

1983年10月31日鳥取県中部の地震に伴う温泉水の異常

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 兆夫

ANOMALOUS FEATURES OF SELF-SPOUTING HOT SPRINGS ACCOMPANIED WITH THE EARTHQUAKE ($M=6.2$) ON OCT. 31, 1983 AT THE CENTRAL PART OF TOTTORI PREF.

By Ryuma YOSHIOKA, Ryohei NISHIDA, Tameshige TSUKUDA,
Kazuo MINO, Naoji KOIZUMI, Koichi KITAOKA,
Sei YABE and Yoshimichi KISHIMOTO

Synopsis

Time variations in chloride ion contents of thirteen hot springs and those of water temperatures in one groundwater and two hot springs have been observed for a few years in order to clarify the relation between these data and earthquakes in the Sanin District. The earthquake ($M=6.2$) occurred on Oct. 31, 1983 at the central part of Tottori Pref.

Anomalous changes in chloride ion content began at seven hot springs about one year before the earthquake occurrence. It is quite interesting because a microearthquake quiescence appeared in the vicinity of the epicenter in this period. Coseismic change of water temperature was observed at one hot spring, too. It is also interesting that the change of the water temperature is approximately exponential.

These facts show that deep groundwater moved in relation to the earthquake and that it is useful to observe the chemistry and water temperature of hot springs in order to know such movement of the deep groundwater.

1. は じ め に

地殻内の応力はそれを構成する固体と流体の両相によって受けもたれている。従来からの地殻活動の変動に関する研究は、おもに固体地球物理学者によってなされ、その観測方法は物理的手法によるものである。流体の性質（特に水質）に着目し、地球化学的に地殻活動をとりあつた研究例は比較的少ない。

そこで、流体の性質と地殻活動との関連性を検討するために、自然発生的に形成された温泉の化学組成を調べるのが最も合理的であると考え、筆者らは山崎断層テストフィールドにおける地震予知実験の一環として、1977年3月16日から塩田温泉でCl濃度の毎日1回の測定を行なっている。1980年3月までに同断層付近に $M=3.7\sim 4.9$ の地震が4回発生した^{1,2,3)}。そのうち1回の地震(1977.9.30, $M=3.7$)では発生前10~14日に温泉中のCl濃度の顕著な減少が観測された。1979年10月13日($M=4.3$)および同年12月28日($M=4.9$)の地震では発生直後にCl濃度は顕著な変化を示した。そして1979年3月22日($M=3.7$)の地震は観測定点よりやや遠方で発生したためかCl濃度の変化は小さかった。

上述のような地殻活動と温泉の化学組成の変化との関係の一般性を目指し、鳥取・島根の両県下の自噴泉を対象に、1980年9月にききこみ調査を実施し、20カ所の温泉水を採取・分析した。その分析結果と、試水の採取援助、連続測定の可能性などを考慮に入れ、12カ所の温泉(湯谷・吉岡・鹿野・三朝一・同一二・関

金・松江・玉造・出雲湯村・湖陵・小屋原・三瓶)を選定し、1980年11月から毎日1回 Cl 濃度と水温(一部)の測定を開始した。これらはいずれも自噴泉であり、揚水による水質変化を考える必要はない。また特に断わらない限り、通常の降水の影響をほとんど受けない温泉群である。そしてこの観測をはじめてもない1981年6月25日12時51分に松江市西方約90kmの島根県浜田市沖合いで $M=4.3$ の地震が発生した。この地震の前駆現象と考えられる Cl 濃度の異常変化が玉造・松江温泉などで観測された⁴⁾。なお温泉の採取地点分布状況を考慮に入れ、1982年9月より鉾泉(生山)1カ所を追加し観測を行なっている。

また鳥取県下において地下水温高精度連続観測を3カ所で、すなわち、鳥取市賀露では1980年8月より、三朝温泉では1980年9月より、源谷温泉では1982年3月よりそれぞれ実施している。

本報告では、鳥取県中部の地震(1981.10.31)に伴った温泉水の Cl 濃度の変化と深井戸・温泉の水温の変化についての観測結果を述べる。

2. 観測結果と考察

2.1 温泉水中の Cl 濃度の変化

Fig. 1 に鳥取・島根両県の温鉱泉の採水地点を示す。これら温鉱泉の周辺の地質、地形、湧出状況、掘削深度、化学組成など記述する必要があるが、ここではそれらを省略し、別の機会に述べることにする。

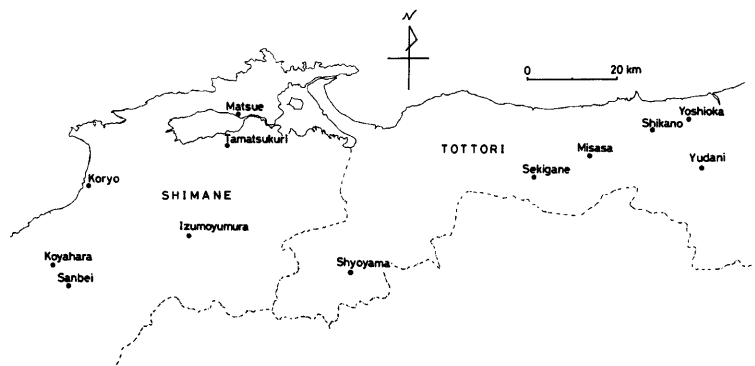


Fig. 1 Locations of the hot springs studied in this paper

Fig. 2 に京都大学防災研究所附属鳥取微小地震観測所による震央分布図($M \geq 2$)を示す。この図中マグニチュード2.9以上の地震を黒丸で記し、かつその発生日時、震源の深さ、マグニチュードなどを一覧表にまとめてある。また△印は温泉の採水地点を示す(Fig. 1 参照)。

Fig. 3 に13カ所の温鉱泉中の Cl 濃度の経年変化を示した。鳥取県中部の地震(1983.10.31)の発生約1年前から、震源付近の三朝周辺では微小地震の空白域が生じたが⁵⁾、それとほぼ時を同じくして、湯谷・吉岡・三朝一・関金・松江・出雲湯村・三瓶の各温泉で、Cl 濃度の変化のパターンが従来のそれとわけてことなった様相を呈しているのは、きわめて興味深い。すなわち、湯谷温泉では約2カ月の周期をもった変化をし、吉岡温泉ではその濃度の変動幅が大きくなっており、三朝温泉一では上向きのスパイク状の大きな濃度変化を示している。関金温泉の1982年6月初めの Cl 濃度のギャップは採水地点の変更によるものであり、1982年7月から1983年3月頃にかけて、三朝温泉一と類似したスパイク状の変化がみられる。松江温泉は1982年9月頃から1983年6月頃にかけて、約4カ月ごとにステップ状に Cl 濃度は増加している。出雲温泉は吉岡温泉と類似し、その濃度の変動幅が大きく変化している。三瓶温泉は三朝温泉一・関金温泉と同様なスパイク状の変化を1983年4月頃から示していることがわかる。

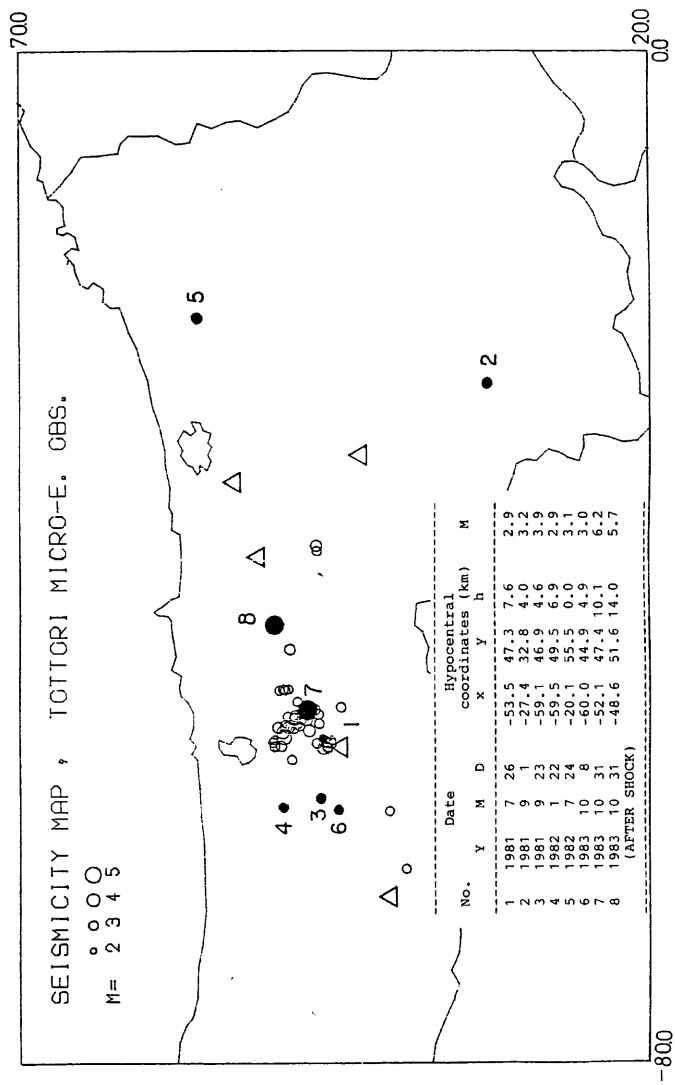


Fig. 2 Seismicity map in Tottori Prefecture. Triangles indicate the locations of the hot springs. Solid circles with numbers indicate the epicenters of earthquakes of magnitude 2.9 or greater. Table shows the data of these earthquakes. The origin of the coordinates is (134°30'E, 35°00'N).

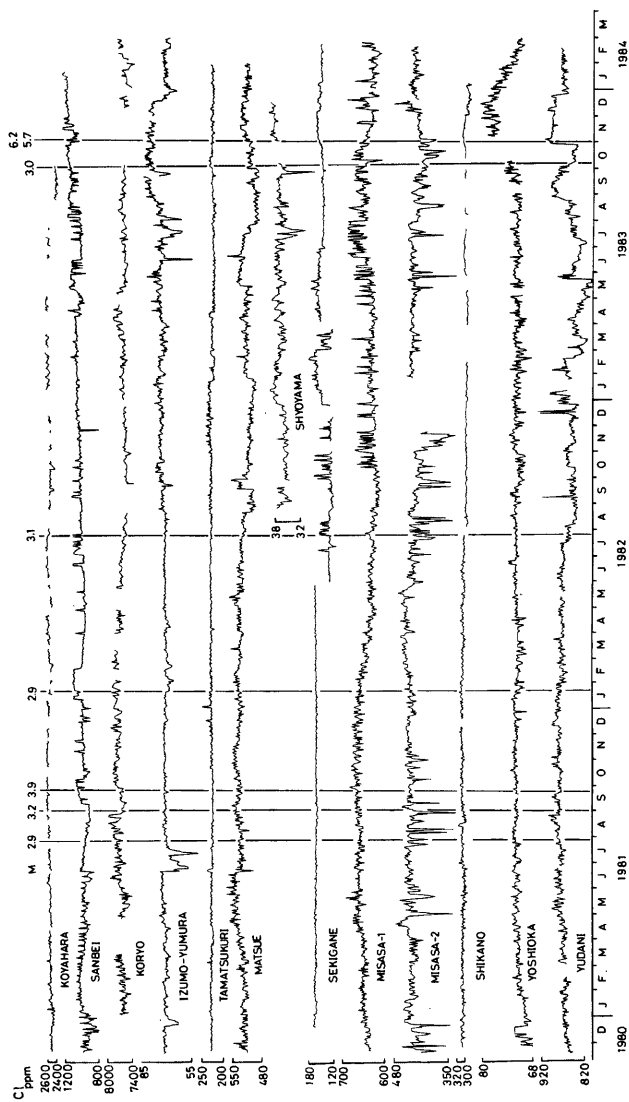


Fig. 3 Time variations in chloride ion contents of the hot springs

上述のような地震発生直前の温泉水中の Cl 濃度のスパイク状の変化は、以前に筆者らによって塩田温泉でも観測されている¹⁾。また温泉水中の電気伝導度¹⁾、温泉水および地下水中の Rn 濃度^{6,7)}、あるいは土壌中の H_2 濃度⁹⁾ の観測においても同様な結果が報告されている。

次に本地震発生前後の2～3カ月の Cl 濃度の変化を各温泉についてみることにしよう。

湯谷温泉では、1983年7月初めの Cl 濃度 830 ppm は多少の増減をくり返ししながら、9月中頃にかけ 900 ppm と増加し、その後増減しながら減少し続け、10月29日には 840 ppm となり、30日には 856 ppm と増加し、31日の地震発生直後には 896 ppm と 40 ppm の増加がみられ、11月1日 (904 ppm) から5日 (915 ppm) にかけて増加し、その後12月23日 (約50日) までに約 10 ppm ときわめて緩慢な濃度減少がみられた。そして12月28日には 860 ppm と急激に減少し、その後 870 ppm 前後の値を維持している。

吉岡温泉では、1983年10月11日から11月7日までデータは欠測している。この温泉は通常 $71 \pm 1\text{ ppm}$ とほぼ一定の値を示しているが、9月初め頃から増加の傾向がみられ9月26日には 74 ppm と増加し、11月8日には 77 ppm とさらに増加し、その後12月16日の 80 ppm まで増加する。その後だんだんと減少し2月10日頃には通常の値に回復している。したがって吉岡温泉では、本地震発生の約2カ月前から Cl 濃度の増加がみられ、地震発生後その濃度増加の日数は約45日も継続し、また通常の値に回復するのに約45日の日数を要していることになる。このことは従来から存在している泉源からの湧出経路が応力集中のため変形し、その湧出経路に Cl-rich の温泉が深部から緩慢に流入してきたものと推測される。

日本海新聞⁹⁾ (1983.11.8) によると鳥取温泉の水位が地震後 2m 近くも上昇し、湯量も通常の1.5～2倍近く湧出し、泉温も 49°C から 51°C に上昇したという。さらに水位の上昇は地震が起こる半年ほど前から生じており、通常の年なら水位が下降するはずの夏期でも今年は温泉の湧出量が多かったという。また同新聞¹⁰⁾ (1983.11.13) によると、関金温泉の町管理の4本の泉源の湧出量は、例年夏期には $120 \sim 130\text{ l/分}$ であるが、冬期には $90 \sim 100\text{ l/分}$ に減少する。ところが10月28日の湧出量は 115 l/分 であったのが、11月4日には 144 l/分 に増加していたという。鳥取温泉と関金温泉における湧出量の増加や泉温の上昇などから判断して、吉岡温泉における Cl 濃度の変化機構の推測は妥当なものといえよう。

吉岡温泉に対し、湯谷温泉の場合には逆の現象を示しているといえる。すなわち、本地震の発生前の3日までの約50日間、 Cl 濃度は減少傾向を示していた。このことは泉源からの湧出経路あるいは泉源の周囲に応力集中のため微小なクラックが入り、そこに Cl-poor な地下水が流入して、本泉の Cl 濃度の低下をもたらしたが、本震の発生3日前から、逆に Cl-rich の温泉水が地下深層から、本泉へ、あるいはその湧出経路へ急激に上昇してきて、本泉の Cl 濃度を高め、その状態を約55日間保持しているものと推定される。

鹿野および関金温泉の Cl 濃度の変化は類似したパターンを示している。すなわち、鹿野温泉では10月29日から11月3日まで欠測しているが、本地震発生前の Cl 濃度は 302 ppm 程度の値を示しているが、11月4日には 305 ppm 、11月10日には 310 ppm と増加し、その後減少し続け11月27日には 302 ppm と発生前の濃度に回復している。そして12月20日頃までその濃度は 290 ppm と減少し続けている。したがって Cl-rich の温泉水が本泉に混入し続けている日数は約25日とみなすことができる。一方、関金温泉では $145 \pm 2\text{ ppm}$ の濃度を示していたのが、10月31日に 150 ppm と11月15日にはさらに 158 ppm と増加し、12月7日までその値を維持し、その後減少し続け12月30日に鳥取県中部の地震の発生前までの濃度に回復する。したがって地震発生による関金温泉への Cl-rich の温泉水の混入は約30日続いたものと推定される。

三朝温泉—1では、前述のように1982年10月中頃より Cl 濃度はスパイク状に大きな変動を示していたが、そのスパイク状の底部の濃度に着目すると、1983年6月初めには 630 ppm 程度の値を示していたのが、7月中頃には 660 ppm まで増加し、8月末頃には 660 ppm 程度まで減少し、その濃度の変化幅は $10 \sim 30\text{ ppm}$ になるが、スパイク状の底部の濃度は10月10日までほぼ維持し、11日には 603 ppm まで減少し、12日には 678 ppm まで増加し、その後11月末にかけ 1 ppm/日 の濃度減少を示している。8月初め頃から地震発生までには、5月初めから7月末までのような大きなスパイク状の濃度変化はみられないが、それでも相当幅の広い濃度のピークをもった変化の様相がうかがえる。地震後はその濃度の変化幅は非常に小さくなっている。このこ

とは5月初めから7月末にかけ、Cl-rich なより深層に存在している泉源から、応力集中により間接的に、通常の湧出経路へその水が混入して Cl 濃度を高めているが、8月初めから地震発生前までは、応力集中による岩石のクラックの増加や湧出経路の変形などのために、より深部の泉源からの供給が平均化され、かつ緩慢になってきたことを示していると考えられる。特に10月中頃から12月初め頃にかけては、応力開放により深部の泉源からの通常の湧出経路への Cl-rich な水の供給はだんだん減少してきているものと考えられる。

三朝温泉—2は河川流量などの影響を比較的受けやすい温泉である。7月末頃まで Cl 濃度は 440ppm 程度の値を示しているが、地震発生前後にかけてその濃度は減少傾向を示し、12月中頃に 440ppm の濃度に回復している。この温泉の地震発生前後の Cl 濃度変化の様相は三朝温泉—1とは逆の傾向を示している。

生山鉱泉は観測期間が他の温泉に比べて短いので、長期の傾向は把握しがたく、しかも10月14日から11月3日まで欠測している。それでも地震後 2ppm 程度の増加が認められた。

松江温泉の Cl 濃度は8月初め頃は 490 ± 6 ppm の値を示していたが、10月5日に 510ppm 程度に増加し、11月6日までほぼその値を維持しているが、11月20日にかけて 525ppm 程度まで増加し、多少の濃度変化はあるけれども、12月20日頃まではほぼその値を保っている。そして地震発生直前の 500ppm に回復するのは1月10日頃である。したがって松江温泉では地震の影響は約65日かかっているものと推定される。なお玉造温泉では本地震の影響はみられなかった。

出雲湯村温泉では8月20日の 73ppm から9月26日にかけて 84ppm まで増加するが、27日から29日にかけて一時濃度は減少する。そして10月中頃に 84ppm 程度の値まで増加し、その後地震発生日の 78ppm まで減少する。そして11月16日にふたたび 83ppm と増加し、12月29日までその濃度は増減をくり返しながら緩慢に減少し続けている。この温泉も今回の地震の影響を受けているものと推定される。

三瓶温泉では前述のように1981年6月25日の浜田沖の地震 ($M=4.3$) のときには、その発生前に Cl 濃度がパルス状の変化を示したが、今回の地震でも、5月中頃からそのような状態が出現し、通常 1050 ± 20 ppm の値を示していたものが、8月10日頃から地震発生日までに 1150 ± 20 ppm と増加し、その後11月15日まで増減をくり返しながら減少しているが、20日頃には発生前の値にほぼ回復していることがわかる。長期の Cl 濃度の変化の様相からみても、本泉も今回の地震の影響を受けているものと考えられる。なお湖陵・小屋原の両温泉においてはデータの欠測のため今回の地震の影響を受けているかどうかは不明である。

2.2 地下水温高精度連続観測と地震時の水温変化

鳥取県下において地震予知を目的とした地下水温連続観測を上述の3カ所で実施中である。

まず鳥取市賀露にある元上水道源池の井戸の観測から述べる。本井の深さ 90m の坑底にセンサーを設置、1980年8月より観測を続けているが、 $0.01 \sim 0.02^{\circ}\text{C}$ の短周期(数時間～数10時間)の変動が見られるものの概して変化がほとんどなく、3年間で約 0.3°C の割合で上昇のトレンドを示す。鳥取県中部の地震でも、前後に確認できる変化はなかった。測定器は Shimamura¹¹⁾ が開発した水晶温度計で、10MHz 水晶振動子をセンサーに用い、その振動数を直ちにセンサー側で分周し、周期約25秒のパルスに変換し、レコーダ側に伝送し、1MHz 基準水温と比較することによって、水晶センサーの振動数の温度による変化を求めようというものである。水晶の長期的特性については、実験例がなく、上記の温度上昇トレンドが有意であるかどうかは不明である。この井戸に関しては、地震時の変化がきわめて小さいのは確実であることから、開きなおると、水晶温度計のエージング・テストの目的に有効である。

三朝町では町の源泉7号(自噴泉)を借用して1980年9月より1983年6月まで(データは1月16日まで)観測を行ってきた。センサーの設置点は深さ 350m、水温は $75.5 \sim 76^{\circ}\text{C}$ で季節変化や降雨に伴う上昇変化をする¹²⁾、三朝を選んだのは、地震活動の空白域が形成されているのが見い出され⁵⁾、大きな地震活動が予測されたからである。水温計設置とともに微小地震活動が始まり、地震と水温変化に関するデータがいくつか記録された。ただ、 76°C という高温のためセンサー・カプセルに内蔵された電子回路の寿命が短く、度々欠測が生じた。特に1982年以降は欠測が多い。センサーの更新と、借用していた源泉の再掘削計画のため、1983年6月一旦計器を引き上げることになった。鳥取県中部の地震は、再設置準備中に発生してしまっ

た。したがって、その地震発生の前直前、直後の水温変化は、残念ながら得られていない。限られたデータに見られる地震前の水温は、1982年9月頃から12月にかけては、例年と同じく下降の傾向であったが、いつもよりさらに 0.5°C ほど低温であった (75°C 程度)。この現象が、地震の前兆を示すのかどうかは現在の段階では不明である。

地震発生後、三朝町有の源泉西1号において観測を再開した。センサーは井戸の最深部(深さ142m)にセットした。ここは自噴はしていない。水位は約 -3m 、水温は $64\sim 65^{\circ}\text{C}$ ぐらいである。観測は地震後約13日を経過した時から始まり、わずかながら地震の効果と思われる上昇を記録した。

第3の水温観測点は湯谷温泉である。自噴泉であるが、井戸のパイプは土砂で塞ぎ、センサーの設置点は、直径1m、深さ40cmほどの池の底である。露天であるので、昼間は日射の影響を受け、みかけ上温度が上昇する。ピークは午前11時～12時に発生し、最高 0.3°C だけ夜間より増加する。この温度変化は短時間であって、夜間および朝夕については実際の水温を示していると考えられるので、よほど短時間の現象でない限りは、データ解析上支障はない。

1982年3月に観測を開始して以来、水温は 32.8°C からステップ状に下降し、1982年9月から1983年1月までは $32.64\sim 32.65^{\circ}\text{C}$ を保持していた。1983年5月26日の日本海中部地震 ($M 7.7$)、同年8月26日の大分県地震 ($M 6.8$)、それに鳥取県中部の地震が次々に発生し、擾乱を受けた¹³⁾。1983年7月頃には、観測期間中最も低い 32.57°C を記録した。鳥取県中部の地震前の約2年間の水温下降現象が前兆を意味するのかどうか現在の段階では明言できないが、可能性が高いと言えよう。もっと長期の観測データの蓄積を待って結論を出したい。

Fig. 4 に示したグラフは、湯谷と三朝(新設)における鳥取県中部の地震時の水温変化である。湯谷では地震前はほぼ一定の温度を指していたが(厳密には、わずかながら下降傾向にあった。これは8月の大分県の地震の余効である。)、地震と同時に急上昇に転じた。地震後の変化は、 $T=T_0(1-e^{-t/\tau})$ という曲線で近似できる。但し、 t は経過時間、 τ は時定数で、この場合、7日である。変化の最大振幅 T_0 は 1.4°C となる。地震後1カ月を越えると、1カ月 0.15°C の割合で直線的に上昇している。この傾向は少なくとも地震後

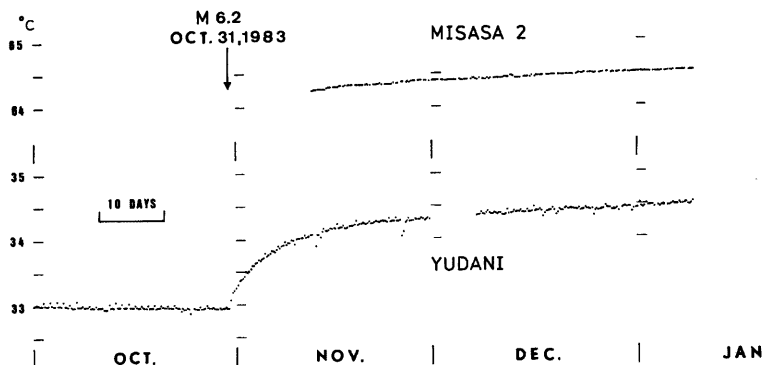


Fig. 4 Coseismic changes of groundwater temperature at Yudani and Misasa hot-springs, Tottori Pref., at the time of the earthquake of $M 6.2$, Oct. 31, 1983. At Misasa, the observation was initiated 13 days later after the earthquake. The change curve at Yudani is represented by a simple function $T=T_0(1-e^{-t/\tau})$ where t is the elapsed time from the event and means a time constant. In this case τ is 7 days and T_0 , the maximum amplitude, is 1.4°C . The curve at Misasa may be also described by the above formula though only a later part of the data is available. If this is the case, τ and T_0 are around 7 days and 0.7°C , respectively.

4 か月まで続いている。*exponential* 型の温度変化曲線を説明するためには、1 つのモデルとして、地下のクラックが地震動や地殻歪のため開き、深部から温泉直下の貯水層へ熱水ないし温水の供給が増加することが考えられる¹³⁾。あるいは、温泉は通常の地下水（冷水）と熱水とが混合したものであるから、冷水の供給が減少するような現象、例えば冷水の流れを一部担っていたクラック群において地震のため、そのクラックが閉じられるようなことが発生すればよい。いずれにせよ、地下水の流れに異変があったと考えられる。

時定数 τ は、貯水層のキャパシタンスと地下水路（クラック系）のレジタンス（コンダクタンスの逆数）の積であって、地下水系の状態を示すパラメータである。Shimamura¹⁴⁾によると、北海道弟子屈温泉では、地震時の τ は 5～10 時間である。湯谷の場合の 7 日というのは、これに比べると非常に長い。湯谷では、地震による水温変化の例が鳥取県中部の地震を含めて 3 例あるが、いずれも 5～15 日という長い時定数を示している¹³⁾。

三朝の場合は、地震直後の変化の様子は不明であるが、途中からの曲線を湯谷と比較すると、同じような理論曲線で表現できるのではないかと推定される。その場合、変化の巾は湯谷の場合の 1/2 ほどであろう。

2.3 温泉貯留層の水温の推定とトリチウム濃度

2.1 および 2.2 で鳥取中部の地震に伴った温鉱泉の Cl 濃度の変化と水温の変化の様相を述べた。それらはいずれも地震に伴って地下深部の水の動きに変化があったことを示している。

それでは、これら温泉が貯留されている源の水温は一体どの程度の値を有するものであるのか、さらにはこれら温泉の源の大部分になる降水・地表水が地中深く浸透し加熱されて、いわゆる温泉になり湧出してくるまでに、どれほどの年月を要するのかわかることはきわめて重要なことである。以下、現在までに判明している事実を記す。

Table 1 に Cl 濃度の毎日 1 回の測定を行なっている温泉における水温の実測値、地球化学的温度計¹⁵⁾ (Na-K-Ca アルカリ比温度計) による最低温度の推定値、Cl およびトリチウム濃度¹⁶⁾ を示した。

Table 1 Water temperatures, chloride ion contents, and tritium contents of the hot springs.
These data are based on the analysis of the sample waters collected on Sep. 18-21, 1980.

Location	Temperature (°C)		Cl (mg/l)	³ H (TU)
	Measured (80'9/18-21)	Calculated t (Na-K-Ca)		
1 Yudani	33.1	163.5	855	2.8±0.4
3 Yoshioka	48.6	88.5	71.2	—
5 Sikano	63.0	93.4	300	0.5±0.3
7 Misasa 2	65.5	149.3	437	—
10 Misasa 1	77.0	151.4	628	0.5±0.3
11 Matsue	71.0	83.6	512	—
12 Tamatsukuri	70.0	82.7	222	1.5±0.4
14 Izumoyumura	42.2	92.8	74.0	—
15 Koryo	42.9	84.5	7130	—
18 Sanbei	37.8	177.2	970	30.9±2.7
19 Koyahara	37.6	175.5	2458	1.2±0.4

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{1647}{\log (\text{Na}/\text{K}) + \beta (\log (\sqrt{\text{Ca}}/\text{Na}) + 2.06) + 2.47} - 273.15$$

$$t < 100^{\circ}\text{C} \quad \beta = \frac{4}{3}$$

$$t > 100^{\circ}\text{C} \quad \beta = \frac{1}{3}$$

ここで、地球化学的温度計について簡単にふれておく。地球化学的温度計とは、試水の化学組成を調べることによって、その試水と岩石とが反応していた場における温度を推定する手法である。この温度計が成立するには、次のような条件が必要である。すなわち、岩石と水との間の化学平衡は貯留層温度で行なわれ、熱水が貯留層から地表へ上昇するとき、再平衡あるいは化学組成の変化は起こらない¹⁷⁾。熱水の貯留層の最低温度を推定する方法として、多くの地球化学的温度計¹⁸⁾が考察されているが、 SiO_2 およびアルカリ比温度計は 200~230°C 付近までの熱水貯留層の最低温度を推定するにはよい方法だとされている。この表には Na-K-Ca アルカリ比温度計をもちいて推定した熱水貯留層の最低温度が示されている。

Table 1 から、まず湯谷、三朝一、同一二、三瓶、小屋原の各温泉の Na-K-Ca アルカリ比温度計による熱水貯留層の推定最低温度は 149.3~177.2°C の範囲にあり、吉岡・鹿野・松江・玉造・出雲湯村・湖陵の各温泉のそれによる推定温度は 82.7~93.4°C の範囲にあることがわかる。松江温泉と玉造温泉とは実測水温と推定水温とはかなりよく一致している。このことはこれらの温泉の泉源貯留層から地表の湧出孔までの距離が比較的小さいか、あるいはその泉源貯留層から温泉の湧出経路へ他の地下水系の水の混入量が相対的に少ないものと推定される。このような推定が妥当なものとするならば、湯谷温泉、三瓶温泉および小屋原温泉はこれら温泉の泉源貯留層から湧出孔までの距離が、松江温泉や玉造温泉に比べて、長い、あるいはその泉源貯留層から温泉の湧出経路へ他の地下水系の水の多量の混入が考えられる。湯谷温泉および三瓶温泉はトリチウム (^3H) 濃度からみて、後者の可能性が高いといえそうである。

以上のことから判断すると、吉岡・鹿野・三朝一・三朝二・出雲湯村・湖陵の各温泉は、松江温泉・玉造温泉と湯谷温泉・三瓶温泉・小屋原温泉の中間的な性質を有しているものと推定される。

^3H 濃度には欠測が多いが、測定値のある温泉についてのみみると、湯谷温泉は 1952~1962 年の間に行なわれた水爆実験によって生じた ^3H をほんの少量含む可能性があり、三瓶温泉には上記の水爆実験の影響を受けた ^3H が相当量含まれていること、さらに鹿野、三朝一、玉造および小屋原の各温泉は水爆実験開始以前 (約 30 年前) の降水が地中に浸透し、それが地下水の熱留りによって温められ、温泉水を形成し、現在湧出している温泉であるということが推測されよう。これらのことから、降水・地表水などが地中に浸透し、地温の高い深部を経由し、温泉水として地表に湧出してくるのに、温泉によって顕著な差があることがわかる。

以上の事実と、2.1、2.2 で述べた温泉水の Cl 濃度および水温との変化との関係は必ずしも明確ではない。さらにデータを蓄積して相互の関係を明らかにしていく予定である。

3. おわりに

以上、1983年10月31日に発生した鳥取県中部の地震 (M 6.2) について、島根・鳥取両県の 13カ所の温泉水の Cl 濃度および水温の変化について述べ、さらに、これらのうち 11カ所の温泉の貯留層の水温の推定と 6カ所の温泉の ^3H 濃度の測定結果についても述べた。これらを要約すると以下ようになる。

1) 鳥取県中部の地震の発生の約一年前から、湯谷・吉岡・三朝一・関金・松江・出雲湯村・三瓶の各温泉の変化のパターンが、従来のそれと比べて異なった様相を呈していた。しかも、この期間は、震源付近の三朝町周辺で微小地震の空白域が生じた時期と、ほぼ一致している。

2) 地震前後の 2、3 カ月前の期間に限ってみても、多くの温泉で Cl 濃度の変化が認められる。

3) 湯谷温泉における水温は、地震と同時に急上昇した。その後の変化は $T = T_0(1 - e^{-t/\tau})$ という直線で近似できる。ただし、 t は経過時間であり、時定数 τ は 7 日、最大振幅 T_0 は 1.4°C である。地震後 1 カ月を越えると、月に 0.15°C の割合で直線的に上昇する。

4) Na-K-Ca アルカリ比温度計による各温泉の熱水貯留層の最低温度の推定や、 ^3H 濃度の測定も行なったが、それらの結果と、1)~3) に述べた温泉水の異常との関係は、現在のところ不明である。

1)~3) の事実から、M6 クラスの地震が起こる際の応力集中が、かなり早い時期から継続して広範囲の地下水に影響をおよぼしていることがわかる。そして、それらの地下水の動きを知るのに、温泉の水質と水

温を詳細に観測することは、きわめて有効であると言える。

4. 謝 辞

現地での観測に積極的なご援助をたまわっている各温泉関係者、鳥取市水道局および三朝町水道課の方々、また Na-K-Ca アルカリ比温度計の計算の手助けをしていただいた東邦大学一般教養部の高松信樹氏に対して深く感謝の意を表します。なお、試水の化学分析は当研究所地形土じょう災害部門の機器を使用し行なったものである。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) Kishimoto, Y.: On precursory phenomena observed at the Yamasaki fault, Southwest, Japan, as a test-field for earthquake prediction, *Earthquake Prediction — An International Review* Maurice Ewing Series 4, 1981, pp. 510-516.
- 3) Yoshioka, R., N. Koizumi, and K. Kitaoka: Relation between temporal variations of chemical species in mineral springs and small earthquakes — A case study in Shiota mineral spring in Hyogo Prefecture, Japan, *Extended abstracts — Fourth International Symposium on Water-Rock Interaction*, 1983, pp. 551-554.
- 4) 吉岡龍馬・岸本兆方・西田良平・北岡豪一：1981年6月25日浜田沖の地震にともなった温泉の塩素濃度の変化，地震予知連絡会会報，第27巻，1982，pp. 291-294.
- 5) 佃 為成：鳥取県中部の地震 (1983年10月31日，M 6.2) の前兆地震活動変化，地震学会講演予稿集，No. 1, 1984, pp. 106.
- 6) Wakita, H., Y. Nakamura, K. Notsu, M. Noguchi and T. Asada: Radon anomaly as possible precursor of the 1978 Izu-Oshima-Kinkai earthquake, *Science*, Vol. 207, 1980, pp. 882-883.
- 7) 王長岭・姚庆春・龍 明：松潘—平武地震前の震央北方地域の泉点における地下水中のラドン濃度異常とその原因に関する研究，中国における地球化学的地震予知研究，地殻化学実験施設集報，第2号，1981，pp. 62-71.
- 8) 杉崎隆一・井戸正彦・武田 浩・磯部由美子・佐竹 洋・林 義光・中村則明・水谷義彦：活断層より放出されるガス(2) 水素について——断層ガスの化学的特徴と断層活動——，地震2，第37巻，1984，pp. 12-34.
- 9) 日本海新聞，1983年11月8日
- 10) 日本海新聞，1983年11月13日
- 11) Shimamura H.: Precision quartz thermometers for borehole observations, *J. Phys. Earth*, Vol. 28, 1980, pp. 243-260.
- 12) 佃 為成：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，第26巻，1981，pp. 271-273.
- 13) 佃 為成・矢部 征：地震後の温泉温度変化曲線，地震学会講演予稿集，No. 1, 1984, pp. 248.
- 14) Shimamura H.: Ground-water microtemperature measurements, coseismic signals and atmospheric pressure effects, *Annales Geophysicae*, Vol. 1, 1983, pp. 235-238.
- 15) Fournier, R. O., and Truesdell, A. H.: An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1973, Vol. 37, pp. 1255-1275.
- 16) 北岡豪一・吉岡龍馬・西田良平：トリチウム濃度から推定される山陰地方温泉の湧出経路，陸水学会講演要旨集，1983，pp. 183.
- 17) 森 康夫・陶山淳治：地熱エネルギー読本，1980，232 pp.，オーム社，東京。
- 18) Rybach L. and L. J. P. Muffler (Eds.): *Geothermal systems: Principles and case histories*, 1981, 359 pp.，John Wiley & Sons, Chichester. New York. Brisbane. Toronto.