

# 特集号「メタンハイドレート (Part I) : 産状, 起源と環境インパクト」

—はじめに—

松本 良<sup>1)</sup> 長久保定雄<sup>2)</sup> 奥田 義久<sup>3)</sup>  
棚橋 学<sup>4)</sup> 村松 康行<sup>5)</sup> 庄子 仁<sup>6)</sup>  
長谷川 四郎<sup>7)</sup> 稲崎 富士<sup>8)</sup> 笠原 順三<sup>9)</sup>

## Preface for the Special Issue on “Methane Hydrate (Part I): Occurrence, Origin, and Environmental Impact”

Ryo MATSUMOTO<sup>1)</sup>, Sadao NAGAKUBO<sup>2)</sup>, Yoshihisa OKUDA<sup>3)</sup>,  
Manabu TANAHASHI<sup>4)</sup>, Yasuyuki MURAMATSU<sup>5)</sup>, Hitoshi SHOJI<sup>6)</sup>,  
Shiro HASEGAWA<sup>7)</sup>, Tomio INAZAKI<sup>8)</sup> and Junzo KASAHARA<sup>9)</sup>

**Key words** : methane hydrate, gas hydrate, deep-sea sediments, natural gas resources, global warming, eustatic sea-level change, ODP/IODP

キーワード : メタンハイドレート, ガスハイドレート, 深海堆積物, 天然ガス資源, 地球温暖化, 海水準変動, 国際深海掘削計画

水の惑星・地球を長期間宇宙から眺めていると、極域付近に数万～10万年単位で大きくなったり小さくなったりする氷冠が際立って見えるに

違いない。気候変動を反映する大陸氷床の消長は海水準を変動させ、地球表層環境と生物界の変遷に大きく寄与してきたことが知られており、“水

<sup>1)</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

<sup>2)</sup> 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) 石油開発技術本部 (TRC)

<sup>3)</sup> 産業技術総合研究所固体高分子形燃料電池先端基盤研究センター (FC-Cubic)

<sup>4)</sup> 産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門

<sup>5)</sup> 学習院大学理学部化学科

<sup>6)</sup> 北見工業大学未利用エネルギー研究センター

<sup>7)</sup> 熊本大学大学院自然科学研究科

<sup>8)</sup> 土木研究所技術推進本部

<sup>9)</sup> 静岡大学理学部地球科学教室

<sup>1)</sup> Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, University of Tokyo

<sup>2)</sup> Technology and Research Center (TRC), Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC)

<sup>3)</sup> Polymer Electrolyte Fuel Cell Cutting-Edge Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

<sup>4)</sup> Institute for Geo-Resources & Environment, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

<sup>5)</sup> Department of Chemistry, Faculty of Science, Gakushuin University

<sup>6)</sup> New Energy Resources Research Center, Kitami Institute of Technology

<sup>7)</sup> Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University

<sup>8)</sup> Advanced Technology Department, Public Works Research Institute

<sup>9)</sup> Faculty of Science, Institute of Geosciences, University of Shizuoka

の水”の挙動と役割についての関心は高い。一方、地球には“水の氷”のほかに、“メタンと水からなる氷=メタンハイドレート”が存在し、炭素循環への直接的な関与を通じて地球表層変動に密接に関わっているが、このことは20世紀半ばまでほとんど知られていなかった。まして海底下のメタンハイドレートが拡大・縮小して大気・海洋系と水やメタンのやり取りをしていたなど知る由もなかった。

メタンハイドレートは、低温・高圧状態で安定に存在(図1)し、氷冠周辺の永久凍土域や、水深数百~数千メートルの海底の堆積物中に広く存在する。地表で目にするものはほとんどなく、その存在が知られるようになったのは深海底の調査が飛躍的に進んだ20世紀後半以降(例えば、Shipley *et al.*, 1978; 松本, 1987)のことである。これをメタンハイドレートの“再発見”と呼ぶ(松本, 1996)。メタンハイドレートの最大の特徴は、大量の炭素を取り込んでいることであり、その炭素量は一万ギガトン(10兆トン)(Kvenvolden, 1994)ともいわれる。大気二酸化炭素の20倍、海洋に溶存する炭酸の30%にも相当する巨大な炭素リザーブであるメタンハイドレートの、表層環境とりわけ生物圏への影響は“水の氷”よりはるかに大きいと予想され、実際、地球史における生物進化や環境変動に劇的な影響をもたらしたのではないかと注目されている(例えば、Dickens *et al.*, 1995; 松本, 1995; Kennet *et al.*, 2000)。しかしメタンハイドレート不安定化の要因や環境インパクトの発現機構についてはわからないことが多い。温暖化はメタンハイドレートの不安定化要因の一つであるが、温暖化による海水準の上昇は海底下のメタンハイドレートには安定化要因でもある。逆に、寒冷化による海水準の低下=圧力減少が広域的な不安定化を引き起こしうる。温暖・寒冷の変動が氷床の消長=海水準の高低に対応する現在のような氷室期の地球と、白亜紀や古第三紀のように大陸氷床が存在しなかった温室期の地球では、メタンハイドレートの挙動とそのインパクトは異なっていたと考えられる。

メタンハイドレートの“再発見”が現代の人類

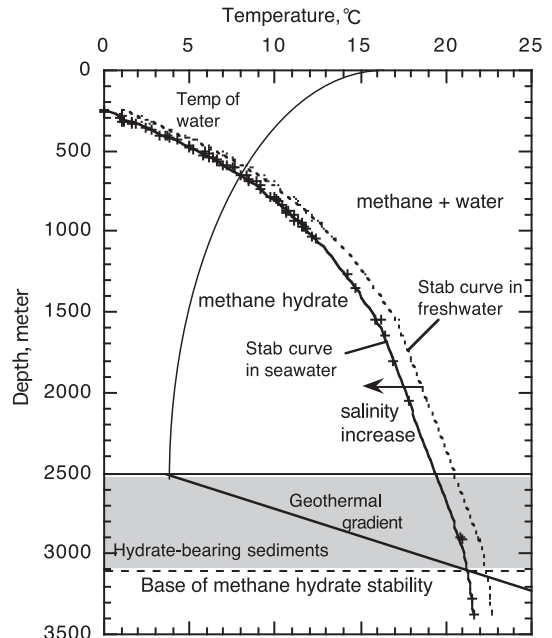


図1 メタンハイドレートの安定領域図。破線は淡水中、実線は海水中での三相平衡カーブ。間隙水の塩分が大きくなると平衡カーブはより低温・高圧側へシフトする。カーブの低温・高圧側でメタンハイドレート安定。

Fig.1 Stability field of methane hydrate in freshwater (broken line) and sea-water (solid line). Lower temperature and higher pressure are required for the stability at hyper-saline condition.

社会にもたらす直接的な恩恵は新しいエネルギー資源としてのポテンシャルである。大陸棚~大陸斜面の堆積物中に“固体状の天然ガス”が広く存在するという事は、国産エネルギー資源は少ないが広大な排他的経済水域を持つ海洋国家にとって夢のような話である。中東へのエネルギー資源依存度の大き過ぎる国々にとっても、供給源の多様化という視点から魅力的である。従来型の石油・天然ガスの埋蔵量は間もなくピークを迎えるといわれているが、その後の代替エネルギーとして、また、単位エネルギー当たりの二酸化炭素排出量の少ないクリーンエネルギー源として、海洋のメタンハイドレートは人類社会が直面している環境と資源という2つの課題解決への重要なキー

プレーヤーであるといえよう。「海洋基本法」の施行（2007年7月）と「海洋基本計画」の閣議決定（2008年3月）を受け経済産業省で検討中の『海洋エネルギー・鉱物資源開発計画』では、(1)メタンハイドレート、(2)石油・天然ガス、(3)海底熱水鉱床の3つの開発ターゲットの一番目に位置づけられている。

化学物質としてのメタンハイドレートは19世紀にはすでに知られており合成もされていた（Davy, 1811; Faraday, 1823）が、その重要性が認識されたのは数10年前に深海堆積物中に“再発見”されて以降である。調査研究が急速に展開されてきたとはいえ、研究の現状といえば、その分布と起源がようやく明らかにされ始めたところである。集積のメカニズムと地質的背景、不安定化機構とその直接の影響と規模については、定性的なモデルが提示されているに過ぎず、実証的な調査研究の基礎が準備された段階である。メタンハイドレートの調査研究において、我が国は早い段階から重要な役割を担ってきた。今日のメタンハイドレート研究の契機となった国際深海掘削計画ODP（Ocean Drilling Program）Leg164ブレイクリッジ掘削には共同首席研究者をはじめとする多くの日本人が乗船参加し深海ハイドレート研究の基礎を築いた（Paull and Matsumoto, 2000）。メタンハイドレートの資源化を世界に先駆けて国家プロジェクトとして立ち上げたのも我が国の経済産業省であった。それからすでに10年以上たち、諸外国でも資源化プロジェクトが立ち上がり、国の内外で多様な調査研究が展開されている。トップランナーである我が国の資源化プロジェクトは、2009年より、世界ではじめてとなる予定の海洋産出試験を実施するフェーズ2に入ることが決まった。学術研究では、オホーツク海や日本海、南シナ海など西太平洋の縁海域で集積度の高い新しいタイプのメタンハイドレートが発見され、その成果は世界へ発信されている（Matsumoto, 2005）。

このような状況の中、2008年5月、日本地球惑星科学連合ではメタンハイドレートに関する2つのセッション「西太平洋・縁海のガスハイド

レートとメタン湧水」と「東部南海トラフのメタンハイドレートと資源開発」がもたれ口頭とポスターを合わせて約80編の研究論文が発表された。これらは、我が国におけるメタンハイドレート調査研究の一つの到達点を示すとともに、今後の展開へ向けての経過点でもある。地学雑誌特集号Part Iは、日本海とオホーツク海のメタンハイドレートとメタン湧出、およびそれらの環境インパクトに関する論文11編からなる。特集号Part IIは南海トラフのメタンハイドレート資源化プロジェクト関係論文を中心に日本海メタンハイドレート論文も含め118巻4号（2009年8月）として刊行される予定である。

総説（松本, 2009）にも述べられているように、水分子とガスからなるハイドレートにはメタンのほかにエタンやプロパン、あるいは二酸化炭素、硫化水素ガスが含まれることがあり、これらを総称して「ガスハイドレート」を使う。ほとんどメタンだけからなると推定される場合でも、厳密には、結晶構造と組成を決定した上ではじめて「メタンハイドレート」を使えるので、国際会議のセッション名も「ガスハイドレート」が一般的である。しかし、我が国では、資源開発プロジェクト「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」の影響で「メタンハイドレート」が広く一般に使われているため、本特集号では便宜的にメタンハイドレートを使うこととした。ただし、2～3の論文ではガスハイドレートを使っている場合もあり、特に英語表記ではgas hydrateを使っている場合があるのでこの点ご承知おきいただきたい。

特集号Part Iでは冒頭、「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ー発見のインパクト—」（松本, 2009）で、メタンハイドレートとはそもそもどんなものでどこにあるのか、地球と人類にとってメタンハイドレートはどのように関与するのか、国の内外の研究動向はどうか、といった問題に焦点を絞った解説がされ、特集号全体への導入となっている。この論文では、Web of Scienceの検索から、1991年より調査研究が爆発的に拡大すること、これら研究の隆盛

が、国際深海掘削計画のガスハイドレート掘削と国の資源探査プロジェクトを契機としたものであることが示されている。深海底堆積物にメタンハイドレートが発見されてまもなく、過去の温暖期におけるメタンハイドレートの大量分解が地球環境を劇的に変えたとするモデルが提唱されたことが引用されるが、モデルの精密化やモデルそのものへ反論があることも指摘されている。メタンハイドレートの資源化プロジェクトについてその背景と経緯が要約され、資源探査から開発生産の段階に発展する段階での課題についての紹介がされている。

続く松本ほか(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」では、2004年以降5年間の集中的な上越海盆調査で得られた多くの新しいデータに基づき、縁海におけるメタンハイドレートの産状の特徴と塊状集積体の生成プロセスと進化について詳述されている。深部から海底へ向けて発達する流体移動帯(ガストムニー)が深部熱分解起源ガスの移動経路となり、ガストムニーとその周辺に塊状の熱分解起源メタンハイドレートが密集して生成する過程が明らかにされる。地温勾配から推定されるBSR深度と、地震探査の時間断面上に出現するBSRの時間深度より、海底-BSR間の堆積物の平均P波速度が1 km/sと異常に小さいことが示され、その理由について議論される。浅所における継続的なメタンハイドレートの集積が重力アンバランスを引き起こし、自己崩壊し浮上する様子が述べられている。さらに最終氷期最寒期の海水準最低期には、海底下で大規模なメタンハイドレート分解がおり、大量のメタンが噴出、海底に巨大な凹地ポックマークをつくった可能性が指摘される。

「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」(上嶋ほか, 2009)では、深海底構造・微地形探査パッケージ(DAI-PACK)を用いて海底の微地形とメタン湧出およびメタンハイドレート分布との関係が示される。DAI-PACKとはサブボトムプロフィールとサイドスキャンソナーを組み合わせた

パッケージをROV(有索無人探査機)に搭載し、分解能の高い地形と表層地質構造を明らかにしようというものである。日本海、上越沖では海底付近にメタンハイドレートが分布しその深部にガストムニーが発達、さらにメタンハイドレート分解によって凹凸のある地形が形成されているため、DAI-PACKのマッピングは全体像の把握に効果的である。

「佐渡南西沖のマウンド・ポックマーク群下の三次元地震波速度構造」(佐伯ほか, 2009)では、2001年に経済産業省が実施した3次元地震探査の反射法データを用いた高密度の速度解析を行っている。その結果、ガストムニーとその周辺にはP波速度が局所的に2 km/sに達する場所もあるが、海鷹海脚上では、水のP波速度1.5 km/sよりも小さな低速度異常が広範囲に認められることを示し、松本(2009)と同様の結果を得た。マウンド・ポックマーク直下に局所的に出現する高速度帯の実態について、柱状の高速度物体が示す合成地震記録を用いて検証している。

「オホーツク海および日本海に胚胎する表層型ガスハイドレート鉱床における間隙水のハロゲンと放射性ヨウ素同位体(<sup>129</sup>I)の地球化学」(戸丸ほか, 2009)では、地質状況の異なるオホーツク海、日本海上越沖、日本海隠岐トラフで採取されたピストンコア堆積物について、間隙水中の硫酸、塩素、臭素、ヨウ素および放射性ヨウ素同位体を決定し比較している。堆積速度の違いにより溶存成分の濃度プロファイルが明瞭に異なること、有機物由来のハロゲンが深部で強く濃集することが示されている。注目すべきは、ヨウ素同位体による起源有機物の年代の違いであり、オホーツク海、日本海上越沖、日本海隠岐トラフでそれぞれ、3500万年、3000万年、4000万年であった。堆積物の大量供給時期の違い、基盤岩類からの寄与の違いと説明される。

「なつしまNT06-19(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」(荻原ほか, 2009)では、冷凍保存して持ち帰ったメタン湧出海域の表層泥サンプルを、脱炭酸塩後に溶媒抽出、ガスクロマト

グラフ質量分析計でバイオマーカー分析を行った。その結果、いずれの場所からも嫌氣的メタン酸化古細菌 (ANME) のバイオマーカーを検出した。バクテリアマット直下でメタン濃度が最大の堆積物中からは、ANME-1、それ以外の場所では ANME-2 であった。

「上越沖海底メタン湧出地域の現世底生有孔虫群集」(的場・中川, 2009) では、生体底生有孔虫の群集解析に基づき、メタン湧出が活発な海域でどのような異常が見いだせるか、メタン湧出の影響が及ぶ範囲はどれほどかを検証している。メタン湧出域において生体の *Bolivina pacifica*, *Stainforthia fusiformis* などは必ずしも多くはないが遺骸は多い。このことから近い過去に著しいメタン湧出があった可能性を指摘する。メタン湧出域の生体底生有孔虫の中では、石灰質有孔虫が多く膠着質有孔虫は少ない。一方、遺骸浮遊性有孔虫の個体数は圧倒的に多い。これは、メタン酸化-硫酸還元環境下において殻の炭酸塩が保存されやすくなったと説明される。

「計量魚群探知機によるメタンブルームの観測とメタン運搬量の見積もり」(青山・松本, 2009) においては、魚群探知機により海底から浮上するメタンの気泡が見事にイメージ化され、メタンハイドレート探査の予備調査として有効であることが強調される。筆者らは ROV ハイパードルフィンを使い、海底で一定量のメタンバブルを捕集-放出し、魚群探知機に記録される強度 (後方散乱強度) の検量を行い、計量魚探イメージからメタン湧出量の推定を試みた。

残る 3 編の論文は、オホーツク海からの報告である。庄子ほか (2009) 「オホーツク海のメタンハイドレートとブルーム」では、オホーツク海メタンハイドレートの研究史と調査概要を述べている。メタンブルームが観測され海底下にメタンハイドレートや炭酸塩コンクリーションが分布し、時に、深部にまで達するガスチムニーが見られる海底の円形地形を「ストラクチャー」という語で表現する。メタン移動通路としての断層の発達に関連して、大陸斜面上の段差 (ステップ) が注目される。また、ストラクチャーの分布と海底

地すべりとの関係を論じている。深部メタンの移動に関してアムール・プレートとの関係も指摘される。

南ほか (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」は、メタンハイドレート賦存域と参照サイトにおける間隙水中の硫酸、カルシウム、マグネシウム、カリウム、ナトリウムの濃度および酸素同位体と水素同位体組成を測定し、間隙水の進化と移動について議論している。湧水に伴うメタン移動、伴わないメタン移動を識別することに成功している。さらに水素同位体の異常から、深部に海水とは異なる湧水の存在を指摘している。

本特集号の最後、八久保ほか (2009) 「オホーツク海天然ガスハイドレートの同位体組成とその結晶特性」では、ガスハイドレートのガス組成と安定同位体組成を決定し、オホーツク海のハイドレートは二酸化炭素還元経路による微生物起源メタンに熱分解起源メタンが少しだけ混在したものであると結論している。ラマンスペクトルから水和数 (メタンと水の分子数比) を 6.19 と決め、ブレイクリッジのメタンハイドレートとほぼ同じであると指摘する。さらに解離熱が測定され水和数との関係について議論される。解離熱は海洋のメタンハイドレートの安定性にとって重要な因子であり、解離熱が水和数に依存するとの指摘は注目される。

本特集号が資源と環境の二つの視点から関心の高い海洋のメタンハイドレートの理解と更なる研究の発展に役立てば幸いである。

## 文 献

- 青山千春・松本 良 (2009): 計量魚群探知機によるメタンブルームの観測とメタン運搬量の見積もり. 地学雑誌, **118**, 156-174.
- Davy, H. (1811): On some of the combinations of oxy-muriatic gas and oxygen, and on the chemical relations of the principals to inflammable bodies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **101**, 1.
- Dickens, G.R., O'Neil, J.R., Rea, D.K. and Owen, R.M. (1995): Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon-isotope excursion at the end of the Paleocene. *Paleoceanography*, **10**, 965-971.

- Faraday, M. (1823): On the condensation of several gases into liquids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **22**, 189.
- 八久保晶弘・坂上寛敏・南 尚嗣・布川 裕・庄子仁・Mateeva, T.・Jin, Y.K.・Obzhairov, A. (2009): オホーツク海天然ガスハイドレートの同位体組成とその結晶特性. 地学雑誌, **118**, 207-221.
- 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.
- Kennett, J.P., Cannariato, K.G., Hendy, I.L. and Behl, R.J. (2000): Carbon isotopic evidence for methane hydrate instability during Quaternary Insterstadials. *Science*, **288**, 128-133.
- Kvenvolden, K.A. (1994): Natural gas hydrate occurrence and issues. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **715**, 232-246.
- 的場保望・中川 洋 (2009): 上越沖海底メタン湧出地域の現世底生有孔虫群集. 地学雑誌, **118**, 136-155.
- 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.
- 松本 良 (1995): 炭酸塩の d13C 異常の要因と新しいパラダイム「ガスハイドレート仮説」. 地質学雑誌, **101**, 902-924.
- 松本 良 (1996): 深海底のメタンハイドレート: 地球の新しい炭素貯蔵庫. 科学, **66**, 600-604.
- Matsumoto, R. (2005): Methane plumes over a marine gas hydrate system in the eastern margin of Japan Sea: A possible mechanism for the transportation of subsurface methane to shallow waters. *Proceedings of the 5th International Conference on Gas Hydrates, Trondheim*, 749-754.
- 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.
- 松本 良・奥田義久・蛭田明宏・戸丸 仁・竹内瑛一・山王梨紗・鈴木麻希・土永和博・石田泰士・石崎理・武内里香・小松原純子・Freire, A.F.・町山栄章・青山千春・上嶋正人・弘松峰男・Snyder, G.・沼波秀樹・佐藤幹夫・的場保望・中川 洋・角和善隆・荻原成騎・柳川勝則・砂村倫成・後藤忠則・廬 海龍・小林武志 (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.
- 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・庄子 仁・Mateeva, T.・Jin, Y.K.・Obzhairov, A.・Poort, J. (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.
- 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.
- Paull, C.K. and Matsumoto, R. (2000): Leg 164 Overview. in *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results* edited by Paull, C.K., Matsumoto, R. and Wallace, P.J., **164**, 3-10.
- 佐伯龍男・稲盛隆徳・長久保定雄・Ward, P.・浅川栄一 (2009): 佐渡南西沖のマウンド・ポックマーク群下の三次元地震波速度構造. 地学雑誌, **118**, 93-110.
- Shipley, T.H., Buffeler, R.T. and Watkins, S. (1978): Seismic stratigraphy and geologic history of Blake Plateau and adjacent Western Atlantic continental margin. *AAPG Bulletin*, **62**, 792-812.
- 庄子 仁・Jin, Y.K.・Obzhairov, A.・Salomatin, A.・Baranov, B.・Gladyshev, V.・八久保晶弘・南 尚嗣・山下 聡・高橋信夫 (2009): オホーツク海のメタンハイドレートとブルーム. 地学雑誌, **118**, 175-193.
- 戸丸 仁・南 尚嗣・庄子 仁・蛭田明宏・松本 良・陸 尊礼・Fehn, U.・Jin, Y.K.・Obzhairov, A. (2009): オホーツク海および日本海に胚胎する表層型ガスハイドレート鉱床における間隙水のハロゲンと放射性ヨウ素同位体 ( $^{129}\text{I}$ ) の地球化学. 地学雑誌, **118**, 111-127.