16 チャンネル深海底熱流量測定システムの 製作と実測定

千葉大学理学部地学教室 柳原 誠一・鈴木 茂文^{*1}
房 律子^{*2}・木下 肇

(昭和 61 年 7 月 15 日受理)

Development of a 16-channel Heat Flow Measuring System and its Test Application on the Deep Sea Floor

Seiichi NAGIHARA, Shigebumi SUZUKI, Ritsuko BOH
and Hajimu KINOSHITA

Department of Earth Sciences, Faculty of Science, Chiba University

(Received July 15, 1986)

The design and use of a newly developed marine heat flow measuring system is described. It has as much as 16 temperature sensors (thermistors) and can record the data sequentially for about 30 hours. Each set of data consists of 16 pairs of pulses; the first 4 for the header bits and the rest 12 bits are assigned to the temperature value. The data are recorded on a magnetic cassette tape recorder. The system carries a modified needle probe to detect insitu thermal conductivity by applying a heating pulse of 8 sec long. We carried out a series of measurements at Sea of Japan to test a reliability of the system, using a modified 6-channel (reduced from 16) probe. The temperature profiles obtained on the deep sea floor (Sea of Japan) showed a good quality.

§1. はじめに

海底熱流量測定器を製作した。本測定器は回路上、16 の温度センサー (サーミスタ) を接続することができ、約 30 時間にわたって、各チャンネルの温度データを順々に記録するものである。データの分解能は 12 ビットで、測定可能な温度幅は約 5°C である。各チャンネルの測定に要する時間は 4 秒で、サンプリングレートは各チャンネルにつき、64 秒に 1 回となる。

海底での熱流量測定は地球内部から流出する熱量を対象としているが、海底表層の温度場は、測点付近の局地的な熱的条件の影響を受け易く、必ずしも、得られたデータが深部の熱構造を反映しているとは限らない。そのような局地的な要素として、特に、(1) 堆積作用の速度、(2) 海底面付近の水温変動、(3) 熱水循環、の与える影響は大きい。熱流量の測定データは、これらの影響を定量的に見つかり、補正されることが望ましい。

昭和 60 年 4 月 6 日発表

^{*1} 現所属：青年海外協力隊

^{*2} : 日本 IBM 株式会社

しかし、このことは逆に、このような海底の環境を決定する手段としての熱流量測定的重要性を示唆するものである。その意味で、従来の測定システムに対し、センサー数やダイナミックレンジ等の面で柔軟性のあるものが望まれるようになったが [木下・山野 (1983)], 今日までの測定器は内外のメーカーに依存するところが多く、測定者の自由のきくものが少なかった。

上述の問題とされる (1) や (2) の影響については、渡部 (1972) によつて補正法がまとめられている。しかし、(3) については、その現象のメカニズムが複雑なため、定量的な見つくりが困難である。

熱水循環は海底地殻内に生じる水の循環で基本的なメカニズムは、多孔質の海底基盤や表層堆積物を通じて起こる水の対流作用であると予測される [ANDERSON and SKILBECK (1981)]. これによつて海底付近の温度場が大きく乱されるだけでなく、対流によつて、従来の測定方法では検知できない熱流出が生じてしまう。熱水循環に対するモデル化の試みはいくつか成されているが [例えば、ANDERSON and SKILBECK (1981), FEHN *et al.* (1983), RIBANDO *et al.* (1976)], 不確定なパラメータが多いため、実際の測定海域に応用するには、地殻構造探査、深海掘削等の多岐にわたる調査を必要とする。

熱流量測定の立場からは、測定点の密度を増やすことは言うまでもないが、各測点での海底面下の温度プロファイルを精度よく求めることが重要である。特に海底面は、その上の海水との間で何らかの熱的境界面になり、温度プロファイルは様々なパターンを示すことが予想される [ANDERSON and SKILBECK (1981)].

我々の製作した測定システムは、チャンネル数が多くとれるため、このような測定に適している。しかし、多数のセンサーを備え、測点数を稼ぐために POGO 方式 (狭い海域で測器を海中につるしたまま、船を移動させて、測定を繰り返す方式) にする場合、プローブの堅ろう性が充分でなければならない。

今回実施した測定テストでは、このシステムを、とりあえず、通常の 6 チャンネルのユース型 [渡部 (1972)] のプローブに適用し、システム自体の適性を見ることに重点を置いた。但し、余分のチャンネルを利用して熱伝導率の現場測定を行うシステムも付加した。それについてもあわせて報告する。

§ 2. データ記録システム

Fig. 1 にシステムのブロックダイアグラムを示す。1 V 基準電源には、松岡 (1979) を使用した。安定性は室温変動の範囲で $\pm 50 \mu\text{V}$ である。増幅部では OP アンプ (LT-1001) を 2 段で 53 dB の増幅を行つている。増幅部の安定性は恒温条件 (冷蔵庫内) で 3% 以内である。

データレコーダーには、通常のカセットテープレコーダーを回転を遅くして使用している。片面 45 分のテープを巻きとるのに約 30 時間を要する。データの記録方式は、木下・安井 (1978) に従つた (2 重パルス方式)。1 回のサンプリングに 16 のパルスをタイミングパルスとして用い、個々のパルスが 2 重なら、デジタル信号「1」を示し、単発パルスなら「0」を意味するものとして (Fig. 2), これらを直列に並べて磁気テープに記録する。パルスの配列は、前半 4 ビットをチャンネル番号に、残りの 12 ビットをデータにあてた。

システムのデジタル部 (Fig. 1 の破線内) のブロックダイアグラムを Fig. 3 に示す。タ

Fig. 1. A block diagram of the temperature data recording system. The part surrounded by dashed square is shown in detail in Fig. 3. TCG stands for a Time Code Generator [INATANI and FURUYA (1980)]. Accuracy of the 1 V DC source is in order of $10 \mu\text{V}$.

Fig. 2. A schematic configuration of the data pulses. 32 pulses compose one set of datum of 16 bits. Each pair of pulses carries following informations, i.e., (1, 0) is zero and (1, 1) is one. The first 4 bits are for the channel number and the rest 12 bits are for the temperature value.

Fig. 3. A circuit diagram of the digital processors of the recording system. The output data from A/D converter are re-arranged to a set of serial positive pulses which are delayed by 50 msec behind the timing pulses (clock of the system) and then these two trains are mixed through an OR logic line.

タイミングパルスの周期は 0.125 秒である。A/D 変換器 (ICL 7109) は 2 重積分型で変換時間は約 30 ms である。測定する温度の変動は緩慢なので、サンプル・アンド・ホールドは行っていない。

内容を順次述べると、1: タイミングパルスの発生、2: データ用パルスの遅延と幅の決定、3: A/D 変換、4: タイミングパルスとデータパルスの直列結合、5: テープへの録音となる。この動作が各チャンネル毎に繰り返される。全体のリセットは、電源の接続と同時に自動的に行われるようにした。

§3. データの処理

データレコーダーには先の 2 重パルスを入れるチャンネルとは別に、刻時信号を入れるチャンネルを設けてある。刻時信号発生器 (TCG) には、INATANI and FURUYA (1980) を用いた。これは、1 秒毎に出力するパルスの幅の長短の組み合わせによつて、日、時、分を表すものである。

データの処理は、まず、カセットテープ中から刻時信号をたよりに必要なデータ記録 (着底時とその前後) をとり出し、それを A/D 変換し、計算機によつてデータパルスを解読する、という手順で進められる。A/D 変換器と計算機以外は特別なハードウェアを必要としないのが利点である。

§4. 熱伝導率現場測定システム

熱伝導率の現場測定は、測定データの信頼性を高める上で、また、測定の能率を上げるため

にも有効な方法である。今までに、ブラード型 [渡辺 (1972)] のプローブの脇にニードルプローブ [VON HERZEN and MAXWELL (1959)] を取りつけたもの [例えば, SCLATER *et al.* (1969)] とパイオリン・ボー型 [HYNDMAN *et al.* (1979)] の2つが実用化されている。前者は船上で行うニードルプローブ法をそのまま海底に応用したものである。後者はブラード形状のプローブの中にヒーターを組み込み、POGO 測定を可能にするため、それを直径数センチメートルのガイドロッドに沿わせてある。ヒーターの加熱時間は 3~15 秒程度 [パルス・プローブ法, HYNDMAN *et al.* (1979), LISTER (1979)] で加熱後の冷却過程から熱伝導率を求める。我々のシステムは、ニードルプローブをユーイング型のセンサーに適応させ、さらにパルスプローブ法で熱伝導率を測定するものである。上に述べたシステムより簡便で消費電力が少ないのが利点である。また、POGO 測定にも耐えうる。ただし、堆積物の冷却過程を記録するためには、64 秒のサンプリングレートでは不十分なので、8 チャンネルをこのためにあて、8 秒のサンプリングレートを確保した。

ヒーターのトリガリングについては、HYNDMAN *et al.* (1979) の方式を参考にした。ヒーターの加熱時間は後述の理由より 8 秒とした。この間に放出される熱量は約 22 J である。ヒーターのトリガリングは測定器の着底後 1024 秒後になされる。着底の認識は測定器に内蔵した感震器の出力振幅の変化によつてなされる。

海底での実測定とは別に、センサーの妥当性を確かめるために、パルス・プローブ法の室内実験を行つた。測定に用いたサンプルは油粘土で、熱伝導率は、迅速熱伝導率計 (QTM) [炭竈・荒川 (1976)] でも測定し、両者の差を見ることにした。適切なプローブの加熱時間を見つめるために、加熱時間を変化させてみた。実験の結果を下に示す。

加熱時間 (秒)	伝導率 (W/mK)	QTM との差
60	1.201	+18.2%
30	0.963	-5.2%
15	0.983	-3.2%
8	0.901	-11.3%

これによれば適切な加熱時間は 8~30 秒である。

§5. センサー

測定器は長さ 4 m のユーイング型のプローブを用いており、6 個のサーミスタが 60 cm 間隔で配置されている。そのうち 1 つは、熱伝導率の測定を兼ねたものである。サーミスタは直径 3 mm のステンレスパイプに封入されている。パイプの内部はアラルダイトで充てんされている。熱伝導率測定用のセンサーには、ヒーターワイヤーを内部に沿わせるため、直径 4 mm のものを使用した。パイプが堆積物に接する部分の長さは 15 cm である。Fig. 4 に測定器の全体写真、Fig. 5 にセンサー部の写真を示す。

§6. 測定テスト

測定は、東京大学海洋研究所の淡青丸の KT 85-15 次航海、KT 85-19 次航海、及び同研究所の白鳳丸の KH 86-1 次航海、KH 86-2 次航海で実施した。前半の航海では測器の耐圧試験や外装の適性を見るのに重点を置いたため、データは得られていない。KH 86-1 次航海

Fig. 4. An Ewing type instrument used for the present test experiments.

Fig. 5. Close look of the sensor on the side of the probe.

では、プローブが根元までささらず、よいデータが得られなかつた [KINOSHITA *et al.* (1986)].
そこで、ここでは、KH 86-2 次航海での測定データを引用する。

KH 86-2 次航海では、日本海において3ヶ所で測定を行った。各点で2回づつ着底させた。
ここでは、そのうちの1点、HF 1-A ($42^{\circ}13.6'N$, $137^{\circ}40.2'E$) のデータについて検討する。

測定点は日本海盆東側の中央部にあたり、堆積層が発達し、熱水循環の心配はない。プローブは根元までささつたが、1個のチャンネルで測定温度レンジの設定を誤り、温度記録が得られたのは5個となつた。

Fig. 6 に着底約5分後から離底直前までの温度記録を示す。ただし、横軸には時間(秒)の

逆数をとっている。ユーイング型のよ
うな細いセンサーを使用している場合、
着底後数分間経た堆積物の温度変化は
時間の逆数に比例することがわかつて
いる [BULLARD (1954)]. 今回得られ
たデータはそれを満たしている。温度
変化から予想される堆積物の平衡温度
を深さに対してプロットして得られた
温度プロファイルが Fig. 7 である。
温度勾配は $0.124^{\circ}\text{C}/\text{m}$ である。

熱伝導率測定はヒーターのトリガリ
ングがうまくおこなわれなかつたよう
である。着底後約7分後に 0.9°C の
温度上昇を記録しているが、8秒後
には全く元に戻っている。これは、トリ
ガーのタイミング、温度上昇の持続時
間とも不適当なので Fig. 6 からは除
外した。他の測点のデータにも、ヒ
ーター加熱に相当するような温度変化は
見られなかつた。但し、この航海では、
同じ場所でピストンコアラーによる採
泥を行つたため、船上でニードルプ
ローブ法による測定ができた。得られ
た熱伝導率の平均値は $0.77 \text{ W}/\text{mK}$ であ
る。

両測定データから得られた熱流量は
 $95 \text{ mW}/\text{m}^2$ で、この値は TAMAKI
(1986) による日本海盆の熱流量の平均値 (信頼度の高いデータのみを対象にしている)、 $95 \pm 12 \text{ mW}/\text{m}^2$ によく一致している。

§ 7. 問題点と今後の課題

データの記録にカセットテープレコーダーを使用しているが、着底のショックに対する不安
をぬぐいきれないので ROM で代替したい。熱伝導率測定システムでは、トリガリングとヒ
ーターの加熱時間の設定が問題である。以後の航海でテストを重ね、適切なレベルを設定し
たい。

システム全体に関しては、音響送信による測定中のデータのモニター、船上でのデータ処理
の2点の実現にとり組みたい。また、16 チャンネルの特性を生かした POGO 測定用のプロ
ローブを開発し、測定を実施したい。

Fig. 6. Temperature versus $1/t$ (t : time in sec) after penetration (right end).

Fig. 7. Temperature-depth profile at HF1-A ($42^{\circ} 13.6' \text{N}$, $137^{\circ} 40.2' \text{E}$) in Japan Basin.

謝 辞

測器の製作にあたり、東京大学地震研究所の山野誠氏、長尾年恭氏に多くの助言、助力を頂いた。千葉大学理学部の浅沼俊夫氏、玉井宏氏にも助力頂いた。また、観測作業においては、白鳳丸及び淡青丸の乗組員の方々にも多大な協力を頂いた。ここに改めて感謝の意を表したい。

文 献

- ANDERSON, R. N. and J. N. SKILBECK, 1981, Oceanic Heat Flow, The Sea 7, Wiley-Interscience, New York, 319-326.
- BULLARD, E.C., 1954, The Flow of Heat through the Floor of the Atlantic Ocean, Proc. Roy. Soc. London, A, **222**, 408-429.
- FEHN, U., K. E. GREEN, R. P. VON HERZEN and L. M. CATHLESS, 1983, Numerical Models for the Hydrothermal Field at the Galapagos Spreading Center, J. Geophys. Res., **88**, 1033-1048.
- HYNDMAN, R. D., E.E. DAVIS and J. A. WRIGHT, 1979, The Measurement of Marine Geothermal Heat Flow by Multipenetrating Probe with Digital Acoustic Telemetry and insitu Thermal Conductivity, Marine Geophys. Res., **4**, 181-205.
- INATANI, H. and I. FURUYA, 1980, A Microprocessor Controlled Time Code Generator for an OBS System, J. Phys. Earth, **28**, 281-292.
- 木下 肇・安井 正, 1978, 簡易型デジタルレコーダー・海底のヒートフロー測定, 地震 **2**, **31**, 95-100.
- 木下 肇・山野 誠, 1983, 最近のヒートフロー測定の話題・南海トラフの高ヒートフロー問題の解決に向けて, 海洋科学, **15**, 738-744.
- KINOSHITA, M., S. NAGIHARA and H. KINOSHITA, 1986, Heat Flow Measurement, Preliminary Report of Hakuho Maru Cruise KH86-1, Ocean Res. Inst., Univ. Tokyo, 33-35.
- LISTER, C. R. B., 1979, The Pulse Probe Method of Conductivity Measurement, Geophys. J. Roy. Astr. Soc., **57**, 451-461.
- 松岡 節, 1979, 標準電池のかわりに使える基準電圧発生 IC, エレクトロニクス 333 回路集, 誠文堂新光社, 48-49.
- RIBANDO, R. J., K. E. TORRANCE and D. L. TURCOTTE, 1976, Numerical Models for Hydrothermal Circulation in the Oceanic Crust, J. Geophys. Res., **81**, 3007-3012.
- SCLATER, J. G., C. E. CORRY and V. VAQUIER, 1969, In situ Measurement of the Thermal Conductivity of Ocean-floor Sediment, J. Geophys. Res., **74**, 1070-1081.
- 炭竈貞夫・荒川美明, 1976, 迅速熱伝導率計, 計測技術, **4**, **4**, 60-66.
- TAMAKI, K., 1986, Age Estimation of the Japan Sea on the Basis of Stratigraphy, Basement Depth and Heat Flow Data, J. Geomag. Geoelectr., **38**, 427-446.
- VON HERZEN, R. P. and A. E. MAXWELL, 1959, The Measurement of Thermal Conductivity of Deep-sea Sediments by Needle-probe Method, J. Geophys. Res., **64**, 1557-1563.
- 渡部輝彦, 1972, 海洋底の熱流量, 海底物理, 東海大学出版会, 1-108.