堆積学におけるガスハイドレート科学の展望 —地球環境科学のパラダイム—

松本 良*

A prospect of gas hydrate science in sedimentology —Paradigm for understanding of the earth environments—

Ryo Matsumoto*

GAS HYDRATES-A HUGE CARBON SINK OF SHALLOW GEOSPHERE :

Findings of gas hydrates in marine sediments in late 20th century have made a strong impact on the study of carbon cycle and global changes as well as on the exploration for energy resources. Gas hydrates are crystalline materials composed of cages of water molecules that surround low-molecular-weight gas such as methane, ethane, propane, carbon dioxide, and etc. Naturally occurring gas hydrates are mostly composed of methane and water, then called as *methane hydrate*, but often referred as *gas hydrates* (e.g., Lancelot and Ewing, 1972 ; Shipley et al., 1978).

Recent geological and geophysical surveys for natural gas hydrates have revealed that the upper few hundred meters of the deep sea sediments of continental margins are often associated with laterally extensive gas hydrate deposits that underlain by free gas zone. *Methane Hydrate Exploration Project* of METI-JNOC (1995~) identified and recovered gas hydrate saturated sands from the Nankai Trough (e.g., Matsumoto, 2000). The pore saturation of the sands reaches up to 80%. The total carbon mass stored in modern gas hydrates is estimated to be 7,500 to 15,000 Gt (Gt=10¹⁵ g), which is ~25% of the total DIC in the ocean, ~10⁴ times the amount of methane carbon in the atmosphere, and comparable to the conventional fossil fuel reserves (e.g., Kvenvolden, 1988, 1993). Methane of marine gas hydrates is mostly originated from microbial methanogenesis and is therefore extremely depleted in ¹³C ($\delta^{13}\text{C} = -60$ to -90‰ PDB).

Gas hydrates are stable at low temperature and high-pressure conditions with certain amounts of gas and water. Therefore, gas hydrates in marine sediments is sensitive to even a little change in the relative sea level, bottom water temperatures, and geothermal gradients. The modeling of carbon cycle and global change must take into account the presence of gas hydrates in marine sediments and the consequences of the dissociation and possible release of large amount of methane carbon into the ocean-atmosphere system.

$\delta^{13}\text{C}$ OF MARINE CARBONATES AND GAS HYDRATE INDUCED EVENTS :

Stratigraphic boundary events with mass extinction are often associated with abrupt

受付 : 2003 年 10 月 7 日

* 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻
東京都文京区本郷 7-3-1

negative excursion in $\delta^{13}\text{C}$ of marine carbonates. Extensive depletion in ^{13}C in the shallow oceans had been explained in two ways ; a mass extinction and reduced primary productivity-photosynthesis (Hsu et al., 1985 ; Hsu and McKenzie, 1990) and an oceanic overturning and consequent upwelling of anoxic bottom waters (e.g., Hoffman et al., 1991). Large releases of isotopically light carbon are also interpreted to have come from massive dissociation of gas hydrates (e.g., Dickens et al., 1995 ; Matsumoto, 1995 ; Kennett et al., 2000).

The “Latest Paleocene Thermal Maximum” (LPTM) ca. 55 Ma is a typical example of “gas hydrate induced” boundary event. LPTM was characterized by a 4 to 6°C rise in deep ocean water temperature (Kennett and Scott, 1991), coincided with major extinction of benthic foraminifers (Kaiho, 1994) and negative carbon isotopic excursion ($\Delta\delta^{13}\text{C} = -2$ to -3‰). Early Paleogene was a period of general warmth, and furthermore a sharp temperature increase is recorded within a short interval of ca. 55 Ma. High-resolution isotope records indicate that the main drop and gradual return in $\delta^{13}\text{C}$ spanned less than 10,000 years and 200,000 years, respectively (e.g., Bains et al., 1999). The timing and magnitude of the $\delta^{13}\text{C}$ excursion across LPTM are best explained by gas hydrate hypothesis. General increase of bottom waters, probably caused by recorded igneous activities, finally triggered thermal dissociation of marine gas hydrates and release of large amount of ^{13}C -depleted methane to the ocean (e.g., Matsumoto, 1995 ; Dickens et al., 1995). Assuming that the total amount and the $\delta^{13}\text{C}$ of gas hydrate carbon were 10,000 Gt and -65‰ , respectively, the temperature increase by 5°C should correspond to the release and injection of $\sim 2,000$ Gt carbon to the ocean, which, in turn, cause an abrupt drop in $\delta^{13}\text{C}$ by $2\sim 3\text{‰}$.

The similar gas hydrate hypothesis have been proposed for a number of OAEs and boundary events such as the early Aptian anoxic event (Jahren et al., 2001), Toarcian anoxic event (Hesselbo et al., 2000), Upper Devonian (Frasnian-Fammenian) event (Matsumoto et al., 2002), and Proterozoic cap carbonates (Kennedy, 2001). Pliocene-Pleistocene boundary event is possibly related with massive dissociation of gas hydrate as suggested by methane induced carbonate sediments (Matsumoto et al., 2002).

RELEASE AND TRANSFER OF GAS HYDRATE METHANE :

It is not reasonable to assume that a huge amount of gas hydrate methane was released within a short period. The shift of the stability zone of gas hydrate is likely to cause a moderate release of methane. The mechanisms to transfer methane from gas hydrates out of the sediments and upwards into the ocean and atmosphere had not been well documented.

Submersible dives and high resolution seismic surveys including 3D and DTAGS have demonstrated methane seep related, ocean floor manifestations such as gas ventings and plumes, pockmarks, mud volcanoes, chemosynthetic communities, methane-induced carbonate crusts and chimneys, and even ocean floor gas hydrates. These phenomena are often related with subsurface gas “plumes” or faults and fractures. Slope failures and slumping were observed in an outer ridge zone of the Nankai Trough, showing that a series of normal faults are constricted to BSRs. This finding suggests that the dissociation of gas hydrates at the base of gas hydrate stability zone was responsible for slope instability and landslides. Cold seep sites have been observed along the traces of the

faults and thrusts. Chemical and isotopic signatures of vent fluids seem to indicate a genetic relation with subsurface gas hydrates.

Detailed imaging of the collapse structure on the crest of the Blake Ridge (Dillon et al., 2001) clearly depicts the close relation with BSR-BGHS (base of gas hydrate stability zone), implying that the blast of gas hydrate and free gas methane caused collapse and release of large amount of gas hydrate methane. Field experiments by means of submersible have exhibited that large pieces of gas hydrates and gas hydrate bearing sediments floated upward and finally reached up to the sea surface because of their lower density ($\sim 0.91 \text{ g/cm}^3$) relative to seawater ($\sim 1.03 \text{ g/cm}^3$) (Paull et al., 2002). Subsurface gas hydrate methane would be effectively transferred to the ocean-atmosphere system through the collapse, faulting, landslide, brecciation, and fracturing. The major methane release should occur at the initial stage of dissociation and the methane release is thought to diminish rapidly.

Key words : carbon cycle, gas hydrate, mass extinction, methane plume, methane seep

1. はじめに

ガスハイドレートとはガス分子と水分子から成る固体物質である。ガスがメタンであるものを特にメタンハイドレートと呼ぶが、自然界ではメタンから成るハイドレートが殆どであるので、しばしばガスハイドレートはメタンハイドレートと同義に用いられる。ガスハイドレートは永久凍土の地下や、シベリアなど寒冷地の天然ガス田からガス消費地へガスを輸送するパイプラインの中などで稀に見られる物資にすぎず、地球科学の分野では殆ど注目されていなかった。しかし1970年代より急速に進展した深海堆積物の調査研究により、海底堆積物中に広く分布することが分かってきた(例えば Shipley et al., 1978, 1979; Matsumoto, 2000; Paull and Matsumoto, 2000)。ガスハイドレートとして地球表層に固定される炭素量は全海洋に溶存する炭素の3分の一にも匹敵する(Kvenvolden, 1988)との見積りがある。メタンが強い還元作用をもち、かつ二酸化炭素の20倍という温室効果をもつことを考慮すると、ガスハイドレートの地球環境への影響がいかに大きいか想像できる。ガスハイドレートの分解は海底堆積物を不安定化させ巨大地滑りの引き金となり、陸棚から斜面、深海底への堆積物の運搬過程としても重要である。

堆積岩成因論、堆積環境論として発展してきた堆積学は、21世紀に入り、地球表層環境の進化と変動への関心の高まりと、地球規模の環境問題に対する社会の強い関心に呼応して、地球環境変動論へと重

心を移しつつある。このような中で、堆積学がその使命を果たすには、環境変動要因として強いインパクトを持つガスハイドレートへの理解が不可欠である。本稿は2003年4月27日、日本堆積学会発足記念シンポジウムにおける講演に基づき、堆積学におけるガスハイドレート科学を展望したものである。

2. ガスハイドレートとは

Fig. 1 にメタンハイドレートの結晶構造模型をしめす。青丸は酸素原子、緑の大きな丸がメタン分子である。水分子が水素結合により他の水分子と結合し、立体ケージ構造を作り、その中にメタン分子が一つ取り込まれているのが分かる。図に示すのは単位胞(ユニットセル)で、全てのケージがメタン分

Fig. 1 Crystal structure of structure-I gas hydrate.

子で充填された理想的なメタンガスハイドレートでは、水分子46個とメタン分子8個がユニットセルを作ることが分かる。これから理想化学式は

と書くことができる。メタンハイドレートの密度は 0.91 g/cm^3 (Sloan, 1989) であるので、メタンハイドレート自体の体積の160倍ほどのメタンが取り込まれると計算される。

Fig. 2に、メタンハイドレートが生成される温度・圧力条件を海洋環境で生成した場合の水深と水温の関係でしめす。メタンハイドレートは一般に低温・高压で安定で、Fig. 2では相境界の太線の左下が安定領域となる。例えば水温 5°C では50気圧(水深500 m)以上、水深2,000 m (200気圧)では温度は 18°C 以下が生成条件となる。このような温度圧力は深海底堆積物や永久凍土域ではごく普通の条件であり、実際に天然ではこのような場所にハイドレートが分布している。A点は水深2,500 mの海底で、水温を 3°C 、地温勾配を100 mで 3°C と仮定すると、地層温度は実線のように上昇し、海底から約600 mでメタンハイドレートの相境界線と交叉する。つまり海底から深度600 mまでがメタンハイドレートが安定に存在する領域であり、この深度を安定領域基底 (BGHS; Base of Gas Hydrate Stability) と呼ぶ。

Fig. 3 Aはカナダ・マッケンジーデルタの永久凍土の下から、Bはバンクーバー島沖のカスカディア収束帯の堆積物中から回収されたガスハイドレートの写真である (ODP Leg204/Tomaru)。Aのように砂や礫の間隙を充填して生成することが多いが、Bのように泥やシルトの中に粒状に成長することもある。海水はメタンに未飽和であるため、温度圧力が条件を満たしていても普通、海底ではハイドレートはできない。しかし、カスカディアでは海底から活発にメタンを含む湧水が立ち上がっているため、底層水のメタン濃度が高くなり海底メタンハイドレートが生成した。

Fig. 4に南海トラフから回収されたメタンハイドレート中のガスの組成と同位体組成をしめす。ガスハイドレートのガスは殆どがメタンでエタンやプロパンは非常に少ないことが分かる。また、メタンの炭素同位体組成は -60‰ と著しく低い。いずれの証拠もハイドレートのガスは生物分解ガスであることを示唆する。これに対して、1,500 mより深いところ

Fig. 2 Stability condition of methane hydrate.

Fig. 3 A and B Gas hydrate in conglomerate and siltstone of the Hydrate Ridge, Cascadia margin, off Vancouver.

ろで回収されたガス (カッティングス・ガス) には熱起源の特徴が見られる。海洋のガスハイドレートは生物起源ガスから成るものが多いが、メキシコ湾の岩塩ドームにともなうガスハイドレート (Sassen and MacDonald, 1994; Ginsburg et al., 1992; Ginsburg and Soloviev, 1998; Sassen et al., 2000) やカスピ海 (Ginsburg et al., 1992)、黒海などの泥火

山に伴うガスハイドレートには熱分解起源のものもある。

3. ガスハイドレートの分布と存在量

Fig. 5 が示すのは西大西洋ブレークリッジの海上地震探査記録である (Shipley et al., 1979)。地層による反斜面を横切って海底面にはほぼ平行の強い反斜面が見られる。波形解析によるとこの反斜面で位相が反転していることが分かる。この反斜面はハイドレート化した“凍結”した堆積物と、ガスを含む堆積物の境界に対応しており、BSR (Bottom Simulating Reflector; 海底疑似反斜面) と呼ばれる。BSR は Fig. 2 の安定領域の基底に対応する。

Fig. 6 は日本周辺海域の BSR 分布 (佐藤/JNOC-HP) である。これまでに南海トラフの四国沖および東海沖、北海道・奥尻島でガスハイドレートが回収

Fig. 4 Gas composition and carbon isotopic composition of methane of gases from the Nankai Trough.

Fig. 5 Seismograph of the Blake Ridge, western Atlantic (Shipley et al., 1978).

されている。

Fig. 7 に世界のガスハイドレート分布をしめす (Kvenvolden, 2000; 佐藤/JNOC-HP)。赤は実際にハイドレートが回収された場所、黄色は BSR の分布から存在が推定されているもの、○印は海洋や湖のガスハイドレート、□印は陸上 (永久凍土域など) のハイドレートである。本図は 2000 年までの報告に基づくが、近年さらに多くの場所から報告がある。図から、大陸縁辺に分布が集中していることから分かるように、海洋のガスハイドレートは大陸棚下部から大陸斜面にかけて広く分布している。

このようにガスハイドレートは地球上に広く分布することが分かっているが、堆積物中の集積度、ハイドレート集積層の厚さが分かっているところは少ないので、全存在量についての見積もりには 2 桁もの幅がある (Kvenvolden, 2000)。詳細に調べられた海域や永久凍土域の見積もりから類推すると、全地球でガスハイドレートとして固定されているメタンは、炭素に換算して 10,000 ギガトンほどと推定される (Kvenvolden, 1988)。Fig. 8 は地球表層における炭素の生物地球化学的サイクルにガスハイドレートを加えたものである。ハイドレートの炭素量は海洋の炭素の 3 分の一に達し、大気二酸化炭素の 20 倍ほどである。このように膨大な量の炭素が地球表層圏に広く分布することから、ガスハイドレートが地球環境と堆積過程に密接に関係してくる事が容易に想像されよう。

4. ガスハイドレートの分解と巨大海底地滑り

海洋のガスハイドレートは水温-地層温度の上昇や圧力の減少によって分解する。Fig. 9 は Fig. 2 の状態から、海水の温度が 2℃ 上昇し、それに伴い地層温度も 2℃ 上昇した状態を示す。温度上昇により BGHS は約 100 m 浅くなりガスハイドレートの安定領域が薄くなることが分かる。一方、Fig. 10 は海水準の上昇による圧力減少の効果を示す。海面が 150 m 低くなると堆積物中の温度直線は全体に 150 m 上へシフトし、相境界線と交叉する深度も浅くなる。相境界線が傾いている効果で BGHS は 200 m ほど浅くなるため、海水準の低下がガスハイドレート安定領域を約 50 m 浅化させることが分かる。このように、水温上昇や海水準の低下により海洋のガスハイドレートが分解することが分かる。

Fig. 11 はこれらを模式的に描いたもので、海水準が高い、あるいは水温が低い時のガスハイドレ-

Fig. 6 Distribution of BSR around Japan islands (Satoh/JNOC-home page, 2003).

Worldwide distribution of natural gas hydrates

Fig. 7 World distribution of BSR and gas hydrates (Satoh/JNOC-home page, 2003).

Fig. 8 Biogeochemical carbon cycle in the shallow geosphere.

Fig. 9 Temperature variation and gas hydrate stability.

ト安定領域を実線で、海水準が低下し、あるいは水温が上昇した時の安定領域を破線で示す。実線から破線への安定領域の縮小により、浅海部へ向かうウェッジ状の部分のガスハイドレートが分解する。分解により堆積物は液状化し、大量のガスが発生して海底から湧出する。海底斜面では液状化層がスラブ状に広く発達することになり、この面を滑走面とする大規模な地滑りが起こる事が予想される。

Fig. 12 は南海トラフの東海沖、海溝へ落ち込む斜面で得られた地震探査記録である（東海沖海底活断層研究会，1999）。海底からの深度 400 m 付近の

Fig. 10 Sea-level change and gas hydrate stability.

Fig. 11 Stability of gas hydrate deposits in the outer shelf-slope environments ("Active ocean floor faults off Tokai", 1995).

BSR=BGHS に向かって斜面と同じ傾きの断層が3枚認められる。これらはいずれも BSR に吸収されるように発達しており、断層に囲まれたブロックは斜面方向に回転し僅かに滑落していることが分かる。これら小断層活動とガスハイドレート安定領域帯のブロック化は、BSR に沿った地滑りに関係あると考えられる。ノルウェーからアイスランドに向かう世界最大の海底地滑りストリッガスライド (Bondevik et al., 2003), アマゾン河口の巨大地滑り, 北米東岸沖の巨大地滑り (Popenoe et al., 1993) な

Fig. 12 Faulting and block movements of the slope sediments off Tokai.

ども,このようなメカニズムで起きたと考えられる.

5. 地球環境の変動要因として

Fig. 13 はガスハイドレート安定領域の基底付近でのガスハイドレートの分解が海洋へ大量のメタンガスを放出する様子を模式的に示したものである (Kvenvolden, 1994). 分解したハイドレートからメタンガスが気泡となって海中を上昇する (ガスプリューム). Paull ら (2002) はモンテレー湾で潜水艇を用いた実験観察を行い, 海底の崩壊によって解放されたガスハイドレート結晶が, 海水中を浮上し容易に海面に達することを証明した (Fig. 14). ガスハイドレートの分解によって海底堆積物が崩壊するとガスハイドレート+堆積物の混合物がガスハイドレートの浮力 (比重=0.91) によって水中を浮上, 大きなハイドレートブロックは海面にまで達して分解する. このようにしてガスハイドレート起源のメタンが大気メタン濃度を効果的に高めるため, さらなる温度上昇とハイドレート分解を引き起こすフィードバックリンクが駆動する.

Fig. 15 は沖縄石垣島の南方の水深約 600m の黒島海丘で観察されているメタン・プリュームである (戸丸ほか, 2001; Takeuchi et al., 2001). 海丘上にはシロウリガイの死骸群集や, メタン酸化に伴って生成した炭酸塩 “チムニー” が広く分布する (Fig. 16). 南海トラフの第二渥美海丘にもシロウリガイ巨大死骸群集がある. 黒島海丘や第二渥美海丘の大規模なシロウリガイ群集は, かつてこれらの海底か

Fig. 13 Schematic diagram of the slope failure caused by dissociation of gas hydrates (Kvenvolden, 2000).

ら広範囲にメタンが湧出していたことを示し, 炭酸塩の同位体組成から, メタンがガスハイドレートの分解に由来することが示唆されている (Takeuchi et al., 2001). メタンの炭素同位体組成は-60~-90‰ PDB なので (Fig. 4, Fig. 8) メタンの湧出と海水中での酸化が起こると海洋の溶存炭素の同位体組成が大きく負にシフトする. 溶存炭素の同位体組成の変動は, 海水から沈澱した炭酸塩鉱物に記録されるので, 海成炭酸塩の炭素同位体層序からメタン湧出イベント, ガスハイドレート分解イベントを抽出することができる.

Fig. 14 Buoyant motion of hydrate-bearing sediments (Paull et al., 2002).

Fig. 15 Methane plume on a Kuroshima Knoll off Ishigaki Island (Jamstec/Matsumoto, 2000).

Fig. 16 Dolomite Chimney on the Kuroshima Knoll (Jamstec/Matsumoto, 2000).

Fig. 17 Carbon isotopic excursion at the Late Paleocene (Dickens et al., 1995).

Fig. 17 は、暁新世末期に汎世界的に認められる海洋の炭素同位体組成の負異常イベントである。大平洋や大西洋の掘削試料中から抽出した浮遊性有孔虫の殻の炭素同位体組成は、55.5 Ma 付近で急激に（おそらく < 5000 年：Dickens et al., 1995） -3‰ 程度シフトし、20 万年ほどかけてもとに戻る。この時、酸素同位体も同時に負にシフトしており、海水が 5°C 程度上昇したと推定される。またこのタイミングで底性有孔虫の 25% が絶滅している（Kaiho et al., 1996）。このような劇的な変動は、海洋のガスハイドレートが大量に分解したために引き起こされたと考えられている（松本, 1995）。

Fig. 18 は、ガスハイドレートの分解がついには

生物の大量絶滅を伴う劇的変動に至る過程を示したものである。ここではトリガーとして大規模な火山活動が想定されている。正のフィードバックリンクを考えると、始めはごく少しのハイドレートの分解が最終的には非常に大きな変動をひき起こしたと考えられる。

Fig. 19 は白亜紀前期 (Jahren et al., 2001) およびジュラ紀前期 (Hesselbo et al., 2000) に見られる炭素同位体の負のイベントである。どちらの時代も黒色頁岩が発達し貧酸素的環境が卓越したと推定されている。これらの時期の急激な負異常も海洋のガスハイドレートの大量分解に関係あると考えられている。

6. ま と め

ガスハイドレートは地球表層環境の進化と変動に大きな役割を果たしてきたと考えられる。しかしガスハイドレート自体は分解し消滅してしまうため、いつどのような変動に関わってきたか知ることは簡単ではない。ガスハイドレートの地質過程への関与を知り評価するには、現在の海底で観察されるガスハイドレートに関連した現象を詳細に観察・計測・

Fig. 18 Simplified process of gas hydrate-induced global event.

Fig. 20 Gas hydrate derived methane flare in the permafrost (from the JNOC-web site, 2003).

Fig. 19 Carbon isotopic excursion in the Cretaceous (Jahren et al., 2001) and Jurassic (Hesselbo et al., 2000).

にされつつあり、地球史のなかでのハイドレートの役割が次第に明確になってきた。

文 献

- Bains, S., Corfield, R.M. and Norris, R.D., 1999 : Mechanisms of climate warming at the end of the Paleocene, *Science*, **285**, 724-727.
- Bondevik, S., Mangerud, J., Dawson, S., Dawson, A. and Lohne, O., 2003 : Record-breaking height for 8000-year-old Tsunami in the North Atlantic. *EOS*, **84**.
- Dickens, G., O'Neil, J.R. and Rea, D.K., 1995 : Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon isotope excursion at the end of the Paleocene. *Paleoceanography*, **10**, 965-971.
- Dickens, G.R. et al., 1997 : A blast of gas in the latest Paleocene : simulating first order effect of massive dissociation of oceanic methane hydrate. *Geology*, **25**, 259-262.
- Dillon, W.P., Nealson, J.W. and Taylor, M.H., 2001 : Seafloor Collapse and Methane Venting Associated with Gas Hydrate on the Blake Ridge- Cause and Implications to Seafloor Stability and Methane Release. *Natural Gas Hydrates*, 211-233.
- Ginsburg, G.D., Guseynov, R.A., Dadashev, A.A., Ivanova, G.A., Kazantsev, S.A., Solovyev, V.A., Telepnev, E.V., Askari-Nasirov, R. Ye, Yesikov, A.D., Maltseva, V.I., Mashirov, Yu. G. and Shabayeva, I. Tu., 1992 : Gas hydrates of the Southern Caspian. *Int. Geol. Rev.*, **34**, 765-782.
- Ginsburg, G.D. and Soloviev, V.A., 1998 : *Submarine gas hydrates*, VNIIOkeangeologia, St. Petersburg, 216 pp.
- Hesselbo, S.P., Grocke, D.R. and Jenkyns, H.C., 2000 : Massive dissociation of gas hydrate during a Jurassic oceanic anoxic event. *Nature*, **406**, 392-395.
- Hoffmann, A., Gruszczynski, M. and Malkowski, K., 1991 : On the interrelationship between temporal trends in $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$, and $\delta^{34}\text{S}$ in the world ocean. *Jour. Geol.*, **99**, 355-370.
- Hsu, K.J., Oberhansli, H., Gao, J.Y., Shu, S., Haihong, C. and Krahenbuhl, U., 1985 : 'Strangelove ocean' before the Cambrian explosion. *Nature*, **316**, 809-811.
- Hsu, K.J. and McKenzie, J., 1990 : Carbon-isotope anomalies at era boundaries ; Global catastrophes and their ultimate cause. In Sharpton, V.L. and Ward, P.D., eds., *Global catastrophes in Earth history*, Geol. Soc. Amer., Spec. Pap., no. 2247, 61-70.
- Jahren, A.H., Arens, N.C. and Sarmiento, G., 2001 : Terrestrial record of methane hydrate dissociation in the Early Cretaceous. *Geology*, **29**, 159-162.
- Kaiho, K., 1994 : Benthic foraminiferal dissolved-oxygen index and dissolved-oxygen levels in the modern ocean. *Geology*, **22**, 719-722.
- Kaiho, K., Arinobu, T., Ishiwatari, R., Okada, H., Kajiwar, Y., Matsumoto, R. and Niitsuma, N., 1996 : Latest Paleocene benthic foraminiferal extinction and environmental changes at Tawanui, New Zealand. *Paleoceanography*, **11**, 447-465.
- Kennedy, M.J., Christie-Blick, N. and Sohl, L.E., 2001 : Are proterozoic cap carbonates and isotopic excursions a record of gas hydrate destabilization following Earth's coldest intervals? *Geology*, **29**, 443-446.
- Kennet, J.P., Cannariato, K.G., Hendy, I.L. and Behl, R.J., 2000 : Carbon isotope evidence for methane hydrate instability during Quaternary Interstadials, *Science*, **288**, 128-133.
- Kvenvolden, K.A., 1994 : Natural gas hydrate occurrence and issues. *Annals N.-Y. Acad. Sci.*, no. 715, 232-246.
- Kvenvolden, K.A., 1988 : Methane hydrate - a major reservoir of carbon in the shallow geosphere? *Chem. Geol.* **71**, 41-51.
- Kvenvolden, K.A., 2000 : Gas hydrate and humans. *Annals N.-Y. Acad. Sci.*, no. 912, 17-22.
- Kvenvolden, K.A., Ginsburg, G.D. and Soloviev, V.A., 1993 : Worldwide Distribution of Subaquatic Gas Hydrates. *Geo-Marine Letters*, **13**, 32-40.
- Lancelot, Y. and Ewing, J.I., 1972 : Correlation of natural gas zonation from the Northwest Atlantic. *Initial Reports. DSDP*, **11**, 791-799.
- 松本 良, 1995, 炭酸塩の炭素同位体組成異常の要因と新しいパラダイム「ガスハイドレート仮説」. 地質学雑誌, **101**, 902-924.
- Matsumoto, R., Uchida, T., Waseda, A., Uchida, T., Takeya, S., Hirano, T., Yamada, K., Maeda, Y. and Okui, T., 2000 : Occurrence, structure and composition of natural gas hydrate recovered from the Blake Ridge, Northwest Atlantic. *Proc. ODP, Sci. Results*, **164**, 13-28.
- Matsumoto, R., 2000 : Exploration for gas hydrate deposits offshore Japan Islands. *Abst., AAPG Meeting*, Bali, Indonesia.
- Matsumoto, R., Hosein Mahmudy Gharaie, M. and Kakuwa, Y., 2002 : Was the Late Devonian Mass Extinction Caused by Massive Dissociation of Gas Hydrate? *Proceedings of the Fourth International Conference on Gas Hydrates, Yokohama, May 19-23*, 75-79.
- Matsumoto, R., 2002 : Comparison of Marine Permafrost Gas Hydrates : Examples from Nankai Trough and Mackenzie Delta. *Proceedings of the Fourth International Conference on Gas Hydrates, Yokohama, May 19-23*, 1-6.
- Matsumoto, R., Hailong, Lu and Tomaru, H., Distribution and occurrence of gas hydrates in Nankai Trough. *Resource Geology*. (in press)
- Paull, C. and Matsumoto, R., 2000 : *Proc. ODP, Sci. Results*, **164**. College Station TX (Ocena Drilling Program), 459 pp.
- Paull, C.K., Brewer, P.G., Ussler III, W., Peltzer, E. T., Rehder, G. and Clague, D., 2002 : Evaluation of Marine Slumping as a Mechanism to Transfer Methane from Seafloor Gas Hydrate Deposits into the Upper Ocean and Atmosphere,

- Proceedings of the Fourth International Conference on Gas Hydrates, Yokohama, May 19-23.*
- Popenoe, P., Schumuck, E.A. and Dillon, W.P., 1993 : The Cape Fear Landslide : Slope failure associated with salt diapirism and gas hydrate decomposition. *U.S. Geol. Surv. Bull.*, 2002, 40-53.
- Sassen, R. and MacDonald, I.R., 1994 : Evidence of structure H hydrate, Gulf of Mexico continental slope. *Org. Geochem.*, **22**, 1029-1032.
- Sassen, R., Sweet, S.T., Milkov, A.V., DeFreitas, D.A. and Mahlon, C., 2000 : Stability of Thermogenic Gas Hydrate in the Gulf of Mexico : Constraints on Models of Climate Change. In Paull, C. and Dillon, W.P. eds, *Natural Gas Hydrates-occurrence, distribution, and detection*, Geoph. Monograph Ser. 124, AGU, 131-143.
- Shipley, T.H., Buffler, R.T. and Watkins, J.S., 1978 : Seismic stratigraphy and geologic history of Blake Plateau and adjacent western North Atlantic continental margin. *Am. Assoc. Pet. Geol., Bull.*, **62**, 792-812.
- Shipley, T.H., Houston, M.H., Buffler, R.T., Shaub, F.J., McMillen, K.J., Ladd, J.W. and Worzel, J.L., 1979 : Seismic reflection evidence for the widespread occurrence of possible gas hydrate horizons on continental slopes and rises. *Am. Assoc. Petrol. Geol., Bull.*, **63**, 2204-2213.
- Sloan, E.D., 1989 : *Clathrate hydrates of natural gases*. Marcel Dekker, Inc., New York and Basel, 641 pp.
- Takeuchi, R., Machiyama, H. and Matsumoto, R., 2001 : The formation process of the cold seep carbonates at the Kuroshima Knoll. *JAMSTEC J. Deep Sea Res.*, no. 19, 61-75.
- 東海沖海底活断層研究会編, 1999 : 「東海沖の海底活断層」, 東京大学出版会, 151 pp.
- Tomaru, H., Matsumoto, R., Machiyama, H., Iwase, R. and Takeuchi, R., 2001 : Geochemistry of Cold Seep and International Water in Kuroshima Knoll. *JAMSTEC J. Deep Sea Res.*, no. 19, 1-7.
- 戸丸 仁・松本 良・町山栄章・岩瀬良一・武内里香, 2001 : 黒島海丘の冷湧水と堆積物間隙水の化学組成, *JAMSTEC 深海研究*, no. 19, 1-8.

堆積学におけるガスハイドレート科学の展望 —地球環境科学へのパラダイム—

松本 良, 2004, 堆積学研究, No. 58, 45—56
 Matsumoto, R., 2004 : A prospect of gas hydrate science in sedimentology
 —Paradigm for understanding of the earth environments—
Jour. Sed. Soc. Japan, No. 58, 45—56

メタンガスと水とからなる氷状固体物質ガスハイドレートは、地球表層における巨大炭素シンクとして、地球環境の変動に強い影響を与えていると考えられる。炭酸塩堆積物に記録された海洋の溶存炭素の同位体組成変動から、海洋無酸素事件や生物の大量絶滅はガスハイドレート分解によって引き起こされたと指摘される。最近、深海底でのガスハイドレート分解が大気海洋系に効率的にメタンを供給する仕組みは潜水艇を用いた実験で明らかにされた。いっぽう、ガスハイドレートの分解が大陸斜面堆積物を不安定にし、大規模な地滑りが起きた例も多数報告されている。いま、堆積学はグローバルな地球環境科学へとその重心を移しつつあり、環境変動要因として強いインパクトをもつガスハイドレートへの理解は不可欠である。