

## 17. 海洋潮汐の地下水並びに地盤に 及ぼす影響について I

地震研究所 小 牧 昭 三

(昭和40年10月26日発表—昭和40年12月28日受理)

### 要 旨

四日市市周辺の地盤沈下の実態を究明するために観測された地下水位、地表沈下および験潮儀の記録について、主要な変動を除いた後の週期的変動に  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $S_1$  の5つの分潮が含まれると仮定して、最小二乗法によりそれぞれの振幅、位相差を求めた。地下水位、地表沈下の位相差と、海洋潮汐のそれとの差を求めると、地下水位については、半日週潮の  $M_2$  分潮と  $S_2$  分潮、日週潮の  $K_1$  分潮と  $O_1$  分潮はほぼ同じである。地表沈下でも少しはばらつくが、やはり同様の現象が認められた。 $M_2$  分潮、 $S_2$  分潮の振幅について、地下水位、地表沈下と海洋潮汐の比をとると、それぞれ各観測井毎にほぼ等しい値を示している。地下水位については海岸に近い程大きく、内陸部に入ると小さくなり、海岸に近い第II観測点4号井では約50%の影響をうけている。地表沈下については大体  $10^{-4}$  の order で海洋潮汐の影響をうけている。また海洋潮汐および各井戸の地下水位、地表沈下のそれぞれについて  $M_2$  分潮と  $S_2$  分潮の振幅比を求めると、同一井戸では地下水位、地表沈下の値が近似しており、それらの値はいずれも海洋潮汐の値0.455に近い。これらより、海洋潮汐は、地下水は勿論、地盤に相当な影響を及ぼすことが判明した。

### 1. 序

海洋の潮位変動に影響されて地下水位あるひは地表面が昇降する現象が研究され始めてより、既に約30年も経っているが、その実態については解明されていない点が多い。

地下水位と潮位との関係については、前田競の報告<sup>1)</sup>がある。すなわち壺岸島の潮位について決められている各分潮の潮汐常数と比較するため、東京大学構内にある深さ約380mの深井戸の地下水位の観測値の中、1933年1月12日～2月9日の29日間について、調和解析を行なひ、 $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $P_1$ ,  $M_4$ ,  $MS_4$  の各分潮の振幅および位相差を決定している。併し、これらの値を用ひて森田稔<sup>2)</sup>および表俊一郎<sup>3)</sup>がそれぞれ prediction を行つて観測値と比較し、ほぼ一致することを期待したが、何れも可なりの齟齬を生じている。これは凡らく、1つには調和解析を行つたデータが、潮汐以外の要素を含

1) 前田 競「一深井に於ける水位の変化」地震 6 (1934), 275.

2) 森田 稔「東京帝国大学構内に在る深さ380米の深井の水位の変化に就て」地震 7 (1935), 395.

3) 表俊一郎「東京帝国大学構内に在る深井の水位変化」地震 8 (1936), 531.

んでいたためと、今1つには、調和解析を施した期間の短いため、各分潮が十分に分離されていない結果と考へられる。

地表面の昇降と潮位変動に関しては、宮部直巳<sup>4)</sup>が調査研究している。これによると、東京深川の数矢小学校での地表面およびすぐ近くにある元木橋での潮位の変動記録の中、1939年3月25日～4月7日、同じく5月20日～6月2日のそれぞれ2週間について、調和解析を行ひ、 $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ の4分潮の振幅および位相差を決定している。併し、何分にも解析を施した期間が短いため、上記2週間についてさえ同一分潮の振幅、位相にかなりの相違があるが、地表面の昇降の振幅は海水面の昇降の振幅の約1万分の1の程度と考へられる。

この他、和達清夫<sup>5)</sup>は、振幅が最も大きくて信頼度の高い $M_2$ 分潮について、大阪市西部における地表面、地下水位の観測記録および驗潮記録より振幅、位相差を求めて検討を加えているが、いずれにしても海洋潮汐と地下水位あるひは地表面の変動の関係については、尚多くの不明な点が解明されないままになっている。

## 2. 解析資料および解析方法

さきに、四日市市周辺の地盤沈下の実態を究明するために、沈下計、水位計の観測記録より、1日週期あるひはそれより短い週期を有つ海洋潮汐、気温あるひは太陽輻射および工業用井戸の揚水等の影響を取除いて、地下水位および地表面本来の主要な変動、すなわち zero line を Pertzev の方法を用ひて求めた。驗潮儀の観測記録についても同様にして、潮位の zero line である平均海水面を求めた<sup>6)</sup>。

この算定に用ひた値は1964年1月1日00時より1965年1月4日07時迄の毎時の観測値で、若し欠測がなければ、8864箇のデータである。そして得られた zero line の値は1964年1月1日18時より1965年1月3日13時までの8828箇となる。今、毎時の観測値よりこの zero line の値を差引くと、その中には1日より短い週期を有つ海洋潮汐、気温および太陽輻射、それに揚水による変動等が含まれている筈である。そこで今、主な海洋潮汐の分潮  $M_2$  (太陰半日週潮)、 $S_2$  (太陽半日週潮)、 $K_1$  (日月合成日週潮)、 $O_1$  (太陰日週潮)、それに海洋潮汐以外の気温および太陽輻射、揚水等によるものを週期1日をもつ  $S_1$  (気象日週潮) とし、都合5つの component が含まれていると仮定して、最小二乗法により調和解析を行つた。

この場合、欠測がなければ8828箇の観測式が得られ、これより各 component の cosine 項、sine 項、それに常数項と11箇あるので、11箇の正規方程式が導かれ、各 component の振幅と位相差が求められるのである。更にこれら振幅、位相差を用いて毎時の predic-

- 4) 宮部直巳「東京に於ける地盤沈下の研究 IV. ——潮汐気圧等の影響——」地震研究所彙報 18 (1940), 57.
- 5) 和達清夫「西大阪の地盤沈下に就いて (第2報)」日本学術振興会災害科学研究所報告 3 (1940).
- 6) 小牧昭三「揚水の地下水位並びに地表沈下に及ぼす影響について I」地震研究所彙報 44 (1966), 273.

tion を行なつたが、これは (観測値—zero line) と大体よく一致する。これらより求めた residual は考慮に入れなかつた components の変動を表わしていると考え、差支へないものであるが、これらの値は全く小さい。これは取りも直さず外部要因として仮定した  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  および  $S_1$  分潮の設定が満足すべきものであつたということになる。residual に引続いて mean square error も求めているが、これはすべて佐藤泰夫、中川一郎のプログラムを利用し、ユニコンを通して IBM 7090 により計算を行つた。

### 3. 解析結果および考察

前述のような手続きで今までに解析された観測資料について、各分潮の振幅及び 1964 年 1 月 1 日 00 時における位相差を示すと、Table 1 のようになる。尚、地下水位および地表沈下の観測値は本来すべて—であるのに、計算の都合上+として取扱つた。このため、解析結果のままの此等の位相差と海洋潮汐のそれを比較する場合、 $180^\circ$  の補正値を加えねばならぬが、地下水位および地表沈下の位相差には、かかる補正が施してある。また、これらの値の標準誤差をそれぞれ、Residual より求めた mean square error, 正規方程式の各係数を用ひて計算した。その結果は海洋潮汐、地下水位および地表沈下の何れに於いても、振幅については高々  $10^{-4}$  の order, 位相差については精々  $0.1^\circ$  である。従つて Table 1 に求められた値は最後の桁に少し不安がある程度で、精度としては満足出来るものである。

観測井全体についての値が出ていないので決定的なことを言える段階ではないが、以下興味ある問題を取上げて述べる。

先づ Table 1 の位相差を見ると、地表沈下の  $S_1$  分潮では  $-155.5^\circ \sim -168.0^\circ$  の間にあつてほぼ一定であるのに対し、地下水位の  $S_1$  分潮は相当ばらついているのに気付くのである。また、地下水位では  $S_1$  分潮の振幅は他の分潮に比べて小さいが、地表沈下では相当に大きく、すべての観測井を通じて殆んど同じ大きさと考へてよい。これから考へても、さきに考察したように<sup>7)</sup>、 $S_1$  分潮は沈下のみに見られた現象ということになり、沈下計の観測記録に現れた異常変動は、大体気温および太陽輻射に依る I 型鋼の変形に基くものと考えて差支えないといふ 1 つの確証を得たことになる。

次に海洋潮汐、地下水位、地表沈下の関係を考へる。

#### a. 位相差

これについては、観測点における仮想天体の南中時に基く補正を施してから論ずべきであるが、この補正値は、各分潮については定数であるので、これを問題にしなくてもよい。各分潮についての相互関係を比較するだけに止める。角速度  $\omega$  なる分潮は振幅、位相差がそれぞれ  $R$ ,  $\epsilon$  である場合、 $R \cos(\omega t - \epsilon)$  で表されるが、各井戸の地下水位および地表沈下の位相差  $\epsilon_i$  と海洋潮汐の位相差  $\epsilon_{o.t.}$  の差  $\epsilon_i - \epsilon_{o.t.}$ 、即ち海洋潮汐に対する遅れを求めたのが Table 2 であり、この際の標準誤差も Table 1 と同様精々  $0.1^\circ$  である。

7) 前掲 6)。

Table 1. Results obtained from the harmonic analysis after elimination of primary variation by B. P. Pertzev's method.

	Component	Ground-water level		Land surface	
		Amplitude	Phase lag	Amplitude	Phase lag
Oceanic tides		m		mm	
	M <sub>2</sub>	0.6296	-160.4		
	S <sub>2</sub>	0.2867	-158.9		
	K <sub>1</sub>	0.2410	-175.2		
	O <sub>1</sub>	0.1805	-174.1		
	S <sub>1</sub>	0.0094	158.5		
II-3	M <sub>2</sub>	0.1820	-133.1	0.2440	- 61.7
	S <sub>2</sub>	0.0809	-132.5	0.1063	- 72.1
	K <sub>1</sub>	0.0660	-163.8	0.1148	-133.0
	O <sub>1</sub>	0.0510	-162.5	0.0970	-135.8
	S <sub>1</sub>	0.0116	-177.0	0.1716	-165.9
II-4	M <sub>2</sub>	0.3049	-121.8	0.3006	- 66.2
	S <sub>2</sub>	0.1394	-119.9	0.1328	- 70.8
	K <sub>1</sub>	0.1282	-148.0	0.1521	-116.7
	O <sub>1</sub>	0.0951	-152.3	0.1189	-127.8
	S <sub>1</sub>	0.0221	-114.8	0.1366	-168.0
III-3	M <sub>2</sub>	0.1645	- 85.0	0.0646	- 27.7
	S <sub>2</sub>	0.0856	- 80.0	0.0318	5.3
	K <sub>1</sub>	0.0772	-124.7	0.0134	- 90.5
	O <sub>1</sub>	0.0475	-128.3	0.0207	-103.3
	S <sub>1</sub>	0.0818	91.0	0.2275	-160.6
I-3	M <sub>2</sub>	0.0205	15.1	0.0826	88.4
	S <sub>2</sub>	0.0085	34.9	0.0332	121.2
	K <sub>1</sub>	0.0265	- 8.3	0.0248	22.7
	O <sub>1</sub>	0.0147	- 45.2	0.0064	- 5.8
	S <sub>1</sub>	0.0721	112.5	0.2759	-155.5
I-4	M <sub>2</sub>	0.0076	83.0	0.0892	130.3
	S <sub>2</sub>	0.0031	91.9	0.0340	161.9
	K <sub>1</sub>	0.0054	- 8.3	0.0399	35.3
	O <sub>1</sub>	0.0024	- 13.3	0.0159	15.1
	S <sub>1</sub>	0.0029	64.6	0.3158	-167.7

先ず地下水位を見ると、海に近い第II観測点、第III観測点の各井戸では、M<sub>2</sub>分潮とS<sub>2</sub>分潮、K<sub>1</sub>分潮とO<sub>1</sub>分潮は大體同じである。同様な傾向は内陸部の第I観測点でも見られる。このように週期の近い分潮が、近似的な phase lag を以つて、地下水位に現れる

Table 2. Phase lag<sub>1</sub>—Phase lag<sub>0.T.</sub>

		M <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>	K <sub>1</sub>	O <sub>1</sub>	S <sub>1</sub>
Ground-water lever	II-3	27.3	26.4	11.4	11.6	24.5
	II-4	38.6	39.0	27.2	21.8	86.7
	III-3	75.4	78.9	50.5	45.8	292.5
	I-3	175.5	193.8	136.8	128.9	314.0
	I-4	243.4	250.8	166.9	160.8	266.1
Land surface	II-3	98.7	86.8	42.2	38.3	35.6
	II-4	94.2	88.1	58.5	46.3	33.5
	III-3	132.7	153.6	84.7	70.8	40.9
	I-3	248.8	280.1	197.9	168.3	46.0
	I-4	290.7	320.8	210.5	189.2	33.8

ということは、地下水位が海洋潮汐の影響を直接的に受けていると考えられる。

地表沈下は地下水位程規則性はないが、それでも半日週潮の M<sub>2</sub> 分潮と S<sub>2</sub> 分潮、日週潮の K<sub>1</sub> 分潮、O<sub>1</sub> 分潮は、それぞれ、海洋潮汐に対して近い phase lag を以つて現れると考へられる。このことは次の振幅でも論じられるが、海洋潮汐に基く地下水位の変動が、ある time lag を以つて地盤に影響し、更に地表沈下に変動が現れると考へて良いと思はれる。

b. 振 幅

先づ海洋潮汐が各井戸の地下水位にどの程度影響するかを調べた。茲では振幅が大きく信頼度の高い M<sub>2</sub> 分潮と S<sub>2</sub> 分潮の振幅について考察を進める。

Table 3 には、海洋潮汐の M<sub>2</sub> 分潮の振幅、S<sub>2</sub> 分潮の振幅で各地下水位の M<sub>2</sub> 分潮、S<sub>2</sub> 分潮のそれを除した値を示してある。これによると、大々の井戸については M<sub>2</sub> 分潮と S<sub>2</sub> 分潮に関する値がほぼ等しいのが認められる。しかも、第II観測点4号井では50%近くが海洋潮汐の影響を蒙っている。同じく3号井では30%近く、また第III観測点3号井でも30%近くの影響を受けている。内陸部になると当然のことながら、海洋潮汐の影響は小さくなり第I観測点4号井では約1%、3号井では約3%の影響を受ける。尚、

Table 3. Amplitude<sub>G.W.</sub>/Amplitude<sub>0.T.</sub>

	M <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>
II-3	0.289	0.282
II-4	0.484	0.486
III-3	0.261	0.298
I-3	0.033	0.030
I-4	0.012	0.011

Table 4. Amplitude<sub>L.S.</sub>/Amplitude<sub>0.T.</sub>

	M <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>
	×10 <sup>-3</sup>	×10 <sup>-3</sup>
II-3	0.387	0.371
II-4	0.477	0.464
III-3	0.103	0.111
I-3	0.131	0.112
I-4	0.141	0.119

Table 3 の値の標準誤差は何れも高々  $10^{-4}$  の order であるので上の考察を行ふには差支へないものと考へられる。

同様のことを地表沈下について施したものが Table 4 に示してあり、この際の標準誤差は  $10^{-7}$  の order である。これによると、地表沈下も地下水位と同様に、それぞれの井戸についての  $M_2$  分潮および  $S_2$  分潮に関する値はほぼ等しく、またすべて  $10^{-4}$  の order であり、宮部直巳および和達清夫の求めた値と合致する<sup>8)</sup>。海洋潮汐の影響の大きいのは、第II観測点で、4号井は  $0.47 \times 10^{-3}$ 、3号井は  $0.36 \times 10^{-3}$  である。他の観測点ではいづれも  $0.1 \times 10^{-3}$  程度である。

次に海洋潮汐および各井戸の地下水位、地表沈下のそれぞれに於いて、 $S_2$  分潮の振幅を  $M_2$  分潮の振幅で除した値を Table 5 に示してある。これらの値も何れもその標準誤差は  $10^{-4}$  の order であり、これらの数値は信用出来るものである。

Table 5. Amplitude  $s_0$ /Amplitude  $M_2$

	O. tide	II-3	II-4	III-3	I-3	I-4
Ground-water level	0.455	0.450	0.458	0.518	0.416	0.411
Land surface		0.436	0.443	0.492	0.390	0.381

これによると、少しのばらつきはあるが、ほぼ同じ値を示している。特に地下水位についての値は海洋潮汐のそれに近似しており、また同一の井戸での地下水位、地表沈下の値が近似していることは注目し得る所である。このことより、海洋潮汐は地下水位に影響を及ぼすばかりでなく、地下水を通して地表沈下、取りも直さず、地盤に影響をも与へていると考へられる。

#### 4. 結 語

以上、地下水並びに地盤に与へられる海洋潮汐の影響について考察した所によると、海洋潮汐は、地下水は勿論、地盤にも相当の影響を及ぼすことがほぼ判明した。1号井、2号井等浅い井戸に就いての解析結果も併せて検討した上で、更に詳細な事柄までも論じたと思つている。

終りにこの研究に関して終始、御激励、御援助を賜りました吉山良一教授に衷心より厚く御礼申上げる。また龍大な観測資料の解析について、佐藤泰夫教授、京都大学中川一郎助教授から頂いた、懇切なる御指導に対して深く感謝する次第である。最後に貴重な観測資料を御提供頂いた、三重県四日市港務局、北伊勢地盤沈下調査会、特に種々の御協力を頂いた同会事務局、三重県工業課の岡本正之課長、谷村和郎技師に対して厚く感謝の意を表する次第である。

8) 前掲 4) 及び 5)

17. *On the Influence of Oceanic Tides upon Ground-Water and Surface Layer of Land, I.*

By Shawzou KOMAKI,  
Earthquake Research Institute.

1. Introduction.

For a number of years the influence of oceanic tides upon ground water and surface layer of land has been known. By comparing harmonic constants of a component of oceanic tides with those of the same component of periodic fluctuations of ground-water level or of land surface, it was concluded by some investigators that oceanic tides exerted some influence on both phenomena. However, their discussions are not always sufficient, which may be due to a short period for harmonic analysis and imperfection of eliminating zero line.

As mentioned in a previous paper, available data are hourly observed values during about a one year period at 00 hour 1st Jan. 1964 to 07 hours 4th Jan. 1965 in convection with ground-water level and land surface observed on observation wells in the Yokkaichi area. Zero line was eliminated from all the hourly observed values by the method proposed by B. P. Pertzev which was ascertained to be excellent by many investigators.

In the following the detailed considerations about the influence of oceanic tides upon ground water and surface layer of land are discussed.

2. Harmonic analysis.

Variations of both the ground-water level and the land surface observed on the observation wells are generally composed of two parts. That is, one is a primary variation with long period due probably to ground-water withdrawal only, and the other is a variation caused by oceanic tides, meteorological and other factors, such as air temperature, solar radiation and daily withdrawal, with periods of about one day or less. In the previous paper, the primary variations, namely zero lines, of both the ground-water level and the land surface on each observation well were discussed, after eliminating effects of factors with short periods by applying Pertzev's method. On the contrary, in the present paper, the variation due to oceanic tides, meteorological and other factors is investigated in detail, after getting rid of the zero line.

After eliminating the zero line, the hourly values of both the ground-water level and the land surface were harmoniously analysed by the method of least squares into components, of which periods are the same as those of oceanic tidal components —  $M_2$  (principal lunar semi-diurnal component),  $S_2$  (principal solar semi-diurnal component),  $K_2$  (luni-solar declinational diurnal component),  $O_1$  (lunar declinational diurnal component) and  $S_1$  (meteorological diurnal component)—, in order to obtain harmonic constants. These hourly values used in each calculation range from 18 hours 1st Jan. 1964 to 13 hours 3rd Jan. 1965, and are 8828 in number, assuming there is no omission in recording. Calculations are also carried out by the 'IBM-7090' as well as the calculations of determining the zero line. In the same way, calculations are carried out concerning the tide curve observed at the tidal station which is about 200 metres away

from the 2nd observation station.

From the harmonic constants, hourly expected values, hourly residuals—differences between the hourly expected values and the hourly observed values eliminating the zero line—, and a mean square error were calculated in the course of the program calculating the harmonic constants. Both the residuals and the mean square error are very small. It becomes evident that the amplitudes of the components which are not discussed are too small to be expected of deducing any significant results from the observational data.

### 3. Discussion.

In Table 1 are shown the observed amplitude and the phase lag at 00 hour 1st Jan. 1964 of each component obtained by harmonic analysis. A standard error of each harmonic constant computed from the mean square error and coefficients of normal equations on method of least squares is sufficiently small. Namely, the error of each amplitude is of the order of  $10^{-4}$ , and one of every phase lag is of the order of  $0.1^\circ$  at the most.

Concerning  $S_1$ -component, a glance at Table 1 shows that the amplitudes are fairly small as compared with those of the other components and the phase lags scatter all range about the ground-water level. On the other hand, for the land surface, the amplitudes are considerably large and the phase lags distribute around a certain value, that is  $-155^\circ \sim -168^\circ$ . It seems supposedly that  $S_1$ -component has a deep significance on the land surface but not on the ground-water level. From considerations in the previous paper, however, the phenomenon is believed to be ascribed to bending of the steel beam on which only a measuring apparatus of subsidence is attached, by expansion due to air temperature and solar radiation.

In the following, discussions concerning relations between oceanic tides and the ground-water level or the land surface are described for the deeper observation wells of the three stations of which calculations are completed.

1. Phase lag. In Table 2 are given different values in phase lag between each component of oceanic tides and that of the ground-water level or of the land surface on the respective observation wells. Regarding ground-water level, the different values in phase lag are similar between the two semi-diurnal components,  $M_2$ -component and  $S_2$ -component, and between the two diurnal components,  $K_1$ -component and  $O_1$ -component, on the individual well. This relation on phase lag is found in the land surface too, though it is some worse in similarity.
2. Amplitude. With regard to  $M_2$ -component and  $S_2$ -component, ratios in amplitude between the ground-water level and oceanic tides on each observation well are shown in Table 3. A similar ratios between the land surface and oceanic tides are shown in Table 4. The influence in amplitude of oceanic tides on the ground water is 30~50% on the wells near the coast and about 1~3% on the inland wells, and that on the land surface is of the order of  $10^{-4}$ . In Table 5 are shown ratios in amplitude of  $S_2$ -component as to oceanic tides, the ground-water level and the land surface on each well. These ratios distribute around the ratio about oceanic tides, 0.455.

From the significant results above-mentioned, it can be concluded that oceanic tides have a direct influence upon both ground water and surface layer of land.