

鳥取一島根県境の地震（1989～1991年）前後の周辺の温泉の 水質・水温変化について

板持 倫子・小泉 尚嗣・西田 良平
吉岡 龍馬・矢部 征・中尾 節郎

TEMPORAL VARIATIONS IN WATER QUALITY AND TEMPERATURE AT HOT OR MINERAL SPRINGS BEFORE AND AFTER SOME EARTH- QUAKE OCCURRENCES NEAR THE BORDER OF TOTTORI AND SHIMANE PREFECTURES (1989-1991)

By *Michiko ITAMACHI, Naoji KOIZUMI, Ryohei NISHIDA,*
Ryuma YOSHIOKA, Sei YABE and Setsuro NAKAO

Synopsis

Temporal variations in water quality and temperature at 5 hot or mineral springs (Tamatsukuri, Yuda, Sekigane, Yoshioka and Yudani) in Tottori and Shimane Prefectures have been observed for geochemical research for earthquake prediction.

Since October, 1989, the seismicity have been active near the border of Tottori and Shimane Prefectures. We carefully estimated the contribution of meteorological factors and earthquakes to the water quality and temperature and found the water quality at the Yoshioka hot spring and water temperature at the Yudani hot spring are sensitive to earthquake occurrences. Especially at Yoshioka hot spring, the Cl^- concentration was anomalously increased just before the earthquake (M 5.9) on August 28, 1991 in the eastern part of Shimane Prefecture.

We conclude that measurement of water quality and temperature at a carefully chosen hot or mineral spring should give information useful for earthquake prediction.

1. は じ め に

地震に伴う温泉水の異常現象は古くから記録されている。例えば、1923年関東大地震 (M=7.9) の直前に熱海大湯の間欠泉の噴出量が増加したことや、1946年南海道地震 (M=8.1) の前に紀伊半島から四国にかけての広い範囲で温泉水・地下水の湧出激減・停止が認められたことなどはよく知られている事実である¹⁾。ゆえに、近年の地震予知研究においても、温泉水の観測・研究が取り入れられてきた。

1977年3月10日から京都大学防災研究所により、山崎断層テストフィールドにおける地震予知研究の一環として兵庫県南西部に位置する塩田温泉で、塩化物イオン（塩素イオン）濃度を中心とした水質分析が行われてきた。そして、同断層付近で発生した地震に伴う塩化物イオン濃度の変化が観測された。1977年9月30日の地震 (M=3.7: M は地震のマグニチュード) では、発生前10～14日に温泉中の塩化物イオン濃度が顕

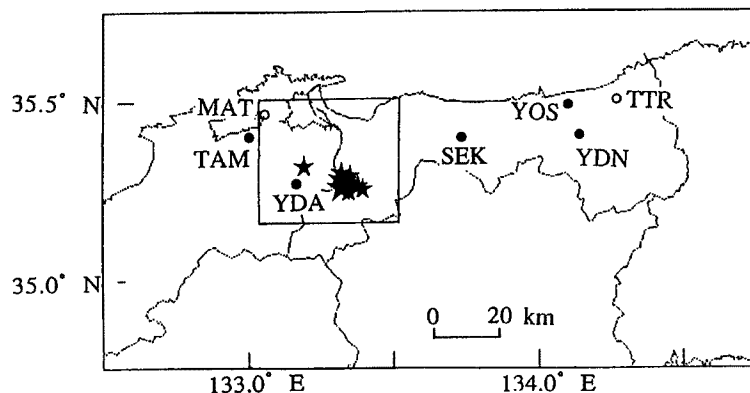


Fig. 1. Location of the observation stations and epicentral distribution near the border of Tottori and Shimane Prefectures.

★: Epicenter ($M \geq 4.0$),

○: Local Meteorological Observatory (TTR: Tottori, MAT: Matsue),

●: Observed hot or mineral springs (TAM: Tamatsukuri, YDA: Yuda, SEK: Sekigane, YOS: Yoshioka, YDN: Yudani).

著に減少した。また、1979年10月13日 ($M=4.3$) および同年12月28日 ($M=4.9$) の地震でも発生前後に塩化物イオン濃度は顕著な変化を示した^{2),3)}。鳥取・島根両県においても、1980年以降いくつかの温泉で水質・水温の連続観測を、鳥取大学と京都大学が共同で行っている。1983年10月31日の鳥取県中部の地震 ($M=6.2$) の際には12ヶ所の温泉水の塩化物イオン濃度の変化が観測され、地震が地下水に影響を及ぼすことがわかった⁴⁾。

鳥取・島根県境の付近は、1989年から1991年にかけて、マグニチュード5～6クラスの地震活動がほぼ1年毎に発生した。この地域の地震は地殻上部で発生していて、地震機構の解析から、ほとんどの地震は横ずれ断層型を示し、上述の山崎断層の地震や鳥取県中部の地震と同タイプの地震である⁵⁾。そこで、鳥取県の玉造温泉・湯田温泉と鳥取県吉岡温泉・関金温泉・湯谷温泉の5つの温泉を選び (Fig. 1), 1989年から1991年にかけて発生した地震活動に伴って、水質・水温が変化するかどうかを調べ、温泉観測による地震前兆現象検出の可能性を探ってみた。

2. 観測点の概要

鳥取県・島根県には、数多くの温泉が存在する。よく知られている温泉地を挙げてみても、東から岩井・鳥取・吉岡・浜村・鹿野・東郷・浅津・三朝・関金・皆生・松江・玉造・湖陵・出雲湯村・三瓶・有福など16ヶ所以上ある。

温泉といえば、概して「火山」「火山帯」と結びつけて考えやすく、実際に火山周辺に温泉の湧出をみることができる。しかし、山陰地方の温泉は、三瓶温泉などを除くと火山との直接の関連性は認めがたく、地質構造からいえば、火成岩 (小鴨型優白ペグマタイト質黒雲母花崗岩類および鉛山型石英閃緑岩類) の岩塊の分布するところに存在し、かつ、これら半深成ないし深成の火成岩類の大きな侵入岩体が、新期の地層に被われていても、古期岩石類を貫いて、これらの侵入岩塊が高まり盛り上がってドーム状ないし背斜状を作っている部分に温泉水の湧出がみられる。このほかに温泉の存在する条件に断層不透水壁の形成と地下水を地表まで送るための断層・破碎帯などの割れ目の存在も必要である⁶⁾。また、鳥取県の温泉地の調査および解析によると、上記の3条件の他に割れ目系として新旧2系統があること、周辺に新第三紀鮮新世ないし第四紀火山岩類が分布していること、浅層地下水が豊富に存在することも必要であるとしている⁷⁾。

今回、玉造・湯田・関金・吉岡・湯谷の5つの温泉地で観測を行った。これらの温泉地の地質構造・歴史等について次に述べる。なお、観測井はいずれも旅館や個人が使用しているものを使わせてもらっている。

2.1. 玉造温泉

島根県の代表的な温泉の1つで、八束郡玉湯町にあり、奈良時代に始まったという長い歴史をもつ温泉地である。この温泉の熱源は、新第三紀中新世に噴火した安山岩のマグマに関連したものと考えられている。地下20～100mの比較的浅い基盤の花崗閃緑岩の割れ目系に沿って上昇し、中新統久利層、川合層の礫岩、砂岩に滞湯して、露出岩盤から自然湧出している自噴泉である。塩化物イオン(Cl^-)が少なく、硫化物イオン(SO_4^{2-})が多く、相対的に $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} + \text{CO}_2$ が少ないのが特徴的である。Na・Ca硫酸塩・塩化物泉で、水温は70度前後である⁸⁾。玉造温泉には、1964年の島根県工業試験所の調査によると16の泉源が確認されている。1980年11月から観測している泉源も自噴泉である⁴⁾。

2.2. 湯田温泉

島根県安来市の南方の山間にある。観測している泉源は自噴泉である。1991年8月28日の島根県東部の地震(M=5.9)の震央にごく近いので(Fig. 1)、地震発生後の1991年9月から観測を開始した。

2.3. 関金温泉

関金温泉は、鳥取県東伯郡関金町関金宿にあり、蒜山の北側山麓の谷間に分布している。周辺の地質は、下位から鳥取花崗岩、第三紀中新世後期の流紋岩、第四紀洪積世の蒜山安山岩および大山火山岩類からなる。温泉地区では、鳥取花崗岩を主体とし、ところどころこれを貫く安山岩および玄武岩の岩脈と、花崗岩を直接覆う厚さ10m内外の沖積層が分布している。また、関金温泉は花崗岩の割れ目から湧出する裂か泉である。主成分として、 Na^+ 、 Cl^- を、副成分として、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 等を含む食塩泉系の温泉であるが、溶存物質総量が400～700mg/kgであるため単純泉に属し、平均水温は、43度前後である。1970年3月、国から保養温泉地の指定を受け、同町は、これを契機に、1970年4月、関金町温泉使用条例を制定し、温泉の集中管理に着手するとともに、資源の開発を行っている。泉源の数は19個確認されている⁷⁾。この温泉地では1980年12月から水質の観測を行なっているが⁴⁾、現在の泉源での観測は1990年8月から開始した⁹⁾。

2.4. 吉岡温泉

鳥取市吉岡温泉町にあり、鳥取県では、岩井温泉とともに最も歴史の古い温泉地である。周辺の地質は下位から鳥取花崗岩、鳥取南部火山岩類、吉岡花崗岩、鳥取層群および鮮新世火山岩類から構成されている。温泉地区では新第三系を欠き、層厚10m内外の沖積層が直接花崗岩を覆っている。沖積層は、3～11mの厚さで分布している。温泉水は、吉岡花崗岩に発達する割れ目系に沿って上昇し、一部は沖積層を流動している。近くには吉岡断層があるが、温泉水の湧出との直接関係は定かではない。熱源は付近の基盤岩の変質の状態から新第三系の三徳累層か、白兔礫層以前の三朝層群などの新期火山岩類が考えられているが、現在のところ判っていない。主成分は、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} を、副成分としては HCO_3^- を含有し、硫酸塩系の温泉に属しているが、溶存物質総量が400～600mg/kgと少ないため、単純泉となっている。元々は地下数メートルからの自噴泉であったが、泉源の新規掘さくがなされたり、揚湯ポンプが取り付けられたりして、集中管理方式が取られるようになった。水温は50度前後である。泉源の数は8つ確認されている^{7,10)}。ポンプにより常時揚湯されている、株湯とよばれる泉源で1980年11月から観測しており、1983年10月31日の鳥取県中部の地震(M=6.2)の際には顕著な水質変化を示した⁴⁾。

2.5. 湯谷温泉

鳥取県八頭郡河原町にある。千代川支流の曳田川左岸の狭い谷の奥にあり、湧出する範囲もせまい。地区

内には6源泉が分布しているが、川の側、民家の庭において、自噴して温泉地の形態はしておらず、雑用水および民家の浴用に利用されているだけである。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いる。食塩泉系の温泉に属しているものの、蒸発残渣が 570~2700 mg/kg であることから、単純泉と含重曹食塩泉に分けられている。水温は34度前後である⁷⁾。観測している泉源は、民家の庭に自噴している。

この温泉では、1983年~1984年に精密水温（精度 1/100°C）の測定を行っていた。その際、4つの地震（1. 日本海中部の地震（1983年5月26日、M=7.7）、2. 大分県北部やや深発地震（1983年8月26日、M=6.8）、3. 鳥取県中部の地震（1983年10月31日、M=6.2）、4. 山崎断層の地震（1984年5月30日、M=5.6））に対して顕著な水温変化を示している^{4),11)}。

3. 観測の方法

各観測点で水の電気伝導度・水温の連続観測を行った（開始時期は異なる）。また、玉造・吉岡では、1日1回の塩化物イオン濃度の測定を行った。湧谷温泉では精密水温測定（精度 0.001°C）も行なっている。これらの温泉の水質・水温変化の要因として、気温・気圧・降水量および地震の震度を考え、それらについても資料を集めた。

3.1. 塩化物イオン濃度について

水質のモニターとして塩化物イオン濃度を採択したのは、1. 温泉において一般的に含まれていること、2. 化学的に安定なこと、3. 分析方法が手軽であることといった理由による³⁾。塩化物イオン濃度の分析は、1989年以降のサンプルについては、東亜電波社製の塩分分析計 SAT-1 を用いて行った。1983~1984年の塩化物イオン濃度の値は吉岡・他⁴⁾により、その測定方法はモール銀滴定法を用いている。

SAT-1 の測定原理は水溶液中の銀イオン (Ag^+) と塩化物イオン (Cl^-) との中和反応を基本とした電量滴定法を採用している。電解液中で銀電極、電解用銀線間に一定値の電流を流し、100%の電流効率で電解用銀線から銀イオンを発生させ、塩化物イオンがなくなるまでに要する電氣量を測定し、ファラデーの法則から塩分量を求め、その塩分量から塩化物イオン濃度を求める。ファラデーの法則は次式で表される。

$$m = Mit/Fn \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 m は目的物質の量 (g)、 M は目的物質の分子量または原子量、 i は定電流電解の電流値 (A)、 t は電解時間 (秒)、 F はファラデー定数 (96487 C)、 n は電極反応に関係した電子数である。ここで、注意が必要なのは、この測定原理だと、塩化物イオン (Cl^-) とだけでなく、フッ素イオン (F^-)・臭素イオン (Br^-)・碘素イオン (I^-) とも銀イオンが反応する結果、それらを含んだ量を塩化物イオン濃度の値とする可能性があるということである。しかし、日本の温泉水の平均水質組成によると¹²⁾、 Cl^- (1,250 mg/l) に比べて F^- (1.9 mg/l) は非常に少なく、それ以上に Br^- 、 I^- も少ない。すなわち、($\text{Cl}^- \gg \text{F}^- > \text{Br}^-$, I^-) なので、 Cl^- の濃度の変化をみるのに妨害にはならないと考えられる。なお、玉造・吉岡・湯谷の各温泉水のイオン全分析の結果を Table 1~3 に示す。

SAT-1 を使った塩化物イオン濃度分析の再現性から計算された精度は 2.2 mg/l 程度である。しかし、1989年から1992年のサンプルを、1992年の3月から12月にかけて分析していたので、古いサンプルほど保存期間中の水の蒸発に伴う濃縮等のために、分析精度が低下した場合もあると考えられる。サンプルは現地の人が、1日1回 250 cc のポリ容器に採水したものを、1~2カ月に1回、研究室に送ってもらった。

3.2. 水の電気伝導度と水温について

水の電気伝導度は、水中の総イオン濃度と対応し、長期にわたって連続測定ができる。だから、水質が変化するときには電気伝導度が変化することが期待できるので、水質の1つの指標となっている⁹⁾。水の電気伝

Table 1. Chemical composition of Tamatsukuri (TAM) hot spring water

Sampling Date	W. T. °C	pH	K ⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l
1980.09.20	70.0	8.2	13.5	432	135	2.4	222	870	22.5
1989.01.16	—	—	11.5	370	—	3.0	227	870	37.5
1990.01.17	—	—	11.7	360	—	3.0	224	860	36.9
1991.01.17	—	—	11.7	370	—	3.0	221	880	37.5
1992.01.01	—	—	11.4	360	—	3.0	221	830	35.8
1992.10.10	—	—	11.9	360	—	2.5	224	825	34.1

W. T. means the water temperature.

Table 2. Chemical composition of Yoshioka (YOS) hot spring water

Sampling Date	W. T. °C	pH	K ⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l
—*1—	—	7.7	15.3	91.0	18.7	0.5	67.5	88.3	101
1989.01.16	—	—	2.5	104.9	16.3	0.6	69.0	100.0	116
1990.01.12	—	—	2.5	105.8	13.8	0.6	72.0	103.5	119
1991.01.16	—	—	2.3	108.9	14.5	0.6	70.0	100.5	123
1992.01.01	—	—	2.3	105.5	13.8	0.4	70.0	99.0	115

*1 After Tottori Prefecture⁷⁾

Table 3. Chemical composition of Yudani (YDN) hot spring water

Sampling Date	W. T. °C	pH	K ⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l
1980.09.18	33.1	6.4	40.5	790	55.4	3.5	855	95	954

導度は、通常、2%/°C で変化するため、JIS 規格では、25°C の値に換算することになっている。一般に、雨水の電気伝導度は 5～50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、河川水では 30～300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、海水では 20,000～50,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ くらいである¹²⁾。測定には、東亜電波社製の電気伝導度計 (CM-20S または CM-40S) を用いた。測定精度は玉造・湯谷で約 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、それ以外の観測点で約 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ である。なお、吉岡・湯谷温泉では、欠測等でデータの質が悪いので、本論文では電気伝導度の測定結果については言及しない。

水温は、サーミスターによって測定した。測定精度は 0.1°C 程度である。湯谷ではさらに、東京電波社製の水晶発信式水温計（高分解能クォーツ温度計 DMT600）を用い、相対的な測定精度 1/1000°C の精密水温測定を1991年9月1日に開始した。

各観測点の電気伝導度および水温のセンサーの位置は以下の通りである。玉造温泉では、泉源からパイプで配管された湧出口での水面下約 20 cm のところ、湯田温泉では湧出口での水面下 2～30 cm のところ、関金温泉ではボーリング孔内の水中ポンプ付近の水面下約 20 cm のところ、吉岡温泉では湯口付近の配管のところ、湯谷温泉では電気伝導度計と水温のセンサーは湧出口での水面下約 30 cm、精密水温のセンサーは湧出口での水面下約 2.3 m のところである。湯谷温泉において、水温のセンサーが水面近くに置いてあるのに対し、精密水温のセンサーは 2.3 m 程度の深さに設置してある。これが、水温と精密水温に 1°C 弱の差がでる原因の 1 つである。ただ、精密水温計の方が水温計より温度の絶対値はやや高めに表示されるようである。

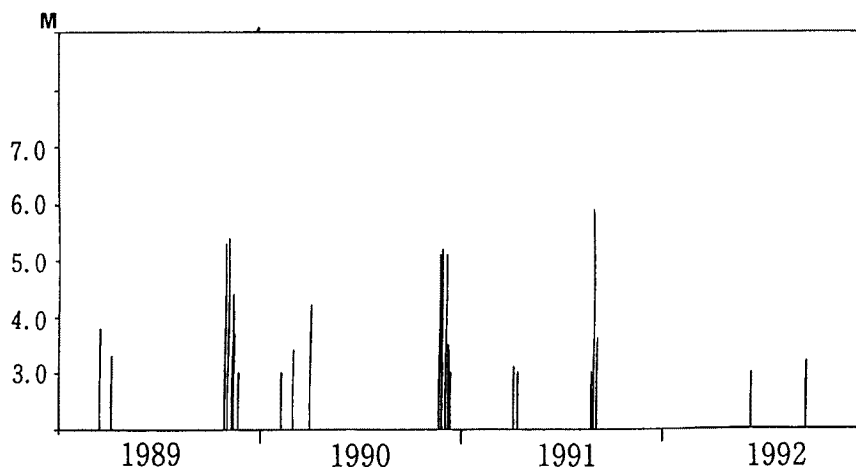


Fig. 2. Time series of the earthquakes ($M \geq 3.0$) within the box in Fig. 1.

電気伝導度・水温の連続データは、1時間に1回、デジタルデータレコーダーに記録するとともに、打点レコーダーでアナログ記録している。後に示す電気伝導度・水温のグラフは24時間平均値を原則として用いる。しかし、デジタルデータレコーダー不良の時は、打点レコーダーの午前0時の値を読みとって用いている。

3.3. 気象データについて

松江地方気象台の気象月報¹³⁾と鳥取地方気象台の気象月報¹⁴⁾から、それぞれ1日の平均気温($^{\circ}\text{C}$)、平均気圧(hPa)、日雨量(mm/day)を利用した。玉造温泉・湯田温泉では松江地方気象台の記録、関金温泉・吉岡温泉・湯谷温泉では鳥取地方気象台の記録を現地の気象データとした。ここで、気温は1日8回測定(3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24時に測定)の平均値、気圧は1日4回測定(3, 9, 15, 21時に測定)の平均値で、降水量は1日の合計値である。

3.4. 地震のデータについて

鳥取一島根県境の地震の震源のデータ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データを用いた。それ以外の地震の震源データは気象庁のデータを用い、地震分布・時系列等の作図が出来るソフト「SEIS-PC」¹⁵⁾を利用した。また、鳥取・松江の震度のデータは気象庁の地震月報¹⁶⁾、大阪管区気象台の管内地震活動図¹⁷⁾および松江と鳥取の地方気象台の気象月報^{13), 14)}のデータを用いた。対象とした鳥取一島根県境の地震の震央範囲をFig. 1中で枠で囲み、その範囲で発生したM3以上の地震の時系列をFig. 2に示す。

4. 観測結果

各温泉での塩化物イオン濃度の時間変化と水の電気伝導度・水温(精密水温)・気温・気圧および降水量のグラフを示す(Figs. 3-7)。また、Figs. 3, 4では松江の有感地震(震度2以上)を、Figs. 5-7では鳥取での有感地震(震度2以上)をそれぞれ矢印で示した。解析した期間は、玉造温泉は1989年1月1日から1992年10月まで、湯田温泉は1991年9月から1992年10月まで、関金温泉は1990年8月から1992年10月まで、吉岡温泉は1989年1月から1992年11月まで、湯谷温泉は1990年8月から1992年10月までである。玉造温泉や湯田温泉では水温の欠測時期があるので、JIS規格で決められている電気伝導度の温度補償(25°C 換算)はして

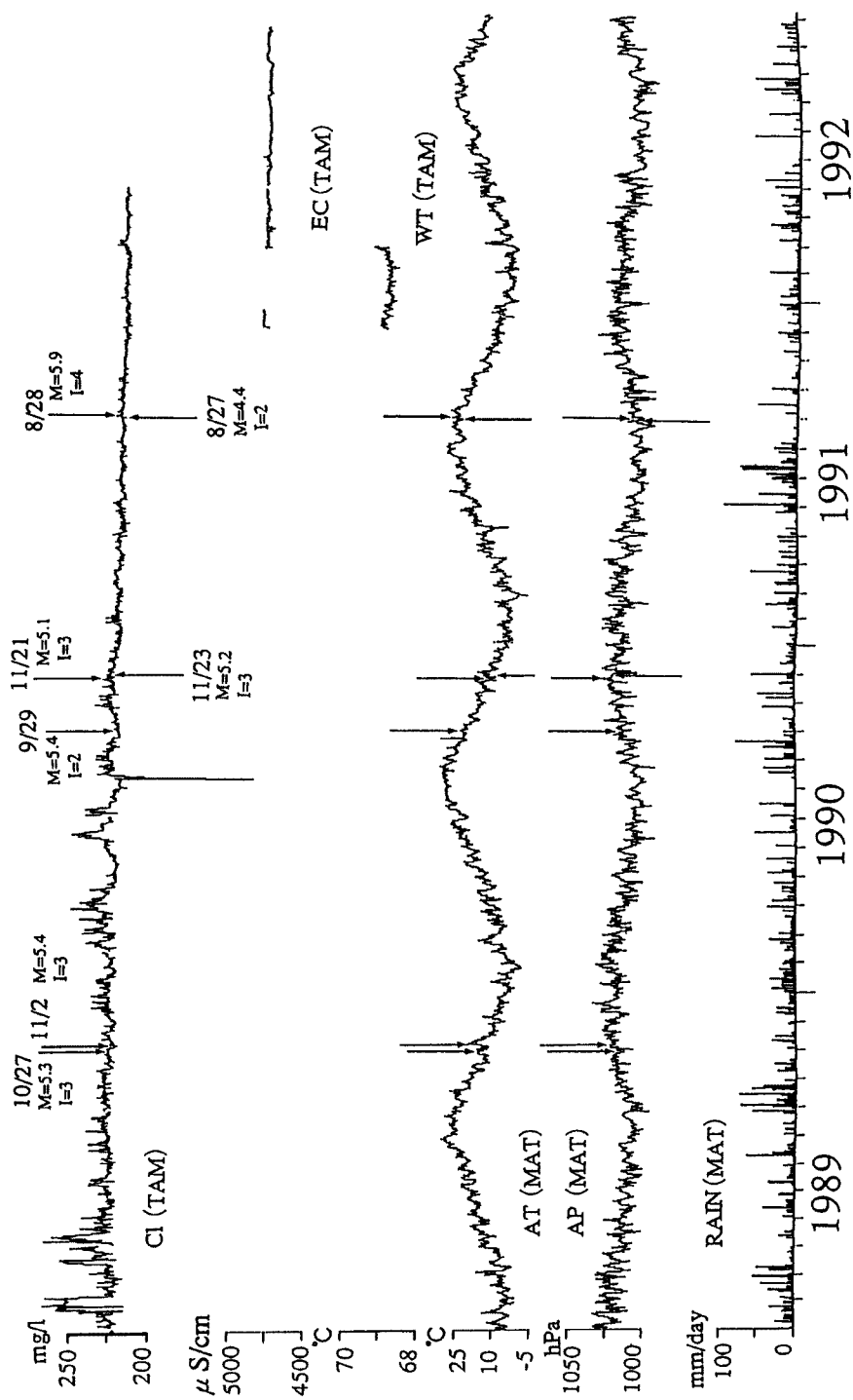


Fig. 3. Results of continuous measurement of Cl^- concentration (CI), electrical conductivity (EC), water temperature (WT) of the groundwater, atmospheric temperature (AT), atmospheric pressure (AP) and rainfall (RAIN) at Tamatsukuri observation station (TAM) and Matsue Meteorological Observatory (MAT). Arrows show felt earthquakes whose intensities (I) are 2 or greater at Matsue Meteorological Observatory.

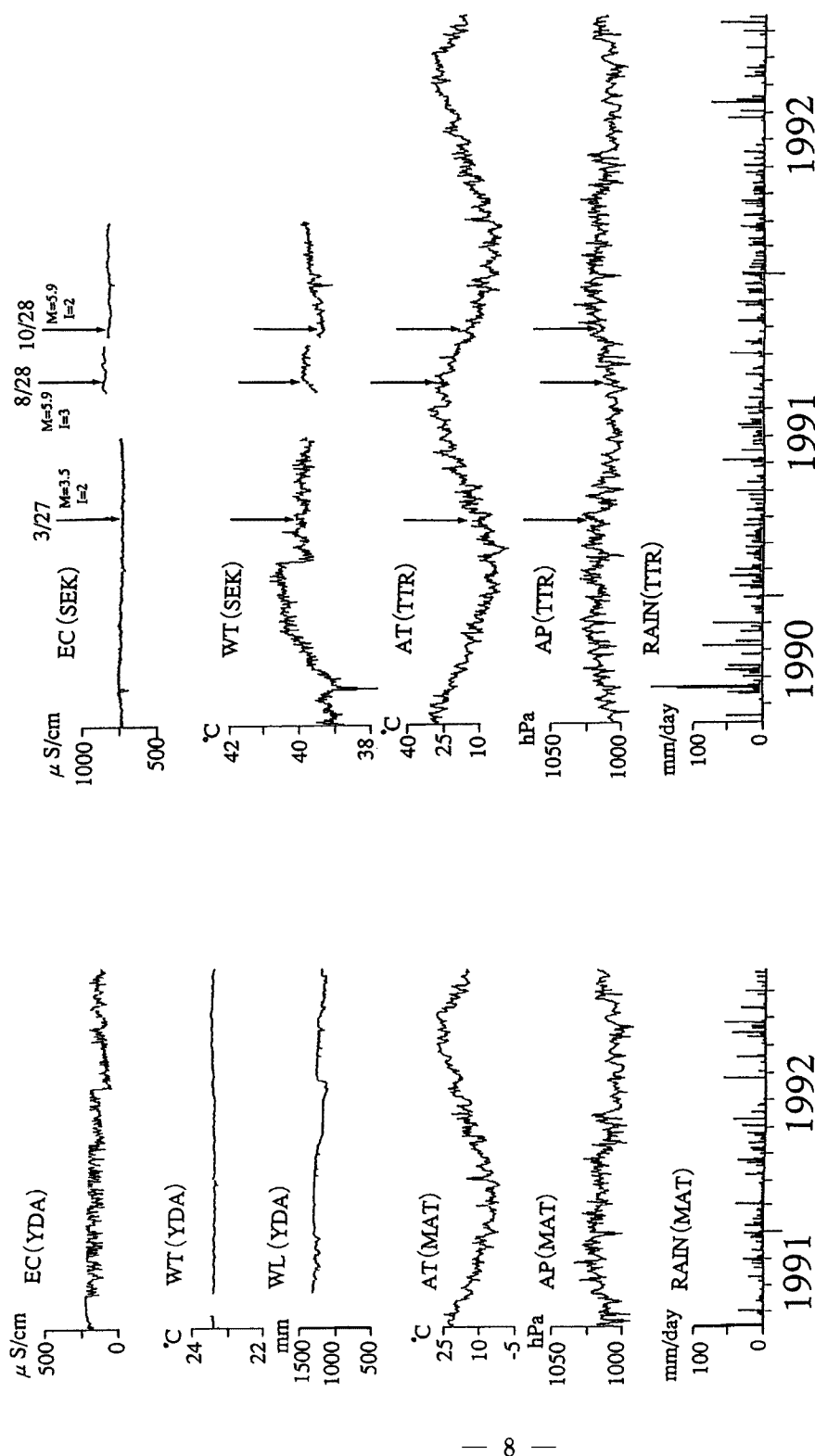


Fig. 4. Results of continuous measurement at Yuda observation station (YDA) and Matsue Meteorological Observatory (MAT). WL means the water level. As to the other symbols, refer to the Figure 3 caption.

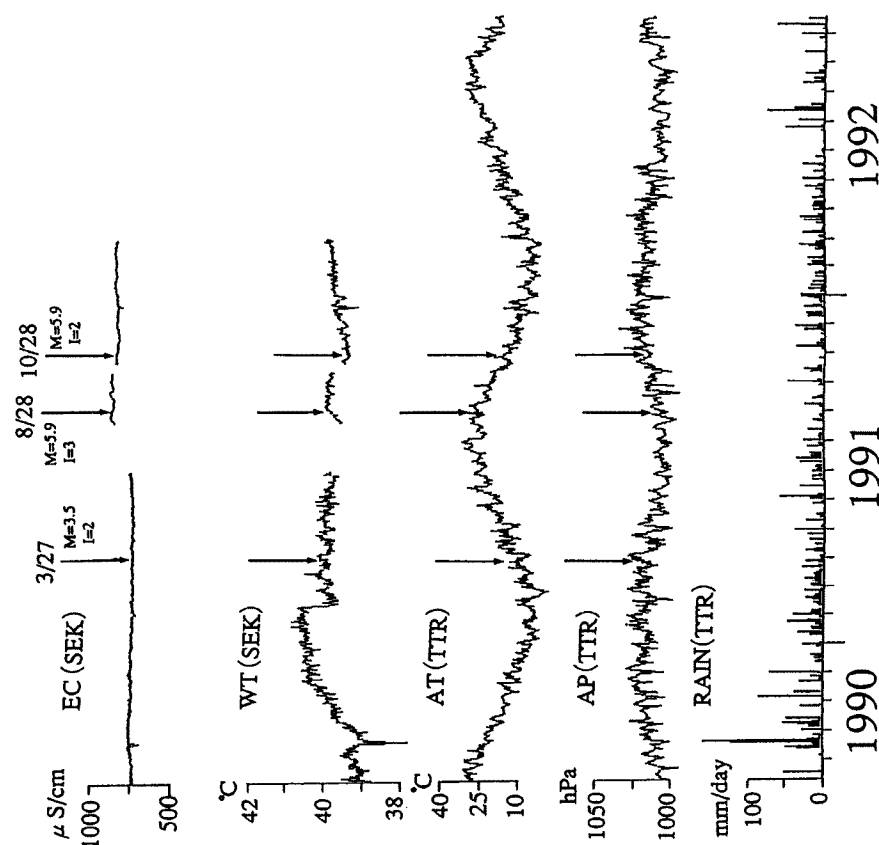


Fig. 5. Results of continuous measurement at Sekigane observation station (SEK) and Tottori Meteorological Observatory (TTR). Arrows show felt earthquakes whose intensities (I) are 2 or greater at Tottori Meteorological Observatory. As to the other symbols, refer to the Figure 3 caption.

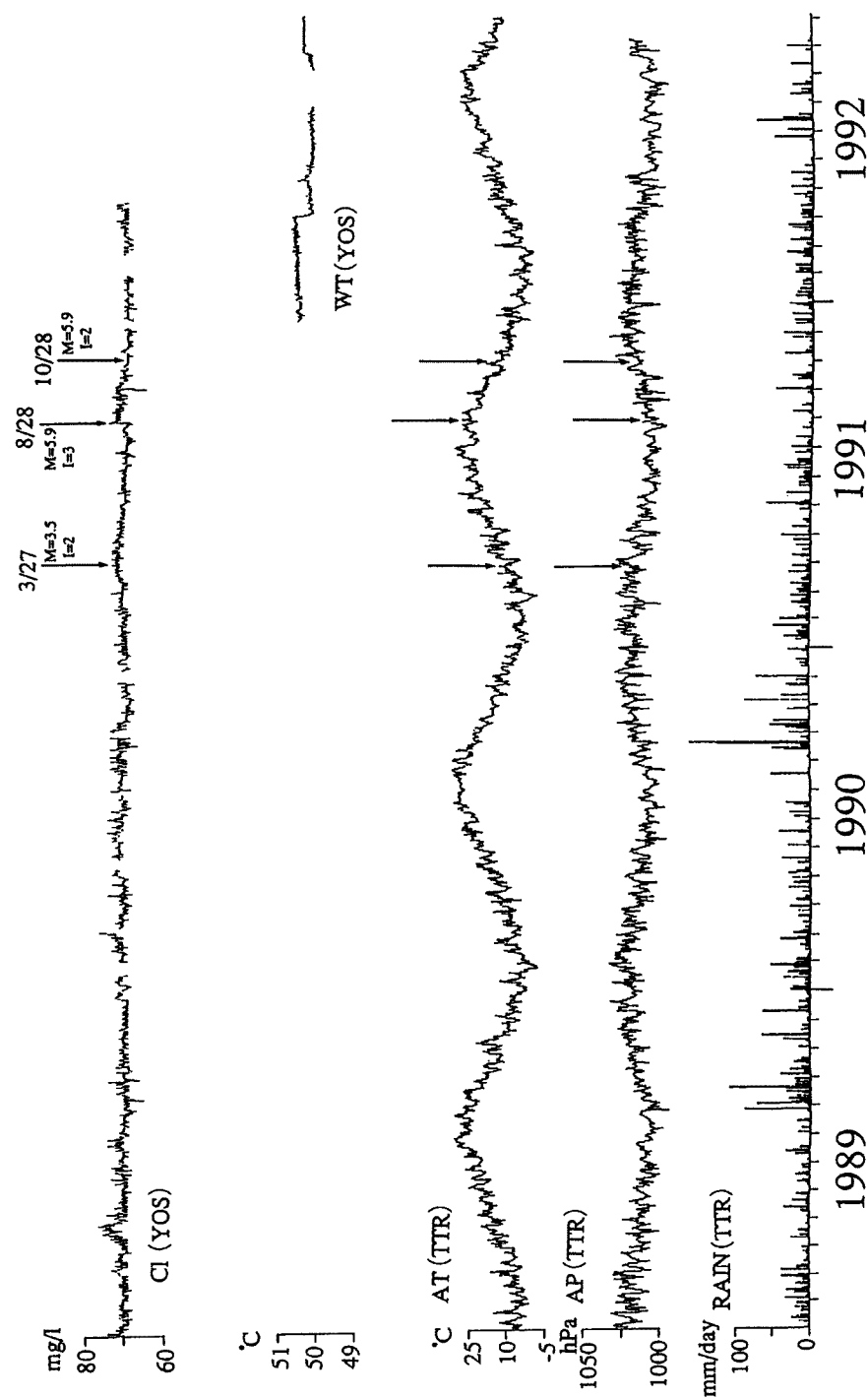


Fig. 6. Results of continuous measurement at Yoshioka observation station (YOS) and Tottori Meteorological Observatory (TTR). Arrows show felt earthquakes whose intensities (I) are 2 or greater at Tottori Meteorological Observatory. As to the other symbols, refer to the Figure 3 caption.

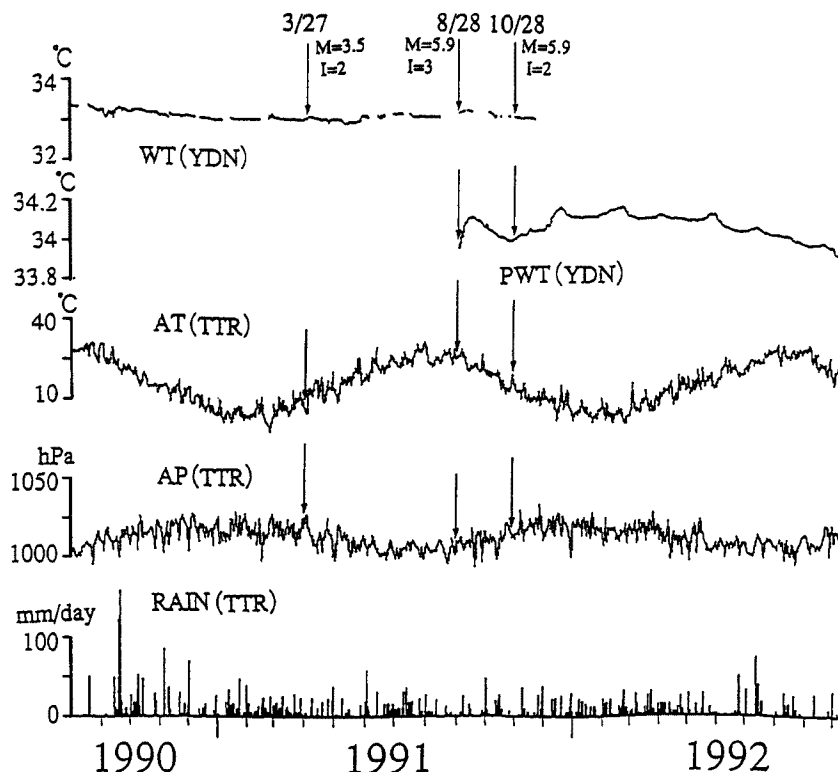


Fig. 7. Results of continuous measurement at Yudani observation station (YDN) and Tottori Meteorological Observatory (TTR). PWT means the precise groundwater temperature. Arrows show felt earthquakes whose intensities (I) are 2 or greater at Tottori Meteorological Observatory. As to the other symbols, refer to the Figure 3 caption.

いないが、この両観測点では、(観測している期間内では)水温はほぼ一定であり(Figs. 3, 4)、水温変動による電気伝導度変化は無視して良いと考えることができる。なお、精密水温(相対的な測定精度 1/1000°C)を測っているのは、湯谷温泉だけであるため、他の4つの観測点の微妙な水温変化を見落としている可能性があることをつけ加えておく。

4.1. 玉造温泉の結果 (Fig. 3)

塩化物イオン濃度は1989年から1992年まではほぼ一定で季節変化もない。1989年～1990年前半は、上向きスパイク状変化が多数認められる。また、1990年8月には下向きのスパイク状の変化が認められる。電気伝導度もほぼ一定の値をとっている。水温は、1991年12月から1992年2月のデータしかないが、気温とよい相関がみられる。これは温泉水が湧出してから配管を通して、測定場所に来るまでに、外気温の影響を受けて変化したものであると考え、泉源の温度が変化したものではないと考えた。少なくとも、1991年以降のデータでは、塩化物イオン濃度・電気伝導度は一定で、気象要素や地震の影響は認められない。

4.2. 湯田温泉の結果 (Fig. 4)

この温泉では、自噴した温泉水を水槽に溜めておき、必要に応じて水中ポンプで水槽内の温泉水を揚水し、旅館の方へ送るシステムを用いている。揚水すると湧出口は(水槽内の)水面よりも上になるが、水槽が温泉水で一杯になってオーバーフローするようになると(その時点での底からの水位は約 1.3 m)、湧出口が水面よりも下(約 30 cm)になる。それに伴って、水温や電気伝導度のセンサーの水面からの距離が異なると

水温や電気伝導度の値に見かけ上の変化をもたらし得るし、自噴量変動することも考えられる。したがって、この水槽内の水位(WL)をモニターしている(水位変化そのものには意味はない)。実際、この水位変化にともなう、水温の値が変化することが判明したので、Fig. 4 の電気伝導度・水温・水位の値は揚湯の行われることの少ない午前0時の瞬時値を用いている。

電気伝導度(EC)の値が大きくばらつくのは、温泉水に含まれるガスの気泡が電気伝導度のセンサーに付着しては離れるためである。この結果、他の要因による電気伝導度変化の検出はむずかしい状況にある。水温の値はほぼ一定で、気象要素の影響は認められない。湯田温泉の観測開始以来、松江で震度2以上の地震は発生していないので地震との関連は不明である。

4.3. 関金温泉の結果(Fig. 5)

電気伝導度はほぼ一定である。1991年7月～8月の欠測前後で値が変化しているが、この原因は不明である。水温は、水中ポンプによる揚湯の影響でばらつきが大きい。1990年9月19日の台風19号による大雨・気圧の急変の時、水温・電気伝導度がスパイク状に変化した。その後、水温はゆっくりと上昇し、1991年2月初めにステップ状に約 1°C 減少した。この後の水温の変化と地震発生とは関係があるようにも見えるが、上述の揚湯の水温に与える寄与が不明なため、因果関係ははっきりしない。

4.4. 吉岡温泉の結果(Fig. 6)

塩化物イオン濃度は全体としてほぼ一定で、季節変化もない。しかし、1991年8月27日、28日の地震の直前に 5 mg/l 増加し、その後、ゆっくり減少した。これについては後で議論する。水温はほぼ一定であるが、1992年3月31日から4月1日にかけて、 0.5°C 程度ステップ状に減少した。この原因は不明である。

4.5. 湯谷温泉の結果(Fig. 7)

水温は年間を通じてほぼ一定の値をとり、季節変化もみられないが、精密水温でみると季節変化をしている可能性がある。1991年8月27日、28日の地震時わずかに増加し、その後ゆっくりと元に戻った。その水温変化は、精密水温のデータに明瞭に粗われている。これについても後で議論する。

5. 考 察

気象要素・地震が温泉の水質・水温に与える影響を見るため、以下で議論する。ただし、観測期間の短い湯田と、揚湯の影響でノイズが多く欠測期間も長い関金を省く3つの観測点(玉造・吉岡・湯谷)の結果についてのみ考察する。

5.1. 気象要素・地震の震度と温泉の水質・水温変化

温泉の水質・水温変化の要因として、気温の急変・気圧の急変・降水量・地震の震度の4つを考える。それらの発生頻度をTable 4～7に示し、そのうち水質・水温変化に対応づけられるものの数を括弧内に示した。水質・水温の変化を上述の要因に対応づける基準を以下のように定めた。気温・気圧の急変、降水、地震があった日の当日を含めて前後2日、合計5日間に塩化物イオン濃度ならば、玉造温泉で 15 mg/l 以上、吉岡温泉で 5 mg/l 以上、また、水温ならば、 0.3°C 以上、精密水温ならば、 $30\text{ m}^{\circ}\text{C}$ 以上、また、電気伝導度ならば、 $300\text{ }\mu\text{s/cm}$ 以上の変化があると、両者が対応づけられると判断するのである。ただし、変化したデータが1つだけしかない場合は信頼性に欠けるとして除外した。以上に述べた水質・水温変化の基準は、各測定項目の精度とデータのばらつき(標準偏差)を比べてその大きい方の2～3倍を目安にして定めたものである。ただし、塩化物イオン濃度の変化に関しては、玉造温泉の塩化物イオン濃度が、吉岡温泉の塩化物イオン濃度の3倍程度の値なので、それを考慮した。気象要素および地震の震度のデータを用いるとき、

Table 4. Frequency Distribution of rainfall and of related water quality and temperature variations

Site	50~75 (mm/day)	75~100 (mm/day)	100~ (mm/day)
TAM	14 (0)	2 (0)	0 (0)
YOS	9 (0)	2 (0)	2 (1)
YDN	6 (0)	1 (0)	2 (0)

Table 5. Frequency Distribution of atmospheric pressure variations and of related water quality and temperature variations

Site	12~14 (hPa)	14~16 (hPa)	16~18 (hPa)	18~20 (hPa)	20~(hPa)
TAM	11 (2)	4 (0)	0 (0)	2 (0)	0 (0)
YOS	17 (0)	4 (0)	1 (0)	0 (0)	1 (0)
YDN	8 (0)	2 (0)	1 (0)	0 (0)	1 (0)

Table 6. Frequency Distribution of atmospheric temperature variations and of related water quality and temperature variations

Site	5~7.5 (°C)	7.5~10 (°C)	10~12.5 (°C)	12.5~(°C)
TAM	15 (0)	4 (0)	0 (0)	1 (0)
YOS	47 (0)	4 (0)	0 (0)	0 (0)
YDN	22 (1)	2 (0)	0 (0)	0 (0)

Table 7. Frequency Distribution of seismic intensity and of related water quality and temperature variations

Site	1	2	3	4	5~
TAM	5 (0)	4 (0)	4 (0)	1 (0)	0 (0)
YOS	5 (0)	2 (0)	1 (1)	0 (0)	0 (0)
YDN	4 (0)	2 (0)	1 (1)	0 (0)	0 (0)

玉造温泉は松江のデータを、吉岡温泉・湯谷温泉は鳥取のデータを用いた。

まず、降水量との対応をみる。便宜的に、1) 50 mm/day 以上 75 mm/day 未満、2) 75 mm/day 以上 100 mm/day 未満、3) 100 mm/day 以上、の3つの規模の降水量を定め、その発生頻度を **Table 4** に示す。なお、2日以上続けて 50 mm/day 以上の降雨がある場合は、1回として数えている。玉造温泉においては、降水量と塩化物イオン濃度との関連はみられない。吉岡温泉においては、1990年9月18日から19日にかけて、台風19号による 200 mm/day を越える降水があったときに塩化物イオン濃度が 5 mg/l 増加した。湯谷温泉においては、水温・精密水温と降水量との関連はみられない (**Table 4**)。

次に、日平均気圧との対応をみた。上記と同様、便宜的に、1) 12 hPa 以上 14 hPa 未満、2) 14 hPa 以上 16 hPa 未満、3) 16 hPa 以上 18 hPa 未満、4) 18 hPa 以上 20 hPa 未満、5) 20 hPa 以上の5つの規模の日平均気圧変化量を定め、その発生頻度を **Table 5** に示した。玉造温泉において、気圧の変化に伴って、塩化物イオンの濃度の変化が2度みられるが、日平均気圧変化量 (12~14 hPa) の発生頻度 (11回) に比べて、塩化物イオン濃度変化の発生頻度が少なく、また、塩化物イオンの濃度に関連があるとした日平均気圧

変化量よりも大きな気圧変化のときに塩化物イオン濃度が変化していない。したがって、気圧変化が原因で玉造温泉の塩化物イオン濃度が実際に変化したとは考えにくい。吉岡温泉・湯谷温泉においては共に、気圧と塩化物イオン濃度・水温との関連はみられない (Table 5)。

次に、日平均気温変化量との対応をみた。上記と同様、便宜的に、1) 5.0°C 以上 7.5°C 未満, 2) 7.5°C 以上 10.0°C 未満, 3) 10.0°C 以上 12.5°C 未満, 4) 12.5°C 以上 15.0°C 未満の4つの規模の日平均気温変化量を定め、その発生頻度を Table 6 に示した。玉造温泉・吉岡温泉においては共に気温と塩化物イオン濃度との関連はみられない。湯谷温泉においては、1991年8月28日のみ精密水温との関連がみられた。しかし、この変化は地震活動と重なっている。地震と重なっていない日は全く変化がみられないので、気温と水温との関連はないものとする (Table 6)。

次に、地震活動との対応をみた。地震のパラメーターとしては、単純に震度を選び、上記と同様に、1) 震度1, 2) 震度2, 3) 震度3, 4) 震度4, 5) 震度5以上の5つの規模の地震に分類し、その発生頻度を Table 7 に示した。ただし、玉造温泉の震度として松江の震度を採用し、吉岡・湯谷温泉の震度として鳥取の震度を採用した。なお、震度の異なる地震が同じ日に発生した場合は、大きい震度の地震のみを数えた。玉造温泉においては地震との関連はみられない。吉岡温泉においては震度3 (1991年8月28日, M=5.9) の地震が発生した前日に塩素イオン濃度が 5 mg/l 増加した。ちなみに、この地震の約10時間半前の1991年8月27日23時59分に鳥取県西部で地震が発生している (M=4.4, 鳥取では震度0だが米子で震度3) が、水質はそれよりも前に変化している。湯谷温泉においては、1991年8月28日の地震後に水温が (約 0.2°C) 上昇した (Table 7)。

以上のように温泉の水質・水温を変化させる要因として、4つの要因を考えた。この考えの妥当性を確認するために、温泉の水質・水温の変化が上述の基準以上あったすべての例に対し、この4つの要因に対応づけできたものと対応づけできなかった(原因不明のもの)の数を Table 8 に示す。玉造温泉においては、1989年～1990年前半にデータのばらつきが多くある (Fig. 3) が、その多くはデータが1つだけとんで元の値に戻るものであるため、それらを省いた。変化があったと判定されたものは13例あるが、気圧に一応対応づけられた2例を除けば、気象要素や地震とは対応づけられない。ただしこの13例の変化は、玉造温泉の塩化物イオン濃度の測定精度が悪いと考えられる1989年と1990年前半だけに発生しているため、その信頼性には問題がある。吉岡温泉においては、塩化物イオン濃度の3つ変化例の内、1つが有感地震と対応している。上述のように、1991年8月28日の鳥根県東部の地震 (M=5.9, 鳥取で震度3) の前日に塩化物イオン濃度が変化したものである。他の2例の内1つは上述したように降雨に伴うものであり、残りの1つは理由付けができなかった。湯谷温泉においては、(精密)水温の変化例が2例あり、その内の1つが、地震 (1991年8月28日の鳥根県東部の地震, M=5.9, 鳥取で震度3) と対応づけられる。その変化の仕方は、吉岡・他⁴⁾ や小泉・他¹¹⁾ が報告したものと同一パターンである。

以上の結果から、玉造温泉の1989年～1990年前半の塩化物イオン濃度を除けば、3つの温泉の水質・水温

Table 8. Frequency Distribution of anomalous variations in water quality and temperature which are related to the certain factors

Site	Factor					Total
	Rain	A. P.	A. T.	S. I.	?	
TAM	0	2	0	0	11	13
YOS	1	0	0	1	1	3
YDN	0	0	0	1	1	2

A. P.: Atmospheric pressure, A. T.: Atmospheric temperature, S. I.: Seismic intensity, ?: Unknown factor

を変化させる要因として、地震の震度と気象要素を考えたのは、概ね妥当だと判断できる。また、その要因に対する変化の仕方は各温泉ごとに異なることが判った。

5.2. 鳥取県中部の地震（1983年10月31日、 $M=6.2$ ）前後の各温泉データとの比較

この地震は1943年の鳥取地震（ $M=7.2$ ）以来、鳥取一島根両県で発生した最大の地震である。当時測定されていた温泉の水質・水温の変化を示す（Fig. 8a）。期間は1983年5月から1984年4月である。この地震の前後において、玉造温泉の塩化物イオン濃度は変化しない。吉岡温泉の塩化物イオン濃度は、鳥取県中部の地震の約2ヶ月前からゆっくりと増加を始める。途中、欠測はあるが地震後も増加し続けている⁴⁾。湯谷温泉の精密水温（精度 $1/100^{\circ}\text{C}$ ）は日本海中部の地震（1983年5月26日、 $M=7.7$ 、米子で震度1）、大分県北部のやや深い地震（1983年8月26日、 $M=6.8$ 、鳥取で震度3）、鳥取県中部の地震（鳥取で震度4）の3つの地震後にいずれも上昇している¹¹⁾。

次に、1991年3月から1992年2月までの水質・水温の変化を詳細に示す（Fig. 8b）。震央距離約20 kmの近くに発生した1991年8月28日の地震のときでさえ、玉造温泉の塩化物イオンの濃度には変化はみられない。吉岡温泉の塩化物イオン濃度は、震央から遠方にあるにもかかわらず地震の1日前にわずかに増加した。パ

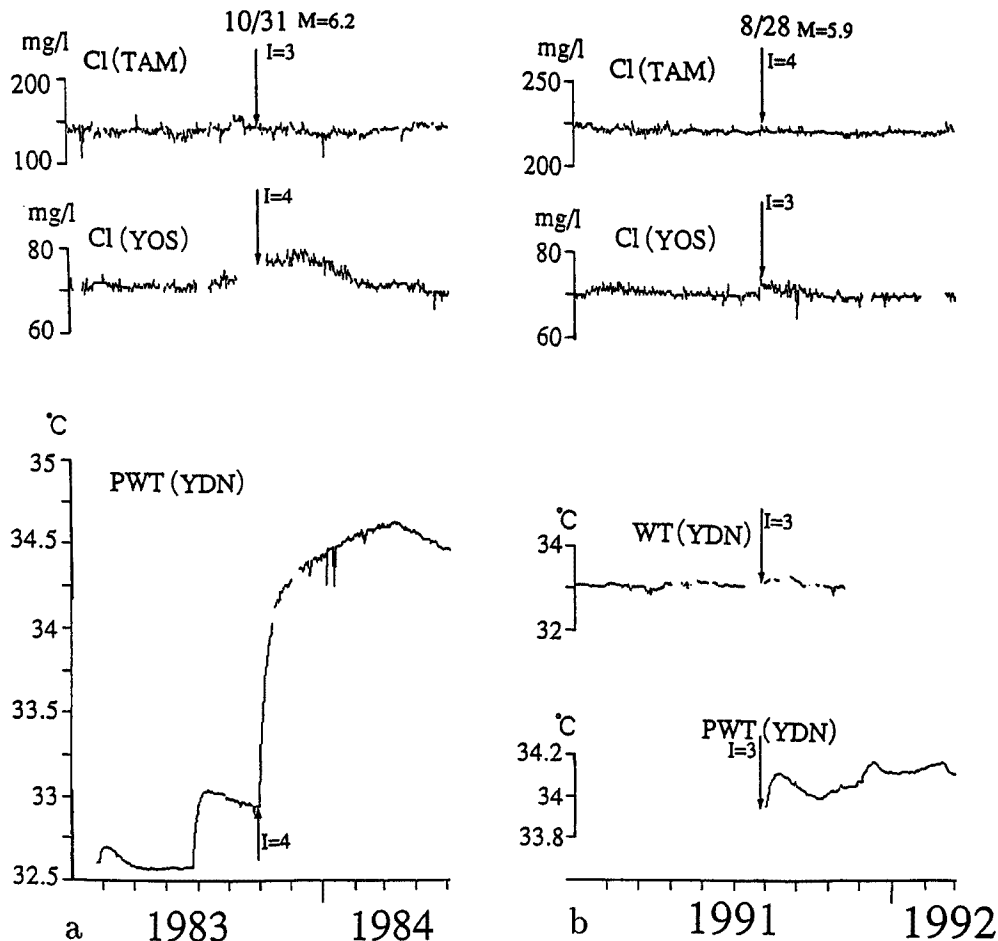


Fig. 8. Temporal variations of Cl^- concentration (Cl) and the groundwater temperature (WT, PWT) before and after the two large earthquakes in Tottori and Shimane Prefectures.

a: Case of the Earthquake ($M=6.2$) on October 31, 1983 in the Central Part of Tottori Prefecture,
b: Case of the Earthquake ($M=5.9$) on August 28, 1991 in the Eastern Part of Shimane Prefecture.

ターンは異なるとはいえ、吉岡温泉は2つの地震に対して、いずれも地震前に塩化物イオン濃度が増加した。また、湯谷温泉は鳥取県中部の地震のときと同様に水温が地震後変化した。

1980年からの温泉での観測開始以来、鳥取・島根両県で発生した M6 クラス以上の地震は、鳥取県中部の地震と島根県東部の地震の2例だけであり、その両方の地震前に吉岡温泉の塩化物イオン濃度が上昇したのは興味深い。

6. 結 論

1989年から1991年の鳥取―島根県境の地震活動（松江または鳥取で震度2以上の地震）・気象要素（気温・気圧・降水）と玉造・湯田・関金・吉岡・湯谷温泉の水質・水温変化とを比較した。特に観測期間の長い玉造・吉岡・湯谷温泉について以下のことがわかった。

1. 玉造温泉の水質は、気象要素や地震の影響を受けない。水温は外気温の影響を受けるが、これは、温泉湧出後に外気温によって、温泉水が影響を受けたと考えられる。

2. 吉岡温泉の水質は、気温・気圧の影響を受けない。降水に対しては、100 mm/day を越えるときに塩化物イオン濃度が増加するケースがあった。地震に対しては、島根県東部の地震（1991年8月28日）の直前に塩化物イオン濃度が増加した。この現象は1983年10月31日の鳥取県中部の地震のときにも観測されている。

3. 湯谷温泉の水温は、気象要素の影響を受けない。鳥取で有感な地震に対して、地震後かなりの頻度で温度が上昇する。このような現象は1983年～1984年にも4度観測されている¹⁾。

以上の結果から、温泉には、地震に対して敏感に水質・水温を変化させるものとそうでないものがあり、地震に敏感な温泉を利用すれば、温泉の水質・水温の連続観測によって地震の前兆現象を見いだせる可能性があることがわかった。なお、取り上げる地震活動域の範囲、地震のマグニチュードと震源距離、温泉の地質構造と水質・水温変化などについては今後の検討が必要である。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、鳥取大学教養部教授宮腰潤一郎博士と同大学同学部助教授塩崎一郎博士に貴重な助言をいただいた。玉造温泉旅館・長楽園の黒田近良氏、島根県広瀬町役場の皆様、鳥取県関金町役場の皆様、吉岡温泉の皆様、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いただいている。また、鳥取大学教養部地学教室の皆様には、図の作成等を手伝っていただいた。以上の方々に、心より感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 脇田 宏：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，1978，pp. 146-166.
- 2) 吉岡龍馬：山崎断層，塩田温泉の塩素濃度の変化と地震，地震予知研究シンポジウム（1980），1980，pp. 159-162.
- 3) Koizumi, N., R. Yoshioka and Y. Kishimoto: Earthquake Prediction by Means of Change of Chemical Composition in Mineral Spring Water, Geophys. Res. Lett., 12, 1985, pp. 510-513.
- 4) 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，京大防災研年報，第27号 B-1，1984，pp. 455-464.
- 5) 西田良平・岡田昭明・渋谷拓郎：鳥取地方の地震と活断層，鳥取大学教養部，1991，pp. 118-121.
- 6) 杉山隆二：山陰の温泉の地質，温泉工学会誌，創刊号，1963，pp. 42-47.

- 7) 鳥取県：鳥取県温泉総覧，鳥取県厚生部，1972, pp. 1-251.
- 8) 三浦 清：玉湯町新泉源開発地域の調査について，1986
- 9) 小泉尚嗣・中尾節郎・矢部 征・桂 郁雄・平野憲雄・西田良平・吉岡龍馬：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，第34号 B-1, 1991, pp. 365-375.
- 10) 宮腰潤一郎・西田良平・塩崎一郎・赤木三郎・豊島吉則・吉谷昭彦・岡田昭明・道上正規・檜谷治：吉岡温泉保全調査報告，鳥取県委託調査，1991, pp. 4-20.
- 11) 小泉尚嗣・佃 為成・矢部 征・渋谷拓郎：鳥取県の湯谷温泉におけるコサイスマミックな水温変化，地震学会講演予稿集1990年度春季大会，1990, p. 27.
- 12) 山本莊毅：新版地下水調査法，古今書院，1983, pp. 368-405.
- 13) 松江地方气象台：鳥根県気象月報，1983年1月-1984年10月 1989年1月-1992年10月.
- 14) 鳥取地方气象台：鳥取県気象月報，1983年1月-1984年12月 1989年1月-1992年10月.
- 15) 石川有三・松村一男・横山博文・松本英照：SEIS-PC の開発一概要一，情報地質，第10号，1985, pp. 19-34.
- 16) 気象庁：地震月報，1989年1月-1991年9月.
- 17) 大阪管区气象台：管内地震活動図，1991年10月-1992年10月.