海洋のガスハイドレートの分布と産状—ODP Leg 164 ブレークリッジ掘削の成果—

Distribution and occurrence of marine gas hydrates—Preliminary results of ODP Leg 164 : Blake Ridge Drilling—

Abstract

松本 良* 渡部芳夫**
佐藤幹夫*** 岡田尚武****
廣木義久***** 川崎正行*****
Leg 164 乗船研究者

Ryo Matsumoto*, Yoshio Watanabe**,
Mikio Satoh***, Hisatake Okada****,
Yoshihisa Hiroki*****,
Masayuki Kawasaki***** and
ODP Leg 164 Shipboard Scientific Party

1996年7月24日受付.
1996年9月20日受理.

- * 東京大学大学院理学系研究科.
Graduate School of Science, The University
of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Tokyo 113, Japan
- ** 地質調査所燃料資源部.
Fuel Resources Department, Geological
Survey of Japan, 1-1-3 Higashi, Tsukuba,
Ibaraki 305, Japan
- *** 地質調査所海洋地質部.
Marine Geology Department, Geological
Survey of Japan, 1-1-3 Higashi, Tsukuba,
Ibaraki 305, Japan
- **** 北海道大学大学院理学系研究科.
Graduate School of Science, Hokkaido
University, Sapporo 060, Japan
- ***** 大阪教育大学教育学部.
Department of Earth Sciences, Osaka
Kyoiku University, Osaka 582, Japan
- ***** 日本海洋掘削.
Japan Drilling Company, 2-6-4 Toranomon,
Tokyo 105, Japan

ODP Leg 164 drilled holes at Sites 994, 995, and 997 on the Blake Ridge and penetrated through the predicted depth of the BSR (Bottom Simulating Reflector) into the sediments below. Solid gas hydrate samples were recovered from these sites and were documented to be composed of a structure I methane hydrate with approximately 99% methane and volumetric ratio of gas to water of 130 to 160. High resolution pore water sampling and analysis have revealed that chloride concentrations are highly variable with local anomalously fresh values for the depth interval of 200 to 450 meters below sea-floor. These anomalies in chloride concentration indicate that a minimum of 1 to 2% of the sedimentary section of this variable zone is filled with gas hydrates. Well logs also indicated distinct zones of higher electrical resistivity and acoustic velocity that were coincident with chloride anomalies. The lower limit of hydrate-bearing sediments (~450 m) coincides with BSR on the seismic profile. A pervasive occurrence of free gas zone below the BSR has been indicated by anomalously low (~1.4 km/sec.) velocity values. Extrapolation of thermal gradients calculated from in situ temperature measurements predicts that the experimentally determined base of gas hydrate stability (BGHS) occurs 40 to 100 m below the observed BSR depth. This discrepancy may suggest that experimentally determined temperature-pressure conditions for the stability of methane hydrates are not applicable for the prediction of the stability of natural gas hydrate in marine sediments, or alternatively, gas hydrates are actually present in the interval between observed BSR and BGHS but they are so sparse that the drilling and well-loggings could not detect their existence.

Key words: ODP Leg 164, gas hydrates, methane hydrate, Blake Ridge, BSR, chloride anomaly, environmental impact

はじめに

ガスハイドレートとは、水分子が作る籠状構造中にガス分子が取り込まれた構造を持つ固体の結晶、クラスレートハイドレートの総称である。天然では、メタンガスと水分子からなるメタンハイドレートがほとんどであると考えられている。ガスハイドレートの生成には、低温、高圧、しかもある程度以上の量のガス（フリーガス）の存在が必要であるので、地表条件では普通生成しない。しかし、海底下の堆積物の比較的浅い部分は温度が低く圧力が高いためメタンハイドレートの生成条件を満たしている場合が多い。したがって、有機物に富む陸棚～斜面の堆積物中にはガスハイドレートが大量に存在する可能性がある（例えば、Kvenvolden, 1988; 松本

ほか, 1994)。しかし、このようなハイドレートも地表条件では不安定であるため、天然ガスハイドレートを実際に手にすることは極めてまれであった。このため、すでに1940年代から天然ガスハイドレートの存在が予測され、1970年代には、ガスハイドレートに由来するガス田の開発（例えば、Makogon, 1974）が行われているにもかかわらず、海底のガスハイドレートの産状や分布、物性に関する我々の知識は驚くほどわずかである。

海底堆積物中のガスハイドレートの存在は、海上地震探査によって認定されることが多い。堆積物中にガスハイドレートが生成すると、堆積物のP-波速度および密度が増加するため、ハイドレート化した地層とそうでない地層の間に音響的な不連続面が生じ、この境界面が地震探査記録上に強い反

Fig. 1. Locality map showing ODP Leg 164, Sites 991, 992, 993 on Calorina Rise, Sites 994, 995, and 997 on the crest of the Blake Ridge, and Site 996 on the upper slope of the Blake Ridge.

射面として記録される。この反射面は、反射波の位相の反転によって特徴づけられ、また、しばしば地層境界が作る反射面と斜交するため地層面とは容易に識別することができる。この反射面は海底面とはほぼ平行に現れるため、海底疑似反射面 (Bottom simulating reflector; BSR) と呼ばれ、海底ガスハイドレート発見の重要な手がかりとなっている。しかし、BSR 付近でのガスハイドレートの分布はほとんどわかっておらず、物性データも少ないため、BSR の発生機構、ガスハイドレートの発達の程度と BSR の強度の関係も未解決のままであった。これらの問題を解明するためガスハイドレート層を掘り抜く掘削が深海掘削計画 (ODP) Leg 164 として計画された。本稿では、掘削と試料回収の概要、海底ガスハイドレートの分布と産状についての新たな知見、今回の掘削により提起された問題について述べる。

Leg 164 の目的と掘削の概要

深海掘削計画の第 164 節航海 (ODP Leg 164) は、(1) 海底ガスハイドレートの分布、存在量、産状、BSR との関係明らかにし、(2) ガスハイドレートの物性、結晶構造、化学組成の解析のために保存状態の良いガスハイドレート試料を回収すること、を主要な目的とした。掘削船ジョイデスリゾリューション号は、1995 年 10 月 31 日にカナダ、ハリファックスを出航してブレークリッジに向かった。ブレークリッジは、大陸棚の沖合いに発達する平坦面 (ブレークプラトー) から深海平坦面へ突き出るように発達した高まり (Fig. 1) である。深海平坦面からの比高は 1.5-3 km、北米大陸に沿って南下するコンターカレント (Western Boundary Undercurrent) によって形成されたと考えられている (例えば、Heezen et al., 1966)。12 月 19 日にマイアミに帰着するまでの 51 日間の多く (約 6 週間) を、BSR が良く発達するブレークリッジ頂部 (水深約 2800 メートル) での掘削に費やし

た。

ブレークリッジ上の 3 つの掘削点は、リッジの南西斜面から頂部へ向かって、順に Site 994, Site 995, Site 997 と配置され、この順に掘削された。Site 994 には BSR は見られず、Site 995 では弱い BSR が認められ、Site 997 には明瞭な強い BSR が存在する (Fig. 2)。BSR の発生機構、BSR の発達とガスハイドレートとの関係を明らかにするためには、このような場所でトランセクトを行うことが最も有効である。掘削深度は BSR を貫く 700~750 m、掘削地点の間隔はそれぞれ 3 km と 7 km である。掘削は海底からの深度 150~200 m までは APC (Advanced Piston Corer) で、それ以深は XCB (Extended Core Barrel) を用いて行われ、平均のコア回収率は 80% であった。

BSR 貫通時に懸念されたガスの暴噴などのトラブルもなく掘削は順調に進められ、厚さ 30 cm 以上の塊状試料をはじめとして、多数のガスハイドレート結晶の回収に成功した。さらに、1.5~9.5 m に 1 回という、高い頻度のサンプリングによる間隙水の分析、30 cm 間隔で測定されたコア温度、圧力コア容器 (PCS) による in situ ガス量の測定、各種の検層 (音響、電気抵抗、地化学など) により、海底下約 200 m~450 m の間の堆積物が広範囲にハイドレート化していることを明らかにし、BSR がガスハイドレート分布の下限に対応することも明確に示した。VSP 測定は、よく発達した BSR の下位には厚さ数百メートルにわたって P 波速度が 1.5 km 以下という低速度帯が発達することを明らかにし、大量のフリーガスが存在することを示唆した。控え目の見積もりでも、ブレークリッジ海域だけで炭素量に換算し数 10 ギガトン (10^{15} g) のメタンがガスハイドレートおよびフリーガスとして存在することが明らかとなった。

掘削は、キャロライナライズ上の 4 か所でも行われた。その目的は陸棚斜面に発達する巨大海底地滑りとガスハイド

Fig. 2. Seismic profile of the Blake Ridge Transect and the location of Sites 994, 995, and 997. The depth of BSR is approximately 450 mbsf.

レートの関係、およびボックマークとガスハイドレートの関係を明らかにすることであり、ダイアピールおよびボックマークの直上で浅い掘削（～50 m）が行われた。ここでも多数のガスハイドレート結晶を回収することができ、メタンの供給とメタンハイドレートの生成、集積について多くの知見が得られたが、これらについては、本稿では扱わず、別に報告するつもりである。

ブレークリッジの地質と堆積物

ブレークリッジ上の掘削点 Site 994, Site 995, Site 997 ではいずれも第四紀から中新世後期（～6 Ma）までの堆積物がほぼ連続的に回収された（Fig. 3）。深層流による海底侵食と考えられる 20 万年程度のハイアタスが中新世に認められる他は、顕著な堆積間隙はない。ナノ化石と古地磁気層序から、平均堆積速度は第四紀で 60 m/m.y., 鮮新世で 100～150 m/m.y., 中新世では 300～400 m/m.y. と見積もることができた。

堆積物は基本的には粘土（60～70%）とナノ化石（20～40%）とからなり、珪藻と有孔虫をかなりの量（10～20%）含む層準も認められる。炭酸塩含有量は更新世でやや高く（～30%）、鮮新世以前では 20% 程度である。100～160 m より浅い層準（鮮新世の最末期と更新世）には、明色でより炭酸塩に富む層と、暗色で炭酸塩の比較的小さい層による、厚さ 1 m 程度の堆積周期が見られる。鮮新統最上部～更新統にはドロマイトがノジュールや薄層として普通に産する。鮮新世の大部分と中新世後期の堆積物には生痕が良く発達し、全体にきわめて均質である。地層は 400 m 付近から固結度を増し、剝離構造（fissility）やフラクチャーが見られるようになる。600 m 付近より下部には径 1 cm 程度のシデライトノジュールが散在する。

ブレークリッジの堆積物は有機炭素含有量（TOC）が全般に高く、しかも、浅部（<200 m）の約 1% から深部の 1.5% へと深部ほど高くなる傾向が見られる。これは、鮮新世、中

新世の有機炭素の質量堆積速度（mass accumulation rate: MAR, $\text{g/cm}^2, \text{ky}^{-1}$ ）が第四紀の数 10 倍とたいへん大きいことによる。鮮新世、中新世には、非炭酸塩成分（陸源碎屑物 + 珪藻）の MAR も大きく増加しており、有機炭素が主として非炭酸塩フラックスとして供給されたことが分かる。しかし、C/N 比（～10）からは有機炭素は海洋起源、ロックエバル分析（水素指数、酸素指数）からはタイプⅢ（陸源高等植物起源）のケロジェンであることが示唆され、有機物の起源は今後の検討課題である。

ガスとその起源

ブレークリッジの堆積物は非常にガスに富む。コア回収中に間隙水から脱ガスしたガスにより、コアライナー中の堆積物には、深度 50 m 付近から、幅 1～2 cm の間隙（gas void）がライナーに直交して発達し始める。間隙は深度を増すにつれ、次第に大きくなり、いくつかのコアではガスの膨張により、コアライナーが破裂したり、堆積物コアがライナーから噴き出してしまい、コアを回収できないものもあった（本特集号口絵写真）。コア回収率は深度 130 m から低下し始め、200～500 m の間では、回収率が大きく変動する（Fig. 4）。Site 994 と Site 995 では 500 m 以深でおおむね回復するが、Site 997 では 500 m 以深でもコア回収率は低い。これは、掘削および回収中の脱ガスにより堆積物が膨張し、コアライナーから噴き出したためと解釈される。

堆積物中にさまざまな形（溶存態、ガスハイドレート、フリーガス）で取り込まれているガスの全量を見積もるため、(1) 少量の堆積物試料を容器に入れて強熱し強制的に脱ガスさせる方法（Headspace gas sampling）、(2) 1 セクション分（1.5 m）のコアを密閉されたチューブ（Gas collection chamber）中におき、室温で暖められたコアから脱ガスしたガス量を計る方法、(3) 圧力コア容器（PCS）で、in situ ガスを逃がさずに回収する方法で、in situ のガス量見積もりが試みられた。(1)(2)の方法で測定されたガス量は、理論的に見積もら

Fig. 3. Lithostratigraphic column of Holes 997 A and 997 B. Patterns in the lithologic column indicate clays, diatoms, and nanno planktons, from right to left.

れる溶存ガス量より少なかった。これは、コア回収中にコアライナーから大量のガスが逃げたためと考えられる。(3)については次の項で述べる。

回収されたガスは大部分がメタンであり、 C_3 以上の重い炭化水素ガスはわずかであった。 C_1/C_2 比は、1,000~100,000であり、一般にバクテリア起源ガスといわれている領域に入る。エタン濃度は深度 400 m 付近まではほとんど無視できる

量であるが、BSR 付近 (400~450 m) から増加傾向を示し、孔底では 100~200 ppmv に達する。他の重い炭化水素ガス量の変動も考慮すると、深部で熱起源ガスの寄与が若干認められたといえる。BSR の下位で重い炭化水素ガス量が一時的に急激に増加することは、BSR がガス拡散、移動のバリアになっていることを示唆する。

圧力コア容器 (Pressure Core Sampler : PCS)

原位置条件 (in situ) で堆積物とガスハイドレートを回収することを目的として圧力コア容器 (PCS) が開発された。原位置条件を保持するには掘削および回収中に圧力と温度を保持する必要があるが、PCS では名前の示すとおり圧力保持のみが考慮されている。国際深海掘削計画 (DSDP/ODP) では以前にも PCS を使用しているが、これまでは圧力保持が十分でなくコアの回収率も悪かった。そこで今回の掘削のために、カッティング・シュー (cutting shoe : PCS の先端に取り付けられるコア回収用の小さなビット) の改良と開発が行われた。準備されたカッティング・シューは (a) 錐のような形状をし、回転しながら押し込むオーガー・シュー (auger shoe), (b) 回転を与えずに地層に突き刺すことが可能なプッシュ・イン・シュー (push-in-shoe) (c) 従来型の回転シューに小さな改良を加えたもの (modified existing shoe) の 3 種 (本特集号口絵写真) で、(a) (b) は期待通り良い成績を挙げた。操作上の改良点としては、ボール・バルブの調整を外部から行えるようにし、回転部のシール素材をステンレスに変更した。また、PCS のまわりの大きなビット (roller cone bit) の回転が PCS の作業に及ぼす影響を軽減するため、延長パイプも用いて PCS を roller cone bit の前方 (最大 36 インチ) に位置させた。

装置の改良と操作上の工夫により、今回の掘削では圧力保持に関しては極めて良い成績を挙げた。結果を Table 1 と Fig. 5 に示す。5 つの掘削点において海底深度 0~723 m で 46 回試みられ、そのうち 27 回は、ほぼ掘削深度の静水圧の保持に成功している。コアの回収について見ると、プッシュ・イン・シューと 36 インチの延長パイプを用いた場合は比較的良好であったが、全般にあまり満足できる結果ではなく、当初意図されたガスハイドレート試料の回収にも成功しなかった。PCS ではビットへの負荷が大きくまた径が小さいため、掘削中の摩擦熱により堆積物の温度が上昇したと考えられる。このためガスハイドレートが分解し、堆積物が容器から噴き出してしまった可能性が高い。しかし、いくつかの PCS から大量のガスが回収でき、そのとき同時に回収された堆積物の量と比較することにより、間隙水中に in situ 条件でどれだけのメタンがとけ込んでいたか見積もることができた。水深 2800 m の堆積物中の間隙水の飽和メタン量は、間隙水 1000 ml あたり 3000~4000 ml であるが、いくつかの PCS では、その深度での飽和メタン量をはるかに超えるガスが測定された。過剰なガスを含む堆積物が回収された深度は、205~600 m であり、この深度範囲に、ガスハイドレートあるいはフリーガスが存在することが強く示唆される。

ガスハイドレートの回収

Site 994 の深度 250 m と、Site 997 の深度 340 m からハイドレート結晶が回収された。ワイアラインでリグフロアに回収されたコアパレルから、透明のコアライナーに入った堆積物コアは直ちに引き抜かれ、キャットウオークと呼ばれる観察フロアに運ばれる。キャットウオークでは、コアライナー

Fig. 4. Core recovery (=recovered/cored (%)) at Site 997 on the Blake Ridge.

を通した観察と、ガス試料の採取、間隙水分析用の試料の採取が行われる。ガスハイドレートはこの段階で、発泡している乳白色の冷たい固体物質として発見された。

1. Site 994

Hole 994 C-Core 31 X の Section 6 は、キャットウオークで、明らかに他の Section より冷たく、コアライナーを通して、小さな白い塊が観察された。コアは直ちに切り出され、掘削によって乱された堆積物中から、径 3~5 cm の不規則な形状のガスハイドレート試料が 3 個回収された。堆積物はその部分だけ他より水を多く含んでいた。これは soupy disturbance と呼ばれ、コアの掘削、回収中に分解したガスハイドレートに由来するものと説明される。コアライナー内側の曲面に沿った試料の外形は、これらハイドレートがより大きなハイドレートから切り取られたものであることを示唆している。試料には、堆積物のラミナのように見える粘土薄層が一枚挟まれていたが、他の部分は均質で不透明な白色を呈し、塊状で純粋なハイドレートと考えられる。船上での分析によると、この試料は 98.8% のメタン、1.2% の二酸化炭素、ごくわずかのエタン、プロパンを含み、ガスと水の容量比は

Table 1. Results of PCS deployment on Leg 164.

Hole	Core No.	T.D. (m)	Water D. (m)	D.BSF (m)	Cutting Shoe	Extention (in.)	Recovery (m)	%	Pressure (psi)	%
991B	01P	2597.9	2587.4	10.5	Push-in	36	0	0	2550	67
991B	02P	2637.4	2587.4	50.0	Push-in	36	1.0	100	64	2
994C	09P	2882.1	2810.1	72.0	Auger	36	0.1	10	1500	35
994C	18P	2958.1	2810.1	148.0	Auger	6	0	0	3260	75
994C	27P	3033.6	2810.1	223.5	Auger	18	0.07	7	3657	82
994C	36P	3110.5	2810.1	300.4	Push-in	18	0.15	15	4436	97
994C	45P	3187.6	2810.1	377.5	Push-in	18	0	0	4985	107
994C	48P	3206.8	2810.1	396.7	Auger	18	0.15	15	4940	105
994C	53P	3245.3	2810.1	435.2	Auger	18	0.15	15	5030	106
994C	60P	3303.0	2810.1	492.9	Auger	18	0.10	10	5166	107
994C	66P	3351.2	2810.1	541.1	Auger	18	0.22	22	5207	106
994C	70P	3380.0	2810.1	569.9	Auger	18	0.20	20	4266	86
995A	Water	n/r	2715.4	n/r	Push-in	18	-	-	2760	-
995A	09P	2849.5	2789.8	59.7	Push-in	36	1.03	103	4126	99
995A	18P	2926.5	2789.8	136.7	Push-in	36	0.69	69	3180	74
995A	27P	3013.7	2789.8	223.9	Push-in	36	1.0	100	4049	92
995A	36P	3091.2	2789.8	301.4	Push-in	36	0.75	75	4740	105
995A	45P	3168.4	2789.8	378.6	Push-in	36	0.58	58	4635	100
995A	48P	3187.6	2789.8	397.8	Push-in	36	0.25	25	4700	101
995A	Water	3213.5	2789.8	423.7	Push-in	36	-	-	4890	104
995A	52P	3216.5	2789.8	426.7	Auger	18	0.17	17	4788	101
995A	60P	3283.9	2789.8	494.1	Auger	18	0.06	6	4240	88
995A	70P	3379.0	2789.8	589.2	Auger	18	0.03	3	3656	74
995B	07P	3097.7	2788.2	309.5	Push-in	36	0.93	93	2776	61
995B	10P	3108.7	2788.2	320.5	Push-in	36	0.65	65	3266	72
996A	07P	2229.9	2181.4	48.5	Push-in	36	0.2	20	3328	102
996D	07P	2233.6	2181.4	52.2	Push-in	36	0	0	2974	91
996E	08P	2242.7	2181.4	61.3	Push-in	36	0	0	944	29
997A	18P	2929.5	2781.6	147.9	Push-in	36	0.42	42	4289	100
997A	25P	2985.1	2781.6	203.5	Push-in	36	0.88	88	4500	103
997A	19P	3013.9	2781.6	232.3	Push-in	36	0	0	4621	105
997A	33P	3042.7	2781.6	261.1	Push-in	36	0	0	4783	107
997A	40P	3100.4	2781.6	318.8	Push-in	36	0	0	465	10
997A	49P	3177.5	2781.6	395.9	Push-in	36	0.64	64	3666	79
997A	51P	3187.1	2781.6	405.5	Push-in	36	0.47	47	3987	85
997A	55P	3215.9	2781.6	434.3	Push-in	36	0.50	50	750	16
997B	06P	3216.0	2781.6	434.4	Push-in	36	0.24	24	0	0
997B	10P	3244.8	2781.6	463.2	Push-in	36	0.14	14	4460	94
997B	15P	3283.4	2781.6	501.8	Push-in	36	0.30	30	4485	93
997B	21P	3331.5	2781.6	549.9	Auger	6	0.94	94	4578	94
997B	25P	3360.3	2781.6	578.7	Auger	6	0.00	0	0	0
997B	Water	3378.1	2781.6	596.5	Auger	6	-	-	4834	98
997B	32P	3418.0	2781.6	636.4	Auger	6	0.00	0	4750	95
997B	36P	3445.7	2781.6	664.1	Auger	6	0.00	0	5122	101
997B	40P	3475.7	2781.6	694.1	Auger	6	0.00	0	4947	97
997B	44P	3504.4	2781.6	722.8	Mod. Pilot	6	0.00	0	4808	94

154:1で、構造-Iのメタンハイドレートである可能性が高い。

2. Site 997

このSiteでは、温度異常を検出するため、ほとんど全てのコアについて、コア回収後直ちに高分解能(30 cm 間隔)の温度測定を行った。200 m 以深では、多くのコアで低温異常が検出されたが、320 m までガスハイドレートは発見できなかった。Hole 997 A-Core 42 X (深度 327-337 m) では、全長

3.87 m の短いコアが回収され、その下部(Section 3)に小さな白い物質が発泡しているのが発見された。その部分を含んで長さ 114 cm のコアを切り出しライナーをはずすと、層序的に下位から順に、よくしまった堆積物(厚さ 20 cm)、掘削のため乱された堆積物(同 5 cm)、塊状ハイドレート(同 30 cm)、厚さ約 3 mm で数 cm 角の扁平なハイドレートを含む乱された堆積物(同 20 cm)、数 cm の不規則な形をした団塊状ハイドレート(同 20 cm)が観察された。塊状ハイドレー

Fig. 5. Sediment core recovery (top) and hydraulic pressure recovery (bottom) of PCS deployment on Leg 164.

トはコアに直交して3つの部分に割れ、最も大きなものは径5 cm, 長さ17 cm, 他の部分はそれぞれ長さ5 cm, 7 cmのいずれも保存状態の良いハイドレート塊として回収された(本特集号絵写真)。これらはヘリウムガスで約100気圧まで加圧された圧力容器に納められ、 -20°C の冷凍庫で保存された。扁平なハイドレートは、堆積物中に発達する割れ目を埋めたものと考えられる。団塊状のものは、もともとはより大きな団塊、あるいはレンズであったのが、掘削により破片となったものと考えられる。船上での分析によると、メタンが98.4%, エタン196 ppmv, プロパン3.8 ppmv, 二酸化炭素1.6%, ガスと水の容量比は138:1で、Site 994と同様に、構造-Iのメタンハイドレートと思われる。ガス組成は、同じコアから採取したガスの分析値とほぼ同じであり、ガスハイドレート生成時のガスの分別は認められない。

ガスハイドレートの垂直的、水平的拡がり

1. コアの温度異常 (Catwalk temperature measurements)

堆積物の構造("soupy disturbance")から、堆積物中のガスハイドレートの多くはコアの掘削・回収中に分解したと考えられる。ガスハイドレートの分解は吸熱反応であり、分解時にまわりの堆積物から多量の熱を奪う(2.5 J/g メタンハイドレート)ため、周辺堆積物の温度は顕著に低下する。したがって、ハイドレートの分解によって引き起こされた温度異常を検出することにより、今も堆積物中に残って分解し続けているハイドレートはもちろん、すでに完全に分解してしまったハイドレートの存在も知る事ができるはずである。コア温度は(1)半割コア表面温度測定、(2)ガスチャンバーで

Fig. 6. Core temperatures measured at catwalk 10 to 15 minutes after the core recovery.

の初期温度測定、(3)キャットウォークでの高分解能コア温度測定、という3つの方法で測定された。

(1)では、堆積物内のハイドレート結晶の分布を数cm~数10 cmのオーダーで検出することを目的とし、縦割りにしたコアの切断面の、長さ20~150 cm, 幅6 cmの範囲の表面温度(実際は表面から数mm下位)を、1 cmのグリッド間隔で測定した。いくつかの半割試料で、温度分布の異常から径1 cm程度のハイドレートノジュールの存在を知ることができたが、測定範囲が均質にハイドレート化している場合は全体として低温になるため温度異常が検出できないという問題があり、堆積物中のガスハイドレート存在量の見積もりには、適当な方法ではなかった。

(2)は、コアを密閉容器(gas collection chamber)内に入れ、堆積物および間隙水からの脱ガス量と、その際の温度変化を測定して、コア全体に分布しているガスハイドレートの量を見積もる目的で計画されたが、キャットウォークに来る以前に大量のガスが堆積物から抜けてしまっており、ガス量については、期待されるデータを採取できなかった。しかし、初期温度および温度上昇カーブから、ハイドレートの存在の有無を知ることができた。

(3)は、数10 cmから数mのオーダーで分布するガスハイドレートおよびハイドレート化した堆積物を検出しようとするものである。Site 994, Site 995では手で触れて冷たい部分を中心に、一つのコア(全長9.6 m)で数か所の温度を、手持

Fig. 7. A. Temperature profiles of cores for the depth interval of 10-40 mbsf. Temperature gradients from the core top to the bottom are explained as the results of heating of drilling bits and core-barrel during coring and penetration. B. Temperature profiles of cores for the depth interval of 200-230 mbsf. Anomously low temperatures are caused by endothermic reactions in sediment-cores such as dissociation of gas hydrates and/or degassing.

ちの高精度デジタル温度計で測定した。Site 997 ではこの手法をさらに徹底し、キャットウオークで、コア全長にわたって、30 cm 間隔で最大 30 点の温度測定を行った。測定したコアは全部で 75 本、測定点は 1326 点である。測定結果を Fig. 6 に示す。0~200 m の間は 10~15°C、200 m で温度が大きく低下し、200~500 m の間は全体としての低温傾向（平均 8°C）と低温側へのシフト（最低 -2°C）が明瞭である。500 m 以深では、再び温度は上昇し変動幅も小さいレベルに戻る。Fig. 7 A, B に一部を拡大し、コア内での温度変動パターンを示す。A は、温度異常の見られない深度 10 m 付近のもので、コア温度は、コア上部から下部へ向かって単調な増加を示す。このような傾向はどのコアでも見られた。これはコアバレル貫入時の摩擦熱（APC 掘削時）あるいはビットの回転による温度上昇（XCB 掘削時）により、コアバレルに入る堆積物が暖められたためと説明される。B は、温度異常の見られた 200 m 付近のものである。コア内での一般的な温度パターンからはずれた、異常な低温（~-2°C）が明瞭である。これは、ガスハイドレートの分解、脱ガス、ガスの断熱膨張のような吸熱反応に由来する温度低下と考えるのが合理的だろう。

2. 間隙水の化学組成と塩素濃度異常（Gas hydrate saturation の推定）

間隙水の化学組成変化を高い分解能で求めるため、1つのコアから数試料、ハイドレート試料が分布しているような層準や特に低温のコアでは1つの Section（長さ 1.5 m）から1試料（最大 6 試料/コア）のホールラウンド試料（長さ 20 cm）を切り出し、間隙水の絞り出しを行った。Site 997 の間隙水試料は全部で 122 である。このように高い密度での間隙水のサンプリング・分析は、DSDP/ODP で初めての試みである。このような方法によって初めて塩素濃度異常の意義を明確にすることができた。Fig. 8 A に Site 997 の間隙水の塩素の深度プロファイルを示す。深層海水の塩素濃度は約 560 mM であるが、深度が増すとともに塩素濃度は減少し、海底面下 200 m で 515 mM となる。ここより下位では負の方向へ短い周期で大きな変動を示し、最小値は 395 mM である。深度 456 m の顕著なスパイクの下位で 515 mM に戻り、460 mM 以深では 510-515 mM と、ほとんど変動を示さない。塩素のこのような深度プロファイルは、Site 994, Site 995 でも同様に認められた。変動ゾーンの上限および下限深度は、Site 994, 995, 997 でそれぞれ、200 m-440 m, 190 m-460 m, 195 m-460 m である（誤差は ±10 m）。

Fig. 8. A. Chloride concentration of the interstitial waters squeezed from sediment cores after core recovery. Anomalous low chloride concentrations observed for the interval of 200–450 mbsf are explained to reflect dissociation of gas hydrates. B. Amounts of gas hydrates (% sediments) calculated from the chloride anomalies.

氷ができるときと同様に、ハイドレートが生成する際も間隙水に含まれていた塩分は排除され、ハイドレートを構成する水は“淡水”となる。したがって、ハイドレートを含む堆積物コアをスクイーザーにかけて水を絞り出すと、得られた“間隙水”は、真の間隙水とハイドレート起源の淡水の混合水となるため、塩素濃度は低下する。堆積物中のハイドレートの量が多いほど、淡水混合の効果は大きくなる。塩素濃度プロファイルの変動ゾーンに見られる負のスパイクは、堆積物中のハイドレートの存在を強く示唆するものである。ハイドレート由来の水は塩素を全く含まないとみなして良いので、このゾーンの間隙水の真の塩素濃度 (in situ の濃度) を知れば、負のスパイクの大きさと頻度から、ガスハイドレート量を計算することができる。

ガスハイドレート生成時の塩分排除により、ハイドレートの周囲の間隙水の塩分濃度は一時的に増加したことが予想される。しかし、このようにして生じた局所的な濃度異常は塩分の上方への拡散によって容易に均質化すると考えられる。圧密による間隙水の排出によってもガスハイドレート生成ゾーン (200~450 m) での均質化は進行する。一方、埋没が進行し温度が上昇するとある深度 (メタンハイドレート安定領域の基底) でガスハイドレートが分解し、堆積物にはメタンガスとともに淡水が供給される。堆積作用の進行にあわせて安定領域基底では継続的にハイドレートの分解が起こるため生成ゾーンの下の間隙水は定常的に薄くなるはずである。

この薄い間隙水もハイドレート生成ゾーンを通過して徐々に上方へ移動・拡散する。つまり、ハイドレート生成ゾーンを含むセクションでの塩素濃度プロファイルは、深部で定常的に生産される“薄い水”と海水の間での拡散パターンになると考えられる。Fig. 8 A に示す実線のカーブは、深度 0–200 m および 460–750 m の深度範囲の塩素濃度の変動を 3 次の関数として回帰したものである。これから、ハイドレート生成ゾーンにおける間隙水の真の塩素濃度は 515 mM 程度と見積もることができる。この見積もり値と実際の測定値の差 (塩素濃度異常) が、サンプリング段階で、ガスハイドレートの分解によって引き起こされた見かけの濃度異常である。

Fig. 8 B に、Site 997 の堆積物に含まれるメタンハイドレートの見積もり値を示す。最大で堆積物の 14%、平均 2~3%、孔隙の充填度としてみると、それぞれ、最大 25%、平均 5~6% となる。Site 994, Site 995 での見積もりでは、平均値はそれぞれ堆積物の 1.5%、1.9% である。ただしこれらの見積もりには、回収されたような厚い塊状のハイドレートは考慮されていないので、実際の平均含有量はこれらの数値より大きくなる。

3. 検層と VSP

通常の掘削での回収が困難であるガスハイドレートの分布を明らかにする上で、掘削後の検層が有効な情報を提供してくれる。Leg 164 では各 Site で、キャリパー、ガンマ線、中性子、音波速度、密度、比抵抗、地化学、温度、FMS の各検

Fig. 9. Summary of sonic and resistivity logs at Site 995.

層とゼロオフセット VSP が行われ、ガスハイドレートを含む堆積物の中で、in situ の物性の深度プロファイルが明らかになった。

特に顕著で特徴的な変化を示したのは P 波速度と比抵抗である (Fig. 9)。Site 995 の P 波速度は、200 m 付近まではほぼ 1600 m/s であるが、210 m で急に 1700 m/s に増大し、そのあと深度とともに増加して、400 m で極大値 1850 m/s となり、450 m 付近の 1700 m/s へと落ち込む。Site 994, Site 997 でも 450 m 付近までは Site 997 と同じように変動する。Site 995 では 550–600 m でさらに 1600 m/s と低速度の層準が出現する。

VSP 測定は、Site 997 の 420 m 付近で極大値 1800 m/s を示したあと、480 m で、1400 m/s という、堆積物としては異常に小さな値を示した。比抵抗も 200 m 付近までは 0.8–0.9 Ωm で変動するが、速度の大きな深度範囲 (200–450 m) では全般に大きな比抵抗値を持つ ($\sim 1.1 \Omega\text{m}$)。深度 250 m 付近、350 m 付近、400 m 付近には、1.2–1.4 Ωm という異常に高い比抵抗値がスパイク状に出現する。

速度、抵抗がともに高いということは、堆積物の粒子間隙が電気伝導度の小さな固体物質で充填されていることを意味する。一方、Site 995 の 550–600 m, Site 997 の 450–550 m の低速度ゾーンは、フリーガスの存在を示唆する。特に Site 997 の異常に小さな速度は、気泡の存在を強く示唆するものである。これらの事実から、深度 200–450 m がメタンハイドレート帯で、その直下の 100–200 m の範囲がフリーガス帯と判定できる。

考察—明らかになった事実と新たな問題

1. ガスハイドレートの産状と存在量

これまでに海底堆積物から回収されたガスハイドレート試料は、比較的大きな (肉眼で十分に観察可能なサイズの) ノ

ジュールや塊状の結晶集合体、あるいは粗粒の砂岩・凝灰岩の間隙を埋める mm サイズの結晶として産するものが多かった。このようなことから、堆積物中のガスハイドレートの集積は、分散型→薄層→団塊→塊状の厚層 という発達経路をたどる (Malone et al., 1985) とされ、ハイドレート化が進行した堆積物中では、厚い塊状のガスハイドレート層が発達すると想定されていた。さらに、塊状、厚層のガスハイドレートが発達する場所としては、深部からのガスの供給を受けやすい、ガスハイドレート安定領域下限 (BGHS) 付近が想定され、これが BSR 出現の主要な原因であるとも考えられていた。つまり、理想的には、BSR 直上に数メートルの厚さの塊状のガスハイドレートが発達することが期待された。しかし、今回の掘削と検層からは、厚い塊状のガスハイドレートは BSR 付近 ($\sim 450 \text{ m}$)、分布の上限付近 ($\sim 200 \text{ m}$) と、 $\sim 330 \text{ m}$ 付近の数層準に発見された。200 m 付近と 450 m 付近の塊状ガスハイドレートゾーンは 3 つの掘削点で確認できたため、10 km 以上にわたって連続し、一方、 $\sim 350 \text{ m}$ のゾーンは、Site 997 でのオフセット掘削 (掘削孔 A と B の間隔が 40 m) の結果から、少なくとも 40 m は連続すると考えられる。

塩素濃度異常やコア温度異常として検出されたガスハイドレートは $\sim 200 \text{ m}$ – $\sim 450 \text{ m}$ のハイドレート帯の全体を通じて分散して (平均含有量 $\sim 2\%$) 広く分布しているものである。コア温度が -1°C という低温の堆積物コア中ではガスハイドレートの分解のような吸熱反応が期待される。そこでそのようなコアをいくつか切り出し、密閉容器に入れてシールし、室温に 10 時間以上放置した。密閉容器内でガスハイドレートが分解すれば内圧はあがる筈である。しかし、期待に反して容器内の圧力は変わらなかった。これは“凍結”した堆積物にガスハイドレートが含まれていなかったことを意味する。この場合、異常低温は、ガスハイドレートの分解・吸熱反応の結果、間隙水が凍結したためと説明される。ガスハイドレートの分解、間隙水の凍結にも関わらず、数 mm の生痕やラミナを含め、堆積構造にほとんど乱れが生じていないという事実は、分解・凍結がごく微少部分で進行したことを示唆する。つまり、ブレークリッジのガスハイドレートは、粘土堆積物中に均質に分散するごく微少な結晶として存在していたと考えられる。

分散する微少ガスハイドレート結晶の含有量を分布帯 250 m を通じて平均 3% とする。これは塊状のガスハイドレートに換算すると 7.5 m となる。一方、検層データから、3 つの層準に発達する塊状ガスハイドレート帯の量は、厚さにして $\sim$ 数 m 程度とみなせるので、全体の量は厚さに換算して 12 m 程度になると考えられる。

2. BSR の起源

VSP と音響検層による速度解析から、掘削点での BSR 深度は、440–460 m であることが分かった。これは、コアの解析、VSP、検層から示唆されたガスハイドレート分布深度の下限にほぼ一致し、BSR がガスハイドレートの存在を示すものであることが実証された。しかし、1) Site 994 には BSR が見られないにもかかわらず、他の Site と同じ程度のガス

ハイドレートが存在し、2) BSR の強い Site 997 にはガスハイドレートの分布下限の直下にフリーガスの存在を示唆する低速度層があり、3) BSR の弱い Site 995 でもやや下位に低速度層が見られ、直下にもわずかに低速度のスパイクがあることが分かった。このことは、BSR の出現には、ガスハイドレートとフリーガス層がともに発達する必要があることを意味する。さらに、BSR が存在しないからといってガスハイドレートが存在しない訳ではないことも示している。主として BSR の分布面積から見積もられていた従来のガスハイドレート存在量見積もりは、この点からも修正を迫られることとなった。

3. ガスハイドレート分布の上限深度

温度-圧力条件のみから検討すると、ごく浅海をのぞいて、海底堆積物の浅部はすべてガスハイドレートの安定領域に含まれる。実際、これまで、海底直下の堆積物からガスハイドレートが回収されており（例えば、Brooks et al., 1986; Ginsburg et al., 1992）、今回もダイアビル直上では、深度数 m ～ 数 10 m の堆積物中からガスハイドレートを多数回収した。しかし、ブレイクリッジの Site 994, 995, 997 では、いずれも深度 200 m 付近に明瞭な分布上限があり、そこより浅部にはガスハイドレート存在の証拠はない。200 m 付近での塩素濃度、温度プロファイルの変化は、BSR 深度での変化と同じ程度に明瞭である。さらに 250 m 付近には、よく連続する塊状ハイドレート産出帯が発達し、検層でも、強い比抵抗異常が検出されている。分布に上限があることは全く予測していなかったことであり、その理由、地質学的意義についても不明である。1) 岩相の違い、浸透率の違いが、下部からのガスの移動・供給をさまたげている、2) メタンの供給と酸化による消費のバランスから、200 m 以浅では、過剰なメタンが存在できない、3) 地震探査記録に見られる正断層のセットにより深部のガスが 200 m 付近までは効果的に運ばれる、などの可能性が考えられるが、現在のところ明快な答えはない。今後の検討課題である。

4. 温度異常値の解釈

塩素濃度や検層など多くのデータが、ガスハイドレート分布の下限深度を 450 m 付近とするのに対し、コア温度測定では、500 m まで明瞭な低温異常（ $\sim -2^{\circ}\text{C}$ ）を記録した。このような低温は堆積物中で何らかの吸熱反応が進行したことを示唆するものであり、ガスハイドレートの分解が妥当な解釈の 1 つである。この層準から PCS で得られたコアには多量の過剰ガスが含まれるが、間隙水は塩素濃度異常を示さず、ガスハイドレートの存在に否定的である。塩素異常を示さないコアが低温異常を示す理由としては、1) BSR より下位にも、局所的にはガスハイドレートが生成しているが、少量であるため検層やコア分析では検出できなかった、2) 低温異常の原因は間隙水からの脱ガス反応などガスハイドレートの分解以外の吸熱反応である、という可能性が考えられるが、これも今後の検討課題である。

5. 熱流量測定から予想される BGHS と実際の分布深度の不一致

ガスハイドレートの安定領域は温度-圧力で決まるため、

堆積物中の分布下限深度は、その場所の地温勾配と水深が与えられれば実験的に決められた相平衡図から読みとることができる（Dickens and Quinby-Hunt, 1994）（Fig. 10 A）。逆に、P 波速度から BSR 深度が分かれば地温勾配が計算でき、BSR の分布から広域的な熱流量の見積もりが可能とされてきた（例えば、Yamano et al., 1982; Field and Kvenvolden, 1985）。

Leg 164 では、ブレイクリッジの各 Site の 0-350 m の深度範囲の 10-12 層準で、ADARA, WSTP, DVTP などの温度プローブ（槍）を用いた in situ の温度測定を行い（Paull et al., 1996）、地温勾配・熱流量を見積もり、相平衡図からガスハイドレート下限深度（Base of gas hydrate stability; BGHS）を求めた。Fig. 10 B に Site 995 の例を示す。海水中での安定条件は純水中より約 1.1°C 低温である。間隙水の塩分濃度は海水に近いので、海水中での平衡カーブを採用する。堆積物温度は $T = 3.6 + 0.0335D$ ($^{\circ}\text{C}$) (D : depth in meter) であるので、BGHS は約 550 m となる。これは BSR および多くのデータが示す深度より 100 m 近く深い。Site 997 でも同様に約 40 m 深い。Site 994 には BSR は認められないが、BGHS は分布下限深度よりやはり 40 m ほど深いことが分かった。深度の不一致は、地温勾配見積もりの誤差よりはるかに大きなものである。

BGHS が BSR や実際に観察された分布の下限と一致しない理由としては、(1) これまでの合成実験が天然の条件をシミュレートしておらず、相平衡図が堆積物中での相境界を示さない、(2) 現在の分布下限は現在の温度、圧力条件を反映しない、つまり、過去のより温度が高い、あるいは水深が浅かった時の化石 BSR であり、BGHS と BSR で挟まれた範囲（“漸移帯”）では、現在ガスハイドレートが集積しつつある、(3) BSR の下位にも実際はガスハイドレートが分布しているが、少量であるため検層や間隙水組成異常としては検出できなかった、などの可能性が考えられる。掘削と検層のデータは(1)の可能性を支持する。仮にそれが正しいとすると、平衡温度は海水組成の水の場合よりさらに $1\sim 3^{\circ}\text{C}$ 低いことになる。(2)の海面低下の効果については、氷期の 100 m の低下に対応する BGHS の変動は $20\sim 30$ m 程度であり、これだけでは説明できない。深度 500 m 付近の“漸移帯”では低温異常が観察されており、この点からは(3)の可能性も排除できない。

まとめ—炭素サイクルと海洋のガスハイドレート

1. 海洋のガスハイドレート量

Leg 164 の最大の成果は、海底堆積物中のガスハイドレート量を見積もる手がかりを得たことである。ブレイクリッジ堆積物中のガスハイドレートの量は、最小でもハイドレート帯の全堆積物量の 1.5%（体積）であり、これに加えて水平的に 10 km 以上追跡できる塊状～層状のガスハイドレートの量を考慮すると、平均して全堆積物量の 5% 程度と見積もることができる。これは、厚さ 12 m のガスハイドレートと同等の量が広範囲に存在していることを意味する。ガスハイドレート分布域を BSR 分布域（ $\sim 24000\text{km}^2$ ）に限定しても、

Fig. 10. A. Phase diagram of methane hydrate in pure water (large dots) and seawater (small dots). Solid line (below) indicates temperature gradients in the Blake Ridge sediments.

Fig. 10. B. Base of gas hydrate stability (BGHS) at Site 995. Vertical thin lines indicate phase boundaries in pure water (right) and seawater (left). Temperature gradient is $3.35^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. The predicted BGHS's, 545 m for sea-water and 570 m for pure-water, are approximately 100 m deeper than the observed base of hydrate zone.

ガスハイドレート量は炭素に換算して18Gt, メタン量として約25兆 m^3 と計算される。しかも実際にはガスハイドレート帯をシールとして、その下位に厚くフリーガス帯が存在しており、トラップされているメタンの全量はさらに多くなる。これまで、海洋全体のガスハイドレート量は、炭素量に換算して10000 Gtと見積もられていた (Kvenvolden, 1988) が、今回の掘削で明らかにされた“堆積物の数%”を採用すると、海洋のガスハイドレート存在量は10000 Gtをかなり上回ることが予想される。

2. 環境へのインパクト

海面が100 m低下すると圧力低下によりガスハイドレートの安定領域下限は数10~10数m上昇し、浅海域での分布が消滅するため、ガスハイドレート安定領域は少なくとも10%程度縮小する。一方底層水の水温が 1°C 上昇しても、100 mの海面低下と同様の効果を生じる。水温が 5°C 上昇すると、海洋のガスハイドレートの25% (炭素換算で2500 Gt以上) が分解して、大量のメタンが大気-海洋系に放出されると見積もられている (松本, 1995)。現在の大気と海洋の炭素量がそれぞれ約600 Gtと36000 Gtであることを考慮すると、ガスハイドレートの分解の影響が如何に大きいか理解できる。ガスハイドレートの分解とメタンの放出は、(1)温室効果ガスの増加と地球温暖化の原因となり、(2)海洋の貧酸素化、無酸素化を促進し、さらに、(3)大気-海洋系の炭素同位体組成の負の異常を引き起こす。このようなシナリオで、生物の大量絶滅を含む古海洋環境の変遷・進化にガスハイドレートの分解・生成が大きな影響を与えてきた可能性が指摘される (『ハイドレート仮説』, 松本, 1995)。

3. 資源ポテンシャル

Leg 164 は、第1に、海底からの深度200-450 mのガスハイドレート帯の、少なくとも3層準に、メートル・オーダーの塊状~層状ガスハイドレート密集帯が存在することを示した。中でも基底部付近の密集帯は、その下位にフリーガス帯

を伴い、全体として、有用な天然ガス鉱床を形成しているように見える。第2に、ガスハイドレートの分布に下限とともに上限があることを示した。上限の起源とその付近の密集帯の形成機構としては、岩相の違いによる流体の移動経路のコントロール以外に、断層、割れ目系の発達によるガスの移動・集積が大きな役割を果たしている可能性がある。南海トラフのような付加体では、スラストや割れ目系がハイドレート帯の発達を基本的に支配しているかもしれない。有効な割れ目系発見のため、海底からの冷湧水やボックマークの調査が重要となってきた。

謝 辞

ODPLeg 164 の2か月の掘削航海を、ガスハイドレート研究に画期的な1頁を加えた科学的に実り多いものとし、また船上での研究生活を生産的かつ安全・快適なものとするよう常に最大限の努力をしてくれた、ジョイデスリゾリューション船長、科学オペレーター、多数のテクニシャン、ドリーラー、クルーの方々に心からの敬意と感謝の意を表します。日本人著者の一部は、本研究航海に参加し、その後の研究を進めるにあたり、文部省科学研究費補助金（国際学術、試験研究、一般研究C）を使用しました。

文 献

Brooks, J. M., Cox, H. B., Bryant, W. R., Kennicutt II, M. C., Mann,

- R. G. and McDonald, T. J., 1986, Association of gas hydrates and oil seepage in the Gulf of Mexico. *Org. Geochem.*, **10**, 221-234.
 Dickens, G. R. and Quinby-Hunt, M. S., 1994, Methane hydrate stability in seawater. *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 2115-2118.
 Field, M. E. and Kvenvolden, K. A., 1985, Gas hydrates on the northern California continental margin. *Geology*, **13**, 517-520.
 Ginsburg, G. D., Guseynov, R. A., Dadashov, A. A., Ivanova, G. A., Kazantsev, S. A., Solov'ev, V. A., Telepnev, E. V., Askeri-Nasirov, R. Ye., Yesikov, A. D., Mal'tseva, E. V., Mashirov, Yu. G. and Shabayeva, I. Yu., 1992, Gas hydrates of the southern Caspian Sea. *Internat. Geo. Review*, **34**, 765-782.
 Heezen, B. C., Hollister, C. D. and Ruddiman, W. F., 1966, Shaping of the continental rise by deep geostrophic contour currents. *Science*, **152**, 502-508.
 Kvenvolden, K. A., 1988, Methane hydrate - A major reservoir of carbon in the shallow geosphere? *Chem. Geol.*, **71**, 41-51.
 Makogon, Y. F., 1974, *Hydrates of natural gases*. Geoexplor. Associates Inc., Denver, 178 p.
 Malone, R. D., Mroz, T. H. and Dominic, K. L., 1985, Geologic analysis of gas hydrate deposits. SPE 15224.
 松本 良, 1995, 炭酸塩の $\delta^{13}\text{C}$ 異常の要因と新しいパラダイム「ガスハイドレート仮説」. *地質雑*, **101**, 902-924.
 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*, 東京, 253 p.
 Paull, C., Matsumoto, R. and Wallace, P., 1996, Proc. ODP, Init. Repts., 164 : College Station, TX (Ocean Drilling Program), (in press)
 Yamano, M., Uyeda, S., Aoki, Y. and Shipley, T. H., 1982, Estimates of heat flow derived from gas hydrates. *Geology*, **10**, 339-343.

(要 旨)

松本 良・渡部芳夫・佐藤幹夫・岡田尚武・廣木義久・川崎正行・Leg 164 乗船研究者, 1996, 海洋のガスハイドレートの分布と産状—ODP Leg 164 ブレークリッジ掘削の成果—. *地質雑*, **102**, 932-944. (Matsumoto, R., Watanabe, Y., Satoh, 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 Leg 164 : Blake Ridge Drilling—. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **102**, 932-944.)

深海掘削計画の第164節航海は、北米東海岸沖約300 kmのブレークリッジ上で、BSRを貫く700~750 mの掘削を行い、多数のガスハイドレート試料の回収に成功した。船上でのコア分析と検層、VSP測定により、深海底のガスハイドレートについて次の事実が明らかになった。(1)深度約200-450 mの堆積物がハイドレート化しており、ハイドレート含有量は全堆積物量の1%から14%、平均して2~3%である、(2)分布の上限と下限付近には塊状~層状のハイドレートが10 km以上にわたって連続して発達する、(3)堆積物中に広く分散するハイドレートはごく細粒である、(4)分布の下限は地震探査記録のBSR深度と一致する、(5)BSRが強く発達する所では、BSRの下位にフリーガス帯が発達する、(6)分布下限深度(=BSR)は、相平衡図と地温勾配から求められたメタンハイドレートの安定領域下限深度(=BGHS)より数10~100 m浅い。