

## 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

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

### HYDROLOGICAL AND GEOCHEMICAL OBSERVATION MADE BY TOTTORI OBSERVATORY, RESEARCH CENTER FOR EARTHQUAKE PREDICTION

By *Naoji KOIZUMI, Setsuro NAKAO, Sei YABE, Ikuo KATSURA,*  
*Norio HIRANO, Ryohei NISHIDA and Ryuma YOSHIOKA*

#### Synopsis

We have continued the measurement of gamma-ray at 4 tunnels for crustal movement observation. We have also continued the measurement of chemical composition (or electrical conductivity) and temperature of the groundwater at 7 wells which are hot or mineral springs. The observation tunnels and wells are mainly located near Yamasaki, Shikano and Yoshioka faults. The observation periods range from 7 months to 14 years.

In 1990, there were 2 neighboring earthquake activities whose magnitudes are greater than 5. There were also 2 typhoon landings accompanied with heavy rainfall and rapid change in atmospheric pressure. Although there were several typhoon-related changes in the gamma-ray intensity, the electrical conductivity or the water temperature at several observation tunnels or wells, we detected only one clear earthquake-related (coseismic) change in electrical conductivity of the groundwater at one observation well. As there clearly exist some sensitive observation stations to neighboring earthquakes, it seems important to investigate the conditions of such observation stations.

#### 1. はじめに

1975年の第三次地震予知計画の一部見直しで、地下水・地球化学観測が、日本の地震予知研究に本格的に取り入れられてから15年が経過した。それ以来、地下水や地球化学的観測による地震の前兆現象例はいくつか報告されたものの、そのメカニズムの解明は充分進んでいないのが現状である<sup>1)</sup>。いま、求められているのは、前兆現象に固執することなく、地下水や地球化学の観測値の変動要因を、ひとつひとつ明らかにしていくという研究態度であろう。他方、アメリカにおいては、放射性廃棄物処理を含めた環境問題に対する関心から、深部地下水の挙動や地下水による物質輸送に対する研究が盛んとなっている。日本においてもその種の研究が必要なのは明らかで、自然放射能や、深部地下水を長期に渡って観測し、その変化の要因を研究することは、地震予知研究とは別の意味で重要となりつつある。

1990年6月に、京都大学防災研究所附属地震予知研究センターが設置され、地震予知研究を総合的に行なう体制が整い、鳥取微小地震観測所も統合されて名称も鳥取観測所となった。鳥取観測所は、上述の

ような観点も踏まえて、主に山崎・吉岡・鹿野断層周辺で、地下水や自然放射能の連続観測を行なっている。本論文では、その観測点や観測手法について紹介し、1990年中に観測点周辺で発生した2つのM5クラスの地震活動の前後の変化について報告する。

## 2. 観測点の概要

### 2.1 $\gamma$ 線観測点

4つの観測点があり、いずれも地殻変動観測坑内で測定している (Fig. 1)。

#### (1) 安 富 (G1)

兵庫県宍粟郡安富町にある山崎断層地殻変動観測坑内で1989年12月より観測をしている。地質は粘板岩ないし頁岩で、坑内気温の年周変化の振幅は約 $5^{\circ}\text{C}$ である<sup>2)</sup>。伸縮歪の年周変化の大きさは $10^{-5}$  Strainに達する<sup>3), 4)</sup>。

#### (2) 生 野 (G2)

兵庫県の旧生野鉾山の火薬庫を利用した地殻変動観測坑内で1987年12月から、同観測点で行なわれている地震予知研究のための総合観測の一環として行なわれている<sup>5), 6)</sup>。地質は流紋岩質ないし安山岩質の凝灰岩および凝灰角礫岩で、年間の坑内気温変化は $0.1^{\circ}\text{C}$ 以下である。

#### (3) 鳥 取 (G3)

鳥取県鳥取市にある地震予知研究センター鳥取観測所の地殻変動観測坑内で1983年8月から観測をしている。地質は石英安山岩質火山礫凝灰岩で、坑内気温の年周変化の振幅は約 $4^{\circ}\text{C}$ である。

#### (4) 鯖 江 (G4)

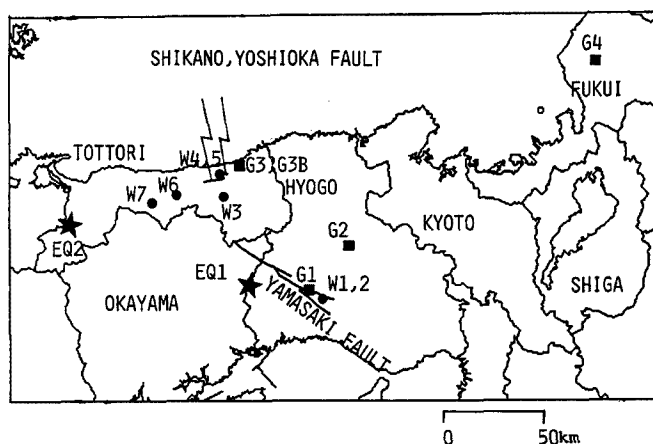


Fig. 1. Location of active faults and observation stations.

G1-G4: Gamma-ray observation stations

(G1: Yasutomi, G2: Ikuno, G3: Tottori, G4: Sabae),

W1-W7: Groundwater observation stations

(W1, 2: Yumesaki, W3: Yudani, W4, 5: Yoshioka, W6: Misasa, W7: Sekigane),

G3B: Tottori Meteorological Observatory,

EQ1: Epicenter of the earthquake (M5.2) which occurred near Sayo in Hyogo Prefecture,

EQ2: Epicenter of the earthquake swarm which occurred to the south of Yonago city in Tottori Prefecture.

福井県鯖江市にある地震予知研究センター北陸観測所の地殻変動観測坑内で1989年4月から観測をしている。地質は主に安山岩質凝灰岩で所々に玄武岩質溶岩の層を含む。坑内気温の年周変化の振幅は約1°Cである。

## 2.2 地下水観測点

7つの観測点があり、吉岡と関金を除いていずれも自噴温泉である。水温・水質等の連続観測を行なっている。

### (1) 夢前(塩田)-1(W1)

兵庫県飾磨郡夢前町塩田温泉の源泉の1つを利用している。約300mの鉛直のボーリング孔から自噴しており、水温は年間を通じて15-17°Cである。1977年3月から、1日1回の塩素イオン濃度分析を開始し、1979年10月から、ときどき長期の欠測はあるものの、水の電気伝導度と水温の連続観測を行なっている。

### (2) 夢前(塩田)-2(W2)

W1と同じく、夢前町塩田温泉の源泉の一つである。地表に自然湧出している。水温は年間を通じて12-22°Cである。約2m離れた所にも井戸があり(W2Bとする)その井戸の水位の影響を受けて水質が変化する。1977年4月から1日1回の塩素イオン濃度分析を開始し、1988年5月から水の電気伝導度・水温の連続観測を行なっている。

### (3) 湯谷(W3)

鳥取県八頭郡河原町湯谷温泉の源泉の1つを利用している。ボーリング孔から自噴しているがボーリング孔は、ほとんど埋まっている。ボーリング孔の深さは不明で、水温は33°C前後である。1980年11月から1日1回の塩素イオン濃度分析を開始。1983年5月から1984年7月まで精密水温観測(精度0.001°C)をしていたが、その後、測器の故障のため測定は中止している。1989年12月から水温・電気伝導度の連続観測を開始した。

### (4) 吉岡-1(W4)

鳥取県鳥取市吉岡温泉の源泉を利用している。ボーリング孔から常時揚水している2つの源泉の水が混合したものを測定している。水温は45°C前後で、1990年8月から水温・電気伝導度の連続観測を開始した。

### (5) 吉岡-2(W5)

W4と同じく吉岡温泉の源泉の一つである。ボーリング孔から常時揚水しており、水温は50°C前後である。1980年11月から1日1回の塩素イオン濃度分析を開始した。

### (6) 三朝(W6)

鳥取県東伯郡三朝町の三朝温泉の源泉の一つを利用している。地表に自然湧出しており、水温50-70°Cで、1980年11月から、1日1回の塩素イオン濃度の分析を開始し、1990年8月から水温・電気伝導度の連続観測を開始した。すぐ近くを流れている川の水位の影響を受ける。

### (7) 関金(W7)

鳥取県東伯郡関金町の関金温泉の源泉の一つである。ボーリング孔から常時揚水している。水温は40°C前後で、1990年8月から水温・電気伝導度の連続観測を開始した。

なお、以上に加えて、米子南方の郡発地震の震央(Fig. 1のEQ2)の近くの生山(しょうやま)鉱泉で、1991年2月から臨時に水温・電気伝導度の連続観測を開始したが、この論文には結果を示さない。

### 3. 観測手法について

#### 3.1 $\gamma$ 線を連続観測する理由

地震前に、地面の収縮や、地下の亀裂の生成等による空隙率の変化があれば、地面と大気の間でのガスのやりとりに変化があることが期待される。したがって、大気中に比べて土壌内の濃度が高いガスの濃度をモニターすれば、地震前の地殻の歪や、亀裂生成を監視できるというのが、地震予知研究のための地下ガス濃度観測の理由である。ラドンガス ( $^{222}\text{Rn}$ ) は

1. 土壌中の濃度が大気に比べて数千倍である<sup>7)</sup>,
2. 化学的に不活性である,
3. 放射性ガスであるため微量でも測定できる,

という特性を備えているので、このような目的のためのガスとしては適している。

従来、地下水や土壌ガス中のラドン濃度の連続測定は、 $\alpha$ 線を測定することによって行なわれてきた<sup>8), 9), 10)</sup>。坑内では、ラドン濃度がある程度高ければ、ラドンとその短寿命娘核種はおおむね放射平衡に達している<sup>11)</sup>、娘核種 ( $^{214}\text{Pb}$ ・ $^{214}\text{Bi}$ ) からの $\gamma$ 線を計測することでラドン濃度の測定が可能になる。しかも、 $\gamma$ 線の連続測定は、 $\alpha$ 線の連続測定に比べて安価かつ容易にできる。問題は、 $\gamma$ 線源としてはラドンの娘核種以外に、土壌中の $^{40}\text{K}$ や宇宙線等があることだが、観測坑内の $\gamma$ 線が変動する要因としてはラドン濃度変動を考えればよいという結果が、いくつかの地殻変動観測坑で示されている<sup>12), 13), 14)</sup>。

#### 3.2 温鉱泉水の水温・水質を連続観測する理由

温鉱泉は断層や断層破砕帯等の地殻の弱線部から湧出してくる場合が多い。地殻がブロック運動をし、かつ、断層部がそのブロック境界をなすならば、そのような断層部には歪が集中する。亀裂の生成・開閉等にもなる空隙率の変化も期待される。従って温鉱泉水の水温・水質に変化が出ることが考えられる。物理的なモデルを考えるためには、温鉱泉水の水位、または自噴量を同時に測定することが望ましいが、商業用の温鉱泉を使わせてもらう場合、水位・自噴量の精度のよい連続測定は一般に難しい。したがって、水温・水質のみを測定する場合が多くなる。

以前は、観測点で1日1回採水されたものを送付してもらい、実験室で分析するという手法が中心であった。そのため、分析するイオンとしては、イオンとしての安定性や、分析の手軽さ等を考慮して塩素イオン濃度を中心に分析していた<sup>15)</sup>。現在は、水質が変化するときは、水の電気伝導度に変化することがかなりの確率で期待できることがわかってきたので、水質のモニターとして、長期に安定な連続測定が期待できる水の電気伝導度の連続観測をおこない、1~2カ月に1回の頻度で採水して、水質に変化がないかどうかをチェックするのを主な観測体制としている。

## 4. 観測結果

1990年には、観測点周辺でM5クラスの地震活動が2つ発生した。一つは1990年9月29日の兵庫県佐用町付近の地震 (EQ1: M5.2) であり<sup>16)</sup>、もう一つは、1990年11月から12月にかけての米子南方の群発地震 (EQ2: 11月21日にM5.1, 11月23日にM5.2, 12月1日にM5.1がそれぞれ発生) である<sup>17)</sup>。また、台風19号 (T19) と台風28号 (T28) の中国地方上陸に伴う大雨や気圧の急変があった。これらの現象の前後の観測値の変化について主に述べる。

#### 4.1 $\gamma$ 線の観測結果

1988年~1990年の3年間の4観測点での結果と生野 (G2) の気圧と雨量を Fig. 2 に示す。生野の雨

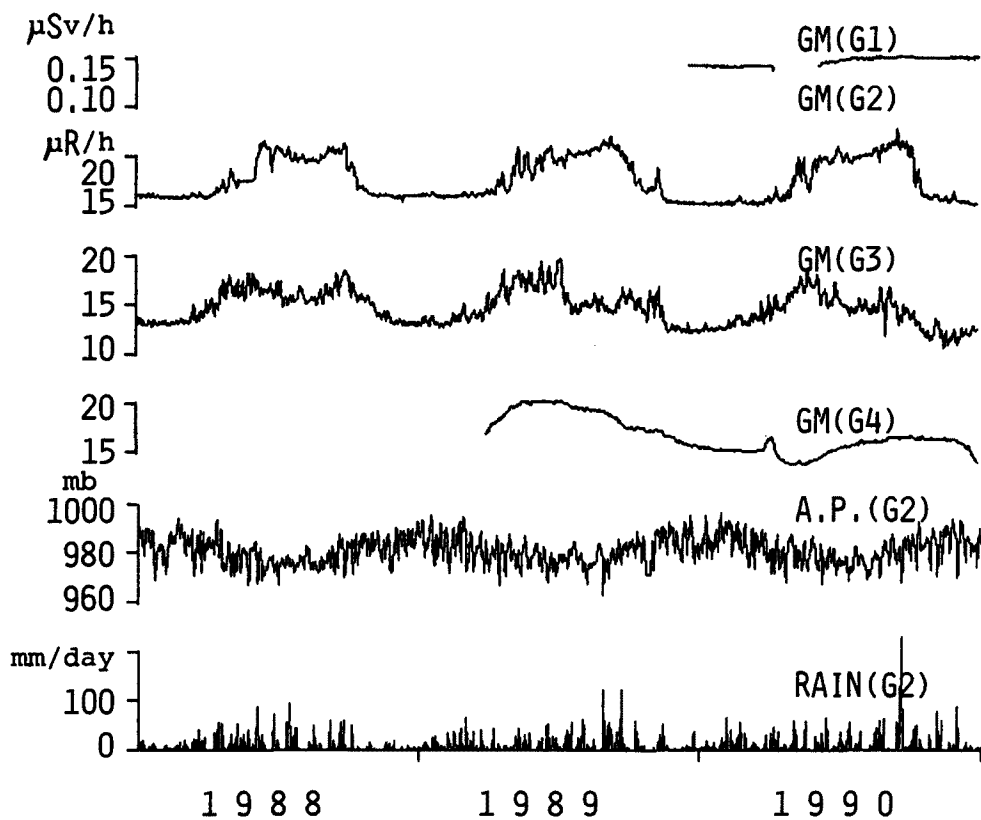


Fig. 2. Results of continuous measurement of gamma-ray(GM) at 4 stations (G1-G4), atmospheric pressure(A. P.) and rainfall at the Ikuno station (G2) during the period from 1988 till 1990.

量は日雨量で示し、他はすべて日平均値である。日平均値で見ると、生野 (G2) と鳥取气象台 (G3 B とする) での気圧変化に時間差はほとんどない。1989年に $\gamma$ 線強度の表示が照射線量率 (R/h) から1 cm線量当量率 (Sv/h) に変更になったので、1989年以前に購入した $\gamma$ 線測定器を使用している生野 (G2)・鳥取 (G3)・鯖江 (G4) と、1989年以降に購入した $\gamma$ 線測定器を使用している安富 (G1) とでは単位表示が異なる。照射線量率 (R/h) と1 cm線量当量率 (Sv/h) とでは、定義が異なるので、単純に単位換算はできないが、ほぼ  $1 \text{ R/h} = 0.01 \text{ Sv/h}$  と考えてよく<sup>18), 19)</sup>、図中のスケールもそれに合わせてある。また、鳥取 (G3) の $\gamma$ 線測定器は、他の測定器に比べて感度が約8倍となっている。

Fig. 2をみると、夏に高く、冬に低いという $\gamma$ 線強度の年周変化が、安富を除く3つの観測点で顕著である。地下水や土壌中のラドン濃度が夏高く、冬低いという傾向はいくつかの論文で報告されているが<sup>10), 20), 21)</sup>、その原因についてはまだはっきりしていない。われわれは、夏と冬の気温差による、地面の伸縮の影響がラドン濃度 ( $\gamma$ 線線量率) に影響を与えているのではないかと考えて、夏・冬での伸縮が  $10^{-5}$  strain に達する安富の観測坑で観測を行なったが、安富観測坑内での $\gamma$ 線線量率はほぼ一定であった (Fig. 2)。坑内の温度変化のごく小さい生野の観測坑においても、かなりの振幅の $\gamma$ 線の年周変化が記録されていることから考えても、ラドン濃度の年周変化を、地温の年周変化による地面の伸縮のみで説明するのは難しいようである。ただし、以前、安富観測坑内で $\alpha$ トラック法によるラドン濃度観測をしていた時は、夏の濃度が冬の数倍高いという年周変化が得られている<sup>22)</sup>。また、観測坑のすぐ上にある山崎断層観測室横の深さ60 cmの土壌ガス中のラドン濃度も、夏の濃度が冬より1桁大きいという年周変化

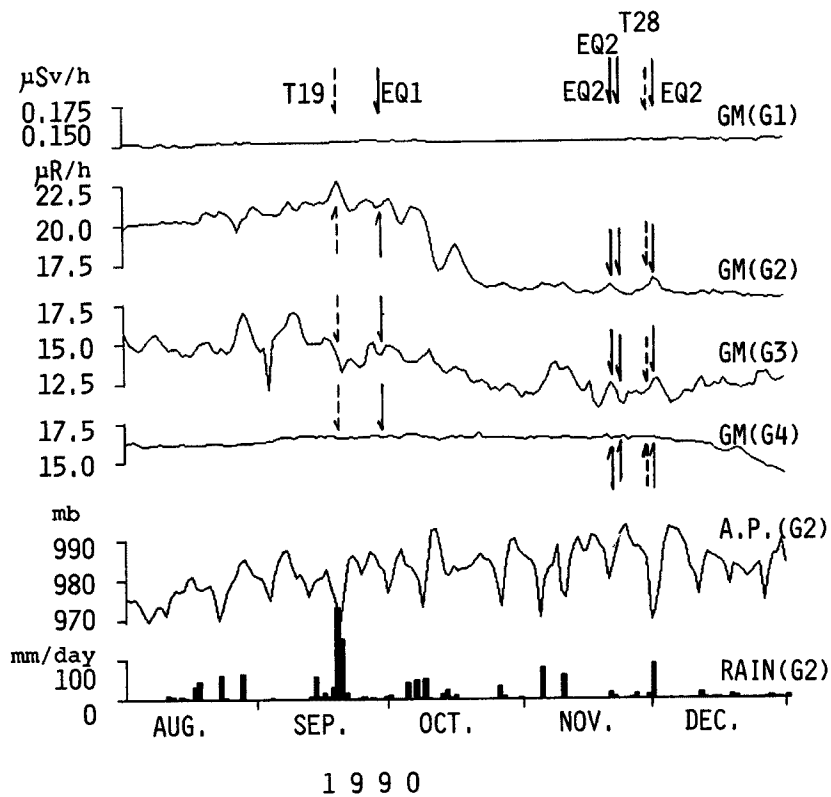


Fig. 3. Results of continuous measurement of gamma-ray(GM) at 4 stations (G1-G4), atmospheric pressure(A.P.) and rainfall at the Ikuno station (G2) during the period from August, 1990 till December, 1990. Solid line arrows and broken line arrows mean earthquake occurrences and typhoon landings, respectively. T19 and T28 show the typhoon(T9019) and the typhoon(T9028), respectively. As to EQ1 and EQ2, refer to Fig. 1.

をしており<sup>23)</sup>, 上述の観測結果には再吟味が必要である。

Fig. 3に、1990年8月から12月までの、 $\gamma$ 線の観測結果を示す。安富(G1)・鯖江(G4)の $\gamma$ 線強度はほぼ一定である。安富(G1)においては、台風19号の大雨に伴って、数日間で $10^{-6}$ に達する(通常の降雨レスポンスとは異なる)右ずれ状の伸縮変化が計測されたが<sup>24)</sup>、 $\gamma$ 線強度に変化はなかった。生野(G2)・鳥取(G3)には、数日程度の周期の変化が認められる。生野(G2)の数日程度の周期の変化には、気圧との逆相関が明瞭に認められるが、鳥取のそれは気圧との関係は、逆相関に見えるときと正相関に見える時と両方あってははっきりしない。生野(G2)・鳥取(G3)の観測結果で、9月～11月に $\gamma$ 線の線量率が減少しているのは、上述の年周変化によるものである。地震に伴う顕著な変化は特に認められない。鳥取の観測結果では、地震前に $\gamma$ 線が変動しているように見えるが、このような変動は他の所でも認められるので、前兆現象かどうかの判定は難しい。

#### 4.2 温鉱泉水の観測結果

1990年8月から1991年2月にかけての結果を、夢前の鉱泉(W1・W2)についてはFigs. 4, 5に、鳥取県の温泉(W3～W7)については、Figs. 6, 7に示す。夢前-1(W1)の結果と生野(G2)・鳥取気象台(G3B)の気圧については日平均値を示し、生野(G2)・鳥取気象台(G3B)の雨量については日雨量を示す。W2～4, W6, W7の結果は、毎0時の瞬時値を示す。W5は、1日1回採水し

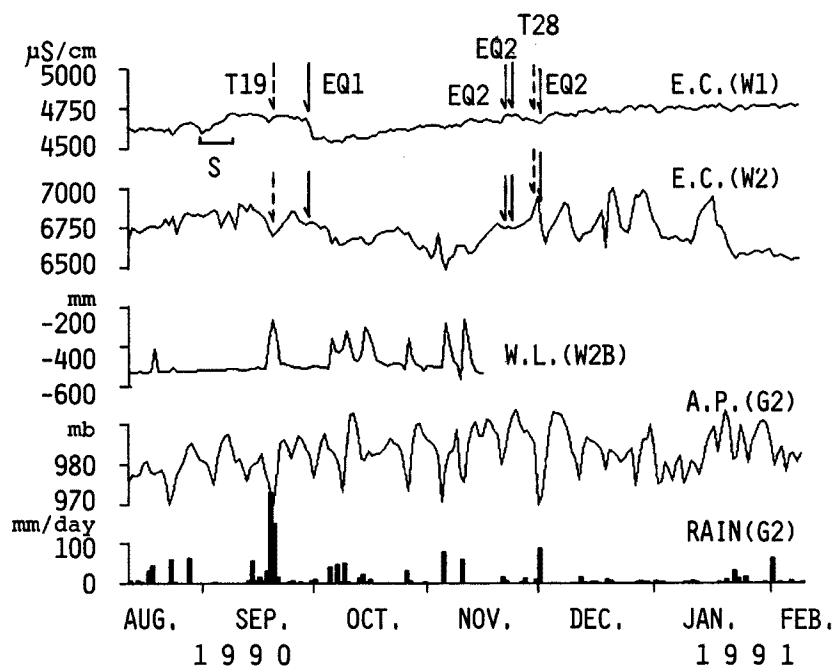


Fig. 4. Results of continuous measurement of electrical conductivity (E. C.) of the groundwater at the Yumesaki observation wells (W1, W2), water level at W2B, atmospheric pressure (A. P.) and rainfall at the Ikuno station (G2) during the period from August, 1990 till February, 1991. The earthquake occurrences (EQ1 and EQ2) and the typhoon landings (T19 and T28) are shown by arrows. As to 'S', refer to the text.

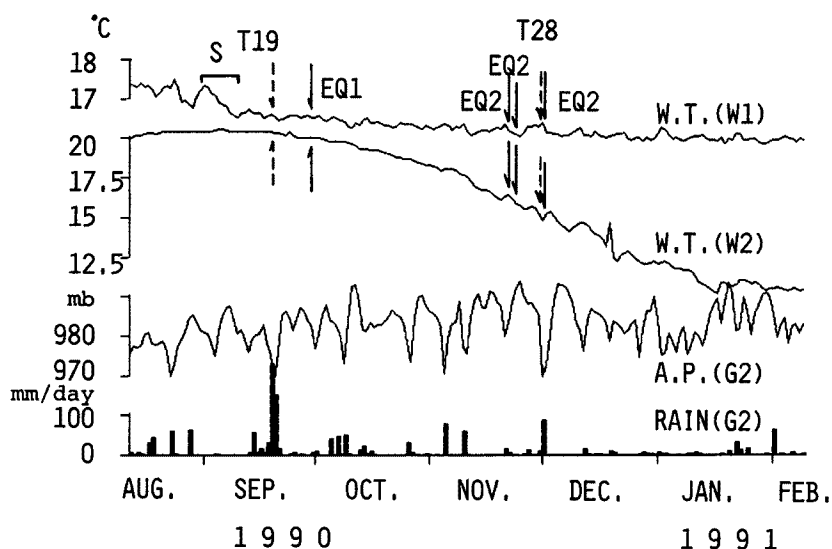


Fig. 5. Results of continuous measurement of water temperature (W. T.) of the groundwater at the Yumesaki observation wells (W1, W2), atmospheric pressure (A. P.) and rainfall at the Ikuno station (G2) during the period from August, 1990 till February, 1991. As to 'S', refer to the text.

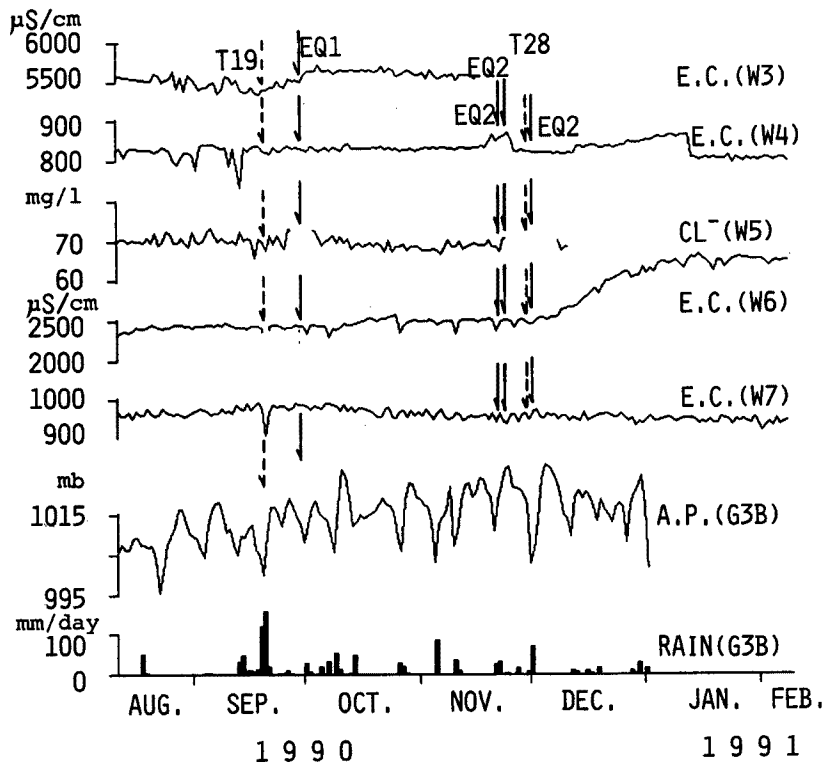


Fig. 6. Results of continuous measurement of electrical conductivity (E. C.) or  $\text{Cl}^-$  concentration ( $\text{Cl}^-$ ) of the groundwater at the observation wells (W3-W7) in Tottori Prefecture, atmospheric pressure (A. P.) and rainfall at Tottori Meteorological Observatory (G3B) during the period from August, 1990 till February, 1991.

た水の塩素イオン濃度を示す。夢前の鉱泉 (W 1, W 2) の電気伝導度は、水温  $15^\circ\text{C}$  の値に換算してあり、鳥取県の温泉 (W 3, W 4, W 6, W 7) の電気伝導度は、水温  $40^\circ\text{C}$  の値に換算してある。

#### (1) 夢前の鉱泉 (W 1, W 2) での結果

W 1 では、佐用町付近の地震 (EQ1) のとき電気伝導度がコサイスマックにステップ状に減少し、その後ゆっくりと上昇している (Fig. 4)。1-2カ月に1度採水し測定している塩素イオン濃度も同様な変化をしている。同観測点では、過去にも3回現地でも有感だった地震の時に同様なコサイスマックな電気伝導度変化・塩素イオン濃度変化を記録している<sup>15), 25)</sup>。米子南方の群発地震 (EQ2) の際には、地震に伴った変化は特に認められない。また、台風19号に伴って電気伝導度がわずかに変化している。他方 W 1 の水温には、特に顕著な変化は認められない (Fig. 5)。なお、Figs. 4, 5 の中で、「S」で示した、W 1 の水温・電気伝導度の変化は、観測システム変更に伴う変化である。

W 2 では、地震に伴った電気伝導度・水温の変化は認められない。水温の1990年10月~1991年2月の減少は季節変化である。降雨・揚水等によって W 2 B の水位が変化すると、それとは逆相関に電気伝導度に変化する。1990年12月以降に電気伝導度の変化の幅が大きくなったように見えるが、この時期から W 2 B の揚水が月に数回行なわれるようになっており、その影響が出ている可能性がある。12月1日の米子南方の地震 (M 5.1) のあとに電気伝導度に変化しているように見えるが、これは、台風19号の時に電気伝導度に変化しているのと同様に、台風28号の降雨にともなう W 2 B の水位変化のためと考えら



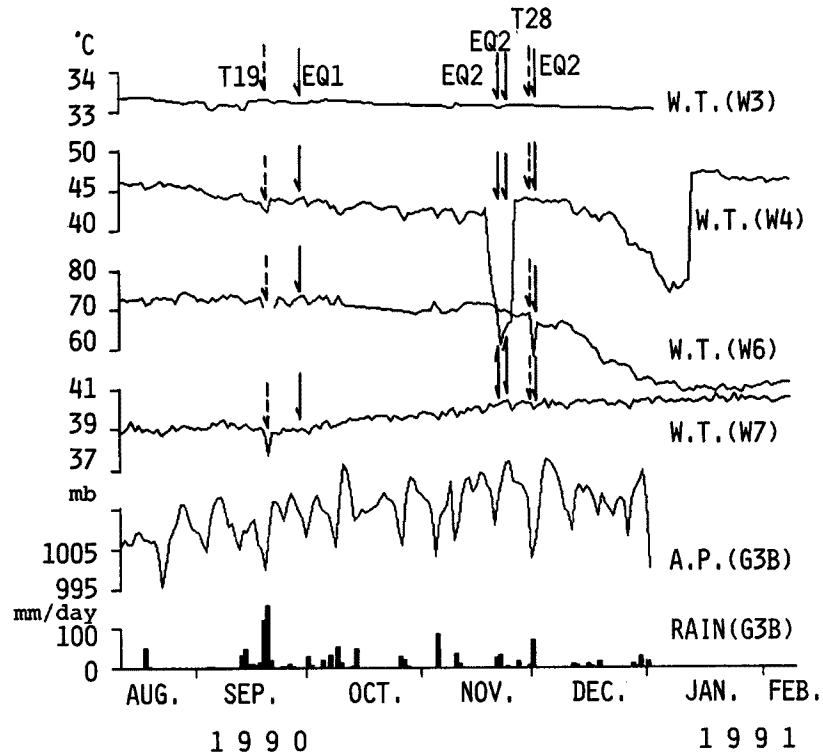


Fig. 7. Results of continuous measurement of water temperature (W. T.) of the groundwater at the observation wells (W3, W4, W6, W7) in Tottori Prefecture, atmospheric pressure (A. P.) and rainfall at Tottori Meteorological Observatory (G3B) during the period from August, 1990 till February, 1991.

れる。ただし、当時 W 2 B の水位は欠測状態にあったので断定はできない。

(2) 鳥取の温泉 (W 3 ~ W 7) での結果

温泉毎に変化のパターンはかなり異なる。例えば、W 3 の水温は非常に安定しているが、W 4 や W 6 ではかなり変化する (Fig. 7)。W 6 の 1990 年 12 月以降の水温の減少と電気伝導度の増加は、地震・台風と関係があるのか、単に季節的なものなのか判断がつかない。W 7 の 1990 年 10 月からの水温の上昇についても同じことがいえる。W 4 では、水温・電気伝導度が 11 月中旬、および、1990 年 12 月 ~ 1991 年 1 月に変化しているが、前者の変化については、温泉水を供給するパイプが詰まったことが原因であることが分かっている。後者についても、パイプ詰まり等の人工的な要因による変化である可能性が大きい。

台風 19 号の時、W 6 の水温や W 7 の水温・電気伝導度が大きく変化した (W 6 の水温は大きく減少したために、記録計がスケールアウトして欠測になっている)。W 3 でも、台風 19 号以降に電気伝導度が上昇しているように見える。台風 28 号の時に顕著な変化を示したのは、W 6 の水温だけである。これは、前述のように W 6 が、大雨にともなう川の増水の影響を強く受けるためである。地震に関連しては、どの観測点も顕著な変化は認められない。W 3 の電気伝導度や W 7 の水温が、EQ 1 以降に上昇しているように見える程度である。なお、1983 年 ~ 1984 年に W 3 で、精密水温測定 (精度 0.001°C) を行なっていた時に、4 つの地震 (1. 1983 年 5 月 26 日の日本海中部の地震 (M 7.7), 2. 1983 年 8 月 26 日国東半島のやや深発地震, 3. 1983 年 10 月 31 日の鳥取県中部の地震 (M 6.2), 4. 1984 年 5 月 30 日の山崎断層の地震 (M 5.6)) に対して顕著なコサイスマックな変化 (振幅 0.1 ~ 1.5°C) を記録している<sup>26), 27)</sup>。W

1～W7の現在の水温測定精度は0.1℃程度であり、地震にともなう水温変化を検出していない可能性はある。

## 5. ま と め

1990年に観測点周辺で発生したM5以上の2つの地震の前後で、顕著な変化を示したのは、W1観測点のみであり、それもコサイスマックな変化であった。通常の状態においても、各観測点で $\gamma$ 線強度や、水温・水質の変化のパターンに違いがある。W1観測点は、地震に関して明らかに敏感なので、このような観測点がある他の観測点と比べてどのような特長を持っているかを研究し、いわゆる地震予知観測のための「つぼ」の条件を明らかにしていきたいと考えている。

## 6. 謝 辞

この研究を進めるにあたり、京都大学名誉教授で前鳥取観測所長の岸本兆方博士には全般的な指導と助言を頂いた。 $\gamma$ 線の連続観測に関しては、元福井大学教授の岡部茂博士や、福井大学助教授の西川嗣雄博士、立命館大学教授の見野和夫博士に指導して頂いた。 $\gamma$ 線測定器の設置や記録の収集に関しては、立命館大学助教授の小笠原宏博士と京都大学防災研究所附属地震予知研究センター助手の渡辺邦彦博士に協力して頂いた。また、旧生野鉦山での観測にあたっては、株式会社三菱マテリアル・シルバー生野・テクノ大手の関係者の方々の協力を頂いている。温鉦泉の観測にあたっては、塩田温泉の知新荘・上山旅館の皆様、湯谷温泉の谷長家の皆様、吉岡温泉町の皆様、三朝温泉木屋旅館の皆様、関金町役場水道課の皆様の理解と協力を頂いている。また、京都大学防災研究所附属地震予知研究センター教授で、鳥取観測所長の住友則彦博士にも指導と助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表わします。

## 参 考 文 献

- 1) 脇田宏：地球化学観測—研究成果と問題点—，地震予知研究シンポジウム (1987)，1987，pp. 213-220.
- 2) 渡辺邦彦：1次元熱伝導モデルによる地殻伸縮年周変動の解釈，九十九地学，第22号，1987，pp. 13-21.
- 3) 尾池和夫・中村佳重郎：山崎断層における伸縮変化の連続観測結果，京大防災研年報，第21号B-1，1978，pp. 11-18.
- 4) 渡辺邦彦・尾池和夫：安富観測坑で記録された山崎断層の地震 (1984年5月30日，M5.6)にかかわる地殻変動，京大防災研年報，第28号B-1，1985，pp. 99-109.
- 5) 藤森邦夫・小笠原宏・小泉尚嗣・中尾節郎・藤原智・谷口慶祐・西上欽也・大塚成昭・平野憲雄・鉤卯三郎・飯尾能久：旧生野鉦山における多項目観測，地震学会講演予稿集，No. 2，1988，p. 240.
- 6) 小笠原宏・藤森邦夫・小泉尚嗣・中尾節郎・平野憲雄・西上欽也・飯尾能久・大塚成昭・谷口慶祐・西田良平：旧生野鉦山における多項目総合観測，西南日本内帯における主要活断層調査，1991，pp. 252-258.
- 7) Hatuda, Z.: Radon Content and its Change in Soil Air near the Ground Surface, Mem. Coll. Sci., Kyoto Univ., B, XX, 1953, pp. 285-306.
- 8) Noguchi, M. and H. Wakita: A Method for Continuous Measurement of Radon in

- Groundwater for Earthquake Prediction, *J. Geophys. Res.*, Vol. 82, 1977, pp. 1353–1357.
- 9) 西村進：地中空気のラドンの自動計測, *Radioisotopes*, Vol. 28, 1979, pp. 29–32.
  - 10) 山内常生・下道国：通気式電離箱による横坑内のラドン濃度の測定, およびその濃度変化と地震発生の関係, *地震 2*, 第 35 巻, 1982, pp. 435–446.
  - 11) Shimo, M., Y. Asano, K. Hayashi, and Y. Ikebe: On some properties of radon short-lived decay products in air, *Health Physics*, Vol. 48, 1985, pp. 75–86.
  - 12) 下道国・山内常生・松田秀晴・宮島力雄：GM サーベイメータによる地殻変動観測坑内空气中的ラドン濃度の測定, *地震 2*, 第 43 巻, 1990, pp. 111–120.
  - 13) 桂郁雄・中尾節郎・岸本兆方・渋谷拓郎・見野和夫・西田良平：鳥取観測所坑内での  $\gamma$  線線量率連続測定, *地震 2*, 第 42 巻, 1989, pp. 299–310.
  - 14) 中尾節郎・岸本兆方・渋谷拓郎・見野和夫・西田良平・桂郁雄：観測坑内におけるガンマー線連続観測(1), *京大防災研年報*, 第 30 号 B-1, 1987, pp. 57–65.
  - 15) 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.
  - 16) 京大防災研地震予知研究センター：兵庫県佐用町付近に発生した中地震（1990年9月29日,  $M = 5.2$ ）, *地震予知連絡会会報*, 第 45 巻, 1991, pp. 412–418.
  - 17) 京大防災研地震予知研究センター・鳥取大教養部：米子南方に再び発生した群発的な地震活動, *地震予知連絡会会報*, 第 45 巻, 1991, pp. 404–411.
  - 18) 日本アイソトープ協会技術課：照射線量率（mR/h）から 1 cm線量当量率（ $\mu\text{Sv/h}$ ）への実用的な換算について, *Isotope News*, 1989年7月号, pp. 45–47.
  - 19) 日本アイソトープ協会技術課：照射線量率（mR/h）から 1 cm線量当量率（ $\mu\text{Sv/h}$ ）への換算—計算による—, *Isotope News*, 1989年8月号, pp. 41–46.
  - 20) Wakita, H., Y. Nakamura, and Y. Sano: Groundwater Radon Variations Reflecting Changes in regional Stress Fields, *Earthq. Predict. Res.*, Vol. 3, 1985, pp. 545–557.
  - 21) 加藤完・高橋誠・吉川清志：長野県西部地震の前兆としての震央周辺における  $\alpha$  トラック法によるラドン濃度異常, *地震 2*, 第 39 巻, 1986, pp. 47–55.
  - 22) 脇田宏：私信.
  - 23) 五十嵐丈二：山崎断層における土壌ガス中ラドン濃度の連続観測, 西南日本内帯における主要活断層調査, 1991, pp. 246–251.
  - 24) 渡辺邦彦：「佐用の地震」に関する伸縮計の降雨レスポンス, 西南日本内帯における主要活断層調査, 1991, pp. 111–120.
  - 25) 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.
  - 26) 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・岸方兆方：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.
  - 27) 小泉尚嗣・佃為成・矢部征・渋谷拓郎：鳥取県の温谷温泉におけるコサイスマックな水温変化, *地震学会講演予稿集*, 1990, No. 1, p. 27.