

日本周辺海域におけるメタンハイドレートの分布、産状と起源

松本良¹⁾ 蛭田明宏^{1) 2)} 大井剛志^{1) 3)}
柿崎喜宏^{1) 4)} 下野貴也^{1) 5)} 石田直人^{1) 6)}
サイデイマツソウ^{1) 7)} シュナイダグレン^{1) 8)} 戸丸仁⁹⁾
福田朱里^{1) 10)} 弘松峰男^{1) 11)} 大川史郎¹⁾
柳本裕¹⁾ 棚橋学^{1) 2)} 角和善隆¹⁾

Overview: Distribution, Occurrence, and Origins of Methane Hydrates around the Japan Islands

Ryo MATSUMOTO¹⁾, Akihiro HIRUTA^{1) 2)}, Takeshi OI^{1) 3)},
Yoshihiro KAKIZAKI^{1) 4)}, Takaya SHIMONO^{1) 5)}, Naoto ISHIDA^{1) 6)},
Mahsa SAEIDI-ORTAKAND^{1) 7)}, Glen SNYDER^{1) 8)}, Hitoshi TOMARU⁹⁾,
Akari FUKUDA^{1) 10)}, Mineo HIROMATSU^{1) 11)}, Shiro OHKAWA¹⁾,
Yutaka YANAGIMOTO¹⁾, Manabu TANAHASHI^{1) 2)} and Yoshitaka KAKUWA¹⁾

[Received 27 September, 2023; Accepted 3 March, 2024]

Abstract

Due to the current energy crisis caused by global warming and geopolitical events, evaluating the energy potential of marine gas hydrates around the Japan Islands has become an urgent issue. Based on open and public reports, a critical overview is provided of the current status of the exploration of gas hydrates in the eastern Nankai Trough and along the eastern margin of the Japan Sea. In 2001, an exploration and resource assessment of gas hydrates in the eastern

¹⁾ 明治大学研究知財戦略機構ガスハイドレート研究所

²⁾ 産業技術総合研究所

³⁾ 原子力規制庁

⁴⁾ 室戸ジオパーク

⁵⁾ 海洋エンジニアリング

⁶⁾ 高知大学海洋コア国際研究所

⁷⁾ 国立科学博物館

⁸⁾ 東京大学海洋研究所

⁹⁾ 千葉大学大学院理学研究院

¹⁰⁾ 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

¹¹⁾ 海洋研究開発機構

¹⁾ Gas Hydrate Research Laboratory, Meiji University, Tokyo, 101-8301, Japan

²⁾ National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba, 305-8561, Japan

³⁾ Nuclear Regulation Authority, Tokyo, 106-8450, Japan

⁴⁾ Muroto Geopark, Muroto, 781-7101, Japan

⁵⁾ Kaiyo Engineering Co., Ltd., Tokyo, 110-0016, Japan

⁶⁾ Marine Core Research Institute, Kochi University, Nankoku, 783-8502, Japan

⁷⁾ National Museum of Nature and Science, Tsukuba, 305-0005, Japan

⁸⁾ Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, Kashiwa, 277-8564, Japan

⁹⁾ Graduate School of Science, Chiba University, Chiba, 263-0022, Japan

¹⁰⁾ Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, University of Tokyo, Tokyo, 113-0033, Japan

¹¹⁾ Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Yokosuka, 237-0061, Japan

Nankai Trough was launched as a national project. In the late 20th century, hydrate-induced BSRs had been widely recognized on the fore-arc basins and slopes of the accretionary wedges of the Nankai Trough. Integrated geological and geophysical exploration reveals that the hydrates of the eastern Nankai Trough occur in the interstitial pore space of sand layers (pore filling type) of the Early Pleistocene turbidite units of 100 to 200 m in thickness above the BSR-BGHS. Hydrate exploration in the Japan Sea entered the National project in 2012, following academic efforts over the preceding 10 years, confirming 1,742 columnar-shaped gas chimney structures (generally a few hundred meters across and roughly 100 m deep) in which a few centimeters to nearly 50 m of thick massive hydrate deposits occur in the Middle Pleistocene silty host sediments. Japan Sea hydrates are considered to have grown in the host sediments, displacing clayey particles (particle displacement type). Gas chimney structures are the main conduits for the migration of deep-seated methane, associated with sea floor methane seeps, chemosynthetic communities, and methane-derived authigenic carbonates. A high concentration of massive hydrate is related to enhanced maturation and accumulation of hydrocarbon deposits under the high heat flow of the Japan Sea basin. Additionally, glacial eustasy of the closed Japan Sea basin facilitated efficient recycling of methane to accumulate massive hydrates.

Key words : pore-filling type hydrates, shallow hydrates, methane hydrate, gas chimney, base of gas hydrate stability: BGHS, bottom simulating reflector: BSR

キーワード：孔隙充填型ハイドレート、表層型ハイドレート、メタンハイドレート、ガストムニー、安定領域基底、海底擬似反射面

I. はじめに

ロシアによるウクライナ侵攻をきっかけとして世界のエネルギー需給バランスが崩壊し、天然ガスの供給不全とエネルギー価格の高騰が世界経済と人々の暮らしに大きな影を投げかけている。わが国は、このような想定されざる状況に直面する30年以上前からエネルギー安全保障に関して多くの課題を抱えていた。それらは1) エネルギーの多くを輸入に依存し自給率が低いこと、2) 原油については主な供給元が中東など数か所に集中しているため地域紛争による地政学的な影響を受けやすいこと、3) 化石燃料、とくに二酸化炭素や硫黄酸化物の排出が大きい石油・石炭への依存度が高く、相対的にクリーンとされる天然ガスへの転換が遅れているという3点に集約されるが(例えば、武富・市川, 2001)、さらに2011年東日本大震災によって引き起こされた3.11福島原子力発電所の事故をきっかけとして、4) 原子力発電への信頼度が低下し原発依存を高めることによ

り温室効果ガスの排出削減を図ろうとする戦略が見直されるなど、わが国のエネルギー安全保障の課題は混迷と深刻さを深めている。このような課題を抱えるなかでの今回の危機は、わが国エネルギー供給の脆弱性を改めて浮き彫りにしている。

石油埋蔵量の枯渇、いわゆる“ピークオイル”問題(例えば、Hubbert, 1966; 井上, 2004)が懸念されていた20世紀の終わり頃から、メタンガスと水が結合した固体物質であるメタンハイドレートが永久凍土域、大陸棚や大陸斜面の深海堆積物から報告され注目されていた(Shipley *et al.*, 1979; Kvenvolden, 1988, 1994)。永久凍土域と深海堆積物を合わせたメタンハイドレートの総量として炭素換算で13,000 Gt (Trofimuk *et al.*, 1977)、あるいは500~2,500 Gt (Milkov and Sassen, 2002)など膨大な数値があげられている。石炭・石油から天然ガスへというエネルギー転換が進むなか、巨大炭化水素リザーブであるメタンハイドレートは、コールベッドメタンやシェールガスとともに非在来型天然ガス資源として期待さ

れ、20世紀末～21世紀初頭より学術調査あるいは国や石油メジャーによる予察的探査がはじまった（例えば、Collett, 1993; Suess *et al.*, 2001）。台湾、韓国、中国、インドでは2001～2011年頃よりそれぞれの周辺海域においてハイドレート資源評価を目的とした国家プロジェクトがはじまっている（松本ほか, 1996; Matsumoto *et al.*, 2011）が、わが国ではそれらに先駆け1995年、通商産業省資源エネルギー庁（現・経済産業省資源エネルギー庁）による開発可能性調査（「メタンハイドレート開発技術に係る研究開発等」）が、2001年には本格的な研究開発プロジェクト（「メタンハイドレート開発計画」）が立ち上げられた（武富・市原, 2001; Tsuji *et al.*, 2004）。

近年、地球温暖化への強い懸念から化石燃料の使用を抑制する動きが強まり（2021年11月グラスゴー気候合意@COP26¹⁾）、わが国も2030年には2013年比で46%の削減、2050年には実質排出量をゼロとする目標を定めた（内閣府²⁾、環境省³⁾）。このような政治的・社会的状況のなか、化石燃料であるメタンハイドレートの研究開発プロジェクトを取り巻く環境には厳しいものがある。しかし、再生可能エネルギーと原子力発電だけで必要なエネルギーをカバーできる状況にはほど遠く、とくに原子力発電については福島第一の廃炉問題、放射性廃棄物の最終処分など未解決の課題があり、依然として化石燃料に頼らざるを得ない状況にある（資源エネルギー庁エネルギー白書⁴⁾）。

近年、化石燃料から排出される二酸化炭素を捕捉し、地層に戻して貯留することで大気から隔離する技術開発（Carbon dioxide Capture and Storage: CCS）が進んでいる。欧州を中心に大規模なCCS計画が実施に向けて動き出しており（ENGONETWORK.ORG⁵⁾）、化石燃料を利用しつつ二酸化炭素排出を増やさないことも可能な選択肢の一つとなりつつある。このような状況も踏まえ、海外からの天然ガス調達が困難となった際のエネルギー安全保障として、日本周辺海域のメタンハイドレート分布の解明と資源量評価を進め、産出技術を確認しておくことの意義は大きい。

本稿では、日本周辺海域において実施されてい

るメタンハイドレート学術調査と経産省資源エネルギー庁の研究開発プロジェクトの既発表資料をもとに、メタンハイドレートの分布、産状と起源についてどこまで明らかにされたか俯瞰しその成果を検証する。なお、日本周辺海域のハイドレート資源量については総説2（松本ほか, 2024, *in press*）を参照されたい。

II. 資源としてのメタンハイドレート

メタンやエタンあるいは二酸化炭素などに飽和した水が一定の温度・圧力状態（低温・高圧）におかれると、水分子がつくる籠構造のなかにこれら気体分子が取り込まれた包接格子（クラスレート・ハイドレートあるいはガスハイドレート）が形成される。包接されるガス分子がメタンだけから成るものをとくにメタンハイドレートと呼ぶ。いくつかの結晶構造をとるメタンハイドレートのうち構造I型のメタンハイドレートは46個の水分子と8個のメタン分子からなり組成式は $\text{CH}_4 \cdot 5.75\text{H}_2\text{O}$ 、比重は 0.91 g/cm^3 （Sloan, 1998）である。メタンハイドレートはその体積の約172倍（標準状態）のメタンガスを含み、自然界における巨大な“メタン貯蔵庫”と言われている（Kvenvolden, 1988; 松本, 1987, 1992, 2009）。

堆積物中の有機物はメタン生成菌の働き（微生物分解）や地下深部の地熱による加熱（無機熱分解）でメタンを生成する。過剰なメタンを含有する間隙水やメタンの気泡が浅部へ移動すると地温の低下によりメタンハイドレートの生成がはじまる。図1に南海トラフ域における水温プロファイル（青線）、地温勾配（赤破線）とメタンハイドレートの相平衡曲線（赤実線）の関係を示す。メタンハイドレートは相平衡曲線の低温・高圧側で安定に存在する。

東部南海トラフ東海沖で実測された地温勾配 $4^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ （Matsumoto *et al.*, 2004）を適用すると、水深1,000 mの海底では海底下270 m（meter-below-sea-floor: mbsf）までがハイドレート安定領域となり、この深度をメタンハイドレート安定領域の基底（Base of gas hydrate stabil-

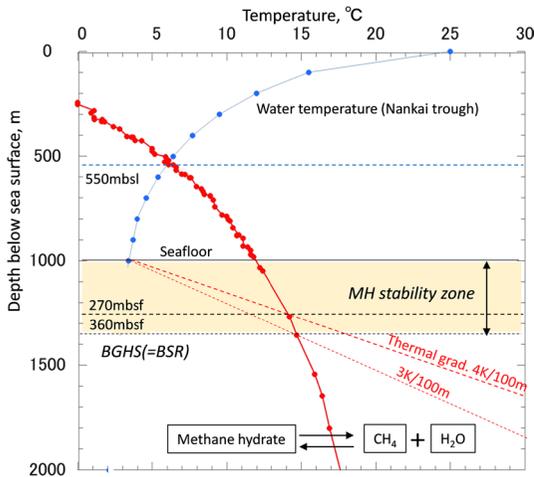


図 1 海洋環境におけるメタンハイドレートの安定領域。相平衡曲線は Dickens and Quinby-Hunt (1997), 水温は渡邊・内田 (2016), 地温勾配 4°C/100 m は Matsumoto *et al.* (2004) による。水深 1,000 m におけるハイドレート安定領域の基底深度 (BGHS) は地温勾配 3 K/100 m と 4 K/100 m の時、それぞれ 360 mbsf と 270 mbsf である。

Fig. 1 Stability field of methane hydrate in marine environment. Phase boundary (red dots and line) from Dickens and Quinby-Hunt (1997), seawater temperature profile from Watanabe and Uchida (2016), and geothermal gradient of 4 K/100 m from Matsumoto *et al.* (2004). Depths of BGHS at a water depth of 1,000 m are 360 mbsf and 270 mbsf for geothermal gradient of 3 K/100 m and 4 K/100 m, respectively.

ity: BGHS) と呼ぶ。地温勾配が 3°C/100 m では BGHS は 360 mbsf となる。水深が大きく地温勾配が小さいほど BGHS は深くなるが、実際にメタンハイドレートが生成するか否かは堆積物のメタン過飽和度や間隙の存在などに依存するため、BGHS が深いほどハイドレート含有量が大きいとは言えない。一方、海水中では水深 550 m 以深が安定領域となる。メタンに未飽和の海水中でメタンハイドレートが生成することはないが、海底から湧出するメタンバブルの表面にハイドレート薄層が生成されることがある。しかしバブル表面のハイドレート薄層は浮上するバブルが安定領域上限深度 (図 1 で 550 mbsl) に達したところで分解しメタンバブルとともに海水に溶解

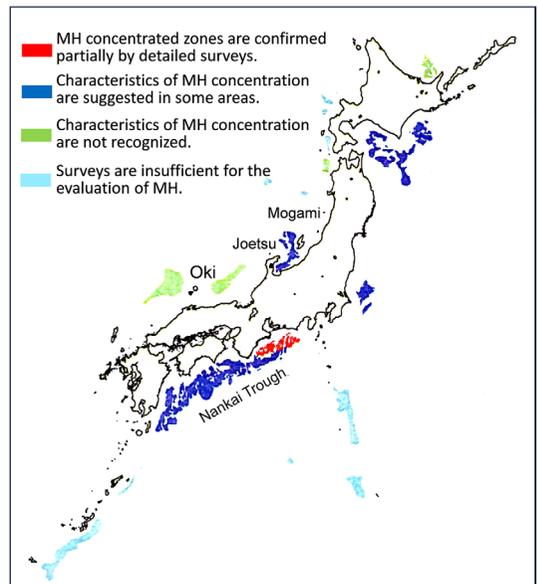


図 2 日本周辺海域における海底擬似反射面 (BSR) の分布 (林ほか, 2010)。

Fig. 2 Distribution of Bottom Simulating Reflectors (BSRs) around the Japan Islands (Hayashi *et al.*, 2010).

する (松本, 2009)。

堆積物間隙水の溶解度を超える過剰なメタンは BGHS 深度の下位では気相として、上位では固相のメタンハイドレートとして存在するため BGHS の上位では弾性波速度 V_p が大きくなる。一方、BGHS の下位では間隙中に気相が含まれ弾性波速度 V_p が低下するため、地震探査断面上では BGHS 付近において位相が反転する特異な反射面が記録される。温度・圧力で出現深度が決まるこの反射面は海底面とほぼ平行に発達するので海底擬似反射面 (Bottom simulating reflector: BSR) と呼ばれる。位相が反転する BSR はハイドレートの存在を強く示唆するものであり、海底下に発達するメタンハイドレートを探査する際の有効な手がかりとなる (Shipley *et al.*, 1979; Leggett *et al.*, 1985)。

1995 年、それまで 40 年以上の間に蓄積された地震探査データを再解釈して BSR を抽出する作業が石油公団 (現・エネルギー・金属鉱物資源機

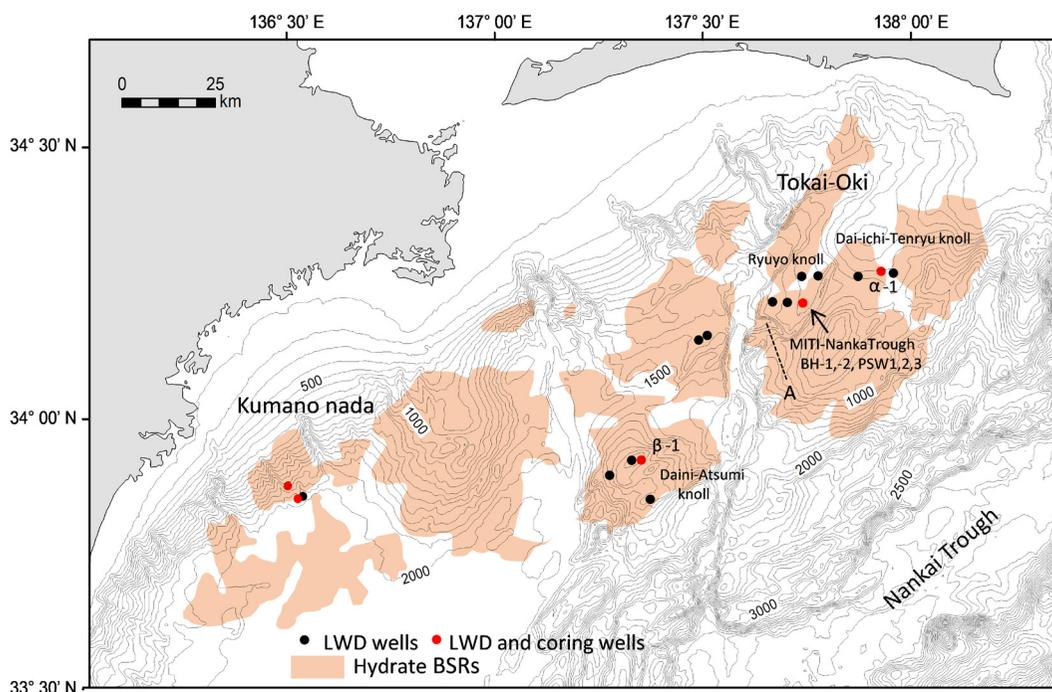


図 3 東部南海トラフ域の BSR 分布および本稿で引用する海域と掘削サイト。BSR 分布と掘削サイトは Tsuji *et al.* (2004), Hiroki *et al.* (2004), 藤井ほか (2009) より。第一天龍海丘および第二渥美海丘の上で LWD とコアリングを実施したサイト (赤点) はそれぞれ 1 点のみであり、それらを α -1, β -1 とみなした。A は図 4 の震探測線。

Fig. 3 Distribution of BSR and selected drill sites in the eastern Nankai Trough. A is the seismic line in Fig. 4. Data from Tsuji *et al.* (2004), Hiroki *et al.* (2004) and Fujii *et al.* (2009). LWD + Coring sites (red dots) on the Dai-ichi Tenryu knoll and Dai-ni Atsumi knoll are assumed to be α -1 and β -1 of Fujii *et al.* (2009), respectively.

構：JOGMEC) と民間各社の共同研究として実施され、既存データに東部南海トラフなどの新規データも加え、2010 年、日本周辺海域の BSR 分布図として公表された (林ほか, 2010) (図 2)。北海道周辺から先島諸島を含む日本周辺海域をほぼカバーする総測線長 8,700 km の地震探査断面と 2,200 km² の 3 次元探査データの解釈に基づく分布図によると、BSR は南海トラフ域、房総・茨城沖、北海道南東方、佐渡～能登半島から、隠岐トラフ、対馬海盆、琉球トラフにも見られ、分布面積は全体で 122,000 km² と見積もられる。

III. 東部南海トラフのメタンハイドレート

1) 研究開発プロジェクトの立ち上げ

通商産業省 MITI (現在の経済産業省 METI) が立ち上げたメタンハイドレート開発促進事業は

南海トラフに沿った前弧海盆の東海沖から熊野灘までを対象とし、プロジェクトではここをとくに“東部南海トラフ”と呼んでいる (図 3)。フィリピン海プレートがユーラシア・プレートに沈み込むプレート境界である南海トラフの付加体・陸側斜面域では、メタンハイドレートが注目される以前から日本列島のテクトニクスと巨大地震発生のメカニズム解明を目的として、海上地震探査を含む総合的学術調査が実施されており、メキシコ湾西縁で報告されたメタンハイドレート由来 BSR と同様の特異な反射面の存在も認識されていた (Yamano *et al.*, 1982; Aoki *et al.*, 1982; Leggett *et al.*, 1985; Finley and Krason, 1986; Krason and Finley, 1992; Krason, 1992; 東海沖海底活断層研究会, 1999; Ashi *et al.*, 2002; Baba and Yamada, 2004)。図 4 に南海トラフにおけるメ

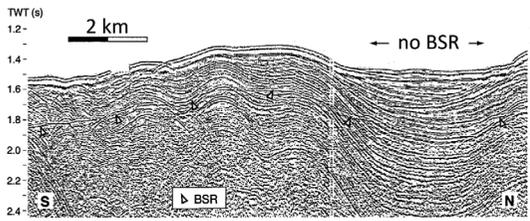


図4 小台場西縁の褶曲軸面を切るBSR (Ashi *et al.*, 2002). 図3のLine A.

Fig. 4 BSR in folded area of western margin of Kodaiba (Ashi *et al.*, 2002). Line A of Fig. 3.

タンハイドレート由来 BSR の記録を示す (Ashi *et al.*, 2002)。このような発見と、第29回万国地質学会議・京都 (29th-IGC-KYOTO) における J. Krason の “Gas Hydrates in continental margin—exploration and economic significance” (Krason, 1992) 中での言及により南海トラフのメタンハイドレートが国際的に注目を集めることとなった。

Yamano *et al.* (1982) は、メタンハイドレートの分布基底深度が地温勾配に支配される点に注目し、BSRの深度(音響探査で得られる往復走時、Two-Way Travel: TWT (sec))から南海トラフの地温勾配(=熱流量)を求めプレート沈み込みに伴う熱移動を議論している。BSRの深度変化に着目する方法は、海底下に地中温度計を挿入する従来の方法を革新する画期的な手法として、その後、多くの熱流量研究に踏襲されている(Jackson, 2004; Horozal *et al.*, 2009; Courel *et al.*, 2011)。しかしBSRによって示される時間深度(TWT sec)を真の海底下深度(mbsf)に変換するには堆積物の弾性波速度(V_p , km/sec)が必須である。地震探査データの高密度速度解析や物理検層等から V_p が得られていない場合、遠洋性堆積物の代表値とされる $V_p = 1.5$ km/sec (Hamilton, 1978)などが代用されることがあり、得られた熱流量の解釈には注意が必要である。

2) 東部南海トラフにおける地震探査と掘削調査

1997年、地震探査で0.32 TWT sec(往復走時)付近にBSRが確認されている東海沖の“竜

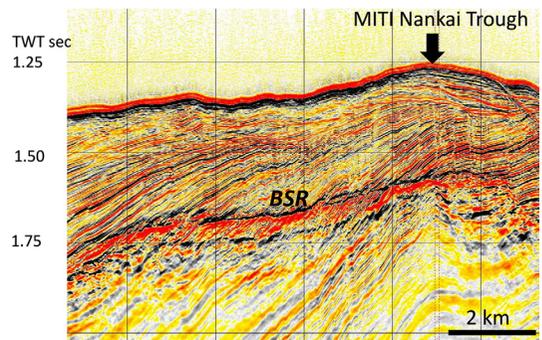


図5 東部南海トラフ竜洋海台の基礎試錐「南海トラフ」掘削サイトとダブルBSR (Matsumoto *et al.*, 2004)。

Fig. 5 Location of Kiso-shisui Nankai Trough on Ryuyo Plateau, showing double BSRs (Matsumoto *et al.*, 2004)。

洋海台”(長久保ほか, 2009)(正式な地形名ではないため引用符を付したが以下では引用符を外した)(図3, 図5)(水深約950 m)に、基礎試錐「南海トラフ」の事前調査坑として掘削深度約250 mの調査坑BH-1, BH-2 (137_44'57", 34_13'06") (Hiroki *et al.*, 2004)が掘削され(図6), 31個のスポットコア試料が採取された。上部70 mは均質なシルトが卓越, 70~150 mは砂層を挟在, 150~250 mは砂泥互層(タービダイト)からなる。回収された砂層には含有されていたハイドレートの吸熱分解による低温異常とハイドレート由来水による間隙水の低塩分異常が観察され, BSRがハイドレートによるものであることが確認された(Hiroki *et al.*, 2004; Tsuji *et al.*, 2004)。

1999~2000年には事前調査孔BH-1, BH-2 (137_45'57.00", 34_13'06.00")近くの水深945 mに基礎試錐「南海トラフ」(137_45'02.63", 34_12'56.07") (Tsuji *et al.*, 2004)が掘削された(図5)。このサイトでは時間深度0.04 TWT (sec)のBSRの下位にもう一枚のBSRが観測され二重のBSR(double-BSR)となっている。上位のものは外縁隆起帯の隆起に伴い浅化した現在の温度・圧力を反映するBSR, 下位のものは隆起前の残存BSRと解釈される(東海沖海底

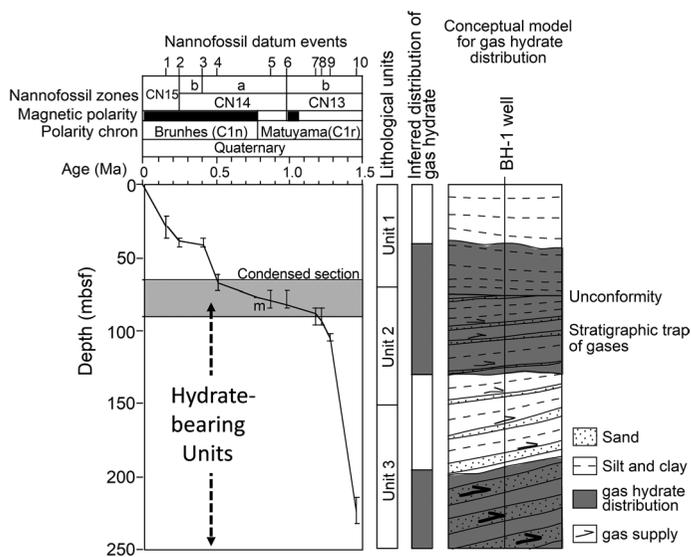


図6 基礎試錐「南海トラフ」の事前調査坑BH-1の古地磁気層序に基づいた地質年代-岩相ダイアグラム。ハイドレートはユニット2と3の砂層に胚胎する(Hiroki *et al.*, 2004)。

Fig. 6 Age-depth diagram of pre-survey well BH-2 based on magnetic chronostratigraphy. Gas hydrates are identified in sandy intercalation of Units 2 and 3 (Hiroki *et al.*, 2004).

活断層研究会, 1999; Matsumoto *et al.*, 2004)。BGHSの浅化により安定領域基底付近のハイドレートは不安定化して分解するためBGHS層準に沿って広範囲に流動化する可能性が指摘されている(Kvenvolden, 1993)。実際、南海トラフ東海沖ではBSRに収斂する複数の断層群と斜面崩壊が記録されている(東海沖海底活断層研究会, 1999)。

基礎試錐「南海トラフ」は浅部のメタンハイドレートだけでなく深部の在来型石油・天然ガス鉱床の探鉱も目的としていたが、本坑掘削後にはメタンハイドレートのみを対象とした追加調査坑PSW-1(WL検層)(137_45'03.01", 34_12'56.22"), PSW-2(コアリング)(137_45'03.39", 34_12'56.38"), PSW-3(WL検層)(137_45'04.34", 34_12'53.38")が竜洋海台に掘削された。物理検層は265 mbsf付近にBGHSを認定、海底下約200~265 mbsfの数層準にハイドレートの存在を示す速度異常と比抵抗異常を認めた(例えば, Inamori and Hato, 2004)。さらに地下の圧力を保持したコア回収が可能な保圧コアラ(Pressure Temperature Core Sampler: PTCS)によりメタンハイドレート含有コアの採取に成功した。この結果、海底下190 mbsfから268 mbsfの間の複数の砂層の孔隙中

にメタンハイドレートが存在することが確認された(若月ほか, 2002)。

2002~2004年には東海沖から熊野灘の広い範囲(図3)を対象として三次元物理探査「東海沖~熊野灘」(2002年)と基礎試錐「東海沖~熊野灘」(2004年)が実施された。2D/3D地震探査データから解釈された東部南海トラフのBSRの分布面積は4,687 km²に達する(藤井ほか, 2009)。さらに検層および全層コアリングのため、東海沖、竜洋海台近くの第一天竜海丘(水深720 m)においては海底面からの深度245 mbsfのBGHSを貫通して掘削深度約250 mの孔井α-1、渥美半島沖約80 kmの第二渥美海丘(水深1,006 m)では海底面からの深度340 mbsfのBGHSを貫通して掘削深度約380 mの孔井β-1の掘削が実施された(例えば, 武内・松本, 2009; 藤井ほか, 2009)(図3)。いずれのサイトにおいても、タービダイトの砂層部分にメタンハイドレートの発達を示す高速度・高比抵抗異常(中水ほか, 2004; Tsuji *et al.*, 2004)と間隙水の低塩素濃度異常が確認された(武内・松本, 2009)。

3) メタンハイドレート胚胎層の岩相と年代

東部南海トラフのメタンハイドレートは下部更新統のタービダイ層を主要な胚胎層準としている(Hiroki *et al.*, 2004; 高野ほか, 2009)。BH-1コ

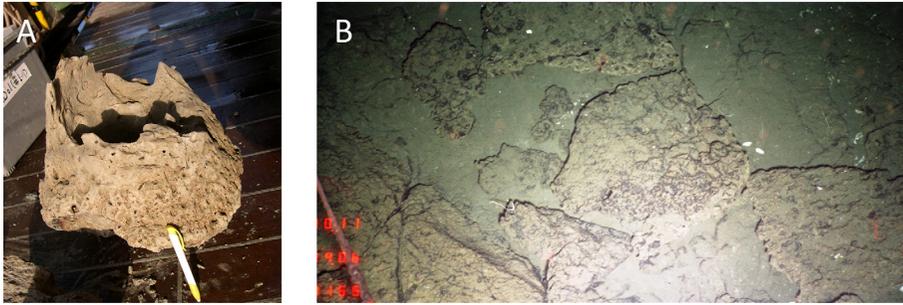


図 7 A: 第二渥美海丘の頂上付近で見られたチムニー状の炭酸塩コンクリーション。B: 層状炭酸塩 コンクリーション。白い破片は貝殻 (恐らくシロウリガイの死貝)。

Fig. 7 Chimney-like carbonate concretion (A) and bedded-carbonate pavements (B) on Dai-ni-Atsumi Knoll. White fragments on B are dead *Calyptogena*.

アの微化石および古地磁気層序によると、ハイドレート含有砂層に特徴づけられる 70 mbsf 以深は石灰質ナノ化石帯の CN13 と CN14 を含む松山逆磁極期 (0.773 ~ 2.595 Ma), シルトが卓越する上半部は CN14 と CN15 を含むプリュンヌ正磁極期 (0.0 ~ 0.773 Ma) に対比される (図 6)。境界層準付近 (70 ~ 90 mbsf) は堆積速度が著しく遅く不整合に伴うコンデンスト・セクションと説明される (Hiroki *et al.*, 2004)。不整合境界は南海トラフのテクトニクスに由来するオンラップ不整合と解釈される (荒井ほか, 2006)。これらの考察から、メタンハイドレート胚胎層準であるタービダイト層は下部更新統, 上位のシルト層は中部更新統であることが明らかとなった。

4) 東部南海トラフのメタンフラックス

2002 ~ 2003 年と 2003 ~ 2004 年の 2 回, 東海沖から遠州灘, 熊野灘の約 30 サイトにおいてピストンコアと重力コア, グラブ採泥器を用いた海底地質・地化学調査が実施された (松本ほか, 2003; Matsumoto and Chen, 2003)。間隙水の硫酸濃度がゼロとなる深度 (Sulfate-Methane Interface: SMI) は, 東海沖 (竜洋海台) と遠州灘では 4.5 ~ 7.5 mbsf, 熊野灘では 20 mbsf 以深と深く, 第二渥美海丘の北斜面では 2.0 ~ 3.5 mbsf と比較的浅いことがわかった。海底面から下位へ拡散する海水由来の硫酸 (28.0 mMol/L) は深部由来のメタンとの嫌氣的反応で消費され,

その消滅深度 (SMI) はメタンフラックスが大きいほど浅くなることが知られている (Borowski *et al.*, 1996)。メタンフラックスと濃度勾配, 孔隙率, 拡散係数の間には以下の関係があり, この関係を利用して当該海域のメタンフラックスを見積もることができる。

$$J_{\text{SO}_4/\text{CH}_4} = -\Phi \cdot D_{\text{sed}} \frac{\partial C}{\partial X} \quad (1)$$

Φ : porosity

D : diffusion coefficient

含水率から見積もった表層堆積物の孔隙率を 0.65 (Matsumoto and Chen, 2003), 硫酸の拡散係数を $D_{\text{sed}} = 0.87 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$ (Iversen and Jorgensen, 1993; 戸丸・松本, 2018, 2019) とすると, 東海沖と熊野灘のメタンフラックスは $J_{\text{SO}_4/\text{CH}_4} = 0.02 \sim 0.13 \text{ mol/m}^2/\text{year}$, 沈み込みに伴う断層が複数発達する第二渥美海丘では $J_{\text{SO}_4/\text{CH}_4} = 0.16 \sim 0.22 \text{ mol/m}^2/\text{year}$ と計算される。

第二渥美海丘の頂部付近 (Ashi, 1997; Ashi *et al.*, 2002) の海底には炭酸塩コンクリーション (図 7) が多産する。炭酸塩コンクリーションは SMI 付近でのメタン-硫酸還元反応により生成するもので (例えば, Matsumoto *et al.*, 2017a, b, c), 炭酸塩コンクリーションの多産はメタンフラックスが高かったことを強く示唆する。

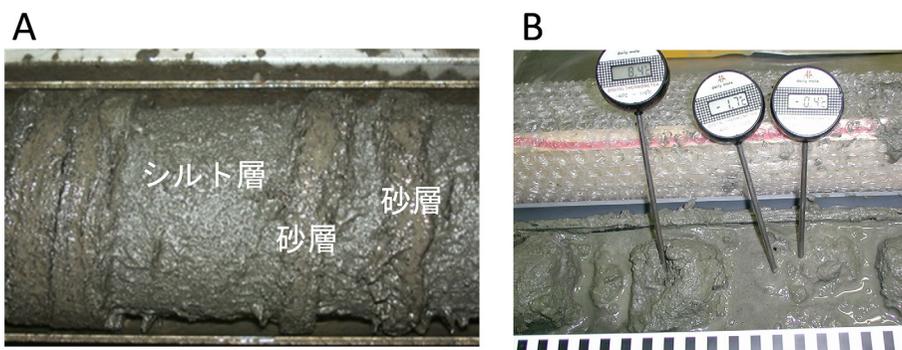


図 8 A: 基礎試錐「南海トラフ」で回収されたメタンハイドレート含有砂泥互層。砂層部分 (3 ~ 7 cm) は微小なハイドレートで膠結されている。B: 回収中の温度上昇と圧力低下により分解した砂層充填ハイドレート。吸熱分解による温度低下と、ハイドレート由来の“淡水”による低塩分化が認められる。

Fig. 8 A: Hydrate-bearing sand-mud alternation unit recovered at Kiso-shisui Nankai Trough. Sand layers, 3 to 7 cm thick, are cemented by fine-grained hydrate. B: Hydrate-bearing sandy intercalations collapsed due to dissociation of hydrate during core-recovery. Low-temperature and low-salinity anomalies due to endothermic dissociation of hydrates are widely recognized over the cores.

5) メタンハイドレートの産状と起源

南海トラフのメタンハイドレートはタービダイト砂層の孔隙を充填して発達しており、孔隙充填型あるいは砂層充填型と呼ばれる (Uchida *et al.*, 2004; Uchida and Tsuji, 2004; 鈴木ほか, 2009; 武内・松本, 2009)。非保圧コアラーではコア回収後、船上での観測までの間にハイドレートの多くは吸熱分解し砂層部分は水漬け状態を呈する (図 8A, B) が、ハイドレート由来水による低塩分異常と顕著な低温異常とから、原位置 (“その場” *in-situ*) において砂層はハイドレートにより膠結されていたと判断される。

海底に堆積した砂層の初期孔隙率は 50 ~ 60% (松本, 1978) であるが埋没に伴う圧密と砂粒子の回転により粒子間隙は減少し東部南海トラフのハイドレート賦存深度では 40 ~ 45% と報告されている (例えば, Fujii *et al.*, 2015; Suzuki *et al.*, 2015; 松本ほか, 2024, *in press*)。東部南海トラフのハイドレートはこのような孔隙を充填して生成しており、孔隙率がハイドレート含有量の最大値となる。砂層は強固な枠組構造をつくるため、ハイドレートの生成・分解だけでは堆積構造は崩壊しないと考えられる。カナダ・マッケンジーデルタなど掘削調査が先行している多くの永久凍土

域や海域においても主要なハイドレート胚胎層は砂層やレキ層であり、孔隙充填型ハイドレートが濃集帯を形成している (例えば, Collett, 1993)。

東海沖の竜洋海台と第一天竜海丘における掘削調査で保圧コアラー PTCS により回収されたメタンハイドレートの全分解ガスは、ほぼ 100% メタンからなる (Waseda and Uchida, 2004a, b)。メタンは著しく ^{13}C に欠乏 ($\delta^{13}\text{C} = -96 \sim -63\%$) した微生物分解起源であり、エタンより重い炭化水素は検知されていない。竜洋海台の基礎試錐「南海トラフ」で熱分解起源のメタン ($\delta^{13}\text{C} > -50\%$) が出現するのは下部中新統の 1,555 mbsf 以深であり、ハイドレート安定領域 (< 270 mbsf) ではすべて $\delta^{13}\text{C} < -60\%$, $\text{C}_2 = 0$ ppm であり、熱分解起源ガスの寄与は認められない (Waseda and Uchida, 2004a, b)。泥火山が発達する熊野灘の掘削サイトでは安定領域内の数か所で熱分解起源の寄与を示唆する $\delta^{13}\text{C} = -55\%$ 前後で $\text{C}_1/(\text{C}_2 + \text{C}_3) = 1000 \sim 2000$ を示す試料が得られたが、他の試料はすべて $\delta^{13}\text{C} < -55\%$ であった (Waseda and Fujii, 2008; Uchida *et al.*, 2009)。これらの結果から、東部南海トラフに広域的に分布する砂層充填型メタンハイドレートは微生物分解起源ガスに由来し、熱分解起源ガスの寄与はき

わめて小さいと結論される。

6) 海洋産出試験

東部南海トラフの海底下 200 ~ 300 mbsf の砂層に胚胎するハイドレートからのメタン生産としては“その場”で分解・ガス化したメタンを回収する方法が採用されている。“その場”分解には温水を注入する熱刺激法と“その場”の圧力（静水圧）を下げた分解する減圧法とがある。2002年と2007年にカナダ永久凍土域のメタンハイドレート層で実施されたテスト結果（山本・佐伯, 2009）を踏まえ、東部南海トラフでの海洋産出試験では減圧法が採用されている。減圧法とは生産パイプ内から水をポンプで汲み出すことにより生産区間の圧力を下げハイドレートの分解を促すというものであるが、分解の際には熱が必要で、周囲の地層熱が分解のための熱源となる。その意味で減圧法とは減圧刺激による熱分解促進と言える。

第1回海洋産出試験は2013年3月に第二渥美海丘の北側斜面上部の水深約1,000 m、海底下約270 mbsf から340 mbsf のハイドレート濃集帯を対象に実施され、日産平均20,000 m³ のガス生産に成功したが、ハイドレート分解に伴う砂層の崩壊・出砂により産出試験は6日間で終了した（JOGMEC, 2013）。産出（＝ハイドレートの分解）に伴い産出区間の地層温度が最大4°Cほど低下し、地温の回復には試験終了後4か月かかったとの報告がある（Yamamoto *et al.*, 2017）。出砂による生産障害とともに地層の温度低下が減圧法において解決すべき課題の一つである（NETL, 2020）。第2回の産出試験は2017年5月～6月、第1回試験と同じ場所でやはり減圧法で実施された（山本, 2018; 山本・藤井, 2018; Yamamoto *et al.*, 2019）。場所を移動し2か所での産出試験は36日間で約260,000 m³ のガスを生産したが、第1回と同様に産出が大きな問題であった。この時生産されたガスの総量はメタンハイドレートに換算して1,511 m³ であり、直径5 m、高さ70 m（ほぼ生産区間の厚さ）の円柱にほぼ相当する。

IV. 日本海東縁のメタンハイドレート

1) 日本海の形成と環境変動

日本海は、漸新世後期にユーラシア大陸東縁の地殻が薄化して開裂、引き続く“古日本海”の拡大によって形成され、2～3 Ma 頃にほぼ現在の形になったとされる（例えば、岡村, 2000）。閉鎖的で嫌氣的な海底には大量の有機物が堆積・埋没し、これらは微生物による分解と若い海盆の高熱流量による熟成を受け、炭化水素を集積したと考えられる。

鮮新世-更新世境界付近で、日本海のテクトニクスは拡大から収縮に転じ（テクトニック・インバージョン）、東北日本弧の日本海側と日本海東縁には閉じた背斜構造と逆断層が発達、これらをトラップ構造とする石油・天然ガス鉱床が形成された。同時に、深部断層を経た浅部へのガス移動が進み、海底直下にはメタンの逸脱経路としてのガスチムニー構造が形成され、メタンハイドレートの集積が進んだと考えられる。

現在の日本海の最大水深は3,800 m に達するが、外洋とは水深100～130 m の狭く浅い海峡で繋がるのみである。第四紀後期には、氷期・間氷期の海水準変動に伴い、海洋環境が劇的に変動したことが知られている。とくに、最終氷期最盛期には100 m 以上の海水準低下によって外洋から閉ざされ、深層は強い還元的環境になったことが底生生物の痕跡を含まない暗色薄葉理層（TL層）の発達など堆積学的・地球化学的証拠から明らかにされている（中川ほか, 2009; 角和ほか, 2013; 秋葉ほか, 2019）。海水準低下に伴う静水圧の減少はBGHSの浅化を引き起こし、BGHS直上のメタンハイドレートの分解と上方へのメタンフラックス強化を促進したと考えられる（Matsumoto *et al.*, 2004; 松本ほか, 2009）。

2) ガスチムニーと表層型メタンハイドレート

1995年に国の開発可能性調査がはじまる以前から、南海トラフでは広い範囲でBSRが確認されていたが、日本海側では西津軽沖と佐渡沖などで小規模なBSRが報告されるのみであった。しかし、2001年、石油公団（現・エネルギー・金

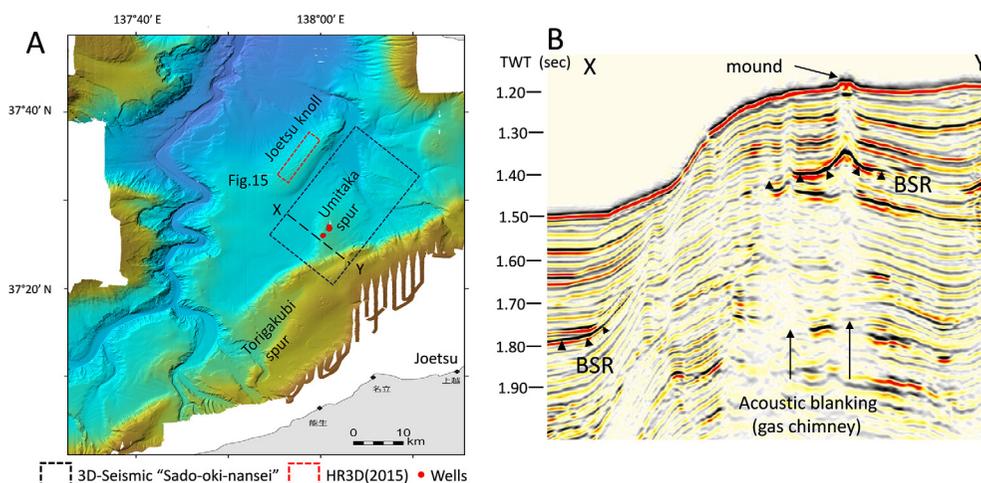


図 9 A: 日本海東縁上越沖の調査位置図。海鷹海脚，上越海丘，鳥が首海脚。B: 上越沖海鷹海脚に確認された BSR。測線 X-Y は原図の X line 1000。基礎物理探査「佐渡沖南西」(石油公団, 2002)。

Fig. 9 A: Locations of survey area off Joetsu, Niigata Prefecture. Main targets are Umitaka spur, Joetsu knoll, and Torigakubi spur. B: BSRs on Umitaka spur off Joetsu on X-Y. Data from Sado-oki-nansei (JNOC, 2002).

属鉱物資源機構)による佐渡沖3次元地震探査(基礎物理探査「佐渡沖南西」)(石油公団, 2002)は上越沖～佐渡南西沖海域の広い範囲に顕著なBSRが発達していることを明らかにした。BSRの時間深度(TWT)は水深約900mの海脚上では約200 msec, 水深約1,100mの海盆では約300 msec(図9)を示し, 日本海にもメタンハイドレートが存在する可能性が高まった。

基礎試錐「佐渡南西沖」の予備調査として実施された2003年の採泥調査では, BSRが確認されていた新潟県上越沖約30kmの海脚頂部から直径数cmのメタンハイドレート片が回収された(門澤ほか, 2006)。これらの成果を受け, 2004年には東京大学の研究チームによる最初の学術調査航海(海鷹丸航海UT04)が実施され, 同年, 東京大学, 東京海洋大学, JAMSTECなどにより日本海ハイドレート学術調査コンソーシアム(以下, 日本海コンソーシアム)が立ち上げられ分野横断的調査研究がはじまった(例えば, 竹内ほか, 2007; Hiruta *et al.*, 2009; 松本ほか, 2009; 上嶋ほか, 2009; 荻原ほか, 2009; 的場・中川, 2009; 中川ほか, 2009; 町山ほか, 2009; 松本・青山, 2020)。

日本海コンソーシアムは, メタンハイドレート

が最初に採取された海脚(以後“海鷹海脚”と呼ぶ。正式な地形名ではないので引用符を付したが以下では引用符なしとする)とその北約20kmの上越海丘(図9, 10)およびこれら海脚・海丘周辺の花盆において, マルチビームエコーサウンダー(Multi-Beam Echo Sounder: MBES)を用いた高分解能海底地形調査, サブボトムプロファイラー(Sub-bottom Profiler: SBP)による海底下地質構造の詳細調査, 無人探査機(Remote-operated-vehicle: ROV)による海底観測およびピストンコアによる採泥, 採取されたコア試料の地化学調査を行い, 海脚の表層堆積物中にメタンハイドレートが分布するなど, 日本海の花ドレートは東部南海トラフをはじめそれまでに報告されていた花ドレートとは異なる産状と起源をもつものであることを明らかにした(例えば, 松本, 2009; Matsumoto *et al.*, 2017a, b)。

花ドレートが回収された海脚・海丘上には海底面での直径数100mで海底から深部へ向かうチムニー状の音響ブランキング帯が発達する(図10)。このような構造をガスチムニー(あるいはガスチムニー構造)と呼ぶ。ブランキング帯の頂部, 海底部分ではしばしば高さ数m～10数

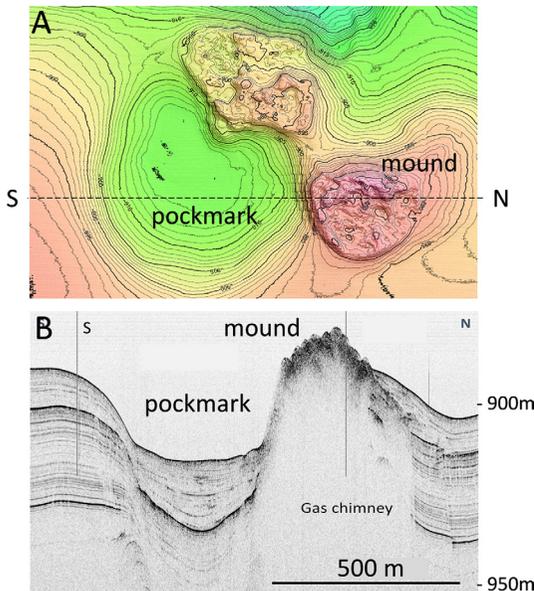


図 10 A: 上越沖、海鷹海脚中央部のマウンドとポックマーク。右側が北。B: S-N 測線上の SBP イメージ。海洋研究開発機構 (JAMSTEC) の 2010 年よこすか航海 (YK10-08) において「AUV うらしま」で採取された SBP-Dive 115 Line 6。

Fig. 10 A: Gas chimney and hydrate mounds in central part of Umitaka Spur, off Joetsu. North is on the right. B: SBP images along line S-N obtained by AUV Urashima Dive 115 Line 6 during JAMSTEC R/V Yokosuka cruise (YK10-08) in 2010.

m の凸部 (マウンド) が発達する。一方、ガスチムニー構造に近接して、直径数 100 m の凹地 (depression) が発達することがありこれはポックマークと呼ばれる (図 10)。ポックマークは深部ガスの爆発的放出の痕跡、あるいは深部メタンハイドレートの分解に伴う陥没 (松本ほか, 2009) などと説明されるが形成過程の詳細は不明である。

メタンハイドレートを胚胎するブランキング構造は当時すでにカナダ・カスカディア沖の震探断面 (Wood *et al.*, 2002) で確認され、海底部分に炭酸塩チムニーが発達することから深部メタンの逸脱構造と説明された。上越沖で発見されたブランキングもガスの逸脱が集中する構造と考えられる。気泡の湧出あるいはメタン含有湧水を伴うガ

スチムニーはカナダ・バンクーバー沖 (Chapman *et al.*, 2002; Pohlman *et al.*, 2013)、タートル海峡 (Shakirov *et al.*, 2019)、カッディツ湾 (Guillamon *et al.*, 2023)、マカッサル海盆 (Jackson, 2004) などの縁海域で多数報告されており、資源評価の視点からだけでなく、海洋へのメタン湧出場として環境インパクトの視点からも重要である。

日本海でもマウンド上には層状あるいはレンズ状の炭酸塩コンクリーションが多産し、バクテリアマットや化学合成生物群集に特異的に出現するキスタレガイ類、ハナシガイ類、ハイバプリニナ類の生体や殻も採取されている (Numanami *et al.*, 2017)。マウンドには高さ数 m の崩壊地形が発達し崩壊断面には塊状あるいは脈状のメタンハイドレートが露出することがある。海底近くで過飽和となりバブルとなったメタンによりハイドレート生成が加速し (Trehu *et al.*, 2004)、海底面では化学合成生物群が多産、海底下では海水硫酸による嫌氣的メタン酸化による炭酸塩鉱物の生成など、メタン由来の様々な現象が進行していると考えられる (図 11)。

マウンドおよびその近傍表層堆積物の間隙水硫酸濃度プロファイルが示す SMI は 0.5 ~ 1.5 mbsf ときわめて浅く、海脚・海丘上ではどこでも 2.5 mbsf 程度、海脚・海丘の間の海盆域でも 3.0 ~ 4.0 mbsf であった (Hiruta *et al.*, 2009)。前述の関係式 (1) (Borowski *et al.*, 1996) に従うと、メタンフラックスはマウンド周辺で $J = 0.6 \sim 1.0 \text{ mol/m}^2/\text{year}$ となり、これは東部南海トラフでメタンフラックスが最も高い第二渥美海丘北斜面の約 5 倍に相当する。

日本海のハイドレートは、調査の初期段階では海底下の比較的浅層から回収されたため表層型メタンハイドレートと呼ばれたが (松本ほか, 2009)、調査の進展により、表層だけでなくガスチムニーの内部、海底下 100 mbsf 以深の BGHS にまで存在することが明らかとなった (松本ほか, 2024, in press)。しかし、ガスチムニー中のハイドレートの主たる生成場は海底下数 mbsf ~ 25 mbsf と考えられ (Torres *et al.*, 2004a, b; Hiruta and Matsumoto, 2022)、深部のハイドレートは

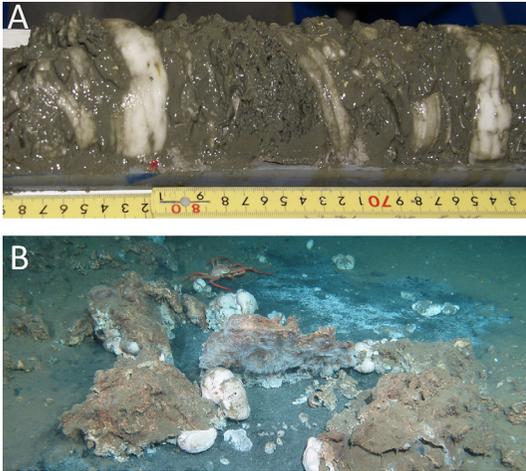


図 11 A: ピストンコアリング (PC502) で海底下約 3 m より採取されたレンズ状～粒状ハイドレート。 B: 上越沖, 上越海丘のメタン湧出サイト。メタンの酸化に由来する炭酸塩コンクリーション, バクテリアマット, 化学合成生物の一種である海綿動物とベニズワイガニ (なつしま航海 NT07)。

Fig. 11 A: Granular and lenticular hydrates in core PC502 on Umitaka Spur. B: Methane-derived authigenic carbonates, bacterial mats, chemosynthetic-sponges, and snow crabs on active methane seep sites, Joetsu Knoll (Natsushima cruise NT07).

表層で生成したものが埋没したものあるいは割れ目を充填したものと解釈される。したがって、想定される生成場に着目すると“表層型”は適切な命名であった。

3) ガスチムニーの掘削と表層型メタンハイドレートの回収

2004 年以降の学術調査では、コア長 8 m 以下のピストンコアラおよび重力コアラによる掘削・採泥によりマウンドの表層堆積物から多数のメタンハイドレート試料が回収され、表層付近にメタンハイドレートが密集することが確認されたが、ブランキング構造 (ガスチムニー) が発達する深部にもメタンハイドレートが存在するか否かは不明であった。2010 年、経産省予算による産総研と東京大学の共同研究として、フランス海洋研究所 (IFRMER) の海洋調査船 Marion Dufresne 号の長尺ピストンコアラ (Calipso, L = 40 m)

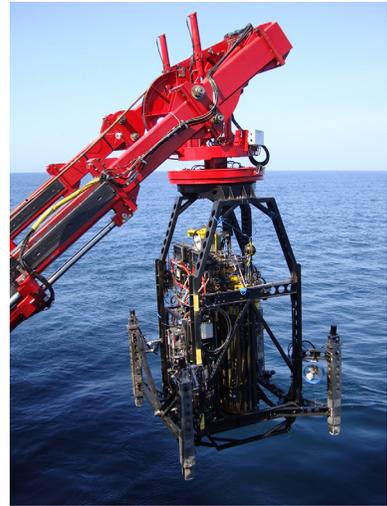


図 12 ガスチムニー掘削に使用したイギリス地質調査所 (BGS) の海底設置型掘削装置 (RockDrill)。

Fig. 12 Seabed drilling machine (Rock Drill) of British Geological Survey (BGS) penetrated gas chimneys.

と頑丈なボックスコアラ (CASQ, L = 10 m) によるコアリング調査 (MD179) が実施された (角和ほか, 2013)。ガスチムニーの外側でメタンハイドレートをほとんど含まないサイトでは、深度 40 mbsf までを連続的にカバーする標準的層序コアが採取されたが、ガスチムニー内への貫入は深度 10 m 以浅でブロックされてしまった。重量 4 トンの錘のためコアリング・パイプは折れ曲がり、回収されたコアラはシルト質マトリックス、破碎されたハイドレート片と炭酸塩コンクリーションで満たされていた。ガスチムニー深部からのコア回収には失敗したが、ガスチムニー深部には重さ 4 トンのコアラでも貫入できない塊状メタンハイドレートが存在することを示唆するものであった。

2013 年、東京大学と民間企業との共同研究として、イギリス地質調査所 (British Geological Survey: BGS) が所有する海底設置型掘削装置 (RockDrill) によるガスチムニー掘削が実施された (図 12)。回転式ビットをもつ RockDrill は上越沖の複数のガスチムニーにおいて、シルト、炭

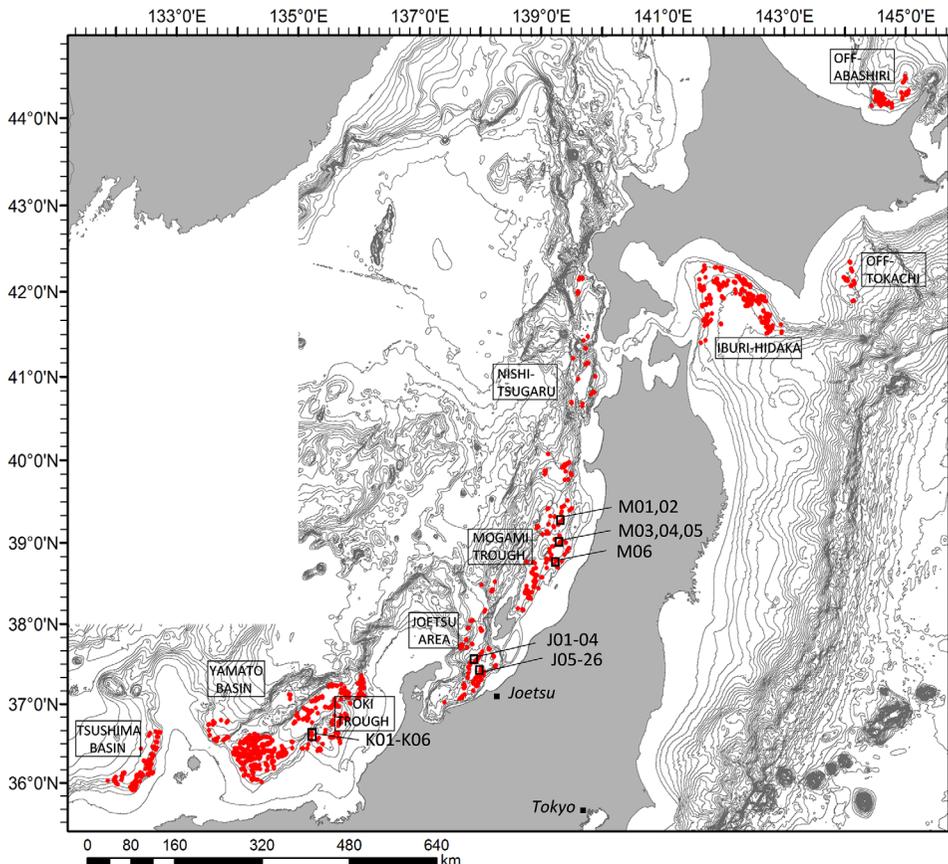


図 13 日本海東縁と北海道周辺海域の 1742 か所で音響ブランキング帯を伴うガスチムニー構造 (赤点) が確認された (Matsumoto *et al.*, 2017a, b, c). これらのうち、最上トラフの 6 サイト (M01 ~ M06)、上越の 26 サイト (J01 ~ J26)、隠岐トラフの 6 サイト (K01 ~ K06) で、コア採取 (R) および LWD 物理探査 (L)、あるいはどちらか一方の掘削調査が実施された。R 孔と L 孔の距離は 10 m 以内である。

Fig. 13 1742 gas chimney structures characterized by acoustic blanking (red dot) are identified in the eastern margin of the Sea of Japan and around Hokkaido Island (Matsumoto *et al.*, 2017a, b, c). Coring (R-site) and/or LWD geophysical surveys (L-site) were conducted at six sites (M01-M06) in Mogami trough, 26 sites (J01-J26) off Joetsu, and 6 sites (K01-K06) in Oki trough. Distance between R and L is less than 10 meters.

酸塩コンクリーションとハイドレートが混在する堆積層のコアリングに成功し、海底から少なくとも 32.0 mbsf まで塊状ハイドレートが存在すること、メタンハイドレートをつくるメタンには熱分解起源が含まれること、ガスチムニー深部にもメタン由来の炭酸塩コンクリーションが存在することなどを明らかにした (松本・ウイルソン, 2014)。

日本海のハイドレート学術調査は 2011 年より

国の研究開発プロジェクトの一部となり、対象海域は北海道周辺から島根県沖合まで拡大された。MBES や SBP を用いた海底地形・地質構造の音響探査、ROV と AUV による海底観測、LWD 検層や掘削により、網走沖、十勝沖、胆振沖、西津軽沖、最上トラフ、上越沖、隠岐トラフ、大和海盆、対馬海盆のいずれも水深約 500 m から 1,500 m の海底の 1,742 か所にガスチムニー構造を確認した (図 13) (経済産業省資源エネルギー庁、

2016)。ここでは海底地形異常と海底下へ鉛直に発達する音響ブランキングの発達を“確認ガストムニー”の認定要件とした(大井ほか, 2016; Matsumoto *et al.*, 2017a, b)。現在まで SBP 調査未了の特異点が多数調査待ちであるため、今後の調査により“確認ガストムニー”の数は飛躍的に増える可能性がある。

4) ハイドレート胚胎層の層序と堆積環境

ガストムニーが発達する海丘・海脚とその周辺海盆の堆積物は半遠洋性のシルトからなり稀に火山灰テフラと細粒砂を挟在する。シルト中には日本海が停滞的・貧酸素的環境であった氷期・海水準低下期の暗色薄葉理層(TL層)(厚さ数10cm～数m)が多数発達する。海鷹海脚上の10サイトのピストンコア試料について詳細な底生・浮遊性有孔虫解析を行った中川ほか(2009)は海脚上の海底から2～6 mbsf付近、最終氷期の海水準低下期に対応する暗色層(TL-2; 26～17 ka)が底生有孔虫数の極小帯をなし、*Bolivina pacifica* や *Rutherfordoides rotundata* などの内生型種に特徴づけられていることを明らかにし、当時底層は強い還元的环境であり、かつメタンの影響が顕著であったと結論づけている。

調査海域で掘削されたコアのうち、掘削障害等による層序の乱れのないコア試料(数10～120 mbsf)について、珪藻層序、有孔虫の¹⁴C年代測定、テフラ層序、古地磁気層序、および有孔虫殻の酸素同位体比の Marine Isotope Stage (MIS)への対比により、海域毎に詳細な年代モデルが作成された(図14)(Oi *et al.*, 2017)。異なる海域の対比と年代決定では300 kaで絶滅した珪藻 *Proboscia curvirostris* の LAD がとくに有効であった(Oi *et al.*, 2017; 大井ほか, 2018)。

隠岐トラフ域のガストムニーの外で掘削された擾乱のないコアの古地磁気層序ではブルンクロン(C1n)と松山クロン(C1r)の境界(M-B境界=0.77 Ma)が63.2 mbsfに出現することが示され(下野・松本, 2018)、平均堆積速度は0.08 m/kyrと計算される(図14)。上越沖、海鷹海脚では87.9 mbsfが珪藻絶滅 LAD の0.30 Maであるので、堆積速度は0.29 m/kyr、隠岐トラフ域

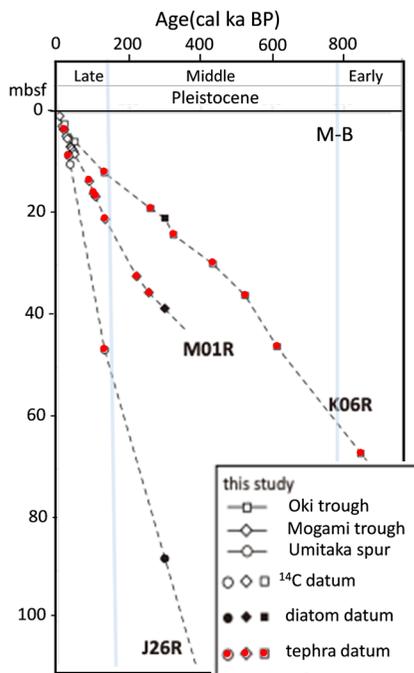


図14 日本海東縁のハイドレート含有堆積物の年代と堆積速度。ハイドレート安定領域基底は最上トラフと上越沖では120 mbsf程度、隠岐トラフ域では65 mbsf程度であるので、日本海ハイドレートの含有層はいずれも中部更新統と考えられる(Oi *et al.*, 2017; 下野・松本, 2018)。

Fig. 14 Ages and sedimentation rate of hydrate-bearing strata in the eastern margin of the Sea of Japan. BGHS occurs at approximately 120 mbsf off Joetsu (J26) and Mogami trough (M01), and about 65 mbsf in Oki trough (K06), and gas hydrate-bearing sediments are all included in the Middle Pleistocene (Oi *et al.*, 2017; Shimono and Matsumoto, 2018).

の3倍となる。最上トラフ域では珪藻絶滅 LAD の深度37.1 mbsfから0.12 m/kyrと計算される。

後述するように、LWD 検層から推定されるメタンハイドレートの安定領域基底 BGHS は隠岐トラフ域で65～70 mbsf、上越沖で110～125 mbsf、最上トラフ域では115 mbsfと想定されるので、いずれも M-B 境界の0.77 Maより若く、メタンハイドレート胚胎層準は中期更新世(チバニアン)以降であると言える。ただし、これはハイドレートが M-B 境界以降に生成・集積したこ

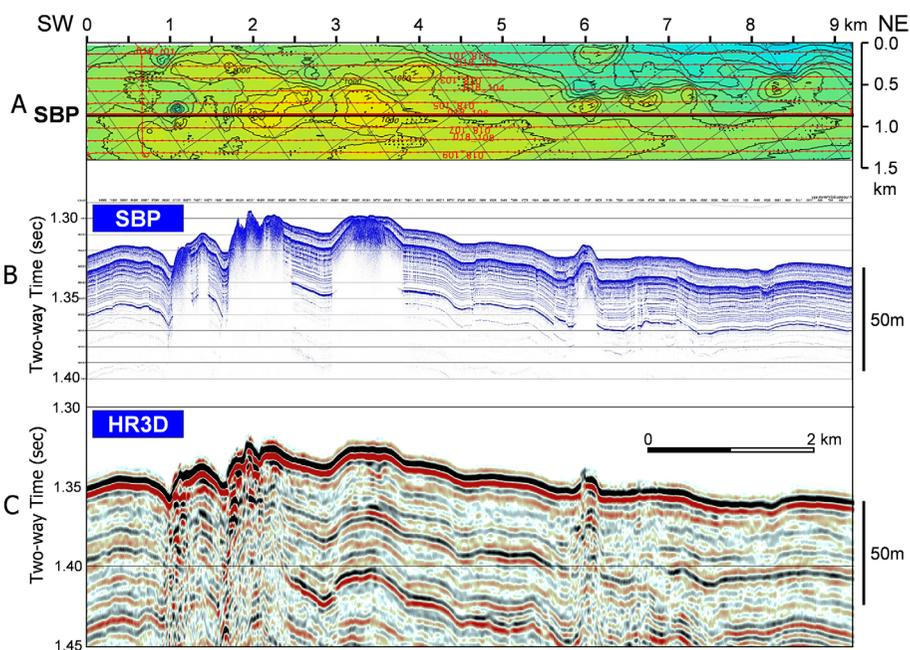


図 15 A: 測線間隔 150 m, 海底からの高度 150 m の AUV 探査で採取された上越海丘 (図 9A) のマルチビーム (MBES) 海底地形図, 等高線間隔は 5.0 m. B: 海底下浅層構造調査 (サブボトムプロファイラー: SBP) で確認されたガスチムニー (ブランキング帯). C: 高分解能三次元地震探査 (HR3D) プロファイル. ここでは海底地形図の凸部 (マウンド) の下位には音響ブランキング帯 (ガスチムニー) が発達. HR3D 探査により, ブランキング帯に成層構造が確認される. 右のスケールは堆積物の速度を 1.5 km/sec と仮定した時の深度.

Fig. 15 A: Bathymetry of Joetsu knoll (Fig. 9A) obtained by AUV surveys at 50 m high and 150 m line interval. B: Shallow subsurface structure obtained by sub-bottom profiler (SBP). C: High-resolution 3D seismic profile (HR3D) along the same line of SBP. Gas chimneys develop below the topographic high (hydrate mounds) on Joetsu knoll. HR3D image reveals the stratification in gas chimneys. Thickness scale, 50 m, is an approximate depth below seafloor, assuming sediment velocity (V_p) is 1.5 km/sec.

とを意味するものではない。胚胎層の埋没に伴い、BGHS は層位的に上位へ移動するため、下位のメタンハイドレートは分解してメタンを上方へ供給し続けることになる。このようなりサイクリング機構がガスチムニー内にハイドレートの高濃集帯をつくった要因の一つと考えられる。

5) ガスチムニーの内部構造

新潟県上越沖約 60 km, ガスチムニー構造が発達する上越海丘頂部付近の微地形 (MBES マルチビーム音響測深図) と海底下地質構造図 (SBP) を示す (図 15A, B) (Matsumoto *et al.*, 2017a)。海丘頂部には比高 10 ~ 20 m のマウンド (凸状地形) が多数発達, ROV-AUV 探査は複数のマウンドから気泡の湧出を視認している (松

本ほか, 2009)。

マウンド地形の下にガスチムニー構造が発達するか否かは SBP による音響ブランキングの有無によって明確に判定される。一方, SBP ではガスチムニー内の可視化が困難で内部構造が不可視となる。2015 年, 上越沖の上越海丘 (図 9) で高分解能三次元地震探査 (High Resolution 3D-Seismic Survey: HR3D) (図 15C) を実施し, ガスチムニーの細密な内部構造を明らかにした (大川ほか, 2016, 2017; 大川・松本, 2018, 2019)。HR3D は, 資源探査で通常実施される大規模な三次元地震探査と手法は同じであるが, 通常より短いケーブルと小容量の震源を用いた低コストで機動性に富む手法で, 表層型メタンハイドレート

の精密探査と資源量評価を可能とする有力なシステムである。

図 15B, C に上越海丘の SBP と HR3D の対比を示す。SBP では不明瞭であったガスチムニー内部の成層構造が明瞭に可視化され、ガスチムニーの外の地層面がガスチムニー内部へも追跡されることが明白である。ガスチムニー構造はその形状の類似性からしばしば異地性堆積体の貫入による泥火山・泥ダイアピールと誤認されるが、地層面の連続性はこのモデルを明確に否定する。チムニーの中と外での微化石層序対比も HR3D の解釈と整合的である (Oi *et al.*, 2017; 大井ほか, 2018)。

6) 表層型メタンハイドレートの産状と起源

日本海のメタンハイドレートは mm から cm オーダーの粒状や脈状に産するもの、数 mm ~ 数 cm の層状~レンズ状の集合体から層厚数 m 以上に達する純粋なメタンハイドレートの塊状集合体など多様である (角和・松本, 2016)。長さ 6 m の連続コアがほとんどすべて塊状メタンハイドレートということも珍しくない (図 16A)。

ガスチムニー内では、塊状、粒状、層状、脈状のメタンハイドレートに加え、炭酸塩コンクリーションが発達しているためコアの回収率も掘削速度 (掘進率) も低く、ガスチムニーの外のシルト層掘削の回収率は 90% を超えるが、ガスチムニー内の回収率は 50 ~ 70% である。炭酸塩コンクリーションは海底下数 m の硫酸・メタン境界 (SMI) 付近でのメタン-硫酸還元反応 (Anaerobic Oxidation of Methane: AOM) で生成するもので (例えば, Matsumoto *et al.*, 2017a), メタン由来生炭酸塩 (Methane derived authigenic carbonates; MDACs) と呼ばれ、過去の強いメタンフラックスを記録する化学化石と言える。

日本海の塊状・粒状のメタンハイドレートは、シルト層の泥粒子を押しつけて成長したものであり、粒子排除型 (particle displacement) と呼ばれる。メタンハイドレートの結晶成長圧が岩圧 (lithostatic pressure) より大きいことが粒子排除型・塊状ハイドレート生成の基本的条件であり、主要な生成場は海底表層から 25 m +/- 5 m 以浅

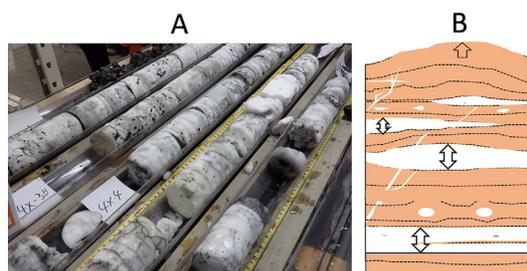


図 16 A: 調査船ポセイドン号により、海鷹海脚のガスチムニー UTCW の掘削サイト J24R から回収された全長 6.0 m の連続的塊状メタンハイドレート (Matsumoto *et al.*, 2017a, c)。B: 日本海のメタンハイドレートは周囲の粘土粒子を排除しながら生成した粒子排除型集合体である。

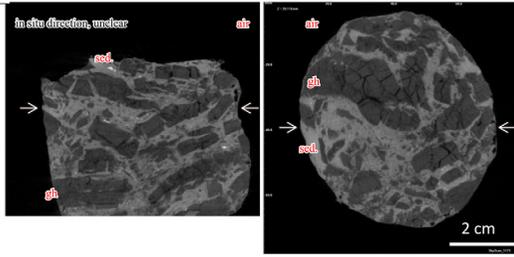
Fig. 16 A: A 6 meter-thick massive hydrate cores recovered by D/V Poseidon-1 of Fukada Salvage from gas chimney UTCW on the Umitaka Spur, September 2015 (Matsumoto *et al.*, 2017a, c). B: Methane hydrates of the Japan Sea sediments were formed as particle displacement-type aggregates, which grew and developed from minute nodular and lenticular aggregates into thick massive deposits.

とされる (Torres *et al.*, 2004a, b)。

層理に沿った厚さ数 mm から数 cm のレンズ状、層状メタンハイドレートは、粒子排除型成長の初期段階と考えられる (図 16B)。既存の試錐データによるとシルト層の初期孔隙率は 70 ~ 80% であるが (松本, 1978), 上越沖のコア分析 (片岡ほか, 2009) や LWD 物理検層では 60% 程度となる。メタンハイドレートの成長に伴い周辺のシルトは押しつけられ変形する。塊状メタンハイドレートの周辺では押しつけ効果により孔隙はさらに小さくなっていったと推定される。サンタモニカ海盆に見られる海底の高まり (マウンド) はメタンハイドレートの成長に伴う海底押し上げと説明されている (Paull *et al.*, 2008)。脈状のメタンハイドレートは割れ目充填型で、ガスチムニー全体に発達するネットワーク状のメタン移動経路に由来すると考えられる。

塊状メタンハイドレートは岩圧が高く粒子排除型成長が困難な深部にも見られる。これらは初生的には表層付近で生成したものが埋没により深部

A: J13R-02H-CC, 10.94mbsf



B: J06R-09X-CC, 44.15mbsf

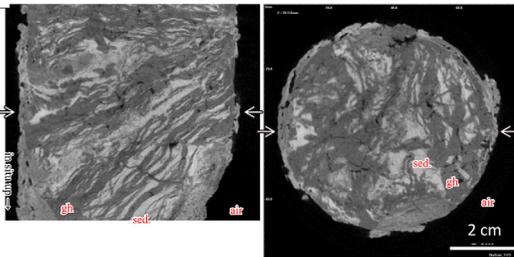


図 17 海鷹海脚のガスチムニー UTNE から回収されたハイドレート・コアの X 線 CT 写真。堆積物と炭酸塩は白く、ハイドレートは灰色で表現される。A: J13R (10.94 mbsf) のブロック状のハイドレートは初生的に生成した層状～レンズ状ハイドレートが埋没過程で破壊されたものと考えられる。B: J06R (44.15 mbsf) は、この深度においても割れ目充填型のハイドレートが生成することを示唆する (蛭田・松本, 2016; Hiruta and Matsumoto, 2022)。

Fig. 17 X ray CT images of hydrates (gray) and sediments (white) of hydrated sediments collected from the gas chimney UTNE of the Umitaka Spur. A: Broken fragments of J13R at 10.94 mbsf were formed by physical breakage of initial thinly bedded hydrates. B: Fracture filling hydrates of J06R at 44.15 mbsf indicates the formation of hydrates even at deep subsurface (Hiruta and Matsumoto, 2016, 2022).

にもたらされたものが大部分と考えられるが、脈状ハイドレートを核として側方へ粒子を排除しながら結晶成長したものも含まれると考えられる。海底下数メートルの SMI 層準で生成するメタン由来炭酸塩 (MDACs) が深部にも分布することは前者を強く示唆する。X 線 CT スキャン (XCT) または X-ray Computed Tomography (XCT) 観察により埋没過程における成長や破碎の痕跡が観察されている (図 17) (Hiruta and Matsumoto, 2022)。

図 18 に、最上トラフ (MT), 上越沖 (UT, NE, JK), 隠岐トラフ (OK) で回収されたメタンハイドレートのガス組成を示す (Kakizaki *et al.*, 2017; Matsumoto *et al.*, 2017a, b; 松本ほか, 2019)。基本的に微生物分解起源と熱分解起源の混合型であるが、海域による違いが明瞭である。

ガス組成比 $C1/(C2+C3)$ はいずれもメタンに卓越 (600 ~ 20,000) しており微生物分解起源を示唆するが、炭素同位体組成 ($\delta^{13}C$) は海鷹海脚上の UTCW, UT-Ref (Off-mound) および UTNE の一部は -50.0% より重く熱分解起源の領域に含まれる。分子組成と同位体組成で認められる不一致は、熱分解ガスが堆積物中を移動する間にメタンとエタンの分別が進みメタンに富化したためと説明されている (Lorenson *et al.*, 1999)。海鷹海脚の UT-NE の一部, UT-B はメタンに富化した熱分解起源と微生物起源の混合ガス, 上越海丘と最上トラフのハイドレートは微生物起源メタンからなる。隠岐トラフのハイドレートは移動による進化前の熱分解起源メタンと微生物起源メタンが直接混合したものと考えられる。

日本海のメタンハイドレートは生成場によりガスの起源や進化トレンドが異なるが、熱分解起源ガスの寄与が認められることが南海トラフとの大きな違いである (Kakizaki *et al.*, 2017; Matsumoto *et al.*, 2017a, b)。海鷹海脚に掘削された基礎試錐「佐渡南西沖」の D 坑 (TD = 2088 mbsf) のコア分析 (門澤ほか, 2006) によると、深度約 900 mbsf 以深のヘッドスペースガスは $\delta^{13}C = -30\% \sim -40\%$, $C1/(C2+C3) = 2 \sim 200$ と典型的な熱分解起源の特徴を示し、1,000 mbsf 付近より浅部へ向かって微生物起源との混合が進み 900 ~ 600 mbsf で $-40\% \sim -55\%$ である。図 18 に示すようにガスチムニー内では表層付近まで熱分解ガス ($\delta^{13}C = -30\% \sim -40\%$) が卓越するが、ガスチムニーの外のシルトのヘッドスペースガス組成は D 坑の浅部への進化トレンド (熱分解起源と微生物起源の混合トレンド) に乗り $\delta^{13}C = -60\% \sim -100\%$ を示す (松本ほか, 2009)。地温勾配 (~ 10 K/100 m) が南海トラフ (3 ~ 4 K/100 m) の 2 倍以上で熱熟成の深度が浅いこと、

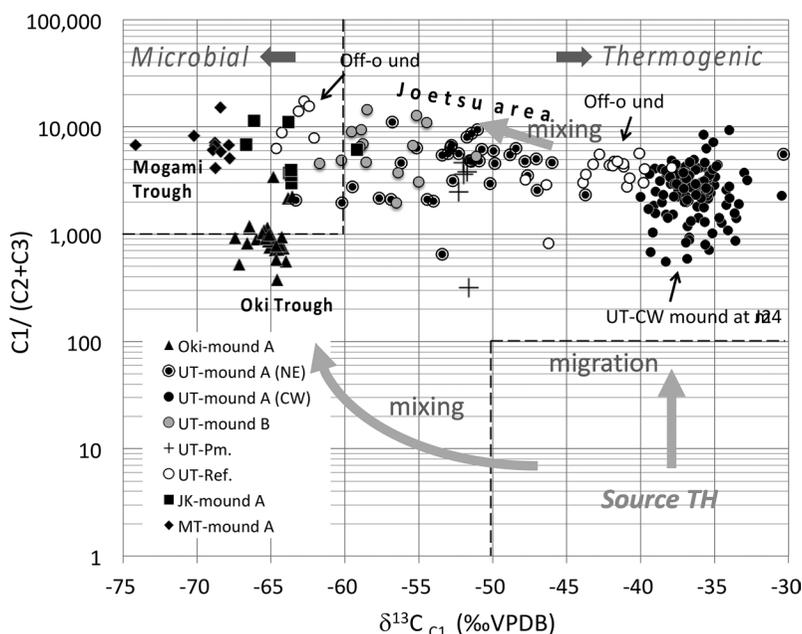


図 18 日本海東縁，最上トラフ (MT)，上越沖 (UT, JK, JK) および隠岐トラフ (Oki) で採取されたハイドレート由来ガスの地化学特性と想定される起源。海鷹海脚のチムニー UT-CW の同位体組成は典型的な熱分解起源を示すが，分子組成は微生物分解起源の領域に含まれる。同位体組成が起源を反映し分子組成はガスの長距離移動中の分別を反映したと考えられる (本文参照)。海鷹海脚の他のチムニー (NE, B) のハイドレートは，移動進化した熱分解起源ガスと微生物起源ガスの混合として説明される。最上トラフ (MT-A) のガスには熱分解の影響は見られないが，隠岐トラフ (Oki-A) のガスは微生物起源ガスと進化する前の熱分解起源ガスの混合トレンドに乗る (Kakizaki *et al.*, 2017; Matsumoto *et al.*, 2017a, b, c)。

Fig. 18 Geochemical characteristics and origins of hydrate-induced gases of the Sea of Japan. Isotopic composition of hydrate gases of gas chimney UTCW strongly indicates thermogenic origin, while molecular composition seems to show microbial origin. This was caused by long-distance migration (see text). Other hydrates of Umitaka spur are a mixture of microbial and evolved thermogenic gases. Mogami trough is totally microbial, and Oki trough is a mixture of microbial and typical thermogenic gases (Kakizaki *et al.*, 2017; Matsumoto *et al.*, 2017a, b, c).

ガス逸脱構造 (ガストムニー) が発達し深部ガスの移動が容易であることが日本海で熱分解起源ハイドレートが生成した主要な理由と言えよう。

V. ま と め

南海トラフ前弧海盆に位置する東海沖から熊野灘には広範囲にハイドレート由来 BSR が分布しその面積は 4,687 km² に達する。集中的に掘削調査が行われた東海沖の竜洋海台 (水深約 945 m) と第一天龍海丘 (水深約 720 m)，渥美半島沖合の第二渥美海丘北斜面 (水深 998 ~ 1,006 m) ではハイドレートの安定領域基底深度 BGHS はそれぞれ 200 ~ 250 mbsf と約 340 mbsf である。

東部南海トラフのメタンハイドレートの胚胎層は前期更新世の海底扇状地型タービダイトである。ハイドレートは厚さ数 10 cm のタービダイト砂層の孔隙を充填しており「孔隙充填型」と呼ばれる。ハイドレート中のガスはほぼ 100% 微生物分解起源のメタンからなることが炭素同位体組成から示された。ハイドレートを胚胎するタービダイト層準は後期更新世の塊状シルト層に覆われシルト層の下限がハイドレート濃集帯の上限となる。胚胎層の厚さは東海沖では約 100 m，第二渥美海丘海域では約 240 m である。

熱流量が高く閉鎖的な背弧海盆である日本海では炭化水素の生成・移動が顕著で，海底メタンフ

ラックスは南海トラフの5倍以上と見積もられる。日本海東縁と北海道周辺海域には音響ブランピングを伴う直径数100 mの円筒状ガストムニー構造が多数分布し、確認されたものだけで1742個に達する。深部ガスの逸脱通路であるガストムニーが日本海メタンハイドレートの胚胎構造であり、海底付近から海底下100～125 mbsfのBGHS-BSRまで塊状メタンハイドレートが分布する。深部メタンガスはガストムニー中を溶存態としてだけでなくフリーガスとしても移動、十分な水が存在する表層付近でメタンハイドレート化し、周囲のシルトを排除しながら、粒状～層状に成長して塊状に固定された。日本海ハイドレートは熱分解起源ガスと微生物分解ガスの混合からなるが、熱分解起源の寄与が大きい場所ほど集積帯が厚く発達すると言える。

東部南海トラフと日本海東縁のメタンハイドレートの産状と起源の違いは、前者が大規模で活動的なスラストに特徴づけられた付加体の前孤海盆～隆起帯に位置するのに対し、後者は25 Ma頃に開裂・拡大し2～3 Ma頃に収縮に転じた背孤海盆に位置することと深く関係する。東部南海トラフでは、BGHS-BSRの直上付近に砂層が発達していたことが「孔隙充填型」の発達を可能にしたと言える。日本海ではガスの生成率が高かったこと、縁海の拡大と収縮がガスの移動を容易にしたこと、ホストがシルトであったことが、ガス逸脱構造としてのガストムニーの発達および粒子排除型・表層型・塊状ハイドレートが発達した要因と言える。

謝 辞

本研究は経済産業省のメタンハイドレート開発促進事業(2001～2018年)の一部として実施された東部南海トラフおよび日本海東縁を中心に実施された探査事業および共同研究者による学術調査の成果をもとに、何がどう明らかにされてきたのかを時系列で記述し俯瞰したものである。

東部南海トラフにおいて実施された探査事業は独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構(旧石油公団)において実施された。日本海東縁と北海道周辺海域で

実施された研究開発事業は産業技術総合研究所から明治大学への再委託(2013～2015年度)により実施され、大学が主体となった学術調査は科学研究費補助金(20K04088)などの補助金および民間との共同研究により実施された。

東部南海トラフのハイドレートガスの起源については早稲田 周氏(元石油資源株式会社)に議論いただいた。複数の査読者からのコメントは文言や引用の正確さを期す上で貴重であった。これらの方々に衷心よりお礼申し上げます。

注

- 1) <https://www.env.go.jp/press/110207.html> [Cited 2023/9/27].
- 2) <https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012.html> [Cited 2023/9/27].
- 3) <https://www.env.go.jp/content/900515878.pdf> [Cited 2023/9/27].
- 4) <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2023/pdf/mokuji.pdf> [Cited 2023/9/27].
- 5) <https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub-publications/55041/eng-perspectives-carbon-capture-storage.pdf> [Cited 2023/9/27].

文 献

- 秋葉文雄・大井剛志・松本 良(2019): 日本海東縁部とプリモリーエ沖海域における上部第四系の高解像度珪藻層序. 表層型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), 98-99. [Akiba, F., Oi, T. and Matsumoto, R. (2019): High resolution diatom biostratigraphy for the upper Quaternary in the eastern margin of the Japan Sea and the sea off Promorye (Russia). *Shallow Methane Hydrate Forum, Abstract (Hyosogata Metan Haidoreto Foramu Koen Yoshi)*, Global Front, Meiji University (Tokyo, Surugadai), 98-99. (in Japanese)*]
- Aoki, Y., Tamano, T. and Kato, S. (1982): Detail structure of the Nankai Trough from migrated seismic sections. *American Association of Petroleum Geologists Hedberg Research Conference*.
- 荒井晃作・岡村行信・池原 研・芦寿一郎・徐 垣・木下正高(2006): 浜松沖前弧斜面上部に発達する活断層とテクトニクス. 地質学雑誌, **112**, 749-759. [Arai, K., Okamura, Y., Ikehara, K., Ashi, J., Soh, W. and Kinoshita, M. (2006): Active faults and tectonics on the upper forearc slope off Hamamatsu City, central Japan. *Journal of the Geological Society of Japan*, **112**, 749-759. (in Japanese with English abstract)]
- Ashi, J. (1997): Distribution of cold seepage at the fault scarp of the eastern Nankai accretionary prism. *JAMSTEC Report of Research and Development*, **13**, 495-501.

- Ashi, J., Tokuyama, H. and Taira, A. (2002): Distribution of methane hydrate BSRs and its implication for the prism growth in the Nankai Trough. *Marine Geology*, **187**, 177–191.
- Baba, K. and Yamada, Y. (2004): BSR 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.
- Borowski, W.S., Paull, C.K. and Ussler III, W. (1996): Marine pore-water sulfate profiles indicate in situ methane flux from underlying gas hydrate. *Geology*, **24**, 655–658.
- Chapman, N.R., Gettrust, J.F., Walia, R., Hannay, D., Spence, G.D., Wood, W.T. and Hyndman, R.D. (2002): High-resolution, deep-towed, multichannel seismic survey of deep-sea gas hydrates off western Canada. *Geophysics*, **67**, 1038–1047.
- Collett, T.S. (1993): Natural gas hydrates of the Prudhoe Bay and Kuparuk River area, North Slope, Alaska. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **77**, 793–812.
- Courel, R., Begg, P., Kim, M., Kokoh, L. and Nasif, K. (2011): Heat Flow measurements and mapping from BSR to constrain the evaluation of the deep-water South Makassar Basin. *International Petroleum Technology Conference, Bangkok, Thailand*.
- Dickens, G.R. and Quinby-Hunt, M.S. (1997): Methane hydrate stability in pore water: A simple theoretical approach for geophysical applications. *Journal of Geophysical Research*, **102**, B1, 773–783.
- Finley, P. and Krasov, J. (1986): Formation and stability of gas hydrates of the Middle America Trench. *Geological Evolution and Analysis of Confirmed or Suspected Gas Hydrate localities, Vol. 9*, U.S. Department Energy, DOE/MC721181-1950-Vol. 9, 243p.
- 藤井哲哉・佐伯龍男・小林稔明・稲盛隆穂・林 雅雄・高野 修・高山徳次郎・川崎達治・長久保定雄・中水勝・横井研一 (2009): 確率論的手法による東部南海トラフのメタンハイドレート資源量評価. *地学雑誌*, **118**, 814–834. [Fujii, T., Saeki, T., Kobayashi, T., Inamori, T., Hayashi, M., Takano, O., Takayama, T., Kawasaki, T., Nagakubo, S., Nakamizu, M. and Yokoi, K. (2009): Resource assessment of methane hydrate by applying a probabilities approach in the Eastern Nankai trough, Japan. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **118**, 814–834. (in Japanese with English abstract)]
- Fujii, T., Suzuki, K., Takayama, T., Tamaki, M., Komatsu, Y., Konno, Y., Yoneda, J., Yamamoto, K. and Nagao, J. (2015): Geological setting and characterization of a methane hydrate reservoir distributed at the first offshore production test site on the Daini-Atsumi Knoll in the eastern Nankai Trough, Japan. *Marine and Petroleum Geology*, **66**, 310–322.
- Guillamon, O.S., Palomino, D., Vazquez, J.T., Leon, R., Fernandez-Puga, M.C., Lopez-Gonzalez, N., Medialdea, T., Fernandez-Salas, L.M. and Somoza, L. (2023): Mopho-sedimentary structure of new mud volcanoes on the Moroccan Atlantic continental margin (Gulf of Cadiz). *Marine and Petroleum Geology*, **148**, 106031.
- Hamilton, E.L. (1978): Sound velocity-density relations in sea-floor sediments and rocks. *Acoustical Society of America Journal*, **63**, 366–377.
- 林 雅雄・稲盛隆穂・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. [Hayashi, M., Inamori, T., Saeki, T. and Noguchi, S. (2010): The distribution of BSRs related to methane hydrates, offshore Japan. *Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology*, **75**, 42–53. (in Japanese with English abstract)]
- Hiroki, Y., Watanabe, K. and Matsumoto, R. (2004): Lithology, Biostratigraphy, and Magnetostratigraphy of gas hydrate-bearing sediments in the Eastern Nankai Trough. *Resource Geology*, **54**, 25–34.
- 蛭田明宏・松本 良 (2016): 塊状表層型メタンハイドレートの起源: X線CT画像解析からの考察. 表層型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). [Hiruta, A. and Matsumoto, R. (2016): Origin of massive, shallow methane hydrates: Consideration from the X ray CT imaging. *Shallow Methane Hydrate Forum, Abstract (Hyosogata Metan Haidoreto Foramu Koen Yoshi)*, Global Front, Meiji University (Tokyo, Surugadai). (in Japanese)*]
- Hiruta, A. and Matsumoto, R. (2022): Massive gas hydrates buried on Umitaka Spur in the Sea of Japan: description, origin, and significance to methane cycling in marine sediments. *Geo-Marine Letter*, **42**, 13.
- Hiruta, A., Snyder, G., Tomaru, H. and Matsumoto, R. (2009): Geochemical constraints for the formation and dissociation of gas hydrate in an area of high methane flux, eastern margin of the Japan Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, **279**, 326–339.
- Horozal, S., Lee, G.H., Yi, B.Y., Yoo, D.G., Park, K.P., Lee, H.Y., Kim, W., Kim, H.J. and Lee, K. (2009): Seismic indicators of gas hydrate and associated gas in the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea) and implications of heat flows derived from depths of the bottom-simulating reflector. *Marine Geology*, **258**, 126–138.
- Hubbert, M.K. (1966): History of petroleum geology and its bearing upon present and future exploration. *AAPG Bulletin*, **50**, 2504–2518.
- Inamori, T. and Hato, M. (2004): Detection of methane hydrate-bearing zones from seismic data. *Resource Geology*, **54**, 99–104.
- 井上正澄 (2004): 石油資源の将来—生産量推移・油

- 田規模分布・究極資源量に関する考察。石油技術協会誌, **69**, 679-691. [Inoue, M. (2004): Future of the petroleum resources—A study on production history, field size distribution and ultimate recoverable resources. *Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology*, **69**, 679-691. (in Japanese with English abstract)]
- Iversen, N. and Jorgensen, B.B. (1993): Diffusion coefficients of sulfate and methane in marine sediments; Influence of porosity. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **57**, 571-578.
- Jackson, B.A. (2004): Seismic evidence for gas hydrates in the North Makassar Basin, Indonesia. *Petroleum Geoscience*, **10**, 227-238
- JOGMEC (2013): 第1回海洋産出試験について。[JOGMEC (2013): The first offshore production test. (in Japanese)*]
https://www.jogmec.go.jp/oilgas/oilgas_10_000018.html [Cited 2023/9/27].
- 上嶋正人・西村清和・岸本清行・弘松峰男・佐藤幹夫・松本 良 (2009): 上越沖, 海底表層メタンハイドレート賦存域での深海底構造・微地形調査について。地学雑誌, **118**, 72-92. [Joshima, M., Nishimura, K., Kishimoto, K., Hiromatsu, M., Sato, M. and Matsumoto, R. (2009): Micro-topography and shallow sub-bottom structure on the gas hydrate area off Joetsu City, Niigata, Japan: DAI-Pack mapping study. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **118**, 72-92. (in Japanese with English abstract)]
- Kakizaki, Y., Snyder, G. and Matsumoto, R. (2017): The origin of gas in gas hydrate fields of Japan Sea. *Proceedings of Tottori International Forum*, Tottori Prefecture Citizens' Culture Hall, Dept of Environment and Consumers Affairs (Tottori), P-13.
- 角和善隆・松本 良 (2016): 浅層掘削コアリングによる「ガスチムニー構造」内のメタンハイドレートの賦存状況と集積度。表層型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)。[Kakuwa, Y. and Matsumoto, R. (2016): Occurrence and accumulation of methane hydrates in gas chimney structure as revealed by shallow coring. *Shallow Methane Hydrate Forum, Abstract (Hyosogata Metan Haidoreto Foramu Koen Yoshi)*, Global Front, Meiji University (Tokyo, Surugadai). (in Japanese)*]
- 角和善隆・中嶋 健・公文富士夫・松本 良・仲村祐哉・大井剛志・富山隆将・町山栄章 (2013): 日本海MD179航海において採取されたコアの層相と対比。石油技術協会誌, **78**, 104-112. [Kakuwa, Y., Nakajima, T., Kumon, F., Matsumoto, R., Nakamura, Y., Oi, T., Tomiyama, T. and Machiyama, H. (2013): Description of sediments recovered during the cruise of MD179 in the Japan Sea—From Joetsu Knoll to southwest Hokkaido—. *Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology*, **78**, 104-112. (in Japanese with English abstract)]
- 片岡沙都紀・山下 聡・川口貴之・松本 良 (2009): 日本海東縁域海底表層地盤の土質特性 (要旨)。第44回地盤工学研究発表会 (関東学院大学), 283-284. [Kataoka, S., Yamashita, S., Kawaguchi, T. and Matsumoto, R. (2009): Soil properties of sea-bottom sediments in the eastern margin of Japan Sea. *44th Japan National Conference on Geotechnical Engineering*, 283-284. (in Japanese)]
- 経済産業省資源エネルギー庁 (2016): ニュースリリース, 2016年9月16日。[Ministry of Economy, Trade and Industry (2016): News Release, September 16. (in Japanese)*]
- Krason, J. (1992): Gas Hydrates in continental margin—Exploration and economic significance. *Abstract, 29th IGC- Kyoto*, 3, 802.
- Krason, J. and Finley, P.D. (1992): Messoyakh Gas Field-Russia: West Siberian Basin. *AAPG Treatise of Petroleum Geology, Atlas of Oil and Gas Fields, Structural Traps VII*, 197-220.
- Kvenvolden, K.A. (1988): Methane hydrate—A major reservoir of carbon in the shallow geosphere?. *Chemical Geology*, **71**, 41-51.
- Kvenvolden, K.A. (1993): Gas hydrates—Geological perspective and global change. *Reviews of Geophysics*, **31**, 173-187.
- Kvenvolden, K.A. (1994): Natural gas hydrate occurrence and issues. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **715**, 232-246.
- Leggett, J., Aoki, Y. and Toba, T. (1985): Transition from frontal accretion to underplating in a part of the Nankai Trough accretionary complex off Shikoku (SW Japan) and extensional features on the lower trench slope. *Marine and Petroleum Geology*, **2**, 131-141.
- Lorenson, T.D., Whitticar, M.J., Waseda, A., Dallimore, S.R. and Collett, T.S. (1999): Gas composition and isotopic geochemistry of cuttings, core, and gas hydrate from the JAPEX/NJOC/GSC Mallik 2L-38 gas hydrate research well. *Bulletin, Geological Survey of Canada*, **544**, 143-163.
- 町山栄章・木下正高・武内里香・松本 良・山野 誠・濱元栄起・弘松峰男・佐藤幹夫・小松原純子 (2009): 日本海東縁, 上越海盆西部メタンハイドレート分布域の熱流量分布。地学雑誌, **118**, 986-1007. [Machiyama, H., Kinoshita, M., Takeuchi, R., Matsumoto, R., Yamano, M., Hamamoto, H., Hiromatsu, M., Sato, M. and Komatsubara, J. (2009): Heat flow distribution around the Joetsu gas hydrate field, western Joetsu Basin, eastern margin of the Japan Sea. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **118**, 986-1007. (in Japanese with English abstract)]
- の場保望・中川 洋 (2009): 上越沖海底メタン湧出地域の現世有孔虫群集。地学雑誌, **118**, 136-155. [Matoba, Y. and Nakagawa, H. (2009): Distribution of recent benthic foraminifera in the methane seepage area off Joetsu in the eastern Japan Sea. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **118**, 136-155. (in Japanese with English abstract)]

- 松本 良 (1978): 炭田地域に分布する炭酸塩岩の生成段階とその成因. 地質学論集, **15**, 35-52. [Matsumoto, R. (1978): Stage of formation and origin of authigenic carbonates and carbonate rocks in the coalfield regions. *Memoir of the Geological Society of Japan*, **15**, 35-52. (in Japanese with English abstract)]
- 松本 良 (1987): ガスハイドレートの性質, 産状, 地質現象との関わりについて. 地質学雑誌, **93**, 597-615. [Matsumoto, R. (1987): Characteristics, occurrence and the relation with geologic phenomena of gas hydrates. *Journal of the Geological Society of Japan*, **93**, 597-615. (in Japanese with English abstract)]
- 松本 良 (1992): 天然ガス資源としてのメタンハイドレート. 資源・素材学会誌, **108**, 511-520. [Matsumoto, R. (1992): Methane hydrate as natural gas resource. *Journal of MMIJ*, **108**, 511-520. (in Japanese with English abstract)]
- 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. [Matsumoto, R. (2009): Overview of gas hydrate: Impact of the discovery of a large ice-like carbon reservoir under the seafloor. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **118**, 7-42. (in Japanese with English abstract)]
- 松本 良・青山千春 (2020): 日本海東縁, 上越おきのメタンブルームによるメタン運搬物見積りへの検証. 地学雑誌, **129**, 141-146. [Matsumoto, R. and Aoyama, C. (2020): Verifying estimates of the amount of methane carried by a methane plume in the Joetsu Basin, eastern margin of the Sea of Japan. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **129**, 141-146. (in Japanese with English abstract)]
- Matsumoto, R. and Chen, Y. (2003): Methane flux in accretionary complex: an example from the fore-arc Basin and outer ridge of the eastern Nankai trough. *Abstract, Goldschmidt Conference, Kurashiki, Japan*.
- 松本 良・ウィルソン, マイク (2014): 海底設置型浅層採泥装置 RD2 を用いたハイドレートマウンド・ガスチムニー掘削. 日本地球惑星科学連合大会要旨. [Matsumoto, R. and Wilson, M. (2014): Hydrate mound and gas chimney coring by seabed drilling machine RD2. *Abstract, JpGU Meeting*.]
- 松本 良・渡部芳夫・佐藤幹夫・岡田尚武・広木義久・川崎正行・Leg164 乗船研究者 (1996): 海洋のガスハイドレートの分布と産状—ODP Leg164 ブレークリッジ掘削の成果—. 地質学雑誌, **102**, 932-944. [Matsumoto, R., Watanabe, Y., Sato, M., Okada, H., Hiroki, Y., Kawasaki, M. and ODP Leg 164 Shipboard Scientific Party (1996): Distribution and occurrence of marine gas hydrates—Preliminary results of ODP Leg164: Blake Ridge Drilling—. *Journal of the Geological Society of Japan*, **102**, 932-944. (in Japanese with English abstract)]
- 松本 良・陳 毅風・第二白嶺丸乗船研究者 (2003): 南海トラフ東海沖～熊野灘に見られるメタンフラックスの地域的変動と付加体における排水機構. 日本地質学会学術大会講演要旨, 第110年学術大会 (静岡), O-178. [Matsumoto, R., Chen, Y. and Dai-ni-Hakurei O2DM Shipboard Scientists (2003): Methane flux in the eastern Nankai trough (Tokai area to Kumano basin) and the mechanism of fluid migration-expulsion within the accretionary complex. *110th Annual Meeting of the Geological Society of Japan (Shizuoka)*, O-178. (in Japanese)]
- Matsumoto, R., Tomaru, H. and Lu, H. (2004): Detection and evaluation of gas hydrates in the eastern Nankai Trough by geochemical and geophysical methods. *Resource Geology*, **54**, 53-68.
- 松本 良ほか 28 名 (2009): 日本海東縁, 上越海盆の高メタンフラックス域におけるメタンハイドレートの成長と崩壊. 地学雑誌, **118**, 43-71. [Matsumoto, R. and 28 others (2009): Formation and collapse of gas hydrate deposits in high methane flux area of the Joetsu Basin, eastern margin of Japan Sea. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **118**, 43-71. (in Japanese with English abstract)]
- Matsumoto, R., Ryu, B.-J., Lee, S.-R., Lin, S., Wu, S., Sain, K., Pecher, I. and Riedel, M. (2011): Occurrence and exploration of gas hydrate in the marginal seas and continental margin of the Asia and Oceania region. *Marine and Petroleum Geology*, **28**, 1751-1767.
- Matsumoto, R., Kakuwa, Y., Snyder, G., Tanahashi, M., Hiruta, A., Oi, T., Ohkawa, S., Tomaru, H., Numanami, H., Shen, C.-C. and Morita, S. (2017a): Occurrence and origin of thick deposits of massive gas hydrate, Eastern margin of the Sea of Japan. *Proceeding of ICGH-9*, June 26-30, Denver CO, USA.
- Matsumoto, R., Tanahashi, M., Kakuwa, Y., Snyder, G., Ohkawa, S., Tomaru, H. and Morita, S. (2017b): Recovery of thick deposits of massive gas hydrates from gas chimney structures, Eastern Margin of Japan Sea: Japan Sea Shallow Gas Hydrate Project. *Fire in the Ice*, **17**, 1-6.
- Matsumoto, R., Snyder, G., Hiruta, A., Kakuwa, Y., Tanahashi, M., Oi, T., Kakizaki, Y., Chang, Y.-Y., Huang, C.-Y. and Shen, C.-C. (2017c): Processes involved in massive gas hydrate formation in the Sea of Japan as inferred from U-Th ages of MDAC and from H2S concentration of hydrates. *Proceedings of the Goldschmidt Conference 2017, Le Palais des Congres Paris*.
- 松本 良・Snyder, G.・蛭田明宏・戸丸 仁 (2019): 表層型メタンハイドレートのガス組成: 特に硫化水素含有ハイドレートの起源と分布について. 表層型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). [Matsumoto, R., Snyder, G., Hiruta, A. and Tomaru, H. (2019): Gas composition of shallow methane hydrates with special reference to the origin and distribution of hydrogen sulfide bearing hydrates. *Shallow Meth-*

- ane Hydrate Forum, Abstract (Hyosogata Metan Haidoreto Foramu Koen Yoshi), Global Front, Meiji University (Tokyo, Surugadai). (in Japanese)*]
- 松本 良・蛭田明宏・大川史郎・戸丸 仁・大井剛志・柿崎喜宏・下野貴也・石田直人・サイディ マツソウ・シュナイダグレン・福田朱里・弘松峰男・柳本 裕・棚橋 学・角和善隆 (2024): 東部南海トラフと日本海東縁メタンハイドレートの堆積物中含有量と原始資源量. 地学雑誌, **133**, in press. [Matsumoto, R., Hiruta, A., Ohkawa, S., Tomaru, H., Oi, T., Kaki-zaki, Y., Shimono, T., Ishida, N., Saeidi-Ortakand, M., Snyder, G., Fukuda, A., Hiromatsu, M., Yanagimoto, Y., Tanahashi, M. and Kakuwa, Y. (2024): Overview: Resource assessment of the methane hydrates of the Eastern Nankai Trough and the eastern margin of the Sea of Japan. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **133**, in press. (in Japanese with English abstract)]
- Milkov, A.V. and Sassen, R. (2002): Economic geology of offshore gas hydrate accumulations and provinces. *Marine and Petroleum Geology*, **19**, 1-11.
- 門澤伸昭・金子光好・大澤正博 (2006): 基礎試錐「佐渡南西沖」の掘削結果に基づいた佐渡～富山湾海域における石油システムの考察. 石油技術協会誌, **71**, 618-627. [Monzawa, N., Kaneko, M. and Osawa, M. (2006): A review of petroleum system in the deep water area of the Toyama Trough to the Sado Island in the Japan Sea, based on the results of the METI Sado Nansei Oki drilling. *Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology*, **71**, 618-627. (in Japanese with English abstract)]
- 長久保定雄・小林稔明・佐伯龍男・下田直之・藤井哲哉・野口 聡 (2009): 東部南海トラフのメタンハイドレート層とメタン湧出を伴う海底面現象の関係. 地学雑誌, **118**, 835-853. [Nagakubo, S., Kobayashi, T., Saeki, T., Shimoda, N., Fujii, T. and Noguchi, S. (2009): The relations between methane hydrate bearing formations and seafloor manifestations accompanied by methane discharges in the Eastern Nankai Trough. 2009, *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **118**, 835-853. (in Japanese with English abstract)]
- 中川 洋・鈴木麻希・竹内瑛一・松本 良 (2009): 上越沖海鷹海脚メタン湧出域の過去 32,000 年の岩相変化と有孔虫層序. 地学雑誌, **118**, 969-985. [Nakagawa, H., Suzuki, M., Takeuchi, E. and Matsumoto, R. (2009): Lithofacies and foraminiferal stratigraphy for the last 32,000 years in the methane seep area of Umitaka Spur, off Joetsu. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **118**, 969-985. (in Japanese with English abstract)]
- 中水 勝・並川貴俊・落合浩志・辻 喜弘 (2004): 資源化を目指すメタンハイドレート探査—基礎試錐「南海トラフ」の概要と今後の研究開発計画—. 石油技術協会誌, **69**, 214-221. [Nakamizu, M., Nami-kawa, T., Ochiai, K. and Tsuji, Y. (2004): Efforts heading for production of methane from methane hydrate resources—An outline of METI exploratory Test Well “Nankai Trough” and future research program and development plan—. *Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology*, **69**, 214-221. (in Japanese with English abstract)]
- National Energy Technology Laboratory (NETL) (2020): Methane Hydrate R&D Program Highlights 2000-2020, US Dept of Energy, 28p. <https://netl.doe.gov/sites/default/files/2020-02/NETL-Methane-Hydrate-Program-2000-2020.pdf> [Cited 2023/9/27].
- Numanami, H., Warabi, R., Koito, T., Jenkins, R., Tomaru, H. and Matsumoto, R. (2017): Quantitative analysis for infaunal macrobenthos at shallow gas hydrate areas offshore Joetsu using CASQ core samples. *Proceedings of Tottori International Forum on Methane Hydrate*.
- 荻原成騎・石崎 理・松本 良 (2009): なつしま NT-06-19 航海 (直江津沖海鷹海脚および上越海丘) によって採取された堆積物柱状試料の有機地球化学分析. 地学雑誌, **118**, 128-135. [Ogihara, S., Ishizaki, O. and Matsumoto, R. (2009): Organic geochemical analysis of push core sediment samples collected from NT-06-19 (Umitaka spur and Joetsu knoll off Naoetsu). *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **118**, 128-135. (in Japanese with English abstract)]
- 大川史郎・松本 良 (2018): 高分解能三次元地震探査によるハイドレート濃集帯の抽出. 表層型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). [Ohkawa, S. and Matsumoto, R. (2018): Extraction of hydrate concentration zone by high resolution 3-dimensional seismic survey (HR3D). *Shallow Methane Hydrate Forum, Abstract (Hyosogata Metan Haidoreto Foramu Koen Yoshi)*, Global Front, Meiji University (Tokyo, Surugadai). (in Japanese)*]
- 大川史郎・松本 良 (2019): 高分解能三次元地震探査 (HR3D) を用いたガストムニー内のハイドレート存在量予測 (予察). 表層型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). [Ohkawa, S. and Matsumoto, R. (2019): Estimate of the amount of hydrate in gas chimney by means of the HR3D. *Shallow Methane Hydrate Forum, Abstract (Hyosogata Metan Haidoreto Foramu Koen Yoshi)*, Global Front, Meiji University (Tokyo, Surugadai). (in Japanese)*]
- 大川史郎・蛭田明宏・松本 良 (2016): 高分解能三次元地震探査によるガストムニー構造内部の可視化. 表層型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). [Ohkawa, S., Hiruta, A. and Matsumoto, R. (2016): Visualization of the internal structure of gas chimney by high resolution 3-dimensional seismic survey (HR3D). *Shallow Methane Hydrate Forum, Abstract (Hyosogata Metan Haidoreto Foramu Koen Yoshi)*, Global Front, Meiji University (Tokyo,

- Surugadai). (in Japanese)*]
- 大川史郎・蛭田明宏・松本 良 (2017): 高分解能 3 次元地震探査から明らかとなった上越沖ガストムニーおよび BSR の詳細構造. 鳥取国際メタンハイドレートフォーラム. [Ohkawa, S., Hiruta, A. and Matsumoto, R. (2017): Detailed gas chimney structures and BSR distribution off Joetsu, recovered by High-Resolution 3D Seismic Survey (HR3D). *Tottori International Methane Hydrate Forum (Tottori Koku-sai Metan Haidoreto Foramu)*. (in Japanese)*]
- 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. 表層型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). [Oi, T., Sato, M. and Matsumoto, R. (2016): Search for “gas chimney structures” in the eastern margin of the Sea of Japan and around Hokkaido. *Shallow Methane Hydrate Forum, Abstract (Hyosogata Metan Haidoreto Foramu Koen Yoshi)*, Global Front, Meiji University (Tokyo, Surugadai). (in Japanese)*]
- Oi, T., Akiba, F., Kakuwa, Y. and Matsumoto, R. (2017): Sedimentation ages from the hydrate-bearing cores in eastern parts of the Sea of Japan. *Proceeding of ICGH-9, June 26–30, Denver CO, USA*.
- 大井剛志・秋葉文雄・佐藤幹夫・松本 良 (2018): ガストムニー構造と周辺堆積物の堆積年代. 表層型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). [Oi, T., Akiba, F., Sato, M. and Matsumoto, R. (2018): Gas chimney structure and depositional age of surrounding sediments. *Shallow Methane Hydrate Forum, Abstract (Hyosogata Metan Haidoreto Foramu Koen Yoshi)*, Global Front, Meiji University (Tokyo, Surugadai). (in Japanese)*]
- 岡村行信 (2000): 日本海東縁のインバージョンテクトニクス. 石油技術協会誌, **65**, 40–47. [Okamura, Y. (2000): Inversion tectonics along the eastern margin of the Japan Sea. *Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology*, **65**, 40–47. (in Japanese with English abstract)]
- Paull, C.K., Normark, W.R., Ussler III, W., Caress, D.W. and Keaten, R. (2008): Association among active seafloor deformation, mound formation, and gas hydrate growth and accumulation within the seafloor of the Santa Monica Basin, offshore California. *Marine Geology*, **250**, 258–275.
- Pohlman, J.W., Riedel, M., Bauer, J.E., Canuel, E.A., Paull, C.K., Lapham, L., Grabowski, K.S., Coffin, R.B. and Spence, G.D. (2013): Anaerobic methane oxidation in low-organic content methane seep sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **108**, 184–201.
- 石油公団 (2002): 平成 13 年度国内石油・天然ガス基礎調査基礎物理探査「佐渡沖南西」解釈作業報告書. 36p. [Japan National Oil Corporation: JNOC (2002): *Explanatory Report of the Basic Geophysical Exploration for the Oil and Natural Gas “Sado-oki-nansei” (Heisei 13 Nendo Kokunai Sekiyu Tennen Gasu Kiso Chosa Kiso Butsuri Tansa Sado-oki Nansei Kaishaku Sagyo Hokokusho)*. 36p. (in Japanese)*]
- Shakirov, R.B., Valitov, M.G., Obzhairov, A.I., Mishukov, V.F., Yatsuk, A.V., Syrbu, N.S. and Mishukova, O.V. (2019): Methane anomalies, its flux on the sea-atmosphere interface and their relations to the geological structure of the South-Tatar sedimentary basin (Tatar Strait, the Sea of Japan). *Marine Geophysical Research*, **40**, 581–600, doi.org/10.1007/s11001-019-09389-3.
- 下野貴也・松本 良 (2018): 表層型ガスハイドレート産出域堆積物の磁気特性 (要旨). 高知大学海洋コア国際研究所, 共同研究成果発表会. [Shimono, T. and Matsumoto, R. (2018): Magnetic characteristics of the sediments of shallow gas hydrate field (Abst). *Research Conference on Joint Research, International Institute for Marine Cores, Kochi University (Kochi Daigaku Kaiyo Koa Kokusai Kenkyusho Kyodo Kenkyu Seika Happyokai)*. (in Japanese)*]
- Shipley, T.H., Houston, M.H., Buffer, R.T., Shwab, J., McMillan, K.J., Ladd, J.W. and Worzel, L. (1979): Seismic evidence for widespread possible gas hydrate horizons on continental slopes and rises. *AAPG Bulletin*, **63**, 2204–2213.
- Sloan, E.D. (1998): Gas hydrates: Review of physical/chemical properties. *Energy & Fuels*, **12**, 191–196.
- Suess, E. and 19 others (2001): Sea floor methane hydrates at Hydrate Ridge, Cascadia Margin. in *Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution, and Detection* edited by Pauli, C.K. and Dillon, W.P., Geophysical Monograph Series, **124**, AGU, 87–98.
- 鈴木清史・海老沼孝郎・成田秀夫 (2009): メタンハイドレートを胚胎する砂質堆積物の特徴とメタンハイドレート胚胎メカニズムへの影響. 地学雑誌, **118**, 899–912. [Suzuki, K., Ebinuma, T. and Narita, H. (2009): Feature of methane hydrate-bearing sandy sediments of the forearc basin along the Nankai Trough: Effect on methane hydrate-accumulating mechanism in turbidite. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **118**, 899–912. (in Japanese with English abstract)]
- Suzuki, K., Schultheiss, P., Nakatsuka, Y., Ito, T., Egawa, K., Holland, M. and Yamamoto, K. (2015): Physical properties and sedimentological features of hydrate-bearing samples recovered from the first gas hydrate production test site on Daini-Atsumi knoll around Eastern Nankai Trough. *Marine and Petroleum Geology*, **66**, 346–357.
- 高野 修・西村瑞恵・藤井哲哉・佐伯龍男 (2009): シーケンス層序学手法による東部南海トラフエリアのメタンハイドレート含有海底扇状地タービダイト砂岩分布解析および BSR 分布との関連の検討. 地

- 学雑誌, **118**, 776-792. [Takano, O., Nishimura, M., Fujii, T. and Saeki, T. (2009): Sequence stratigraphic distribution analysis of methane-hydrate-bearing submarine fan turbidite sandstones in the eastern Nankai Trough area: Relationship between turbidite facies distribution and BSR occurrence. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **118**, 776-792. (in Japanese with English abstract)]
- 武富義和・市原秋男 (2001): 深海に眠るメタンハイドレート: 我が国の取り組み状況. *海洋と生物*, **136**, 498-508. [Takedomi, Y. and Ichihara, A. (2001): Methane hydrate R&D Program and the desirable direction on natural gas policies. *Aquabiology*, **136**, 498-508. (in Japanese)]
- 竹内瑛一・中川 洋・松本 良 (2007): 日本海東縁, 上越沖のメタン・シープ域における過去 28,000 年の底生有孔虫の群集組成と炭素・酸素同位体組成の変動. *堆積学研究*, **64**, 143-148. [Takeuchi, E., Nakagawa, H. and Matsumoto, R. (2007): Variation of the benthic foraminiferal assemblage and carbon and oxygen isotopic compositions for the last 28,000 years at methane seep sites in Joetsu, eastern margin of Japan Sea. *Sedimentary Research*, **64**, 143-148. (in Japanese with English abstract)]
- 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. [Takeuchi, R. and Matsumoto, R. (2009): Geological and geochemical constraints on the process of gas hydrate formation and accumulation in the eastern Nankai Trough, off central Japan. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **118**, 793-813. (in Japanese with English abstract)]
- 東海沖海底活断層研究会 (1999): 東海沖の海底活断層. 東京大学出版会, 151p. [Tokaiiki Kaitei Katsudanso Kenkyukai (1999): *Active Faults on the Seafloor, Tokai Oki*. University of Tokyo Press, 151p. (in Japanese)]
- 戸丸 仁・松本 良 (2018): ガスチムニー周辺の堆積物の温度構造とメタンハイドレート安定領域の変化. 表層型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). [Tomaru, H. and Matsumoto, R. (2018): Temperature structure around gas chimney and the variation of the stability field of methane hydrates. *Shallow Methane Hydrate Forum, Abstract (Hyosogata Metan Haidoreto Foramu Koen Yoshi)*, Global Front, Meiji University (Tokyo, Surugadai). (in Japanese)*]
- 戸丸 仁・松本 良 (2019): 上越沖海鷹海脚のガスチムニー内のメタンの動態. 日本地球惑星科学連合大会要旨. [Tomaru, H. and Matsumoto, R. (2019): Reaction/fixation/migration of methane within the gas chimney on the Umitaka Spur, eastern margin of the Japan Sea. *Abstract, JpGU Meeting.*]
- Tomaru, H., Matsumoto, R., Lu, H. and Uchida, T. (2004): Geochemical process of gas hydrate formation in the Nankai trough based on chloride and isotopic anomalies in interstitial water. *Resource Geology*, **54**, 45-52.
- Torres, M.E., Wallmann, K., Tréhu, A.M., Bohrmann, G., Borowski, W.S. and Tomaru, H. (2004a): Gas hydrate growth, methane transport, and chloride enrichment at the southern summit of Hydrate Ridge, Cascadia margin off Oregon. *Earth and Planetary Science Letters*, **226**, 225-241.
- Torres, M.E., Teichert, B.M.A., Tréhu, A.M., Borowski, W. and Tomaru, H. (2004b): Relationship of pore water freshening to accretionary processes in the Cascadia margin: Fluid sources and gas hydrate abundance. *Geophysical Research Letters*, **31**, L22305.
- Trehu, A.M. and 28 others (2004): Three dimensional distribution of gas hydrate beneath southern Hydrate Ridge: Donstrains from ODP 204. *Earth and Planetary Science Letters*, **222**, 845-862.
- Trofimuk, A.A., Chersky, N.V. and Tsaryov, V.P. (1977): The role of continental glaciation and hydrate formation on petroleum occurrence. in *The Future Supply of Mature-made Petroleum and Gas* edited by Meyer, R.F., Pergamon, 919-926.
- 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. and Tsuji, Y. (2004): Petrophysical Properties of Natural gas hydrate-bearing sands and their sedimentology in the Nankai Trough. *Resource Geology*, **54**, 79-87.
- 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., Waseda, A. and Namikawa, T. (2009): Methane Accumulation and high concentration of gas hydrate in marine and terrestrial sandy sediments. in *Natural Gas Hydrates—Enerby Resource Potential and Associated Geologic Hazards* edited by Collett, T., Johnson, A., Knapp, C. and Boswell, R., *AAPG Memoir*, **89**, 401-413.
- 若月 基・米澤哲夫・高橋秀明・武富義和 (2002): メタンハイドレート層の掘削—基礎試錐「南海トラフ」掘削実績. 高圧力の科学と技術 (特集ガスハイドレート), **12**, 50-55. [Wakatsuki, M., Yonezawa, T., Takahashi, H. and Takedomi, Y. (2002): Exploration for natural hydrate in MITI Nankai-trough wells offshore Japan. *High Pressure Science and Technology*, **12**, 50-55. (in Japanese with English abstract)]
- Waseda, A. and Fujii, T. (2008): Geochemical study on gas generation and hydrate formation in the eastern Nankai Trough (Abstract). *JpGU Meeting*.
- Waseda, A. and Uchida, T. (2004a): Origin and mi-

- gration of methane in gas-hydrate-bearing sediments in the Nankai Trough, in *Geochemical Investigations in Earth and Space Sciences: A Tribute to Isaac R. Kaplan* edited by Hill, R.J., Leventhal, J., Aizenshtat, Z., Baedeker, M.J., Claypool, G., Eganhouse, R., Goldhaber, M. and Peters, K., *Geochemical Society Publication*, **9**, 377-387.
- Waseda, A. and Uchida, T. (2004b): The geochemical context of gas hydrate in the Eastern Nankai Trough. *Resource Geology*, **54**, 69-78.
- 渡邊俊一・内田 徹 (2016): 日本沿岸西太平洋海域における同一海域での海中水温・塩分プロファイルの時間的安定性の検証. 海洋情報部研究報告, **53**, 57-81. [Watanabe, S. and Uchida, T. (2016): Stable structure of temperature and salinity validated by repeated measurements in the few-miles-square regions off Japan coast in the western Pacific. *Report of Hydrographic and Oceanographic Researches*, **53**, 57-81. (in Japanese with English abstract)]
- Wood, W.T., Gettrust, J.F., Chapman, N.R., Spence, G.D. and Hyndman, R.D. (2002): Decreased stability of methane hydrates in marine sediments owing to phase-boundary roughness. *Nature*, **420**, 656-660.
- 山本晃司 (2018): 砂層型メタンハイドレート第2回海洋産出試験について. メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム. [Yamamoto, K. (2018): Second offshore production test of sandy methane hydrate. Methane hydrate resource development and research consortium. (in Japanese)*]
- https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methane_hydrate/pdf/033_05_00.pdf [Cited 2023/9/27].
- 山本晃司・藤井哲哉 (2018): 東部南海トラフ域におけるメタンハイドレート第2回海洋産出試験. 日本地球惑星科学連合大会要旨. [Yamamoto, K. and Fujii, T. (2018): Second offshore production test of methane hydrate in the eastern Nankai Trough. *Abstract, JpGU Meeting*.]
- 山本晃司・佐伯龍男 (2009): メタンハイドレート資源量評価と陸上産出試験. 石油技術協会誌, **74**, 270-279. [Yamamoto, K. and Saeki, T. (2009): Resource assessment and onshore production test of methane hydrate. *Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology*, **74**, 270-279. (in Japanese with English abstract)]
- Yamamoto, K., Kanno, T., Wang, X.-X., Tamaki, M., Fujii, T., Chee, S.S., Wang, X.W., Pimenov, V. and Shako, V. (2017): Thermal responses of a gas hydrate-bearing sediment to a depressurization operation. *RSC Advances*, **7**, 5554-5577.
- Yamamoto, K., Wang, X.-X., Tamaki, M. and Suzuki, K. (2019): The second offshore production of methane hydrate in the Nankai trough and gas production behavior from a heterogeneous methane hydrate reservoir. *RSC Advances*, **9**, 25987-26013.
- Yamano, M., Uyeda, S., Aoki, Y. and Shipley, T.H. (1982): Estimates of heat flow derived from gas hydrates. *Geology*, **10**, 339-343.
- * Title etc. translated by R.M.