

沖縄トラフにおける微量元素の分布と挙動

下島 公紀^{*1}

1988年に発見された、沖縄トラフ中軸部の伊是名海穴 (JADE site) 及び伊平屋凹地 (CLAM site) の両熱水域から、熱水試料を採取して微量元素 (V, Mn, Fe, Ni, Co, Cu, Zn, Mo, Cd, Pb) の全量 (溶存態+懸濁態) の測定を行った。一部の試料については溶存態微量元素の測定も行った。また、JADE site では熱水噴出口 (ブラックスモーカー) 周辺の海水 (ブルーム水) を採取し、全量と溶存態の微量元素を測定した。

各サイトの試料群中の Mg に対するプロットでは、Mn, Fe, Co, Zn は負の傾きを示し、V, Ni, Cu, Mo, Cd, Pb は正の傾きを示した。JADE site と CLAM site では傾きの値が異なっており、これは両熱水活動域で異なった熱水循環過程が起こっているためと考えられる。熱水試料中における微量元素の存在状態では、Cu, Mo, Cd, Pb は懸濁態の割合が多かった。他の微量元素は溶存態の割合が多かった。熱水噴出口から底層海水中に供給された後の挙動は各々の微量元素で異なり、海水の流動と各々微量元素の除去過程に支配された分布を示す。

キーワード: 沖縄トラフ中軸部, 微量元素, ブラックスモーカー, ブルーム水

Distribution and Behavior of Trace Metals on the Okinawa Trough

Kiminori SHITASHIMA^{*2}

The deep-sea hydrothermal fluid samples were taken by the "Shinkai 2000" from two active vent sites, JADE and CLAM, in the Mid-Okinawa Trough, where submarine hydrothermal activity was discovered in 1988. The buoyant plume waters around a black smoker were also collected at the JADE site. Total dissolvable and dissolved trace metals (V, Mn, Fe, Ni, Co, Cu, Zn, Mo, Cd and Pb) in the hydrothermal fluid samples and the buoyant plume samples were determined.

The plot of Mg versus Mn, Fe, Co and Zn in the hydrothermal fluid samples showed negative correlation, while V, Ni, Cu, Mo, Cd and Pb were positively correlated with Mg concentration. The slope of correlation line differed between the JADE and CLAM sites, showing that the mechanism of hydrothermal circulation might differ between the two vent sites. The dissolved form was dominant in the hydrothermal fluids for V, Mn, Fe, Ni, Co and Zn, while Cu, Mo, Cd and Pb were mostly in the particulate form. Each trace metal behaves differently in the buoyant plume after emitted from the hydrothermal

* 1 東京大学海洋研究所
(現在: (財)電力中央研究所)

* 2 Ocean Research Institute, University of Tokyo
(Present: Central Research Institute of Electric Power Industry)

vent. The distribution of trace metals in the buoyant plume was governed by both scavenging processes and bottom water movement pattern.

Key words: Mid-Okinawa Trough, Trace metals, Black smoker, Buoyant plume

1. はじめに

1988年6月の西ドイツの調査船「ゾネ」による沖縄トラフ中軸部の熱水性鉱床の発見以来 (Halbach *et al.*, 1989), 沖縄トラフでは多くの観測航海や潜航調査が実施され、ブラックスモーカーや生物群集などを含む大規模な熱水活動が次々に発見された (門馬ほか, 1989; 中村ほか, 1990; 蒲生ほか, 1990; 酒井ほか, 1990)。沖縄トラフは海底表面を堆積物で覆われた「埋積海嶺」であることから、熱水の化学的性質は中央海嶺系の熱水とは著しく異なることが明らかにされている。沖縄トラフでは、熱水は厚い堆積層を通過して噴出するため、その熱水の中には多量の NH_4 が含まれている。このため他の中央海嶺系の熱水に比べて高い pH を示す (蒲生ほか, 1990; Sakai *et al.*, 1990; Gamo *et al.*, 1991)。また、これまでに発見された沖縄トラフの熱水活動域でも伊是名海穴 (JADE site) と伊平屋凹地 (CLAM site) ではそれぞれ性質の異なる熱水循環系が形成されていることが報告されている (蒲生ほか, 1990; 石橋ほか, 1990)。

著者は、1989年6月から7月にかけて実施された「しんかい2000」潜航調査で採取した熱水試料及び、同年7月に実施された「白嶺丸」調査航海 (GH89-3) で採取したブルーム水 (ベントから海水中に供給された後の熱水) について、微量元素の全量 (溶存態+懸濁態) 及び溶存態の濃度を測定した。本稿ではこれらの測定結果から、沖縄トラフの海底熱水活動における微量元素の分布や挙動について考察する。

2. 試料の採取

熱水試料は、1989年6月から7月の「しんかい2000」潜航調査 (DIVE 413, 414, 416, 423, 424, 426, 427) において、JADE site と CLAM site のブラックスモーカーを含む熱水ベントから約30が採取された。図1に沖縄トラフの位置と両熱水サイトの位置を示す。「しんかい2000」潜航調査による熱水試料の採取方法及び熱水の温度測定については酒井ほか (1990) を、熱水中の主要化学成分の地球化学的特徴については蒲生ほか (1990) を参照されたい。

ブルーム水は、1989年7月の「白嶺丸」調査航海 (GH89-3) で採取した。採水は、JADE site で発見さ

れたブラックスモーカーの地点とこれを中心にした周囲の数地点で、ステンレスワイヤーに Go-Flo 採水器を連装して行い、海底直上では採水が密になるよう設定した (下島ほか, 1990)。この航海では、ブルーム水の三次元的な拡がり把握し、その中の化学成分の挙動を明らか

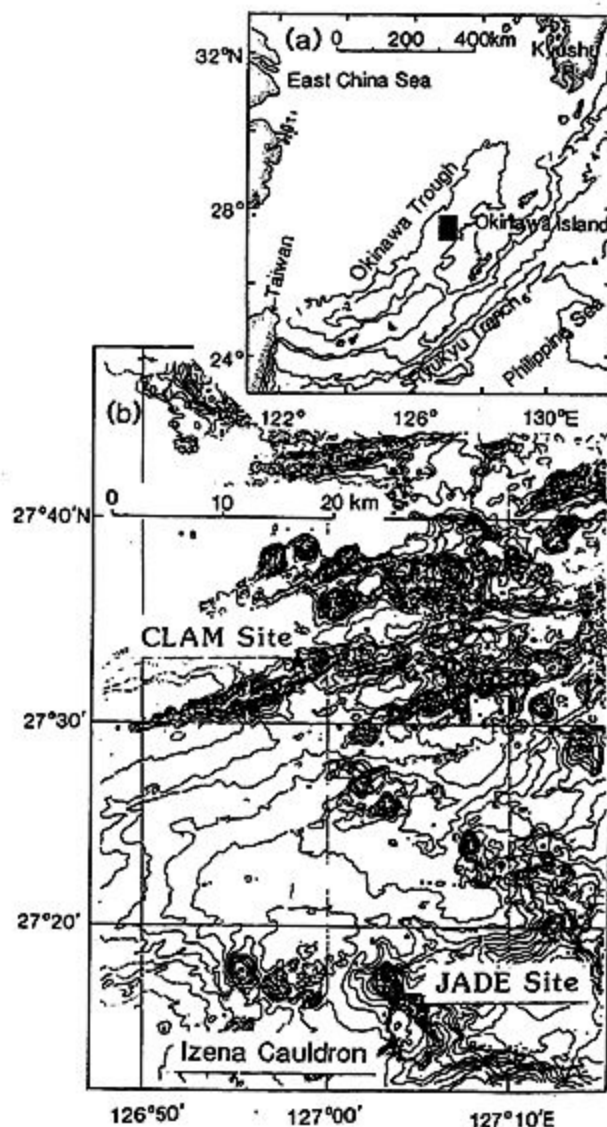


図1 沖縄トラフの位置 (a) と沖縄トラフ中軸部の伊是名海穴 (JADE site) 及び伊平屋凹地 (CLAM Site) の位置 (b)

Fig. 1 Location of the Okinawa Trough (a), and the JADE and CLAM sites in the Mid-Okinawa Trough (b).

にすることを目的とした。図2にGH89-3における試料採取点を示す。

3. 微量元素の分析

3.1 熱水中の微量元素の分析

採取された熱水試料の分取は、「しんかい2000」揚収後ただちに「なつしま」船上で行った。気相と液相が分離している試料は、気体と液体に分けて採取した。本稿では液体の試料についてのみ分析を行った。液体試料はそれぞれの目的に応じて分配し、pH、アルカリ度、ケイ酸、アンモニアについてはただちに船上で分析した(蒲生ほか, 1990)。全量の微量元素分析のための試料は、分配後ただちに船上のクリーンブース内でpH1になるよう硝酸を添加して保存した。溶存態の微量元素分析のため、一部の試料についてはクリーンブースにおいて、0.4 μ mのニウレポアフィルターを用いて加圧濾過を行って懸濁物を除去し、硝酸を添加して保存した。微量元素の分析は、陸上のクリーンルームにおいてキ

レート剤による溶媒抽出後、フレイムレス原子吸光法(GFAAS)によってV, Mn, Fe, Ni, Co, Cu, Zn, Mo, Cd, Pbの各元素を測定した。クリーン分析技術についてはShitashima and Tsubota (1990)とTsubota *et al.* (1993)を、分析法については下島ほか(1990)を参照されたい。

3.2 ブルーム水中の微量元素の分析

採取した試料は、「白嶺丸」船上でただちにそれぞれの目的に応じて分配し、塩分、pH、アルカリ度、ケイ酸については船上で分析した。微量元素分析のための濾過や酸添加などの処理方法及び微量元素の分析方法は、熱水試料の場合と同様である。この試料ではV, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd, Pbの各元素を測定した。

4. 熱水試料中の微量元素濃度

一般に高温の熱水ではMgの濃度はほとんどゼロになることが知られている(Edmond and Von Damm, 1983)。JADE siteのブラックスモーカーから得られた熱水試料(温度: 320°C)中のMg濃度はほぼゼロであり、この試料はJADE siteの熱水系のエンドメンバーであった(蒲生ほか, 1990)。図3に、採取した熱水試料中のMg濃度に対する全量及び溶存態の微量元素濃度のプロットを示す。このプロットでは、Mn, Fe, Co, Znは負の傾きを示し、V, Ni, Cu, Mo, Cd, Pbは正の傾きを示したが、JADE siteとCLAM siteとでは、その傾きは異なっていた。Gamoら(1991)は両熱水活動域における熱水循環過程の違いを報告している。それによるとJADE siteでは深部熱水が直接海底に噴出し硫化物鉱床を形成しているのに対し、CLAM siteではJADE型熱水の上にさらに厚い堆積層があり、その中で上部から進入する海水と混合して浅部熱水系を形成しているため、NH₄やH₂Sが多く、pHも高い。高いpHは金属硫化物の溶解度を低下させるので、CLAM siteでは、JADE siteに比べて金属硫化物の沈殿がより促進されていると考えられる。また、CLAM siteにおいては、熱水は厚い堆積層を通過するため、Mn, Fe, Coでは堆積物からの寄与があるかもしれない。木村ら(1991)によると、JADE siteの噴出口(チムニー)を構成する物質中には、CLAM siteの熱水性マウンドに比べ約20倍高い濃度のZnが検出された。エンドメンバー試料中の高Zn濃度は、JADE siteでは、Znの濃縮がより顕著に起こる熱水循環過程があることを示唆している。

熱水試料中における微量元素の存在状態では、Cu,

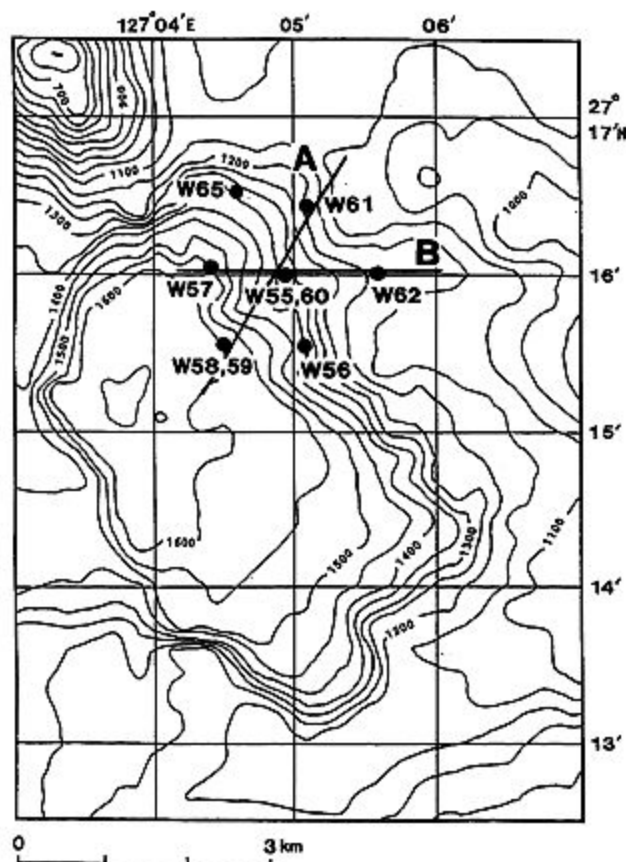


図2 伊豆海峽(JADE site)におけるブルーム水の採取点
Fig.2 Sampling positions in the buoyant plume at the JADE site.

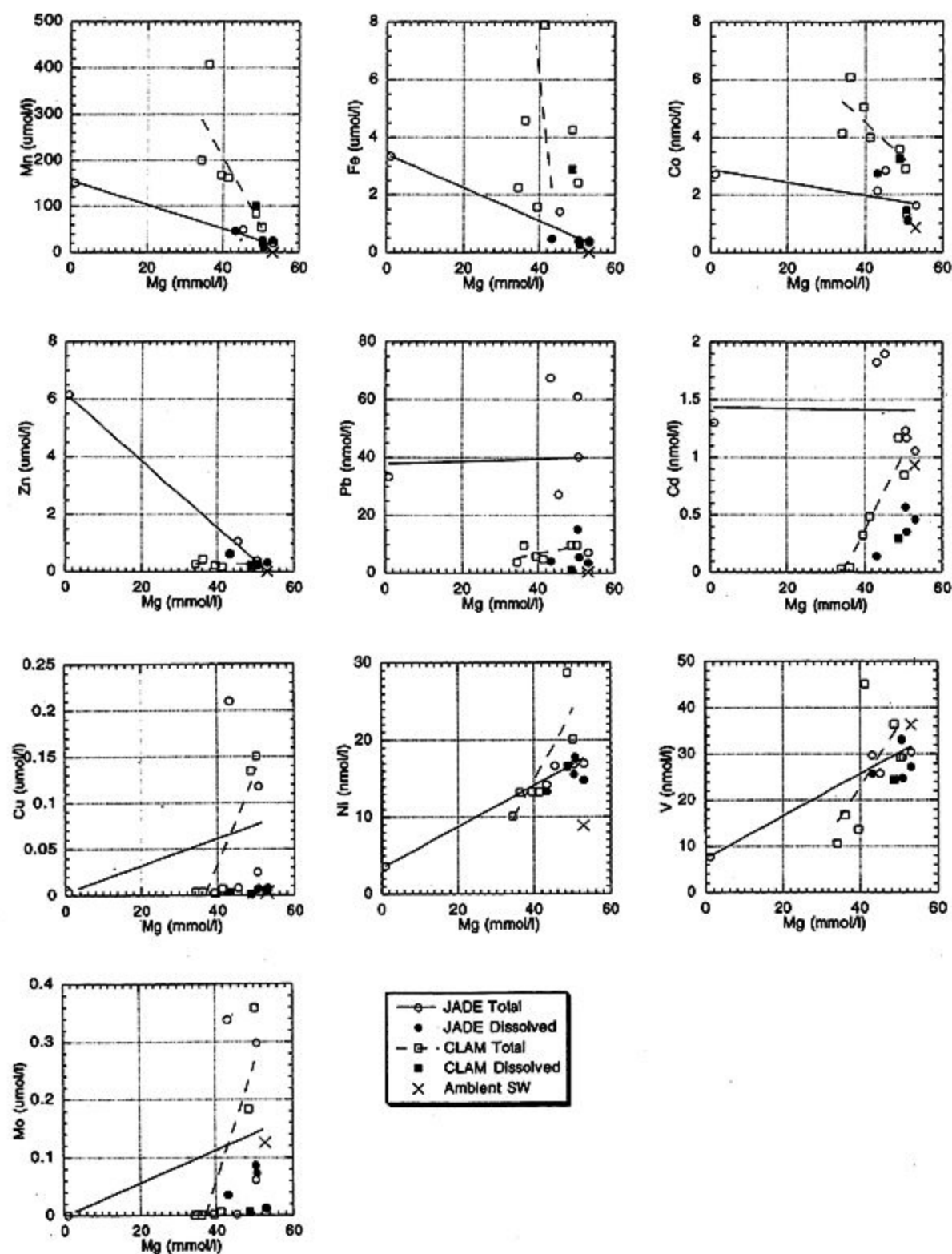


図 3 沖縄トラフで採取された熱水試料中の Mg 濃度に対する全量及び溶存態の微量元素濃度の関係
 Fig. 3 Relationships of Mg versus trace metals in the hydrothermal fluid samples from the Okinawa Trough.

Mo, Cd, Pbは懸濁態の割合が非常に多く、他の微量元素は溶存態の割合が多かった。熱水中では、Mnは硫化物として沈殿しないため、噴出口周辺に沈積することなく非常に高濃度で底層海水に放出される。一方、他の微量元素は硫化物として沈殿するため、その挙動は複雑である。Fe, Co, Znは噴出直後の比較的早い時期に除去されるが、残った部分については噴出口から放出された後は底層海水との混合によって希釈されながら沈積する。

Ni, Cu, PbはFe等比べて沈殿するのがやや遅いが、噴出直後にはその大部分が除去される。V, Mo, Cdは、熱水中の濃度はJADE site内の通常海水(Ambient SW)より低いか、わずかに高い程度である。これらの微量元素は、熱水循環過程において岩石から供給されるうちのほとんどが噴出直後に除去されている。

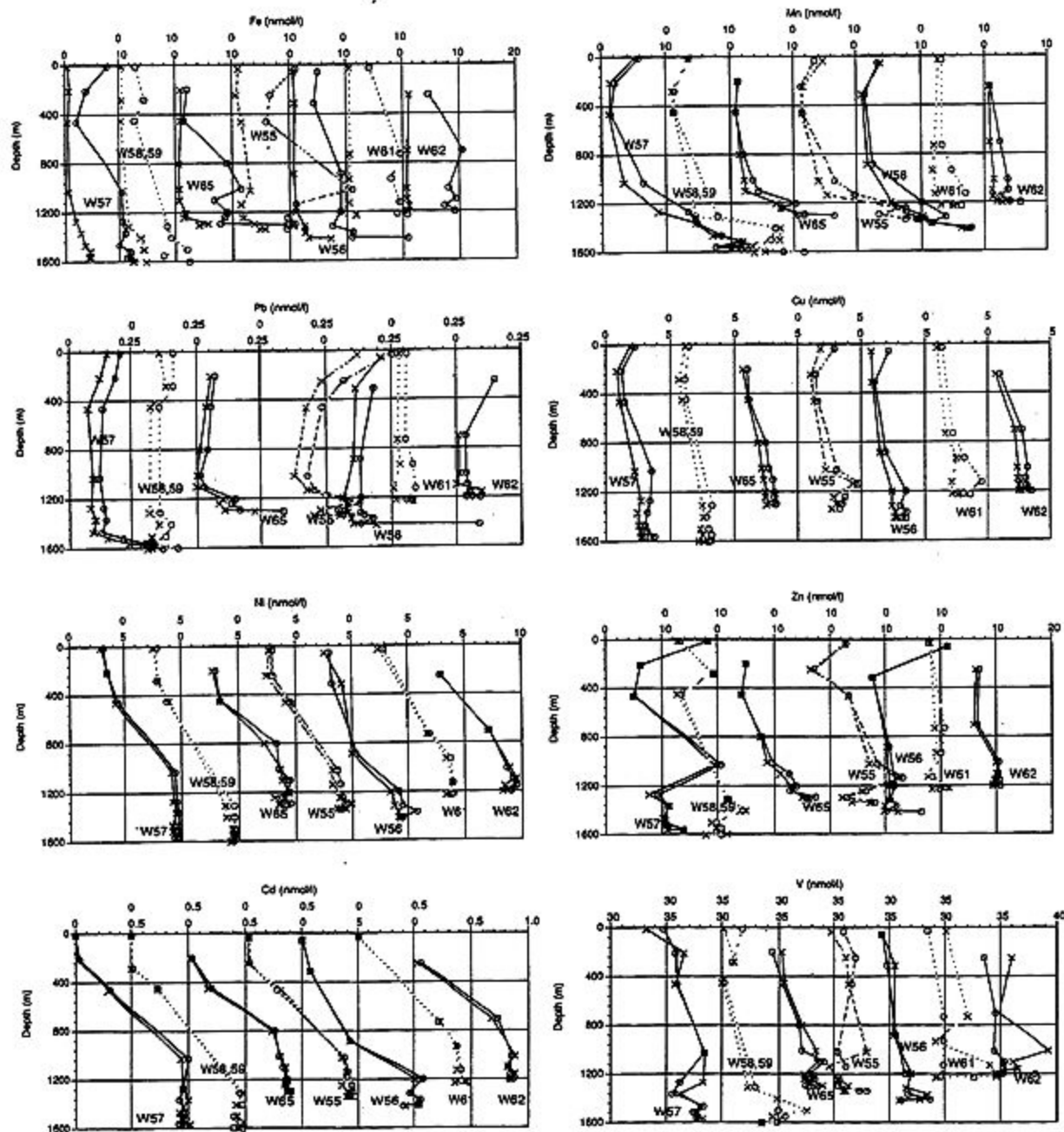


図4 伊豆名海穴 (JADE site) におけるブルーム水中の微量元素の鉛直分布図 (○: 全量, ×: 溶存態)

Fig. 4 Vertical profiles of trace metals in the buoyant plume at the JADE site. (○: total dissolved, ×: dissolved)

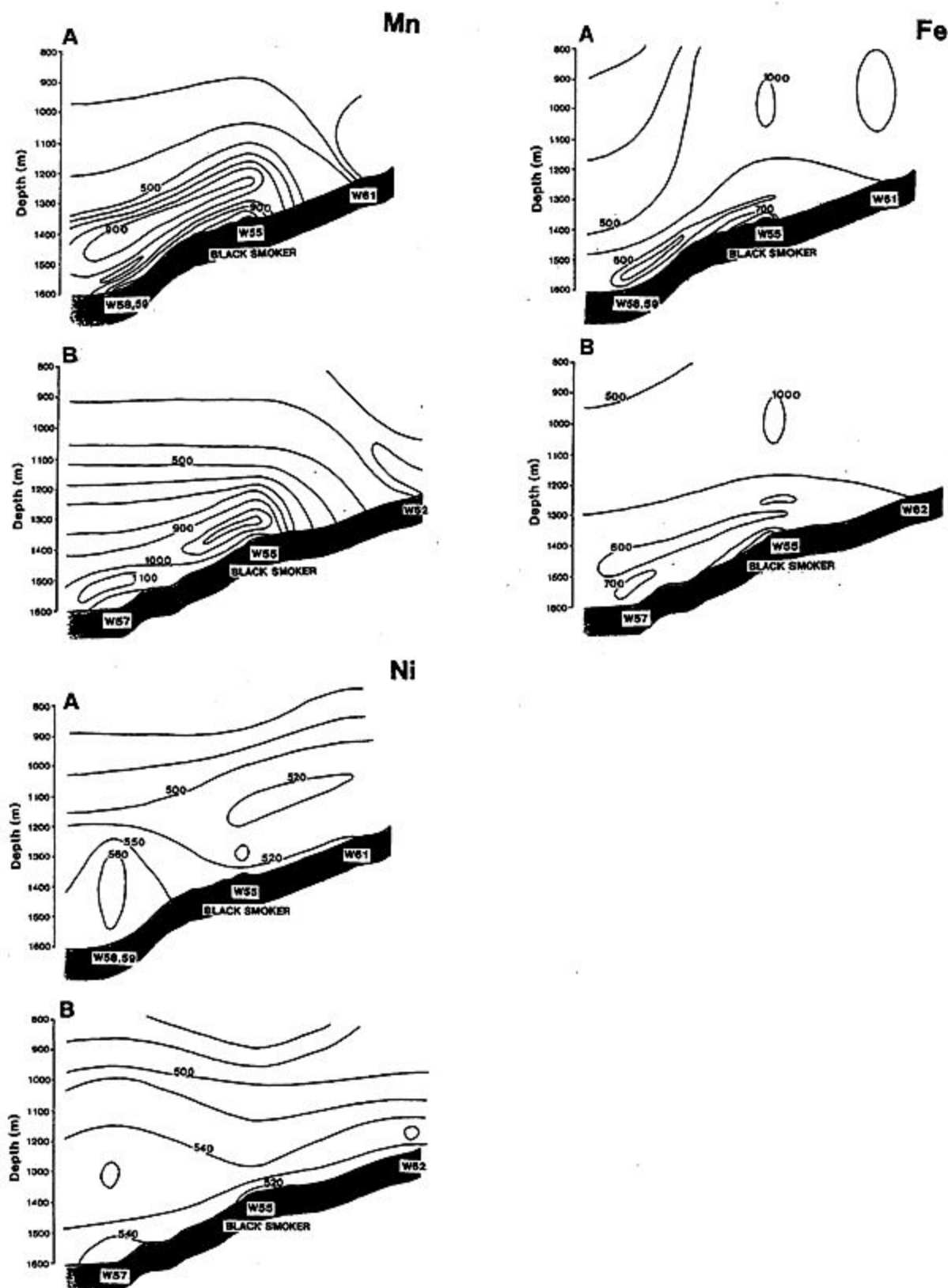


図 5 伊是名海穴 (JADE site) における Mn, Fe, Ni の鉛直断面の分布図 (A 及び B の断面図はそれぞれ図 2 の A, B のラインに対応する。図中の数字は濃度 (ng/l))

Fig. 5 Contours of Mn, Fe and Ni concentration at the JADE site. (The contours A and B of each trace metal correspond to the lines A and B in Fig. 2, respectively. The numbers in figure are trace metal concentration (ng/l).)

5. ブルーム水中の微量元素濃度

GH89-3 研究航海で得られたブルーム水中の全量及び溶存態の微量元素の鉛直分布を図4に示す。JADE site の海穴内(約1,100m以下の水深)では、Mn, Fe, Cu, Pb, Zn は海底に近づくにつれて濃度の増加や変動があり、Fe, Cu, Pb ではそれぞれ80%, 15%, 20%が懸濁態であった。Mn, Zn はほとんどが溶存態であったが、Mn は熱水噴出口(W55)周辺の底層水を除けば、懸濁態の割合が多くなっており、徐々に酸化物として海水中から除去されている。Fe は噴出口から放出後、酸化物として海水中から除去されるため懸濁態が多くなる。Cu, Pb は Fe の酸化物に取り込まれるため、懸濁態の割合が多くなると考えられる。一方、V, Ni, Cd では海穴内でも濃度の増加や変動はなく、そのほとんどが溶存態として存在していた。

底層での海水流動が比較的緩やかな場所では、底層海水中に噴出した熱水は、急速に周囲の海水と混合しつつ上昇し、やがて十分に希釈されて、その密度がまわりの海水と等しくなると、浮力を失って水平方向にたなびくブルームとなる。伊是名海穴のような地形的凹地内の海水の主成分組成は均一であることから、伊是名海穴では活発な海水混合が起こっていると考えられる(下島ほか, 1990)。このように活発な海水流動が起こっている場所では、ブルームのたなびきかたも異なっていることが想像される。

全量の Mn, Fe, Ni について、ブラックスモーカー地点(W55)を中心にした鉛直断面(図2のA及びBのライン)を図5に示す。Mn のブルームは、噴出後100m近く上昇するが、水平方向にたなびくことはなく、海穴の底に向かってたなびいている。これは海穴内の斜面に沿って下降する海水の流れがあることを示唆している。Fe のブルームも Mn と同様な挙動を示し、海穴の底に向かってたなびいている。一方、Ni では顕著なブルームは形成しておらず、熱水から底層海水への負荷はほとんどないことがわかる。

6. ま と め

JADE site においては、ブラックスモーカーから放出されたブルーム水は、海水流動に伴って周囲に広がり海穴内の斜面に沿って下降する。今回測定した微量元素は、ブルーム水中における挙動の違いから、4つのグループに分けることができる。図6は沖縄トラフ伊是名海穴(JADE site)における、微量元素ブルームの行方を模式的に示したものである。

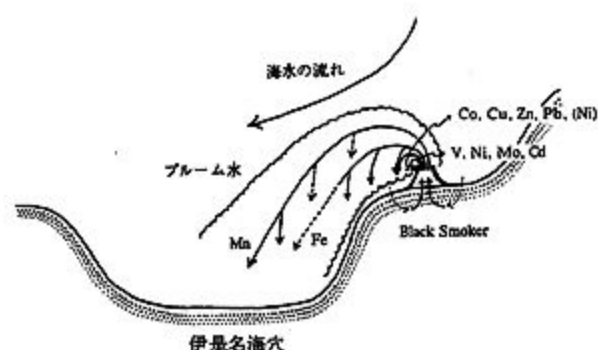


図6 伊是名海穴(JADE site)における微量元素ブルームの行方の模式図

Fig. 6 Fate of trace metals in the buoyant plume at the JADE site.

- ① Mn は熱水中では硫化物として沈殿しないので、溶存態として底層水中に放出された後、海水の流動とともに周囲に拡散しつつ徐々に酸化物として沈積するため、広い範囲まで分布する。
- ② Fe は硫化物としても酸化物としても沈殿するので、噴出直後の熱水中では硫化物として沈積し、噴出した後は酸化物として噴出口の近くに沈積するが、この時、他の微量元素を伴って沈積することが考えられる。
- ③ Co, Cu, Zn, Pb は熱水中で多くの部分が硫化物として沈積するが、噴出口のごく周辺に分布する部分もある。これらは Fe の酸化物とともに挙動していることが考えられる。あるいは熱水循環の過程で、堆積物からの寄与があることも考えられる。Ni もこのグループに入るかもしれない。
- ④ V, Ni, Mo, Cd はそのほとんどが熱水中で硫化物となって沈積するため、噴出口の周辺には分布しない。したがって、濃度異常のブルームは形成しない。

海底熱水活動域における、微量元素の分布や挙動を支配している因子について考察する場合、海底熱水活動域に特徴的に存在する化学合成細菌の存在を無視することはできない。本稿では、微量元素の物理化学的な性質に主眼をおいて考察を行ったが、より詳細な考察を行う場合は、化学合成細菌などの微生物的な関与も考慮に入れる必要があろう。

謝 辞

本研究の推進にあたり、広島大学の坪田博行名誉教授、山形大学の酒井均教授、東京大学海洋研究所の蒲生俊敬助教授、地質調査所の浦辺徹郎博士と三田直樹博士

には多大なご支援をいただいた。試料の採取に際しては、「しんかい2000」の司令及び潜航要員の皆様、「なつしま」及び「白嶺丸」の船長、乗組員及び同乗の研究者の皆様のご協力をいただいた。

参考文献

Edmond, J.M. and K. Von Damm (1983): Hot springs on the ocean floor. *Sci. Amer.* 248 (4), 78-93.

蒲生俊敬・酒井 均・金 銀洙・下島公紀・柳澤文孝・石橋純一郎・大森 保・山野 誠・野尻幸宏・田中武男・松本 剛・満澤巨彦・長沼 毅 (1990): 中部沖縄トラフ海底熱水活動の地球化学的研究: 「しんかい2000」第416回潜航報告および熱水の主要化学成分濃度からみた熱水活動の特徴。『しんかい2000』研究シンポジウム報告書, 6, 51-62.

T. Gamo, H. Sakai, E.-S. Kim, K. Shitashima and J. Ishibashi (1991): High alkalinity due to sulfate reduction in the CLAM hydrothermal field, Okinawa Trough. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 107, 328-338.

Halbach, P., K. Nakamura, M. Wahsner, J. Lange, H. Sakai, L. Kaselitz, R.-D. Hansen, M. Yamano, J. Post, B. Prause, R. Seifert, W. Michaelis, F. Teichmann, M. Kinoshita, A. Marten, J. Ishibashi, S. Czerwinski and M. Blum (1989): Probable modern analogue of Kuroko-type massive sulphide deposits in the Okinawa Trough back-arc basin. *Nature*, 338, 496-499.

石橋純一郎・佐野有司・脇田 宏・蒲生俊敬・堤 眞・酒井 均 (1990): 中部沖縄トラフ海底熱水活動の地球化学的研究: 溶存気体成分からみた熱水活動の特徴。『しんかい2000』研究シンポジウム報告書, 6, 63-68.

木村政昭・大森 保・井沢英二・加藤祐三・田中武男・仲 二郎・小野朋典 (1991): 「しんかい2000」による伊平屋海凹の第284, 286, 287, 366潜航と伊是名海穴第364潜航の成果。『しんかい2000』研究シンポジウム報告書, 7, 147-161.

門馬大和・橋本 惇・田中武男: 深海調査グループ

(1989): 沖縄トラフ深海曳航調査 (DK88-2-OKN-LEG1, 2) 速報. 海洋科学技術センター試験研究報告, 21, 203-221.

中村光一 (1989): 沖縄トラフ, 伊是名海穴熱水性鉱床の研究 I—新たに発見したブラックスモーカーを中心とする鉱床の分布と産状. 第6回「しんかい2000」研究シンポジウム予稿集, 32-33.

H. Sakai, T. Gamo, E.-S. Kim, K. Shitashima, F. Yanagisawa, M. Tsutsumi, J. Ishibashi, Y. Sano, H. Wakita, T. Tanaka, T. Matsumoto, T. Naganuma and K. Mitsuzawa (1990): Unique chemistry of the hydrothermal solution in the mid-Okinawa Trough backarc basin. *Geophys. Res. Lett.*, 17, 2133-2136.

酒井 均・山野 誠・田中武男・蒲生俊敬・金 銀洙・石橋純一郎・下島公紀・松本 剛・大森 保・柳澤文孝・堤 眞 (1990): 「しんかい2000」による伊是名海穴熱水系の地球化学的研究—第413回および第415回潜航報告, および第424回潜航で採取した二酸化炭素液泡と包接化合物について。『しんかい2000』研究シンポジウム報告書, 6, 69-85.

下島公紀・熊本雄一郎・石橋純一郎 (1990): 沖縄トラフ (GH89-3 航海) における海底熱水活動の地球化学的探査. 海底熱水活動に伴う重金属資源の評価手法に関する研究, 平成元年度研究概要報告書, 191-197.

K. Shitashima and H. Tsubota (1990): Transport of heavy metals into and out of the Seto Inland Sea, Japan. *Geochem. J.*, 24, 283-293.

H. Tsubota, S. Nakamura, K. Shitashima (1993): "Trace metals in the North Pacific—recent development of clean techniques and their applications to ocean chemistry." p169-184. In: *Deep Ocean Circulation, Physical and Chemical Aspects*. Edited by T. Teramoto, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 382 pp.

(原稿受理: 1994年6月30日)