

温泉・地下水と地震

京都自然史研究所

西村 進

〒 606-8305 京都市左京区吉田河原町 14 近畿地方発明センター内

(平成 10 年 8 月 30 日受付、平成 10 年 10 月 20 日受理)

The Effect of Earthquake on the Hot-spring and Groundwater

Kyoto Institute of Natural History

Susumu NISHIMURA

Abstract

There have been many reports on pre- and co-seismic anomalous changes in the water-level, gushing volume, temperature and chemical contents of hot-springs and groundwaters, but the mechanism of these anomalies are not clear. The 1995 Hyogoken Nambu earthquakes was one of the greatest shallow inland earthquakes in Japan. Many hot-spring and groundwater anomalies have been observed as the pre- and co-seismic events. The purpose of this paper is to study these anomalies systematically and to gain some knowledge of their mechanisms. The anomalous changes in shallow underflow water and river-water were not discussed but these on gushing springs, hot-springs and deep confined groundwaters are discussed.

Key Words: pre- and co-seismic anomalous change, hot-springs, groundwater, Hyogoken Nambu earthquake
キーワード：地震前後の異常現象、温泉、地下水、兵庫県南部地震

1. はじめに

被害地震が起こる度に、地震前後に起こった事象が問題になり、今後の予知に役立つものがないかと議論される。その中でも温泉や地下水の異常な変化については多く紹介されるが、なかなか連続観測にまで進まない。地震の後は連続観測が少しされることが多いが、地震予知計画でも、予算が減れば、一番さきに予算が切れ続けることが難しいことが多い。しかし、予算がなくても続けられているところもあり、それらをまとめ、議論を進めることが大切であると感じた。

兵庫県南部地震は大きな被害をもたらし、野島断層沿いにも、多くの湧き水がみられたりして、多くの現象が調べられ、地震時の地下水・温泉の変動とそのメカニズムが議論されたが、浅い地下水や、河川水の変動まで、すなわち、振動で変化したものまで入れたため議論を難しくしている(電力中央研究所, 1995; 石井他, 1995; 西村, 1995; King et al., 1995; Koizumi et al., 1996)。

今回、連続観測井のデータを集め、連続観測でないデータを一部参考にして、議論を進め、地震予知の研究に進言したい。

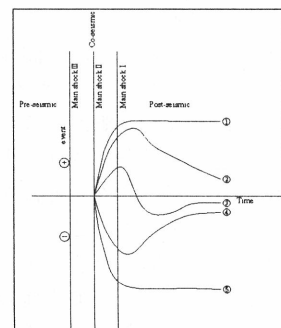


Fig. 1 Types of temporal variations of the hot-springs and ground-water before and after earthquake.

図1 地震前後での温泉・地下水の変動のタイプ

2. 地震時の変動の分類

温泉・深部被圧地下水の地震時の変動を次の様に分類する (Fig.1)。主震(main shock I :Fig.1参照)の前、すなわちpre-seismicな変動が認められる場合をCase- I、主震(main shock II, III:Fig.1 参照)の後、すなわちco-,post-seismicな変動が認められた場合をCase- II、変動が認められない場合をCase- IIIとする。

Case- I、Case- IIともに、地震に伴う水位の上昇、自噴量の増大、水温の上昇、成分の増大がして地震後ももとに戻らず推移している場合を①、下降、減少して後、もとに戻らず推移している場合を⑤、上昇、増大して時間とともに次第にもとに戻る場合を②、揺動して次第にもとの値に戻る場合を③、下降、減少して次第に元に戻る場合を④に分類しよう。なかにはどの場合でも、兵庫県南部地震のように大きな地震後に地震にたいして鈍感になったり、敏感になったりすることがある。

ただ地震後に調べることがおおいので、Case- I、Case- IIの区別のつかない場合も多い。

3. 変動の実例

3.1. Case- I の①の例：

城崎温泉の第28号泉源、この泉源は城崎町では最も深く、1994年10月に500m掘削完了し、孔底温度が81℃で、自噴120 ℓ/min、69-67℃の温泉が得られた(西村他,1995)。ところが、11月初めに城崎町の温泉課から、自噴泉の温度が上昇しているとの電話があり、その後、毎日測定してもらっていた (Fig.2)。1995年1月17日の兵庫県南部地震直前まで70-80℃を上下していたが地震直後80℃、次第に81℃に上昇し安定した。そのご配管工事がなされ、町の温泉源の一つとして利用されている。4泉源の湯のブレンドのコントロールのため各泉源の温度が連続で測定されているが、第28号泉源は現在でも80-81℃で安定している。これは、地震の前から変動があったが、地震後安定した典型的な例であるが、震源からの距離からして、特異点の一例とみられる。

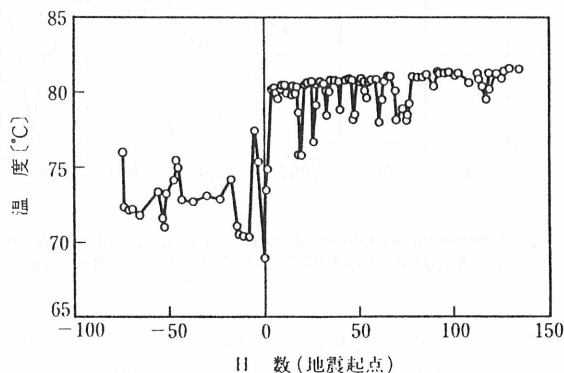


Fig. 2. Temporal variations of water temperature recorded at Kinosaki No.28 hot springs before and after Hyogoken Nanbu earthquake (modified from Nishimura, 1995).
 図 2. 城崎28号泉源(位置は図4参照)の自噴温度の兵庫県南部地震前後の変化(西村, 1995に加筆)

3.2. Case- I の②の例：

守山市の琵琶湖古環境調査(1975-1976)の際に1,000m深まで掘削された自噴井で、研究終了後、温泉として守山市に寄付されていて放置してあったものを使わせていただき1985から地震予知計画の一環として湧水量、ガス分析、深部の温度変化など盛りだくさんの連続測定を開始した。途中、ケーシングのものがわかり、深部の湧水と浅部の湧水をケーシングを入れ直して、分離して測定を続けた。その後、780m深度の温度が安定して測定出来るようになった。1990年4月に温度計を入れ替え、800m深度で測定を進めた。ここにはその温度変化と深部の湧水量、琵琶湖の西岸堅田で湖面の水位変化をFig.3に示した。観測点のちかくの地震ではその1ヵ月ほど前から水温が上昇しだし、地震後約1ヵ月ほどして下降することがわかった。1990年初頭の滋賀県西北部地震(M4.9)

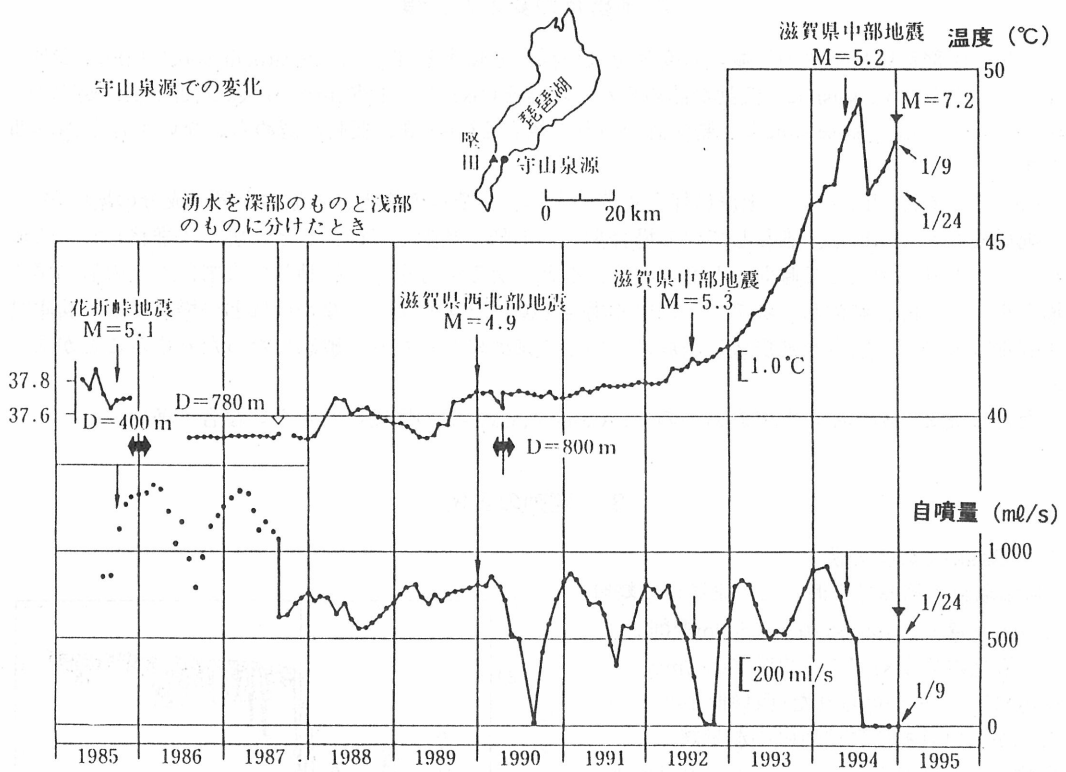


Fig. 3. Temporal variations of water temperature and volume of self-fountain at Misaki, Moriyma city, Shiga Pref.
 図 3. 滋賀県守山市美岬における自噴泉の自噴量と深部の温度変化矢印波近辺で起こった地震

後、しばらくしてストレーナにめずまりがしたのか、自噴量の変化がはげしくなった。1993年から温度が上昇を続け、1994年5月28日滋賀県中部地震(M5.2)の後約1ヵ月ほどして急下降した。その後ふたたび上昇はじめたが、研究費が打ち切れ、1995年1月9日測定は打ち切られた。兵庫県南部地震後、温度測定をしたところ、温度の下降が認められた(Fig.3)(浅田他、1988; 1991; 西村、1995)。

3.3. Case- I の②、④の例：

京都大学防災研究所地震予知研究センターでは鳥取県湯谷(YDN)、吉岡(YSO)、兵庫県塩田温泉知新荘(CSN)で連続観測をしているが、Fig. 4に示すように、湯谷の水温、吉岡の水圧、知新荘のCIに co-seismic な変化がみられると報告されている(King, et al., 1995; 京大防災研地震予知研究センター,1995)。また、湯谷温泉の水温の変動について数値解析がなされている(Kitagawa and Koizumi, 1996)。しかし矢部(1998)の詳細なFig. 5を見ると13回の地震についてすべて地震の前の変化のパターンが同じで、pre-seismic の変化があるとみえるので、Case- I の②の例として取り上げる。吉岡温泉の水圧は詳細な報告がなく、Case- I ともCase- II とも判断はつかない。塩田温泉知新荘の自噴井はpost-seismic な変動とみられ、兵庫県南部地震後自噴が止まり、ようやく5月に自噴するようになったので、Case- II の④に属するとみられる。

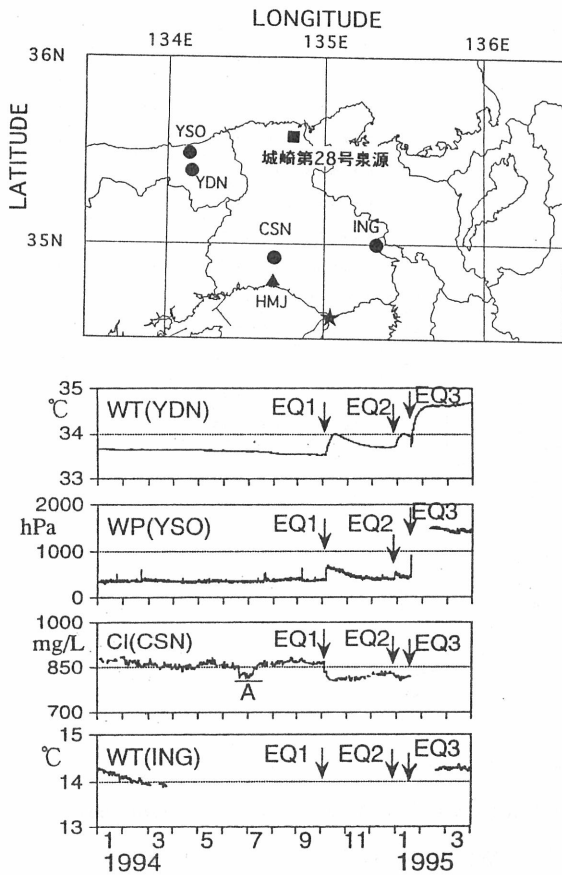


Fig. 4. Temporal variations of water temperature recorded at YDN (Yutani hot-spring) and ING (Inagawa hot-spring), water pressure at YSO (Yoshioka hot-spring), and chloride-ion content at CSN (Shiota Spa, Chishinsou spring). EQ 1, EQ 2 and EQ 3 are shown the times of Hokkaido Toho-Oki (Oct. 4, 1994; M8.1), Sanriku Haruka-Oki (Dec. 28, 1994; M7.5) and Hyogoken Nanbu (Jan. 17, 1995; M7.2) earthquakes, respectively (modified from DPRI, Kyoto Univ., 1995).

図 4. 鳥取県湯谷温泉(YDN)と兵庫県猪名川温泉(ING)の水温度変化、鳥取県吉岡温泉(YSO)の水圧変化ならびに兵庫県塩田温泉知新荘(CSN)の自噴泉の塩素イオン濃度変化 矢印のEQ 1, EQ 2, EQ 3はそれぞれ北海道東沖地震、三陸はるか沖地震、兵庫県南部地震を示す

このほか多くの兵庫県南部地震時の水温、水位、化学成分の含有量の変化が報告されているがそれがおこくの地震時に同じようにおこっているが、Case- I かCase- II か不明であるのでここでは議論できない。

3.9. Case- II の④の例 :

静岡県榛原観測井(榛原町、深度170m)および草薙観測井(静岡市、深度250m)において兵庫県南部地震および三陸はるか沖地震のときに地震後水位の低下がみられた(Fig. 10)(佐藤他,1995)。

3.4. Case- I の③の例 :

新潟県笹神村出湯の小林タツエ井の水水位と洞春湯温泉の湧出量と1995年4月1日(M6)の新潟県北部地震とその余震(大木他, 1995)の時の変化がCase- I の③の例とみられる(川上, 1995)。この変化については大木他(1998)がこの論文集でまとめている。

3.5. Case- I の④の例 :

ルーマニアでの1986年8月と12月の地震と震源から150km離れたところの地下水の微小な温度変化をFig. 6 にしめす。これは地震の前60日から地下水の水温に変化が見られた(島村, 1995)。これはCase- I の④にあたる。

3.6. Case- II の①の例 :

北海道弟子屈の黒滝井戸の例をFig. 7 に示すが、これはCase- II の①の例である(島村, 1995)。

3.7. Case- II の②と④の例 :

北海道有珠火山の地震と数km離れたところの井戸の温度変化をFig. 8 に示すが、震源の位置により、Case- II の②と④との違いがあらわれる(島村, 1995)。

3.8. Case- II の④の例 :

大津市逢坂山の元東海道線隧道内の湧き水の水頭の変化を長年にわたり測定されているが、ここでは、地震後水頭が下がり、戻る変化を示している(Fig. 9)(京大防災研地震予知研究センター, 1996; 重富・大谷, 1996)。

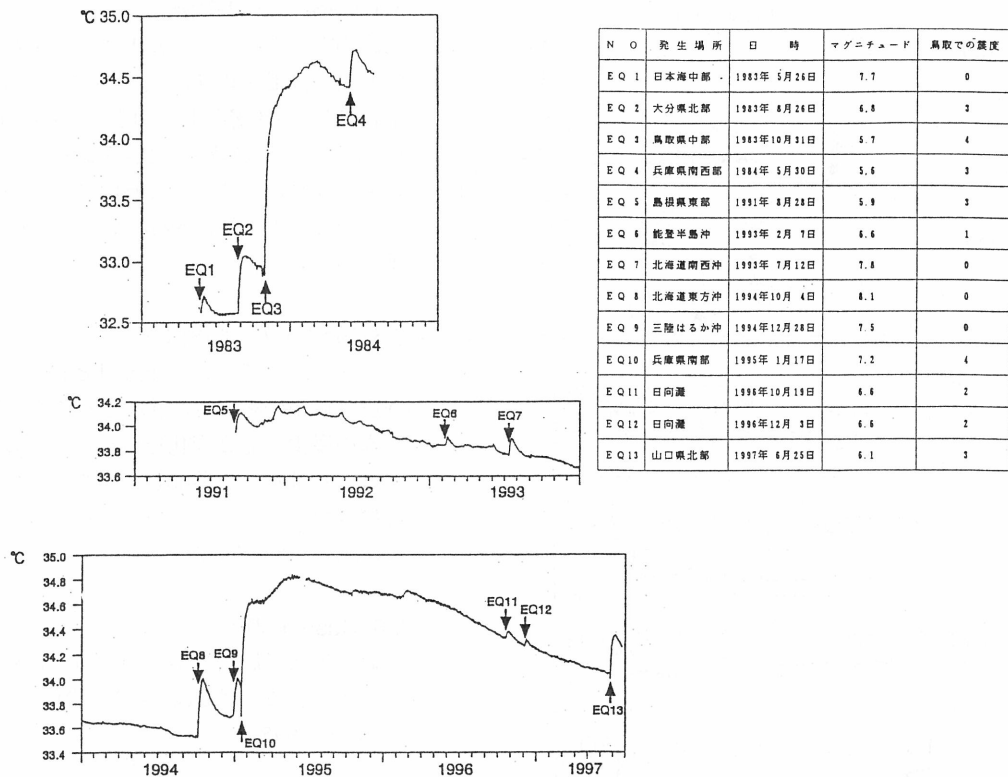


Fig. 5. Temporal variation of water temperature recorded precisely at YDN (Yutani hot-spring) and earthquakes (modified from Yabe, 1998)

図 5. 鳥取県湯谷温泉観測点での詳細な温度変化と地震(矢部, 1998に加筆)

4. 地震時の伝達メカニズム

前述のようにpre-, co-, post-seismicな地下水・温泉の湧出量、水位、温度、化学成分にかなり遠方まで変化する例が連続観測で報告されている。また、被害地震が起こるごとに、多くの変動が知らされる(西村, 1995; 電力中央研究所, 1995; 高村・河野, 1996など)。しかし、非常に近くでも変動しないことも多い。そのため地震のメカニズムを解明することが大切になる。

兵庫県南部地震後、地震のメカニズムの解明にともない、断層モデルから体積歪の正、負により、水位・湧出量の減少、増加が決まるのではないかと西村他(1995)が報告した。しかし、その後、更におおくのデータを集めて、そのように見えないとの報告がなされた(King, et al., 1995; Koizumi, et al., 1996)。それに対し、伏流水の変化や河川水の変化などまでいれたいのでそれらを排除し、温泉水や被圧裂カ地下水に限り、さらにその伝達速度の早い湧水量・地下水位・自噴温度・地下深部の地下水温度について地質構造を検討して検討すれば、地震時のメカニズムとの関係議論出来るのではと反論した(西村, 1995)。

近畿地方や中国地方では最近の火山活動がほとんど少なく、地下の温度構造も異常点は少なく(西村他, 1986; 西村, 1990; Furukawa, et al., 1998)、ほとんど活構造に支配されている。近畿地方での温泉探査は地熱地帯とは異なり、活断層調査である(西村, 1998)。温泉、岩盤の裂カに胎生する被圧水を対象とするならば地質構造を知る必要がある。また、琵琶湖周辺や大阪湾周辺の厚い未固結の体積盆地の深部から汲み上げている温泉があるが、これは均一に近い堆積物のなかの地下水で、

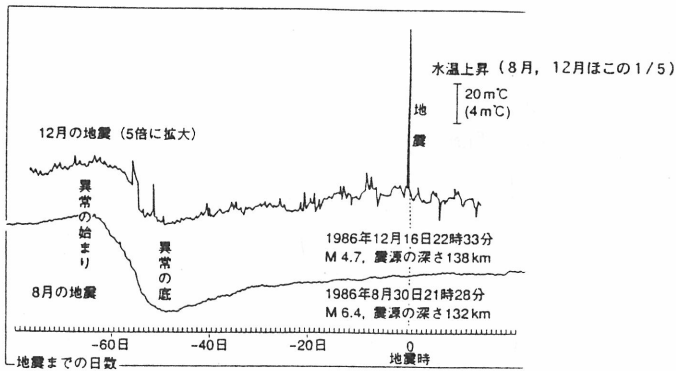
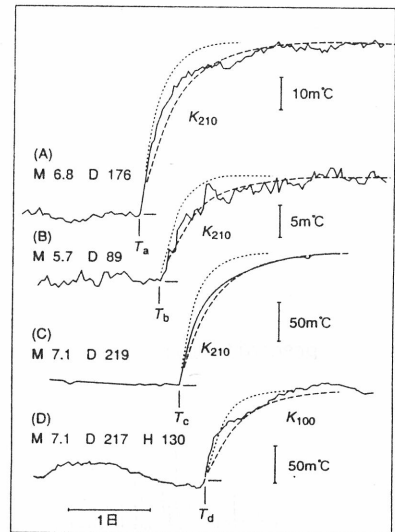


Fig. 6. Temporal variation of water temperature of groundwater recorded at Romania. This figure shows similar variations of two evidences at August and December, 1986 (modified from Shimamura, 1995).

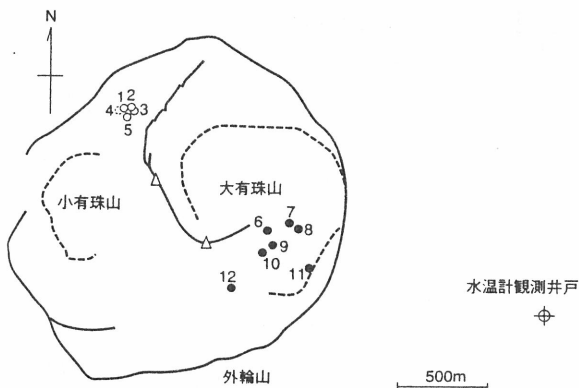
図 6. ルーマニアで記録された地震時の1986年8月と12月の地下水温のよく似た変化(島村, 1995に加筆)



Ta, Tb, Tc, Td は地震時を示す

Fig. 7. Co-seismic changes in water temperature of groundwater at Teshikaga, Hokkaido (modified from Shimamura, 1995)

図 7. 北海道弟子屈の黒滝井戸のコサイスミックな地下水温変化(島村, 1995に加筆)



No.	地震の日付	マグニチュード	地下水温変化 (m°C)
1	80年4月13日	4.1	+2.4
2	2月2日	4.1	+6.2
3	3月8日	4.2	+10
4	5月23日	4.1	+
5	1月23日	4.2	+6.3
6	3月23日	3.9	-2
7	2月27日	4.0	-3.8
8	5月12日	4.1	-3
9	4月30日	3.9	-2
10	3月22日	4.0	-4.6
11	4月24日	3.9	-1
12	5月14日	3.9	-1

Fig. 8. Co-seismic changes in water temperature of groundwater at Usu volcano, related to the positions of epicenters (modified from Shimamura, 1995).

図 8. 有珠火山の近くの井戸でのコサイスミックな地下水温の変化とそれをもたらした地震の震央の関係(島村, 1995に加筆)

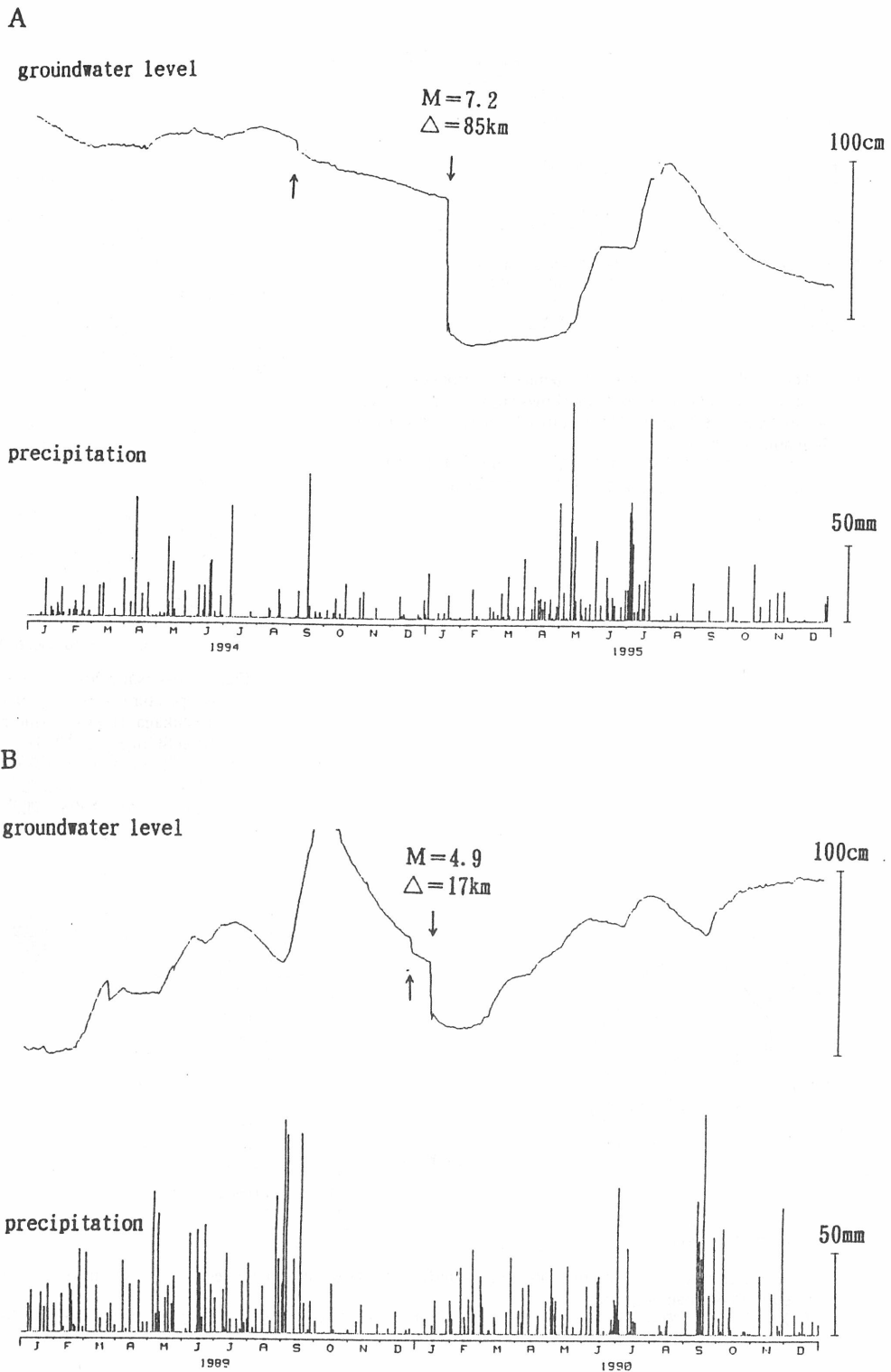


Fig. 9. Typical cases of abrupt falls in spring water level (indicated by arrow) preceding earthquakes observed in the runnel at Ohsakayama Observatory, Kyoto University (modified from Shigetomi and Ohya, 1997).
 図 9. 京都大学逢坂山観測所のトンネルの中の自噴泉の水頭レベルの地震時の典型的な変化の例 (重富・大矢, 1997に加筆)

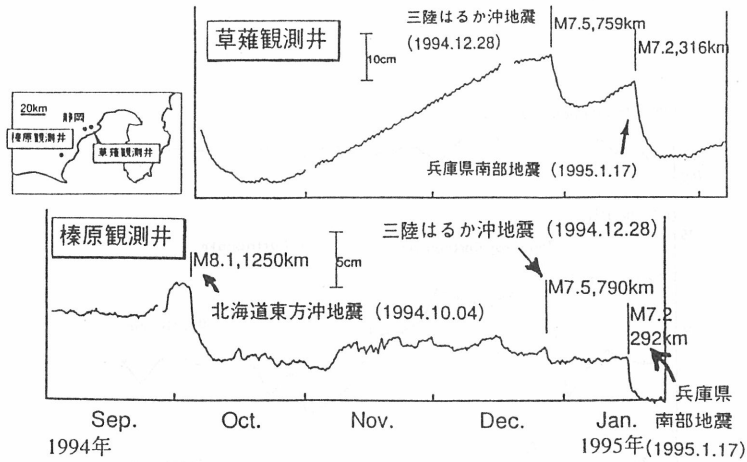


Fig. 10. The changes of groundwater level at Kusanagi and Haibara wells in Shizuoka Prefecture (modified from Sato, et al., 1995).

図 10. 静岡県草薙観測井と榛原観測井の水頭変化と地震(佐藤他, 1995)

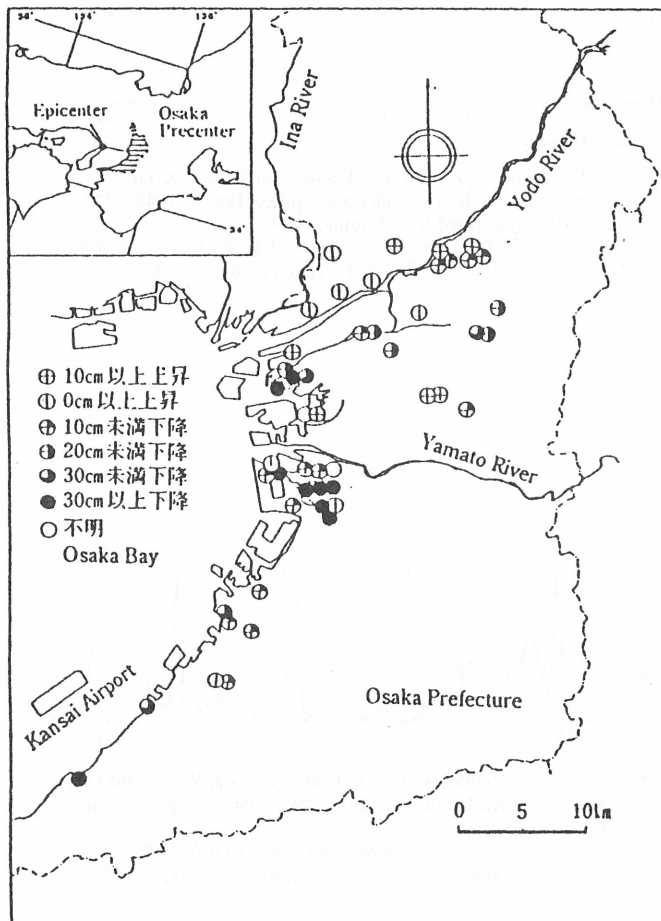


Fig. 11. Co-seismic changes in groundwater level around Osaka Bay at Hyogoken Nanbu earthquake (modified from Kumai, et al., 1996).

図 11. 兵庫県南部地震時の大阪府下の地盤沈下観測井の水位変化(熊井他, 1996に加筆)

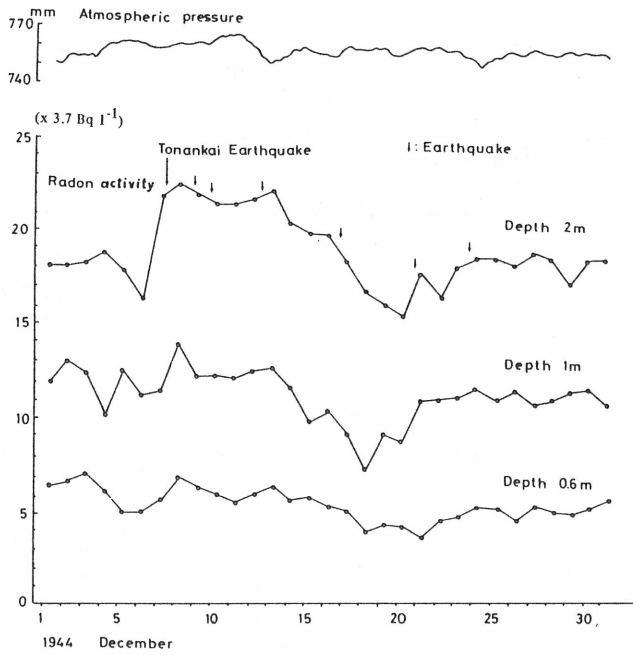


Fig. 12. The change in Rn activity of underground gas at Kyoto University during the Tonankai earthquake (Dec. 7, 1944; M7.9) in units of Bq/l (modified from Hatuda, 1953).

図 12. 東南海地震(1944年12月7日; M7.9)の前後の京都大学北部構内の地中空気のラドン量の変化(Hatuda, 1953に加筆)

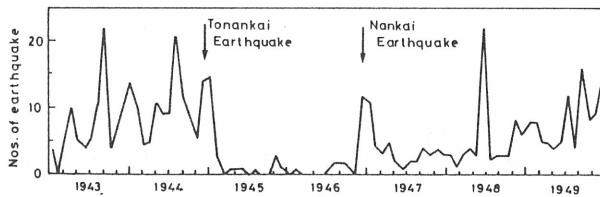


Fig. 13. Monthly numbers of the felt earthquakes at Wakayama City, west end of Kii Peninsula, during 1943-1949 (modified from Kanamori, 1981).

図 13. 東南海地震と南海地震を含む1943-1949年間の和歌山市での有感地震の月ごとの回数(Kanamori, 1981に加筆)

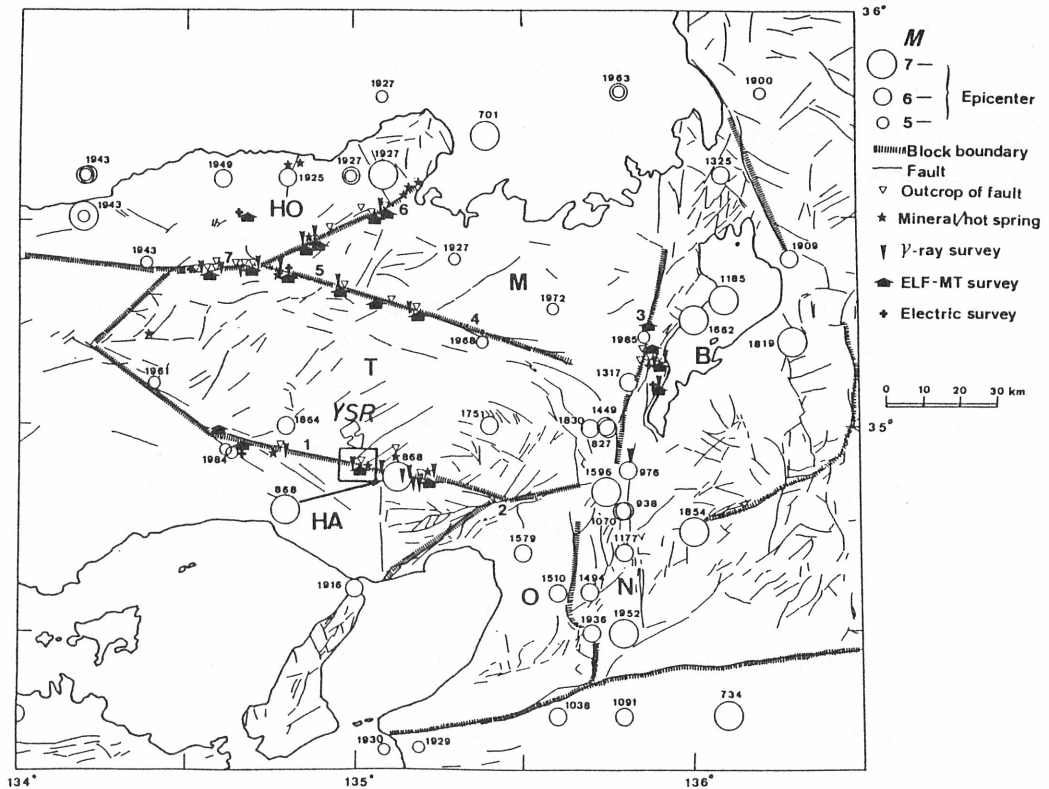


Fig. 14. The block tectonic structure revealed by the geophysical surveys in northwestern part of Kinki district, Southwest Japan (Nishimura and Katsura, 1990)

図 14. 近畿地方北部の地球物理探査で確定されたブロック構造(Nishimura and Katsura, 1990).

体積歪みに応じた変動が期待される場合もある(Fig.11)(熊井他, 1996)。多の地域では地下の温度構造や火山活動とからめて、議論することが必要であろう。

岩盤の断層や亀裂に胚胎する自噴井・温泉・裂カ被圧水についての地震時の変化は、測定対称から次のようにみることが出来よう。

- (1) 地下の静水位・自噴井の湧出量の地震前後の変化は一番早く伝達されるもので、(a)応力・歪みの伝達がみとめられる連通管のように変動が伝達される場合、(b)地震時の震動による変動が伝達される場合が考えられる。
- (2) 地下水温の地震の前後の変化は、水そのものの変動が伝達される場合で圧力の伝達より少し遅い。しかし、現在では1000分の1℃程度の精度で測定可能なので、静水位や自噴量の変動も温度測定で可能である(鳥村,1995)。10分の1℃程度の変動の測定では水の動きが必要で変化の伝達は比較的遅い。
- (3) ガス成分の地震前後の変動は、例えばラドンの変化のようなもので、断層に沿った地下水や温泉では、ウラン・トリウム系列は放射非平衡になっていて、断層粘土にラヂウムが吸着されていて、地下水中にはラドンしか溶けだしてこない(Nishimura and Katsura, 1990)ので、振動により地下水中のラドンがへり、地中空気にあふえる。この例としては多くの報告がある。例えば、兵庫県南部地震前後の神戸市のある地下水中のラドン量の変化の報告がある(Igarasshi, et.al.1995)。この地震時の地中空気中のラドン量の変動の日本で最初の報告は、東南海地震の時(Dec.7, 1944; M

7.9)の前から京都大学理学部の空き地にの地中空気のラドンの変動があり(Fig.12)、同じような規模の南海地震の時(Dec.21,1946;M8.0)には地震の前に変動がなかった(Hatuda,1953)。これは Fig. 13に示すように東南海地震には多くの前震がみられたが、南海地震時は前震はほとんど無かったこと(Kanamori,1981)に関係があると考えられる。

(4)地下水中の化学成分の変動は伝達速度は遅く、地下水が動くときに起こると考えられる(Tsunogai and Wakita, 1995)。

5. まとめ

兵庫県南部地震を主として、また、連続観測をしていて地震の前後に変化があった記録を調べてみると、伝達速度は①自噴量・深部被圧地下水の静水位、微細な水温の変化、②自噴や地下水の温度、③ラドンのようなガス成分の変化、④化学成分の変化の順で遅くなる。

近畿地方のような大きなブロックに分ける大断層(主に横ずれ断層)(Fig.14)やそれらに付随する断層に見られる自噴井、温泉、深部被圧裂カ水に限れば、被害地震(M6以上)に限れば、広い範囲で地震の前にも自噴量、静水位、微細な水温の変化がある可能性が高い。しかし、敏感なところも考えられるので、そのようなところを選び、連続観測の出来る専属の深井戸が望まれる。

6. 文献

- 浅田照行, 小泉尚嗣, 松尾成光, 西村進(1991) 守山市観測井における地球化学的研究(2), 地震2, 44, 345-354.
- 浅田照行, 西村進, 松尾成光, 小泉尚嗣(1988) 守山市観測井における地球化学的研究, 地震2, 41, 17-27.
- 電力中央研究所(1995) 1995年兵庫県南部地震被害調査速報, 電力中央研究所調査報告U94042, 44-46.
- Furukawa, Y., Shinjoe, H. and Nishimura, S.(1998) Heat flow in the southwest Japan arc and its implication for thermal processes under arcs, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1087-1090.
- Hatuda, Z.(1953) Radon content and its change in soil air near the ground surface, *Mem. Coll. Sci., Univ. Kyoto, Ser. B*, 20, 285-306.
- Igarashi, G., Saeki, S., Takahata, N., Sumikawa, K., Tasaka, S., Sasaki, Y., Takahashi, M. and Sano, Y.(1995) Groundwater radon anomaly before Kobe earthquake in Japan, *Science*, 269, 60-61.
- 石井武政, 風早康平, 安原正也, 佐藤努(1995)地下水から推定される神戸市周辺の潜在断層, *地質ニュース*, 491, 29-32.
- 川上貞雄(1995) 1995年新潟県北部地震と温泉・地下水の異常についての報告, *月刊地球*, 198, 758-761.
- Kanamori, H.(1981) Earthquake prediction. In: Maurice Ewing Ser., 4, AGU, Washington, D.C., p.1-19.
- King, Chi-Yu, Koizumi, N. and Kitagawa, Y. (1995) Hydrogeochemical anomalies and the 1995 Kobe Earthquake, *Science*, 269, 38-39.
- Kitagawa, Y. and Koizumi, N.(1996) Comparison of postseismic groundwater temperature changes with earthquake-induced volumetric strain release, Yudani hot spring, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 3147-3150.
- Koizumi, N., Kano, Y., Kitagawa, Y., Sato, T., Takahashi, M., Nishimura, S. and Nishida, R.(1996) Groundwater anomalies associated with 1995 Hyogoken Nambu earthquake, *Jou. Phys. Earth*, 44, 373-380.
- 熊井久雄, 高村陽子, 内山高(1996) 兵庫県南部地震に対する大阪平野の地下水の反応, *地下水技術*,

138, 39-49.

京都大学防災研究所地震予知研究センター(1995) 兵庫県南部地震前後の周辺の地下水・温泉水の変化について, 地震予知連絡会会報, 54, 745-749.

京都大学防災研究所地震予知研究センター(1996) 逢坂山観測所における兵庫県南部地震前後の地下水位変化, 地震予知連絡会会報, 56, 537-539.

西村進(1990) 深井戸の温度勾配とその地殻熱流量(2), 地熱学雑誌, 12, 238-293.

西村進(1995) 地質構造と兵庫県南部地震, 安全工学, 34, 398-409.

西村進(1998) どうしたら温泉が探せるか, 環境の計画, 8, 8-14.

Nishimura, S. and Katsura, I.(1990) Radon in soil gas: Applications in exploration and earthquake prediction. In:Geochemistry of gaseous elements and compounds, ed. Durrance et al., Theophrastus Pub., S.A., Greece, p.497-533.

西村進, 小泉尚嗣, 北川有一, 浅田照行, 赤松信(1995) 兵庫県南部地震前後の地下水・温泉水の変化, シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, 121-124.

西村進, 茂木透, 桂京造(1986) 深井戸の温度勾配とその地殻熱流量, 地熱学雑誌, 8, 347-360.

大木靖衛, 徐輝竜, 渡部直喜, 鈴木幸治, 佐藤修(1995) 1995年新潟県北部地震の震度分布と伏在活断層について, 月刊地球, 17, 766-773.

佐藤努, 松本則夫, 高橋誠, 佃栄吉(1995) 1995年兵庫県南部地震に伴う地下水変動ー淡路島の湧水および静岡県内の地下水観測ー, 1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会, 日本第四紀学会, 第四紀研究連絡委員会(1995,2,18), 59-60.

重富国広, 大谷文夫(1996) 逢坂山観測所で観測された1996年7月18日に京都市内で起きた地震前後の地下水位変化について, 防災研講演会予稿集.

島村英紀(1995) 精密水温測定で地震前の地下水の動きを探る, 化学, 50, 537-539.

高村弘毅, 河野忠(1996) 淡路島における兵庫県南部地震後の湧水・地下水の挙動, 地下水学会誌, 38, 331-338.

Tsunogai, U. and Wakita, H.(1995) Precursory chemical changes in groundwater: Kobe earthquake, Japan, Science, 269, 61-63.

矢部征(1998) 温泉水の変化は地下からのサイン, 技術職員研修, 第18, 19回技術(研究)発表報告会.