

神奈川県西部の地震予知研究用観測井における 地下水位変化の特徴とその要因

横山尚秀、板寺一洋、小鷹滋郎、平野富雄

神奈川県温泉地学研究所

Analysis of Natural and Artificial Changes in the Groundwater Level
at Three Monitoring Wells in Western Kanagawa Prefecture

by

Takahide YOKOYAMA, Kazuhiro ITADERA, Shigeo ODAKA and Tomio HIRANO

Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

Hakone, Kanagawa

(Abstract)

Monitoring of groundwater levels has been carried out since 1989 at three monitoring wells in western Kanagawa Prefecture. The aim is to study methods of predicting a possible earthquake in the Odawara area. The characteristics of a normal change in groundwater level are classified as either natural or artificial changes in order to clarify what is an anomalous one. The influence of the pumping well is recognized as having led to a rise in groundwater level at Ohi of 10cm and at Odawara of 60cm. The effect of irrigation of paddy fields is distinctive in raising the groundwater level at Ohi. A rise in groundwater level associated with heavy rainfall is observed at Minamiashigara. Considering these features, changes in groundwater level were compared with barometric pressure or earthtide. Barometric effects and earthtidal ones were recognized at Ohi and Minamiashigara. The former are calculated as being 4.3mm/mb at Ohi and 3.8mm/mb at Minamiashigara and the latter ones as 9.2mm/ μ gal at Ohi and 5.7mm/ μ gal at Minamiashigara. These effects show strong sensitivity to the strain of the earth's crust. Anomalous changes in groundwater level associated with the earthquake on August 5, 1990 were recognized in the monitoring wells. Upward trends before the earthquake were recognized at wells, with the biggest rise being 10cm at Minamiashigara. Coseismic downward changes were also observed at Minamiashigara. The pattern of these changes in the groundwater level recognized at Minamiashigara seems to be typical of changes in crustal stress associated with an earthquake.

神奈川県温泉地学研究所 神奈川県足柄下郡箱根町湯本997 〒250-03

神奈川県温泉地学研究所報告 第24巻、第1号、1-18、1992.

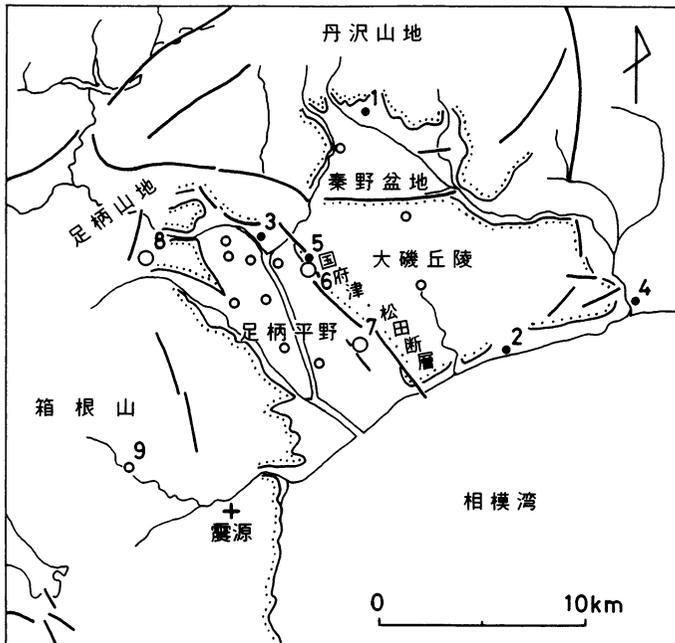


図1 観測井位置と活断層分布
 大○：地震予知研究用観測井
 小○：その他の県観測井
 ●：なまずの会観測井
 太線：活断層
 +：震源

1 はじめに

地震の前兆現象は水文現象、とくに地下水位によく現れやすいと言われ、地下水位は地殻変動に敏感な歪計と見なされている。地下水に関する前兆現象の研究成果については、Oki and Hiraga (1979) や Roeloffs (1988)、川辺 (1991) によってまとめて報告されている。

1976年にアマチュアの地下水による地震予知研究グループが大木・平賀両氏の指導のもとに発足し、当所では1977年に地震予知研究として地下水位観測事業を発足させ (大木、1977 a、1977 b)、以来「なまずの会」の活動を積極的に支援している。その活動の成果が次第に蓄積され (Oki and Hiraga、前出、大木、平賀、1984)、良い結果を得たので1989年以來県西部地震予知研究として専用の観測井設置をはじめ、観測施設の整備と充実が図られた。

県西部地震について石橋 (1985) は西相模湾断裂モデルを提唱し、マグニチュード (M) 7級の地震が歴史的に繰り返し神奈川県西部を襲う可能性について述べている。これらの研究成果を踏まえ、差し迫っていると考えられている次のM 7級神奈川県西部地震の前兆現象を捉え、地震予知研究を推進させるため1988年度に足柄地域の大井町、南足柄市、小田原市に地下水位観測用の深井戸3本 (表1、図1) を設置し、観測を開始した。

観測井では地下水位のほか、雨量、気圧を分単位で観測している。観測データは分単位で観測井毎に現地の記録装置に蓄えられ、テレメータシステムによってデータは一日一回本局からの呼出に応じて自動的に当所のパソコンに収録される。データ処理の概要は図2の通りである。

表 1 地下水位観測井の仕様

観測井名	所在地	深度 (m)	口径 (m)	スクリーン深 (m)	観測項目	透水係数 (cm/sec)	地質
大井観測井 緯度 経度	足柄上郡大井町金子2856 N 35°19' 47.9" E139°09' 40.6"	300	100	270-300 (30)	地下水位 気圧 降水量	5.5×10^{-4}	洪積層 相当 砂礫層
小田原観測井 緯度 経度	小田原市千代279-1 N 35°17' 47.7" E139°11' 17.1"	300	100	270-300 (30)	地下水位 気圧 降水量	1.4×10^{-2}	洪積層 相当 砂礫層
南足柄観測井 緯度 経度	南足柄市摺手1687-3 N 35°20' 09.1" E139°04' 33.0"	150	100	120-150 (30)	地下水位 気圧 降水量	8.7×10^{-4}	足柄層 相当 砂層

観測井の位置

大井観測井は図1中のNo. 5に示す。
小田原観測井は図1中のNo. 7に示す。
南足柄観測井は図1中のNo. 8に示す。

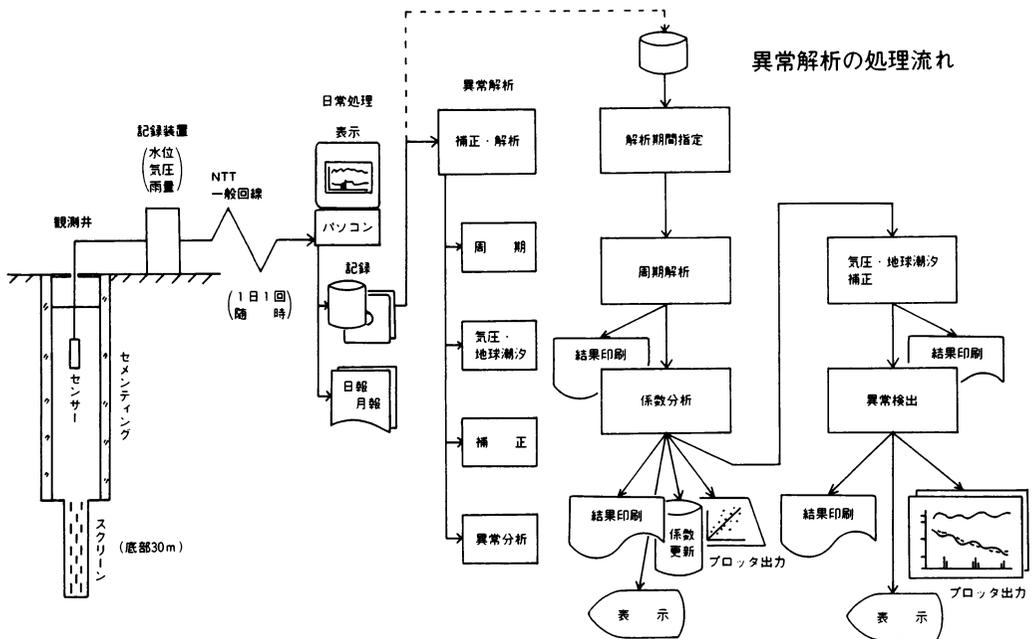


図 2 地下水位観測のテレメータ・システムとデータ処理の流れ

観測を開始して1年半が経過した1990年8月5日、神奈川県小田原市と箱根町との境界付近を震源とするM5.1の地震が発生した。地震規模はM7に及ばなかったが、震央は3観測井から15km以内と近く、深度は17kmと浅かった。3観測井の水位は地震の前に上昇し、地震の前兆変化が捉えられたのでその概要を観測だよりに速報した(横山ほか、1990、1991)。地震の前兆変化が現れたことは水位観測が予知研究に有効であることを示しており、引き続き異常検出などの予知手法の研究に取り組んでいる。

異常判定には平常時の各観測井の水位変化の特徴を把握しておく必要があると考えた。本報告では約2年間の観測データに基づいて水位の季節、月間、週間、1日の変化特性、周期性についてハイドログラフから読み取れる範囲で検討し、人為的な水田灌漑、揚水影響について調べた。さらに、地下水水位に与える気圧と地球潮汐の効果を解析し、既に報告した先のM5.1地震前後の水位異常変化について検討を加えた。

2 観測井の位置と仕様

3観測井は足柄平野周辺の活断層の近くに設置されている(図1)。大井観測井は大磯丘陵の際にあって国府津-松田断層上に位置し、川音川扇状地の末端に近い(写真1)。小田原観測井は千代台地上に位置し、国府津-松田断層に接している。南足柄観測井は平山断層に近く、内川の旧河床に位置している。観測井の仕様を表1に示す。

井戸深度は大井、小田原観測井が300m、南足柄観測井が150mである。いずれの井戸も最下部の30mにスクリーンが切っており、スクリーンの位置の地層は更新世である。透水量係数は大井観測井が14.3m³/日、小田原観測井が359.4m³/日、南足柄観測井が22.5m³/日である。

地下水水位(地表からの深度)はいずれも浅く、スクリーン位置よりかなり上にあがっている。水位は大井観測井が17m前後、小田原観測井が12m前後、南足柄観測井が27m余りである。地下水はいずれも被圧地下水である。

3 平常時の地下水水位変化の特色

地下水水位変化を引き起こす要因は、一般に地下水の自然な流動、降雨、蒸発散、気圧、潮汐、河川流量などの自然的要因と灌漑、揚水などの人的要因が挙げられる。水位の異常変化をとらえるためには、平常の変化にどのような特徴があるか、水位変化がどの要因によるか、とくに人為的な影響について現象の頻度、周期、規模について十分に把握しておく必要がある。とりわけ3観測井が足柄平野周辺に設置されていることを考えると、横山ほか(1986)が報告しているように、揚水や灌漑の影響についてよく調査する必要がある。

1989年と1990年の地下水水位変化(図3、4)について検討したところ、各観測井とも地下水水位の年間、週、日変化に特色があり、大井観測井には水田灌漑、小田原観測井と大井観測井に揚水の影響が

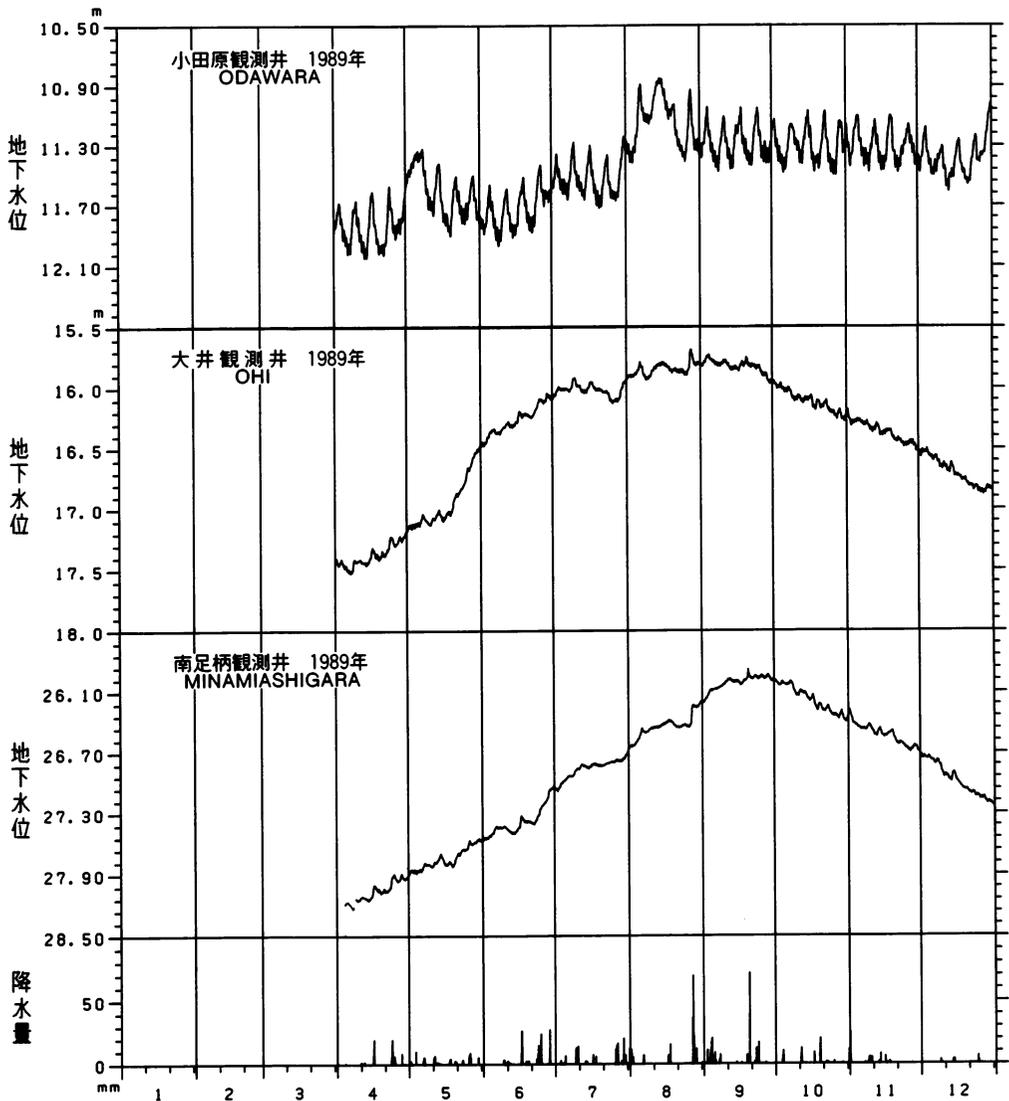


図3 1989年地下水位変化（上段から小田原観測井、大井観測井、南足柄観測井）
地下水位は地表からの深度（m）

認められた。また、大井観測井と南足柄観測井に気圧変化、地球潮汐等の影響を受けていることがグラフから読み取れた。各観測井の水位変化について特色をまとめると次のとおりになった。

(1) 大井観測井

大井観測井の地下水位は地表から約17mの位置にあり、地下水は被圧されている。年間の地下水位変化をみると、5月中旬以降の水田灌漑開始に対応する水位上昇、7月中旬の田干しによる水位低下、8、9月の台風等の大雨による水位上昇とその後の水位低下が認められる。これらの水位変化は足柄

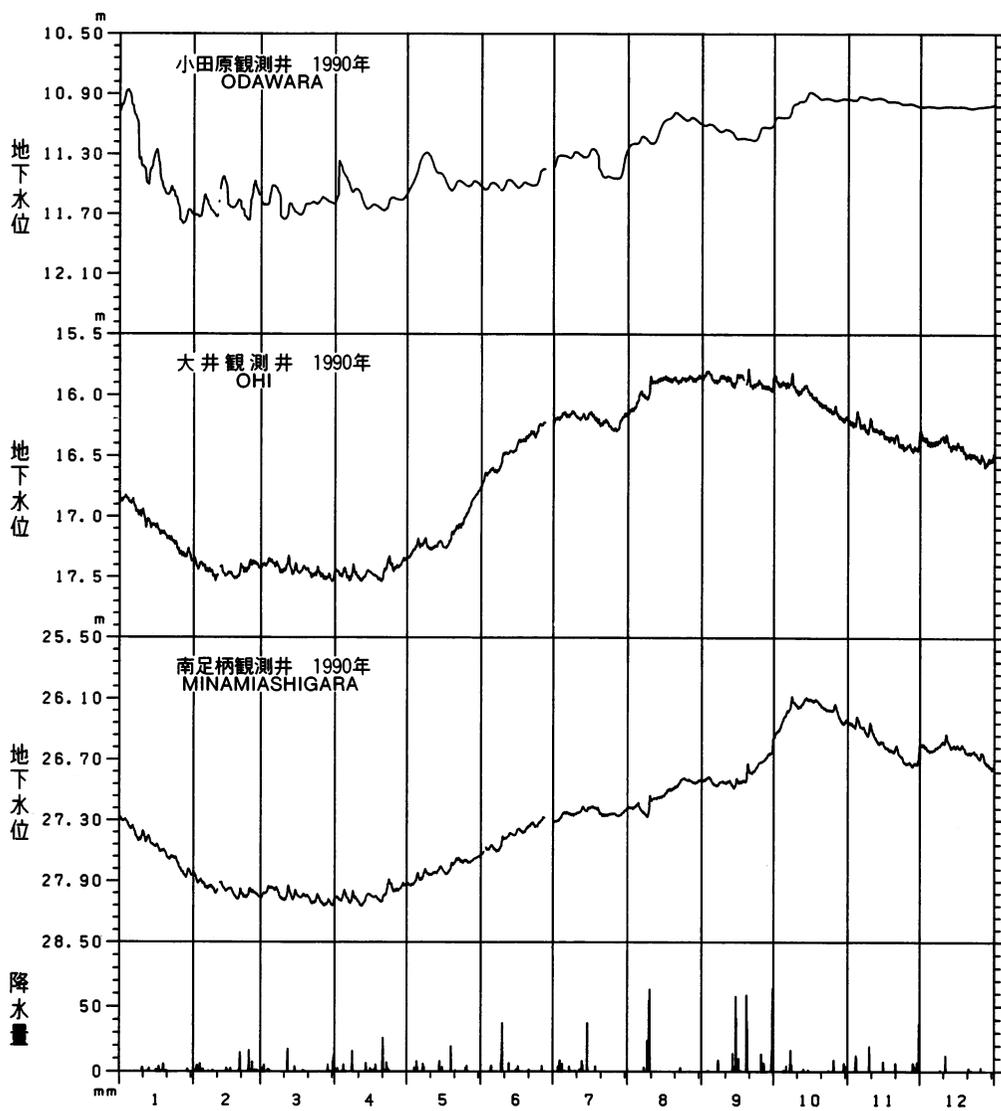


図4 1990年地下水水位変化（上段から小田原観測井、大井観測井、南足柄観測井）
地下水水位は地表からの深度（m）

平野の特徴である年間変化パターン（横山ほか、1986）と一致する。1990年の年間変動量は1.8mであった。毎日の水位変化グラフを詳しくみると気圧と地球潮汐の応答（後述）が認められ、気圧と潮汐が影響していることが分かる。また、年末年始に水位が10cm上昇し、わずかであるが工場揚水の影響があることが分かる。

(2) 小田原観測井

小田原観測井の水位は地表から約11mの位置にあり、地下水は被圧されている。観測井は沿岸部の

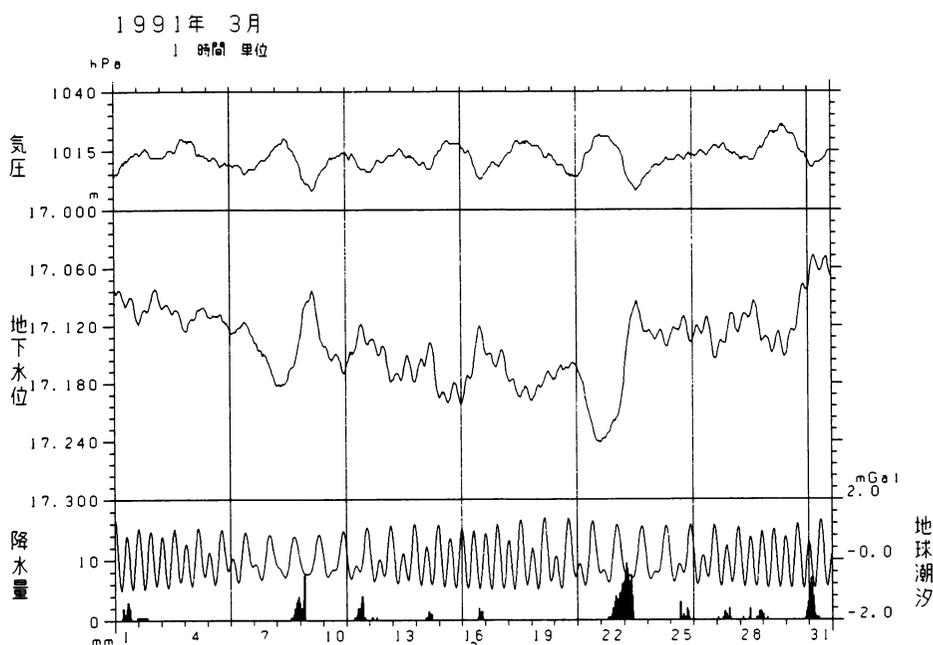


図5 大井観測井の地下水位、気圧、地球潮汐の観測結果
地下水位は地表からの深度 (m)
地球潮汐は計算値 (μGal)

工場地帯に近く、工場の揚水の影響が認められる (図3)。年末年始 (60cmの水位上昇)、5月の黄金週間、夏休みに水位回復が認められるほか、毎週土曜日から月曜日にかけて水位が上昇し、火曜日から金曜日にかけて低下する週変化がある。週間変化は1990年前半まで顕著であったが、次第に変動幅を減少させ、12月には殆ど認められなくなった。日曜～月曜の水位上昇量は5cmであった。水位の年間変動量は1.0mで、気圧と地球潮汐の影響は認められない。

なお、1990年3月頃から地下水位の週間変動の力が小さくなっている。これは井戸底部に泥状の堆積物がたまり、スクリーンが次第に埋没したことが原因である。

(3) 南足柄観測井

南足柄観測井の水位は地表から約27mの位置にあり、地下水は被圧されている。観測井は関本丘陵と足柄山地の間を流れる内川の右岸に位置し、足柄層群中の水位変化を観測している。水位の年間変動量は2mと最も大きい。水位は気圧変化と潮汐変化に反応して変化するが、揚水の影響は認められない。しかし、他の2井と比べて井戸深度が浅いこともあり、降水の影響を間接的に受け易く、まとまった雨が降った後は水位が上昇する。

4 気圧効果と地球潮汐効果

被圧水井戸は歪計とみなされている (Bodwarsson, 1970)。水文現象に現われた前兆現象のなかで、

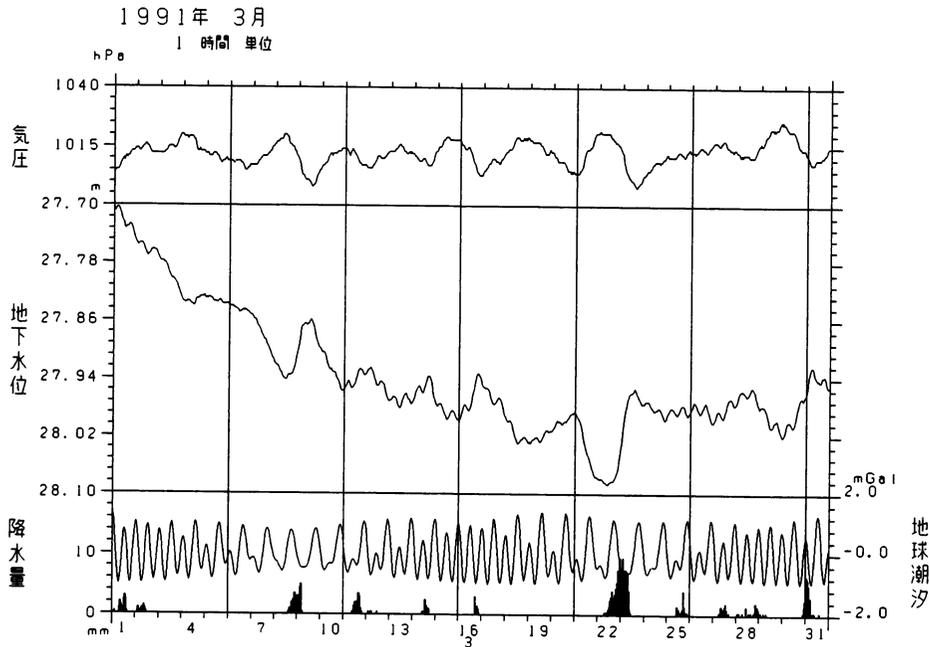


図6 南足柄観測井の地下水位、気圧、地球潮汐の観測結果
地下水位は地表からの深度 (m)
地球潮汐は計算値 (μGal)

被圧地下水位に地盤の歪量が最もよく現れる (Roeloffs, 前出)。とくに、地球潮汐や気圧変化に対する地盤 (水位) の反応は地盤 (殻) に加えられた力に対応する歪と水位変化の関係と同一と考えられる。これらの影響が現われ易い敏感な井戸では地盤の歪計として地下水位が有用である (ROELOFFS, 1988)。たとえば、「なまずの会」の観測結果 (鈴木, 1978) では宮城県沖地震の際に地下水位の気圧に対する反応が大きくなったことが分かっている。

小田原観測井を除く2観測井では、観測された地下水位 (図5、6) をみると気圧と潮汐の影響を受けていることが分かる。気圧と地球潮汐の影響度を求め、あらかじめ補正除去する必要があるが、両者の影響を同時に解析することは複雑で困難であるためこれを避け、まず気圧変化に対する影響 (気圧効果) から解析を進める。

地球潮汐は1日2回の干満を繰り返す短周期であり、気圧変化は数日以上比較的長い周期変化であることから、時間幅を1時間にとって水位変化量と気圧変化量の相関を求め気圧効果を算出した。図7は気圧変化と水位変化との相関を示す散布図である。このようにして求められた気圧効果 (気圧補正係数) を平均すると、大井観測井で4.3mm/mb、南足柄観測井で3.8mm/mbであった。この係数を用いて水位 (観測値) を算術平均した気圧に補正する。なお、小田原観測井では気圧効果は認められなかった。

気圧効果で気圧補正した水位には約12時間の周期が認められ (図8)、気圧効果と同様に地球潮汐

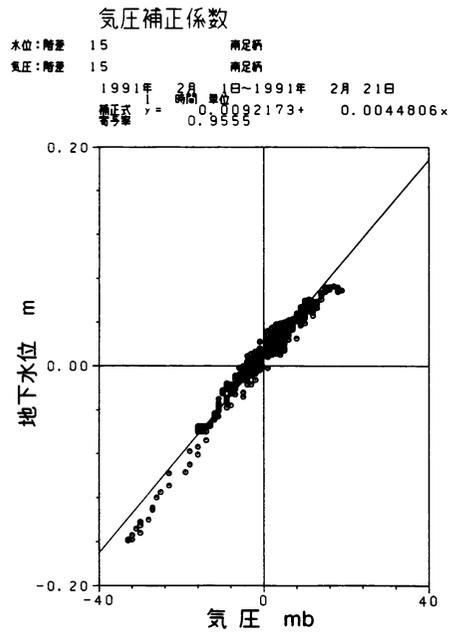
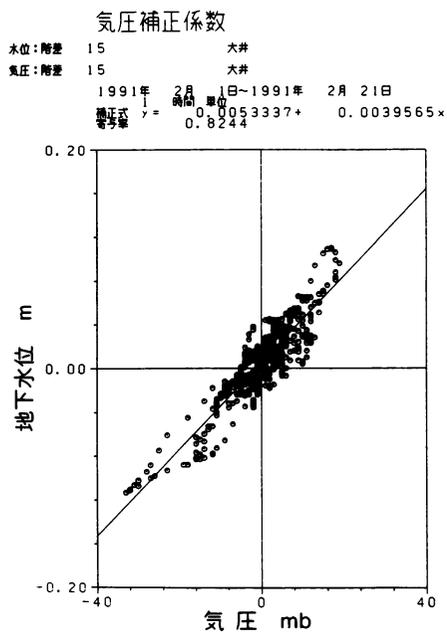


図7 水位と気圧変化との関係（散分布） 左側が大井観測井、右側が南足柄観測井

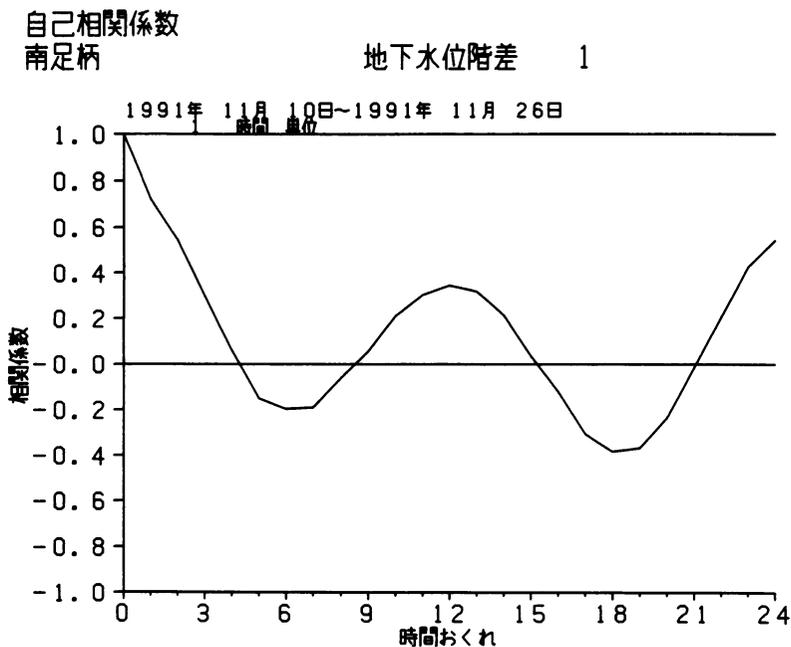


図8 地下水水位変化の周期性（南足柄観測井）

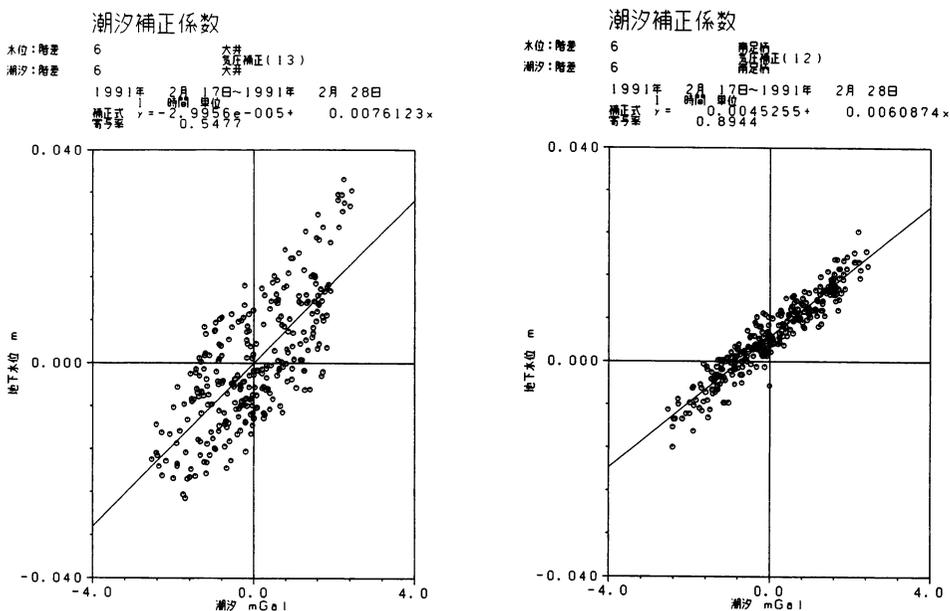


図9 水位と地球潮汐との関係について（散分布）
 （気圧補正した水位変化について地球潮汐との相関を求めた）

変化（理論値）と水位変化との相関を求めた。散分布図（図9）の寄与率が（大井観測井が0.55、南足柄観測井が0.89）が示すように、地球潮汐と気圧補正水位とは良い相関にあり、潮汐補正係数は大井観測井で7.6mm/ μ gal、南足柄観測井で6.1mm/ μ galと計算された。

以上の各観測井の気圧と地球潮汐の効果を整理すると表2のとおりになった。この補正係数を用い、図2の流れ図に示す手順で観測された水位の気圧、潮汐補正を行っている。なお、補正された水位変化（図10）にまだ若干の周期的変化が認められ、補正によって完全に潮汐の影響を取り除くことは難しいが、今の所異常を検出するためには十分と考えた。しかし、それぞれの効果の平均値に対するデータ抽出期間（例えば月毎など）の各効果の変動特性、地殻の歪蓄積にともなう気圧等の効果の変化も考えられるので、さらに解析を行なう必要があろう。

5 1989年8月5日の小田原地震の前兆異常変化

既に速報した地震前後に観測された水位変化は気圧効果と地球潮汐効果を考慮していなかった。そこで、気圧、潮汐補正した水位に認められた前兆変化と地震直後の変化について改めて検討することにした。さらに、他の県観測井、なまずの会観測井についても異常について検討した。

(1) 大井観測井

前述の補正係数で気圧、潮汐補正を行った。地震前後の補正した地下水位（図11）によると、2番

表2 地下水位変化の特徴

観測井名	井戸構造	年間変動量	揚水影響	降雨影響	気圧効果	地球潮汐効果
大井観測井	深度 300m 口径 0.1m スクリーン 30m	年間1.8m 灌漑影響	年末年始 0.1m上昇	有り	有り 4.3mm/mb タイムラグなし	有り 7.6mm/ μ g
小田原観測井	深度 300m 口径 0.1m スクリーン 30m	年間1.0m	年末年始 0.6m上昇 週間変化	無し	無し	無し
南足柄観測井	深度 150m 口径 0.1m スクリーン 30m	年間2.0m	無し	有り	有り 3.8mm/mb タイムラグなし	有り 6.1mm/ μ g

(注)大井観測井は気圧効果、地球潮汐効果の他に日周期の水位変化が認められる。人為的な影響の可能性もあり、引きつづき分析中である。

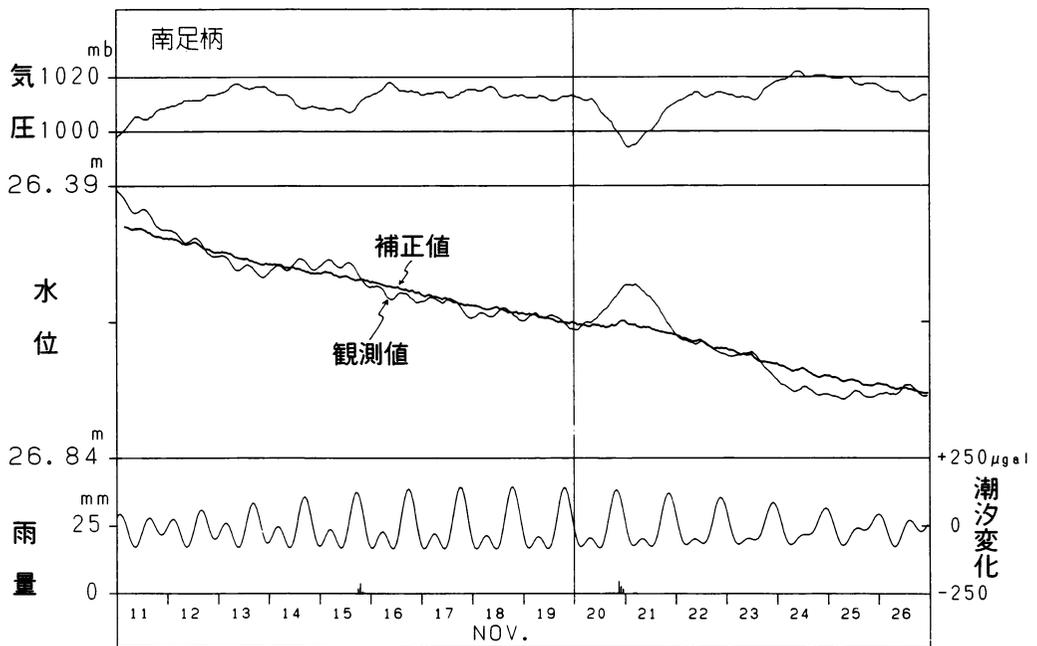


図10 観測値と補正後の水位比較（南足柄観測井の場合）
細線が観測値、太線が補正值

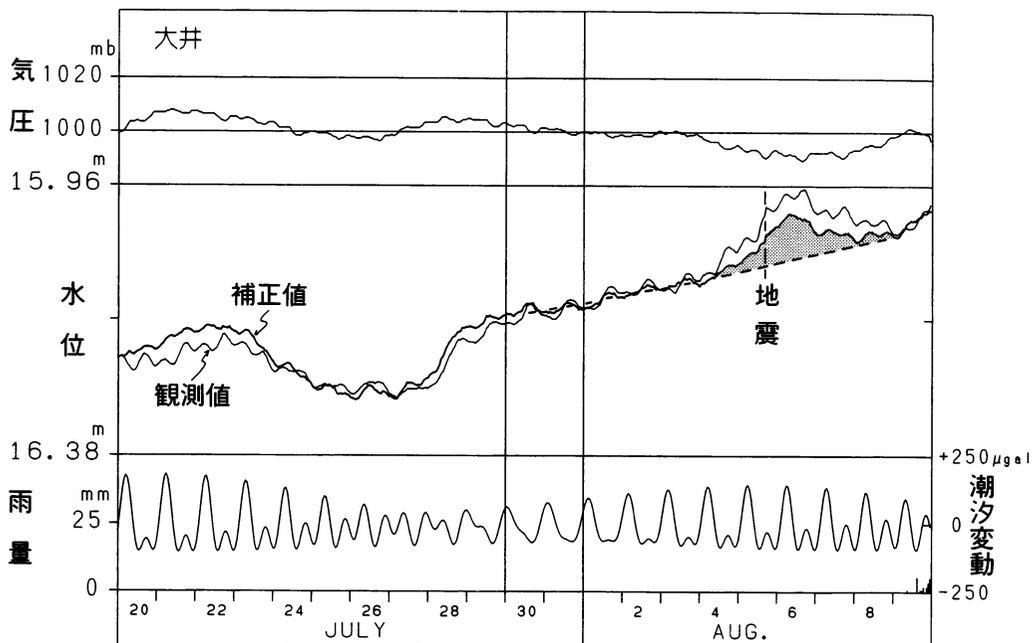


図11 大井観測井の地震前後の地下水位変化
 細線が観測値、太線が補正值、編目部分が異常部分

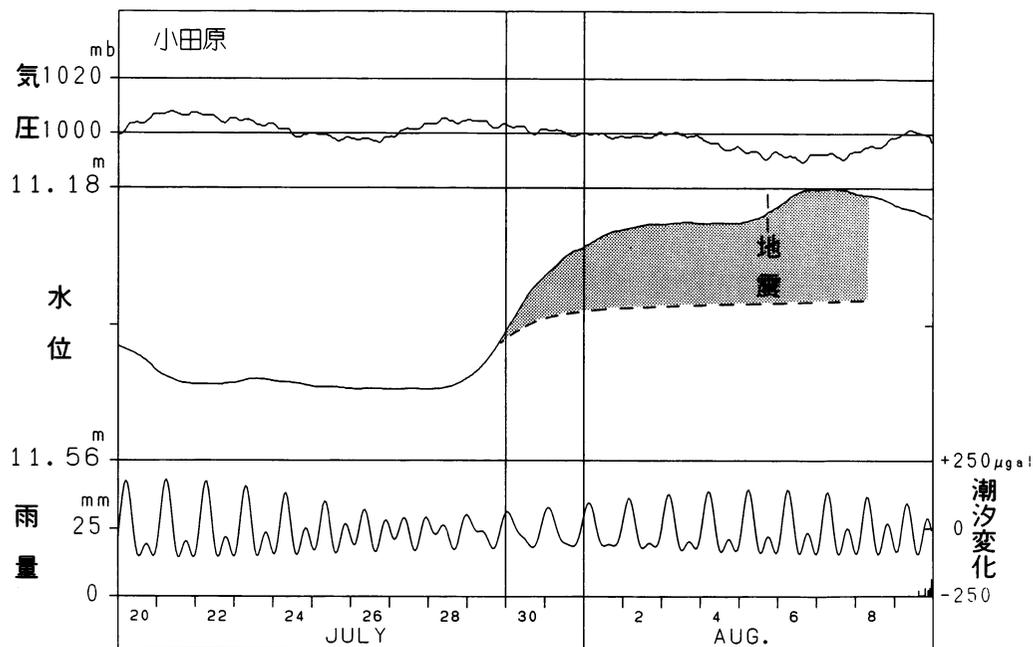


図12 小田原観測井の地震前後の地下水位変化
 細線が観測値、太線が補正值、編目部分が異常部分

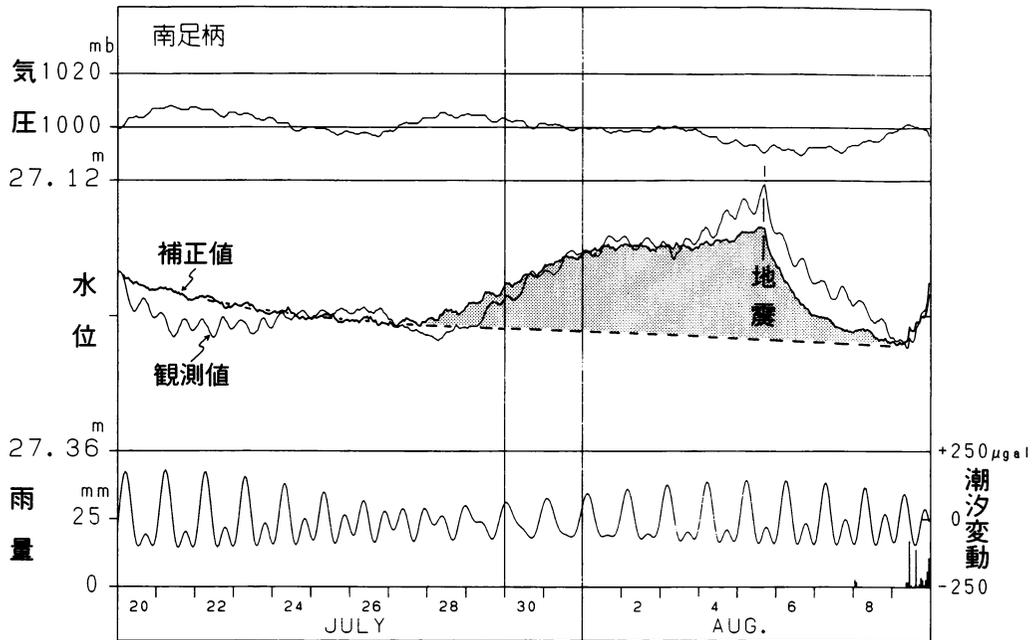


図13 南足柄観測井の地震前後の地下水位変化
細線が観測値、太線が補正值、編目部分が異常部分

田干し直後の7月28日に水位は田干し前のレベルまで回復した。その後、8月8日まで水位は上昇を続ける。そのなかで、8月4日になると水位は上昇勾配が2倍となり、5日に地震が発生した。地震直後水位は1cm余り上昇し、6日にピークをみて低下傾向に転じている。

大井観測井は震央から北北東側14kmに位置し、水位異常が認められる期間は8月4日から8月8日までで、4cmの水位上昇が観測された。

(2) 小田原観測井

小田原観測井は震央距離12kmの所にある。小田原観測井の水位は気圧と地球潮汐に影響されず、必要ないので地震前後の水位変化(図12)は気圧、潮汐の補正は行っていない。観測井は相模湾沿岸部の工場地帯に近く、地下水位は工場の揚水の影響が認められる。小田原観測井では日曜から月曜にかけて5cm程度水位が上昇する週間変化のほか、年末年始、黄金週間、夏休みの水位上昇が観測されている。

今回の地震前の水位上昇は7月28日から始まり地震後の8月7日まで続いた。水位上昇量は最大27cmにのぼるが、8月5日の上昇は毎週観測される週間変化が重なっている可能性が強い。この上昇量を勘案し、上昇量から差し引いて異常値を17cmと見積もった。

小田原観測井の水位異常をまとめると、7月28日から8月8日の間に異常変化が観測され、異常変化量は最大17cmの上昇となる。

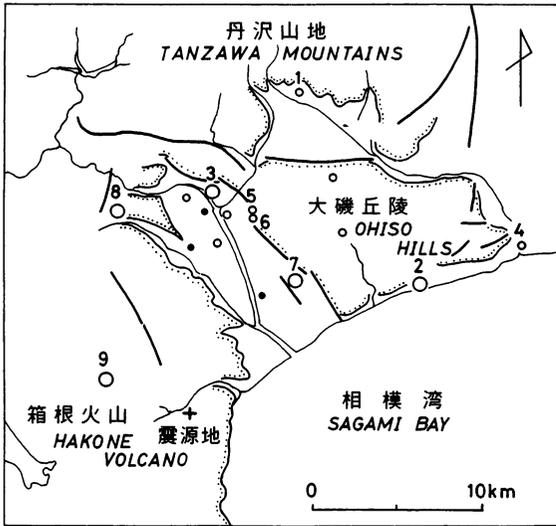


図14 地下水位前兆異常変化が観測された井戸の分布
 大きい○が5 cm以上、小さい○が5 cm未満
 の異常が観測された井戸
 ●は異常が認められなかった井戸

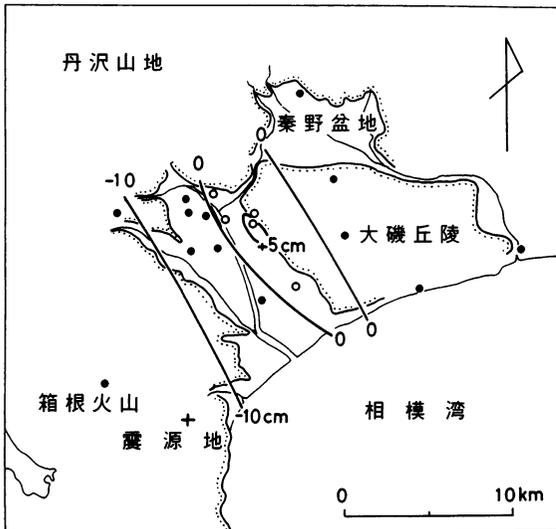


図15 地震直後の水位変化量分布
 ○は水位上昇が、●は水位降下が認められた井戸

(3) 南足柄観測井

南足柄観測井は震央距離15kmの所にある。地震前後の水位変化は図13のとおりであった。地下水位は前述の係数で気圧、潮汐補正してある。7月下旬に降雨がなかったため水位は低下傾向にあったが、7月27日から上昇傾向に転じた。水位上昇は8月2日に一旦停止するが3日に再び上昇を開始し、地震直前まで延べ10cm余上昇した。水位は地震発生後直ちに低下を開始し、8月8日の降雨をみるまで減水曲線を描いて低下を続けた。この間の水位低下量は10cmにのぼった。その結果、8月8日の地下水位は7月27日以前の水位変化傾向の延長上にはほぼ一致する位置まで降下した。

表3 観測井の水位異常と震央距離

名 称			所在地	震央距離	前兆現象		地震後の水位変化
					発生時期	変化量	
県 観 測 井	6	大井観測井	大井町	12km	1990.08.04	+ 4 cm	直後 3 mm上昇含め 7 cm上昇 上昇傾向続く 直後低減し、元に戻る 直後18cm低下
	7	小田原観測井	小田原市	10	07.30	+11	
	8	南足柄観測井	南足柄市	13	07.27	+10	
	9	久野観測井	小田原市	5	08.01	+ 5	

南足柄観測井の水位異常変化をまとめると、異常は7月27から8月8日までの間に出現し、水位の異常上昇量は最大10cmであった。地震後4日で水位上昇は解消した。地殻の歪の蓄積と地震による解放の過程を考えると、正にこの水位変化は歪解消過程を表している。足柄地域はフィリピン海プレートがもぐり込む所にあたり、常に圧縮の場である。今回の異常変化は次回の地震前後の水位変化の条例として注目される。

(4) その他の観測井

横山ほか(1991)によると、今回の地震に伴い「なまずの会」の5井で異常(水位上昇)が観測されている。さらに、地下水収支観測調査用に足柄平野と周辺地域に設置されている観測井について地震前後の水位変化を調べたところ、2カ所で同様に異常(水位上昇)が検出された。

これらの水位異常変化をまとめて地図上に示すと図14のとおりであった。図中には異常値が+5cm以上、+5cm未満、異常が認められなかった井戸とを3ランクに分けて表現した。異常が大きかった井戸の分布が震源地に近く分布する傾向があるが、足柄平野では異常が観測された井戸が少ない。これは、灌漑や揚水等の影響により異常が判別しにくいためと考えられる。

6 地震前後の水位変化

前節に述べたように地震前の異常変化は全般に上昇であった。これらの井戸の地震直後の水位変化について調べたところ、久野観測井の10cm低下から大井観測井の7cm上昇まで多様であることが分かった。県観測井の地震前後の水位異常値は表3のとおりであった。地震後の水位変化量を地図上に表すと図15のとおりになった。変化量の分布から上昇域と低下域が区分出来る興味ある結果が得られた。

水位上昇域は大磯丘陵際の国府津—松田断層地震に沿って現れ、下降域は箱根外輪山、足柄平野と大磯丘陵東側に分布する。両地域とも発震機構上の引きの場にあたる。地殻歪の蓄積と地震による地盤破壊、歪解消を反映する水位変化が生じたと考えられ、川辺(1981)にあわせてみると、今回の現象は図16のC又はDに分類されると考えられる。今回観測された異常現象を前兆現象の事例として1つのパターンと考え、発震機構や地質構造との関係をさらに検討する必要がある。

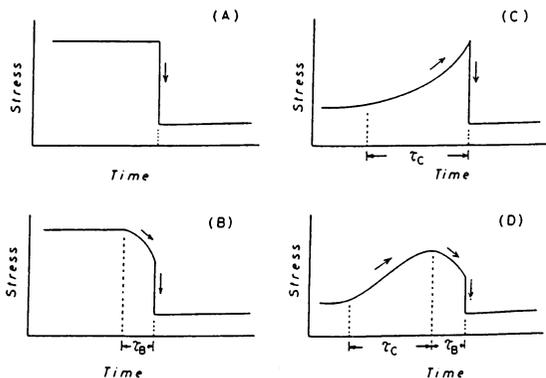


図16 地震発生前後の地殻の変形過程 (川辺、1991)

7 まとめ

観測井の地下水位変化を解析し、それぞれの井戸の特徴を明かにし、1989年8月5日小田原地震の水位前兆異常を確認することが出来た。以上に述べた内容をまとめると次のようになる。

- (1) 2年間の水位観測結果からそれぞれ観測井で水位の年間、週間変化の特徴を明らかにした。
- (2) 3観測井の気圧効率、地球潮汐効率を求め、水位の気圧、潮汐補正を行い、異常変化を明らかにした。
- (3) 地震発生後20ヶ所の観測井の水位をチェックしたところ、その内10ヶ所の井戸の水位が地震前に上昇し、異常変化が認められた。
- (4) 水位異常変化は1989年7月27日以降現れた。いずれも地下水位は上昇した。
- (5) 1989年8月5日の地震の地下水位異常変化の変化量の大きさと分布が明らかになった。
- (6) 地震直後に水位が変化した。下降が多いが、国府津－松田断層沿いに上昇域が認められた。
- (7) いずれの観測井ともフィリピン海のもぐり込みによる圧縮の場であり、次の地震発生時の水位変化を予想する好材料となった。

8 今後の課題

M5の地震の前後に大井、小田原、南足柄の3ヶ所の県観測井で水位異常変化が認められたことから、ある程度の規模の地震であれば地震発生の前に水位異常変化が発生する可能性が大きいと予想される。平成3年度に新たに2カ所に観測井が整備され、観測体制の強化が図られた。これを契機に、次の手順で事前の異常判定手法の開発のため課題の達成に努める必要がある。

- (1) 異常変化の時期、場所、異常値の規模とタイプの把握と類型化、地震との相関調査
- (2) 地下水位の統計的処理による平滑化、異常判定基準の検討と判定手法の開発
- (3) 異常変化の地下水理学的な検討
- (4) 異常変化と地震発生機構の地球物理学的研究

謝辞

この調査研究を進めるにあたり、元所長の大木靖衛新潟大学教授には当所の地下水位による地震予知研究の推進および観測体制の整備に御尽力いただき、予知研究を初め調査研究の御指導をいただいた。前所長で現生涯福祉部長である久保清治氏には常に励ましていただき、長瀬和雄専門研究員をはじめ所員の方々からは貴重な示唆をいただいた。これらの皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- Bredehoeft, J.D. (1967) Response of well-aquifer systems to earth tides, J.G.R., Vol.72, No.12, 3075-3087.
- Bodwarsson, G. (1970) Confined fluids as strain meters, J.G.R., Vol.75, No.14, 2711-2718.
- Freeze, R.A. and J.A. Cherry (1979) Groundwater, Prentice-Hall.
- Igarashi, G. and H. Wakita (1991) Tidal responses and earthquake-related changes in the water level of deep wells, J.G.R., Vol.96, No. B3, 4269-4278.
- 石橋克彦 (1985) 小田原付近の大地震発生の可能性、月刊「地球」、Vol. 7、No. 8、420-426.
- 石橋克彦 (1988) “神奈川県西部地震”と地震予知、科学、Vol.58, No. 9、537-547.
- 石橋克彦 (1988) “神奈川県西部地震”と地震予知、科学、Vol.58, No.12、771-780.
- 伊東博、棚田俊收、八巻和幸、小鷹滋郎 (1991) 1990年8月5日小田原直下地震 (M5.1) の概要、神奈川温地研報告、Vol.22, No. 2、1-8.
- 地震予知総合研究振興会 (1991) 平成2年度 地震テクトニクスのモデル化及びM7級内陸地震の予知手法に関する研究成果報告書.
- 川辺岩夫 (1991) 地震に伴う地下水・地球化学現象、地震第2輯、第44巻、特集号、341-364.
- 大木靖衛 (1977) 観測日より発刊にさいして、神奈川温地研報告、Vol. 9、No. 1、1.
- 大木靖衛 (1977) なまずの会繁昌記、文芸春秋、昭和52年10月号、372-379.
- 大木靖衛、平賀士郎 (1984) 地震の前兆と地下水位異常、ちかすい、265-272.
- 大木靖衛、平賀士郎 (1984) 地下水位変化による地震予知、しんかんきょう、No.27、44-62.
- Oki, Y. and S. Hiraga (1988) Groundwater-level monitoring for prediction of earthquakes, PAGEOPH, Vol.126, Nos.2-4, 211-240.
- Roeloffs, E.A. (1988) Hydrologic precursors to earthquakes: A review, PAGEOPH, Vol.126, Nos.2-4, 177-209.
- 鈴木勲子 (1978) マグニチュード7.4 宮城県沖地震、神奈川温地研報告、Vol.10, No.1、5-7.
- Todd, D.K. (1976) Ground. Water Hydrology, Wiley.
- Wakita, H. (1975) Water wells as possible indicators of tectonic strain, Science, Vol.189, No.4202, 553-555.
- 山本莊毅 (1983) 新版地下水調査法、古今書院.
- 横山尚秀、荻野喜作、大木靖衛 (1986) 足柄平野及び大磯丘陵の地下水位観測結果、神奈川温地研報告、Vol.17, No.5, 127-140.
- 横山尚秀、伊東博、棚田俊收、八巻和幸、小鷹滋郎 (1990) 1990年8月5日小田原で発生したM5の地震に対する前兆現象、地震学会講演予稿集、325.
- 横山尚秀、小鷹滋郎、平野富雄 (1991) 1990年8月5日小田原直下地震の水位前兆異常、神奈川温地研報告、Vol.22, No. 2、9-16.
- Yokohama, T., K.Itadera, S.Odaka and T.Hirano(1992) Precursory changes in the groundwater level associated with the M5.1 Odawara Earthquake that occurred on August 5, 1990, Eos, Vol.73, No.25, 55.

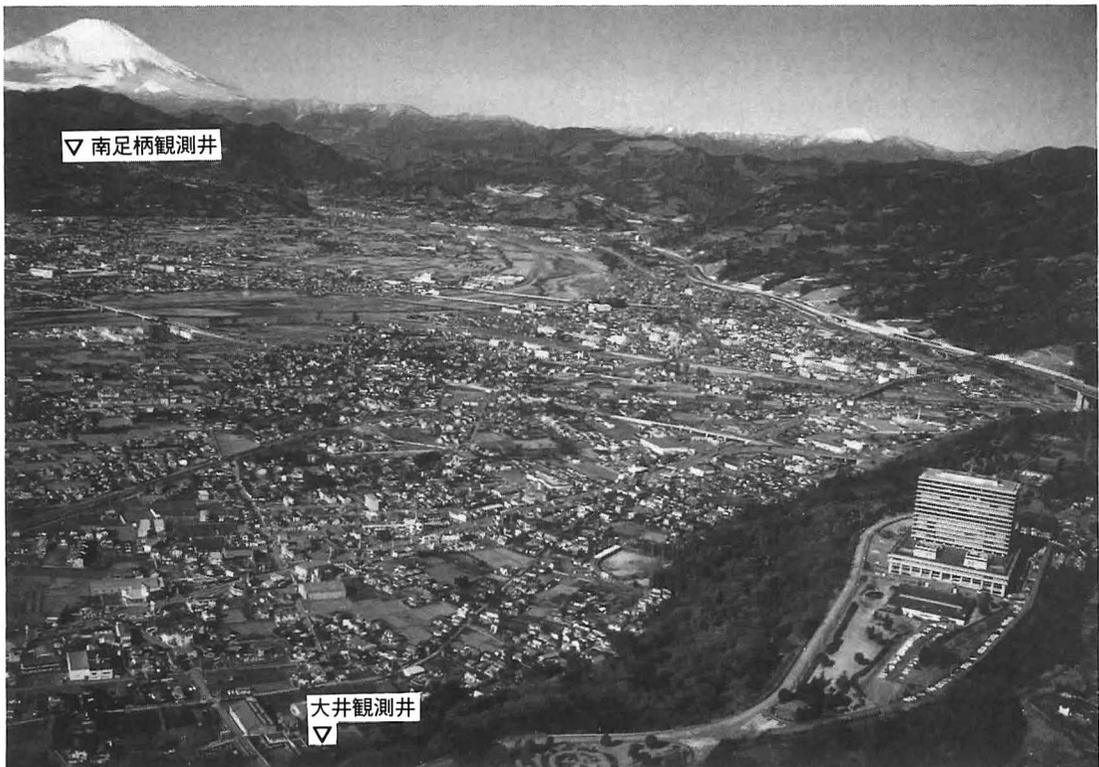


写真1 大井観測井と南足柄観測井（中央部は足柄平野）