

マヌス海盆 DESMOS カルデラにおける海底水温 アレイ観測実験とその解釈

松林 修*1 西村 清和*1 木下 正高*2 浦辺 徹郎*1

マヌス海盆 DESMOS カルデラ内にて、「しんかい6500」により多点海底面温度観測のための全長230 mのサーミスタのアレイが設置され、169時間にわたり17点での温度を記録することに成功した。この測線はカルデラの北西部をなすテラスを東西に横切るもので、その一帯はバクテリア・マットと生物群集が広範に分布する所である。この報告では、海底面での周期的・非周期的な微小温度変化に着目した議論をする。半日周期が卓越する周期的な変化は、1) 海洋の潮流によって周期的にスweepされる一定流量一定温度の熱水流出であるか、2) 間隙水圧力を媒介にして地殻応力変化に対応する温度と流出量の変動を反映するもの、との解釈が可能であるが、筆者らは熱的な考察により地殻応力変化の仮説がより現実に近いと考える。

キーワード：マヌス海盆，DESMOS カルデラ，多点温度測定，潮汐

Array Observation of Seabottom Temperature at a Diffusive Hydrothermal Area Within DESMOS Caldera in Manus Basin

Osamu MATSUBAYASHI*3 Kiyokazu NISHIMURA*3
Masataka KINOSHITA*4 Tetsuro URABE*3

In an attempt to investigate the thermal process of heat discharge in diffusive hydrothermal areas, an array of thermistor sensors has been deployed using "Shinkai 6500" within DESMOS Caldera, Manus Basin. Temperature data for 169 hours at 17 points on the seabottom along a 230m long E-W transect passing through the northwestern terrace which is extensively covered by bacterial mats with biological colonies have been successfully recorded. We here concentrate on looking at very small periodic and non-periodic temperature changes on the seabottom. The periodic one having semi-diurnal nature can be explained either by 1) sweeping of a constant rate constant temperature discharge of diffusive warm water from the hydrothermal ground by ocean tidal current; or 2) modulation of temperature and/or discharge rate of the fluid according to the change in earth's stress by way of interstitial fluid pressure change. We prefer the latter hypothesis, based on considerations of the thermal mechanism of diffusive fluid discharge.

Keywords : Manus Basin, DESMOS Caldera, Thermistor sensor array, tidal variation.

*1 工業技術院地質調査所

*2 東海大学海洋学部

*3 Geological Survey of Japan, Tsukuba, Japan

*4 Tokai University, Shimizu, Japan

1. はじめに

中央海嶺や背弧海盆における海底熱水活動をエネルギー収支の観点から見る場合に、低温のdiffuse flowによる海水への熱放出総量は多くの例について高温噴気群による熱放出量に匹敵するか、むしろもっと大きいことが推定されている (Lowell et al., 1995)。本研究では、低温のdiffuse flowの時系列的変化に着目して海底面から放出される熱エネルギーの輸送過程を究明することを目的として、パプアニューギニア沖のマヌス海盆 DESMOS カルデラを実験フィールドとして温度センサー・アレ (多点センサー・ケーブル方式) による低温熱水活動の温度変化の連続観測を行ってその結果を考察した。中央海嶺熱水活動の長期観測機器の一つとして地質調査所によって開発中の光ファイバ分布型温度計測システム (西村・松林, 1996) を使った深海底での観測を開始するに先だち、世界的にも潜水船によりケーブル・センサーを海底面に長距離にわたって敷設する技術的実績がなかったため、本研究ではリールに巻いた1kmオーダーの長いセンサー・ケーブルの扱いに関する問題点解決を試みるものでもあった。

2. 測定方法

本研究に用いた測定装置の仕様は表1に示すとおりである。多点式記録装置 (Daibutsu-2) の基本的な部分では木下ほか (1995) にて報告された多点熱流量測定装置「大仏」と同一の仕様のものを使用しているが、今回の実験ではセンサーとして10m間隔にサーミスタを配置したケーブル・センサーのみを用いた点が異なっている。記録器を収納する耐圧容器の設置点からケーブル・センサーの端点までは230mで24点での測定を予定していたが、作動不良のセンサーも数個みられたため、有効なチャンネル数は17となった。観測時間はケーブル設置後169時間 (約7日間) であった。海底に設置された記録装置 (Daibutsu-2) の外観をしんかい6500の#2ビデオカメラの映像から複写して写真1に示す。耐圧容器と、ケーブルを展開する前のケーブル・リールとが見られる。

またDaibutsu-2とは独立に、海底面から32m上方の回収用浮力体にとりつけた小型高精度の水中温度記録器 (WaDaR) によりバックグラウンドとしての海水温測定も行った。さらに、同じ航海においてDaibutsu-2と近接した3地点において海上保安庁水路部の長屋好治氏により

表1 自己浮上式多点温度記録装置 (Daibutsu-2) の仕様

型番:	DHF 604
温度センサー:	サーミスタ (6k Ω @0°C)
記録チャンネル数:	50
データ記録容量:	7000回の測定 (1MB)
計測インターバル:	プログラマブル
分解能:	0.1 Ω (0.001°C)
測定レンジ:	0-6500 Ω
電源:	リチウム電池
データ転送:	音響デジタル通信 (12kHz, 10-100bps)
耐圧容器:	チタン合金, 6,000 m水深まで
回収:	音響指令による切り離しで記録部が自己浮上
センサー・ケーブル:	長さ230 m (10 m毎にサーミスタ)
ケーブル展開方法:	耐圧容器の脇に設置されたリールに巻いておいて、潜水船がそのリールを持って海底に着地している記録装置 (Daibutsu-2) から遠ざかって行く。

係留式式の底層海水温度連続測定も行われて、筆者らが用いた WaDaR と基本的に同質のバックグランド水温データが得られている。

3. 低温熱水サイトおよびセンサー設置の状況

ケーブルが設置された場所は、Gamo et al. (1993) により最初に記載された火山性の陥没（以下、DESMOS カルデラと呼ぶ）の北西部にあって、広範なバクテリア・マットを伴う小さなテラス地形に発達した熱水活動域である（図1）。DESMOS カルデラのカルデラ壁を形成する断層系中には最高 120℃ の噴気が存在することが分かって、そこは「Onsen サイト」と名づけられた（Auzende et

al., 1996）。ケーブルはその噴気そのものは横切っておらず、東西測線に沿って海底面直上の低温熱水の挙動をモニターすることに専念した。図2に測線の地形断面とセンサー位置を示す。ケーブルの敷設状態については、敷設終了直後しんかい6500によって観察したところでは予想以上に「たるみ」はなく、逆に（特に地形の起伏が急で大きな岩石塊が分布する場合）ケーブルが海底表面に密着せずに10cmほど水中に上がっている部分も数カ所あった。しかし、センサー全部のうち7割程度以上の点では海底堆積物表面の温度が測定されたと見られる。

DESMOS Caldera, northern part

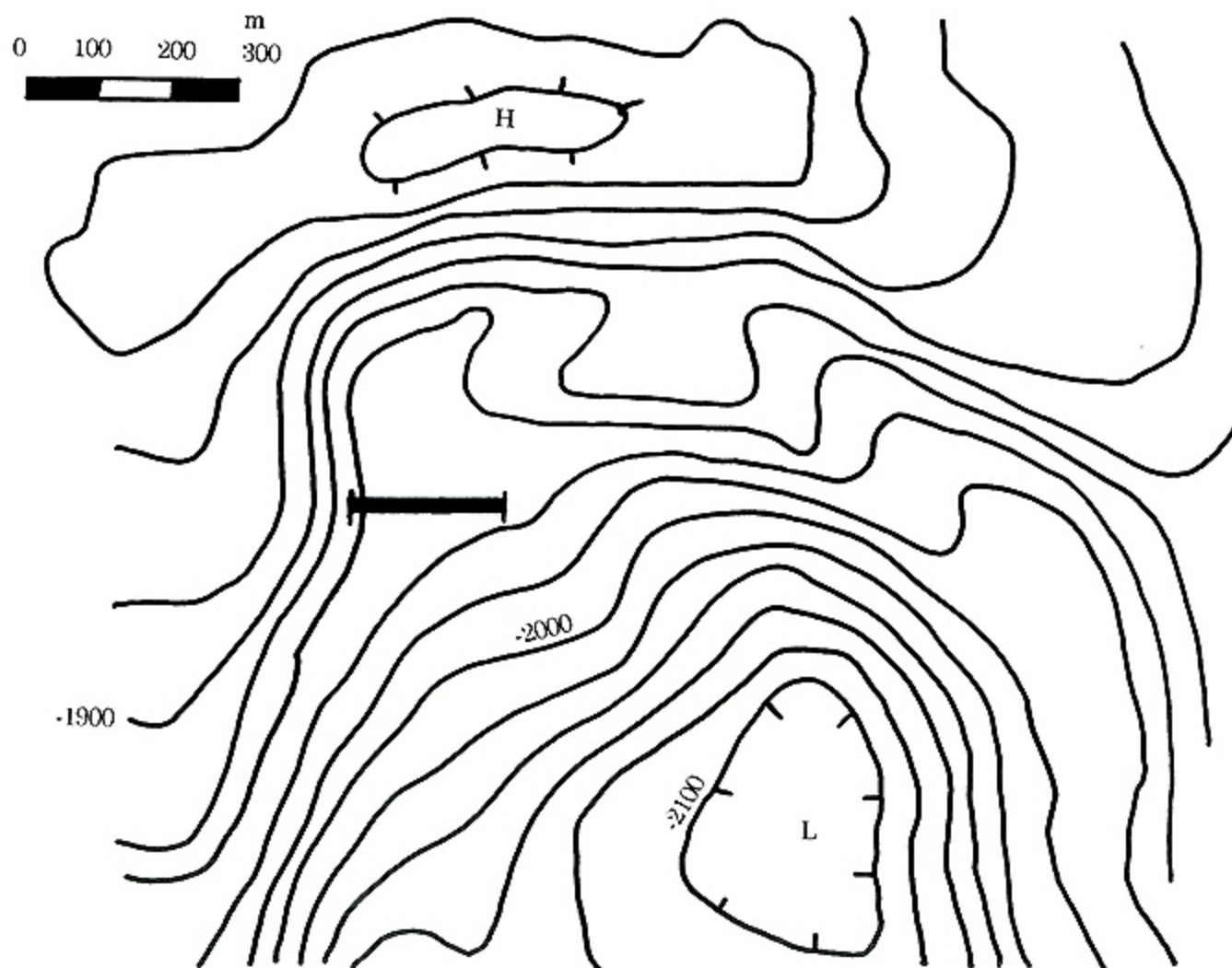


図1 マス海盆のDESMOSカルデラ地形図。ケーブル・センサーが敷設された東西測線（長さ230m）を太い実線で示す。

Fig. 1 Topographic map of DESMOS Caldera. The cable sensor was deployed on seafloor along the E-W line (230 m long) shown by bold solid line.

Topographic cross section and sensor locations

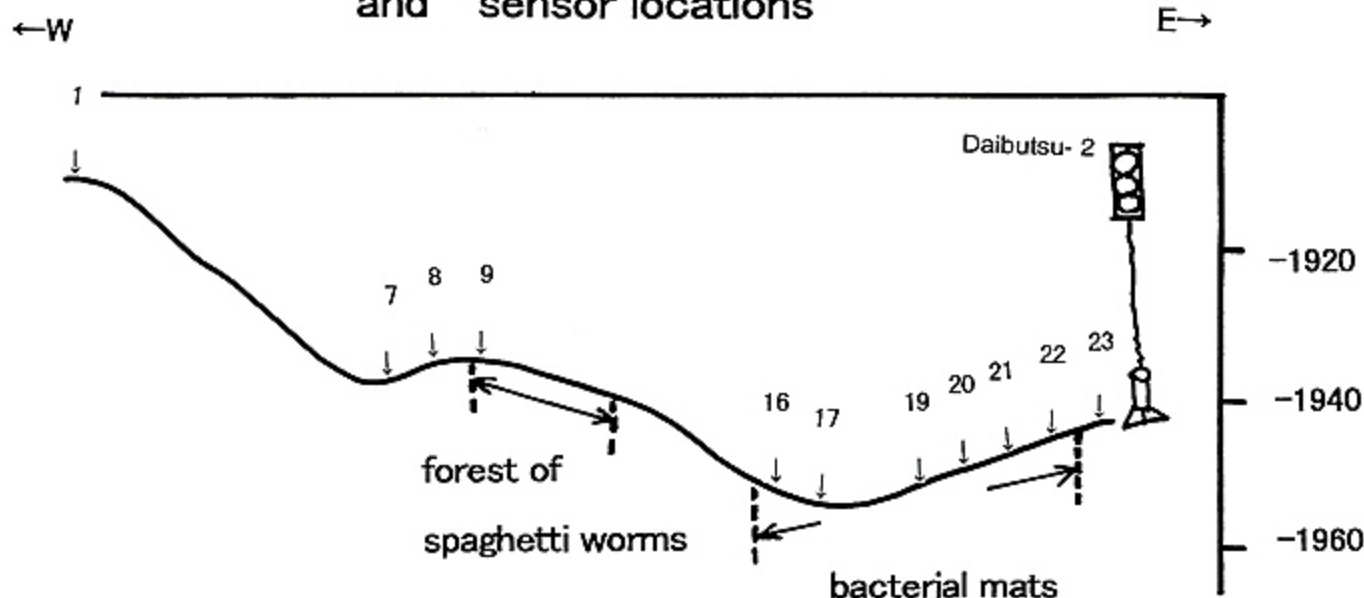


図2 測線に沿った地形断面とセンサー位置。
Fig. 2 Cross-section of the transect and locations of sensors along it.

4. 測定結果

図3に示すものは海底に敷設されたケーブル上の代表的なセンサー6点についての7日間の温度変化である。ここで便宜的に温度変化のパターンを分類してAタイプとBタイプに分ける。Aタイプは不規則で変化幅が大きい (> 0.2 K, peak to peak) もので、典型的なのはCh.19に見られる。なお、このタイプでは後述の半日周期など規則的な変化を含むとしても場合によって不規則変化に隠されてしまうことがある。他方Bタイプは、図3のCh.7に見られるように変化幅が小さくて不規則変化の成分を含まない。これは、海底面から上方に32m離れた海水の温度の変動 (図4, WaDaRを使って得られた結果) と似た変化パターンである。測線の西の端点 Ch.1もこれに当たる。Ch.7の周期性を見るためその温度変化のパワー・スペクトルを計算してみると図5のとおりである。12.1時間周期が最も卓越するが、それよりややパワーが小さい一日周期の成分も含まれる。今回のアレイ観測による海底面温度の変化傾向を全体として示すために、フルスケールを0.1℃としたカラーコンター表示を試みたもの (温度が高いことを暖色で表す) が図6である。横軸は時間で、縦軸は東西方向の距離である。

異なるチャンネル相互の関係がどうか興味をもたれる。温度測定のスAMPLING間隔が今回 10 分であるため、あまり時間軸の精密な議論ができないのが残念であったが、測線の東の端に近い7点 Ch. 16, 17, 19, 20, 21,

22, 23 (Ch.18はセンサー不調で欠測) についてのデータの一部を詳しく見ると、例えば10月27日の22:00すぎに起こった温度急上昇 (立ち上がり) の時刻が東方ほど遅いことに気づいた (図7)。これは速度2-5cm/secにてゆっくりと重力的に中立な温水塊が東向きに移動したことを表すものと解釈される (Matsubayashi et al., 1996)。温水塊が動くためのメカニズムについては、後述するような diffuse flow 自体のメカニズムに関する未解決の問題とも密接な関係があるだろう。

5. 考 察

海底地熱活動域における変動現象の時間スケールは図8 (Rona, 1988) に示されるように、秒のオーダーから数千万年のオーダーに至るまで広範なものが含まれている。今回の1週間の観測ではこれより長い周期の現象を観測するには短かすぎたものの、潮汐に関係する周期の変動は良くとらえられた。問題は、なぜ12.1時間の周期で海底水温が変化するかであるが、考えられる2つの極端な仮説は次のとおりである：

- 1) 海洋潮汐による海水の流れ (1日に2回程度の頻度で起こる) によって、海底付近に滞留していた温水塊が挙に運び去られる (Little et al., 1988)。
- 2) 湧出温水の流量を制御する機構として、地殻内応力変化およびそれに関連して周期的に変動する間隙圧変化が作用している。

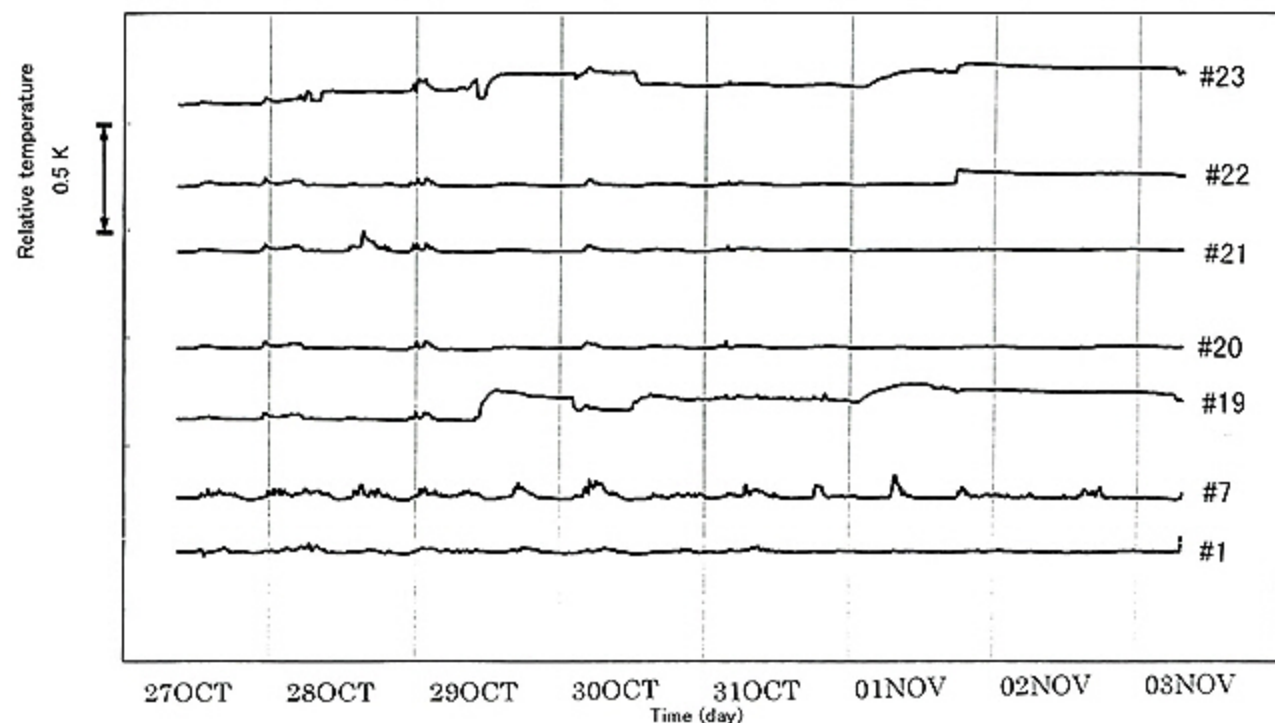


図3 測線に沿った6点のセンサーにて測定された温度の時系列。曲線が重ならないように温度の相対的な変化のみを示している。
 Fig. 3 Representative time-series of temperature measured at six points (Nos.7, 19, 20, 21, 22, 23) along the transect. Only relative temperature values are shown for clarity.

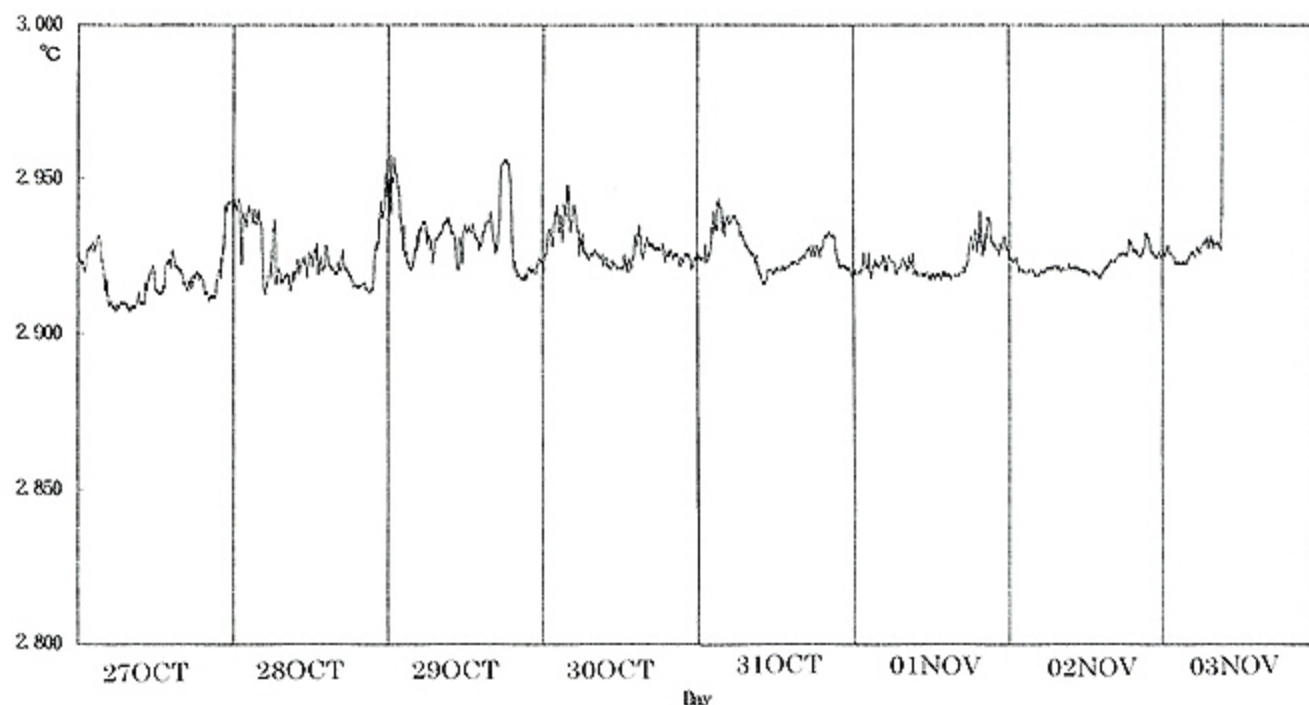


図4 海底面から32m上方にてWaDaRにより測定された海水温度の時系列。観測期間中を通じて、変化の幅は0.06 K p.p.を越えなかったことに注意。
 Fig. 4 Time-series of ambient water temperature taken by WaDaR at the level 32m above the seafloor. Note that the amplitude of the change is no larger than 0.06K, peak to peak, during the observation period.

Power Spectrum of #7 Temperature

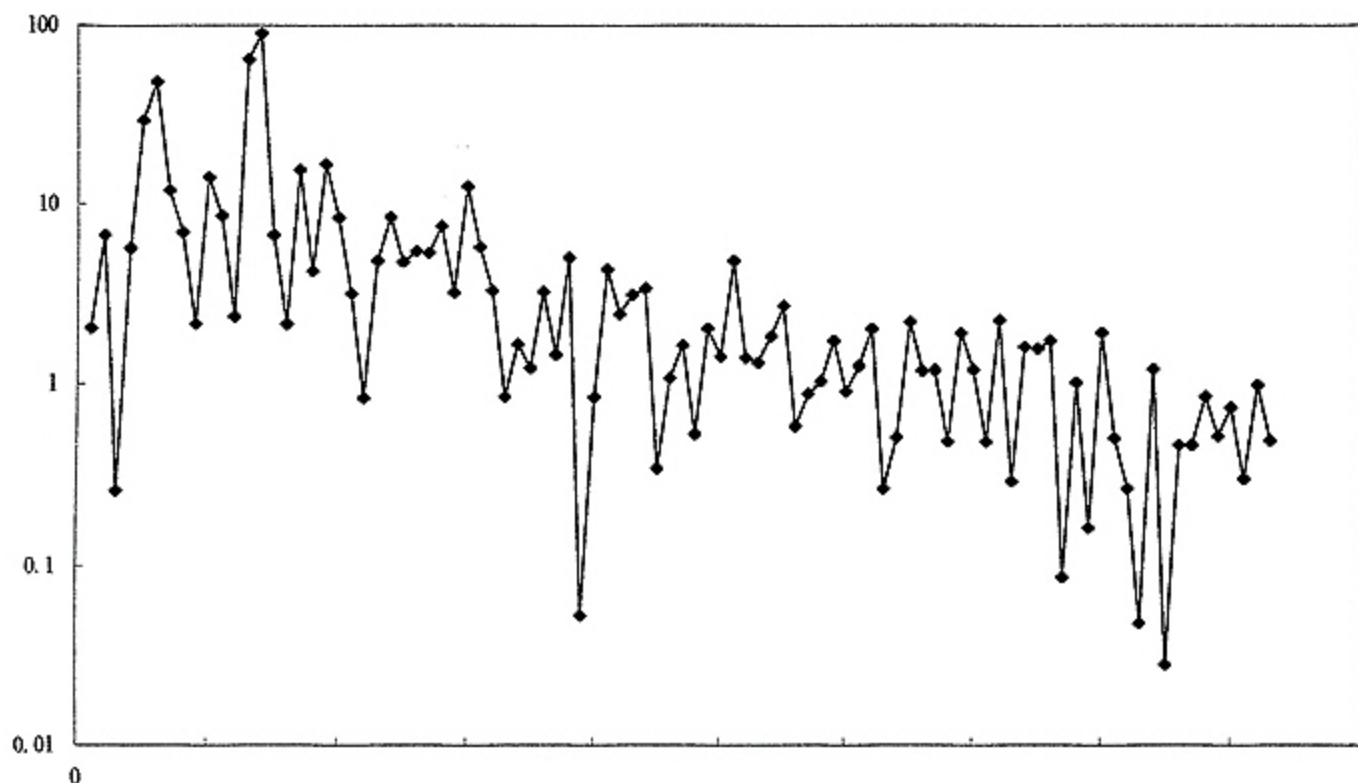


図5 No.7 センサー（測線の西端よりも60m東方の点）での温度変化のパワー・スペクトル。周期12.1 hourに最大のピークがある。
Fig. 5 Power spectrum of the temperature variation measured at No.7 sensor, which is located 60m to the east from the western end of the transect. There is a peak for the frequency of 12.1 hour.

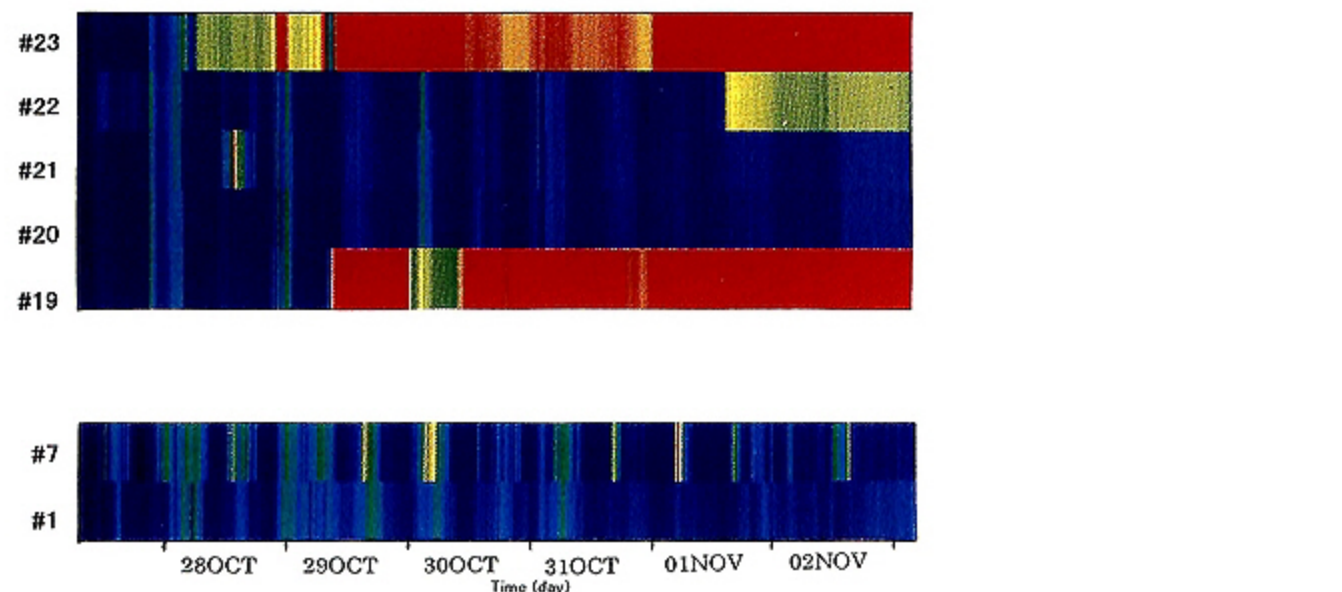
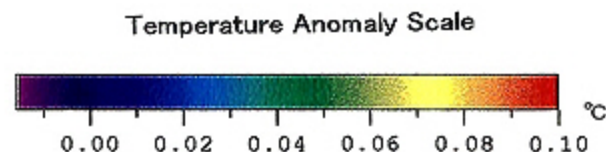


図6 海底面の6点で測定された温度の時系列をカラー・コンターで示す。周期的な変化はすべての測定点に対して同じ周期性である。

Fig. 6 Color contour diagram showing the set of temperature time-series for six different points on the seafloor. Periodicities seen for all the sensors are essentially the same.



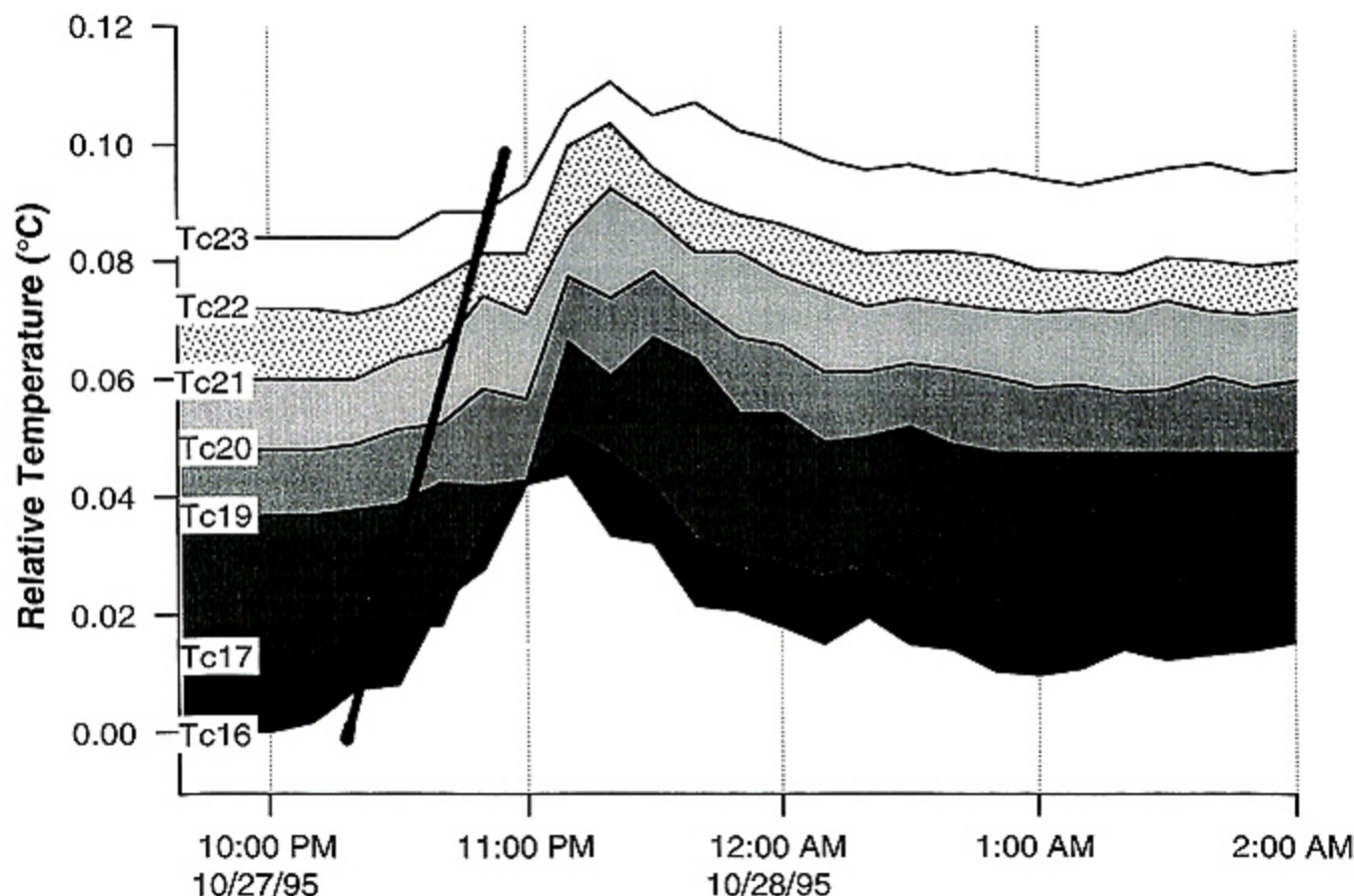


図7 10月27日夜に起こった温度変化を7点のセンサーで見た拡大図。太い斜めの実線は、ゆっくりとした東向きの温水塊の動きの速度をあらわす。

Fig. 7 Expanded view of the temperature changes occurred in the evening of October 27, 1995 measured at seven of the sensors. Bold slant line may show the speed of moving warm water mass toward the east.

以下にのべる理由により第2のモデルの方が現実に近いものと考えられる。海底面で見られるBタイプの規則的な変化は32m上方での水温の変化とよく似ているが、その変化が海底面のものがより絶対値が大きい変化でありさらに波形としても、より鋭い立ち上がりとなっている。故に熱エネルギーは海底からdiffuse flowによって海水中にもたらされていることを示す。問題は、潮流によるカルデラ内の底層水の動きが海底面の温度変化までも支配する程度に大きいものかどうかである。全世界の海洋潮汐(M2成分)の振幅をまとめたSchwiderski (1979)のマップによればニューブリテン島付近に無潮点が位置しており、今回のDESMOSカルデラもM2の振幅が25cm以下の海域に属している。従って第1のモデルに必要な原動力(潮位変化)は十分な大きさに達しないと思われるが、今回のサイトに対しては底層海流の実測データも、海水コラムの荷重を評価するための海底現位置圧力の実測データも得られていないために確定的

なことは言えない。

それに対して、マリアナ・トラフなどの世界の幾つかの海底熱水活動域にて指摘されている(Kasahara et al., 1994)のと同様に、地殻応力の異常な分布をともし火山活動の場である本調査地点において地球潮汐の影響が海洋潮汐とともに支配的であることはあり得ることである。たとえばWang and Davis (1996)は多層構造の海洋底堆積物に対して潮汐周期の間隙水圧力変動が伝わる過程をモデル化しているが、その変動の周期性を生じるために、ある条件下では地球潮汐が主たる外力であってもかまわない。ここでは定性的な議論にとどめるが、多孔質の表層地層中から海水へのdiffuse flowによる熱放出が行われる時に、その流速は両者の圧力差に依存する(Darcyの法則)ことから、第2のモデルが支持されると考える。そのように解釈すると、この多孔質体を熱交換器と見て、熱出力の時間的な変化が多孔質体の力学的な応答(地殻応力変化に対する)の情報を含んでいると予想され大変興味深い。

時間のスケール

自然のイベント

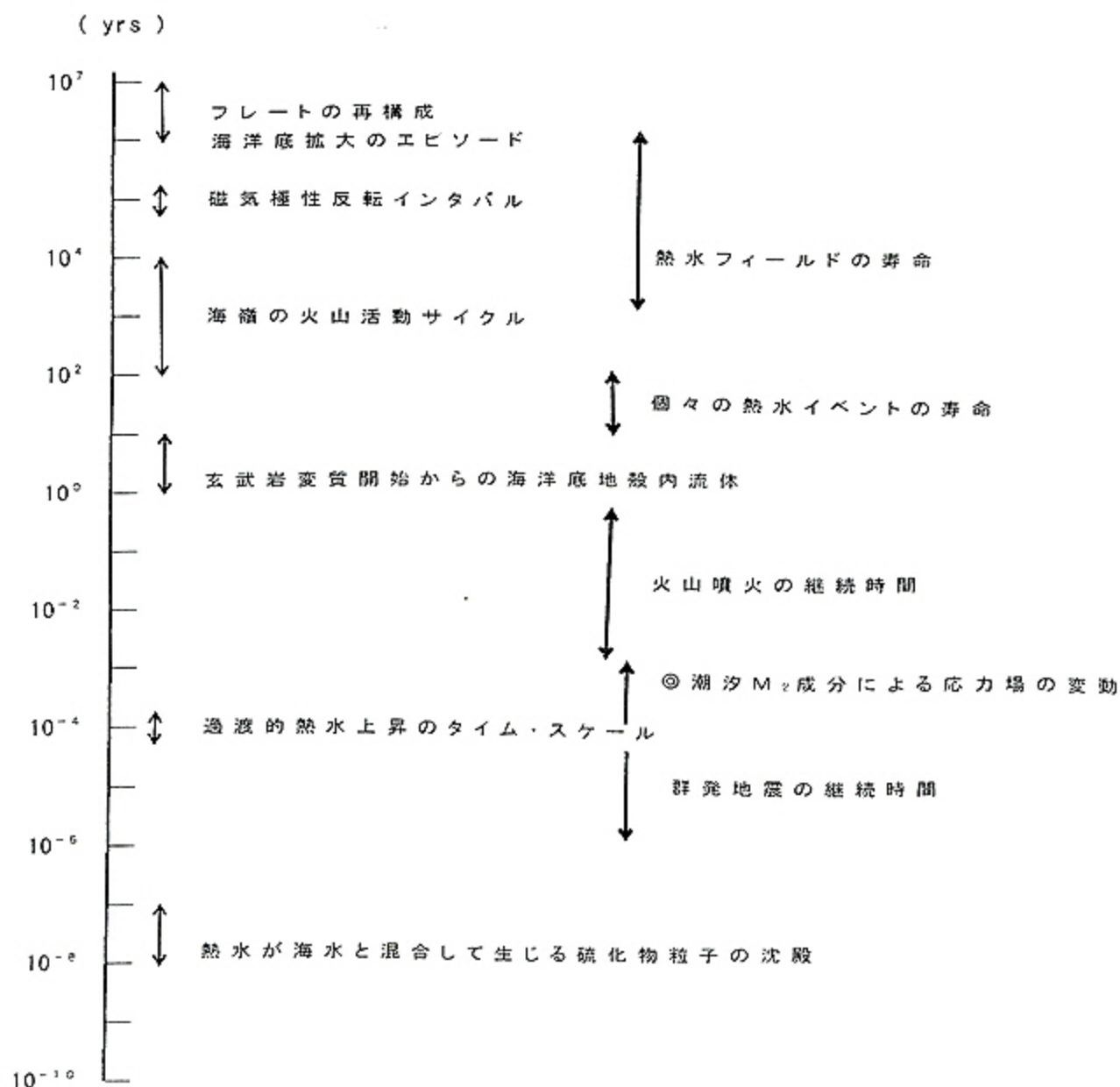


図8 中央海嶺などの海底熱水活動に関する現象の時間スケールのダイナミックレンジ

Fig. 8 Dynamic range of the various phenomena that occur in connection with hydrothermal activities at mid-ocean ridges and other similar sites

6. まとめ

1995年10-11月に行われた「よこすか・しんかい6500」によるManusFlux航海において、マヌス海盆のDESMOSカルデラ内の低温熱水活動域に長さ230mのケーブル・センサー型の海底面水温長期観測装置を設置して7日間にわたり熱水と底層海水の温度の変動を精度良くモニターすることに成功した。船上からの音響コマンドにより装置本体を自己浮上させて回収した。

記録された水温変動は、不規則かつ変化量が大いものと、12時間又は24時間周期で変化量が小さいピークとが重ね合わさっている。本装置の自己浮上用浮力体にとりつけた高精度小型水温計WaDaRのデータ、および同じ期間中に得られた長屋(1996)による係留系の水温変動記録を参照しつつ、規則的な変化についてのメカニズムを考察した。エンド・メンバーのモデルとして二つの可能性を考えた：①熱水湧出量は時間的に変化しないが、海洋潮汐による水塊移動のために海底面の温度センサー・アレイが潮汐変化を検知する。②地球潮汐のような地殻内部の応力変化の影響によって熱水湧出の温度自体が規則的に変化する。

現実には両者の中間であるかもしれないが、後者のモデルに近いものが観測事実を説明しやすいと筆者らは考えている。そして、海底面下で低温熱水を造成している熱交換系の物理的性質の推定に対して本研究で得られた様な温度の時系列データが有用な情報源となることが期待される。

謝 辞

本研究は、「海嶺におけるエネルギー・物質フラックスの解明に関する国際共同研究」の一環として行われた。日仏NEW STARMER計画の一環でもあったManus Flux航海を成功に導いた科学技術庁と海洋科学技術センターの関係者各位、そして同航海期間中のみならず航海後にも筆者らと色々と討論や情報交換などして下さったフランス・バブアニューギニア・カナダ・オーストラリア・日本の研究者からなる10名余の多国籍乗船研究者諸氏のご協力に感謝する。実際の航海および潜航においては「よこすか」の湯川修船長はじめ乗組員の皆様、「しんかい6500」の井田正比古司令はじめ運航チームの皆様には準備段階から設置および回収にいたるまで、全面的にご協力いただいた。装置の製作については、海洋電子株式会社の村上英幸氏と鶴見精機株式会社の鈴木重教氏に大変お世話になった。以上の方々に深く感謝の意を表する。

引用文献

- Auzende J-M. et al. (1996): "Shinkai 6500" dives in the Manus Basin: New STARMER Japanese-French program. JAMSTEC 深海研究, 12, 323-334.
- Gamo, T., H. Sakai, J. Ishibashi, E. Nakayama, K. Isshiki, H. Matsuura, K. Shitashima, K. Takeuchi and S. Ohta (1993): Hydrothermal plumes in the eastern Manus Basin, Bismark sea, CH₄, Mn, Al and pH anomalies. Deep-Sea Res., 40, 2335-2349.
- Kasahara J., T. Sato and K. Fujioka (1994): Intensive thermal upwelling at a seamount in the south Mariana Trough observed by ocean bottom seismic instruments using "Shinkai 6500" submersible. JAMSTEC J. Deep Sea Res., 10, 163-173.
- 木下 正高・松林 修・藤岡 換太郎 (1995): 大西洋中央海嶺TAG熱水マウンドにおける長期熱流量測定. JAMSTEC 深海研究, 11, 137-147.
- Little, S. A., K. D. Stolzenbach and F. J. Grassle (1988): Tidal current effects on temperature in diffuse hydrothermal flow: Guaymas Basin. Geophys. Res. Lett., 15, 1491-1494.
- Lowell, R. P., P. A. Rona and R. P. Von Herzen (1995): Seafloor hydrothermal systems. J. Geophys. Res., 100, 327-352.
- Matsubayashi, O., M. Kinoshita and K. Nishimura (1996): Periodic temperature anomalies detected by a horizontal thermistor array at a diffusive hydrothermal site in Manus Basin. EOS, Trans. AGU, 77, F698.
- 長屋 好治 (1996): マヌス海盆熱水活動域における水温の連続観測. 第13回しんかいシンポジウム予稿集, 107-108.
- 西村 清和・松林 修 (1996): 光ファイバ分布型温度センサーの海洋及び湖沼への適用. 海洋調査技術, 8, 17-32.
- Rona, P. A. and D. A. Trivett (1992): Discrete and diffuse heat transfer at Ashes vent field, Axial Volcano, Juan de Fuca Ridge. Earth Planet. Sci., Lett., 109, 57-71.
- 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.
- Wang, K. and E. E. Davis (1996) Theory for the propagation of tidally induced pore pressure variations in layered sub-seafloor formations, J. Geophys. Res., 99, 9681-9695.

(原稿受理: 1998年7月31日)

(注) 写真は次ページ以降に掲載



写真1 「しんかい6500」から撮影した海底着底後の Daibutsu-2記録装置部。
Photo 1 Daibutsu-2 system on the seafloor as seen from "Shinkai 6500".