

水曜海山カルデラの熱水活動観測 —NT01-08航海およびNT02-09航海序報—

木下 正高*¹ NT01-8およびNT02-9航海乗船研究者一同*²

伊豆小笠原弧上の水曜海山カルデラ内に存在する熱水地帯の物理・化学・地質環境を推定し、島弧の熱水系に固有の微生物採取等を行うために、平成13-14年度にかけて総合的な潜水調査が実施された。海洋科学技術センターの「なつしま」を用いた2航海(NT01-08およびNT02-09航海)では特に、熱水系地下生物圏の物理化学環境のモニタリング・マッピング、そして微生物の現場培養に重点を置き、ROV「ドルフィン3K」および潜水船「しんかい2000」を用いた調査を行った。台風の影響を受けて、両航海とも予定潜航のうち4潜航ずつがキャンセルされたが、海底に設置した諸装置の回収はすべて終了し、さらに熱流量測定、採水、微生物採取等をほぼ予定通り実施することができた。熱流量はあわせて41点で測定が実施され、熱水地帯内部では概して10W/m²を超える高熱流量が、その北西側および南側では1W/m²以下の低熱流量が確認され、熱水地帯から北東側では4W/m²程度の均一な高い値であった。一方、座布団型熱流量計、湧出量計、メデューサ等により、海底下からの熱水の湧出速度・温度とその時間変動に関する知見が得られつつある。共通して見られる現象として、潮汐周期を持つ変動が観測された。座布団型熱流量計で観測された変動の多くは、潮汐に起因する海水の移動に伴って噴出した熱水が運ばれることが原因だと考えられる。その他の減少も同様な変動なのか、それとも実際に湧出速度や温度が変動したのかは、今後の解析を待ちたい。

Observation of hydrothermal activity in the Suiyo Seamount caldera, Isu-Bonn Arc - Preliminary report of the NT01-08 and NT02-09 cruises -

Masataka KINOSHITA*¹ NT01-08 and NT02-09 cruises Shipboard Scientists*²

In 2001-2002, hydrothermal activity within the caldera of Suiyo Seamount was investigated in detail using manned or remotely-operated submersibles, and by deep-tow imagery and seismic surveys. Hydrothermal regime in the Suiyo seamount is characterized by a geochemically uniform fluid, shallow reservoir depth, very permeable seafloor, and venting without creating big chimneys. As well as numerous instruments deployed in the active area, detailed heat flow surveys were carried out through four research cruises.

Heat flow is highest ($> 10 \text{ W/m}^2$) within the active area. On the western and southern periphery, some heat flow was lower than 0.3 W/m^2 , only several tens of meters away from the active area. To the east, heat flow is uniform around 4 W/m^2 . Significant temporal variations in temperature have been detected at the seafloor with their amplitudes up to 1°C . They mostly correlate well with tidal modulations.

* 1 JAMSTEC

* 2 内海真生 (筑波大), 中村 光一・田中 明子 (AIST/GSJ), 護摩堂雅子・溝口 智信・田中亜津沙・篠原 貴志 (東海大), 内田 真吾・岩川 浩照 (奈良教育大), 角皆 潤・土岐 知弘・上妻 史宜 (北海道大学), 岡村 慶・鈴木 優章 (京都大学), 畑中 弘 (滋賀県立大), 下島 公紀 (電中研), 桑原 朋彦 (筑波大), 砂村 倫成 (AIST/BR), 板橋 志保 (東薬大), 山中 寿朗 (九州大), 木村 浩之 (広島大)

1. はじめに

海嶺や島弧での海底火山活動に伴って生じる熱水活動は、地球内部から水圏・生物圏への熱・物質の最大の供給源であり、地球環境に多大な影響を与えている。これまでの観測船や潜水船による精力的な観測の結果、海底熱水活動の時間・空間的な多様性が明らかになりつつある。例えば潮汐による圧力変動や、マグマ活動などによる地震、海底下での熱水の沸騰は、熱水移動の擾乱を支配する直接の原動力として働くと同時に、その流路を規定する地下の透水率分布にも影響を与えるであろうと予想され、このことが、海底熱水系の物理・化学条件の時空間的多様性を導き、ひいては熱水地下生物圏の多様な可能性を示唆する。

しかし、これまでの観測の多くはスナップショット的・スポット的であり、熱水活動の解明に必要な時空間スケールをカバーしているとはいえない。熱水域全域、熱水ベント、熱水湧出域、熱水プルーム、というような様々なスケールにおいて、温度・流速・熱流量・圧力・化学成分・pH・酸化還元電位などを、できるだけ長期間にわたって観測を行うことが必要である。

伊豆小笠原弧の火山フロント上に位置する七曜海山列のほぼ中央に位置する水曜海山(図1)において、活発に熱水を噴出するチムニー群が発見されている(渡辺ほか, 1994a, b)。水深1360mの火口底には、南北約300m、東西約100mにわたって熱水活動域が分布し、高さ50cm以下の活発なチム

ニーが多数存在する。ここの熱水活動は初期～最盛期であり、また、陸源／海洋表層起源の堆積物も少ないため、他の熱水地帯に比べて海底下の熱水環境が再現しやすいと期待される。島弧の熱水活動の場としての水曜海山カルデラ内において、地球物理、地球化学、生物、地質鉱物的な観点から総合的な潜水調査を実施した。

本研究に関連する航海を表1に示す。この中で、「しんかい2000」および「ドルフィン3K」による調査航海(NT01-08およびNT02-09)について、ここでその概要を紹介すると共に、その中で主に熱流量や熱水湧出量観測について、予察的な結果を紹介する。

なお本調査は、文部科学省科学技術振興調整費による国際共同研究「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」(代表者: 浦辺徹郎氏)の枠組みで実施されたものであり、以下の4つのサブテーマに沿って各種調査を実施した:

熱水循環系の物理的プロセスに関する研究

熱水循環系の物理的プロセスに関する研究に関して、1) SAHF(長さ約70cmの温度プローブ)を複数本使用した水曜海山カルデラ内の広範囲熱流量測定、2) 改良型湧出量計を用いたシェルカーベット地帯の湧出量測定、3) medusa/gemini型流量計によるケーシングパイプ並びに熱水地帯海底の熱水湧出量モニタリングを行った。

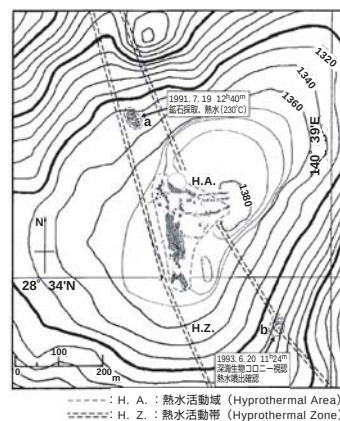
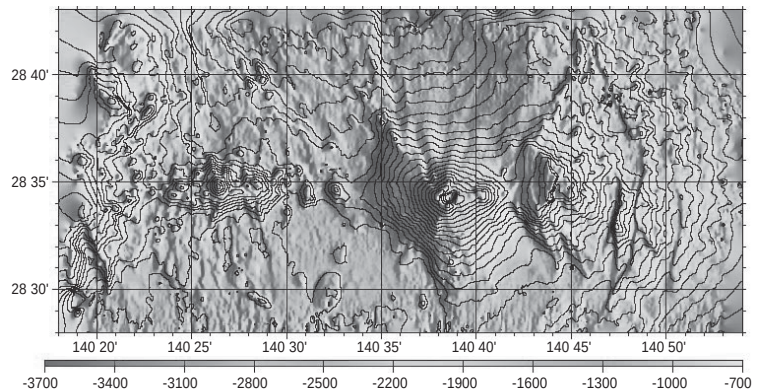
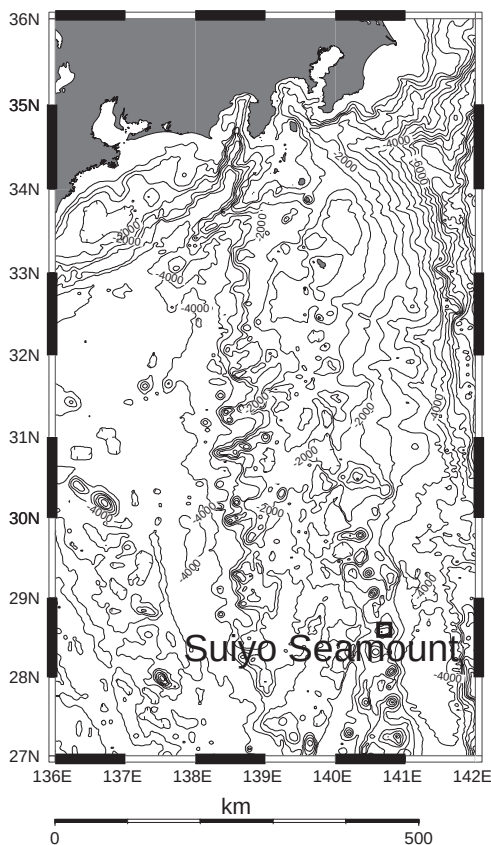


図1 水曜海山の位置および地形(右下の図は渡辺ほか(1994a)より引用)。

表1 水曜海山における関連調査航海一覧

航海名	出港日	入港日	船舶	使用施設	主席研究員
NT01-08	2001/6/18	2001/6/27	第2白領丸	BMS	浦辺徹郎
	2001/7/28	2001/8/11	新生丸	はくよう2000	中村光一
	2001/8/24	2001/9/18	なつしま	しんかい2000	木下正高
	2001/9/28	2001/10/26	なつしま	しんかい2000	丸山明彦
NT01-15	2001/12/8	2001/12/28	かいいい	CTD, 磁力計, 音波探査等	島 伸和
NT02-09	2002/7/15	2002/7/23	第2白領丸	BMS	浦辺徹郎
	2002/8/ 3	2002/8/15	新竜丸	はくよう2000	石橋純一郎
	2002/8/21	2002/9/18	なつしま	しんかい2000・ドルフィン3K	木下正高・内海真生

熱水系地下生物圏の化学環境の把握に関する研究

熱水系地下生物圏の化学環境の把握に関する研究に関して、1) GAMOS-IVを利用した低温熱水における溶存マンガンの濃度の時間変動の観測、2) ハイブリット採水システムで採水した熱水試料の化学成分分析、3) 様々な現場計測機器を用いた熱水物理化学環境総合測定を行った。

熱水系地下生物圏の微生物群集の解明に関する研究

熱水系地下生物圏の微生物群集の解明に関する研究では、1) 熱水噴出域での溶存メタン酸化速度測定、2) 現場培養缶を用いた熱水噴出孔の微生物棲息場を考慮した現場培養、3) カテーテル型・チムニー型微生物培養器等を用いた現場微生物培養、3) ハイブリット採水システムを利用したケーシングパイプ等のピンポイント採水による特定微生物分離培養を行った。

微生物活動と地質プロセスとの相互作用に関する研究

微生物活動と地質プロセスとの相互作用に関する研究では、熱水・生物・堆積物セット採集とその同位体分析による親生物元素の地殻から生物への流れ解析等を行った。

2. 航海概要

2001年8月24日から9月18日まで行われたNT01-08航海では、途中父島に寄航をはさんで15回の「しんかい2000」による潜航が計画された。途中何度も発生した台風のため、実際には1レグで7回、2レグで4回の潜航が行われた。なお航海に先立ち、2001年度7月28日から8月11日まで、同海域においてROV「はくよう2000」による調査が実施された(主席研究者：中村光一氏)。この調査には今回の航海の乗船研究者も多く参加し、機器の設置や採水を行っている。そのうちのいくつかの装置は、「はくよう2000」で設置し、「しんかい2000」で回収するという、航海間の協力体制が取られることになった。熱水活動の時間変動を捉えるには、このような航海間協力が必須である。

NT02-09航海は、2002年8月21日から9月18日まで、途中横須賀新港入港をはさんで実施された。1レグは「ドルフィン3K」4潜航と「しんかい2000」7潜航が予定されていたが、台風15

号、16号が海域を通過したため「しんかい2000」については1潜航のみが実施された。一方2レグは天候にも恵まれ、1レグでできなかった項目をカバーしつつ「しんかい2000」10潜航が実施された。その結果、「はくよう2000」にて設置した諸装置の回収はすべて終了し、さらに熱流量測定、現場化学測定装置の設置回収、湧出量計の設置、濁度測定なども実施することができた。限られた時間ではあったが、今後の解析とあわせ、実りある成果が得られたと考えている。特に熱流量測定は、SAHFと呼ばれる長さ約70cmの温度プローブを複数本用意して、何点かで同時に測定を行ったことにより、非常に効率的に測定点を稼ぐことに成功した。なお、本航海に先立って、前年度と同様に「はくよう2000」による潜航が実施され(主席研究者：石橋純一郎氏)、NT01-08航海で設置されていた機器の回収や熱流量計、湧出量計の再設置などが行われた。

3. 調査機器・手法

本章では、関係航海で設置された観測・サンプリング機器の中で、地球物理観測機器を主として時間変化をモニターするものを紹介し、化学・微生物関連の詳細については別の報告にゆずる。表2および図2に、用いた機器の概要をまとめた。また図3に、水曜海山カルデラ内部に設置された機器の位置を示した。

3-1. 小型熱流量プローブ(SAHF)

Stand-Alone Heat Flow meter (SAHF) は、潜水船用に作成された、長さ約1mの熱流量プローブである。海底に垂直につきさして、内蔵の5個のサーミスタセンサーにより、温度勾配を測定する。オフラインであるため、複数個を同時に持ってゆき、効率的な測定を行うことができるのが特徴である。全部で6台用意したが、このうち3台程度をつかって、熱水地帯の熱流量分布を測定した。測定時間は15-20分であるが、一部これ为数日間にわたって設置して、潮汐に対応した変動などを捕らえることも可能である。

3-2. 座布団型熱流量計(ZABUTON)

座布団型熱流量計は堆積物がない、または温度プローブが刺さらない場所で熱流量を測定するための機器である(Johnson and Hutnak, 1996)。本装置は、データロガー、耐圧容器、温度センサーマット(座布団)、フレーム(塩化ビニール

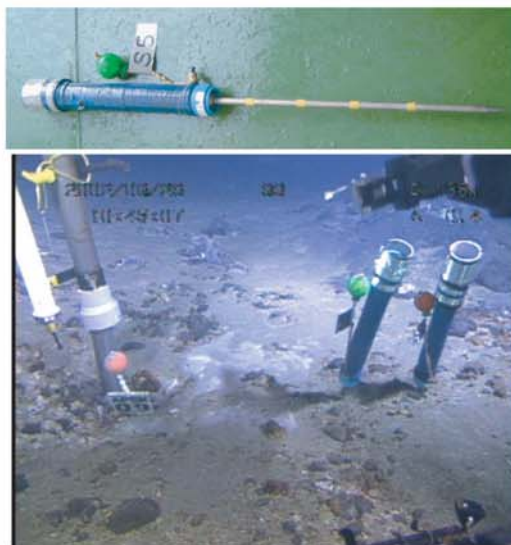
表2 水曜海山での設置・回収・観測機器一覧

装置名	目的	担当者	測定期間	サイズ (cm)	水中重量 (kg)	空中重量 (kg)	台数
海底設置・回収機器							
時系列型採水器	熱水の時系列採水	角皆	24時間Max	1m * 1m * 1m	27.3	46.3	1
現場化学分析装置 GAMOS-IV	熱水の化学成分の 現場測定	岡村	2-3日	70 * 30 * 280	19	28.7	1
座布団型熱流量計	熱流量分布・潮汐応答	木下	数時間-1年	58 * 52 * 57.1	7.6	15.2	6
熱流量プローブ SAHF	熱流量測定	木下	15分-1年	L100 * ϕ 8.9	2.6	4-5	6
湧出量計	熱水湧出のフラックス	内田	数日-1年間	50 * 50 * 52.7	16.7	27.8	5
改良型湧出量計	熱水湧出のフラックス	内田	数日-1年間	30 * 50			2
ミニメデューサ	熱水湧出のフラックス	田中	数週間	100 * 70 * 70	11.5	13	2
Gemini	掘削孔からのフラックス	田中	数週間	75 * ϕ 15	13.5	15	2
現場pH+p _{co2}	プルームの挙動	下島	数週間	ϕ 21 * L21	1.4	2.78	2
流速計	低層流・潮汐	中村	数週間	120 * 60 * 60	8.2		2
CTD+圧力計	+pH,Redox,DO,BS	中村	数週間	82 * 25 * 25	17.8		1
海底化学 ステーション	高温での温度・Redox	中村	数週間	74	3.8-7.4	5.2-9.7	3
ベント温度・ Redox計	熱水噴出の温度・Redox	中村	数週間	48 * 40 * 32	3.6	5.3	4
Horizontal-Up流速計	海底直上の流速	中村	数週間	82 * 57 * 18	5.4	10.1	1
Horizontal流速計	海底直上の流速	中村	数週間	95 * 55 * 18	6.3	11.7	1
3-ch potentiostat		中村	数週間	75 * 20 * 20	7.5	12	1
精密圧力計	潮汐の現場計測	木下	1年間		4		1
カテーテル型 現場培養器	熱水起源微生物現場培養	砂村	数日		1.2		1
チムニー型 現場培養器	熱水起源微生物現場培養	砂村	数日				
現場培養缶	熱水起源微生物現場培養	桑原	数日	41 * 14 * 14	2	4.5	1
ペイロード							
レバーアクション式 ニスキン採水器	熱水の採取	内海		26 * 67	2	5.5	1
メタンセンサー	熱水中のメタン濃度	内海			10.3	15.2	1
ORI式採水器	熱水の採取	内海			30		
M式採泥器	構築物の採取	山中			1.25		
微量採水器		山中			5.45		
濁度計	熱水プルームの同定	砂村	潜航中				
ニスキン採水器 CTD-RMS	熱水プルームの採取	下島	潜航中	57 * 54 * 63			1
保圧型採水器	熱水の採取	角皆		L39 * ϕ 6	28	35.2	1
ROVホーマー	設置機器の位置の特定	チーム				1.9	

湧出量計(NT02-09で使用したもの)



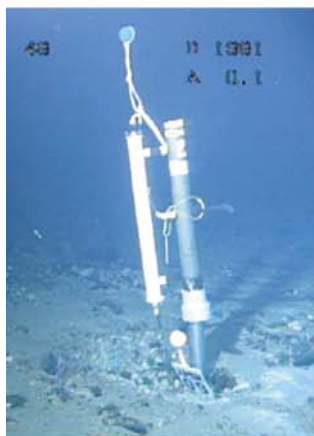
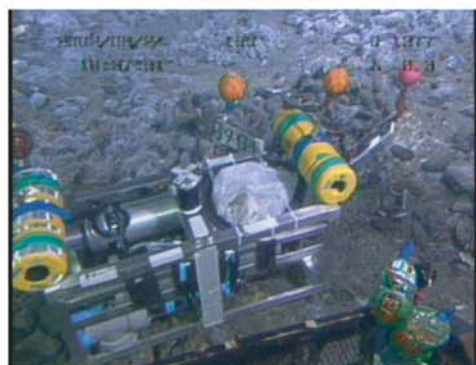
熱流量計(SAHF)



座布団型熱流量計

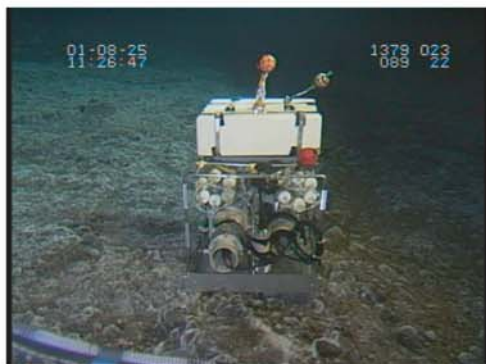


GAMOS-IV



Gemini

時系列採水器



流速計

圧力計

CTD

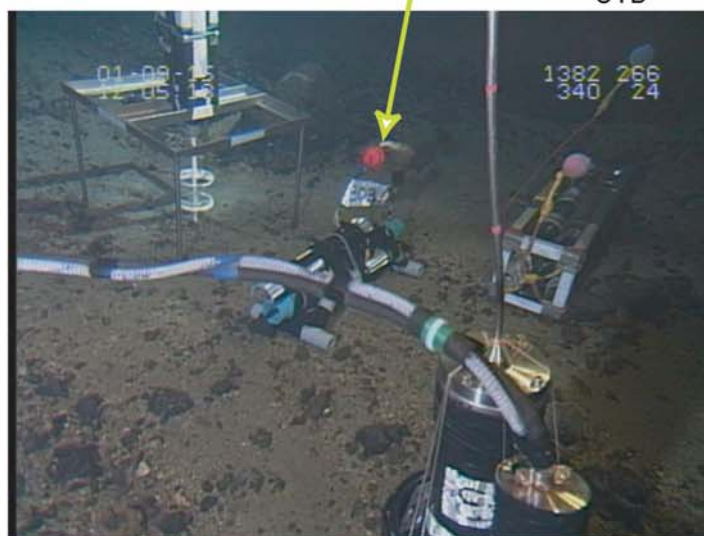


図2 水曜海山カルデラ内部に設置された機器の写真(一部)。

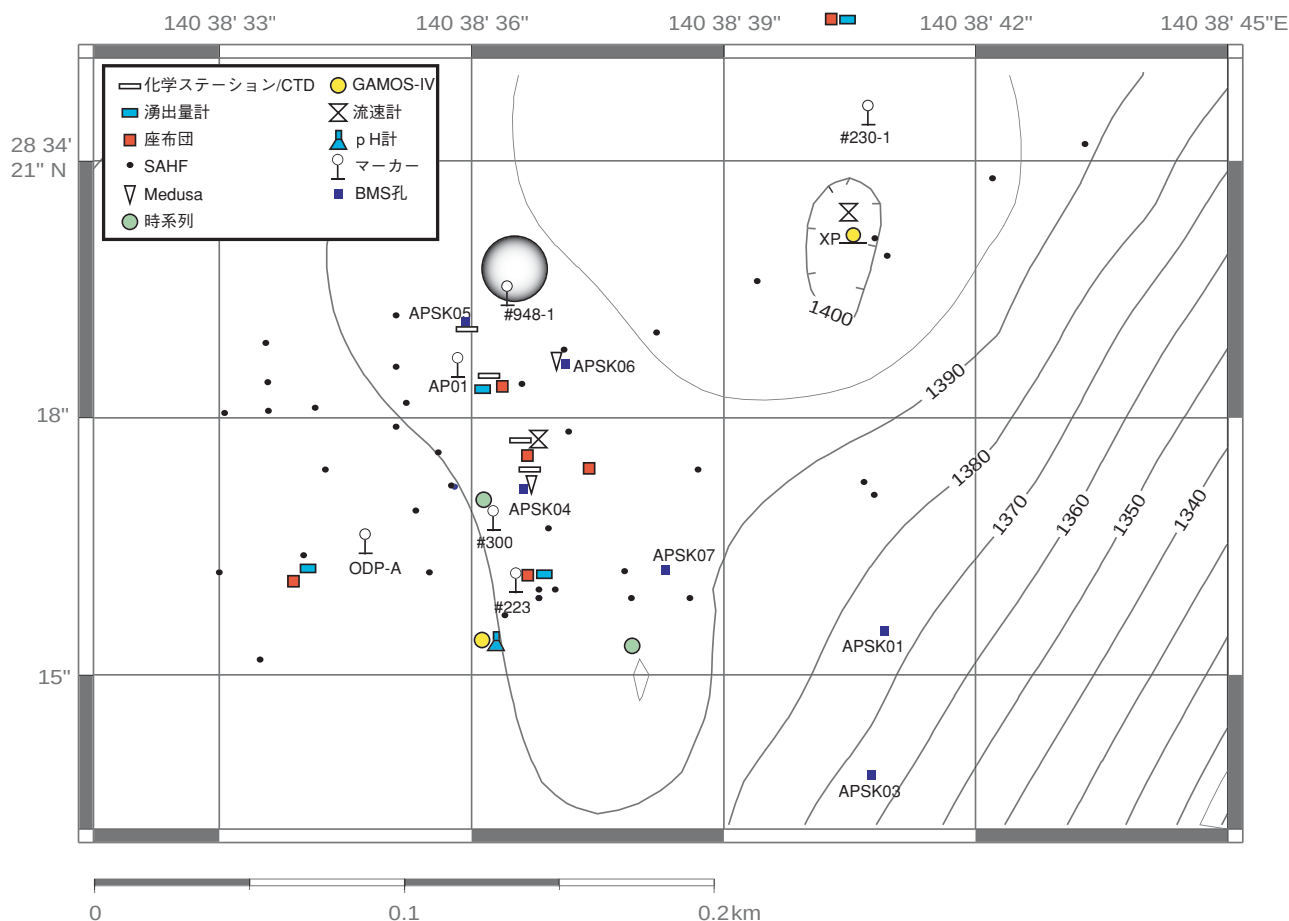


図3 水曜山カルデラ内部に設置された機器の位置。これらは同時に設置されたわけではないことに注意。

パイプ)から構成される。温度センサーマットは厚さ5cm、大きさ50cm四方のスポンジをビニールシートで覆ったもので、海水中では内部は海水で満たされる構造になっている。全部で8個の温度センサーがマットの上面と下面に取り付けられ、海底に密着させた後に上下間の温度差から熱流量を求めるという原理である。この他水温のモニター用の温度センサーを有する。

3-3. Medusa型熱水流速計

Medusaは海底熱水孔の流速と温度を長期間測定するための機器である (Urabe et al., 1999)。Mini-Medusaは、これまでのMedusa熱水流速計のセンサー部が、回転式ロータリーセンサーからsolid-stateの流速および温度センサーに代わっている。回転部が無くなったため信頼度が上がったが、測定値の温度依存性が高いという欠点がある。このほか、従来のmedusaと比較して採水機能を持たない代わりにベンチュリー管の高さが1/2(高さ~35cm)になり、小型軽量(空中重量は約13kg、水中重量は約11.5kg)になっている。天然の熱水噴出口の上に置くためのもので、耐温は100-150℃程度、測定可能流速範囲は0.1 mm/sec-n x 100mm/secである。流速と同時に、熱水の温度と周囲の海水温度を記録する。エレクトロニクスと電池は圧力容器の中に入っている。Medusa/Geminiはケーシ

ングパイプにかぶせて流速を測るための装置で、フローチューブの形態が異なるだけでセンサーおよびエレクトロニクス部はMini-Medusaと同一である。長さ750mm、直径80mm、空中重量15.0kg、水中重量13.5kgである(電池も含む)。

3-4. 自記湧出量計

他の手法では測定の難しいベント以外から湧出する低速の水のフラックスを測定し、その時間的変化を見るために、湧出量計の設置を行った。海底から湧き出た水を一辺が50cm四方の集水器を用い、それによってパイプ内に水を集めて流し、その流速を測定する装置である。また、熱電対とは別にサーミスターが取り付けられており、一つは海底下に5cm突き刺さるように耐圧容器内の中央部に固定され、もう一つは耐圧容器内に備え付けられており、それぞれでの温度測定が可能である。

NT01-08航海で用いたタイプが、底層流の影響によって倒れてしまっていたことから、NT02-09航海ではその高さを低くし、より底層流の影響を受けないように形状を変えた。また、計器内センサーを逆向きにひとつ増やし、海底下への吸い込みの測定をも可能にしている。さらに、熱電対とは別にサーミスタが海底下に5cm突き刺さるように耐圧容器内の中央部に取り付けられており、温度の測定が可能になっている。

3-5. 流速計

熱水地帯の潜航調査で頻繁に観測されていた底層流の変化の実態を解明するため、音響三次元流速計を2台設置した。流速計は米国NOBSKA社製MAVS-3DDで、三次元の流速ベクトルを測定するセンサーの他、コンパス、傾斜センサー並びに温度センサーが付いている。MAVSは下向き設置のセンサー形状であるのでチタン製のフレームに付けて設置した。

3-6. CTD/圧力計

熱水地帯の海底付近の化学環境の時間変動を解明する目的で、熱水地帯中心部のBMS掘削孔(APSK04)の近くその他にCTDを設置した。また、このフレームには現場で潮汐変動を観測する目的で圧力計も装着した。CTD装置はイタリアIdronaut社製Ocean Seven 316でCTDの他、pH、Redox、DO、turbidityセンサーが装着されている。圧力計は米国Paroscientific社製の水晶共振式圧力センサー(Digiquartz)に海洋電子(株)が開発したデータロガーを付けたものである。

3-7. 化学ステーション

熱水ベントの湧出熱水の温度ならびに化学組成の時間変動を探る目的で、白金抵抗測温体を用いて高温まで温度を測ることのできる温度センサーと酸化還元電位センサーを、チタン製の容器内部に導かれた熱水に満たされた空間の熱水に当たるようにセットした装置であり、熱水湧出孔に設置した。さらに、海底近傍の海水の温度変化を検出する目的で50℃まで測定可能な自己記録式温度計を装着しているほか、中の1台には高温で計測可能なpHセンサーとデータロガーも装着した。

3-8. 時系列採水装置

潜水調査船等を用いて海底に単体で設置し、海底湧水等を様々な時間間隔で自動的に採水する装置である。ピストン式サンプルシリンダー(12本)、切替バルブ、ポンプ、マイクロコンピュータと電源を内蔵した制御ユニットからなり、船上で予め設定された任意のスケジュールで自動的にサンプルシリンダーを切り替え試料を採取する。採水は、ピストンで仕切られたサンプルシリンダー内に予め満たしておいた純水をポンプで排出することによって、ピストンの反対側に試料を導入する。通常はこの試料側をテフロン配管によって湧水域直上に設置した逆漏斗型容器(ベルジャー)につなぎ、低速で湧出する試料を海底の広い範囲からかき集める。本航海では、このベルジャーとしてステンレス製の本体一体型(内容積2.4L)のものを用意し使用した。またベルジャー内部の水温は、離合社製自己記録型温度計によりモニタリングした。

3-9. 現場化学測定装置(GAMOS-IV)

GAMOSとは現場で化学成分を分析する装置で、今回は過酸化水素とルミノールを利用した化学発光法と流れ分析法を利用して、マンガン濃度を測定した。

検出方法は、試料もしくは標準溶液を内径1mmのテフロン管内を通しながら、pH4.5の緩衝溶液と混合し、キレート樹脂カラムで熱水中の鉄や銅、亜鉛など、検出を妨害する金属を除去した後、アンモニア水溶液、ルミノール溶液、過酸化水素溶液を混合することで起きる化学発光強度を検出する。

GAMOS-IVは、フロー分析系が入っている油漬け容器、検出器が入っている耐圧容器、バッテリー、試薬袋の4つの部分が一体化したものである。このGAMOS-IVは中期連続観測用に開発したもので、サンプルや試薬の送液における消費電力量及び送液速度を抑えるために、ダイヤフラムポンプを採用している。

4. 成果の概要

4-1. 位置決定の問題点

水曜海山における本航海では、潜水船の位置が正確に決定できないという問題が起こった。海底に設置してある機器の緯度経度に対して、SSBL測位により実際に決定された位置が、平均で50-60mずれており、しかもそのずれ方がランダムであった。さらに悪いことには、同じ日の中でも時間によってずれの量が変わったことである。このために、しばしば現場での機器の発見に手間取ったり、SAHFなどの設置位置が不正確になるなど、大きな問題を残した。その原因は不明であるが、水深1380mでの誤差50mは決して無視できない量であり、今後の調査に課題を残した。

4-2. 熱水地帯の特徴概観

本航海と他の航海の結果、水曜海山内カルデラの熱水活動の分布が詳細に解明されてきた。NT01-08およびNT02-09航海で得られた海底の様子から、熱水地帯の概要をマッピングした。基本的には渡辺ほか(1994a)の概要と一致しているが、個々のベントの対比は不可能であり、この海域でのチムニーの成長速度の速さなどから推測して、細かい部分の特徴は当時とは異なっているものと考えられる。

カルデラ底部表層は、基本的には砂で覆われている。砂地はリップルマークが発達している。熱水地帯の東に、北東-南西方向に伸びる砂のリッジが見られた。その成因は不明である。砂地の平地に設置した湧出量計は、設置後数週間を経てその周囲が大きくくぼんでいた。これは他の岩石(転石と思われる)の周囲でも同様であり、おそらく強い底層流によって上流側からえぐれたためと思われる。熱水地帯の北端に、高さ8-10mの高まりがあり、これは「中央火口」または「大岩」(これらは同一のものと考えられる)と呼ばれるものと思われる。その頂上は平らな岩(クラックが入っている)だが、中心部は落ち込んでおり、その中や壁からは熱水の湧出が見られた。

NT02-09航海での特筆すべき成果の1つとして、水曜海山カルデラ内でこれまで熱水活動がほとんどないと考えられていたカルデラ東側地域に活発な熱水活動帯が確認されたことがある。砂地の中に大小の白色硫化物マウンドおよび活発に熱水を吹き上げるブラックスモーカーが多数観察された。今後はこれまでの水曜海山熱水活動帯範囲に関する認識を改めなければならない。

4-3. 熱流量分布

水曜海山カルデラ内部において、潜水船により41点で熱流量測定が実施された。図4に熱流量分布の予備的な結果を示す。また図5に、測定点SHF14およびSHF22での温度および温度勾配データを示す。それぞれ、高熱流量および低

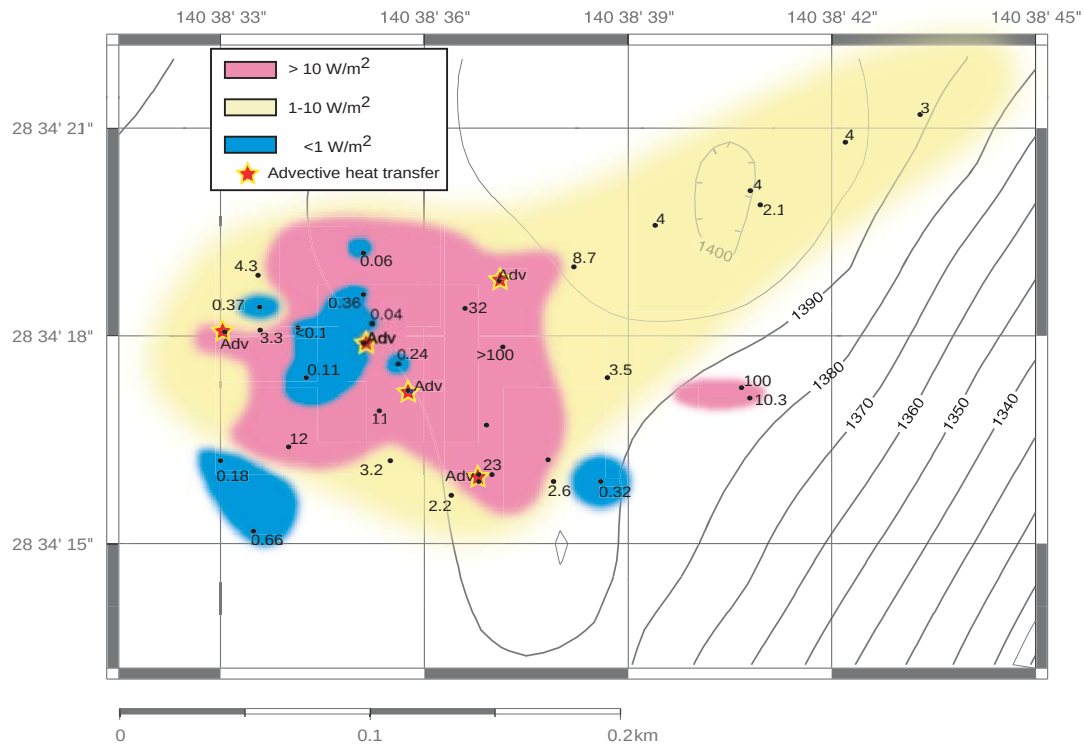


図4 水曜山カルデラ内部の熱流量分布。10W/m²を超える高熱流量域が、ほぼ熱水地帯に一致している。

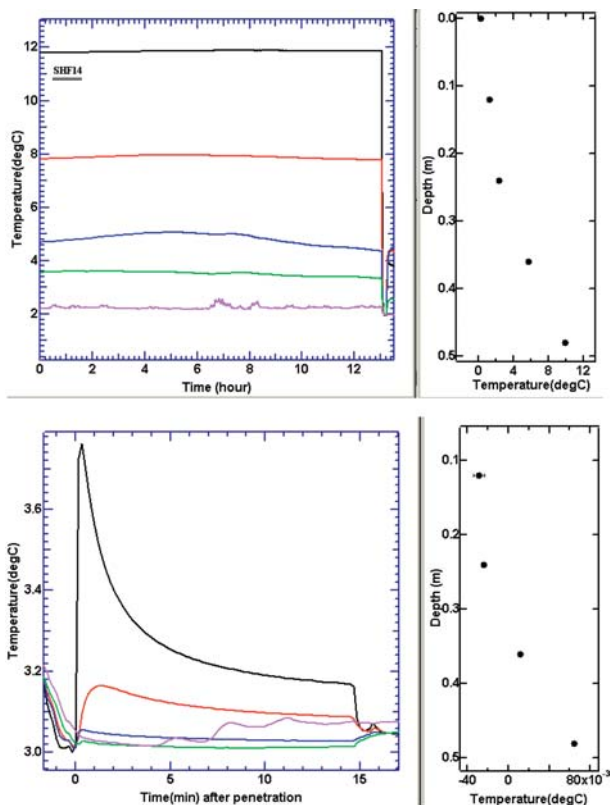


図5 SAHF観測点のうち、SHF14(高熱流量)、SHF22(低熱流量)の2点における観測データの例。

熱流量の例である。なお、海底表層の物質は場所によらないと考え、熱伝導率は一定とした。従って、ここでは実際に測定された温度勾配を熱流量として議論を進める。

熱水活動が確認された場所では、概して10W/m²を超える高い熱流量が観測された。これは海底面への熱水噴出の影響を受けていると考えられ、このままでは地下の温度構造の推定には使用できないと思われる。なお、時系列採水器によるベルジャー内部のシリカ濃度・温度上昇から熱流量を見積もることができ、熱水域西部の湧出域で約16W/m²という値が得られた。SAHFで測定された値とほぼ整合的である。一方熱水噴出域からわずか20m程度のところに、最小0.04W/m²から0.4W/m²程度の低熱流量域が存在することが確かめられた。ごく表層部分で、10-20mスケールでの熱水循環が存在していることを強く示唆する。

これに対して熱水地帯の北東側では、4W/m²程度の高い熱流量が一様に分布している。海底には熱水の徴候はなく、パミスサンド等で覆われている。地下の熱源(熱水溜まり、あるいは冷却しつつ溶岩など)からの熱が、熱伝導的に伝わっていると推測される。

熱水地帯ほぼ中央にいくつか見られる、孤立型硫化物マウンド(中央からブラックスモーカー噴出)の脇2m以内のところで熱流量測定を行った。海底下10-20cmでそれぞれ20°Cを超えるような高温が、さらにその下では温度が低下するという現象が観測された。マウンドの熱水噴出様式を推定する上で、重要なデータと考えられる。硫化物構造の下面に沿って、その脇

に流れ出る熱水が高温域を作っている可能性が考えられるが、その下の相対的な低温を実現するためには、脇を流れ出る熱水の直下に海水の流入を考えることが必要かもしれない。

島弧型の熱水活動の特徴として、カルデラ内の地下構造は、透水性の高い火山砕屑物(軽石など)と溶岩がいわば互層をなしていると考えられる。軽石層に熱水が流れ込むと容易に粘土鉱物が形成され、熱水の流路がシールされてしまうであろう(丸茂, 私信)。一方水曜海山の熱水は化学的に極めて一様であることが示唆されている(石橋, 私信)。さらに、BMS掘削の結果、高温の熱水域では堆積物とデイサイトが強い熱水変質を受けて、硬石膏等に変質しており、海底面付近から深さ10m程度まで不透水性のcap-rockを形成していること、そしてその下に300°Cを越える高温の熱水溜まりが存在することが示された(浦辺ほか, 2002)。

これらと上記の熱流量の結果を併せて考えると、水曜海山の熱水システムは、山全体スケールでの安定した系、深さ数m、横方向には20m程度の局所的で、おそらくは時定数の短い系、そして孤立ベントの周辺のローカルな循環系、のモードが存在すると考えられる。

4-4. 温度の時間変動

水曜海山カルデラ内の熱水地帯及び周辺の様々な場所で座布団型、湧出量計およびSAHF海底直上、または直下の温度の連続測定が行われ、海底付近の水温変動や、海底下の温度変動の様子が明らかになった。

温度の時間変化をまとめたものを図6に示す。どの地点でも約半日周期の温度変化が見られるが、(1)すべての観測点で同時、同位相の温度下降、(2)熱水地帯内部での位相が逆転した温度変化、の2種類が存在する。(1)は潮汐に伴って起

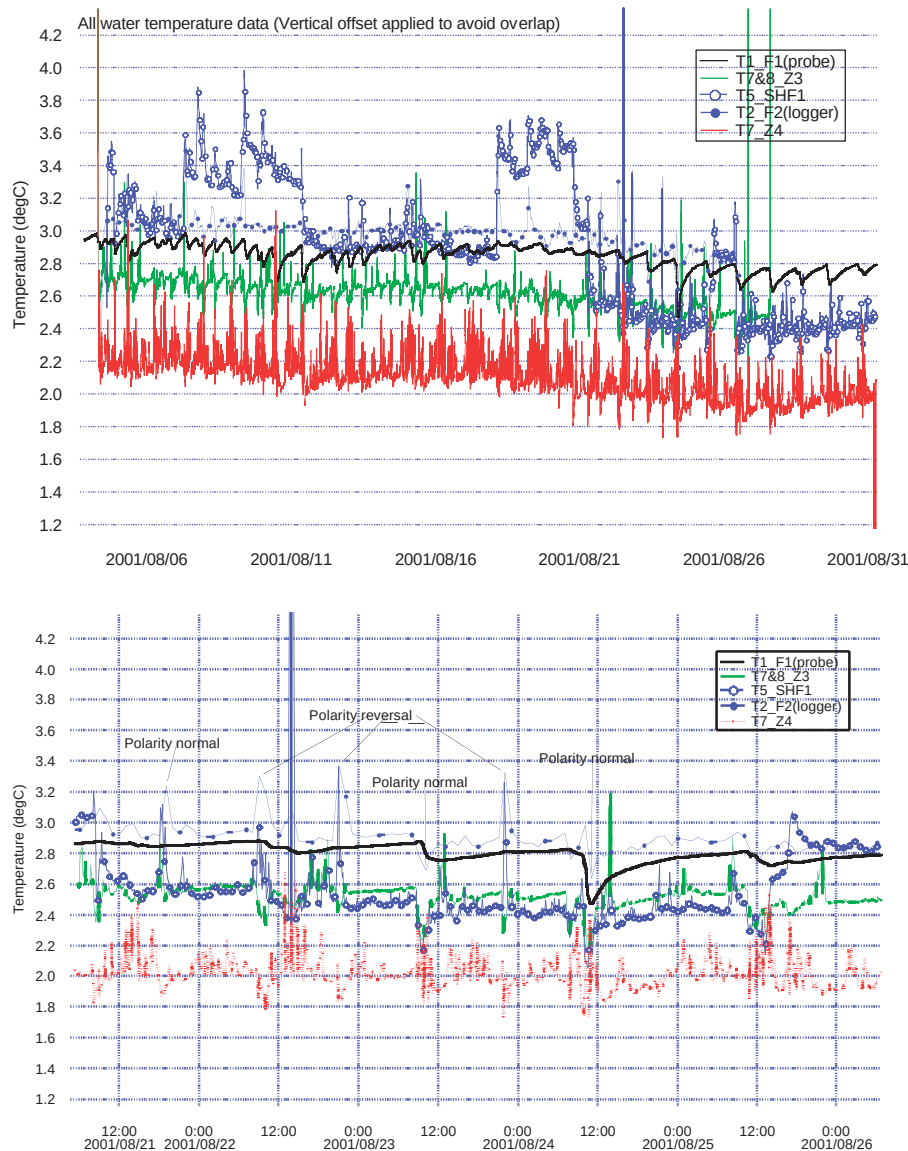


図6 水曜海山カルデラ内部熱水地帯、及び周辺の海底付近の水温分布。F1, F2: 湧出量計SHF1:SAHF(熱流量プローブ), Z3, Z4: 座布団型熱流量計。(上)全期間,(下)一部拡大したもの。

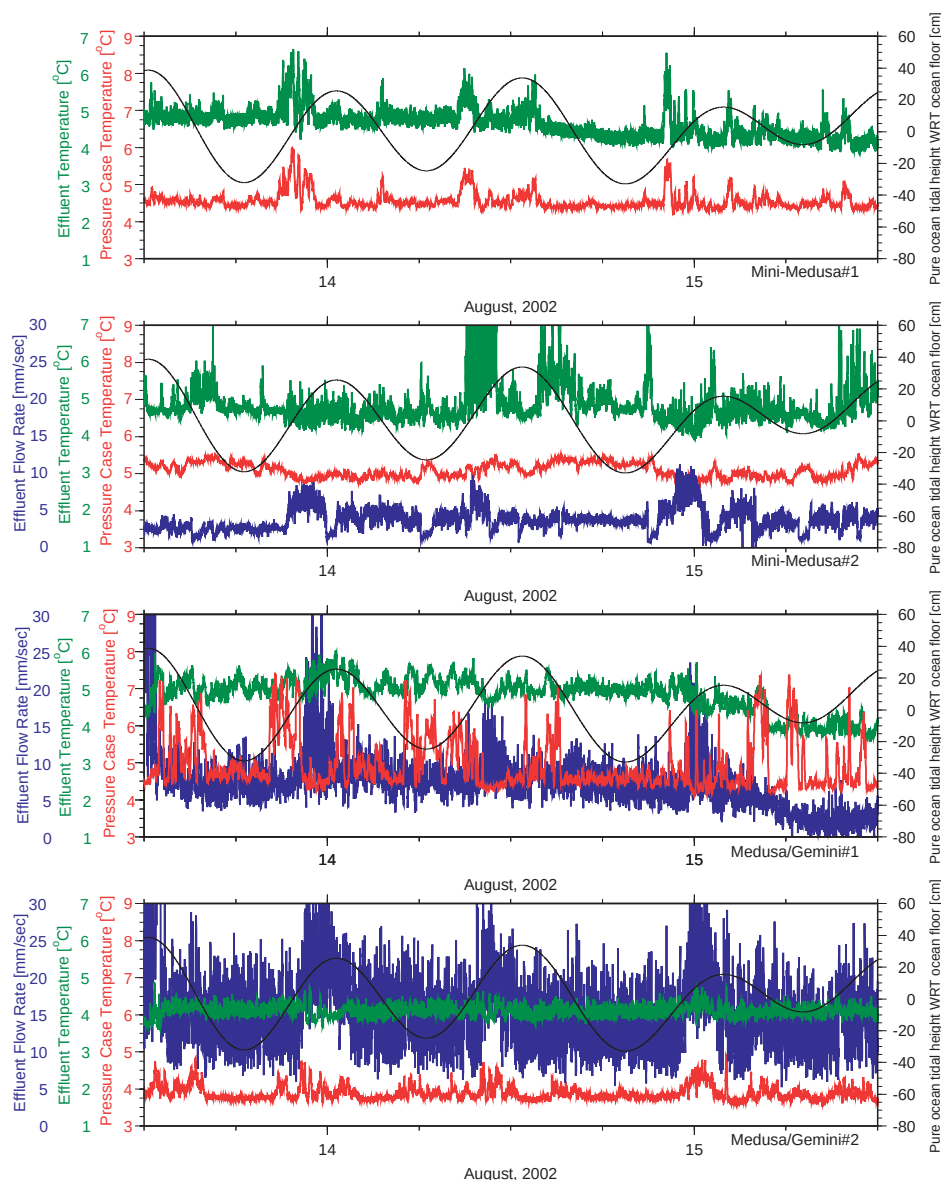


図7 Gemini/Medusaにより得られた記録の一例。青、緑、赤、黒色の実線は、それぞれ熱水の流速と温度および海底付近の水温のデータ、および理論海洋潮汐を示す。

こる海底直上の海水の移動に対応すると考えられる。温度下降が急で、その後の上昇が緩やかであるという特徴がある。(2)も同様の原因で発生するが、たまたま上流に熱水があると温度が上昇するというのが最も考えやすい。詳細は流向流速計のデータと比較する必要がある。あるいは海底下からの熱水湧出速度や温度変化を反映している可能性もある。

熱水地帯での温度等の時間変動は、これまでTAG熱水マウンド等で観測されており(Schultz et al., 1996; Kinoshita et al., 1996; 1998), 今回の結果とあわせて、地質条件と熱水活動の様式との関連について重要な示唆を与える。

4-5. Medusa等による熱水湧出量モニタリング

2002年8月に、Mini/Medusaを2台、熱水湧出地帯の上("Shell Carpet"とAPSK03付近)に17日間程度設置し、

Medusa/Gemini 2台は、BMS掘削孔上(APSK10とAPSK09)上にかぶせて10日間程度観測を行った。それぞれ熱水の流速と温度および海底付近の水温のデータを15秒毎に測定した。図7にデータの一部を示す。座布団やSAHFで観測された温度の時間変化と同様に、どの地点でも約半日周期の変化が見られる。また、熱水の温度と海底付近の水温は正の相関を持ち、全ての観測点において同時に同位相と逆位相のイベントが見られる。

4-6. 湧出量

NT01-8航海では、熱水地帯内部および周辺部の4点で観測を実施したが、前述の通り強い底層流のために装置が傾いたり、周囲の砂が移動したりして、精度良い観測が困難であった。しかし定性的には潮汐の影響と思われる周期変動

が観測された。

NT02-09航海では、2002年8月22日～9月17日にかけて、改良型(Type-S')1台を熱水地帯のほぼ中央に設置した。データを解析した結果、平均 8×10^{-6} m/sの湧出速度が得られた。また湧出速度の周期解析を行なった所、12.2 - 13.4hの卓越周期が明らかになった。

5. 結論と今後の動向

平成13-14年度にかけて、水曜海山カルデラ内部の熱水活動に関する総合的な潜水調査が実施された。その中で、熱水地帯の環境を正確に把握するため、海底設置型の観測機器が、数日間から1年間にわたって多く設置され、データを回収することに成功した。熱流量はあわせて41点で測定が実施され、熱水地帯内部では概して 10 W/m^2 を超える高熱流量が、その北西側および南側では 1 W/m^2 以下の低熱流量が確認され、熱水地帯から北東側では 4 W/m^2 程度の均一な高い値であった。これらと、化学・地質的な成果を併せて考えると、水曜海山の熱水システムは、海山全体スケールでの安定した系、深さ数m、横方向には20m程度の局所的で、おそらくは時定数の短い系、そして孤立ベントの周辺のローカルな循環系のモードが存在すると考えられる。今後数値計算などにより、定量的に検証していきたい。

一方、座布団型熱流量計、湧出量計、Medusa等により、海底下からの熱水の湧出速度・温度とその時間変動に関する知見が得られつつある。共通して見られる現象として、潮汐周期を持つ変動が観測された。座布団型熱流量計で観測された変動の多くは、潮汐に起因する海水の移動に伴って噴出した熱水が運ばれることが原因だと考えられる。その他の減少も同様な変動なのか、それとも実際に湧出速度や温度が変動したのかは、今後の解析を待ちたい。

本調査では、熱流量の結果に基づいて地下の熱水の存在、環境を推定することがひとつの目的であった。そのためには、地震探査やサイドスキャン調査の結果を用いることが必須である。さらに流体移動の特定のため、自然電位測定を行うことも有益であろう。このような観点から、平成14年度に「かいれい」による調査が行われた。平成15年度においても調査を継続して実施することが計画されている。

謝辞

本航海を実施するにあたり、海洋科学技術センター調査船「なつしま」の長谷川澄および斎藤房夫船長をはじめとする乗組員一同、また潜水調査船「しんかい2000」および「ドルフィン3K」の与田代志男および柴田裕之司令、および運航チーム一同、そして乗船支援員の青木美澄観測技術員の皆様の多大なるご協力とご支援をいただきました。今航海では多くの台風に見舞われましたが、その中で可能な限り潜航を行っていただきました。また、これらの方々を取りまとめていただいた、日本海洋事業の皆様にも感謝いたします。

航海計画の立案および準備にあたっては、プロポーザルに基づいて、海洋科学技術センターの研究業務部の皆様にも効果的に案をまとめていただき、また荷物の積み込み等に

ついて大変ご協力をいただきました。

実際に観測を行うにあたっては、「はくよう2000」による調査結果を使わせていただきました。中村光一氏、石橋純一郎氏、浦辺徹郎氏、ほか乗船研究者の皆様にも感謝いたします。

本調査は、平成13年度および14年度海洋科学技術センター深海調査研究の枠組みで実施された。費用の一部は、文部科学省科学技術振興調整費による国際共同研究「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」(代表者：浦辺徹郎氏)により負担した。

引用文献

- 1) Johnson, H. P. and Hutnak, M. (1996): Conductive heat flow measured in unsedimented regions of the seafloor, EOS, Trans., AGU, 7, 321.
- 2) 春日 茂・加藤 幸弘(1992): 伊豆・小笠原弧水曜海山の火口底における海底熱水性硫化物鉱床の発見, しんかいシンポジウム報告書, 8, 249-256.
- 3) Kinoshita, M., O. Matsubayashi, and Von Herzen, R.P. (1996): Sub-bottom temperature anomalies detected by long term temperature monitoring at the TAG hydrothermal mound, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 3467- 3470.
- 4) Kinoshita, M., R. P. Von Herzen, O. Matsubayashi, and K. Fujioka(1998): Erratum to "Tidally- driven effluent detected by long- term temperature monitoring at the TAG hydrothermal mound, Mid- Atlantic Ridge, *Phys. Earth Planet. Int.*, 109, 201- 212.
- 5) Schultz, A., P. Dickson, and H. Elderfield(1996): Temporal variations in diffuse hydrothermal flow at TAG, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 3471- 3474.
- 6) 浦辺 徹郎, 丸茂 克美, 中村 光一, 木下 正高, 丸山 明彦, 島 伸和, 石橋純一郎(2002): 小笠原水曜海山の熱水地帯での浅部掘削により明らかになった海底熱水水循環系の構造について―アーキアン・パーク計画報告―, 地球惑星科学関連学会2002年合同大会.
- 7) Urabe, T., A. Tanaka, and A. Schultz(1999): Long- term temperature and velocity monitoring of low- temperature hydrothermal effluent on southern East pacific Rise, EOS, Trans., AGU, 80, F1098.
- 8) 渡辺 一樹・梶村 徹(1994): 伊豆・小笠原弧中部, 水曜海山の熱水鉱化作用, 資源地質, 44, 2 (no.244), 133-140, (資源地質学会).
- 9) 渡辺 一樹, 芝田 厚, 梶村 徹(1994a): 水曜海山カルデラ内の熱水活動のマッピング, JAMSTEC深海研究, 10, 55-62.
- 10) 渡辺 一樹・芝田 厚・梶村 徹・石橋 純一郎・角皆潤・青木 正博・中村 光一(1994b): 海底火山とそれに伴う海底熱水鉱床の調査手法―伊豆・小笠原弧の水曜海山における「しんかい2000」の潜航調査を例として―, 海洋調査技術, 6,1 (no.11), 29-44, (海洋調査技術学会).

(原稿受理：平成15年1月15日)

