鹿児島湾「たぎり」海底熱水活動およびサツマハオリムシ化学合成生物群集生息環境の地球化学的研究

山中　寿朗[*1]　石橋純一郎[*2]　中野　綾子[*2]　梅木　優子[*2]　橋本　惇[*3]

桜島北東海底下に存在する若尊カルデラ内およびその東部海丘上では「たぎり」と呼ばれる活発な海底噴気活動がある。噴気と共に海底にゆらぎがあることは過去の潜航調査でも確認されているが, 1998年および1999年に行われた「ドルフィン3k」による潜航調査で初めて採水を行い, 高温のゆらぎが熱水活動であることが地球化学的に確認された。しかしながら, 熱水のエンドメンバーを推察するに充分な試料はこれまで得られていない。また, 化学合成生物群集のある海丘上では, 噴気は見られるものの熱水活動の兆候は認められていない。2001年に再び行われた「ドルフィン3k」による潜航調査で, カルデラ内の熱水および化学合成生物群集周辺の底層水を新規に開発した熱水採水装置などを用いて採水した。高温の熱水を採水することはできなかったが, 分析結果は1999年の試料と同様の傾向を示し, あらためてカルデラ底から湧出するゆらぎは海底下の熱源によって間隙海水が加熱され, 周辺岩石と相互作用しながら海底に噴出する熱水活動であることが確認できた。また, 化学合成生物群集周辺の底層水には熱水の兆候は確認されなかった。化学合成生物群集は既に同位体的研究からも示唆されている通り, "熱水"に依存しているわけではなく, 火山ガス中のメタンを用いた海底下の微生物由来硫化水素を利用する, 冷湧水型生物群集と同じメカニズムによって支えられていると考えられる。

キーワード：海底熱水活動, 鹿児島湾, 火山ガス, サツマハオリムシ

Geochemical study of seafloor hydrothermal system and chemosynthetic animal community around a submarine caldera, southern part of Kagoshima Bay, southern Kyushu, Japan

Toshiro YAMANAKA[*4]　Junichiro ISHIBASHI[*5]　Ayako NAKANO[*5]　Yuko UEKI[*5]　Jun HASHIMOTO[*5]

Many fumaroles have been in activity at Wakamiko submarine caldera floor and the summit of eastern knoll in the northern Kagoshima Bay. Around the fumaroles on the caldera floor shimmering fluids have been observed. Chemistry of the shimmering fluids and bottom water, which were collected from the caldera floor during the "Dolphin 3K" dive studies in 1998 and 1999, suggested that hydrothermal circulation had been occurred at the subseafloor. The fluid chemistry, however, was not enough for estimation of the chemistry of hydrothermal endmember. The shimmering fluids and bottom water were sampled again in 2001, and the fluid chemistry was similar with the previous report. On the other hand, chemistry of the bottom water previously and newly collected around the cluster of Vestimentiferan tube-worms at the summit of the knoll suggested that no hydrothermal activity were occurred. This result and previous isotopic study of the tube-worm suggest that the tube-worm depend on sulfide derived from bacterial sulfate reduction using fumarolic methane as an electron donor. It implies that a life style of the tube-worm is comparable with that of the communities of cold water seepages.

Keywords : Seafloor hydrothermal system, Kagoshima Bay, Fumarolic gas, Vestimentiferan tube-worm

＊1　筑波大学地球科学系
＊2　九州大学理学部
＊3　海洋科学技術センター・海洋生態環境研究部
＊4　Institute of Geoscience, University of Tsukuba
＊5　Faculty of Science, Kyushu University
＊6　Marine Ecosystems Research Department, Japane Marine Science and Technology Center

1. はじめに

鹿児島湾奥部の桜島北東海底には水深約200mのカルデラ状の凹地があり，若尊カルデラと呼ばれている（図1）。このカルデラのすぐ東側には頂上部の水深が80mの海丘があり，その頂上付近にはサツマハオリムシの大群集がある。カルデラ底および海丘上共に「たぎり」と呼ばれる噴気活動が活発で，桜島の火山活動と関連したものと考えられている（小坂ほか，1977）。また，カルデラ底には熱水活動と密接に関連した黒鉱様の硫化鉱物や熱水性石油の生成が認められており，活発な熱水活動があると考えられている（Yamanaka et al., 1999）。しかしながら，本海域においては熱水の地球化学的特徴を明らかにする目的で調査が始められたのはごく最近で，1998年の「ドルフィン3k」潜航調査以降である。これまでのところ熱水エンドメンバーを推定するにたる純度の高い熱水の採取には至っていない。また，当初，熱水性生物群集であると考えられていたサツマハオリムシは，コロニー周辺で採水した試料からは熱水の兆候が認められず（山中ほか，1999），同位体地球化学的にも熱水および噴気中の硫化物とは無関係に生育している可能性が示唆されている（根建ほか，1997）。

そこで，本研究では，熱水活動の地球化学的特徴を明らかにする目的で2001年に行われた「ドルフィン3k」潜航調査でROVでも利用可能な新規開発したシリンジ採水器などを用いて再び熱水試料の採取を行い，その分析結果を報告する。さらに，これまで同海域で得られた地球化学データから，化学合成生物群集と同海域の地球化学環境について議論を行う。

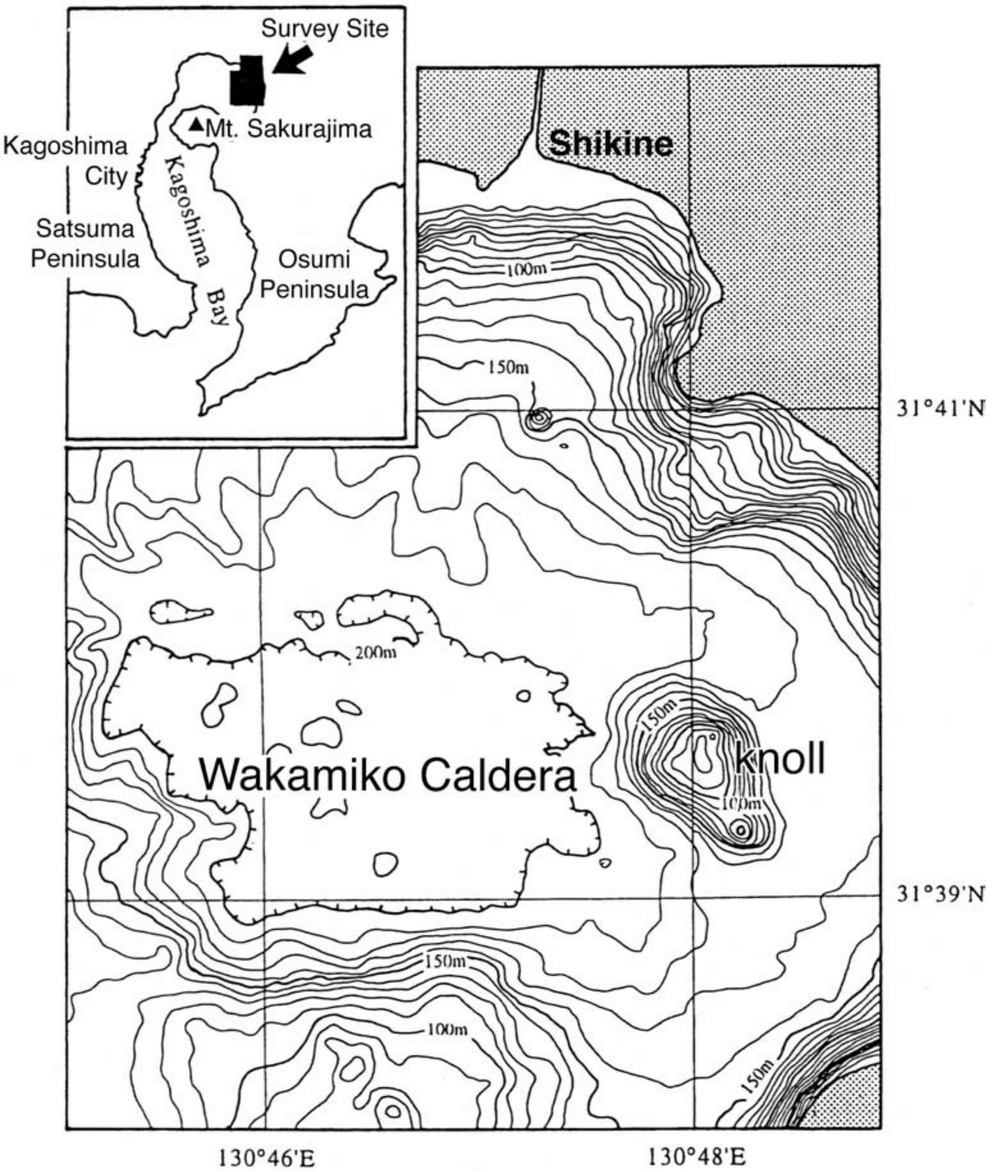

図1　調査海域海底地形

Fig. 1　Bathymetry map of survey area

2. 試料採取および実験方法

2001年6月に行われた「ドルフィン3k」による潜航踏査によって，地球化学的研究に用いられる試料の採集が行われた。図2に1997年以降2001年まで，本海域で行われた「ドルフィン3k」潜航調査の航跡図の一部を示す。図2aは水深200mのカルデラ底，bはサツマハオリムシ群集のある海丘上の航跡図である。図内の○は採水もしくはガス採集が行われた場所を示す。この図から，これら海域における調査は1997年以来，ほぼ同じ場所で試料採集が繰り返し行われていることがわかる。またサツマハオリムシの採集および観察も限られた範囲内で行われていることがわかる。海底噴気孔はカルデラ底に広く分布することが報告されている（小坂ほか，1992）。 熱水の湧出孔は噴気孔と同一ではなく，隣接してはいるが同時に湧出していないことがこれまでの観察からわかっている。これまでのところ，熱水チムニーは確認されておらず，湧出規模も大きくないため採水に適した熱水湧出孔の探索に時間を要した。なお，本年度の調査は鹿児島一帯で大雨が降った数日後に行われ，そのため海表面は周辺から流れ込んだ泥水によって著しく濁っていた。また，数日前の雨が原因か明らかではないが，ハオリムシも数センチの厚さの泥によって覆われていた。

今回，熱水試料の採取には従来から利用されていた真空びき採水器とは別に，新たに開発されたシリンジ式微小量熱水採取器を用いている。この採水器は低温の熱水湧出地帯から化学環境を乱さないようにゆるやかに噴出する熱水を採取することを目的として開発されたものである。このために試料の吸引速度を0.2mL/secとかなり低く抑えるように設計されている。図3にこの採水器の概念図を示した。全長

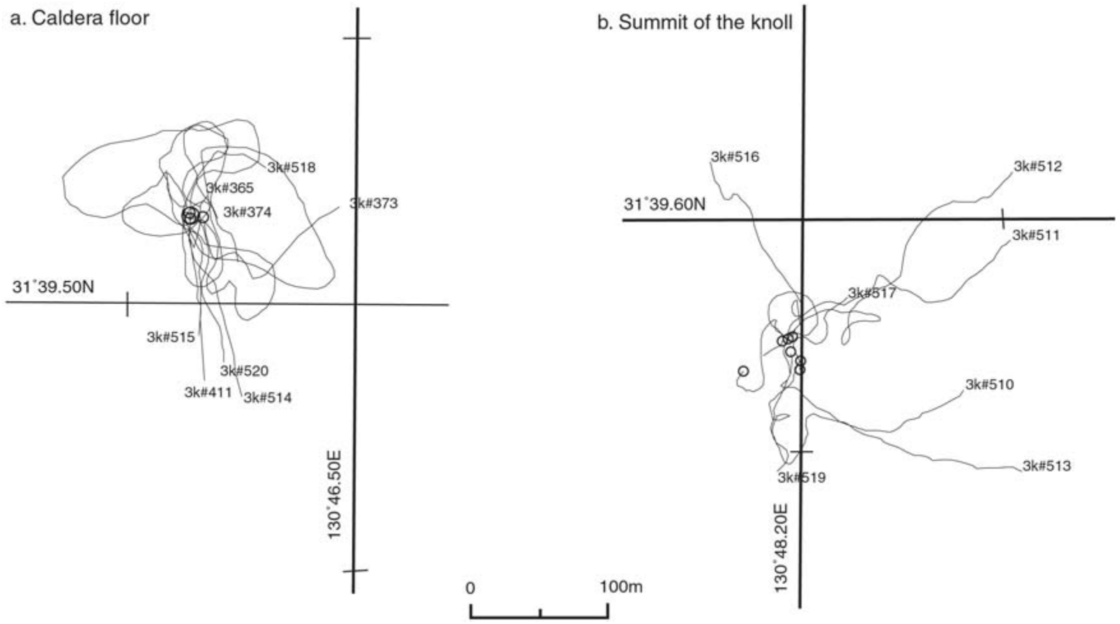

図2　ドルフィン3k航跡図。
a）カルデラ底サイト（水深200m），b）海丘上サイト（水深100m）。○はこれまで試料採集が行われた地点。

Fig. 2　Track chart of Dolphin 3k.
a) Caldera floor (200m depth), b) summit of the knoll (100m depth). Open circles indicate the sampling points.

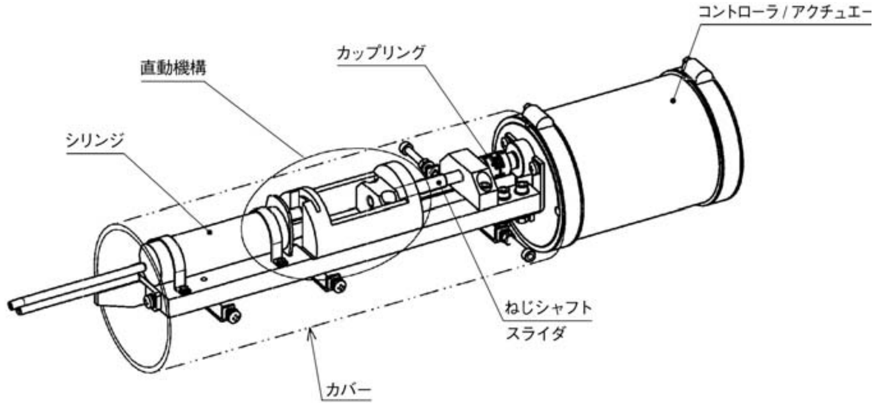

図3　微小量熱水採取器の概要

Fig. 3　Scheme of a syringe fluid sampler

は480mm，外径はアクリルカバー装着時で110mmである。試料採取はねじが回転しピストンを引くことにより力学的に行われる。作動制御はマグネットスイッチとタイマーによっている。動力源としては通常の9V箱型電池1個で十分に作動し，ROVからの電力供給を必要としない。直動機構の一端に，市販の滅菌シリンジ（50mL）をセットして試料採取容器とする。今回の鹿児島湾調査では試料水中の溶存ガス量が多いと予測されたので，爆発的な脱ガスを防ぐためにシリンジに1ヵ所小穴を空けておいた。またシリンジの先には逆止弁付きのテフロンチューブを接続して採取した試料が逆流しないようにした。今回の潜航調査では，採取時の熱水の温度を知るため自己記録式温度計と組み合わせての使用を試みた。温度計はシリンジを支えるテフロン板の裏に抱き合わせ，採水器の採取口であるテフロンチューブ先端を温度計のセンサー近傍に固定した（写真1を参照）。試料採取のための操作としては，まず，コントローラのパワーをONにして，マグネットのついた採水器ホルダー内に納めた状態で潜航する。本体がマニュピレーターによって採水器ホルダーから取り出されるとタイマーが発動し，一定時間後にねじが自動的に回転を始める（今回はねじ始動までの時間を2分間に設定した）。ねじの回転によりピストンが移動して，チューブを通してシリンジ内に試料が吸引される。ねじの回転はモニターされており，一定数の回転の後に自動的に停止する。これにより毎回一定量の試料が採取できる（今回の試料採取量は20mLに設定したので作動時間は100秒であった）。動作完了後はシリンジを外せば容易に試料を回収することができる。

写真1　微小量熱水採取器
（自己記録式温度計と組み合わせての使用例）
Photo 1　A syringe type fluid sampler with a temperature recorder

微小量熱水採水器とともに底層水を採取するため2.7lのニスキンボトルを「ドルフィン3k」の前方上部に取り付けた。採取した水試料は船上にて硫化水素，アンモニアの定量を行い，残った試料は実験室に持ち帰った後，主成分やシリカの定量を行った。

3. 結果

1998年より2001年の間の潜航調査で得られた熱水試料の化学分析の結果の一例を図4に示した。横軸は熱水成分の指標物質として良く使われるシリカ(SiO_2)の濃度をとっている。今回微小量熱水採取器を用いて200mのカルデラ底サイトから採取した試料のシリカ濃度は300μM/kgを越えており，これまでに採取された試料の中で最も熱水成分を多く含むものであった。熱水採取時の温度の平均値は20.9 ℃であり，周囲の海水温度である16 ℃よりは確実に高いものであった。なお，採取地点を探索する間の最高温度は40 ℃であり，期待されたほどは高い温度は今回観測されていない。また図にもあきらかなように水深100mの海丘上サイトから得られた試料（＋印で示した）はシリカ濃度が海水とほとんど変わらないものばかりであった。サツマハオリムシ集落内に微小量熱水採水器を突っ込んで行われた試料採取時に計測された温度も16 ℃で周囲の海水と同じ温度であった。

図4に示したアンモニア濃度やマグネシウム濃度とシリカ濃度の関係においてカルデラ底サイトから採取された試料について良好な直線関係がみられることは，このサイトに熱水の供給があることを強く示唆するものである。高温の熱水があることを仮定してMg濃度が0になる純粋な熱水成分のシリカ濃度を推算すると4-5mM/kgとなり200 ℃前後の熱水が海底下に存在することを暗示している。この程度の熱水温度条件下で有機物が分解してアンモニアが熱水に供給されるという説明は，熱水のアンモニア濃度が高くなっていることと調和的である。

一方海丘上サイトから採取された試料は，カルデラ底サイトから得られた試料とは明らかに異なる関係が図にあらわれている。これは両者の間で湧水の供給源が異なっていることを強く示唆している。海丘上サイトの試料は，高温での岩石との熱水反応で熱水に取り込まれるシリカの濃度が海水とほとんど変わらないことから，このサイトでは高温の熱水は存在しないことが示唆される。

なお，硫化水素濃度は各サイトそれぞれ1試料測定を行った。カルデラ底において微少量採水器にて採取したガスの溶け込んだ水では266μM/kgと高いが，ハオリムシ群集に微少量採水器を差し込んで採取した水では1μM/kg以下の非常に低い濃度であった。

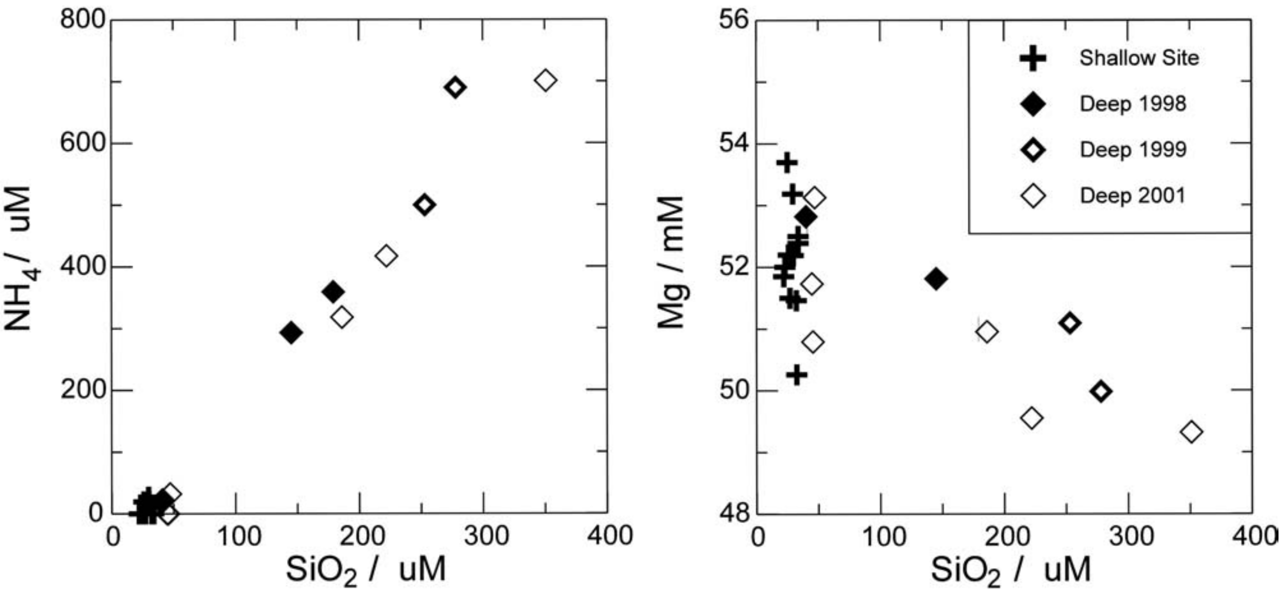

図4　熱水試料のSiO_2濃度とNH_4濃度との関係（左）およびMg濃度との関係（右）

Fig. 4　Relationships between SiO_2 and NH_4 concentrations (left) and SiO_2 and Mg concentrations (right) of fluid samples

4. 考察

以上の分析結果から，水深200mのカルデラ底サイトで採水された熱水の組成は2年前の潜航でほぼ同一地点で採取された熱水組成化からあまり変化していないことが確認され，少なくとも2年間は定常的な熱水活動が続いていることを示唆している。しかしながら，熱水エンドメンバーを推定するにたる試料は採水できておらず，同海域における熱水活動の全容はまだ闇の中である。1991年と1992年に行われたカルデラ内での潜航調査によってカルデラ底に多くの噴気孔があることが報告されている（小坂ほか，1992）。1999年および2001年の潜航調査では図2の「ドルフィン3k」の航跡から明らかなように，同一点に繰り返し潜航を行ったにすぎない。今後は，純度の高い熱水の採水に適した噴出孔を探索すると共に，熱水採水の実績を多く積んだ東大海洋研式ポンプ採水器による熱水の採水が行われることが期待される。

水深100mの海丘上サイトで採水されたサツマハオリムシ群集周辺海水の組成は，やはり群集近辺での熱水活動を裏付けるような結果は得られず，あらためて，熱水活動が起こっていないことが確認された。根建ほか（1997）による群集近傍で採取された噴気ガス（硫化水素：$\delta^{34}S$ = +6～+7‰（対CDT値））や底質中硫化物（黄鉄鉱：$\delta^{34}S$ = -29～-20‰）とサツマハオリムシ軟組織の硫黄同位体組成（有機硫黄：$\delta^{34}S$ = -25‰）は，サツマハオリムシの鰓内共生細菌がエネルギー源としてバクテリア起源の同位体的に非常に軽い底質中硫化物を利用していることを示している。群集内やその近傍の噴気ガスには約1％前後の硫化水素が含まれている（小坂ほか，1992）が，サツマハオリムシ軟組織硫黄同位体組成はこの硫化水素の硫黄同位体組成とは明らかに異なる。また，今回の分析結果も周辺海水には有意な硫化水素濃度は検出できておらず，サツマハオリムシが鰓から硫化水素を取り込んでいるとは考えにくい。噴気ガスには硫化水素と共に多量のメタン（5～20％）が含まれており（小坂ほか，1992），大陸縁辺の冷湧水域同様，このメタンを用いた微生物的硫酸還元が堆積物中で起こっていると考えられる。サツマハオリムシと極めて近縁なハオリムシは冷湧水帯である初島沖などにも生息が確認されている（藤倉ほか，1995）。鹿児島湾においては，メタンの起源はマグマからの脱ガスや堆積有機物の熱分解生成物であり（山中ほか，1998），冷湧水帯のような微生物起源のメタンではないが，冷湧水帯と同様にメタンの湧出がサツマハオリムシの生育を支えていると推察される。今後は堆積物中の間隙水を詳細に調べることによって，サツマハオリムシの生育を支えている地球化学環境を明らかにできると考えられる。

謝辞

本研究を行うに当たり，「ドルフィン3k」運行チームおよび「なつしま」乗組員の皆様には大変お世話になりました。また，海洋科学技術センターの三宅裕志博士および渡部元博士には船上作業にご理解とご協力頂きました。なお本研究で用いられた微小量熱水採水装置の開発は，科学技術振興調整費総合課題「海底熱水系における生物・地質相互作用の解明に関する研究」の一環として行われたものである。同装置の開発・設計・製作・試験にあたっては日油技研工業（株）の小嶺哲也・菅野亨・佐藤智郎の各氏にご尽力いただいた。記して深く感謝いたします。

引用文献

藤倉克則・橋本惇・藤原義弘・奥谷喬司（1995）：相模湾初島沖化学合成生物群集の群集生態．JAMSTEC深海研究，**11**, 227-241.

橋本惇・藤倉克則・三浦知之・小坂丈予（1993）：有光層における

ハオリムシの発見. しんかいシンポジウム報告書, **9**, 321-326.

Hashimoto, J., Miura, T., Fujikura, K. and Ossaka, J. (1993) : Discovery of vestimentiferan tube-worms in th euphotic zone. Zool. Sci., **10**, 1063-1067.

根建心具・三浦知之・橋本惇(1997)：鹿児島湾 "たぎり" 活動に伴う硫黄の挙動. 第14回しんかいシンポジウム予稿集, 35-36.

根建心具・上野宏共・大木公彦・志賀美英・早坂祥三・小坂丈予・野上健治・伊藤信夫・橋本惇(1991)：鹿児島湾北部, 若御子カルデラの "たぎり" 湧出部における底質および硫化物脈. 海洋科学技術センター試験研究報告, 235-243.

小坂丈予・平林順一・野上健治・黒崎誠・橋本惇(1992)：鹿児島湾北部の海底噴気ガス成分の変化と火山活動の推移. しんかいシンポジウム報告書, 75-80.

小坂丈予・平林順一・小沢竹二郎・大西富雄・坂本隼雄(1977)：鹿児島湾奥部の海底泥と噴気ガスに関する研究. 文部省総合研究報告書, 48-63.

Yamanaka, T., Mizota, C., Murae, T. and Hashimoto, J. (1999) : A currently forming petroleum associated with hydrothermal mineralization in a submarine caldera, Kagoshima Bay, Japan. Geochem. J., **33**, 355-367.Yamanaka, T., Ishibashi, J. and Hashimoto, J. (2000) : Organic geochemistry of hydrothermal petroleum generated in the submarine Wakamiko caldera, southern Kyushu, Japan. Org. Geochem., **31**, 1117-1132.

山中寿朗・石橋純一郎・佐竹洋・溝田智俊・佐藤雅規・木川田喜一・橋本惇 (1998)：鹿児島湾海底カルデラ内における火山および熱水活動に伴った石油の生成. 日本地球化学会年会予稿集, 九州大学.