



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	水晶発振式精密地下水温計の開発と観測
Author(s)	島村, 英紀; SHIMAMURA, Hideki; 古屋, 逸夫 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 59, 221-247
Issue Date	1996-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.59.221
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14242
Type	departmental bulletin paper
File Information	59_p221-247.pdf



水晶発振式精密地下水温計の開発と観測

島村 英紀

北海道大学理学部海底地震観測施設

古屋 逸夫

気象庁松代精密地震観測室

(1996年1月16日受理)

Development of Sensitive Groundwater Thermometer which Makes Use of Quartz Sensor and Its Observations

Hideki SHIMAMURA

Laboratory for Ocean Bottom Seismology, Faculty of Sciences, Hokkaido University

Itsuo FURUYA

Matsushiro Seismological Observatory, Japan Meteorological Agency

(Received January 16, 1996)

A sensitive instrument to measure groundwater temperature, with a resolution of 10^{-5} degree, has been developed to make a clue to hydrology. Also in fields of solid earth geophysics, the importance of behavior of groundwater is becoming to play an important role in understanding generation of earthquakes, or in making detailed survey in crustal deformations, e.g. by use of GPS. A quartz sensor was introduced, and the field unit has been made to a low power, rugged design which can be powered by batteries. The advantage of this measurement is that it can use any existing well, regardless of steel casing.

The observations have been made mainly in earthquake zones in wells whose depth ranges from shallow to 1600 m. In many wells hPa(mb) atmospheric pressure change was found to affect the minute groundwater temperature noticeably, however the coefficient differs by more than 100 times from well to well. The effect was proved not to be caused by a simple change of water table according to atmospheric pressure changes.

Many coseismic changes in the groundwater temperature have been recorded, with amplitudes 1 to 1100 m deg, dependent on the magnitudes (Richter scale) and distances of earthquakes. The coseismic changes have been also proved not to relate water level changes in the well.

Also some changes which preceded earthquakes in the groundwater temperature were recorded in some wells in Hokkaido, Romania and China. However, the mechanism of these signals are still unknown. The amplitude ratios between two sensors in different depths in a well has shown that the ratios of these peculiar signals, those of coseismic signals and those of atmospheric pressure effects are all different, which suggests that the mechanisms of changing groundwater temperature are different each other for these phenomena.

I. 水晶発振式精密地下水温計の開発目的

地下水が地殻の物理的な性質を左右していることの重要性が、最近、地震学などの固体地球物理学で注目されている。

例えば、近年はパイロサイスのような反射法地震探査でモホ面までの地殻全体を研究することが出来るようになったが、カリフォルニア大学が行った実験 (Tom McEvilly, 私信) では、乾期が続いた後に雨が降ったときには、モホ面の深さそのものが変わったように見える記録が取られている。実際にモホ面の深さが変わるわけではないから、地下水の変化によって地殻の中の地震波速度が広範囲に変わっていたことを示している。また、最近測地測量に替わって広範に使われているGPS (Global Positioning System) 測量も、昔の測量よりも測定精度が上がった分、地下水によって測定値に影響が出てしまうことが分かりつつある。つまり、地殻の中の水の状態と挙動が分からないと何を測っているのか分からないほどなのである。このように地震予知や火山噴火予知のための精密測量など、測器としての観測精度を活用してより正確な観測をするためにも、地殻の物理的な性質に大きな影響を与えている地下水についての観測をはじめ、広い意味での陸水学 (Hydrology) の新しい発展が必要とされ始めているのである。

また固体地球物理学にとってもうひとつの重要な地下水の寄与がある。つまり地震の発生の研究のために地下水の動きを知ることも、近年とみに注目されたのである。震源で地震が発生するとき、つまり岩石の破壊には地下水が重要な関与をしていることがわかりかけてきている。

では、地下水の動きをどうやって測ることが出来るのだろうか。容易に想像がつくように、地下水の流速はごく小さいものだし、また三次元的に流れていることも多いと考えられるので、流速や流向を直接測ることは殆ど不可能である。つまり地下水の動きそのものを測ることはじつにむづかしいのである。

このためのひとつの手法として、ごく微小な地下水温の変化を観測することによって地下水の動きを知る試みをはじめた。微小な水温の変化はもっとも測りやすい物理量のひとつであることが狙いである。地下水が少しでも動けば、地下水温は微妙に変化する。それを精度 1000 分の $1 \sim 2^\circ\text{C}$ 、分解能 100,000 分の 1°C といった高い感度で測ろうというのである。

すでに行われている地下水中の化学成分や同位体比の変化を測るのも『地下水の動き』を測る方法である。もちろんこれらの観測は重要なものだが、地下水の動きを観測する手法としての感度は高いものではない。例えば標準的な地温勾配 ($1 \sim 10^\circ\text{C}/100\text{ m}$) を持つ場所で上記の精度で観測しているとすると、もし地下水が上下方向に $1 \sim 10\text{ cm}$ だけ動けば、観測出来ることになる。しかし、化学成分や同位体比は、特異な場合を除けば、これだけの検出感度を持つことはあり得ないからである。

一方、地震が発生するときに地震断層の動きによって熱が発生する。この面での観測や研究は限られているが、本研究の精密地下水温観測では、こういった研究に直接の寄与が出来る可能性は高くはない。それは岩石中の固体熱伝導で熱が伝わる速さは、例えば 1 km で 1 万年と、あまりに遅いためである。もちろん地下水が動くなど、固体熱伝導以外の機構で熱が運ばれる場合には、これよりもずっと大きな速さで熱が伝えられるから、特殊な場合には本研究での観測にかかることもあり得る。

II. 測器の概要と特長

この精密地下水温観測の大きな特長は、どんな既成の井戸でも使えることである。つまりケーシング (鉄管外装) のあるなしに関わらず、井戸の任意の深さのところで、外の地下水の温度を検知する

ことが出来る。もちろん、ひとつの井戸の中の複数の深さのところでも同時観測をすることも出来る。一方例えば地下水の化学成分の観測ではこうはいかず、ケーシングやストレーナー（ケーシングに開けた穴）の有無で観測が出来るところが限定されてしまう。

温度センサーには水晶振動子を使った。この種の地球物理学的な測定には、高い感度と長期にわたる安定性ととの両方がとくに必要なので水晶センサーを使ったのである。センサーに水晶振動子を使い、一般的な温度測定によく使われているサーミスターを使わなかった理由は、月とか年とかにわたる安定性の悪さを嫌ったせいである。サーミスターは温度測定の感度が高くて高感度の測定が容易なゆえによく使われるが、他方経年変化によるドリフトが大ききく、数週間以上の長期にわたる信号の検出には不向きである。

使った水晶振動子は、温度変化に対してなるべく鈍感な結晶のカット方向を用いている時計や発信器用とは異なる特殊なもので、温度変化に対して大きな周波数変化が得られる結晶のカット方向を用いている。初期の頃は国内の水晶メーカー 2 社に特注して作っていたが、後年はスイスの水晶メーカーが発売した既成水晶振動子を用いている。基本発信周波数は 8~11 MHz のものと 262 KHz のものの二つを使っている。温度係数は水晶によって 35~100 ppm/°C である。温度係数は負であり、測定すべき温度が上がったときには発信周波数が下がる。温度に対する周波数変化は、広い温度範囲では直線的に変化するわけではないが、せいぜい数°C の地下水温変化を測定するこの機械のような場合には、直線的な変化だと考えて十分である。

なお、この測定は、絶対的な温度の正確さは必要としないのが特長である。いったん井戸の中に設置したあとの温度変化を観測するのが目的だから、相対的な温度変化を観測すればいい。これは測器としての設計や較正を大変楽にする。

センサーが置かれた測定環境の温度を検出することためには、水晶振動子の発信周波数のごく小さな変化を検出しなければならない。開発された水晶発振式精密地下水温計では $3.5\sim 10\times 10^{-10}$ の発振周波数変化を検出することによって 100,000 分の 1°C の分解能を達成している。なお水温計としての精度は 1000 分の 1~2°C である。このほか、高精度の水温測定にとって、井戸の中に置かれるセンサー部分が発熱することは極力避けるべきだから、センサー部分での電力消費は特殊な IC を使って 1 mW 以下と小さく押さえている。

こうして作られた水晶発振式精密地下水温計は 993 型と名付けられた。測器全体の仕組みとしてはデジタル方式を採用している。アナログ方式よりは気温などの環境の変化に対して動作が安定しており、雑音に対しても強いのがデジタル方式の利点である。

最終的な記録方式としてもデジタル方式を使っている。デジタル方式の記録としてはフロッピーディスクや磁気テープなどの磁気媒体や半導体メモリーなどに記録する方式が一般的だが、この測器ではあえて記録紙の数字を打ち出すプリンター方式を採用した。その理由は、民家などに観測を委託するときに、誰でも動作状態が分かり、不具合が分かるためである。磁気媒体や半導体メモリーなどにしなかったのは、その場では正常に動作しているかどうか分からず、あとで不具合が分かっても、その間、欠測状態が続くことになるのを避けたかったからである。

またこの方式の取り柄は、緊急時には数値を読みとって電話やファクシミリでデータを転送して貰うことが可能なことである。群発地震が続いているときや、何かの前兆があって大きな地震が心配されるなどには、この利点は大きいはずである。もちろん、このほか故障時には電話で数字を読み上げて貰って、故障の診断をすることも出来る利点も持つ。

プリンターの方式としては放電プリンターを使っている。インク切れやインク凍結の恐れがないために選んだもので、アルミニウムをコーティングした記録紙に放電による小さい孔をあけることで縦

7ドット、横10ドットの数字を打ち出す仕組みである。プリンターには24桁の数字を打ち出すようになっており、そのうち水温の記録には16桁、時計、観測地点識別番号をそれぞれ4桁で記録している。なおプリンターの記録紙は毎時記録で250日記録可能である。

フィールドで使う観測機器には二つの重要な条件がある。ひとつは、故障しないことで、もうひとつは極力安価に作ることである。現場での故障は観測データを失うことを意味するので極力避けなければならない。とくに後者は、地球物理学の観測機器は、出来れば観測点を増やしてより多くの観測点でデータを取ることが重要なことが多いし、万が一、水害や火山灰の降灰や盗難などで測器を失っても被害が少ないためにも必要である。

こういったことから、この精密地下水温計では、現場に置く観測器を極力簡素に作ることに意を用いている。簡素に作ることは部品の点数が少ないことであり、上の二つの条件を同時に満たすことになるからである。例えば、現場でセンサーの水晶振動子の発信周波数から温度の数値そのものを計算して表示したり記録したりすることはもちろん可能だが、そのためにはある種の演算をする回路を付加しなければならない。何かの回路を付加することは、その分だけ全体の回路が複雑になり、電力も食い、信頼性も落とすことになる (Fig. 1)。

このためこの精密地下水温計では、デジタル記録する数値として、温度そのものではなくて、温度センサーの発信周波数の逆数に比例する数値を採用している。つまりセンサーの水晶振動子からの矩形波の入力信号を分周して約30秒の周期の矩形波にまで落として井戸の外まで伝送し、その矩形波を元にしてさらに分周した約30秒から2時間までの周期のゲートを使って基準発信器からの約1MHzの発信周波数を切ってカウントを数えて表示する方式である。

基準発信器としては通常の水晶発振器を使う。つまり気温や室温の変化になるべく影響されない温度補償型の水晶発振器である。この方式には大きな利点がある。それは記録出来る温度の幅が極めて広い、つまり記録のダイナミックレンジが約240dBと、極めて大きいということである。ダイナミックレンジが極めて広くフィールドでの観測中に記録がスケールアウトする可能性がないということは、フィールドでの測器にとってもっとも重要なことである。とくに井戸の中での水温測定では、測器の設置作業が水温を変化させてしまうことが多く、観測開始時の水温と実際に測るべき水温とは違うことが十分に考えられるだけに、このスケールアウトしないという利点は重要である。



Fig. 1. Developed groundwater thermometers, type 993, which make use of quartz sensor. The sensor is housed in a stainless steel pressure case.

なお、約 30 秒から 2 時間までという周期は、同時にプリンターでプリントアウトする周期にもなっており、通常は機器の設置時のテスト用などに 30 秒、フィールドでの定常的な観測のために 15 分、30 分、1 時間、2 時間のうちからスイッチで選べるようになっている。この回路方式のために、プリントアウトの間隔が長くなるほどカウント数が増えて、結果として温度測定の実効分解能が増す方式になっている。この方式では、プリントアウトしたときのそれぞれの瞬間値をサンプルする方式と違って、測定間隔の平均値を測っているのと同じことなので、測定間隔を変えてもアリアシングを生じないという利点もある。

こういった回路方式を採用したために、全体としての回路がごく簡単になり、それゆえ部品点数も減って、信頼性が上がるという利点を得ることが出来た。しかもこの矩形波のゲートを使って周波数を数える方式は、じつはごく普通の周波数カウンターの回路そのものである。このため、精密地下水温計の回路の主要部分には、既製のカウンター回路用の CMOS-IC (集積回路) が使えるという特長もある。この IC を使えるようにしたためにさらに部品点数が減らせた。

温度補償型的水晶発振器としては、海底地震計にも使っている低消費電力型の TCXO 発信器 (Temperature Compensated Crystal Oscillator) を使った。この水晶発振器は温度補償のために恒温槽を使うわけではなくて電気的に基準水晶の発振周波数を一定に保つ仕組みを持つもので、発信器部分の消費電力は約 10~90 mW と小さい。周囲温度の変化に対する発信周波数の変化は機種によるが、0.1~0.5 ppm (0~40°C) ほどである。

フィールドで精密地下水温計が置かれる条件での温度変化は、室内か室外か、また室内だとしても民家か小屋かといった条件で変わるが、いずれにせよこの周囲温度の変化に対する発信周波数の変化が、精密地下水温計としての最終的な精度を決めてしまうことになる。逆に言えば、この周囲温度の変化に対する発信周波数の変化がさらに小さな温度補償型的水晶発振器を使えば、温度センサーとしての水晶発振子の発信周波数の温度依存性は本質的に線型のものだから、測定結果としての観測精度はもっと上げられることになる。

このため、使用出来る電力が十分にあり、かつ微妙な温度変化を検出したいなど観測精度を上げたいときには、恒温槽を使った温度補償型的水晶発振器である OCXO 発信器 (Oven Controlled Crystal Oscillator) を使っている。これは基準発振の水晶振動子を恒温槽に入れて使っているもので、周囲温度の変化に対する発信周波数の変化は TCXO 発信器よりも約 1 桁小さくなる。しかし、発信器部分の消費電力は、立ち上がり時を除いた定常状態でも約 1.5 W ほどある。

この精密地下水温計は、井戸の中にセンサーを入れ、地上で記録する方式である。このためセンサーから記録器までの距離は少なくとも数百 m は離れることが出来なければならない。

この精密地下水温計の方式を可能にするための要点は、センサーの水晶振動子からの矩形波の入力信号を分周して約 30 秒周期の矩形波にまで落とし、その矩形波を数百メートル、ときにはそれ以上の距離をケーブルで伝送することであった。その矩形波は、ゲートを使って基準発信器からの約 1 MHz の発信周波数を切って数えるためのものだから、伝送中にケーブルの分布容量などの影響で矩形波の立ち上がりが鈍り、その矩形波のゲートを使って基準発信器からの約 1 MHz の発信周波数を切って数えるときに数え損なっては困る。しかし種々のテストの結果、数え損ないはなく、測定結果に影響はないことが確かめられた。もちろん伝送するときのインピーダンスは十分低くして、影響を受けにくくしている。この方式では、使うケーブルはごく安価な 3 芯のより線ケーブルを使うような設計になっているなど、全体のシステムを安価に作っている。

このように精密地下水温計はフィールドでの観測器として、観測現場での悪い条件にも耐えられて、しかも高い信頼性を持つような設計になっている。また、たとえ商用電源がないフィールドでも動作

するように、小容量の電池による駆動が可能になっている。なお、地震予知研究に使われる場合には、ふだんは商用電源で使っていたとしても、ある程度の地震が起きたときに停電して記録が止まってしまうことを避けなければならない。このためにも電池による駆動のバックアップが必要なのである。

精密地下水温計の消費電力は、もっぱら温度補償型の水晶発振器によって占められており、それ以外の回路の消費電力は、CMOS-ICを使っているためにごく小さい。また、プリンターとそのインターフェースは、実際にプリンターが動作するときだけにしか回路に電流を流さないで、ピーク電力値としては約5Wにも達するので小さくはないが、平均的な電力は約1mWとごく少ない。

結局、精密地下水温計全体の消費電力は、TCXO型の基準発信器を使ったもので96mW、OCXO型の基準発信器を使ったもので1.5Wである。つまりTCXO型の基準発信器を使った精密地下水温計では、乗用車用の蓄電池(60AH)を使えば10ヶ月、単一型のアルカリマンガン電池(8個直列)でも1ヶ月は動作させられる。

こうして1977年に最初的水晶発振式精密地下水温計を開発し、1978年、北海道東部の弟子屈を最初に、日本と世界の各地で、実際のフィールド観測を行っている(Shimamura, 1980)。

III. アナログ出力型精密地下水温計

開発した精密地下水温計をフィールドでの観測に使うときに、その観測点ですでに既存のテレメーター装置が設置されていることがある。こういった場合には、既存のテレメーターのシステムになるべく手を加えないで、つまりテレメーターで伝送している既存のデータに精密地下水温計で観測したデータを加えてテレメーターに載せることが望ましい場合が多い。

こういった既存のテレメーターとの接続用には、それが例えばテレメーターとしてはデジタル式のものでも、精密地下水温計側でアナログ出力を持つことが、じつはもっとも接続を簡単にする方法である。それは、一般にテレメーター装置の入力側にはマルチプレクサーとサンプルホールドとAD変換器が装備されていることが多いからである。このため、アナログ出力を持つ精密地下水温計も開発した。これは995型と名付けられ、東海地方やアイスランドなど各地で使われている。

この精密地下水温計では、センサーの水晶振動子からの矩形波の入力信号を分周して約30秒から2時間の周期の矩形波にまで落とし、その矩形波のゲートを使って基準発信器からの約1MHzの発信周波数を切って数えるまでは993型(デジタルプリンター型)の精密地下水温計と同じ仕組みである。しかしその後、数えたデジタルのカウント数値をラッチ(固定)してDAC(デジタル・アナログ・コンバーター)で数値に比例したアナログ出力を作るようにしている。なるべく簡素な回路にしたことが回路としての特長で、993型のプリントアウトの周期と同じく、センサーの水晶振動子からの矩形波の入力信号を分周して作った約30秒から2時間の周期に同期させて段階的に出力を変化させている。

つまりDACに送り込まれるカウント数値は約30秒から2時間(15分、30分、1時間も選べる)ごとに変わる値になっている。デジタル型の精密地下水温計と同じく、この間隔が長くなるほどカウント数が増えて、結果として温度測定の分解能が増す方式になっている。例えば1時間毎の記録更新の場合には記録幅(アナログ出力の最大変化幅)は55m°C(0.055°C)、分解能は0.01m°C、15分の場合はそれぞれ220m°C、0.05m°Cである。

DACの出力は0~+5V、0~10V、0~-10Vなど各種の出力が選べるようになっていて、特長としては、この記録幅から精密地下水温計の出力がスケールアウトしないようになっていて、上記の回路方式ゆえ、例えばDACが0から10Vの範囲のときには、仮に出力が次第に大きくなって

10 Vを超えたときには、その続きが記録幅の反対側の端である 0 Vからプラス側へ続いていくようになっている。さらに出力が大きくなれば、これを何回でも繰り返す。出力が小さくなっていったときにも同じ仕組みである。これは信号のゲートで切った周波数を数えるカウンターの下位 12 ビットだけを D A Cに取り込むようにしているからである。

なお既存のテレメーターがあるところでは商用電源があることが普通なので、この 995 型の精密地下水温計では観測精度を上げるためにも恒温槽を使った温度補償型の水晶発振器である O C X O 発信器を使っているのを標準的なものにした。

IV. フィールドでの精密地下水温観測

1. 国内での観測

精密地下水温観測は 1977 年から観測を始めている。最初の観測点は道東の弟子屈にある 210 m の井戸（黒滝井戸）で、屈斜路湖の南東にあり、1938 年の弟子屈地震（マグニチュード 6.0）の長さ約 20 km ある地震断層の中央部分のすぐ近くである。ごく初期には、すでに設置してあったペン描き地震計に水晶センサーからのパルスを重ねて描かせる方法で精密地下水温を記録していて、1978 年 12 月 6 日にマグニチュード 7.5 の地震が 204 km 離れたところに起きたときに 133 m°C の変化を記録した（Shimamura, 1980）。これが水晶センサーで記録した最初のコサイスマックな地下水温変化であった。

その後本稿に述べた 993 型、そして 995 型の精密地下水温計の開発を始め、1978 年から、実際のフィールド観測を行っている。その後観測点を次第に増やし、北海道（弟子屈、浦河、有珠火山）や、静岡県（東海地方）、福島県（双葉断層など）、鳥取県（三朝温泉など）（吉岡他, 1984）、神奈川県（湯河原など）をはじめ、国外でも、アイスランド、ルーマニア、中国などに及んでいる。このうち東海地方では東海地震の予知研究関連の観測として、のべ 18 地点の深井戸でこの精密地下水温計による観測を続けており、気象庁、静岡県地震対策課、静岡県新居町、気象庁気象研究所、地元の篤志家などの協力を得て、1979 年以来 16 年にわたって継続的に観測している。いままでに観測を行った観測点を Table. 1. に示す。

北海道の弟子屈地方に観測点が多いのは、ここでは 1938–1967 年の間にマグニチュード約 6 を超える内陸直下型の地震が 6 回起きている（1938 年にマグニチュード 6.0、1957 年にマグニチュード 5.7、6.2、6.1 の 3 回、1967 年にマグニチュード 6.5、5.7 の 2 回）ので、この種の地震と地下水の関係を研究するためには最適のフィールドだと判断したからである。なお気象庁が決めたこれらの地震の震源は、いずれも 20 km より浅い。また弟子屈地方は温泉地帯であり、温泉として使っている井戸のほか、温泉の掘削を試みた多くの井戸が使われないまま残されているので、この種の地下水観測の候補が多いことも弟子屈を選んだ理由である。そのうえ温泉用のボーリングは水井戸など他の井戸が堆積層だけを掘っているのと違って、岩を貫いて掘っていることが多く、地球物理学的にはより意味のある地下から来る信号を捉える機会が多いと考えられる。

現地の事情で観測を中止した観測点もあるが、1995 年現在は約 20 台の精密地下水温計が設置されて、連続観測を行っている。このそれぞれは、地震活動が盛んなところか、または東海地震のように地震予知のための観測が重要なところを選んである。またこのほかに南極の昭和基地にも置かれて、地下水温や地中温度がどう変わるのかの観測にも動員された（Shibuya et al, 1982, Nagao et al., 1985, Nagao and Kaminuma, 1986）。

Table 1. List of observation of groundwater temperature by the quartz thermometer.

OBSERVATION SITE	LATITUDE	LONGITUDE	OBSERVATION PERIOD
(HOKKAIDO, JAPAN)			
KUR (Kurotaki)	43° 32' 55" N	144° 22' 17" E	17/11/1978 -
MEI (Meisei)	43° 28' 15" N	144° 12' 00" E	11/ 4/1979 - 12/1983
KMD (Kamata)	43° 28' 48" N	144° 27' 50" E	11/ 7/1979 - 26/ 7/1982
TCY (Tsujiya)	43° 28' 49" N	144° 28' 37" E	10/ 5/1980 - 12/ 5/1983
KNK (Kunioka)	43° 29' 33" N	144° 27' 18" E	9/12/1981 - 28/12/1983
AKA (Akan)	43° 25' 53" N	144° 06' 12" E	8/12/1981 - 4/1984
USU (Showashinzan)	42° 32' 08" N	140° 51' 42" E	12/10/1979 - 12/1984
BRW (Biruha)	43° 32' 00" N	144° 20' 00" E	11/ 7/1979 - 9/ 5/1980
CHG (Chikashigen)	43° 04' 41" N	141° 20' 12" E	16/11/1979 - 1982
BRO (Biraou)	43° 28' 99" N	144° 24' 18" E	2/11/1984 -
KMU (Kamikineusu)	42° 14' 19" N	142° 58' 02" E	4/ 7/1983 -
TUT (Tsubetsu)	43° 40' 53" N	144° 00' 50" E	15/ 4/1986 -
(FUKUSHIMA, JAPAN)			
SHM (Sohma UT)	37° 46' 41" N	140° 59' 11" E	2/ 6/1979 -
KSM (Kashima UT)	37° 41' 27" N	140° 53' 31" E	5/11/1979 -
NRH (Naraha UT)	37° 15' 21" N	140° 59' 05" E	5/11/1979 -
(TOKAI, CENTRAL JAPAN)			
OMG (Omaezaki UT)	34° 35' 58" N	138° 13' 50" E	22/ 6/1979 - 24/ 4/1980
YSD (Yoshida)	34° 45' 24" N	138° 16' 17" E	22/ 6/1979 - 5/10/1982
IWN (Iwatanishi)	34° 42' 48" N	137° 51' 11" E	22/ 6/1979 - 21/11/1979
SZH (Shizuhataminami)	35° 00' 48" N	138° 22' 40" E	22/ 6/1979 - 5/ 5/1983
ARA (Araimachi)	34° 41' 05" N	137° 34' 43" E	21/11/1979 -
FKR (Fukuroi)	34° 43' 40" N	137° 57' 30" E	25/12/1979 - 3/ 4/1992
OSM (Osadaminami)	34° 56' 00" N	138° 22' 19" E	25/12/1979 - 23/ 1/1992
FJM (Fujinomiya)	35° 12' 39" N	138° 35' 34" E	25/12/1979 - 7/ 6/1984
YIZ (Yaizuobama)	34° 53' 36" N	138° 20' 54" E	16/ 4/1980 -
MKB (Mikkabi JMA)	34° 48' 20" N	137° 33' 26" E	5/10/1981 -
TYB (Toyobou)	34° 41' 46" N	137° 43' 16" E	16/11/1981 -
MZK (Maruzuka)	34° 43' 21" N	137° 45' 30" E	18/11/1981 -
HIZ (Higashiizu JMA)	34° 48' 45" N	139° 30' 28" E	15/ 3/1982 - 16/ 3/1990
AJR (Ajiro JMA)	35° 02' 34" N	139° 05' 45" E	11/ 3/1983 -
HNO (Hino JMA)	35° 38' 51" N	139° 25' 01" E	11/ 6/1984 - 6/ 5/1988
YGW (Yugawara JMA)	35° 09' 47" N	139° 05' 34" E	16/ 6/1984 -
OMZ (Omaezaki JMA)	34° 36' 06" N	138° 12' 58" E	1/12/1984 -
MAT (Matsushiro JMA)	36° 32' 28" N	138° 12' 34" E	30/ 8/1994 -
(ICELAND)			
HEL (Hella)	63° 50' 24" N	20° 24' 36" W	1/ 9/1982 -
STO (Storolfshvoll)	63° 45' 00" N	20° 12' 36" W	2/ 9/1982 -
SKA (Skalholt)	64° 12' 36" N	20° 31' 48" W	3/ 9/1982 -
JDA (Jadar)	63° 18' 00" N	20° 09' 00" W	4/ 9/1982 -
SAU (Saurbaer)	63° 59' 06" N	20° 25' 48" W	4/ 9/1982 -
GEL (Geldingaa)	64° 19' 30" N	19° 16' 48" W	5/ 9/1982 -
BUR (Burfell)	64° 06' 36" N	19° 48' 00" W	29/10/1982 -
(ANTARCTICA)			
SWA 1 (Showa 1)	69° 00' 39" S	39° 35' 15" E	19/ 4/1980 -
SWA 2 (Showa 2)	69° 00' 40" S	39° 35' 12" E	19/ 4/1981 -
SWA 3 (Showa 3)	69° 00' 29" S	39° 34' 18" E	7/ 6/1980 - 2/ 1/1981
(TOTTORI, JAPAN)			
MSA 1 (Misasa 1)	35° 24' 41" N	133° 53' 14" E	1/ 9/1980 -
MSA 2 (Misasa 2)	35° 24' 41" N	133° 53' 14" E	12/11/1983 -
YDN (Yudani)	35° 23' 09" N	134° 09' 23" E	12/ 3/1982 -
KRO (Karo)	35° 31' 33" N	134° 11' 51" E	14/ 8/1980 -
(ROMANIA)			
VRI (Vrancioaia)	45° 52' 20" N	26° 43' 50" E	9/10/1985 -
ODA (Odobesti)	45° 46' 48" N	27° 03' 37" E	10/10/1985 -
BUC 1 (Bucharest)	44° 20' 80" N	26° 01' 80" E	24/10/1985 -
(CHINA)			
SCH (Sha Cheng)	40° 18' 00" N	115° 30' 00" E	12/ 9/1987 -

SENSOR DEPTH	WELL DEPTH	COMMENTS
210m	210m	Second sensor added 7/1980, water level gauge added 8/1994
480m	760m	Sensor shifted to 220m 5/1981 (at maximum temperature gradient)
110m	493m	Self flowing 150 liter/min, 93°C
68m	800m	Self flowing 3 liter/min., 24°C, borehole narrowed beyond 68m depth
180m	270m	
4m	4m	Self flowing, 48°C
200m	376m	
113m	113m	
110m	110m	Second sensor added 7/1981
140m	140m	with geophones
60m	110m	with borehole strainmeter
995m	1600m	Self flowing, Sensor depth changed to 55m 9/1988
215m	215m	with tiltmeter
200m	200m	with Radon observation
200m	200m	with Radon observation
100m	100m	Second sensor added 11/1979
135m	135m	with Radon observation
150m	150m	
100m	100m	with water level observation
393m	393m	with seismograph, Sensor depth changed to 170m 12/1992
130m	130m	with Radon observation, Observation hut removed by owner 4/1992
110m	110m	with Radon observation
130m	130m	with Radon observation
484m	484m	Abandoned hot spring, Sensor depth changed to 200m 12/1992
45m	45m	with borehole strainmeter
125m	125m	
330m	330m	
245m	245m	with borehole strainmeter, Sensor depth changed to 161m 24/ 5/1989
180m	108m	with borehole strainmeter
131m	131m	with borehole strainmeter
110m	144m	with borehole strainmeter
180m	208m	with borehole strainmeter
34m	50m	with borehole strainmeter
393m	393m	with borehole strainmeter
401m	500m	with borehole strainmeter
125m	140m	with borehole strainmeter
58m	70m	with borehole strainmeter
118m	180m	with borehole strainmeter, Sensor depth 37m until 6/ 9/1986
238m	238m	with borehole strainmeter
170m	180m	with borehole strainmeter
5, 10, 20m	20m	Sensor 2.5m from 4/1981
1, 4, 7m	7m	
7m	7m	Deployed on the sea floor
350m	400m	
140m	190m	
0.3m	0.3m	Deployed on bottom of fountain
90m	100m	
70m	70m	
50m	50m	130m deep well are made 16/ 7/1988 (sensor at bottom)
89m	159m	
50m	500m	Self flowing at 4 litre/sec, 86–89°C

3. 中国での精密地下水温観測

水晶発振式精密地下水温計は中国の地震多発地域にも設置した。この観測は1987年の設置以来、日中の共同研究として続けられている。精密地下水温計を設置した場所は北京の西北西、約70 kmの沙城（さじょう、Sha Cheng）である。ここは北京・天津・唐山・張家口（通称「京津唐張」）地域の中国の「首都圏テストフィールド」のなかでも地震予知の重点地域のひとつであり、地震観測所が置かれている。この燕山地震帯では過去に、1337年（M 6.5）、1484年（M 6.75）、1536年（M 6）、1665年（M 6.5）、1679年（M 8）、1720年（M 6.75）、1730年（M 6.5）など、多くの地震が起きているほか、将来も地震が起きることが予想されている場所である。

精密地下水温計の設置は、島村英紀と中国国家地震局分析予報中心の鄭斯華・張煒らが、沙城にある熱水を自噴している深井戸で、1987年9月12日に行った。井戸の深さは500 m、86～89℃ほどの高温の熱水が自噴しており、その自噴量は約4リットル/秒である。自噴のため、センサーは井戸底まで入れず、深度は50 mにした。

水温計レコーダーは地震観測所家屋内にある井戸から10 mほどはなれた家屋の中で、観測所には人が常勤している。まわりは乾いた原野だが、数百メートル以内には人家がある。近くで地下水の汲み上げは行っていない。温泉の水は、殆ど利用していない。井戸の状況は、282 mまでは、鉄ケーシング。以下、500 mまでは岩盤中の裸孔である。含水層は294 mから500 mまでである。

記録された水温は日本内外の他の観測点にくらべて、はるかに変動が大きく、一週間で500 m℃、観測開始後一年間では2000 m℃にも達した。例えば他の観測点では数十 m℃以内が普通であり、東伊豆など、変動が大きい観測点でも、沙城よりはずっと変動が少ない。

4. アイスランドでの精密地下水温観測

精密地下水温計はアイスランドの地震多発地域にも設置している。観測は1982年9月以来、7地点の井戸で続けられている。アイスランドは海嶺を陸上で観察出来るというまたとない場所である。海底で行える各種の観測は以前よりはずっとふえつつあるとはいえ、まだ、ある種の観測は陸上の方がやりやすく、その意味ではアイスランドは貴重なテスト・フィールドなのである。

大西洋を北上した大西洋中央海嶺はアイスランドの南西端に至ってトランスフォーム断層になり、アイスランドの南の端にそって東へのびている。そして、そこでまた海嶺になってアイスランドの中央東よりのところを南北に貫通して、アイスランドの北端へ至っており、そこでまたトランスフォーム断層（断裂帯）になって西へいき、その先で北へのびている大西洋中央海嶺につながっている。巨大な地震は、もっぱら、このトランスフォーム断層の近くにだけおきている。つまりアイスランドの南西部と北部に集中していることになる。

精密地下水温計の7点の観測点はアイスランドの南西部の100 km四方に集中して設置されている。ここはトランスフォーム断層が陸上を走っているところで、過去に多くの巨大な地震やヘイマエイなど大規模な火山噴火が記録されているところである。すべての観測点はカーネギー研究所がアイスランド気象庁と協力して設置した体積歪計の井戸を共用しており、その深さは70から500 mである。観測条件は非常に厳しく、ごく短い夏期に四輪駆動車で登るか、冬期の天候の良い日にスノーモービルで登るかしか出来ない岩山の上などに設置されている。それゆえ観測点を訪れる機会のごく限られる。殆どの観測点では電源は風力発電や電池でまかなわれている。冬の気温は零下20度より下る。こんな気温になると通常の磁気記録（カセットテープ、フロッピーディスクなど）はまったく役に立たなくなる。一方、こういった厳しい観測条件は、日本ではしばしば問題になるような人為的な擾乱を受けないという利点もないわけではない。

V. 各地の観測で得られた日常と異常

地下水温の測定は、実際には、深井戸の中（多くの場合は井戸の底）にセンサーを設置して行われる。井戸の深さや、その付近の水文地質の条件によって、得られた信号は、同じ地域にあるすぐ近くの井戸でも、井戸ごとにより異なる。地震など外部要因がないように見えるときでも、弟子屈・黒滝井戸のように毎日数十m°Cも変化する観測点も、同じく弟子屈にあるME I井戸のように数m°C以下しか変らない観測点もある。

精密地下水温観測の結果では気温の影響は北海道・弟子屈にある一つの観測点（KMD）以外のすべての観測点で見られなかった。KMDは93°Cの熱湯を毎分150リットル産出している温泉の源泉で、気温の約1/100の振幅で地下水温が変化していた。コヒーレンスを計算した結果、気温が2時間遅れで地下水温に影響していることが分かった（Shimamura, 1983. Fig. 3）。

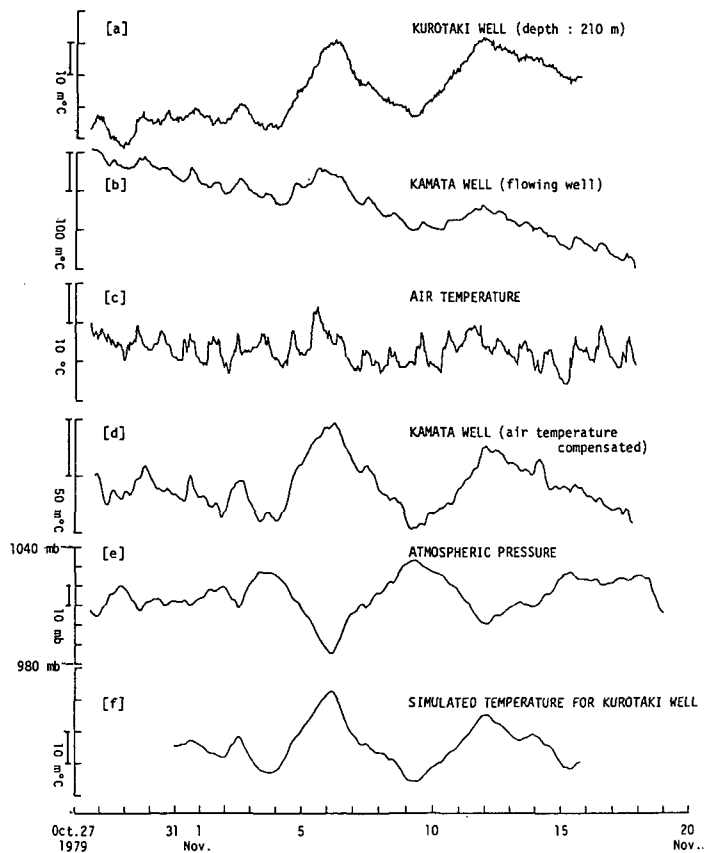


Fig. 3. a) Groundwater temperature record at 210 m depth of Kurotaki well. The groundwater temperature is ≈ 22 °C. b) Groundwater temperature record of KMD flowing well, recorded at 30 m depth. The water temperature is ≈ 93 °C. c) Ambient air temperature at KMD. d) KMD record in which ambient temperature effect and linear trend were removed. e) Atmospheric pressure recorded by a nearby Japan Meteorological Agency station. f) a synthetic record for Kurotaki computed from the impulse response calculated from KMD data and the atmospheric pressure.

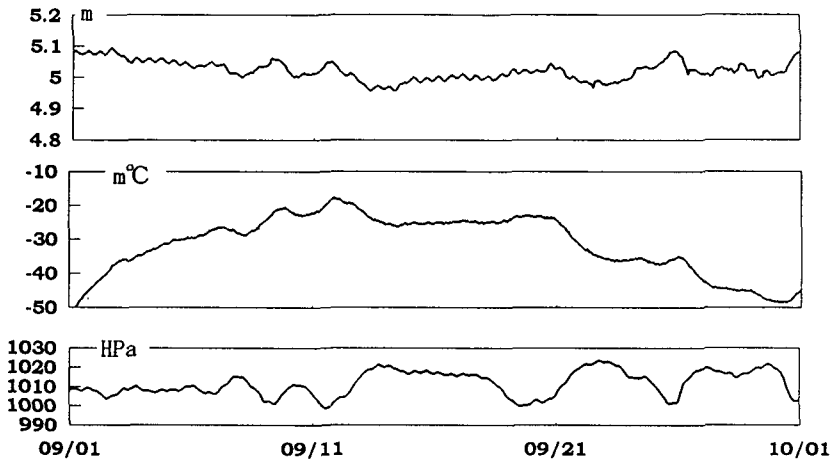


Fig. 4. Records of water level of Kurotaki well, groundwater temperature at the bottom of 210 m of Kurotaki well (both on relative ordinate, and the atmospheric pressure recorded at the nearby JMA station, Kushirio. They were recorded in September 1994.

観測された地下水温でいちばん目立つのは気圧との相関であった。ただしその影響は井戸によって大きく異なり、その係数は100倍以上も違っている。大きい方の例は弟子屈のTCY井戸(深さ800 m, 自噴)やアイランドのSAU(深さ180 m, 自噴)で6 m°C/hPaであり、黒滝井戸(深さ210 m, 非自噴)はその1/10ほどである。小さい方では、弟子屈MEI井戸(760 m, 非自噴)のように0.05 m°C/hPa以下のものや、気圧の影響がまったく見られないものもある(Shimamura et al., 1985)。気圧の影響があるものは、いずれも気圧が下がったときに地下水温が上がる方向であった。一般的には自噴している井戸のほうが気圧の係数が大きい。しかし自噴していない井戸の中でも、気圧の係数は10倍以上違う。なお自噴量と気圧との関係は、自噴量を正確に計ることが難しいため、今回は研究されていない。

弟子屈・黒滝井の場合、気圧の増大は水温の低下と水位の低下を伴っているのが分かった(Fig. 4)。このことから、気圧が変化し、それに伴い井戸内の水柱が単純に上下して、水温の温度勾配のために結果的に水温が変化するという気圧変化に対して水温が変化する機構が考えられる。黒滝井戸の場合、井戸中の温度勾配は温泉地帯のため大きく、深さ方向で温度が増大している(Fig.

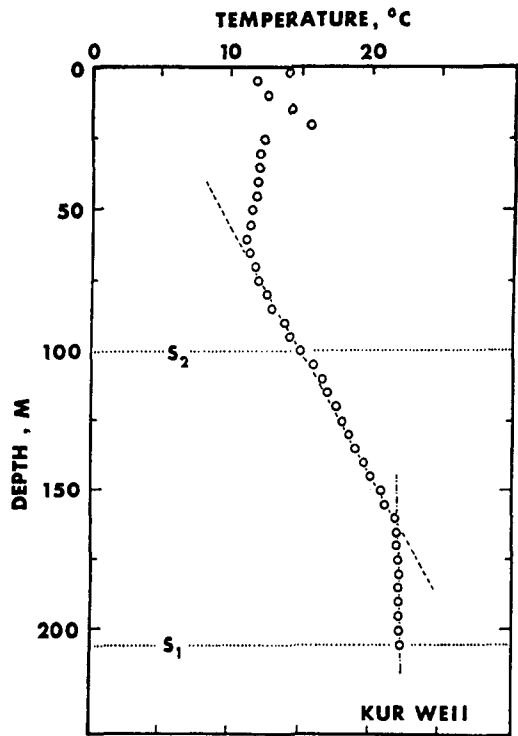


Fig. 5. Measured temperature gradient in the Kurotaki well. The bottom sensor is located at S1, where the gradient is about 10 m°C/m, and the shallow sensor at S2, where the gradient is about 120 m°C/m. The temperature between 0 and 25 m varies according to the secular changes of the air temperature.

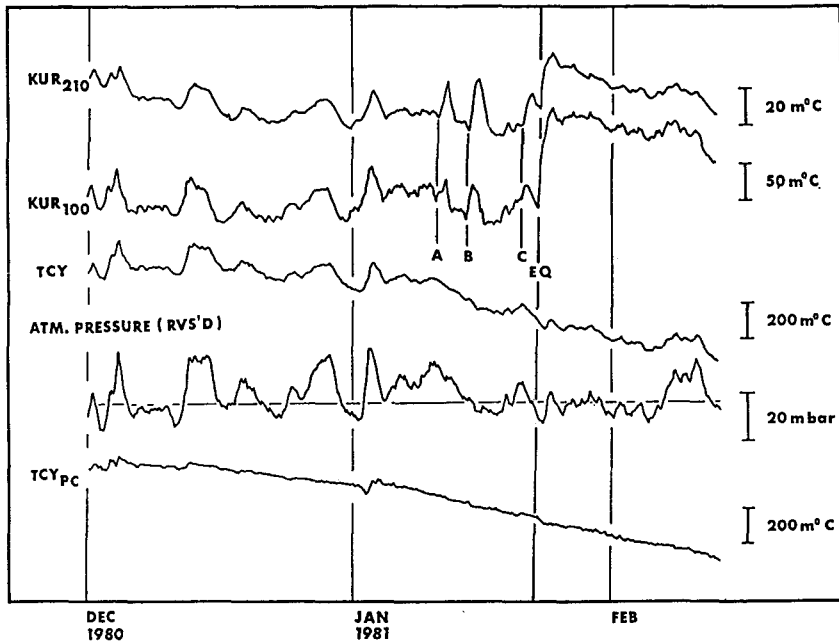


Fig. 6. Comparison of recorded groundwater temperature recorded at bottom, 210 m, and the middle, 100 m. TCY is another well also in Teshikaga region. Atmospheric pressure apparently affects the groundwater temperatures. TCY-PC is TCY record compensated for the atmospheric pressure effects. Coseismic signals were recorded on 23 January, where magnitude 7.1 earthquake took place at 217 km distance.

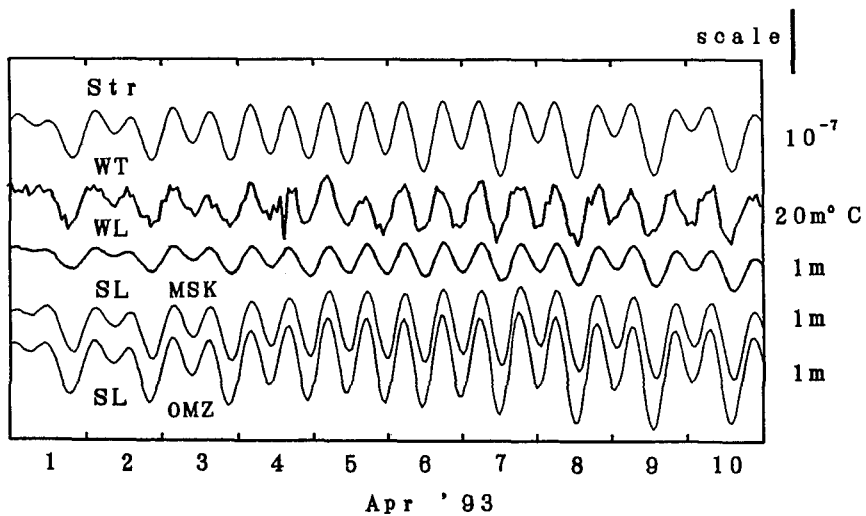


Fig. 7. From top to bottom ; a) theoretical volumetric strain calculated from earth tide, B) groundwater temperature at ARA well, c) water level at ARA well, d) record of tide gauge at Maisaka, and e) tide gauge record at Omaezaki. Maisaka and Omaezaki are 4 km and 60 km from ARA well, respectively.

5), 気圧が増えて水柱が下がるとそれに対応する温度低下が期待される。しかし、黒滝井戸の場合、センサーは井戸底の 210 m と中間の 100 m のところに設置されており、中間点の温度逆勾配が井戸底のそれより 12 倍も大きいのかかわらず、気圧による水温変化は 3.6 倍にしかになっていない (Fig. 6)。したがって、この弟子屈・黒滝井戸では気圧変化に伴う水温変化を水位の上下だけで説明するには不十分であり、もっと別のメカニズムが働いていると考えられる。

一方、静岡県新居町の井戸 (490 m, 非自噴) の場合、水温変化は殆ど水位変化で説明出来る。この水温、水位には 12 時間および 24 時間周期の振動 (海洋潮汐による: 後述) が卓越している (Fig. 7)。水温センサーは 170 m に設置されており、その付近の温度逆勾配は $26\text{ m}^\circ\text{C}/\text{m}$ である。12 時間周期の水温と水位の振動から $21\text{ m}^\circ\text{C}/\text{m}$ が求まり、これは温度勾配と概ね一致していると考えられるので、水温変化は殆ど水位変化で説明することが出来る。なお、ここでは水位上昇が水温上昇に対応している。水位上昇が水温上昇、あるいは、水位低下が水温低下に対応するのは、井戸の一般的性質である。これは、温度勾配の図に見られるように井戸の中の水温は、多くの井戸の場合温度が逆勾配になっており、したがって温度的には不安定であるのが普通だからである。

VI. 体積歪計と精密地下水温計の同時観測

国内 (東海地方 8 地点と北海道大学の浦河地震観測所) とアイスランド (7 地点) の計 16 地点で、体積歪計を設置してある井戸の中に水温計を設置して歪との同時同時観測を行っている。これには気象庁、アイスランド気象庁、米国カーネギー研究所の協力を得た。体積歪計とは深い井戸の中に入れて井戸の孔の歪みを測るもので、気象庁は東海地震の予知のために東海・南関東地方に展開している。この同時観測によって地下水の動きと体積体積歪みとの関連を調べるのが目的であった。

体積歪計は感度の高い測器であるので、地下水温の影響を当然受ける。このため、温度の影響を補正して正確な歪量を求める手法を得るのも観測目的の一つであった。伊豆半島の東伊豆では数年にわたって体積歪計に伸びが記録されていたが、これは地下水温が定常的に低下していることによる見かけ上の記録であることが明らかになった。なお、東伊豆は温泉地帯にあり、井戸中の水温も 50°C 以上と高い。ここでの地下水温の低下は、他の観測点にはない一様で著しい下降であった。アイスランドの精密地下水温観測でも、体積歪計の記録との比較では、いくつかの点では体積の伸びと水温の下がりに対応しており、これは東伊豆で得られた結果と一致している。

なおその後、東伊豆の体積歪計は更新されて新しいものが設置された。以後は歪は定常的な縮み、地下水温は定常的な上昇が記録されている。気象庁の私的な見解によると、掘削時に使用した大量の水のせいで温度が下がって、現在はその一時的な下降からの回復過程にあるのではないかと考えられる。

各地で観測された地下水温のスペクトルには、多くの観測点で 12 時間と 24 時間の鋭いピークがある。観測点によっては 12 時間周期のピークはさらに 12.0 時間と 12.4 時間のピークに分離する。これらは潮汐の S_2 と M_2 分潮に対応している (Fig. 8)。地球潮汐の影響が大きいか、海洋潮汐の影響が大きいかは井戸によるようである。

水温計が体積歪計と併設されている観測点では単位歪みに対する水温変化を観測から求めることが出来た。この結果と周辺媒質の断熱温度変化を比較することによって、東京都の日野の井戸と伊豆大島の井戸 (OSH) での 12 時間周期の地下温度変化は、水あるいは普通の岩の断熱変化と同程度であった。つまり、これらの水温変化の原因は、潮汐がもたらした地殻内の歪み変化が起こした断熱変化として説明出来ることになる。

しかし、そうでない観測点も多い。例えば静岡県の三ヶ日の井戸と静岡市の井戸 (SHZ) での観

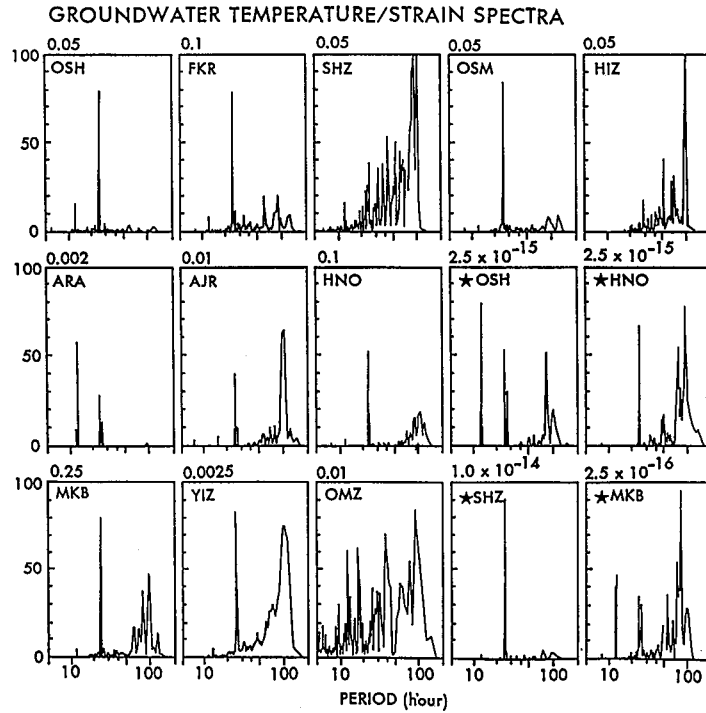


Fig. 8. Power spectra of groundwater temperature and volumetric strain (with asterisk). Station names are indicated on each spectrum. OSH and SHZ are operated by JMA.

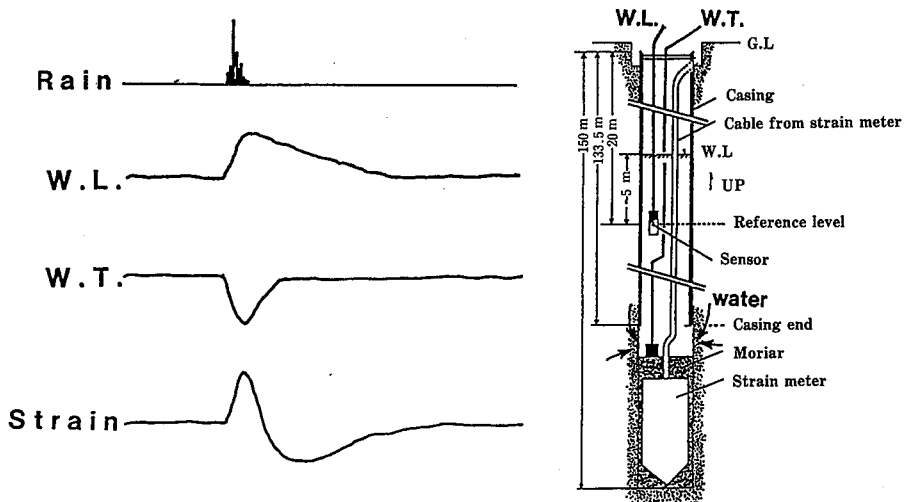


Fig. 9. Schematic diagram of precipitation, water level, groundwater temperature and volumetric strain at Yugawara well. To the right, measuring apparatus are shown.

測値は、水温の変化は水あるいは岩の断熱変化から期待される値よりはるかに大きくなった。この理由としては井戸の周りの地下水の移動、つまり水の流入あるいは流出が考えられる。実際、静岡の井戸では1日毎の水位の上下があり、日曜日毎やその他の休日に水位の上昇がある。これは社会生活に関係した地下水の汲み上げに関係していることは明らかである。12時間周期の振動も、地球潮汐あるいは海洋潮汐に伴って、地下水温を観測している帯水層に地下水が流出するものが原因である可能性が高い。

前に述べたように静岡県新居町の井戸の場合、水温変化は殆ど水位変化で説明出来る。水が塩水であるので、海水が直接流入していることは明らかである。つまりこの井戸の水温変動は海洋潮汐に起因している (Fig. 7)。この観測点は全ての観測点のなかで最もよく潮汐現象に似た水温変化を示す。ちなみに、海洋潮汐と井戸の水位変化の振幅と位相のずれから周辺媒質の透水性を知ることにも出来る。

なお、降水量の地下水温への影響は、静岡県焼津の井戸や神奈川県湯河原の井戸のように年間を通して水温変化の少ない観測点を除いては殆ど見られない。

降水時の湯河原の歪変化は、Fig. 9に見られるように水温、水位との微妙な関係にある。ここでは降水があると水温が下がり (見かけ上伸びの歪み変化)、水位は上がる (見かけ上縮みの歪み変化)。また、降水が終わると、水温は上がり、水位は下がり始めるが、その進行時間に違いがある。この緩和時間の差の結果、降水初期には水温の影響が強く、降水終了後しばらくすると水位の影響が強くなる。

VII. コサイスマミックな地下水温変化

コサイスマミックな地下水温変化は、いくつかの観測点で明瞭に観測された。コサイスマミック (coseismic) な信号とは、地震時に出る信号である。なお地震波が起こす断熱圧縮による温度上昇 (あるいはその逆に断熱膨張による温度低下) は $1\text{ m}^{\circ}\text{C}$ よりもはるかに小さく、ここで述べる変化を説明出来るものではない。

例えば北海道の有珠火山にある井戸 (Shimamura and Watanabe, 1981)、北海道の弟子屈にある黒滝井戸 (Shimamura, 1983)、伊豆半島の東伊豆の井戸はとくに出る。その振幅は大きいものでは $100\text{ m}^{\circ}\text{C}$ を超えるものもある。あとの多くの井戸では、信号はずっと小さい。例えば気圧に対する地下水温変化が特に大きかった弟子屈のTCY井戸では、コサイスマミック信号は殆ど描かない。一般に気圧に対する水温変化が大きい井戸はコサイスマミックな信号が小さい。これは気圧の変化に対する水温変化の機構とコサイスマミックな水温変化が起きる機構が異なっていることを示している。

このうち有珠火山から約 1 km 東方の井戸では、約30年の休眠期間後に起きた1977年に始まって1978年10月まで続いた有珠火山の噴火後、1979年10月から精密地下水温観測が行われた。井戸の深さは 380 m であったが、井戸内の深部は崩れていたため、センサーは設置可能な最深部である 200 m の深さに設置した。当時は、まだマグマが地下から上がってきている最中で、オガリ山の標高が毎日高くなっていったときであった。地震活動も盛んで、最大マグニチュード4.3の地震が起き、地震活動は1980年に入っても続いていた。

観測開始後の半年間で、観測された地下水温は 0.3°C 上昇し、これは上昇してきているマグマと関連していると考えられた。その上昇速度は時間とともに減少したが、これは、マグマの活動や観測された地殻変動が時間とともに取まっていったのと同じ傾向であった。なおこれは測器のドリフトではない。精密地下水温計による他の観測点では、この観測のような一方的な温度変化は、後述する東伊豆を除いては観測されていない。

この精密地下水温観測では、火山の地下で起きる地震で多くのコサイスマミックなステップ的な水温

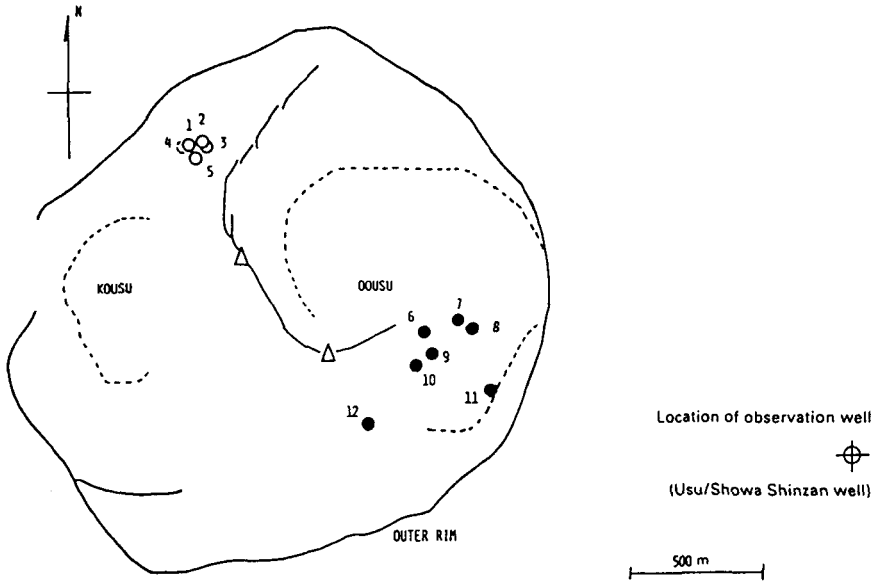


Fig. 10. A map showing locations of earthquake epicentres which generated coseismic signals on the groundwater temperature, and the location of the well. Solid circles and open circles indicate earthquakes with negative and positive offsets, respectively. The U-shaped solid line in the crater is a major surface fault zone (Shimamura and Watanabe, 1981).

変化が観測された。その変化の振幅は $1\text{ m}^{\circ}\text{C}$ から $10\text{ m}^{\circ}\text{C}$ で、地震のマグニチュードが大きいほど大きなステップ的な変化が観測された。最大の $10\text{ m}^{\circ}\text{C}$ はマグニチュード 4.2 の地震の時のものであった。マグニチュード 3.7 より小さな地震ではステップ的な変化は観測されなかった。マグニチュード 3.7 以下の地震ではこういった水温変化が起きないのか、あるいは精密地下水温計の検知限界以下なのかは分からない。一方、震源の深さ (0 から 1.2 km) に対応する水温ステップの変化は分からなかった。

この観測では、水温の上昇と下降との二つのステップが観測されたが、これらは震源の位置と対応した。正の水温ステップは、有珠火山のクレーターの北西に位置する北屏風の下で起きた地震のときに観測され、負のステップはクレーターの南東に位置する大有珠南の地下で起きた地震のときに観測された。ともに例外はなかった (Fig. 10)。それぞれの地震群は発震機構が別で、北屏風の地震は逆断層、大有珠南の地震は正断層で、ともに断層面は鉛直に近く立っているものであった。観測井戸からそれぞれの地震群までの平均の震央距離は、北屏風の地震群では 2.7 km 、大有珠南の地震群では 1.5 km であった。この二つの地震群以外にも小さな地震は有珠火山の周辺で起きていたが、これら周辺の小さな地震ではコサイスミックな水温変化は観測されなかった。

一方、北海道弟子屈の黒滝井戸では、多くのコサイスミック信号を記録しており、大きなものではその振幅は $100\text{ m}^{\circ}\text{C}$ を超え、最大では北海道東方沖地震 (1994 年) のときの約 $1100\text{ m}^{\circ}\text{C}$ にもなったものまであった。しかし、黒滝井戸に近い弟子屈のいくつかの精密地下水温観測では、これらのコサイスミックな信号は記録していない。つまり地下水の地球化学的な観測と同じく、井戸によって信号の出方が大きく異なっている。

黒滝井戸でのコサイスミックな信号は振幅が違ってもよく似た立ち上がりを示している (Fig. 11)。つまり時定数 5 時間の指数関数で立ち上がり、地震後 6, 7 時間後からは時定数約 10 時間の立ち上がりになって、その後約 2 ヶ月ほどで回復する (Fig. 12)。なおセンサーユニットの水中での時定数は 6

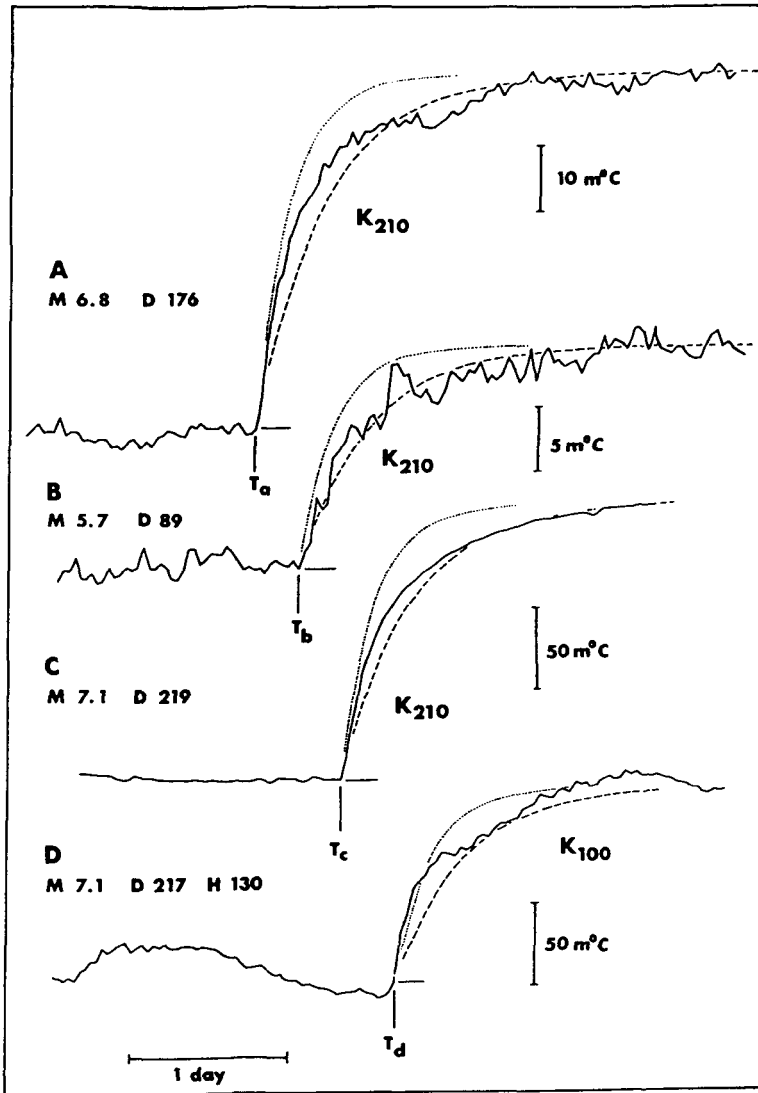


Fig. 11. Coseismic groundwater temperature signals recorded at Kurotaki well. T_a to T_d are the times of earthquakes, which coincided with the onset of the coseismic increase of the temperature. K210 and K100 are records from 210 m depth sensor and 100 m depth sensor, respectively. The magnitudes and epicentral distances of each earthquakes are shown on each trace. Earthquake dates and depths are A : 23/2/1980, 30km, B : 14/12/1979, 70 km. C : 21/5/1982, 40 km, and D : 23/1/1981, 130 km.

分であり、これらの立ち上がりには十分追従している。この黒滝井戸の場合は、地下水温のコサイスマックな変化の殆どは温度上昇であり、有珠での観測とは異なる (Fig. 12, 13)。これはこちらの場合には震源はいずれも太平洋岸からその沖にかけての場所で、地震の発震機構も特有のものが殆どなせいか、あるいは帯水層の性質によるものであろう。一方、東伊豆の井戸で記録されたコサイスマックな信号は常に水温の低下であった。

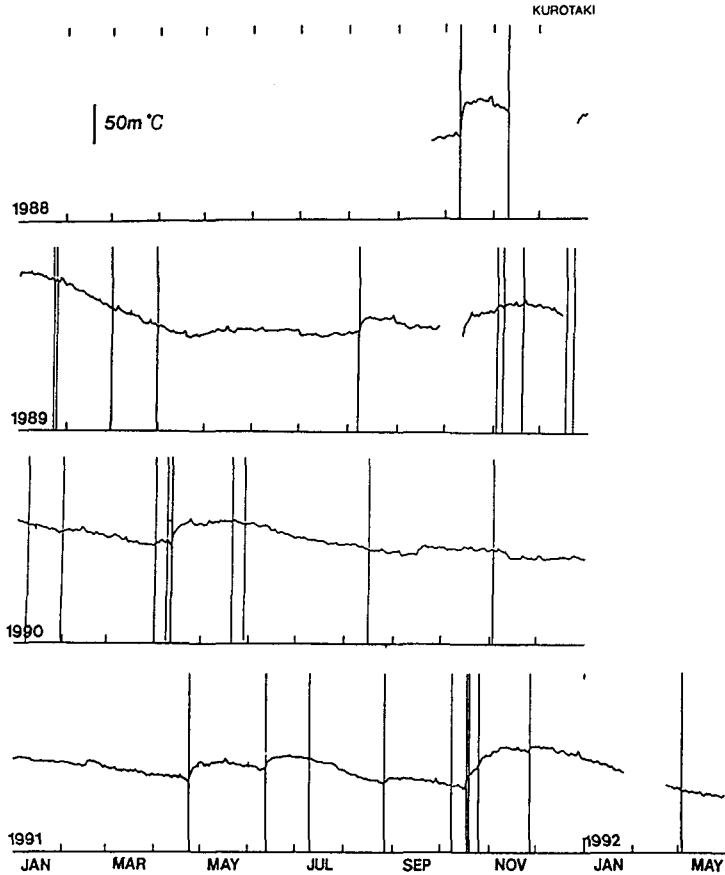


Fig. 12. Groundwater temperature record at Kurotaki well (bottom sensor) and the felt earthquakes (vertical lines) at Kushiro JMA station, which is located about 75 km south of Kurotaki well.

このコサイスマックな信号の振幅は、地震の震源からの距離と地震のマグニチュードに応じて分布している (Fig. 13)。コサイスマック信号が出た地震のうち一番近いものは震央距離 90 km であった。なお図中、小さい丸と点線は平賀 (1981 a, 1981 b) による日本の温泉で検知された水温、泉質、湧出量など各種のコサイスマック変化とその検知限界を示しているが、精密地下水温観測のコサイスマック変化の検知感度のほうが高いことが分かる。なおこれらのコサイスマックな精密地下水温の信号が出た有珠、弟子屈、東伊豆の井戸はいずれも温泉地帯にある。これは温泉脈と井戸との何らかの繋がりを示唆しているのかも知れない。

興味深いことは、この黒滝井戸で設置されている深さ 100 m と 210 m のセンサーの記録で、同じ地震によるコサイスマックな変化の振幅比が 4.5 と、気圧による変化の比 3.6 と有意に違うことである。これは前述したように気圧変化が大きい井戸でコサイスマックな信号が小さいことと相まって、コサイスマックな信号を生む機構が、地下水温が気圧に影響される機構とは異なることを意味している。気圧の変化とコサイスマックな信号の周波数はそれほど違っていないので、これは例えば周波数による地下水の応答の違いとは思えない。

なお黒滝井戸では 1994 年 8 月からは圧力式水位計を併設して水温との同時観測を始めた。その後 1994 年 10 月 4 日に北海道東方沖地震 (震央距離 250 km) など比較的大きな地震や、観測点の近くで

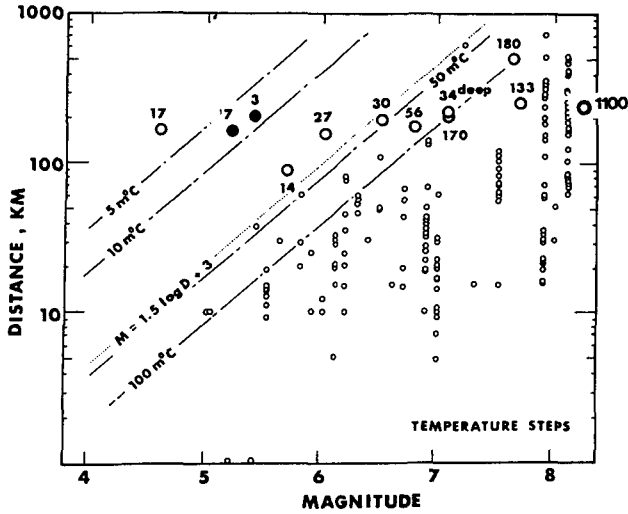


Fig. 13. Recorded amplitudes of coseismic signals at Kurotaki well (bottom sensor). The amplitudes are shown in m°C by large circles with numerals. Open and solid circles indicate positive and negative offsets, respectively. Small circles are visible coseismic signals of hot springs compiled by S. Hiraga.

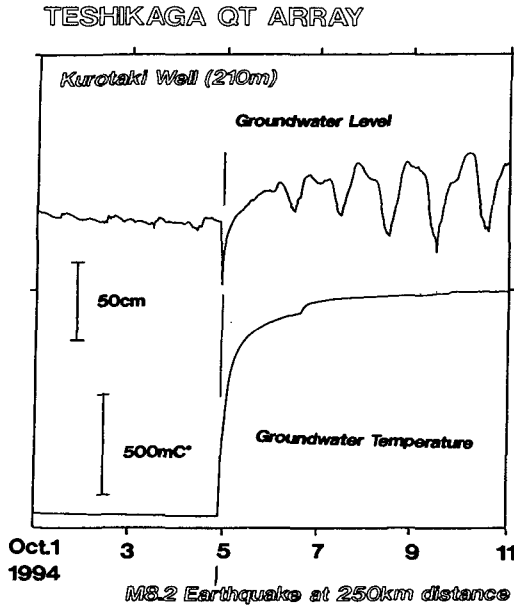


Fig. 14. Groundwater temperature and water level in Kurotaki well of Hokkaido-touhouoki earthquake of October 1994, Magnitude 8.2, which occurred at 250 km east of the well. The first spike of the water level is 40 cm amplitude, and the groundwater temperature change eventually reached to 1100 m°C on 11 October, five days after the earthquake.

アトサヌプリの群発地震があった。

Fig. 14 に北海道東方沖地震沖前後の地下水温と水位を示す。地震後3時間で500 m°C, 12時間で800 m°C, 2日後には1100 m°Cも上昇した。これは今まで記録した最大の水温変化だが、コサイスマミックな変化としては今まで数ある地震の時に記録したものと、振幅こそちがえ同じ形の変化である。一方水位は、地震と同時に40 cmほど低下したものの、その後は上昇した。この地下水温と水位との同時観測によって、コサイスマミックな変化が地下水位の変化による地下水の並行的な上下運動を単純に反映しているものではないことが確認された。

VIII. 地震に先立つ変化

地震に先立つ変化は、有珠火山、ルーマニア、中国、弟子屈で出たことがある。

前述した有珠火山から約1 km 東方の井戸では、1979年10月の精密地下水温観測開始後の半年間で、観測された地下水温は0.3°C上昇し、これは上昇してきているマグマと関連していると考えられた。当時は地震活動が盛んで、最大マグニチュード4.3の地震が起き、地震活動は1980年に入っても続いていた。

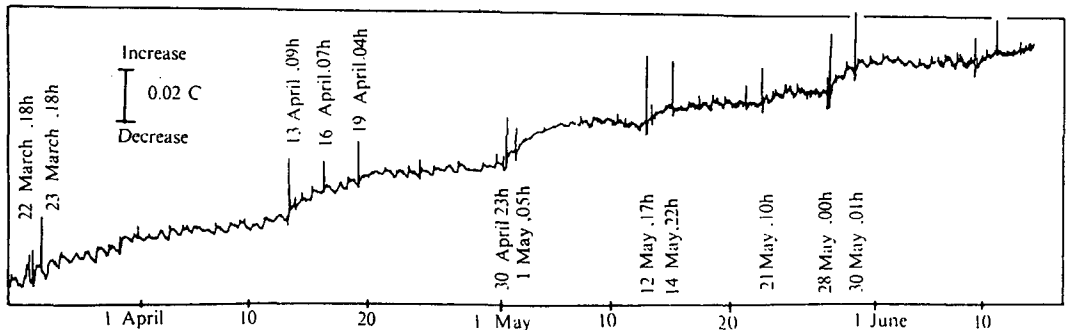


Fig. 15. Groundwater temperature recorded at Usu volcano well in 1980. Spikes correspond to relatively large earthquakes, whose dates and times are indicated. The changes in the gradient of the increasing temperature preceded the seismic activities (Shimamura and Watanabe, 1981).

この全体的な地下水温の上昇の中で、約10回ほど上昇速度が鈍ったり、ときには僅かながら下降したことが観測された (Fig. 15)。このそれぞれの期間の直後には、いずれも活発な地震活動があった。つまり、これらの地下水温の上昇速度の変化は、例外なく、活発な地震活動に先行するものであった。図に見られるように、例えば1980年5月5日過ぎから上昇速度が鈍り、12日から14日にかけて2回の大い地震があった。図上での上向きスパイク状の水溫記録は、センサーユニットを収納してある耐圧容器と周りの水との地震の震動による摩擦が起こした一時的な水溫上昇であり、それゆえスパイクは比較的大い地震を意味している (Shimamura and Watanabe, 1981)。

ルーマニアの精密地下水温観測点のうちODOでは地震前の地下水温変化を記録した。1986年の8月と12月に起きた二つの地震で、約2ヶ月前から酷似した特徴的な湾型の変化が見られた (Fig. 16a, 16b)。8月の地震はマグニチュード6.4(震源の深さは132 km)で、約50 m°Cの湾型の水溫変化があった。また12月の地震はマグニチュード4.7(震源の深さは138 km)で、約8 m°Cの水溫変化があった。観測点から震源までの距離はいずれも約150 kmであった。これらの地震は、1977年に起きたマグニチュード7.2の深発地震の近くで起きた地震で、それ以来の最大(マグニチュード6.4)とその次の大きさの地震(マグニチュード4.7)であったが、幸い被害はなかった。このうち、このうち前者の地震

GROUNDWATER MICROTHERMATURE OBSERVATION IN ROMANIA

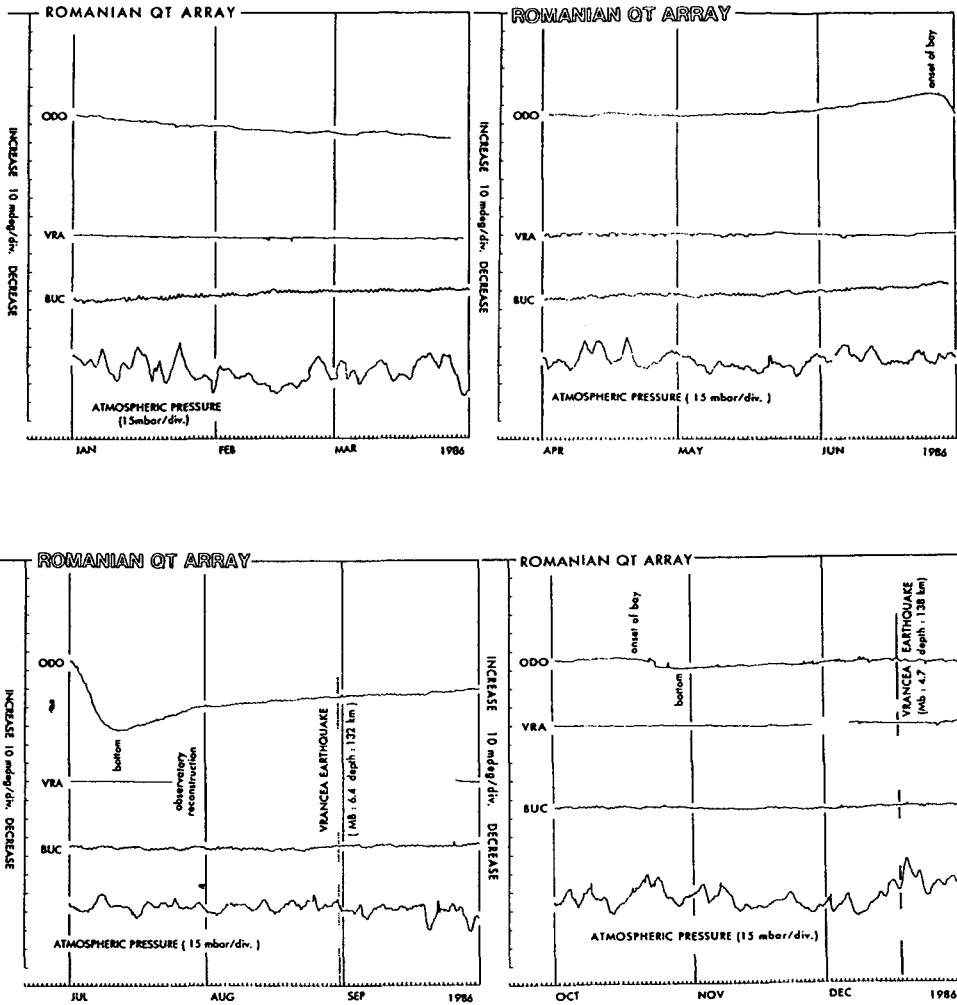


Fig. 16a. Groundwater temperature record in Romanian wells, ODO, VRA and BUC. Atmospheric pressure is also shown. ODO recorded a peculiar signal about two months prior to the magnitude 6.3 earthquake which occurred in August 1986.

ではコサイスマックな信号は出なかった。

なお地震のとき以外にはこの種の変化は記録されていない。こういった変化は通常の雑音レベルよりも大きく、他の現象、例えば気象やコサイスマックなものではないことは確かめられている。なお深発地震面の延長が地表に達する地点のすぐ内側に観測点VRAを置いてあったが、残念なことに地震の前後は観測所の再築工事中で、観測がたまたま停止していたので記録はない。また130 kmほど南西に離れたBUCでは、これらの地震に伴う地下水温の変化は見られなかった。

中国での精密地下水温度観測では、観測開始後二回ほど、現地としては近くて大きい地震があった。この二つの地震では、いずれも地震の前から観測された水温が下がったのが認められた (Fig. 17)。

最初の地震は1987年11月11日河北省宣化の西南で起きたもので M_s は4.2、震央距離は60 kmであった。地震の40日前から観測された水温が低下し、地震後は段階的に回復して約50日後に元の水温に戻った。水温の低下幅は400 m°Cから500 m°Cであった。次の地震は1988年7月23日陽原で起き

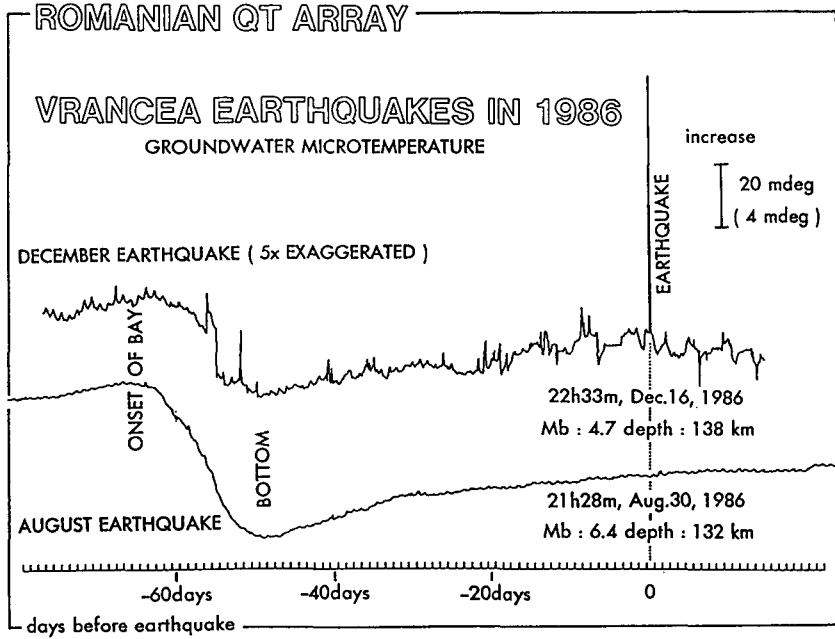


Fig. 16b. Groundwater temperature record in Romanian wells, ODO. Peculiar signals, resembling each other, about two months prior to the magnitude 6.3, and magnitude 4.7 earthquakes, respectively. Epicentral distances are about 150 km for both earthquakes. Ordinate for december earthquakes are exaggerated by five times for comparison.

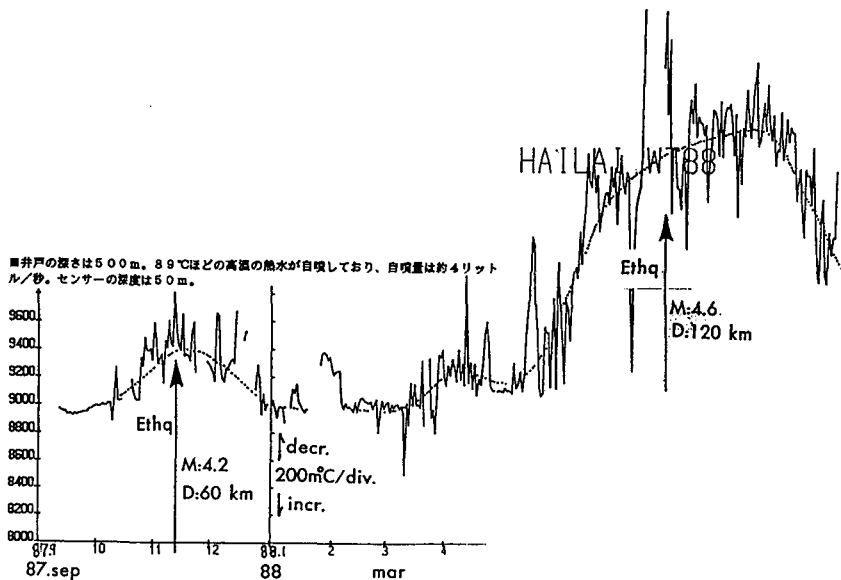


Fig. 17. Groundwater temperature, reversed in polarity, recorded in Sha Cheng well west of Beijing in China. The well has a depth of 500 m and water of 93 °C is self flowing at about 4 litres/second. The variation of the water temperature is around 500 m°C/week or 2000 m°C/year. Two remarkable decreases of groundwater temperature, with amplitudes of 500 m°C-1°C, were recorded 30-50 days before earthquakes, with magnitudes of 4.2-4.6.

たもので、マグニチュード (M_s) は 4.6、震央距離は 120 km であった。地震の前に前回と同じく観測された水温が低下した。低下幅は $1000 \text{ m}^\circ\text{C}$ にも達した。

弟子屈・黒滝井戸の場合には、二つの地震について、やはり地震に先行するように見える地下水温変化が約 $30 \text{ m}^\circ\text{C}$ の振幅で出たことがある (Shimamura et al., 1985)。これらはマグニチュード 6.8 の色丹島付近の地震 (1980 年 2 月 23 日、深さ 49 km) とマグニチュード 7.1 の北海道日高沿岸の地震 (1981 年 1 月 23 日、深さ 130 km) で、ともに震央距離は約 200 km であった。これらの地震の半月～1.5ヶ月前から、幅が 1～3 日の 2～3 のパルス状の水温上昇として記録された (Fig. 6)。これは気象など、観測されたあらゆる現象とは関係がないものであった。

前述したように黒滝井戸で設置されている深さ 100 m と 210 m のセンサーの記録で、同じ地震によるコサイスマックな変化の振幅比が 4.5 と、気圧による変化の比 3.6 と有意に違っていたが、この地震に先行するパルス状の変化については上記の比は 1.5～1.6 であった。つまり、コサイスマックな変化とも気圧の変化とも違う機構があることを示している。このパルス的な変化は気圧の変化やコサイスマックな信号の周波数と違ってないので、やはり周波数による地下水の応答の違いとも思えない。なお、この比がコサイスマックな変化や気圧による変化よりも小さいということは、210 m のセンサーのほうが、地震に先行するパルス的な信号を捉えるためには信号対雑音比が良いことを示している。

このほか黒滝井戸では、北海道東方沖地震 (1994 年) の 1 週間ほど前から、それ以前とは異なる変化が水位で 3～8 cm ほど見られた (Fig. 18 の黒線部分)。これらが地震の前兆的なものかどうか現段階では判断は出来ない。なお、この井戸の 10 km 北でアトサヌプリ群発地震が 7ヶ月前から発生していて、この 7ヶ月の期間全体での有感地震 18 個のうち東方沖地震の発生 2 日前には 1 個、前日には 4 個と急増していた。マグニチュードは最大で 3.4 である。しかし水位・水温に変化が記録された北海道東方沖地震前の 1 ヶ月間には有感地震はなく、群発地震の活動全体にも変化は見られなかった。黒滝井戸は北海道東方沖地震から 250 km、群発域からは 10 km 程度のところにある。

なお東海地方は、現在、地震活動度が低いので、北海道の弟子屈などで得られているような、大きな地震に関連した地下水温の特有な記録はまだ得られていないが、その反面、いままで述べてきたよ

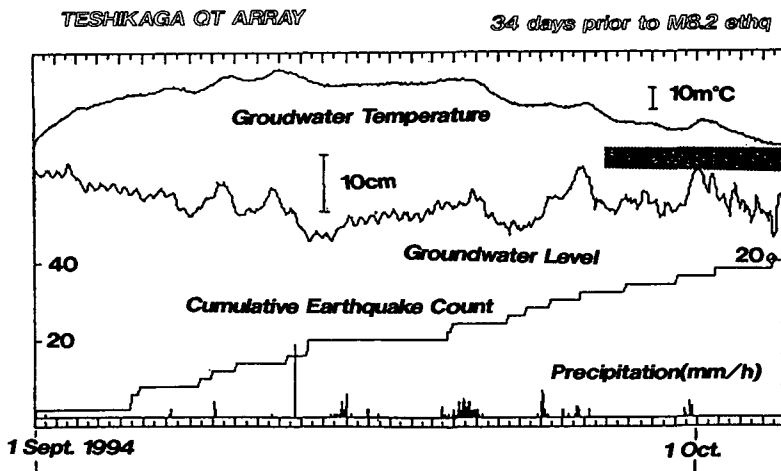


Fig. 18. One month records prior to Hokkaido-touhououki earthquake of October 1994, with magnitude 8.2, at a distance of 250 km. Record of ground water temperature, water level, accumulated number of nearby local earthquakes, and precipitation of Kurotaki well, Teshikaga, eastern Hokkaido.

うな「平常時」の記録の性質についてはいろいろの知見を得た。このため、もし今後「異常」な信号が出たときには、異常として検出するための資料は集められたというべきであろう。

一方、アイスランドでも、ここ数年のアイスランドの地学的な活動はいままでになくくらい静穏である。例えば観測点を展開した重要な目標のひとつであり、すぐ近くにあるヘクラ火山は12世紀以来16回の活動が記録されているが1980年を最後にその最近の活動はごく低い。このため現在までのところ大きな地震や火山の活動に結びつく結果は得られていない。

IX. ま と め

ごく精度の高い精密地下水温観測を行える観測器を開発し、国内や世界の各地で観測を行っている。この結果、いままでは殆ど分かっていなかった地殻の物理的な性質に大きな影響を与えている地殻中の水の状態と挙動を研究するための一つの手がかりを得つつある。また固体地球物理学にとってもうひとつの重要な地下水の寄与がある。地震が発生するとき、つまり岩石の破壊には地下水が重要な関与をしているがその研究にも手がかりの一つになっている。

いままでの観測の結果では、いままでには知られていない多くの現象が見つかっている。地下水温が気圧で変化すること、コサイスマミックな変化を描くこと、地震に先行する水温変化があることなど、いずれも高感度の精密地下水温観測をして初めて分かってきたものである。このうち例えば数 hPa (mb) の気圧の変化を地下水温変化として捉えられることが分かった。これは精密地下水温観測によって地殻内の微細な圧力変化や、ひいては歪み変化を捉えられる可能性を示している。

しかし、観測された地下水温変化が一つの井戸（例えば黒滝井戸）でも気圧に対する変化とコサイスマミックな変化と地震に先行する変化のそれぞれが別々の機構から来ているに違いない証拠も本研究から得られており、これは地下水とその動きが実際にはかなり複雑なことを示している。たとえば複数の帯水層があってそのそれぞれが、これらの現象に対する応答が違うことも十分に考えられる。また縦に掘り抜いている井戸が、これら帯水層を繋いでいる役目を果たしていることも考えられる。

しかしいずれにせよ、この新しい観測である精密地下水温観測は、固体地球物理学だけではなく、広い意味での陸水学 (Hydrology) にも新しい道具になりうるものであろう。

謝辞 1978年以來の精密地下水温観測には、井戸の提供から観測の維持にいたるまで、多くの方々のお世話になっている。また解析や研究の過程でも多くの方と有意義な議論をしていただいた。以下の方々の協力がなければ、この研究は出来なかった。故仁藤潤太郎 (静岡県焼津市)、仁藤とよ (同)、黒滝君代 (北海道弟子屈町)、中村龍雄 (中村ボーリング、静岡県函南町)、静岡県庁 (井野盛夫、岩田孝仁ほか)、静岡県新居町役場防災環境課、小河富夫 (元北大理学部)、北海道津別町役場、青木武男 (北海道阿寒町)、ラグナー・ステファンソン (アイスランド気象庁)、クリスティアン・アグストソン (同)、ソリール・オラフソン (同)、セルウィン・サックス (米国カーネギー研究所)、アラン・リンデ (同)、クリシャン・デメトレスク (ルーマニア国立地震研究所)、バシレ・メルザ (同)、鄭斯華 (中国国家地震局分析予報中心)、張煒 (同)、二瓶信一 (気象庁)、椛皮久義 (同)、佐藤馨 (同)、小泉岳司 (同)、大西功一 (同)、小高俊一 (気象庁気象研究所)、高山寛美 (気象庁気象研究所)、高山博之 (気象庁精密地震観測室)、岩崎貴哉 (元北大理学部)、稲谷栄己 (元北大理学部)、根本泰雄 (元北大理学部)、浦上晃一 (北大理学部)、脇田宏 (東大地殻化学実験施設)、吉岡龍馬 (元京都大学)、金沢敏彦 (元東大理学部)、卜部卓 (元北大理学部)、藤井直之 (名古屋大理学部)

文 献

- 島村英紀, 1995. 精密水温測定で地震前の地下水の動きを探る. 化学 (化学同人社) 1995年9月号 (50巻), 537-539.
- 島村英紀・森谷武男, 『北海道の地震』北海道大学図書刊行会. 224頁, 1994年3月10日発行.
- Furuya, I., Odaka, T., Takahashi, K., Shimamura, H., and Iwasaki, T., 1988, Observation of groundwater temperature, ground strain and water level in wells in the Tokai District, Papers in Meteorology and Geophysics, **39** (4), 149-161.
- Furuya, I., and Shimamura, H., 1988, Groundwater microtemperature and strain, Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, **94** (2), 345-353.
- Nagao, T., Kaminuma, K. and Shibuya, K., 1985, Long-term underground temperature measurements by quartz thermometers at Syowa Station, East Antarctica, Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **37**, 13-21.
- Nagao, T., and Kaminuma, K., 1986, Long-term underground temperature measurements at Showa station, east Antarctica, Journal of Geodynamics, **6**, 297-308.
- Shibuya, K., Nagao, T. and Kaminuma, K., 1982, Measurements of underground and underwater temperatures by quartz thermometers at Syowa Station, East Antarctica, Nankyoku Shiryo (Antarct. Rec.), **76**, 89-100.
- 島村英紀, 1986. 精密地下水温計. 『北海道大学地球物理学研究報告』, **47**, 1-15.
- Shimamura, H., Ino, M., Hikawa, H., and Iwasaki, T., 1985. Groundwater microtemperature in earthquake regions, Pure and Applied Geophysics, **122**, 933-946.
- Shimamura, H., 1983. Groundwater microtemperature measurements
—— coseismic signals and atmospheric pressure effects, Annales Geophysicae, **1** (3), 235-238.
- Shimamura, H. and Watanabe, H., 1981. Coseismic changes in groundwater temperature of the Usu volcanic region, Nature, **291**, 137-138.
- Shimamura, H., 1980. Precision quartz thermometers for borehole observations, Journal of Physics of the Earth, **28** (3), 243-260.
- 平賀士郎, 1981 a. 地震前兆現象としての温泉・地下水異常記録, 神奈川県温泉研究所報告, **12**, 144-146.
- 平賀士郎, 1981 b. 地震前兆現象としての温泉・地下水異常記録, 神奈川県温泉研究所報告, **13**, 52-53.
- 吉岡龍馬・西田良平・佃為成・見野和夫・小泉尚嗣・北岡豪一・矢部征・岸本兆方, 1983年10月31日鳥取県中部の地震に伴う温泉水の異常, 京都大学防災研究所年報, **27**, B-1, 455-464.