



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	精密地下水温計
Author(s)	島村, 英紀; SHIMAMURA, Hideki
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 47, 1-15
Issue Date	1986-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.47.1
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14144
Type	departmental bulletin paper
File Information	47_p1-15.pdf



精密地下水温計

島村英紀

北海道大学理学部海底地震観測施設

(昭和61年1月14日受理)

A Quartz Thermometer System for Measuring Microtemperature Variations of Groundwater

By Hideki SHIMAMURA

Laboratory for Ocean Bottom Seismology

Faculty of Sciences, Hokkaido University

(Received January 14, 1986)

An accurate thermometer system has been made to measure long-term variations in microtemperatures of groundwater. A quartz crystal was used for sensing devices, which has a resolution of 10^{-5}°C , and the accuracy of 10^{-3}°C . There are two types of thermometers; one is with digital printer and the other is with analogue voltage output for telemetering. Both types have huge dynamic range, 240 dB, so that no adjustment is necessary in its installation. The thermometer has been designed to withstand harsh conditions, e. g. with operating temperature range of -30 to $+40^{\circ}\text{C}$. Battery operations are possible. The sensor which is intalled in a well can "sense the outside" regardless of well casing. So that any existing well can be used for the microtemperature observations.

About 50 sets have been installed mostly in earthquake impending regions, where some relations are expected between earthquake generation and the movements of groundwater that are sensitively caught by microtemperature measurements. In some observations, observed microtemperature changes have been revealed to be related with earthquakes, with their precursors, and also with atmospheric pressure changes.

I. はじめに

地下水や温泉の温度を測ることはよく行われているが、その測定精度は、せいぜい 0.1°C くらいなのがふつうである。今回は、この種の測定精度を上げられるだけ上げて微小な水温の変動を見てみると、いままで見えなかった現象が見えるのではないかと考えて測定装置を開発し、

各地の現場で観測を行っていることについて報告する。この場合温度の絶対値を測ることは、ほとんど意味がないので、温度の変動を精密に測ることを目的とした。

最近では、地震の発生について、地下水とその動きが強く関連していることが認められつつある。このため、地下水の動きを知ることができれば、地震の発生や、ひいてはその予知にとっても研究が進むことが期待される。地下水の動きを直接に精密に調べることは、一般には不可能であり、間接的な方法のなかでは、高精度の水温測定は、たぶん、もっとも感度の高い方法である。

こうして、当面の直接の目的は、地震予知研究のための地下水温の高精度の連続観測、さらに将来的には、他の地球物理的な観測や研究のためにも使いうような、センサーに水晶振動子を使い $m^{\circ}C$ ($1/1000^{\circ}C$) の精度をもった水温計を製作した。

II. 測器の仕様

上記にあげたような目的で、なるべく精度の高い水温観測をするためには、いくつかの必要な条件がある。

第一には、長期的な安定性が必要である。たとえば、サーミスターをセンサーに使える、測定分解能として $1/1000^{\circ}C$ は達成できるが、長時間の測定のためには、半導体使用の素子として不可避のドリフトを逃げられないので、たとえば井戸の底で年の単位で連続観測をするためには不向きである。また第二には、地球物理の観測の常として、環境の条件の悪いところでも十分に働く測器でなくてはならず、たとえば高、低温や高湿度に耐えるほか、停電に備えたり、商用電源のないところでも働くように、低消費電力で電池駆動も可能でなければならない。

また、第三には、現地の人に委託観測するときなどのために、正常な機能をしているかどうか、外からすぐにわかるものである必要がある。たとえば録音した磁気媒体を送ってもらって研究室で再生して、そのときにはじめて不具合がわかる、というのでは、故障の発見や障害の回復がそれだけ遅れてしまうわけである。

そのほか第四としては、今回の水温観測のように、高い分解能で観測する場合は、広いダイナミックレンジが必要になる。設置後の水温の変動でスケールアウトしては困るのである。また、理想的には、設置の際にも何の初期設定もなしに動き出すものが望ましい。温度測定の場合とはくに、設置作業が水温の擾乱を与える可能性が大きく、現場で水温を測ってから初期設定をしても、その後の温度が変わってしまうことが考えられるので、この条件は重要である。

一方、第五には、深い井戸で観測するためには、井戸の中へ入れるセンサー部分と、地上に置くことになるレコーダー部分との距離がなるべく長くとれることが好ましい。また、その間をつなぐ電線の長さやその環境条件（周囲の温度や、周囲との電気容量など）の変化によって測定が影響されるものでは困ることはもちろんである。

これらの条件を考慮に入れ、しかも最大の目的である高い分解能と精度を達成するために、特殊なカットをした水晶振動子をセンサーに使った（前述1の条件を満たすため、以下カッコ内の数字は同様）、基本的には周波数カウント型の回路を設計し（1, 4, 5）、その回路をCMOS化し

(2, 5), また出力回路としてはデジタルプリンターを使った(2, 3)構成とした。

a. センサー部分

この特殊な水晶振動子は、温度によってその発振周波数が変化するもので、変化率は1℃あたり35~100 ppmほどである。したがって1/100,000℃の分解能をもたせるためには、 $3.5 \sim 10 \times 10^{-10}$ ほどの周波数変化を捉えなければならないので、かなり高度なエレクトロニクス

を必要とする。水晶振動子はその基本周波数が8~11 MHzのもの、262 KHzのものとの二種を使っている。後者はのちに入手したもので、振動子が小型(外側の円筒型金属ケースの直径2 mm, 長さ6 mm)のうえ安価にできるのが特長である。

この水晶発振子を発振させ周波数を分周して約30秒の矩形波にしてセンサー部分からとり出している。発振と分周は特別な低消費電力の回路を使っている。それは、センサー部分の電力消費はそこでの発熱になるので、この種の高感度測定にとっては好ましくないことのためである。一方、30秒という低い周波数の波にして送り出す理由は前記5の条件を満たすため、これによって、ケーブルの長さは1000 m以上でも可能になり、またその長さの変化や周囲の条件には全く関係しない測定が可能になった。

このセンサー部は、ステンレス鋼でできた耐圧ケースに入れて井戸の中に入れられる。耐圧容器は外径4.8 cm, 長さ17 cmの円筒型であり、2000 m以上の水圧に耐える。容器の隅はPhoto 1, 5に見られるように切り落されているうえ、上部に40 cmの長さの棒がついていて、井戸内の上げ下げでひっきりなくく形になっている。センサー部分の水晶発振子と回路は3 cm×6 cmのプリント板1枚におさまっており、耐圧容器はもっと小さく作ることは可能だが、あまり軽いと井戸の中をスムーズに降りていけないことがあることか

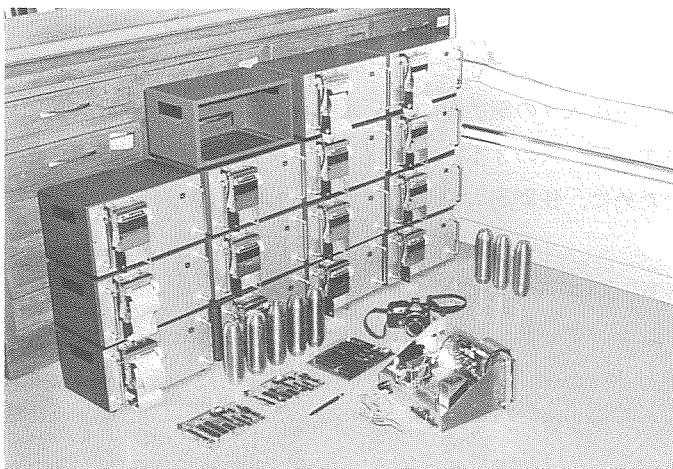


Photo 1. Quartz thermometer system with digital printer, type 993. Cylindrical pressure cases for borehole sensors are also shown.

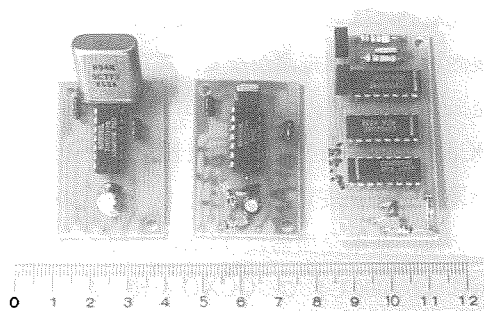


Photo 2. Microtemperature sensing units. Quartz crystals are mounted on printed circuit boards, in which oscillation and frequency division are made. Three types of quartz crystals, whose frequencies are 8.948 MHz, 10.7 MHz, and 262.144 KHz, are used. The temperature coefficients of the quartz sensor is 35–100 ppm/℃.

ら、標準的にはこの大きさのものを使っている。

センサー部分とレコーダー部分をつなぐケーブルは、安価で強度のあるものが使われている。芯は鋼線入りの銅撚線に架橋ポリエチレンをかぶせた直径 2.2 mm の単線を三つ撚り（信号線、電源、アースの 3 本）にしたもので、破断強度は 215 kg である。また、架橋ポリエチレンを使ったために、長期間の観測でも 120℃ の水温まで耐える（規格は 136℃ で 7 日以上）ことができる。

b. レコーダー部分

レコーダー部分は井戸の外の地上に置かれる。レコーダー部分の全体の大きさは横 30×高 17×奥行 20 cm で、その前面に放電破壊印字方式のデジタルプリンターがあって、記録を記録紙上に打ち出すようになっている（Photo 1）。

デジタルプリンターを出力に使ったのは、主として前述の 3 の条件のゆえで、どんな数字を打っているかは、誰にもすぐわかり、また例えば、電話でその数字を読みあげてもらうことによって、緊急時や故障の診断などにも役立つことができる利点は大きい。一方、放電破壊の印字方式をもつプリンターは、感熱方式のものにくらべて低温での問題が少なく、室内でも -30℃ にもなる北海道の観測や、南極の昭和基地での観測にも支障なく働いている。これにくらべて、たとえば磁気テープは、零下の環境では安定には動作しない。

レコーダー部分の電気回路は、基本的には、センサー部分から送られてきた矩形波の周期を測定するカウンターである。入ってきた矩形波でゲート信号をつくり、その中に基準周波数がいくつ入るかを数える方式で、回路は簡単で信頼性は高い。

レコーダーの中にある基準周波数の水晶発振器は、測定の精度を上げるためには、安定度のよいものが必要とされる。しかし一方で、高安定度の水晶発振器は恒温槽を内蔵しているために、電池駆動には適さないほど大きな電力を消費することが場合によっては難点になる。このため、観測現場に商用電源がなく、電池駆動にせざるを得ない場合には、TCXO（温度補償回路型水晶発振器）を使い、商用電源が利用できる場合には OCXO（恒温槽型水晶発振器）を使っている。OCXOの方が安定度はよく、水温測定の精度からいえば、基準発振器に TCXO を使ったときは 2 m℃ (2/1000℃) で、OCXO を使ったときは 1 ケタほどよくなる。

この基準発振器とデジタルプリンターのインターフェースと電源回路とを除いたすべての回路は消費電力を小さくするために CMOS 型の IC で作られ、13×19 cm の大きさの一枚のプリント板におさめられた（Photo 3）。

基本的な回路は周期を測定するためのカウン

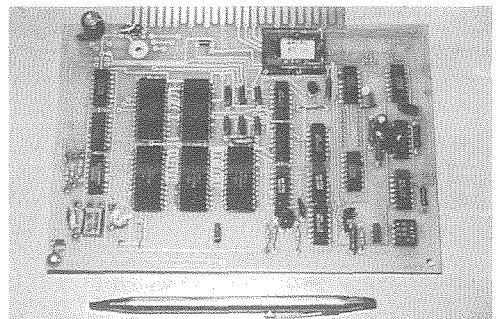


Photo 3. Main circuit board which contains every circuit except for a printer driver, a reference quartz oscillator, and power supplies. All the IC's are CMOS which enable low power consumption.

ターなので、測定すべき水温の変化が非常に大きくてもスケールアウトすることはないのが、この方式の最大の特長である。測定のダイナミックレンジは 240 dB という大きなものになっている。これによって、測定のための観測器の設置の時には、どんな水温に対しても、なんの調整も設定もなしに観測をはじめることができる。

この他に、時刻を印字するための回路も組みこまれている。回路を簡素化して信頼性をあげるために、水温の測定値を印字するときに、観測開始（リセット）iraいの時間数を日時ではなく 4 ケタの数値で打つという簡単なものにしてている。

デジタルプリンターとそのインターフェースは、ふだんは通電されない。設定された印字間隔ごとに印字する時だけ、電気を流すようにしてあるので、平均消費電力は 1 mW ほどと、ごくわずかですんでいる。

なお、印字する間隔は、ふつうは 30 分、1 時間、2 時間の中からスイッチで選ばれるが、それ以外にも、結線を変えるだけで簡単に変更も可能である。これらの間隔のあいだ、測定された水温の値は平均化されている。したがって、サンプリング間隔ごとに瞬間値をぬきとるとちがって、アリアシングを生じない特長をもつ。

デジタルプリンターの記録紙は、1 巻で 6000 行ほど打てるので、毎時一行ずつ印字しても 250 日間の記録が可能である。なお、プリンターの寿命は 100 万行であり、信頼性も十分高い。

c. 電源

システムが必要とする電源は、商用電源があるところでは AC 100 V からすべてがまかなわれる。商用電源のないところでは、+12 V と -24 V の二種の直流電源（電池）が必要である。このうち +12 V は +12 から +35 V までのどの電圧でも供給可能で、基準発振器をはじめ、プリンターインターフェース以外のすべての回路をまかなう。電流の消費は TCXO を基準に使ったときに 8 mA である。このため、アルカリマンガンの単一型乾電池で 1 ケ月の連続観測をまかなうことが出来るし、小型の乗用車用の鉛蓄電池 (60 AH) では 10 ケ月の観測が可能である。一方、-24 V は -24 V から -40 V が供給可能で、デジタルプリンターの印字用であり、平均電力はごく少ないために、アルカリマンガンの単三型乾電池を使っても数ケ月の連続観測をまかなうことが可能である。またこの -24 V は、+12 V から DC-DC コンバーターを通してまかなう仕様も作られており、この場合は、全体のシステムを 12 V の単一電源で駆動することができる。

いずれにせよ、このシステムは電源についての負担が少なくてすむのが特長である。もちろん、電源電圧の変動による測定への影響はない。

d. 環境テスト

環境条件がともすれば苛酷なこの種の観測器にあっては、その環境に耐えることはもちろん、測定結果が環境の変化に影響されないことが必要である。

このため、各種のテストが行われ、満足すべき結果を得た。温度でいえば 40°C 以上の高温から

-30℃の低温まで支障なく動作し、結露しないかぎり高い湿度にも耐える。また、気圧の変化にも何の影響がないことも確かめられた。また、センサー部は 100℃以上まで測定可能である。

なお、センサー部分の熱的な時定数のテストも行われた。標準の大きさの耐圧容器に入れたときに、水中での時定数は 6～7 分であった。実際に井戸の中で地下水温を測ってみると、水温の変動にくらべてこの時定数は十分短く、これ以上小さい時定数にする必要がないことが確かめられている。

e. テレメーター用システム

以上述べてきたデジタルプリンター方式の精密水温計はすでに 50 台余が北大理学部で作られ、III に述べるように世界各地に設置されて観測を続けている。これらの測定は、印字された紙を切りとって郵便で集めることでデータが処理される。1 ヶ月ぶんの記録を人間の手によって北大で計算機に入力するのに約 20 分ほどで終るので、それほど大変な作業ではない。

しかし、この方式では第一に時間おくれがあり、地震予知など、研究によってはもっと早いデータ収集が求められることもある。また観測点によっては、すでにテレメーターのための回線があって、既存のデータを送っているところもある。

このため、こういった場合に使うためのテレメーター用のシステムも作られた(Photo 4)。この場合にも、前に述べたようなフィールドの測器としての条件が同様に必要となる。

既存のテレメーター回線にデータを送りこむためには、なるべく広い範囲の異ったテレメーターシステムに対応しなければならない。このため、一般的にはアナログ出力をもつことが好ましく、またその出力の極性や振幅を相手に応じて変えられることが必要である。今回はこのため、水温が変ると選択の可能な出力電圧がアナログ的に変化するシステムを開発した。

アナログ出力の場合、とくに問題となるのが、出力の飽和(スケールアウト)である。このため、高分解能を保ちながら飽和しない出力をもつために、出力がきめられたスパンから外へ出るときには、その続きがスパンの反対側の端からスパンの中に入ってきて、出力がつねにスパンの中にある方式を採った。この方式だと、高い分解能を保ちながら、スパンの端を出力が何回横切ったかを数えることによって、スパンよりもずっと大きい電圧をよみとることができる。

この方式をとるために、センサー部分からの矩形波の周期を数えるためのデジタルカウン

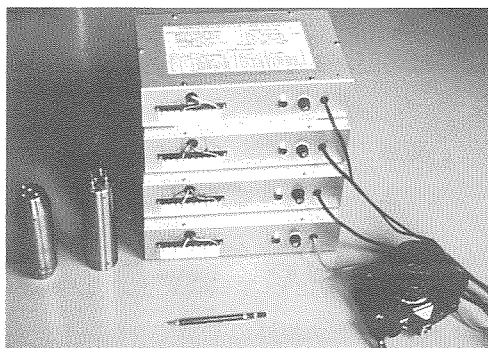


Photo 4. Quartz thermometer system for telemetry, type 995. DA converter supplies analogue voltage output which will not be saturated over a wide range of measured temperature. The range of the output voltage, and the polarity of the output can be adjusted internally according to the telemetry system. Four sets are shown.

ターの IC の下位 (12 ビット) だけを DA (デジタル・アナログ) 変換して出力をとり出す回路方式を使っている。なおアナログ出力は、ラッチ回路を付けたために、次のデータで更新されるまでは同じ電圧を保っており、テレメーター側の機器でこの出力をいつサンプリングしてもいいような対策が行われている。

基本的な回路は、信頼性や部品の供給のために、なるべくデジタルプリンター型のシステムと共用をはかっており、センサー部分や、レコーダー部の初段部分は同じものを使えるようになっている。

なお、基準水晶発振器は OCXO を使っている。これは、既存のテレメーターがあるところでは、商用電源があるのが普通だから、より高精度の観測のために用いたものである。

アナログ出力は、正、負、あるいは両極性が結線を変えることで選べ、また全スパンの電圧も 2.5, 5, 10 V の中から選べる。また、分解能と出力の更新周期はスイッチの切換えで変えられるが、ふつうにはそれぞれ $0.01 \text{ m}^\circ\text{C}$ (10^{-5}°C) で 60 分更新、または $0.03 \text{ m}^\circ\text{C}$ で 30 分更新、または $0.05 \text{ m}^\circ\text{C}$ で 15 分更新のどれかで観測をしている。なお、このそれぞれの場合のフルスケールは、それぞれ 55, 110, 220 mV であるが、このスケールを超えても、出力は飽和せずに記録されることは前述したとおりである。

III. 現場での観測

a. 北海道での観測

北大理で開発された水晶振動子を使った高精度水温計がはじめて現場に設置されたのは、1978 年 11 月、弟子屈 (てしかが) 町屈斜路の 210 m の井戸 (黒滝井戸) であった。センサーは井戸の底に置かれた。当初はレコーダーは地震計のペン描き記録に重畳させた一種のアナログ記録であった。このシステムは同年 12 月 6 日に 204 km 離れた深さ百数十 km の稍深発地震 (マグニチュード 7.5) のときに、 $133 \text{ m}^\circ\text{C}$ にもなるコサイスマミックな水温の上昇を記録した (Shimamura, 1980)。

その後、デジタルプリンター方式のシステム (993 型と称されている) が 1979 年春に作られ、1979 年 4 月に弟子屈町鑑別の 760 m の井戸 (明盛井戸) で観測をはじめたのを皮切りに、Table 1 に示すように、現在までに、国内のべ 34 点、国外 13 点の観測が行われている。

これらの設置場所は、そのほとんどが、地震予知研究のために選ばれた。北海道では、特異な内陸地震活動がある弟子屈町周辺をはじめ、浦河沖や日高山脈下の活発な地震活動に近い浦河町上杵臼 (北大理・浦河地震観測所)、それに火山活動や火山性地震活動と関連して有珠山の近くにも置かれた。

このうち、有珠での水温観測では、群発地震活動に先立って水温が変化することや、コサイスマミックな水温のステップ状の変化の正負の極性が、地震のおきる場所と地震の発震機構のちがいに対応していることが発見された (Shimamura and Watanabe, 1981)。このとき観測された水温のステップは 1 から $10 \text{ m}^\circ\text{C}$ という小さなものであり、この精密水温計でないと観測できないも

Table 1. Observation sites of the quartz thermometers.

OBSERVATION SITE	LATITUDE	LONGITUDE	OBSERVATION PERIOD	SENSOR DEPTH	WELL DEPTH	COMMENTS
(HOKKAIDO)						
KUR (Kurotaki)	43°32'55"N	144°22'17"E	17/11/1978 -	210 m	210 m	Second sensor added 7/1980
MEI (Meisei)	43°28'15"N	144°12'00"E	11/4/1979 - 12/1983	480 m	760 m	Sensor shifted to 220 m 5/1981
KMD (Kamata)	43°28'48"N	144°27'50"E	11/7/1979 - 26/7/1982	110 m	495 m	Sensor depth 30 m until 7/1980
TCY (Tsujiya)	43°28'49"N	144°28'37"E	10/5/1980 - 12/5/1983	68 m	800 m	Self flowing 3 litre/min., 24°C
KNK (Kunioka)	43°29'33"N	144°27'18"E	9/12/1981 - 28/12/1983	100 m	270m	
AKA (Akan)	43°25'53"N	144°06'12"E	8/12/1981 - 4/1984	4 m	4 m	Self flowing, 46°C
USU (Showashinzen)	42°32'08"N	140°51'42"E	12/10/1979 - 12/1984	200 m	376 m	
CHG (Chikashigen)	43°04'41"N	141°20'12"E	16/11/1979 -	110 m	110 m	Second sensor added 7/1981
BRO (Birao)	43°28'99"N	144°24'18"E	2/11/1984 -	140 m	140 m	With geophones
KMU (Kamikineusu)	42°14'19"N	142°58'02"E	4/7/1983 -	110 m	110 m	With borehole strainmeter
(FUKUSHIMA)						
SHM (Sohma)	37°46'41"N	140°59'11"E	2/6/1979 -	215 m	215 m	With tiltmeter
KSM (Kashima)	37°41'27"N	140°53'31"E	5/11/1979 -	200 m	200 m	With Radon observation
NRH (Naraha)	37°15'21"N	140°59'05"E	5/11/1979 -	200 m	200 m	With Radon observation
(TOKAI)						
OMZ (Omaezaki)	34°35'58"N	138°13'50"E	22/6/1979 - 24/4/1980	100 m	100 m	Second sensor added 11/1979
YSD (Yoshida)	34°45'24"N	138°16'17"E	22/6/1979 - 5/10/1982	135 m	135 m	With Radon observation
IWN (Iwanishi)	34°42'48"N	137°51'11"E	22/6/1979 - 14/8/1979	150 m	150 m	
SZH (Shizuhataminami)	35°00'48"N	138°22'40"E	22/6/1979 - 5/5/1983	100 m	100 m	With water level observation
ARA (Araimachi)	34°41'05"N	137°34'43"E	21/11/1979 -	393 m	393 m	With seismograph
FKR (Fukuroi)	34°43'40"N	137°57'30"E	25/12/1979 -	130 m	130 m	With Radon observation
OSM (Osadaminami)	34°56'00"N	138°22'19"E	25/12/1979 -	110 m	110 m	With Radon observation
FJM (Fujinomiya)	35°12'39"N	138°35'34"E	25/12/1979 - 7/6/1984	130 m	130 m	With Radon observation
YIZ (Yaizuobama)	34°53'36"N	138°20'54"E	16/4/1980 -	484 m	484 m	Abandoned hot spring
MKB (Mikkabi)	34°48'20"N	137°33'26"E	5/10/1981 -	45 m	45 m	With borehole strainmeter
TYB (Toyobou)	34°41'46"N	137°43'16"E	16/11/1981 -	125 m	125 m	
MZK (Meruzuka)	34°43'21"N	137°45'30"E	18/11/1981 -	330 m	330 m	
HIZ (Higashihizu)	34°48'45"N	139°03'28"E	18/3/1982 -	245 m	245 m	With borehole strainmeter
AJR (Ajiro)	35°02'34"N	139°05'45"E	11/3/1983 -	108 m	108 m	With borehole strainmeter
HNO (Hino)	35°38'51"N	139°25'01"E	11/6/1984 -	131 m	131 m	With borehole strainmeter
YGW (Yugawara)	35°09'47"N	139°05'34"E	16/6/1984 -	144 m	100 m	With borehole strainmeter
OMJ (Omaezaki JMA)	34°36'06"N	138°12'58"E	1/12/1984 -	208 m	200 m	With borehole strainmeter
(ICELAND)						
HEL (Hella)	63°50'24"N	20°24'36"W	1/9/1982 -	393 m	393 m	With borehole strainmeter
STO (Storöfshvöll)	63°45'00"N	20°12'36"W	2/9/1982 -	401 m	500 m	With borehole strainmeter
SKA (Skálholt)	64°12'36"N	20°31'48"W	3/9/1982 -	125 m	140 m	With borehole strainmeter
JDA (Jadar)	63°18'00"N	20°09'00"W	4/9/1982 -	58 m	70 m	With borehole strainmeter
SAU (Saurbaer)	63°59'08"N	20°25'48"W	4/9/1982 -	37 m	180 m	With borehole strainmeter
GEL (Geidlingaa)	64°19'30"N	19°16'48"W	5/9/1982 -	233 m	233 m	With borehole strainmeter
BUR (Búrfeili)	64°06'36"N	19°48'00"W	29/10/1982 -	180 m	180 m	With borehole strainmeter
(ANTARCTICA)						
SWA1 (Showa 1)	69°00'39"S	39°35'15"E	19/4/1980 -	5,10,20m	20 m	Sensor 2, 5 m from 4/1981
SWA2 (Showa 2)	69°00'40"S	39°35'12"E	19/4/1981 -	1,4,7 m	7 m	
SWA3 (Showa 3)	69°00'29"S	39°34'18"E	7/6/1980 - 2/1/1981	7 m	7 m	Deployed on the sea floor
(TOTTORI)						
MSA1 (Misasa 1)	35°24'41"N	133°53'14"E	1/9/1980 - 30/6/1983	350 m	400 m	
MSA2 (Misasa 2)	35°24'41"N	133°53'14"E	12/11/1983 -	140 m	190 m	
YDN (Yudani)	35°23'09"N	134°09'23"E	12/3/1982 -	0.3 m	0.3 m	Deployed on bottom of fountain
KRO (Karo)	35°31'33"N	134°11'51"E	14/8/1980 -	90 m	100 m	
(ROMANIA)						
VRI (Vranceaia)	45°52'20"N	26°43'50"E	9/10/1985 -	70 m	70 m	
ODA (Odobesti)	45°46'48"N	27°03'37"E	10/10/1985 -	50 m	50 m	
BUCI (Bucharest)	44°20'80"N	26°01'80"E	24/10/1985 -	89 m	159 m	

TOTTORI, Antarctic observations, and FUKUSHIMA/TYB/MZK are mainly kept by Dr. T. Tsukuda, Kyoto University, NIPR (National Institute for Polar Research), and Dr. T. Kanazawa (Tokyo University), respectively.

のであった。

また、弟子屈の水溫観測では、観測された水溫の変化(振幅は井戸によって20~80 m°C)が気圧の変化とよい相関を示し、気圧による地下水の動きが水溫観測ではじめて示された(Shimamura, 1983)。なお、これは地下水位の変化を介しての水溫の変化ではないことも調べられた。

このほか、弟子屈の210 mの黒滝井戸(1979年4月にデジタルプリンター型の観測システムに変更されていた)では、多くのコサイスマックな水溫変化が観測され、その振幅が、地震のマグニチュードと地震までの距離で系統的に変わることも示された(Shimamura, 1983)。観測された振幅は3~170 m°Cであり、その立上りの波型

Table 2. Specifications of the quartz thermometer which was temporarily deployed at the depth of 5100 m on the Northwestern Pacific Basin.

SPECIFICATIONS OF THE DEEP-SEA QUARTZ THERMOMETER

SENSOR : QUARTZ CRYSTAL. CUT AT -26.5° FROM Z-AXIS.

ACCURACY : BETTER THAN 1/1000 °C.

RESOLUTION : 1/100,000 °C.

RECORDING PERIOD / RECORDING INTERVAL

250 DAYS / 1 HOUR

125 DAYS / 30 MIN.

64 DAYS / 15 MIN.

200 HOURS / 2 MIN. (SELECTABLE BY SWITCH)

CONTAINER : GLASS SPHERE. 33 CM DIAMETER.

USABLE DEPTH : 7500 METERS.

BUOYANCY OF THE WHOLE THERMOMETER : POSITIVE.

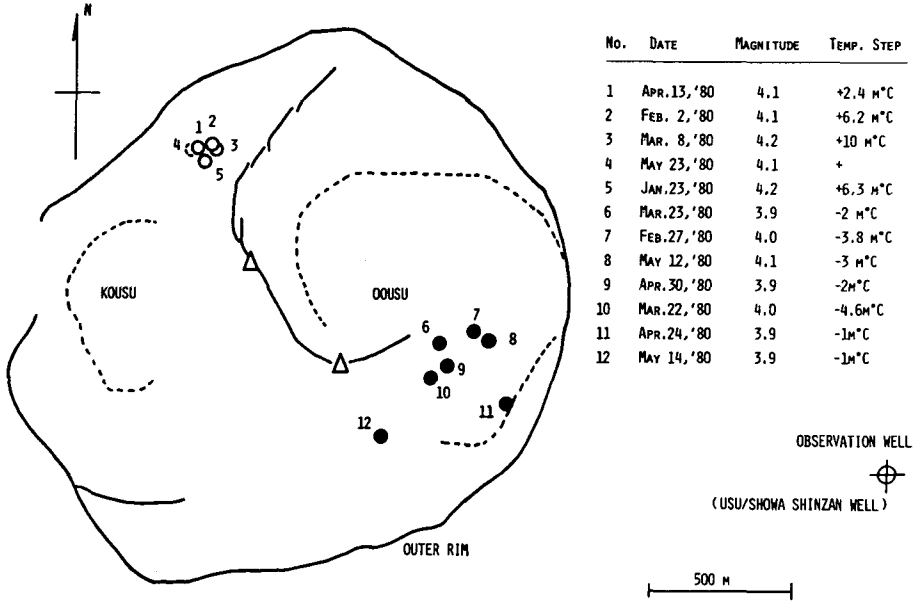


Fig. 1. Location of earthquake epicentres and the observation well in Usu volcanic region (USU). Solid circles indicate epicentres of earthquakes which were recorded by the quartz thermometer with negative temperature offsets (1–6m°C). Open circles are those with positive offsets (2–10m°C). The earthquakes are listed in the inserted table. The magnitudes of the earthquakes were 3.9–4.2. No offset was observed with earthquakes whose magnitudes were less than 3.7. The U-shaped solid line in the volcano crater is a major surface fault zone.

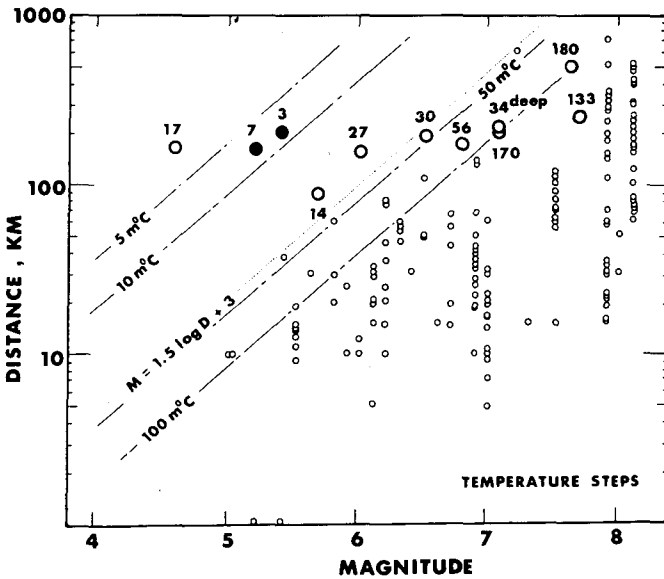


Fig. 2. Microtemperature steps recorded at KUR station by a 210 m deep sensor (KUR₂₁₀). The recorded amplitudes in m°C are shown by large circles with numerals. Open and solid circles are positive and negative steps, respectively. Small circles represent the compilation of visible coseismic signals of hot springs and groundwater by Dr. S. Hiraga. 34m°C, which was recorded with deep, 170km, earthquake, and 17m°C are a few exceptions from the lines. (Shimamura et al., 1985)

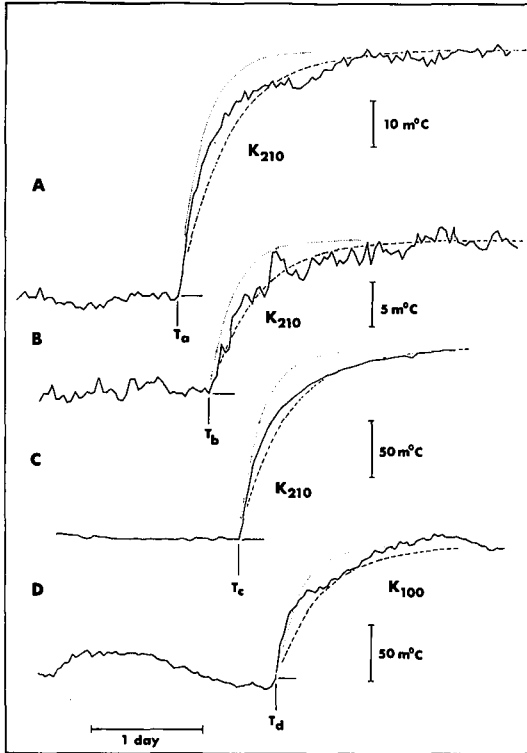


Fig. 3. Coseismic microtemperature signals recorded at KUR station by a 210 m deep sensor (KUR₂₁₀) and a 100 m deep sensor (KUR₁₀₀). Dotted lines indicate exponential increase with time constant of 5 hours, and broken lines, of 10 hours. The observed microtemperature increased with a time constant of about 5 hours at first, and later with a time constant more than 10 hours. T_a to T_d are the times of earthquakes, which coincided with the onsets of the observed records. Earthquake dates, magnitudes, depths and epicentral distances are A-23/2/1980, M6.8, 30 km, 176 km; B-14/12/1979, M5.7, 70 km, 89 km; C-21/3/1982, M7.1, 40 km, 219 km; D-23/1/1981, M7.1, 130 km, 217 km, respectively. All the polarities of these records are positive (temperature increasing), however other earthquake can generate negative steps also.

はいずれもよく似ていて、時定数5ないし10時間のイクソネンシャル曲線で近似できる。なお、観測を開始していらい弟子屈近辺には近い地震はなく、これらの地震はいずれも90 kmよりも遠いものであった。

また、その後の観測で、気圧の変化で誘起される水温の変化は、数 km 以内の狭い範囲でも井戸によって著しく異り、最小は $0.05 \text{ m}^\circ\text{C}/\text{mbar}$ 以下、最大は $6 \text{ m}^\circ\text{C}/\text{mbar}$ 以上と、2 ケタもちがうことがわかった (Shimamura et al., 1985)。そして、気圧に対する感度が良い井戸が必ずしも、コサイスミックな信号が大きいわけでもないことも示された。因みに、気圧に対する感度が最大なのは、弟子屈の辻谷井戸で、深さ 800 m、約 20°C の水を毎分 3 l ほど自噴している。一方、コサイスミックな信号がもっとも大きく記録されるのは黒滝井戸で、ここでの気圧係数は 210 m の井戸底で、 $0.53\sim 0.59 \text{ m}^\circ\text{C}/\text{mbar}$ 、100 m の深さのところでは $1.9\sim 2.1 \text{ m}^\circ\text{C}/\text{mbar}$ である。

興味深いことは、この 210 m の井戸の底と中間に入れてある 2 個のセンサーの信号のちがいである。この二つのセンサーは全く同じ特性をもつが、これらに記録された信号の振幅の比は信号ごとにちがっていることが発見された (Shimamura, 1983)。一般的に振幅は中間のセンサーの方が大きい、その振幅の比は、気圧に誘起された水温の信号では 3.6 なのに、コサイスミックな信号については 4.5 にもなる。このことは、この二種類の信号がそれぞれ別のメカニズムから来ていることを示すとともに、井戸内の水位変化、つまり井戸内の水全体の垂直変動によるものでもないことを示している。なお、この二種の信号の周波数はほぼ同じであり、周波数による地下水の応答のちがいは考えられない。

黒滝井戸では、地震の前兆と考えられる水温の信号が、すでにくつか見つかったている (Shimamura et al., 1985). これは、200 km 近く離れたマグニチュード7クラスの地震の前に見られたもので、地震の前1~2ヶ月から、振幅30 m°Cほど、幅1~2日の単発パルス状の変化が2、3回ほど記録されたもので、これらの地震の前以外にはけして見られず、また地震を含めて他のどんな現象にも対応しないことから、地震の前兆と考えられ

ている。今後さらに観測が集積されれば、よりくわしく調べられるだろう。

この単発パルス状の変化で注目されることは、井戸内の異った深さで記録された振幅比が、前に述べた、気圧による水温変化の3.6とも、コサイスマミックな信号の4.5ともちがって、1.5~1.6であることであった。これは、この信号を生むメカニズムが、他の二者のどちらともちがうことを示している。また、この比のちがいから、地震の前兆信号を「信号」とし、気圧による水温変化を「雑音」と考えるときには、信号対雑音比 (SNR) は、井戸の底のセンサーの方が3倍も良いことになる。

b. 道外での観測

北海道内のほか、1979年には福島県の太平洋岸に近い三地点でも993型による水温観測がはじめられた。これは活断層のすぐ近くであり、また宮城・福島両県の沖の活発な海底地震活動の近くであることから場所が選ばれたもので、東大理学部地球化学観測や井戸底での傾斜計観測との協同研究である。

このほか、同じく1979年からは、東海地震の発生が懸念されていて、地震予知の観測強化地域に指定されている東海・南関東地方にも静岡県庁と気象庁の協力を得て水温計の設置がはじめら

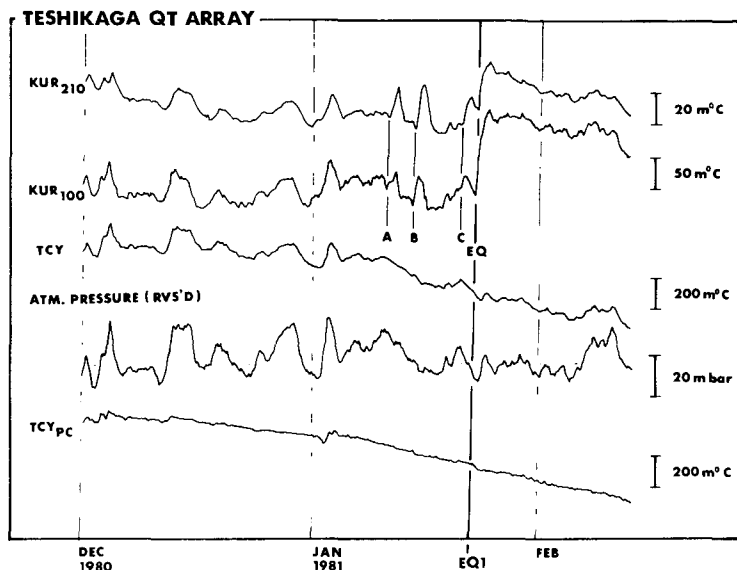


Fig. 4. Comparison of KUR₂₁₀ (bottom) sensor and KUR₁₀₀ sensor. Both records are before compensating for atmospheric pressure (TCY_{pc} is a pressure compensated record of TCY). In general the KUR₁₀₀ signal is 3.6 times larger, but for the coseismic signal, e. g. at time of EQ, it is 4.5 times larger. Also, the precursors, e. g. A-C, is only 1.5-1.6 times larger. The earthquake (M7.1) occurred on 23/1/1981. A very small negative coseismic signal is seen on TCY_{pc} record. Atmospheric pressure is also shown, with the polarity reversed.

れた。995型と称されるテレメーター型を含めて現在までにこの地方だけでのべ17地点になる。

同地方の観測は、人間活動の大変高いところで行われている。たとえば井戸を中心とした半径500m以内に数百軒の家があるところがほとんどだが、水温に及ぼす人為的な影響は、鰻の養殖のために大量の水をすぐ近くで汲み上げている1ヶ所（吉田町）を除けば、ほとんどないことがわかった。

現在この地方の地震活動度は大変低いので、いままでのところではコサイスマミックな信号や、地震の前兆と考えられる信号は見つかっていない。しかし、1979年の設置開始から6年の観測を蓄積したために、いわばふだんの信号がわかり、将来もしこれをバックグラウンドとして別の「信号」が来たときには、それを検出することは可能になっていると思われる。

また、1980年からは鳥取地方の温泉などで、地域の地震活動との関連を調べるために、京大防災研究所との協同研究で993型の観測が始められている。

このほか、1982年からは国立極地研究所との協同研究で、南極の昭和基地でも連続観測が始められ、測器の長期間の安定性を生かして、地球熱学的な研究などにも使われている（Shibuya et al., 1982, Nagao et al., 1985）。

その他国外では、アイスランドの気象庁と米国のカーネギー研究所と協力して、1982年からアイスランド南部の地溝帯にある深井戸で連続観測が始められている。7台の993型精密水温計がカーネギー研究所の高感度体積歪計（Sacks and Evertson, 1970）と同じ井戸に設置された。微小な体積歪と精密な水温変化を同時に測ることは地殻変動と地殻内の地下水の挙動の関連など、いままで知られていなかったものを研究するのに有効である（Shimamura et al., 1985）。このため、アイスランドに限らず、国内でも、この種の並行観測を増しており、現在、国内外あわせて13点になっている。1985年秋には、日本とルーマニアの間の地震予知の協同研究が5年計画ではじまり、その第一年次として、3台の993型の精密水温計が同国の地震多発地帯であるブランチア地方などの井戸に設置された（Photo 5）。1986年以降、さらに増設されることが予定されている。



Photo 5. Deployment of the sensor into a Romanian well in October 1985. Simple and low cost twisted wires can be used for the system. The cable has steel conductor wires so that it is strong enough to be used for observations with depth exceeding 1000 m.

c. 海底での臨時観測

993型の水温計システムは前述のように消費電力が少く、また全体の容積も小さい。このため、将来の地球物理と地球化学の観測や海底の熱水鉱床の探査などにとっては重要だが、まだ誰も試みたことのない、海底での水温の微小変動を観測した（島村・西澤, 1980）。

観測は1980年7月、北大備船の作業船オーシャン・ディスカバラー号(699トン)で、三陸沖約310 km(40°30'N, 145°28'E)、水深5100 mの北西太平洋海盆の平坦な海底で行われた(Photo 6)。993型のシステムはガラス製の球状の耐圧容器(内径33 cm)1個のなかに電池とともに入れられ、深海ブイと音響切離装置をとりつけて海底へ沈められた。この観測は音響切離装置のテストを兼ねて行われたもので、水温計の位置は海底面上3 m、海底での観測時間は6日余(150時間)であった(島村・西沢, 1980)。観測された水温変動は11 m°Cほどあり、海底での海水の潮汐に関連したものと思われる半日周期のスペクトルの山が見られる。

なお、センサーの水晶発振子は厚さ約1.5 cmのガラス球の内壁に接着されており、熱的な時定数は2時間であった。もしセンサーをガラス球の外へ出せば、時定数は秒の単位以下にまでずっと短くなりうるので、将来海中を曳航する精密水温計などを作るときには、そういった時定数の小さい仕組みにすることを考えている。

IV. ま と め

温度の分解能が 10^{-5} °Cをこえる安定度の高い水温計を開発し、深層地下水の観測などに使っている。絶対的な精度や安定性については市販の計測器では検定することができないほど良好であり精度は1 m°C (10^{-3} °C)程度かと思われる。

この測定システムは地球物理学のフィールド向けに作られており、現場での調整が不要なうえ、苛酷な環境条件に耐え、また電池駆動も可能である。

システムは現在までに約50台が北大理学部で作られ、主として地震予知研究のために国内外の井戸に設置されている。このような井戸内の観測に使う場合には、この水温計はどんな既設の井

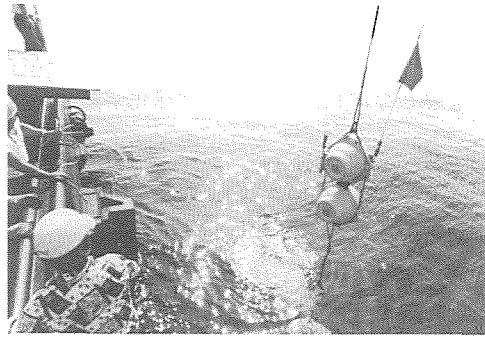


Photo 6. Quartz thermometer deployed on the ocean bottom. An experimental deployment of 6 days was made in 1980 on a flat deep ocean basin with a depth of 5100 m. All the thermometer system was contained in a 33 cm diameter glass sphere.

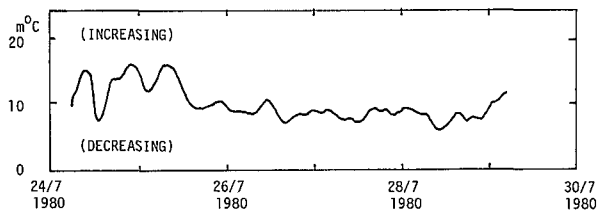


Fig. 5. Microtemperature record taken on a flat deep oceanic basin. The location was on the Northwestern Pacific Basin, 40°30'N, 145°28'E; depth is 5100 m. The quartz thermometer, which was contained in a 33 cm diameter glass sphere, was temporarily deployed 3 m above the bottom. Six-day record shows the maximum variation of 11 m°C, with a 12-hour peak in its spectrum.

戸でも観測できるという利点をもつ。つまり、水温観測は、その井戸にケーシング（鉄管外装）がされているかどうかにかかわらず、井戸の外の温度を「感じる」ことができる。これは、水そのものを感じなければならない地球化学観測や電気伝導度の測定にはできない特長である。

また、センサーである水晶振動子の大きさが小さいので、必要によってはセンサー部分を非常に小さく作ることができ、狭い井戸での観測や小さい熱的な時定数が求められるときにも対応が可能である（Photo 7）。

これだけの高精度測定を行いながら、記録可能範囲は 100℃以上と広い。これらの特長は、地震予知関連だけでなく、他の研究用途にも、この測器がそのまま使える可能性を大きくしている。

測器としてはほぼ完成の域に達し、現場での信頼性も高いことから、今後、さらに観測を継続し、あるいはさらに観測点をふやして、地下水温の微小変動、ひいては地下水の熱的な挙動やその微小な変動を見ていきたい。このことは、地震の前兆を研究するにも役立つはずである。

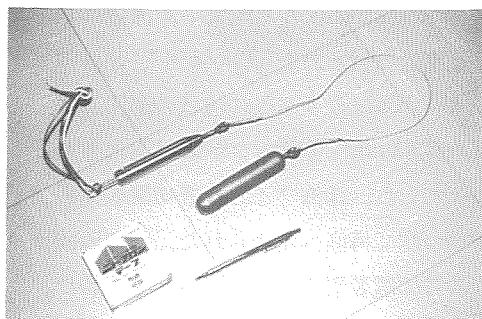


Photo 7. A sensor pressure case for boreholes with flowing water, or with smaller diameter. The outside diameter is 25 mm. A lead weight, shown below the pressure case, is used to make the installation of the pressure case in a flowing well smoother.

謝辞

精密水温計の開発の初期から約 50 台が現場に設置されている現在まで、その製作や設置は、すべて研究者の手で行われた。このため、製作、設置とその維持には多くの人のお世話になった。とくに、卜部卓（当初北大学生、現九大理）、稲谷栄己、岩崎貴哉、小河富夫、岡山宗夫、上野真司（以上北大理）、金沢敏彦、脇田宏（以上東大理）、二瓶信一、楡皮久義、薄田真司、吉田明夫（以上気象庁）、井野盛夫（静岡県地震対策課）の諸氏には製作と設置で、また上記のほか、黒滝君代、鎌田孝一（以上弟子屈町）、仁藤潤太郎（静岡県焼津市）、飯田衛（静岡県新居町）、中村龍雄（静岡県函南町）の諸氏には設置と維持の面でお世話いただいている。記して謝意を表したい。

文 献

- NAGAO, T., K., K. KAMINUMA and K. SHIBUYA, 1985. Long-term underground temperature measurements by quartz thermometers at Showa Station, East Antarctica, *Memoirs of National Institute of Polar Research*, Special Issue 37, 13–21.
- SACKS, I. S. and D. W. EVERTSON, 1970. A sensitive borehole strain-rate meter, *Carnegie Institution Year Book*, 68, 448–453.
- SHIBUYA, K., T. NAGAO and K. KAMINUMA, 1982. Measurements of underground and underwater temperatures by quartz thermometers at Showa Station, East Antarctica, *Antarctic Record, National Institute of Polar Research, Japan*, 76, 89–100.

- SHIMAMURA, H., 1980. Precision quartz thermometers for borehole observations, *Journal of Physics of the Earth*, **28** (3), 243–260.
- SHIMAMURA, H. and H. WATANABE, 1981. Coseismic changes in groundwater temperature of the Usu volcanic region, *Nature*, **291**, 137–138.
- SHIMAMURA, H., 1983. Groundwater microtemperature measurements—coseismic signals and atmospheric pressure effects, *Annales Geophysicae* (Journal of European Geophysical Society), **1** (3), 235–238.
- SHIMAMURA, H., M. INO, H. HIKAWA, and T. IWASAKI, 1985. Groundwater microtemperature in earthquake regions, *Pure and Applied Geophysics*, **122**, 933–946.
- 島村英紀・西澤あずさ, 1980. 深海底直上温度の時間変化について, 地震学会講演予稿集, 1980-2, A 57.