

逢坂山観測所で観測された地震に伴う地下水位変化

重富 國宏・山田 勝・藤井 伸蔵

COSEISMIC CHANGES IN GROUNDWATER LEVEL AT OSAKAYAMA

By Kunihiro SHIGETOMI, Masaru YAMADA, Sinzo FUJII

Synopsis

Continuous monitoring of groundwater level have been carried out since December 1976 at Osakayama observatory in order to investigate relations between groundwater level and strain changes and earthquake occurrence.

For nineteen earthquakes coseismic steps in groundwater level were observed at the observatory till July 1991. Coseismic steps in ground water level are observable for earthquakes with magnitude larger than 4.0 in case of epicentral distance less than 50 km.

In all cases sences of coseismic steps are upward and do not depend on those of initial motions of P wave. Amplitudes of coseismic steps in groundwater level are proportional to energy of earthquakes and are inversely proportional to a square of epicentral distance.

1. は じ め に

防災研究所地震予知研究センター逢坂山観測所では、地下水位と歪変化及び地震発生との関係を知るため、観測坑道内に坑道床面からの深さ 19 m, 直径 20 cm の井戸を堀削し、1976年12月から地下水位の連続観測が実施されてきている。観測の概要・日変化・降雨量との関連・年周変化、歪変化との関連については既に報告されている¹⁾。この中で、地下水の出入りをあまり考えなくてもよい日変化については、地下水位計は地球潮汐変化を記録すること、地下水位変化は基本的には降雨によって規定されるものの、降雨量に単純に比例するものではなく、積算雨量に支配されること、地下水位変化は歪変化と非常によい相関があること、歪の年周変化は、地下水位の変化によって観測坑道に加わる圧力が変化するためであること等々を明らかにし、地下水位の観測は、伸縮計・傾斜計による、いわゆる地殻変動連続観測の擾乱源としての降雨の単なる Indicator というのでなく、それ自身地殻変動の有力な観測手段で有り得ることが主張されている。

地下水位の観測が地殻変動の観測手段となり得るには、観測井（を含む水系）の地殻応力変化に対する特性を明らかにしなければならない。地殻応力変化に対する特性を最も顕著に示すものは、一つは地球潮汐変化に対する応答であり、もう一つは地震に対する応答である。前報¹⁾において逢坂山の場合、地下水位に地球潮汐変化を生じさせる水系のモデルとしては、体積変化型よりはむしろ圧力変化型の方が適当であると述べている。一方、地震に対する応答については、これまでも種々の報告がなされている（例えば^{2)~5)}）。また川辺（1991）によって総合的な報告もなされている⁶⁾。しかしながら、地震の発震機構との関係も含めて coseismic な地下水位変化のメカニズムは未だ解明されているとは言い難い。それはおそらく、観測井（を含む水系）の特性がそれぞれに異なるからであろう。言い換えれば、それぞれの観測井での coseismic な地下水位変化は、その観測井（を含む水系）の特性を表わすことになる。

本稿では、逢坂山観測所で観測された地震に伴う地下水位変化について報告する。

2. 観 測

観測井戸は、観測坑道として使用されている旧日本国有鉄道東海道本線逢坂山トンネルのほぼ中央部に掘削されている。山の被りは約 60 m である。Fig. 1 に、観測坑道近傍の断面図と観測坑道内の観測計器の配置図を示す。観測井戸は図の WL である。井戸の深さは坑道床面から 19 m であり、直径は 20 cm である。床面から下は塩ビのパイプでケーシングをしている。地下水位面が坑道床面より高いため、ステンレス・パイプで約 220 cm かさあげしている。平均的な水面の高さは床面より約 150 cm である。観測方式はフロートによる自記記録で、感度は 1/1 である。観測開始は1976年12月である。自記記録は当初1週間巻であったが、1990年9月から記録紙送りを1/2にして2週間巻に変更している。

Fig. 2 に、記録例として1990年10月23日から1990年11月20日までの4週間の水位計記録を示す。観測開始以来、日変化の振幅・気圧・降雨に対するレスポンスにも変化は見られず、安定した記録が得られてい

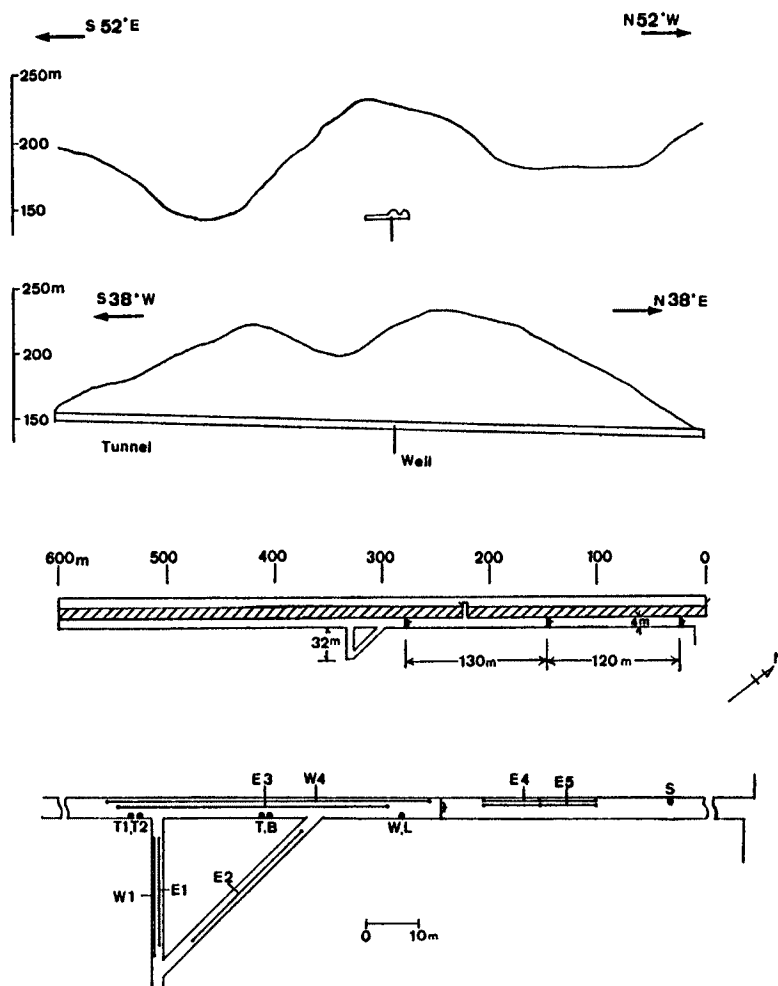


Fig. 1. Cross sectional views of the observation tunnel and locations of the well and other instruments in the tunnel. WL: Well; E1, E2, E3, E4, E5: Extensometers and E5 are also used as a strain seismograph; T: Thermometer; B: Barometer.

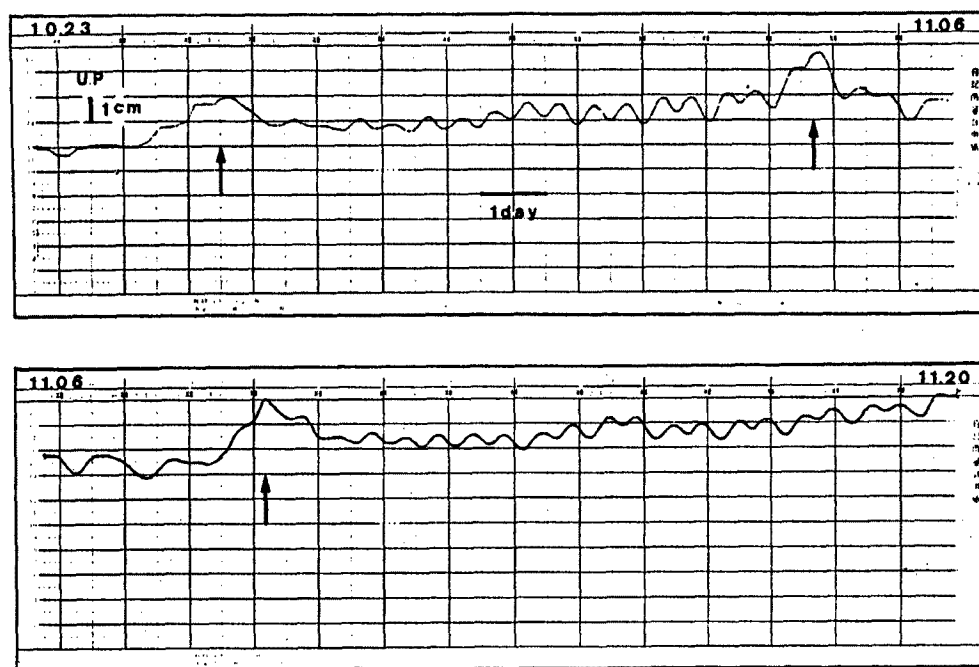


Fig. 2. Examples of hydrograph records for the period from October 23 to November 20, 1990. Abrupt changes in groundwater level (indicated by arrows) are caused by changes in barometric pressure.

る。図中矢印を付した急激な水位変化（上昇）は、台風通過に伴う急激な気圧変化によるものである。coseismic な地下水位変化の有無は、気圧変化による変化や潮汐変化と明瞭に区別可能か否かで判断されている。

3. 地震に伴う水位変化

3.1 記 録

観測開始以来1991年7月31日までに、明瞭な coseismic な水位変化が観測されたのは19個の地震に対してであった。

Table 1 に、coseismic な水位変化が観測された地震のリスト及び coseismic な水位変化の振幅・発震機構から期待される逢坂山観測所での地震波初動の向きをのせている。coseismic な水位変化が観測された地震のうち、震央距離が最も短い地震の震央距離は 17 km（マグニチュード4.9）、マグニチュードの最も小さい地震のマグニチュードは4.3（震央距離 29 km）であった。震央距離・マグニチュードともに最大の地震は日本海中部地震（1983年5月26日、震央距離 660 km、マグニチュード7.7）であった。

Fig. 3 に、coseismic な地下水位変化の記録例を示す。a は、マグニチュード4.9、震央距離 30 km の地震に際して得られたものである。水位は約40分かけて step 状に 21 mm 上昇している。b は、マグニチュード 7.7、震央距離 660 km の地震（日本海中部地震）の際に得られたものである。水位は、約200分かけてやはり step 状に 55 mm 上昇している。この地震の場合、水位が上昇した後、潮汐変化が記録されなくなっている（12日後に復活した）。

Fig. 4 は、震央距離 50 km 以下でマグニチュードが4.5以上の地震に伴う coseismic な水位変化について、原記録をトレースしたものである。

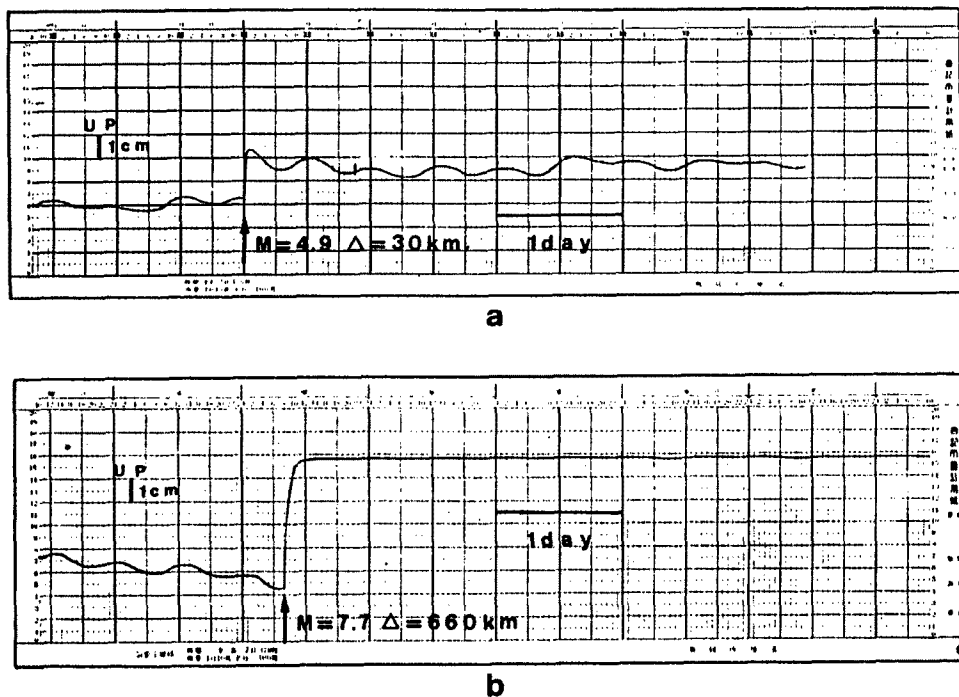


Fig. 3. Hydrograph records showing coseismic changes in groundwater level.

a: for the earthquake with $M=4.9$ and $\Delta=30$ km.

b: for the earthquake with $M=7.7$ and $\Delta=660$ km.

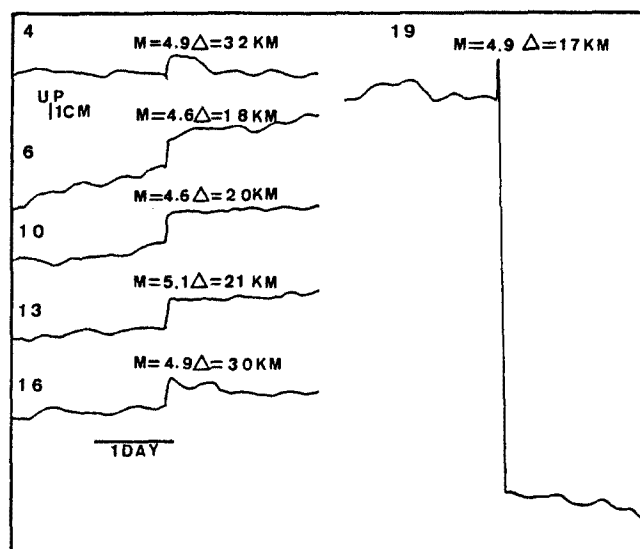


Fig. 4. Coseismic changes in groundwater level traced from original records for earthquakes with $M \geq 4.5$ and $\Delta \leq 50$ km.

Numbers correspond to those in Table 1.

図中の数字は Table 1 の番号に対応している。No. 19 の地震の場合以外はほぼ同様の変化を示している。No. 19 の地震の場合、約30分かけて 26 mm 上昇し、その後 260 mm 急激に下降している。

Fig. 5 は、震央距離 100 km 以上のマグニチュードの大きい地震についての Fig. 4 と同様のものである。

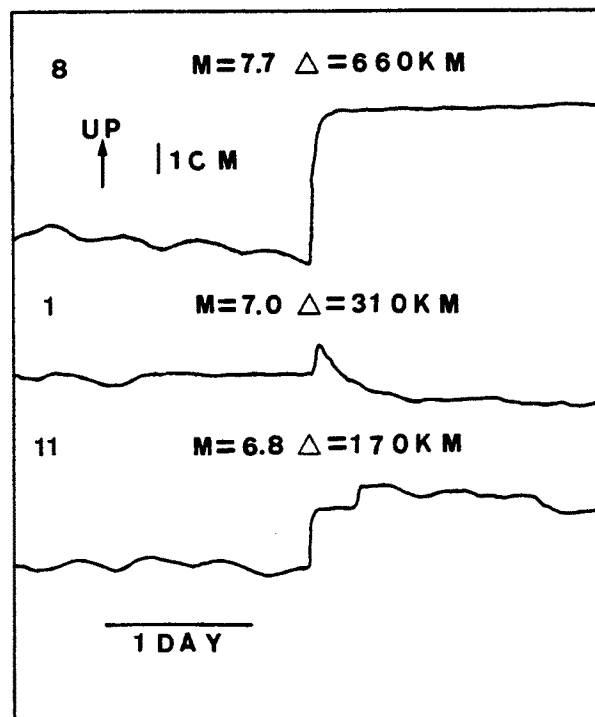


Fig. 5. Same as Fig. 4, but for relatively distant and large earthquakes.

Table 1. List of earthquakes with coseismic steps in groundwater level and amplitudes of steps. Last column is shown sense of initial motions of P waves at the observatory (+: compressional, -: dilatational, ±: uncertain)

No	Time Y M/D	Lat. deg.	Lon. deg.	Mag.	Δ km	Step mm	Initial P wave
1	1978 1/14	34.767	139.250	7.0	311	15	+
2	1978 10/ 7	34.783	137.500	5.3	173	7	+
3	1979 4/12	34.667	136.383	4.3	29	6	-
4	1979 10/16	35.283	135.883	4.9	32	16	+
5	1980 6/29	34.917	139.233	6.7	308	11	-
6	1980 9/11	35.133	135.967	4.6	18	19	+
7	1983 3/16	34.788	137.613	5.7	162	11	-
8	1983 5/26	40.355	139.077	7.7	660	55	+
9	1983 10/31	35.413	133.927	6.2	180	15	-
10	1984 5/ 5	34.888	135.692	4.6	20	20	-
11	1984 9/14	35.822	137.560	6.8	170	22	+
12	1985 1/ 6	35.178	135.552	5.9	94	16	±
13	1985 10/ 3	35.178	135.862	5.1	21	22	+
14	1985 11/27	35.612	135.750	5.1	70	4	+
15	1987 5/ 9	34.143	135.408	5.6	102	39	-
16	1987 5/28	35.000	135.530	4.9	30	21	-
17	1987 12/17	35.372	140.500	6.7	425	8	±
18	1989 2/19	34.608	136.468	5.3	70	23	-
19	1990 1/11	35.110	135.978	4.9	17	26	+

る。上から順に、日本海中部地震（1983年5月26日）、伊豆大島近海地震（1978年1月14日）、長野県西部地震（1984年9月14日）に際してのものである。

3.2 地震波初動との関係

Fig. 3 の a の地震の場合、発震機構から期待される逢坂山観測所での地震波初動は引きである。期待される地震波初動は、引きにもかかわらず水位は上昇している。また、Fig. 4 において、No. 4, No. 6, No. 13, No. 19 の地震の場合、発震機構から期待される地震波初動は押しであり、No. 10, No. 16 の地震の場合は引きであるが、coseismic な水位は全て上昇している。Fig. 5 においても、coseismic な水位は上昇している。観測開始以来逢坂山観測所で観測された coseismic な水位変化は全て step 状に上昇している。

coseismic な水位変化（の上昇・下降）が、地震の発震機構から期待される地震波初動の押し・引きと対応している、との報告がある⁵⁾。ところが、観測開始以来逢坂山観測所で観測された coseismic な水位変化は、発震機構から期待される地震波初動の押し・引きに関係なく全て上昇している。

coseismic な水位変化が、地震の実体波によって引き起こされる oscillatory な変化である場合には、水位

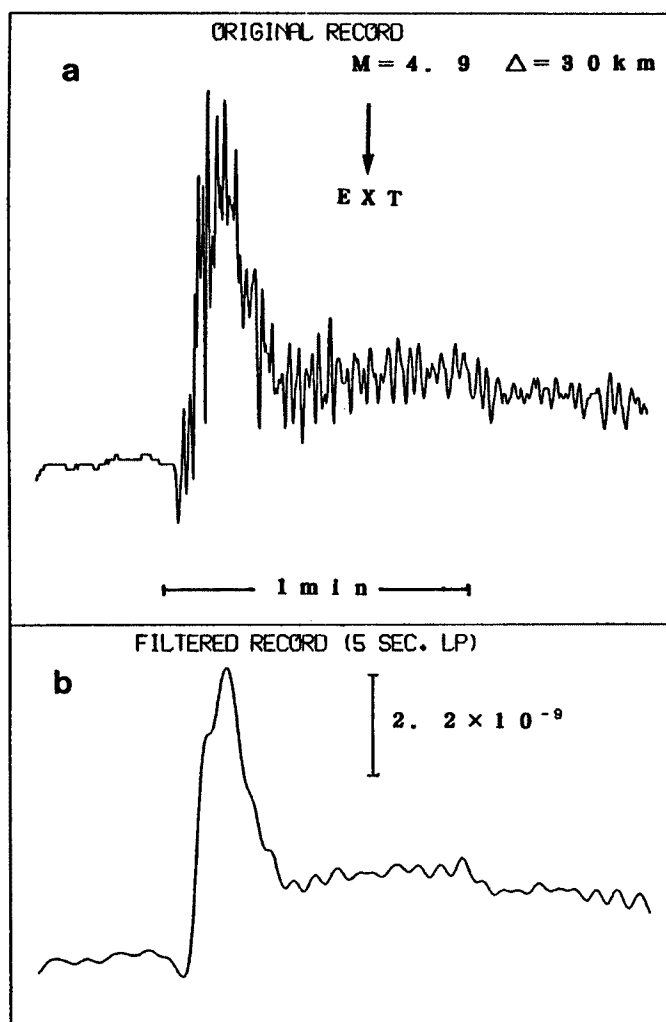


Fig. 6. Strain seismogram recorded for the same earthquake shown in Fig. 3 a.
a: original record. b: filtered record (5 sec. low pass).

変化の初動の sence が地震波初動の押し・引きに対応するかもしれないが, coseismic な水位変化が step 状に変化する場合には, step の sence が地震波初動の押し・引きと必ずしも対応する必要はないと考えられる。逢坂山観測所での水位観測は自記記録であり, 従って時間精度が良くないため, coseismic な step の立ち上がりは地震波の, どの phase に対応しているのかを明確には決められない。また, coseismic な水位変化が oscillatory であるか否かも判断できない。

観測例が少なかった当初には, coseismic な水位変化が地震波初動の sence に関係なく上昇するのは, 地震波による振動によってしぼりだされた水が時間的に積分されることによるものと考えられていた。しかし, 観測例が増えるにつれ, coseismic な水位変化が観測される地震の際には, すべて歪 step が観測されることから, coseismic な水位変化は, 観測井を含む水系に何らかの急激な変化が生じるためであると考えられてきている。この急激な変化が, すべて地震の震源の dislocation によるものか, 地震によって励起された観測所近傍の local な変化によるものかの問題は歪 step の場合の問題と同様である。逢坂山観測所では, 伸縮計による通常の歪観測と並行して, 伸縮計を歪地震計として利用した観測がおこなわれている⁷⁾。Fig. 6

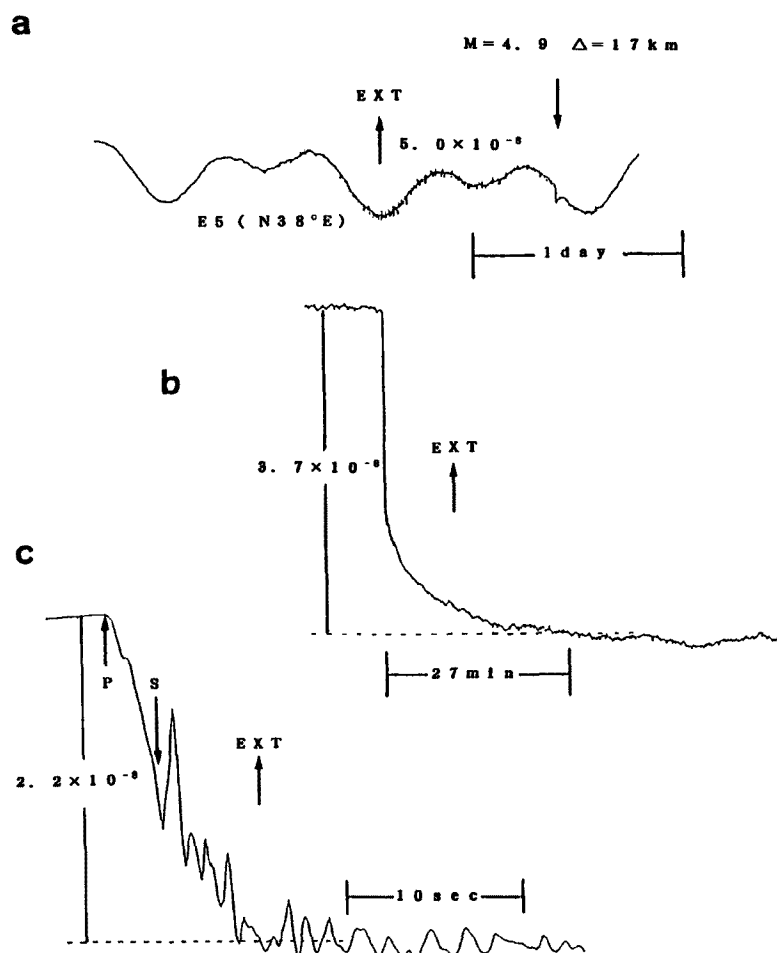


Fig. 7. Records of extensometer and strain seismograph for the earthquake with $M=4.9$ and $\Delta=17 \text{ km}$ (No. 19 in Fig. 4 and Table 1).
 a: N 38°E component extensometer record sampled at every one minute.
 b: Same component strain seismogram showing coseismic changes.
 c: An enlarged portion of the strain seismogram. P and S indicate the onset times of P- and S-waves respectively.

に、Fig. 3のaに例示された地震の際に記録された歪地震の記録を示す。最初約 7×10^{-9} 変化した後約 2×10^{-9} の step を記録している。この地震の場合、地震波初動は引きである。Fig. 7は、Fig. 4に示されたNo. 19の滋賀県南部地震（1990年1月11日、 $M=4.9$ 、 $\Delta=17$ km）の際に記録された伸縮計と歪地震計の記録を示したものである⁸⁾。歪 step の時間的な変化の詳細が記録されている Fig. 7のb, cを比較すると、歪 step には震源に直接起因する部分とそれ以外の部分がありそうである。このことは、coseismic な水位変化についても同様のことを示唆している。また、震源に直接起因しない変化に対して地震に伴う地下水の変化が影響している可能性をも示唆している。この地震の場合、地震波初動は押しである。上にあげた2例とも、歪 step は compressional であり、水位 step の上昇と対応しているようであるが、歪地震計の観測は1成分のみであり、面積歪 step が compressional なのか dilatational なのかが決められないので、歪 step と水位 step との関係は sence にまで立ち入っては論じられない。coseismic な歪 step と水位 step との関係についてはさらに検討を加え稿を改めて報告したい。

3.3 マグニチュード・震央距離との関係

観測された coseismic な水位の step と地震のマグニチュード及び震央距離との関係について二つの点から検討してみた。一つは、coseismic な step が観測される地震についてそのマグニチュード及び震央距離に下限が、震央距離に上限があるのか、あるいは観測所に向いた方向性が存在するのか否か、と言ったいわば coseismic な step の検知能力とでも言ったものであり、もう一つは、観測された coseismic な step 振幅とマグニチュード、震央距離との関係である。

最初の検知能力とでも言ったものについては SEIS-PC⁹⁾ によって、観測所までの震央距離 50 km 以下の地震についてはマグニチュード3.0以上、震央距離 50 km 以上 100 km 以下の地震についてはマグニチュード4.0以上の地震のリストを求め、地下水位計の原記録と照合して coseismic な水位変化の有無を調べた。その結果マグニチュード4.0以下の地震については、気圧変化や潮汐変化と明瞭に区別できる coseismic な水

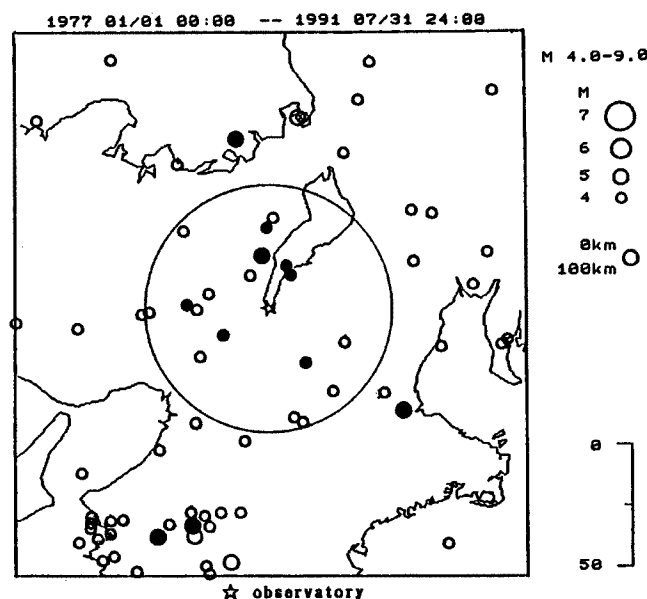


Fig. 8. Epicentral distribution around the observatory for the period from Jan. 1, 1977 to Jul. 31, 1991. Earthquakes with magnitude greater than 4.0 and depth shallower than 100 km are plotted. The data are derived from SEIS-PC⁹⁾ ●: earthquakes with coseismic steps. The center of the circle is the observatory and the radius of it is 50 km.

位変化はみられなかった。Fig. 8 は、SEIS-PC⁹⁾ によって求めた、1977年1月1日から1991年7月31日までのマグニチュード4.0以上、深さ100 km以下の地震の震中分布を示したものである。●印の地震は、coseismic な水位変化が観測された地震の震央を示している。また、図中の円は観測所から半径50 kmの範囲を示している。Fig. 9 は、マグニチュード4.5以上の地震についての、Fig. 10 は、マグニチュード5.0以上の地震についての、Fig. 8 と同様の図である。Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10 から、震央距離50 km以下であれ

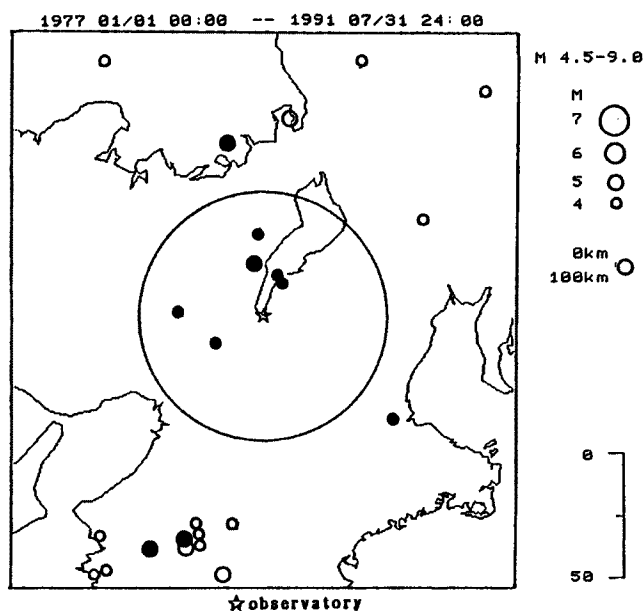


Fig. 9. Same as Fig. 8, but earthquakes with magnitude greater than 4.5 and depth shallower than 100 km are plotted.

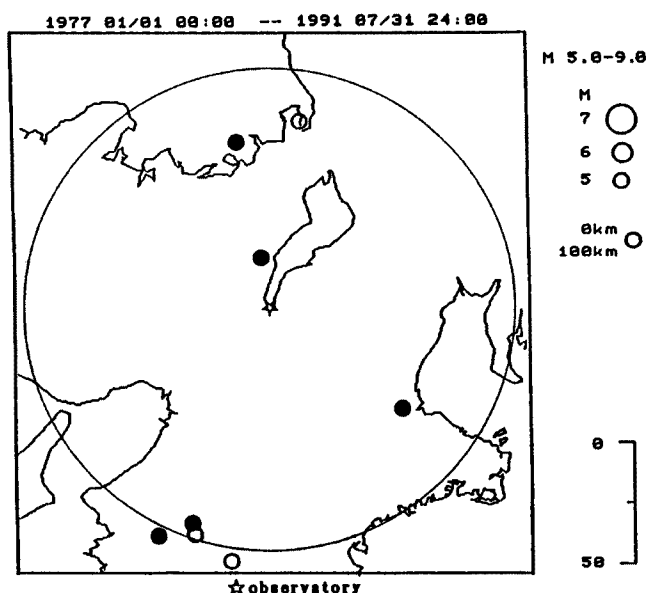


Fig. 10. Same as Fig. 8, but earthquakes with magnitude greater than 5.0 and depth shallower than 100 km are plotted. The radius of the circle is 100 km.

ば、マグニチュード4.5以上の地震については coseismic な水位変化が観測されと言えそうである。観測の感度及び時間精度を上げれば、震央距離が小さい場合には、マグニチュード4.0以下の地震に対しても coseismic な水位変化が観測されるであろう。震央距離 50 km 以下の地震については、coseismic な水位変化の出やすさといったものには特に方向性はみられない。震央距離 100 km 以上の地震については、ほとんど観測当時に地震との対応がついているが、見落としがないかと考え、震央距離 300 km 以下の地震についてはマグニチュード5.0以上の地震を、震央距離 300 km 以上の地震については震央距離 1000 km 以下、マグニチュード6.0以上の地震について、SEIS-PC⁹⁾ によるリストと原記録から coseismic な変化の有無について調べた。Fig. 11 に、coseismic な変化が観測された震央距離 100 km 以上の地震の震央を示した。震央距離が最大な地震は日本海中部地震 (1983年 5月26日、震央距離 660 km、マグニチュード7.7) であった。震央距離の大きい地震に伴う coseismic な水位変化は Rayleigh 波によるものであるとの考えがある (例えば³⁾)。その場合、coseismic な水位変化は、観測井を含む水系の体積変化に伴う oscillatory なものであろう。逢坂山の場合、観測された地震のうち Layleigh 波の振幅の大きい地震に対しても必ずしも coseismic な変化が観測されないのは、coseismic な変化が oscillatory なものではない可能性を示している。coseismic な水位 step の観測例のなかで Fig. 3 の b にみられるように、coseismic な step をみた後、潮汐変化が記録されなくなる場合がある。おそらく、潮汐変化は弾性的に安定な状態でのみ観測されるであろうから、Fig. 3 の b の場合、地震によって弾性的に不安定になったため潮汐変化が記録されなくなったのであろう。このことも、coseismic な変化が oscillatory なものでないことを示唆している。

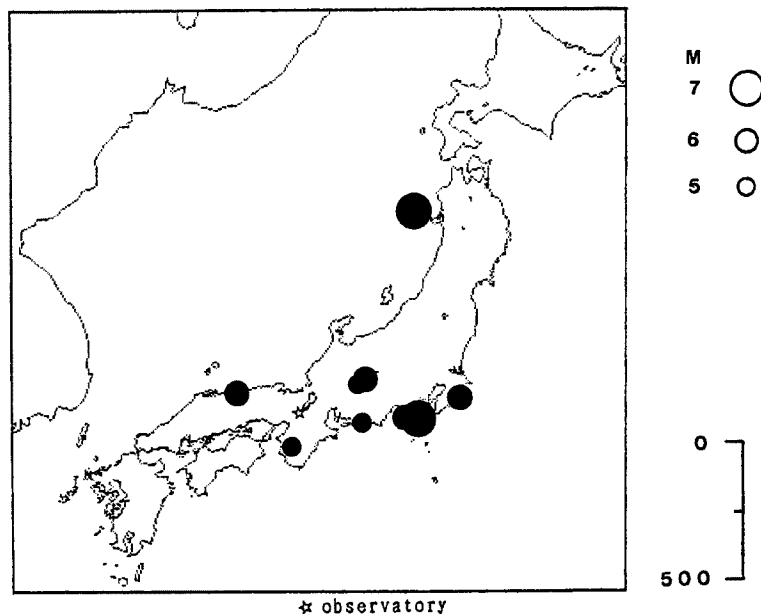


Fig. 11. Epicenters of earthquakes with epicentral distance greater than 100 km for which coseismic steps in groundwater level were observed at the observatory.

次に、coseismic な水位 step の振幅と対応する地震のマグニチュード、震央距離との関係についてであるが、Fig. 12 に、地震のマグニチュードと水位 step の振幅に震央距離の自乗を乗じたものの対数をプロットしたものを示す。両者間の直線性から、coseismic な水位 step の振幅は、geometrical な減衰を考慮すれば、地震のエネルギーに比例していると言える。

このことは、定性的には coseismic な水位 step は震源の情報を直接反映している可能性を示している。

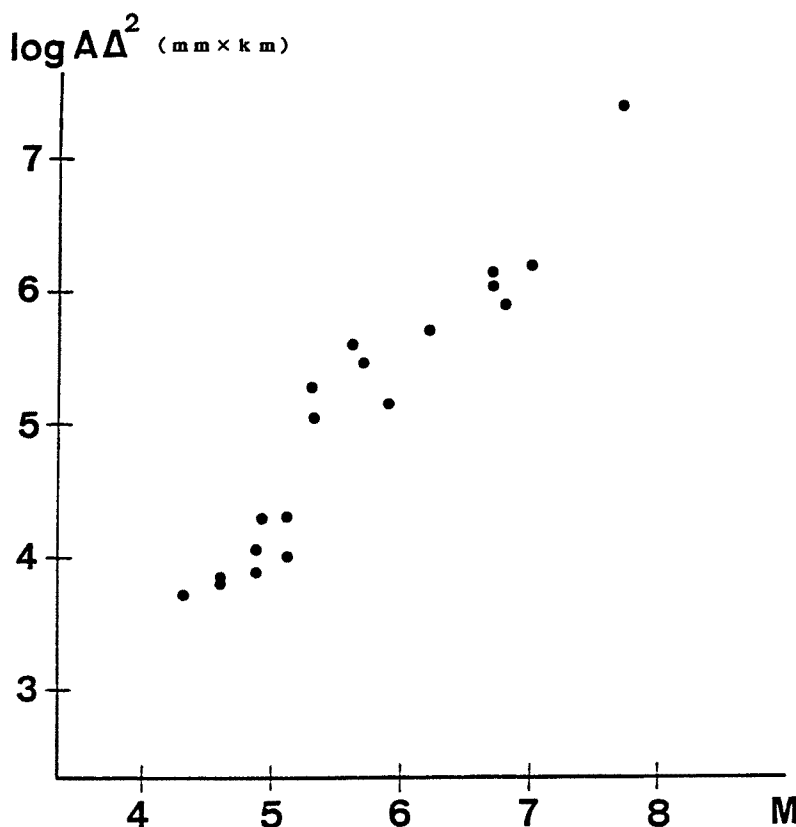


Fig. 12. Magnitude-dependence of logarithmic amplitude of coseismic steps in groundwater level. The amplitude is multiplied by a square of epicentral distance in view of the effect of geometrical spreading for seismic waves.

4. お わ り に

逢坂山観測所で観測された地震に伴う地下水位変化について検討をした結果、大略以下のようなことがわかった。

1. coseismic な地下水位変化は step 状である。
2. coseismic な step の後、潮汐変化が記録されない例がある。
3. coseismic な水位 step が観測される地震はマグニチュード4.0以上である。coseismic な水位 step が観測された地震のうちマグニチュード・震央距離がともに最大の地震は $M=7.7$ $\Delta=660$ km であった。
4. 観測された19例の coseismic な水位 step は、発震機構から期待される地震波初動の押し・引きにかかわらず全て水位の上昇を示す。
5. coseismic な水位 step と coseismic な歪 step とは互いに関連がありそうである。
6. coseismic な水位 step の振幅は地震のエネルギーに比例し、震央距離の自乗に反比例する。

以上のことから、逢坂山観測所における地下水位の連続観測を実施しているなかで観測される地震に伴う地下水位変化は、地震波によって励起される dynamic な振動を記録するのではなく、震源の dislocation に伴う観測井を含む水系の static な変化を反映するものだと言えそうである。coseismic な歪 step に対応するものであろう。また coseismic な水位変化が coseismic な歪 step に対して一定の役割を果たしていることが考えられる。このことは、歪 step の観測値と理論値とが必ずしも一致しない問題の解決に寄与するであろう。

以上観測の感度及び時間精度に限界があるため定性的な議論に留まったが、地下水位の連続観測は地殻変動の有力な観測手段であることを示し得たと言える。

Table 1 に示した発震機構から期待される逢坂山観測所での地震波初動の押し・引きについては防災研究所地震予知研究センター飯尾能久助手に教えていただいた。また京都大学理学部地球物理学教室西村敬一助手には数々のご助言をいただいた。記して感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 重富國宏・橋田匡邦・藤井伸蔵：逢坂山地殻変動観測所における地下水位の連続観測について，京大防災研究所年報，第31号B-1，1988，pp. 19-28.
- 2) Blanchard, F. B., and P. Byerly: A study of a well gauge as a seismograph, B. S. S. A., Vol. 25, 1935, pp. 313-321.
- 3) Eaton, J. P. and K. J. Takasaki: Seismological interpretation of earthquake-induced water-level fluctuations in well, B. S. S. A., Vol. 49, 1959, pp. 227-245.
- 4) Cooper, H. H., Jr., J. D. Bredehoeft, I. S. Popadopoulos, and R. R. Bennett: The response of well aquifer systems to seismic waves, J. G. R., Vol. 70, 1965, pp. 3915-3926.
- 5) Wakita, H: Water wells as possible indicators of tectonic strain, Science, Vol. 489, 1975, pp. 553-555.
- 6) 川辺岩夫：地震に伴う地下水・地球化学現象，地震Ⅱ，第44巻，1991，pp. 341-364.
- 7) 西村敬一・森井 互・橋田匡邦：伸縮計と地震計の併用による地震観測，地震Ⅱ，第38巻，1985，pp. 435-446.
- 8) 京都大学理学部 逢坂山地殻変動観測所：滋賀県南部地震（1990年1月11日，M=4.9）に伴う地殻変動，地震予知連絡会報，第44巻，1990，pp. 364-367.
- 9) 石川有三・松村一男・横山博文・松本英昭：SEIS-PC の開発一概要一，情報地質，Vol. 10, 1985, pp. 19-34.