

水曜海山海底熱水活動の分布・様式と地殻構造の関連性の解明 —KR01-15かいれい調査航海序報—

○石橋純一郎*¹ 島 伸和*² 石井 浩介*³ 岡村 慶*⁴ 海宝 由佳*⁵ 加賀谷昌弘*⁶
 亀尾 桂*⁷ 辻野 匠*³ 角皆 潤*⁸ 徳山 英一*⁷ 中川 書子*⁹ 中村 光一*³
 中村 恭之*⁷ 西村 清和*³ 野田 雅一*¹⁰ 東 陽介*¹¹ 丸茂 克美*³ 村上 文敏*³
 山本富士夫*¹² 山中 寿朗*¹³ 渡辺 正晴*⁷

島弧のマグマ活動に伴う海底熱水活動の総合調査を目的として、2001年12月にKR01-15研究航海を伊豆小笠原弧の水曜海山を主対象海域として実施した。海底面の精密マッピングと地球物理学的構造探査を行った結果、カルデラ底直下の数kmまでの浅い領域に熱水帯水層やマグマだまりと想定される構造が、また西側のカルデラ壁直下に強い熱水変質を示唆する構造が見られた。採泥された表層堆積物の地質学的解析から、カルデラ底が主に粗粒の火山性碎屑物に覆われていることが示された。周辺水塊の地球化学的・微生物学的研究によって、カルデラ内側に熱水ブルームが分布し化学成分の異常と微生物群集の発達が観測されること、カルデラの地形障壁によって外洋へのブルームの漏れだしが限定されていること、が明らかになった。これらの結果から島弧型熱水活動の特徴として、(1)熱水循環系が火山性碎屑層中に発達し比較的浅いマグマの活動に強く影響されている、(2)熱水ブルームの分布が火山カルデラ地形から大きな影響を受けている、ことが示された。

キーワード：海底熱水活動・島弧マグマ・火山性碎屑堆積物・海底カルデラ・熱水ブルーム

-
- * 1 九州大学大学院理学研究院
 - * 2 神戸大学内海域機能教育研究センター
 - * 3 産業技術総合研究所海洋資源環境部門
 - * 4 京都大学化学研究所
 - * 5 海洋科学技術センター深海研究部
 - * 6 千葉大学大学院自然科学研究科
 - * 7 東京大学海洋研究所
 - * 8 北海道大学大学院理学研究科
 - * 9 東京工業大学大学院総合理工学研究科
 - * 10 東北大学大学院理学研究科
 - * 11 産業技術総合研究所生物遺伝子資源研究部門
 - * 12 (株) 海洋先端技術研究所
 - * 13 九州大学大学院比較社会文化研究院
 - * 14 Faculty of Science, Kyushu University
 - * 15 Research Center for Inland Seas, Kobe University
 - * 16 Institute for Marine Resources and Environment, AIST
 - * 17 Institute for Chemical Research, Kyoto University
 - * 18 Deep Sea Research Department, JAMSTEC
 - * 19 Graduate School of Science and Technology, Chiba University
 - * 20 Ocean Research Institute, University of Tokyo
 - * 21 Graduate School of Science, Hokkaido University
 - * 22 IGSSE, Tokyo Institute of Technology
 - * 23 Graduate School of Science, Tohoku University
 - * 24 Institute for Biological Resources and Functions, AIST
 - * 25 Ocean High Technology Institute Inc.
 - * 26 Graduate School of Social and Cultural Studies, Kyushu University

Interactions within seafloor hydrothermal system in Suiyo seamount arc volcano -Preliminary report of KR01-15 Cruise

○Jun-ichiro ISHIBASHI*¹⁴ Nobukazu SEAMA*¹⁵ Kosuke ISHII*¹⁶ Kei OKAMURA*¹⁷
Yuka KAIHO*¹⁸ Masahiro KAGAYA*¹⁹ Katsura KAMEO*²⁰ Takumi TSUJINO*¹⁶
Urumu TSUNOGAI*²¹ Eiichi TOKUYAMA*²⁰ Fumiko NAKAGAWA*²² Ko-ichi NAKAMURA*¹⁶
Yasuyuki NAKAMURA*²⁰ Kiyokazu NISHIMURA*¹⁶ Masakazu NODA*²³ Yosuke HIGASHI*²⁴
Katsumi MARUMO*¹⁶ Fumitoshi MURAKAMI*¹⁶ Fujio YAMAMOTO*²⁵ Toshiro YAMANAKA*²⁶
Masaharu WATANABE*²⁰

We conducted KR01-15 cruise in December 2001, in order to investigate a seafloor hydrothermal system in Suiyo Seamount. Geophysical exploration and mapping revealed existence of magma at shallow depth and record of intense hydrothermal alteration. Geological sampling indicated that the caldera floor is covered with volcanoclastic sandy sediment. Geochemical and microbiological survey showed intense plume in the water column above the hydrothermal field and its sporadically leak over the caldera wall. The hydrothermal system associated with arc magmatic activity is characterized as fluid circulation within permeable volcanic sediment activated by shallow magma, and plume evolution strongly influenced by topographic barrier of the caldera wall.

Keywords : seafloor hydrothermal system, island arc magma, volcanoclastic sediment, submarine caldera, hydrothermal plume

1. はじめに

KR01-15調査航海は、岩石圏・水圏・生物圏の相互作用の場として海底熱水活動をとらえる視点から総合的な解析を行うことを目的として、地球物理学・地球化学・微生物学・地質学の分野の研究者が一堂に会して行われた。海底熱水活動は海洋の地殻内の熱源を海水が循環して効率的に冷却するシステムとして岩石圏と水圏の境界領域に発達する。その発達は、熱源であるマグマと水が移動するための断裂系の形成により規制されている。海底面上の熱水活動の分布規模や熱水地帯直下の構造を把握することは、海底火山のマグマ活動・地殻構造と熱水循環系との関連性を探る上で重要な知見となる。また熱水循環系は、熱水反応により岩石やマグマから取り込んだ元素を熱水の噴出とともに海洋へ供給することで、岩石圏と水圏の間の物質輸送機関として働く。この物質輸送は、熱水活動地帯に豊かに発達した生物圏を支えるために不可欠である。熱水地帯周辺海域の水塊や海底表層堆積物中の熱水由来物質の分布と諸相を把握することは、海底熱水活動が周辺海域、特に微生物圏の活動にどのような影響を与えているのかを定量的に議論するための基礎的なデータとなる。

このような総合的な海底熱水活動の調査を行う対象海域として伊豆小笠原弧をテストフィールドとして選び、「島弧型」熱水活動の特徴を抽出して中央海嶺の熱水活動との比較対照を行うことをめざした。伊豆小笠原弧は代表的な海洋性島弧であり、島弧フロント上の海底火山である水曜海山と明神海丘に活発な熱水活動が発達している(図1)。両者ともに

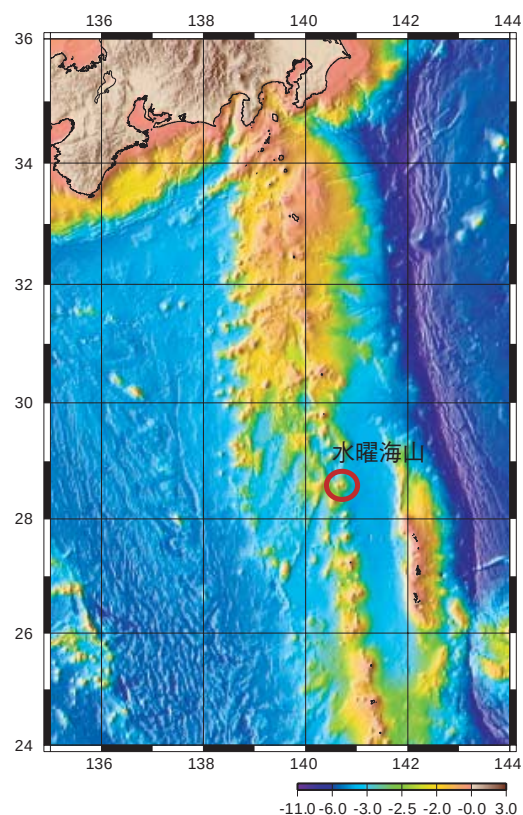


図1 伊豆小笠原弧の海底地形と水曜海山の位置。

Fig. 1 Map showing Izu-Bonin trench-arc-backarc system and location of Suiyo seamount.

中央海嶺の熱水系に匹敵する300°C前後に達する高温の活発な熱水活動であることが、これまでの「しんかい2000」潜航調査により明らかにされている(渡辺ほか, 1994; 飯笹ほか, 1998; Iizasa et al., 1999)。また伊豆小笠原弧の大部分は陸から離れており熱水反応に寄与する陸源堆積物の影響をあまり考える必要がない点でも、中央海嶺の熱水系と比較しやすい。本調査研究によって得られた伊豆小笠原弧の海底熱水活動の特徴を中央海嶺のものと対比することで、島弧と海嶺の本質的な相違—すなわち海底マグマ活動および海底を構成する地殻物質の構造的特徴や化学的性質の相違—が、海底熱水活動の分布・様式をどのように支配しているのかを明らかにできることが期待される。さらに、伊豆小笠原弧は1000kmを越える長さにわたって分布しており、熱水活動が海洋に与える役割を考える上でも重要な研究対象と考えられる。全地球的な視点から海底熱水活動を考えるためにも、「島弧型」熱水活動の典型例として伊豆小笠原弧の海底熱水活動を総合的に解析することは重要な意義を持っている。

2. 熱水系地下構造探査

熱水循環系の全体像を把握することを目的として、地球物理学的研究として海底面の精密マッピングと構造探査を行い、海底火山のマグマ活動や地殻構造と熱水循環系の関連を探った(Seama et al., 2002)。「かきれい」搭載機器であるシービーム・船上重力計・プロトン磁力計・船上三成分磁力計による探査に加えて、4台の海底地震計による速度構造探査を行った。熱水循環系が存在する水曜海山西峯のカルデラ地形は長辺2kmに満たない小さなものなので、深海曳航式の各種探査機器(サイドスキャンソナー・音波探査システム・三成分磁力計)を用いて、100m程度の高い距離分解能での探査を行なった。これらの曳航体にはトランスポンダーを取り付けて「かきれい」のSSBLシステムによりこれを追跡し、正確な位置を確認しながら曳航を行った。

図2に、「かきれい」のシービームにより作成された水曜海山全体の地形図ならびに散乱強度分布図を示す。水曜海山はほぼ東西にならぶ2つの峯を持っている。その延長方

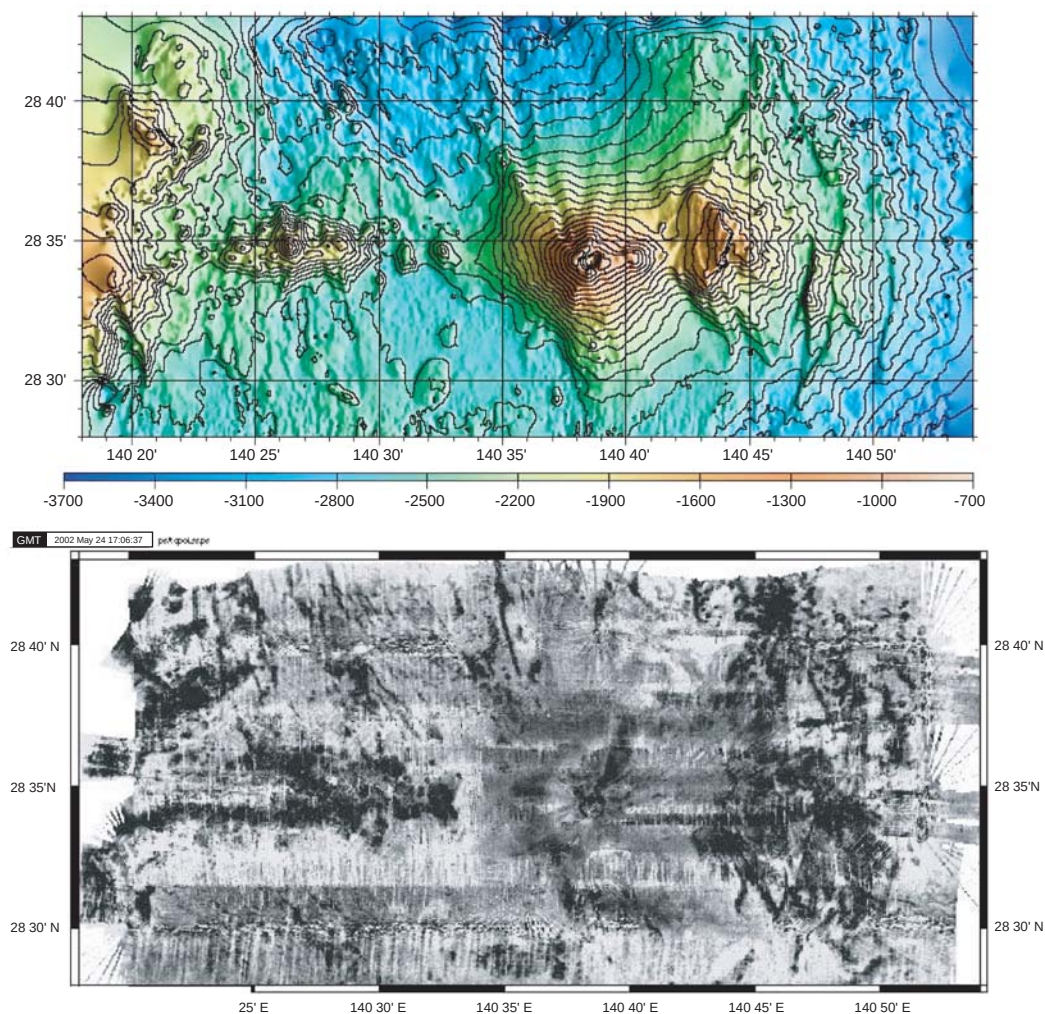


図2 SeaBeam2112による水曜海山付近の地形図(上図)ならびに散乱強度分布図(下図)。北北東側のカルデラ壁は低くその斜面に崩壊を思わせる散乱も見られる。

Fig. 2 Bathymetry (top) and backscatter image (bottom) over the Suiyo seamount area, which were derived from the SeaBeam2112 data. A collapse occurred in NNE side of the caldera after its formation.

向に他の小規模な火山地形が見られ、また南北方向に伸びたグラベン構造も見られることから、広域的には東西方向の伸張場であると考えられる。熱水地帯は西峯頂部にある火口カルデラの底に広がっている。このカルデラ地形は北東-南西方向に少し伸びている。散乱強度分布図から、西峯の山体は散乱の低い物質、おそらく火山性碎屑物で覆われていることが示唆される。また、カルデラ壁がもっとも低い北北東斜面において崩壊が起こっていることも見てとれる。

図3は、カルデラ近傍の磁化分布を深海曳航式磁力計により得られたデータをもとに推定し、カルデラ地形と比較したものである。右図で青色で示した磁化の弱い部分がカルデラ西側領域に広がっており、カルデラの東側とは区別されることがわかる。熱水変質によって磁化が失われたと考え、この磁化分布はかつての熱水循環系が西側に集中していたことを示唆する。またこのカルデラ近傍を除くと水曜海山西峯山体は正磁極期に磁化しており、その生成年代が0.78Ma以後のブリュンヌ期であることがわかる。

図4に、深海曳航式地震波探査システムとGIガンにより得られた反射法地震波記録を示す。カルデラ直下では2つの層が認められ、その層厚は中央部で、上層約0.015秒(約11m)および下層約0.03秒(約23m)である。これらの層厚は西に行くほど厚くなる傾向があり東西に非対称である。また、この上層は深海曳航式サイドスキャンソナー「わだつみ」による探査でも確認された(図5)。次に熱水地帯の海底0.11秒(150m程度)と0.65秒(1km程度)の深度にも反射面が認められる。前者は熱水たまりによる変質層を、後者はマグマ溜まり上面を示唆している。さらに海底地震計とGIガンを用

いた屈折法地震探査に基づくP波速度構造モデルでは、海底2kmまで2.2-4.2km/sの層が存在し、カルデラ下では周辺よりやや低速度の物質が存在することが示唆された。

3. 熱水性堆積物探査

熱水循環系が発達する地質環境および熱水由来物質の分布を探る目的で、グラブ採泥器を用いて表層堆積物を採取し地質学的研究を行った。水曜海山カルデラ内外の7点で得られた堆積物試料の写真を図6にまとめた。試料の分析については、船上においてXRFによる元素組成分析を行い、研究室に持ち帰った後に全有機炭素濃度(TOC)および全窒素(TN)の分析などを行った。

水曜海山で得られた堆積物は、ほとんどが溶岩もしくは軽石を起源とする火山性の碎屑物であった。「しんかい2000」の潜航調査でもカルデラ底は砂質堆積物におおわれていることが確認されている。こうした地質試料の採取は、散乱強度分布や地震波探査などの地球物理探査によって推定された地質構造を裏付けるものとなっている。水曜海山カルデラ内でのTOCは最大0.2%程度で低いレベルにとどまっており、水曜海山が陸地から非常に離れているために外来性の有機物に乏しいこと、また、カルデラ形成後にそれほど時間が経過していないために有機物を含む遠洋性堆積物が乏しいことが改めて確認された。カルデラ内の堆積物の一部には表面が黒から赤褐色を呈しているものがあり、船上でこれら黒色物質をXRFにより分析した結果、銅・亜鉛・硫黄などを含んでおり、熱水性沈殿物であることがわかった(図7)。

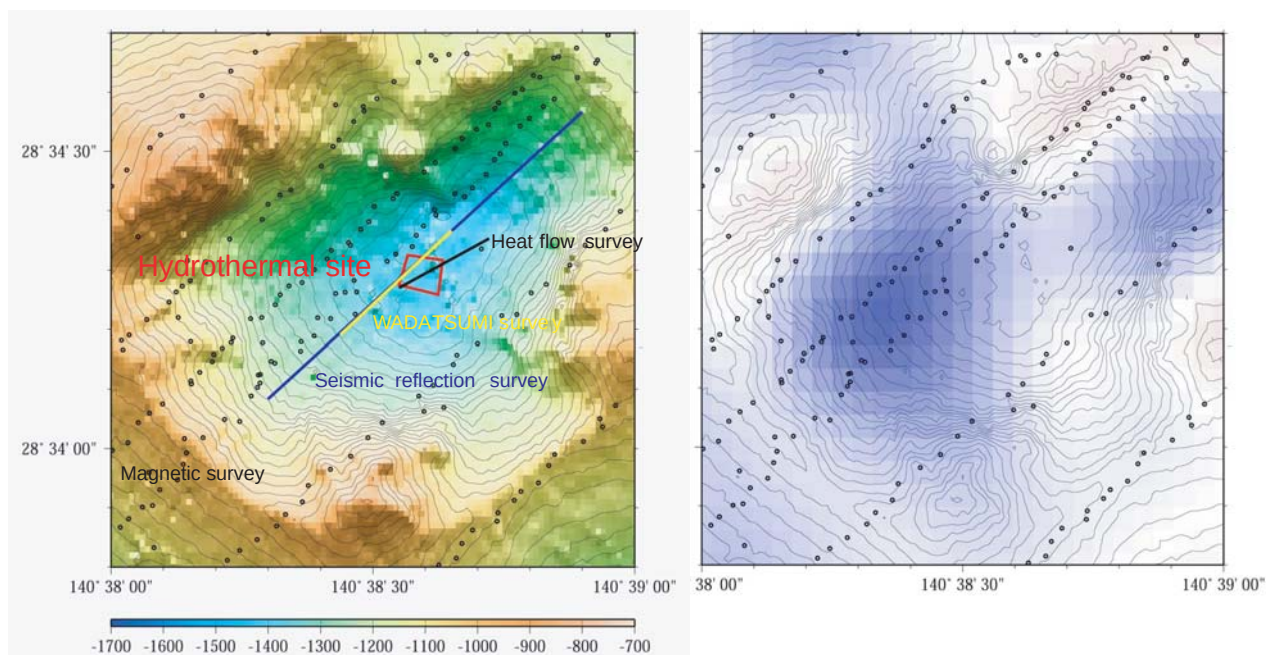


図3 水曜海山山頂近傍のカルデラ地形(左図)ならびに磁化分布(右図)。地形図中の直線と点線は地球物理探査の測線を示す。磁化分布図中、磁化の弱い部分(青色)がカルデラ西側にのみ広がっている。

Fig. 3 Topography with geophysical survey lines (left) and magnetization with bathymetric contour (right) around the summit of the Suiyo seamount. Low magnetization area (shown as blue color in the right map) is located only in the western side of the caldera.

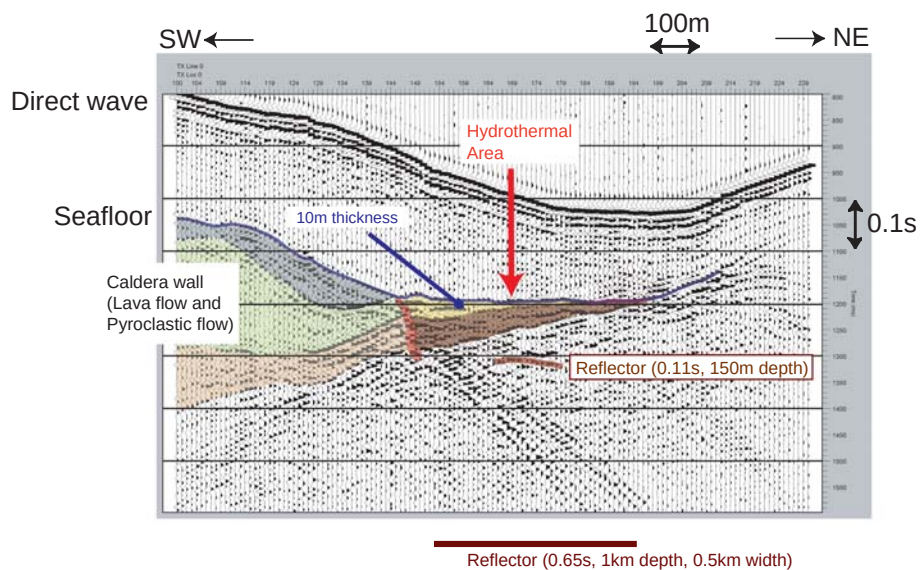


図4 水曜海山のカルデラを南西－北東方向に横切る地震波反射断面図。堆積層が南西側ほど厚くなる非対称な構造になっている。

Fig. 4 Seismic reflection image across the Suiyo seamount in SW-NE direction. Difference in thicknesses of two layers beneath the caldera center exists between the SW and NE sides.

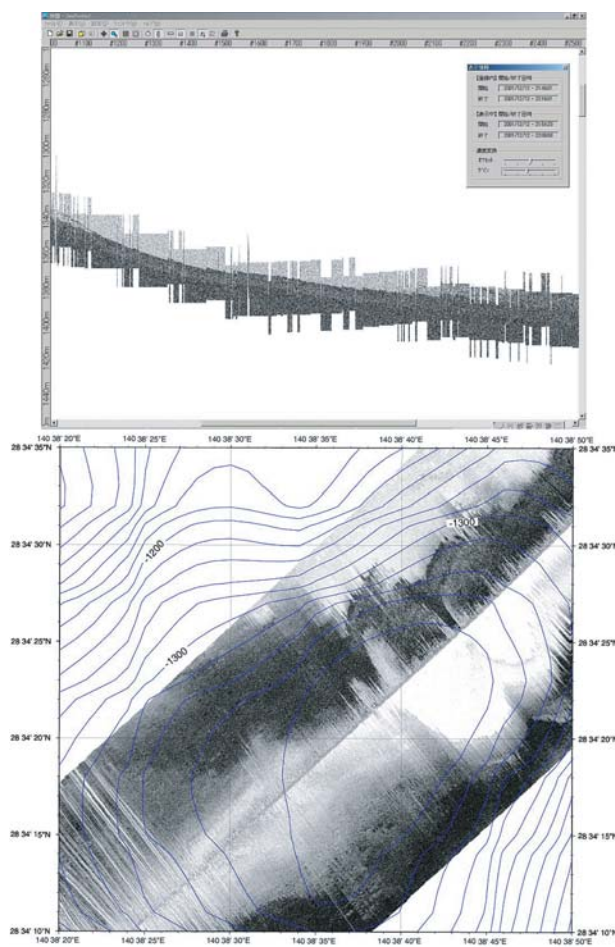


図5 深海曳航式「わだつみ」による水曜海山カルデラ底のサブボトムプロファイラー(上図)とサイドスキャンソナーイメージ(下図)の結果。海山の地形変化に対応して曳航深度を細かく変化させたためにイメージの解像度があまり高くない。

Fig. 5 Sub-bottom profiles (top) and side scan sonar intensity images (bottom) obtained by a deep towed WADATSUMI survey. Quick changes in towing depth to follow the topography resulted in poor images.

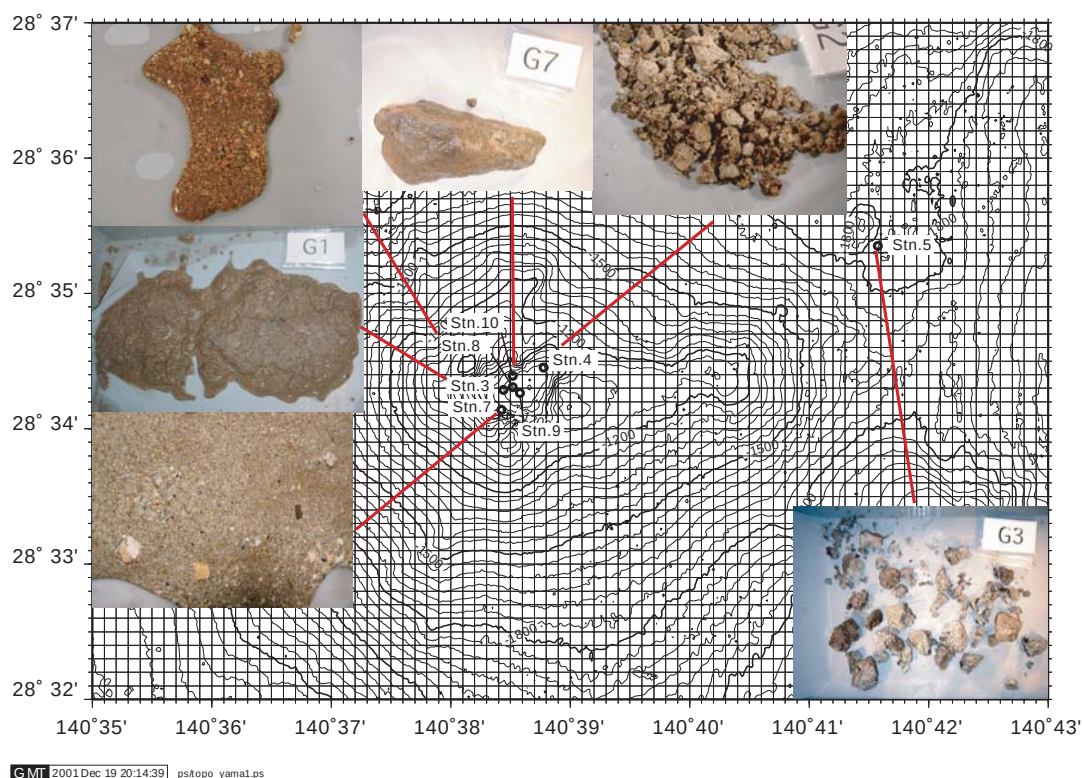


図6 水曜海山周辺で採取された表層堆積物。ほとんどが溶岩もしくは軽石を起源とする火山性の碎屑物であった。

Fig. 6 Sediment samples collected from Suiyo seamount. Seafloor is covered with volcanoclastic sediment.

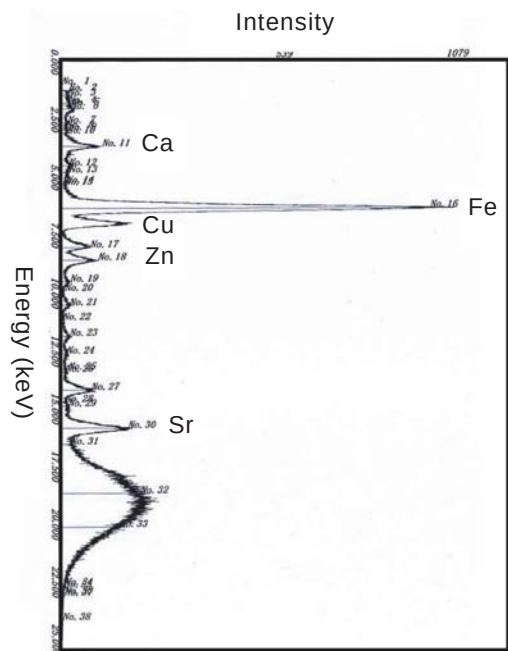


図7 熱水由来物質を含む堆積物を船上蛍光X線分析装置(丸茂, 1994)により分析した結果。銅の含有量は800ppm, 亜鉛の含有量は1200ppmに達する。

Fig. 7 Result of onboard XRF analysis of hydrothermal precipitates found in the sample G1, which indicated enrichment in heavy metal elements (800ppm copper and 1200ppm zinc).

4. 熱水ブルーム探査

熱水ブルームの規模・分布およびブルーム内部における化学反応や微生物活動など二次的な変質過程を探ることを目的として、カルデラ内外でセンサーパッケージによる連続モニタリングと海水試料の採水を行った。センサーパッケージは、通常のCTDT(深度・温度・伝導度・透過度)に加え、光学濁度計およびRedoxセンサーなどのセンサー類、さらに現場化学分析装置GAMOS-IIあるいはレーザー粒度粒径測定装置といった現場測定装置を随時組み込んだ。採水は微量金属元素の汚染を防ぐ仕様になっているXニスキ型採水筒を用い、これをカラーセル採水ユニットにより制御した。

図8は水曜海山カルデラ内外の熱水ブルームの分布をみるために、南南東方向にほぼ一直線上に並んだ5つの鉛直採水測点における透過度プロファイルと比較したものである。カルデラ内で深度1050-1200mを中心に顕著な熱水ブルームが観測され、カルデラ外の最大2km程度まではこの熱水ブルームが広がっていることが確認された(中川ほか, 2003)。図9はカルデラ内の測点において、現場化学分析装置GAMOS-IIにより得られたマンガン濃度とCTDセンサにより得られた温度異常を比較したものである(岡村ほか, 2003)。鉛直プロファイル(左図)に示されたように、熱水ブルームの中心層である1150mの深度で、熱水由来物質であるマンガンの濃度と温度異常はともに極大となっている。この中心層でマンガン濃度/温度異常比をとって高温熱水中のマンガン濃度/温度

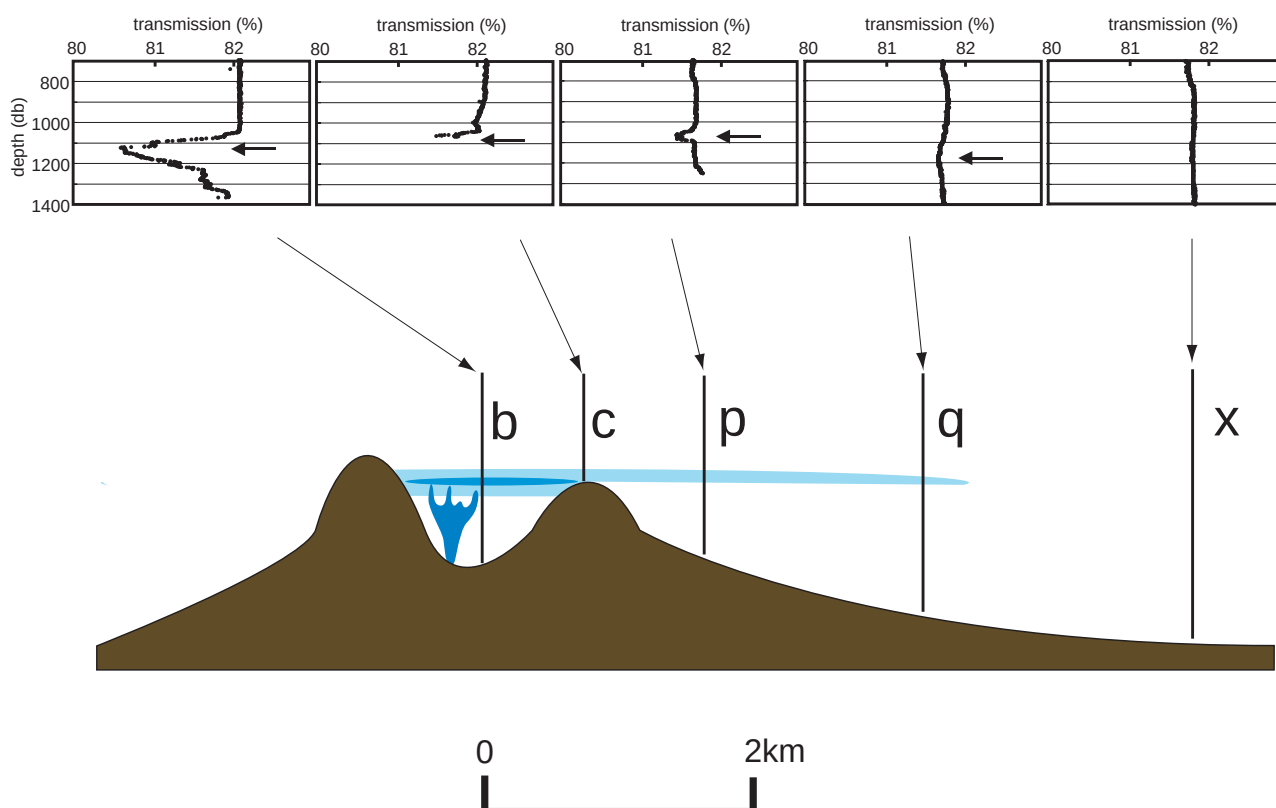


図8 水曜海山カルデラ内外の水塊の透過度異常の鉛直プロファイル。熱水プルームはカルデラ内で強くカルデラから離れるにつれて急激に弱くなる分布を示した。

Fig. 8 Vertical profiles of transmission of water column within and outside of Suiyo seamount caldera, showing distribution of hydrothermal plume.

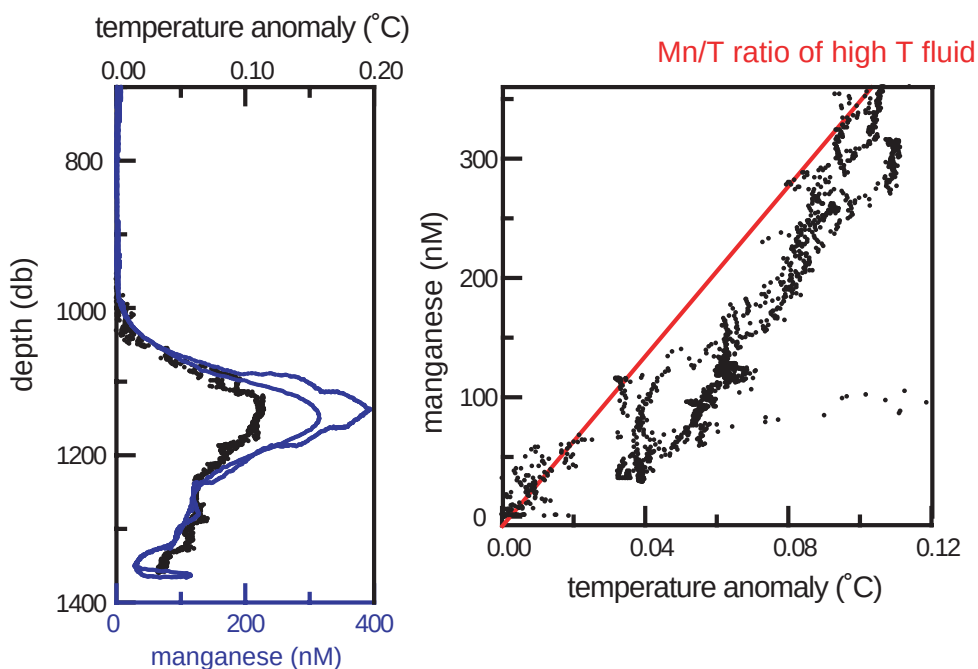


図9 現場化学分析計GAMOS-II (Okamura et al., 2001) により得られた熱水プルーム中のマンガン濃度とCTDセンサにより得られた温度異常。鉛直プロファイル(左図)と両者の関係(右図)を示した。マンガン濃度／温度異常の比はプルーム中心層では高温熱水における比(赤線で示した)とほぼ一致するが、その他の層ではこれよりも明らかに低くなっている。

Fig. 9 Vertical profile (left) and relationship (right) of manganese concentrations and temperature anomalies of the hydrothermal plume. Mn/T ratio in the plume was lower than the ratio of high temperature fluid (shown as a red line).

異常比(右図中の赤線)と比較するとほぼ同じ値であった。しかし、その他の層では右図に示されたようにマンガン濃度/温度異常比がこの値より低くなっており、熱水ブルーム中でマンガンの消費が進行していることを示唆している。

熱水ブルームが分布する深度は、水曜海山カルデラ壁の鞍部の深度とほぼ一致している。熱水ブルームのカルデラ外への広がりが地形の規制を受けているかどうかを確認するために、水曜海山の西峯のカルデラ壁外周をセンサーパッケージを上下させながら一周させるTow-yo探査を行った。その結果を示したのが図10である。カルデラ壁の北東・南東・南西の3ヶ所の鞍部(水深1100m程度)において、図中に黒丸印で示したように熱水ブルームの存在を示す透過度異常を検出した。しかしながら、いずれも同じ場所を再び探査した際に異常が検出されなかったことから、カルデラ壁を越える熱水ブルームの広がりは定常的には起こっていないと考えられる。本航海とは別に行われた水曜海山カルデラ内での測流によって、カルデラ内に周期性の強い流れとカルデラ壁に沿った外洋海水の流入があることが観測されている(下島・前田, 2003)。カルデラ壁鞍部から外洋海水が流入している時間帯はその場所から熱水ブルームが外へ広がるのが妨害されと考えれば、熱水ブルームが検出されるときと、されないときがあることをうまく説明できる。

熱水ブルーム中の微生物群集組成の質的および量的説明をめざして、熱水ブルームから得られた試料に対して、16S rRNAを標的とした微生物の系統解析とFISH法等を用いた微生物細胞の顕微鏡による定量解析を行った(Sunamura et al., 2002)。試料については、前述のニスキンボトルにより得た海水のほかに、タイマーで制御する深海ポンプにより現場で大量の海水をろ過するシステムを用いて遺伝子を現場濃縮して系統解析に供した。16S rRNA 系統解析の結果、主に ϵ プロテオバクテリアに属する特定グループと γ プロテオバクテリアに属する特定グループのクローンが見出された。特に後者は、熱水噴出地帯の貝類の共生微生物として知られているイオウ酸化微生物と近縁なものであった。この結果にもとづいて特異プローブを作成してFISH解析を行ったところ、熱水ブルームの中心層(深度1100-1200m)では、バクテリアとして検出されるもののうち大部分が γ プロテオバクテリアに属する特定グループで、残りのほとんどが ϵ プロテオバクテリアに属する特定グループであることがわかった。このようなわずかに2つのグループで水塊中のバクテリア群集が構成されていることは、これまでに報告例がなく非常に興味深い。こうした特異的なバクテリア群集が発達していることは、熱水が海底から噴出した直後の熱水ブルーム形成の過程において、熱水活動に由来する微

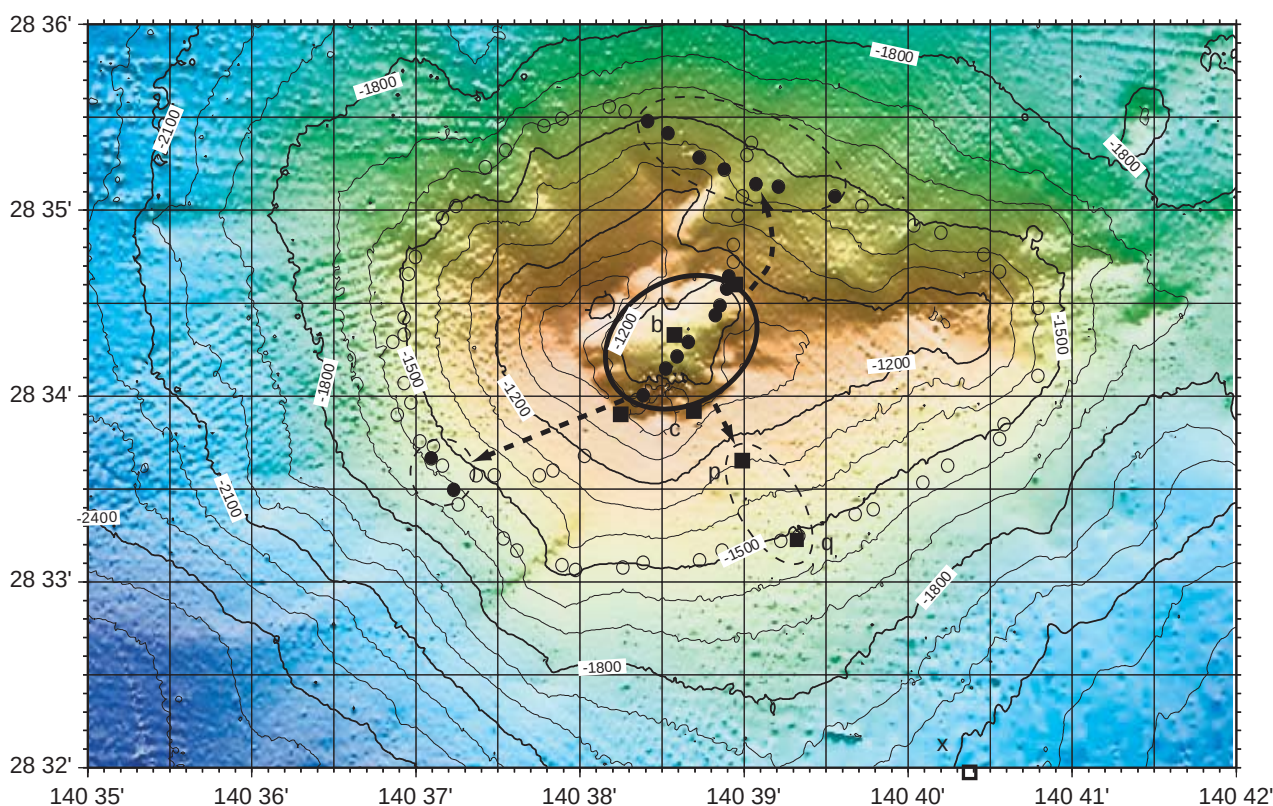


図10 鉛直採水とtow-yo探査により熱水ブルームにより明らかにされた熱水ブルームのカルデラ壁からの漏れ出し。○印がtow-yo観測点、□印が鉛直採水観測点。それぞれ黒抜きで示した点(●・■)で熱水ブルームによる透過度異常を検出した。

Fig.10 Sporadically leak of hydrothermal plume over the caldera wall. Open circle and open square indicates the tow-yo track and the cast stations, while closed symbols indicates the station where transmission anomalies were observed.

生物が増殖するのにきわめて都合の良い環境となっていたことを示唆している。

5. 島弧のマグマ活動に伴う熱水活動の特徴

水曜海山で得られたこれらの成果を総合して解析することで、島弧の海底火山に伴う海底熱水活動の特徴の一端が明らかになってきた。

最も特徴的な点は、透水性の高い火山性砕屑物からなる堆積層内に熱水循環系が発達していることである。水曜海山の珪長質なマグマは流動性が低く揮発性成分に富んでいるために、その噴出物が細かく砕けやすい性質をもつことが知られている。さらにカルデラ地形内の強い流れによって、細屑粒子が生成しやすい環境にもなっている。こうした水曜海山の地質学的環境は、枕状溶岩が一面に広がりその冷却に伴って発達した割れ目地形を熱水が流動する中央海嶺の熱水循環系とは大きく様相が異なるものである。また海底下1km程度の深さにマグマ溜まり上面を示唆する地震波反射面が見出された。マグマ溜り上面が海底下1km程度の深さにあるとすると、中央海嶺系に比べて非常に浅い位置にあることになる。中央海嶺の海底熱水活動が海洋地殻の断裂系により強く支配されているのに対して、水曜海山では熱水循環系のより近くに存在するマグマの影響をより強く受けていると考えられる。

島弧火山に特有なカルデラ地形は、その中の海水の動きを支配し熱水プルームの拡散を妨害する方向に作用している。このことは、熱水活動による物質的な影響が広く海洋に伝播しにくいことを意味するが、逆に考えれば熱水活動に伴う物質供給がカルデラ内に集中する可能性を示唆している。こうした熱水由来物質の海底面上での再循環によって熱水プルームで観察された特異的な微生物群集が発達するのにきわめて都合の良い環境を維持しているとすれば、「島弧型」熱水活動における岩石圏・水圏・生物圏相互作用の興味深い一例とみることができる。

謝辞

本研究航海では、非常に狭い調査海域で各種の研究機器による観測を集中的に行ってその結果を総合的に解析することをめざした。このような一般的とはいえない調査の成功は、海洋科学技術センターの研究業務部ならびに深海研究部の皆様のご支援、ご配慮、ご尽力があつて初めて可能

となったものである。さらに現場での観測調査にあたっては、田中船長をはじめとする「かいいい」乗組員の皆様、富樫主任をはじめとする観測技術員の皆様に多大なご助力をいただいた。この場を借りてお礼申し上げたい。また本航海に持ち込んだ機器の開発・運用は、文部科学省科学技術振興調整費「海底熱水系における生物・地質相互作用の解明に関する国際共同研究」から支援を受けて行われた。

引用文献

- 1) 飯笹幸吉ほか，“明神海丘のアクティブ熱水フィールドとブラックスモーカー”，JAMSTEC深海研究，14，223-236 (1998).
- 2) K.Iizasa et al., "A Kuroko-type polymetallic sulfide deposit in a submarine silicic caldera", *Science*, 283, 975-977 (1999).
- 3) 丸茂克美，“卓上型蛍光X線分析を用いた地質試料の化学分析”，資源地質，44，51-64 (1994)
- 4) 中川書子ほか，“熱水プルーム中における一酸化炭素の生成”，第19回しんかいシンポジウム予稿集，p.166 (2003).
- 5) Okamura K. et al., "Development of a deep-sea in situ Mn analyzer and its application for hydrothermal plume observation", *Mar. Chem.*, 76, 17-26 (2001).
- 6) 岡村慶ほか，“伊豆小笠原弧，水曜海山における低温熱水及びプルーム中のマンガン・鉄の挙動について”，第19回しんかいシンポジウム予稿集，p.226 (2003).
- 7) Seama et al., "Geophysical structure of a hydrothermal system in the Suiyo Seamount, the Izu-Bonin Island Arc, Western Pacific", *EOS Trans. AGU*, 83 (47), Fall Meet. Suppl., Abstract, V72A-1306 (2002).
- 8) 下島公紀・前田義明，“水曜海山カルデラ内の熱水プルームの地球化学と海水流動”，第19回しんかいシンポジウム予稿集，p.203 (2003).
- 9) Sunamura et al., "Active and Restricted phylotypes of Bacteria in Suiyo Seamount Hydrothermal Plume", *EOS Trans. AGU*, 83 (47), Fall Meet. Suppl., Abstract, V11C-10 (2002)
- 10) 山中寿朗ほか，“水曜海山および明神海丘熱水系周辺表層堆積物の地球化学的研究”，第19回しんかいシンポジウム予稿集，p.200 (2003).
- 11) 渡辺一樹ほか，“伊豆・小笠原弧中部，水曜海山の熱水鉍化作用”，資源地質，44，133-140 (1994).

(原稿受理：平成15年1月15日)

