講 演

海底メタンハイドレートの
資源ポテンシャルに関する検討課題*

松 本 良**

(Received January 10, 1995; accepted January 17, 1995)

Feasibility of methane hydrate under the sea
as a natural gas resource

Ryo Matsumoto

1. はじめに

メタンハイドレートは、固体であるが、室温では容易にメタンガスと水とに分解し、そのとき発生するメタンガスの量は体積にして固体メタンハイドレートの百数十倍である。永久凍土域のメタンハイドレートは、シベリア、カナダ北極海諸島、マッケンジーデルタなどから報告されている。メタンハイドレートが最初に商業生産されたのも、西シベリアのメソヤハガス田である。

地球上でメタンハイドレートが大規模に存在するもう 1 つの場所は、海底堆積物である。1970 年代以降、国際深海掘削計画 (DSDP/ODP) をはじめとした海底の地球物理探査、地質調査、深海堆積物の掘削調査により、大陸棚～大陸斜面の海底堆積物中にメタンハイドレートが広く分布することが明らかとなってきた。海底メタンハイドレートの分布域は大消費地に近いものが多く、輸送コストの点で、永久凍土域のハイドレートガス田より経済的に有利であり、資源ポテンシャルも高いと考えられている。1980 年代後半からは、二酸化炭素による地球温暖化への対応および石油代替資源の候補として、天然ガスへの関心が高まり、非在来型天然ガスとしての海底メタンハイドレートも注目を集めるようになってきた。

海底堆積物中のメタンハイドレートは、資源ポテンシャルとしてだけでなく、地球表層における炭素循環、気候変動への影響、という視点からも重要な研究対象であり、最近では多くの研究者が関心を持つようになってきた。このような関心の高まりの中で、ODP では、1995 年冬にメタンハイドレート層の掘削と標本の回収を主目的とした掘削航海 (Leg 164) をフロリダ半島東方のブレークリッジで行うことを決定し、我が国からも、数人の研究者がこの調査に参加することが決まっている。一方、我が国では、1995 年度から始まる第 8 次五年計画の基礎調査に、日本周辺海域におけるメタンハイドレート層の試錐が含まれた。95 年中に行われる Leg 164 の掘削と、数年後に計画されている基礎試錐調査により、海底メタンハイドレートに関する理解が飛躍的に高まり、海底ハイドレートガス田の開発が具体的なプロジェクトとして検討され始めるのも遠い将来のことではないと言えよう。

本稿では、はじめにメタンハイドレートの物性、生成条件について述べる。次に話題を資源ポテンシャルの高い海域のメタンハイドレートに絞り、これまでに何が分かっている、何が分かっているのか、資源開発を考えると、何が問題となるのか、具体例を挙げながら検討する。

2. メタンハイドレートとは

メタンハイドレートとは、水分子とメタンガス分子とから成る氷状の固体結晶である。水分子が内部に 5~6 Å の大きさの空隙をもった立体網状構造を作り、その

* 平成 6 年 10 月 27 日、平成 6 年度石油技術協会秋季講演会で講演

This lecture was delivered at the 1994 JAPT Autumn Meeting held in Tokyo, Japan, October 27, 1994.

** 東京大学大学院理学系研究科 The University of Tokyo

空隙にメタンガス分子を包接している。このような構造をした化合物は「包接化合物(クラスレート)」と呼ばれており、その骨格となる網状構造を包接格子と言う。水分子と気体分子からなるクラスレートを一般にガスハイドレートと言ひ、ガス分子がメタンであるものを特にメタンハイドレートと呼ぶ。天然に産するガスハイドレートのほとんどはメタンハイドレートであるため、天然のハイドレートについて論じているとき、ガスハイドレートとメタンハイドレートはほぼ同義とみなして良い。

2.1 ガスハイドレートの結晶構造

ガスハイドレートは一定の結晶構造を持った鉱物であり、低温エックス線回折装置により、対称性や格子定数を決定することができる(例えば Hondoh *et al.*, 1990)。一般に結晶構造(立体網状構造の大きさと水分子の配列状態)は、包接されるガス分子の大きさによって異なり、二酸化炭素、メタンなど分子の大きさが5.2 Åより小さなガス分子は、単位胞のサイズが12 Åの構造-Iハイドレートを、分子の大きさが5.9~6.9 Åのガス分子を包接するものは単位胞のサイズ17 Åの構造-IIハイドレートを(表1)。メタンハイドレートは構造-Iであり、その単位胞は、5角12面体2個と、変形14面体6個からなる(図1)。これは、8個のガス分子を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1個に対する水分子の数)は5.75と計算され、理想化学式は、

となる。これから計算されるメタンハイドレート中のメタンガス含有量は水1 kg に対してメタンガス 9.66 mol。メタンハイドレートの密度は0.91であるから、メタンハイドレート中のメタンガスの体積は、標準状態にして、ハイドレート自身の約170倍と計算される。この倍率を標準容積倍率と呼ぶ。包接格子の空隙がすべてガス分子で満たされることは希であり、充填率が70~80%程度のことが多い。それでも含有されるガスの量は、それ自身の120倍ほどになる。一方、構造-IIハイドレートでは、ガス分子と水分子の比は、8:136 となり、水和数は17と計算される。この場合、標準容積倍率は60倍程度であり、一定体積のハイドレート中に含有されるガス量は、構造-Iの1/2~1/3となる。

ガスハイドレートの構造は、包接されるガス分子の大きさによって異なりと長い間信じられてきたが、実験的

表1 様々なハイドレートの0℃における
解離圧と構造型

Gas	P^{atm} (0℃) diss	Hydrate Structure
N ₂	160	I
O ₂	120	I
A	95.5	I
Kr	14.5	I
Xe	1.50	I
CF ₄	41.5	I
CH ₄	26.0	I
C ₂ H ₆	5.2	I
$\overline{\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2}$	0.70	I (metastable)
CO ₂	12.5	I
H ₂ S	0.92	I
Cl ₂	0.32	I
Br ₂	0.056	*
C ₃ H ₈	1.74	II
$\overline{\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2}$	0.62	II
CHCl ₃	0.065	II
C ₂ H ₅ Cl	0.26	II
CBrClF ₂	0.19	II

(Miller, 1974)

図1 メタンハイドレート(構造-I)の結晶構造と、5角12面体のケージ

には確かめられていることが、必ずしも表1に示すようにはなっていないことが最近分かってきた (Hondoh *et al.*, 1990)。例えば、グリーンランド氷床中の窒素と酸素を主成分とする空気ハイドレートは表1からは構造-Iのはずであるが、実際は、構造-IIである。どちらの構造をとるかににより、標準容積倍率、つまり一定体積中に含有されるガス量が大きく変動するので、資源量の見積もりをする際は、構造決定が必須である。しかし、試料を *in situ* 条件で手に入れることが困難であったため、天然のガスハイドレートの結晶構造解析はほとんど進んでいない。

2.2 メタンハイドレートの化学的性質

塩水中で、メタンハイドレートが生成するとき、溶存していた塩分はハイドレート結晶から排除される。このため、ハイドレート化に伴い、固体ハイドレート中に淡水が濃集し、周りの塩水は一層塩分濃度が高くなる。このような作用をガスハイドレートによる「淡水化作用」と言う。この作用により、ハイドレート化が進行した地層中では、間隙水の塩分濃度に異常が起きることが予想される。これは、地層中にガスハイドレートを発見する有効な手がかりの1つとなっているが、どこに、どのくらいの量が存在するかなど、定量的な議論をするためには、水とハイドレートの間での塩類の分配を決定しなければならない。

メタンハイドレートを含む地層中の間隙水と自生鉱物の同位体組成の測定から、ガスハイドレート中の水の酸

素同位体組成は、それと平衡にある周りの水の酸素同位体組成より重くなること、つまり質量数18の同位体に富むことが示唆されている (Matsumoto, 1989; Kvenvolden *et al.*, 1985)。この作用は、間隙水の酸素同位体組成変動の異常の原因となり、「淡水化」作用と同様に、地層中にハイドレートを発見する有効な手がかりとなる。図2に示すのは、ガスハイドレート研究の先駆けとなったブレイクリッジにおける間隙水の酸素同位体組成の深度変化である。この図2で、深度300 mに著しい正の異常が認められる。この異常は、重い酸素同位体をもつガスハイドレートがこの深度範囲に分布しているためと説明される。異常の程度とハイドレート分布密度との関係について議論するには、酸素同位体分別係数を決定しなければならない。

3. メタンハイドレートの生成条件

自然環境でメタンハイドレートが生成するためには、

- (1) 生成するためのスペースがあること、
- (2) 十分なメタンガスと水が存在すること、
- (3) 温度、圧力が生成条件を満足すること、

の3つの条件が満たされなければならない。海底堆積物は十分な粒子間隙と間隙水を持ち、有機物に富んだ大陸棚～大陸斜面堆積物中では有機熟成によって発生する多量のメタンガスと下位から移動するガスの供給により、メタンハイドレート生成に十分なフリーガスが存在すると考えられる。したがって、有機物に富んだ堆積物中で、メタンハイドレートが生成する条件は、適当な温度と圧力である。

3.1 メタンハイドレート生成の温度・圧力条件

メタンハイドレートの生成・分解、つまりハイドレート+水(または水)とフリーメタン+水(または水)の相変化が起こる温度-圧力を、図3に実線で示す。0℃では約26気圧、10℃では70気圧、20℃では220気圧の圧力が必要であり、温度が高くなるほど高い圧力が必要となることが分かる。これは海面からの深度に換算すると、それぞれ、約260 m, 700 m, 2,200 mである。

メタンハイドレート安定領域内の太い実線は、海底堆積物の温度・圧力の変化を示す。実線1は、水深2,700 m、海底(SF)の水温3℃、地温勾配16℃/km、実線2は、水深1,000 m、海底の水温4℃、地温勾配20℃/kmのときの堆積物中の温度・圧力変化である。ここでの圧力とは、間隙水中に浮遊するメタンガスの気泡の圧力で、ほぼ静水圧に等しいと見なせる。堆積物は、はじめはメタンガスハイドレートの安定領域に含まれるが、深部に向かい温度、圧力が実線に沿って上昇、ついにメタンハイドレートの安定境界と交差し(図中B点)、ガ

図2 ブレイクアウターリッジ (DSDP Leg 76 Site 533) で見られる間隙水の酸素同位体組成の変動 (Jenden and Gieskes, 1983)

図3 メタンハイドレートの安定領域 (Claypool and Kaplan, 1974)

ス+水の領域に出る。点Bの深度は海底からそれぞれ1,300 m, 200 mである。この関係から、実線1の条件では、堆積物の上部1,300 mでメタンハイドレートが生成し、実線2では、上部200 mがハイドレート帯となりうることが分かる。このように、水深が大きなところほどハイドレート帯は厚くなる。

3.2 温度・圧力条件のシフト

生成の温度・圧力条件は、ハイドレートのタイプ（構造-I，構造-II）によって異なり，構造-Iより構造-IIの方が，より高温，低圧でも生成する（表1）。メタンハイドレートは構造-Iとされているが，空気ハイドレートの例のように，天然で，構造-IIとして産するメ

タンハイドレートがあるとする，それらは，図3から予測されるより大きな深度でも安定に存在するかもしれない。天然ガスハイドレートの分布深度を見積もる上からも，結晶構造の決定は重要な課題である。

生成条件のシフトで，これまでによく研究されているものは，「混合ガスの効果」と「溶質効果」である。図3で「93%メタン-7%二酸化炭素」と示した実線，「98%メタン-2%硫化水素」と示した実線は，それぞれ，メタンガスに二酸化炭素を7%混合したガス，硫化水素を2%混合したガスからガスハイドレートができる生成曲線である。このように，生成条件の領域が広い（高温，低圧）ガスを混合すると，混合比に応じて生成曲線

は右下（高温、低圧側）へシフトすることが分かる。硫化水素ハイドレートのように、もともと低圧で生成するハイドレートの混合効果は著しい。海底堆積物中では、海水中の硫酸の還元により多量の硫化水素ガスが発生することがあり、メタンとともに混合ガスハイドレートを作ること容易に想像できる。このようなハイドレートは、かなりの深度まで安定に存在する可能性がある。

図3で「メタン-3.5%塩化ナトリウム」と示した実線は、3.5%塩化ナトリウム溶液（ほぼ海水の塩分濃度）からメタンハイドレートができるときの生成曲線である。純水からできるときより約1℃低温となり、安定領域は狭くなりうる。塩化ナトリウムだけでなく、アルコールなどの有機溶剤を加えても、ガスハイドレート化が始まる温度は低下する。この効果を利用すると、温度、圧力を変えずにガスハイドレートを分解することができる。ガスハイドレートガス田でハイドレートからガスを回収する方法として提唱されている。

4. 海域のメタンハイドレートの産状

4.1 BSR とメタンハイドレート

図4にフロリダ東方のブレイクリッジで得られた海上地震探査記録を示す。南西に緩く傾く反射面は、地層面（bedding plane）を表すが、それらと斜交し、海底面に平行な強い反射面が、海底からの往復走時約0.5秒（深度約500 m）のところに現れている。この反射面を海底疑似反射面（Bottom Simulating Reflector; BSR）と呼ぶ。反射面が現れるのは、そこを境界として、上下に音響インピーダンス（密度と地震波速度の積）の異なる地層が存在するからである。境界の上位の地層が下位の地層より密度と地震波速度（音響インピーダンス）が大きいと、地震波の位相が反転することが知られてい

る。メタンハイドレートに由来するBSRでは位相が反転しており、BSRの直上で音響インピーダンスが大きいが分かる。

未固結堆積物中に氷状の固体物質であるメタンハイドレートが生成すると、地震波の伝搬速度が増加することが予想され、合成実験によってもこれは確かめられている（Stoll *et al.*, 1971）。ブレイクリッジのBSR深度は、ほぼメタンハイドレートの安定領域の基底（Base of gas hydrates; BGH）に相当する。さらに、掘削調査により、ブレイクリッジの半遠洋性堆積物は有機物に大変富み、メタンガスを多量に含むことが分かっている。これらの理由から、このBSRは、メタンハイドレートの生成帯の基底に対応すると結論できる。

メタンハイドレートの安定温度・圧力条件についての考察（図3）からは、BSRの上位の地層中にはどこにでもメタンハイドレートが生成することになる。しかし、BSRがBGHに対応する顕著な反射面として現れると言う事実は、(1)安定領域の基底付近に特に顕著な濃集帯が形成されていると言うこと、あるいは、(2)BSRの直下の地層中にフリーガスが濃集し、音響インピーダンスが著しく低下したこと、あるいは(1)、(2)両方の現象が起きていることを意味する。いずれにしろ、埋没続成の進行、温度の上昇により、BGH付近に生成したメタンハイドレートが分解し、その直上の安定領域内の体積物中に再沈殿したり、BSRよりはるかに下位で生成し上方へ移動してきたガスがBGH付近でメタンハイドレートを作って沈殿し、ハイドレート帯の形成に寄与していると推定される。

海域におけるメタンハイドレートの探査では、BSRは極めて有効な手がかりである。しかしこれまでの深海掘削では、顕著なBSRが記録されながら、メタンハイ

図4 ブレイクアウターリッジ Site 533 付近の地震探査記録（Scientific Party, 1983）

ドレートがほとんど見つからない例（例えば Leg 146, Cascadia Margin など）、また逆に BSR が記録されていないのに、メタンハイドレート結晶が回収された例（Leg 127, 奥尻海嶺など）が報告されており、BSR と海底のメタンハイドレートの関係はこれまで考えられていたほど単純ではない。

奇妙なことは、オホーツク海（網走沖）にも見られる。北見大和堆の東方の海盆の地震探査記録（図5）によると、この海域には、2枚のBSR（A, B）が認められる。どちらも海底面に平行で、地層面と斜交する強い反射面で、BSR の特徴を示す。このような反射面は、上に述べたようなモデルでは、説明が難しい。位相の反転があるかどうかは確かめられていないので、この反射面がシリカ鉱物の続成境界（オパール A/オパール CT 境界）あるいは続成的炭酸塩岩の層という可能性を否定することは出来ないが、どちらもハイドレートによる反射と仮定すると、2枚のうちのどちらかが、BGH（安定領域の基底）に対応し、他方は安定領域外の溶け残り（レリック）あるいは、領域内の濃集帯と考えなくてはならない。

海域のメタンハイドレートに天然ガス資源のポテン

シャルを期待するとき、BSR より浅い安定領域内でのハイドレートの分布密度、大きさ、形状、岩相との関係などが重要なパラメーターとなる。しかし、これらはほとんど分かっていない。これらを明らかにするためには、分解能の高い3次元的地震探査、BSR を貫く複数の試錐、分析用試料の回収、LWD（Logging While Drilling）などの検層を集中的かつ総合的に行う必要がある。

4.2 ODP によりメタンハイドレートの回収

国際深海掘削計画（DSDP/ODP）により、ブレークアウターリッジをはじめ、中米海溝、ペルー沖、北海道奥尻海嶺など14ヶ所からメタンハイドレートの結晶サンプルが回収されている。多くは、予期しない場所や層準の未固結堆積物中に、数 mm から 1 cm 程度の氷状の小さな白いかたまりとして見つかったため、詳細な記載や分析データはない。これまでに得られた海のハイドレート試料の中で最も保存状態の良いものは、1984年、DSDP Leg 84（グアテマラ沖中米海溝）Site 570 の海底からの深度 249 m（海面からは、1,965 m）で回収されたコア長 1.05 m の試料である（Kvenvolden *et al.*, 1985）。坑井ログにより、この深度で密度は減少し、速

図5 オホーツク海（網走沖）北見大和堆付近の地震探査記録（地質調査所、未公表資料より）

図6 中米海溝（グアテマラ沖）Site 570 における検層データ（von Huene and Aubouin, 1985），
Original vertical scale 10.0 cm=100 m

度、電気抵抗、孔隙率、ガンマ線強度は増大していることが分かる（図6；Mathews and von Huene, 1985）。この深度には厚さ3～5 mのハイドレートが存在している可能性がある。大きな固まり状である上に、あらかじめ保存用の低温圧力容器が準備されていたため、実験室に運ばれ、ガス組成、同位体組成などの分析が行われている（Kvenvolden *et al.*, 1985）。結果を以下に示す。

ガス組成 $C_1=99.4\%$, $C_2=0.2\%$, $C_3<100$ ppm,
 $CO_2=0.4\%$, $C_1/C_2=497$

溶解水の塩素濃度 0%

ガス/水（体積比）64～67

水和数 19～20

水素同位体組成 $\delta D=+18.0\%$

酸素同位体組成 $\delta^{18}O=+2.0\%$

炭素同位体組成 $\delta^{13}C_{CH_4}=-44.0\%$

$\delta^{13}C_{C_2H_6}=-26.7\%$

$\delta^{13}C_{CO_2}=-2.9\%$

二酸化炭素やエタンもごく少量含むが、ほとんどがメタンのメタンハイドレートである。溶解水からは塩素が検出されない。水和数は、メタンハイドレートの化学式から計算される値5.75よりはるかに大きく、したがって、ガス/水比も64～67と、構造-Iのハイドレートとしては、異常に小さい。この異常には2つの説明が考えられる。1つは、「溶解水」には、メタンハイドレート結

晶以外に由来する水が含まれていたとするもの。ハイドレートの分解は吸熱反応であり、保存中に分解すると周りの熱を奪い温度を下げ、分解して生じたハイドレート由来の水や間隙水を凍らせ、ハイドレート化した堆積物の間に氷の結晶が生じる可能性がある。また、ハイドレート試料を液体窒素やドライアイス中で保存中に大気水蒸気がハイドレート試料の回りに氷として集まる可能性も指摘される。水のサンプリング中にこれらの水が混入すると水和数は大きくなる。もう1つは、回収されたガスハイドレートは、構造-Iではなく構造-IIであったという可能性である。メタンハイドレートは、本来構造-Iのはずであるが、天然では、構造-IIとなる可能性を否定できない。実際、水和数は、構造-IIの値に近い。

5. 海域におけるメタンハイドレートの分布

5.1 世界のメタンハイドレート分布

図7は、Kvenvolden *et al.*, (1993) によってまとめられた世界のメタンハイドレートの分布図に、最近の資料を加えたものである（松本ほか, 1994）。陸域の分布が、検層、試料の回収、ガス分析から決められたものであるのに対し、海域の分布は、ほとんどがBSRから決められている。海域と内陸湖55地点のうち、掘削やドレッジによって実際にハイドレート試料が回収されているのは12地点にすぎない。大陸縁辺域でBSRが確認さ

図7 メタンハイドレートの分布 (Kvenvolden *et al.*, 1993 に加筆, 松本ほか, 1994)

れている海域は、近年、分解能の高い地震探査が進むにつれて広がっている。今後も調査の進展に伴い BSR 分布域は広がると予想される。

5.2 日本周辺海域における分布

日本列島周辺海域では、南海トラフ（四国～御前崎沖）、千島海溝（十勝～日高沖）のいずれも陸側斜面、西津軽海盆、日本海北部、オホーツク海（網走沖）で、広い範囲に BSR が確認されている。これらのうち、四国沖の南海トラフからは、ODP Leg 136 で、少量のガスハイドレート結晶が回収されている。このほか、ODP Leg 127 でも、北海道西方の奥尻海嶺付近から少量のハイドレートが回収されている。明瞭な BSR が認められる海域の水深は一般に 1,000～2,500 m であるが、網走沖では、北見大和堆の水深 500 m 付近にも BSR が認められる（図5）。これは、深度的に従来使われている石油掘削リグでの試掘が可能であることを意味しよう。

6. 資源としてのメタンハイドレート

6.1 資源量の見積もり

海域のメタンハイドレートのエネルギー資源としての将来性を評価するためには、資源量の見積もりが必要である。海底堆積物中にメタンハイドレートが分布していることが分かり始めた1970年代以降、多くの研究者により様々な見積もりが出されている。それらは、表2に示すように $10^{18} \sim 10^{14} \text{ m}^3$ と大きくばらつく。このように一万倍もばらつくのは、これらの数字が、今後発見されることも見込んだ BSR の分布面積と、BSR より浅い堆積物中のメタンハイドレートの分布密度を「適当に」見積もって、試算されたためである。BSR が明瞭に認められる海域だけに絞った Krason (1992) の見積もりで

表2 海域のメタンハイドレートの資源量試算値
(メタンガス容積, 単位立方メートル)

Trofimuk <i>et al.</i> (1977)	$(5 \sim 25) \times 10^{15}$
McIver (1981)	3.1×10^{15}
Dobrynin <i>et al.</i> (1981)	7.6×10^{18}
Kvenvolden and Claypool (1984)	2.9×10^{16}
Krason (1992)	$(2.2 \sim 16.5) \times 10^{16}$
地質調査所/エネ総工研 (1992)	$(2.5 \sim 5.0) \times 10^{14}$

は、 $10^{13} \sim 10^{14} \text{ m}^3$ である。ここでは、BSR 直上のメタンハイドレート濃集帯の厚さを1 mと仮定したときと10 mと仮定したときの試算値が示されている。

これらの試算で、メタンハイドレート資源量としているのは、固体のメタンハイドレート結晶中にトラップされているメタンガスの標準状態（0℃，1気圧）における容積である。しかし、BSR 発生メカニズムでも述べたように、BSR を発生するメタンハイドレート濃集帯の直下には、フリーガス層が存在する可能性がある。これはつまり、メタンハイドレート層がメタンガス貯留層のシールとなっていると言うモデルである。この場合、メタンハイドレートガス田のメタン資源量には、フリーガスも加えるべきであるが、フリーガス量の見積もりは固体メタンハイドレート以上に難しい。地質調査所とエネルギー総合工学研究所（1992）はフリーガスをハイドレートガスの約40%とし、日本周辺海域の資源量を、固体メタンハイドレートとして $6 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 、フリーガスとして $2.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$ と計算している。

どのような資源でも資源量計算は、必然的に不確定な要素を含む。海域のメタンハイドレートの場合、いくつかの決定的なパラメータが不明であるため、試算値の不確かさは大変大きいと考えなくてはならない。南海トラフを例に、実際にどのように計算されているか示し問題点を整理してみる。以下の試算で、イタリックの部分は現在のところ根拠が乏しいものである。

6.2 南海トラフのメタンハイドレート資源量

- (1) 四国～御前崎沖の南海トラフで、BSR が確認されている海域面積は35,000 km²、このうち40%の海域、14,000 km²で資源となり得るメタンハイドレートが分布すると考える。
- (2) メタンハイドレートが存在するBSR より浅い堆積物の平均孔隙率を40%、このうち12%の孔隙、つまり堆積物の全容積の5%がメタンハイドレートで充填されていると考える。
- (3) メタンハイドレートの化学式から計算される標準容積倍率は約170倍であるが、ハイドレート格子のガス分子が占める孔隙のうち、70%だけがメタンで充填されていると考えられる。このとき容積倍率は、120倍となる。
- (4) 以上の仮定のもとに、ハイドレート化した堆積物の厚さを1 mとしたときと、10 mとしたときのメタンハイドレートの原始資源量（標準状態での容積）を計算すると、それぞれ $0.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 、 $8.0 \times 10^{12} \text{ m}^3$ となる。これが、南海トラフの資源量である。
- (5) この、すべてを資源として利用できるわけではな

い。メソヤハガス田の例から、この回収率を10%とすると、800億～8,000億 m³が回収できるメタンガス量と言うことになる。

不確実な係数のうち、ハイドレート化した堆積物の積算層厚と、それらの堆積物のメタンハイドレート充填率は、堆積物中でのメタンハイドレートの産状に関わるパラメーターである。標準容積倍率は、メタンハイドレートの結晶構造に関わるパラメーターである。

7. おわりに

パイプライン事故をきっかけとして始まったガスハイドレートの実験的研究により、1950年代には、その安定条件、結晶構造などについてはかなりのことが分っていた。1970年代以降の海洋地質調査、物理探査、掘削調査の進展により、海底堆積物中にガスハイドレートが多量に存在するらしいことが分ってから、次第に天然ガス資源としての関心を集めるようになってきた。特に最近の数年間、二酸化炭素の排出規制とも絡み、資源としてのメタンハイドレートへの期待が大変大きくなっている。しかし、海域のメタンハイドレートについて、現在我々が知っていることは大変限られている。地層中での分布密度、形態、天然での結晶構造、水とガスの容積比など、資源量計算に必要なパラメーターもほとんど分かっていない。極端に言えば、海底堆積物中のメタンハイドレートについて、今、我々が知っていることは、安定領域基底（BGH）付近にBSR が発見されること、BSRの有無に関係なく、有機物に富んだ堆積物中から、希にメタンハイドレート結晶が回収されることの2つに過ぎない。このような状況では、海域のメタンハイドレートが、近い将来資源として利用出来るものなのか否か、判断することは難しい。様々な状況証拠から資源ポテンシャルが高そうなことは分かるが、あまりに楽観的になることは、根拠なく悲観的になると同様に、天然ガスハイドレートの理解を妨げる恐れがある。

地球表層における巨大な炭素シンクである天然ガスハイドレートは、単に資源ポテンシャルと言う視点からだけでなく、地球表層における炭素循環、長期的・短期的な気候変動を理解する上からも極めて重要である。最近Erwin (1993)はその著書(The Great Paleozoic Crisis, 1993)の中で、二疊紀/三疊紀境界における地球環境の劇的な変動を説明するのに、ガスハイドレートによる大量の炭素の固定というモデルを提唱している。メタンガスの温室効果により、氷期-間氷期の気候変動が緩和されるという説もある(Paull *et al.*, 1991)。地球環境の進化と変動をより良く理解するためにも、天然ガスハイドレートの産状、存在量、環境との相互作用についても

と良く知らなければならない。海底メタンハイドレートについて、複数地点における掘削調査、密度の高い物理探査による3次元の解析、試料の分析とシミュレーションなど、総合的、集中的な調査を行うことにより、天然ガスハイドレートに関する知識と資源ポテンシャル評価に関する情報は飛躍的に増大するだろう。

謝 辞

本稿の内容は、財団法人エネルギー総合工学研究所のメタンハイドレート調査委員会における調査、検討、議論に負うところが大きい。エネルギー総合工学研究所と専門委員のかたがたに謝意を表します。

文 献

- Claypool, G. E. and Kaplan, I. R., 1974 : The origin and distribution of methane in marine sediments. In Kaplan, ed. : *Natural Gases in Marine Sediments*, 99-139, Plenum, New York.
- Dobrynin, V. W., Korogajev, Yu P., and Plyushev, D. V., 1981 : Gas hydrates, a possible energy resources. In Meyer, R. F. and Olson, J. C. eds. : *Long-Term Energy Resources*, 1, 727-729, Pittman, Boston, Mass.
- エネルギー総合工学研究所, 1992 : 非在来型天然ガスに関する調査報告書. 398 pp.
- Erwin, D. E., 1993 : *The Great Paleozoic Crisis, Life and Death in the Permian*. 327 pp., Columbia University Press, New York.
- Hondoh, T., Anzai, H., Goto, A., Mae, S., Higashi, A., and Langway Jr., C. C., 1990 : The crystallographic structure of the natural air-hydrate in Greenland Dye-3 deep ice core. *J. Incl. Phen. Molec. Recogn. Chem.*, 8, 17-24.
- Jenden, P. D. and Gieskes, J. M., 1983 : Chemical and isotopic composition of interstitial water from Deep-Sea Drilling Project Site 533. *Init. Repts. DSDP*, 76, 453-462.
- Krasen, J., 1992 : Gas hydrates in continental margin-exploration and economic significance. *Abs.*, 29th I. G. C., 3, 802.
- Kvenvolden, K. A. and Claypool, G. E., 1984 : Gas hydrates in ocean sediments. *U. S. Geol. Surv., Open File Rep.*, 88-216, 50 pp.
- Kvenvolden, K. A. and McDonald, T. J., 1985 : Gas hydrates of the Middle America Trench-Deep Sea Drilling Project Leg 84. *Init. Repts. DSDP*, 84, 667-682.
- Kvenvolden, K. A., Ginsburg, G. D., and Soloviev, V. A., 1993 : Worldwide distribution of subaqueous gas hydrates. *Geo-Mar. Lett.*, 13, 31-40.
- Mathews, M. A. and von Huene, R., 1985 : Site 570 Methane hydrate zone. *Init. Repts. DSDP*, 84, Washington, 773-790.
- Matsumoto, R., 1989, Isotopically heavy oxygen containing siderite derived from the decomposition of methane hydrate. *Geology*, 17, 707-710.
- 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. 253 pp, 日経サイエンス, 東京.
- McIver, R. D., 1981 : Gas hydrates. In Meyer, R. F. and Olson, J. C. eds. : *Long-Term Energy Resources*, 1, 49-72, Pittman, Boston, Mass.
- Miller, S., 1974 : The nature and occurrence of clathrate hydrates. In Kaplan, I. R. ed. : *Natural Gases in Marine Sediments*, 151-177, Plenum Press, New York.
- Paull, C. K., W. Ussler, III and W. P. Dillon, 1991 : Is the extent of glaciation limited by marine gas-hydrates? *Geophys. Res. Lett.*, 18, 432-434.
- Scientific Party, 1983 : Site 533 : Blake Outer Ridge. *Init. Repts. DSDP*, 76, 35-140.
- Stoll, R. D., Ewing, J. I. and Bryan, G. M., 1971 : Anomalous wave velocities in sediments containing gas hydrates. *J. Geophys. Res.*, 76, 2090-2094.
- Trofimuk, A. A., Cherskiy, N. V. and Tarasev, V. P., 1977 : The role of continental glaciation and hydrate formation on petroleum occurrence. In Meyer, R. F. ed. : *Future Supply of Nature-made Petroleum and Gas*, 919-926, Pergamon, New York.
- von Huene, R. and Aubouin J., 1985 : *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project 87*. U. S. Government Printing Office, Washington.