

# 茂原型天然ガス鉱床は メタンハイドレート起源か

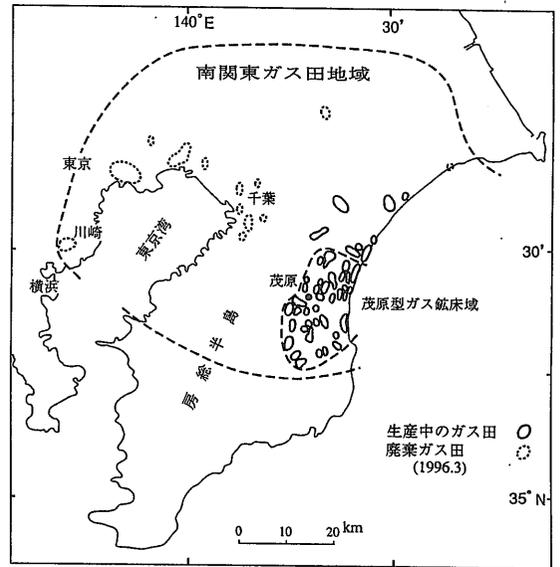
名 取 博 夫<sup>1)</sup>

## はじめに

わが国においては世界に先駆けてエネルギー資源としてのメタンハイドレートの研究が始まっている。メタンハイドレートは、低温高圧下において、水の分子の空隙にメタン分子が取り込まれて生成される氷状の包接化合物であり、温度圧力条件の変化により、容易に分解(解離)してメタンと水に戻る不安定な物質である。天然のメタンハイドレートは、永久凍土地帯や深海底下に存在し、わが国の周辺海域においても発見されている(奥田, 1993; 松本, 1995)。メタンハイドレートは現世に限らず地質時代にも存在し、既知の天然ガス鉱床の中には地質時代のハイドレートの分解によって形成されたものもあると考えられる。しかし、ガス鉱床のメタンが過去にシャーベット状であったことを証明するのは必ずしも容易ではなく、これまでのところ世界的にもその実証例は知られていない。ところが、九十九里浜一帯に発達する茂原型天然ガス鉱床にはメタンハイドレート起源であることを示唆するいくつかの有力な証拠が認められる。

## メタンハイドレートの生成

東京の中心部から東方の東京湾岸および房総半島頸部地域一帯は南関東ガス田地域と呼ばれる水溶性天然ガス鉱床地域であり(第1図), 1931年以来商業的な開発が行なわれている。このガス田地域南東部の九十九里浜一帯には通常の水溶性ガス鉱床に比べて著しく産出ガス水比の高い鉱床が発達し、分布の中心に当たる茂原市の名を冠して茂原型天然ガス鉱床と呼ばれている。



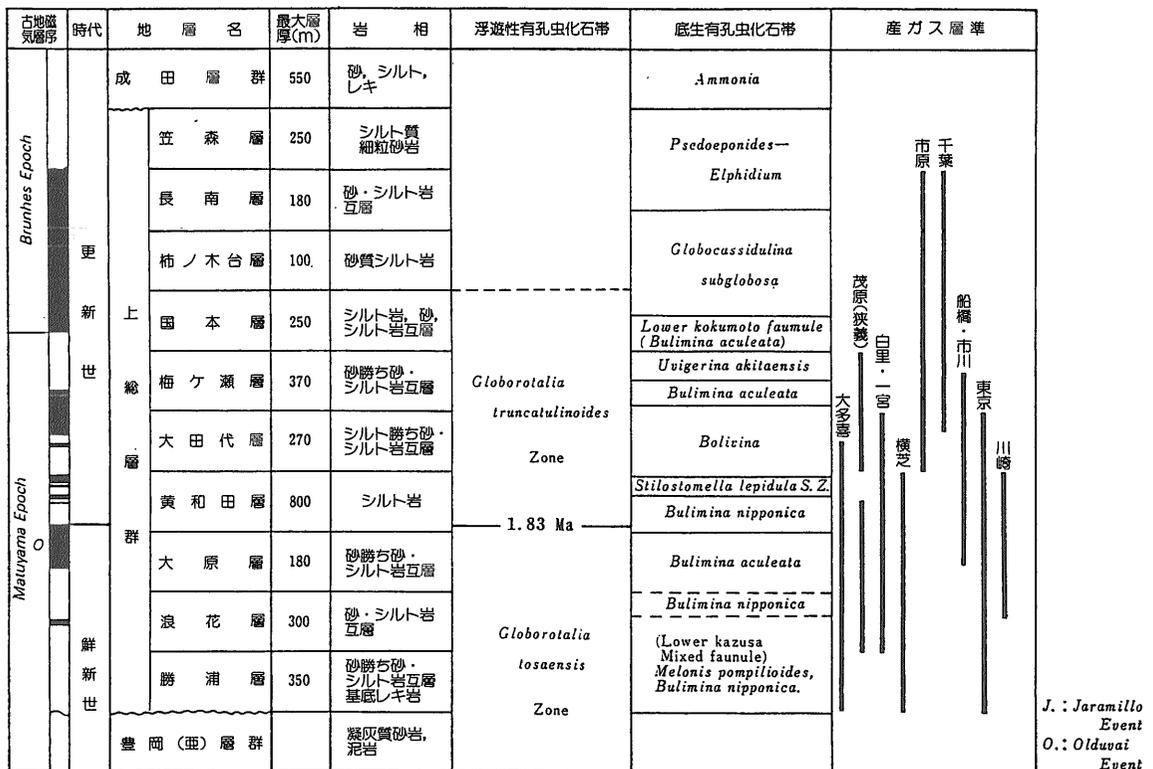
第1図 南関東ガス田地域におけるガス田分布図

茂原型鉱床は上総層群中に胚胎する。上総層群は鮮新～更新世の砂岩および泥岩で構成される外洋性堆積物であり、下位から勝浦、浪花、大原、黄和田、大田代、梅ヶ瀬、国本、柿ノ木台、長南、笠森の10層に区分され、鮮新/更新世境界は黄和層下部(高山ほか, 1995)に認められている(第2図)。水溶性ガスは最上位の笠森層を除きほとんど全層準に認められるが、茂原型鉱床は主として更新世の大田代および梅ヶ瀬層中に発達する。上総層群の中～上部を構成する更新統の層厚は2,000mに達し、この年代の外洋性堆積物としては世界的にも類例のないほど厚く、経済的なガス鉱床の成立のための重要な要因となっている。

水溶性天然ガス鉱床は、可燃性ガスが地下にお

1) 地質調査所 燃料資源部

キーワード: 茂原型, 水溶性, 天然ガス, メタンハイドレート, 解離, 泥層メタン, マッドベッドメタン



[米谷 (1983)、一部改変]

第2図 上総層群の層序・有孔虫化石帯・産ガス層準

いて静水圧に対応し、地層水中に溶解して成立している鉱床である。ガスは、坑井を通じて地層水を地上に汲み上げることによって採取される。揚水によって地層水が静水圧から解放されると、水に対するガスの溶解度が低下し、ガスは気泡となって自然に分離し、容易に採取される。

茂原型鉱床を胚胎する大田代および梅ヶ瀬層は堆積盆中心部に発達したタービダイト起源の固結度の低い砂泥互層により構成される(写真1)。底生有孔虫群集解析(Ishiwada, 1964; 樋口, 1964)によると、大田代および梅ヶ瀬層の群集は *Uvigerina akitaensis*, *Bulimina aculeata* 等に特徴付けられ、現世の北西太平洋の中層水下に生息する群集(Inoue, 1983)に類似する。上総層群分布域は、地温勾配の低い地域として知られるが、なかでも地層が厚く発達する茂原型鉱床域の地温勾配は特に低い。このような堆積環境および物理的条件は、上総層群堆積時にメタンハイドレートの生成された可能性を示している。

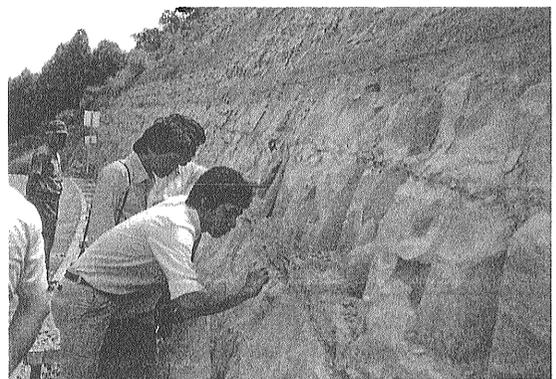
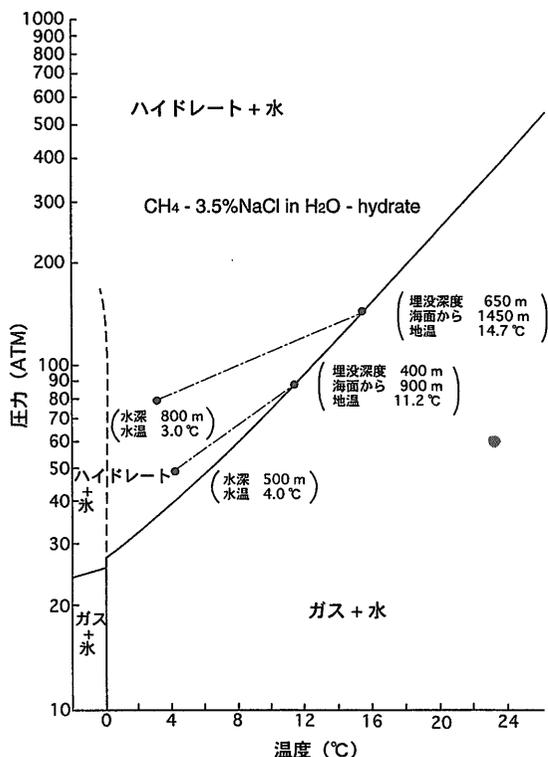


写真1 茂原型ガス鉱床を胚胎する大田台層の砂泥互層

そこで水深800m、底層水温3.0℃、地温勾配0.018℃/mの古海域を想定すると、メタンハイドレートの安定曲線(Claypool and Kaplan, 1974)から、その安定領域は海底面から埋没深度650m(海面から1,450m;地温14.7℃)までの区間となる(第3図)。また、水深500m、底層水温4.0℃では、安定区間は海底と埋没深度400m(海面から900m;地温11.2℃)



第3図 茂原型ガス鉱床胚胎層堆積時におけるメタンハイドレートの安定領域 [Claypool and Kaplan (1974)に基づく]

との間となる。この結果はこれらの区間に水の溶解度を超える十分な量のメタンが存在すれば、メタンハイドレートが生成されたであろうことを示している。

有孔虫群の示す堆積環境からみると、ハイドレートの生成は黄和田層堆積期(約180万年前:渡辺・壇原, 1996)に黄和田層およびその下位層中に始まったと考えられる。安定区間に形成されたハイドレート層は、堆積物による埋没の進行とともにその下底から分解し、“メタンハイドレート解離鉱床 (Methane hydrate dissociation deposit)”；すなわち茂原型鉱床をその場に残しつつ上方へと移動した。ハイドレート相の発達は大田台、梅ヶ瀬期にピークに達し、国本期(約80万年前)には浅海化により劣化、消滅したと推定される。

ハイドレートの安定領域は水深(圧力)に比例して拡大する。したがって、ハイドレート相は相対的に深い海底下ほどより厚く発達し、安定期間も長期化する。安定期間の長期化はハイドレートのメタン充填率を高め、結果として解離鉱床のポテンシャルを向上

させると考えられる。

南関東ガス田地域のガス鉱床のポテンシャルは、堆積深度と密接な関係があり、より深い海底の堆積物中ほど高くなるといわれてきたが(樋口, 1964)、そのメカニズムの説明はこれまでのところなされていなかった。しかし、上述のように、ハイドレートの関与によって、明解に説明できる。この事実はこの地域のガス鉱床がメタンハイドレート起源であることを示す有力な証拠の一つといえよう。

### 茂原型鉱床

南関東ガス田地域における水溶性ガス鉱床の開発深度は200~1,800mであるが、茂原型鉱床の成立深度は通常型の水溶性ガス鉱床より相対的に浅く、200~700mである。鉱床区間の層厚は300~500m。うち、見かけの貯留層を構成する砂岩の有効層厚は100~150m、孔隙率30~40%、浸透率は数10~100ミリダルシー(md)である。生産開始時の貯留層圧はほぼ静水圧に等しい。生産坑井の多くは、鉱床区間全体に長孔明管仕上げの施されたいわゆる多層同時仕上げ坑井である。生産設備としては一般にチュービングフローガスリフト方式が採用されている(写真2,3)。

茂原型鉱床の特徴は、生産の進行とともに産出ガ

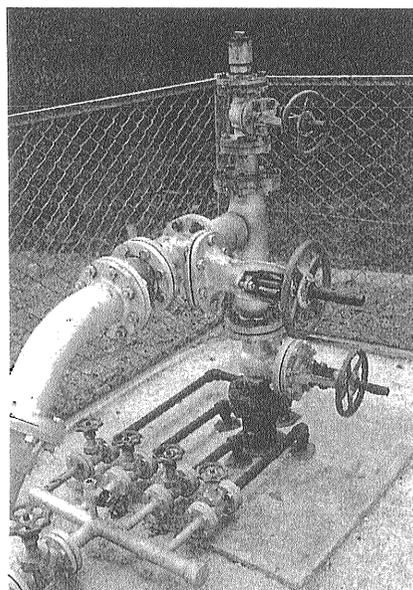


写真2 茂原型ガス田におけるガスリフト方式の生産井

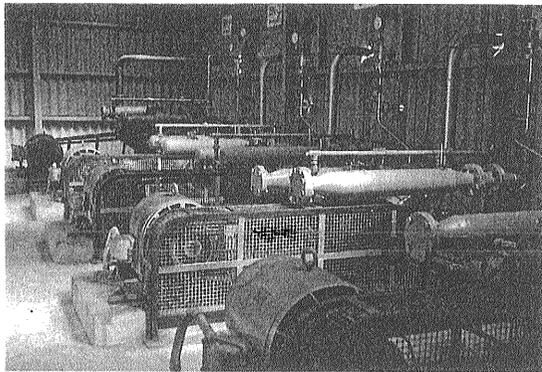


写真3 ガスリフト用ガスを加圧するコンプレッサー群

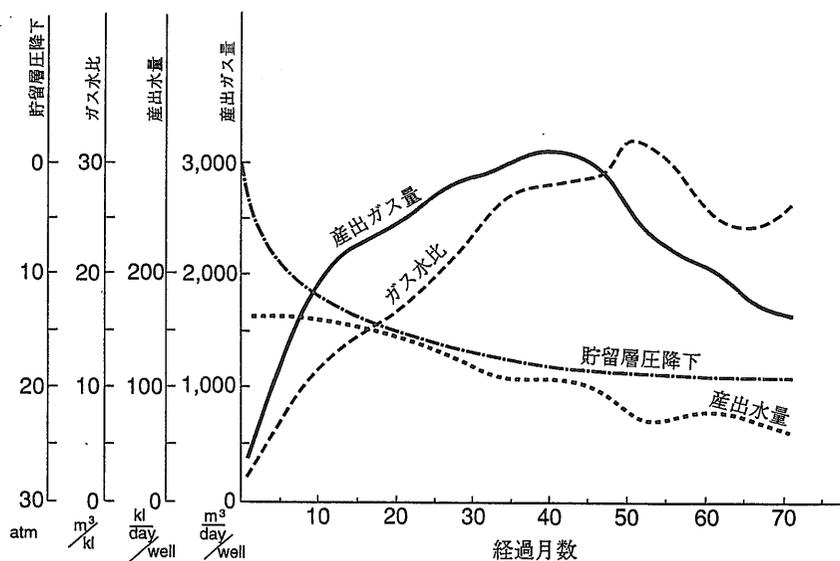
ス水比が急上昇することにある(第4図)。産出ガス水比は、標準状態におけるガスと水の体積比で表される。例えば、1kl(1m<sup>3</sup>)の水を地下から汲み上げたとき、2m<sup>3</sup>のガスが分離採取されれば、ガス水比2とされる。生産開始後、最初の15年間の平均ガス水比が4以上の鉱床が茂原型、4以下のものは通常型と便宜的に分類されている。

地層水(塩水)に対するメタン溶解度から算出される計算ガス水比は、地表からの深度500mで1.0、1,000mで1.5、1,500mで1.8程度である。通常型の水溶性ガス鉱床のガス水比はこれらの計算値にほぼ等しいか、やや上回る程度である。それに対して、茂原型においては、生産初期には通常型をやや上

回る程度であるが、生産の進行とともに20~30へと急上昇し(第4図)、高ポテンシャル域においては、40を超えることもある。このような異常に高い茂原型のガス水比は、遊離ガスの存在を予感させる。しかし、その値に見合う大量の遊離ガスは見かけの貯留層である砂岩中には認められていない。断層・層位封鎖等、構造的な遊離ガスの存在も知られていない。

茂原地域の地質は北西傾斜3~4°の単斜構造を呈する。したがって、砂岩中の遊離ガスは移動・逸散し易く、滞留することができない。また、互層する泥岩は浸透率が高いと考えられ、キャップロックとしての能力を欠いている。そのため構造的な遊離ガスも存在し得ないのであろう。ちなみに、地表露頭から採取された泥岩試料の空気浸透率は大田台、梅ヶ瀬層に関して2,330~4,050md、国本層では9,000mdと極めて高い値を示す(井波, 1981)。これらの泥岩試料は水に接触すると崩壊するため、水に対する浸透率は測定されていない。

このような事実から、地層水の溶解限度を超える大量のガスは、互層中の泥岩に由来すると考えられている(秋林ほか, 1992; 田崎, 1992)。泥岩中に包蔵されている遊離メタンが生産に伴う減圧によって砂岩中に浸出し、生産井に吸い寄せられ、産出ガス水比を上昇させるのである。これらの事実は、茂原



第4図 茂原型ガス鉱床の産出挙動例。[関東天然瓦斯株式会社(1965), 一部改編]

型鉱床が“水溶性”ではなく、泥岩がメタンの根源岩と貯留岩とを兼ねた新しいタイプのガス鉱床であることを示している。そこでこの鉱床を“泥層メタン鉱床(Mud bed methane deposit: MBM deposit)”と呼ぶこととした。

MBM鉱床の埋蔵量計算には、産出ガス水比に基づく水溶性ガスの計算手法は適用できない。生産ガス水比に替え、泥層中のメタン充填率をパラメータとする新たな評価手法の構築が必要であろう。

南関東ガス田地域におけるガスの生産は現在7社により行われており、1995年のガス生産量は約4億4,900万 $\text{m}^3$  (原油換算44万9,000kl)である。この値は国内天然ガス生産量の21%に当たり、また、総消費量の0.8%に相当する。1995年末の稼働坑井は640本、1995年末までの累計生産量は約160億 $\text{m}^3$ であり、そのうちの約60%が茂原型鉱床から生産され、残りの40%は通常型水溶性ガス鉱床から生産されたものと推定される。水溶性ガスとして推計された南関東ガス田地域の究極可採埋蔵量は約3,840億 $\text{m}^3$ である。1995年末における残存可採埋蔵量は約3,680億 $\text{m}^3$ であり、同年のわが国の天然ガス消費量の6.3年分に相当する。将来、茂原型鉱床に対するメタン充填率による評価手法が確立されれば、この地域の埋蔵量は大幅に拡大すると考えられる。

究極可採埋蔵量1,000億 $\text{m}^3$ 以上のガス田は巨大ガス田(Giant gas field)と呼ばれる。資源密度、産出挙動等が在来型ガス田とは異なるものの、茂原型ガス田の資源規模は、その再計算を待つまでもなく、巨大ガス田に匹敵するといえよう。

茂原型鉱床のガスは98~99%の $\text{CH}_4$ と少量の $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 等で構成され、 $\text{H}_2\text{S}$ のような有害成分をほとんど含まず、燃料および化学工業原料として使用されている。

ガス付随水(写真4)には塩分が含まれ、その塩素量は10,000~19,400%である。また、付随水中には60~140 $\text{mg/l}$ のヨードが含まれ、工業的に抽出され(写真5,6)、化学工業原料、食品添加剤等として国際市場に供給されている。南関東ガス田地域は世界的なヨード生産地域である。1994年の生産量は約5,800トンであり、世界の総生産量の約35%に達している。

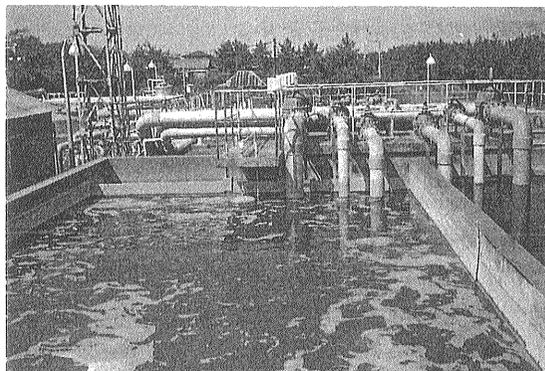


写真4 ヨードの原料水となるガス付随水。フミン酸を含み茶褐色を呈する。

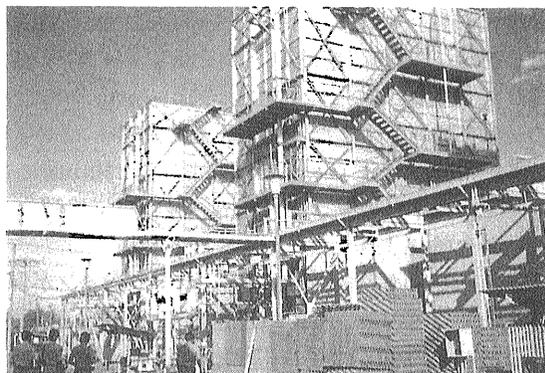


写真5 ガス付随水からヨードを抽出するブローアウト方式のヨード生産プラント

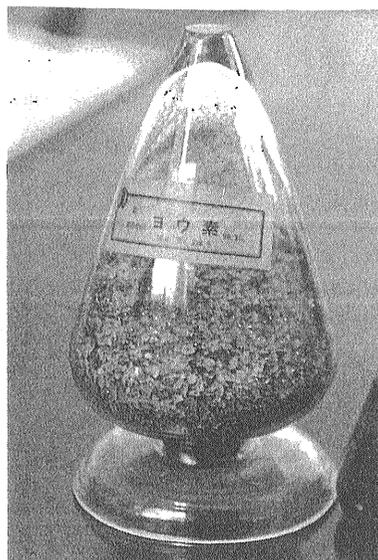


写真6 ヨードのサンプル。ハロゲン族の一種、金属光沢のある灰黒色鱗片状結晶。

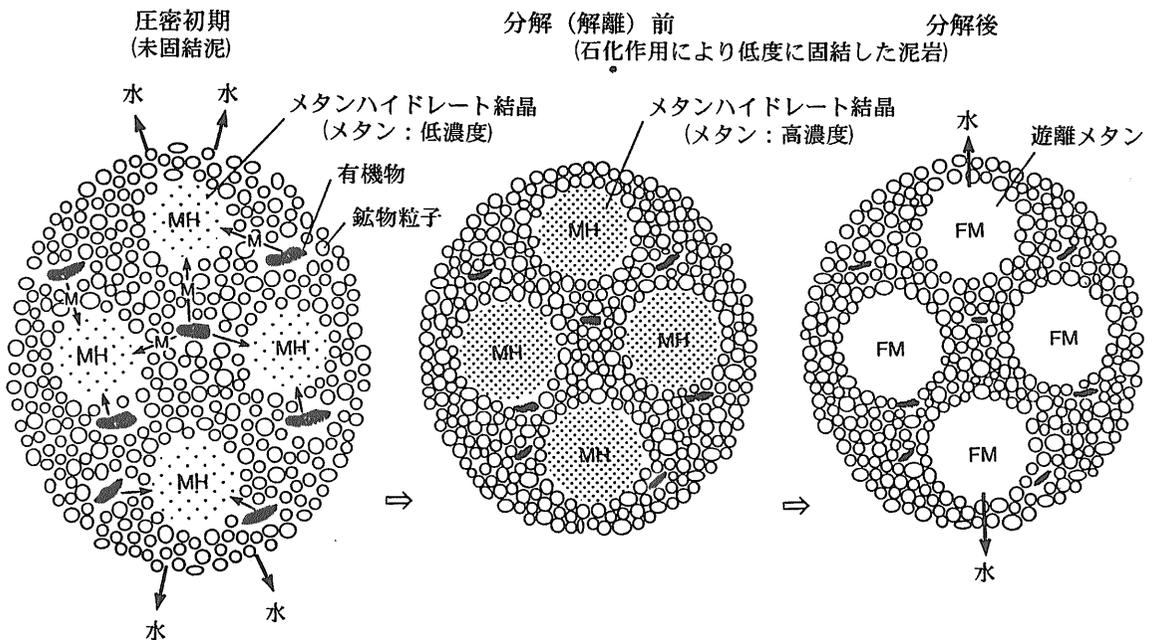
茂原型鉱床の形成モデル

茂原型鉱床のメタンは、炭素同位体比 $\delta^{13}C$ が $-67.0\%$ と低く(Igari and Sakata, 1989), 有機物のバクテリア醗酵により、主として泥岩中で生成され、ハイドレートとしてその場に固定されたと考えられる。堆積初期にはメタンを溶解した大量の水が、圧密により絞り出され、地層外に流失したが、溶解限度を超えるメタンはハイドレートとして貯留され、時間とともに濃縮された(第5図)。ハイドレートはメタンの優れた貯留体であり、理想的なメタンハイドレートは、それ自身の体積に対して、標準状態換算で約170倍の体積のメタンを貯留することができる。

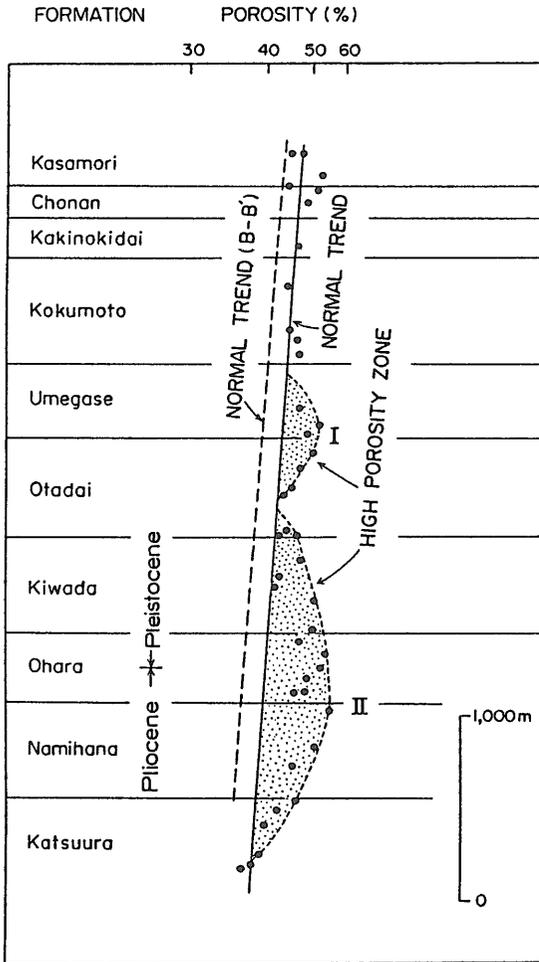
埋没の進行によりハイドレートが解離深度を超えると下底から分解(解離)し、水と大量のメタンを生成した。遊離したメタンは水を排除し、ハイドレートの分解によって生じた泥岩の微細空隙中に留まり、解離鉱床、すなわち茂原型鉱床を形成した(第5図)。排除された水は溶解メタンを伴い砂岩中に移動し、地層外に排出された。

ハイドレート解離後の泥岩中に大量のメタンが保存されているのは、泥岩の異常に高い孔隙率に依存する。地表露頭試料の孔隙率測定(井波, 1983)

によると、茂原型鉱床を伴う梅ヶ瀬および大田台層の泥岩の孔隙率は42~51%で、ノーマルトレンドに対して最大30%の高孔隙率異常を示している(第6図)。孔隙異常の形成要因は異常高压にあると考えられてきた(井波, 1983)。しかし、泥岩の高い空気浸透率は異常高压の形成に否定的な要素である。異常高压の発生に不可欠な低浸透層や封鎖構造の存在も認められない。このような高孔隙率異常はハイドレートの生成・解離の過程で形成されたと考えることによって矛盾なく説明できる。すなわち、ハイドレートの結晶が泥岩中において鉱物粒子間の微細空隙を埋めつつ微粒子状に成長し、堆積の進行に伴う圧密による空隙の縮小を抑制する支持材として機能した。埋没が解離深度を超えると、ハイドレートは水とメタンに分解し、支持材としての機能を失う。しかしながら、この段階に達すると、ハイドレートの結晶により占められていた空隙は、石化作用による鉱物粒子相互の結合により上載圧に対する耐圧能力を獲得し、圧密による急激な減少を免れ、メタンの優れた貯蔵庫となった(第5図)。このような泥岩の高孔隙率異常および大量に貯留されている遊離メタンは、メタンハイドレートの“化石”にたとえることができ、過去にメタンハイドレートが存在した有力な



第5図 メタンハイドレートの生成・分解モデル



第6図 上総層群泥岩の孔隙率分布. 井波(1983)より

証拠とみなすことができよう。

茂原型鉱床は地下浅部(200~700m)に存在する梅ヶ瀬・大田代層中に発達し、下り傾斜側の深部においては劣化し、通常型水溶性鉱床に移化している。その原因としては、深度の増加に伴う静水圧の上昇により泥岩中の空隙に水が侵入し、遊離メタンが押し出されて失われたこと、あるいは、耐圧限界を超える上載圧により泥岩空隙が圧砕され、遊離メタンが押し出されて失われたことなどが考えられる。茂原型鉱床が大田代層の下位の地層中に存在せず、通常型に限られるのも、同様なメカニズムによるのであろう。

泥岩空隙の圧密はガスの生産に伴う孔隙圧の低下によっても進行する。ガス・水の生産に伴う地盤沈下は南関東ガス田地域におけるガス鉱業の発展

を阻む大きな要因となっている。

### 新たなメタン源

茂原型ガス鉱床の生産ガス水比を向上させるもう一つのメタン源として、地層中で新たに生成される生物源メタンについても考慮する必要がある。ガスの生産に伴う地層水の再流動化はメタンバクテリアを活性化させる可能性がある。茂原地域の泥岩中の有機物は陸性植物に特徴づけられ(米谷ほか, 1983)、ガス指向型である。有機炭素量は0.7~1.6%で、ガス生成ポテンシャルが泥岩中に保持されていることを示す。ビトリナイト反射率は0.2~0.3%で、有機物が未熟性であり、メタンバクテリアの栄養源になり得ることを示している。地層温度20~30℃もバクテリア活動に適している。地層水の化学組成にはバクテリア活動を妨げる因子は認められない。

メタンハイドレート解離後のバクテリア活動の問題は、現世海域のハイドレートのメタン供給源にも関連し、今後の研究課題として重要であろう。

### おわりに

茂原型鉱床およびその分布域については、豊富なデータが既に存在する。また、天然のメタンハイドレート分布地域に比べ、アクセスが容易である。したがって、茂原型鉱床のハイドレート起源が実証されれば、この地域は、現世の海底メタンハイドレートの資源としての研究およびハイドレートに関係するさまざまな地質現象の研究に貴重なフィールドとなる。

### 参考文献

- 秋林 智・山口伸次・藤田豊久(1992): 水溶性天然ガス田の高ガス水比挙動シミュレーション. 石枝誌, 57, 427-433.
- Claypool, G. E. and Kaplan, I.R. (1974): The origin and distribution of methane in marine sediments. In *Natural Gases in Marine Sediments*, ed. Kaplan, I. R., Plenum Press, New York, 99-139.
- Collins, A. G., Bennett, J. H. and Manuel, O.K. (1971): Iodine and algae in sedimentary rocks associated with iodine-rich brines. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 82, 2607-2610.
- 樋口 雄(1964): 千葉県ガス田地域における微化石層位学的研究. 東北大地古邦文報告, 61, 1-48.
- Igari, S. and Sakata, S. (1989): Origin of natural gas of dissolved-in-water type in Japan inferred from chemical and isotopic compositions: Occurrence of dissolved gas of

thermogenic origin. *Geochem. Joul.*, 23, 139-142.  
 井波和夫(1981):房総半島における泥岩の物性について. 石技誌, 45, 149-158.  
 井波和夫(1983):房総半島上総層群泥岩の圧密について. 地調月報, 34, 207-216.  
 Inoue, Yoko(1983): Northwest Pacific foraminifera as paleo-environmental indications. *Sci. Rep. Inst. Geosci. Univ. Tsukuba*, 10, 57-162.  
 Ishiwada, Y.(1964): Benthonic Foramonifera of the Pacific coast of Japan refered to biostratigraphy of the Kazusa Group. *Rep. 205, Geol. Surv. of Japan*, 1-45.  
 関東天然瓦斯開発株式会社(1965):茂原ガス田. 石油学会誌, 8, 540-545.  
 米谷盛壽郎(1983):上総層群(南関東)標準層序表. 石油鉱業便覧, 石技協会, 707.  
 松本 良(1995):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. 石技誌, 60, 147-156.

名取博夫(1996):メタンハイドレート解離相としての水溶性ガス鉱床. 平成8年度石技協会春季講演会要旨集, 94.  
 奥田義久(1993):シャーベット状の天然ガス資源—ガスハイドレート. *Petrotech*, 16, 300-306.  
 高山俊昭・佐藤時幸・亀尾浩司・佐藤登美子(1995):第四系石灰質ナンノ化石層序と鮮新統/更新統境界の年代値. 第四紀研究, 34, 157-170.  
 田崎善行(1992):茂原ガス田の産出挙動と毛細管圧力の関係について. 石技誌, 57, 151-156.  
 渡辺真人・壇原 徹(1996):房総半島上総層群のフィッシュン・トラック年代. 地質雑, 102, 545-556.  
 米谷 宏・粕 武・鈴木尉元・小玉喜三郎(1983):上総・三浦及び保田層群中の有機炭素及びノルマルパラフィンの分布. 地調月報, 34, 153-174.

NATORI Hiro'o (1997): Mobarate type natural gas deposits seem to be methane hydrate origin.

<受付:1996年12月20日>

## ビデオ「天然ガスハイドレート」

21世紀の天然ガス資源として期待されている天然ガスハイドレートのビデオが完成しました。これまでに地質調査所が中心となって行ってきた合成実験、資源量評価、探査手法開発などを中心として、天然ガスハイドレートの分布、構造、基礎物性から探査、掘削、生産に至る広範な内容を分かりやすく解説しています。地質調査所標本館で上映しているほか、基盤技術研究促進センターなどを通して入手できます。

内容は以下の通りです。

### 1. 天然ガスハイドレートとは何か

- 1) 天然ガスハイドレート:燃える雪玉の燃焼実験
- 2) 日本近海の分布
- 3) 世界の分布
- 4) メタンハイドレートの構造:分子模型, 生成過程

### 2. 基礎物性

- 1) 合成実験:温度圧力条件の検討
- 2) 生成分解曲線:メタンハイドレートの安定条件
- 3) 測定装置:ガスクロマトグラフ, ガスクロマトグラフ燃焼質量分析計, ガスクロマトグラフ質量分析計, 核磁気共鳴装置

### 3. 探査

- 1) 地震探査の概念:海底下の地質構造の解析
- 2) 地震探査船上作業:白嶺丸での船上作業
- 3) 地震探査記録処理
- 4) BSR(海底疑似反射面):南海トラフの地震探査記録
- 5) メタンハイドレートの安定領域
- 6) 天然ガスハイドレート賦存モデル
- 7) ブレーク海嶺:ODP Leg164航海, ハイドレート回収試料

### 4. 掘削・生産

- 1) 掘削法
- 2) 生産法
- 3) ロシア・シベリア:メソヤハ油田
- 4) アラスカ・ノーススロープ:プルドーベイ油田

### 5. まとめ

- 1) 日本の探査・開発計画:基礎物理探査, 基礎試験
- 2) 通産省・石油公団の開発計画・体制:天然ガスハイドレート開発推進体制
- 3) 世界及び日本の天然ガスハイドレート資源量
- 4) 今後の展望

(今井 登)