

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：16401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03994

研究課題名(和文)山陰沖海底地すべりの発生機構：表層型メタンハイドレート分解の観点による要因評価

研究課題名(英文) Submarine slope failure due to shallow-type methane hydrate dissociation: a case of a submarine slide in the offshore of San'in region

研究代表者

石田 直人 (ISHIDA, Naoto)

高知大学・海洋コア総合研究センター・客員講師

研究者番号：20534746

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：山陰沖日本海の海底地すべりの発生について、表層型メタンハイドレートの分解が誘発したという観点から検討した。鳥取沖の隠岐トラフ南西斜面に位置する海底地すべりは、44 kaに発生したと考えられる。実測した水温、塩分、地温勾配、地殻熱流量、堆積速度等を基にメタンハイドレート安定領域下限を推算し、海底地すべり発生当時、地すべり土塊の直下に位置していたことを明らかにした。MIS5e間氷期に安定領域下限は最も深くなり、その後の海水準低下に伴って徐々に上昇する。安定領域下限に沿ってメタンハイドレートの分解が進行して地盤支持力が低下し、やがて斜面が滑動したという海底地すべり発生機構を支持する結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、山陰沖日本海の海底地すべりについて発生機構を検討した。その結果、発生時期が海水準低下期であることが明らかになり、水圧の減少がメタンハイドレートの分解を進行させ、やがて斜面が滑動した可能性が高いという結論を得た。近年資源として注目される日本海の表層型メタンハイドレートは、その安定性を左右する外的要因の変化の影響を受けやすい特性がある。この成果は、メタンハイドレートの分解が海底地すべりを誘発する可能性を具体例をもって示し、新たな視点を与えるものとして重要である。

研究成果の概要(英文)：A submarine slide in the offshore of San'in region was investigated from the viewpoint of dissociation of shallow-type methane hydrate. The age of the submarine slide located in the southwestern slope of the Oki Trough, off Tottori, was estimated to be 44 ka. Based on the measured water temperature, salinity, geothermal gradient, heat flow, sedimentation rate, etc., the base of the gas hydrate stability was thought to be located just below the landslide mass at the time. After the MIS5e interglacial, methane hydrate dissociation had progressed along the base of the stability in response to a sea-level fall. The results of this study strongly support a scenario that methane hydrate dissociation induced submarine slope failures.

研究分野：メタンハイドレート

キーワード：表層型メタンハイドレート 海底地すべり ガスハイドレート安定領域 日本海

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本海にメタンハイドレート (MH) の存在が広く認識されるようになって 10 数年が経過し、主に炭化水素資源としての観点から現在も調査・研究が進められている。日本海の MH は海底面近傍の泥層に濃集することを特徴とする「表層型」である。MH は低温高圧下で安定な固相であるが、海底面付近に存在する表層型 MH は温度・圧力を変化させる外的要因の影響を受けやすく、また、濃集した産状は周辺層への影響が顕著に現れやすいことを意味する。MH の安定性を左右する外的要因には、海水準変動や底層水温変化、堆積・削剥作用などが挙げられる。

MH が周辺環境に与える影響のひとつに、MH 安定領域下限 (BGHS) の変動が誘発する斜面崩壊がある。MH は分解するとメタンガス (気相) と水 (液相) となり、体積・間隙水圧の変化から地盤の変形や強度低下が生じるのがその理由で、特に斜面の堆積物中で分解が生じると海底地すべりの発生をもたらす (例えば, Sultan et al., 2004)。このシナリオが働いた例とされるのがノルウェー沖のストレッガ地すべりであり、最終氷期後の急激な温暖化によって MH が分解し、巨大な海底地すべりが発生したとされる (Mienert et al., 2005)。しかし、温暖化による海水準の上昇は MH を安定化させる等の疑問視する見解もあり、ストレッガ地すべり発生について MH 関与の真偽は定かではない。

日本海の南部、山陰沖の隠岐トラフ南西部には大規模な海底地すべり群の存在が知られる (池原ほか, 1990)。一方、隠岐トラフには広域的に BSR が分布しており (林ほか, 2010)、また近年、経済産業省によって実施された資源量把握のための調査により、表層型 MH 胚胎を示唆する海底微地形が多数識別されている (大井ほか, 2016)。隠岐トラフの海底地すべり群は水深数 100 m に集中し、これは MH 安定領域の水深でもある。このように、山陰沖では海底地すべりと表層型 MH の分布域の重なりが明瞭になりつつあり、両者が関連している可能性を想起させる。

2. 研究の目的

ストレッガ地すべりをはじめ、海底地すべりと MH 分解との関連を指摘する研究は散見されるものの、多くは考察程度にとどまる。そこで本研究では、シナリオ先行で論じられてきた MH 分解が誘発する海底地すべりの発生について、具体例に基づいて検証することを目的とした。これまでの知見の蓄積により、隠岐トラフは海底地すべりの分布と MH 胚胎域の重複が判明しており、この検証に好適な研究フィールドである。

3. 研究の方法

本研究では、何らかの要因がもたらす BGHS 変動によって安定領域から不安定領域に移行した胚胎層内で MH 分解が進行し、BGHS に沿って面的に地盤支持力が低下し、結果として生じる斜面崩壊のプロセスを定量的に検証する。このため、(1) 具体事例として検討する海底地すべりの選定、(2) 海底地すべり周辺における各種観測、および現在の BGHS 深度の特定、(3) 海底地すべりの発生年代の特定、(4) 地すべり発生に至るまでの BGHS 変動過程の復元、の順で研究を進めた。(1) は既存研究による隠岐トラフの海底地形図等から、崩壊地形が明瞭に保存され、他の地すべりに被覆されていない最も若い時代に形成されたと考えられる海底地すべりを選定の条件とした。(2) と (3) は調査航海により、海底地すべりの変状域、および近接する非変状域に対して地温計測、海洋観測、コア採取等を実施して実測データを取得した。(4) は得られた各種データを基に、海底地すべり発生までの BGHS 深度の上下動を計算によって求めた。

4. 研究成果

(1) 検討した海底地すべり

本研究で検討した海底地すべりについては石田ほか(2019)で記載した。この海底地すべりは、鳥取市の沖合約 80 km の隠岐トラフ南西斜面に位置しており、明瞭な変状地形を残している。地すべりの崩落崖頂部の水深は 540 m、末端の水深は 1120 m で、すべり方向は東北東である。変状域の長さは 20.6 km、幅は最大で 11.3 km、面積は 172.6 km² の規模である。この海底地すべりの周辺にはマウンドやポックマーク等の MH 胚胎域に特徴的な海底微地形が多数確認され、地すべり堆積物を抜くガスチムニー構造の存在から、地すべり発生後も MH の集積が続いている可能性が指摘されている。

(2) 海底地すべり周辺における各種観測、現在の BGHS 深度

検討する海底地すべりの熱的背景の検討には、2018 年に明治大学ガスハイドレート研究所が実施した 7K18 調査航海の計測データを用いた。計測は長さ 8 m のプローブに計 5 個の温度ロガーを約 80 cm 間隔で装着して実施された。地すべり近傍の非変状域で水深 700 m、および水深 1000 m 地点において計測された地温データの解析の結果、地温勾配はそれぞれ 83.13 mK/m、99.42 mK/m と求められた。また既存研究による、近傍の水深 1075 m 地点の地温勾配は 123 mK/m であり (Yasui et al., 1968)、水深が増すにつれて地温勾配が増加する傾向が認められる。また、水深 1000 m の地温計測地点において、ピストンコアラーによって採取したコア (PC1816, 全長 718 cm) の 21 層準に対して熱伝導率を測定した。計測された熱伝導率は 0.7662~0.9813 W/m²・K の範囲であり、地温計測深度にある 11 層準の平均値として 0.8040 W/m²・K を得た。これより、水深 1000 m 地点における地殻熱流量は 79.93 W/m² と求められた。

鳥取県沖では 2018 年から 2022 年にかけて、鳥取県水産試験場の第一鳥取丸によって海洋観測を実施した。取得された日本海固有水の水温は水深 700 m で約 0.47 °C、水深 1000 m で約 0.32 °C であり、観測毎の水温の揺らぎはわずかである。また、水深 500 m 以深の塩分は 34.06~34.08 PSU と極めて安定している。得られた底層の水温、塩分を基に、塩分 34.0 ‰ の MH 相平衡線 (Dickens and Quinby-Hunt, 1994) を用い、計測した地温勾配は地下深部まで一定として BGHS 深度を求めた。その結果、現在の海底地すべり近傍の BGHS 深度は、水深 700 m 地点で 115.1 mbsf、水深 1000 m 地点では 130.5 mbsf と見積もられた。

(3) 海底地すべりの発生年代

海底地すべりの発生年代を特定する目的で、地すべり変状域末端部においてコアを採取した。採取されたコア (PC1818, 全長 708 cm) の最下部、681 cmbsf 以深には泥の円礫を多数含む泥層が回収され、これを海底地すべり堆積物と判断した。地すべり堆積物の 65 cm 上位には、厚さ約 9 cm のガラス質テフラが認められ、これは AT テフラ (30.078 ka; Albert et al., 2018) と考えられる。また珪藻解析の結果、被覆層と海底地すべり堆積物の境界は、秋葉ほか (2014) による日本海の珪藻分帯の D 帯に相当する (解析は秋葉文雄氏による)。以上より、海底地すべりは最終氷期最盛期より以前、酸素同位体ステージ (MIS) 3 の時期に発生したと考えられる。

被覆層と海底地すべり堆積物の境界には厚さ 3 mm 程度の有孔虫濃集層が挟まれ、これより浮遊性有孔虫 *Globigerina bulloides* を抽出して放射性炭素年代を測定した。その結果、放射性炭素年代として 42180±420 BP が得られ、Marine20 を用いた較正年代として 44178 cal BP (43326-44805 cal BP) が得られた。但し、この時期の日本海のローカルリザーバー効果は不明であり、その補正はしていない。放射性炭素年代測定によって得られた年代は、テフラや珪藻による年代とも矛盾はない。よって、この海底地すべりの発生年代はおよそ 44 ka と結論し、この年代を BGHS 変動過程の解析に用いる。

(4) BGHS 変動過程の復元

検討する海底地すべりは、最終間氷期から最終氷期最盛期に向けて海水準が徐々に低下する時期に発生した。海水準低下に呼応して BGHS は上昇し、MH の不安定化が促進される。先述のシナリオの要件となる地すべり発生と MH 分解のタイミングは一致することが明らかである。

これを定量的に検証するため、地すべり発生以前に最も海水準の低下した MIS6 氷期から、最も海水準が上昇した MIS5e 間氷期を経て、MIS3 に地すべりが発生するまでの BGHS 変動過程を復元した。BGHS に対して、最大の変動要因は海水準変動に伴う水圧変化であり、次いで堆積・削剥作用に伴う海底面上の堆積物の増減である。海水準変動量は後期第四紀海水準変動モデル (Spratt and Lisiecki, 2016) を用いた。堆積物上載量は、PC1816 から得られた堆積速度 30.76 cm/kyr を検討した期間で一定として計算した。このほか底層水温の変化も MH 安定性に影響を与えるが、日本海のような半閉鎖海洋では過去の底層水温を算定する手段がない。よって、底層水温は実測した現在の深度分布データを基に、水深と水温の関係式を作成して算出した。塩分は 34.0 ‰、地温勾配は現在の値を解析に用いた。

ここでは海底地すべりに隣接する非変状域が地すべり発生前の原地形を保持するとみなす。非変状域内において地温勾配を決定し、PC1816 を採取した水深 1000 m 地点を基点に定め、以下に BGHS 変動の解析結果を述べる。先述の通り、この水深 1000 m 地点の BGHS 深度は現在 130.5 mbsf である。

海底地すべり発生以前に最も海水準が低下した MIS6 氷期 (現在比-124.0 m) には、BGHS は現在の海底面から 159.5 m 下方に位置していた。この後、急激な温暖化によって MIS5e 間氷期に海水準はピークに達する (現在比+3.1 m)。この海水準上昇による水圧上昇に応答して、BGHS は現在の海底から 168.9 m の深さまで下方へ移動し、MIS6 から 10 m 程度、MH の安定領域が拡大した。MIS5e 間氷期後の寒冷化に伴い、海水準は小規模な増減を繰り返しながら、大局的には MIS2 氷期に向けて低下してゆく。寒冷化が小康状態となった MIS3 の中頃、44 ka の海底地すべり発生時に海水準低下は一時的に停滞していた (現在比-76.2 m)。この時に BGHS は現在の海底面から 125.0 m の深さに位置していた。MH 安定領域が最大となった MIS5e 間氷期からは約 44 m 上昇している。また、MIS6 氷期以前から長期間安定領域にあった胚胎層には MH がより多く蓄積していた可能性があり、これが層厚にして約 34 m にわたり不安定化していることは注目に値する。

地すべり発生以降の非変状域の堆積物の上載分を補正すると、海底地すべり発生時の BGHS は当時の海底面から 111.5 m 下方に位置していたことになる。検討した海底地すべりは、変状域長さが 20 km、幅は最大 11 km を越える規模であり、これが深さ 110 m 付近を滑り面として堆積物表層が滑動したものである可能性は十分に考え得る。

(5) 結語

これまでシナリオ先行で議論されてきた MH 分解が誘発する海底地すべりについて、山陰沖海底地すべりを例に定量的に評価した。その結果、検討した海底地すべりの発生と MH 分解との因果関係には、少なくとも矛盾がない。この結論を確実にするには、海底地すべりの滑り面を貫通するコア掘削が必要であり、これは本研究の範疇を越える。本研究は、MH 分解を模した地盤強度の実験的検討や、地すべり発生に伴う津波の規模の評価等、発展的課題を有しており、今後の発展が望まれる。

【引用文献】

秋葉文雄・谷村好洋・大井剛志・石浜左栄子・松本 良, 2014: 日本海最上部第四系コアの珪藻化石層序および珪藻起源の黒色粒子とその古海洋学的意義. 石油技術協会誌, 79, 130-139.

- Albert, P.G., Smith, V.C., Suzuki, T., Tomlinson, E.L., Nakagawa, T., McLean, D., Yamada, M., Staff, R.A., Schlolaut, G., Takemura, K., Nagahashi, Y., Kimura, J.-I. and Suigetsu 2006 Project Members, 2018: Constraints on the frequency and dispersal of explosive eruptions at Sambe and Daisen volcanoes (South-West Japan Arc) from the distal Lake Suigetsu record (SG06 core). *Earth-Science Reviews*, 185, 1004-1028.
- Dickens, G.R. and Quinby-Hunt, M.S., 1994: Methane hydrate stability in seawater. *Geophysical Research Letters*, 21, 2115-2118.
- 林 雅雄・稲盛隆徳・佐伯龍男・野口 聡, 2010: 日本周辺海域におけるメタンハイドレートに起因するBSRの分布. *石油技術協会誌*, 75, 42-53.
- 池原 研・佐藤幹夫・山本博文, 1990: 高分解能音波探査記録からみた隠岐トラフの堆積作用. *地質学雑誌*, 96, 37-49.
- 石田直人・戸丸 仁・海老沼孝郎・松本 良, 2019: 日本海の海底地すべりと表層型メタンハイドレート分解との関連. *日本地質学会学術大会講演要旨*, 160.
- Mienert, J., Vanneste, M., Bünz, S., Haflidason, H. and Sejrup, H.-P., 2005: Ocean warming and gas hydrate stability on the mid-Norwegian margin at the Storegga Slide. *Marine and Petroleum Geology*, 22, 233-244.
- 大井剛志・佐藤幹夫・松本 良, 2016: 日本海東縁と北海道周辺海域における「ガストムニー構造」の探索. 表層メタンハイドレート・フォーラム (講演要旨), 明治大学グローバルフロント (東京・駿河台).
- Spratt, R.M. and Lisiecki, L.E., 2016: A Late Pleistocene sea level stack. *Climate of the Past*, 12, 1079-1092.
- Sultan, N. Cochonat, P. Canals, M. Cattaneo, A. Dennielou, B. Haflidason, H. Laberg, J.S. Long, D. Mienert, J. Trincardi, F. Urgeles, R. Vorren, T.O. and Wilson, C., 2004: Triggering mechanisms of slope instability processes and sediment failures on continental margins: a geotechnical approach. *Marine Geology*, 213, 291-321.
- Yasui, M., Kishii, T., Watanabe, T. and Uyeda, S., 1968: Heat flow in the Sea of Japan. In, *Crust and Upper Mantle of the Pacific Area*. Knopoff, L., Drake, C. and Hart, P., eds., *Geophysical Monograph*, 12, 3-16.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 石田直人・瀬戸浩二・秋葉文雄・松本 良
2. 発表標題 日本海南部における66 ka以降の全有機炭素濃度・同位体比変動
3. 学会等名 日本地質学会第128年学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石田直人, 藤岡秀文, 戸丸 仁, 海老沼孝郎, 松本 良
2. 発表標題 日本海南部, 大和海盆南西縁のメタンハイドレート胚胎特性
3. 学会等名 JpGU - AGU Joint Meeting 2020: Virtual
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石田直人・森下翔太・海老沼孝郎・戸丸 仁・松本 良
2. 発表標題 メタンハイドレート分解が誘発した斜面崩壊：隠岐トラフ南西部の海底地すべりの事例
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石田直人・戸丸 仁・海老沼孝郎・松本 良
2. 発表標題 日本海の海底地すべりとメタンハイドレート分解との関連
3. 学会等名 日本地質学会第126年学術大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------