— 論 文 —

海底熱水系の物理環境パラメータの時間変動モニタリング — 水曜海山カルデラ海底熱水域における 流速・温度の時間変動観測 — *

田中 明子[†]・木下 正高[‡]・浦辺 徹郎^{**}

要 旨

2001 年から 2002 年にかけて、伊豆小笠原弧上の水曜海山カルデラ内の海底熱水域において、物理・化学・地質環境の変動の長期観測を行ない、それらの変動が熱水系地下生物圏に与える影響について総合的な調査研究を行なった。海底熱水系の物理環境パラメータの時間変動モニタリングを行なうために、Medusa 型熱水流速計・小型熱流量プローブ・座布団型熱流量計・湧出量計などを用い、水曜海山カルデラ内の掘削孔などにおいて、熱水活動の熱水の流速と温度や海底における水温を観測した。その結果、低温熱水湧出部においては、熱水の流速・熱水温度・海底における水温の変動は、いずれも底層流に支配されており、基本的には 12 時間の周期性をもっていることが明らかになった。一方、掘削坑から湧出する熱水は、流速が一日・半日周期で変動していることが推測された。これは、熱水溜まりの潮汐に対する応答を反映している可能性がある。

キーワード：海底熱水系、水曜海山、流速・温度測定、時間変動、空間分布

1. はじめに

伊豆小笠原海域の水曜海山において、2001 年から 2003 年にかけて、科学技術振興調整費総合研究課題「海底熱水系における生物・地質相互作用の解明に関する国際共同研究」(アーキアン・パーク計画)の下で、さまざまな装置・機器・手法を用いて、学際的な研究が行われた(浦辺ら, 2005)。海底熱水系における生物圏-地

殻圏相互作用のシステムを解明するためには、その場の地圏から水圏・生物圏へのエネルギー・物質フラックスを定量的に測定・長期観測することが必要とされる(科学技術庁, 2000)。海底下における微生物の生息環境は、間隙水の存在と温度・圧力条件に左右され、それらは潮汐作用などにも影響されて、さまざまなスケールで時間的に変動していると考えられているからである(科学技術庁, 2000)。これまでの研究で、海水中に噴出した熱水の挙動やフラックスが徐々に明らかになってきた。例えば、大西洋中央海嶺 TAG 熱水マウンドでは、ブラックスモーカー複合体周辺に鉛直サーミスターアレイが 3 本設置され、約 12 時間周期の温度異常が観測されて、熱水プルームが海洋潮汐に起因する潮汐流によって移動していることが示唆されている(Kinoshita

* 2004 年 10 月 17 日受領；2005 年 1 月 21 日受理
著作権：日本海洋学会, 2005

[†] (独) 産業技術総合研究所地質情報研究部門
〒305-8567 つくば市東 1-1-1 つくば中央第 7 事業所
主著者 e-mail address : akiko-tanaka@aist.go.jp

[‡] 海洋研究開発機構地球内部変動研究センター
〒237-0061 横須賀市夏島町 2-15

^{**} 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻
〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1 理学部 5 号館

et al., 1998)。また、ハイドロフォン観測により、海底熱水活動が潮汐と極めて良い相関があることが、マリアナトラフ、大西洋中央海嶺 (TAG 地域)、沖縄トラフなどにおいて確認されている (例えば、西澤ら, 1995; 笠原ら, 1995)。このハイドロフォンで検知される信号の変動は、潮汐によって引き起こされた湧昇流の直接または間接的な圧力変動によって生じたと示唆されている。

Fig. 1. Topographic relief map of Izu-Bonin arc system and location of Suiyo Seamount.

本研究では、海底下の物理的環境を長期間にわたって調査研究するために、海底の掘削孔を利用することを試みた。そのために、海底の熱水湧出地帯において、熱水の流速や温度を長期間にわたり測定できる装置として Medusa 型熱水流速計を利用することにした。Medusa 型熱水流速計は、これまでに海嶺軸付近の熱水系における流速・温度の長期変動の観測に用いられてきた (Schultz *et al.*, 1992; Shultz *et al.*, 1996)。これを掘削孔上の観測用に改良して、これまでにデータの得られていない島弧縁海系の海底熱水域である水曜海山カルデラにおいて、熱水の流速と温度および海底付近の水温のデータを 2 週間程度にわたり測定した。本

論文では、これらの測定値の時系列解析結果を明らかにするとともに、そこから類推される熱水活動の時間変動の特徴について議論した。

2. 機器の概要とその設置・回収

アーキアン・パーク計画において種々の調査研究が行なわれた水曜海山は、伊豆小笠原島弧のデイサイト質海底火山である (Fig. 1)。これらの調査研究を通じて、島弧の海底熱水系に特有な構造と性質が明らかになった (Urabe *et al.*, 2002)。この熱水系は粗粒の砂と軽石よりなる堆積物に覆われた平坦なカルデラ底 (水深 1,390 m) が東西 250 m, 南北 200 m にわたって広がっている (Fig. 2)。Table 1 は、長期観測を行った機器の設置場所・期間などをまとめたものである。これらの機器の設置と回収は、主に 2001 年“新生丸”・2002 年“新竜丸”航海における無人潜水艇“はくよう 2000”と、海洋科学技術センターの“なつしま”を用いた航海 (NT01-08 および NT02-09 航海) における“しんかい 2000”と無人潜水艇“ドルフィン 3K”を用いて行なわれた (木下ら, 2003)。地球化学的な時系列データは本特集号 (石橋ら, 2005) で述べられている。また、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た湧出量計については Taniguchi *et al.* (2003) により報告がなされている。

2.1. Medusa 型熱水流速計

Medusa 型熱水流速計は、現在オレゴン州立大学の Adam Schultz 教授により設計されたもので、海底の熱水湧出地帯において流出する熱水および流入する海水の流速と温度を長期間にわたって測定できる装置である (Schultz *et al.*, 1992; Shultz *et al.*, 1996)。Mini-Medusa 型熱水流速計・Medusa/Gemini 型熱水流速計は、それぞれ天然の熱水噴出口上および掘削孔のケーシングパイプ上において観測するために改良されたもので、ベンチュリー管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同一である (Fig. 3 の上と中央の図)。ベンチュリー管は、海底から流出する熱水を導入するための管であり、中央に温度・流速センサーが固定されている。Mini-Medusa 型熱水流速計のベンチュリー管は、乱流の発生を抑えるために、海底

Fig. 2. Schematic map of the hydrothermal area at the Suiyo Seamount (modified after Urabe *et al.* (2002)). Stars show locations of observation sites.

に密着する部分と先端の径が大きく、センサーが付く中央部分において径が小さい鼓状の形状となっている。また、Medusa/Gemini 型熱水流速計のベンチュリー管の長さは、管内に流入する熱水が層流となるのに十分な長さとなるように決められている。温度・流速センサーはケーブルを用いて、圧力容器と接続されている。圧力容器内部には内部の温度を測るための温度計があり、耐温は 100 °C～150 °C 程度である。測定可能流速範囲は $10^{-1} \sim 10^2 \text{ mm s}^{-1}$ 程度であり、流速と同時に熱水の温度と周囲の海水温度 (Mini-Medusa 型熱水流速計・Medusa/Gemini 型熱水流速計は、それぞれ海底面上約 5 cm・約 15 cm の位置における測定値) を記録する。従来の機器 (Shultz *et al.*, 1992) のセンサー部分の原理を変更することにより、信頼性が上がっている。なお、観測している流速は速さ (速度の大きさ) であり、その向きは測定できない。また、小型・軽量化

により、既存の有人・無人潜水艇を用いて設置・回収を行う際に、複数個を同時に扱うことが可能となった。一方、流速データの温度依存性が高くなるという欠点が生じ、取得したデータのキャリブレーションをより一層注意深く行う必要が生じている。

2002 年 8 月に、Mini-Medusa 型熱水流速計と Medusa/Gemini 型熱水流速計のそれぞれ 2 台ずつ (以下それぞれ MM1, MM2, MG1, MG2 と略す) を、無人潜水艇 “はくよう 2000” を用いて海底現場に設置し、無人潜水艇 “ドルフィン 3K” を用いて回収した。MM1 と MM2 はそれぞれ、“shell carpet” と呼ばれている中央熱水地帯の西側に広がるシンカイヒバリガイが巨大コロニーを形成している場所と、中央熱水地帯から東側に 100 m 程度離れた東部熱水地帯にある掘削孔 (APSK03) の近くの海底面の低温熱水湧出部において、17 日間程度の観測を行なった。MG1 と MG2 は、2002 年 8 月

Table 1. Summary for long-term experiment during the period between 2001 and 2002 within the caldera of Suiyo Seamount.

Station Name	observations	Start time [GMT]	End time [GMT]	duration [day]	Site description Latitude [28°34'N], Longitude [140°38'E]	Station Name	observations	Start time [GMT]	End time [GMT]	duration [day]	Site description Latitude [28°34'N], Longitude [140°38'E]
SHF1	Heat flow	01/09/01	01/09/01	<1	18.44°N, 36.6°E	SHF41	Heat flow	02/09/16	02/09/16	<1	19.22°N, 40.133°E
SHF2	Heat flow	01/09/01	01/09/02	1	20.09°N, 41.01°E	SHF42	Heat flow	03/12/07	03/12/07	<1	17.42°N, 38°E
SHF3	Heat flow	01/09/02	01/09/05	3	16.43°N, 33.975°E	SHF43	Heat flow	03/12/07	03/12/07	<1	18.11°N, 38.8°E
SHF4	Heat flow	01/09/05	01/09/06	1	17.61°N, 35.625°E	SHF44	Heat flow	03/12/07	03/12/07	<1	18.11°N, 38.8°E
SHF5	Heat flow	01/09/05	01/09/06	1	19.61°N, 39.38°E	SHF45	Heat flow	03/12/07	03/12/07	<1	18.11°N, 38.8°E
SHF6	Heat flow	01/09/06	01/09/14	8	20.80°N, 42.21°E	SHF46	Heat flow	03/12/07	03/12/07	<1	18.93°N, 38.65°E
SHF7	Heat flow	01/09/06	01/09/14	8	18.81°N, 37.11°E	SHF47	Heat flow	03/12/07	03/12/07	<1	20.41°N, 39.25°E
SHF8	Heat flow	01/09/14	01/09/15	1	21.13°N, 43.275°E	SHF48	Heat flow	03/12/08	03/12/08	<1	17.39°N, 35.35°E
SHF9	Heat flow	01/09/14	01/09/15	1	16.24°N, 33°E	SHF49	Heat flow	03/12/08	03/12/08	<1	15.33°N, 37.5°E
SHF10	Heat flow	01/09/15	01/09/15	<1	19.03°N, 38.213°E	SHF50	Heat flow	03/12/08	03/12/08	<1	14.56°N, 40.74°E
SHF11	Heat flow	01/09/15	02/08/10	329	16.76°N, 06.915°E	SHF51	Heat flow	03/12/08	03/12/08	<1	15.44°N, 40.74°E
SHF12	Heat flow				16.25°N, 37.82°E	SHF52	Heat flow	03/12/08	03/12/08	<1	15.81°N, 39.275°E
SHF13	Heat flow	02/08/10	02/08/23	13	16.06°N, 36.98°E	Zabuton Z1	Heat flow	01/07/30	02/08/10	376	NE reference
SHF14	Heat flow	02/08/23	02/08/24	1	16.06°N, 36.81°E	Zabuton Z2	Heat flow	01/07/30	01/08/27	28	next to SHF1
SHF15	Heat flow	02/08/23	02/08/24	1	15.97°N, 36.81°E	Zabuton Z3	Heat flow	01/07/30	01/08/27	28	E of SHF11
SHF16	Heat flow	02/08/23	02/08/24	1	15.97°N, 36.81°E	Zabuton Z4	Heat flow	01/07/30	01/09/05	37	next to SHF3
SHF17	Heat flow	02/08/24	02/08/24	<1	15.77°N, 36.39°E	Zabuton Z5	Heat flow	01/09/01	02/08/10	343	MK#223
SHF18	Heat flow	02/08/24	02/08/27	3	16.25°N, 35.49°E	Zabuton Z6	Heat flow	01/09/14	02/08/10	330	near APSK4
SHF19	Heat flow	02/08/24	02/08/24	<1	15.97°N, 37.891°E	Seep meter F1	Seep flow	01/07/30	01/09/06	38	next to Z1
SHF20	Heat flow	02/08/24	02/08/26	2	15.97°N, 38.62°E	Seep meter F2	Seep flow	01/07/30	01/08/26	27	next to Z2
SHF21	Heat flow	02/08/24	02/08/24	<1	19.23°N, 35.1°E	Seep meter F3	Seep flow	01/09/14	01/09/14	<1	next to SHF3
SHF22	Heat flow	02/08/24	02/08/24	<1	16.63°N, 35.1°E	Seep meter F4	Seep flow	01/09/06	02/08/10	338	MK#223
SHF23	Heat flow	02/08/24	02/08/24	<1	17.93°N, 35.25°E	Seep meter F5	Seep flow	01/07/30	01/09/15	47	
SHF24	Heat flow	02/08/31	02/08/31	<1	17.42°N, 38.7°E	Seep meter F6	Seep flow	01/07/30	01/09/14	46	
SHF25	Heat flow	02/08/31	02/09/03	3	17.22°N, 35.79°E	CTD/Pressure	CTD+Pressure	01/07/30	01/09/14	46	
SHF26	Heat flow	NA	NA			Geochemical St.#1		01/07/30	01/09/14	46	near APSK4
SHF27	Heat flow	NA	NA			Geochemical St.#2		01/08/27			near APSK4
SHF28	Heat flow	02/09/06	02/09/06	<1	16.61°N, 34.965°E	Geochemical St.#3		01/09/05			at APSK05
SHF29	Heat flow	02/09/06	02/09/06	<1	18.56°N, 35.625°E	Flow meter#1	Current	01/09/15	02/08/10	329	near APSK4
SHF30	Heat flow	02/09/06	02/09/06	<1	17.87°N, 33.165°E	Flow meter#2	Current	01/09/01	01/09/01	<1	next to SHF2
SHF31	Heat flow	02/09/06	02/09/06	<1	16.96°N, 32.835°E	Pressure meter	Pressure	01/09/01	01/09/02	1	
SHF32	Heat flow	02/09/06	02/09/06	<1	16.96°N, 31.665°E	Seep Flow meter rev1	Seep flow	01/09/02	01/09/05	3	
SHF33	Heat flow	02/09/10	02/09/10	<1	16.96°N, 35.33°E	Medusa/Gemini#3	Tamb, Teff, Veff	01/08/08	01/08/09	<1	APSK05, 07
SHF34	Heat flow	02/09/10	02/09/10	<1	15.25°N, 33.48°E	Medusa/Gemini#4	Tamb, Teff	01/08/03	01/08/27	24	APSK04, 06
SHF35	Heat flow	02/09/12	02/09/12	<1	17.20°N, 40.74°E	Medusa/Gemini#5	Tamb, Teff, Veff	01/08/02	01/08/03	<1	APSK01
SHF36	Heat flow	02/09/14	02/09/14	<1	17.49°N, 36.375°E	Medusa/Gemini#1	Tamb, Teff, Veff	02/08/13	02/08/23	10	APSK01
SHF37	Heat flow	02/09/14	02/09/14	<1	17.50°N, 34.1325°E	Medusa/Gemini#2	Tamb?, Teff?, Veff	02/08/13	02/08/23	10	APSK09
SHF38	Heat flow	02/09/15	02/09/15	<1	18.20°N, 35.23°E	Mini-Medusa#1	Tamb, Teff	02/08/06	02/08/23	17	17.60°N, 36.04°E
SHF39	Heat flow	02/09/15	02/09/15	<1	17.46°N, 34.26°E	Mini-Medusa#2	Tamb, Teff, Veff	02/08/06	02/08/23	17	APSK03
SHF40	Heat flow	02/09/16	02/09/16	<1	16.96°N, 41.47°E						

に、“第2白嶺丸”/BMS(海底設置型掘削装置)を用いて、中央熱水地帯に掘削された APSK10 と APSK09 において、約10日間程度の観測を行なった。MM2は、他の機器と100 m以上離れていた(Fig. 2)。他の3台のMedusa型熱水流速計は、いずれも中央熱水地帯に設置され、それぞれ数十 m 離れていた。掘削孔やカルデ

ラ内の海底熱水系に関する詳細は、丸茂ら(2005)および掛川ら(2005)に記述されている。

2.2. 小型熱流量プローブ(SAHF)

SAHF(Stand-Alone Heat Flow meter)は、潜水船で容易に取り扱えるように作成された長さ約1 mの熱

Fig. 3. Images of Mini-Medusa and Medusa/Gemini hydrothermal monitoring systems, and SAHF (from top to bottom).

流量プローブである (Fig. 3 の右下の図)。海底に鉛直につきさして、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装置である。オフラインであるために、既存の有人・無人潜水艇を用いて測定を行なう際に、複数の SAHF を同時に取り扱うことが容易であり、効率的に熱流量分布を測定することが可能である (木下ら, 2003)。

2001 年から 2002 年の期間に、水曜海山カルデラ内の計 41 点における温度が SAHF を用いて測定された。その結果、中央熱水地帯内部では 10 W m^{-2} を超える高熱流量、その北西側および南側では 1 W m^{-2} 以下の低熱流量、その北東側では 4 W m^{-2} 程度の均一な値が観測された (木下ら, 2003 ; Fig. 2 の地殻熱流量の分布図)。ここで用いるデータは、MG2 の横 50 cm 程度の位置においてほぼ同時期に観測を行った SAHF13 (Fig. 3 の左下の図) の最上部のサーミスタの値であり、海底面下直下の温度である。

3. 時系列解析

Medusa 型熱水流速計 4 台 (MM1, MM2, MG1, MG2) と SAHF13 に観測された温度・流速の時間変化を Fig. 4 に示す。MM1 (Fig. 4 の上から 3 つ目の部分) による観測結果は、熱水温度 (Fig. 4 では灰色の太実線で示す) と海底における水温 (Fig. 4 では点線で示す) の間に非常に有意な相関があった。MM2 (Fig. 4 の上から 4 つ目の部分) による結果は、熱水温度と海底における水温の間に正の相関があり、熱水の流速 (Fig. 4 では灰色の破線で示す) が速い際には、熱水温度・海底における水温が低下していた。これらのデータによれば、熱水温度が海底における水温より全体的に低い傾向があるが、これは压力容器を低温熱水湧出部の海底面に直接置いたことにより、その中に設置されている温度センサーが熱水に直接さらされたためであろう。また、MM2 (MM1 の熱水流速の値は欠測) による観測結果の熱水流速が速い際に、熱水温度と海底水温とが負の相関にあるのは、潮汐に対応した底層流によって、MM2 のまわりの海底面下から湧出している熱水よりも低温のカルデラ内の水がベンチュリー管内を鉛直下向きに流れることにより、生じたと考えられる。

MG1 (Fig. 4 の上から 5 つ目の部分) による観測結果は、熱水温度と海底における水温の間に正の相関を示し、熱水の流速が速い際には、熱水温度・海底における水温が低下する。これは MM2 による観測結果と同様に、ベンチュリー管内にカルデラ内の水が流入したためと考えられる。8 月 15 日を境にして、熱水温度の方が海底における水温より全体的に高い傾向から低

Fig. 4. (Top) Tidal signal generated by the NAO99 model (Matsumoto *et al.*, 2000). (Second panel) Time series temperature measurements by SAHF13. (Lower four panels) Time series of effluent velocity and temperature, and ambient seawater temperature measured by Medusa systems.

い傾向に変化した。これに伴い熱水の流速も下がるが、これは掘削坑が熱水からの析出物によりその径が細くなることにより熱水が通りにくくなった結果と考えられる。一方、MG2 (Fig. 4 の最下部) による観測結果は、熱水温度・熱水流速・海底における水温の間にはそれぞれ正の相関があることを示している。このデータは、熱水温度の方が海底における水温より全体的に高い傾向があるが、これは掘削坑から流出するカルデラ内の海水より温度が高い熱水をとらえている。

海洋潮汐とこれらの熱水の温度・流速や海底における水温の変動との関連を解析するために、海面高度を Fig. 4 の最上部に示す。海洋潮汐モデルは、国立天文台・水沢のホームページ (<http://www.miz.nao.ac.jp/staffs/nao99/>) で公開されている Matsumoto *et al.* (2000) による全球潮汐モデルの計算値を用いた。これには、約 5 年分の TOPEX/POSEIDON 海面高度計データ (Cycle 9-198) を潮汐解析して、流体力学数値モデルに同化して構築されたグローバルモデルと、沿岸の検潮データを同時に同化して作成された日本周辺モデルが用意されており、特に日本周辺では高精度な海洋潮汐モデルであると考えられている。カルデラ内東部の低温熱水湧出部に設置した MM2 は、数十 m の距離内に設置した MM1, MG1, MG2, SAHF13 と 100 m 以上離れている。このような観測位置分布にも係わらず、満潮から引き潮になるときに、MM1 と MM2, MG1 と MG2, SAHF13 (Fig. 4 の上から 2 つ目の部分) という順に少しずつ時間差 (Fig. 4 の灰色の太点線) を伴ない、全観測量に変動が見られた。この変動は、カルデラ内全体に生じているような潮汐に伴って起こる海底直上の海水の移動に対応していると考えられる。

比較的短い時系列から長周期変動を取り出すことのできる Multi-Taper Method (例えば Percival and Walden, 1993) により、それぞれのデータの卓越周期を得た (Fig. 5)。海底面の低温熱水湧出部に設置した MM1 と MM2 の熱水の流速・熱水温度・海底における水温のデータは、いずれも 12 時間の周期が卓越していた。これは、潮汐に関連した底層流の現象をとらえていると考えられる。一方掘削坑上に設置した MG1 と MG2 では、MG2 の熱水の流速については、12 時間と 24 時間の卓越周期がみられるが、その他のデータには

潮汐に対応するような顕著な周期変動が認められない。安定して得られたデータの期間が十分ではないが、熱水の流速は掘削孔上と天然の熱水噴出口の上では卓越周期が異なることが推測される。

4. 考察

アーキアン・パーク計画などを通して、水曜海山カルデラ内の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、不透水性の cap-rock を形成していることが明らかになった (Urabe *et al.*, 2002)。この cap-rock の上面の深さは、海底面付近から海底面下 10 m 程度までの間で、深さは波打つように変化しており、その下に 300 °C を越える高温の熱水溜まりが存在すると考えられている。熱水溜まり中の熱水温度や組成は、10 年間にわたり場所によらず均一であり、化学的に均質な単一の熱水溜まりが熱水地帯の海底下に薄く広く分布していると推定されている (石橋ら, 2003)。この熱水溜まりから掘削坑を通して湧出する熱水をとらえていると考えられる MG1 と MG2 の観測値からは、MG2 の熱水の流速の卓越周期が 24 時間と 12 時間である以外は、明瞭な卓越周期が得られなかった。MG2 の熱水流速・熱水温度の間にみられる正の相関性と熱水流速の卓越周期から、熱水溜まりからの熱水の湧出量の卓越周期も 12 時間と 24 時間であると推測される。それにも係わらず、熱水温度の卓越周期が明瞭ではないのは、熱水溜まりから掘削坑を通して湧き出る熱水と、潮汐に支配されている底層流との両者の影響を受けているためによる可能性が示唆される。特に熱水温度と海底水温のデータは、海底から高さ約 50 cm・15 cm における測定値であることから、両者の影響が分離し難いためと考えられる。これは、流速が MG2 に比べて遅い MG1 において、卓越周期が見られないということと整合的である。つまり、低温熱水湧出部に設置した MM1 と MM2 の観測値が、潮汐に関連した底層流の現象をとらえていたと考えられ、12 時間周期が卓越していたのに対して、MG1 と MG2 のデータは、この底層流と潮汐に起因する直接または間接的な圧力変化によって、熱水溜まりの活動変動の影響を受けている可能性を示唆する。いずれの場合も、より詳細な議論

Fig. 5. Power spectral estimates for the data collected by Mini-Medusa#1 and #2 and Medusa/Gemini#1 and #2 using MWPS code (Jupp, personal communication).

は流向流速計のデータと比較するか、もしくは海底下からの熱水流出速度・温度をより長期間にわたりデータを取得する必要がある。

ここで得られたデータからは、海底熱水活動の流速と温度の時間変動が、掘削孔のケーシングパイプ上と天然の熱水噴出口の上では卓越周期が異なると推察されるが、より定量的な解釈を行うためにはより長期の安定した良質のデータの取得が必要である。例えば、主要四分潮を分離するためには、少なくとも2週間以上のデータを得る必要がある。また、これらの時間変動が熱水系地下生物圏に与える影響について考察するためには、海水中に噴出した熱水のフラックや変動だけではなく、海底下の物理的環境・イベントをできるだけ高密度かつ正確に捉えることが必要である。このためには、海底下のシステムを擾乱することなしに、海水に源を持つ変動と分離して観測を行なうことが不可欠となる。そのためには、1990年以来 ODP (Ocean Drilling Program. 国

際深海掘削計画) 航海で使用されることが多い“CORK (Circulation Obviation Retrofit Kit)” (孔内計測の後に流体循環を長期モニタリングするための孔内計測機器。掘削孔を密閉することにより、定常的な海水の流れを除去することができる。例えば Davis *et al.* (2000) を参照のこと) や、パッカーを用いる“ACORK” (http://www.earth.rochester.edu/issep/Advanced_CORK_report.html) などに用いられている技術を利用する工夫も必要であろう。

5. おわりに

アーキアン・パーク計画を通じて、水曜海山は種々のデータが取得され、もっとも詳細に調査された海底熱水系の一つとなった。海底熱水系における掘削孔を利用した流体の温度・流速の時間変動モニタリングは、その場の温度場や熱水循環のスタイルについて多くの情報をもたらすものと期待される。化学環境パラメー

タや他のデータとの統合化をはかることにより、これらの変動が熱水系地下生物圏に与える影響についての新しい知見が得られる可能性がある。今後は、島弧海底熱水系の流速と温度の変動の要因を明らかにするとともに他のデータの解釈ともあわせ、統合的なモデルの構築を行なう必要性があろう。

謝 辞

本研究は、平成12年度～平成16年度文部科学省科学技術振興調整費総合研究課題「海底熱水系における生物・地質相互作用の解明に関する国際共同研究」(アーキアン・パーク計画)の一環として実施された。機器の設置回収には、無人潜水艇“はくよう2000”とその母船“新世丸”・“新竜丸”および潜水艇“しんかい2000”・無人潜水艇“ドルフィン3K”とその母船“なつしま”の潜航チームおよび乗組員の皆様に大変ご尽力いただいた。これらの方々に心から感謝する。なお一部の図の作成には、GMT systems ver. 3 (Wessel and Smith, 1995)を用いた。

References

- Davis, E. E., K. Wang, K. Becker, and R. Thomson (2000): Formation-scale hydraulic and mechanical properties of oceanic crust inferred from pore pressure response to periodic seafloor loading. *J. Geophys. Res.*, **105**, 13,423–13,435.
- 石橋 純一郎, 島 伸和, 石井 浩介, 岡村 慶, 海宝 由佳, 加賀谷 昌弘, 亀尾 桂, 辻野 匠, 角皆 潤, 徳山 英一, 中川 書子, 中村 光一, 中村 恭之, 西村 清和, 野田 雅一, 東 陽介, 丸茂 克美, 村上文敏, 山本 富士夫, 山中 寿朗, 渡辺正晴 (2003): 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-. JAMSTEC 深海研究, **22**, 115–124.
- 石橋 純一郎, 中村 光一, 岡村 慶, 下島 公紀, 土岐 知弘, 角皆 潤 (2005): 海底熱水活動地帯の化学環境を明らかにする試み. 海の研究, **14**, 251–266.
- 科学技術庁 研究開発局 海洋地球課 (2000): 平成11年度科学技術振興調整費 海底熱水系における生物圏・岩石圏相互作用の解明に関する調査報告書. 326 pp.
- 笠原 順三, 佐藤 俊典, 是沢 定之 (1995): 「しんかい2000」を用いた海底地震観測によってわかった沖縄トラフ・伊平屋海嶺の熱水活動の周期性の証拠. JAMSTEC 深海研究, **11**, 167–188.
- 掛川 武・野田 雅一・丸茂 克美 (2005): 水曜海山海底熱水活動域の地下地質構造と硫化物硫黄同位体組成との関係. 海の研究, **14**, 221–235.
- Kinoshita, M., R. P. Von Herzen, O. Matsubayashi, and K. Fujioka (1998): Tidally driven effluent detected by long-term monitoring at the TAG hydrothermal mound, Mid-Atlantic Ridge. *Phys. Earth Planet. Interior*, **109**, 201–212.
- 木下 正高, NT01-8 および NT02-9 航海乗船研究者一同 (2003): 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-. JAMSTEC 深海研究, **22**, 77–87.
- 木下 正高, 護摩堂 雅子, 川田 佳史, 田中 明子 (2005): 熱流量精査による水曜海山カルデラの熱水循環様式の推定. 海の研究, **14**, 165–175.
- 丸茂 克美・浦辺 徹郎・高野 淑識・後藤 晶子 (2005): 水曜海山海底熱水系に産する熱水鉱物の産状と化学組成 - 海底設置型掘削装置によるアプローチ -. 海の研究, **14**, 203–220.
- Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe (2000): Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan. *Journal of Oceanography*, **56**, 567–581.
- 西澤 あずさ, 佐藤 俊典, 笠原 順三, 藤岡 換太郎 (1995): TAG 熱水マウンドの潮汐に同期した活動-OBSHによる観測結果. JAMSTEC 深海研究, **11**, 125–135.
- Percival, D. B., and A. T. Walden (1993): Spectral Analysis for Physical Applications: Multitaper and Conventional Univariate Techniques. Cambridge University Press, 583 pp.
- Schultz, A., J. R. Delaney, and R. E. McDuff (1992): On the partitioning of heat flux between diffuse and point source seafloor venting. *J. Geophys. Res.*, **97**, 12,299–12,314.
- Schultz, A., P. Dickson, and H. Elderfield (1996): Temporal variations in diffuse hydrothermal flow at TAG. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 3,471–3,474.
- Taniguchi M., S. Uchida, and M. Kinoshita (2003): Periodical changes of submarine fluid discharge from a deep seafloor, Suiyo Sea Mountain, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1,917–1,920.
- Urabe, T., J. Ishibashi, A. Maruyama, K. Marumo, and N. Seama (2002): Influence of magmatic volatiles to hydrothermal activity at Suiyo Seamount, Izu-Ogasawara Arc, Western Pacific. *Eos. Trans. AGU*, **83** (47), Fall Meet. Suppl., Abstract V11C-03.
- 浦辺 徹郎・丸山 明彦・丸茂 克美・島 伸和・石橋 純一郎 (2005): 「アーキアン・パーク計画」が明らかにしたもの, 海の研究, **14**, 129–137.
- Wessel, P., and W. H. F. Smith (1995): New Version of the Generic Mapping Tools Released. *EOS Trans. AGU*, **76** (33), 329.

Temporal variations in effluent fluid at Suiyo Seamount

Akiko Tanaka [†], Masataka Kinoshita [‡], Tetsuro Urabe ^{**}

Abstract

Many attempts have been made to acquire time-series measurements at Suiyo Seamount, Izu-Bonin Arc, Japan, during August 2001 and August 2002. Among many instruments deployed on the seafloor at hydrothermal sites in the summit caldera of the Suiyo Seamount, we report the results by Medusa hydrothermal monitoring system and SAHF (Stand Alone Heat Flow meter). We deployed Medusa systems at hydrothermal systems in August 2002 for about two weeks. The Medusa system monitors the flow velocities and temperatures of effluent fluid out of cased seafloor boreholes and areas of warm diffusive flow. Spectral analyses of these data provide strong evidence for tidal modulations in case of the diffuse seafloor areas. Effluent flow rate atop a cased borehole drilled into the seafloor indicates peaks at semi-diurnal and diurnal frequencies. It might reflect the tidal response of hydrothermal activity.

Key words: sea-floor hydrothermal processes, Suiyo Seamount, monitoring instrumentation, time-series analysis, spatial distribution

(Corresponding author's e-mail address: akiko-tanaka@aist.go.jp)

(Received 17 October 2004; accepted 21 January 2005)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2005)

[†] Institute of Geology and Geoinformation, National Institute of Advanced Science and Technology (AIST), Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan

[‡] Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2-15, Natsushima, Yokosuka, Kanagawa 237-0061, Japan

^{**} Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan