東部南海トラフ海域の堆積物に含まれるメタンハイドレートの 分解に伴う選択的脱水とその意義

伊藤拓馬^{1*}・皆川秀紀¹

Selective dehydration during methane-hydrate dissociation in the eastern Nankai Trough sediments and its implications

Takuma Ito^{1*} and Hideki Minagawa¹

This paper discusses effects of methane hydrate (MH) formation and dissociation on water content of the sediment in the eastern Nankai Trough area. Sediment can be divided into three types. The Type 1 sediments indicate coarser than 20 μm in median with inverse and normal grading structures, and the Type 2 sediments are finer than 20 μm in median with normal grading structure. Both sediments are interpreted as turbidite deposits. The Type 3 sediments show constant grain size, almost 10 μm in median, and this fact implies this type is of hemipelagic mud. As to the Type 1 sediments after MH dissociation, relationship between water content below 10% and clay-silt-sand contents differs from that in water saturated sediments. This fact implies that MH accumulated in the sediments with water contents below 10%, and dehydrating action occurred during dissociation of MH. In this study, water content decreased at most 15% after MH dissociation. Low water content sediments owing to selective dehydration can provide one of the criteria for identifying the MH-bearing strata in past times.

Key words: Methane hydrate, Nankai Trough, sediment property, sedimentary process, water content, dehydration

はじめに

天然ガスハイドレートは、低温高压の安定条件を満たす海底や湖底、永久凍土域の堆積物に分布することが知られている (Sloan, 1998). このような天然ガスハイドレートは、水分子の籠状構造の中にメタン分子などの炭化水素を包接する。天然ガスハイドレートは、地球表層の炭素循環に影響を及ぼしてきた可能性が指摘されており (松本, 2009), また海底や永久凍土に埋蔵するエネルギー資源と

しても有望視されている (Tsuji et al., 2004; 長久保, 2009).

本邦の東海沖から熊野灘の海域は、天然ガスハイドレートの存在が期待される地域のひとつとして着目されてきた (Tsuji et al., 2004; Baba and Yamada, 2004; 松本, 2009; 長久保, 2009). 2003 年度には、海上基礎試験「東海沖～熊野灘」が実施され、東部南海トラフ海域で天然ガスハイドレート安定領域下限までの堆積物が回収された。この天然ガスハイドレートは、主にメタンハイドレート (MH) からなることが確認され、2003 年度には MH 資源開発研究コンソーシアム (MH21) により、東海沖から熊野灘にかけて MH を含む堆積物のコア掘削が実施された。それにより、タービダイト砂層に MH が濃集していることが判明し (松本, 2009; 長久保, 2009), 未固結堆積物の分布する浅層における MH の産状やその集積過程などが明らかにされつつある (Uchida et al., 2004; Uchida and Tsuji, 2004; Tsuji et al., 2004;

受付: 2013 年 1 月 24 日 受理: 2013 年 7 月 12 日

¹ 独立行政法人産業技術総合研究所メタンハイドレート研究センター

Methane Hydrate Research Center, AIST, 2-17-2-1, Tsukisamu-Higashi, Toyohira, Sapporo 062-8517, Japan

* Corresponding author: t-itou@aist.go.jp

Fujii et al., 2009). 一方, MH の分解は海底地すべりの発生要因のひとつとしても着目されており, MH 分解時に生成した水・ガスなどの流体が移動する際に間隙圧を上昇させた結果, 地盤の摩擦係数を低下させるとされている (Terlien, 1998). 例えば, 下北沖の陸棚斜面で認められた海底スランプ層には, 脱水構造が認められ, この海域の海底地すべりには MH 分解による下位層からの流体供給が影響していたことが指摘されている (森田ほか, 2011). これらの理由から, MH 分解にともない MH を含む堆積物から放出される水分の量を評価することは, 海底地すべりの機構についての知見を得るために重要と考えられる. しかしながら, MH 分解時の堆積物からのガス放出に伴う含水率の変化に関しては, 詳細な報告例はない.

本研究では, 東部南海トラフ海域の第二渥美海丘近傍から得られた MH を含む堆積物について, MH の生成・分解に伴う間隙水の選択的な放出により, 堆積物の含水率がど

のように変化したかを示し, その堆積学的な意義を考察した.

試料採取地点と試料概要

研究対象域は, 東部南海トラフ海域の第二渥美海丘近傍である (第 1 図). 第二渥美海丘の斜面部には, MH の安定領域の下限を示す海底疑似反射面 (BSR) が確認されており (第 1 図), 各種検層の結果から MH が濃集している可能性が指摘されていた (Fujii et al., 2009).

本研究に用いる試料は, 経済産業省により実施された 2003 年度基礎試錐「東海沖～熊野灘」において β -1 坑井から得られた堆積物のひとつであり, それは第二渥美海丘の海底面から BSR 下部までの堆積物である (Tsuiji et al., 2004). 試料採取には, コア深度の圧力と温度を保った状態で MH を含む試料を回収できるように改良された Pres-

第 1 図 本研究で扱った 2003 年度基礎試錐「東海沖～熊野灘」によるボーリングコア掘削地点とその周辺の音波探査断面.

sure Temperature Core Sampler (PTCS) を用いた (Fujii et al., 2009). 水深 1006 m の地点において全長 384 メートルのコア試料が回収された. 回収率は約 64% であった (武内・松本, 2009).

本研究では, BSR が分布する深度 340 mbsf (meter below sea floor) よりも浅い深度 322~322.74 mbsf から得られたコア試料を用いた. 船上記載データによると, 本試料の砂質部には MH が含まれることが肉眼観察および MH 分解時の吸熱反応を捉えた赤外線カメラ画像およびペン型温度計記録により確認されている (Uchida et al., 2004; Uchida and Tsuji, 2004).

方 法

β -1 坑井からのコア試料の一部は, MH を含む状態で凍結保管されている. その他の試料は, 大気圧下で冷蔵保存されており, それらの試料ではすでに MH は失われている. ここでは前者を凍結試料, 後者を脱ガス試料と呼ぶ. 凍結試料は MH を含む堆積物の観察のため, 脱ガス試料は含水率の測定および粒度分析のために使用した.

ここで, MH の生成・分解による間隙水の放出で含水率がどのように変化したかを見積もるための原理を述べる. 脱ガス試料の含水率は, MH 生成・分解後の堆積物における液相飽和率を意味している. 一方, MH 生成前の含水率を知ることはできないため, ここでは脱ガス試料の間隙を蒸留水で満たした試料 (以下, 水飽和試料と呼ぶ) を作製し, これが海底下における MH 生成前の含水率を反映すると仮定した. この仮定が成立するには, MH 分解に伴う脱ガスや脱水による著しい粒子移動や体積変化が起きていないことが重要だが, それを確認することは難しい. しかし, コア試料には堆積構造が認められるので, ある程度の初生的な粒子配列は残っており, 試料の体積変化も小さいものとみなした. 本研究では, これらの含水率を比較し, MH 生成・分解に伴う堆積物の含水率の変化を見積もった. 各試料の詳細を以下に述べる.

脱ガス試料は, 2004 年から 2012 年まで 5°C で冷蔵保存されていた. コア試料は, アクリルチューブに内包されたまま, 真空排気したセラミック蒸着系透明フィルム製袋 (エスカルフイルム) に密閉保存状態にあったが, 長期間の冷蔵保存中に堆積物中の MH が分解している. コア試料を半割後, ただちに岩相記載を行った. その後, 半割されたコア試料は, 深度方向に 2.0 cm ごとに容積 7 cm³ のプラスチックキューブ (夏原技研株式会社製) を埋め込み, 36 試料を採取した. これらの試料について, JIS 規格 (地盤工学会, 2000) に基づき, 水飽和試料の含水率の測定および粒度分析を実施した.

また, β -1 坑井からの堆積物の間隙水は, 海水起源の塩類を含んでいる (武内・松本, 2009). 本研究では蒸留水による水飽和处理を実施したが, スメクタイトなどの粘土鉱物は塩類溶脱時に膨潤するとされており (大坪, 2001), 間隙を蒸留水で満たした時と塩水で満たした時に, 含水率の違いが生じるかを調べる必要がある. 本研究では, 間隙中に蒸留水と 3.5% の NaCl 水溶液を飽和させた時の含水率の違いは 1% 未満となり, 粘土鉱物の膨潤の影響は小さいものと判断された.

もう一方の半割コア試料は, 深度方向に 0.5 cm ごとに切断し, 148 試料の脱ガス試料を採取した. これらの脱ガス試料について, 含水率および粒度分析を行った.

1. 含水率の測定

MH 生成・分解後の含水率 (W_a) は, 脱ガス試料の湿潤重量 ($W_{a\text{wet}}$) と 80°C のオーブンで 2 日間乾燥させた乾燥重量 ($W_{a\text{dry}}$) を測定後, 次式から求めた.

$$W_a(\%) = 100 \times (W_{a\text{wet}} - W_{a\text{dry}}) / W_{a\text{dry}} \quad (1)$$

水飽和試料の含水率 (W_s) を求めるために, 堆積物の水飽和处理を次の手順で行った. 脱ガス試料は, 堆積物中に間隙水溶存ガスや MH から生成したガスで不飽和状態なため, 上述の試料を蒸留水に浸し, デシケータに入れて減圧し, 一昼夜静置することで水飽和試料を作製した. 減圧過程初期には, 堆積物から気泡の放出が観察されたが, 時間経過とともに気泡の放出は減少した. この気泡の減少から, 間隙を占める気相が液相と置き換わっているものと推測される. 水飽和含水率 (W_s) は, 試料の湿潤重量 ($W_{s\text{wet}}$) を測定後に, 80°C のオーブンで 2 日間乾燥させた乾燥重量 ($W_{s\text{dry}}$) を測定し, 次式から求めた.

$$W_s(\%) = 100 \times (W_{s\text{wet}} - W_{s\text{dry}}) / W_{s\text{dry}} \quad (2)$$

2. 粒度分析

粒度分析は, 脱ガス試料と水飽和試料について実施した. 試料に含まれる有機物を除くための前処理として, 乾燥試料 100 mg 程度を秤量し, 容量 50 ml の遠沈管に入れ, 30% の過酸化水素水を十分量加え, 発泡がおさまるまで数日間静置した.

本試料のスミアスライドによる観察から, 試料には陸源性砕屑物の他に, 珪藻殻と石灰質ナノプランクトン遺骸が認められた. 本試料は砕屑物が主体であるが, 細粒な堆積物では珪藻殻の割合が高くなる. 石灰質ナノプランクトン遺骸はほとんど含まれていない. 細粒な堆積物であってもその含有量は少ないが, 少しでも生物源粒子の影響を小さくするため, ここでは石灰質ナノプランクトンを試料から次のような手順で除くことにした.

有機物分解後の試料に, 3% の塩酸を 10 ml 加え, 一日静

置し、石灰質ナノプランクトンを分解除去した。光学顕微鏡で石灰質ナノプランクトンがなくなっていることを確認した。したがって、本試料の粒度分布は、陸源性碎屑物と珪藻殻のそれを合成したものともみなすことができる。

これを遠心分離処理し、上澄み液を除き、残渣を蒸留水にて洗浄後、粒度分析用の試料に分散剤として0.5%のヘキサメタリン酸ナトリウム水溶液を10ml加えた。10分間の超音波振盪後、Microtrac MT3300（日機装株式会社製）を用いてレーザー回折散乱法にて粒度分析を実施した。同一試料を10回測定した粒度分析結果から求めた各粒径の誤差は、体積基準で5%以内であった。

3. メタンハイドレートを含む堆積物の観察

β -1 坑井の深度312 mbsf から得られた MH を含む堆積物は、ロケーターと呼ばれる容器中で液体窒素から生じる窒素ガスにより温度約 -180°C にして凍結保存されていた。その凍結試料のうち、MH を含む砂質堆積物について表面形態観察と元素組成分析を行った。

分析には、エネルギー分散型エックス線分析装置 EDS（日本電子株式会社製 JED2300）が搭載された電界放出型走査型電子顕微鏡 FE-SEM（日本電子株式会社製 JSM-7000F）を使用した。MH を含む砂質堆積物における EDS 分析は、加速電圧 10 kV、エミッション電流 105 μA 、測定時間 60 秒という条件で点分析を行った。

本装置の試料ホルダーには、液体窒素と加熱ヒーターを用いた温度制御システムが備えられており、低真空モードにて試料室を 10 Pa、試料ステージ温度を -193°C に設定することで MH 分解を抑制し、堆積物の観察を行った。その後、試料ステージの温度制御により試料温度を昇温させ、MH 分解後の砂質堆積物の表面形態観察も行った。

結 果

1. 肉眼記載による岩相区分

コア試料の深度は、322~322.74 mbsf であるが、ここでは簡便のため、コア試料の最上部を 0 cm として記載した。コア堆積物の肉眼記載は、粒径、岩相境界の特徴および堆積構造に着目して行った。その結果、堆積物は 2 つの岩相に区分された（第 2 図 a）。

コア深度 0~2.8 cm, 38.2~56.5 cm, および 61.5~64.9 cm に認められる岩相は、明灰~暗灰色を呈し、上下に隣接する岩相と比較して粗粒な堆積物からなっており、その基底には明瞭な侵食面が認められる（第 2 図 a）。コア深度 38.2~56.5 cm の岩相では、最上部にも侵食面が認められる（第 2 図 a）。この岩相には、直径 1~2 mm ほどの楕円または円状の発泡痕がランダムに分布しており、チューブ状の構造が認められる。

深度 312 mbsf から採取した堆積物について、凍結試料の FE-SEM 画像を観察した結果、本岩相に相当する部分には明灰色を呈する物質が認められ、その部分の EDS 分析では炭素と酸素が検出された（第 3 図 a）。このことから、明灰色を呈する物質は、MH および水であることが確認できた。また、MH 分解過程を観察した結果、MH および水は堆積物の間隙を満たしていた（第 3 図 b, c）。このことから、この岩相にみられる発泡痕は MH の分解によるものと考えられる。コア深度 38.2~56.5 cm の岩相では、底部に雲母が濃集しており、直径数 mm 程度の木片も混入していることが肉眼観察から明らかになっている。

コア深度 2.8~38.2 cm, 56.5~61.5 cm, 64.9 cm 以深で認められる岩相は、オリブ灰~黒褐色を呈する塊状な粘土質シルトからなる（第 2 図 a）。しばしば斑点状の生痕が認められる。発泡痕は肉眼では認められない。

2. 含水率および粒度組成

MH 生成・分解後の試料における含水率（Wa）は、1.8~20.3% の範囲で変動しており、その平均値は 15.3% である（第 4 図 a）。水飽和試料の含水率（Ws）は、17.8~22.8% の範囲で変動しており、その平均値は 21.4% である（第 4 図 a）。

粒度分布は、細粒側に尾をもつ負の歪度をもっている（第 2 図 b）。中央粒径は、 $4.5\sim 114.7\mu\text{m}$ の範囲で変動しており、その平均値は $28.5\mu\text{m}$ である（第 4 図 b）。粘土含有量は、1.6~39.2% の範囲をもち、平均は 23.6%（第 4 図 c）、シルト含有量は、20.0~72.4% の範囲をもち、平均は 57.2%（第 4 図 d）、砂含有量は、1.1~78.4% の範囲をもち、平均は 19.2% である（第 4 図 e）。

3. 粒度組成による堆積物区分

粒度組成から堆積物は、以下の 3 タイプに分けられる（第 4 図）。タイプ 1 は、コア深度 0~2.5 cm と 38.5~57.0 cm とに認められる（第 4 図 f）。このタイプは、中央粒径が $20\mu\text{m}$ 以上で、隣接するタイプ 2, 3 と比べて粗粒な堆積物からなる（第 4 図 b）。また含水率（Wa）が 15% 未満と低い（第 4 図 a）。

タイプ 2 は、コア深度 8.5~38.5 cm, 59.5~65.0 cm, 67.0 cm 以深に認められる（第 4 図 f）。このタイプは、中央粒径が $20\mu\text{m}$ 未満の堆積物からなっており、正級化が認められる（第 4 図 b）。

タイプ 3 は、コア深度 2.5~8.5 cm, 57.0~59.5 cm, 65.0~67.0 cm に認められる（第 4 図 f）。このタイプは、中央粒径が $10\mu\text{m}$ 付近でほぼ一定値をとる細粒な堆積物からなることで特徴づけられる（第 4 図 b）。

第2図 2003年度基礎試錐「東海沖～熊野灘」コア（322～322.74 mbsf）の（a）写真および（b）粒度分布。写真の破線は、侵食面の位置を示す。

考 察

1. 肉眼記載による岩相区分と粒度組成によるそれとの比較

肉眼観察による岩相区分と、粒度組成に基づく堆積物のタイプ区分とを比較すると、肉眼観察で同一の岩相としたコア深度0～2.8 cmと38.2～56.5 cmの粗粒な堆積物（第2図）は、タイプ1の堆積物に一致した（第4図）。しかし、コア深度61.5～64.9 cmの岩相は、肉眼観察ではタイプ1

と同じものと判断されたが、先述した粒度組成に基づく識別基準に従うと、タイプ2に区分される。一方、コア深度2.8～38.2 cmと64.9 cm以深に肉眼観察により認められた粘土質シルトからなる岩相（第2図）は、中央粒径が20 μm より細粒な堆積物からなるが、上方細粒化しているものをタイプ2、そうでないものをタイプ3と分類できる。このように肉眼観察のみで細粒堆積物を粒度ごとに細分することは難しい。よって、これ以降は細粒堆積物をより詳しく区分できる粒度組成に基づく区分を用いて議論する。

第3図 電界放型走査型電子顕微鏡 (FE-SEM) による EDS 分析の結果と MH 分解過程の観察。
(a) 間隙を満たす MH および氷の元素組成, (b) MH 分解前の画像, (c) MH 分解後の画像. (a) の Ka と Kb は, 各元素における特性エックス線の Ka 線と Kb 線を意味する.

2. 堆積物の分類と堆積過程

粒度分析の結果に基づき, Shepard (1954) の三角ダイアグラムによる堆積物の分類を行った (第5図). 堆積物のタイプ1は, 主にシルト質砂の領域に分類されるが, 砂から粘土質シルトの堆積物も認められる. 堆積物のタイプ2は, 粘土質シルトの領域に分類されるが, 1試料のみが砂-シルト-粘土となっている. 堆積物のタイプ3は, 全てが粘土質シルトの領域に分類される.

タイプ1について, コア深度 38.0~57.0 cm の堆積物では, 下位よりコア深度 57.0~55.5 cm までが正級化, 55.5~47.0 cm までが逆級化, 47.0~38.0 cm までが再び正級化を示す (第4図b). また, コア深度 0~2.5 cm のタイプ1の堆積物では, これより上位のデータが欠損しているので, 全体の構造は分からないが, 最下部は逆級化している (第4図b). タイプ2についてみると, コア深度 38.5~8.5 cm では全体的に上方細粒化しているが, コア深度 28.0 cm, 21.0 cm, 16.0 cm には中央粒径がわずかに大きくなるピークが認められる (第4図b). コア深度 59.5~65.0 cm は, 単純な正級化構造を示す (第4図b). このように, タイプ1とタイプ2の堆積物は, いずれも全体的には正級化構造を示すという点は共通しており, このことは混濁流からの堆積を示唆する.

タイプ1の堆積物は, いくつかの逆級化と正級化構造が組み合わさるものや, 最下部が逆級化するものがあるので, 一過性の混濁流からの堆積でなく, 速度が変化する流れからの堆積物と判断される (例えば, Mulder et al., 2001). タイプ2の堆積物は, 中央粒径が 20 μm 未満と細粒なので, 細粒タービダイトの可能性がある. Ashi et al. (2012) は, 2004 年紀伊半島沖地震直後に, 南海トラフの海溝陸側斜面の小海盆において, 海底近傍に懸濁した底層水を認めており, その懸濁した底層水が細粒タービダイトの堆積に重要

であることも指摘されている (池原, 2012). コア深度 38.5 cm と 65.0 cm のタイプ2の基底には, 侵食面が認められるため, Ashi et al. (2012) が報告したような懸濁した底層水の移動により下位の堆積物が削られ, それを覆うようにタイプ2の堆積物が堆積したのかも知れない. また, コア深度 38.5~8.5 cm では級化しながらも, 中央粒径の変動が認められるため (第4図b), これを堆積させた混濁流は速度が増減するような流れであった可能性もある.

タイプ3の堆積物は, 三角ダイアグラム上では砂含有量がほぼ一定で粘土とシルトの比率が変化する分布をとる (第5図). また, 粒度はほぼ一定の中央粒径値となる (第4図b). このことから, 中央粒径がほぼ一定に落ち着く堆積物であり, 半遠洋性の堆積物と解釈できる.

3. 脱ガス試料と水飽和試料の粒度組成と含水率の関係とその意義

水飽和試料について, 粘土含有量, シルト含有量, 砂含有量と含水率 (W_s) の関係式をまとめた (第6図a, b, c). その結果, 含水率 (W_s) に対して粘土含有量 (第6図a) とシルト含有量 (第6図b) は正の相関をもつのに対し, 砂含有量 (第6図c) は負の相関をもつことがわかった. 含水率 (W_s) に対して粘土含有量は直線的な関係にある (第6図a). 一方, 含水率 (W_s) に対してシルト含有量と砂含有量は, 含水率 (W_s) 19% を閾値として二つの異なる関係がある (第6図b, c). 含水率が 19% より大きい部分における含水率 (W_s) とシルト含有量との間には, ほとんど相関が認められない (第6図b).

脱ガス試料について, 含水率 (W_a) と粘土含有量, シルト含有量, 砂含有量の関係式をまとめた (第6図d, e, f). その結果, 含水率 (W_a) と粘土含有量およびシルト含有量との間には, 大きくみて正の相関があり (第6図d, e), 砂含有量と含水率 (W_a) との間には負の相関がある (第6図

第4図 コア試料の物性. (a) 脱ガス試料の含水率 (W_a) および水飽和試料における含水率 (W_s), (b) 平均粒径, (c) 粘土含有量, (d) シルト含有量, (e) 砂含有量, (f) 粒度組成により分類した堆積物のタイプ.

第5図 粒度組成に基づく堆積物の分類. 三角ダイアグラムは, Shepard (1954) に従った.

f). より詳しくみると, 含水率 (W_a) 10% を境界として, 2つの傾向に分けられる. 含水率 10% 以上のものでは, タイプ1からタイプ3へと連続的に含水率が変化するのに対し, 10% 以下のものでは, それらとは違った傾向を示す (第6図 d, e, f). 含水率 (W_a) が 10% より高い堆積物における粘土, シルト, 砂含有量に対する含水率 (W_a) の傾きは, それぞれ前述の水飽和試料でみられるその傾きに近い (第6図). しかし, 含水率 (W_a) 10% 未満の堆積物では, 両者の傾きは異なる (第6図 d, e, f). 一般的に, 堆積物の組成がほとんど変わらない碎屑物では, 含水率は粘土含有量に依存することが知られている (池原, 1989). 本コア試料では, 堆積物の組成の違いはほとんどなく, また水飽和試料の含水率 (W_s) と粘土含有量との関係は, 直線的な関係にある (第6図 a). したがって, 本コア試料の含水率を支配する要因のひとつとして, 粘土含有量が挙げられる. しかし, 脱ガス試料では水飽和試料にみられたような, 含水率と粘土含有量との間に直線的な関係は認められない (第6図 d). 含水率が 10% 未満の脱ガス試料では, 10% 以上の試料よりも, 粘土含有量の減少に対する含水率の減少傾向が強い (第6図 d). このことは, 含水率 (W_a) 10% 未満の堆積物については, MH の分解により堆積物の間隙水が選択的に脱水された可能性を示唆している. 含水率が 10% 未満となる試料は, コア深度 40~50 cm に位置しているタイプ1の堆積物である (第4図 a).

本研究におけるコア試料の砂質部には, 間隙充填型の MH が含まれることが確認された (第3図). 加えて, タイプ1に相当する堆積物には, 発泡痕が認められ, 脱ガスや脱水の可能性を示している. このことから, 上述の脱ガス後に含水率が著しく低下する堆積物では, MH の選択的な

第6図 各物性の相関。水飽和試料の含水率 (Ws) と (a) 粘土含有量, (b) シルト含有量, (c) 砂含有量, 脱ガス試料における含水率 (Wa) と (d) 粘土含有量, (e) シルト含有量, (f) 砂含有量。破線は、各含有量と Ws との間の回帰直線である (第4図 a, b, c)。

生成およびその分解後に試料に占める気相 (メタンガス) の割合が大きくなり、液相 (間隙水) の割合が低くなったものと推定される。しかし、含水率を低下させたその他の原因として、コア保管時の気相の膨張による間隙水移動および粗粒堆積物からの選択的脱水も考えられる。前者に関しては、本試料では発泡痕が認められる部分を除けば初生的堆積構造が残されているので、巨視的にみれば気相の膨張による間隙水の移動の影響は小さいとみなして差し支えないであろう。後者に関しては、前述の通り、タイプ1の脱ガス試料の粘土、シルト、砂含有量と含水率 (Wa) との間には、10%の含水率を閾値として、水飽和試料に近い関係のものと、脱水過程を反映したものとがある (第6図 d, e, f)。例えば、同じ粘土含有量をもつ脱ガス試料をみると、含水率が10%以上のものと、それ未満のものとのみられる (第6図 d)。通常、含水率が粘土含有量に依存することを踏まえると、このような現象は粒度組成の違いのみを反映した選択的脱水作用の影響では説明できず、海底下で起きた選択的なMH生成とその分解によって間隙水が排出された影響もあると考えるのが妥当であろう。

本堆積物に含まれるMHの多くは構造I型 ($\text{CH}_4 \cdot 6.1 \text{H}_2\text{O} \sim 6.2 \text{H}_2\text{O}$) からなり (Waseda and Uchida, 2004; Kida et al., 2009), 大気圧下での分解に伴い固体体積の170倍余にガス膨張し、固体体積の8割程度の水が排出される (Sloan, 1998)。このようにMH結晶から排出された水は、発生したメタンガスとともに移動することが知られており、脱ガス過程におけるメタンガスと水の移動挙動は各々異なるとされている (Johnson et al., 2011)。実際に船上のコア観察では、MH分解時に脱ガスに伴う脱水の様子が観察されており (Uchida et al., 2004), 上述の見解は観察事実により支持される。

本研究の結果では、上述したようにコア保管時の粗粒堆積物からの選択的な脱水の影響が若干あるかも知れないが、脱ガス試料と水飽和試料の含水率の差が最大15%ほど低くなっている (第6図)。この15%という値には、脱ガス後に起きた脱水の影響も含まれるため過大評価したものであるが、この程度の間隙水がMH生成・分解による脱ガス過程で堆積物の外へ放出された可能性が大きい。サハリン島沖の大陸棚にある湧水ストラクチャーから採取された

堆積物の亀裂を埋めるような産状の MH を含む堆積物の含水率は、MH を含まない堆積物のそれよりも、含水率の差として 19~26% ほど小さく、MH 生成に間隙水が関与していることが指摘されている（南ほか, 2009）。また、標準珪砂を用いた実験的研究からは、試料が粗粒であるほど、MH に置換される間隙水の割合が大きくなることが示されている（Lu et al., 2011）。本研究の間隙充填型 MH でも、MH 生成時には間隙水が使用され、その MH 分解時に発生するメタンガスの移動に伴って脱水が起こることで、MH 生成前の堆積物がもっていた含水率よりも MH を含んでいた堆積物の含水率は低くなったと考えられる。そして、脱ガス後、間隙水が含まれていた空間の一部は、気相により満たされたものと推定される。このように、MH を含む砂質堆積物では、MH 生成・分解後に含水率が著しく低くなる傾向がみられる。一般的な堆積物の含水率と粘土、シルト、砂の各含有量との関係に比べて著しく低い含水率をもつ堆積物は、かつて MH を含んでいた地層を認定するためのひとつの判断材料となりうる。

ま と め

東部南海トラフ海域から得られた堆積物について、MH の生成・分解に伴う間隙水の選択的な放出により、含水率がどのように変化するかを示し、その意義を検討した。堆積物は、混濁流堆積物のタイプ 1 およびタイプ 2、そして半遠洋性堆積物のタイプ 3 に区分された。

MH 生成前の含水率を示す水飽和試料と、MH 生成・分解後の含水率を示す脱ガス試料の 2 種類を用いて、粘土・シルト・砂含有量と含水率との関係を調べた。その結果、タイプ 1 の堆積物では、MH 生成・分解により含水率が最大で 15% 程度減少したことがわかった。また、脱ガス試料における含水率と粘土・シルト・砂含有量の関係は、水飽和試料のそれと比べ、含水率が 10% 未満となる堆積物で異なる傾向がみられた。この堆積物はタイプ 1 に相当しており、このことは海底下でタイプ 1 の堆積物に MH が選択的に生成し、その分解時に脱水作用が起きたと考えられる。一般的な堆積物の含水率と粘土、シルト、砂の各含有量との関係に比べて著しく低い含水率をもつ堆積物は、かつて MH を含んでいた地層のひとつの認定材料となりうるであろう。

謝辞：産業技術総合研究所の池原 研氏には、粗稿を読んでいただき、お世話になりました。産業技術総合研究所の成田英夫氏と石油天然ガス・金属鉱物資源機構の鈴木清史氏にはメタンハイドレートを含む堆積物について貴重なアドバイスをいただき、産業技術総合研究所の江川浩輔氏に

は震探断面についてのコメントをいただきました。石油資源開発の辻 隆司氏、匿名査読者および編集担当である島根大学の酒井哲弥氏には、本稿を改善するにあたって有益なご意見を賜りました。本研究で使用した試料は、2003 年度基礎試錐「東海沖～熊野灘」において採取され、経済産業省による MH21 メタンハイドレート開発促進事業として実施されたものです。以上の方々に深く感謝いたします。

文 献

- Ashi, J., Ikehara, K., Kinoshita, M. and KY04-11 and KH-10-3 ship-board scientists, 2012, Settling of earthquake-induced turbidity on the accretionary prism slope of the central Nankai subduction zone. In Yamada, Y. et al., eds., *Submarine mass movements and their consequences*, Advances in Natural and Technological Hazards Research, **31**, 561-571, Springer, Dordrecht.
- Baba, K. and Yamada, Y., 2004, BSRs and associated reflections as an indicator of gas hydrate and free gas accumulation: An example of accretionary prism and forearc basin system along the Nankai Trough, off Central Japan. *Resource Geology*, **54**, 11-24.
- Fujii, T., Nakamizu, M., Tsuji, Y., Namikawa, T., Okui, T., Kawasaki, M., Ochiai, K., Nishimura, M. and Takano, O., 2009, Methane-hydrate occurrence and saturation confirmed from core samples, eastern Nankai Trough, Japan. In Collett, T., Knapp, C., Boswell, R. eds., *Natural gas hydrate—Energy resource potential and associated geologic hazards*. The American Association of Petroleum Geologists Memoir, **89**, 385-400.
- 池原 研, 1989, 山陰-北陸沖海底表層堆積物の物理的性質. 地質調査所月報, **40**, 239-250.
- 池原 研, 2012, 地震/津波による浅海域での粒子輸送・堆積現象：過去の地震/津波イベントの理解のための海底堆積物研究の現状と課題. 堆積学研究, **71**, 141-147.
- 地盤工学会, 2000, 土質試験 基本と手引き. 地盤工学会 土の試験実習書編集委員会, 251 p.
- Johnson, A., Patil, S. and Dandekar, A., 2011, Experimental investigation of gas-water relative permeability for gas-hydrate-bearing sediments from the Mount Elbert Gas Hydrate Stratigraphic Test Well, Alaska North Slope. *Marine and Petroleum Geology*, **28**, 419-426.
- Kida, M., Suzuki, K., Kawamura, T., Oyama, H., Nagao, J., Ebinuma, T. and Narita, H., 2009, Characteristics of natural gas hydrates occurring in pore-spaces of marine sediments collected from the eastern Nankai Trough, off Japan. *Energy Fuels*, **23**, 5580-5586.
- Lu, H., Kawasaki, T., Ukita, T., Moudrakovski, I., Fujii, T., Noguchi, S., Shimada, T., Nakamizu, M., Ripmeester, J. and Ratcliffe, C., 2011, Particle size effect on the saturation of methane hydrate in sediments—Constrained from experimental results. *Marine and Petroleum Geology*, **28**, 1801-1805.
- 松本 良, 2009, 総説メタンハイドレート—海底下に氷状巨大炭素リザーバ発見のインパクト—. 地学雑誌, **118**, 7-42.

- 南 尚嗣, Krylov, A., 坂上寛敏, 八久保晶弘, 百武欣二, 戸丸仁, 木田真人, 高橋信夫, 庄司 仁, 2009, オホーツク海のメタンハイドレート含有層における間隙水の地球化学. 地学雑誌, **118**, 194-206.
- 森田澄人, 中嶋 健, 花村泰明, 2011, 海底スランプ堆積層とそれに関わる脱水構造: 下北沖陸棚斜面の三次元地震探査データから. 地質学雑誌, **117**, 95-98.
- Mulder, T., Migeon, S., Savoye, B. and Faugeres, J.C., 2001, Inversely graded turbidite sequences in the deep Mediterranean: A record of deposits from flood-generated turbidity currents?. *Geo-Marine Letters*, **21**, 86-93.
- 長久保定雄, 2009, 国産エネルギー資源としてのメタンハイドレート—我が国におけるメタンハイドレート開発計画—. 地学雑誌, **118**, 758-775.
- 大坪政美, 2001, 塩類溶脱が有明粘土の圧密特性に及ぼす影響. 低平地研究, **10**, 25-30.
- Shepard, F.P., 1954, Nomenclature based on sand-silty-clay ratios. *Journal of Sedimentary Petrology*, **24**, 151-158.
- Sloan, E.D.J., 1998, *Clathrate Hydrates in Natural Gases*. 705 p, 2nd edition, New York, Marcel Dekker Inc.
- 武内里香, 松本 良, 2009, 東部南海トラフにおけるガスハイドレートの生成集積過程に関する地質学的・地球化学的制約. 地学雑誌, **118**, 793-813.
- Terlien, M.T.J., 1998, The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds. *Environmental Geology*, **35**, 124-130.
- Tsuji, Y., Ishida, H., Nakamizu, M., Matsumoto, R. and Shimizu, S., 2004, Overview of the MITI Nankai Trough Wells: A Milestone in the evaluation of methane hydrate resources. *Resource Geology*, **54**, 3-10.
- Uchida, T., Lu, H., Tomaru, H. and the MITI Nankai Trough Shipboard Scientists, 2004, Subsurface occurrence of natural gas hydrate in the Nankai Trough Area: Implication for gas hydrate concentration. *Resource Geology*, **54**, 35-44.
- Uchida, T. and Tsuji, T., 2004, Petrophysical properties of natural gas hydrates-bearing sands and their sedimentology in the Nankai Trough. *Resource Geology*, **54**, 79-87.
- Waseda, A. and Uchida, T., 2004, The geochemical context of gas hydrate in the eastern Nankai Trough. *Resource Geology*, **54**, 69-78.

東部南海トラフ海域の堆積物に含まれるメタンハイドレートの分解に伴う選択的脱水とその意義

伊藤拓馬・皆川秀紀, 2013, 堆積学研究, Vol. 72, No. 1, 3-12

Ito, T. and Minagawa, H.: Selective dehydration during methane-hydrate dissociation in the eastern Nankai Trough sediments and its implications
Jour. Sed. Soc. Japan, Vol. 72, No. 1, 3-12

東部南海トラフ海域から採取されたメタンハイドレート(MH)を含む堆積物の生成および分解が含水率に与える影響を議論した。堆積物は3つのタイプに分けられた。タイプ1は、中央粒径が20 μm より粗粒で逆級化構造と正級化構造を示す。タイプ2は、中央粒径が20 μm 未満の細粒な堆積物からなり正級化構造を示す。タイプ1とタイプ2は、いずれも混濁流堆積物である。タイプ3は、中央粒径が10 μm 程度でほぼ一定な細粒堆積物からなり、半遠洋性の堆積物と判断される。MH分解後のタイプ1の堆積物については、10%未満の含水率と粘土・シルト・砂含有量との関係が水飽和試料のそれとは異なっていた。このことは、含水率が10%未満のタイプ1の堆積物に選択的なMHの集積があり、MH分解過程で脱水作用が起きたことを示唆している。本研究では、MH分解後に最大15%の含水率が減少した。選択的脱水による含水率の低い堆積物は、かつてMHを含んでいた地層を認定するためのひとつの基準となりうる。