

特集

天然ガスの新展開

ガスハイドレート

Natural Gas Hydrate

奥田 義久*

Yoshihisa Okuda

1. はじめに

ガスハイドレートはクラスレート（包接体）の一種である。自然界で地下に存在するガスハイドレートは、その大半がメタン分子を水分子が包接するメタンハイドレートである。しかし、「メタンハイドレート」は、今から30年前の資源・エネルギー関係の論文には殆ど見ることがなかった目新しい用語である。

メタンハイドレートは、シャーベット状の氷状固体物質であり、低温高圧下で生成される。天然のメタンハイドレートは、凍土が発達する極地方の陸域とその周辺海域、及び大陸と島弧の縁辺海域に分布する。地質調査所¹⁾や米国エネルギー省²⁾等の資料によれば、メタンハイドレートは日本周辺の南海トラフや北海道周辺海域にも広く分布していると予想され、また、米国地質調査所によれば、地球上のメタンハイドレートの炭素量は 10^{13} トンを超えるとの試算結果もある³⁾。

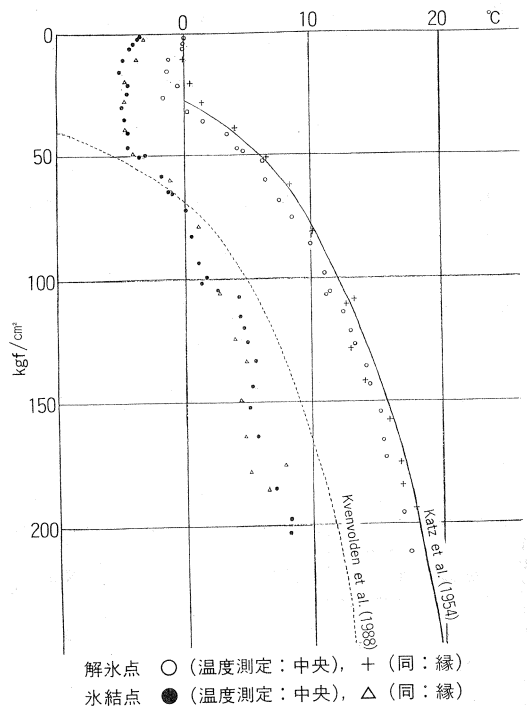
メタンハイドレートは、①化石燃料資源としてのポテンシャル、②地滑りなどの海底における災害をもたらす自然現象、③地球規模の環境に対する影響、との関わりで研究されてきた。しかし、従来多くの海洋地質調査や物理探査が実施されたにもかかわらず、ごく最近までメタンハイドレートに着目した調査が少なかったために、メタンハイドレートに関する海洋地質学や地球物理学的情報が現在でも十分あるとは言えない。本稿では、過去の化学・海洋地質学や物理探査等で研究されたメタンハイドレートの成因、賦存条件等について概説するとともに、今後のメタンハイドレートの資源探査・開発の課題について論ずる。

2. メタンハイドレートの産出条件

メタンハイドレートが存在するためには、低温かつ

高圧の環境でメタンが水に飽和し、温度、圧力、水及びガスの組成が物理化学的にある一定の条件を満たす必要がある。地質調査所で実施した合成実験により得られたメタンハイドレート生成・分解の温度・圧力条件⁴⁾（図-1）によれば、その生成曲線と分解曲線とは異なっており、この両者の間は準安定領域と見なすことが出来る。

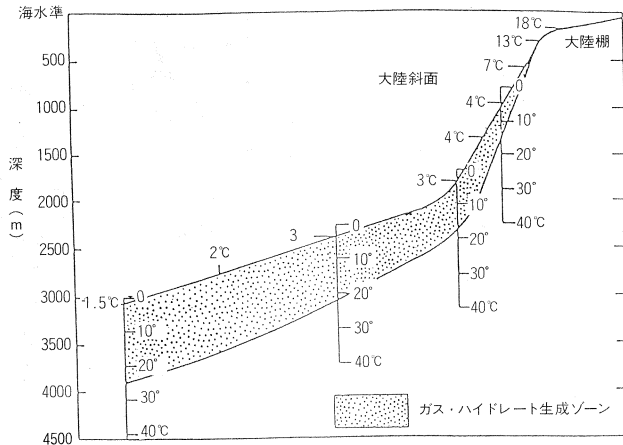
また、温度・圧力領域でのメタンハイドレート生成の相境界は、メタン以外のガスとの混合成分や、水のイオン濃度により影響を受ける。例えば、二酸化炭素



この図上で、メタンハイドレートが●上で生成が開始され、●の左側で安定である。また、メタンハイドレートが融ける時は○上で分解が始まる。したがって、両者の間は準安定領域と見なすことができる。

図-1 メタンハイドレートの生成分解曲線⁴⁾

*工業技術院 地質調査所 海洋地質部海洋地質課長
〒305 つくば市東1-1-3



図は地温勾配を2.73°C/100m、静水圧を1気圧/10mと仮定したときの中緯度地帯の平均的なガスハイドレート生成ゾーンを示す。

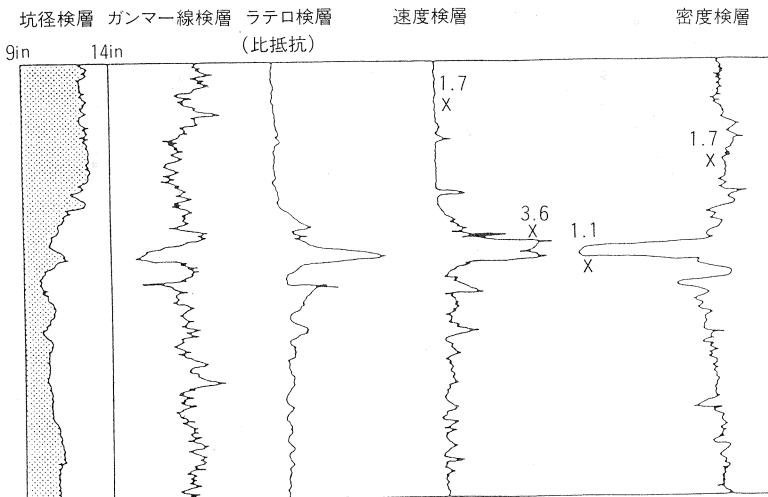
図-2 海底下ガスハイドレート生成ゾーン概念図⁵⁾

や硫化水素が混合する場合はハイドレートが生成されやすく、塩水が混在するとハイドレートが生成されにくくなる。しかし、分析可能な地下のメタンハイドレートサンプルが十分に得られていないために、地下の堆積物の孔隙中のガスや水の成分の詳細な変化に関する相変化には不明な点が多い。したがって、現在一般に行われている天然のガスハイドレートの産出条件の推定は、掘削、地震探査、及び地温勾配等のデータと実験的に得られる純粋な水とメタンの相平衡関係との対比で行なわれている。この相平衡関係から海洋におけるメタンハイドレートの産出可能範囲を推定すると、

海底の温度が0°C以上である場合には、概ね300m以深の海域に分布し(図-2⁵⁾)、また、海底下のメタンハイドレート産出下限は、水深や地温勾配にも影響されるが、最大でも海底下2000m程度であると考えられる。

3. ハイドレートの物理的性質

従来実施された陸域の試錐及び深海掘削等の結果⁶⁾(図-3)では、地下のメタンハイドレート層には、①高い比抵抗を有すること、②自然電位検層データに変化がほとんど無い(浸透率が低い)こと、③音波速度



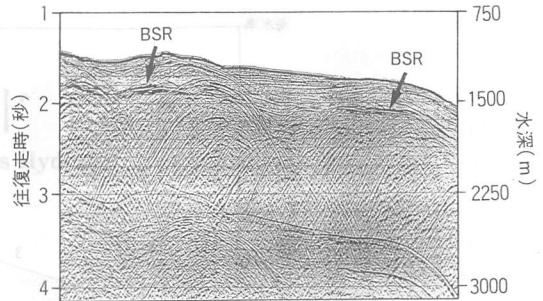
本検層記録によりメタンハイドレート層の弾性波(音波)速度が上下の地層に比べ速く、密度が低いことがわかる。

図-3 グアテマラ沖のメタンハイドレート層検層記録⁶⁾

が増加すること、④坑径値が大きいこと、⑤密度が低いこと、等の特徴がある。掘削されたメタンハイドレート塊の弾性波（P波）速度は2.5~3.8km/秒、また密度は1.1g/cm³程度であり、その物理的性質は氷（速度：3.23km/秒、密度：0.917g/cm³）と類似している。純粋メタンハイドレートの物性に関する実験室での直接的な測定結果はほとんどないが、メタンハイドレートの生成反応速度測定結果⁷⁾から熱力学的理論によって計算される純粋メタンハイドレートの密度は、概ね0.93g/cm³程度である。

4. BSRとメタンハイドレートの賦存

地震探査記録上には、Bottom Simulating Reflector (BSR) と呼ばれる負の極性を持つ強い反射面が海底に平行にしばしば認められる。例えば、米国南東岸のブレイクアウターリッジに認められるBSRの反射係数は、 -0.12 ± 0.04 と計算され⁸⁾、明確な負の極性を示している。このようなBSRは、メタンハイドレート層の弾性波速度が速く、メタンハイドレート層直下に存在するフリーガス層または水層の弾性波速度が遅くなるために、上下の音響インピーダンスの差が大きくなって発生する位相の反転する強振幅反射面である考えられている。また、ブレイクアウターリッジ、中央アメリカ、南海トラフ（図-4）、ペルー沖などの地震探査記録上に認められるBSRをその地域の地温勾配と対比すると、BSRの深度はハイドレート



BSR は地層の層界面の傾斜と斜交して発達する。

図-4 四国沖の地震探査記録にみられる BSR 記録例

安定領域の下限に対応するために、ハイドレートの安定領域及び量的評価の推定がしばしばBSRを用いて行なわれている。例えば、ペルー沖では10%の孔隙率を充填するハイドレート層に関しては、合成記録及びBSRの振幅から直下のフリーガス（遊離ガス）層の厚さが5.5~17mと推定された例⁹⁾がある。

5. メタンハイドレートの分布

メタンハイドレートは、極地方及び深海に分布し（図-5¹⁰⁾）、北極地方では凍土が発達するシベリア、カナダ北部、アラスカ等の陸域及びその周辺海域で産出するが、その他の海域では大陸斜面やコンチネンタルライズ及び南極海域に分布する。例えば、アラスカのブルドーベイ（図-5中のA）では14箇所の坑井でメタンハイドレートが回収され、また、深海掘削では、ペ

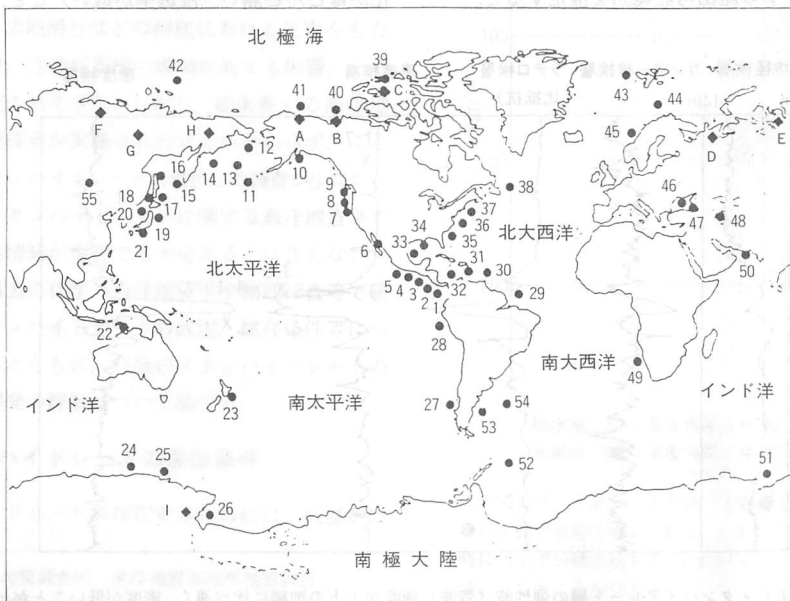


図-5 世界のメタンハイドレートの分布¹⁰⁾



1.南海トラフ(a:四国沖 b:室戸舟状海盆 c:東海沖-熊野灘)
 2.奥尻海嶺 3.千島海溝周辺(十勝・日高沖) 4.オホーツク海(網走沖)
 5.西津軽沖 ▲▲▲はプレート境界

図-6 日本周辺海域のメタンハイドレートの分布¹⁰⁾

ルー沖(図-5中の28), コスタリカ沖(同,2) グアテマラ沖(同,4), メキシコ湾(同,34), アメリカ南東沖(同,35), アメリカ西部海岸沖(同,8) 日本周辺海域(同,18) 等の14箇所, また, ピストンコア等により黒海(同,46), メキシコ湾北部(同,34), オホーツク海(同,16) 等の6箇所, メタンハイドレートが採取された。日本周辺海域に関しては, 地質調査所や資源エネルギー庁による海洋地質調査や反射法地震探査等の結果, 南海トラフ海域, オホーツク海, 十勝・日高沖, 北海道西方沖(奥尻海嶺), 西津軽沖等にメタンハイドレートが分布すると予想される(図-6¹⁰⁾)。これらの中でも, 当面水深の浅いBSR分布域であるオホーツク海や遠州灘沖等が, エネルギー資源的に有

望であると考えられる。

6. メタンハイドレート中のメタンの起源

メタンハイドレート中のメタンの成因に関しては, 熱分解起源と生物発酵起源の二つの起源が考えられており, 現在までに知られている陸域のメタンハイドレートについては熱分解起源を示すものが多く, 海洋のメタンハイドレートについては生物発酵起源を示すものが多い¹¹⁾。

海洋から今までに得られたメタンハイドレート中のメタンの炭素同位対比測定結果からは, その多くが生物発酵起源であると考えられる。米国南東沖, 北カルフォルニア沖, ペルー沖, 黒海, 及びメキシコ湾の一部等のハイドレート分解ガスの99%以上がメタンであり, メタンの炭素同位体比は通常-50パーミルより軽い。また, 堆積物中のメタンの炭素同位体比は, 一般に深度とともに重くなり, 例えば, ブレックアウトリッジでは-94パーミルから-66パーミルに変化し, 同時にメタンの炭素同位体比と平行して二酸化炭素の炭素同位体比も-25パーミルから-4パーミルに変化する¹²⁾。このように炭素同位体比の測定結果によれば, 今までに得られた海域のメタンハイドレートは, 生物発酵起源を示すものが多い。

しかし, メキシコ湾では, 生物発酵起源のメタンが一部に存在するものの, 多くのサンプルから-50パーミルより重い炭素同位体比が得られており, また, メタン以外の炭化水素ガスを多く含んで, 熱分解起源を示している¹³⁾。また, 中米海溝グアテマラ沖の海底下210m以深の堆積物には-40パーミル, 塊状サンプルには, -44パーミルの炭素同位体比を示すものがあり, この付近では生物発酵起源(分散状ハイドレート)と熱分解起源(塊状ハイドレート)が混在している(図-7)¹⁴⁾。なお, この塊状ハイドレートの溶解実験で

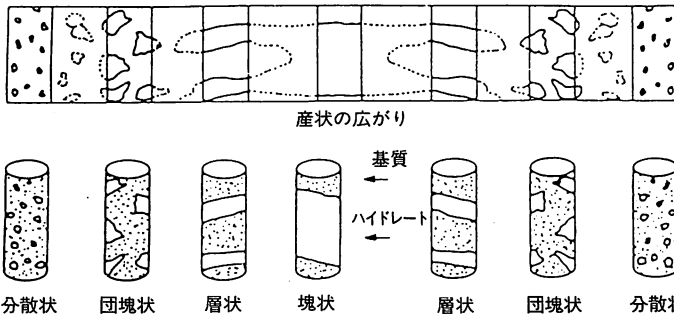


図-7 メタンハイドレートの産状¹³⁾

得られたメタンの炭素同位体比は、 -36.1 パーミル～ -43.6 パーミルである¹⁵⁾。その他、シベリア、アラスカ、カナダ等の陸上の油ガス田地帯の堆積盆地でも、熱分解起源のガスが下方よりハイドレート安定領域に移動してハイドレート層を形成している。海洋でこれらと同じ環境にある場合には十分な量のガスが海底下に存在するため、フリーガス層がBSRの下に存在することが期待でき、また、下位にフリーガス層を伴う熱分解起源のメタンハイドレート層は、メタンが水に飽和して塊状ハイドレートを形成している可能性が極めて高く、資源的には、一般に熱分解起源のメタンハイドレート層の下部が最も有望であると考えられる。

7. メタンハイドレートの資源としてのポテンシャル

メタンハイドレートは、コールベットメタン、タイトサンドガス、シェールガス、深層水ガス等の非在来型天然ガスに比べると、賦存層の単位体積当たりで2～5倍程度のガス量が期待される。従来世界で試算されたメタンハイドレートの天然ガス資源量は、陸海合わせて概ね 10^{14} ～ 10^{18} m³のオーダー（表1）で、地質調査所の試算でも 10^{14} m³のオーダーの結果が得られており¹⁾、近い将来掘削可能な2,000m以浅の海域にも相当量の天然ガスハイドレートが期待できる。地質調査所の所有する従来の海洋地質データを用いて、我が国周辺海域の資源量を試算すると、約6兆m³と試算できる¹⁾。しかし、これらの試算方法には多くの仮定があり、試算値は一応の目安として取り扱う必要がある。

8. メタンハイドレートの掘削と生産

シベリア、カナダ等での資源探査的な掘削の経験では、ガスハイドレート層を掘削する上での重要な技術

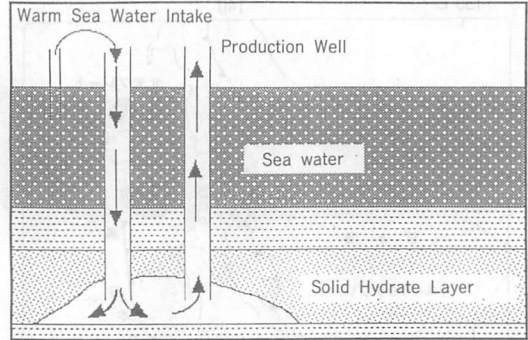


図-8 塩水注入法によるメタンハイドレートの生産概念図

課題は、ガスハイドレートの分解速度の制御である。このために、泥水比重及び泥水冷却の制御、アニユラスの層流状態の制御、断熱ケーシングの使用等に工夫がなされている。

メタンハイドレート層そのもののみを対象とした経済的なガス生産は行われていない。しかし、シベリアのメソヤハガス田においては、メタンハイドレート層の直下のフリーガスを採取することにより、結果として貯留層の減圧が進んでメタンハイドレート層の分解が進み、ハイドレートの分解ガスの生産を行った例がある¹⁶⁾。

メタンハイドレート層からの天然ガスの生産方法としては、熱水注入法、減圧法（フリーガス採取法）、塩水、グリコールやメタノール等の溶媒注入法等が世界各国で検討されている。シベリアのメソヤハガス田では、蒸気あるいは熱水注入、塩水注入、メタノールあるいはグリコール等の注入によってガスハイドレートの分解を促進し、実験的に生産を行った¹⁶⁾。但し、この実験的な生産テスト結果では、メタノール注入法のコストはかなり高いことが判明しており、一般にフリーガスを伴うハイドレート層の開発については、熱

表1 世界のメタンハイドレートの資源量試算例¹⁾

	陸 域	海 域	全 域
Trofimuk et al. (1977)	5.7×10^{13}	$(5 - 25) \times 10^{15}$	2.01×10^{18}
McIver (1981)	3.1×10^{13}	3.1×10^{15}	
Meyer (1981)	1.4×10^{13}		
Dobrynin et al. (1981)	3.4×10^{18}	7.6×10^{18}	
Kvenvolden (1988)			
Kvenvolden and Claypool (1988)		2.91×10^{16}	
Krason (1992)		$(2.21 - 16.5) \times 10^{16}$	
地質調査所/エネ総研 (1992)		$(2.5 - 5) \times 10^{14}$	

注) フリーガスを除く；(単位m³)

水注入法を一部併用した減圧法が最も実用的であるとされている。したがって、構造トラップ、層位トラップ、岩塩ドーム等の従来型石油・天然ガス鉱床を形成する構造中でメタンハイドレートが石油・天然ガスをシールする場合は、浸透率、孔隙率のよいガス貯留層が存在しさえすれば、メタンハイドレートの分解ガスを比較的容易に回収できると考えられる。また、海洋では豊富な海水を使用できることから塩水注入法(図-8)も実用的であろう。

9. 今後の開発に向けての技術的課題と開発への展望

今後メタンハイドレートを比較的早期に開発するためには、基礎的研究から、探査、生産開発技術に至るまで広範囲な技術開発が必要である。

探査・開発に必要なメタンハイドレートの基礎的な研究は、現在でも十分になされてきたとは言えない。例えば、メタンハイドレートの物理化学的な準安定領域は、ハイドレート結晶の格子の生成・分解過程を示すと考えられるが、分子構造的にどのような過程を経ているのかについては、水分子のチェーン構造生成モデル等の仮説理論があるものの、現在これらの説の実証がなされておらず、今後の基礎的な物理化学解明課題として残されている。また、メタンハイドレートの混合相変化は、将来メタンハイドレートの開発方法を検討する際に重要な課題であるにもかかわらず、分析可能な地下サンプルが十分に得られていないために、地下の堆積物の孔隙中のガスや水の成分の詳細については不明な点が多く、また、メタンハイドレートの密度についても、精度の高い測定結果がない。今後、実験室で純粋なメタンハイドレートの合成実験及び堆積物中でのメタンハイドレートの合成実験を行なうと同時に、物性を測定できる装置の開発も必要である。さらに、資源的に有望視される熱分解起源のメタンハイドレートを探査する地化学探査技術開発、例えば質量分析計によるメタンハイドレート中のメタンの炭素同位体比の測定手法の開発等が重要な課題として取り残されている。

一方、BSRを用いたメタンハイドレート層直下のフリーガス存在の詳細な判定法については、いくつかの手法が研究されているものの、全体としては未だ研究の段階にある。海域で従来得られた地震探査記録は、その多くがBSRを消去するように処理されており、より詳細な分布の形態を明らかにするためには、既存

記録の位相解析や高精度速度解析等の再処理や、高周波震源による再調査が必要である。

地層中に存在するメタンハイドレートの総量あるいは集積度を適切に判定することは、メタンハイドレートの資源化を考慮する上で極めて重要、かつ最も基本的な課題である。広域的な資源量の推定は各国でなされているが、今後これらの資源量計算を鉱床レベルで精度良く行なうためには、メタンハイドレートの集積度の推定法が最も重要な課題である。仮に、メタンハイドレート生成の物理化学的条件が満たされたとしても、実際鉱床中の賦存量は、孔隙率や水飽和率、またフラクチャーの存否にも依存すると考えられ、資源として利用可能な量が集積しているかどうかの手法についての開発が必要である。この技術課題を克服するためには、試錐による資源的な基礎データの収集が早期に必要である。

海域のメタンハイドレートの掘削については、従来型の石油天然ガスに比べて大水深掘削技術が必要である。我が国の掘削技術について見ると、米国では水深2000m程度までの掘削技術があるが、国内には水深約500mまでの半潜式掘削リグしかないため、探査の上では大水深用の深海掘削船リグの早期建造が望まれる。

また、将来の海域のメタンハイドレートの開生産産についても、従来型の石油天然ガスに比べて大水深開生産産技術の開発が必要であり、コンプライアント型、テンションレグ型、浮遊式セミサブ型開生産産システムの早期開発が望まれ、また、開発に伴う貯留層の評価のためのシミュレーションの研究が必要であろう。

米国での開発可能性の例を見ると、アラスカのノーススロープでは、ARCO-EXXON社北西アイリーン2号井で、圧力コアバレルによってガスハイドレートを回収し、この探査データを用いて資源量を試算すると、ブルドーベイクパルクリバー油田には $1.1 \times 10^{12} \text{m}^3$ のメタンがガスハイドレート中に存在する¹⁷⁾。この試算値は米国におけるガス埋蔵量の13%にも相当するが、現在未だ商業的には開発されていない。ここでは、現在既に設備投資がなされた開発油田が衰退した後に、メタンハイドレート中のメタンを採取する見込みで、このメタンハイドレートは21世紀に入るまでは開発されないと予想される³⁾。米国国内で最も早期に開発される可能性のある地域は、輸送コストを考慮すると北カルフォルニア沖など需要地に近い海域であるとの指摘もあり¹⁸⁾、この面では、日本周辺海域に

分布するメタンハイドレートも経済的に有利な開発条件にあるものと世界的に見なされている¹⁹⁾。

参考文献

- 1) 奥田義久；シャーベット状の天然ガス資源—ガスハイドレート，*Petrotech*, 16巻, 4号 (1993), 12~18.
- 2) Krason, J.; Gas Hydrate in continental margins—exploration and economic significance, 29th IGC Abs. (1992) 802.
- 3) Kvenvolden, K.A.; Gas hydrate—geological perspective and global climate, *Review of Geophys.*, 31, 2 (1993) 173~187.
- 4) 伊藤司郎，メタンハイドレートの合成実験，*地質学会講演要旨*, 100 (1993), 176.
- 5) Kvenvolden, K.A., and Barnard, L.A.; Gas hydrate of the Blake Outer Ridge, Site 533., *DSDP Init. Rept.* 76 (1983), 353~365.
- 6) Bautluc M., von Huene, and Aubouin, J.; Introduction and explanatory notes., *DSDP Init. Rept.* 84 (1985), 5.
- 7) Kim, H. C., Bishnoi, P. R., Heidemann, R. A. and Rizvi, S.S.H.; Kinetics of methane hydrate decomposition., *Chem. Eng. Sci.* 42-7 (1987) 1645~1653.
- 8) Shipley, T. H., Houston, M. H., Buffer, R. T., Shaub F. J., Mcmillan, K. J., Ladd J.W., and Worzel, J.L.; Seismic reflection evidence for the widespread occurrence of possible gashydrate horizon on continental slopes and rises., *A.A.P.G. Bull.*, 63 (1979), 2204~2213.
- 9) Miller, J. J., Lee, M. W., and von Huene, R.; An analysis of a seismic reflection from the base of a gas hydrate zone., *A. A. P. G. Bull.*, 75 (1991), 910~924.
- 10) 松本 良，奥田義久，青木 豊；メタンハイドレート (1994)，*日経サイエンス社*。
- 11) 奥田義久，天然ガスハイドレートの探査と開発への展望；*エネ学誌*, 72巻, 6号 (1993), 425~435.
- 12) Galimov, E. M., and Kvenvolden, K. A.; Concentrations and carbon isotopic compositions of CH₄ and CO₂ in gas from sediments of the Blake Outer Ridge, Deep Sea Drilling Project Leg 76., *DSDP Init. Rept.*, 76 (1983), 403~407.
- 13) Brooks, J. M., Cox, H. B., Bryant W. R., Kennicutt II, M. C., Mann, R. G., and McDonald T. J.; Association of Gas Hydrates and oil seepage in the Gulf of Mexico., *Org. Geochem.*, 10 (1986), 221~234.
- 14) Jeffrey, A. W., Pflaum, R. C., McDonald, T.J., Brooks, J. M., and Kvenvolden, K. A.; Isotopic analysis of core gases at sites 565-570, Deep Sea Drilling Project Leg 84., *DSDP Init. Rpt.*, 84 (1985), 719~726.
- 15) Kvenvolden, K. A., Claypool, G. E., Threlkeld, C. N. and Sloan, E. D.; Geochemistry of naturally occurring massive marine gas hydrate., *Org. Geochem.*, 6 (1984), 703~713.
- 16) Makogon, Y. F.; Gas Production from the Natural Gas Hydrate Deposits., *Gazovaya Promishlennost*, 10 (1984), 24~26.
- 17) Collett, T. S.; Potential of gas hydrate outlined., *Oil Gas Jour.*, 90, 25 (1992), 84-87.
- 18) Macdonald G. J.; The future of methane as an energy resources., *Annu. Rev. Energy* (1990) 15, 53-83.
- 19) Nederlof M. H.; The scope for natural gas supplies from unconventional sources., *Annu. Rev. Energy* (1988) 13, 95-117.

協賛行事ごあんない

「動力エネルギー技術の最前線'94」講演募集

＜開催日＞ 平成6年12月6日(火), 7日(水)

＜会場＞ 神戸国際会議場

＜講演募集テーマ (オーガナイズドセッション)＞

1. 新発電・新エネルギー技術
 - ・高温・高効率発電技術, 新発電・新エネルギー利用発電技術, 燃料電池
2. 環境用エネルギー関連機器とシステム技術
 - ・空調・廃熱利用と蓄熱技術, 地球環

境および関連技術

3. 原子力発電の将来技術

- ・次世代軽水炉技術, 新型原子炉技術, 知能化・信頼性技術

＜申込締切＞ 平成6年6月10日(金)

＜問い合わせ先＞ (株)日本機会学会事業課 高橋正彦
東京都渋谷区代々木2-4-9
TEL 03-3379-6781