最近の研究から

ガスハイドレートに関する最近の研究 —エネルギー資源としてのガスハイドレート—

松 本 良

1. はじめに

水分子の作るケージ(包接格子)中に気体分子が捉えられた構造をもつ氷状の固体物質を一般にガスハイドレートと言い、気体が主としてメタンであるものをメタンハイドレートと呼ぶ。ケージがすべてメタンガス分子で充填されたとき(占有率100%)メタンと水分子の比は8:46となるので、メタンハイドレートの理想化学式は、 $\text{CH}_4 \cdot 5.75\text{H}_2\text{O}$ と表せる(図1)。これからメタンハイドレート中に含まれるメタンガス量(体積)は、標準状態でハイドレート自体の約170倍と計算される。つまりメタンハイドレートは、効率的なメタン(炭素)貯蔵庫とすることができる。

ガスハイドレートは、パイプラインの閉塞事故の原因物質として、一部の研究者には以前から関心を持たれていたが、地球科学者の注目を引くようになったのは最近の20-30年である。(松本ほか, 1994)。直接の引き金は、北極海地域での石油・天然ガスの開発に伴う、永久凍土およびその下位の堆積物からの天然ガスハイドレートの発見(たとえば Makogon, 1974; Collett, 1988)、および、最近の海洋物理探査、掘削調査による海底堆積物中からのメタンハイドレートの発見と回収(Shipley *et al.*, 1979; 松本, 1987; Kvenvolden, 1988)である。とくに、大陸縁辺域の深海～半深海堆積物にメタンハイドレートが広く分布していることが分かってくると、資源、環境、自然災害など、さまざまな側面から、海洋のメタンハイドレートの重要性が注目されるようになってきた。

2. 海洋のメタンハイドレートの生成と分布

堆積物中の有機物は、はじめはバクテリアによって分

図1 メタンハイドレートの結晶構造。結晶格子は水分子の配列だけを示す。メタンハイドレートの単位胞(ユニットセル)は、5角12面体のケージ2個と、変形14面体のケージ6個からなる。これは8個のメタンガス分子を46個の水分子が取り囲むことを意味しており、水和数(ガス分子一個に対する水分子の数)は5.75と計算される。

図2 メタンハイドレートの安定条件。太い実線の左下、低温高圧部でメタンハイドレートは安定に存在する。メタンハイドレートは水温曲線(破線)が生成曲線(太い実線)と交差する水深400m以深の堆積物中で生成する。堆積物中のメタンハイドレート安定領域は、水深、水温、地温勾配によって決まる。水深2500mでは、低層水温3°C、地温勾配30°C/kmのとき(A点)海底下610mまでがメタンハイドレート安定領域となる。水温が8°Cに上昇すると(B点)安定領域基底は420mとなる。

Recent studies on gas hydrates—Gas hydrates as energy resources—

東京大学大学院理学系研究科地質学専攻

〒113 東京都文京区本郷7丁目3番1号

(Ryo Matsumoto, Geological Institute, Graduate School of Science, University of Tokyo)

解されてメタンを生成し、埋没が進行し堆積物の温度が上昇すると熱分解を受けてメタンやエタンなどを生成する。大陸縁辺部の堆積物は堆積時には数%以上の有機物を含むものが多く、埋没過程で多量のメタンを発生すると考えられる。生成した炭化水素ガスは、はじめ間隙水に溶解するが、過剰なガスは気泡となって堆積物中を移動する。メタンの気泡（フリーガス）は、海底面からある一定の深度以浅では、水分子とともにメタンハイドレート結晶を作り、堆積物の間隙に沈殿する。このようにして、海底から一定深度までの堆積物は、さまざまな程度にメタンハイドレート結晶を含むことになる。ハイドレートの分布基底深度は、その場所の水深と堆積物中の温度勾配により決まる。温度勾配 $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ のとき、水深2500mで、分布基底深度は610mである。（図2）。

3. 海洋のメタンハイドレートの探査

堆積物中にメタンハイドレートが生成すると堆積物は固化し、P波伝播速度が大きくなる。逆に、堆積物中にフリーガスが集積するとP波伝播速度は小さくなる。つまり、メタンハイドレートを含む堆積物中では分布の基底面を境界として、著しい物性（音響インピーダンス）のコントラストが生じることとなる。地震探査でこの境界面は、位相が反転した振幅の大きい反射面（海底疑似反射面：BSR）として記録される。したがって、BSRの分布から、メタンハイドレートの分布域を推定することができる。

図3 日本周辺海域におけるBSR（海底疑似反射面）の分布（佐藤ほか，1996）。番号は本文参照。等深線の数字はメートル。

日本列島周辺でメタンハイドレートの分布が予測されている海域は、東海沖から四国沖の南海トラフ陸側斜面（図3，海域1）、銚子沖、十勝沖（海域2）、オホーツク海の北見大和堆（海域6）、西津軽沖（海域3）などである（佐藤ほか，1996）。南海トラフのBSR分布面積は 36000km^2 と見積もられている。世界の海洋では、北米の東海岸沖および西海岸沖、メキシコ湾、ペルー沖、北海などがある（Kvenvolden, *et al.*, 1993）。ほかに、カスピ海や黒海でもメタンハイドレートの存在が確認されている。

4. メタンハイドレート量の見積もり—ODP Leg164の成果から

メタンハイドレートの分布面積はBSRの分布から推定できるが、堆積物中のどこにどれくらい存在しているかは、実際に掘削してみなければ、はっきりしたことは分らない。BSRの振幅（強度）が強いことから、メタンハイドレートは分布基底付近に密集している可能性が高いとされていたが、基底深度よりずっと浅いところからも塊状の結晶が回収されており、実際の分布、産状はよく分かっていなかった。これらの問題を明らかにするため、1995年10月～12月、北米東海岸ブレイクリッジで、ハイドレート分布深度を貫く掘削（ODP Leg164）が行われ、多数のハイドレート試料（図4）、堆積物試料とともに、多くのデータが採取された。ハイドレートの分布、産状、量を知る上で特に重要な情報は検層（well loggings）と間隙水の塩素濃度（図5）である。速度検層からは堆積物中のP波伝播速度の変化を知ることができ、塩素濃度の異常からは、直接、メタンハイドレート分布と存在量を知ることができる。これらのデー

図4 国際深海掘削計画（ODP Leg164）の掘削により、1996年12月4日北米東海岸沖のブレイクリッジから回収された塊状メタンハイドレート。長さ約17cm。

図5 国際深海掘削計画ODP Leg164 (ブレークリッジ) Site997 で回収された堆積物中の間隙水の塩素濃度プロファイル。塩素濃度が異常に小さい層準にメタンハイドレートが含有されていた (Matsumoto and Paull, 1996)。

タから、メタンハイドレートを含む堆積物 (メタンハイドレート分布帯) の厚さは250m, 分布帯の堆積物体積の約3%がメタンハイドレートであることが分かった (松本ほか, 1996; Matsumoto and Paull, 1996)。ブレークリッジのBSR分布面積は24000km²であることから、ブレークリッジのメタンハイドレート量はメタン量に換算して約25兆立方メートル、炭素換算で18ギガトンと見積もることができた。

5. メタン量の見積もり

Leg164の検層により、振幅の大きなBSRの直下 (メタンハイドレート分布基底の直下) にはフリーガス帯が存在することが確かめられた。「圧力コア容器」 (= 圧力を保持して堆積物コアを回収できる掘削装置) で回収された堆積物コアの分析から、フリーガス量はブレークリッジ全体で、約17ギガトン (炭素換算) と見積もることが出来る。つまり、メタンハイドレートとフリーガスを合計すると、ブレークリッジのメタン量は、35ギガトン (炭素)、49兆立方メートル (メタン) になる。これは、BSRが顕著に発達する海域1km²当たり約21億立方メートルに相当する。

6. メタン量と資源量

メタンハイドレートとそれに伴うフリーガスを資源として利用する立場からは、上に計算したメタン量をそのまま資源量 (究極可採資源量) とすることは出来ない。資源として利用するためには、ある程度以上メタンハ

イドレートやフリーガスが集積する必要がある。また、一定程度以上に集積していても、その全てを回収出来るわけではない。上で求めたメタン量に集積率と回収率を考慮したものが、エネルギー資源として考慮の対象になるメタンハイドレートおよびフリーガスである。集積率は通常の油・ガス田でも堆積盆ごとに異なるはずであり、メタンハイドレートについてどれくらいの集積率が適当であるか定説はない。奥田(1993)や佐藤ほか(1996)らは安定領域基底付近 (BSR直上) にメタンハイドレートが密集するというモデルに基づいて、集積率を1/200 (=0.005) とし、回収率はハイドレートについては0.1、フリーガスについては0.75とした。つまり、メタン量として計算された数値の270分の1~2000分の1が、究極可採資源量と言うことが出来る。

7. 日本周辺海域の資源量

南海トラフにおけるBSRの分布面積は35000km²である。メタンハイドレート帯を貫く掘削データがないため、堆積物中の分布、メタン存在量などは分かっていない。佐藤ほか (1996) は、ハイドレート安定領域の厚さを400m、堆積物の平均孔隙率を50%、ハイドレートが孔隙の半分を充填していると仮定して試算を行い、メタンハイドレートからの分解ガスの究極可採資源量を3500億立方メートル、フリーガスの究極可採資源量を1兆2000億立方メートルと見積もった。さらに、ほかの海域のBSR分布面積も加えると (合計60,000km²)、日本周辺海域全体で、メタンハイドレートとフリーガスを合わせた資源量は約2兆6000億立方メートルと試算される。これは、現在の国内天然ガス消費 (540億立方メートル/年) の約50年分に相当する。

8. ガスハイドレートの鉱床開発プロジェクト

資源エネルギー庁は1995年、世界に先駆けて、海洋のメタンハイドレートを次世紀のエネルギー資源として開発するプロジェクトをスタートした。このプロジェクトは、単に石油代替エネルギーを日本周辺に確保するというだけでなく、石油資源がやがては枯渇に向かう中、次世代へ向けて新しいタイプのエネルギー資源を開発しようとする、先見的、先導的な試みである。3年後の試掘へ向け、石油公団を中心として、さまざまなテーマの研究開発プログラムが展開されている。今後の研究の進展により、メタンハイドレートに関する情報が飛躍的に増大し、資源、環境、自然災害とメタンハイドレートの関わりについて、我々の理解がさらに深まる事が期待される。

文 献

- Collett, T. S., 1988: Geologic Interpretations relative to gas hydrates within the North Slope of Alaska, U. S. Dept. of Energy Open-file Rept, 88-389.
- Kvenvolden, K. A., 1988: Methane hydrate—a major reservoir of carbon in the shallow geosphere? Chem. Geol., **71**, 41-51.
- Kvenvolden, K. A., Ginsburg, G. D., and Soloviev, V. A., 1993: Worldwide distribution of subaquatic gas hydrates. Geo-Marine Lett., **13**, 31-40.
- Makogon, Y. F., 1974: Hydrate of natural gas. Geoexplores Associates, Inc., Denver, 178pp.
- 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, 奥田義久, 青木 豊, 1994: メタンハイドレート 21世紀の巨大天然ガス資源. 日経サイエンス, 253pp.
- 松本 良, 渡辺芳夫, 佐藤幹夫, 岡田尚武, 廣木義久, 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 ブレクリッジ掘削の成果. 地質学雑誌, **102**, 932-944.
- Matsumoto, R., and Paull, C., 1996: Methane gas hydrate drilled at Blake Ridge. EOS, Amer. Geoph. Union, **77**, 219.
- 奥田義久, 1993: 天然ガスハイドレートの探査と開発への展望. 日本エネルギー学会誌, **72**, 425-435.
- 佐藤幹夫, 前川竜男, 奥田義久, 1996: 天然ガスハイドレートの分布と資源量の推定. 地質学雑誌, **102**, 959-971.
- Shipley, T. H., Houston, M. H., Buffler, R. T., Shaub, R. J., McMillen, K. J., Ladd, J. W., and Worzel, J. L., 1979: Seismic evidence for widespread possible gas hydrate horizons on continental slopes and rises. A. A. P. G., Bull., **63**, 2204-2213.