後、再構成した 3D モデルに対して球面調和関数展開を行うことで、タービダイトフロックの三次元形状を数値に変換、計算機上で再現を可能にした。

2. タービダイトフロックの水中挙動観測

2.1 実験目的

フロックを構成する粘土粒子は電荷を持っているため、イオン濃度の高い海水中では凝析するが、真水中では粒子同士が静電気力で反発しあうため安定性が低下する。そのため、メタンハイドレート生産による真水の生成がイオン濃度の低下させることで、タービダイトフロックが崩壊することが懸念される。そこで本実験では、タービダイトフロックの塊をシャーレに貼った蒸留水および塩水の中に入れて分散させ、その様子を観測した(Fig. 1)。この時得られた画像を解析して粒径分布を求め、真水中と塩水中での比較を行った。

2.2 実験結果

真水中で分離したタービダイトフロックの塊の粒度分布は Fig.2 で示すように、河口の天然フロックで報告されているもの[2]と類似の 3 つのピークに分けられた。大きいほうから順に 1 mm 程度にピークを持つマクロタービダイトフロック、300 μm 程度のタービダイトフロック、そしてより小さな細粒分と分けられる。この 3 つのピークは蒸留水と塩水中で同様に見られ、真水中でも塩水中同様にタービダイトフロックは存在可能であることがわかった。通常、フロックならイオン濃度の低下による不安定効果が見られるはずであり、こ

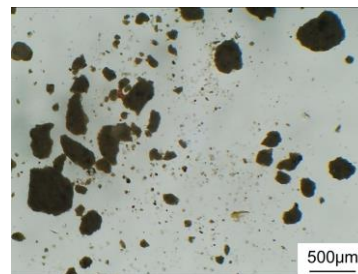


Fig. 1 Turbidite flocs dispersed in distilled water

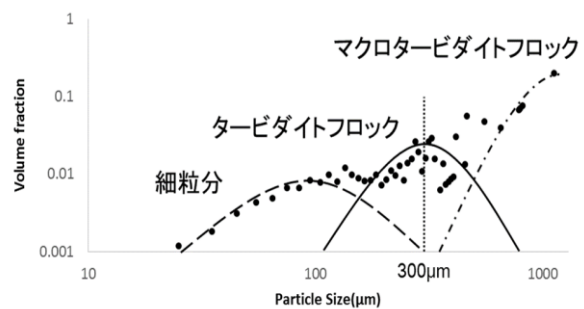


Fig. 2 Particle size distribution of turbidite flocs

の結果は海底で長期間に渡る圧密を受けた結果、タービダイトフロックが通常のフロックよりも強固に凝結している可能性を示している。ただし、超音波振動にかけたところ 300 μm 以上の粒子は全て分解し、砂粒と比べれば以前脆い凝集体であることに変わりは無いことが確認された。

3. 流水中のタービダイトフロック観測

3.1 実験概要

タービダイトフロック一粒を流水中に保持し、その挙動を観測する実験装置を自ら設計して実験を行った。実験装置の写真を Fig. 3 に示す。装置中央に観察セルとして内径 10 mm のアクリル管が垂直に固定されており、その中にシリンジポンプで流量をコントロールしながら蒸留水を流すことが出来るようになっている。観察セルの中にはステンレス管が土台部分から伸びており、ここにサンプルホルダーを取り付けてサンプルを流水中に保持できるようになっている。サンプルホルダーはサンプルの安定性や撮影のしやすさなどを勘案し、複数の形状のものを作成して検討した結果、シンプルな円筒状のものを濡らして水の表面張力でサンプルを保持する Fig. 4 の形状がベストであるという結論に至った。撮影セルの周りには 90 度刻みでステンレスの柱が立てられており、それぞれ上下に 2 台、合計で 8 台の USB カメラ Dino-Lite Premier が取り付けられており、サンプルを全方向から撮影できるようになっている。さらに土台部分は観察セルを中心に回転させられるようになっており、必要に応じてカメラを動かし、撮影位置を変えることが出来るように設計されている。

3.2 実験結果

メタンハイドレート生産時に生じる水の流速は第一回海洋産出試験のデータ[3]から 10^{-3} m/sec のオーダーであると推定されるが、この範囲ではタービダイトフロックが削れる様子は観察されず、タービダイトフロックの安定性が示された。ほとんどのサンプルでは 10^{-2} m/sec オーダーの流速下でもタービダイトフロックが侵食される様子は見られなかったが、唯一最も新しい 2013 年に事前掘削により得られたタービダイトで、酸化を防ぐため真空条件下で保管されていたサンプルから取り出したタービダイトフロックのみ、流速 2.1×10^{-2} m/sec のときに複数の欠片に分解する様子が観測された。

4. 撮影画像の 3D モデル化

4.1 写真の 3D モデル化方法

倉敷紡績株式会社製の三次元写真応用計測システム Kuraves-MD を用いて、第 3 章と同じ装置で撮影されたタービダイトフロックの全周画像からステレオ撮影の原理を用いて 3D モデルを再構築した。撮影条件は検討の結果、16 方向から、 22.5° 刻みで全周撮影するのが最適であると判断した。理想的には撮影した写真を Kuraves-MD が自動で処理し 3D モデル化を行ってくれるのだが、顕微カメラの被写界深度の浅さ、及びタービダイトフロック表面上の特徴の乏しさからプログラムの自動処理機能は一切使えず、ステレオ写真の対応付けは全て手動で行う必要があるとの結論に至った。また、特徴点を増やすための工夫として真鍮管の土台に色を塗りキズをつけ、異なる位置から撮影した写真同士の対応付けを行いやすくした。

4.2 3D モデル化の結果

本研究では合計 3 つのタービダイトフロックの 3D モデル化を行った。その結果の一つを Fig. 5 に示すが、写真から再構成された 3D モデルはどれも目視の範囲ではタービダイトフロックの大まかな特徴を再現できていた。3D モデル化の精度を定量的に検証するために、密度既知の標準サンプルとして 1



Fig. 3 Experimental setup for observing floc in water flow

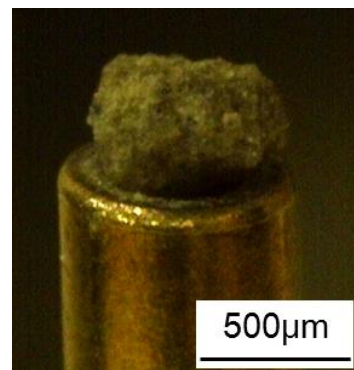


Fig. 4 Sample holder holding turbidite floc

mm 程度に加工した鉛を用い、質量から求めた体積と 3D モデルの体積を比較した。結果として質量から求めた鉛の体積は 1.82 mm³、3D モデルの体積は 1.25 mm³ となり、体積の誤差は 31.3 % と計算された。誤差の主な原因はカメラの被写界深度が浅く、撮影範囲が平面的で空間的な情報に乏しいからだ

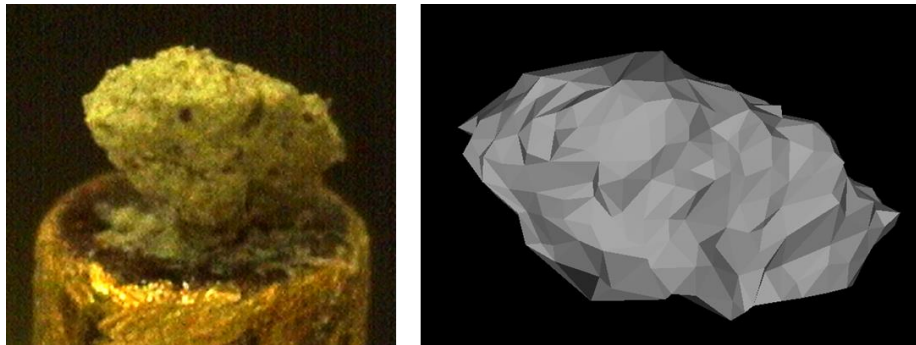


Fig. 5 Observed turbidite floc (left) and 3D-reconstructed turbidite floc (right)

と考えられ、今回用いた顕微 USB カメラの代わりにより被写界深度が深い光学系を用いれば 3D モデルの誤差は減ると考えられる。

5. タービダイトブロック形状の球面調和関数展開

球面調和関数 Y_m^l は以下の式(1)で表される。ここで、 P_m^l はルジャンドル陪関数である。

$$Y_l^m(\theta, \varphi) = (-1)^{\frac{m+|m|}{2}} \sqrt{\frac{2l+1}{4\pi} \frac{(l-|m|)!}{(l+|m|)!}} P_l^{|m|}(\cos\theta) e^{-im\varphi} \quad (1)$$

この球面調和関数 Y_m^l を用いることで、三次元曲座標上の実数関数 $r(\theta, \phi)$ は次式(2)のように表される。

$$r(\theta, \varphi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l [a_l^m \operatorname{Re}\{Y_l^m(\theta, \varphi)\} + b_l^m \operatorname{Im}\{Y_l^m(\theta, \varphi)\}] \quad (2)$$

すなわち、式(3)に示す球面調和展開を行い式(2)における係数 $s_l^m = a_l^m + ib_l^m$ を求めれば、物体の輪郭 $r(\theta, \phi)$ が再現できるということである。

$$s_l^m = \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 r(\theta, \varphi) Y_l^m(\theta, \varphi) d \cos\theta d\varphi \quad (3)$$

本研究では、杉田[4]が砂粒の CT 画像に球面調和関数展開を行うために用いたプログラムを Kuraved-MD で再構成したタービダイトブロックの 3D モデルに適用できるように改変し、球面調和関数展開を行った。3つのブロックについて球面調和関数展開を行った結果は Fig. 6 のようになり、この数値を用いることでタービダイトブロックの形状を計算で再現できる。

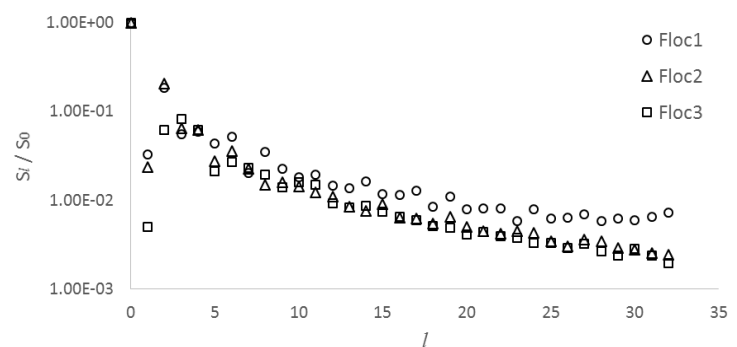


Fig. 6 Spherical harmonic coefficients of 3 flocs

6. 結論

本研究では、物性のほとんどが未知であるタービダイトブロックについて、メタンハイドレート生産に及ぼす影響

を推定するためその水中での安定性を調べた。第2章ではタービダイトブロックが真水の中でも安定に存在でき、イオン濃度の低下だけでは崩壊に至らないことが確認された。第3章では流水中での実験の結果、メタンハイドレート生産時に想定される 10^{-3} m/sec オーダーの流速ではタービダイトブロックの崩壊は確認されず、タービダイトブロックの安定性が示された。

また、タービダイトブロックを計算機上で再現できるようにするために全周撮影を行った画像からその3Dモデルを再構築した。完成した3Dモデルは、撮影したタービダイトブロックの大まかな形状を再現できていた。このタービダイトブロックに対して球面調和関数展開を行うことで三次元形状を数値化し、計算機上でその形を表現するためのパラメーターを求めることができた。

参考文献

- [1] 安田尚登：地盤工学会誌 68(2015)10-13
- [2] van Laussen W.: PhD Thesis University of Utrecht (1994)
- [3] K. Yamamoto Proceedings of the 8th International Conference on Gas Hydrates, 2014
- [4] 杉田年男：修士学位論文，東京大学（2008年）