

山崎断層の塩田温泉における近年の水質・水温変化

富永 卓男・小泉 尚嗣・北川 有一・吉岡 龍馬・
佐野 有司・五十嵐丈二

RECENT TEMPORAL CHANGES IN WATER QUALITY AND TEMPERATURE AT SHIOTA HOT SPRING NEAR THE YAMASAKI FAULT

By *Takuo TOMINAGA, Naoji KOIZUMI, Yuichi KITAGAWA,*
Ryuma YOSHIOKA, Yuji SANO and George IGARASHI

Synopsis

We have observed Cl^- concentration in spring water for the research for earthquake prediction since November, 1991. The study area is located in Shiota district, Hyogo prefecture, which is known as the Yamasaki Fault zone. Water samples are collected every day in principle. In this study, we paid attention to the short-term changes. To eliminate long-term fluctuation, we took the first order differential value of the time series of Cl^- concentration. As a result, remarkable changes in Cl^- concentration were recognized three times during the observation period. Two of them were probably caused by the plumbing. However the rest was attributable to neither artificial nor weather effects. As the electrical conductivity of spring water at Shiota and the water pressure at Yoshioka hot spring in Tottori prefecture changed simultaneously just after the East-Off Hokkaido earthquake (M 8.1), we conclude that the Cl^- concentration change was caused by the East-Off Hokkaido earthquake.

1. は じ め に

1.1 地球化学的地震予知研究について

地球化学的地震予知研究法とは、地下水や地下ガス中の特定の化学成分に注目したり、地下水の温度や、井戸の自噴量を調べ、その時間変化との関連を調べたり、空間分布を調べて、プレートテクトニクスや活断層等との関連を調査したりすることである。これには地下水の物理的性質の変化に注目したものと（水温、水位、自噴量、etc）、地下水の水質の変化に注目したものとがある。本研究は後者に属する。

この種の研究で近年注目を集めたものに、1966年旧ソ連タシケント地方の地震（ $M=5.5$ ）発生前に、地下水の Rn 濃度が変化したことを報告したものがある¹⁾。その後日本でも、1973年頃から、東大の脇田らを中心にこの種の研究が行われるようになった²⁾。さらに、中国での海城地震（1975年2月、 $M=7.3$ ）の予知の成功の際、地球化学的観測が非常に有効であったと伝えられると、文部省測地学審議会は「第三次地震予知計画の一部見直しについて」（1975年7月）を建議し、地下水に関する研究の推進を促すに至った。このようにして地球化学的な研究手法が、特に短期的な地震予知に有効な手法として、日本の地震予知研究に本格的に取り入れられるようになった。その後、日本でも多数の前兆現象例が報告されたが、前兆現

象をおこす地下のメカニズムについて不明な点が多いなど、種々の問題点も明らかになってきた。だがこの種の研究が地震予知研究にとって非常に有望な可能性を秘めていることもまた事実である。

1.2 地下水の水質が変化する理由

地下水の水質が変化する理由として地震に関連した変化と、それ以外のものがある。地震に関連した変化としては以下の2つのものが主に考えられる。

1. 地殻の歪み変化を原因とした地下水圧の変化によるもの。
2. 地震動によって、地下構造が破壊されることにより起こる地下水のシステムそのものの変化によるもの (Fig. 1)。

1は地震前と地震後のどちらにでもあり得る変化であり、2は地震後に起こる変化である。なお、地震時の揺れによって井戸の配管等が破損した結果、地下水水質が見かけ上変化することがあるので、この点については注意を要する。

次に地震以外の水質変化要因について述べる。これには以下の3つのものが主に考えられる。

1. 降水によるもの
 - 1-a 降水が地下に混入するために起こるもの
 - 1-b 降水の加重による地下水圧の変化のため起こるもの
2. 気圧の変化による地下水圧変化によるもの
3. 地球潮汐や海洋潮汐による地殻の歪み変化によるもの

1.3 同様の研究の問題点と本研究の特徴

地震予知の研究の一環として、地下水の水質に注目するという考えは、過去に比較的多くの研究がなされてきた。しかしこの種の研究には次の2つの問題点を含みがちであった。

1. 観測期間が十分に長いとはいえない
2. 採水間隔が十分に短いとはいえない

測定の高頻度は多いものでも一月に数回といったものが多かった。これでは地下水の短期的な変化を見るのには不十分であると考え、この研究では吉岡³⁾や Koizumi et. al⁴⁾の方法に習って次のような特徴を持たせた。

1. 1日1回の採水を原則とする (実際には現地の人に採水をお願いして、1~2ヶ月に1回溜まったサンプルを我々が回収している)。
2. 最低数年以上の観測を行うようにする。
3. 対象とする地下水を活断層周辺の温泉水とする。
4. 採水されたサンプルの塩素イオン (塩化物イオン) 濃度を主に分析する。
5. 電気伝導度計を現地に設置して連続観測を行い、水質変化の目安にする。

1と2の理由は上に述べた通りである。3の理由としては、活断層周辺が地震活動の起こりやすい場所であるという事と、断層及び断層破砕帯に応力が集中して地震が発生する場合、地震前の歪み変化や地震後の

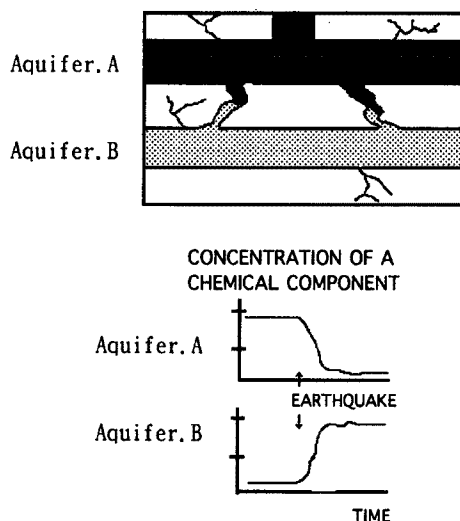


Fig. 1. A Model for change in water quality made by earthquake-caused destruction of the underground structure. Aquifer A: Aquifer where the concentration of a chemical component of the groundwater is high, Aquifer B: Aquifer where the concentration of it is low.

地下構造の破壊が温泉水の水質に変化を与える事が期待できる点が挙げられる。4の理由としては、塩素イオンは温泉において一般的に含まれている元素であるということ。化学的に安定であり、分析方法が手軽であるという点が挙げられる。5の理由としては、電気伝導度計が、水質の指標として比較的安定に連続観測が出来るという点が挙げられる。連続観測をしているので、水質異常の発生時間が、1日1回の塩素濃度分析値に比べて正確にわかるという利点はあるが、無人で観測しているために、しばしば故障して長期の欠測を生じる。また後に述べるように、塩素イオン濃度に比べて精度が落ちるという欠点がある。それゆえ1日1回の採水・塩素イオン濃度の分析も並行して行っている。

以上の5点を特徴として、本研究を進めていった。

2. 観測点の概要

本研究では、途中大きな欠測期間（1992年8月24日～1992年11月14日）を含むが、1991年11月18日より1994年12月31日までを主要な観測期間として取り扱う。今回調査を行ったのはFig. 2の黒丸で示すところである。この地域には山崎断層と有馬高槻構造線という2つの大きな活断層系が存在している。山崎断層には、大原断層、土万断層、暮れ坂峠断層。安富断層という4つの大きな断層があり、この中の安富断層が東方に延長され有馬高槻構造線に繋がると言われている⁵⁾。主要な観測点はFig. 2の1の塩田にある知新荘という温泉宿の井戸である。そこでの変化を補助する形でもうひとつの観測点であるFig. 2の2の吉岡のデータを用いる。

2.1 塩田温泉

この観測点は、兵庫県飾磨郡夢前町に位置し、山崎断層を構成する安富断層と暮れ坂峠断層の間に挟まれている。周辺の地質は、流紋岩質凝灰岩、砂岩、頁岩等である。

観測井は知新荘という温泉旅館のものである。温泉水は約300mのボーリング孔から二酸化炭素を伴って自噴しており、水温は年間を通して15-17度である。PHは6.5程度である。1977年3月より1989年1月までの約12年間にわたって水質の調査がなされており^{3,4,6-9)}、それによるとこの井戸はNaClの卓越したものとCa(HCO₃)₂の卓越したものが混ざってできたものであるとされている³⁾（詳細な分析表をTable 1に記す）。

今回用いたデータは、塩素イオン濃度の1991年11月より1994年12月までの約3年分と、水の電気伝導度の1994年7月8日から1995年1月16日までの6ヵ月分である。

2.2 吉岡温泉

この観測点は、鳥取県鳥取市吉岡温泉町に位置し、鳥取県では岩井温泉とともに、最も歴史の古い温泉

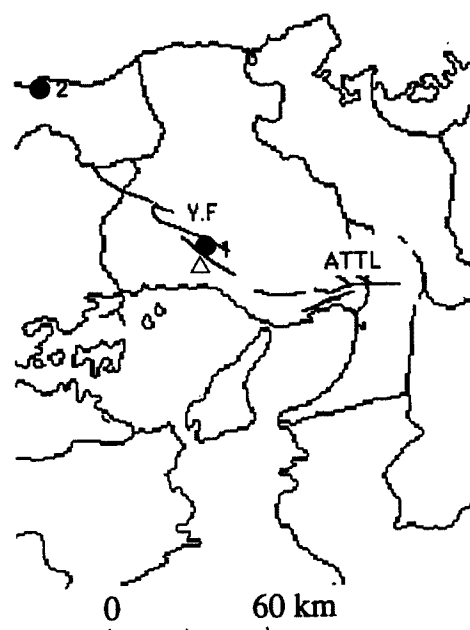


Fig. 2. Location of observation stations. ● 1: Shiota (Chishinso observation station), ● 2: Yoshioka, △: Himeji Meteorological Observatory, Y.F.: Yamasaki Fault, A.T.T.L.: Arima-Takatsuki Tectonic Line.

Table 1. Chemical composition of Shiota hot spring water, Yoshioka hot spring water and Yumesaki river water. Yumesaki river runs in front of Shiota observation well.

LOCATION	DATE	pH	Na ⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Cl ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L
SHIOTA	94. 10. 04	6.5	706	6.3	640	109	855	10.0	2900
YOSHIOKA	92. 01. 01	—	105	2.3	13.8	0.4	70.0	99.0	115
YUMESAKI RIVIER	94. 12. 30	—	14.3	3.1	13.7	3.4	14.5	44.5	20.2

の一つである。周辺の地質は、下位から鳥取花崗岩、鳥取南部花崗岩類、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 10 m 内外の沖積層が直接花崗岩を覆っている。沖積層は 3 ~ 11 m 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、鳥取県¹⁰⁾や宮腰ら¹¹⁾によって行われた調査では、温泉水との関係ははっきりしなかった。温泉水の熱源は、付近の基盤岩の変質の状態から、新第三系の三徳層群か、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、現在のところ解っていない。泉質は、硫酸塩系の温泉に属しているが、溶存物質総量が 400 ~ 600 mg/l と少ないために、単純泉となっている¹⁰⁾ (Table 1)。観測井は、ポンプにより常時汲み上げられている株湯と呼ばれる泉源である。水温は 50 度前後で、PH は 7.6 程度である。

今回用いたデータは、連続データとしては 1993 年 10 月より 1995 年 1 月までの水圧 (揚湯している配管に取り付けられた圧力センサーで測定されているもので気圧との差圧) である。塩素イオン濃度も 1992 年 4 月までは毎日測定しているが¹²⁾、その後 2 カ月に一度程度の採水間隔になっている。そのため短期的な水質変化を観測するには不十分として、今回の研究では取り扱わない。

3. 測定方法

3.1 塩素イオン濃度の測定法

塩素イオン濃度の測定に用いた測定機器は、東亜電波社製の塩分分析計 SAT-2A である。この測定機器の測定原理は電量滴定法で、水溶液中の銀イオンと塩素イオンの中和反応を基本として、電気分解に関するファラデーの法則にもとづいて、電解に要した電気量を測定することにより、目的物質を定量する方法である。測定の手順は以下のとおりである。

1. 電解液中で銀電極、銀線間に一定量の電流を流す
 2. 塩素イオンが完全になくなるまで電流を流す
 3. 中和に要した電気量を求める
 4. ファラデーの法則から、塩素イオン濃度を出す
- なお、ファラデーの法則は次式で表される。

$$Q = \int_0^t Idt = FnW/M \quad \dots\dots\dots (1)$$

よって

$$W = QM/Fn \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで Q は中和に要した電気量, t は電解時間, I は電解の際の電流値 (一般に一定値), 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, W は目的物質の量, M は目的物質の分子量または原子量である。

注意すべき点は, この測定原理だとフッ素, ヨウ素, 臭素といった他のハロゲン元素とも銀イオンが反応してしまうということである。しかし日本の温泉においては, 塩素イオンの濃度に比べて他のハロゲン元素の濃度は十分に低

いので, 塩素イオンの濃度変化を見る妨害にはならないと考える (日本の温泉の平均水質組成¹³⁾を Table 2 に示す)。今回の測定における標準サンプルの測定値の再現性から調べた測定精度は約 10 mg/l 程度である。

Table 2. Average chemical composition of hot or mineral spring in Japan after Yamamoto (1983)¹³⁾.

ELEMENT	CONCENTRATION mg/L	ELEMENT	CONCENTRATION mg/L
Na	770	SO ₄ -S	570
K	42	Si	38
Mg	56	Fe	313
Ca	221	Al	95
Sr	0.5	As	0.43
Cl	1250	Mo	0.0077
F	1.9	Cu	0.8
I	0.73	Zn	0.13

3.2 電気伝導度の測定法

水の電気伝導度は, 水中の総イオン濃度に対応し, 水質が変化するとき電気伝導度も変化することが期待でき, さらに比較的長期に渡って連続測定ができる利点を持つ。

今回測定に使用した機器は, 東亜電波社製の電気伝導度計 CM-40 S である。この機器の測定原理は, 水中に電極を二本入れ, 交流電圧をかけて電流の流れ易さを測定するものである。注意しなければならない点として, 水の電気伝導度は通常 2 %/℃程度で変化する事が挙げられる。今回の測定値は JIS 規格に合わせて 25 度の値に換算してある。一般的な水の電気伝導度は, 雨水で 5 ~ 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 河川水で 30 ~ 3,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 海水で 20,000 ~ 50,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ であり¹³⁾, 塩田の温泉水で 4,000 ~ 4,350 $\mu\text{S}/\text{cm}$ となっている。

塩田における測定値は, デジタルレコーダーで 1 時間に一回, アナログレコーダーで 1 分半に一回打点記録している。

3.3 地震と気象のデータについて

今回の研究に使用した地震のデータは, 気象庁の発行する地震月報と, 同じく気象庁の発行する地震火山概況を利用した。気象のデータは, 気象庁姫路測候所のデータを用いた。

4. 観 測 結 果

4.1 塩田における観測結果

(1) これまでの観測結果

前にも述べたように, この観測点では, 1977 年 3 月より 1989 年 1 月までの約 12 年間にわたって塩素イオン濃度の測定がなされている^{3,4,6~9)}。Fig. 3 に示しているのは 1982 年 7 月より 1988 年 1 月までの約 6 年間のデータである。1986 年 12 月 25 日の工事による変化以外の目立った変化は地震によるものである。1983 年 10 月 31 日に起こった鳥取県中部の地震 (M 6.2), 1984 年 5 月 30 日の兵庫県南西部の地震 (山崎断層の地震, M 5.6) の発生直後から塩素イオンの濃度が急激に下がり, 数カ月をかけて回復する事がわかる (Fig. 3)。

この井戸は気温, 気圧, 降水量といった気象の影響をほとんど受けないということと, 山崎断層中部・

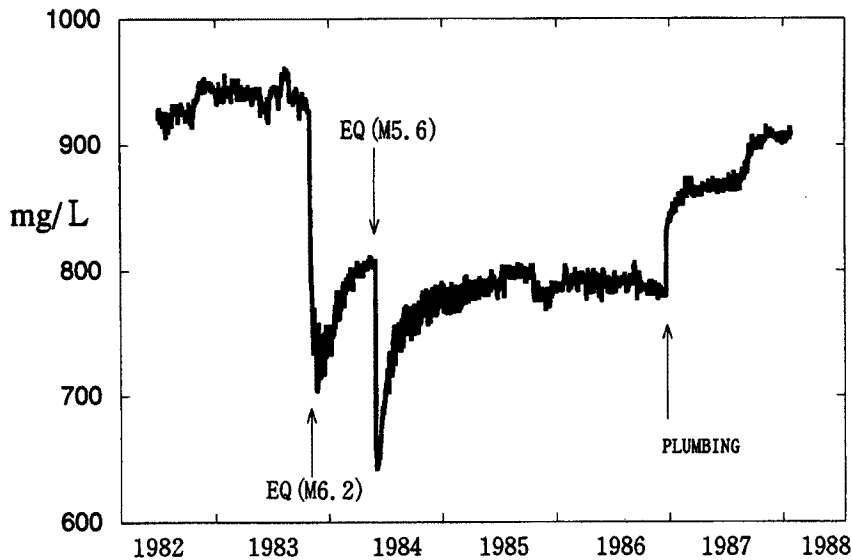


Fig. 3. Change in Cl^- concentration of the spring water at Chishinso, Shiota during the period from July, 1982 to January, 1987. EQ (M6.2): Earthquake with a magnitude of 6.2 occurring in the center of the Tottori Prefecture on October 31, 1983. EQ (M5.6): Earthquake with a magnitude of 5.6 occurring in the southwestern part of the Hyogo Prefecture on May 30, 1984.

東南部の M 3.5 以上の地震や、中国地方で発生する M 6 以上の地震に対して、塩素イオン濃度が、顕著な反応を示すことが報告されている⁴⁾。また今回新たに行った調査で、この井戸の塩素イオン濃度は、姫路測候所で震度 3 を越すほとんどの地震に対して、地震後顕著な変化を示すことが解った。

(2) 新たに行った観測の結果

まず塩素イオン濃度の観測結果から述べる。今回主に解析したのは、1991 年 11 月より 1994 年 12 月のサンプルである (Fig. 4)。なお 1992 年 8 月 21 日より同 11 月 20 日までは欠測期間である。大きく値が変化しているところが 3 箇所ある。1993 年 9 月 27 日、1994 年 6 月 21 日、同 10 月 5 日である。その 3 回の变化と、その後のばらつき以外は、870 ~ 920 mg/l の間では安定している。

次に温泉水の電気伝導度の観測結果について述べる。電気伝導度のデータは 1994 年 7 月 8 日から 1995 年 1 月 16 日までのものである (Fig. 5)。先に述べたように、電気伝導度のデータはデジタルレコーダには 1 時間に 1 回記録しているのだが、この井戸は二酸化炭素のあぶくを伴って自噴しているため、そのあぶくがセンサー部に付着してしまい、データがばらついている (ばらつきの上限の値が真の値に近いと思われる)。1994 年 11 月上旬から測定値の上限の値が小さくなると同時にデータのばらつきが小さくなっているが (図に双方向の矢印で示す)、これはこの時期にデジタルデータレコーダが故障し、やむなくアナログレコーダから毎時値を読みとり始めたからである。読みとる際には、ばらついているデータの中心点を読みとったので、必然的に正時付近のデータの平均値を読みとることになった。その結果、ばらつきが小さくなり、測定値の上限値も小さくなったのである。この点を考慮に入れて図を眺めると、電気伝導度の値が明瞭に変化するのは 1994 年 10 月 4 日 23 時からである。

4.2 吉岡における観測結果

水圧の 1994 年 7 月から 1995 年 1 月にかけての毎時値のデータを示す (Fig. 6)。300 ~ 400 hPa で安定していた水圧が、1994 年 10 月 4 日から 5 日にかけて大きく変動している。1994 年 10 月 4 日 0 時より 6 日

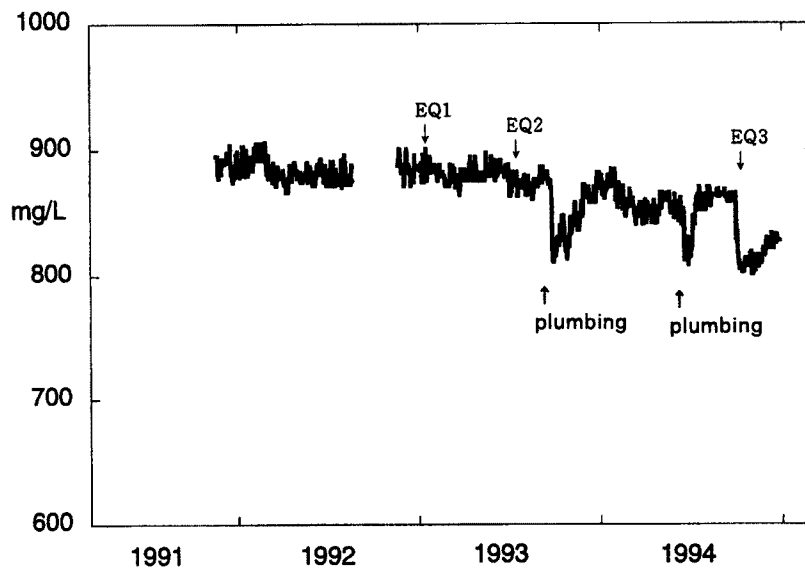


Fig. 4. Change in Cl^- concentration of the ground water at Chishinso, Shiota during the period from November 1991 to December, 1994. EQ 1 : Kushiro-oki Earthquake with a magnitude of 7.8 on January 15, 1993, EQ 2 : Hokkaido Nansei-oki Earthquake with a magnitude of 7.8 on July 12, 1993, EQ 3 : Hokkaido Toho-oki Earthquake with a magnitude of 8.1 on October 4, 1994.

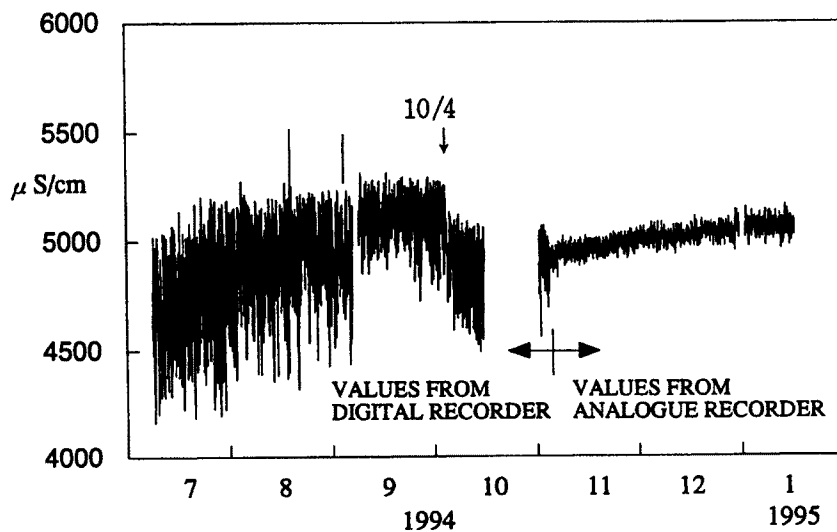


Fig. 5. Change in electrical conductivity of the ground water at Chishinso, Shiota.

0時までを拡大したのが Fig. 7 である。これを見ると値が大きく変化したのは、4日の23時の観測値からであることが解る。その後の2ヶ月間で急激に値は、もとの安定していたレベルまで戻っている。なお、1994年12月28日の三陸はるか沖地震（M 7.5, 鳥取での震度0）や1995年1月17日の兵庫県南部地震（M 7.2, 鳥取での震度4）でも水圧は急上昇している。特に兵庫県南部地震後の水圧の増加幅は大きく、記録計のレンジを越えてしまった結果、1月17日以降は水圧は欠測となっている（Fig. 6）。

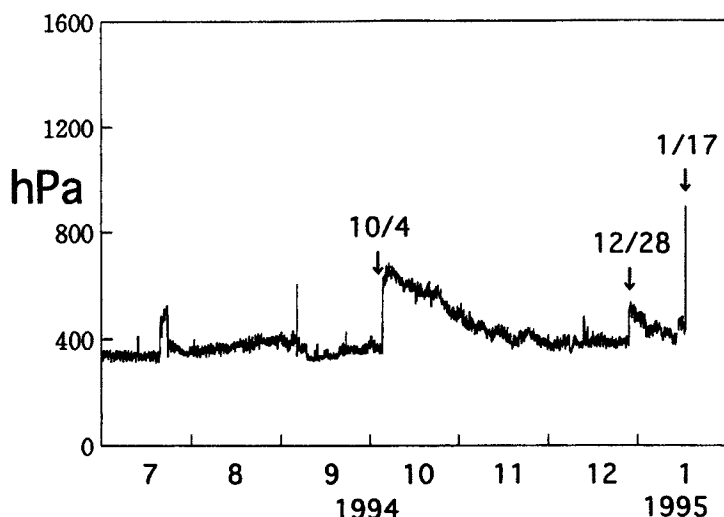


Fig. 6. Change in water pressure at Yoshioka hot spring during the period from July, 1994 to January, 1995.

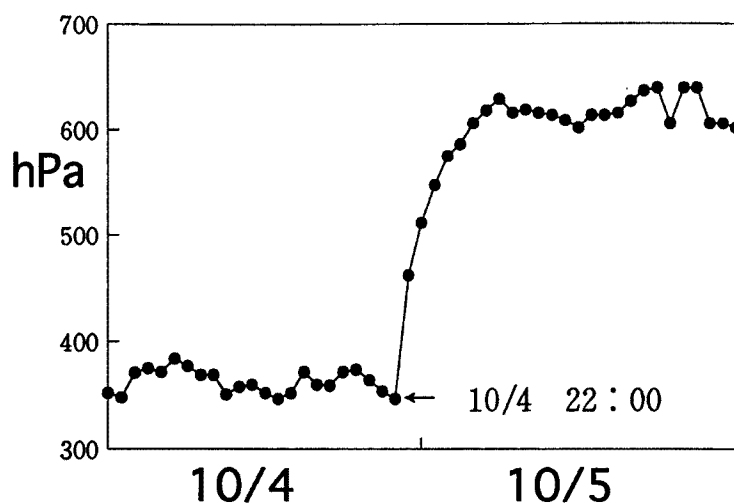


Fig. 7. Change in water pressure at Yoshioka hot spring on October 4 and October 5, 1994.

5. 考 察

5.1 異常値の決定法

これまで曖昧だった塩素イオン濃度の異常値を客観的に決定するために、今回新たに次のような方法を用いた。ある日の測定値から前日の測定値をひいた差分値を計算する。次にその差分値全体（1991年11月～1994年12月）の標準偏差（ σ ）を計算する。その日の差分値が $\pm 3\sigma$ を越える場合、これを異常値とする。この方法を用いることにより年周変化などに代表される長期的な緩やかな変化を取り除くことができ、短期的な変化のみに注目できる。この異常値の決定法は、塩素イオン濃度のみではなく、それを変化させ得る要因である、気温、気圧、降水量についても行った。気温・気圧については日平均値、降水量に

関しては日降水量を用いている。なお、気象要素の差分値と塩素イオン濃度の差分値の対応を Fig. 8 にのせる。気温・気圧・降水量との対応は明らかに認められない。塩素イオン濃度を遅らせるセンスで、時間をずらしても同様である。塩素イオン濃度変化と対応させる地震としては、姫路で震度3を越えるものと、山崎断層沿いの M 3.5 以上のものを調べた。

以上のような方法を今回の測定値に用いた結果 Table 3～6 のようになった（降水量については省略）。それぞれの異常値が、気温で8回、気圧で6回、塩素イオン濃度で3回、降水量で35回あった。地震については上述の条件に該当するものは発生しなかった。Table 5, 6 に気圧や気温の異常値の発生日とその日の塩素イオン濃度の差分値を示すが、塩素イオン濃度は特に大きな変化を示していない。これは雨についても同様である。

5.2 異常値の考察

塩素イオン濃度の異常値は3回発生した（Table 4）。そのうちの2回は、発生日の前日である1993年9月26日と1994年6月20日に、測定器設置のために井戸の配管工事を行っており、その後の変化は、この工事によるものであると考える。1993年9月27日以降の数カ月間、塩素イオン濃度は不安定だが、過去に配管工事を行ったときも同様の変化が観測された場合があるので、この不安定な変化も配管工事に原因を帰することができる。1994年10月5日の変化の前後には、配管工事は行っていないし、上で定義した気象要素の異常変化も該当する地震もない。したがってこの変化は、これまでの要因では説明できない。

この異常値の変化要因をこれまでの測定値から総合的に考えることにする。1994年10月4日から5日にかけての変化は気象の急変によるものではない。山崎断層沿いで M 3.5 以上の地震は発生していないし、姫路で震度3以上の地震も発生していない。それらに準ずるような規模の地震すら起こっていない。ゆえに従来対応するとされてきた地震による変化でもない。

塩田と吉岡ではほぼ同時に変化が見られたことから、その要因は広い範囲で変化をもたらすものである。変化の始まりが、吉岡の水圧で（デジタル記録

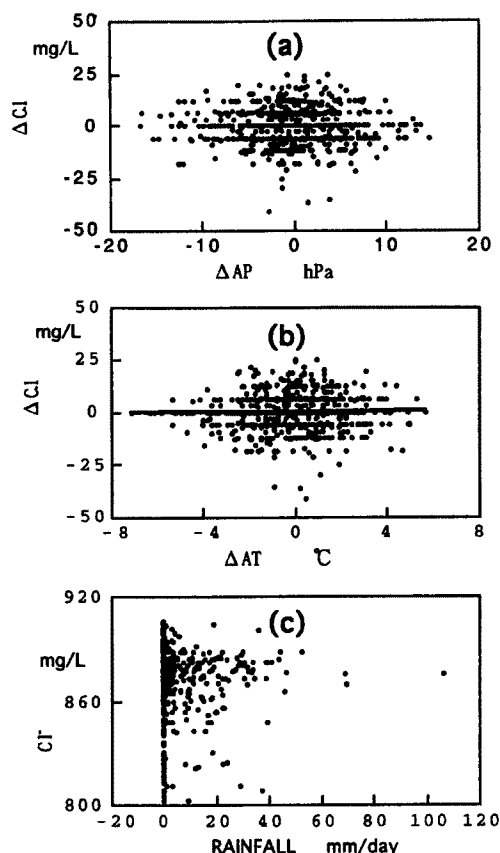


Fig. 8. Correlation between Cl^- concentration at Shiota and each meteorological factor observed at Himeji Meteorological Observatory. a: Correlation between ΔAP (differential values of the atmospheric pressure) and ΔCl^- (differential values of the Cl^- concentration), b: Correlation between ΔAT (differential values of the atmospheric temperature) and ΔCl^- c: Correlation between daily rainfall and Cl^- (Cl^- concentration).

Table 3. Standard deviations (σ) of differential values of the observed data and frequency with which the differential values are beyond 3σ .

ELEMENT		STANDARD DEVIATION (σ)	Frequency
Cl^-	(mg/L)	8.4	25.2
AP	(hPa)	4.5	13.4
AT	($^{\circ}\text{C}$)	1.7	5.1
RAIN	(mm/day)	9.0	27.1

Table 4. Date of the abnormal Cl^- concentration change and its value (ΔCl^- : differential value of the Cl^- concentration).

DATE	Cl^- (mg/L)	ΔCl^- (mg/L)
93. 09. 27	829	- 41
94. 06. 21	812	- 35
94. 10. 05	829	- 36

Table 5. Date of the abnormal atmospheric pressure change at Himeji, its value (ΔAP : differential value of the atmospheric pressure) and corresponding Cl^- concentration change.

DATE	ΔAP (hPa)	ΔCl^- (mg/L)
92. 03. 05	- 14.6	- 6
92. 04. 10	- 14.5	5
92. 11. 20	- 17.6	—
93. 02. 08	13.8	0
93. 02. 21	- 16.7	0
94. 02. 01	- 16.5	- 6
94. 02. 10	14.6	0
94. 02. 21	- 15.3	- 6

Table 6. Date of the abnormal atmospheric temperature change at Himeji, its value (ΔAT : differential value of the atmospheric temperature) and corresponding Cl^- concentration change.

DATE	ΔAT ($^{\circ}\text{C}$)	ΔCl^- (mg/L)
92. 03. 02	- 6.0	15
92. 04. 12	- 5.4	- 9
92. 10. 05	- 5.4	—
92. 11. 21	- 5.8	0
93. 02. 08	- 6.1	0
93. 02. 23	- 7.1	0
93. 05. 14	6.3	0
94. 04. 11	5.7	0

毎時値より) 10月4日の23時, 塩田の電気伝導度計で(アナログ連続記録より) 10月4日22時30分頃, 塩田の塩素イオン濃度で10月5日のサンプルであったことなどを考え, 我々はこの変化要因を1994年10月4日午後22時23分に起こった北海道東方沖地震(M8.1)による変化だと考えた。

5.3 1991年～1994年にかけて発生したM8クラスの地震と塩田の塩素イオン濃度の対応

では今回の観測期間に起こったM8クラスの他の地震に対して塩田ではどのような変化がでたのだろうか。今回の観測期間中に日本およびその周辺でM8クラスの地震は北海道東方沖地震を含めて3回起こっている(Fig. 9)。1993年1月15日の釧路沖地震(M=7.8 深さ=108 km, これをEQ1とする)。1993年7月12日の北海道南西沖地震(M=7.8 深さ=35 km, これをEQ2とする)。1994年10月4日に起こった北海道東方沖地震, (M=8.1 深さ=40 km, これをEQ3とする)である。3つとも塩田から見ての方向と震央距離は, ほぼ一緒に, 姫路での震度は0である。地震の発生した日の塩素イオン濃度変化をFig. 4にしめす。また各地震の発

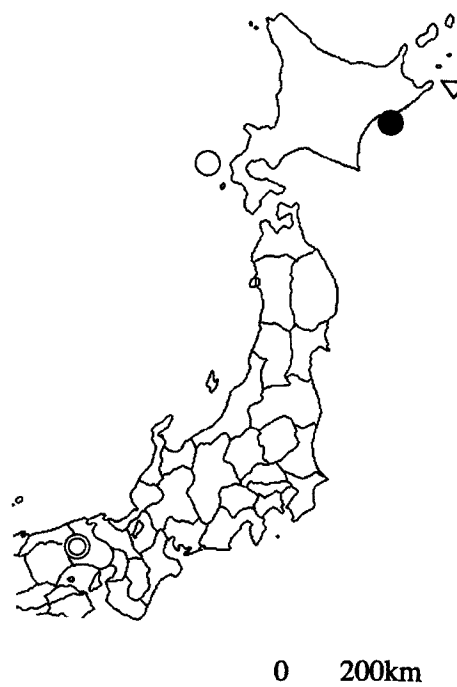


Fig. 9. Distribution of epicenters of M8-class earthquake occurring in and around Japan during the period from 1993 to 1994. ●: Kuroshio-oki Earthquake (M=7.8, Depth=108 km), ○: Hokkaido Nansei-oki Earthquake (M=7.8, Depth=35 km), ▽: Hokkaido Toho-oki Earthquake (M=8.1, Depth=40 km), ◎: Shioya.

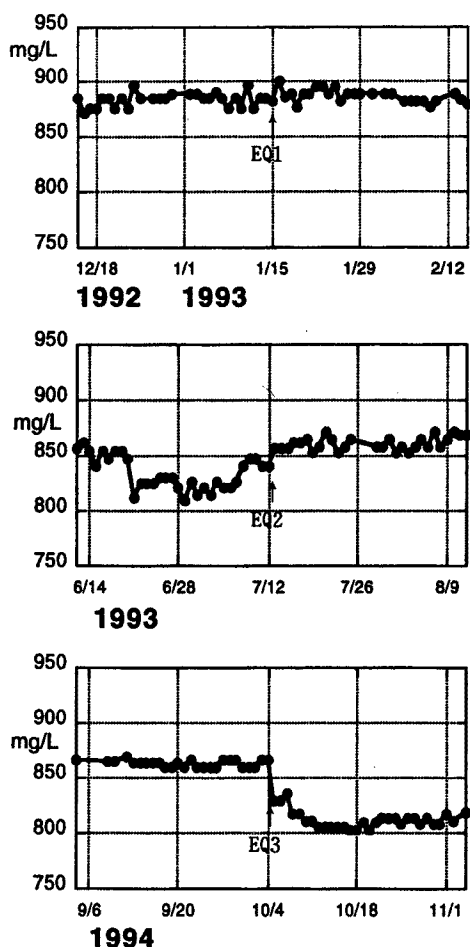


Fig. 10. Correlation between the Cl^- concentration changes and three M 8-class earthquakes. Upper: Temporal variation in the Cl^- concentration before and after the Kushiro-oki Earthquake (EQ 1), Middle: Temporal variation in the Cl^- concentration before and after the Hokkaido Nansei-oki Earthquake (EQ 2), Lower: Temporal variation in the Cl^- concentration before and after the Hokkaido Toho-oki Earthquake (EQ 3).

生日の前後 1 カ月をとって拡大したものが Fig. 10 である。塩素イオン濃度の変化が明らかに現れているのは EQ 3 のみで、EQ 1, EQ 2 に対応する変化は見られない。

このような変化の違いの明確な理由は現在まだ解っていないが、長野県松代町にある気象庁地震観測所で記録された広域地震計の速度記録では、長周期の波（表面波）の振幅が EQ 1 EQ 2 EQ 3 の順に大きくなっており、塩田でも同様であると考えられる。このように、震度にはあらわれない長周期の大きな振幅の地震波が、塩田における水質の変化に何らかの影響を与えたのではないかと考えられる。

6. 結 論

今回の測定結果から得られた結論は次のとおりである。

1. 今回新たに行った異常値の決定法は、長期的な変化を差し引き、客観的な異常値を決定するのに有効である。
2. Koizumi et. al⁴⁾の結果と同じく、今回の観測でもやはり塩田における塩素イオン濃度は、気温、気圧、降水量といった気象の影響を、少なくとも短期的には受けない。
3. 山崎断層周辺の地震や現地で震度の大きい地震だけでなく、現地で無感であっても遠方の大きな地震に対して水質に変化が見られる事がある

以上のようなことから、これまでの調査と同じく、今回の研究においても塩田の温泉水は、特定の性質を持った地震に対して明らかな反応を示すことが解った。地震後の水質変化については、今後、広域地震計等の記録を利用して、地震波のどのような成分に対応して、水質変化が生じるのかを明確にすることが必要である。その結果が井戸周辺の地下構造と結びつけば、水質変化を引き起こすメカニズムの解明に役立つであろうと考える。

7. 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、広島大学理学部地球惑星システム学科の寺田健太郎助手には、貴重な助言をいただいた。京都大学防災研究所の院生の皆様、広島大学地学科の院生・学生の皆様には、御助言・励

ましの言葉をいただいた。塩田温泉知新荘の皆様や吉岡温泉の皆様には観測に協力していただいている。特に知新荘では、本研究を行う上で欠かせないサンプルを、毎日とっていただいている。以上の方々に深くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Ulomov, V.I. and B. Z. Mavashev : The Tashkent earthquake of 26 April 1966, Acad.Nauk Uzbek SSR FAN, 1971, pp. 188 - 192.
- 2) 脇田 宏 : 地球化学的地震予知研究の 10 年, 東京大学理学部地殻化学実験施設彙報, 第 3 号, 1984, pp. 2 - 26.
- 3) 吉岡龍馬 : 山崎断層の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.
- 4) Koizumi, N., R., Yoshioka and Y., Kishimoto : Earthquake prediction by means of change of chemical composition in mineral spring water, Geophys. Res. Lett., Vol. 12, 1985, pp. 510 - 513.
- 5) 茂木 透・西村 進・見野和夫・貞広太郎 : 近畿北西部地域の活構造 (1) - 山崎断層東方延長域一, 地震 2, 第 38 巻, 1985, pp. 57 - 66.
- 6) 吉岡龍馬・小泉尚嗣 : 温泉水の水質変化, 月刊地球, 第 7 巻, 1985, pp. 54 - 57.
- 7) 小泉尚嗣・中尾節郎・矢部 征・桂 郁雄・西田良平・吉岡龍馬 : 山崎及び吉岡・鹿野断層周辺での地下水・地球化学観測, 西南日本内帯における主要活断層調査, 1991, pp. 231 - 245.
- 8) 小泉尚嗣・吉岡龍馬 : 地震活動に関連した地下水塩素イオン濃度の変化前兆異常検出の統計的手法, 統計数理研究所共同研究会成果報告書, 1987, pp. 104 - 113.
- 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) 鳥取県 : 鳥取県温泉総覧, 1972, pp. 65 - 74.
- 11) 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.
- 12) 板持倫子・小泉尚嗣・西田良平・吉岡龍馬・矢部 征・中尾節郎 : 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, 京大防災年報, 第 36 号 B-1, 1993, pp. 237 - 252.
- 13) 山本莊毅 : 新版地下水調査法, 古今書院, 1983, pp. 368 - 405.