

近畿地方及びその周辺における産業技術総合研究所 地下水観測点での地下水位の大気圧応答

北川有一¹・小泉尚嗣¹・高橋 誠¹・松本則夫¹・佐藤 努¹・
桑原保人¹・伊藤久男¹・長 秋雄²・佐藤隆司¹・佃 栄吉¹

Yuichi Kitagawa, Naoji Koizumi, Makoto Takahashi, Norio Matsumoto, Tsutomu Sato, Yasuto Kuwahara, Hisao Ito, Akio Cho, Takashi Satoh and Eikichi Tsukuda (2004) Estimation of barometric responses of groundwater levels at observation stations of the Geological Survey of Japan, AIST in and around the Kinki district. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 55(5/6), p.129 - 152, 32 figs., 2 tables.

Abstract: AIST has been measuring the groundwater level of wells in order to detect crustal movements. We analyzed the barometric responses of the groundwater levels to understand the hydraulic characteristics of the well and stratum. These information are useful to exactly evaluate detection capability of the crustal movements. The groundwater levels have been measured at 26 wells of 21 observation stations in and around the Kinki district mainly since 1996. We describe the three phenomena, which affect the barometric responses of the groundwater levels, and the characteristics of frequency dependence caused by each phenomenon. We calculated the frequency dependence of the barometric response of the groundwater level for each AIST observation well. The characteristics of frequency dependence of the barometric responses fall into several standard patterns. From the characteristics at each well, we estimated what phenomena affected the groundwater level. There are some wells of which the groundwater levels were largely affected by rainfall and the barometric responses could not be well estimated. We also compared the tidal response with the barometric response at each well. At some wells, the barometric responses of the groundwater levels were not consistent with the tidal responses of the groundwater levels. The possible causes of the inconsistency were discussed.

Keywords: groundwater level, barometric response, frequency dependence, well-aquifer system, tidal response

要 旨

産業技術総合研究所では地殻変動を検出するために地下水位の観測を行っている。地下水位の地殻変動検出能力をより正確に評価するために必要な井戸や地層の水理特性を把握する基礎調査として、地下水位の大気圧応答を解析した。近畿地方及びその周辺の21箇所の観測点の26本の井戸で、主に1996年以降、地下水位の連続測定を行っている。まず地下水位の大気圧応答に影響する主な3つの現象を解説し、それらがもたらす周波数依存の特徴を述べた。それぞれの井戸で、地下水位の大気圧応答を周波数解析により求めた。大気圧応答の周波数依存の特徴には数通りのパターンが見られた。各観測点での大気圧応答の周波数依存の特徴から、どの現象が地下水位に影響を及ぼしているかを分析した。降雨に対する地下水位の応答が大きく、大気圧応答を推定できない観測点があった。そして地下水位の大気圧応答と潮汐応答との比較を行った。地下水位の大気圧応答が潮汐応答と整合しない場合があり、その原因を議論した。

1. はじめに

一般に、大気圧変化の影響を受けて、地下水位は変化する。地下水位の情報から地震や火山活動等の地殻活動に関連する地殻変動を知る(小泉ほか, 2004)ことを目的とした場合、地下水位の大気圧応答成分は気象現象からの擾乱成分であり、上述の地殻変動とは無関係な変化と考えられる。地下水位データから大気圧応答成分を除去するデータ処理手法として、多変量回帰及び自己回帰モデル(例えば、松本, 1995)などがある。実際に、産業技術総合研究所地質情報研究部門地震地下水観測ネットワークのシステムでは、Matsumoto(1992)の方法で地下水位の潮汐・大気圧・降雨応答成分の補正を自動及び手動で行っている(高橋ほか, 2004)。多変量回帰及び自己回帰モデルの時系列解析による手法では、大気圧応答が周波数によって著しく変わる場合には、補正は必ずしも上手くいかないという事情がある。ここでは周波数解析による手法で大気圧応答を求める。時系列解析は大気圧応答を現実的に補正することに主眼をおいて、周波数解析は大気圧応答の特

¹地質情報研究部門(Institute of Geology and Geoinformation, GSJ)

²地圏資源環境研究部門(Institute of Geo-Resources and Environment, GSJ)

徴を正確に把握し、その物理的な意味を理解することに主眼をおいている。周波数領域で大気圧応答を調べることで、時系列解析が持っている問題点をクリアするための手掛かりが得られる。

周波数領域で大気圧応答を求めることは、大気圧応答の補正に役立つだけでなく、井戸-帯水層システムの評価に用いることができる。地下水位の大気圧応答は井戸構造・地層の物性などに依存する。地層の間隙水圧変化が井戸孔内の水位変化として現れる効果や周りの地層との間を地下水が拡散する効果などが大気圧応答の周波数依存性をもたらす。詳細な理論展開はRojstaczer(1988)でなされている。

地殻変動が速いかゆっくりかによって、対応する地下水位変化も違ってくる。これが地殻変動に対する地下水位の応答の周波数依存性である。例えば、前段落で述べた二つの効果は大気圧応答と地殻変動応答に周波数依存性として共通して現れる効果である。大気圧応答を評価することで、地下水位の地殻変動応答の周波数依存性を推定することができる。したがって、この情報を用いると、地下水の情報から地殻活動に伴う地殻変動をより精度良く知ることにもつながるのである。

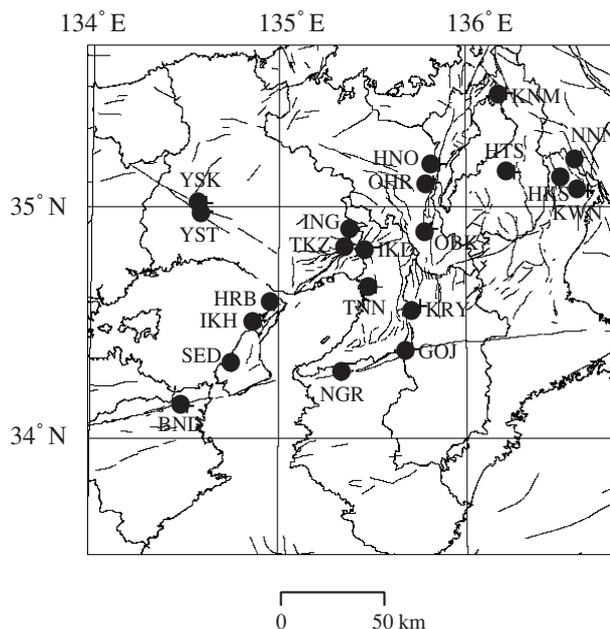
長期間の地下水位・大気圧の連続測定データを解析することで、実際の大気圧応答の特徴を求めることができる。この報告では、近畿地方及びその周辺の産業技術総合研究所地下水観測点(第1図、第1表)(佃ほか、2000)のデータから、それぞれの観測点における地下水位の大気圧応答を計算し、周波数依存性の特徴を整理した。

2. 大気圧の地下水位への影響の仕組み

井戸孔内の地下水の水圧と大気圧の和が帯水層内の間隙水圧と釣り合うように地下水位は変化する。大気圧の変化が地下水位にどう作用して変化を引き起こさせるかの概略を以下に記述する(第2図)。

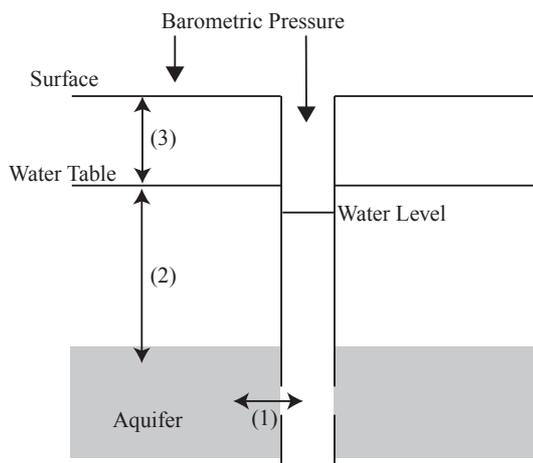
第一段階では、大気圧変化は地表及び井戸孔口に作用する。井戸孔口には大気圧変化量の全てが荷重として作用し、帯水層内では地表に加えられた大気圧変化量の一部(その比率は帯水層のスキャンプトン係数やポアソン比といった物性に依存する。ここではその比率を α とする)が間隙水圧の変化になる。井戸孔内と帯水層との間に圧力差が生じて、以下の現象を引き起こしながら大気圧変化に伴う新たな釣り合い状態に移行を始める。以下に述べる現象(1)~(3)の効果が非常に小さく、井戸孔内と帯水層との間の圧力の釣り合いが極めて速やかに成り立った状態をstatic responseと呼ぶことにする。static responseの特徴は、大気圧変化に対する地下水位変化の振幅比(これを応答係数と呼ぶ)が $1-\alpha$ で、符号が逆、つまり位相差が180度である(第3図)。

第二段階では、三種類の現象がそれぞれに関係する物



第1図:産総研の観測点分布。

Fig.1 Distribution of the observation stations of the Geological Survey of Japan, AIST.



- 現象 (1) : 井戸孔内と帯水層(aquifer) の間の水の移動
- 現象 (2) : 帯水層とその近傍の地層との間の水の移動
- 現象 (3) : 地層内の空隙圧の拡散伝播

第2図:大気圧変化の地下水位変化への効果の模式図。

Fig.2 Schematic illustration of the effects of the groundwater level to the barometric pressure change.

性に従い、並行して進行する。1つ目は、第一段階で生じた圧力差を解消するために、井戸孔内と帯水層との間を水が移動する現象(1)である。これは井戸貯留の効果である。2つ目は、帯水層に生じた間隙水圧変化により生じる近傍の地層の間隙水圧との差を解消するために、帯水層とその近傍の地層との間を水が移動する現象(2)である。3つ目は、地表面での大気圧と地盤内の空隙圧に差が生じるため、

第1表:産総研の観測点.

Table 1 Description of the observation stations of the Geological Survey of Japan, AIST.

観測点	略号	緯度	経度	標高 (m)	井戸深度 (m)	ストレーナ 深度(m)	地質
板東	BND	34.141N	134.517E	25	502	419-430	Qs
五條	GOJ	34.387N	135.707E	236	334	313-330	PTv
北勢 内管	HKSi	35.123N	136.507E	116	511	491-511	Qs
北勢 外管	HKSo	35.123N	136.507E	116	290	100-110	Qs
花折	HNO	35.186N	135.857E	476	262	235-246	PTs
平林	HRB	34.580N	134.972E	36	747	630-650	PTv
秦荘	HTS	35.151N	136.256E	125	515	338-360	Qs
池田	IKD	34.816N	135.439E	35	680	540-561	Qs
育波	IKH	34.511N	134.900E	80	1000	224-246	PTv
猪名川	ING	34.887N	135.374E	85	1000	700-823	PTs
木之本	KNM	35.495N	136.215E	110	250	178-195	Qs
広陵	KRY	34.572N	135.751E	40	602	412-434	PTv
桑名 内管	KWni	35.073N	136.652E	76	300	264-280	Qs
桑名 外管	KWno	35.073N	136.652E	76	100	67-84	Qs
根来	NGR	34.279N	135.331E	90	625	402-446	Qs
南濃	NNN	35.215N	136.616E	12	458	427-442	Qs
黄檗 孔1	OBK1	34.908N	135.811E	52	389	357-374	PTs
黄檗 孔2	OBK2	34.909N	135.814E	59	122	96-113	PTs
大原	OHR	35.107N	135.822E	217	272	256-267	PTv
西淡	SED	34.317N	134.748E	3	253	210-225	Qs
宝塚	TKZ	34.818N	135.336E	82	1000	188-210	PTs
天王寺	TNN	34.656N	135.515E	10	603	447-464	Qs
安富北	YSK	35.018N	134.607E	150	150	132-137	PTs
安富 孔1	YST1	34.982N	134.611E	126	280	254-265	PTs
安富 孔2	YST2	34.982N	134.611E	126	155	144-150	PTs
安富 孔3	YST3	34.982N	134.611E	126	155	144-150	PTs

Qs: Quaternary sedimentary rocks第四紀堆積岩

Ts: Tertiary sedimentary rocks第三紀堆積岩

Tv: Tertiary volcanic rocks第三紀火山岩

PTs: Pre-Tertiary sedimentary rocks第三紀以前の堆積岩

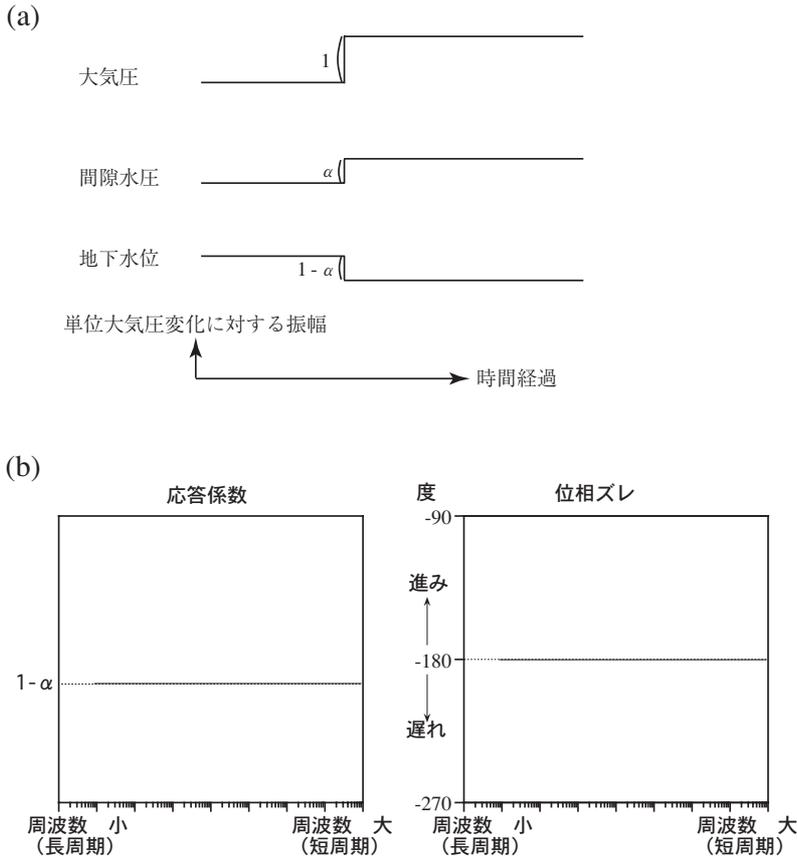
PTv: Pre-Tertiary volcanic rocks第三紀以前の火山岩

地盤内の空気に大気圧変化が伝わることで地下水面での空隙圧に変化が生じる現象(3)である。地下水面での空隙圧変化は地下水面での間隙水圧変化を生じ、ひいては現象(2)によって帯水層の間隙水圧に変化をもたらす。現象(2)と(3)は帯水層の被圧(密閉度)の程度に依存して進行する。

第二段階の現象(1)で、井戸孔内の地下水位が実際に変化するには有限量の水が帯水層と井戸孔内との間を移動することが必要である。実際に有限量の水が井戸を出入

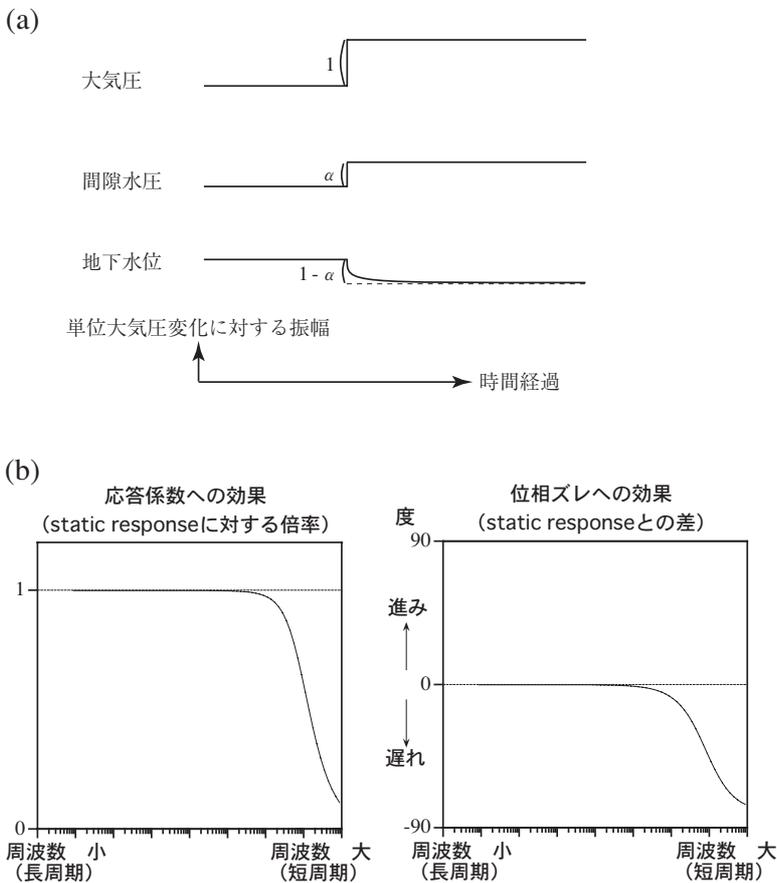
りするには一定の時間を必要とするので、大気圧変化の周期が短いほど、井戸孔内の地下水位変化として表れるのが間に合わなくなる。地下水位変化は大気圧変化を後追いすることになり、大気圧変化の周期が短いほど、位相遅れも大きくなる。その効果は一種のローパスフィルターに相当し、その特性は井戸孔の直径及び井戸孔内と帯水層との間の透水性に依存する(小泉, 1994)(第4図)。

現象(2)では、帯水層とその近傍の地層との間を水が移動することにより、帯水層の間隙水圧変化が小さくなる(元



第3図: static response の概念図. (a)時間領域でのステップ状の大気圧変化に対する応答. (b)周波数領域での大気圧変化に対する地下水位の応答.

Fig.3. Schematic diagram of the static response. (a) Response to step-like barometric pressure change in time domain. (b) Response of the groundwater level to the barometric pressure change in frequency domain.



第4図: 現象(1)の効果の概念図. (a)時間領域でのステップ状の大気圧変化に対するstatic responseを含んだ応答. (b)周波数領域での現象(1)の効果. 但し, (a)の場合と異なり, static responseの成分は除いた.

Fig.4 Schematic diagram of the effect of the phenomenon (1). (a) Response to step-like barometric pressure change in time domain including the static response. (b) Effect of the phenomenon (1) in frequency domain. The component of static response is excluded from these figures, unlike in the case of (a).

のレベルに戻ろうとする)ように変化する。その結果、井戸孔口と帯水層内との圧力差が逆に大きくなり、井戸孔内の水位変化量が増大する。この効果は、地下水が帯水層と外部の地層との間で拡散して、間隙水圧が変化することによるものである。大気圧変化の周期が長いほど十分に拡散が生じるため、効果は顕著に現れる。したがって、長周期側で応答係数を1に近付ける効果をもたらす。拡散には時間が必要であるから、短周期側では拡散する時間が無いため、現象(2)の間隙水圧への影響は無くなる。水位変化は増幅されながら間隙水圧変化を後追いつることになるので、周期が短いほど、位相遅れも大きくなるが、更に短周期になると間隙水圧そのものが上記のように変化しなくなるので、地下水位への影響は無くなる。この効果は一種のローパスフィルターに近いが、長周期側で上述のstatic response に対して $1/(1-\alpha)$ 倍の効果、短周期側で影響が無くなる(static response に対して1倍の効果)ところに違いがある。また、拡散が間に合わないために効果が現れない周期より少し長い周期では、応答係数が小さくなる(第5図)、それは、この周期では地層内の地下水の拡散のタイミングと大気圧変化という荷重による間隙水圧変化の周期が合うことで、共鳴現象が起こっているためである。その際、荷重を受ける側である地層内の間隙水圧変化は増幅し、地下水位変化は小さくなるという結果をもたらす。その特性は帯水層の被圧の程度、あるいは帯水層と周辺の地層との間の透水性に依存する。

現象(3)では、大気圧変化が地層内の空隙圧変化をもたらす。最終的には井戸孔口に作用する大気圧変化と同じ大きさの変化を帯水層近傍の間隙水圧にもたらす。これは現象(2)とは逆に帯水層内の間隙水圧変化が大気圧変化と同じ大きさになるように変化していくので、井戸孔内の水位変化量は小さくなる(変化量は減衰していく)。この効果は、空気が地表から地下へ拡散して、空隙圧が変化することによるものである。大気圧変化の周期が長いほど十分に拡散が生じるため、効果は顕著に現れる。すなわち大気圧変化と水位変化との間の応答を考えると、長周期側で応答係数を0に近付ける効果をもたらす。地層内の間隙水圧変化の位相は大気圧変化に対して遅れであるが、井戸孔内の水位は間隙水圧と大気圧の差であるから、結果的に位相は見かけ上進みとして現れる。この効果は一種のハイパスフィルターに相当する。また、拡散が間に合わないために効果が現れない周期より少し長い周期では、応答係数が大きくなる(第6図)。それは、この周期では地層内の空気の拡散のタイミングと大気圧変化の周期が合うことで、共鳴現象が起こっているためである。その際、拡散の行き着く先である地下水表面での空隙圧変化は大気圧変化とは位相が逆になり、地下水位変化は大きくなるという結果をもたらす。その特性は地表面から地下水表面までの間の地層の空気の拡散性に依存する。但し、現象(3)が地下水位変化に現れるには、地下水表面での間隙水圧変化が測定している深度の帯水層

での間隙水圧に伝わる必要がある。これは現象(2)のことなので、実際に現象(3)の効果が地下水位に反映されるには現象(2)がある程度進行している必要がある。

基本的には、現象(1)は独立して現れる。また長周期側の極限では、通常、現象(2)と(3)の両方の効果で応答係数は0になる。つまり大気圧が変化しても、充分時間が経つと水位変化は0になることを表す。地盤内に空気を通さない層が存在するなどの条件により地下水表面まで大気圧変化が伝わらない場合は現象(3)が作用しないと考えられる。Quilty and Roeloffs(1991)では現象(1)の効果を無視した場合の理論展開を行っている。その中で現象(3)に大きく関わる地層の空気の拡散性の特徴に応じて三通りの応答式を求めている。

特徴を以下に整理する。(static response を考えた時、大気圧が増加した時に水位が低下する際の位相差は180度となる。下記では、この位相差180度を基準として位相ズレを考える。)

現象(1)では、長周期(周波数が小)側で、応答係数・位相の両方に影響しなくなり(応答係数への効果が1倍、位相はズレ無し)、短周期(周波数が大)側で、応答係数への効果が0倍に近付き(水位変化が小さくなり)、位相は遅れが大きくなるといったローパスフィルターのような効果を持つ(第4図)。

現象(2)では、長周期(周波数が小)側で、応答係数へはstatic response に対して $1/(1-\alpha)$ 倍の効果を持ち、位相へは影響しなくなる。中間周期では位相は遅れになり、更に短周期(周波数が大)側で、応答係数・位相の両方に影響しなくなるという効果を持つ(第5図)。

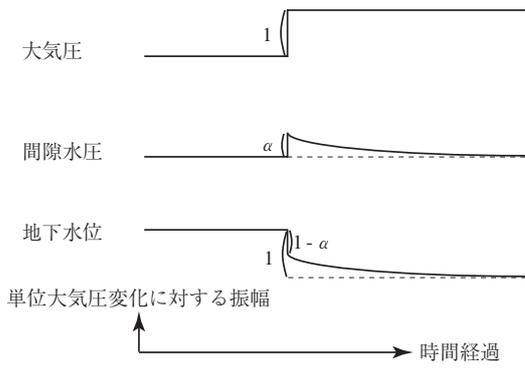
現象(3)では、長周期(周波数が小)側で1倍以上の増幅効果を持つ周期帯が存在し、更に長周期側では0倍に近付ける効果をもたらす。位相は進みが大きくなる。短周期(周波数が大)側で、応答係数・位相の両方に影響しなくなる。結果としてハイパスフィルターのような効果を持つ(第6図)。

実際には、現象(1)～(3)の3つの効果が重なって、地下水位の大気圧応答として現れる(第7図)。

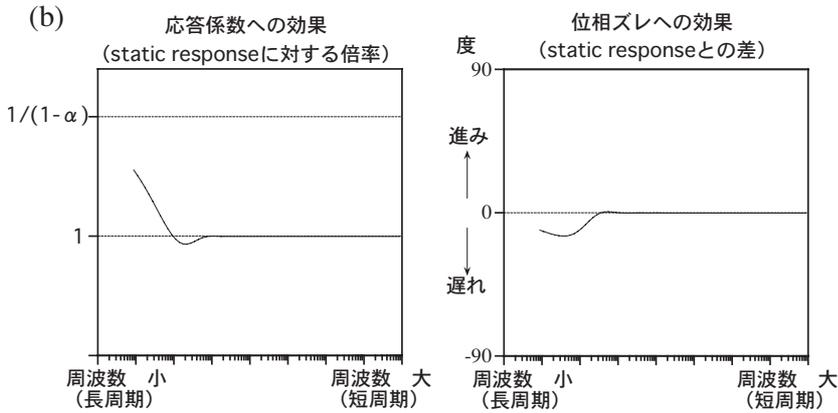
3. 実データの解析結果

近畿地方及びその周辺にある産業技術総合研究所の地下水観測点の地下水位データを解析し、大気圧応答を求めた。なお、解析期間が観測点毎に異なるのは、以下を満たすことを考慮したからである。まずは地下水位・大気圧データに欠測がなく、長期にわたり連続でデータが存在すること。そして降雨の地下水位への影響が小さい、あるいは降雨そのものが少ない期間であること、またはMatsumoto(1992)の方法により降雨応答の補正ができた期間であること。これらの条件を満たす期間のデータを解析に用いた。地下水位と大気圧とのコヒーレンシーを考慮すると、実際に評

(a)



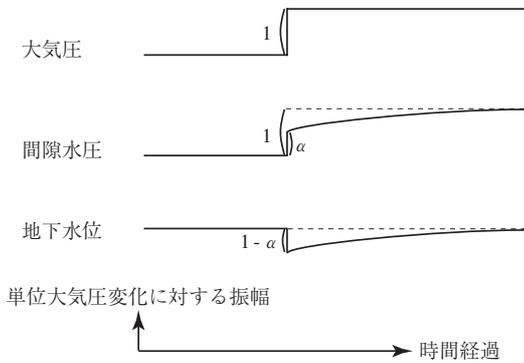
(b)



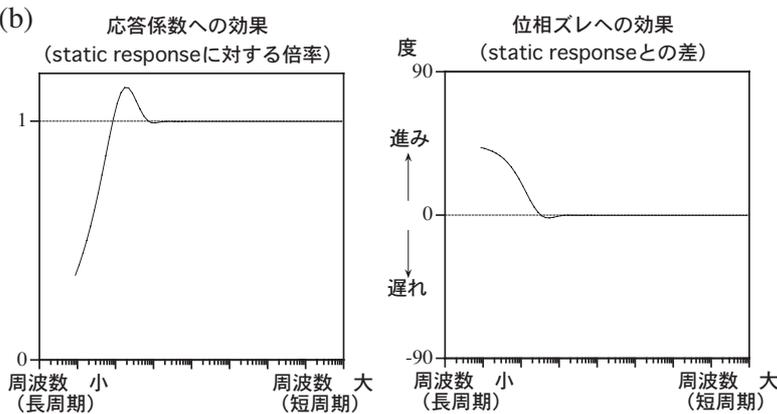
第5図: 現象(2)の効果.

Fig.5 The effect of the phenomenon (2).

(a)

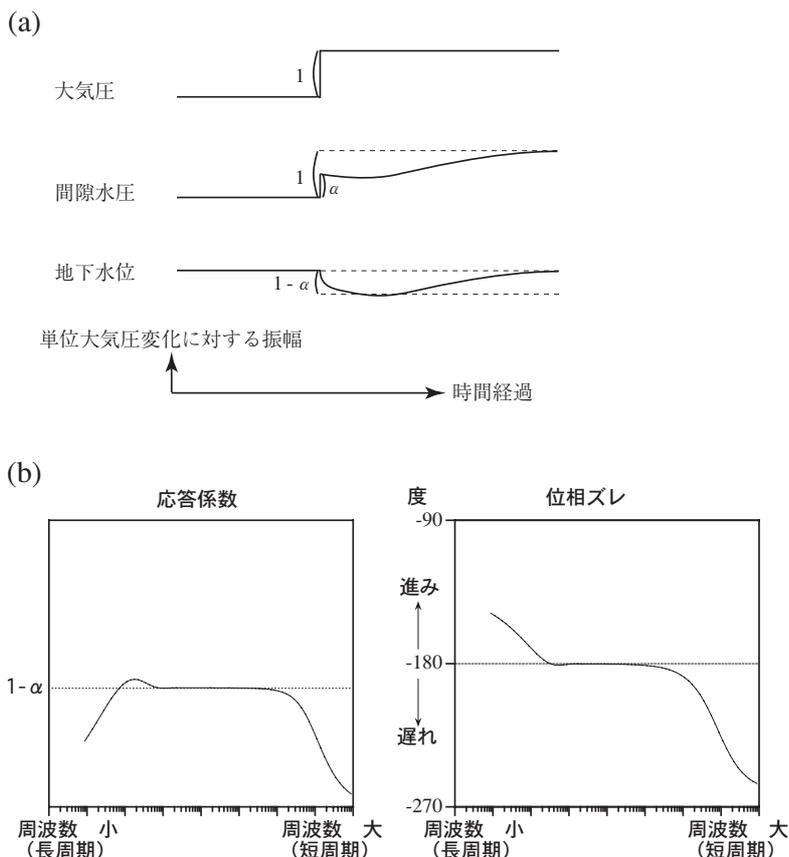


(b)



第6図: 現象(3)の効果.

Fig.6 The effect of the phenomenon (3).



第7図:大気圧応答の周波数依存性の概念図。(a)時間領域でのステップ状の大気圧変化に対する応答。(b)周波数領域での大気圧変化に対する地下水位の応答。

Fig.7 Schematic diagram of the frequency dependence of the barometric response. (a) Response to step-like barometric pressure change in time domain. (b) Response of the groundwater level to the barometric pressure change in frequency domain.

価できる周波数帯は0.05~0.9 cycle/day(周期1.1日~20日)の範囲に限られる。コヒーレンシーは各周波数において大気圧と地下水位がどのぐらい良く相関しているかを示す指標で、0から1までの値である。1に近いほど相関が良いことを意味する。そのため、評価した周波数の範囲にどの現象が現れるかによって、得られる大気圧応答の特徴が異なる。その場合の特徴を下記のように大まかに分類した。

現象(1)のみが現れる場合は一通りのパターンが生じる。

・ローパスフィルター I 型:短周期ほど応答係数が小さく、位相が遅れる。

現象(2)と(3)が大気圧応答の周波数帯でどう現れるかによって、三通りのパターンが生じる。

・ローパスフィルター II 型:現象(2)が現れ、現象(3)が現れない時、短周期ほど応答係数が小さく、位相が遅れとなる。これだけではローパスフィルター I 型と区別することは難しいと思われる。更に短周期側では、応答係数が一定になり、位相ズレが無くなるので、これが分かれば区別できる。

・ハイパスフィルター I 型:現象(2)と現象(3)の両方が関与するが、現象(3)の効果がより短周期側に及ぶ場合、現象(3)の特徴は現れるが、現象(2)の特徴は現れない。長周期ほど応答係数が小さく、位相が進む。

・ハイパスフィルター II 型:現象(2)と現象(3)の両方が関与し、現象(2)の効果がより短周期側に及ぶ場合、現象(2)と(3)の両方の特徴が現れる。長周期ほど応答係数が小さ

く、位相が進むが、中間周期に応答係数が大きくなる領域が存在する。

現象(1)~(3)のすべてが現れる場合、基本的には一通りのパターンが生じる。

・バンドパスフィルター型:ローパスフィルター I 型とハイパスフィルター I or II 型の合成。

現象(1)~(3)のいずれも現れない場合は一通りのパターンが生じる。

・フラット型:static response だけである。

地下水位は地球潮汐・海洋潮汐現象に対して応答している場合がある。潮汐特有の成分であるO1分潮(約25.8時間周期)、M2分潮(約12.4時間周期)に対する応答を、潮汐解析プログラムBAYTAP-G(Ishiguro *et al.*, 1981; Tamura *et al.*, 1991)と地球潮汐・海洋潮汐荷重計算プログラムGOTIC2(Matsumoto *et al.*, 2001)を用いて、地殻歪に対する感度係数(地殻歪変化に対する地下水位変化の振幅比を意味する)と位相ズレの形で求めた(第2表)。そして、大気圧応答の特徴と潮汐応答の特徴とを比較した。

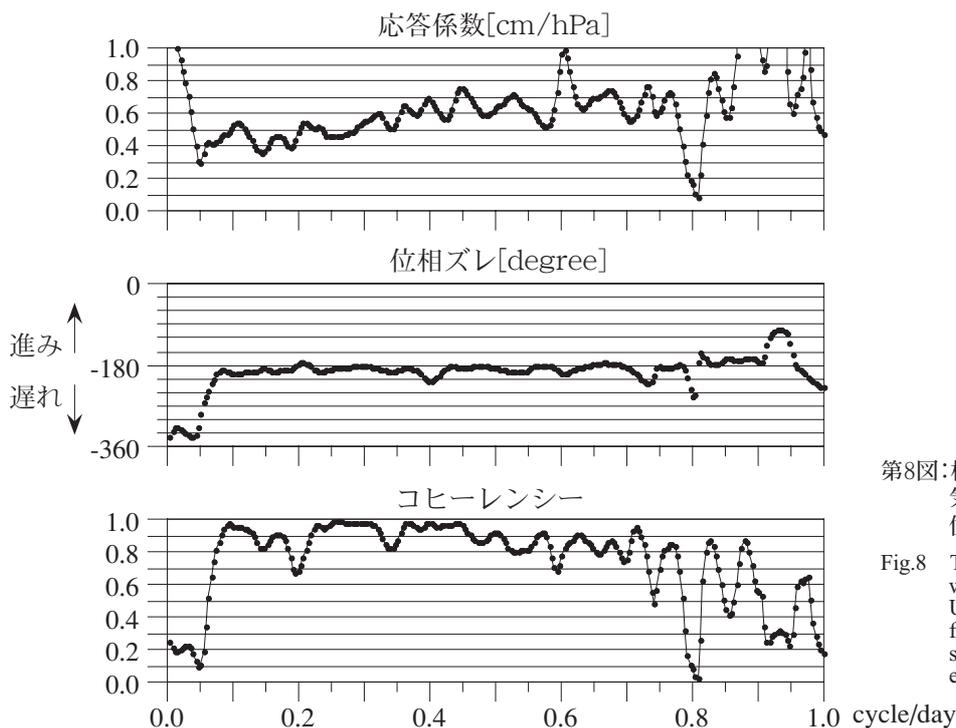
・板東観測点(第8図):ハイパスフィルター I 型

2003年2月以前は井戸孔口からの雨水の流れ込みがあり、降雨の影響が大きく、大気圧応答が推定できない。自然水位が孔口付近なので、2003年2月に井戸孔口の工事を行い、井戸孔口を密閉した。井戸孔内の水位の代わりに井

第2表:各観測点の地下水位の潮汐応答.

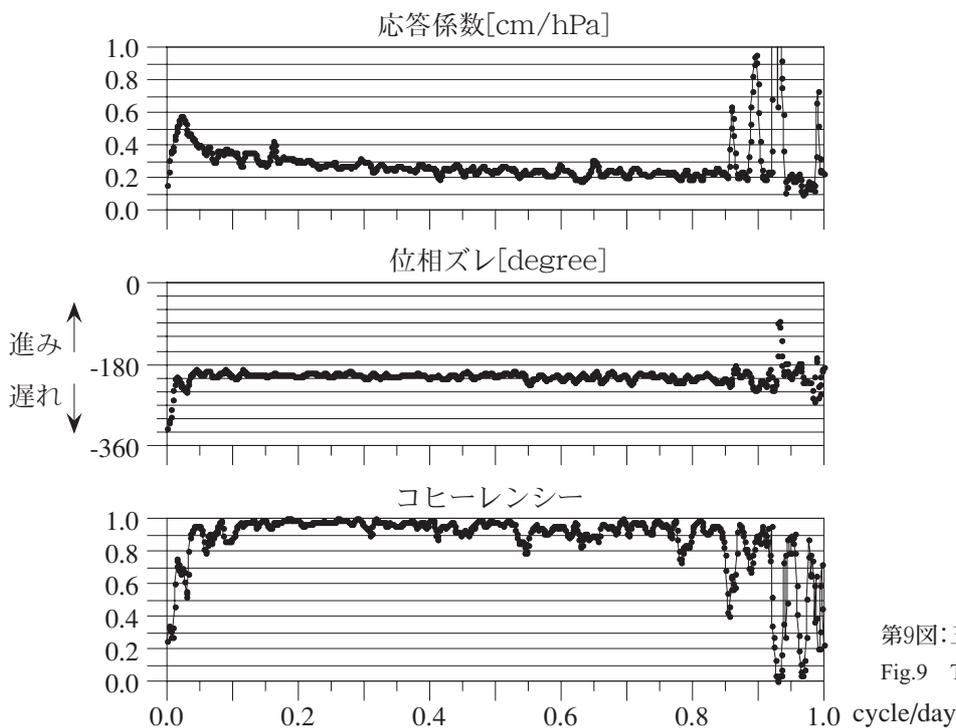
Table 2 The tidal responses of the groundwater levels at the observation stations.

観測点	略号	解析期間	分潮	位相ズレ degree 負:遅れ	(誤差)	感度係数 mm/10 ⁻⁸	(誤差)
板東	BND	2003/03/01-2003/07/16	O1	-20.315	(5.949)	14.525	(1.509)
			M2	-14.984	(1.000)	11.411	(0.199)
五條	GOJ	2000/12/09-2002/12/24	O1	-24.536	(0.243)	9.420	(0.040)
			M2	-23.751	(0.047)	8.338	(0.007)
北勢 内管	HKSi	1999/11/07-2001/09/02	O1	-54.488	(1.980)	1.001	(0.034)
			M2	-61.406	(0.525)	0.562	(0.005)
北勢 外管	HKSo	1999/12/08-2001/07/30	O1	-99.554	(33.267)	0.020	(0.011)
			M2	-57.832	(9.452)	0.016	(0.003)
花折	HNO	2000/03/18-2001/07/30	O1	-2.559	(1.651)	15.413	(0.443)
			M2	-0.853	(0.272)	14.313	(0.068)
平林	HRB	2002/01/21-2002/12/26	O1	-152.880	(2.691)	12.337	(0.580)
			M2	-150.356	(1.026)	7.840	(0.140)
秦荘	HTS	1999/08/12-2001/09/03	O1	-55.389	(6.528)	1.867	(0.212)
			M2	-76.001	(2.022)	0.882	(0.031)
池田	IKD	1996/07/10-1997/07/05	O1	-54.743	(1.128)	5.824	(0.115)
			M2	-64.119	(1.009)	3.328	(0.059)
育波	IKH	2000/11/05-2002/10/24	O1	-130.106	(0.257)	65.561	(0.294)
			M2	-49.720	(0.262)	11.066	(0.050)
猪名川	ING	2001/11/20-2002/12/24	O1	-84.775	(1.028)	0.744	(0.014)
			M2	-81.884	(1.230)	0.360	(0.008)
木之本	KNM	1998/05/21-1999/01/07	O1	-18.788	(0.704)	11.677	(0.144)
			M2	-34.121	(0.253)	10.259	(0.045)
広陵	KRY	2002/04/01-2002/11/30	O1	-5.392	(1.868)	14.748	(0.481)
			M2	-17.905	(0.319)	14.485	(0.081)
桑名 内管	KWNi	1999/11/26-2000/11/06	O1	-90.632	(5.508)	0.083	(0.008)
			M2	-92.287	(2.251)	0.059	(0.002)
桑名 外管	KWNo	2000/09/23-2001/07/27	O1	17.024	(15.688)	1.277	(0.349)
			M2	-1.083	(1.769)	1.730	(0.054)
根来	NGR	2000/02/03-2001/09/30	O1	-64.611	(9.278)	0.074	(0.011)
			M2	-68.795	(6.273)	0.048	(0.005)
南濃	NNN	2002/01/10-2004/01/06	O1	-19.590	(5.572)	21.669	(2.108)
			M2	-56.021	(0.377)	53.376	(0.351)
黄檗 孔1	OBK1	2000/01/26-2001/08/09	O1	-3.209	(1.042)	11.819	(0.215)
			M2	-4.872	(0.147)	12.700	(0.033)
黄檗 孔2	OBK2	2000/01/26-2001/08/08	O1	-3.330	(1.676)	5.688	(0.166)
			M2	1.778	(0.393)	5.903	(0.040)
大原	OHR	2000/01/21-2001/07/16	O1	5.187	(2.354)	13.643	(0.560)
			M2	-0.240	(0.336)	14.145	(0.083)
西淡	SED	2000/03/30-2002/04/23	O1	-70.436	(2.425)	39.711	(1.683)
			M2	-168.528	(0.474)	10.543	(0.087)
宝塚	TKZ	1997/04/27-1998/03/22	O1	3.726	(5.106)	21.820	(1.945)
			M2	0.666	(0.713)	20.943	(0.261)
天王寺	TNN	2000/07/30-2002/10/29	O1	-12.176	(0.631)	5.217	(0.057)
			M2	-30.413	(0.136)	4.451	(0.010)
安富北	YSK	2000/10/12-2002/10/01	O1	16.698	(0.107)	31.385	(0.059)
			M2	9.103	(0.042)	46.096	(0.033)
安富 孔2	YST2	2000/01/25-2000/12/06	O1	-9.042	(3.216)	12.731	(0.714)
			M2	-13.896	(0.428)	15.710	(0.117)
安富 孔3	YST3	2000/01/30-2000/12/06	O1	-40.748	(2.386)	4.871	(0.203)
			M2	-34.380	(0.443)	4.193	(0.033)



第8図:板東観測点(BND)の地下水位の大気圧応答. 上図が応答係数, 中図が位相ズレ, 下図が相関を示す.

Fig.8 The barometric response of the groundwater level at the Bando station (BND). Upper figure shows the barometric efficiency. Center figure shows the phase shift. Lower figure shows the coherency.



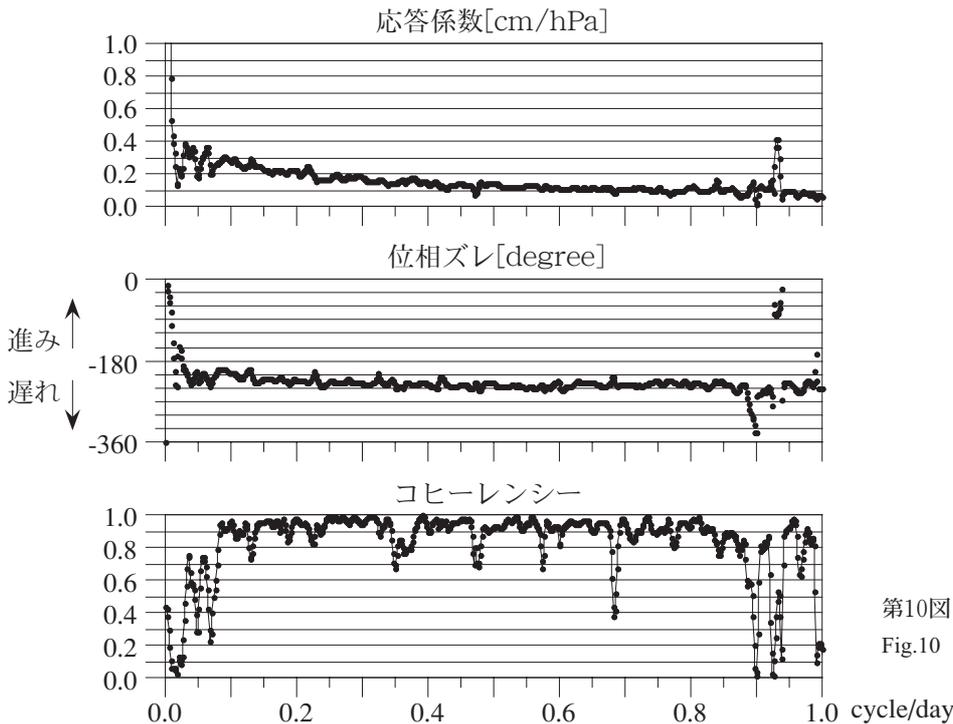
第9図:五條観測点(GOJ).

Fig.9 The Gojo station (GOJ).

戸孔内の水圧を測定している. それ以降, 短期的には明瞭な降雨の影響は認められない. 2003年3月1日~2003年11月12日のデータを解析した結果, 0.1~0.7 cycle/day (周期1.7日~10日)の範囲で応答が明瞭であった. 応答係数は長周期側で小さくなる傾向がある. 位相はやや遅れである. 大気圧応答の周期帯では, 応答係数についてはハイパ

スフィルターI型の特徴を持っている. 潮汐応答の結果(感度係数はO1>M2, 位相はO1, M2とも15~20程度の遅れ)とはやや整合しない.

・五條観測点(第9図):ローパスフィルターI型
2000年12月8日~2002年12月24日のデータを解析した



第10図:北勢観測点内管(HKSi).

Fig.10 The inner well of the Hokusei station (HKSi).

結果,0.05~0.8 cycle/day(周期1.25日~20日)の範囲で応答が非常に明瞭である. 応答係数は短周期側でやや小さくなる傾向があり,位相は少し遅れである. 応答係数・位相の特徴から,現象(1)が少し現れていると推測される. 大気圧応答の周期帯では,ローパスフィルター I 型の特徴を持っている. 潮汐応答の結果(感度係数はO1>M2,位相は24~25度遅れ)と整合する.

・北勢観測点

北勢観測点では,一本の観測井で2つの深度の地層の地下水を観測するために,井戸が二重管構造で作られている(佐藤ほか,2000). 内側の管は外側の管より深い地層の地下水位を測定している.

内管(第10図):ローパスフィルター I 型

1999年11月6日~2001年9月2日のデータを解析した結果,0.1~0.8 cycle/day(周期1.25日~10日)の範囲で応答が明瞭であった. 応答係数は長周期側で大きくなる傾向があり,位相は大きく遅れである. 現象(1)が大きく現れていると推測される. 大気圧応答の周期帯では,ローパスフィルター I 型の特徴を持っている. 潮汐応答の結果(感度係数はO1>M2,位相はO1で54度遅れ,M2で61度遅れ)と整合する.

外管(第11図)

降雨の中長期的な影響は認められる. 1999年12月7日~2001年7月31日のデータを解析した結果,大気圧応答は不明瞭であった. 応答係数は非常に小さく,大気圧応答自体がほとんど無いと思われる. 潮汐応答が非常に小さく,位相遅れが大きいことと整合する. 現象(1)が大きく現れている

と推測される.

・花折観測点(第12図):ハイパスフィルター II 型

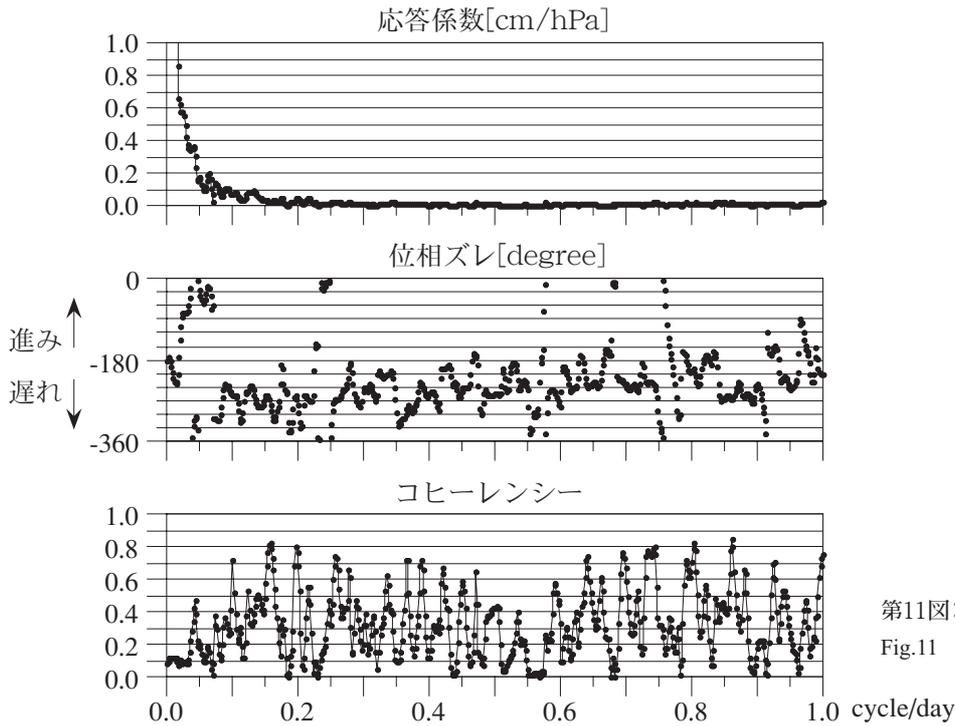
降雨の影響が認められる. 明瞭な応答関係が推定できないため,降雨応答の補正を行った後,2000年3月17日~2001年7月31日のデータの解析を行った. 改善はされたものの,やはり応答は不明確であり,降雨応答の補正が不十分と思われる. 応答係数は短周期側で大きくなる傾向を持つ. 位相は長周期(<0.3 cycle/day(周期3.3日))で遅れ,短周期(>0.3 cycle/day(周期3.3日))でやや進みとなった. 全体としてハイパスフィルタータイプである. 長周期側の位相遅れの特徴から,現象(2)の特徴が現れていると推測できる. ハイパスフィルター II 型と判断される. 井戸孔口を密閉して水圧として測定しているため,現象(1)は現れていない. 潮汐応答の結果(感度係数はO1>M2,位相はO1,M2ともズレ無し)とは大きくは矛盾しない.

・平林観測点(第13図)

降雨の影響が大きく,2002年1月21日~2002年12月27日のデータを解析したが,明瞭な応答関係が推定できない. 潮汐応答の結果は,感度係数はO1>M2,位相は150度程遅れである. 平林観測点が海沿いの観測点であるため,潮汐応答については海洋潮汐の影響をうまく評価できていない可能性が高い.

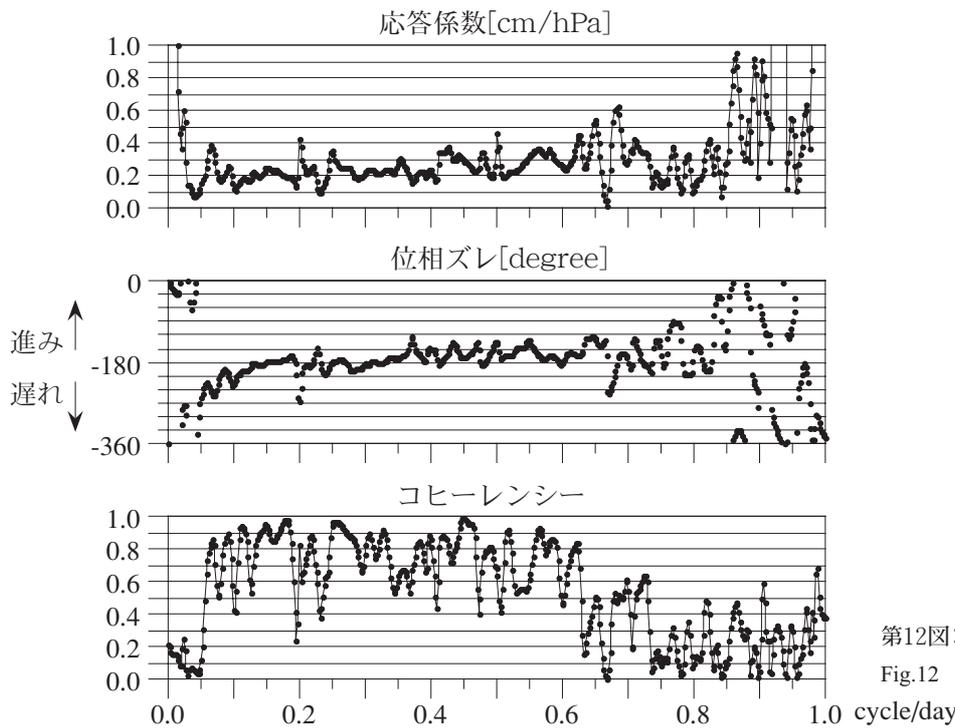
・秦荘観測点(第14図)

明瞭な応答関係が推定できなかった. 降雨の影響が大きい



第11図:北勢観測点外管(HKSo).

Fig.11 The outer well of the Hokusei station (HKSo).



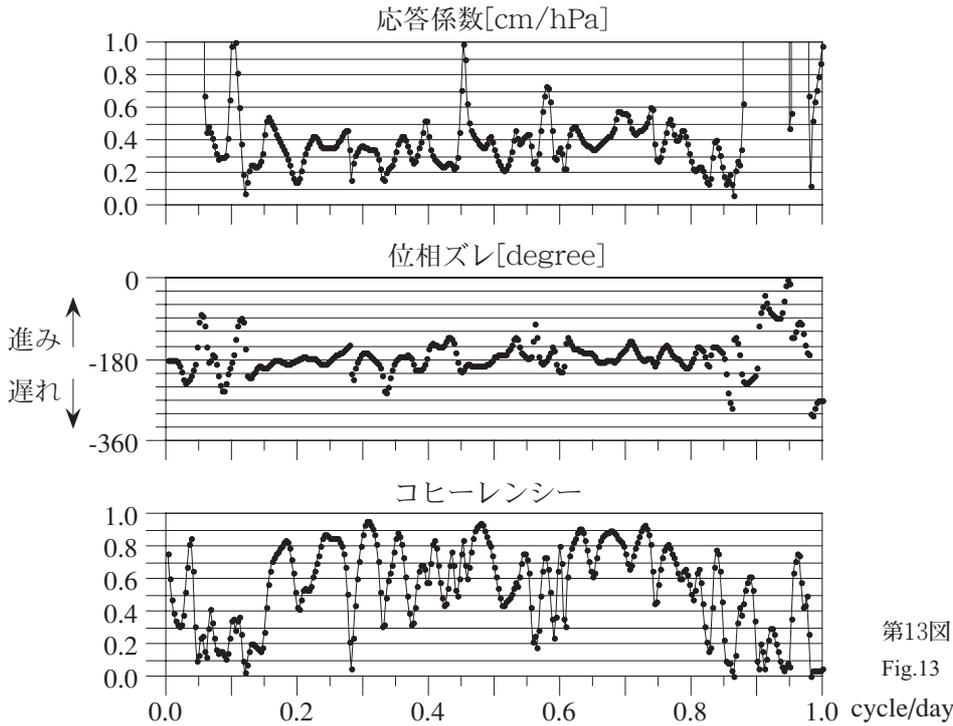
第12図:花折観測点(HNO).

Fig.12 The Hanaore station (HNO).

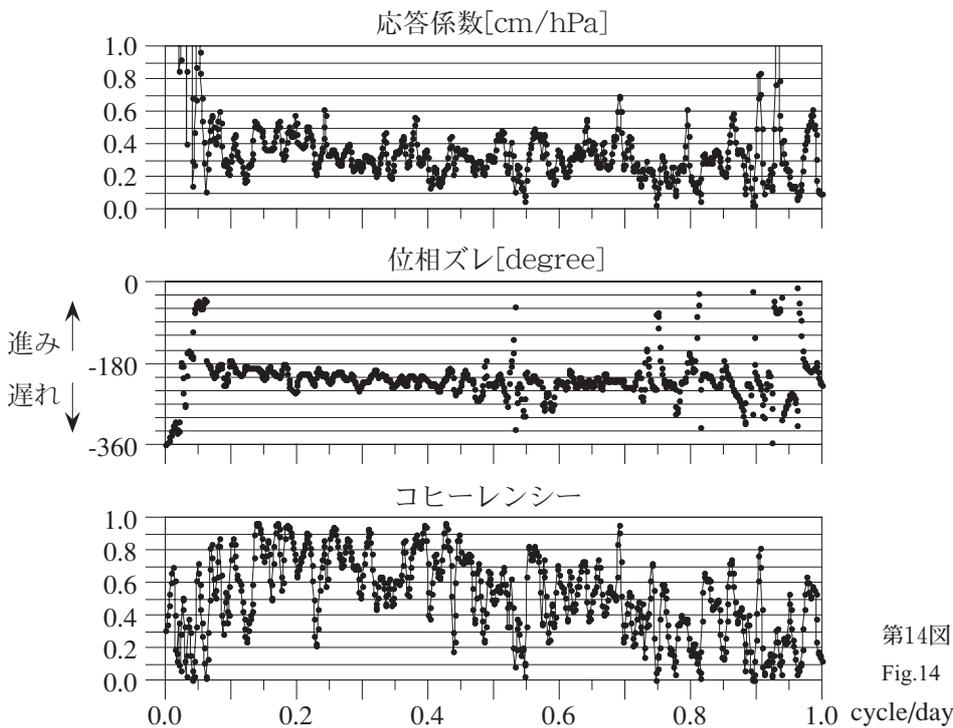
と思われるが,降雨応答の補正を行っても,改善しなかった.1999年8月11日~2001年9月3日のデータを解析した結果,位相は遅れで,現象(1)が現れていると推測される.潮汐応答の結果は,感度係数はO1>M2,位相はO1で55度遅れ,M2で76度遅れである.

・池田観測点(第15図):ローパスフィルターI型

降雨の際に地下水位の急上昇が見られることがある.特に2001年後半以降は観測井の孔口が一部破壊し,降雨の影響がより顕著となった.したがって,降雨の影響が少ない時期(1996年7月10日~1997年7月5日)を用いて解析を行った.0.05~0.8 cycle/day(周期1.25日~20日)の範囲



第13図: 平林観測点 (HRB).
Fig.13 The Hirabayashi station (HRB).

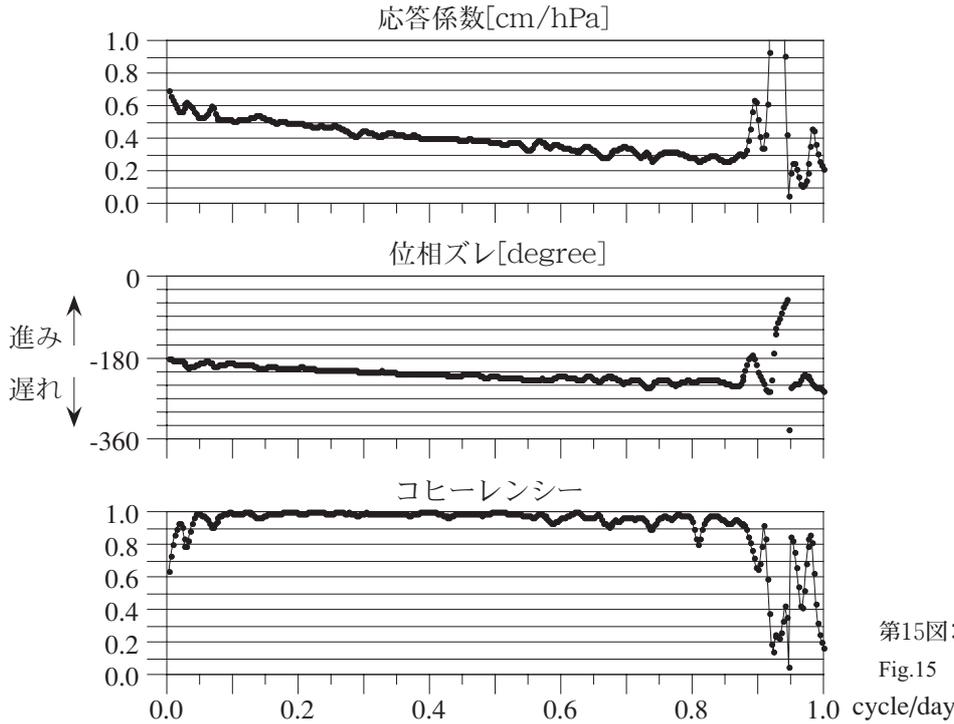


第14図: 秦荘観測点 (HTS).
Fig.14 The Hatasho station (HTS).

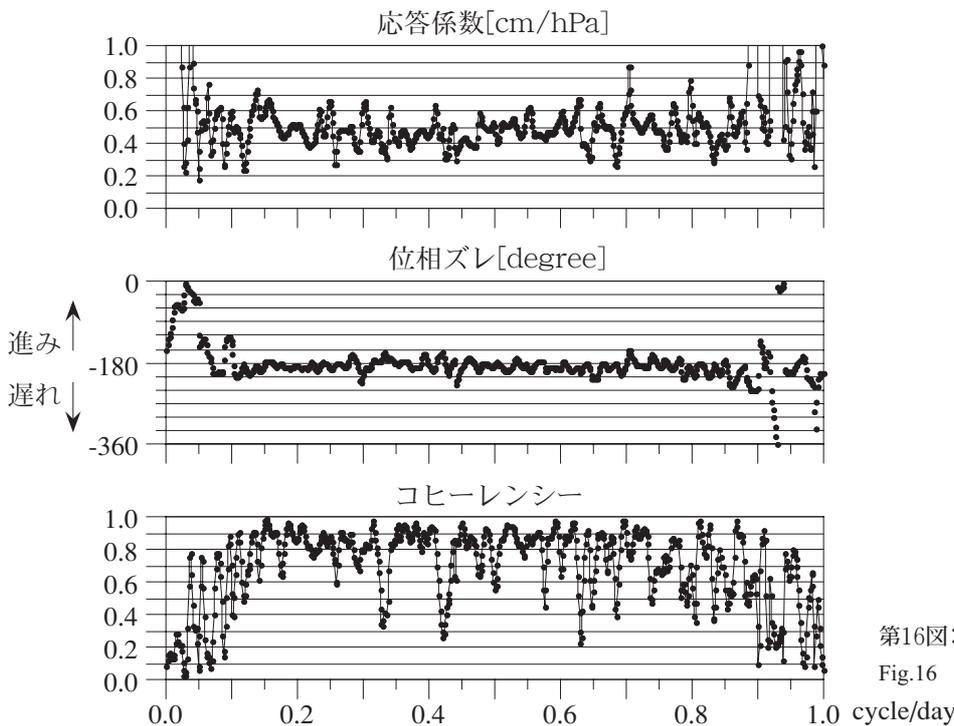
で応答が非常に明確であった。応答係数は短周期側で小さくなる。位相は長周期側で遅れが無くなり、短周期になるにつれて遅れが大きくなる。短周期側で応答係数が小さくなり、位相の遅れが大きくなるので、現象(1)が現れていると判断される。長周期側で応答係数が大きくなることと位相が遅れのままであることから、現象(3)は現れていないと推定される。すな

わち大気圧応答の周期帯では、ローパスフィルターI型の特徴を持っている。潮汐応答の結果(感度係数はO1>M2,位相はO1で55度遅れ,M2で64度遅れ)と整合する。

・育波観測点(第16図):フラット型
2000年後半までは降雨の影響が大きく認められる。井戸



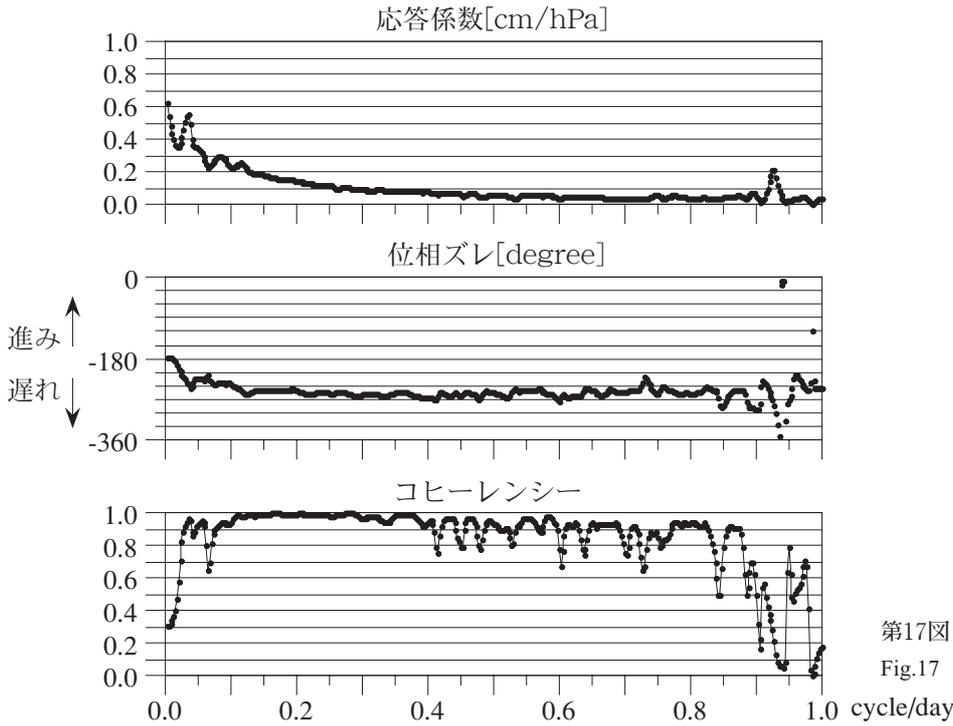
第15図: 池田観測点 (IKD).
Fig.15 The Ikeda station (IKD).



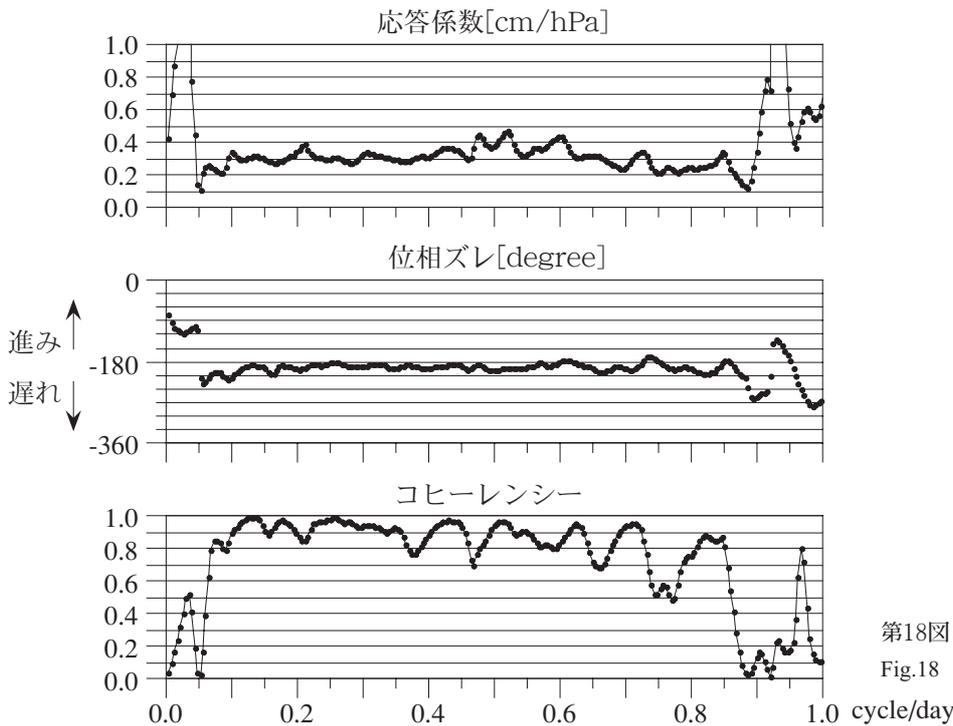
第16図: 育波観測点 (IKH).
Fig.16 The Ikuha station (IKH).

孔口を補修した後は降雨の影響は小さくなった, 2000年11月4日~2002年10月25日のデータを解析した結果, 0.2~0.7 cycle/day (周期1.4日~5日) の範囲で応答はあるが, バラツキが見られる. 応答係数は一定で, 位相は少し遅れである. 位相は遅れなので, 現象(1)が少し現れていると推測される. 全体としては大気圧応答の周期帯では, フィル

ターとして作用していない(フラット型である). 潮汐応答の結果(感度係数はO1>M2, 位相はO1が130度遅れ, M2が50度遅れ)とは整合しない. 育波観測点が海沿いの観測点であるため, 潮汐応答については海洋潮汐の影響をうまく評価できていない可能性が高い.



第17図:猪名川観測点(ING).
Fig.17 The Inagawa station (ING).

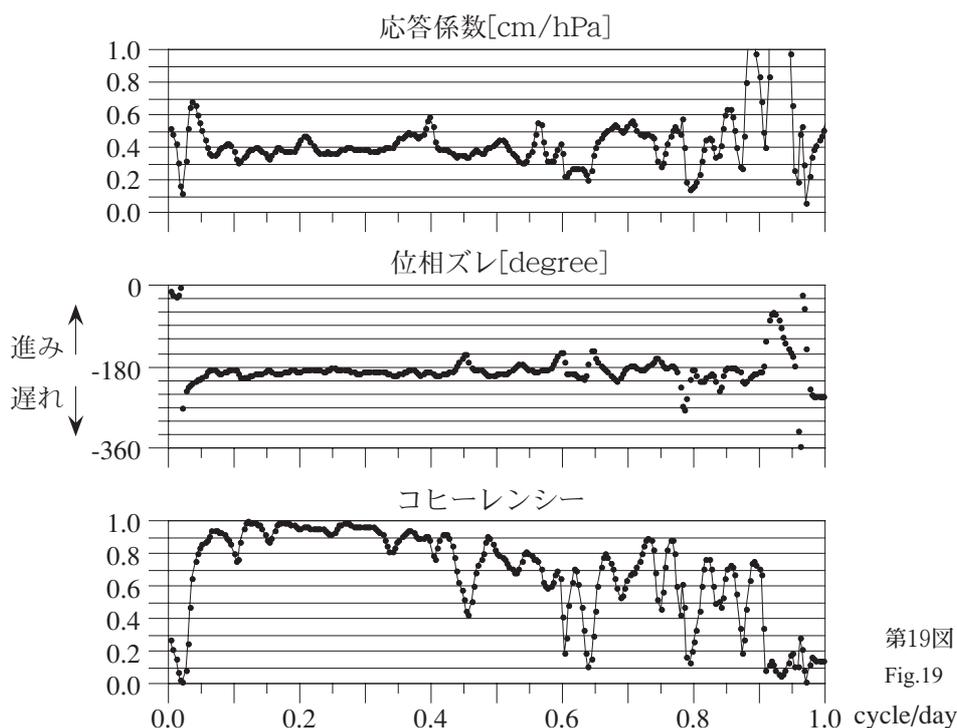


第18図:木之本観測点(KNM).
Fig.18 The Kinomoto station (KNM).

・猪名川観測点(第17図):ローパスフィルターI型

2001年以前は降雨の影響が認められる。井戸孔口の密閉化を行い、それ以降は短期的な降雨の影響はほとんど無くなった。2001年11月20日～2002年12月25日のデータを解析した結果、0.1～0.8 cycle/day(周期1.25日～10日)の範囲で応答が明瞭であった。応答係数は長周期側で大きく

なる傾向があり、位相は大きく遅れである。現象(1)が大きく現れていると推測される。大気圧応答の周期帯では、ローパスフィルターI型の特徴を持っている。潮汐応答の結果(感度係数は $O_1 > M_2$, 位相は80～85度遅れ)と整合する。



第19図: 広陵観測点(KRY).
Fig.19 The Kouryo station (KRY).

・木之本観測点(第18図): バンドパスフィルター型

2001年後半以降, 井戸孔口から雨水が入り込むようになり, 降雨の影響が大きく現れている. それ以前は短期的には明瞭な降雨の影響は認められない. 1998年5月21日~1999年1月8日のデータを解析した結果, 0.1~0.7 cycle/day (周期1.4日~10日)の範囲で応答が明瞭であった. 応答係数は0.5 cycle/day (周期2日)をピークに短周期・長周期側共にやや小さくなる傾向があり, 位相は少し遅れである. 短周期側の振幅・位相の特徴から, 現象(1)が少し現れていると推測される. 長周期側の振幅の特徴から, 現象(3)の特徴が少し現れていると推測される. 大気圧応答の周期帯では, バンドパスフィルター型の特徴を持っている. 潮汐応答の結果(感度係数はO1>M2, 位相はO1で19度遅れ, M2で34度遅れ)と整合する.

・広陵観測点(第19図): フラット型

2002年3月26日~2002年12月25日のデータを解析した結果, 0.1~0.4 cycle/day (周期2.5日~10日)の範囲で応答が明瞭であった. 応答係数はほぼ一定で, 位相はやや遅れである. 位相の特徴から, 現象(1)が少し現れていると推測される. 大気圧応答の周期帯では, フィルターとして作用していない(フラット型である). 潮汐応答の結果(感度係数はO1=M2, 位相はO1で5度遅れ, M2で18度遅れ)と整合する.

・桑名観測点

桑名観測点では, 一本の観測井で2つの深度の地層の地下水を観測するために, 井戸が二重管構造で作られて

いる. 内側の管は外側の管より深い地層の地下水位を測定している.

内管(第20図): ローパスフィルター I 型

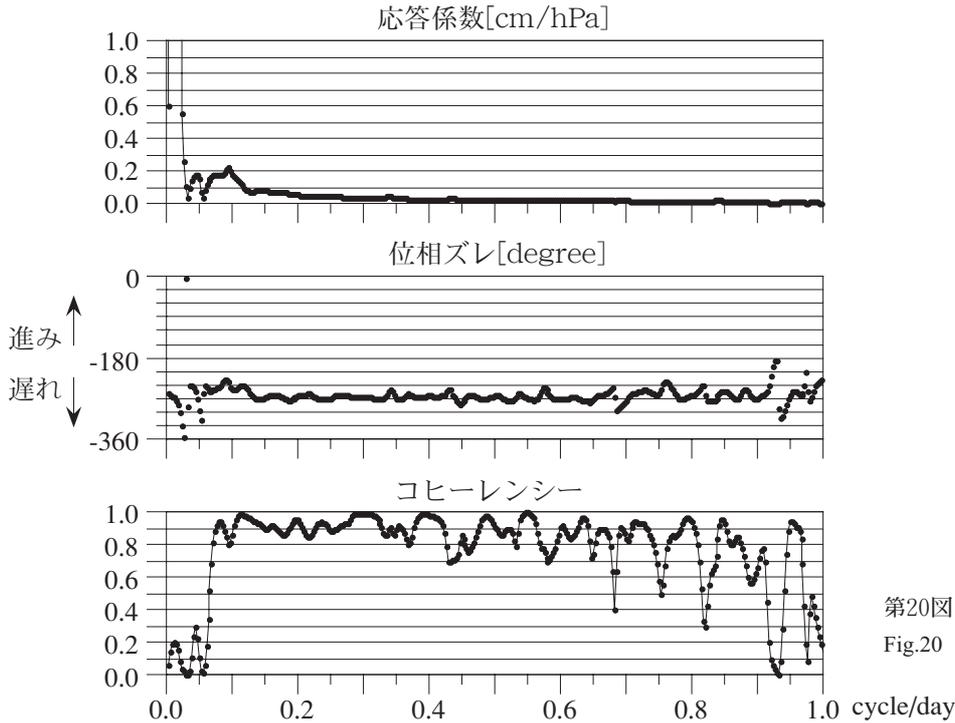
近くの井戸での汲み上げの影響を受けて, 大きく低下する時期がある. 1999年11月25日~2000年11月7日のデータを解析した結果, 0.1~0.6 cycle/day (周期1.7日~10日)の範囲で応答が明瞭であった. 応答係数は非常に小さいが, 長周期側で大きくなる傾向がある. 位相は大きく遅れである. 現象(1)が大きく現れていると推測される. 大気圧応答の周期帯では, ローパスフィルター I 型の特徴を持っている. 潮汐応答が非常に小さく, 位相遅れが大きいことと整合する.

外管(第21図): ハイパスフィルター I 型

2000年9月22日~2001年7月27日のデータを解析した結果, 0.1~0.9 cycle/day (周期1.1日~10日)の範囲で応答が明瞭であった. 応答係数は長周期側で小さくなる傾向がある. 位相は長周期側(<0.6 cycle/day (周期1.7日))では進み, 短周期側(>0.6 cycle/day (周期1.7日))ではやや遅れである. 応答係数と0.6 cycle/day (周期1.7日)より長周期側の位相進みの特徴から, 現象(3)の特徴が現れていると推測される. 大気圧応答の周期帯では, ハイパスフィルター I 型の特徴を持っている. 潮汐応答の結果(感度係数はO1=M2, 位相はO1, M2ともズレ無し)と整合する.

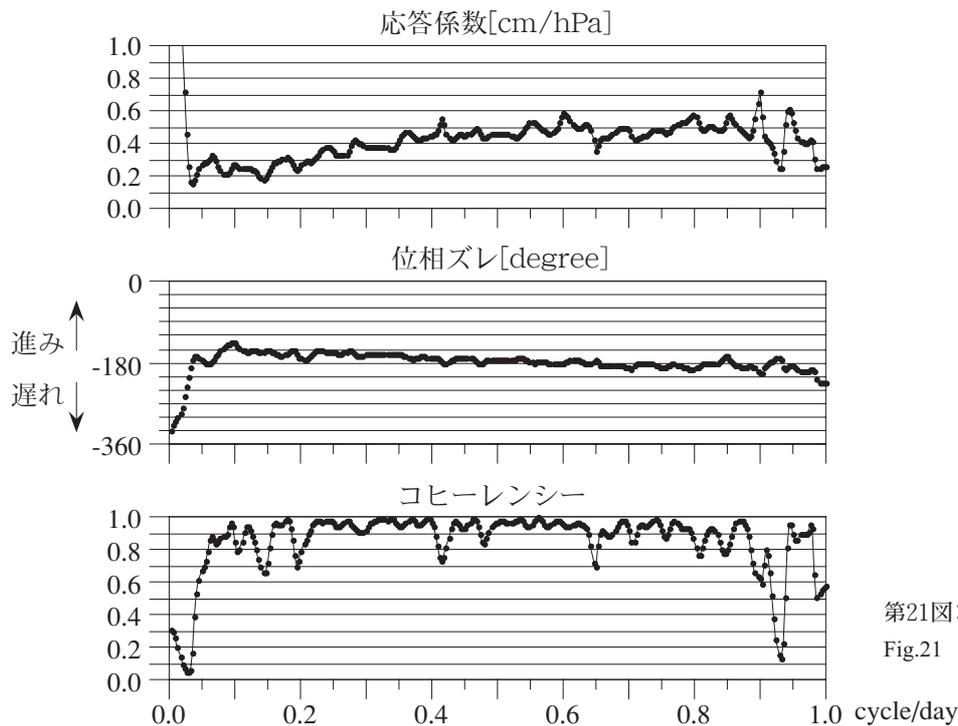
・根来観測点(第22図): ローパスフィルター I 型

2000年2月2日~2001年9月30日のデータを解析した結果, 0.1~0.4 cycle/day (周期2.5日~10日)の範囲で応答



第20図: 桑名観測点内管 (KWNi).

Fig.20 The inner well of the Kuwana station (KWNi).



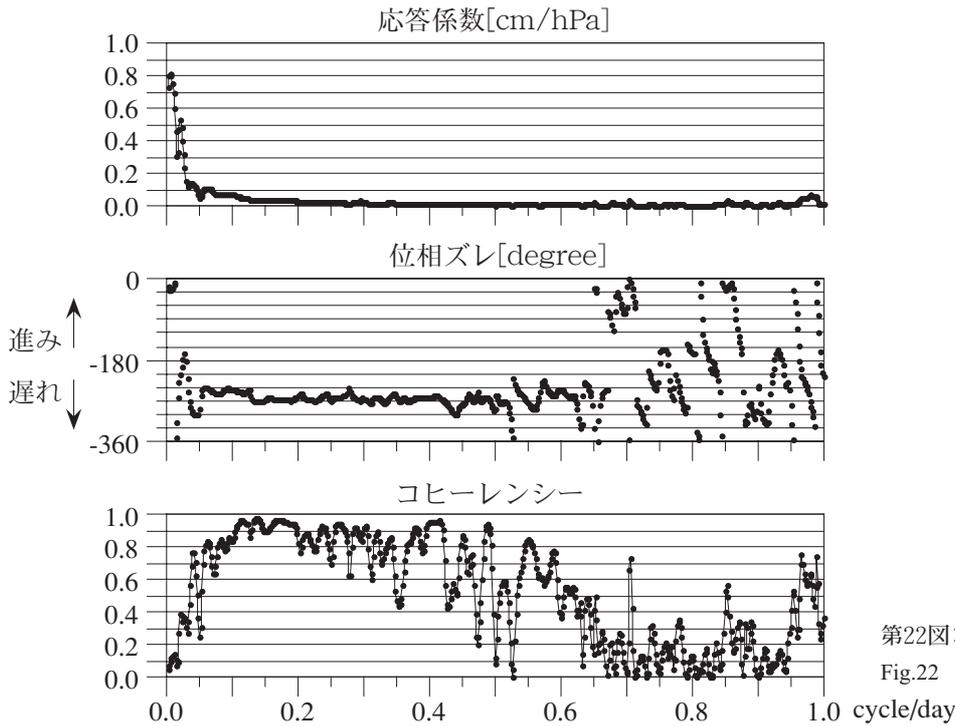
第21図: 桑名観測点外管 (KWN0).

Fig.21 The outer well of the Kuwana station (KWN0).

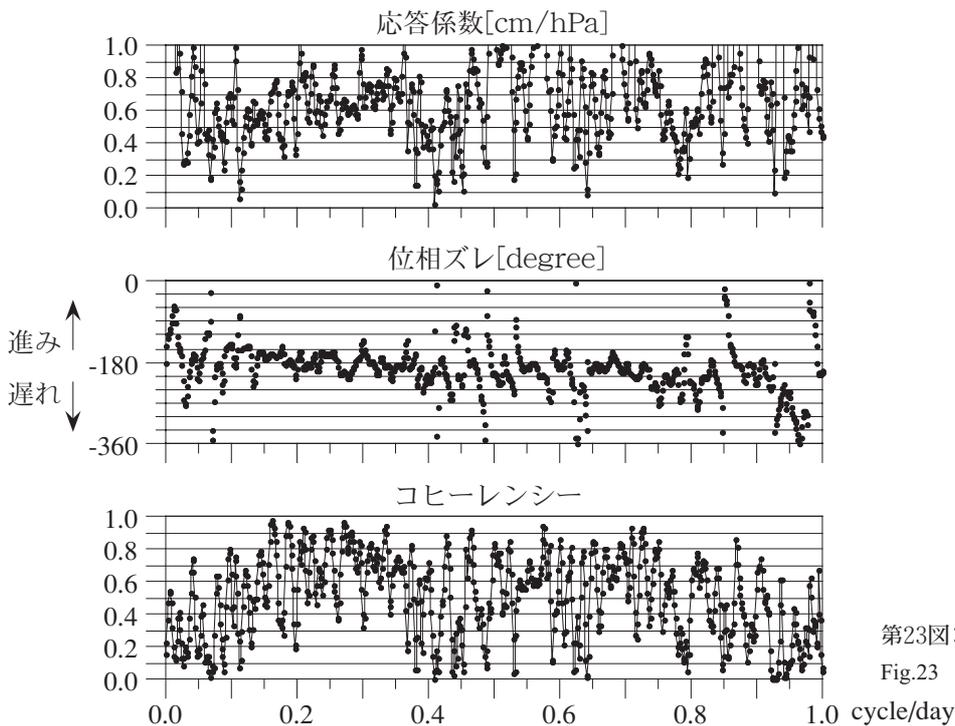
があった。応答係数は非常に小さいが、長周期側で大きくなる傾向がある。位相は大きく遅れである。現象(1)が大きく現れていると推測される。大気圧応答の周期帯では、ローパスフィルターI型の特徴を持っている。潮汐応答が非常に小さく、位相遅れが大きいことと整合する。

・南濃観測点(第23図)

降雨の影響が認められる。2002年1月10日～2004年1月6日のデータを解析したが、明瞭な応答関係が推定できない。潮汐応答の結果は、感度係数は $O1 < M2$ 、位相は $O1$ が20度遅れ、 $M2$ が56度遅れである。



第22図: 根来観測点(NGR).
Fig.22 The Negoro station (NGR).



第23図: 南濃観測点(NNN).
Fig.23 The Nan-nou station (NNN).

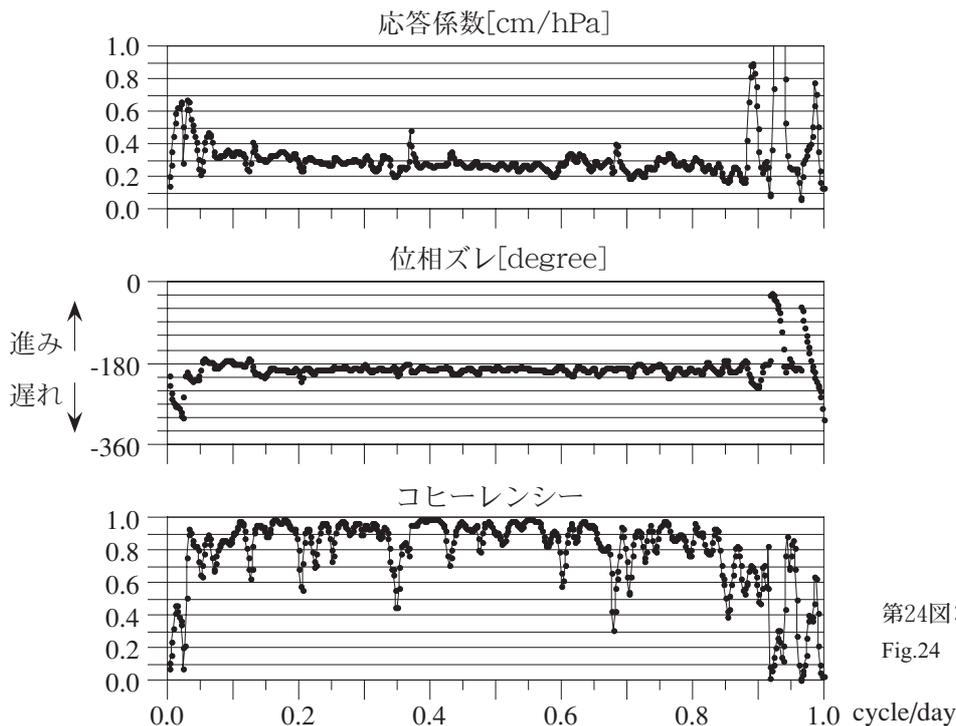
・黄檗観測点

黄檗観測点では,黄檗断層周辺に水平方向に約200 m 離れて2本の観測井が掘削された(小泉ほか,2002).西側の観測井を孔1,東側の観測井を孔2とする.

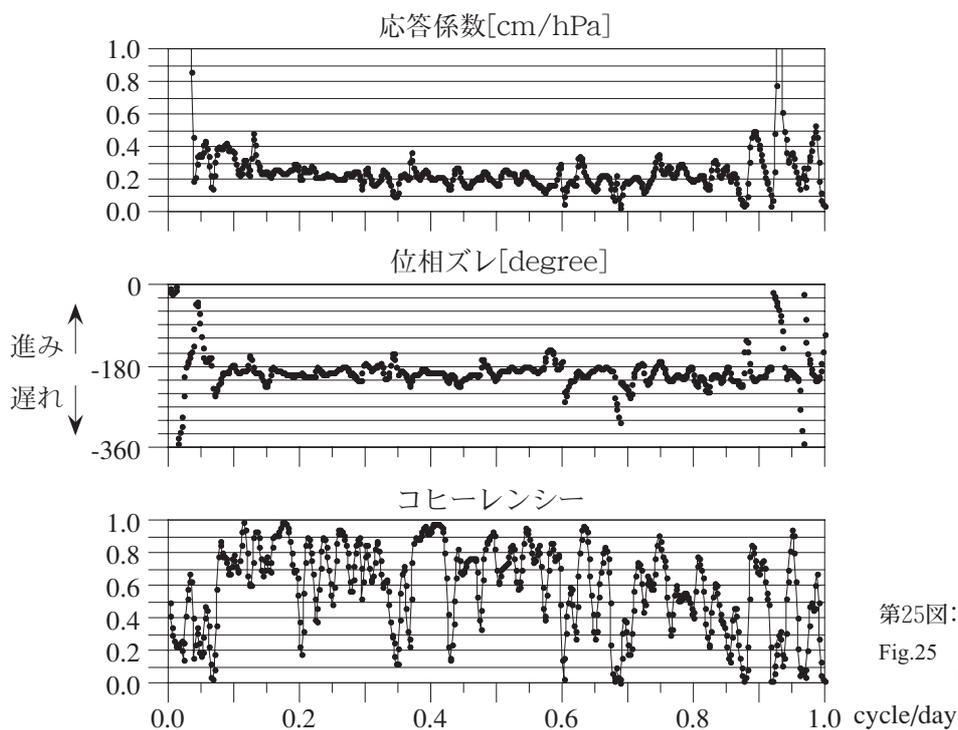
孔1(第24図):ローパスフィルター型

2000年1月25日~2001年8月10日のデータを解析した結

果,0.1~0.8 cycle/day(周期1.25日~10日)の範囲で応答があった.応答係数は短周期側でやや小さくなる傾向があり,位相は遅れである.大気圧応答の周期帯では,ローパスフィルター型の特徴を持っている.潮汐応答の結果(感度係数は $O1 \leq M2$,位相は $O1, M2$ ともやや遅れ)と大きくは矛盾しない.潮汐応答の特徴から考えて,現象(1)が現れ



第24図: 黄檗観測点孔1(OBK1).
Fig.24 The well 1 of the Oubaku station (OBK1).



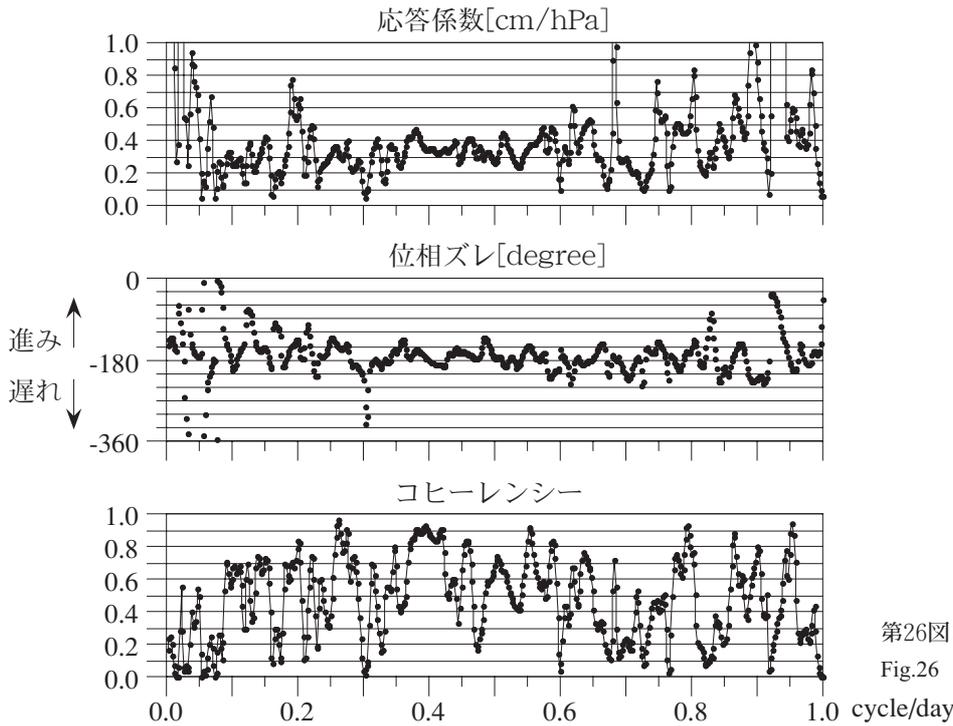
第25図: 黄檗観測点孔2(OBK2).
Fig.25 The well 2 of the Oubaku station (OBK2).

ておらず、ローパスフィルター II 型の可能性がある。

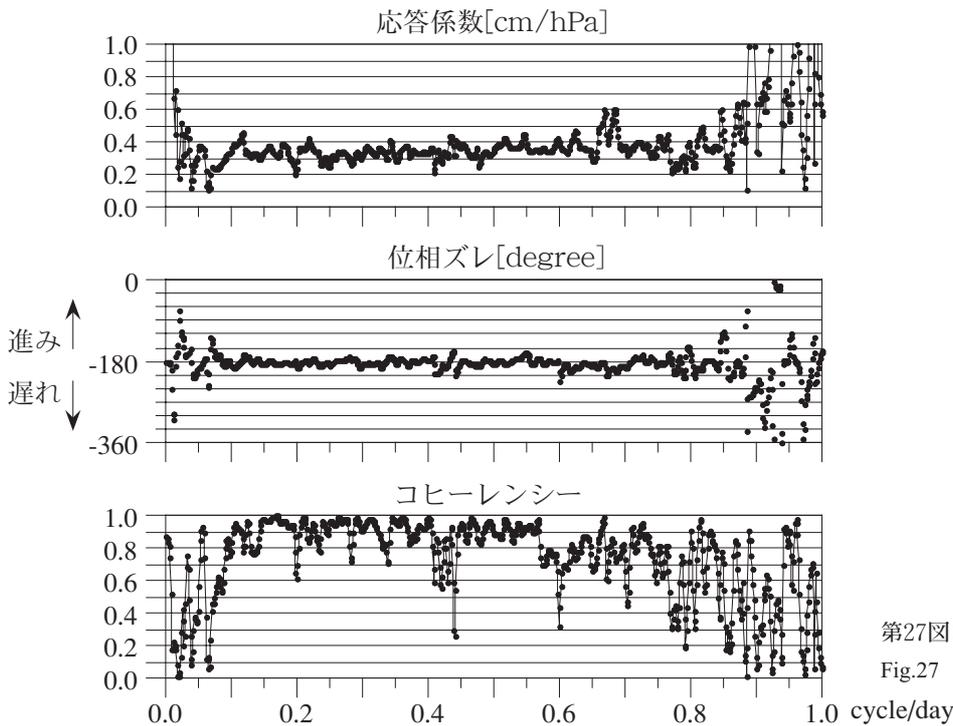
孔2(第25図):ローパスフィルター型

2000年1月25日~2001年8月9日のデータを解析した結果、応答は不明瞭であった。応答係数は短周期側でやや小さくなる傾向があり、位相は少し遅れである。応答係数・位相の特徴から、現象(1)が少し現れていると推測されるが、こ

れは井戸孔口を密閉していることと整合しない。大気圧応答の周期帯では、ローパスフィルター型の特徴を持っている。潮汐応答の結果(感度係数はO1=M2、位相はほぼズレ無し)と大きくは矛盾しない。潮汐応答の特徴から考えて、ローパスフィルター II 型の可能性も考えられる。



第26図:大原観測点(OHR).
Fig.26 The Ohara station (OHR).



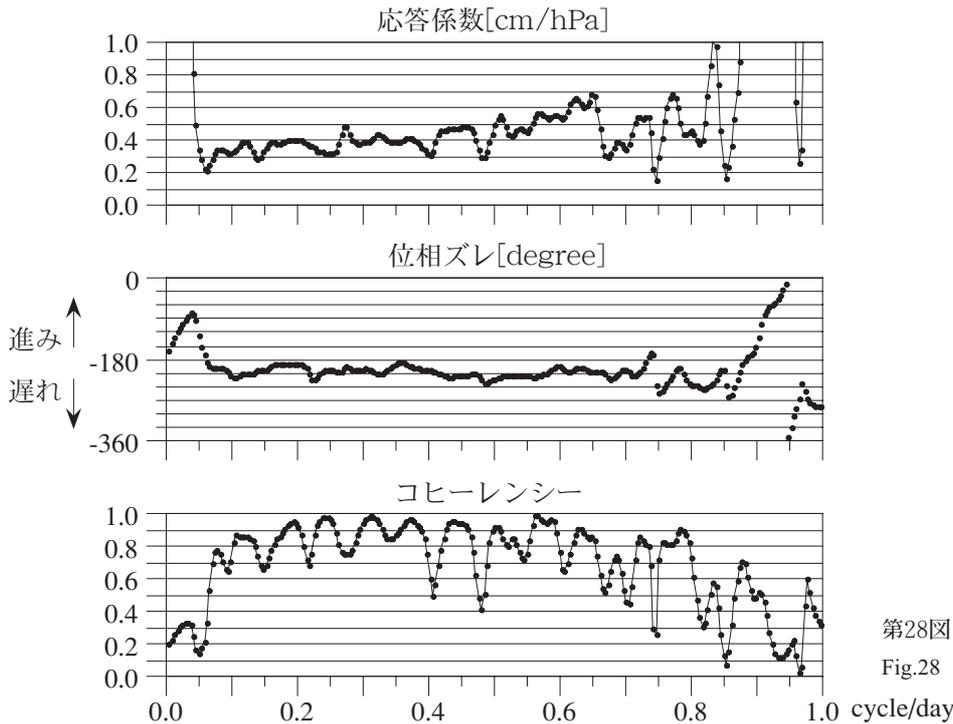
第27図:西淡観測点(SED).
Fig.27 The Seidan station (SED).

・大原観測点(第26図)

降雨の影響が大きく、降雨応答の補正を行った上で解析を試みた。2000年1月20日～2001年7月16日のデータを解析したが、相関が不十分であり、大気圧応答を推定できなかった。潮汐応答の結果は、感度係数はO1=M2、位相はO1で5度進み、M2でズレ無しであった。

・西淡観測点(第27図):フラット型

2000年3月29日～2002年4月24日のデータを解析した結果、0.1～0.6 cycle/day(周期1.7日～10日)の範囲で応答があった。応答係数は一定で、位相はほぼズレ無しである。いずれの現象も現れていないと推測できる。大気圧応答の周期帯では、フィルターとして作用していない(フラット型で



第28図:宝塚観測点(TKZ).
Fig.28 The Takarazuka station (TKZ).

ある). 潮汐応答の結果(感度係数は $O1 > M2$, 位相は $O1$ が70度遅れ, $M2$ が169度遅れ)とは整合しない. 西淡観測点が海沿いの観測点であるため, 潮汐応答については海洋潮汐の影響をうまく評価できていない可能性が高い.

・宝塚観測点(第28図):ハイパスフィルター I 型

降雨の影響が認められるため, 降雨応答補正を行った. 2002年後半以降は応答関係が改善された. 2003年5月2日~2003年12月31日のデータを解析した結果, 応答係数は長周期側で小さくなる傾向を持ち, 位相は遅れであった. 大気圧応答の周期帯では, 応答係数についてはハイパスフィルター I 型の特徴を持っている. 潮汐応答の結果(感度係数は $O1 = M2$, 位相はズレ無し)とは, 係数は整合するが, 位相は整合しない. 潮汐応答の結果は井戸孔口を密閉していることと矛盾せず, 現象(1)が現れていないことを意味する.

・天王寺観測点(第29図):フラット型

2000年7月29日~2002年10月30日のデータを解析した結果, $0.1 \sim 0.8$ cycle/day(周期1.25日~10日)の範囲で応答が非常に明瞭であった. 応答係数はほぼ一定で, 位相は若干遅れである. 位相の遅れの特徴から, 現象(1)が少し現れていると推測される. 大気圧応答の周期帯では, フィルターとして作用していない(フラット型である). 潮汐応答の結果(感度係数は $O1 > M2$, 位相は $O1$ で12度遅れ, $M2$ で30度遅れ)とは大きくは矛盾しない.

・安富北観測点(第30図):ハイパスフィルター I 型

中長期的な降雨の影響が認められる. 2000年10月11日~2002年10月2日のデータを解析した結果, $0.2 \sim 0.8$ cycle/day(周期1.25日~5日)の範囲で応答が明瞭であった. 応答係数は短周期側で大きくなる傾向がある. 位相はほぼズレ無し(若干進み)である. 短周期側で, 応答係数が大きくなる傾向があり, 位相がほぼズレ無しなので, 現象(1)が現れていない. これは井戸孔口を密閉して水圧として測定していることと整合する. 位相が少し進みなので, 現象(3)の特徴が現れている. 大気圧応答の周期帯では, ハイパスフィルター I 型の特徴を持っている. 潮汐応答の結果(感度係数は $O1 < M2$, 位相は $O1$ で17度進み, $M2$ で9度進み)と整合する.

・安富観測点

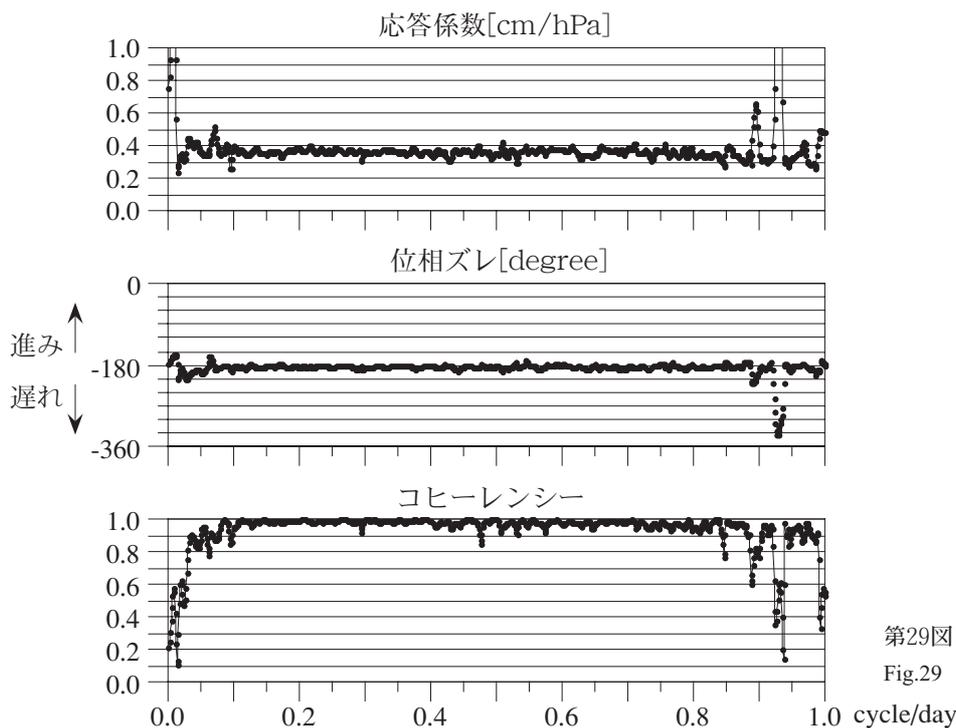
安富観測点では, 水平距離10 m以内に3本の観測井が掘削された. 孔1は他の2本よりも深い地層の地下水を観測し, 孔2と孔3の2本の観測井は同じ深さの地層の地下水を観測している(北川ほか, 2003).

孔1

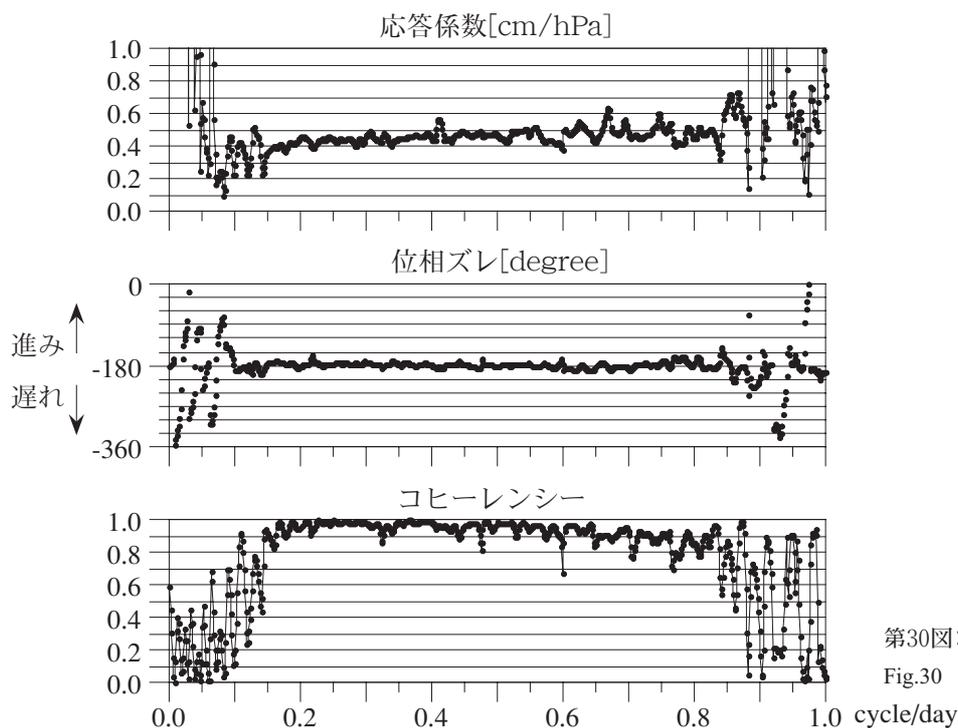
1999年前半に井戸孔口を密閉して水圧測定を開始した. しかしながら, 2000年頃から水圧が低下しており, 密閉が不完全であったと考えられる. そのあと補修を行い, 2003年12月以降は密閉ができて, 正常に測定が行われていると思われる状態になったので, データの蓄積を待って解析を行う予定である.

孔2(第31図):ハイパスフィルター I 型

2000年1月25日~2000年12月7日のデータを解析した結



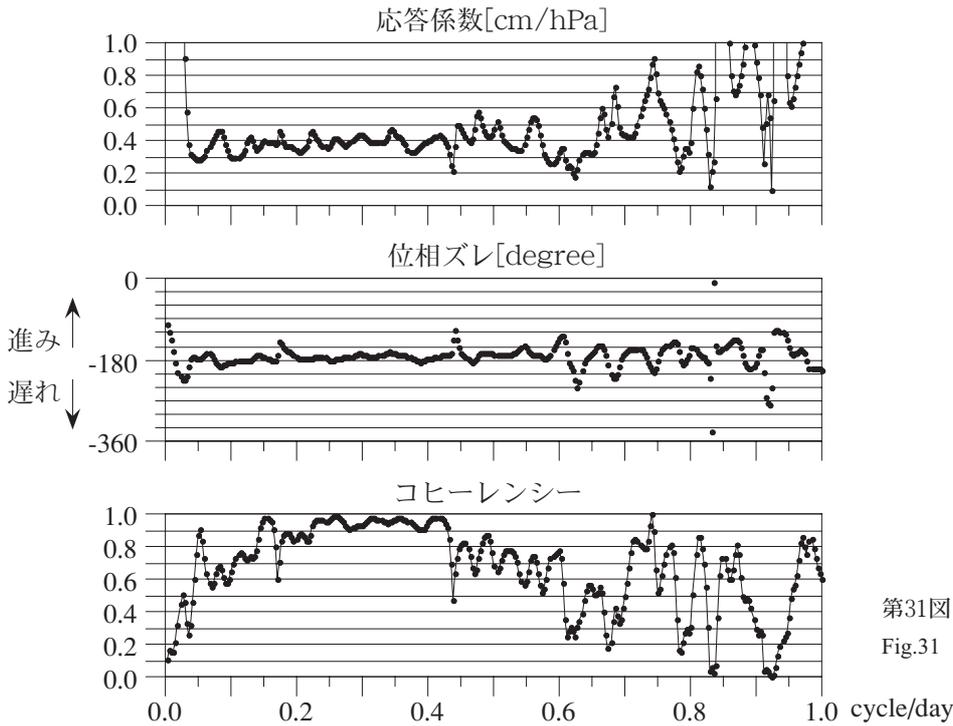
第29図:天王寺観測点(TNN).
Fig.29 The Ten-nouji station (TNN).



第30図:安富北観測点(YSK).
Fig.30 The Yasutomikita station (YSK).

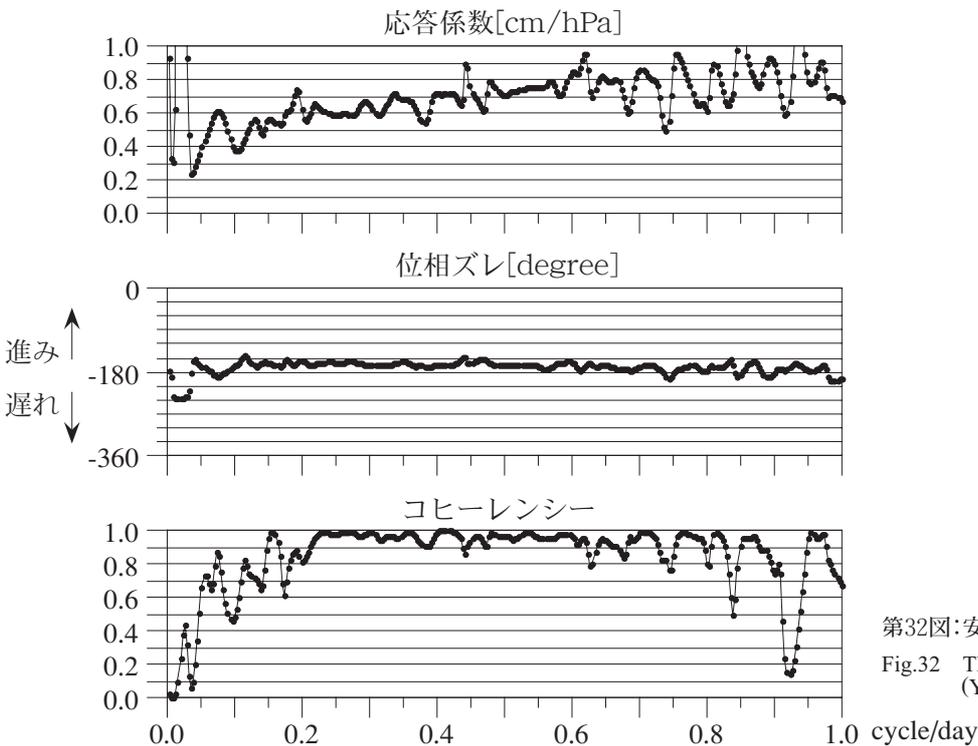
果, 0.2~0.4 cycle/day(周期2.5日~5日)の範囲で応答が明瞭であった。応答係数は不明確ながら短周期側でやや大きくなる傾向がある。位相は全体にやや進みである。短周期側で応答係数がやや大きくなる傾向があり、位相がやや進みなため、現象(1)が現れていない。これは井戸孔口を密閉して水圧として測定していることと整合する。また全

体に位相が進みなので、現象(3)の特徴が主に現れている。大気圧応答の周期帯では、ハイパスフィルターI型の特徴を持っている。潮汐応答の結果(感度係数は $O1 < M2$, 位相は $O1$ で9度遅れ, $M2$ で14度遅れ)とは、係数は整合するが、位相が整合しない。



第31図:安富観測点孔2(YST2).

Fig.31 The well 2 of the Yasutomi station (YST2).



第32図:安富観測点孔3(YST3).

Fig.32 The well 3 of the Yasutomi station (YST3).

孔3(第32図):ハイパスフィルターI型

2000年1月30日~2000年12月7日のデータを解析した結果,0.2~0.8 cycle/day(周期1.25日~5日)の範囲で応答が明瞭であった。応答係数は短周期側で大きくなる傾向がある。位相は進みである。短周期側で応答係数が大きくなる傾向があり,位相が進みなので,現象(1)が現れていない。

これは井戸孔口を密閉して水圧として測定していることと整合する。位相が進みなので,現象(3)の特徴が主に現れている。大気圧応答の周期帯では,ハイパスフィルターI型の特徴を持っている。潮汐応答の結果(感度係数はO1>M2,位相はO1で41度遅れ,M2で34度遅れ)とは整合しない。

4. 大気圧応答の特徴の考察

3節で推定した地下水位の大気圧応答から以下のことが分かった。ローパスフィルター I 型になることは井戸と帯水層の間の透水性が悪いことに対応する。このような井戸では短周期側では変化が現れにくくなるので、潮汐応答についても感度係数が小さく(特にO1よりもM2が小さい)、位相遅れも大きくなる傾向がある。地震波などの短周期の現象への応答が小さくなることが想定される。孔口を密閉して水圧として測定した場合、この効果は非常に小さくなることも分かった。一方、現象(2)は帯水層からの間隙水圧の拡散によるものであるから、現象(2)が関与する場合、帯水層の被圧度が悪いことを意味する。ローパスフィルター II 型、パイパスフィルター I 型、ハイパスフィルター II 型、バンドパスフィルター型が当てはまる。このような井戸では長期間にわたる地殻歪変化を地下水位変化として検出しにくいことが考えられる。

幾つかの観測点では、大気圧応答を推定することができなかった。大気圧変化と降雨は関連することが多いので、降雨の影響が見られる時に十分な降雨補正ができない場合、大気圧応答が明瞭には求められない。このような観測点は周期が1.1日よりも長い地殻変動の定量的な検出という点では不向きである。しかし、そのような観測点でも潮汐の応答は求まっているので、周期が1日よりも短い地殻変動の検出には使える。このように大気圧応答及び潮汐応答を調べることで、地下水観測網全体としての地殻変動検出能力を客観的に評価できる。降雨の影響が現れる過程には、降雨が荷重として働く場合、地盤の中に雨が浸透して帯水層に影響を及ぼす場合と例外的なケースとして井戸の孔口の構造上の問題により孔口から雨水が直接流れ込む場合がある。降雨が荷重として働く場合は、地下水位への影響は短期で補正しやすい。地盤の中に雨が浸透して帯水層に影響を及ぼす場合は、一度の降雨の与える影響の時空間的な範囲が明瞭でなく、中長期的に影響を及ぼす時には降雨補正は難しいことが多い。孔口から雨水が直接流れ込む場合には、その影響が大きく、降雨補正は非常に難しい。このような観測点は必要に応じて随時補修を行っている。

大気圧応答の結果と潮汐応答の結果とが整合しない場合がある。一つは解析に使用している周波数が違うことが原因である場合が考えられる。主に2日周期より長周期側を使用した大気圧応答と約半日(M2)・約1日(O1)周期を使用した潮汐応答では、影響を及ぼす現象が異なっている可能性が考えられる。また別の原因としては地層内の空隙圧の拡散の効果(現象(3))が考えられる。大気圧応答の推定結果に地層内の空隙圧の拡散の効果が大きく現れる一方、潮汐応答はその効果と無関係である。その相違の結果、大気圧応答の結果から推量した潮汐周期帯(半日周期, 1日周期)での感度係数・位相ズレが実際の潮汐応答と異なる

ことが予想される。しかしながら、それだけは説明がつかない場合も多い。その原因の一つとして考えられるのは、潮汐応答の推定精度の問題である。観測点が海岸線に近い場合に海洋潮汐の影響をうまく評価できず、理論的に推定した潮汐と実際に生じている潮汐との間に大きな違いがあることが考えられる。別の原因としては、降雨応答の補正の問題である。補正が充分でないために大気圧応答の推定に誤差・バラツキが生じていることが考えられる。また、見た目では明瞭な降雨の影響が分からず、實際上、分離が難しい場合も考えられる。更に別の原因としては、地殻の不均質性である。不均質の影響の現れ方が周波数により異なり、局所的に増幅・減衰している可能性も考えられる。

5. まとめ

産業技術総合研究所の地下水観測点のうち、近畿地方及びその周辺の観測点の地下水位データを用いて、大気圧応答の推定を行った。降雨の影響により明瞭な推定ができなかった井戸も複数あったが、地下水位は大気圧に対して観測点毎にそれぞれ特徴を持った応答を示していることが確かめられた。これらの大気圧応答の特徴は各観測点の井戸や地層の物性を反映していると推測される。地下水位の地殻歪変化に対する応答は周波数に依存することが知られている。地下水位を体積歪センサーとして考える際には、そのセンサー特性を明らかにする必要がある。地下水位の大気圧応答を用いて、井戸構造や地層の水理構造の特性を推定できるので、地下水位の地殻歪応答の周波数依存性を推量することが可能である。今後は井戸や地層の水理構造の特性を推定し、地下水位変化を用いた地殻変動の評価をより正確に行えるようにしていきたい。

謝辞: 観測に関しては、地質調査総合センターの職員をはじめ、国・地方自治体・民間の多くの方々には協力を頂いています。増田幸治氏には有益な査読コメントを頂きました。ここに記して感謝します。

文 献

- Ishiguro, M., Akaike, H., Ooe, M., and Nakai, S. (1981) A Bayesian approach to the analysis of earth tides, *Proc. 9th International Symposium on Earth Tides*, 283-292.
- 北川有一・小泉尚嗣・大谷 竜・渡辺邦彦・板場智史 (2003) 山崎断層沿いの産業技術総合研究所安富観測点で観測された顕著な地殻歪変化, *地震* **2**, 56, 245-254.
- 小泉尚嗣 (1994) 地殻歪と地殻内流体, *火山*, **39**, 169-176.
- 小泉尚嗣・高橋 誠・松本則夫・佐藤 努・大谷 竜・北川有一 (2004) 地震予知研究における水文学的・地球化学的手法の役割, *地質ニュース*, 596, 11-16.

- 小泉尚嗣・佃 栄吉・高橋 誠・横田 裕・岩田知孝・
入倉孝次郎・上砂正一・高木 清・長谷川昌志
(2002) 黄檗断層の地下構造調査, 地震2, **55**, 153-
166.
- Matsumoto, K., Sato, T., Takanezawa, T., and Ooe, M.
(2001) GOTIC2: A program for computation of
oceanic tidal loading effect, *J. Geod. Soc. Japan*,
47, 243-248.
- Matsumoto, N. (1992) Regression analysis for anomalous
changes of ground water level due to earth-
quakes, *Geophysical Research Letters*, **19**, 1193-
1196.
- 松本則夫 (1995) 地震に関連する地下水変化の検出. 時
系列解析の実際II, 朝倉書店, 218p.
- Quilty, E. G., and Roeloffs, E. A. (1991) Removal of
barometric pressure response from water level
data, *J. Geophys. Res.*, **96**, 10,209-10,218.
- Rojstaczer, S., (1988) Determination of fluid flow prop-
erties from the response of water levels in wells
to atmospheric loading, *Water Resour. Res.*, **24**,
1927-1938.
- 佐藤 努・高橋 誠・佃 栄吉・村上 尚・菅原豊松
(2000) 鈴鹿東縁断層帯における地下水観測井の新
設—北勢観測井—, 地質調査所月報, **51**, 1-16.
- 高橋 誠・松本則夫・佐藤 努・北川有一・大谷 竜・
小泉尚嗣 (2004) 産総研地震地下水観測ネットワ
ーク, 地質ニュース, 596, 17-21.
- 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.
- 佃 栄吉・小泉尚嗣・桑原保人 (2000) 地震防災対策強化
地域及び活断層近傍における地下水等総合観察研
究, 地質調査所月報, **51**, 435-445.

(受付:2004年7月20日;受理:2004年9月30日)