鳥取県湯谷温泉のコサイスミックな 水温変化について

京都大学防災研究所附属地震予知研究センター* 小泉 尚嗣・北川 有一

東京大学地震研究所** 佃 為 成

京都大学防災研究所附属地震予知研究センター鳥取観測所*** 矢 部 征

Coseismic Changes in Water Temperature at Yudani Hot Spring in Tottori Prefecture, Japan

Naoji KOIZUMI and Yuichi KITAGAWA

Research Center for Earthquake Prediction, Disaster Prevention Research Institute,
Kyoto University, Gokasyo Uji, Kyoto 611, Japan

Tameshige TUKUDA

Earthquake Research Institute, University of Tokyo Yayoi 1-1-1,
Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

Sei YABE

Tottori Observatory, Research Center for Earthquake Prediction, Disaster Prevention
Research Institute, Kyoto University 257-2, Hamada Engoji Tottori 680, Japan

(Received December 28, 1994; Accepted August 23, 1995)

We have observed precise groundwater temperature at Yudani hot spring in Tottori Prefecture, Japan since September 1991. The resolution of the temperature measurement is 0.001°C . The same observation was done from May 1983 to July 1984, with lower resolution of 0.01°C . The groundwater temperature has periodic fluctuations mainly induced by the earth tides. The temperature also changes due to atmospheric pressure and sometimes has clear coseismic rises. Such coseismic rise was observed 7 times with very similar patterns. Generally, the felt earthquakes at Yudani hot spring with JMA intensity 3 or greater coincides with the coseismic groundwater temperature changes and unfelt distant large earthquakes sometimes caused the same coseismic changes. These changes might have been caused by volumetric strain changes induced by tides, atmospheric pressure and earthquakes and we calculated respective strain sensitivity of the groundwater temperature. The sensitivity from the response to the atmospheric pressure is nearly equal to that from the tidal response ($1.10\text{ m}^{\circ}\text{C}/10^{-8}$ strain). However, the sensitivities estimated from the coseismic temperature changes and the static strain steps which were calculated from the earthquake fault model in a homogeneous elastic half space are more than 1000 times larger than the sensitivity from the tidal response. Therefore, the coseismic static strain steps cannot explain these coseismic changes on the groundwater temperature. We propose that these changes are caused by local strain release induced by the seismic waves which have little effect on the seismic intensity.

Key words: Groundwater temperature, Coseismic change, Volumetric strain, Tides, Strain sensitivity.

* 〒611 宇治市五ヶ庄

** 〒113 東京都文京区弥生 1-1-1

*** 〒680 鳥取市円護寺浜田 257-2

Fig. 1. Location of the Yudani observation well (solid circle) and Tottori Local Meteorological Observatory (solid square).

Fig. 2. Schematic figure of the observation well. Arrows show the direction of the groundwater flow. Two solid stars show the positions of the temperature sensors.

§1. はじめに

地震に関連して地下水（特に温泉）の水温が変化する例が、昔から多数報告されている。脇田(1978)によって紹介されているものの中には、数℃から場合によっては、10℃を超える変化が記録されている例がある。

このような地震に関連した地下水温観測・研究に画期的な進展を与えたのは、SHIMAMURA (1980) や NAKAMURA and WAKITA (1984/85) による、水晶振動子の発振周波数が温度によって変化することを利用した精密水温計（分解能 $0.001^{\circ}\text{C} \sim 0.0001^{\circ}\text{C}$ ）の開発であった。この精密水温計は長期に安定に駆動し、低消費電力で、ダイナミックレンジも広いという特長を持っている。このような特長を持つ水温計は国内外の多くの観測点に置かれるようになり [島村 1986]、いくつかの地震の前兆的水温変化や地震後の変化が報告されている [SHIMAMURA *et al.* (1984/85)]. また、この水温計の開発に

よって、地下深部の歪変化を水温の変化によって推測できることが明らかになった。例えば、FURUYA and SHIMAMURA (1988) は、東海地方の11の観測井に上述の精密水温計を設置し、体積歪計との比較を行った結果、多くの井戸で、地球潮汐力が原因と思われる水温の潮汐変化を検出している。

しかし、地震後の地下水温変化は、震源から遠方の地点で観測されることがあり、地震発生後の地殻歪変化が地震断層面から離れると急速に減衰することを考えると、地殻歪変化だけで地震後の水温変化を説明するのは難しく思えることも事実である。逆に、このメカニズムが明らかになれば、遠方の地震に対しても、その前兆と思われる地下水の異常が認められるという観測事実を説明できるかもしれない。地震後の地下水温変化は、地震との因果関係がはっきりしているという点で、地震前の水温変化よりも、その変化のメカニズムを考える上で有

利である。

われわれは、鳥取県の湯谷温泉で (Fig. 1), 上述の精密水温計と同じ原理の水温計を用いた観測を行っている [佃・矢部 (1981, 1984)]. この温泉では、気圧変化・潮汐・地震によって水温が変化する。本論文では、これらの現象に伴う体積歪変化によって水温変化が生じるとした場合の、それぞれの現象における水温変化と体積歪変化の比 (体積歪-水温変化換算係数) を求めて比較する。また、簡単なモデルを用いて地震に伴う水温変化のメカニズムについて考察し、地震時の水温変化を、地震動に起因するものと体積歪変化に起因するものとに分離することも試みる。

§2. 観測点の概要

湯谷温泉は鳥取県鳥取市の南方 15 km のところに位置する (Fig. 1). 千代川支流の曳田川左岸の狭い谷の奥にあり、湧出範囲も狭い。旧期花崗岩 (鉛山侵入岩) の侵入余熱により生成された温泉水が、中生代火山岩類を湧出母岩とし、本岩層に発達する割れ目系から上昇しており、水温は 34℃ 前後である [鳥取県 (1972)]. 地区内には 6 源泉が分布しているが、温泉地の形態はしておらず、自噴した温泉水が民家の浴用・雑用水に利用されているだけなので [鳥取県 (1972)], 人工的な揚水等の影響を考える必要がなく、温泉における観測には適している。

観測井は標高約 120 m で民家の庭に自噴していて、その水はほとんど使用されていない。この井戸では Fig. 2 のように、パイプおよびパイプのまわりから湧出した水がいったん湯だめに溜められた後、流れていく仕組みになっていて、パイプの湧出口は湯だめの水面の約 20 cm 下にある。したがって、湯だめの水面近くの温泉水は降雨や日光・風の影響を受けやすいと考えられる。観測井のボーリング時の記録はなく、かつ、井戸の壁面が一部崩れているために本当の深さは不明である。この井戸の深さ方向の水温分布を、水温センサーの入る水面下 25.7 m まで、1993 年 8 月 6 日に測定した (Fig. 3). 測定は原則として、1 m 間隔で行い、温度が急変する部分では測定間隔を短くした。測定値は、センサー移動後の温度表示値が安定するのを待って記録したが、表示値が安定しないところでは、数分間の測定期間中の最大値と最小値とを記録した。以上のような方法で湧出口と深さ 25.7 m の地点までの往復測定を行い、結果をまとめたのが Fig. 3 である。Fig. 3 では、同じ測定地点で測定値がばらついている場合、それらの最大値と最小値とを横線でつないでいる。深さ約 18.5 m と約 25.7 m の所で水温の急変部があり、少なくともこの 2 カ所か

Fig. 3. Temperature profile of the observation well.

らは水が流入していると推定できる。

§3. 観測の方法

3.1 水温測定

水温観測は次の 2 期間に実施している。1983 年 5 月 24 日～1984 年 7 月 31 日に分解能 0.01℃ で、1991 年 9 月 1 日から現在まで分解能 0.001℃ で行っている。なお、1989 年 12 月から現在まで、分解能 0.1℃ の水温観測もしている。記録は、分解能 0.01℃ の温度測定時には、50 分に 1 回測定値をプリンターに打ち出し、それを 1 時間値に換算する方式を取っていたが、分解能 0.1℃ と 0.001℃ 温度測定時は、1 時間に 1 回正時に、1 分間のデータを 1 秒または 2 秒のサンプリングでデジタル収録する一方、打点レコーダーにもアナログ収録した。この 1 分間のデータの平均値を正時の値とした (ただし、1 秒サンプリングの時は上下 6 個ずつ、2 秒サンプリングの時は上下 3 個ずつのデータを取り除いた上で、平均を取っている)。デジタルレコーダーが故障して欠測しているときは、打点レコーダーの正時

Fig. 4. Observational results from May 1983 to July 1984. The atmospheric pressure, atmospheric temperature and rain fall were measured at Tottori Local Meteorological Observatory.

の値を読みとって欠測値を補間した。このようにして作成した1時間値を解析に用いている。時刻精度は全体として ± 3 分以下である。

分解能 0.01°C と 0.001°C の水温の測定原理は SHIMAMURA (1980) と同じで、センサーに水晶発振子を用いている。分解能 0.1°C の水温計のセンサーはサーミスタである。1983年5月24日から1984年7月31日に使用していた測定器は自作のもので、分解能としては本来 0.001°C 以下であったが、 0.001°C の桁の値が不安定であったので、 0.01°C までの出力値を採用した。1991年9月1日から使用している測定器は東京電波社製 DMT-600A で、カタログによると 0.001°C の分解能が保証されたものである。

1983年5月24日に開始した水温観測では、水温のセンサーは湧出口での水面下約30 cm のところに設置していた。このために水温のデータには、日射による上向きのスパイク状の変化と雨の影響による下向きのスパイク状の変化が出ていた (Fig. 4)。つまり、晴天の昼間は太陽の光が直接センサーに当たることで、測定値を実

際の水温より上げ、雨の日には雨水が湯だめ (Fig. 2) の中の温泉水と混ざり、水温の測定値を下げてしまうのである。なお、風や温泉使用に伴う水温変化は確認されていない。1991年9月1日以降、水温のセンサーは湧出口での水面下約2.3 m のところに設置したので、水温測定データに日射や雨の影響は出ていない (Fig. 5)。

なお、同観測井では、水質の測定も行っている [吉岡・他 (1984), 小泉・他 (1991)]。

3.2 気象・地震データおよび理論潮汐体積歪について

気温・気圧及び降水量のデータは鳥取地方気象台 (Fig. 1) の測定値を利用し、これを湯谷観測井の気象データと解釈した。気象台のデータは1991年より前は3時間値 (気温・気圧は3時間毎の瞬時値、降雨は3時間積算値) が記録されていたが、1991年以降は毎時値が記録されるようになった。本論文中でも、1991年より前の場合は、3時間値を、1991年以降の場合は毎時値を用いているが、Fig. 5 は3時間値で描いている。

地震のマグニチュード (M)・震源・震度に関しては、

Fig. 5. Observational results from September 1991 to June 1994. The atmospheric pressure, atmospheric temperature and rain fall were measured at Tottori Local Meteorological Observatory.

Fig. 6. Typical observational results from September 10 1993 to October 10, 1993. Theoretical tidal volumetric strain is calculated for the observation well.

Table 1. Tidal components of the groundwater temperature and theoretical volumetric strain.

Tidal component (period)	Theoretical volumetric strain (TVS)		Water temperature (WT)		WT/TVS
	Amplitude (σ)	Phase shift (σ)	Amplitude (σ)	Phase shift (σ)	
	(10^{-8})	(deg)	($m^{\circ}C$)	(deg)	($m^{\circ}C/10^{-8}$)
O_1 (25.8 hours)	0.64133	0.00	0.67 (0.06)	42.81 (5.44)	1.045 (0.094)
M_2 (12.4 hours)	1.01300	0.00	1.16 (0.03)	8.78 (1.34)	1.145 (0.030)

Values in parentheses are respective standard deviations.

気象庁の地震月報や地震火山概況のデータを用いた。しかし、後述の EQ3, 4, 5 の地震は京都大学防災研究所附属地震予知研究センター鳥取観測所の当時の微小地震観測網内で発生したもので、その震源データに関しては鳥取観測所のものを用いた。以上のデータを利用して、観測された水温変化と地震（水温観測期間内に日本列島近辺で起きた $M \geq 5.5$ の地震と湯谷観測井での有感

地震）との関係を検討した。震度は鳥取地方気象台での震度を湯谷観測井での震度とみなす。

湯谷観測井における理論潮汐体積歪については以下のように計算した。地球潮汐のみによる体積歪の時間変化は、三浪 (1990) のプログラムから面積歪を計算し、それに $2/3$ をかけて求めた (Fig. 6 の理論体積歪はそのようにして得られたもの)。これは、自由表面を仮定し、

ポアッソン比を 0.25 としたことを意味する [MELCHIOR (1983)]. 海洋潮汐も考慮にいたれた, より厳密な理論値は, プログラム GOTIC [SATO and HANADA (1984)] によって計算した (Table 1). ただし, 体積歪に対する海洋潮汐の寄与は海岸部を除いて本来少なく [OZAWA (1957)], 日本海の海洋潮汐の振幅が小さいこともあって, 湯谷観測井における体積歪の潮汐変化はほとんど地球潮汐によるものである.

§4. 観測結果

4.1 水温変化と気象・潮汐歪との関係

板持・他 (1993) は, 1990 年 8 月～1991 年 11 月の分解能 0.1°C の水温測定結果 (日平均値) と 1991 年 9 月～1992 年 10 月の分解能 0.001°C の水温測定結果 (日平均値) から, 数日以下の短期的な変化について, 湯谷観測井の水温と気温・気圧・降雨とは無関係であるとしたが, 本論文では, 1 時間値をもとに, より詳細に調べてみる.

1983 年 5 月 24 日～1984 年 7 月 31 日までの結果を Fig. 4 に, 1991 年 9 月 1 日以降の結果を Fig. 5 に示す. また, 地震の影響を受けていないと考えられる場合の水温変化の典型的な例として 1993 年 9 月 10 日～10 月 10 日のデータを Fig. 6 に示した. なお, 1989 年 12 月～1994 年 6 月の水温変化は, 0.5°C 以下なので

(Fig. 5 および板持・他, 1993), 分解能 0.1°C のセンサーによる測定結果はここでは示さない.

Fig. 4 の水温データで, 水温が急上昇した後, 一定になるかゆっくり減少するという変化が 4 度認められる. これは地震に伴うもので [佃・矢部 (1984)] 後述する. 気温・気圧・降雨・潮汐歪との関係は, 上述のスパイク状の水温変化があることや, 分解能が 0.01°C であることからこの期間では議論することが難しい.

Fig. 5 の水温は, 1991 年 9 月から 12 月にかけてゆっくりと上昇した後, 全体として下降傾向にある. 1991 年 9 月の観測開始直後と, 1993 年 7 月に, 上述の地震に伴う水温変化のパターンと同様な変化が, 規模は小さいものの認められる. これについても後述する. 温度変化をこのスケールでみる限りでは, 気温・気圧・水温との関係は明瞭ではない.

Fig. 6 のようにスケールを拡大すると, 0.005°C 程度の変化幅で, 半日周期の水温変化が卓越していることがわかる. これを地球潮汐による理論体積歪変化と比較するとその振幅の消長が類似していることから, 潮汐体積歪変化の影響を水温は受けていることがわかる. 体積歪が増大するとき (体積が膨張するとき) 水温が上昇しており, これは, 小泉 (1991) による岡山県西粟倉観測井の例とは逆である. また, 数日から 10 日程度の周期の水温変化があるが, それは, 気圧の変化からやや遅れ

Fig. 7. Correlation between the groundwater temperature (WT) and the atmospheric pressure (AP) during the period from February 1994 to March 1994. The broken line is the regression line.

て、気圧と逆センスで変化しているように読みとれる。降雨との関係は、気圧変化と降雨が重なることもあってはっきりしない。気温との関係は特に認められないようである。

体積歪の潮汐変化が水温に与える影響について定量的に考えるため、1991年9月以降のデータについて、潮汐解析プログラムBAYTAP-G [石黒・他 (1984), TAMURA *et al.* (1991)] を用いて、水温の測定値をトレンド・潮汐成分・ランダムノイズに分離し、理論体積歪と水温の振幅およびそれらの比を、潮汐現象に特有の周期である O_1 分潮 (周期 25.8 時間) と M_2 分潮 (周期 12.4 時間) に関して計算した (Table 1)。振幅比に関しては、 O_1 分潮と M_2 分潮ではこの値にほとんど差はない (平均 $1.10 \text{ m}^\circ\text{C}/10^{-8} \text{ strain}$)。位相は体積歪の伸びからの位相差を示し、正の値をとる上に M_2 分潮と O_1 分潮で有意な差がある。これはまた、体積歪の縮みより 180° 弱遅れていると解釈することもできる。いずれにしても、この位相をどのように解釈するかは現時点では難しく、位相についての議論は本論文では行わない。

著者らはまた、BAYTAP-G を用いて気圧の寄与分の分離を試みたが成功しなかった。数日程度の周期の気圧変動が、水温に顕著な影響を与えているように見えるが (Fig. 6)、このような長周期の変動の寄与は BAYTAP-G では、必ずしもきれいに除去できない。それで、平行データを用いなくて BAYTAP-G によって計算した水温のトレンドと気圧のトレンドとの相関図をつくり、時

間をずらしていった相関係数と水温の気圧係数 (水温変化と気圧変化との比) の変化の様子を調べてみた。その際、地震による水温変化の影響が残っていない時期で、かつ、比較的少雨の時期 (1994年2月~1994年3月) を選んだ (Fig. 5)。気圧変化を水温変化より 19~35 時間遅らせた時に両者の相関係数は 0.70 より大きくなり、その時の気圧係数は $0.44 \sim 0.46 \text{ m}^\circ\text{C}/\text{hPa}$ であった。なお、相関係数の最大値は 0.74、そのときの時間遅れは 27 時間、気圧係数は $0.46 \text{ m}^\circ\text{C}/\text{hPa}$ である (Fig. 7)。念のために、水温と気圧の生のデータで同様の解析を行ったが、相関係数の値は若干小さくなるものの、結果は同様であった。したがって、気圧係数は $0.45 \pm 0.01 \text{ m}^\circ\text{C}/\text{hPa}$ であると考えることができる。

Fig. 7 をみてもわかるように、水温変化と気圧変化とは明らかに相関があるとはいえ、かなりばらついている。これもまた、水温の気圧への寄与分を BAYTAP-G でうまく分離できなかった原因であろう。このようにばらつく原因として、雨の影響が取り切れていないことその他に、気圧が地下水温に寄与するときの周波数依存性 [小泉 (1991)] が考えられるが、これについても別の論文で議論することにし、本論文では上述の気圧係数についてのみ後に考察する。

4.2 水温変化と地震との関係

湯谷観測井では、適当な大きさの地震発生後に、非常に特徴的なパターンの水温変化がある。以下にその変化の様子を記す。

Fig. 8. The corrected groundwater temperature where the rainfall-induced and daylight-induced changes are omitted. Arrows show earthquake occurrences. EQ means earthquake.

Table 2. List of the earthquakes which caused coseismic water temperature changes at Yudani hot spring (May 1983–July 1984, August 1991–June 1994).

No.	Date	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Depth (km)	M	ED (km)	SI	Name
1	1983 5 26	40.355	139.077	14	7.7	701	0	Central Japan Sea Earthquake
2	1983 8 26	33.552	131.605	116	6.8	311	3	North Oita Prefecture Earthquake
3	1983 10 31	35.420	133.920	11	6.2	23	4	Central Tottori Prefecture Earthquake
4	1984 5 30	34.941	134.606	19	5.6	63	3	Southwest Hyogo Prefecture Earthquake
5	1991 8 28	35.304	133.186	17	5.9	90	3	East Shimane Prefecture Earthquake
6	1993 2 7	37.653	137.300	25	6.6	377	1	Off Noto Peninsula Earthquake
7	1993 7 12	42.780	139.183	35	7.8	929	0	Southwest off Hokkaido Earthquake

Yudani hot spring is located at (35.38°N, 134.17°E). ED and SI respectively mean the epicentral distance and the seismic intensity at Tottori Local Meteorological Observatory.

1983年5月～1984年7月のデータに関しては、上述のように、日射と雨の影響による見かけ上の変化が出ている (Fig. 4)。そこで夜間 20:00～4:00 のデータのうち、そのデータからさかのぼって6時間以内に雨が記録されていない部分を連続的なグラフにして地震との関係を調べた (Fig. 8)。上述のパターンの水温変化がこの期間に4度、いずれも地震発生直後に測定されている [佃・矢部 (1984)]。このような変化は最小でも 0.1°C 変化していることから、前節で述べた気象要素や潮汐による体積歪変化に帰することはできず、地震に起因するものと考えることができる。

これらの4つの地震は、日本海中部地震 (EQ1)・大分県北部やや深発地震 (EQ2)・鳥取県中部の地震 (EQ3)・兵庫県南西部の地震 (EQ4, 山崎断層で発生した地震) で (Table 2)、日本海中部地震を除いて、いずれも鳥取での震度は3以上であり、この期間では、震度が大きいほど水温変化も大きい。ちなみに気象庁によれば、鳥取での震度が3以上の地震は鳥取県中部の地震の直後の余震2つ (1983年10月31日と同年11月3日に発生) 以外に同期間中は発生していない。

水温センサーの位置を深くし、温度計も分解能 0.001°C のものと取り替えて測定を再開した 1991年9月～1994年6月の間、鳥取で震度3以上の地震は発生していない。しかしながら、大ききこ小さいが、やはり地震に伴う同様な変化が認められる (Fig. 9a)。まず、1991年9月1日からの観測開始直後に水温の変化が認められるが、その変化パターンや分解能 0.1°C の水温測定結果から、1991年8月28日に発生した島根県東部の地震 (EQ5) に伴うものと推定できる [板持・他 (1993)]。また、能登半島沖地震 (EQ6) や北海道南西沖地震 (EQ7) の際にも水温が変化しているが (Figs. 5, 9a, Table 2), EQ6 よりも EQ7 の方が水温変化が大きく、ここでは上述の水温変化と震度との相関関係は崩れてい

る。また、北海道南西沖地震の際の水温変化は (Fig. 10)、日本海中部地震の時のそれと振幅や減衰の仕方が酷似していた。なお、Fig. 9a をみてもわかるように、EQ5～7 以外の所にも同様なパターンの水温の変化が認められるが、次の章で述べる判断基準により、これらの変化はとりあえず無視した。

1983年5月～1984年7月と1991年9月～1994年6月の2つの期間に日本付近で起きた M (マグニチュード) 5.5 以上の地震の分布を地震解析プログラム SEIS-PC [石川・他 (1985)] を用いて示す (Fig. 11)。さらに湯谷観測井との距離を計算し、地震の M と震源距離の関係を示す (Fig. 12)。Fig. 12 より、近くて大きい地震はどコサイスマックな水温変化が出ることがわかる。

4.3 コサイスマックな水温変化の客観的な検出

コサイスマックな水温変化の特徴は地震後に水温の時間変化率が急増することである。これは水温の二階時間微分が立ち上がり部分で大きくなることを意味する。コサイスマックな水温変化を客観的に検出するために、1991年9月以降の水温のデータ (Fig. 9a) を用いて BAYTAP-G で計算した水温のトレンド (Fig. 9b) に対し、以下のような演算を行なう。すでに述べたように、この水温のトレンドには気圧の寄与が含まれている。

ある時刻 T_i から時刻 T_{i+23} までの24個の水温データを、最小自乗法で直線近似して求めた平均的な時間変化率 (傾き) を G_i とし、 G_i から G_{i-24} を引いた値を時刻 T_i における水温の (疑似) 二階時間微分値の Δ_i とする。

Fig. 9c の演算結果では、4ヶ所で 4σ (σ : 標準偏差) を越える大きな値を示した。そのうち2ヶ所は上で述べた EQ6, 7 の時に発生したものである (Fig. 9c の B, C)。残りの2ヶ所 (Fig. 9c の A, D) は台風に伴う気圧の急変と大雨に対応した変化であった。Fig. 13 に D の

Fig. 9. a: Original groundwater temperature data from September 1991 to June 1994. Arrows show earthquake occurrences. b: The residual groundwater temperature data(The original data minus the tidal component which was calculated by BAYTAP-G). c: A kind of the second order derivative of the residual groundwater temperature data (b). Symbols (A, B, C, D) show remarkable changes.

前後の変化を示す。なお、上述のようにEQ5前後における分解能 0.001°C の水温データはないので、EQ5の時の Δt_i は計算されていない。

以上のことから、EQ6, 7の時の水温変化が、1991年9月以降のデータの中で、他の同様なパターンの変化に比べて特に異常な変化であることがわかる。

§5. 考 察

鉛直のボーリング孔において、1つの帯水層（割れ目系）から温泉水が供給されて自噴している簡単なモデル（Fig. 14）を考える。湯谷温泉水は上述のように岩の割れ目系から供給されていると考えられるが、割れ目の向きが全体としてランダムであれば一様な帯水層として扱えるので、ここではそのように仮定した。このモデルに

Fig. 10. The groundwater temperature change before and after the Southwest off Hokkaido Earthquake, which is a typical coseismic groundwater temperature change at the observation well.

Fig. 11. Epicentral distribution in and around Japan from May 1983 to July 1984 and from September 1991 to June 1994. Magnitudes of the earthquakes are 5.5 or greater. Solid circles mean the earthquakes which caused coseismic groundwater temperature changes at the observation well.

Fig. 12. Hypocentral distance from the observation well and magnitude of the earthquakes shown in Fig. 11. Circles and squares show the earthquakes which occurred during the periods from May 1983 to July 1984 and from September 1991 to June 1994, respectively. The earthquakes shown by solid circles and squares caused the coseismic groundwater temperature changes.

Fig. 13. Groundwater temperature changes before and after a large typhoon landing.

に基づいて、湯谷観測井の水温変化について考察する。

5.1 潮汐歪変化や気圧変化によって水温が変化する理由

潮汐歪変化や気圧変化によって地下水位や地下水自噴量が変化する例はよく知られている [例えば, MELCHIOR (1960, 1983), BREDEHOEFT (1967), KOIZUMI (1993)]. 温泉の自噴量変化によって水温が、正または負の相関で変化する例もよく知られている [湯原・瀬野 (1969)]. その理由として湯原・瀬野 (1969) は、自噴量変化とともに、温泉水を形成する複数の温度の異なる地下水の混合比が変わることや、温泉水が地表に達するまでに周囲に出す放熱量が変わること等を挙げている. 小泉 (1991) は、潮汐歪変化による自噴量変化にほぼ比例して、地下水温が 0.05°C 程度の振幅で変化する場合があることを見だし、その振幅の4割程度は放熱量の変化によって説明できることを示した. 湯谷観測井では自噴量の測定は行っていないが、鳥取県中部の地震 (EQ3) の際の現地聞き込み調査で、地震後の水温増加とともに自噴量が増加したことを確認している. しかし、Fig. 6 や Table 1 では、体積歪変化が正の時 (体積が膨張する時) 水温は増加しているように見える. 一般に体積歪変化が負の時 (体積が縮む時) に地下水自噴量が増加すると考えられ、必ずしも自噴量変化と正の相関で水温が常に変化するとはいえない. 本論文では、とりあえず自噴量変化の振幅 ($|\Delta Q|$) に水温変化の振幅 ($|\Delta T|$) が比例するものとし、符号については問わないこととする. すなわち、

$$|\Delta T| = C_1 |\Delta Q| \quad (1)$$

Fig. 14. Schematic diagram for our model. Arrows show the groundwater movement. Q: Discharge, P_a : Atmospheric pressure, p : Pore pressure, h_0 : Vertical distance between the top of the borehole and the top of the aquifer.

ここで C_1 は観測井に固有の定数とする.

帯水層中の空隙圧 (水圧) を p 、気圧を P_a 、井戸の出口と帯水層との距離を h_0 とすると自噴量 Q は次のように表わせる [NOMITSU *et al.* (1940), KOIZUMI (1993)].

$$Q = C_2(p - P_a - \rho g h_0) \quad (2)$$

ここで、 ρ は温泉水の密度、 g は重力加速度で、 C_2 も観測井に固有の定数である. ボーリング孔の中は非圧縮と考えるので ρ は定数である. 帯水層における体積歪変化 ($\Delta \epsilon$) と、空隙圧変化 (Δp) との関係は、BREDEHOEFT (1967) によれば

$$\Delta p = -C_3 \Delta \epsilon \quad (3)$$

$$C_3 = \rho g / S_s = 1 / (\alpha + n\beta) \quad (4)$$

ここで、 $S_s (= \rho g (\alpha + n\beta))$ は比貯留量 (水頭圧 (水圧を水の高さで表したもの) の単位の変化に応じて、単位体積の帯水層から出入りする水量) と呼ばれる定数、 α は帯水層を構成する固体部分の圧縮率、 n は帯水層の空隙率、 β は水の圧縮率で、結局 C_3 も観測井に固有の定数となる. なお、ここでは、地下水の移動によって、体積歪変化と空隙圧変化に時間差が生じる効果 [例えば, ROJSTACZER (1988)] については無視している. したがって、帯水層内の空隙圧は、気圧の寄与が無視出来る場合、(1)~(3) より、

$$|\Delta T| = C_4 |\Delta \epsilon| \quad (5)$$

$$C_4 = C_1 C_2 C_3 \quad (6)$$

となって体積歪変化の振幅に水温変化の振幅が比例する. $O_1 \cdot M_2$ 分潮は気圧変化の周波数成分に含まれないので、その振幅比によって求めた体積歪-水温変化換算係数 $1.10 \text{ (m}^{\circ}\text{C}/10^{-8} \text{ strain)}$ は、(6) の C_4 を求めたこ

となる。

次に、気圧の寄与によって水温が変化する場合を考えると、気圧変化によって空隙圧も変化するので取扱いは潮汐歪の場合より少し複雑になる。やはり、水の移動による効果を見捨てる、気圧変化(ΔP_a)は加重変化として帯水層に加わり、その一部が空隙圧変化(Δp)に、残りが帯水層を構成する固体部分によって支えられる圧力の変化($\Delta \sigma$)になるので、

$$\Delta p = \gamma \Delta P_a \quad (7)$$

$$\text{ただし, } 0 < \gamma < 1 \quad (8)$$

となる。 γ も観測井に固有の定数である(1), (2), (7)より

$$|\Delta T| = C_5 |\Delta P_a| \quad (9)$$

$$C_5 = C_1 C_2 (1 - \gamma) \quad (10)$$

よって、 C_4 は気圧-水温変化換算係数 C_5 と C_3 , γ を用いて以下のように表せる。

$$C_4 = C_5 C_3 / (1 - \gamma) \quad (11)$$

ここで、帯水層の体積変化すべてが空隙の体積変化になると仮定すると [JACOB (1940)],

$$\gamma = \alpha / (\alpha + n\beta) \quad (12)$$

(4), (11), (12) より、

$$C_4 = C_5 / n\beta \quad (13)$$

帯水層は火山岩中の割れ目系に対応するから空隙率は0.05~0.3程度とすると [建設産業調査会 (1984)], β は $0.45 \times 10^{-9} (P_a)^{-1}$ なので [国立天文台 (1989)], 気圧-水温変化係数($C_5 = 0.45 \pm 0.01 \text{ m}^\circ\text{C}/\text{hpa}$)から見積もられる C_4 は $0.33 \sim 2.0 \text{ m}^\circ\text{C}/(10^{-8} \text{ strain})$ となり、潮汐歪変化から求めた $1.10 \text{ (m}^\circ\text{C}/10^{-8} \text{ strain)}$ と矛盾しない。逆に、気圧-水温変化によって見積もられる体積歪-水温変化係数が潮汐変化-水温変化によって見積もられるもの($1.10 \text{ m}^\circ\text{C}/10^{-8} \text{ strain}$)と一致するとすれば、空隙率 n は $0.089 \sim 0.093$ になる。

5.2 コサイスミックな水温変化が生じる理由

(1), (2) 式より、

$$|\Delta T| = C_1 |\Delta \{C_2(p - P_a - \rho g h_0)\}|$$

地震時の水温は短期間に大きく変化するので、気圧変化の寄与は無視できる。地震の震度は最大でEQ3の時の4であるから、地震に伴う地殻変動による h_0 の変化も無視できるだろう。するとコサイスミックな水温変化(ΔT_{EQ})に関しては

$$|\Delta T_{EQ}| \sim |C_1(p - P_a - \rho g h_0) \Delta C_2 + C_1 C_2 \Delta p| \quad (14)$$

と考えることができる。地震時に温泉の水温変化が生じる理由としては、地震動によるものが知られている [瀬野・湯原 (1969), 力武 (1976)]。地震動によって帯水層内に割れ目が入ったりボーリング孔内の目つまり等の状態が変われば、 C_2 が変化することによって自噴量が増え水温は変化する(14式第一項)。帯水層周辺で新た

Fig. 15. Relationship between the groundwater temperature and the strain changes caused by the earth and ocean tides (EOT), atmospheric pressure (AP) and earthquakes (EQ1-7).

な割れ目ができるなどして、温泉水を形成するシステムが変われば C_1 も変わり得る。他方、上述のように湯谷観測井の水温は地殻の体積歪変化によって変化するので、湯谷観測井におけるコサイスミックな体積歪変化による空隙圧の変化(Δp)によっても水温は変化する(14式第二項)。

こらら2つの要因による水温変化を分離することは一般には難しい。ただし、地震動の影響による水温変化の部分は、温泉水を形成するシステムが一部破壊された結果として生じるものであるから容易には回復しないが、体積歪変化による水温変化の部分は、帯水層からの水の漏洩・拡散の効果で空隙圧が下がって比較的早期に回復することが予想できる。ROELOFFS *et al.* (1989) や RUDNICKI *et al.* (1993) の研究によると、クリープ変位に伴う体積歪変化によって変化した井戸の水位は1カ月程度で回復している。この観点から検討すると、EQ1, 6, 7の水温変化は1カ月程度で回復しているが、EQ2~5の際の水温変化は回復していない。EQ1, 6, 7の震度は1以下なのに対し、EQ2~5の震度はいずれも3以上である。震度が大きくなると、地震動による水温変化への寄与が増して、水温変化が回復しない(または回復が遅れる)と考えれば、この結果を説明できる。

EQ1~EQ7の点震源モデルに基づき OKADA (1992) の方法(地殻を半無限の等方・均質な弾性体と仮定)を用いて湯谷観測井での地震時の体積歪変化を求め、水温変化量と比較した (Fig. 15)。EQ1~3, EQ5~7に関しては、DZIEWONSKI *et al.* (1983, 1984a, 1984b, 1992, 1994a, 1994b) の CMT 解を採用し、EQ4については

Dziewonski らが扱ってなかったので、山崎断層研究グループ(1985)と気象庁(1985)の解を用いた。この水温変化量は、地震後の極大値から地震直前の値を引いた値である。また、同じ Fig. 15 に、潮汐歪と気圧それぞれから求められる、体積歪－水温変化換算係数に対応する直線を記した。地震動による寄与が少ないと考えられる震度 1 以下の EQ1, 6, 7 に限っても、地震時の歪に対する水温の感度は、気圧や潮汐による歪に対する感度に比べて 3 桁以上大きいことがわかる。

気圧や潮汐による体積歪変化の周期 ($10^1 \sim 10^2$ 時間) に比べて地震によるその継続時間はかなり短いことが予想されるとは言え、このような極端な感度の差をもたらす要因は何であろうか。

地震から離れた断層周辺の観測点で、コサイスミックな地殻歪ステップが、計算値より大きく増減のセンスが逆になる例がしばしばある [WATANBE (1991)]。また、コサイスミックな地下水位変化の増減のセンスが、地震の断層モデルから求められた体積歪変化によって推定されるものとは一致しないこともかなり一般的に認められる [IGARASHI and WAKITA (1991), KÜMPFEL (1992), 小泉 (1994)]。湯谷温泉においても、コサイスミックな水温変化が、対応する地震から見積もられる観測井付近の体積歪変化の増減の符号とは無関係に、常に水温の上昇の形で始まることから考えて、観測井周辺の局所的な歪の蓄積が、地震波が引き金となって解放されている可能性がある [たとえば、WATANABE (1991)]。その結果として地震時の観測井周辺の体積歪変化が増幅されるために、上述のような大きな感度の違いを、見かけ上生ずるのかもしれない。

§ 6. 結論と今後の課題

1. 湯谷観測井における地下水温は、潮汐・気圧変化・地震の影響によって変化する。降雨に対しても水温は変化するようであるが、対応関係は不明瞭で、気温に関しては変化は認められない。

2. コサイスミックな温度変化は 4 年 1 カ月の観測期間中 (1983 年 5 月～1984 年 7 月, 1991 年 9 月～1994 年 6 月) に 7 度検出された。その変化は急上昇した後、一定になるかゆっくり減少するというよく似たパターンを示す。

3. 気圧変化による水温変化から見積もられる体積歪－水温変化換算係数は、潮汐歪による水温変化から見積もられる値 ($1.10 \text{ m}^\circ\text{C}/10^{-8} \text{ strain}$) にほぼ一致する。

4. 地震の断層モデルによって推定される、観測井周辺の体積歪変化によって水温変化が生じたとすると、その体積歪－水温変化換算係数は潮汐や気圧変化に対する

ものに比べて 3 桁以上大きい。

本論文では、体積歪変化と水温変化の位相差についてはほとんど議論できなかった。これについては、湯谷観測井での自噴量測定の実験や結論 4 のメカニズム解明とあわせ今後の課題としたい。

謝 辞

この研究を進めるにあたり、鳥取大学の宮腰潤一郎博士や西田良平博士および京都大学防災研究所附属地震予知研究センターの堀川晴央氏・中野 進氏に貴重な助言を頂いた。また、2 人の査読者 (名古屋大学の山内常生博士と東京大学の野津憲治博士) や編集委員 (名古屋大学の木股文昭博士) にも有益な助言を頂いた。鳥取県八頭郡河原町湯谷の谷長 潔氏には長期にわたる観測に協力して頂いている。以上の方々に心から感謝申し上げます。なお、この研究の一部は、科学研究費奨励研究 A (No. 06854021, 研究代表者: 小泉尚嗣)「地殻歪の潮汐変化と地震波動に対する地下水の応答に関する研究」による。

文 献

- BREDEHOEFT, J. D., 1967, Response of well-aquifer systems to earth tides, *J. Geophys. Res.*, **72**, 3075–3087.
- DZIEWONSKI, A. M., J. E. FRANZEN and J. H. WOODHOUSE, 1983, Centroid-moment tensor solutions for April–June, 1983, *Phys. Earth Planet. Interiors*, **33**, 243–249.
- DZIEWONSKI, A. M., J. E. FRANZEN, and J. H. WOODHOUSE, 1984 a, Centroid-moment tensor solutions for July–September, 1983, *Phys. Earth Planet. Interiors*, **34**, 1–8.
- DZIEWONSKI, A. M., J. E. FRANZEN and J. H. WOODHOUSE, 1984 b, Centroid-moment tensor solutions for October–December, 1983, *Phys. Earth Planet. Interiors*, **34**, 129–136.
- DZIEWONSKI, A. M., G. EKSTRÖM and M. P. SALGANIK, 1992, Centroid-moment tensor solutions for July–September, 1991, *Phys. Earth Planet. Interiors*, **72**, 1–11.
- DZIEWONSKI, A. M., G. EKSTRÖM and M. P. SALGANIK, 1994a, Centroid-moment tensor solutions for January–March, 1993, *Phys. Earth Planet. Interiors*, **82**, 9–17.
- DZIEWONSKI, A. M., G. EKSTRÖM and M. P. SALGANIK, 1994b, Centroid-moment tensor solutions for July–September, 1993, *Phys. Earth Planet. Interiors*, **83**, 165–174.
- FURUYA, I. and H. SHIMAMURA, 1988, Groundwater microtemperature and strain, *Geophys. J.*, **94**, 345–353.
- IGARASHI, G. and H. WAKITA, 1991, Tidal responses

- and earthquake-related changes in the water level of deep wells, *J. Geophys. Res.*, **96**, 4269-4278.
- 石黒真木夫・佐藤忠広・田村良昭・大江昌嗣, 1984, 地球潮汐データ解析—プログラム BAYTAP の紹介—, 統計数理研究所彙報, **32**, 71-85.
- 石川有三・松村一男・横山博文・松本英照, 1985, SEIS-PC の開発—概要—, 情報地質, **10**, 19-34.
- 板持倫子・小泉尚嗣・西田良平・吉岡龍馬・矢部 征・中尾節郎, 1993, 鳥取—島根県境の地震 (1989~1991 年) 前後の周辺の温泉の水質・水温変化について, 京大防災研年報, **36**, 237-252.
- JACOB, C. E., 1940, On the flow of water in an elastic artesian aquifer, *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, **21**, 574-586.
- 気象庁, 1985, 1984 年 5 月 30 日兵庫県南西部の地震, 地震予知連絡会会報, **33**, 383-388.
- 建設産業調査会, 1984, 地下水ハンドブック, 1537 pp.
- 小泉尚嗣, 1991, 自噴井における地下水温潮汐変化に関する解析—岡山県の西粟倉観測井の場合—, 地震, **2**, **44**, 155-164.
- 小泉尚嗣・中尾節郎・矢部 征・桂 郁男・平野憲雄・西田良平・吉岡龍馬, 1991, 地震予知研究センター鳥取観測所の地下水・地球化学多点観測, 京大防災研年報, **34**, 365-375.
- 小泉尚嗣, 1994, 地殻歪と地殻内流体, 火山, **39**, 169-176.
- KOIZUMI, N., 1993, Frequency dependence of the groundwater discharge at an artesian well as recognized from tidal fluctuation records, *J. Geophys. Res.*, **98**, 825-835.
- 国立天文台, 1994, 理科年表, 丸善, 1037 pp.
- KÜMPFEL, H.-J., 1992, About the potential of wells to reflect stress variations within inhomogeneous crust, *Tectonophysics*, **211**, 317-336.
- MELCHIOR, P., 1960, Die gezeiten in unterirdischen flussigkerten, *Erdoel Kohle*, **13**, 312-317.
- MELCHIOR, P., 1983, The tides of the Planet Earth, 2nd ed., Pergamon Press, 641 pp.
- 三浪俊夫, 1990, 私信.
- NAKAMURA, Y. and H. WAKITA, 1984/85, Precise temperature measurement of groundwater for earthquake-prediction study, *Pure Appl. Geophys.*, **122**, 164-173.
- NOMITSU, T., K. SENO and K. YAMASHITA, 1940, The correlation between the rate of discharge and the pressure head in the Beppu hot springs, 1, The stratified type, *Mem. Coll. Sci., Kyoto Univ.*, Ser. A., **23**, 75-95.
- OKADA, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 1018-1040.
- OZAWA, I., 1957, Study on elastic strain of the ground in earth tides, *Bull. Disas. Prev. Res. Inst.*, Kyoto Univ., **15**, 1-36.
- ROELOFFS, E. A., S. S. BURFORD, F. S. RILEY and A. W. RECORDS, 1989, Hydrologic effects on water level changes associated with episodic fault creep near Parkfield, California, *J. Geophys. Res.*, **94**, 12387-12402.
- ROJSTACZER, S., 1988, Intermediate period response of water levels in wells to crustal strain: Sensitivity and noise level, *J. Geophys. Res.*, **93**, 13619-13634.
- 力武常次, 1976, 地震予知論入門, 共立出版, 212 pp.
- RUDNICKI, J. W., J. YIN and E. A. ROELOFFS, 1993, Analysis of water level changes induced by fault creep at Parkfield, California, *J. Geophys. Res.*, **98**, 8143-8152.
- SATO, T. and H. HANADA, 1984, A program for the computation of oceanic tidal loading effects 'GOTIC', *Publ. 18*, pp. 63-82, *Int. Latitude Obs. of Mizusawa, Japan*.
- SHIMAMURA, H., 1980, Precision Quartz thermometers for borehole observations, *J. Phys. Earth*, **28**, 243-260.
- SHIMAMURA, H., 1984/85, Groundwater microtemperature in earthquake regions, *Pure Appl. Geophys.*, **122**, 933-946.
- 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.
- TAMURA, Y., T. SATO, M. OOE and M. ISHIGURO, 1991, A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion, *Geophys. J. Int.*, **104**, 507-516.
- 鳥取県, 1972, 鳥取県温泉総覧, 鳥取県厚生部, 251 pp.
- 佃 為成・矢部 征, 1981, 鳥取県三朝温泉における地下水温連続観測, 地震予知連絡会会報, **26**, 271-273.
- 佃 為成・矢部 征, 1984, 地震後の温泉温度変化曲線, 地震学会講演予稿集, No. 1, 248.
- 脇田 宏, 1978, 地下水の水位・化学組成変化, 「地震予知の方法」, 浅田 敏編著, 東京大学出版会, 146-166.
- WATANABE, K., 1991, Strain variations of the Yama-saki Fault Zone, South-west Japan, derived from extensometer observations part 2—On the short-term strain variations derived from strain steps—, *Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, **41**, 53-85.
- 山崎断層研究グループ, 1985, 山崎断層の地震 (1984 年 5 月 30 日, *M* 5.6) について, 地震予知連絡会会報, **33**, 355-382.
- 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, 1984, 1983 年 10 月 31 日鳥取県中部の地震に伴う温泉水の異常, 京大防災研年報, **27**, 455-464.
- 湯原浩三・瀬野錦蔵, 1969, 温泉学, 地人書館, 293 pp.