

## 南海トラフ付加体内部から表層堆積物へのメタン供給

土岐知弘<sup>1</sup> 蒲生俊敬<sup>1</sup> 山中寿朗<sup>2</sup> 石橋純一郎<sup>3</sup> 角皆 潤<sup>1</sup> 松林 修<sup>4</sup>

Tomohiro TOKI, Toshitaka GAMO, Toshiro YAMANAKA, Jun-ichiro ISHIBASHI, Urumu TSUNOGAI and Osamu MATSUBAYASHI (2001) Methane migration from the Nankai Trough accretionary prism. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 52 (1), p. 1-8, 7 figs., 2 tables.

**Abstract** : Several major dissolved constituents and properties (pH, alkalinity, Ca, Cl, K, Mg, Na, Si (OH)<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>, SO<sub>4</sub>, CH<sub>4</sub>, and  $\delta^{13}\text{C}$ ) were measured for interstitial waters retrieved from surface sediments of the Nankai Trough accretionary prism during the NGH99 cruise (1999. 9. 14~9. 29). Detailed depth profiles of chemical components associated with early diagenesis indicate that sulfate reduction rapidly occurs to consume all sulfate within the upper 2 meters of the sediment column at one of five stations. It is suggested that the upward migration of methane plays an important role as a carbon source in addition to the sedimentary organic matter derived from the water column above. Based on the stable carbon isotope ratio of methane in the pore fluid ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} \leq -70\text{‰}$ ), methane is thought to be biogenic through bacterial CO<sub>2</sub> reduction. Various sulfate distributions suggest a localized CH<sub>4</sub> supply from deeper zones.

### 要 旨

NGH99 航海 (1999. 9. 14~9. 29) において, 四国南東沖南海トラフ付加体の先端部付近から海底下 4~8 m の堆積物コア 5 本を採取した. コアサンプル中の間隙水を船上で直ちに抽出, 各種の化学成分濃度を測定した. 一部のコアサンプルにおいては海底下約 2 m で硫酸イオンがほぼ消費し尽くされており, 硫酸還元反応による有機物の酸化が著しい速さで進行している. 海洋生物起源の有機物の分解だけでは説明のできない過剰の全炭酸が生成しており, 地下からのメタンが硫酸還元反応に大きく寄与していることがわかった. メタンの炭素同位体比が  $-70\text{‰ PDB}$  と非常に軽いことから, その起源は海底下数 100 m 以内でバクテリアによって生成されたものと考えられる. また, 硫酸イオン濃度の減少の割合が測点毎に大きく異なっていたことから, 海底下からのメタン供給は局所的な変動が大きいと考えられる.

### 1. はじめに

日本列島の南に位置する南海トラフでは (第 1 図), フィリピン海プレートが北北西方向に年間数 cm のスピードでユーラシアプレートの下側に沈み込んでいる (Ranken *et al.*, 1984; Seno, 1977). 沈み込むプレートは, 厚さ約 1.3 km の堆積物で覆われているが, プレートの沈み込みにもなって, 上部約 1 km の堆積物は沈み込まずにプレートからはぎとられ, 日本列島側に次々と押しつけられ付加体を形成している (平, 1990; 芦ほか, 1990). 付加体堆積物では沈み込むフィリピン海プレートから絶えず圧縮力が加わっているため, 大地震のような地殻変動が頻繁に起こり, 多数の逆断層が形成される (Nasu *et al.*, 1982; Aoki *et al.*, 1983; Moore *et al.*, 1990). 圧縮された堆積物からは, 堆積物中の間隙水が絞り出され, いわゆる冷湧水として海底から湧き出している (Yamano *et al.*, 1984; Kinoshita and Yamano, 1986).

冷湧水は, もとをたどれば海底堆積物中にしみこんだ海水であるが, 堆積物中で起こる有機物の続成過程により生じる炭化水素や栄養塩に富むことが知られている (Kulm *et al.*, 1986; Suess *et al.*, 1985; Paull *et al.*, 1984; Kennicutt II *et al.*, 1985). 炭化水素を含む水が海底直下まで到達すると, 表層堆積物中で起こっている海洋生物起源の有機物による硫酸還元反応に組み込まれるので (第 2 図) (Reeburgh, 1976; Barnes and Gold-

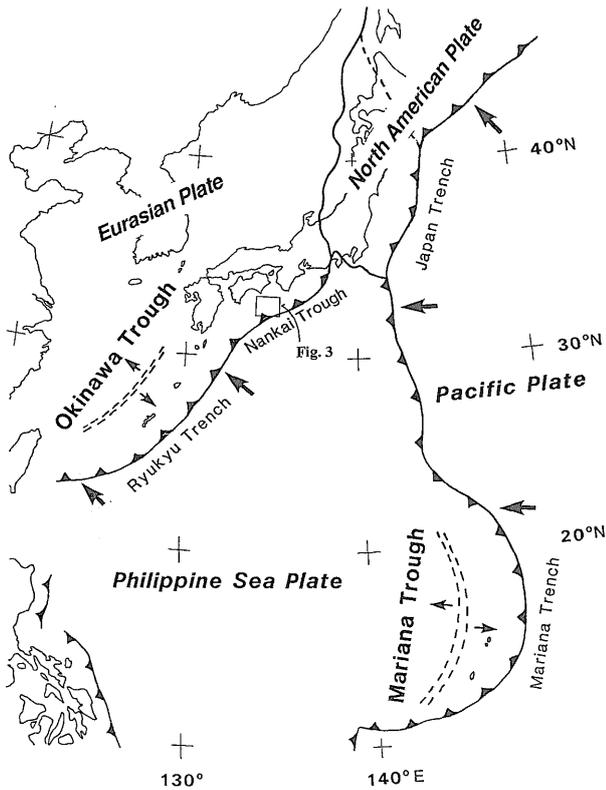
Keywords: methane, Nankai Trough accretionary prism, sulfate reduction, methane hydrate, diagenesis

<sup>1</sup> 北海道大学大学院理学研究科 (Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, N10 W8, Sapporo, 060-0810 Japan)

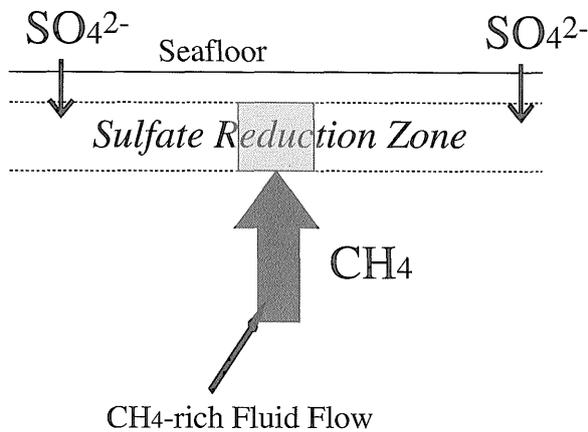
<sup>2</sup> 筑波大学地球科学系 (Institute of Geoscience, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, 305-8571 Japan)

<sup>3</sup> 九州大学大学院理学研究科 (Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, 33 Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Fukuoka, 812-8581 Japan)

<sup>4</sup> 地質調査所資源エネルギー地質部 (Mineral and Fuel Resources Department, GSJ)



第1図 日本周辺のプレート運動の概要と南海トラフ沈み込み帯の位置. 南海トラフではフィリピン海プレートがユーラシアプレートの下に沈み込んでいる(蒲生, 1999).  
 Fig. 1 Plate motions around the Japanese Islands and the location of the Nankai Trough subduction zone. The Nankai Trough is an active plate margin where the Philippine Sea plate subducts under the Eurasian plate (Gamo, 1999).



**Sulfate Reduction**

- 1)  $(\text{CH}_2\text{O})_{106}(\text{NH}_3)_{16} + 53\text{SO}_4^{2-} \rightarrow 106\text{HCO}_3^- + 16\text{NH}_3 + 53\text{H}_2\text{S}$
- 2)  $\text{CH}_4 + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O}$

berg, 1976), 硫酸イオン(海水起源)の減少がその分促進されると考えられる. したがって硫酸イオンの減少の程度を見ることによって, 付加体深部からの炭化水素の供給の度合いを推定できる可能性がある. Gamo *et al.* (1993) は, 1990年に室戸岬南方の南海トラフで実施された ODP 131 航海の 808 掘削孔(32°21.17'N, 134°56.66'E)より採取した海底堆積物から抽出した間隙水の化学組成分析に基づき, 海底下わずか6m以内で硫酸還元反応が終了していることを見出し, 深部より供給されたメタンの影響が大きいことを指摘している.

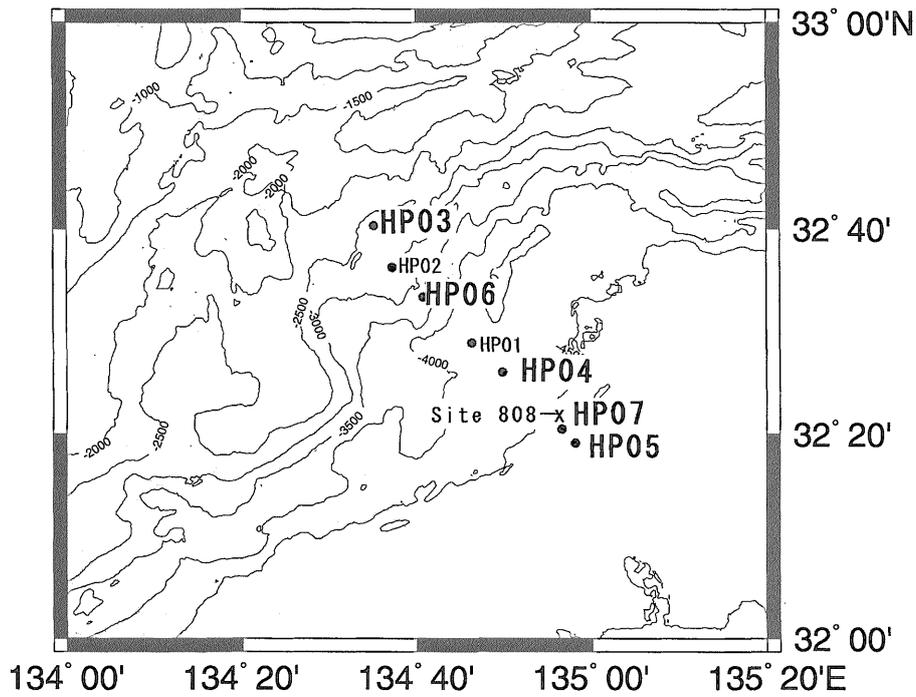
南海トラフ付加体斜面の海底下には, 天然メタンハイドレートの存在を示唆するBSR(海底疑似反射面)が反射法地震探査によって観測されており(Ashi and Taira, 1993), 表層堆積物中へのメタン供給の程度を知ることは, メタンハイドレートの存在の実態や, 分布の様子, 及び生成過程を解明してゆく上で地球化学的に大きな意義がある. 本稿では, ODP掘削点(808)周辺の海域で新たに採取した堆積物サンプルから抽出した間隙水の化学組成分析に基づき, 南海トラフ付加体堆積物に固有の有機物初期続成過程について, またそれに対してメタンがどのような関わりを持っているかについてまとめた.

**2. サンプリングと分析方法**

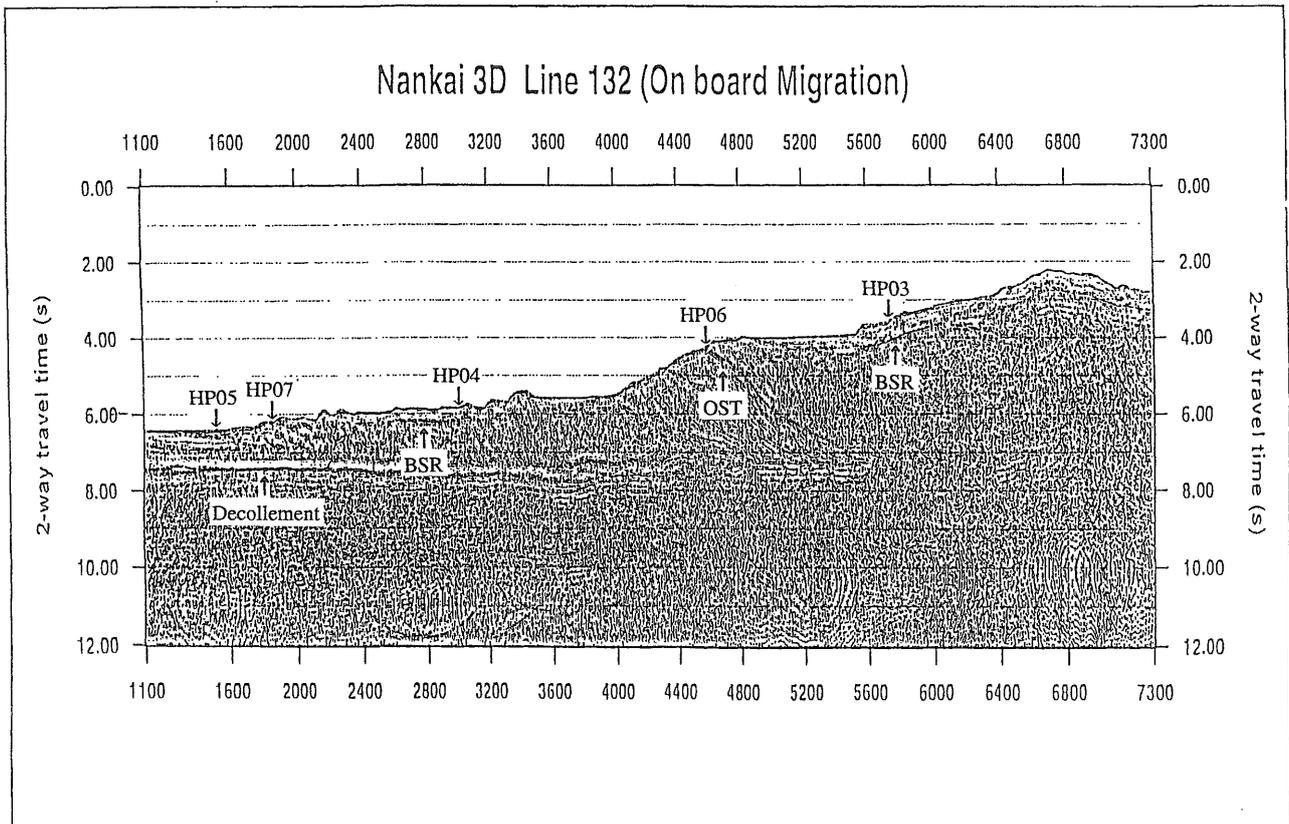
NGH99航海(1999.9.14~9.29, 主席研究員:松林修)では, 第3図に示した5つの測点において, 南海トラフのトラフ底から室戸岬方面に向かう付加体斜面上の表層堆積物を, 長さ4~8mのピストンコーラーを用いて採取した. この海域ではモーリス・ユーイング号が三次元地震波探査を行っている(第4図;倉本ほか, 2000). コアサンプルは, 揚収後船上で直ちに半割し, 約50cm毎に10cmずつ堆積物をくり抜き, 専用のステンレス装置を用い間隙水を抽出した(Manheim and Sayles, 1974). 得られた間隙水サンプルは, pHとアルカリ度を船上で測定し, 陸上分析のためにポリビンに封入し冷蔵保存して持ち帰った. 東京大学海洋研究所にお

第2図 海底堆積物表層における硫酸還元反応. メタンの供給されている場所では, 海洋生物起源の有機物による硫酸還元反応(1)に加えてメタンが還元剤として作用する硫酸還元反応(2)が起こり, 硫酸イオンの減少を促進する(蒲生, 1999).

Fig. 2 Sulfate reduction in a subsurface sediment. A methane-rich fluid flow, which induces sulfate reduction oxidizing methane (2) in addition to sedimentary organic matter (1), accelerates sulfate consumption (Gamo, 1999).



第3図 NGH99航海による測点 (HP03~07) と ODP Leg 131航海 808 孔の位置。  
 Fig. 3 Locations of the sampling stations of the NGH99 cruise (HP03~07) and Site 808 of the ODP Leg 131.



第4図 モーリス・ユウイング号による3次元地震波探査記録 (倉本ほか, 2000).  
 Fig. 4 Seismic reflection profile by R/V Maurice Ewing cruise. (Kuramoto *et al.*, 2000).

いて、蒲生&ギースケス(1992)に示された手法に従いアンモニアとシリカを比色法によって、また主要化学成分(Ca, Cl, K, Mg, Na, 及びSO<sub>4</sub>)をイオンクロマトグラフィーによって測定した。また、ガス測定用のサンプルは褐色のバイアル瓶に保存して持ち帰り、東京工業大学と北海道大学においてTsunogai *et al.* (1998)に示された手法により同位体比質量分析計(Finnigan MAT 252)を用いてメタン濃度及び炭素同位体比を測定した。炭素同位体比は、常法により

$$\delta^{13}\text{C値}(\delta^{13}\text{C}(\text{‰})) = \left\{ \left( \frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}}{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}} \right)_{\text{CH}_4} / \left( \frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}}{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}} \right)_{\text{PDB標準}} - 1 \right\} \times 1,000$$

で表示した。第1表に各化学成分ごとに分析方法と精度についてまとめた。

### 3. コアサンプル記載と採取した場所

各コアを採取した場所については、第2表にまとめた。以下、各測点ごとに採取されたサンプルの特徴を示す。なお、詳細な記載については別途報告される予定である。

#### (1) HP03

5本のコアのうちで最も付加体の上部、水深2,730mの場所から採取した。地震探査の結果(第4図)によると海底面下400mのところにBSR(bottom-simulating reflector)が見られる。外観上ひび割れなどは見られず、硫化水素臭もしなかった。長さ2m 63cmのサンプルが

第1表 間隙水中の各化学成分の測定方法と精度。

Table 1 Analytical methods for the measurement of chemical components in the pore waters.

Element	Method	Precision
pH	glass electrode	0.2 %
Alkalinity	potentiometric titration	1.2 %
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	spectrophotometry of phenol blue	7.5 %
Si(OH) <sub>4</sub>	spectrophotometry of silicomolybdate complex	1 %
Na <sup>+</sup>	ion chromatography	3 %
K <sup>+</sup>	ion chromatography	7 %
Mg <sup>2+</sup>	ion chromatography	6 %
Ca <sup>2+</sup>	ion chromatography	10 %
Cl <sup>-</sup>	ion chromatography	2 %
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	ion chromatography	10 %
CH <sub>4</sub>	irm-GC/MS	5 %
δ <sup>13</sup> C	irm-GC/MS	1 %

第2表 NGH99 航海で各コアサンプルを採取した場所。

Table 2 Locations of core sampling during the NGH99 cruise.

Core	Latitude	Longitude	Depth (m)	Location	BSR
HP03	32° 40.31' N	134° 35.14' E	2,727	Slope	400 mbsf
HP04	32° 26.01' N	134° 49.87' E	4,368	Slope (Terrace)	300 mbsf
HP05	32° 19.12' N	134° 58.12' E	4,799	Trough floor	No
HP06	32° 33.38' N	134° 40.81' E	3,280	OST	No
HP07	32° 20.44' N	134° 56.60' E	4,720	Deformation front	No

回収された。

(2) HP04

このサンプルはセクション毎に切り分けた際に発泡が見られ、堆積物が膨張してチューブからはみだした。また 250 cmbsf (cm below seafloor) 以深の堆積物においてはひび割れが激しく、コアを半割にした際に著しい硫化水素臭がした。粒度の粗い層 (火山灰や砂層) が多く見られる。524 cmbsf に 7 cm ほどのひび割れが、また 630, 640 cmbsf にもひび割れがある。こういったひび割れは、現場で存在していたメタンなどの気体がサンプル回収後に散逸したためと考えられる。採取点の海底地形は水深 4,370 m のテラス状で、海底面下 300 m に BSR が認められる。長さ 7 m 75 cm のサンプルが回収された。

(3) HP05

全体として含水比が高く、比較的粒度の細かい粘土質である。これは採取した場所がトラフ底であることと関連があるのかもしれない。ひび割れはなく、間隙水抽出のために堆積物をくり抜く際に 150 cmbsf 以深において硫化水素臭がした。長さ 3 m 42 cm のサンプルが回収された。

(4) HP06

このコアのみ上部 3 cm には酸化層が残っており、赤茶色を呈していた。77~83 cmbsf に大きな空隙があり、海水が入っていた。しかしそれ以深では全体として緻密なコアであり、コア全体にわたり硫化水素臭はなかった。またコア全体にわたって黒いパッチが点在してお

り、硫化金属の沈殿物である可能性がある。また 350 cmbsf 以深に有孔虫が見られた。468~470 cmbsf には火山灰の層がある。採取した場所は比較的水深の浅い断崖に位置し、地震探査のデータによると海底下に OST (Out-of-Sequence Thrust) が見られる場所である。長さ 7 m 44 cm のサンプルが回収された。

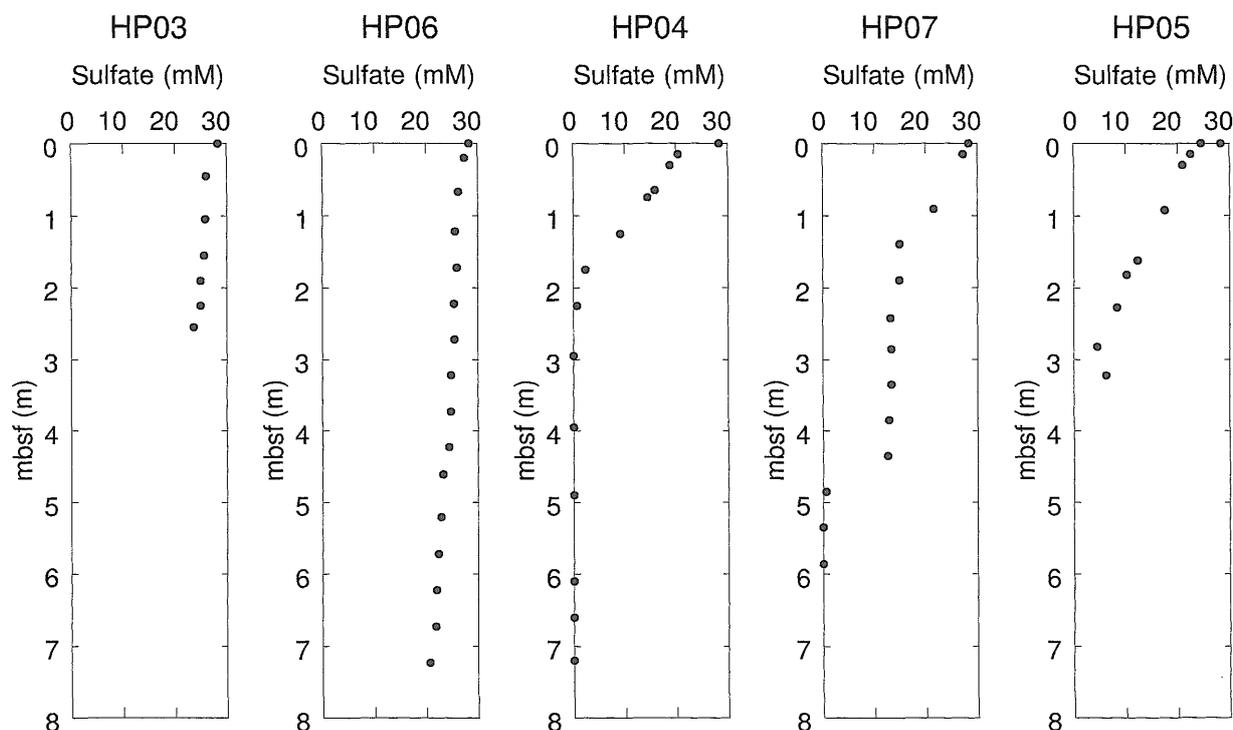
(5) HP07

100 cmbsf までは含水比の高いサンプルであり、ところどころコア採取時に人工的に生じたひび割れが見られる。30 cmbsf 以深では硫化水素臭がした。450 cmbsf 以深になるとひび割れが始まる。硫酸還元層において硫化水素が発生した後、さらに下層でメタンの生成が始まり、堆積物中にメタンが溜まっていたと考えられる。また 510 cmbsf 以深はすべてフローインで、砂のような粒度の粗い堆積物であった。なお 79~96 cmbsf に火山灰層がある。採取した場所はデフォーメーションフロント (変形フロント) 付近でヒートフロープローブによる実測値で最もヒートフローの高い値を示した場所である。長さ 6 m 50 cm (ただしフローイン: 510~650 cmbsf) のサンプルが回収された。

4. 間隙水化学組成分析

(1) 硫酸イオン

硫酸イオン濃度分布を5つの測点で比較して示した (第5図)。硫酸イオンの減少の仕方は場所によって大き



第5図 間隙水中の硫酸イオン濃度の分布。  
Fig. 5 Distributions of sulfate in the pore waters.

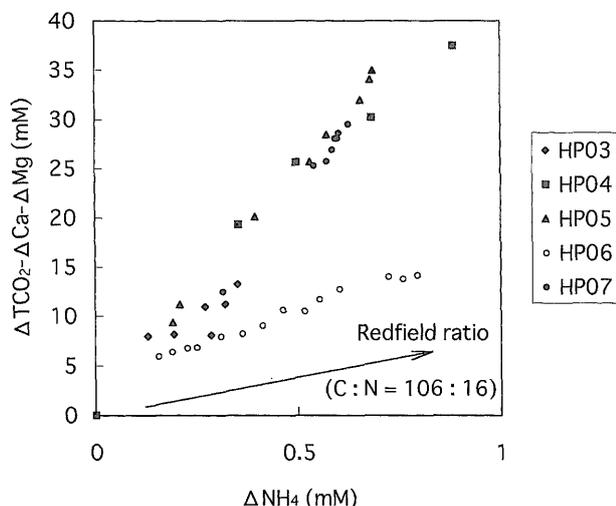
く異なっており、減少が最も著しいのはHP04である。HP04よりも陸側で採取したサンプル(HP03, HP06)では硫酸イオンの減少はわずかしかなく、主として海洋生物起源の有機物の分解のみが起きていると考えられる。一方、デフォーメーションフロントにおいて採取したHP07サンプルでは、硫酸イオンは150 cmbsfまで急激に減少しているがそれ以深においてはほぼ一定の濃度(13 mM)を示している。トラフ底でサンプリングしたHP05に関しては、300 cmbsfにおいて硫酸イオンがほとんど消費し尽くされている。これらの測点の間に沈降してくる有機物の量に大きな違いがあるとは考えにくいので、硫酸イオン濃度の減少の仕方の違いは海底下から供給されるメタン量の多寡に起因すると考えられる。

(2) 全炭酸とアンモニア濃度

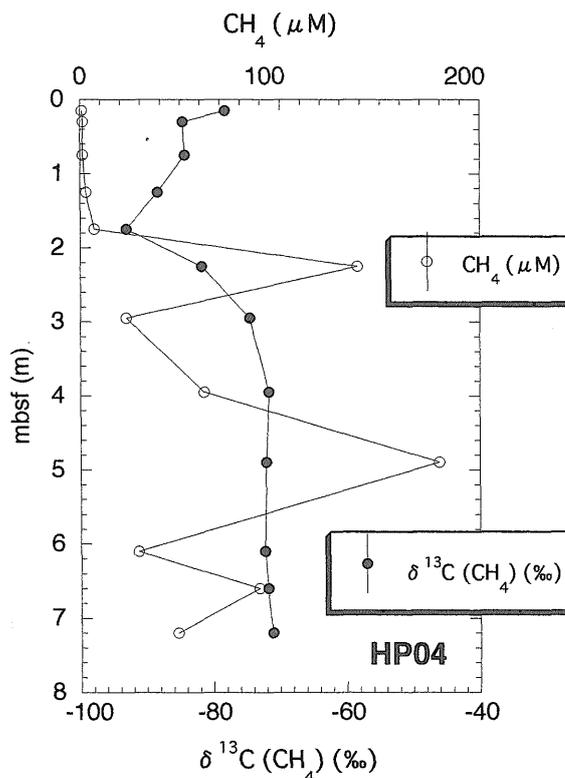
Kulm *et al.* (1986)を参考にして間隙水中の全炭酸とアンモニア濃度をプロットした(第6図)。全炭酸濃度はpHとアルカリ度から計算し、ドロマイト生成で消費された分を補正した。レッドフィールド比(炭素:窒素=106:16)を持った海洋生物起源の有機物の分解(第2図の反応1)だけでは説明のできない過剰の全炭酸が生成していることがわかる。これはアンモニアの生成を伴わない(すなわち窒素を含まない)有機物の酸化によって生成した全炭酸であると考えられる。このような有機物として、海底堆積物中で生成するメタンは有力な候補である(第2図の反応2)。第6図から明らかのように、HP06以外のコアサンプル中では、硫酸還元反応によって酸化されている有機物の大部分がメタンである可能性がある。そこで以下に間隙水中のメタンの分析を行った結果について考察する。

(3) メタンの分布と炭素同位体比

メタン濃度と炭素同位体比を、特に硫酸イオンの減少



第6図 間隙水中の全炭酸/アンモニア生成量比。  
Fig. 6 Relation between  $\Delta \Sigma \text{CO}_2$  and  $\Delta \text{NH}_4^+$  in the pore waters.



第7図 測点HP04における間隙水中のメタン濃度及び炭素同位体比の分布。

Fig. 7 Distribution of the concentrations and  $\delta^{13}\text{C}$  values of dissolved methane in the pore water at HP04.

が著しくみられた測点HP04の間隙水について示した(第7図)。このコアサンプルは、先に述べたように半割りにしたときに数多くのひび割れが見られ、強い硫化水素臭があったことからメタンもかなり発泡して抜けてしまったと考えられる。したがってメタン濃度は脱ガスの程度によって大きくばらついており、その絶対値は現場でのメタン濃度の下限値と見なすべきである。それでもなお、一般に深層海水中で観測されるメタン濃度に比べると10万倍に達する高濃度のメタンが堆積物中に存在していることは確かである。脱ガスが炭素同位体比に与える影響は小さいと考えられる。第7図に示したように、メタンの炭素同位体比は約-70‰以下と軽いことから、主として細菌起源のメタンと考えられる。メタンの生成は硫酸イオンが十分消費し尽くされた2 m付近で始まっていると思われる(Claypool and Kaplan, 1974)。

5. 考察

硫酸還元反応が最も顕著なHP04コアサンプルについてさらに考察を進める。間隙水中の主要成分の鉛直プロフィールからは、海底下からの活発な流体の上昇を示唆する徴候は認められない。しかし硫酸還元ゾーンの直下

で始まる細菌によるメタン生成反応で大量のメタンが発生し、その一部が硫酸還元ゾーンに拡散によってしみ出すことによって、硫酸還元反応を促進させていると考えられる。このことは硫酸イオンが消費し尽くされる2 mよりもやや浅い深度で最も軽い炭素同位体比(-95%)のメタンが検出されていることから示唆される。Gamo *et al.* (1993) は、ODP 131 航海 808 孔 (第3図) の硫酸還元ゾーン内において、全炭酸の $\delta^{13}\text{C}$  値が海洋生物起源の有機物よりも軽いことから、全炭酸の一部は軽い同位体比をもつメタンの酸化によって生成されると指摘している。硫酸還元ゾーンにおいて炭素同位体比が徐々に表層に近づくにつれて重くなってゆくこと (第7図) は、メタンの酸化による同位体分別効果によるものと考えられる。一方、メタン生成ゾーンにおいて深さとともにメタンの炭素同位体比はより重い方向(-70%)へシフトしてゆく (第7図)。このことは細菌が二酸化炭素を還元してメタンを生成する際の細菌の同位体分別効果、すなわち細菌は軽い二酸化炭素を優先的に還元してゆくために重い二酸化炭素が徐々に残留してゆき、生成するメタンも徐々に重くなってゆく効果のためと考えられる。

堆積物中に蓄積されるメタンは、Berner and Faber (1993) によれば 808 孔の深度 26.80 mbsf で 3,492 ng/g (nanogram gas per gram wet sediment) に達する高濃度のプールを形成している。Gieskes *et al.* (1993) の報告にある間隙水中の塩化物イオンの約 120 mbsf に見られる減少は、これらの蓄積したメタン由来のハイドレートの分解に起因している可能性がある。

このようにメタンは硫酸還元ゾーン直下から蓄積し始め、ODP 131-808 孔においては約 1,000 mbsf まで細菌起源のメタンが分布している (Berner and Faber, 1993)。物理的条件の整った数 100 mbsf までは、メタンハイドレートが形成しうる。この物理的条件の境界に BSR が見られることが多い。ただ、メタンハイドレートを形成しない場合でもメタンは海底下に大量に存在していると考えられる。

## 6. おわりに

今後は硫酸還元反応の地域的な違いについて海底の断層や褶曲といった大きな地殻構造との関連に留意しながら、さらにサンプル数を増やすことによって詳しい調査を継続してゆく必要がある。また堆積物中で起こっている反応について様々なモデルを使い、付加体深部から表層堆積物へのメタンの供給について定量的な評価を行うことで、南海トラフ付加体内部におけるメタンハイドレートの実態の究明をさらに進める。

謝辞 NGH99 航海において林 努, 木下正高, 山野

誠, 多田井修, 江南亮他乗船研究者の皆様にも数多くの便宜をはかっていただいた。第五海工丸の船長はじめ乗組員の皆様には観測作業でたいへんお世話になった。イオンクロマトグラフィーの使用にあたっては、植松光夫, 笹川基樹, 太田一岳各氏の御協力をいただいた。また、査読者の方々には、本稿の改良に関して有益なコメントをいただいた。これらの方々にも心より感謝の意を表す。

## 文 献

- Aoki, Y., Tamano, T. and Kato, S. (1983) Detailed structure of the Nankai Trough from migrated seismic sections. *American Association of Petroleum Geology Memoir*, **34**, 309-322.
- 芦寿一郎・徐 桓・木下正高 (1990) プレート沈み込み境界における付加体の発達. *科学*, **60**, 638-644.
- Ashi, J. and Taira, A. (1993) Thermal structure of the Nankai accretionary prism as inferred from the distribution of gas hydrate BSRs. *Geol. Soc. Amr. Special Paper*, **273**, 137-149.
- Barnes, R.O. and Goldberg, E.D. (1976) Methane production and consumption in anoxic marine sediments. *Geology*, **4**, 297-300.
- Berner, U. and Faber, E. (1993) Light hydrocarbons in sediments of the Nankai accretionary prism (Leg 131, site 808). *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **131**, 185-195.
- Claypool, G.E. and Kaplan, I.R. (1974) The origin and distribution of methane in marine sediments. In: Kaplan I.R. (Ed.), *Natural Gases in Marine Sediments*. Plenum, New York, N.Y., 99-139.
- 蒲生俊敬 (1999) 深海底から地球深部を探る—南海トラフにおけるメタンガスの湧出現象. *石油技術協会誌*, **64**, 173-183.
- 蒲生俊敬・ヨリス ギースケス (1992) 国際深海掘削計画 (ODP) 第 131 航海における堆積物間隙水の船上化学分析. *地球化学*, **26**, 1-15.
- Gamo, T., Kastner, M., Berner, U. and Gieskes, J. (1993) Carbon isotope ratio of total inorganic carbon in pore waters associated with diagenesis of organic material at Site 808, Nankai Trough. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **131**, 159-163.

- Kennicutt II, M.C., Brooks, J.M., Bidigare, R.R., Fay, R.R., Wade, T.L. and McDonald, T.J. (1985) Vent-type taxa in a hydrocarbon seep region on the Louisiana slope. *Nature*, **317**, 351-353.
- Kinoshita, H. and Yamano, M. (1986) The heat flow anomaly in the Nankai Trough area. *In*: Kagami, H., Karig, D.E. and others (Eds.), *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., **87**, 737-743.
- Kulm, L.D., Suess, E., Moore, J.C., Carson, B., Lewis, B.T., Ritger, S.D., Kadko, D.C., Thornburg, T.M., Embley, R.W., Rugh, W.D., Massoth, G.J., Langseth, M.G., Cochrane, G.R. and Scamman, R.L. (1986) Oregon subduction zone: venting, fauna, and carbonates. *Science*, **231**, 561-566.
- 倉本 真一, 平 朝彦, Bangs, N.L., Shipley, T.H., Moore, G.F. and EW99-07, 08 航海乗船研究者 (2000) 南海トラフ付加体の地震発生帯—日米 3D 調査概要—. *地学雑誌*, **109**, 531-539.
- Manheim, F.T. and Sayles, F.L. (1974) Composition and origin of interstitial waters of marine sediments based on deep sea drill cores. *In*: Goldberg, E.D. (Ed.), *The Sea*, **5**, Wiley, New York, N.Y., 527-568.
- Moore, G.F., Shipley, T.H., Stoffa, P.L., Karig, D.E., Taira, A., Kumamoto, S., Tokuyama, H. and Suehiro, K. (1990) Structure of the Nankai Trough accretionary zone from multichannel seismic reflection data. *Journal of Geophysical Research*, **95**, 8753-8765.
- Nasu, N. and 17 others (1982) Multi-channel seismic reflection data across Nankai Trough. IPOD-Japan Basic Data Series No. 4, Ocean Research Institute, University of Tokyo, Tokyo, Japan.
- Ranken, B., Cardwell, R.K. and Karig, D.E. (1984) Kinematics of the Philippine Sea Plate. *Tectonics*, **3**, 555-575.
- Reeburgh, W.S. (1976) Methane consumption in Cariaco Trench waters and sediments. *Earth and Planetary Sci. Letters*, **28**, 337-344.
- Paull, C.K., Hecker, B., Commeau, R., Freeman-Lynde, R.P., Neumann, C., Corso, W.P., Golubic, S., Hook, J.E., Sikes, E. and Curray, J. (1984) Biological communities at the Florida Escarpment resemble hydrothermal vent taxa. *Science*, **226**, 965-967.
- Seno, T. (1977) The instantaneous rotation vector of the Philippine Sea Plate relative to the Eurasian Plate. *Tectonophysics*, **42**, 209-226.
- Suess, E., Carson, B., Ritger, S.D., Moore, Jones, M.L., Kulm, L.D. and Cochrane, G.R. (1985) Biological communities at vent sites along the subduction zone off Oregon. *Bulletin Biology Society of Washington*, **6**, 475-484.
- 平 朝彦 (1990) 日本列島の誕生. 岩波新書.
- Tsunogai, U., Ishibashi, J., Wakita, H. and Gamo, T. (1998) Methane-rich plumes in Suruga Trough (Japan) and their carbon isotopic characterization. *Earth and Planetary Sci. Letters*, **160**, 97-105.
- Yamano, M., Honda, S. and Uyeda, S. (1984) Nankai Trough: A hot trench?. *Marine Geophysical Researches*, **6**, 187-203.

(受付: 2000年10月17日; 受理: 2001年1月10日)