

「しんかい6500」による南部東太平洋海膨海底熱水活動 の地球化学的研究 (2)

石橋純一郎*1 岡村 慶*2 津旨 大輔*3 中村 光一*4
浦辺 徹郎*4 下島 公紀*3 ケヴィン・ロー*5 ジェームス・コーエン*6
デイヴィッド・バターフィールド*5 蒲生 俊敏*2

リッジフラックス計画の一環として、南部東太平洋海膨への「しんかい6500」の潜航調査が1997年7-9月に行われた。1994年に行われた同海域への潜航調査に引き続いて、様々な地球化学的研究が実施された。今回は、熱水が海底から噴出して海水と混合する段階で起こる種々の化学変化過程についても詳細に研究することで、熱水活動が海洋の地球化学収支に与えるインパクトについてのより多くの情報を得ることに重点が置かれている。高温熱水については、1994年に活発な活動が見られたRM28(18°26'S)を再訪して、この3年間にその化学組成が大きく変動したことを確認した。熱水ブルームの空間分布をあきらかにするためには、リッジフラックス計画によって開発された深海センサー類あるいは現場化学分析計が化学マッピングに活躍した。これらの機器は熱水ブルームの時間変動を見るため長期係留も行っている。さらに海洋中にひろがった熱水ブルームが化学種を海底に除去する過程を追跡する目的で、RM24(17°25'S)熱水地帯を取り囲む4点にセジメントトラップを設置している。こうした空間的パラメーター・時間的パラメーターをカバーした研究成果が出揃うことによって、熱水活動に伴う海洋への物質フラックスについてより確かな評価が可能になることが期待される。

キーワード：南部東太平洋海膨、海底熱水活動の進化、物質フラックス、熱水ブルーム

Geochemical studies of hydrothermal activities along the S-EPR by Shinkai 6500 (2)

Junichiro ISHIBASHI*7 Kei OKAMURA*8 Daisuke TSUMUNE*9
Koichi NAKAMURA*10 Tetsuro URABE*10 Kiminori SHITASHIMA*9
Kevin ROE*11 James P.COWEN*12 David A. BUTTERFIELD*11
Toshitaka GAMO*8

The "SHINKAI 6500" dive mission was conducted at the southern EPR, in July-September 1997, as a part of the RidgeFlux project. We will report geochemical studies during this mission.

- * 1 東京大学理学部
- * 2 東京大学海洋研究所
- * 3 (財)電力中央研究所
- * 4 地質調査所
- * 5 米国大気海洋局
- * 6 ハワイ大学
- * 7 Faculty of Science, University of Tokyo
- * 8 Ocean Research Institute, University of Tokyo
- * 9 Central Research Institute of Electric Power Industry
- * 10 Geological Survey of Japan
- * 11 National Oceanic and Atmospheric Administration, Pacific Marine Environmental Laboratory
- * 12 School of Ocean and Earth Science and Technology, University of Hawaii

Hydrothermal fluid and particles were collected from two ridge segments, to reveal various geochemical processes associated with hydrothermal activity. Diffuse hydrothermal effluents (temperature of 6.5°C and 10.5°C) were sampled from two locations in the Oasis hydrothermal field of RM24 (17°20'S). Particles in the hydrothermal effluent were also collected by in situ filtration for microbiological and biogeochemical studies. At RM28 (18°26'S), vent fluid (measured temp. was 268°C and 306°C, respectively) and particles were sampled from two black smokers. Shipboard analysis combining results of the 1993 Nautilus and 1994 Shinkai studies revealed large changes in the RM28 fluid chemistry from vapor-like to brine-like.

An in situ pH sensor, Eh sensor and an in-situ manganese analyzer (named GAMOS) were developed for the in situ measurement of chemical properties of seawater in the vicinity of the hydrothermally active region. These instruments were attached to the submersible during many dives and successfully collected data from the water column and deepwater above the seafloor. The GAMOS study revealed variations in the ratio of manganese concentration to temperature anomaly, ranging up to over an order of magnitude depending on style of venting in the hydrothermal fields at RM24.

The in situ pH sensor and Eh sensor were deployed at the seafloor for a year-long time-series monitoring experiment. Together with the results of particle flux trap experiments and other geophysical and visual monitoring instruments, their results will provide key information for the estimation of geochemical flux via hydrothermal activities.

Keywords : Southern East Pacific Rise, evolution of hydrothermal systems, geochemical flux through hydrothermal field, geochemical process in hydrothermal plume

1. はじめに

海底熱水活動に伴った様々な化学反応と熱水の大規模な移動は、海洋と地殻の地球化学的収支を考える上で無視することができない現象である。このことは海底熱水活動の発見直後から繰り返し強調されてきたが (Von Damm et al., 1985), その定量的な評価については、まだ議論が定まっていなかったのが現状である (Elderfield and Shultz, 1996; 石橋, 1995)。それは、海底の研究が進むにつれて次々と新しい事実が発見され、それまでの議論の前提とされていた仮定が覆されていくからである。1993年より進められている科学技術振興調整費による「海嶺におけるエネルギー・物質フラックスの解明に関する国際共同研究」(リッジフラックス計画)では、多数の地球化学者が協同してこの課題に挑戦している。

このリッジフラックス計画では、東太平洋海嶺南部 (southern East Pacific Rise; 以下SEPR) を研究対象海域として頻りに航海を行っている。この海域は非常に拡大速度が大きい海嶺軸であり、多くの場所で海洋地殻直下にまでマグマが上昇していることが確認されている。1993年にはメルビル号による広域調査 (Urabe et al., 1995) による広域調査が、1994年には「しんかい6500」による潜

航調査 (Fujioka et al., 1994; 石橋ほか, 1995) が行われた。これらの研究航海では、この超高速拡大軸にマグマ貫入イベント直後の「若い」熱水活動が多数存在していること、さらにそのような「若い」熱水活動における物質フラックスはこれまでに観察されてきた熱水系における物質フラックスとは質的にも量的にも異なるものであることを明らかにしてきた (Feely et al., 1996; Ishibashi et al., 1997; Baker and Urabe, 1996)。これらの研究成果は、中央海嶺における海底拡大やマグマ上昇という地質学的現象がその場で起きる熱水循環に伴う化学的現象や物質フラックスを左右していることを意味している。そうしてみると、地球上で最も活動度が高い海嶺軸の一つであるSEPRは、全地球的な海嶺を通した物質フラックス評価のために最も重要な研究対象海域であるといえるであろう。

1997年7-9月に再び「しんかい6500」を使用して行われた潜航調査は、地球物理的データの長期連続観測を目指した海底への機器設置 (Urabe et al., 1998) が第一目的として行われた。これとあわせて、様々な手法を駆使しての地球化学的研究も多数行われたので以下にその概要を紹介する。

2. 潜航調査を行った海域

「しんかい6500」潜航調査の調査は、主に1994年の潜航調査が行われた海域を再訪するかたちで行われた。前半のレグは15潜航をすべて行うことができたが、後半のレグは9潜航を終わったところで海況が悪化して以降の潜航はすべて中止となった。

RM28 (18°25'S) は、1994年にきわめて活動的な高温熱水噴出が観察された海域であり、断層崖沿いにいくつもの噴出孔が並んでいる。1994年の潜航調査時には噴出孔から広がるブラックスモークにより視界がたびたび遮られるほどで、噴出する熱水の最高温度も374℃に達していた。1997年の潜航調査の際にも同じ噴出孔が観察されたが、見た目でもスモークの勢いは衰えかほそくなっており測定された熱水の温度は300-367℃であった。

RM23 (17°35'S) は、1994年に広く分布した低温熱水噴出が観察された海域である。1997年にはほとんど噴出を視認できなかったため、調査海域をこの北側のRM24 (17°25'S) にまで広げた。RM24では1993年にフランスの潜水艇ノチールによって潜航調査が行われている (Auzende et al., 1996)。オアシスと名付けられた低温噴出地帯と高温噴出孔の密集する地帯がある。

3. 熱水活動の進化と高温熱水化学組成の経時変動

「若い」熱水活動は数年のタイムスケールでその形態を大きく変えていくらしいことが、最近の研究で注目されている (Von Damm et al., 1995)。この熱水活動の進化の一端として、熱水の化学組成が変動することもわかってきた。こうした知見は、研究初期に観測されていた中央海嶺の熱水活動から導き出された常識-熱水活動は

少なくとも10年ぐらいのタイムスケールでは安定している (Campbell et al., 1988) -を覆すものである。この高温熱水化学組成の変動が、SEPRでも観測された。

図1は、RM28熱水地帯のブラックスモーカーから採取された高温熱水の化学組成をプロットしたものである (Butterfield et al., 1997b)。X軸には陰イオンの代表成分であるClを取り、Y軸には溶存気体の代表成分であるH₂Sを取っている。94年の試料と97年の試料を比較すると、後者はH₂S濃度が低くCl濃度が高い。さらにRM24熱水地帯の北側にある「Rehu-Marka」チムニーにおいても、1993年にフランス研究者が採取分析した化学組成 (Charlou et al., 1996) と比較することで全く同様な傾向の熱水化学組成の進化が観測されている。このような熱水化学組成の変動傾向は、他の「若い」熱水活動地帯で観測されている例と一致している (Butterfield et al., 1997a; Von Damm et al., 1997)。すなわちマグマ貫入によって励起された「若い」熱水活動の化学進化という事象がかなり普遍的に起こっているらしい。

なおここで採取された高温熱水試料については、乗船研究者及びその共同研究者によって、多種の無機化学成分、有機化学成分、溶存気体成分について分析が進められている。

4. 熱水噴出地帯直上底層水における熱水ブルームの分布

熱水ブルームは海底から噴出した熱水と海水が混合して生じる水塊である。熱水ブルームは海洋中を広範囲にまで広がり、熱水活動による海洋への物質フラックスを効率的に輸送する手段となっている。しかし熱水ブルームを単に高温熱水が海水によって希釈されたものであると考えたのでは、その物質フラックスをうまく説明できないことがわかってきた (Massoth et al., 1994)。熱水ブルームが担う物質フラックスをより正確に評価するためには、熱水噴出地帯直上での熱水ブルームが生成する過程とその分布を詳細にあきらかにする必要がある。リッジフラックス計画では新しい手法でこれらの問題に対して挑んでいる。前者については、熱水噴出孔に化学種を取り込ませて熱水ブルームによって拡散したものを検出する研究を行った。これについては詳しい報告が別にある (津旨ほか、本号) のでこちらを参考にされたい。後者については、ブルームの化学的性質を海水中で分析・測定できる機器を開発し、空間分解能の高いデータを連続取得して詳細な分布を得ることを目指した。

深海pHセンサーはISFET半導体を利用したものであ

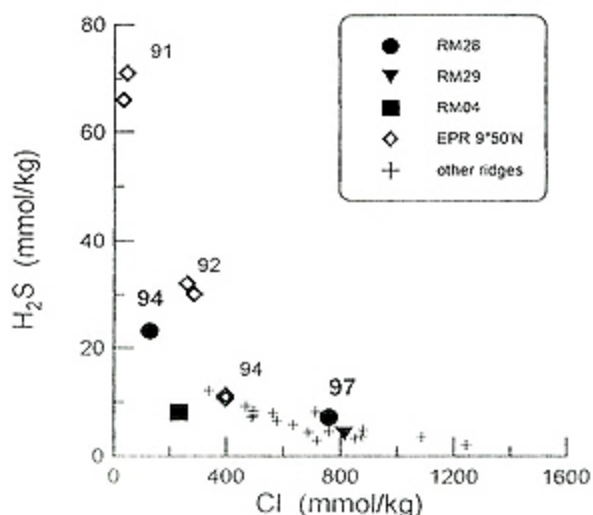
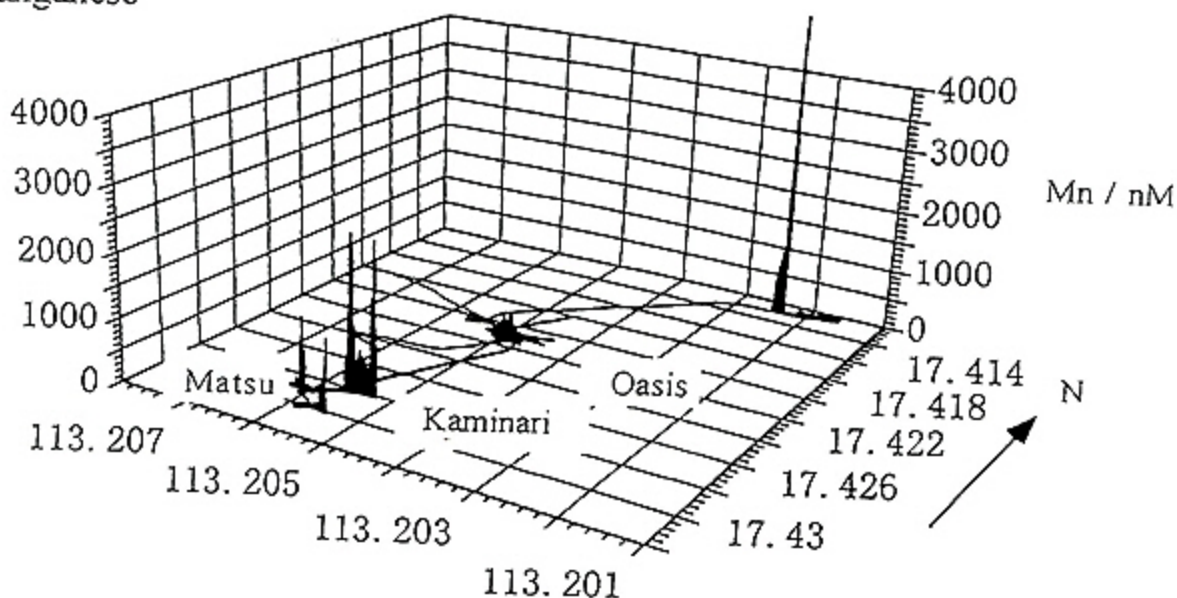


図1 RM28熱水地帯における高温熱水化学組成の経時変動
Fig. 1 Time series change of composition of the RM28 vent fluid.

る(下島ほか, 1998)。これは一般によく使用されるガラス電極によるpH電極と比べてはるかに耐性が高い上に感応速度が速く、海洋中での使用に適している。熱水ブルームは二酸化炭素などを多く含むためpHが周囲海水に比べて低いことを検出する。深海Ehセンサーは電極電位により還元性物質の検出するものである(Nakamura and Tachibana, 1998)。これは白金線による不活性電極と圧力平衡型の銀/塩化銀照合電極とを組み

合わせたもので、海洋中での不活性電極電位の変動を見ることができる。熱水指標物質のうち硫化水素・メタンなどの還元性物質が濃集している熱水ブルームを横切る時に、この電位が急激に変動することを検出する。現場型マンガン化学分析計は、分析装置そのものを海底で作動させて元素分析を行う画期的なものである。リッジフラックス計画で開発されたGAMOSは、ルミノールによる化学発光の際のマンガン触媒作用を利用して海水中の

Manganese



Temperature

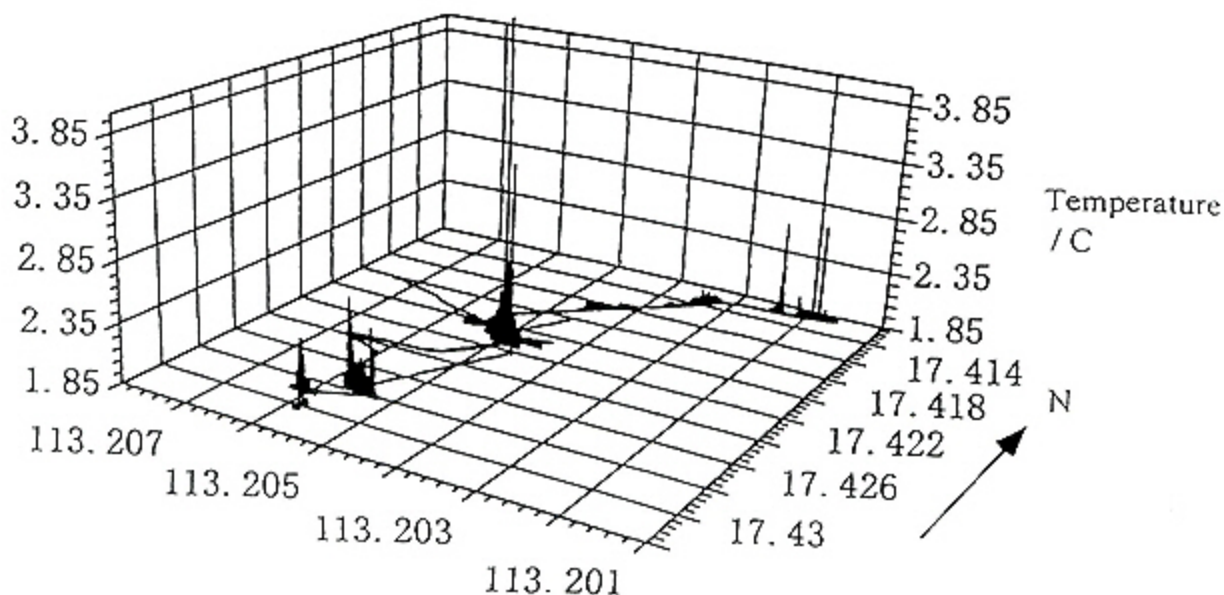


図2 RM24熱水地帯におけるマンガン濃度と温度のマッピング

Fig. 2 Manganese concentration and temperature plotted along the tracks in the RM24 hydrothermal field.

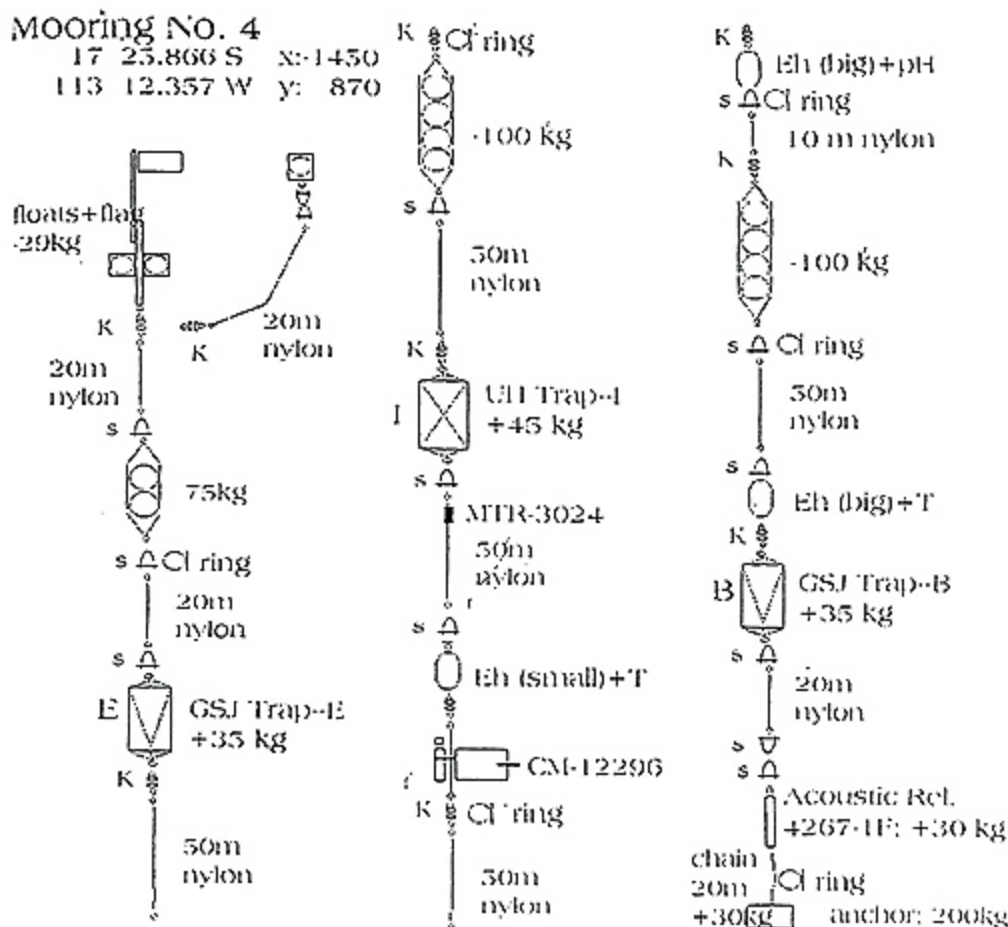


図3 RM24熱水地帯に係留されたセジメントトラップ係留系

Fig. 3 Configuration of the mooring of sediment traps, chemical sensors, and current meters, which were deployed at RM24 hydrothermal field

マンガン濃度を定量するものである (Okamura et al., 1998)。そのプロトタイプは、1995年のマヌス海盆潜航調査でも活躍している (蒲生ほか, 1996)。

1997年の潜航調査ではこれらの化学センサー類を潜水艇に取り付けて、熱水地帯直上における熱水ブルームの分布を化学的性質とともにあきらかにする研究が行われた。図2にRM24熱水地帯におけるGAMOSを用いたマンガン濃度のマッピングと温度異常のマッピング結果を示した。図であきらかなように熱水噴出孔近傍でマンガン濃度と温度の両者が上昇していることがわかる。しかし詳細に見ると、オアシス低温噴出地帯の近傍とカミナリ・マツなどの高温噴出孔近傍を比べた時に、前者では温度異常に対してずっと小さいマンガン濃度異常が観測されていることがわかる。すなわち両者の間で物質フラックスと熱フラックスの比は異なっているのである。

これと同様にして化学マッピングの結果をCTDTセ

ンサーによる温度異常及び濁度異常のマッピングと合わせて検討することによって、それぞれの熱水ブルームの化学的性質の違いをあきらかにすることをめざしている。

さらにこれらの化学センサー類の長期係留も行われている。これによって得られる熱水ブルームの時間変動に関するデータがより確かな物質フラックスの評価に重要なデータとなることが期待される。

5. 熱水ブルームにおける化学過程の追跡

熱水ブルームは単に物理的性質が周囲の海水と異なるだけでなく熱水由来物質を多く含んでおり、ブルームが生成・拡散している段階でも様々な化学反応が進んでいる場である。こうした化学反応には微生物の活動が深く関与し多くの化学種について反応をコントロールしていることが特徴的である (Cowen et al., 1986)。熱水ブ

ルームはこれらの反応を経た後に海洋に拡散していくわけであるから、こうした化学反応を追跡して評価することは熱水活動が海洋へ与える最終的な影響を考える上で重要である。例えば熱水ブルーム内の懸濁物が海水中のリンを吸着してしまう反応は、海洋中の栄養塩プロファイルを変動させてしまうほどの影響があることが知られている (Feely et al., 1996)。

1997年の潜航調査航海では、この熱水ブルームにおける化学過程の追跡を目的として、以下に示す新しい試みを行った。

熱水噴出孔からの懸濁物質の採取は、深海ポンプにより吸引した熱水を種々のフィルターでろ過してすることで現場サンプリングを行った。この試料採取は、RM24熱水地帯の低温噴出孔とRM28熱水地帯の高温噴出孔について行われた。今回採取された試料は熱水の純度が高く、その分析によって噴出直後の懸濁物質の無機化学・有機化学・微生物学的性質をあきらかにできることが期待される。また噴出孔近傍でのブルームサンプリングとして、高温噴出孔からのブラックスモークを潜水艇のサンプルバスケットに取付けたニスキン採水器により採取した。この試料の分析により、熱水ブルーム生成過程における化学反応を追跡する。同様な試料採取は1994年にも行われており、結果の比較から熱水地帯の化学進化に伴って熱水ブルームの化学的性質がどのように変動しているかをあきらかにすることも期待される。

熱水ブルームから化学種が除去される過程を追跡することを目的に行われたのがセジメントトラップの設置である。セジメントトラップは大きなじょうごの下に採取容器がついているもので、これに捕捉された粒子が蓄積されていく。トラップは流向流速計やEhセンサー、pHセンサーとともに係留された(図3)。係留系は、RM24熱水地帯を取り囲む4点に設置されている。トラップは熱水ブルームが分布する層の上下に設置されており、熱水ブルームから沈降あるいは上昇して除去される粒子状の化学種を捕捉できるようになっている。ここで得られた試料を分析し熱水起源由来物質を同定していくことで、この海域の海洋中の物質フラックスのうち、表層生産によるものと熱水由来によるものの割合を定量することができる。

謝 辞

潜航調査に際しては井田司令をはじめとする潜航チームの皆様にご多大のお世話になりました。特に赤沢潜航長・小倉整備長には、毎回サンプルバスケットに由盛りに機

器を搭載しようとする我々に辛抱強くつきあっていただきました。セジメントトラップ係留系の設置には、石田船長をはじめとする「よこすか」乗組員の皆様にご多大のお世話になりました。おかげさまで、航海後半に海況は良くなかったにもかかわらず予定していた係留系をすべて設置することができました。記して深く感謝いたします。

引用文献

- Auzende, J.-M. et al. (1996) : Recent tectonic, magmatic and hydrothermal activity on the East Pacific Rise between 17 and 19°S: Submersible observations. *J. Geophys. Res.*, 101, 17995-18010.
- Baker E. T. and Urabe T. (1996) : Extensive distribution of hydrothermal plumes along the superfast-spreading East Pacific Rise, 13°30'-18°40'S. *J. Geophys. Res.* 101, 8685-8695.
- Butterfield, D. A. et al. (1997a) : Seafloor eruptions and evolution of hydrothermal fluid chemistry. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 355, 369-386.
- Butterfield, D. A., Roe, K. K., Lupton, J. E. and Ishibashi J. (1997b) : Time Series Chemistry of hydrothermal fluids from the Southern East Pacific Rise, 14-18°S. *EOS Trans. AGU*, 78(46), F706.
- Campbell A. C. et al. (1988) : A time series of vent fluid compositions from 21°N, East Pacific Rise, and the Guaymas Basin, Gulf of California. *J. Geophys. Res.* 93, 4537-4549.
- Charlou, J. L., Fouquet, Y., Donval, J. P. and Auzende, J. M. (1996) : Mineral and gas geochemistry of hydrothermal fluids on an ultra fast spreading ridge: East Pacific Rise, 17 to 19°S (NAUDUR cruise, 1993) Phase separation processes controlled by volcanic and tectonic activity. *J. Geophys. Res.* 101, 15899-15919.
- Cowen et al. (1986) : Bacterial scavenging of Mn and Fe in a mid- to far-field hydrothermal plumes. *Nature*, 322, 169-171.
- Elderfield, H. and Schultz, A. (1996) : Mid-ocean ridge hydrothermal fluxes and the chemical composition of the ocean. *Ann. Rev. Geophys.* 24, 191-224
- Feely R. A., Baker E. T., Marumo K., Urabe T., Ishibashi J., Gendron J. and Lebon G. T. (1996) : Hydrothermal plume particles and dissolved phosphate over the superfast-spreading Southern East Pacific Rise. *Geochim. Cosmochim. Acta* 60, 2297-2323.

- 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, マス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.
- Ishibashi, J., Wakita, H., Okamura, K., Nakayama, E., Feely, R.A., Lebon, G. T., Baker, E. T. and Marumo, K. (1997) : Hydrothermal methane and manganese variation in the plume over the superfast-spreading southern East Pacific Rise. *Geochim. Cosmochim. Acta* 61, 485-500.
- 石橋純一郎 (1995) : 海底熱水活動が海洋の化学物質収支に与えるインパクト. 号外海洋 No.8, 172-179.
- 石橋ほか (1995) : 「しんかい6500」による南部東太平洋海膨海底熱水活動の地球化学的研究. JAMSTEC 深海研究, 11, 157-165 (1995).
- Massoth, G. J., Baker, E. T., Lupton, J. E., Feely, R. A., Butterfield, D. A., Von Damm, K. L., Roe, K. K. and Lebon, G. T. (1994) : Temporal and spatial variability of hydrothermal manganese and iron at Cleft segment, Juan de Fuca Ridge. *J. Geophys. Res.*, 99, 4905-4923.
- Nakamura, K. and Tachibana, K. (1998) : Eh anomalies in and around cold seeps in the Nankai Trough. Abstract, International Symposium on Japan-France Kaiko-Tokai Project, in press.
- Okamura K. et al. (1998) : Selective and sensitive determination of trace manganese in sea water by flow through technique using luminol-hydrogen peroxide chemiluminescence detection. *Anal. Chim. Acta*, in press
- 下島公紀・許正憲 (1998) : 化学センサの海洋学への適用 地球化学, 32, 1-11
- Urabe T. et al. (1995) : The effect of magmatic activity on hydrothermal venting along the superfast-spreading East Pacific Rise. *Science* 269, 1092-1095.
- Urabe T. et al. (1997) : Japanese Ridge Flux Project Group has started Long-term sea floor monitoring in the southern East Pacific Rise. *Interridge News* 7(1), 41-44.
- Von Damm, K. L., Edmond, J. M., Grant, B., Measures, C. I., Walden, B. and Weiss, R. F. (1985) : Chemistry of submarine hydrothermal solutions at 21°N, east Pacific Rise. *Geochim. Cosmochim. Acta* 49, 2197-2220.
- Von Damm K. L. et al. (1995) : Evolution of East Pacific Rise hydrothermal vent fluids following a volcanic eruption. *Nature* 375, 47-50.
- Von Damm K. L. et al. (1997) : Direct observation of the evolution of a seafloor 'black smoker' from vapor to brine. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 149, 101-111.

(原稿受理: 1998年7月23日)