

温泉地学研究所の観測井における地下水位変化の特徴とその補正について.

板寺一洋*

Characteristics and Correlation Method of Groundwater Level Fluctuations
in Observation Wells of the Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture.

by

Kazuhiro ITADERA*

Abstract

Six observation wells have been installed in western Kanagawa Prefecture. The Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture monitors groundwater level in these wells to detect and investigate hydro-geological precursors to earthquakes. In each well, the groundwater level fluctuates in response to atmospheric pressure, ocean and earth tides, rainfall, artificial pumping and irrigation of paddy field. Coseismic irregularities were occasionally observed as water level movement or vibration. The influence of tsunami was also recognized in the well located near the seashore. Groundwater level fluctuation over 25 hours, or a major tidal periods, was better correlated to the changes in atmospheric pressure. By this correlation, the atmospheric efficiency was calculated, and observed water level fluctuations could be corrected for atmospheric pressure effect.

1. はじめに

神奈川県温泉地学研究所では、神奈川県西部地域の 6 か所に、専用の観測井を配置し、地下水位の観測を行っている。水位の観測結果について異常の有無を判断するには、平常時の地下水位がどのように変化するかを把握しておく必要がある。6 観測井の地下水位に影響を及ぼす主な要因は気圧、地球潮汐、降雨、揚水および水田への灌がいである。各々の影響の仕方、程度は観測井によりて異なっており、その概要については、横山ほか(1992)および横山ほか(1995)が報告している。ここでは、定性的ではあるが、水位に影響を及ぼす要因と、その補正処理の現状と問題点についてまとめた。

2. 温泉地学研究所観測井における地下水位変化の特徴

2.1 潮汐の影響

月や太陽の引力によって生じる起潮力は、海面の昇降現象(海洋潮汐)を引き起こすだけでなく、地球の固体

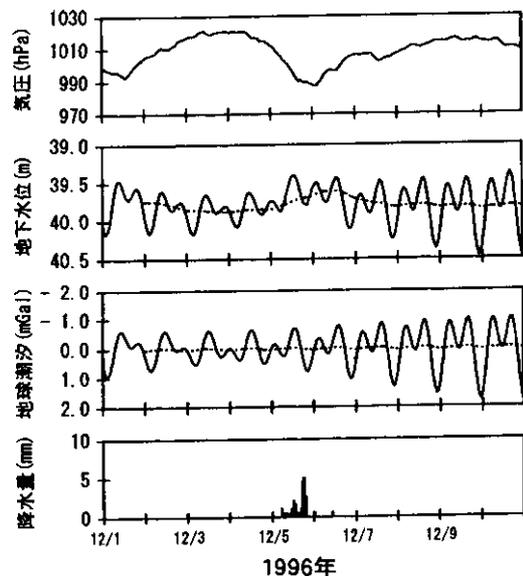


図1 真鶴観測井における気圧、地下水位、降水量の観測例と地球潮汐

Fig.1 Fluctuation of barometric pressure, ground water level, rainfall and Earth tide at Manazuru observation well.

* 神奈川県温泉地学研究所〒250-0031 神奈川県小田原市人生田 586
神奈川県温泉地学研究所報告, 第 29 巻, 第 112 号, 57-64(1999)

部分に作用し、地殻を变形させる（地球潮汐）。その影響は、当然、岩石の空隙を満たす地下水の間隙水圧をも変化させ、地下水位の変化として観測される。海洋潮汐、地球潮汐とも、およそ 12 時間 25 分と 24 時間 50 分の 2 つの周期が卓越しており通常は 1 日 2 回ずつ、小潮の日には 1 回ずつの極大、極小を示す。図 1 は、真鶴観測井（以下、真鶴とする。）における 10 日間の観測結果と、地球潮汐の理論値を比較したものである。この図から明らかかなように、真鶴で観測される水位変化は、地球潮汐の変化と非常に良く対応しており、時間的なずれも小さい。Bredhoeft (1967) は、被圧帯水層中に設置された観測井の水位には、1~2cm のオーダーの振幅で地球潮汐の影響が現れるとしている。これに対して真鶴では、潮汐変化に対応した最大 1m 程度の振幅を持つ水位変化が観測されている。この観測井は真鶴半島の先端部に位置しており、海岸線からの距離も近い。

そのため、井戸内の地下水が水理学的に付近の海水と連続しており、潮位（海洋潮汐）の変化が、直接作用していると考えられる。しばしば、津波の影響が観測される（後述）ことなどからも、潮位変化の影響を強く受けていることがわかる。地球潮汐の影響は、二宮観測井（以下、二宮とする。）をはじめ、後述する気圧補正後の南足柄観測井、大井観測井（それぞれ、以下、南足柄、大井とする。）でも顕著に認めることができる。

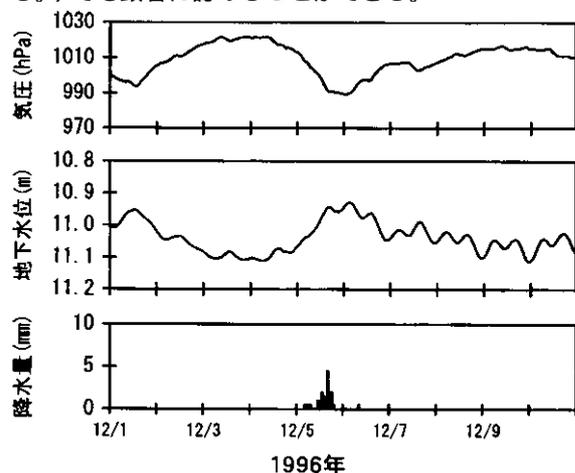


図 2 二宮観測井における気圧、地下水位、降水量の観測例
Fig.2 Fluctuation of barometric pressure, groundwater level and rainfall at Ninomiya observation well.

2.2 気圧の影響

気圧は、地表面を通して帯水層に作用する。気圧の変化も、地層や岩石を变形させ、間隙水圧を変化させる。観測井の水位は、間隙水圧と気圧の釣り合いの状態を反映して変化するため、気圧が上がると地下水位は低下し、気圧が下がると水位は上昇する。この度合いは、地下水を含んだ帯水層の弾性体としての特性や透水性、観測井の深度および地下水位によっても異なる。

図 1 において、地下水位および地球潮汐とともに示した破線は、おのおのを 24 時間移動平均処理した結果である。地球潮汐の移動平均はほぼ一定であるのに対して、地下水位の移動平均結果には気圧の影響が明瞭に現れている。図 2 には、二宮における 10 日間の観測例を示した。上述の潮汐の影響による日変化をしながらも、気圧が上昇すると、水位が下がり、気圧が下がると水位が上昇する傾向があり、気圧の影響が明瞭に現れている。気圧変化による影響は数十 cm に及んでいるのに対し、地球潮汐の影響によると見られる水位変化の振幅は数 cm ~ 10 cm 程度である。気圧の影響は、南足柄や大井においても認められる。

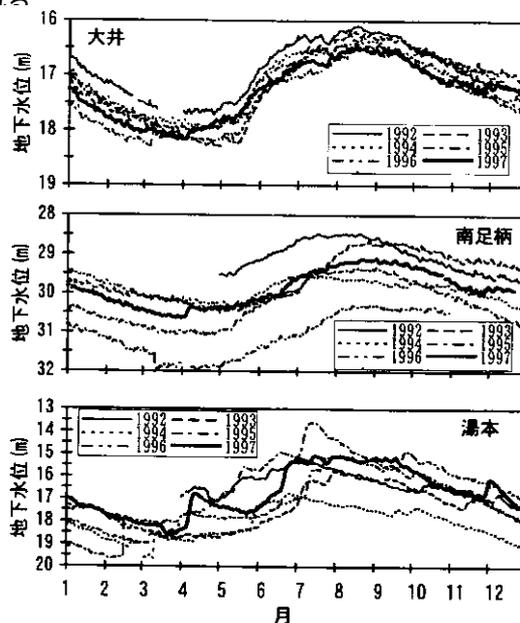


図 3 大井、南足柄、湯本の各観測井における地下水位の年変化パターン
Fig.3 Annual pattern of groundwater level fluctuation at Ohi, Minamiashigara and Yumoto observation wells.

2.3 地下水位の年変化

足柄平野の浅層地下水位は、平野部の水田への灌がいの影響を受けて変化し、毎年、春先に極小を、夏季に極大を示すパターンを示すことが報告されている（横山ほか, 1986）。図3は、1992年から1996年までの大井および南足柄の年変化を示した図である。大井は深度300m（ストレーナー深度は270-300m）、南足柄は深度150m（ストレーナー深度は120-150m）であり、一般には深井戸に分類される井戸であるが、どちらも、先に述べた浅層地下水と同様の年変化をしていることがわかる。足柄平野は基盤深度が相当深い、その上部に分布する帯水層は、粘土層等の不透水層で分割されているものの、大局的には一つの帯水層と考えられることから、深度数百mの深井戸においても、浅層地下水と同様の変化が観測されるものと考えられる。

水位の絶対値や、上昇・下降の時期は、大井では毎年ほぼ同じなのに対して、南足柄では、年毎に微妙に異なっている。同様の年変化は湯本観測井でも観測されるが、南足柄と同様に年変化のパターンは一定していない。

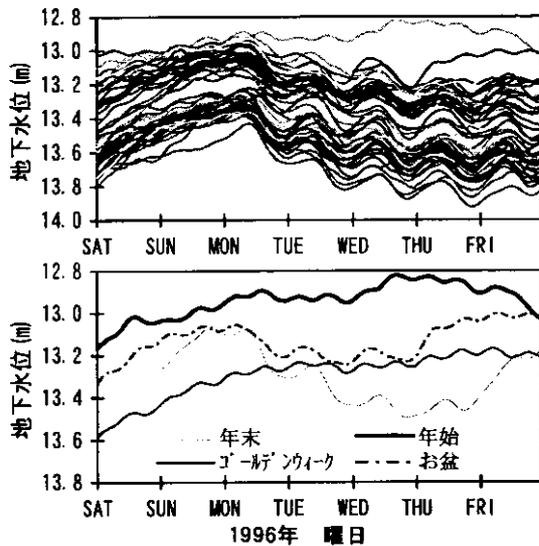


図4 小田原観測井における地下水位の日変化および週変化パターン
Fig.4 Daily and weekly pattern of groundwater level fluctuation at Odawara observation well.

2.4 揚水の影響

小田原観測井（以下、小田原とする。）では、周辺の工場などの揚水の影響が大きい。図4は、小田原における1週間ごとにの変化を1年分表示したものであり、月～金曜にかけて水位が下がり、週末に上昇する週変化と朝から夜にかけて水位が下がり、夜中に回復する日変化を示している。こうした水位変化のパターンは、工場の作業時間等、人間の活動様式と、良く対応している。同様の変化は大井でも認められる。

2.5 降雨の影響

程度の差こそあれ、どの観測井においても降雨の影響により水位が上昇する。地下水位に現れる降雨の影響（水位上昇量および上昇速度、影響の継続時間等）は、観測井が代表する集水域の水文地質学的特性を反映していると考えられる。横山ほか（1995）は、二宮観測井における、降雨量と水位上昇量の関係について検討し、降雨量（水柱高換算）の約6割が水位上昇量に相当するとしている。実際には、降雨条件（降雨量や降雨強度、先行降雨量）も単純ではないことから、降雨による影響を定量的に評価するのは容易ではない。また、地震予知研究という視点からだけでなく、純粋な地下水学の視点からも重要な項目である。

3. 地震にともなう地下水位の異常変化について

地震の発生前後に井戸の水位や湧水量に異常が現れることは、古くから多くの地震について報告されている（たとえば、Oki and Hiraga, 1988）。温泉地学研究所の観測においても、表1にまとめた地震についてコサイスマックな異常変化が認められた。水位の異常変化は、次の3つのパターンに分けることができる。

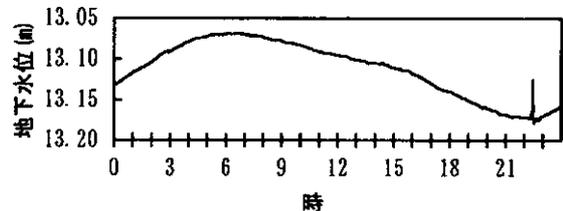


図5 北海道東方沖地震(1994年10月4日)に伴うコサイスマックな地下水位の上下動(小田原観測井)
Fig.5 Coseismic groundwater level fluctuation observed at East off Hokkaido Earthquake.

表1 温泉地学研究所の観測井で認められたコサイスマミックな地下水位異常変化の概要
 Tab.1 Coseismic groundwater level change observed at HSRI observation wells.

年	月	日	震央地名	M	地下水位の変化(mm)					
					大井	小田原	南足柄	湯本	真鶴	二宮
1993	1	15	釧路沖	7.1	25↑	7				
	7	12	北海道南西沖	7.8	37↑	16	3		20	
	8	8	グアム	8.0		4	3			
	10	12	東海道はるか沖	7.1	19↑	2				
1994	6	29	千葉県南部	5.3	18↑	5↓				
	7	22	日本海北部	7.6	28↑	2				
	10	4	神奈川県西部	4.1	78↑	2				
	10	4	北海道東方沖	8.1	81↑	56			6	
	10	25	箱根外輪山	4.8	4↑	6↑	2↑			6↑
	12	19	足柄平野北部	3.5	17↑					
	12	28	三陸はるか沖	7.5	73↑	10				
1995	1	17	兵庫県南部	7.2	15↑	3	1			
	4	18	駿河湾	5.1	26↑					
	7	3	相模湾	5.6	105↑					
	10	1	伊豆半島東方沖	4.8	32↑					
1996	2	17	福島沖	6.6	105↑					
	2	17	ニューギニア沖	8.0		15	2↓		*	
	3	6	山梨県東部	5.8	113↑		**↓	**↑		
	8	9	山梨県東部	4.6	109↑		10↓			
	9	11	千葉県東方沖	6.2	107↑					
	10	25	山梨県東部	4.5	62↑					
	12	21	茨城県南部	5.4	137↑					
1997	3	3	伊豆半島東方沖	4.5	15↑					
	3	3	伊豆半島東方沖	5.0	**↑					
	3	4	伊豆半島東方沖	4.9	75↑					
	3	4	伊豆半島東方沖	5.7	23↑	4↑				14↑
	3	16	愛知県東部	5.8	2↑					
	7	9	千葉県北西部	4.8	20↑					
	8	9	埼玉県南部	4.7	11↑	5↓				
	9	8	東京湾	5.1	80↑					
	11	1	神奈川県西部	3.8	82↑					
	11	4	神奈川県西部	4.0	28↑		3↑			

M:マグニチュード、地下水位の変化:数値は振幅の大きさ、↑:水位の上昇、↓:水位の低下
 *:津波の影響と思われる水位変化、**:異常変化の継続時間が不明瞭

水位の上下動を伴うもの

図5に、北海道東方沖地震(M8.1)が発生した1994(平成6)年10月4日の、小田原観測井における観測結果を示した。22時22分の地震発生後から数十分にわたり、水位が上下動し、その振幅は最大で50mm以上に及んでいる。このような水位の上下動については、長周期の地震波による地面の歪みの変化を反映していると考えられている(Cooper et al. (1965), Li et al. (1989)など)。

水位が一方向的に上昇または降下する場合

図6は、大井、南足柄、湯本の各観測井について、山梨県東部地震(M5.8)が発生した1996(平成8)年3月6日を含む20日間の観測結果を示した図である。この地震発生後に、大井および湯本では水位が上昇、南足柄では水位が降下している。秋田ほか(1996)は、北海道周

辺で発生した大地震によって観測された同様な地下水位の変化と、GPS等によって得られた広域的な地殻変動(圧縮変形、引張変形)との関連について述べている。

地震に伴って発生した津波の影響が現れる場合

図7はニューギニア沖地震(M8.0)が発生した1996(平成8)年2月17日の真鶴観測井における観測結果である。1分間の変化を示した図には、15時台にパルス状の変化が認められ、地震波の到達に対応していると考えられる。地下水位および1分間の変化を示した図に、20時台から認められる乱れは、津波の影響によると考えられる。こうした観測結果から、真鶴観測井の地下水位に対して、付近の潮位が強く影響していることが示される。

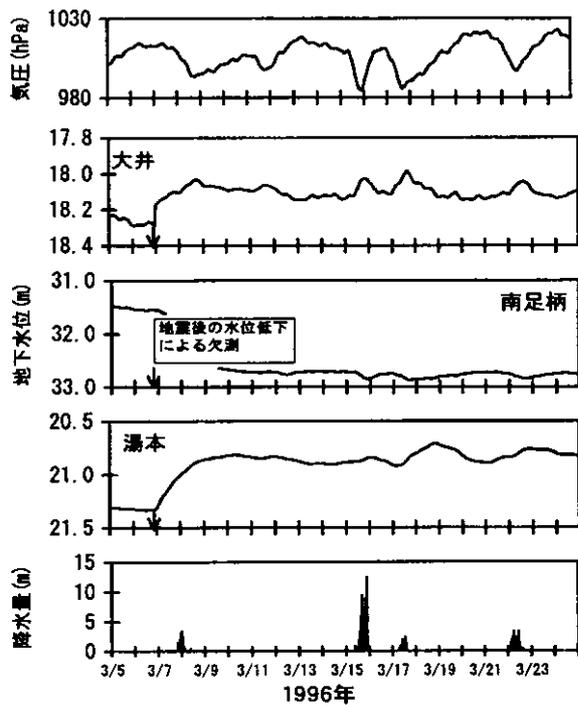


図6 山梨県東部地震（1996年3月6日）に伴うコサイスミックな地下水位の上昇および下降（↓は地震発生時を示す）
Fig.6 Coseismic groundwater level movement observed with East Yamanashi Earthquake.

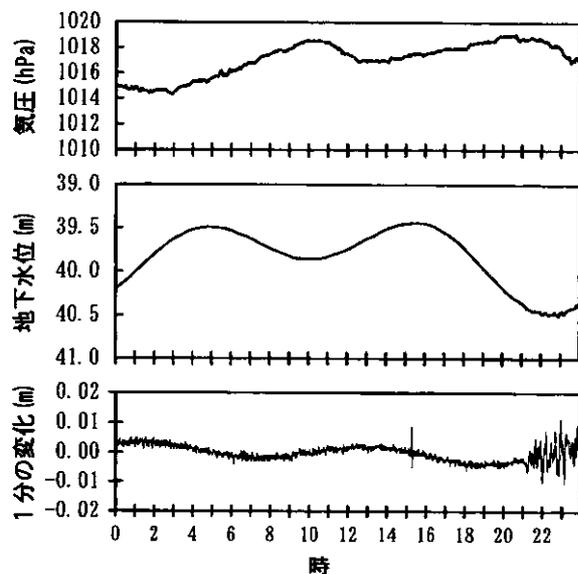


図7 地下水位に現れたニューギニア地震（1996年2月17日）に伴う津波の影響（真鶴観測井）
Fig.7 The example of tsunami influence on groundwater level.

地震の予知に関わる分野で地下水位が測定されているのは、地下水位が地殻の歪み計として機能し、地震の前兆を含む異常変化を捕捉できるであろうとの考えに基づいている。やに示した事例は、当所の地下水位観測井が、その役割を果たしうることを示す結果として評価できる。今後は、水位の異常変化を引き起こすメカニズムの解明も含め、井戸の構造、帯水層の水理学的特性、発震機構や地震波の特性、地殻変動と関連について解析を進める必要がある。

4. 地下水位の補正について

地下水位観測井においては、地下水位が上述の各要因による影響を受けた結果が観測される。温泉地学研究所の6観測井における水位変化の特徴は、次のようにまとめることができる。

真鶴、二宮においては気圧、潮汐の影響が顕著で、最も自然状態に近い変化を示している。前者では、海洋潮汐（潮位）の影響が顕著であるのに対して、後者では、気圧変化に対応した変化に潮汐の影響が足し合わされたパターンを示す。

南足柄では気圧・潮汐のほか、水田灌がいの影響を受けた年変化を示す。

小田原における水位は人為的な影響による日変化、週変化が顕著に認められ、自然的な要因による影響は些少である。しかし年末・年始、ゴールデンウィーク、夏休みなど、工場等の連続した休業時期には、水位が上昇するとともに、気圧や潮汐の影響があらわれてくる。

大井では、上記の潮汐変化、気圧変化、灌がいによる年変化、揚水の影響のすべてが現れる。

湯本では、南足柄や大井と同様の年変化が認められるが、その他の要因による影響については、いまのところ規則性が見いだせない。

降雨の影響は、程度の差こそあれ、すべての観測井で認められる。

こうした観測井ごとの特徴を念頭に置き、温泉地学研究所では、現在、観測された水位変化に気圧補正を施した結果を手がかりとして、異常の有無について検討を加えている。

4.1 観測水位の気圧補正

簡単のため、地下水水位が気圧と潮汐のみの影響によって変化するものと仮定する。温泉地学研究所の観測井のうち二宮や真鶴における地下水水位変化が、ほぼ、これに該当する。このような場合、ある時間経過に伴う観測水位の変化 H_0 は

$$H_0 = H_p + H_E \quad (1)$$

と表すことができる。 H_p と H_E はそれぞれ、気圧および潮汐の影響による水位変化を示す。これら 2 つの成分のうち潮汐が周期を持つ現象であることに注目する。すなわち、観測データの変化を見る階差間隔を潮汐の主な周期 (25 時間) に設定すれば、潮汐の影響 H_E は最もゼロに近くなるはずである。

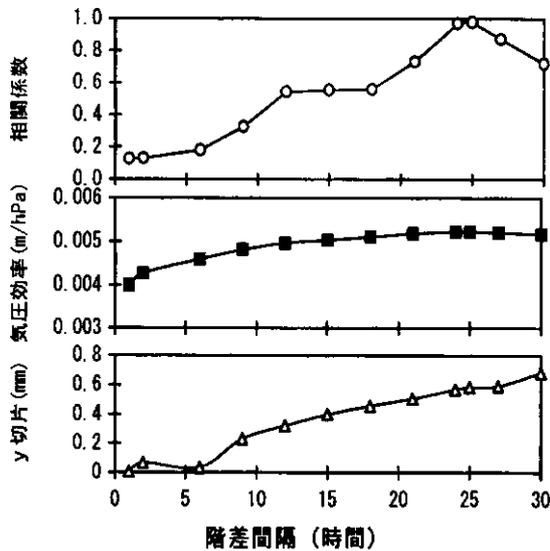


図 8 階差間隔による気圧変化と水位変化の相関関係の変化 (二宮観測井)

Fig.8 Correlation changing with time interval barometric pressure and groundwater level changes (Ninomiya observation well).

図 8 は、二宮の観測結果をもとに、水位変化と気圧変化の相関を階差間隔を変えて調べた結果である。階差時間を 25 時間とした場合 (図 9) に、気圧変化 P と水位変化 H_0 が最も高い相関係数を示していることがわかる。このときの両者の関係を示す一次式

$$H_0 = C \cdot P + (H_p) \quad (2)$$

において定数 C は気圧変化に対する水位変化の割合 (気圧効率) を示す。実際には、25 時間階差をとった場合でも、気圧以外の影響による変化は含まれているから、 C は気圧効率の近似値ということになる。

また、切片 y が 0 でない場合、気圧 (および潮汐) の

変化がなくても、水位が一定の割合で変化していることを示す。階差時間と の関係を調べてみると、 は階差時間とほぼ直線関係にあることがわかる (図 8)。 は季節変化のように、階差時間と比べて長い時間における水位変化の割合に相当するものと考えられる。

そこで、水位と気圧をそれぞれ H 、 P とし、時刻 t と時刻 $t + \Delta t$ の観測データを添え字で示すものとすれば (1)

(2) 式の組み合わせにより

$$H_{t+\Delta t} - H_t = C (P_{t+\Delta t} - P_t) + H_E + y$$

が得られる。

$$H_{t+\Delta t} - \{H_t + C (P_{t+\Delta t} - P_t) + y\} = H_E \quad (3)$$

が得られる。(3) 式は、地下水水位が気圧と潮汐によ

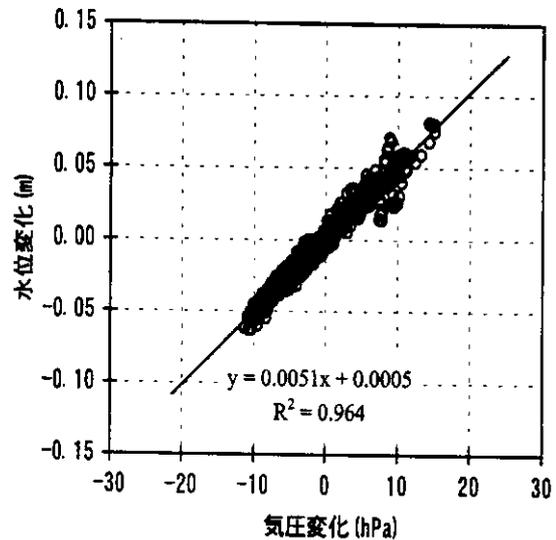


図 9 階差間隔25時間における気圧変化と水位変化の相関関係 (二宮観測井)

Fig.9 Correlation between changes of barometric pressure and groundwater level at 25 hours interval (Ninomiya observation well).

て変化する場合、観測水位 (左辺第一項) と気圧と季節変化の影響を考慮した水位 (左辺第二項) との差が潮汐の影響に等しくなること、すなわち (3) 式の左辺によって観測水位データを処理すれば、観測水位から気圧の影響を取り除く (補正する) ことができることを示している。

図 10 は、二宮観測井における 3 日分の観測結果、(3) 式左辺第二項に相当する気圧成分、および両者の差による残差と、理論潮汐を比較したものである。若干の位相差はあるものの、残差と理論潮汐はよく似た変化を示している。

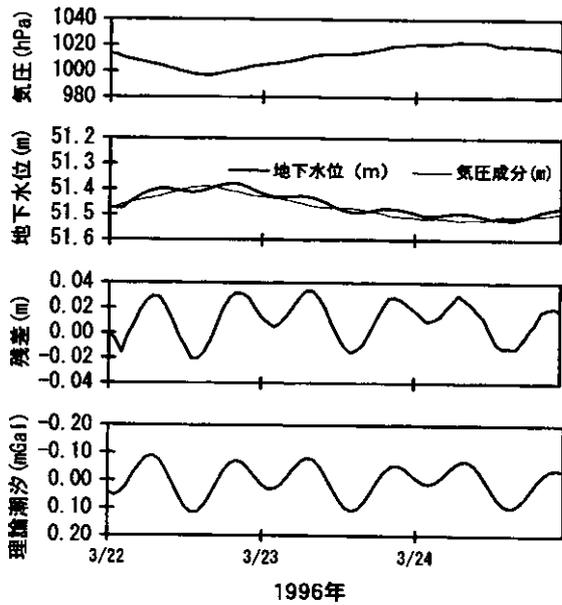


図10 地下水位の気圧補正結果と潮汐の比較
(二宮観測井)

Fig.10 Comparison corrected groundwater level fluctuation and Earth tide.

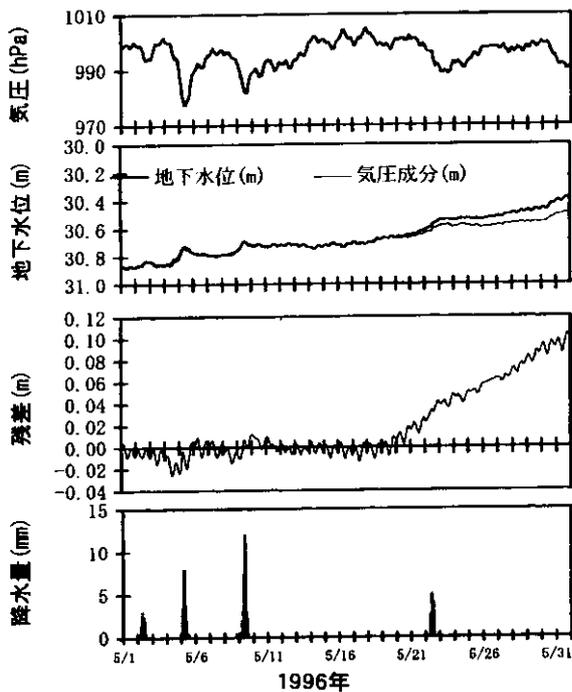


図11 地下水位の気圧補正例 (南足柄観測井)

Fig.11 Groundwater level fluctuation corrected for atmospheric pressure effect.

では、気圧と潮汐以外の要因も水位に影響を及ぼす場合はどうであろうか。図11に、1996年5月1ヶ月間の南足柄観測井における観測結果、気圧成分および残差を示した。残差に注目すると、潮汐の影響による水位変動、降雨の影響による水位上昇、さらに月半ばから始まった水田かん漑の影響による水位上昇を明瞭に読みとること

ができる。

潮汐はきわめて周期的な現象であるから、(3)式によって算出される残差成分について、振幅や位相に着目すれば、目視によっても、異常変化有無の判断は容易となる。さらに、潮汐の影響は、24ないし25時間の移動平均処理によって、簡易的に取り除くことができる(たとえば図1)。また、すでにBAYTAP-G(田村,1995)等の解析プログラムも開発されている。これらを活用し、潮汐の影響を取り除くことができれば、二宮や真鶴以外の観測井について、降雨や揚水の影響を抽出し、それらの補正法についても検討することが可能であろう。

5. おわりに

温泉地学研究所における地下水位観測井の整備は、1989(平成元)年度から1993(平成5)年度にわたって進められた。第一期に整備された観測井(大井、小田原、南足柄)で10年、第三期整備の観測井(二宮)でも6年が経過したことになる。ここで報告したとおり、地下水位に影響を及ぼす要因や、観測井ごとの水位変化の特徴が明らかになってきたものの、究極の目的である地震予知(研究)への活用のためには、まだ課題が山積している。当初、目視で異常の有無を判定していた観測結果の評価については、各要因の影響の補正を通して、徐々に客観性を持たせることが可能になってきた。実際には、複数の要因が互いに影響し合って地下水位に作用しており、それらを補正するためのパラメータ自体も時々刻々変化していると考えられる。従って、個々の要因を補正するための手法の確立とともに、将来的には、常に最新の観測データをもとにパラメータを決定し、観測結果の処理にフィードバックするようなシステムを構築する必要がある。

参考文献

秋田藤夫、松本則夫（1996）北海道周辺で発生した大地震によって生じた地下水位変動,日本地震学会 1996 年度秋季大会講演予稿集,P104.

Bredhoeft, J.D. (1967) Response of Well-Aquifer Systems to Earth Tides. , J.Geophys.Res.Lett. , 72, 12, 3075-3088.

Cooper, H.H. , J.D.Bredhoeft and I. S.Papadopoulos (1965) The Response of Well-Aquifer Systems to Seismic Waves~J. Geophys.Res. Lett. , 70, 3915-3926.

Liu, L.B. , E.Roeloffs and X.Y. Zheng (1989) Seismically Induced Water Level Fluctuations in Wai Well, Beijing, China. J.Geophys.Res.Lett. , 94, 9453-9462.

Oki, Y. and S.Hiraga (1988) Groundwater-level Monitoring for Prediction of Earthquakes, PAGEOPH, 1124, Nos.2-4, 211-240.

田村良明(1995)重力観測データ解析法の進歩,月刊地球,号外 NO.11,138-142.

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(足柄平野の地下水その9),神奈川県温地研報告,17,5,127-140.

横山尚秀、板寺一洋、小鷹滋郎、平野富雄(1992)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特徴とその要因,神奈川県温地研報告,24,1,1-18.

横山尚秀、小鷹滋郎、板寺一洋、長瀬和雄、杉山茂夫(1995)神奈川県西部地震予知研究のための地下水位観測施設と地下水位解析,神奈川県温地研報告,26,1・2 合併号,21-36