
特集『温泉と地震』(その2)

近畿およびその周辺地域における地震予知研究のための 地質調査所による地下水位観測

地質調査所

小泉尚嗣・佃 栄吉・高橋 誠・佐藤 努・松本則夫・
伊藤久男・桑原保人・長 秋雄・佐藤隆司

〒305-8567 茨城県つくば市東 1-1-3

(平成10年11月9日受付、平成10年12月3日受理)

Groundwater Level Observation of Geological Survey of Japan in and around the Kinki District, Japan for Earthquake Prediction Research

Geological Survey of Japan

Naoji KOIZUMI, Eikichi TSUKUDA, Makoto TAKAHASHI, Tsutomu SATO,
Norio MATSUMOTO, Hisao ITO, Yasuto KUWAHARA, Akio CHO and Takashi SATOH

Abstract

Geological Survey of Japan made an observation network composed of 29 wells mainly along active faults in and around the Kinki district for earthquake prediction research. These wells were newly made by Geological Survey of Japan after the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake. All of the wells have water level meters and some of them also have water temperature meters, borehole-type strain meters, borehole-type tilt meters, GPS's, and seismometers. Most of the wells have only 1 screen (perforated well casing). The depths of them are 130m-1000m and those of the screens are 100m-800m. We analyzed recent 6 month data of groundwater level at 22 of those wells. 16 wells of them were considered to have tidal oscillations of groundwater level whose amplitudes are 1mm or greater at O_1 and M_2 components and analysis of the tidal oscillations shows that water level of 13 of the wells can detect volumetric strain changes of the order of $10^{-9} \sim 10^{-10}$ whose frequency is similar to tidal phenomena. 11 wells of them also showed water level changes just after an earthquake (M5.4) occurring in the northern part of Mie Prefecture, which is the largest shallow earthquake within the observation network during the 6 months. Analysis of these changes also show that water level of 9 of those wells can detect coseismic and/or postseismic crustal deformation corresponding to volumetric strain changes of the order of 10^{-9} . These results seem to show that the groundwater observation network should have an ability to detect earthquake-related crustal deformations corresponding to volumetric strain changes of the order of 10^{-9} .

Key words: Earthquake prediction, groundwater level, tide, coseismic changes, crustal deformation

キーワード：地震予知，地下水位，潮汐，地震時の変化，地殻変動

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震(1995年1月17日, M7.2)の際には, 地震前における地下水ラドン濃度異常(Igarashi et al., 1995)・地下水水質異常(Tsunogai and Wakita, 1996)・地下水湧出量異常(藤森ら, 1995), 地震後の淡路島における多量の異常湧水(佐藤・高橋, 1997)等の多数の地下水異常が生じた(遠田ら, 1996; Koizumi et al., 1996). Koizumi et al.(1996)は, 主に聞き込み調査・アンケート調査を用いて, 近畿・四国・中国地方の地下水調査を行い, 地震前後の多数の地下水変化について, すべてを地震に伴う体積歪み変化だけで説明するのは難しいと結論づけた. しかしながら, その解析は, アンケート調査に基づくだけに定性的な域を出なかった. その後, 建設省近畿地方建設局および徳島県の管理する, 兵庫県南部地震前後に地下水位の連続観測記録がある約130箇所の井戸を選んで調査を行なった所, ストレーナが50mより深い井戸のデータを選ぶと, 地震後の体積歪み変化と地下水位変化との間に相関が認められるようになることが判明した(小泉ら, 1997; 地質調査所, 1997). 地震の発生前後の震源域周辺の地殻歪み変化については定量的な議論がよくなされており, 地震前の地下水異常については地殻歪み変化に起因するという考えが有力である. したがって, 地震前の地下水異常のメカニズムを解明するためには, 当面の手法として深部地下水の水位を連続観測して地殻歪み変化(第1次近似として体積歪み変化)と比較することが望ましいと考えられる.

1995年兵庫県南部地震(M7.2)以降, 平成7年度(1995年度)および平成8年度(1996年度)補正予算で, 近畿およびその周辺域に, 活断層調査・地殻応力測定・地殻歪観測・地震観測・地下水観測等の種々の

目的で多くの観測孔が地質調査所によって掘削された. 地質調査所で地下水観測による地震予知研究を行っているグループは, 当初から地下水観測を目的とした観測井に加えて, 他の目的で設置された観測井も利用し, 地下水観測網を整備した(佃ら, 1996; 佃, 1998). この結果, 近畿およびその周辺地域に, 24点(29観測井:後述するように, 1つの観測井で深さの異なるストレーナからの地下水を別々に測定しているケースも個別の観測井としてカウントしている)の地下水観測施設ができ, 地震予知研究を目的とした地下水観測網としては世界でも有数のものを保持するに至った(Fig.1). この観測網によって, 海溝型地震である東海地震を想定した従来の地下水観測による地震予知研究に加え, 活断層密集地域において内陸直下型地震の予知研究に地質調査所として新たに取り組むことになった訳

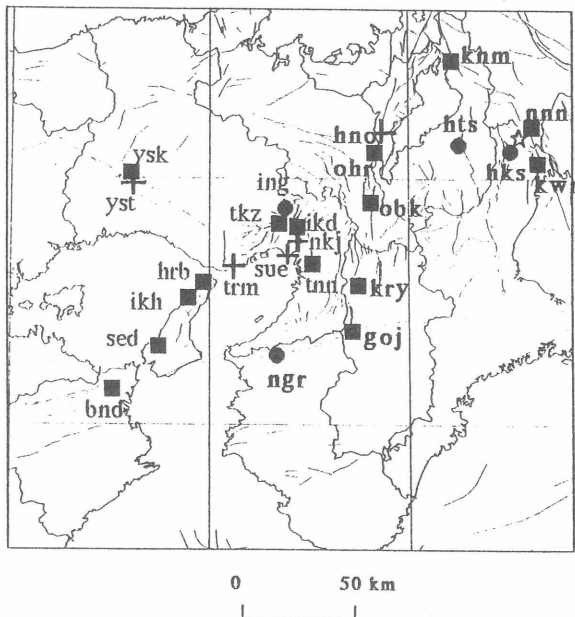


Fig.1 Distribution of active faults and observation stations of Geological Survey of Japan(+, ●, ■). Solid circles and squares show the stations where the observed data are shown in this paper. Especially at the stations expressed by the solid squares, tidal oscillations of the groundwater level whose amplitudes are 1mm or greater at O_1 and M_2 components are observed. ☆: Epicenter of an earthquake(M5.4) occurring in the northern part of Mie Prefecture on April 22, 1998.

である(佃ら, 1996; 佃, 1998).

本論文では, 上述の観測井の中の19箇所(22観測井)(Fig.1, Table 1)における1998年2月~7月の地下水位観測結果について主に考察を行った. 半年という期間は, 解析を行う上で十分な長さであるとはいえないが, 潮汐変化と地震時の変化について各観測井の水位の体積歪に対する感度を求めた. その結果, 潮汐と地震時について 10^9 またはそれより大きい体積歪変化(あるいはそれに相当する地殻変動)を, 22観測井の中のかなりの井戸で地下水位変化として検出できることがわかったので報告する.

Table 1 List of the 19 observation stations and 22 wells where the observational data are shown in this paper.

Station Name	Well Name	Altitude (m)	Well Depth(m)	Depth of screen(m)	Depth of water level meter(m)
bnd(bando)	bnd	25	500	419~430	9
goj(gojo)	goj	236	334	313~330	22
hks(hokusei)	hks-i	116	511	491~511	11
			511	100~110	29
	511	184~215			
			511	258~269	
hrb(hirabayashi)	hrb	30	747	630~650	5
hts(hatasyo)	hts	125	600	338~360	12
ikd(ikeda)	ikd	35	800	540~561	32
ikh(ikuha)	ikh	80	1000	224~246	34
ing(inagawa)	ing	85	1000	700~823	10
knm(kinomoto)	knm	110	250	178~195	6
kry(koryo)	kry	40	600	412~434	45
kwn(kuwana)	kwn-i	76	300	264~280	49
	kwn-o	76	300	67~84	34
ngr(negoro)	ngr	90	500	402~446	85
nnn(nanno)	nnn	12	458	427~442	13
obk(obaku)	obk1	52	389	357~374	13
	obk2	59	122	96~113	2
ohr(ohara)	ohr	217	272	256~267	12
sed(seidan)	sed	3	250	210~225	10
tkz(takarazuka)	tkz	82	1000	188~210	0
tnn(tennoji)	tnn	10	600	447~464	45
ysk(yasutomikita)	ysk	150	150	132~137	1

2. 観測

Fig.1に観測点の分布を示す. 降水や周辺の地下水の揚水の影響を避けるため, 井戸の深さは130~1000m, ストレーナの位置は100~800m程度である. また, この中のかなりの数の観測井が, 水温または水質から温泉法上の「温泉」である. 基本的には1つの観測点に1つの観測井をおき, ストレーナは1カ所にして単一の帯水層からの地下水を観測するようにしている. しかし, 場所によっては複数の観測井をおいたり(安富北(yst)・黄檗(obk)), 観測井は1つだがケーシングを二重にする等の工夫をして, 深度の異なる地下水を観測している所(北勢(hks)・桑名(kwn))もある. 後者については, それぞれ別の観測井としてカウントしている. 黄檗(obk)は特に, 南北走向の逆断層である黄檗

断層(小泉ら, 1998)を挟んで約200mの距離をおいて, 下盤側に黄槩1 (obk1)の観測井を, 上盤側に黄槩2 (obk2)の観測井を設置している。

これらの観測井では, 地下水位または水圧と降雨量・気圧を原則として観測する。水位および水圧を測定する場合は, 水晶の発振数が圧力によって変わる原理を用いた水圧センサーを原則として用いており, その精度は, メーカーの保証する所でフルスケールの±0.02%である。したがって, 宝塚(tkz)・安富北(ysk)以外ではフルスケール10mの水位計を用いているので精度は±2mm, tkz・yskではフルスケール50mの水位計を用いているので±10mmである。一方分解能についてはメーカーは特に記述していないが, 数日以下の短期的な水位変化を見た限りでは, 精度の10分の1程度はありそうである。その他, 場所によっては気温計・水温計・ボアホール型水平3成分歪計・傾斜計・GPS・地震計による観測も行っている(佃ら, 1996; 佃, 1998)。地震やGPSを除く観測データのサンプリング間隔は原則として2分であり, 現地収録・保存されたデータが, 1日に1回または2回の頻度で, テレメータにより地質調査所に転送されるシステムとなっている。また, データの表示・解析は, 市販のホームページ閲覧ソフトを用いて簡単な操作で行えるようになっており, データや表示・解析システムの機能が多くが公開されている(桑原ら, 1998)。

3. 結果

上述の24地点29観測井のうち, 降雨の影響が大きすぎたり, ストレーナ付近の地質状況によって水位の回復が極端に遅い等の理由で安定して良好なデータが取れていない所をのぞいた19点22観測井について, Figs.2~6に1998年2月~7月の結果(毎正時の瞬時値)を示す。correctedとあるのは, 潮汐解析プログラムBAYTAP-G(石黒ら, 1984; Tamura et al., 1991)によって, 気圧の寄与・潮汐成分・不規則ノイズを除去した補正值である。観測井によって, 気圧や潮汐の影響の受け方は異なるが, BAYTAP-Gによる解析の際のパラメーターを井戸毎に厳密に設定してはいないので, 補正值は必ずしも最適なものではない。また, 降雨の寄与は除去されていない。これらの点については, 少なくとも1年, できれば2年以上安定してデータが取得できた時点で改善を考えている。

各観測井における地下水位変化の概要について下記に記す。下記の観測井で, 特に断らない場合は, 主に地下水観測のために作られた観測井である。また, ストレーナ付近の岩

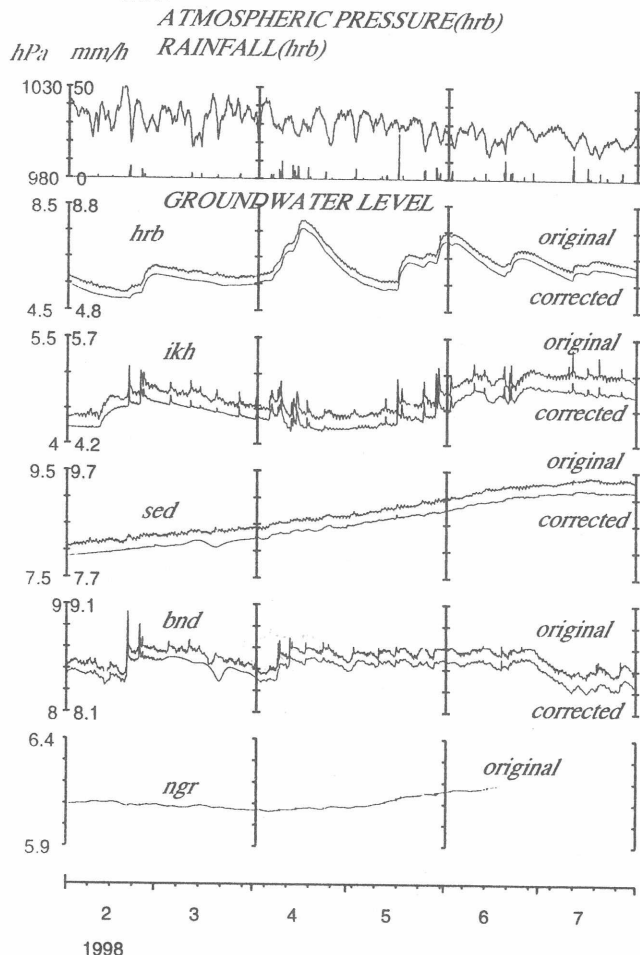


Fig.2 Observational results at the wells of hrb, ikh, sed, bnd and ngr from February 1998 to July 1998.

石や地層についての記述はボーリングコア観察に基づいて行われている。

3. 1 野島断層およびその延長部に沿った観測井

・平林(hrb)(Fig.2)

活断層調査および地殻応力・地震等の測定のために作られた観測井で、ストレナ位置は野島断層の破碎帯の位置に一致しており、付近の岩石は破碎された花崗岩である(伊藤ら, 1996)。1ヶ月程度の期間でくりかえすゆったりした変化は降雨の影響によるものと思われる。

・育波(ikh)(Fig.2)

活断層調査および地殻応力・地殻歪・地震等の測定のために作られた観測井で(伊藤ら, 1997)、ストレナ位置付近の岩石は花崗岩である。数日程度の期間のスパイク状の変化は降雨によるものである。

・西淡(sed)(Fig.2)

活断層調査および地下水観測のために作られた観測井で、ストレナ位置付近の地層は大阪層群最下部である(水野ら, 1996)。2月からほぼ一定の比率で水位が増加したが、7月に入って横這い傾向にある。

3. 2 中央構造線活動帯(徳島県～和歌山県～奈良県)沿いの観測井

・坂東(bnd)(Fig.2)

ストレナ位置付近は土柱層相当層である。1～2日程度の期間のスパイク状の変化は降雨によるものである。

・根来(ngr)(Fig.2)

ストレナ位置付近は菖蒲谷層群である。水位の変化はほとんど認められない。

・五條(goj)(Fig.5)

ストレナ位置付近の岩石は凝灰岩である。補正後の水位は安定しているが、降雨の影響で数日程度の間少し変化する。観測開始当初をのぞき、ほぼ一定の比率で水位は上昇している。

3. 3 有馬一高槻一六甲断層帯(兵庫県～大阪府)沿いの観測点

・宝塚(tkz)(Fig.3)

活断層調査および地殻応力・地震等の測定のために作られた観測井で(伊藤ら, 1997)、ストレナ位置付近は有馬層群である。地下水位が地表より上に來るので、井戸を密閉して水圧を測定しそれを水位に換算して表示している。2月から3月初めにかけて減少していたのがその後増加に転じ、6月に入って以降は横這い傾向にある。

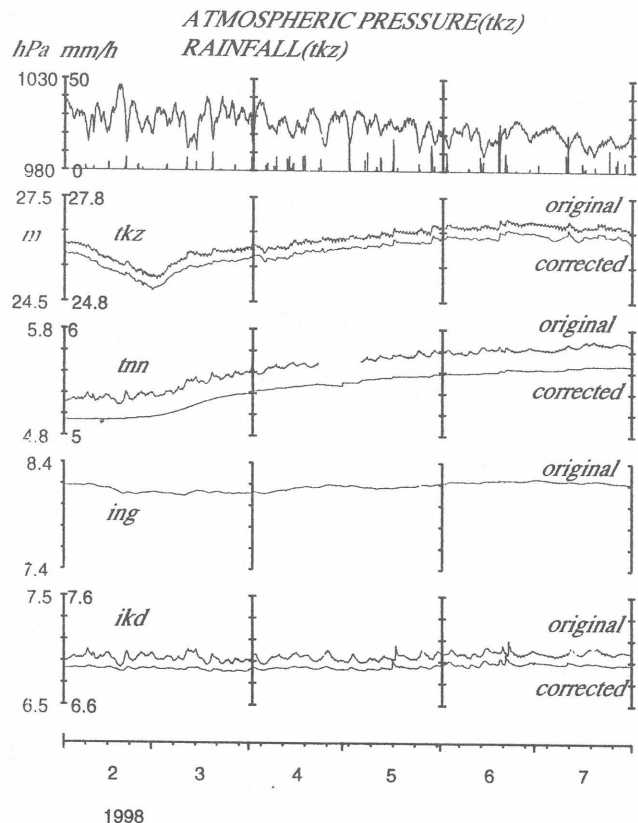


Fig.3 Observational results at the wells of tkz, tnn, ing and ikd.

・猪名川(ing)(Fig.3)

猪名川群発地震の発生原因の調査のために作られた観測井で(佐藤ら, 1997), 深度700~823mの部分が裸孔になっており, その部分の地下水を測定している。裸孔付近の岩石は超丹波帯長尾山層である。全体としてほとんど変化しない。

・池田(ikd)(Fig.3)

ストレーナ位置付近の地層は大阪層群である。数日程度の期間のスパイク状の変化は降雨によるものである。ごく近傍で別の井戸を掘り, 応力測定が行われたが(伊藤ら, 1997), すでにそちらの井戸は埋められている。

3. 4 上町断層(大阪府)沿いの観測井

・天王寺(tnn)(Fig.3)

ストレーナ位置付近の地層は大阪層群である。補正後の水位は非常に安定している。3月初めから増加傾向にあったのが, 6月頃から横這い傾向にあるように見える。

3. 5 鈴鹿西縁断層系(滋賀県)沿いの観測点

・秦荘(hts)(Fig.4)

ストレーナ位置付近は古琵琶湖層群である。1998年4月22日に発生したM5.4の三重県北部の地震(当初気象庁は, この地震を「岐阜県美濃中西部の地震」としたが震央の位置からいって「三重県北部の地震」とした方がより正確なので, 本論ではこの名称を採用する)の際に顕著なコサイスマック~ポストサイスマックな水位変化を示した。

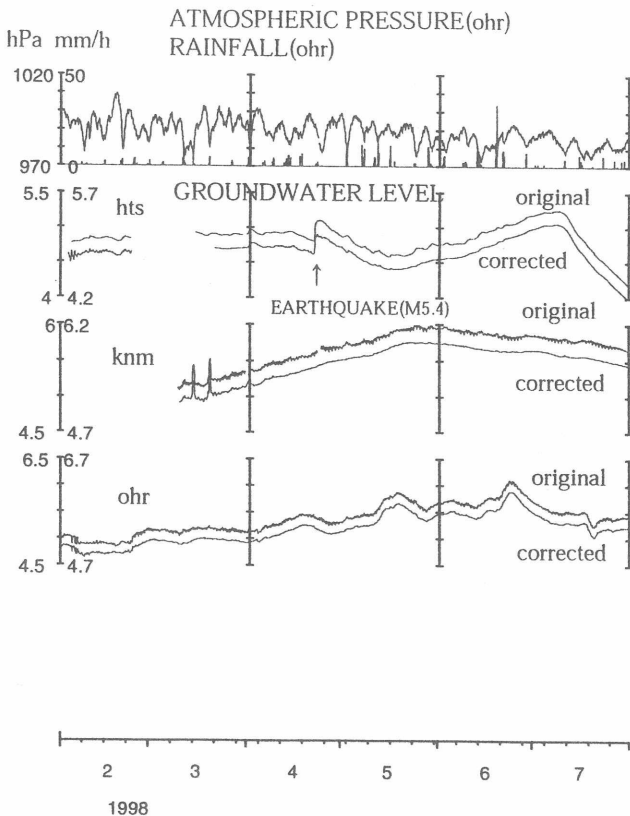


Fig.4 Observational results at the wells of hts, knm and ohr.

3. 6 花折断層(滋賀県~京都府)~黄檗断層(京都府)沿いの観測井

・大原(ohr)(Fig.4)

ストレーナ位置付近の岩石は花崗閃緑岩である。10日~20日程度の期間でくりかえすゆったりした変化は降雨の影響によると思われる。

・黄檗1(obk1)(Fig.5)

ストレーナ位置付近の岩石は丹波層群の頁岩である。補正後の水位は, まだ潮汐の日周潮の影響が取り切れていないが, ほぼ一定の比率で上昇した後, 7月に入って横這い傾向にある。

・黄檗2(obk2)(Fig.5)

ストレーナ位置付近の岩石は丹波層群の頁岩である。地下水位が地表より上に来るので, 井戸を密閉して水圧を測定しそれを水位に換算して表示している。6月下旬から水位が低下し始めた。7月20日以降は, 近傍の市営プールの水源の井戸の揚水が原因と考えられるが, それ以前の水位低下の理

由については不明である。水位低下中は潮汐変化の振幅が小さくなった。

3. 7 大和川断層(奈良県)沿いの観測点

・広陵(kry)(Fig.5)

ストレーナ位置付近の岩石は花崗岩である。数日程度の期間のスパイク状の変化は降雨によるものである。

3. 8 山崎断層(兵庫県)沿いの観測井

・安富北(ysk)(Fig.5)

ストレーナ位置付近の岩石は丹波層群の粘板岩～シルト岩である。地下水位が地表より上に来るので、井戸を密閉して水圧を測定しそれを水位に換算して表示している。潮汐変化がありしかも振幅が大きい。20日程度の周期の変化があるがこの原因は不明。

3. 9 鈴鹿東縁断層(三重県)沿いの観測井

・北勢内(hks-i)(Fig.6)

ケーシングを二重にし、内側の管で、491～511mのストレーナ位置からの地下水を測定している。ストレーナ付近は東海層群の粘土・シルト・砂層である。1998年4月から本格的に観測を開始して以来、水位は上昇を続けている。

・北勢外(hks-o)(Fig.6)

ケーシングを二重にし、外側の管で、100～110m・184～215m・258～269mの3カ所のストレーナ位置からの地下水を測定している。3カ所のストレーナ付近はいずれも東海層群の砂礫である。1998年4月から本格的に観測を開始して以来、水は上昇を続けてきたが、7月にはいって横ばいになっている。

3. 10 柳ヶ瀬一養老一桑名断層(三重県～岐阜県～滋賀県)沿いの観測点

・木之本(knm)(Fig.4)

ストレーナ位置付近の岩石は美濃帯の頁岩である。観測当初は、井戸における雨水混入防止策が不十分だったので、降雨の影響が大きくでているが、改善してからは降雨の寄与は小さくなった。観測開始後5月位まで上昇傾向にあったのが、その後減少に転じている。

・桑名内(kwn-i)(Fig.6)

hks-iと同様にケーシングを二重にし、内側の管で、264～280mのストレーナ位置からの地下水を測定している。ストレーナ付近は東海層群の砂礫である。1998年4月から本格的に観測を開始し

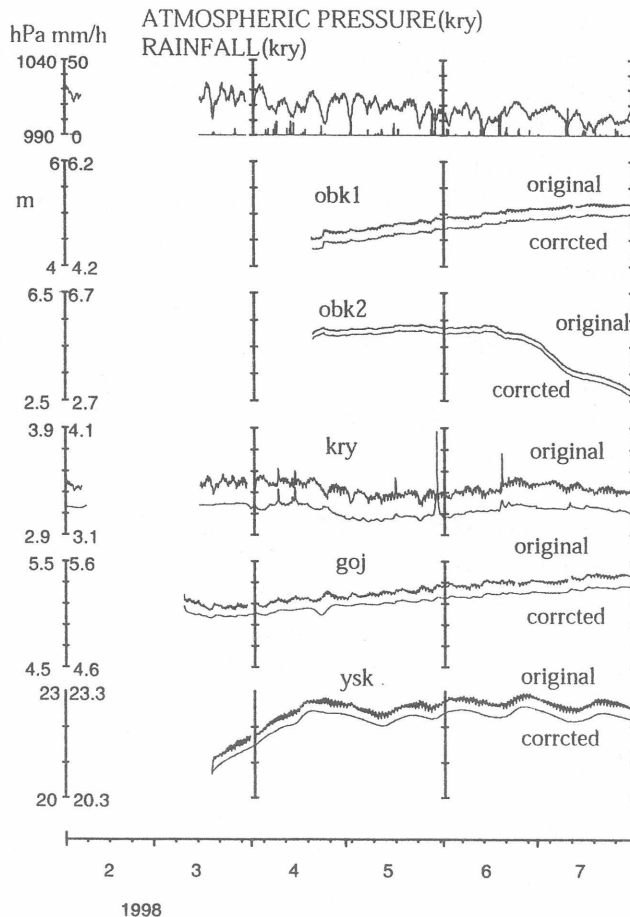


Fig.5 Observational results at the wells of obk1, obk2, kry, goj and ysk.

て以来、水位は上昇を続けてきたが、7月後半から低下傾向を示す。

・桑名外(kwn-o)(Fig.6)

hks-oと同様にケーシングを二重にし、外側の管で、67~84mのストレーナ位置からの地下水を測定している。ストレーナ付近は東海層群の砂礫である。1998年4月から本格的に観測を開始して以来、水は上昇を続けてきたが、7月にはいって低下傾向を示す。

・南濃(nnn)(Fig.6)

ストレーナ位置付近は東海層群の砂層である。1998年6月から本格的に観測を開始して以来、水位は減少を続けてきた。降雨の影響を数日程度の期間で大きく受ける。潮汐変化があり、その振幅も大きい。後述するようにM₂分潮(周期12.4時間)の振幅が非常に大きい一方、O₁分潮(周期25.9時間)の振幅が小さい。

4. 考察

4. 1 潮汐歪に対する地下水位変化

地下水位に潮汐変化が認められる場合、1.帯水層が圧力的に海水とつながっていて、海洋潮汐による圧力変化が帯水層を伝播して来るケース、2. 海洋潮汐による荷重変化が歪変化となって帯水層の水圧変化となるケース、3. 地球潮汐による歪変化が帯水層内の水圧変化となるケースの3通りが考えられる(ここでいう「帯水層」は、砂礫等の堆積層だけでなく、岩盤の割れ目系も含めるものとする)。1が理由である場合、透水係数が極端に大きくない限り潮汐振幅はすぐに減衰してしまうので(吉川ら, 1958), 海岸のごく近傍にある観測井(本論文ではhrb, ikh, sedの3観測井)を除いて(Fig.1), 通常は2と3のケースを考えればよい。つまり、井戸水位の潮汐変化を調べることで、上述の地下水観測網における水位の地殻歪に対する感度を調べることが出来ると考えて良い。ここで、地下水位に影響を与える歪変化は第1次近似として体積歪変化を考える。

潮汐解析プログラムBAYTAP-G(石黒ら, 1984; Tamura et al., 1991)で、上述の22観測井の多くで同時にデータが取れている期間である1998年5月~7月の1時間値を主に用いて、潮汐に固有の周期であるM₂分潮(周期12.4時間)とO₁分潮(周期: 25.8時間)の潮汐振幅と位相を求めた。そのうち、水位計が10m計の所で2mm以上、水位計が50m計の所で10mm以上の振幅が両分潮で得られたのは15の観測井である(Figs.1,7,8)。また、kwn-iも振幅は2mm未満ではあるが、1mm以上の振幅があった(Figs.1,7,8)。他の6観測井では、両分潮における振幅が1mm未満だったので、とりあえず本論文で

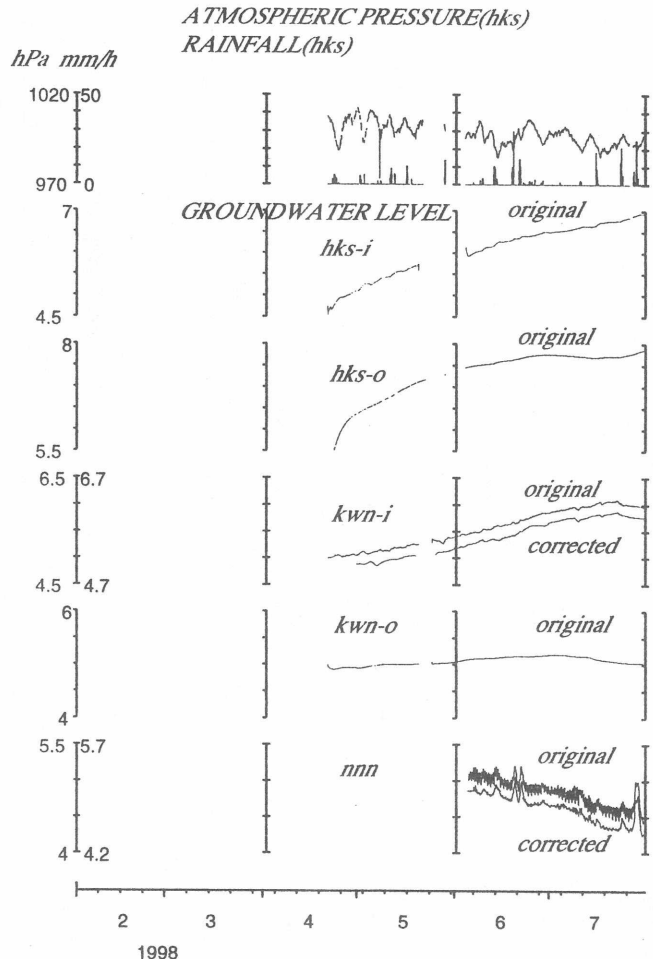


Fig.6 Observational results at the wells of hks-i, hks-o, kwn-i, kwn-o and nnn.

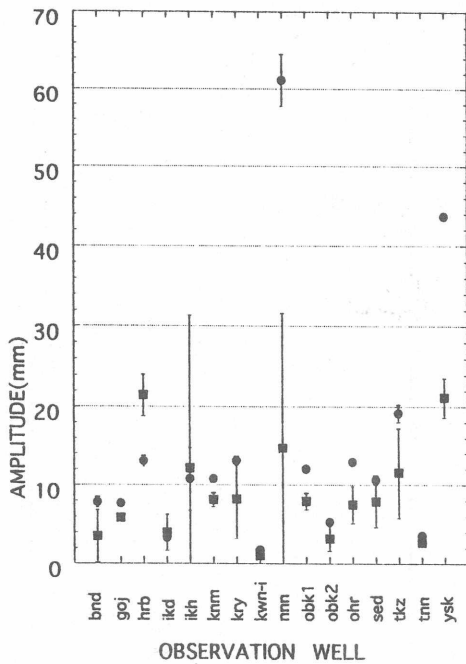


Fig.7 Tidal amplitude of the well water levels. ■ : O₁ component, ● : M₂ component.

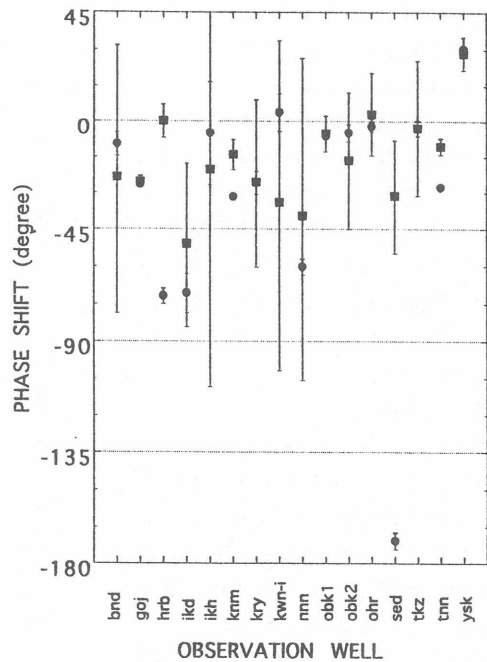


Fig.8 Phase shift of the well water levels from theoretical volumetric strain changes caused by Earth tides. ■ : O₁ component, ● : M₂ component.

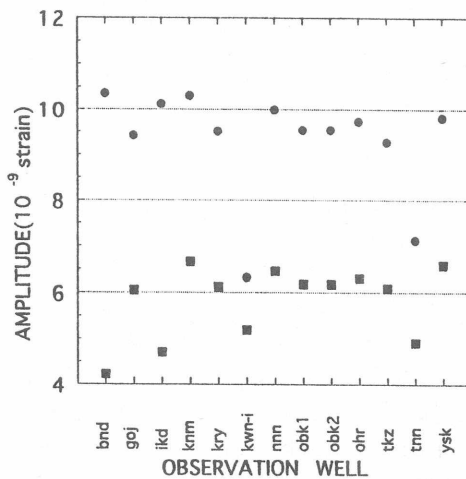


Fig.9 Tidal amplitude of volumetric strain estimated by a program GOTIC(Sato and Hanada, 1984). ■ : O₁ component, ● : M₂ component.

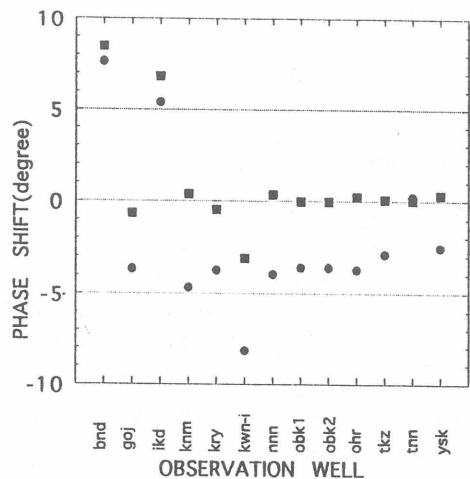


Fig.10 Phase shift of volumetric strain estimated by the program GOTIC(Sato and Hanada, 1984). This phase shift denotes that from theoretical volumetric strain changes caused by Earth tides. ■ : O₁ component, ● : M₂ component.

は潮汐歪との比較を行わない(Fig.1). ただし、この5月~7月という期間は、降雨の多い時期でその影響が水位に出やすいから、潮汐解析をする時期としては必ずしも適当ではなく、観測井によっては今後の解析によって数値に若干の変更がでる可能性はある。図の誤差範囲は、BAYTAP-Gによって求められた潮汐振幅・位相の標準偏差の2倍を示している。地下水位の場合、一般に体積歪変化が負の

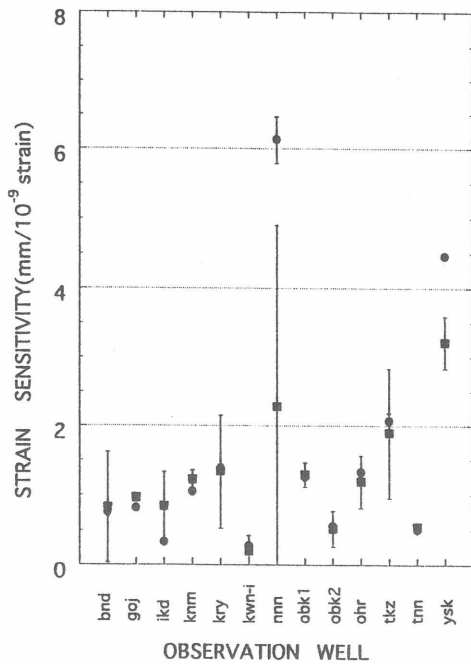


Fig.11 Strain sensitivity of the well water levels calculated from the results shown in Figs. 7 and 9.

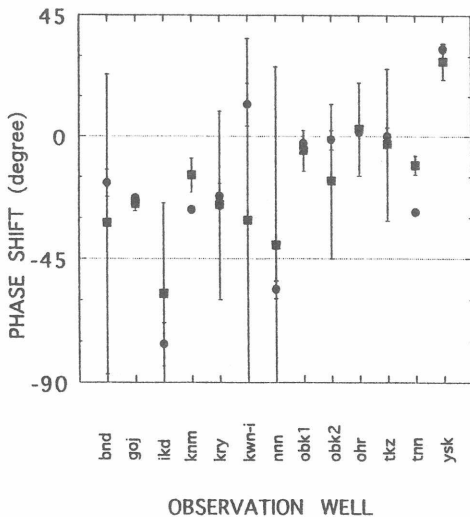


Fig.12 Phase shift of the well water levels from tidal volumetric strain changes estimated by the program GOTIC, which was calculated from the results shown in Figs.8 and 10.

とき(縮む時)水位が上昇するので位相は180度ずれるが、表現の都合上、本論文では体積の縮みと水位の上昇が一致したときの位相を0度としている。

振幅については、yskとnnnを除いて1mm~20mm程度の値に分布している(Fig.7)。地球潮汐による理論体積歪みからの位相差についてはおおむね0~45度の間に分布しているが、yskのように30度程度位相が進むものもある。海岸線に特に近い淡路島の3つの観測井(sed,ikh,hrb)ではM₂分潮よりO₁分潮の方が有意に振幅が大きかったり(hrb)、O₁分潮の振幅や位相差の誤差が特に大きかったり(ikh)、M₂分潮とO₁分潮で位相差が大きく異なる(sed)といった特徴がある。

上述の2の効果を考慮するために、理論潮汐を計算するプログラムGOTIC (Sato and Hanada, 1984)を用いて、地球潮汐だけでなく海洋潮汐による加重変化も加味した、各観測井における体積歪の潮汐変化の振幅と位相(理論地球潮汐からの位相のずれ)をM₂分潮とO₁分潮で計算した(Figs.9,10)。hrb・sed・ikhについては、GOTICで求める理論振幅・位相そのものに問題がある可能性が高いので図示していない。それは、GOTICで用いる海陸分布図のメッシュがあまりく(緯度方向が5分、経度方向が7分、Sato and Hanada, 1984)、しかも瀬戸内海の潮位は太平洋の潮位で代用しているからである。Figs.7,9の結果から、hrb・sed・ikhを除く13観測井のそれぞれの分潮における歪感度(水位振幅/GOTICによる体積歪振幅)を求めたのがFig.11、一方、Figs. 8,10の結果から、GOTICによる理論体積歪変化からの水位変化の位相差を示したのがFig.12である。

水位変化が単純に体積歪変化に比例し、その比例係数が井戸の内径や帯水層の透水係数等に依存する各観測井固有のものならば(Rice and Cleary, 1976; Roeloffs, 1996)、歪感度は各観測井毎に異なっても、M₂分潮とO₁分潮で値は一致し、位相差は0となるはずであり、tkz, obk1, obk2, ohr, kwn-iの5観測井がほぼそれに対応すると考えられる。帯水層の透水係数が小さい等の理由で、ストレナから井戸内への水の出入りに時間がかかると、これは体積歪変化が水位変化に変わる際に一種のハイカットフィル

ターの作用を生じ(Hsieh, 1987; 小泉, 1994)、M₂分潮の方がO₁分潮より歪感度は小さくなり位相遅れはM₂分潮の方が大きくなる。また、帯水層の被圧が不十分だと、周波数の大きい体積歪変化の方が効率よく水圧変化となる一種のハイパスフィルターの効果が生じ(Rojstaczer, 1988; 小泉, 1994)、M₂分潮の振幅の方が大きくなる一方、位相は見かけ上進んで、その進みはM₂分潮の方が小さくな

る。この「ハイカットフィルター」と「ハイパスフィルター」の効果を生じる現象は独立に生じるものであるから、両者の効果が1つの観測井で同時に生じることもあり得る。誤差を考慮すれば、tnn, bnd, kry, ikd, goj, knmの6観測井のレスポンスはほぼ「ハイカットフィルター」で説明でき、yskについては「ハイパスフィルター」で説明できると考えられる。nnnにおける、 M_2 分潮における歪感度の大きさや位相の遅れといった特徴については、「ハイカットフィルター」と「ハイパスフィルター」の効果に合成によるものかもしれないが、潮汐解析区間がこの観測井は2カ月足らずなので(Fig.6)、本論で結論を出すことは差し控えたい。

以上から、nnnに若干議論の余地は残るものの、水位に1mm以上の潮汐変化を示し海岸近傍でない13の観測井では井戸水位の歪感度が $0.2\sim 6\text{ mm}/10^9\text{ strain}$ であるから、水位計の分解能が $0.2\sim 1\text{ mm}$ であることを考慮すると、潮汐の周波数帯で、 $10^9\sim 10^{10}$ 程度またはそれより大きい体積歪変化を検出できるといってよい。

なお、上述の16観測井以外の井戸(hks-i, hks-o, hts, ing, kwn-i, kwn-o, ngr)をBAYTAP-Gで解析すると、潮汐振幅は M_2 分潮でも1mm未満であった。地下水観測網付近の M_2 分潮の体積歪の潮汐振幅が 10^9 程度であることから(Fig.9)、これらの井戸の歪感度は潮汐の周波数帯で、 $0.1\text{ mm}/10^9\text{ strain}$ 未満である。これらの井戸の水位計は10m計で分解能は0.2mm程度なので、潮汐の周波数帯で、 2×10^9 程度またはそれより小さい体積歪変化は検出できないと考えられる。

4. 2 地震時の水位変化

1998年2月~7月で、Fig.1に示した範囲で、 M_4 以上で深さ30kmより浅い地震は、4月22日20時32分に三重県北部に発生した $M_{5.4}$ の地震だけである(Fig.1)。この地震は、nnnはこの時点ではまだ本格的に観測を開始しておらず、kwn-i, kwn-o, hks-i, hks-oも4月20日前後に本格的に観測を開始したばかりであり、地震前に異常な変化があったかどうかは判断できない状況である。これらの観測点の次に震央に近いhtsでは、地震前に若干水位の低下する傾向が認められるが(Fig.4)、他の期間にもそのような変化は認められるので、特に異常な変化とは認められない。したがって、ここでは、三重県北部の地震に伴ったコサイスマック~ポストサイスマックな水位変化についてのみ言及する。

この地震について、11の観測井(kwn-i, kwn-o, hks-i, hks-o, hts, knm, obk1, obk2, ohr, tkz, ysk)でコサ

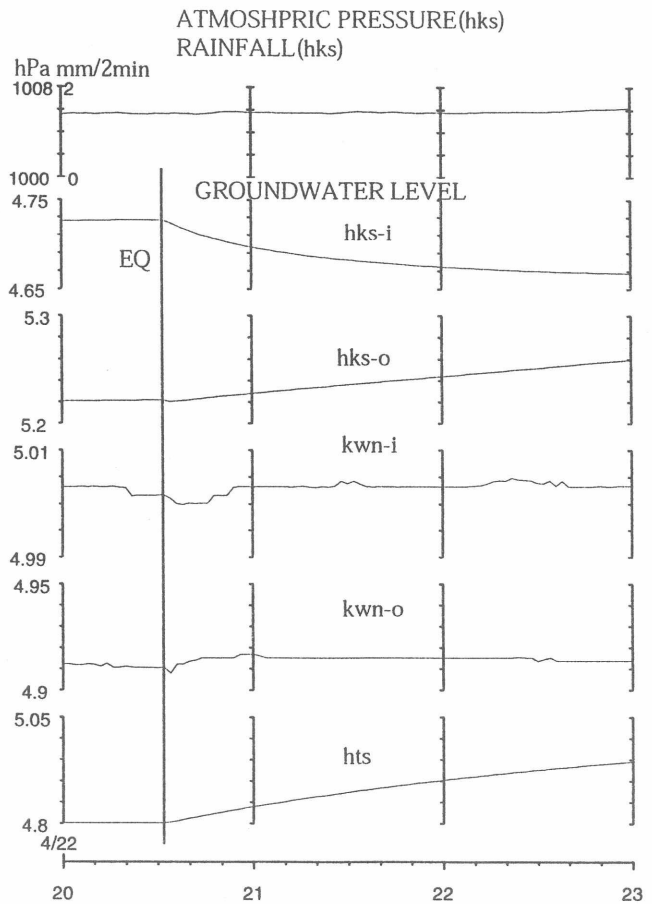


Fig.13 Well water level changes at hks-i, hks-o, kwn-i, kwn-o and hts just before and after the earthquake($M_{5.4}$) occurring in the northern part of Mie Prefecture at 20:32 on April 22, 1998. A long bar shows the earthquake occurrence.

イスマック～ポストサイズミックな水位変化が観測された。以上11の観測井における地震の直前直後の20時～23時の水位変化(2分値生データ：毎偶数分または毎奇数分に記録)をFigs.13, 14に示す。htsについては、Fig.4についても明瞭な変化が認められる。これらの水位変化を地震時のコサイズミックな体積歪変化によって生じたと仮定し、その際の歪感度を求めるために下記の考察・作業を行った。

コサイズミック～ポストサイズミックな水位変化の要因としては、
 1. 地震による地殻歪変化(第1次近似として体積歪変化)の他に、
 2. 地震による透水係数変化、
 3. 地震による地盤の液状化が大きな要因として挙げられる。
 1についてはさらに、ステップ状の体積歪変化だけでなく、地震の振動によって生じる0.01～100Hz程度の周期の体積歪変化も考慮しなくてはならないが、2分というサンプリングでは、そのような短周期体積歪変化に対応するような水位変化とその歪感度を評価するのは不可能である。短周期の水位の振動を2分というサンプリングで記録することによる見かけ上の増減を「ステップ状の変化」と誤解しないた

めの考慮が必要である。2については透水係数の変化によって帯水層内の圧力勾配が代わり水位変化に至るので1による水位変化に比べて若干時間がかかることが予想される。3は地震による強い振動がある地域(つまり震央近傍の地域)で堆積層内の地下水位上昇について考慮すべき要因であろう。

以上の考察に基づき、コサイズミックな水位変化の振幅と増減については以下のように同定した。地震発生直前の観測値(20時31分または32分のデータ)とそれ以前のデータの傾向を考慮して、地震直後の観測値(20時33分以降のデータ)で直前の観測値より10分以上続けて有意に同じセンスで変化した時点で「増減」のセンスを判断した。また、その変化が反転または横這いになった時点の値と前述の直前の値との差を振幅とした。この方式でコサイズミックな水位変化を同定すると地震後数分以内に変化のセンスが反転する obk2, tkz, ysk, kwn-o, hks-o において、obk2 は $5.2 \pm 1\text{mm}$ の減少、tkz と ysk ではステップ状の変化無し、kwn-o は $4.5 \pm 0.5\text{mm}$ の増加となり、hks-o も増加となる(Table 2)。この hks-o に関しては、地震前から 59.3mm/day 程度の増加率で増加していたのが、地震後増加率が急増したあと徐々に増加率が減少するという変化を示したので(Figs.6,13)、地震前の増加率 6cm/day 程度に戻った時点の水位の値(4月28日未明： $6195 \pm 10\text{mm}$)から、地震後も地震前と同じ増加率

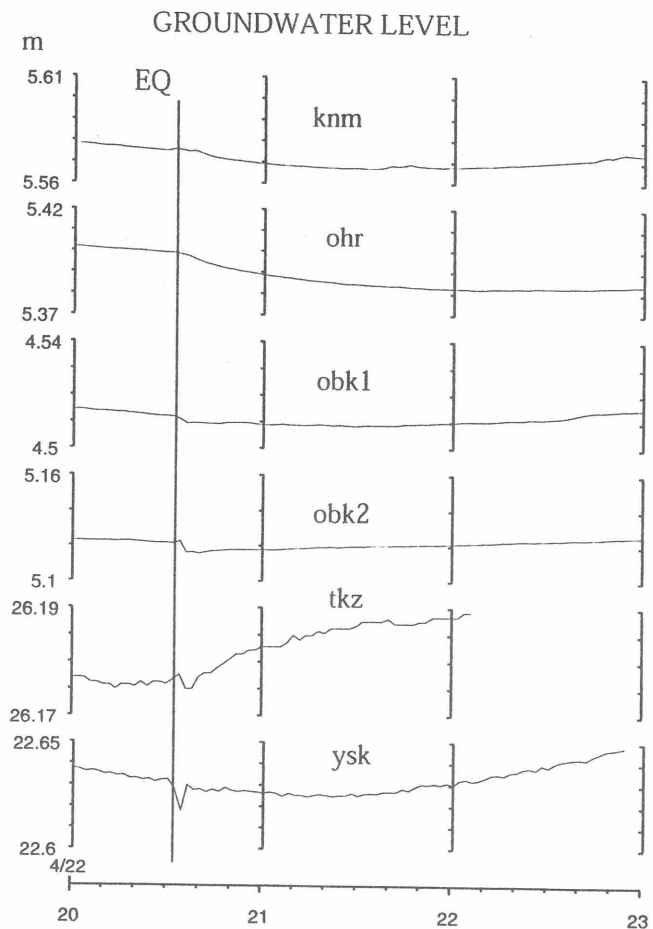


Fig.14 Well water level changes at knm, ohr, obk1, obk2, tkz and ysk just before and after the earthquake(M5.4) occurring in the northern part of Mie Prefecture at 20:32 on April 22, 1998. A long bar shows the earthquake occurrence.

Table 2 Strain sensitivity estimated from theoretical volumetric strain changes

Well Name	TCV*1 10 ⁻⁹	OCW*2 mm	Error mm	SS(*3) mm/10 ⁻⁹
hks-i	-0.53 ~ 8.59	-61.5	0.5	116.01 ~ -7.22
hks-o	-1.44 ~ 8.70	655	20	-467.30 ~ 77.60
hts	0.72 ~ 2.05	292	1	408.97 ~ 142.07
knm	0.08 ~ 0.66	-8.9	1	-117.91 ~ -11.92
kwn-i	-6.95 ~ -13.25	-1.6	0.5	0.30 ~ 0.08
kwn-o	-7.32 ~ -14.19	4.5	0.5	-0.68 ~ -0.28
obk1	0.08 ~ 0.17	-2.4	0.5	-38.58 ~ -11.44
obk2	0.08 ~ 0.17	-5.2	1	-82.28 ~ -25.20
ohr	0.13 ~ 0.37	-16.5	0.5	-126.62 ~ -43.06

*1. Theoretical coseismic volumetric strain changes.

*2. Observed coseismic and/or postseismic well water level changes.

*3. Strain sensitivity.

Table 3 Strain sensitivity estimated from observed volumetric strain changes

Well Name	OCV(*1) 10 ⁻⁹	Error 10 ⁻⁹	OCW(*2) mm	Error mm	SS(*3) mm/10 ⁻⁹	Error mm/10 ⁻⁹
hts	-18.700	3.300	292	1	-15.6	2.8

*1. Observed coseismic volumetric strain changes.

*2. Observed coseismic and/or postseismic well water level changes.

*3. Strain sensitivity.

で水位が上昇したと仮定した時の4月28日未明の水位の推定値(5540±10mm)を差し引いて655±20mmの増加とした。

他方、久家(1998)による三重県北部の地震のメカニズム解(点震源)を用い、Okada(1992)の歪計算プログラム(地殻を半無限の均質な弾性体と仮定、弾性定数は岩盤に相当する値を用いている)によって、各観測井毎の地震時の体積歪変化を求めた(Table 2)。上記の久家(1998)の解には任意性があるので理論体積歪変化の値にも幅が生じる(Table 2)。また、ステップ状の変化が同定された上述の9観測井のうち、観測井そのものにポアホール型水平3成分歪計が設置されているhtsでは、観測された歪変化に基づいて体積歪変化を算出した(Table 3)。その際、水平3成分歪計からは体積歪変化を直接計算できないので面積歪変化を計算し、それに2/3を乗じて体積歪変化を計算している。自由表面を仮定すると面積歪変化は体積歪変化に比例し、便宜上、ポアソン比を0.25とすると比例係数は2/3となるからである(例えばMelchior, 1983)。

以上の結果をもとに、コサイスミックな水位変化が、すべて地震時の体積歪変化によって生じたと仮定して歪感度を求めたのがTable 2とTable 3である。Table 2の場合が、理論体積歪変化を用いて計算した場合で、Table 3が観測体積歪変化を用いた場合である。すでに述べたように体積が縮むとき(体積歪が負の時)水位が上昇するのが一般的なケースなので、その場合の歪感度は負の値となっている。理論体積歪変化は、上述のように地殻を半無限の均質な岩盤としている訳だから、ストレート位置の地質だけでなく歪計の設置位置のそれも(堆積層である)古琵琶湖層群のhtsについては、

Table 2よりTable 3の方の歪感度の値の方がより正確であると考えられる。

Fig.11の潮汐周波数帯における歪感度および潮汐変化が認められない井戸の歪感度が $0.1\text{mm}/10^9\text{strain}$ 未満であることを考慮すると、地震モデルの任意性によって歪感度のセンスが逆転してしまう hks-i と hks-o をのぞいては、Table 2における地震時の歪感度は潮汐の周波数帯のそれより数倍～数千倍程度に見積もられることがわかる。またそのセンスも hts と kwn-i では負(つまり体積縮小時に水位増加、体積増大の時に水位減少)とはならない。

これについてはまず、理論体積歪変化値に問題があると考えられる。観測体積歪変化値がある hts では、観測値の方が理論値の十～数十倍になっておりしかもセンスが逆である。したがって、観測値の方から求めた歪感度は負の値になっている上に絶対値もかなり小さくなっている。また、地震モデルの任意性による理論体積歪変化値の誤差は震央に近いほど大きくなるから (Table 2)、震央近傍の kwn-i の歪感度が正の値になっているのも、理論体積歪値に問題があるのかもしれない。よって kwn-i の歪感度も実際はマイナスかもしれない。また、Table 2 の歪感度の絶対値も数十分の1となる可能性がある。

ただし、hts に関しては、観測体積歪変化値を用いても、歪感度が絶対値で $15.6\text{mm}/10^9$ となり、誤差の $2.8\text{mm}/10^9$ を考慮しても、潮汐周波数帯における歪感度 ($0.1\text{mm}/10^9$ 未満) の100倍以上となってしまう。これについては、hts のコサイスマック～ポストサイスマックな水位上昇が数日かかっていることと、hts における震度が3以上あったと気象庁の震度分布図から推定できることから、上述の2や3による水位上昇も重なって生じている可能性がある。 $655\pm 20\text{mm}$ もの地震後の水位上昇があると同定した結果、Table 2 で極端に大きな歪感度が算出されている hks-o も事情は同様である。

以上の結果をまとめると、上述の9観測井は、地震によって生じる短期間の 10^9 程度またはそれより大きい体積歪変化(あるいはそれに相当する透水係数変化等)を検出できると推定できる。しかしながら、1つの地震による水位変化の結果のみに基づいているので、この推定には不確実なところがある。今後観測を続けてより多くの地震時の地下水位変化を検出することで、この不確実性を解消していきたいと考えている。

5. まとめ

地質調査所が近畿を中心に展開した地下水観測網の「性能評価」のため、潮汐変化と地震時の変化について各観測井の体積歪に対する感度を求めた結果、潮汐と地震時について 10^9 またはそれより大きい体積歪変化(あるいはそれに相当する地殻変動)を、本論で紹介した22観測井の中のかなりの井戸で地下水位として検出できることがわかった。地下水変化は地震と密接な関係があることが分かっているものの、過去の地下水連続観測による成果が1つの地域で1～2点観測によるものがほとんどで、地震との定量的な関係を明らかにする上で説得力を欠いたのも事実である。今後もこのような解析を行い、多点に地下水観測井をおいた地下水観測網によって、地殻変動に対する地下水の時間的・空間的応答の解明を行う予定である。それによって、地震予知研究に寄与することを目指したい(松本・小泉, 1998)。

6. 謝辞

地質調査所地震地質部変動解析研究室の中村みのりさんと細田幸江さんには図表の作成を手伝っていただいた。二人の匿名の査読者の方には適切な助言を頂いた。また観測井の設置・運営に関しては、地方自治体をはじめとする関係諸機関および民間の方々にも協力を頂いている。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 地質調査所(1997)1995年兵庫県南部地震直後の関西地区と徳島県における地下水位変化, 地震予知連絡会報, 58, 500-504.
- 藤森邦夫, 山本剛靖, 大塚成昭: 六甲高雄観測室における兵庫県南部地震に関連する湧水量変化, 京都大学防災研究所年報, 第38号B-1, 1995, pp.287-296.
- Hsieh, P. A. and Bredehoeft, J. D. (1987) Determination of Aquifer Transmissivity from Earth Tide Analysis, *Water Resources Res.*, 23(10), 1824-1832.
- Igarashi, G., Saeki, S., Takahata, N., Sumikawa, K., Tasaka, S., Sasaki, Y., Takahashi, M. and Sano, Y. (1995) Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan, *Science*, 269, 60-61.
- 石黒真木夫, 佐藤忠広, 田村良明, 大江昌嗣(1984)地球潮汐データ解析プログラムBAYTAPの紹介一, 統計数理研究所彙報, 32, 71-85.
- 伊藤久男, 桑原保人, 宮崎光旗, 西沢 修, 木口 努, 藤本光一郎, 大谷具幸, 田中秀実, Susan Agar, Alain Brie, 山本裕祥(1996)断層を貫く坑井調査による野島断層の深部構造, 物理探査, 49, 525-535.
- 伊藤久男, 桑原保人, 西沢 修(1997)断層近傍の地殻応力 池田・宝塚・垂水・野島平林・育波の結果, 地球惑星科学関連学会1997年合同大会予稿集, 15.
- 桑原保人, 松本則夫, 高橋 誠, 佐藤 努, 佃 栄吉, 伊藤久男, 小泉尚嗣, 佐藤隆司, 長 秋雄(1998) 地質調査所の活断層モニタリングデータ転送・解析システム一, 日本地震学会講演予稿集, 2.
- 小泉尚嗣(1994) 地殻歪と地殻内流体, 火山, 39(4), 169-176.
- 小泉尚嗣, 松本則夫, 佃 栄吉, 永山 透, 金子純一, 堤 岑生(1997) 1995年兵庫県南部地震後の関西地区と徳島県における地下水位変化について, 地球惑星科学関連学会1997年合同大会予稿集, 545.
- 小泉尚嗣, 横田 裕, 佃 栄吉, 高橋 誠, 岩田知孝, 入倉孝次郎, 上砂正一, 高木 清, 長谷川昌志(1998)黄檗断層の地下構造調査, 地球惑星科学関連学会1998年合同大会予稿集, 324.
- Koizumi, N., Kano, Y., Kitagawa, Y., Sato, T., Takahashi, M., Nishimura, S. and Nishida, R. (1996) Groundwater anomalies associated with the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, *J. Phys. Earth*, 44(4), 373-380.
- 久家慶子(1998) 強震計波形データを用いた地震の震源パラメタの自動決定, 平成7-9年度科学研究費基盤研究(A)(1)研究成果報告集「地震防災を目的とした地震情報の即時伝達システムに関する研究」(研究代表者:入倉孝次郎), 10-30.
- 松本則夫, 小泉尚嗣(1998)高感度地殻変動センサーとしての地下水位の変動メカニズムの解明, 月刊地球, 号外20, 226-229.
- Melchior(1983) *The Tides of the Planet Earth*, 2-nd edition, 65-66, Pergamon Press, Oxford.
- 水野清秀, 吉岡敏和, 岡村 眞, 松岡裕美(1996)淡路島南部, 湊-本庄断層の活動性調査, 平成7年度活断層研究調査概要報告書, 地質調査所研究資料No.259, 23-32.
- Okada, Y. (1992) Internal Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-space, *Bull. Seism.Soc.Amer.*, 82(2), 1018-1040.
- Rice, J.R. and Cleary, M.P. (1976) Some basic stress diffusion solutions for fluid-saturated elastic porous media with compressible constituents, *Rev. Geophys.Space Phys.*, 14(2), 227-241.
- Roeloffs, E.A. (1996) Poroelastic Methods in the Study of Earthquake-related Hydrologic Phenomena, in *Advances in Geophysics*, edited by R.Dmowska, 135-195, Academic, San Diego, Calif.
- Rojstaczer, S. (1988) Intermediate period response of water levels in wells to crustal strain: Sensitivity and noise level, *J.Geophys.Res.*, 93, 13619-13634.

- Sato, T., and Hanada, H. (1984) A Program for the Computation of Oceanic Tidal Loading Effects 'GOTIC', Publ.Int. Latti.Obs.Mizusawa, 18(1), 29-47.
- 佐藤隆司, 楠瀬勸一郎, 長 秋雄, 木山 保, 山田文孝, 相沢隆生(1997)群発地震発生域直上における地殻応力測定-兵庫県猪名川町における-, 地震2, 50(1), 57-66.
- 佐藤 努, 高橋 誠(1997) 淡路島の異常湧水の化学組成変化-1995年兵庫県南部地震による影響-, 地球化学, 31, 89-98.
- Tamura, Y., Sato, T., Ooe, M. and Ishiguro, M. (1991) A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion, Geophys.J.Int., 104, 507-516.
- Tsunogai, U. and Wakita, H. (1996) Anomalous Changes in Groundwater Chemistry - Possible Precursors of the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, Japan, J. Phys. Earth, 44(4), 381-390.
- 遠田晋次, 田中和広, 千木良雅弘, 宮川公雄, 長谷川琢磨(1996)1995年兵庫県南部地震に伴うコサイスマミックな地下水挙動, 地震2, 48(4), 547-553.
- 佃 栄吉, 高橋 誠, 佐藤 努, 松本則夫, 伊藤久男(1996) 地質調査所における地震予知地下水観測網-近畿地域の地下水観測井の新設-, 地質ニュース, 505, 11-15.
- 佃 栄吉(1998) 変動解析研究室の現在の研究内容と今後の展望-東海地域の地震予知研究及び内陸活断層の活動モニタリング-, 地質ニュース, 523, 29-34.
- 吉川秀夫, 赤井浩一, 速水頌一郎(1958)河川と地下水の問題, 石原藤次郎・本間仁編「応用水理学中2」, 275-337, 丸善, 東京.