

マヌス海盆デスマス海穴のマグマ性海底熱水活動の 地球化学的研究

石橋純一郎*1 山中 寿朗*2 岡村 慶*3 蒲生 俊敬*3
ジャンリュック・シャルー*4 千葉 仁*2 下島 公紀*5
高橋 弘樹*1
BIOACCESS 航海乗船研究者

マヌス背弧海盆の海底熱水活動の研究を目的として、「しんかい6500」及び「しんかい2000」の潜航調査が行われた。なかでも東マヌス海盆のデスマス海穴の海底熱水活動は、マグマ性の物質が高温のまま直接取り込まれて強酸性の熱水が生成されるというユニークな特徴をもったものである。このシステムは陸上では“高イオウ型浅熱水系”として研究されているもので、鉱床生成の可能性や特異な生態系を形成する可能性をはじめとして地球化学的研究の対象として非常に興味深い。

キーワード：マヌス海盆，デスマス海穴，海底熱水活動，マグマ起源物質，高イオウ型浅熱水系

Geochemical studies of magmatic hydrothermal activity in the DESMOS Cauldron, Manus back arc basin

Jun-ichiro ISHIBASHI*6 Toshiro YAMANAKA*7 Kei OKAMURA*8
Toshitaka GAMO*8 Jean-Luc CHARLOU*9 Hitoshi CHIBA*7
Kiminori SHITASHIMA*10 Hiroki TAKAHASHI*6
Shipboard Scientific Party of Bioaccess Cruise

Two dive missions, ManusFlux Cruise of “Shinkai 6500” in 1995 and Bioaccess Cruise of “Shinkai 2000”, were conducted to study hydrothermal fields in the Manus back arc basin, PNG. Hydrothermal activity in the DESMOS cauldron in the East Manus Basin was revealed

-
- * 1 東京大学理学部
 - * 2 九州大学理学部
 - * 3 東京大学海洋研究所
 - * 4 フランス国立海洋開発研究所
 - * 5 電力中央研究所
 - * 6 Faculty of Science, University of Tokyo
 - * 7 Faculty of Science, Kyushu University
 - * 8 Ocean Research Institute, University of Tokyo
 - * 9 IFREMER/Centre de Brest
 - * 10 Central Research Institute of Electric Power Industry

as an analogue of "high-sulfidation epithermal system", where magmatic volatile input causes strong acid fluid. This unique fluid geochemistry is interesting from a point of view of potential of hydrothermal ore generation on or beneath the seafloor.

Key words : Manus back-arc basin, DESMOS cauldron, hydrothermal activity, magmatic fluid, high-sulfidation epithermal system

1. はじめに

「しんかい2000」「しんかい6500」をはじめとする諸国の潜水艇及び研究船を用いた調査研究によって、西部・南部太平洋の海域においても多数の海底熱水活動が存在することが明らかにされてきた。これらの熱水活動は島弧・背弧の火山活動に伴うものであり、中央海嶺の熱水活動とは異なる化学的性質を示している。(e.g. Ishibashi and Urabe, 1995)。さらに熱水活動ごとの多様な個性が見られることが多く、それは島弧・背弧の熱水活動ではマグマ性物質の寄与が大きくそのマグマ物質の化学的性質が中央海嶺に比べて多様であることを反映しているものと考えられる。

なかでも東マヌス海盆のデスマス海穴で発見された熱水活動は、マグマから脱ガスした揮発性成分がきわめて高温のうちに海水と混合して反応しているものとして興味深い(蒲生ほか, 1996; Gamo et al., 1997)。この揮発性成分と海水との反応により、海水は加熱されるのみならず化学的性質を大きく変えて強酸性の溶液となる。このようなデスマス海穴の熱水循環システムは、一般の熱水循環システムが海底深部までしみ込みマグマ直上の高温反応帯(>350°C)で岩石と反応した熱水が噴出するというモデルで説明されるのとはかなり異なるものである。むしろ陸上の地熱系で“高イオウ型浅熱水活動”として分類されているものに類似している。我が国では薩摩硫黄島の強酸性温泉水(Shinohara et al., 1993)や恐山の地熱系(Aoki, 1992)などが詳しく研究されている。

このようなマグマ性の熱水活動では、多量のマグマ性物質が熱水循環により海底に運ばれること、さらには海水の化学的性質が突然大きく変化することなどの作用によって、熱水活動に伴う鉱床の生成の可能性が高いと考えられる(e.g. Giggenbach, 1992)。またこうした熱水循環システムでは比較的低温(100-200°C程度)でも非常に酸性が強い熱水が生成されるので、熱水が噴出する環境での微生物や大型生物の活動がこの強酸性の熱水にどのように規制されるのかも興味深い問題である。

本報告では、このデスマス海穴の熱水活動を対象とし

て行われている地球化学的研究のいくつかを紹介する。同じ熱水サイトを対象とした地質学的研究(ゲナほか, 本号)・生物学的研究(太田ほか, 本号)の報告とあわせて参照されたい。

2. 試料の採取方法

1995年10-11月に行われた「しんかい6500」によるManusFlux航海、並びに1996年11月に行われた「しんかい2000」によるBioaccess航海による潜航調査において、地球化学的研究に用いられている試料の採取が行われた。

熱水試料の採取は主に海洋研型ポンプ式採水器(Tsunogai et al., 1994)で行われた。それぞれの成分の保存に適した試料の分配と処理は、採水後直ちに船上実験室で行われた。ManusFlux航海においては船上で主成分組成の分析も行われた。堆積物試料の採取はマニピュレーターで操作するプッシュコアにより行われた。試料は船上で直ちに凍結処理をされ保存された。

3. 熱水試料に溶存する気体成分の同位体比の研究

熱水に溶存しているガス成分は、そのほとんどが熱水系の下部に存在するマグマに由来すると考えられている。言い換えれば熱水試料を採取して溶存ガス成分の分析を行うことで、マグマ物質の化学的性質の情報(特に同位体組成)を引き出すことができる(e.g. Tsunogai et al., 1994)。中でもヘリウムは、極微量成分であるもののマントル物質が地殻物質に比べて非常にヘリウム-3に富むという性質を持つことから、有用な指標化学種として注目されるものである(石橋, 1997)。

ヘリウム同位体比の測定は、高密度ホウ素入りガラス容器に保存した熱水試料を真空抽出して精製した後に高分解能質量分析器で測定した。これとは別に主要ガス成分である二酸化炭素・メタンについては、塩化第二水銀飽和溶液を加えた後にガラスヴァイアル瓶に密栓して保存した試料を、キャリアガスでバブリングして抽出した後にクロマトあるいはガスクロマトグラフで濃度

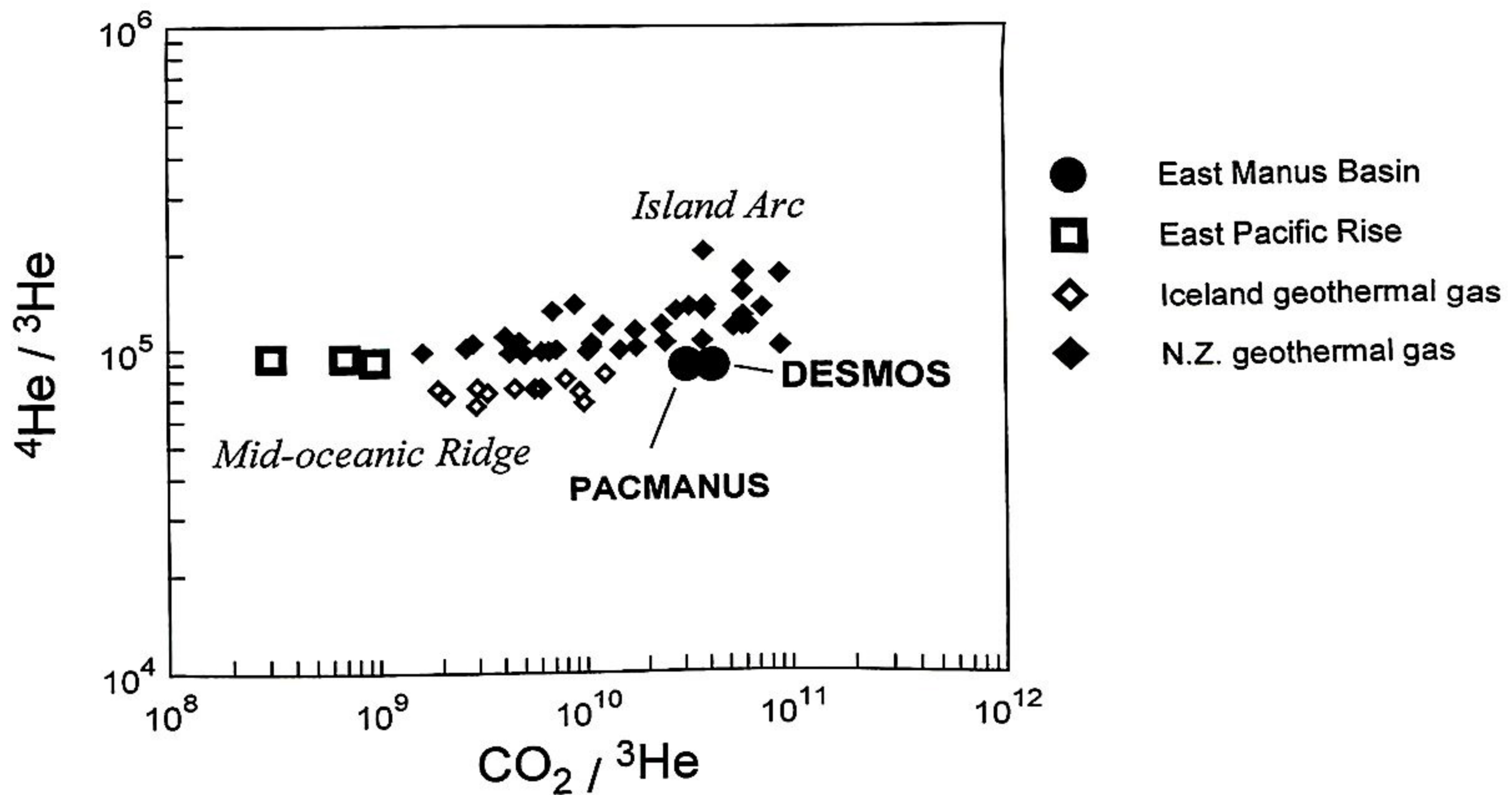


図 1 熱水中の溶存気体成分の $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}/{}^3\text{He}$ ダイアグラム

● : 東マヌス海盆 (Ishibashi et al., 1996), □ : 東太平洋海膨 (Merlivat et al., 1987 ; Craig et al., 1980), ◇ : アイスランド地熱系 (Poreda et al., 1992), ◆ : ニュージーランド地熱系 (Hulston and Lupton, 1996)

Fig. 1 Relationship between $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$ and ${}^4\text{He}/{}^3\text{He}$ of hydrothermal fluids collected from the Manus Basin.

を定量した。

図 1 はマヌス海盆の熱水地帯から採取された試料中の溶存ガス成分について、主要成分である二酸化炭素 (CO_2) とヘリウムの濃度、またその同位体比 (${}^4\text{He}/{}^3\text{He}$) の関係をプロットしたものである。比較として中央海嶺の熱水活動のもの、さらに陸上の地熱系からアイスランド (中央海嶺型) とニュージーランド (島弧型) のデータもあわせてコンパイルした。この図からデスマス海穴熱水系のガス成分とバックマヌス熱水地帯のガス成分は、ともに島弧型に分類される化学的性質を持っていることがわかる。このことは両者のマグマ活動がともに、東マヌス海盆というリフティングの段階にある背弧海盆にあることを反映していると思われる。またこの結果は両者の熱水の化学的特徴が大きく違っていること (蒲生ほか, 1996) と一見相容れないようだが、熱水の化学的特徴を大きく左右しているのはマグマ性物質の性質の違いではなく熱水に溶解する時の条件の違いであるためだと考えることができる。

4. 熱水試料の主要成分化学組成の研究

デスマスサイトの熱水の化学組成は次のようなユニークな特徴を示す。(1) 低温 (100°C 前後) にもかかわらず、pH が非常に低く強い酸性でありアルカリ度も極端

に低い。(2) 硫酸イオン (SO_4) が海水より多く含まれている。一般の熱水では熱水循環の過程で沈殿し海水より失われていると考えられている。(3) 硫化水素・二酸化炭素などのマグマ由来のガス成分に富んでいる。(4) 主成分の多くはそれほど濃度が高くなくむしろ若干減っているものが多い。一般の熱水では Mg と Na 以外の陽イオンは濃度が海水より著しく高くなる。

これらの性質は、マグマ性物質の一つである二酸化イオウ (SO_2) が熱水に溶解し不均化反応により硫酸 (H_2SO_4) と硫化水素 (H_2S) になったとすると説明できる。硫酸は溶液が低温でも高温でも強い酸性を示すし、硫酸の生成はアルカリ度の減少と対応する。さらに熱水中の硫酸イオンと硫化水素のイオウ同位体比もこの反応が起きたことを支持する結果となっている (Gamo et al., 1997)。

図 2 は採取された熱水試料のケイ酸と pH・硫酸イオン濃度をプロットしたものである。熱水は岩石との反応によりケイ酸を取り込むことが知られており、ここでケイ酸濃度は採取された試料中の熱水成分の割合を示していると考えてよい。左の図から熱水の pH が非常に低いことがわかる。

また右の図からは、デスマス海穴の熱水には化学的性質の異なる 2 つのグループがあることがわかる。すな

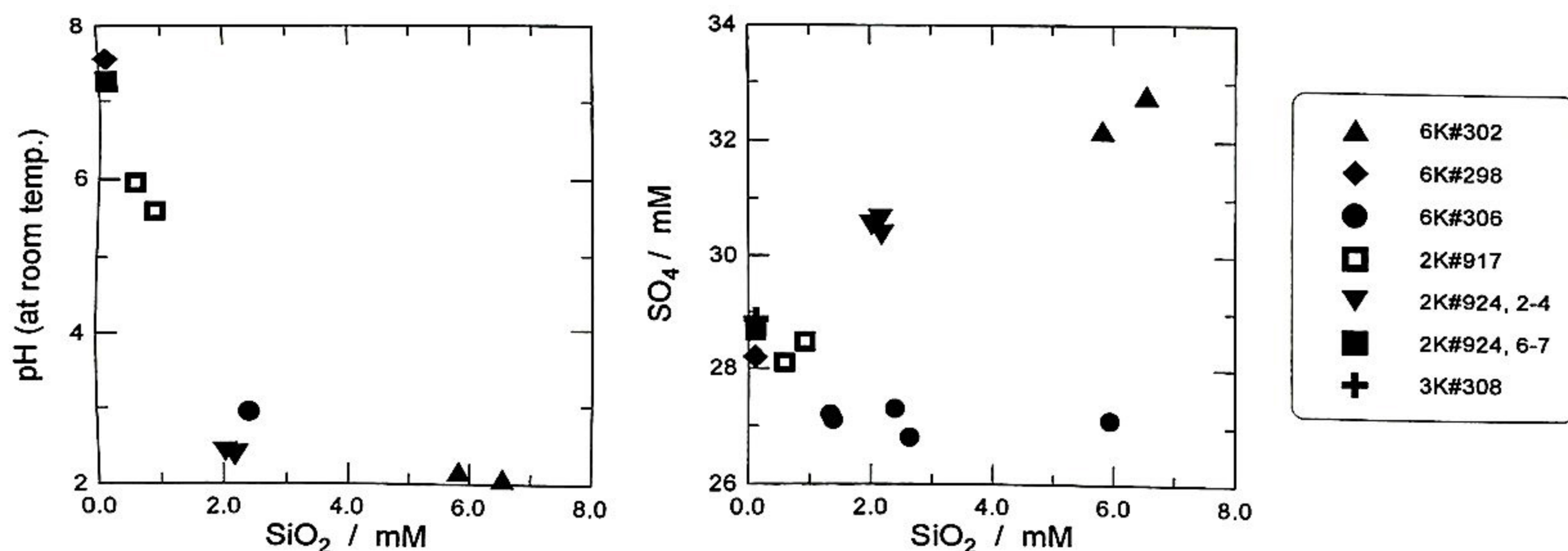


図 2 熱水試料のケイ酸濃度と pH・硫酸イオンとの関係
 Fig. 2 Relationship of pH vs SiO₂ and SO₄ vs SiO₂ of fluid samples collected during from the DESMOS hydrothermal field.

わち熱水地帯の中心にある白濁した熱水を噴出する“White Smoker”から採取された熱水試料（6K#302 と 2K#924, 2-4）だけが、海水より高い硫酸イオン濃度を示している。その他の噴出孔から採取された熱水にこの傾向が見られない理由は、いくつか考えられるが決定的なことは良くわからない。マグマから脱ガスしてきた揮発性成分中の二酸化イオウはその温度の低下とともに失われて硫化水素にかわってしまうことが知られており（Giggenbach, 1992）、高温のマグマ性物質の寄与を強く反映した特徴は熱水地帯の中心部にだけ見られているのかもしれない。

5. 堆積物中の脂肪酸分布の研究

脂肪酸はすべての生物に共通して認められる有機化合物で、細胞膜・エネルギー貯留物質・保護膜の成分である。生物の死骸として堆積したこれらの脂肪酸は、堆積過程でそのほとんどが微生物分解を受けていくが、一部エステル結合により安定な高分子化合物になったものが長期間保存され得る（Fukushima and Ishiwatari, 1988）。脂肪酸の組成分布はそれを代謝した生物に特有なパターンを示すことが知られており、これを利用して堆積有機物からその堆積環境にあった微生物相を推定すること、すなわち脂肪酸のバイオマーカーとしての有用性が注目されている（e.g. Harvey, 1994; 長沼ほか, 1996）。

本研究では、堆積物より有機溶媒を用いて超音波抽出された有機物をアルカリ条件下で加水分解して脂肪酸を分離し、これをガスクロマトグラフ質量分析（GC/MS）法を用いて分析した。

図 3 にデスマス海穴熱水系で発見されたシロウリガ

イ群落周辺で得られた堆積物（第 916 潜航で採取）の脂肪酸分布を示した。まず脂肪酸の全量は 134 μg/g 乾泥で、標準的な海底の脂肪酸濃度として 10~70 μg/g 乾泥という値が報告されている（Harvey, 1994）のとは比べて高くなっている。この結果は、有機物供給源として海水表層の一次生産から沈降してきたものと別に、熱水サイト周辺で一次生産が行われているものが加わっていることを示唆している。

脂肪酸分布からは、デスマス熱水地帯の堆積物にはモノ不飽和脂肪酸が富んでいることがわかる。その定量値は全脂肪酸に対し重量比で 42% を超えている。モノ不飽和脂肪酸は好気性バクテリアに由来することが知られていることから（Findlay et al., 1990）、その活動が堆積有機物の主たる供給者であると推定される。また嫌気性バクテリアからの寄与がさほど大きくないことが、分岐脂肪酸の割合が低いことから示唆される。これらの結果は好気性バクテリアであるイオウ酸化細菌が熱水系における一次生産の大部分を担っていることを反映していると結論づけることができる。つまり、熱水サイトの生態系がプランクトンや陸源の有機物には依存していないという考えを有機地球化学的に証明するものである。さらに個々の脂肪酸や他の有機化合物について詳細に検討することで、起源生物を具体的に推定したり、熱水系の生態系について他のサイトとの比較を行うことを目指している。

謝 辞

潜航調査に際しては、「しんかい 6500」「しんかい 2000」の両潜航チームの皆様、並びに「よこすか」「なつしま」の乗組員の皆様には大変お世話になりました。

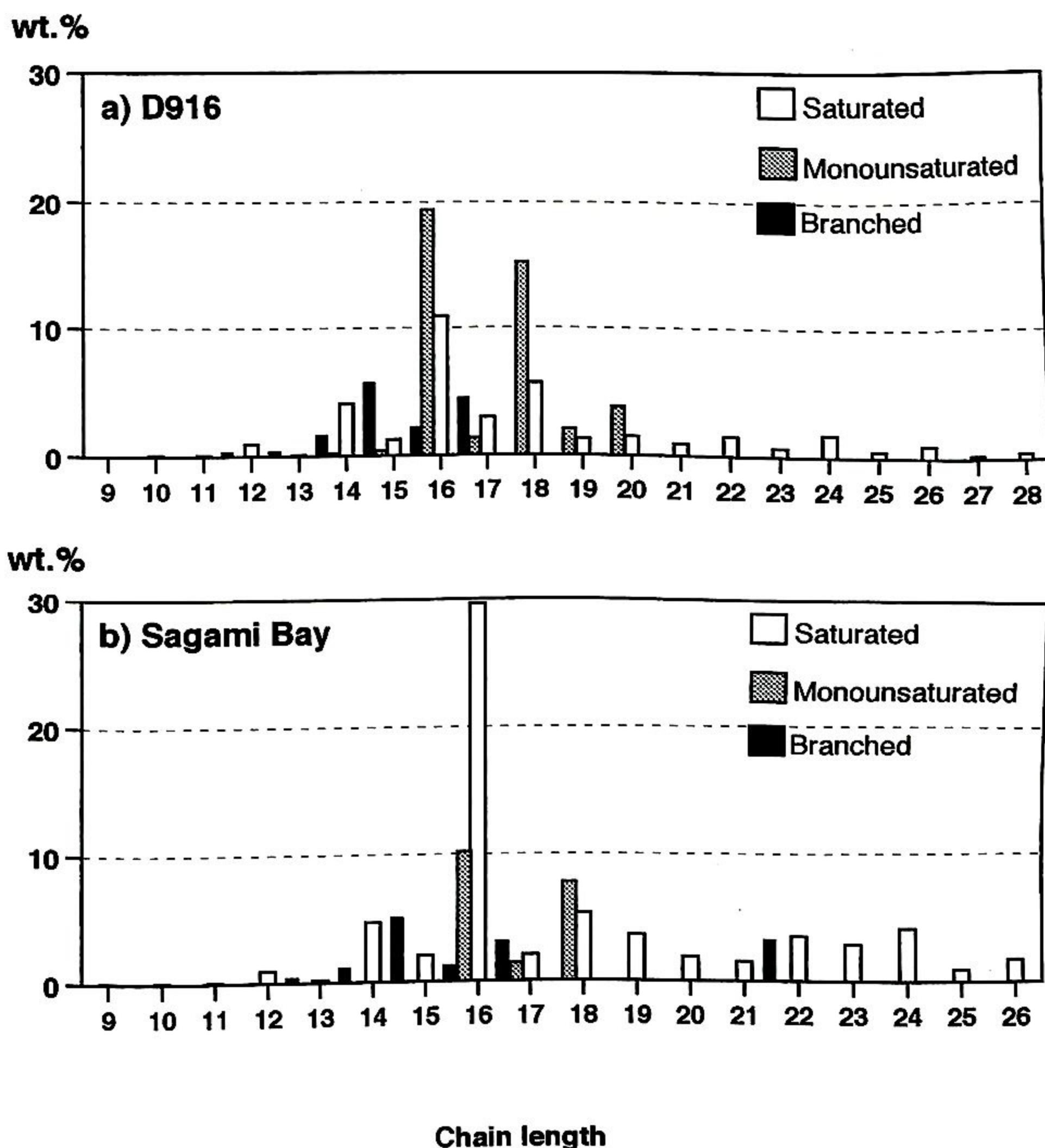


図 3 堆積物中の脂肪酸分布

全脂肪酸に対する各脂肪酸の割合を重量パーセントで表した。横軸の数字は脂肪酸分子の炭素数を表す。a) 第 916 潜航においてシロウリガイ群集周辺の堆積物 b) 東京大学海洋研究所の KF95-1 航海 (1995 年 9 月) において相模湾内 (深度 1,443 m) にて採取された未攪乱柱状堆積物試料 (表層 3 cm) (Yamanaka et al. (投稿中))。標準的な海底堆積物中の脂肪酸分布の一例と考えられる

Fig. 3 Fatty acid composition of sediment. Bars indicate weight % of individual fatty acid relative to total fatty acid concentration. Numbers on x-axis represent carbon chain length. a) sediment in the vicinity of Calyptogena community, collected during Dive 916. b) undisturbed sediment (top 3 cm of the core sample) in Sagami Bay (depth = 1,443 m), collected during KF95-1 cruise of ORI (Yamanaka et al., submitted).

また試料の採取には、ManusFlux 航海並びに Bioaccess 航海の乗船科学者の皆様のご理解とご協力をいただきました。記して深く感謝いたします。

引用文献

Aoki, M. (1992) : Magmatic fluid discharging to the surface from the Osorezan geothermal system, northern Honshu, Japan. Geol. Surv. Japan Report, No. 279, 16-21.

Craig, H., J.A. Welhan, K. Kim, R. Poreda, and J. E. Lupton (1980) : Geochemical studies of the 21°N EPR hydrothermal fluids. EOS, 61 : 992 (abstract).
Findlay, R. H., M. B. Trexler, J. B. Guckert and D. C. White (1990) : Laboratory study of disturbance in marine sediments : response of a microbial community. Mar. Ecol. Prog. Ser., 62, 121-133.
Fukushima, K. and R. Ishiwatari (1988) : Geochemical significance of lipids and lipid-derived substructures.

- tures interlaced in kerogen. *Org. Geochem.*, 12, 509–518.
- 蒲生俊敬・岡村 慶・ジャンリュックシャルー・浦辺徹郎・ジャンマリーオーゼンド・ManusFlux 乗船研究者一同・石橋純一郎・下島公紀・児玉幸雄 (1996) : パプアニューギニア, マヌス海盆における海底熱水活動の化学的探査 (ManusFlux 航海). *JAMSTEC 深海研究*, 12, 335–345.
- Gamo, T., K. Okamura, J.-L. Charlou, T. Urabe, J.-M. Auzende, J. Ishibashi, K. Shitashima, H. Chiba, and Shipboard Scientific Party of the ManusFlux Cruise (1997) : Acidic and sulfate-rich hydrothermal fluids from the Manus back-arc basin, Papua New Guinea. *Geology*, 25, 139–142.
- Giggenbach, W. F. (1992) : Magma degassing and mineral deposition in hydrothermal systems along convergent plate boundaries. *Econ. Geol.*, 87, 1927–1944.
- Harvey, H. R. (1994) : Fatty acids and sterols as source markers of organic matter in sediments of the North Carolina continental slope. *Deep-Sea Res. II*, 41, 783–796.
- Hulston, J. R. and J. E. Lupton (1996) : Helium isotope studies of geothermal fields in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 74, 297–321.
- Ishibashi, J. and T. Urabe (1995) : “Hydrothermal activity related to arc-backarc magmatism in the western Pacific.” pp. 451–495. In : *Backarc Basins : Tectonics and Magmatism*. Edited by B. Taylor, Plenum Press, New York, 524pp.
- Ishibashi, J., H. Wakita, K. Okamura, T. Gamo, K. Shitashima, J.-L. Charlou, J. P. Donval, P. Jean-Baptiste and Shipboard Scientific party of the ManusFlux cruise (1996) : Chemical characteristics of hydrothermal fluids from the Manus back-arc basin, Papua New Guinea, II. Gas components. *EOS*, 77 (22), W116 (abstract).
- 石橋純一郎 (1997) : ヘリウムを指標とする海底熱水系の研究. 号外地球, No. 18, 88–92.
- Merlivat, L., F. Pineau and M. Javoy (1987) : Hydrothermal vent waters at 13° N on the East Pacific Rise : isotopic composition and gas concentration. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 84, 100–108.
- 長沼 毅・藤倉克則・仲 二郎・加藤幸弘・竹内 章 (1996) : 北部奥尻海嶺の開口割れ目域における堆積物脂肪酸—メタン湧水域および海底火山火口域との比較. *JAMSTEC 深海研究*, 12, 83–94.
- Poreda, R. J., H. Craig, S. Arnorsson, and J. A. Welhan (1992) : Helium isotopes in Icelandic geothermal systems I. ^3He , gas chemistry and ^{13}C relations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56, 4221–4228.
- Shinohara, H., W. R. Giggenbach, K. Kazahaya and J. W. Hedenquist (1993) : Geochemistry of volcanic gases and hot springs of Satsuma-Iojima, Japan : Following Matsuo. *Geochem. J.*, 27, 271–285.
- Tsunogai, U., J. Ishibashi, H. Wakita, T. Gamo, K. Watanabe, T. Kajimura, S. Kanayama and H. Sakai (1994) : Peculiar features of Suiyo Seamount hydrothermal fluids, Izu-Bonin Arc : Differences from subaerial volcanism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 126, 289–301
- Yamanaka, T., H. Iino, T. Murae, W. Soh and H. Tokuyama (1997) : Sources of deposits and the distributions of chemical elements and sedimentary lipids in Sagami Bay, Japan. *Geochem. J.* (to be submitted).

(原稿受理 : 1997 年 7 月 10 日)