

南奄西海丘で湧出している気泡の化学・同位体組成

千葉 仁^{*1} 酒井 均^{*2} 蒲生俊敬^{*3} 石橋純一郎^{*4}
中島和夫^{*2} 南 秀樹^{*5} 土橋 史^{*5}

南奄西海丘 C 凹地において、海底から湧出している気泡をはじめて採取した。気泡は、化学分析の結果、二酸化炭素 (87%) を主成分としていることが明らかになった。二酸化炭素に富む海底熱水活動が、伊是名海穴や伊平屋凹地に限られず沖縄トラフの広い範囲の特徴であることが示唆される。二酸化炭素の炭素同位体比、ヘリウムの同位体比、硫化水素の硫黄同位体比は、これらの気体がマグマ起源であることを示唆している。

Chemistry and Isotopic Composition of Bubbles Emerging from the Seafloor at the Minami-Ensei Knoll, Okinawa Trough

Hitoshi CHIBA^{*6} Hitoshi SAKAI^{*7} Toshitaka GAMO^{*8}
Jun-Ichiro ISHIBASHI^{*9} Kazuo NAKASHIMA^{*7}
Hideki MINAMI^{*10} Fumi DOBASHI^{*10}

Bubbles emerging from the seafloor at the Minami-Ensei Knoll were first sampled during 538 dive. They are composed of 87% of carbon dioxide, suggesting that the CO₂-rich sea-floor hydrothermal activities spread in the wide area of the Okinawa Trough. Carbon isotopic ratio of CO₂, ³He / ⁴He ratio and sulfur isotopic ratio of H₂S in the bubbles imply their magmatic origin.

-
- * 1 岡山大学地球内部研究センター
現在：九州大学理学部
 - * 2 山形大学理学部
 - * 3 東京大学海洋研究所
 - * 4 東京大学理学部
 - * 5 東海大学海洋学部
 - * 6 Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University
present address: Faculty of Science, Kyushu University
 - * 7 Faculty of Science, Yamagata University
 - * 8 Ocean Research Institute, University of Tokyo
 - * 9 Faculty of Science, University of Tokyo
 - * 10 School of Marine Science and Technology, Tokai University

1. はじめに

沖縄トラフにおける海底熱水活動は、伊是名海穴や伊平屋凹地において発見され、すでに多くの研究がなされてきている。それらの研究によれば、沖縄トラフの熱水系の熱水の化学的な特徴は、これまで研究されている他の地域の海底熱水系に比べて、カリウム、リチウム、アンモニアの濃度とアルカリ度が高いこと、そして最大の特徴は、二酸化炭素を主成分とする揮発性物質に著しく富んでいることである (Sakai et al., 1990 a)。南奄西海丘でも、橋本ら (1990) によって、15℃の温水の湧出と熱水性生物群集が報告されている。第538潜航では、南奄西海丘の熱水活動の調査を目的として潜航を行った。海況が厳しかったために短時間の潜航であったが、海底から湧出していた気泡をはじめ採取することができた。その化学・同位体組成について報告する。

2. 調査地点および試料

「しんかい2000」第538潜航により調査を行ったのは、南奄西海丘C凹地の南西から中央にかけてのルートである。「しんかい2000」の航跡図を図1に示す。このルートにおける水深は、700~712mである。

C凹地南西部はれき質の海底であるが、中央部に向かうにしたがって海底に泥がかぶり始める。航跡図の2のポイントの辺りから、白い変質帯と思われるものが所々にみられ、航跡図3のポイントにおいて海底から湧出している気泡を発見した。この気泡をアクリル製のM式採泥器 (蒲生

ら, 1991) により採取して持ち帰り、分析に供した。気泡の湧出孔の温度を白金抵抗温度計により計測した結果は、10℃であった (STDによる周囲の水温は、7.1℃)。

航跡図のポイント3と4の間から、海底に白色の巨れきが積み重なっている場所が多く見られるようになり、それが離底地点まで続いた。こうした巨れきの間の砂地の岩石や巨れきそれ自体にシンカイヒバリガイがコロニーを作って生息している場所が数多くみられた。こうしたシンカイヒバリガイのコロニーの周辺で気泡が海水中を上がっていくのが、少なくとも本潜航中に全部で9カ所みられた。潜航の最後に航跡図のポイント7のシンカイヒバリガイのコロニーで気泡のでている温水湧出孔 (10.3℃) から採水を試みたが、採水器の不調のため採水には失敗した。

M式採泥管に採取された気体試料は、酒井ら (1990) で報告されているのと同様に葡萄の粒を詰めたような形状で採泥管の上部にたまった。この粒は、「しんかい2000」が海底にいる間は、そのまゝの状態に保たれていた。しかし、浮上に伴う温度上昇と圧力降下により、酒井ら (1990) に示されているのと同様の相変化をして、最終的には、浮上するまでに気体となり、その一部は採泥管下部からの発泡により失われた。

3. 試料の分取・分析方法

M式採泥管に採取された気体試料は、「なつしま」船上で orsat 法により、二酸化炭素+硫化水素の量が分析された。残りの気体試料から、酒井ら (1990, 図3) に示されている気体試料簡易分離装置に真空ポンプを取り付けた改良型の装置を用いて、R-ガス (二酸化炭素と硫化水素を除いたガス) および生ガス (未処理のガス) の分取を行い、同位体比測定のために CO_2 と H_2S の固定を行った。実験室に持ち帰ったR-ガス中のメタン、窒素、水素濃度をガスクロマトグラフを用いて分析した。また、生ガスを用いて CO_2 の量もガスクロマトグラフにより再測定した。 H_2S 含有量の測定方法は、酒井ら (1990) と同じである。ヘリウムの同位体比、二酸化炭素の炭素同位体比、硫化水素の硫黄同位体比は、それぞれ専用の同位体比測定用質量分析計により測定した。

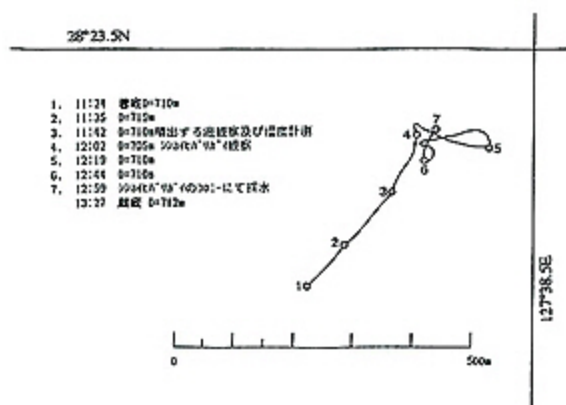


図1 Dive 538の航跡図
Fig. 1 Route map of Dive 538.

4. 分析結果および考察

測定された化学組成と同位体比を表1に示した。表1には、他の海底熱水系で測定されているガスや熱水中の溶存気体の化学・同位体組成も比較のために示してある。

4.1 化学組成

表1に示されているように、気泡の主化学成分は、二酸化炭素である。これによって、沖縄トラフでは、伊是名海穴 (Sakai et al., 1990b; 石橋ら, 1990) や伊平屋凹地 (石橋ら, 1990) と同様に南奄西海丘でも、中央海嶺の海底熱水系と比べて多量の二酸化炭素が熱水活動にともなって放出されていることが明らかになった。南奄西海丘は、伊是名海穴と伊平屋凹地から約70km北北東の沖縄トラフ内部に位置している。このようにこれまで知られていた熱水活動域と離れた地域でもCO₂を主成分とするガスが放出されていることは、二酸化炭素を主成分とする多量の揮発性成分を含む海底熱水活動が、沖縄トラフの広い範囲の特徴であることを示している。

すでに述べたように南奄西海丘C凹地では、分析された気泡と同様の化学組成を持つと思われる気泡が数多くの場所で海底からたちのぼっているのが観察された。同様な現象は、橋本ら (1990) によっても報告されている。こうした気泡が海底から湧出する現象は、海底下でCO₂-H₂O包接化合物のキャップによってCO₂が

蓄積されており、そこに水によって熱が運ばれて10℃ (気泡湧出域の水深における包接化合物の分解温度) の等温線が海底近くまで押し上げられることによって起きていると考えられている (酒井ら, 1990)。気泡が海底から数多くの場所でたちのぼっていることは、南奄西海丘C凹地では、10℃の等温線を海底近くまで押し上げられるだけ地下深部からの熱の供給量が多いことを意味している。したがって沖縄トラフの様に海底下に二酸化炭素が蓄積されている場所では、海底からの気泡の湧出は熱水系を探索する上で非常に良い指標になるであろう。現実には1991年度の本潜航の後の潜航によって南奄西海丘C凹地では、多数の熱水チムニーが発見され (橋本ら, 1991)、非常に活動的な海底熱水系であることが明らかになった。

もう一つの化学組成上の特徴は、気体中に占める硫化水素の割合が南奄西海丘の気泡では1%とほかの沖縄トラフの熱水系 (3~8%) に比べて低いことである。しかし、現在得られている値は相対値であり、H₂Sフラックスが少ないため、あるいは、CO₂フラックスが多いため、のどちらによってこのように見えているのか不明である。今後の熱水試料や火山岩試料の採取とそれら中の炭素と硫黄の濃度と同位体比の測定が待たれる。

R-ガスは、全気体成分中の11.8%を占め、伊是名海穴の熱水の溶存気体中のR-ガス濃度と比

表1 南奄西海丘の気泡と他の熱水系の気泡および熱水溶存ガスの化学組成と同位体比の比較

Table 1. Comparison of chemical and isotopic compositions among bubbles at the Minami-Ensei Knoll, bubbles at Izena and dissolved gases in hydrothermal fluids at other ridge systems.

Sample Name	Locality	Chemical Composition			Isotopic Composition		
		CO ₂ %	H ₂ S %	R-gas %	δ ¹³ C(CO ₂) ‰ PDB	δ ³⁴ S(H ₂ S) ‰ CDT	³ He/ ⁴ He R/Ra
538-M*	S. Ensei	87.2	1.0	11.8	-5.2	3.6	7.5
424-M*(1,2)	Izena	86±3	3.0	11±1	-5.0	8.0	6.6
424-RV4*(1,2)	Izena	92±1	4.4	4±1	-4.8	7.2	5.8
***,1,2)	Izena	91.1±1	5.5	3.5	-4.8	7.3	6.5
***,2,9)	Iheya	86	8.4	5.6	-4.4	-	3.9-4.1
***,3)	EPR 21°N	-	-	-	-7.0	1.3 - 5.5	7.8
***,4)	EPR 13°N	-	-	-	-5.5 - -4.1	1.7 - 4.9	7.5
***,5)	SJFR	-	-	-	-9.7 - -6.8	4.2 - 7.4	7.7-8.1
***,6)	Guaymas	-	-	-	-10.5 - -3.4	-	7.0
***,7)	MAR 23°N	-	-	-	-	4.9 - 5.0	8.4
***,8)	Maniana	-	-	-	-	3.6 - 4.8	8.6

* gas collected by M-type sampler.

** gas evolved from mud.

*** dissolved gas and/or dissolved species in the hydrothermal fluid.

1) Sakai et al. (1990). 2) Ishibashi et al. (1990). 3) Welhan and Craig (1983), Woodruff and Shanks (1988). 4) Merlivat et al. (1988).

5) Evans et al. (1988). 6) Welhan and Craig (1987), Lepton (1983). 7) Jean-Baptiste et al. (1991), Campbell et al. (1988).

8) Kusakabe et al. (1990), Craig et al. (1987). 9) Ishibashi (1990).

べて高い (表 1)。R-ガスの主成分は、メタン (R-ガス中で96%) であり、残りは N_2 (3%) と H_2 (1%) である。

4. 2 同位体組成とガスの起源

ヘリウムの同位体比を図2に示す。南奄西海丘の気泡のヘリウム同位体比は、地殻物質から由来したヘリウムの寄与が示唆されている伊平屋凹地のヘリウム同位体比よりもかなり大きな値を示している。さらに、伊是名海穴の熱水中の溶存気体や気泡、日本の陸上の多くの火山の火山ガスや温泉ガスのヘリウム同位体比よりも高く、中央海嶺の熱水系の熱水のヘリウム同位体比の範囲に入る。このことは、南奄西海丘の気泡中のヘリウムは、地殻物質による汚染をほとんど受けておらず、マントル起源のものが大部分を占めていることを示す。

二酸化炭素の炭素同位体組成を他の海底熱水系の文献値とともに図3に示した。南奄西海丘の二酸化炭素の炭素同位体比は、伊是名海穴の二酸化炭素の同位体比とはほぼ同じ値であり、同様の起源を持つものと推定される。また、-5.2パーミルという値は、MORB中の炭素の同位体比の範囲にも入り、さらに、薩摩硫黄島の高温の火山ガス中の二酸化炭素の炭素同位体比の範囲にも入っている。このことは、二酸化炭素がマグマ起源である可能性を示唆している。しかし、量的に多量な二酸化炭素をマグマからの直接的な脱ガスだけで

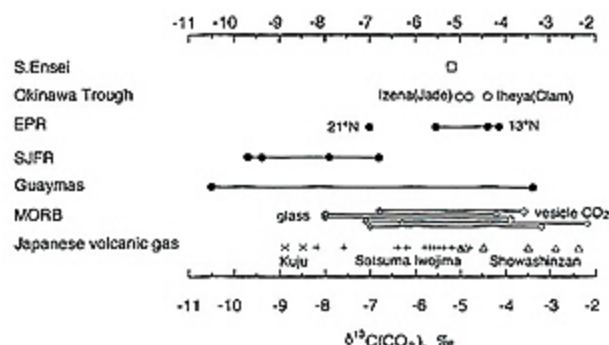


図3 気泡および熱水溶存ガスの二酸化炭素の炭素同位体比の比較

Fig. 3 Compilation of $\delta^{13}C(CO_2)$ of bubbles and dissolved gas in hydrothermal fluids.

MORB: Des Marais and Moore (1984). S. Iwojima and Kuju: Matsubaya et al. (1975). Showashinzan: Mizutani (1982)

まかなっているのか、あるいは、例えば炭酸塩や包接化合物などとして一度固定された二酸化炭素が分解されて湧出してきているのかについては、マグマの炭素含有量、その持っている熱量と大きさ、熱水の海底下における化学組成などを考慮したモデルによる検討が必要である。

硫化水素の硫黄同位体比を図4に示す。硫黄同位体比は、3.5パーミルと伊是名海穴と伊平屋凹地の硫化水素の硫黄同位体比の中間の値を示す。伊平屋凹地では、熱水系の浅部で海水起源の硫酸の還元が起きており、その結果として生じた硫黄

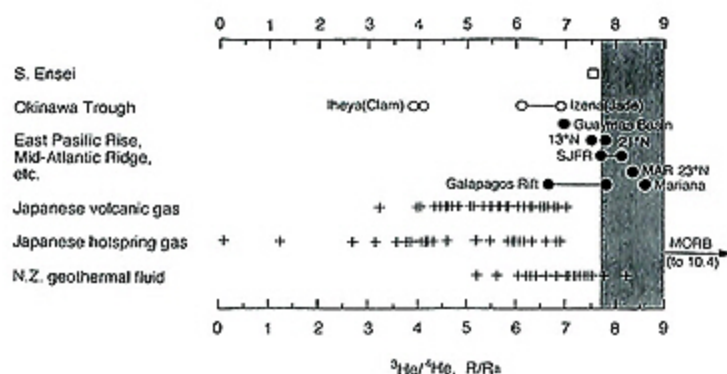


図2 気泡および熱水溶存ガスのヘリウム同位体比の比較

Fig. 2 Compilation of He isotopic ratios of bubbles and dissolved gas in hydrothermal fluids. Japanese volcanic gases: Marty et al. (1989). Japanese hot spring gases: Sano and Wakita (1985). N. Z. geothermal fluids: Torgersen et al. (1982)

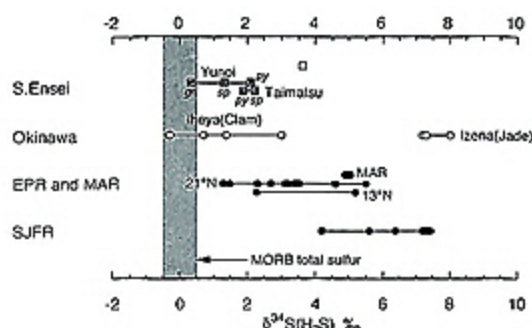


図4 気泡および熱水溶存ガスの硫化水素の硫黄同位体比の比較

Fig. 4 Compilation of $\delta^{34}\text{S}$ (H_2S) of bubbles and dissolved gas in hydrothermal fluids.

同位体比の低い硫化水素が一部混入していることが示唆されている (Gamo et al., 1991)。したがって、伊平屋凹地の硫化水素の硫黄同位体比は、南奄西海丘のものと直接比較する対象とはならない。このような熱水系浅部における硫酸還元の影響を受けていない伊是名海穴の熱水系の硫化水素の硫黄同位体比と比べてみると南奄西海丘の硫化水素の硫黄同位体比は明らかに低く、中央海嶺の熱水系の硫化水素の硫黄同位体比の範囲に入る。また、明らかに二次的な汚染を受けていると思われる岩石を除いた琉球弧の火山岩中の全硫黄の硫黄同位体比は、3.1~7.3パーミル (Ueda and Sakai, 1984) で、南奄西海丘と伊是名海穴の硫化水素の硫黄同位体比は、両者ともに、この範囲に入る。マグマから放出される硫黄化合物の同位体比は、マグマからの脱ガスの程度とマグマの分化にともなう硫化物鉱物の生成によって変化し (Ueda and Sakai, 1984)、さらには、海底から湧出する前の海底下での熱水からの硫化物鉱物の沈澱によっても影響を受ける。しかし、これらのプロセスによって引き起こされる同位体分別の大きさは小さく、熱水系浅部における硫酸還元起源の硫化水素の混入がないとすると南奄西海丘と伊是名海穴の硫化水素の同位体比の違いは、それぞれのマグマが持っている硫黄の同位体比の違いを主に反映していると考えられる。

図4には、第547~549潜航で南奄西海丘で採取されたチムニー中の硫化物鉱物の硫黄同位体比も示した (根建ら, 1991)。硫化物鉱物の硫黄同位体比は、気泡中の硫化水素のそれよりも低い。E.

P. R. 21°N やマリアナトラフの海底熱水系において、硫化物チムニーを構成する硫化物鉱物とチムニーから噴出している熱水中の硫化水素の両者の硫黄同位体比が測定されている (Woodruff and Shanks, 1988; Kusakabe et al., 1990)。二つの熱水系で観測されている硫化物鉱物と硫化水素の間の見かけの硫黄同位体分別の範囲は、-2.1~0.5パーミルである。今回採取された気泡中の硫化水素と根建ら (1991) によるチムニー中の硫化物鉱物の間の硫黄同位体比の開きもほぼこの範囲に入る。南奄西海丘で硫化物鉱物を生成させている熱水中の硫化水素の硫黄同位体比が、今回分析された気泡の硫化水素の同位体比と大きな隔たりがないことが示唆される。

5. ま と め

今回の調査により、南奄西海丘C凹地で海底から湧出している気泡の主成分が二酸化炭素であることが確認された。多量の二酸化炭素をとまなう海底熱水活動が、沖縄トラフの広い範囲の特徴であると推測される。気泡中の二酸化炭素の炭素同位体比、硫化水素の硫黄同位体比、ヘリウムの同位体比は、これらの気体がマグマ起源のものであることを示唆する。

二酸化炭素や硫化水素の絶対濃度の測定とその起源の詳しい研究のために、南奄西海丘の良質な熱水試料と火山岩の採取、それら中の二酸化炭素および硫化水素の濃度と同位体比の測定が今後の課題である。

6. 謝 辞

今回の南奄西海丘の潜航調査では、「しんかい2000」の運航チームの方々、「なつしま」の乗組員の方々にたいへんお世話になり、深く感謝いたします。本研究の一部は、文部省科学研究費・重点領域研究「海洋フラックス」No. 03248103 (代表者、酒井均) の補助を受けて行われた。

参考文献

- Campbell, A. C., Palmer, M. R., Klinkhammer, G. P., Bowers, T. S., Edmond, J. M., Lawrence, J. R., Casey, J. F., Thompson, G., Humphris, S., Rona, P. and Karson, J. A. 1988, Chemistry of

- hot springs on the Mid-Atlantic Ridge. *Nature*, 335, 514-519.
- Craig, H., Horibe, Y., Farley, K. A., Welhan, J. A., Kim, K.-R. and Hey, R. N. 1987, Hydrothermal vents in the Mariana Trough: Results of the first Alvin dive. *EOS*, 68, 1531.
- Des Maris, D. J. and Moore, J. G. 1984, Carbon and its isotopes in midoceanic basaltic glasses. *E. P. S. L.*, 69, 43-57.
- Evans, W. C., White, L. D. and Rapp, J. B. 1988, Geochemistry of some gases in hydrothermal fluids from the Southern Juan de Fuca Ridge. *Jour. Geophys. Res.*, 93, 15305-15313.
- Gamo, T., Sakai, H., Kim, E.-S., Shitashima, K. and Ishibashi, J. 1991, High alkalinity due to sulfate reduction in the CLAM hydrothermal field, Okinawa Trough. *E. P. S. L.*, 107, 328-338.
- 蒲生俊敬, 酒井均, 石橋純一郎, 大森保, 千葉仁, 下島公紀, 中島和夫, 田中善孝, 益田晴恵, 1991, 中部沖縄トラフ, 伊平屋凹地 (クラムサイト) における熱水性マウンドの構造的, 鉱物学および化学的特徴からみたマウンドの成長過程について: 「しんかい2000」第486, 487, 488回潜航報告, JAMSTEC DEEPSEA RES., 163-184.
- 橋本惇, 藤倉克則, 堀田宏, 1990, 南奄西海丘における深海生物群集の観察, JAMSTEC DEEPSEA RES., 167-179.
- 橋本惇, 藤倉克則, 三浦知之, 野上健治, 根建心具, 1991, 南奄西海丘における熱水噴出孔生物群集, 第8回しんかいシンポジウム予稿集, 37-39.
- Ishibashi, J. 1990, Geochemical studies of hydrothermal fluids in the middle Okinawa Trough Back Arc Basin. PhD thesis, 131p.
- 石橋純一郎, 佐野有司, 堀田宏, 蒲生俊敬, 堤真, 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, JAMSTEC DEEPSEA RES., 63-68.
- Jean-Baptiste, P., Charlou, J.L., Stievenard, M., Donval, J.P., Bougault, H. and Mevel, C. 1991, Helium and methane measurements in hydrothermal fluids from the mid-Atlantic ridge: the Snake Pit site at 23°N. *E. P. S. L.*, 106, 17-28.
- Kusakabe, M., Mayeda, S. and Nakamura, E., 1990, S, O and Sr isotope systematics of active vent materials from the Mariana backarc basin spreading axis at 18°N. *E. P. S. L.*, 100, 275-282.
- Lupton, J. E. 1983, Fluxes of helium-3 and heat from submarine hydrothermal systems: Guaymas basin versus 21°N EPR. *EOS*, 64, 723.
- Marty, B., Jambon, A. and Sano, Y. 1989, Helium isotopes and CO₂ in volcanic gases of Japan. *Chem. Geol.*, 76, 25-40.
- 松葉谷治, 上田晃, 日下部実, 松久幸敬, 酒井均, 佐々木昭, 1975, 薩摩硫黄島および九州の二, 三の地域の火山ならびに温泉についての同位体化学的調査報告, 地質調査所月報, 26, 375-392.
- Merlivat, L., Pineau, F. and Javoy, M. 1987, Hydrothermal vent waters at 13°N on the East Pacific Rise: isotopic composition and gas concentration. *E. P. S. L.*, 84, 100-108.
- Mizutani, Y. 1978, Isotopic compositions of volcanic steam from Showashinzan volcano, Hokkaido. *Japan. Geochem. Jour.*, 12, 57-63.
- 根建心具, 上野宏共, 小坂丈予, 野上健二, 橋本惇, 藤倉克則, 三浦知之, 1991, 沖縄トラフ南奄西海丘の海底熱水鉱床 — 特に構成鉱物について — 1991, 第8回しんかいシンポジウム予稿集 40-42.
- Sakai, H., Gamo, T., Kim, E.-S., Shitashima, K., Yanagisawa, F., Tsutsumi, M., Ishibashi, J., Sano, Y., Wakita, H., Tanaka, T., Matsumoto, T., Naganuma, T. and Mitsuzawa, K., 1990a, Unique chemistry of the hydrothermal solution in the Mid-Okinawa Trough Backarc Basin. *Geophys. Res. Lett.*, 17, 2133-2136.
- Sakai, H., Gamo, T., Kim, E.-S., Tsutsumi, M., Tanaka, T., Ishibashi, J., Wakita, H., Yamano, M. and Oomori, T., 1990b, Venting of carbon

dioxide-rich fluid and hydrate formation in Mid-Okinawa Trough Backarc Basin. *Science*, 248, 1093-1096.

- 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, 柳沢文孝, 堤真, 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, JAMSTECTR DEEPSEA RES., 69-85.
- Sano, Y. and Wakita, H. 1988, Precise measurement of helium isotopes in terrestrial gases. *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 61, 1153-1157.
- Torgersen, T., Lupton, J. E., Sheppard, D. S. and Giggenbach, W. F. 1982, Helium isotope variations in the thermal areas of New Zealand., *J. V. G. R.*, 12, 283-298.
- Ueda, A. and Sakai, H. 1984, Sulfur isotope study of Quaternary volcanic rocks from the Japanese Islands Arc. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48, 1837-1848.
- Welhan, J. A. and Craig, H. 1983, Methane, hydrogen and helium in hydrothermal fluids at 21°N on the east Pacific rise. in "Hydrothermal processes at seafloor spreading centers" ed. by Rona et al. 391-409.
- Welhan, J. A. and Lupton, J. E. 1987, Light hydrothermal gases in Guaymas basin hydrothermal fluids: thermogenic versus abiogenic origin. 71, 215-223.
- Woodruff, L. G. and Shanks W. C. 1988, Sulfur isotope study of chimney minerals and vent fluids from 21°N, East Pacific Rise: Hydrothermal sulfur sources and disequilibrium sulfate reduction. *Jour. Geophys. Res.*, 93, 4562-4572.