

南部東太平洋中央海膨における全炭酸

下島 公紀^{*1} 園田 朗^{*2} 石橋純一郎^{*3} 浦辺 徹郎^{*4}
藤岡換太郎^{*5} エドワード・ペーカー^{*6} リチャード・フィーリー^{*6}
デヴィッド・バターフィールド^{*6}

「RidgeFlux 計画」の一環として、南部東太平洋中央海膨において 1993 年 11 月～12 月に「メルビル」による調査航海が、1994 年 9 月～11 月に「しんかい 6500」による潜航調査が実施された。2つの航海で熱水試料およびブルーム試料を採取し、全炭酸（全溶解二酸化炭素）濃度を測定した。熱水試料中の全炭酸濃度は 16mM から 5mM の範囲であり、これまでに東太平洋中央海膨の他の地点で得られた値とほぼ同程度の値か、やや高い値であった。熱水噴出口から放出された二酸化炭素は拡大軸上に顕著な全炭酸のブルームを形成しており、熱水活動によって二酸化炭素が海洋中に放出されている様子が明らかになった。さらに、15°S の拡大軸を中心として全炭酸濃度の高い海水が海底沿いを東西方向に広がっていることがわかったが、このブルームは Lupton と Craig (1981) によって明らかにされたヘリウムのブルームとは異なった形をしていた。

これらのことから、海洋への二酸化炭素の供給源として海底熱水活動が無視できない存在であることが想像される。

キーワード：南部東太平洋中央海膨、海底熱水活動、全炭酸、浮上性ブルーム、化学フラックス

The Flux of Total Carbonate at the Southern East Pacific Rise

Kiminori SHITASHIMA^{*7} Akira SONODA^{*8} Jun-ichiro ISHIBASHI^{*9}
Tetsuro URABE^{*10} Kantaro FUJIOKA^{*11} Edward Baker^{*12}
Richard Feely^{*12} David Butterfield^{*12}

Total carbonate (total dissolved carbon dioxide) was determined in the samples of the buoyant plume and the hydrothermal fluid collected at the southern East Pacific Rise (S-

* 1 (財)電力中央研究所

* 2 日本海洋事業株式会社

* 3 東京大学理学部

* 4 地質調査所

* 5 海洋科学技術センター深海研究部

* 6 米国大気海洋局

* 7 Central Research Institute of Electric Power Industry

* 8 Nippon Marine Enterprises, Ltd.

* 9 Faculty of Science, University of Tokyo

* 10 Geological Survey of Japan

* 11 Deep Sea Research Department, Japan Marine Science and Technology Center

* 12 National Oceanic and Atmospheric Administration

EPR) by the R/V Melville (Nov. ~Dec. 1993) and the DSRV "Shinkai 6500" (Sep. ~Nov. 1994) under the RidgeFlux project (funded by Science & Technology Agency, Japan). The concentration of total carbonate in hydrothermal fluid samples ranged from 16 to 5 mM and were similar or relatively high to concentrations reported for other EPR hydrothermal systems. We found the total carbonate plumes on the seafloor along S-EPR axis. The seawater enriched with total carbonate diffuses both westward and eastward in the bottom water at 15°S on the S-EPR, but distribution pattern of the total carbonate plume was different from that of the Helium-3 plume reported by Lupton and Craig (1981).

These suggest that hydrothermal systems are significant source of carbon dioxide in the ocean.

Key words : Southern East Pacific Rise, Hydrothermal systems, Total carbonate, Buoyant plume, Geochemical flux

1. はじめに

熱水中の二酸化炭素は主にマグマ起源であり、熱水循環の過程で火山岩から熱水中へ抽出されたものである。背弧海盆などのように堆積物に覆われた地域では、これに堆積物中の炭酸塩や有機物を起源とする二酸化炭素が加わるため、熱水中の二酸化炭素濃度は一般に高い。1989年には背弧海盆である沖縄トラフにおいて、堆積物中から湧き出ている二酸化炭素水和物が発見 (Sakai et al., 1990) されており、熱水噴出口が存在する海底では、熱水活動によって二酸化炭素が深層水中に放出されていることが予想される。地球環境問題と相まって、海洋中の二酸化炭素のフラックスは注目を集めている。海底熱水活動による海洋への二酸化炭素のフラックスは、海洋表面でのそれとは異なり局所的な存在ではあるが、海洋全体としての二酸化炭素の収支を考えるうえでは無視できない存在であると思われる。しかしながら、今までの熱水調査は探査や熱水そのものの化学的特徴の把握に主目的が置かれており、海底熱水活動による海洋への二酸化炭素の供給という観点から、熱水だけでなく浮上性ブルームや熱水ブルーム中の二酸化炭素を測定する調査が行われた例は少ない。

南部東太平洋中央海膨 (S-EPR) は、世界で最も早い海底拡大軸の1つであり、ここでは、海底熱水活動に伴う物質フラックスも大きいことが予想される。1993年と1994年に、科学技術庁科学技術振興調整費「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 (RidgeFlux計画)」による2つの調査航海がS-EPRにおいて実施された (Urabe et al., 1995; 石橋ほか, 1995)。筆者らは海底熱水活動による海洋への二酸化

炭素の供給を明らかにすることを目的としてこの計画に参加し、熱水およびブルーム試料中の全炭酸濃度を測定した。

2. 熱水試料およびブルーム試料の採取と全炭酸濃度の測定

1994年9月から11月にかけて「RidgeFlux計画」の一環として、「しんかい6500」(海洋科学技術センター)による潜航調査が実施された。潜航調査は、1993年11月から12月にかけて実施された「メルビル」航海において、顕著な濃度異常が検出された地点を中心に行った。図1にS-EPRにおける調査海域を示す。Area-AからArea-Eおよび#35から#39は「メルビル」航海での観測範囲および観測地点を示し、RM04, RM23, RM29, RM28は「しんかい6500」による潜航調査地点を示す。

1993年の「メルビル」航海では、CTD-RMSTによってS-EPR上およびその近傍の合計31測点において海水試料を採取し、pH、全炭酸、メタン、微量元素 (Al, Fe, Mn) 等を船上で測定した (Urabe et al., 1995)。また、1994年の潜航調査では、熱水試料は東京大学海洋研究所のポンプ式熱水採水器 (酒井ほか, 1990) によって熱水噴出口から直接採取し (石橋ほか, 1995)、噴出口周辺の浮上性ブルーム試料は「しんかい6500」に取り付けした3~7本のニスキ型採水器 (2.7リットルと5リットル) によって採取した。採取した試料について、「よこすか」船上でpH、アルカリ度、主要陽イオン; Li, Na, K, Mg, Caおよび主要陰イオン; Cl, SO₄, Br (イオンクロマトグラフィー)、硫化水素、アンモニア、シリカ (比色分析法) を測定した。全炭酸測定用の試料には塩化第2

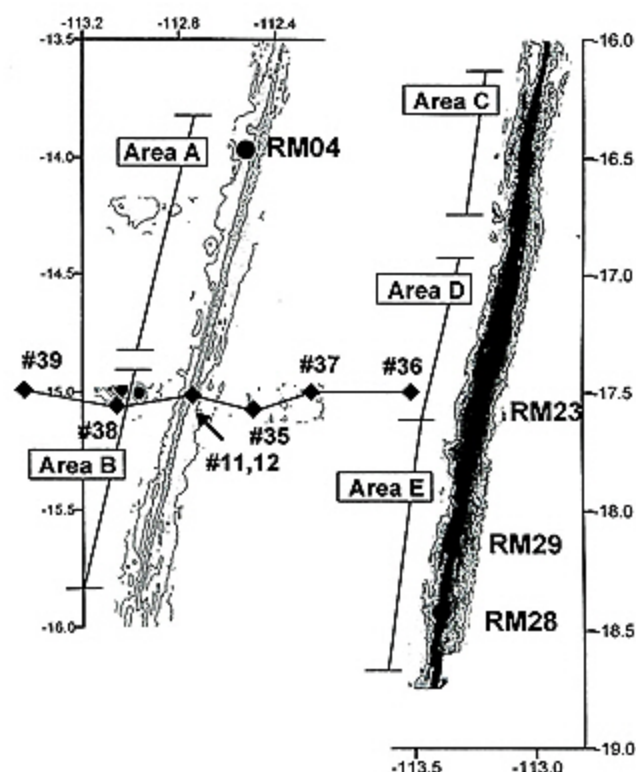


図1 南部東太平洋中央海膨における調査海域
Fig. 1 Sampling location on the S-EPR.

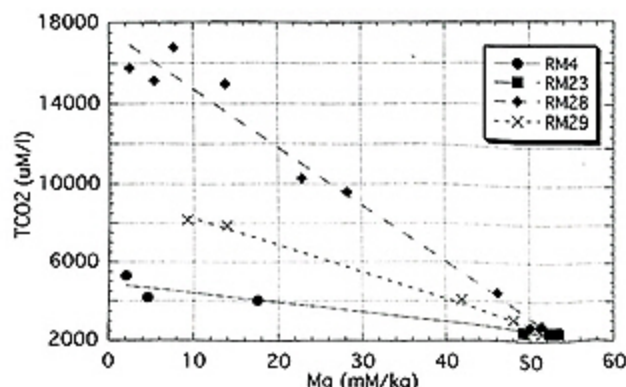
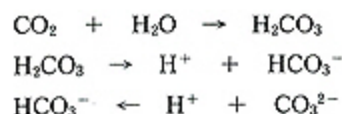


図2 南部東太平洋中央海膨の各熱水域から採取した熱水試料のMgに対する全炭酸のプロット
Fig. 2 Mg vs. total carbonate relationship for the hydrothermal fluid samples taken from hydrothermal active vents in the S-EPR.

水銀を添加後、冷蔵して持ち帰り、陸上の研究室で測定した。

両航海で採取した試料中の全炭酸はクーロメトリーで測定し、検量線には炭酸ナトリウム試薬(純度99.99%)から調整した数種類の標準溶液を用いた。その測定精度は $\pm 0.0018 \text{ mM}$ である。なお、全炭酸(全溶存二酸化炭素)は海水中の3つの炭酸種[炭酸(H_2CO_3) + 重炭酸イオン(HCO_3^-) + 炭酸イオン(CO_3^{2-})]を合計したものである。一般に、二酸化炭素は以下の反応式のごとく海水に溶けて炭酸となり、さらに重炭酸イオンへと解離する。



すなわち、海底熱水活動によって海洋中に供給された二酸化炭素は全炭酸の増加として検出される。

3. 結果および考察

「しんかい6500」による潜航調査で採取された熱水試料の分析結果からは、次のような地球化学的特徴が明らかになった(石橋ほか, 1995)。1) RM04, RM29, RM

28で採取された熱水は、いずれも海底で気相と液相に相分離した後に上昇したものである。2) RM23, RM28の熱水は溶存気体の含有量が高く、その成分組成はマグマからも化学種が加わっていることを示唆している。

S-EPR上の4つの活動域(RM04, RM23, RM29, RM28)で採取した熱水中の全炭酸濃度は、16mMから5mMの範囲であり、これまでにEPRの他の地点で得られた値とほぼ同程度の値か、やや高い値であった。また、背弧海盆の沖縄トラフ(Sakai et al., 1990)や、ホットスポットであるハワイ・ロイヒ海山(Sedwick et al., 1992)で得られた熱水中の全炭酸濃度に比べて10分の1～100分の1ほどの低い値であった。図2は、「しんかい6500」で採取した浮上性ブルームおよび熱水中のマグネシウムに対して全炭酸をプロットしたものである。このプロットでは、それぞれの活動域で異なる3つの直線にきれいにグループ分けされた。溶存気体の含有量が高いRM28の熱水では全炭酸濃度も高く、マグマからの二酸化炭素の寄与が大きいことがわかる。

熱水噴出口から噴出した直後の熱水は、周囲の海水と激しく混合しながら浮上性ブルームとなって上昇を続け、やがて海水によって1万倍程度に希釈される。図3は浮上性ブルーム試料および熱水試料中の全炭酸濃度を、熱水噴出口からの距離に対してプロットしたものである。浮上性ブルーム試料はそのたなびきに沿って潜水調査船を移動させながらニスキン採水器で採取した。噴出直後の熱水が周囲の底層海水と急激に希釈・混合されるに伴って全炭酸の濃度は急激に減少し、熱水噴出口から50m程度離れると1993年の「メルビル」航海で観測された熱水ブルーム中の濃度レベル(後述)に近づいて

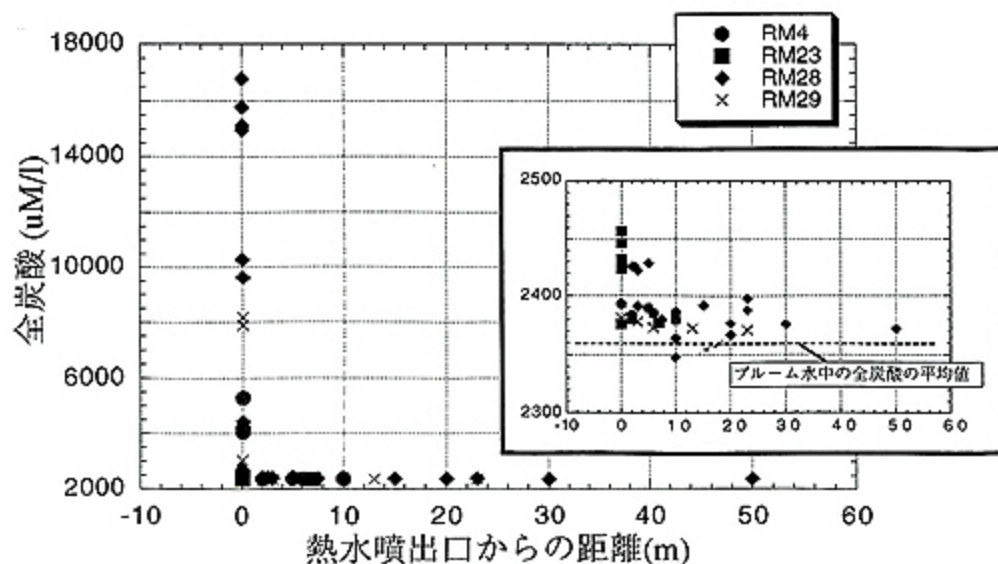


図 3 南部東太平洋中央海膨の各熱水域の熱水噴出口からの距離に対する全炭酸のプロット
Fig. 3 Distribution of total carbonate as a function of distance from hydrothermal active vents in the S-EPR.

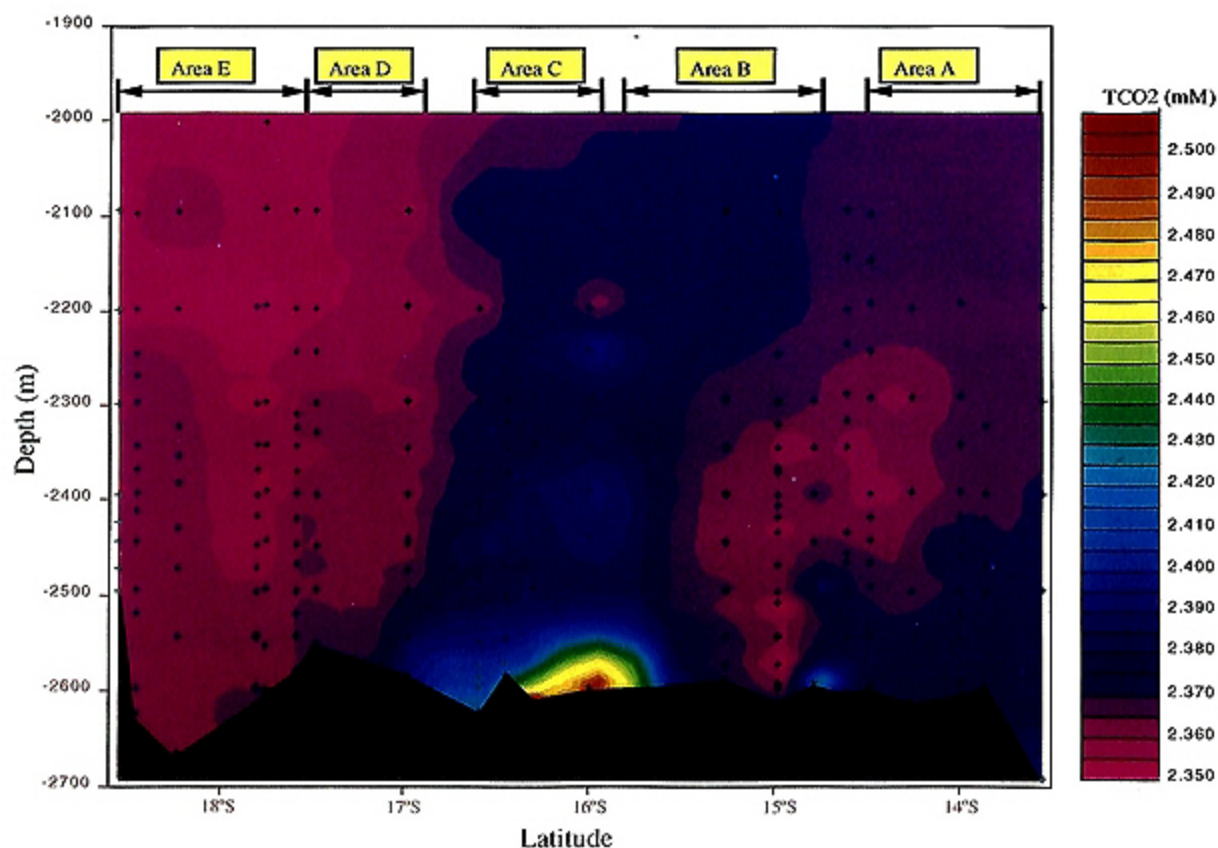


図 4 南部東太平洋中央海膨上における全炭酸の断面図
Fig. 4 View of total carbonate in the water column over the S-EPR.

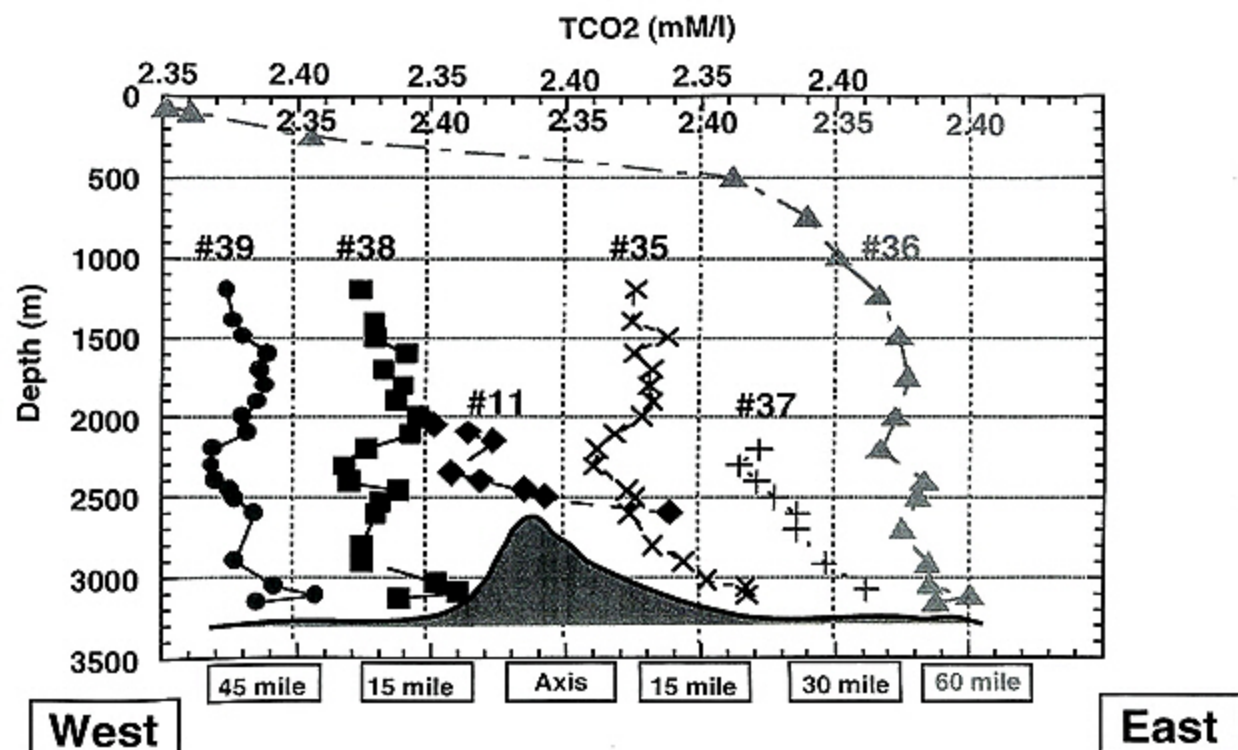


図5 南部東太平洋中央海膨15°Sにおける東西方向の全炭酸の鉛直分布 (図中の“Axis”は拡大軸を、それぞれの“mile”は拡大軸からの距離を示す)

Fig. 5 Vertical profiles of total carbonate for a short east-west section at 15°S on the S-EPR. (“Axis” is the spreading center, each “mile” is distance from the spreading center.)

いる。

さて、熱水噴出口から放出された二酸化炭素は、どのようにして海洋中へ拡がってゆくのだろうか。図4は1993年の調査において観測された、S-EPR上のウォーターカラム中の全炭酸の断面図である。この近辺の海域の通常海水中の全炭酸濃度は2.35mM程度であるが、16°S付近で最高2.50mMにも達する濃度異常が観測された。この図から、S-EPR上で起こっている熱水活動によって、二酸化炭素が海洋中に放出されてブルームを形成している様子がうかがえる。図5は、15°Sに沿ってS-EPRの拡大軸を東西方向に直交する測線上で得られた全炭酸の鉛直分布である。拡大軸から離れた深層水中に、通常海水に比べて高濃度の全炭酸を含む海水が検出され、この海水がS-EPRの東西方向の海底斜面に沿って広がっていることが分かる。また、西側の測点では、全炭酸濃度の低い太平洋海水との希釈混合による濃度の減少が見られる。しかしながら、この15°Sにおける全炭酸の濃度異常ブルームは、Lupton and Craig (1981)によって明らかにされたヘリウム-3の濃度異常ブルーム(15°SのS-EPR上500mの層を西方向にのみ広がっている)とは全く違った形をしている。図6は、その様

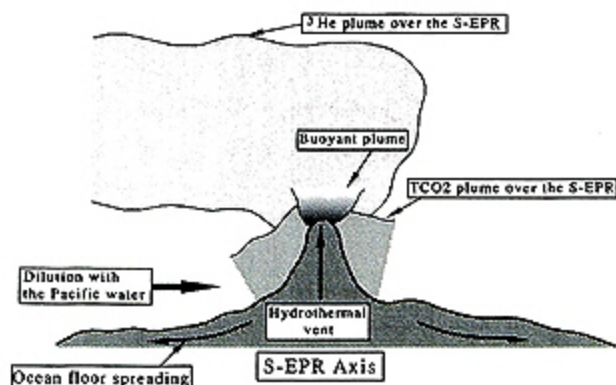


図6 南部東太平洋中央海膨15°Sにおける東西方向の全炭酸ブルームの模式図

Fig. 6 Schematic diagram of total carbonate plume for a short east-west section at 15°S on the S-EPR.

子を模式的に示したものであり、熱水噴出口から放出された後の両者は異なった挙動を示しながら拡散している。

今回観測されたような深海での全炭酸濃度の増加は他の(熱水活動のない)海域では検出された例はない。したがって、この全炭酸の濃度異常がS-EPRにおける熱水活動に由来しており、海底熱水活動によって二酸化炭

素が海洋中に供給されている可能性は高い。一方、海底熱水活動による直接的な二酸化炭素の供給以外に、メタン酸化細菌による二酸化炭素の生成、熱水性の細菌によって生産された有機物の酸化分解による二酸化炭素の生成、熱水活動によるカルシウムの供給に伴う炭酸カルシウムと二酸化炭素の生成などによって、深海底において二酸化炭素が供給されることが考え得る。しかし、これについても間接的ではあるが、海底熱水活動が関与している。すなわち、海底熱水活動によって直接的にも、間接的にも二酸化炭素が海洋中に供給されていると考えられる。このようなそれぞれの二酸化炭素の起源を識別するには、炭素同位体比の測定が有効であろう。

4. おわりに

これまでの研究で、海底熱水活動からの二酸化炭素のフラックスは、どの程度と見積もられているのであろうか。熱水試料中の $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$ 比をもとにした Gerlach (1989) の見積もりによると、中央拡大軸からの二酸化炭素の放出フラックスは、 $0.7 \pm 0.25 \times 10^{12} \text{ mol/年}$ と報告されている。また、Javoy and Pineau (1991) の同様の手法による見積もりでは $15 \times 10^{12} \text{ mol/年}$ と報告されている。これらの値は、化石燃料の消費によって大気中に放出される二酸化炭素のフラックスや、海洋表面での二酸化炭素の交換速度と比較すると 2~3 桁小さく、また、海洋の堆積物への炭素フラックスに比較して 1 桁小さい。したがって、中央拡大軸からの二酸化炭素の供給が海洋の炭素循環に与える影響は短期的（数年オーダー）には小さいことが予想される。しかし、 $10^6 \sim 10^7$ 年オーダーの長期間では膨大な量の二酸化炭素が海洋に供給されていたことになる。また、メガブルーム (Baker et al., 1987) のように、一時的に発生する大規模な海底熱水活動は通常の熱水活動の 1~3 桁程度大きな熱フラックスであることが知られているが、現在のところメガブルームからの二酸化炭素フラックスについては分かっていない。ホットスポットのような海底火山や背弧海盆系の海底熱水活動は、中央海嶺系と比べるとその存在は局所的ではあるが、先にも述べたようにそれらの熱水中には中央海嶺系の熱水よりも 10~100 倍も高濃度の二酸化炭素が含まれており、これからの二酸化炭素フラックスも重要である。

以上のことから考えると、海底熱水活動による海洋への二酸化炭素の供給は、決して無視できる量ではないことが想像できる。今後、個々の海底熱水活動からの二酸化炭素フラックスの実測や、それらの海洋における炭素

循環への寄与あるいは影響などを明らかにしてゆく必要がある。

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さま、湯川・井村両船長をはじめとする「よこすか」乗組員の皆さま、「メルビル」航海に際しては Al Arsenault 船長をはじめとする「メルビル」乗組員の皆さまには大変お世話になりました。試料の採取および船上処理・分析に際しては両航海の乗船研究員の皆さまにご協力いただきました。おかげさまで、有意義な試料を採取できました。記して深く感謝いたします。

引用文献

- Baker, E.T., G.J. Massoth and R.A. Feely (1987): Catalytic hydrothermal venting on the Juan de Fuca Ridge. *Nature*, **329**, 149-151.
- Gerlach, T.M. (1989): Degassing of carbon dioxide from basaltic magma at spreading centers: II. Mid-oceanic ridge basalts. *J. Volcanol. Geotherm. res.*, **39**, 221-232.
- 石橋純一郎, 大森 保, 園田 朗, ジョン・ラプトン, デヴィッド・バターフィールド, 下島公紀, 角皆潤, ケヴィン・ロー, ジョージス・パラディス, ジェームズ・ジェンドロン, グリー・マソス (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.
- Javoy, M. and F. Pineau (1991): The volatiles record of a "popping" rock from the Mid-Atlantic Ridge at 14°N : chemical and isotopic composition of gas trapped in the vesicles. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **107**, 598-611.
- Sakai, H., 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 回及び第

- 415 回潜航報告, 及び第 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.
- Sedwick, P.N., G.M. McMurtry and J.D. Macdougall (1992): Chemistry of hydrothermal solution from Pele's Vents, Loihi Seamount, Hawaii. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56, 3643-3667.
- 下島公紀・園田 朗・浦辺徹郎 (1994): 南部東太平洋中央海嶺における全炭酸の濃度異常. 1994 年度日本海洋学会講演要旨集, p.233.
- 下島公紀・園田 朗・浦生俊敬・浦辺徹郎・藤岡換太郎 (1995): インド洋中央海嶺および南部東太平洋中央海嶺における全炭酸のフラックス. 地球惑星科学関連学会 1995 年合同大会予稿集, p. 339.
- Urabe, T., E.T. Baker, J. Ishibashi, R.A. Feely, K. Marumo, G.J. Massoth, A. Maruyama, K. Shitashima, K. Okamura, J.E. Lupton, A. Sonoda, T. Yamazaki, M. Aoki, J. Gendron, R. Green, Y. Kaiho, K. Kisimoto, G. Lebon, T. Matsumoto, K. Nakamura, A. Nishizawa, O. Okano, G. Paradis, K. Roe, T. Shibata, D. Tennant, T. Vance, S.L. Walker, T. Yabuki and N. Ytow (1995): The effect of recent magmatic activity on hydrothermal venting along the superfast-spreading East Pacific Rise. *Science*, 269, 1092-1095.

(原稿受理: 1996 年 7 月 12 日)