

相模湾初島沖シロウリガイコロニーにおける 長期温度勾配測定

木下 正高*¹ 山野 誠*²

これまでに開発され、マリアナトラフなどで設置、測定が行われていた長期温度記録計を1991年11月26日、「しんかい2000」により相模湾初島沖シロウリガイコロニーに設置した。1年間測定を行ったうえ、翌1992年11月29日に「しんかい2000」によって無事回収した。コロニーの端から3 m, 8 m, 18 mのところに長さ60 cmから90 cmのプローブを差し、各プローブにつき3本から5本のセンサーで温度勾配の測定を行った。このほかにデタロガー近傍に水温のセンサーを置いた。測定間隔は1日1回である。

得られた温度記録は、水温変動とよく一致しているが、海底下約70 cm下の記録ではかなり減衰している。水温変動の影響を除くことによって、下からの熱流量の時間変動を捉えることができると期待される。またこの水温変動による温度変化の様子から、堆積物の熱拡散率を見積ることができる。一方、明らかに水温変動ではない変化が1本のセンサーのみに見られた。おそらくは間隙水のepisodicな移動が起こったと思われる。

Long-term Temperature Gradient Measurement Near the Hatsushima Community, Sagami Bay

Masataka KINOSHITA*³ Makoto YAMANO*⁴

A long-term temperature monitoring system (LTMS) was deployed on Nov. 26, 1991 and recovered on Nov. 29, 1992 by the submersible "Shinkai 2000" at the biological community east off the Hatsushima Island, western Sagami Bay. Three geothermal probes, which are 60 cm to 90 cm in length and in which 3 to 5 thermistor sensors are installed at equal intervals, had been penetrated at 3 m, 8 m and 18 m away from the eastern edge of a *Calymene* colony. Measurements were made once every day.

Obtained temperature records in the sediment have similar features to that of bottom water temperature measured near the data logger. The amplitude of fluctuation at each sensor seems to attenuate exponentially and the phase seems to get delayed with respect to the increasing depth, indicating that these

*1 東海大学海洋学部

*2 東京大学地震研究所

*3 School of Marine Science and Technology, Tokai University

*4 Earthquake Research Institute, University of Tokyo

fluctuations are attributed to bottom water temperature variation. These fluctuations can be eliminated numerically and the temperature gradient originated from down below can be estimated, although it is still on the way. A strange variation appeared at only one sensor located closest to the colony; it is independent of bottom water temperature variations. A certain episodic movement of interstitial water should have occurred at that moment.

1 はじめに

海底面付近での熱輸送における、熱水や間隙水の移動の寄与を知ることは、海嶺や付加体での真の熱収支を求めるのに本質的な役割を果たすと考えられる。このためには、空間的に高密度な熱流量測定を行って熱流量分布の局所性を知ることが重要である。一方、熱流量（または温度自体）の時間変動を測定することは、空間分布の時間的普遍性をチェックするために、また間隙水移動がどのように起こっているのか、その様式を知るのに有用である。

海嶺軸付近での熱放出を知るために、活発なチムニーから噴出する熱水の量と温度をモニターすることなどが行われている(Converse et al., 1984; 最近ではSchultz et al., 1992; Woods and Delaney, 1992など)。これにより、例えば東太平洋海嶺21°Nでは、単一の熱水噴出マウンドに伴う放熱量が0.5–10MWと見積もられている。しかし、これは熱水噴出孔からの放熱であり、その周囲の大部分から放出されている、熱伝導による放熱量の測定は、少なくとも海嶺軸付近の堆積物の存在しないところでは皆無であった。熱水噴出などの周辺で、10mのオーダーでの詳細な熱流量分布のマッピングを行う試みは、例えば山野・木下(1989)によりなされている。これは沖縄トラフの熱水地帯で、「しんかい2000」のマニピュレーターで長さ25cmの小プローブをつきさすことにより行われた。今回測定に使用した長期温度記録計も、やはり「しんかい2000」により場所のコントロールを完全に行ったうえで測定を行い、詳細な熱流量分布のマッピングを行うことが目的の1つである。

また、水深が浅いために海水温度が季節変動などの影響を受けて、時間的に一定でない場合、1回だけの観測ではその変動の影響を受けてしまい、

真の熱流量値が得られなくなる。このようなときは、その変動が十分減衰する深さまでプローブをさすか、時間変動を測定して、これから真の熱流量を推定することが必要となる。

このような目的から、これまでに長期温度記録計が開発され、深海潜水艇によりマリアナトラフなどで設置・測定が行われてきた(山野, 1991)。マリアナトラフでの測定は、拡大軸からやや離れた、表層が堆積物などで覆われた場所で行われた。わずか2週間の測定ではあったが、拡大軸から離れているにもかかわらず、熱水活動を示唆する濃度異常が記録されており、熱水活動の時間的・空間的局所性が示された。このほか、ODPの掘削孔を用いて温度プロファイルを長期間にわたって記録する試みがなされている(例えばFouche et al., 1992)。南海トラフ付加体での温度測定(ONDO計画)、ファンデフカ海嶺での温度測定および間隙水採取(CORK; Davis et al., 1992)などである。

相模湾初島沖のシロウリガイコロニー付近ではこれまでに1,000mW/m²を超える高熱流量(Kinoshita et al., 1991)や、メタン濃度の異常(Gamo et al., 1988)が観測されており、間隙水の湧出が起こっていることを強く支持する。一方、この海域は水深が1,200mと比較的浅く、海底付近の水温が変動している可能性がある(太田1990)。そこで今回コロニーのごく近傍にプローブを3本設置して(図1)、1年間連続測定を行い、熱流量分布の詳細マッピング、及びその時間変動を明らかにしようと試みた。

長期温度記録計(以下LTMSと略称)は、1995年11月26日に行われた、「しんかい2000」による第590潜航(潜航者:木下正高)により設置され、ちょうど1年間観測を行った後、1997年11月29日の第658潜航(潜航者:中西正男氏)により無事

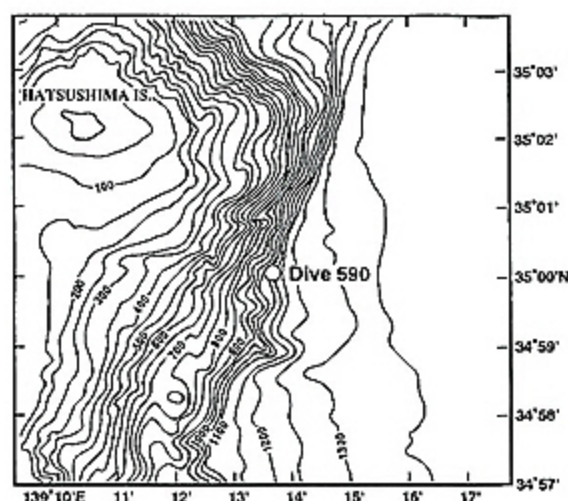


図1 潜航地点付近の海底地形図
Fig. 1 Topographic map showing the dived point.

回収された。ここでは、LTMSにより得られた結果を、予察的ではあるが報告する。

2 装置概要

本装置は、温度データを16bitデジタルでROM上に記録する。記録容量は測定するチャンネル数により異なる。今回はチャンネル数を12とし、記憶容量を考慮してサンプリング間隔を1日1回とした。

温度センサーには、テフロンコーティングしたサーミスタを用いた。1本を水温のモニタリング用として、5本を長さ60cmにプローブに、3本を60cmと90cmのプローブにそれぞれマウントした。プローブは外径20mmのステンレス製であり、中にはセンサーが12~35cm間隔でセットされ、隙間には珪砂が詰められている。センサーの配置、間隔などは図2に示したとおりである。

これを、「しんかい2000」に搭載して潜航した(第590潜航:写真1a)。プローブおよびケーブルは筒の中にたたんで収納され、展開時にマニピュレーターで引っ張り出すようにした。

3 設置および回収概要

図3に、第590潜航の軌跡を示す。LTMSを設置したのは、図2に示すように、シロウリガイコロニーの1つの東端から数mのところである。この場所は、東に向かって10~20度で傾き下っており、「しんかい2000」の台座から下ろして置いた途端、10m程度も東に滑り落ちてしまった。結果的には、先端が半分ほど泥に埋まってうまく安定して止まっていたため、このまま設置した(写真1b)。

プローブおよびケーブル長は、図2に示す通りであるが、まず測器のすぐ脇に60cm長のプローブ

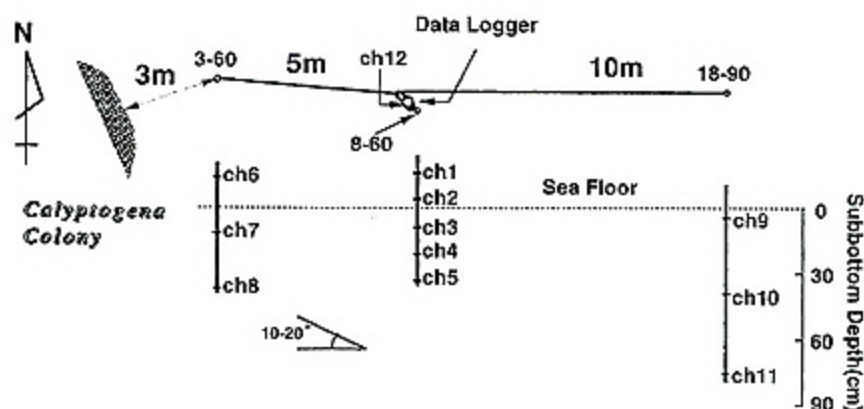


図2 LTMS設置の詳細図。「3-60」は、コロニーから3mの距離のところにした、長さ60cmのプローブを示す(8-60、18-90も同様)。下部には、それぞれのプローブ中の温度センサーの位置と、どこまでささったかを示す。ch12は水温モニター用のセンサー

Fig. 2 A detailed map showing how the LTMS and its sensors had been installed. A caption '3-60' indicates the 60-cm probe located 3m away from the colony. Positions of temperature sensors and estimated length of penetration for each probe into sediment are also shown. Ch12 is a sensor for the water temperature monitoring.

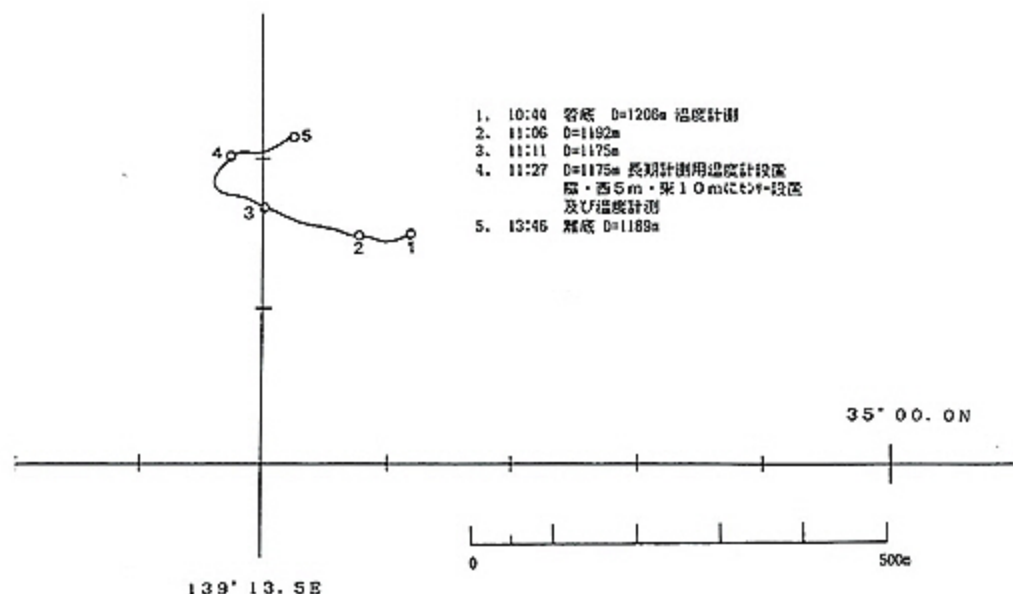


図3 「しんかい2000」による第590潜航の航跡。地点1および4で25cmプローブによる温度勾配測定，地点4にてLTMSを設置した。

Fig. 3 A route map of Dive 590 by Submersible "Shinkai 2000". At points 1 and 4, geothermal gradient measurements were made using the 25-cm probe; the LTMS had been deployed at point 4.

ブをさした。さし方はやや悪く，上部20cmほどが海水中に残っていた（写真1b）。次いで測器から西に約5mの，コロニー東端から3mのところに60cm長さのプローブをさした。これは斜面にほぼ垂直に，根元までささった（写真1c）。最後に測器の東10mのところに，90cm長のプローブをさした。途中40cmほどのところで何か硬いものにぶつかったものの，結局根元まで垂直にささった（写真1d）。以上，3本のプローブをコロニーから離れる方向に東西に展開することに成功した。以下では，各プローブの呼称を，コロニー東端からの距離とプローブ長を用いて，8-60，3-60，18-90（図2参照）とする。

なお，測器の西および東のプローブのすぐそばと，コロニーの中，そして着底点付近（コロニーの250m東南東：図3のポイント1）で，25cmプローブによる温度勾配測定を行った。このプローブは，「しんかい2000」のマニピュレーターでつきさすタイプのもので，温度センサーが25cm間隔で2本取り付けられている。

回収は，翌1992年11月29日の第658潜航により行われた。測器，プローブともども無事に回収す

ることができ，データも問題なく記録されていた（詳細は中西による報告を参照）。

4 測定結果

各プローブごとの温度を，時間に対してプロットした（図4及び図5）。なお各図とも，測器のところに取り付けられている水温センサーの温度記録をもとに表示してある。一方，図6はこれらを3次元的に表示したものである。

水温変動そのものの特徴は，周期3～4日の変動が卓越しており，その振幅が約0.4度にも達しているのが分かる。ただし，1日1回というサンプリング間隔に比べて実際の変動周期が短いと思われるものも多く（図5），このような変化に対してはエアリングを起こしている可能性が大きい。各プローブの温度変動（特に周期1週間以内のもの）は，この水温変動とよく一致しており，このような変動が基本的には海底付近の水温変動によるものであることを示す。実際，半無限媒体の表面にある温度擾乱を与えたとき，媒体中の温度は表面からの深さ方向に指数関数的に減衰すると同時に，位相が徐々に遅れることが知られてい

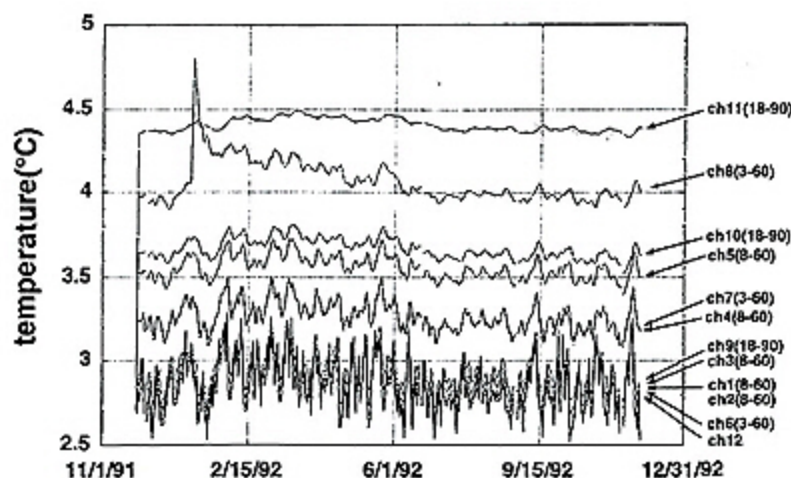


図4 各プローブごとの温度の時間に対するプロット。水温データ (ch12) とともに表示した。チャンネル番号などと実際の位置との対応については図2を参照。

Fig. 4 Temperature records of each sensor including that of bottom water. See Figure 2 to correlate channel numbers with actual positions.

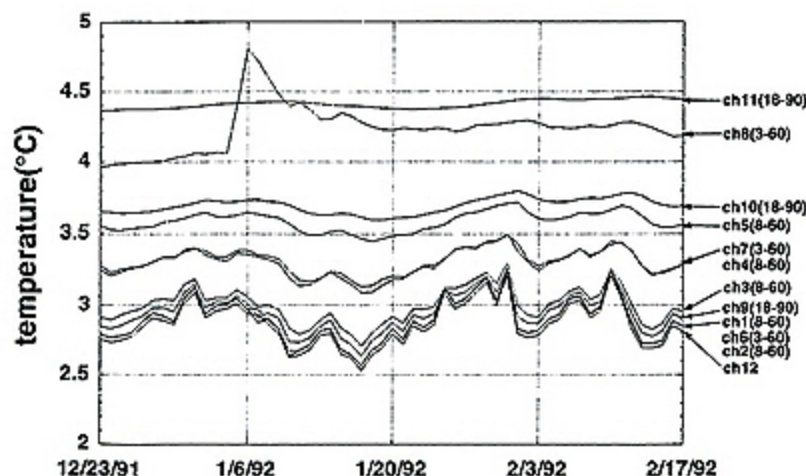


図5 各プローブごとの温度の時間に対するプロット (拡大)。ch. 8 のみに異常変化が見られる。

Fig. 5 Blow-up of temperature records of each sensor including that of bottom water. An anomalous change is seen on ch. 8 only.

るが(次章参照), 図6にもこのことが明瞭にみとれる。特に18-90プローブでは, 1番下のセンサーの温度はほとんど海水温変動の影響を受けておらず, 1週間程度の周期の変動については, 海底面から70cm程度より下では影響を無視してよいことが分かる。

図4および図5で, 1992年1月6日から約10日間, 3-60プローブの1番下のセンサー(ch8)に他のセンサーと無関係の変化が出現しているのが分

かる。変動の幅は0.8度である。このセンサーの他の部分の記録からみて, センサー自体の異常とは考えられないことから, この変化は実際にこのセンサーの近辺にのみ起こった, ごく局所的な温度異常であることが明らかである。

図4~6をみると, 堆積物中にささっていないセンサーがあることが分かる。そこでこれを除いたセンサーの温度から, 各プローブごとの温度勾配を最小自乗法により計算し, これを時間の関数

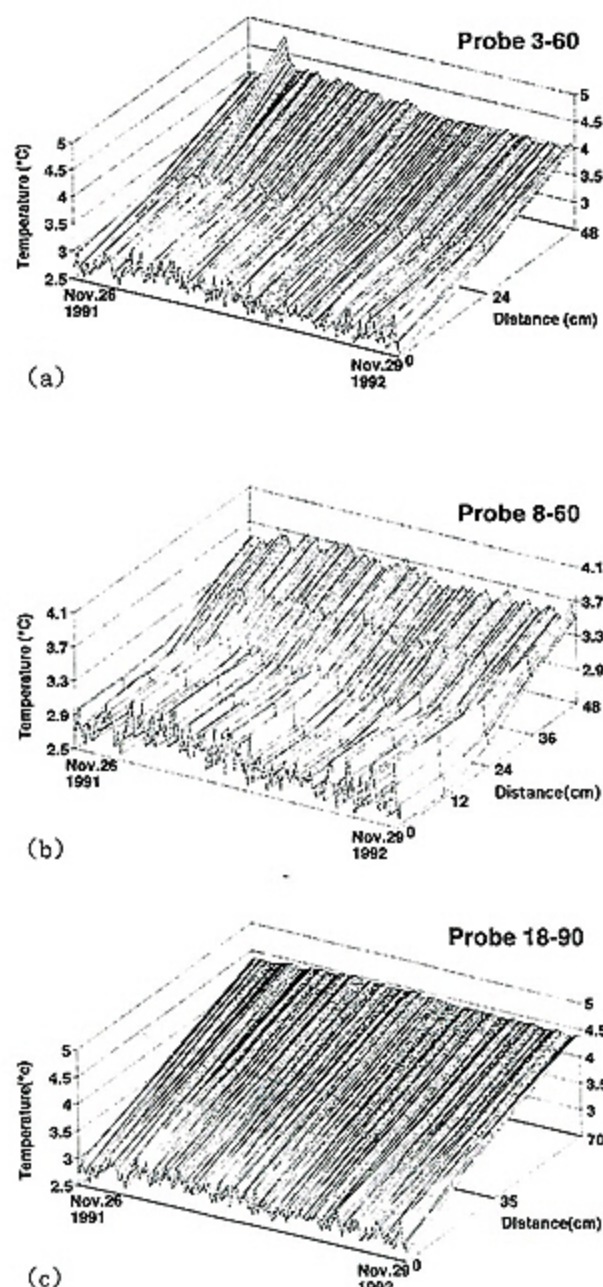


図6 各プローブごとの温度の、深さおよび時間に対するプロット。(a) プローブ3-60, (b) プローブ8-60, (c) プローブ18-90.

Fig. 6 Temperature plots versus depth and time. (a) The 3-60 probe, (b) the 8-60 probe, and (c) the 18-90 probe.

としてプロットした(図7)。海水温変動の影響を補正していないため、これに対応した変動がここでも見られる。各プローブごとに温度勾配の平均をとったところ、表に示すような温度勾配の結果が得られた。この表には、1991年の潜航時に25 cmプローブにより現場で測定された温度勾配の値も載せてある。両者ともコロニー近傍では1,000 K/mを超す高い熱流勾配が得られた。さらに、シロウリガイコロニーの端から20m程度離れるだけで、温度勾配(従っておそらくは熱流量値も)が2/3程度に下がってしまうことが分かる。

5 考察および結論

得られたデータは、現在鋭意解析中であり、ここで述べるのは予察的な結論である。

まず、図5などから、この付近の海底の水温は、遅くとも1日から3~4日周期で0.4度程度変動していることが分かる。一般に、表面で周期P(sec)の水温変動は、深さ方向に減衰して伝播するが(Carslaw and Jaeger, 1959), 振幅が $1/e$ になる深さ(z^*)は,

$$z^* = \sqrt{\frac{\kappa P}{\pi}}$$

で表される(κ は堆積物の熱拡散率)。熱拡散率を $10^{-6}(\text{m}^2/\text{s})$ と仮定すると、周期が4日では z^* は33cmとなる。これは実際の減衰の様子とよくあっている。また、これより短い周期については記録されていないものの、 z^* が今回のプローブ長に比べて十分短くなると考えられるので、前章で述べたエリアジングについては、実際上ほとんど問題がないものと考えられる(例えば周期1時間では $z^*=3\text{cm}$)。このことから、これまでの通常のプローブによる熱流量測定(プローブ長3 m以上)では、プローブが十分にささっている場合(実際よくささっていることが多い; Kinoshita et al. 1991)には、この周期3~4日の水温変動については全く影響がないと考えられる。ただし図3からも分かるように、1年程度の周期も見られるようであり、このような長周期変動の影響は補正する必要がある。今後、今回得られたデータをスペクトル解析することにより、これを行う予定である。

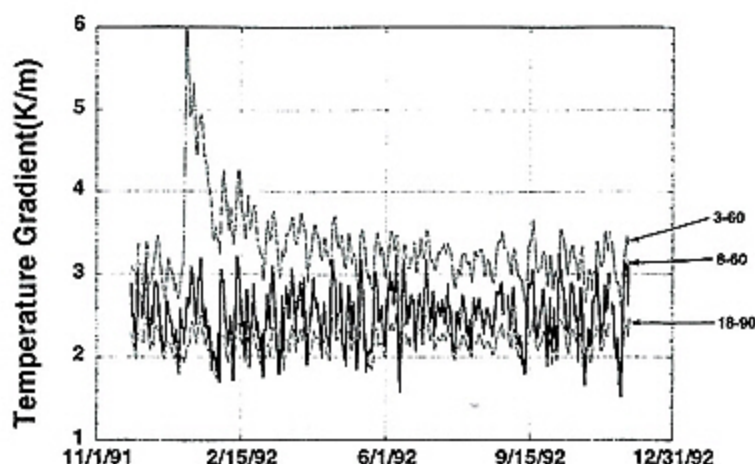


図7 各プローブごとの温度勾配の時間に対するプロット
Fig. 7 Plot of temperature gradient for three probes versus time.

表1 温度勾配の比較
Table 1 Comparison of temperature gradient

	LTMS ¹	25-cm probe
within colony	- (mK/m)	1990 (mK/m)
3-60	3400	2900
8-60	2700	-
18-90	2400	1831
250m ESE	-	900

* 1 Mean values averaged over the period between Aug.4 and Nov.29, 1992.

水温変動の様子がよく分かっているため、この補正を行うことによって下からの情報を正確に抽出できることが期待される。同時に、この補正を行う過程で、統計的手法により堆積物の熱拡散率が推定できると考えられる。

熱流量異常の局所性については、コロニーの分布しているところには下からの間隙水上昇が存在し、これが一種のplumeとなっていて、周りを熱伝導により暖めていると考えられる。温度勾配の値が、1年間の測定期間を通じてほぼ一定であったことは、この間隙水上昇の影響が定常的であることを示唆する。

このような定常的な局所的熱流量異常のほかに、さらに局所的なepisodicな変動が存在するらしいことが示唆された (ch 8 の異常)。この変動の原因については、伊豆東方沖群発地震などが考えら

れる。今後より長期間の観測により、地震、火山活動と温度変動との関連を検証してゆくことは、間隙水移動のメカニズムの解明に役立つばかりでなく、この地域のテクトニックな活動度をモニターするのに有用であろう。

謝 辞

本装置の回収にあたり、貴重な潜航時間を割いていただいた、東京大学海洋研究所の中西正男氏および藤本博巳氏に感謝いたします。また、段野洲興指令はじめ「しんかい2000」運航チームの方々、「なつしま」乗組員の方々に感謝いたします。特に、パイロットの桜井利明氏および鈴木晋一氏には、やっかいなプローブの設置、回収の両方にわたり、大いにお世話になりました。

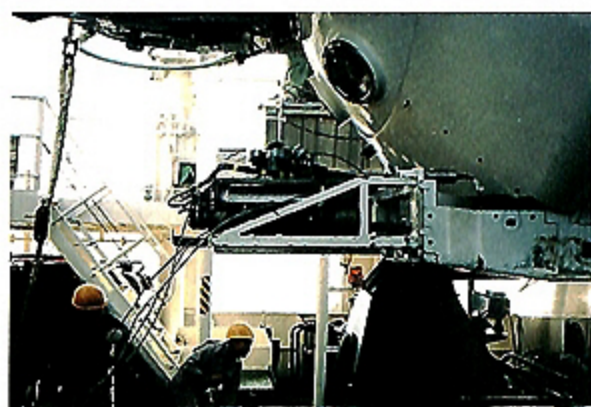
参考文献

- Carslaw, H. S. and J. C. Jaeger (1959): Conduction of Heat in Solids. Oxford University Press, 510pp.
- Converse, D. R., H. D. Holland and J. M. Edmond (1984): Flow rates in the axial hot springs of the East Pacific Rise (21° N): implications for the heat budget and the formation of massive sulfide deposits. Earth. Planet. Sci. Lett., 69, 159-175.
- Davis, E.E., K. Becker, T. Pettingtew, B. Carson and R. MacDonald (1992): CORK: a

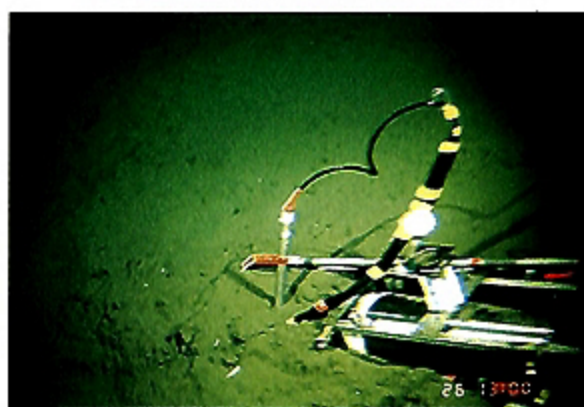
- hydrologic seal and downhole observatory for deep-ocean boreholes. Proc. ODP, Init. Rep., 139, 43-54.
- Gamo, T., J. Ishibashi, K. Shitashima, M. Kinoshita, M. Watanabe, E. Nakayama, Y. Sohrin, E.-S. Kim, T. Masuzawa and K. Fujioka (1988): Anomalies of bottom CH_4 and trace metal concentrations associated with high heat flow at the Calyptogena community off Hatsu-shima Island, Sagami Bay, Japan: A preliminary report of Tansei Maru KT-88-1 cruise Leg-1. *Geochemical Journal*, 22, 215-230.
- Kinoshita, M., M. Yamano, and S. Makita (1991): High heat flow anomaly around Hatsu-shima biological community in the western Sagami Bay, Japan. *J. Phys. Earth*, 39, 553-571.
- 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, 12299-12314.
- Woods, A. W. and J. R. Delaney (1992): The heat and fluid transfer associated with the flanges on hydrothermal venting structures. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 112, 117-129.
- 山野 誠・木下正高 (1989): 中部沖縄トラフ・伊是名海穴での地殻熱流量測定. 第6回「しんかい2000」研究シンポジウム予稿集, 17-18.
- 山野 誠 (1991): 海底熱水系における長期温度観測. *月刊海洋*, 251, 244-248.
- 太田 秀 (1990): 相模湾冷湧水生態系に関する生態学的知見. 「しんかい2000」研究シンポジウム報告書, 6, 181-195.

(原稿受理: 1993年7月23日)

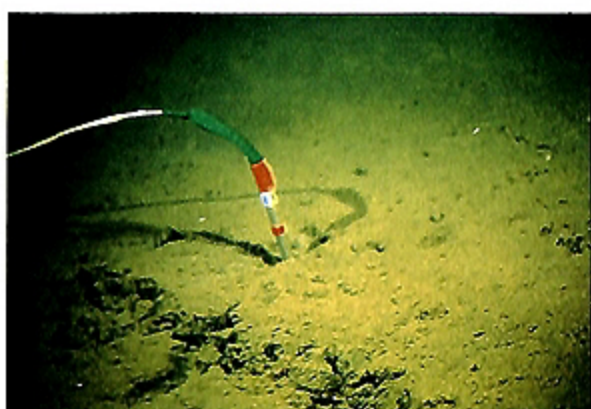
(注) 写真は次ページ以降に掲載



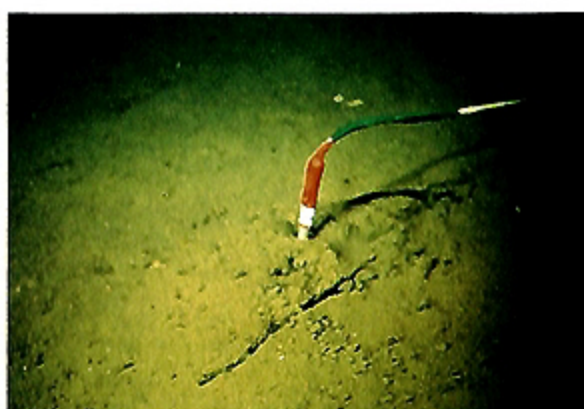
(a)



(b)



(c)



(d)

写真1 設置されたLTMS。(a) 1992年11月29日、回収された装置、(b) 海底での測器本体および8-60プローブ、(c) 3-60プローブ、(d) 18-90プローブ

Photo 1 LTMS installed. (a) LTMS recovered on Nov. 29, 1992, (b) Data logger and '8-60' probe, (c) '3-60' probe, (d) '18-90' probe.