

## 埋込式体積歪計による地球潮汐の観測\*

福留篤男\*\*

Tidal Observation by means of Borehole Volume Strainmeters

A. Fukudome

(Earthquake Prediction Information Division, J. M. A.)

The earth tides are investigated using the data of Borehole volume strainmeters installed by J. M. A. in Tokai and Southern Kanto Districts.

The spectral analysis shows that the observed volumetric strains are highly influenced by the environmental characteristics of each station.

In general, observed amplitudes of earth tides are small at the stations where the sensitivity to the variation of atmospheric pressure is high, and large at the stations where the sensitivity to the seismic wave (Rayleigh wave with a period of 40 sec.) is high.

As for the  $M_2$ , there is a difference of 260 times between the largest amplitude and the smallest one.

### § 1 はじめに

大規模な地震の前兆現象を捕捉し、地震予知に結びつけるため、気象庁では東海および南関東地域に埋込式体積歪計(以下、体積歪計と略す)を設置して、地殻体積歪の連続観測を実施している。体積歪計も、ほかの地殻変動の観測計器と同様、立地条件、岩盤の性質、海洋潮汐の影響、気象の擾乱、岩盤との結合、地下水の変動など様々な環境条件の影響を受けている。この環境条件の差異は、そこで得られる観測値に影響を及ぼすため、各観測地点の環境条件の把握は焦眉の問題であるといえよう。すでに、古屋ら(1983)は気圧変化と遠地震波に対する体積歪の応答から、これらの環境条件の一部について調査している。

今回、環境条件に関する調査の一環として、体積歪計で観測される潮汐変化を解析し、それに対する応答と環境条件の関わりについて調べた。このように、いろいろな現象に対する応答を知ることは、各地点の環境条件の把握に役立つばかりでなく、そこで得た観測結果の解釈にも有益であると考えられる。

### § 2 観測

地震の前兆には各種の現象がある。その中には、明瞭な地殻変動が生じた報告もあり(例えば、茂木(1982))、地殻変動の監視は重要な観測要素の一つになっている。この目的のため体積歪計、伸縮計、傾斜計など各種の計器で連続観測が続けられている。一般に、地震の前兆を捕捉するには、予想される震源域付近に、なるべく多くの観測計器を設置するのが有効である。この点、体積歪計はセンサーの設備が横穴式の計器に比べ比較的簡単であり、観測網の展開が容易であるという利点を持っている。

現在、気象庁では東海および南関東地域の31ヶ所に体積歪計を設置して、テレメータ方式で観測を行っている。Fig.1にその観測地点の配置を示す。なお、気圧変化に起因する歪変化を補正するために榛原、富津の2地点に気圧計が設けてある。

体積歪計で観測される地殻変動の中には、地殻の永年歪などの長周期変動と、気象の擾乱や地震波などによる短周期変動とを含んでいる。この振幅、周期の異なる変化を正確に、また効率よく観測するため、時間単位から永年変化までの長周期変動を対象にした差動変換器出力(DC, DT)と、これより感度が約100倍高く地震波などの短周期変動を対象にした短周期出力(Ac, Bm)の2つに分けて記録している。両成分のフィルター特性をFig.2に示す。

本報告では、地球潮汐の解析および気圧変化(周期

\* Received Mar. 22, 1983

\*\* 気象庁地震予知情報課

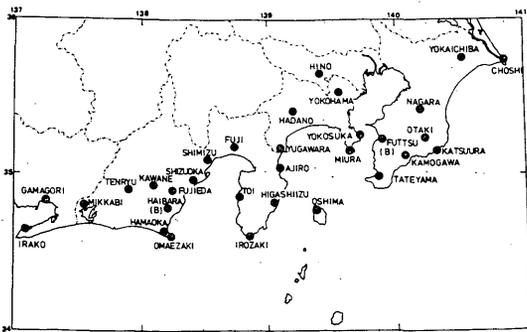


Fig. 1 Location map of the borehole volume strainmeters.

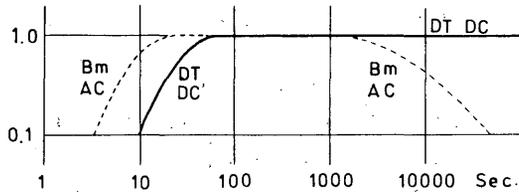


Fig. 2 Frequency response curves of instruments.

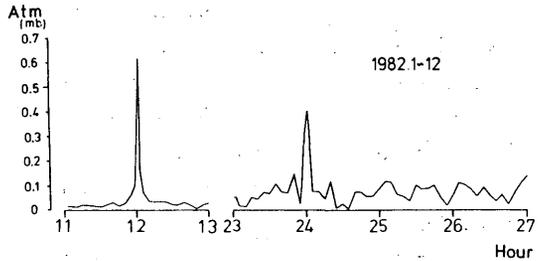


Fig. 3 Amplitude spectra of atmospheric pressure variations at Haibara.

30~80時間)による出力は差動変換器出力、また遠地地震の表面波(周期40秒)の解析には短周期出力を用いている。

ところで、地殻変動は気象の擾乱によるノイズを含んでいる。その中で、特に気圧変化と降水の影響は見逃せない。気圧変化が体積歪に及ぼす影響は、例えば1mbの気圧変化に対し $0.1 \sim 2.0 \times 10^{-8}$ 程度の変動が認められる(楡皮ら, 1983)。また、気圧の半日および1日潮などの潮汐成分(Fig.3)は地球潮汐と同じ、あるいは極く接近した周期をもっているため、あらかじめ気圧の影響を除いておく必要がある。本報告では、東海地域は榛原、南関東地域は富津の気圧をそれぞれ用い、ほかの地点においても同時刻、同様な気圧変化が生じたものとして楡皮ら(1983)の方法によって、気圧変化の影響を除いた。このため榛原、富津以外の地点では気圧の影響が完全に除かれていない可能性がある。一方、降水の影響は三ヶ日で顕著であり、100mm以上の降水に対して $10^{-6}$ もの変化を生じるが、ほかの地点では比較的小さいようである。

今回の解析期間は1カ年として、1982年1月1日00時00分から同年12月31日23時00分(JST)の毎時の値を用いた。なお、館山は計器不安定のため同年7月1日00時00分から10月24日23時00分(JST)の値を使用した。

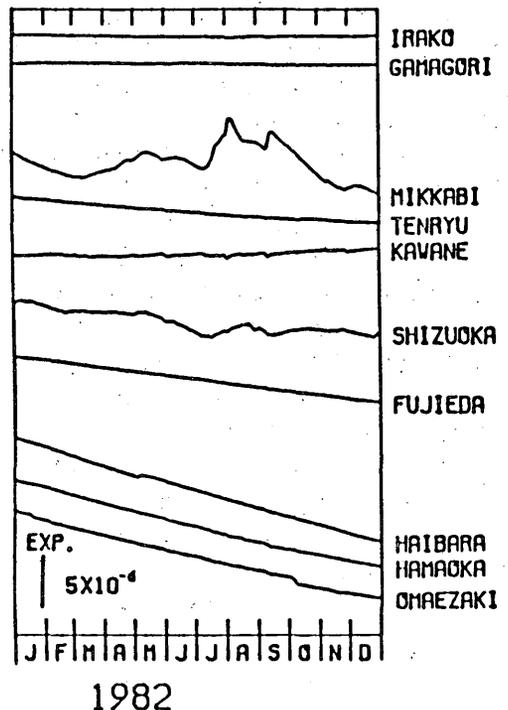


Fig. 4-1 Daily mean values are plotted.

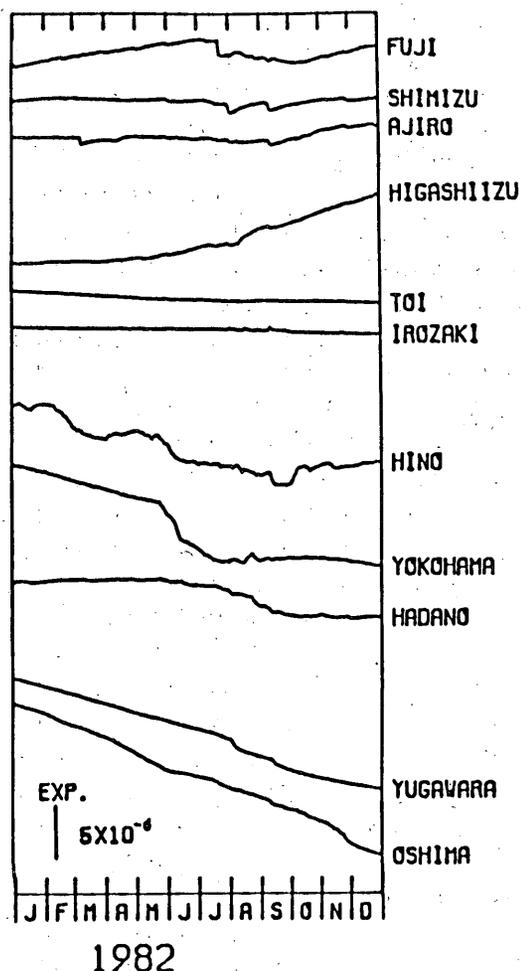


Fig. 4-2 Daily mean values are plotted.

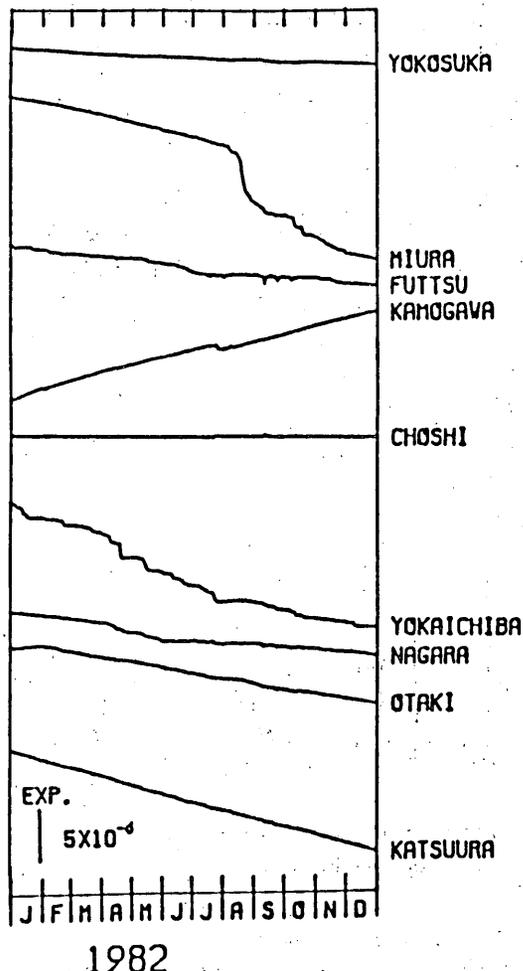


Fig. 4-3 Daily mean values are plotted.

測は免れない。欠測は現地記録によって、または短時間のものは前後のデータから推察して修正を行ったが、それでも資料の一部、解析期間の0.5%程度は解析に適さないデータが含まれている。なお解析期間中、計器の感度に目立った変化の生じた地点は認められなかった。

### §3 地球潮汐に関する解析

#### 1) 地球潮汐分潮の検出

この調査では、地球潮汐の解析にフーリエ解析法と最小二乗法を用いた。前者は分潮の仮定をせずに解析を行えるが欠測があってはならない。後者は、あらかじめ分潮を仮定する必要があるが、欠測があっても適用できる。このように、両解析法は一長一短があるので、まず全観測点についてフーリエ解析法によって対象とする半日および一日潮付近のスペクトルを求め、

それから各分潮を検出した。そして、多くの地点で検出された分潮の存在を仮定して、最小二乗法によって振幅と位相を求めた。データはドリフトを除いたあと Fig.5 の特性を示すフィルターを適用している。

#### ① フーリエ解析法による解析

フーリエ解析による解析結果の一例を Fig.6 に示す。これは藤枝についての結果であるが  $K_2$ ,  $S_2$ ,  $M_2$ ,  $N_2$ ,  $K_1$ ,  $P_1$ ,  $O_1$ ,  $Q_1$  の8分潮が検出されている。さらに、 $L_2$  (12時間 11.5分),  $J_1$  (23時間 5.9分),  $M_1$  (24時間 50.0分) などに相当する小さいピークが認められる。上記の8分潮がすべて検出できたのは12地点である。また、一日潮付近でよく接近している  $K_1$ ,  $S_1$ ,  $P_1$  の分離は18地点でできた。しかし、八日市場では最も振幅の大きい  $M_2$  を含め、明瞭な分潮がほとんど認められなかったほか、浜岡、大多喜、長柄などにおいても二、三の分潮しか分離できなかった。

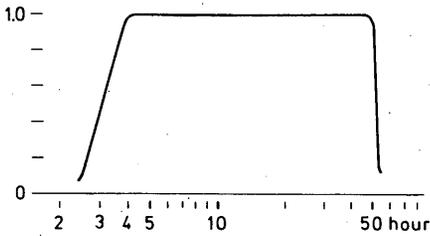


Fig. 5 Response of the band pass filter used in the present analysis.

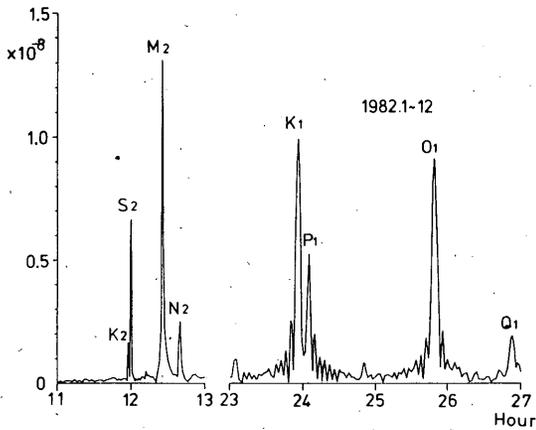


Fig. 6 Spectra of volume strain data for 1982 at Fujieda.

## ② 最小二乗法による解析

ここでは、上記8分潮のほか気象変化の項である  $S_1$  を含めた9分潮について解析した。このうち、主要4分潮の振幅を、同期間の固体潮汐の理論値との比および  $M_2$  とほかの分潮との比とともに Tab.1 に示した。固体潮汐の理論値はすべての地点で Love 定数  $h=0.60$ ,  $k=0.24$ , 志田定数  $l=0.08$ ,  $a \cdot dh/dr = -1.40$  と仮定して小沢(1974)の式によって計算したものを観測値の解析と同様、最小二乗法によって解析した。なお、フーリエ解析法によって分潮のピークが小さく不明瞭なもの、および  $K_1$ ,  $S_1$ ,  $P_1$  の分離ができなかった  $K_1$  にはそれぞれ\*, \*\*印を付した。これらの分潮の値は他に比べて精度がおとる。各分潮の振幅の最も大きい地点と最も小さい地点の振幅比は  $M_2$  において260倍、 $O_1$  において170倍になっている。すでに述べたとおり榛原、富津以外の地点は気圧変化の影響が残っている可能性がある。この影響を完全に除けば、特に  $S_2$  の振幅はさらに小さくなるだろう。

各分潮の位相および固体潮汐の理論値との位相差を Tab.2 に示す。各分潮の位相は、解析開始時刻から振

幅が最大(ここでは膨張)になるまでの時間を角度で示したものである。

## 2) 環境条件の影響

Tab.1~2の振幅と位相の特性から、約半分の観測点では固体潮汐の理論値と大きくくいちがっている。そのうえ、ごく近接している観測点で解析結果が大きく異なっている場合がある。例えば、御前崎と浜岡は体積歪の観測点の中で最も近接(距離7km)しており、これに榛原が隣接している(Fig.1)。ところが、Tab.1~2に示すように御前崎の位相、浜岡の振幅と位相は固体潮汐の理論値と大きくくいちがっている。この3地点における半日および1日潮付近のスペクトルを Fig.7 に示した。御前崎、榛原の振幅は固体潮汐の理論値に比べ、やや小さいものの明瞭な分潮が認められる。一方、浜岡はほかの2地点に比べて振幅が小さく、このうち  $S_2$ ,  $S_1$  は気圧変化の影響を含んでいる可能性もあり、いうならば明瞭な分潮はほとんど認められない。このように、距離が7km離れたところでスペクトルの様子が一変して、地球潮汐の明瞭な分潮がほとんど認められなくなるのは大変興味深いことである。この3地点における2カ月間の観測値および気圧補正後の値を気圧値とともに Fig.8 に示す。各観測値には、気圧が高い時期に収縮、低い時期に膨張する気圧変化に対応する変動が認められ、また永年歪、短周期変動ともよく類似している。気圧補正後の様子をさらによくみるため Fig.8の一部を拡大して Fig.9 に示した。御前崎と榛原は満月や新月の時期に大きく、その中間の時期に小さい、いわゆる潮汐変化が認められる。しかし、浜岡では潮汐変化はみられない。Fig.10に満月の頃の1日半の気圧補正後の値と固体潮汐の理論値を示した。この図からも御前崎の潮汐変化は理論値とほぼ逆位相であり、榛原は同位相になっていることがわかる。

このように振幅、位相のくいちがう原因は、各体積歪計の分解能、安定度など性能のばらつきは極めて小さく一様であることから、各観測点の環境条件の違いによるものと考えられ、例えば、(1)観測点周辺の地殻の性質、(2)岩盤との結合、(3)海洋潮汐、(4)気象の擾乱などの影響があげられる。

## ① 地殻の性質および岩盤との結合

地球潮汐の振幅が小さい、あるいは位相差が大きい地点は岩盤とセンサーの結合が悪い可能性と地殻自体の性質に起因するもの、例えば地殻の異方性、非弾性的ふるまい、あるいは局部的破壊帯の存在などの影響等が考えられる。ここでは、岩盤との結合を含めた地殻の性質をポアソン比の違いによって表し、それが地

Tab.1 Amplitudes of  $S_2$ ,  $M_2$ ,  $K_1$ , and  $O_1$  constituents.

Station Number	Station name	$S_2$			$M_2$		$K_1$			$O_1$		
		$A_0$ ( $\times 10^{-9}$ )	$A_0/A_c$	Ratio to $M_2$	$A_0$ ( $\times 10^{-9}$ )	$A_0/A_c$	$A_0$ ( $\times 10^{-9}$ )	$A_0/A_c$	Ratio to $M_2$	$A_0$ ( $\times 10^{-9}$ )	$A_0/A_c$	Ratio to $M_2$
1	IRAKO	7.38	1.17	0.40	18.48	1.36	12.17	1.13	0.66	11.46	1.50	0.62
2	GAMAGORI	6.86	1.08	0.44	15.54	1.13	12.83	1.17	0.83	12.14	1.57	0.78
3	MIKKABI	4.96	0.79	0.48	10.28	0.75	5.34**	0.49	0.52	7.28	0.95	0.71
4	TENRYU	6.00	0.89	0.42	14.30	0.98	10.93	0.94	0.76	10.57	1.28	0.74
5	KAWANE	9.02	1.34	0.46	19.67	1.36	13.83	1.18	0.70	13.24	1.60	0.67
6	HAMAOKA	0.65	0.10	1.31	0.50	0.04	0.089**	0.01	0.18	0.66*	0.09	1.33
7	OMAEZAKI	5.97	0.93	0.72	8.31	0.60	4.99	0.45	0.60	3.08	0.40	0.37
8	HAIBARA	3.61	0.56	0.42	8.51	0.62	5.28	0.48	0.62	5.49	0.70	0.64
9	FUJIEDA	6.87	1.08	0.47	14.58	1.06	10.06	0.91	0.69	9.20	1.18	0.63
10	SHIZUOKA	7.57	1.21	0.49	1.54	0.11	9.13**	0.84	5.92	2.22*	0.29	1.44
11	SHIMIZU	8.72	1.37	0.44	19.68	1.43	14.39	1.29	0.73	13.09	1.66	0.67
12	FUJI	3.21	0.47	0.76	4.22	0.28	2.95**	0.25	0.70	4.59	0.54	1.09
13	TOI	24.65	3.77	0.44	55.53	3.92	30.34	2.68	0.55	24.79	3.10	0.45
14	IROZAKI	60.38	9.38	0.46	131.42	9.43	82.90	7.52	0.63	64.03	8.21	0.49
15	HIGASHIIZU	6.26	0.94	0.45	13.97	0.97	8.72	0.76	0.62	9.74	1.20	0.70
16	AJIRO	2.29	0.36	0.26	8.65	0.63	6.27	0.56	0.72	4.56	0.58	0.53
17	YUGAWARA	9.59	1.42	0.43	22.08	1.51	13.64	1.15	0.62	12.14	1.45	0.55
18	HADANO	4.20	0.62	2.24	1.88	0.13	1.24**	0.10	0.66	0.75*	0.09	0.40
19	HINO	10.25	1.57	4.76	2.16*	0.15	3.59**	0.31	1.66	5.60*	0.68	2.60
20	YOKOHAMA	0.61*	0.10	0.33	1.83	0.13	1.75**	0.16	0.96	2.06*	0.26	1.13
21	YOKOSUKA	4.22	0.68	0.62	6.82	0.50	4.41	0.40	0.65	3.15	0.41	0.46
22	MIURA	5.30	0.83	0.64	8.32	0.60	6.25	0.56	0.75	3.52	0.45	0.42
23	OSHIMA	12.66	1.85	0.39	32.07	2.17	24.78	2.11	0.77	20.19	2.43	0.63
24	FUTTSU	2.55	0.41	0.92	2.77	0.20	1.67*	0.15	0.60	1.49*	0.19	0.54
25	TATEYAMA	4.82	0.79	1.54	3.12	0.23	3.53	0.30	1.13	1.47	0.19	0.47
26	KAMOGAWA	3.26	0.52	0.51	6.34	0.47	3.62	0.33	0.57	3.12	0.40	0.49
27	KATSUURA	19.83	3.19	0.45	43.92	3.26	26.98	2.48	0.61	21.94	2.85	0.50
28	OTAKI	0.98	0.16	0.97	1.01	0.07	1.16*	0.10	1.15	0.77*	0.10	0.76
29	NAGARA	0.45	0.07	0.35	1.29	0.09	1.01*	0.09	0.78	0.50*	0.06	0.39
30	YOKAICHI	0.47*	0.08	0.35	1.35*	0.10	3.34*	0.30	2.47	0.38*	0.05	0.28
31	CHOSHI	2.12	0.34	0.57	3.72	0.27	0.83**	0.07	0.22	0.79	0.10	0.21

Notes.  $A_0$ : Observed amplitude

$A_c$ : Calculated amplitude

\* : No earth tides was detected from fourier analyses.

\*\* :  $K_1$ ,  $S_1$  and  $P_1$  constituents were not identified from fourier analyses.

Tab. 2. Phase and phase differences  $\varphi_0 - \varphi_c$  of  $S_2$ ,  $M_2$ ,  $K_1$  and  $O_1$  constituents.

Station Number	Station name	$S_2$		$M_2$		$K_1$		$O_1$	
		$\varphi_0$	$\varphi_0 - \varphi_c$						
1	IRAKO	3.4	3.8	143.8	13.8	314.3	-2.5	85.9	3.8
2	GAMAGORI	356.3	-2.9	138.1	8.4	311.7	-4.9	83.3	1.4
3	MIKKABI	312.6	-46.0	139.0	9.9	326.8	10.5	83.6	2.0
4	TENRYU	1.0	3.0	128.2	-0.2	319.5	3.5	84.5	3.2
5	KAWANE	359.8	2.2	135.7	7.7	308.8	-7.0	78.9	-2.2
6	HAMAOKA	198.6	-158.8	80.8	-47.0	87.2	131.5	93.4	12.4
7	OMAEZAKI	239.2	-118.1	339.9	-147.8	176.7	-138.9	279.0	-161.9
8	HAIBARA	0.4	3.1	131.3	3.5	321.2	5.6	80.8	-0.1
9	FUJIEDA	354.9	-2.4	128.9	1.2	318.7	3.1	84.3	3.4
10	SHIZUOKA	8.6	11.7	89.9	-37.5	303.2	-12.2	48.4	-32.3
11	SHIMIZU	5.4	8.7	131.9	4.8	317.5	2.2	79.9	-0.7
12	FUJI	345.6	-10.7	135.4	8.7	327.4	12.3	72.8	-7.6
13	TOI	11.7	15.5	120.1	-6.5	327.0	11.9	76.9	-3.5
14	IROZAKI	12.6	16.6	117.3	-9.2	323.0	8.0	67.6	-12.7
15	HIGASHIIZU	356.7	1.1	131.2	5.1	324.5	9.7	73.8	-6.3
16	AJIRO	308.9	-46.6	94.5	-31.5	0.1	45.4	86.0	4.0
17	YUGAWARA	344.0	-11.5	123.1	-2.9	313.9	-0.8	78.0	-2.0
18	HADANO	290.9	-64.4	162.1	36.3	322.6	8.0	190.9	111.0
19	HINO	228.3	-126.1	1.1	-123.8	65.2	111.0	268.0	-171.5
20	YOKOHAMA	290.6	-64.0	114.4	-10.7	343.6	29.3	75.7	-3.9
21	YOKOSUKA	173.7	179.4	277.9	153.2	124.2	170.1	254.4	175.0
22	MIURA	332.2	-22.7	120.3	-5.0	299.0	-15.4	63.4	-16.3
23	OSHIMA	7.4	12.4	110.2	-15.2	329.9	15.4	75.3	-4.5
24	FUTTSU	207.3	-146.3	300.4	176.4	186.1	-127.7	47.3	-31.8
25	TATEYAMA	66.0	72.0	59.5	-64.9	331.2	17.2	47.1	-33.2
26	KAMOGAWA	340.0	-13.9	110.8	-13.6	293.5	-20.4	73.0	-6.2
27	KATSUURA	340.4	-12.7	87.1	-36.4	312.9	-0.6	60.1	-18.7
28	OTAKI	309.0	-44.3	143.9	20.1	234.0	-79.6	44.2	-34.7
29	NAGARA	192.4	-160.9	317.7	-166.0	148.9	-164.7	41.7	-37.2
30	YOKAICHI	280.3	-72.4	322.1	-161.0	75.1	121.8	10.9	-67.7
31	CHOSHI	7.7	15.7	127.3	4.8	248.4	-64.6	33.0	-45.3

Notes: The phase is the value of  $\varphi$  in  $\text{Acos.}(\omega t - \varphi)$ , in which the time origin is adopted as  $00^{\text{h}} 00^{\text{m}}$  on January 1, 1982 (JST).

$\varphi_0$ : Observed phase

$\varphi_c$ : Calculated phase

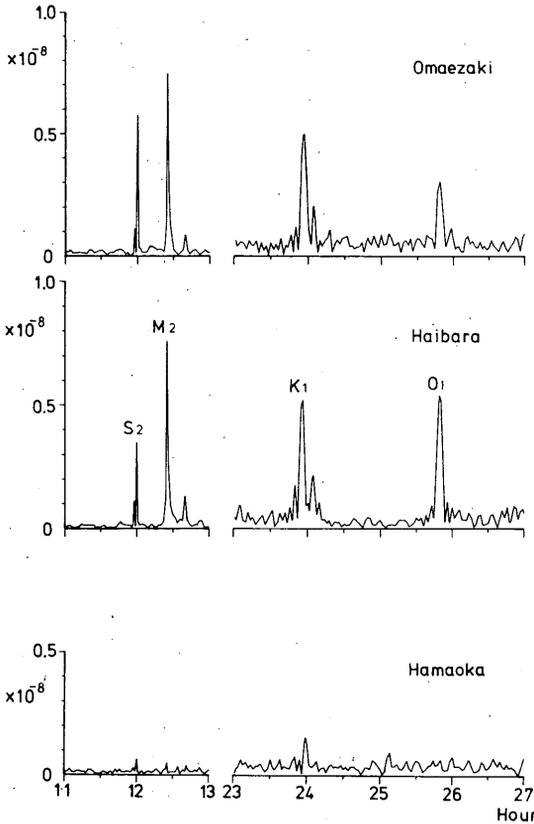


Fig. 7 Spectra of volume strain data from January to December, 1982 at Omaezaki, Haibara and Hamaoka.

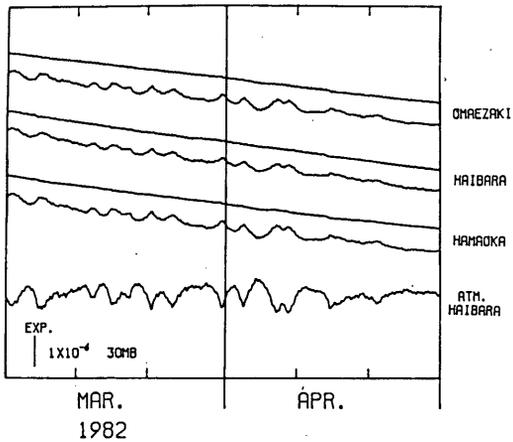


Fig. 8 Original data (hourly mean values) and corrected ones by the atmospheric pressure.

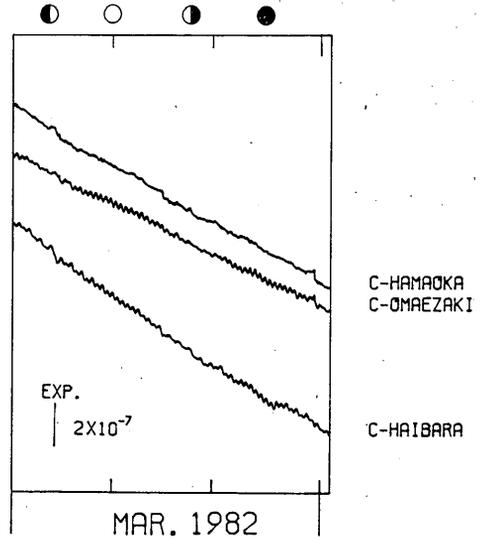


Fig. 9 The volume strains corrected by atmospheric pressure. Tidal variations are seen apparently at Omaezaki and Haibara.

球潮汐に及ぼす影響について論じる。

Fig. 11は横軸の気圧変化(周期30~80時間)に対する感度、縦軸に遠地地震の表面波(周期40秒)に対する応答をとったものである(古屋ら, 1983)。図中の数字は地点番号である(Tab.1~2)。Fig. 11の横軸は気圧1mbの変化によって生じる値であり、縦軸は遠地地震の表面波であるため各観測点にほとんど同じ入力があると考えられるが体積歪計の変動量には大きな違いがある。そして、一般的傾向として気圧に対する感度の良い所は表面波に対する応答が小さい。古屋ら(1983)は、この理由を各地点における周辺媒質のポアソン比の違いに求めた。ポアソン比が小さい所、すなわち「より固体的」な所では表面波に対する応答が大きく、1/2に近づくにつれて、すなわち「より流体的」になるに従って気圧変化に対する感度がよくなる。ところで、地球潮汐による体積歪 $\nu$ は地球表面において次式で表わされる(Melchior, 1978)。

$$\nu = \frac{1-2\nu}{1-\nu} (l_{00} + l_{\lambda\lambda})$$

ここで、 $\nu$ はポアソン比、 $l_{00}$ 、 $l_{\lambda\lambda}$ はそれぞれ緯度方向、経度方向の歪である。これから、ポアソン比が1/2に近づくにつれて体積歪は小さくなることがわかる。この様子をFig. 12に示した。これは、「流体的」な所は地球潮汐の体積歪が小さいことを表している。このことから、Fig. 11の右下の「より流体的」なグル

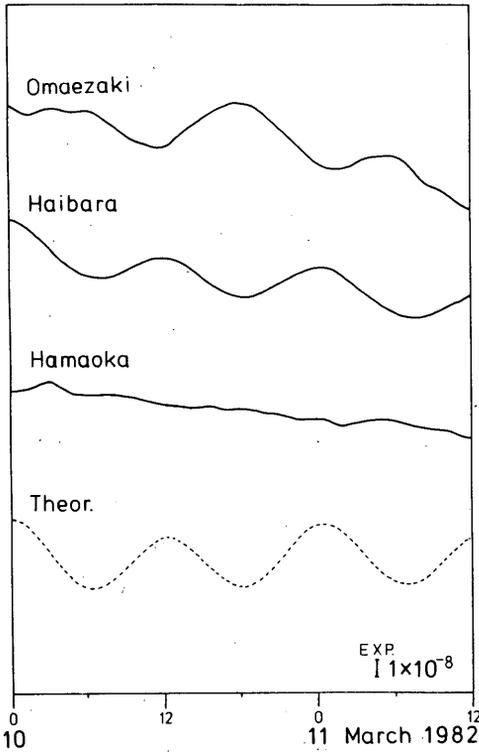


Fig.10 The volume strains corrected by atmospheric pressure and the theoretical volume strain at Omaezaki for March 1982.

Tidal constants are assumed as  $h = 0.60, k = 0.24, l = 0.08$  and  $a \cdot dh/dr = -1.40$

ープに属する地点では、地球潮汐の体積歪が小さくなっていると考えられる。そこで、 $M_2$ において観測値と固体潮汐の理論値の比 (Tab.1) が0.20未満の地点には Fig.11に丸を付して振幅が小さい地点を示した。Tab.1および Fig.11から周辺媒質が「流体的」な地点では、実際に $M_2$ の振幅が小さくなっていることがわかる。しかし、その振幅はあまりにも小さすぎるようであり、実際に周辺媒質の違いが地球潮汐の振幅にどの程度影響を及ぼしているのか今のところ不明である。この地球潮汐が小さく観測される地点は、気圧変化に応じた変動が相対的に大きく、その影響を除くと短期間においては直線的であって、潮汐変化は小さい。つまり、その短周期変化の大部分は気圧変化に応じた変化である。そのうえ、ステップ状の変化等特異な変化が現われることが多く、coseismicな変化も相対的に大きくなる傾向が認められる。また、南関東地域に多く偏っている。

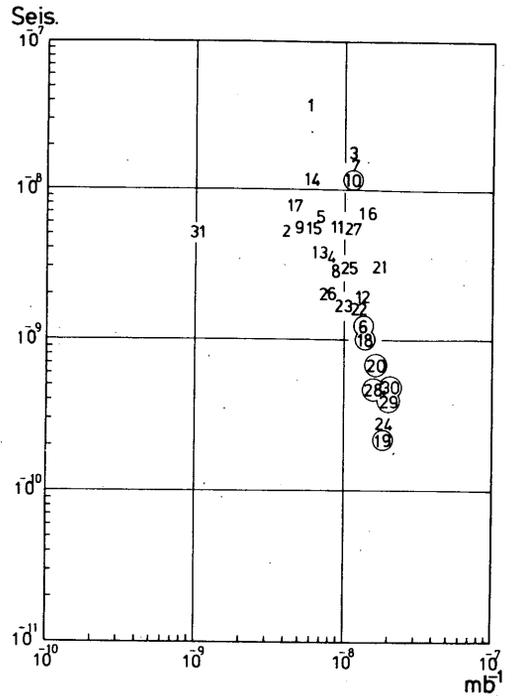


Fig.11 Relationship between sensitivities of strainmeter for atmospheric pressure and those for Rayleigh wave with the period of 40 sec from near New Zealand earthquake, May 25, 1981.

Notes: The stations where the amplitude ratios  $A_0/A_c$  of  $M_2$  constituent is less than 0.20 are shown by circles.

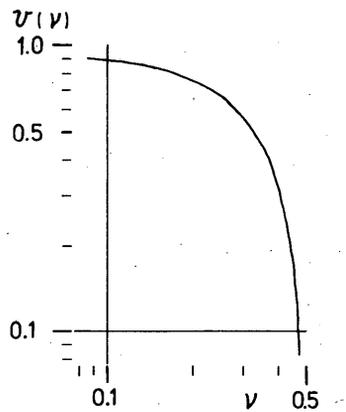


Fig.12 Theoretical amplitude of volume strain by the earth tide as a function of Poisson's ratio.

## ② 海洋潮汐の影響

地球潮汐には、海洋潮汐や気象の擾乱などの影響も含まれている。周知のとおり、日本は周囲を海洋に囲まれ、内陸部の観測所においてもその影響は免れない。特に、気象庁の体積歪計による地殻変動の観測は、震源域に海底を含む地震の前兆を捕捉する目的をもっているため海洋の近くに設置してある。例えば各地点の最も近い海岸までの距離は1 km未満9地点、1～10 km 13地点、最も近い地点は100 m、最も離れている地点でさえ29 kmにすぎない。一般の地殻変動の観測所に比べ海洋の影響を受けやすい位置にあるものが多い。海洋潮汐は観測点と周囲の海洋との相対的位置関係によって複雑に影響するが、ここでは一応海洋からの距離に応じて减小するものとして、最も近い海岸までの距離をとり、これと $M_2$ の振幅との関係を調べてみた。その結果をFig.13に示す。最も近い海岸は湾であったり、太平洋に面していたりして、その影響は一律に扱えないがFig.13から、 $M_2$ の振幅は概ね海岸に近い地点では大きく、離れた地点では小さい傾向が認められる。この関係を最小二乗法によって求め、直線ABで示してある。 $M_2$ の振幅は直線ABで示す傾きで

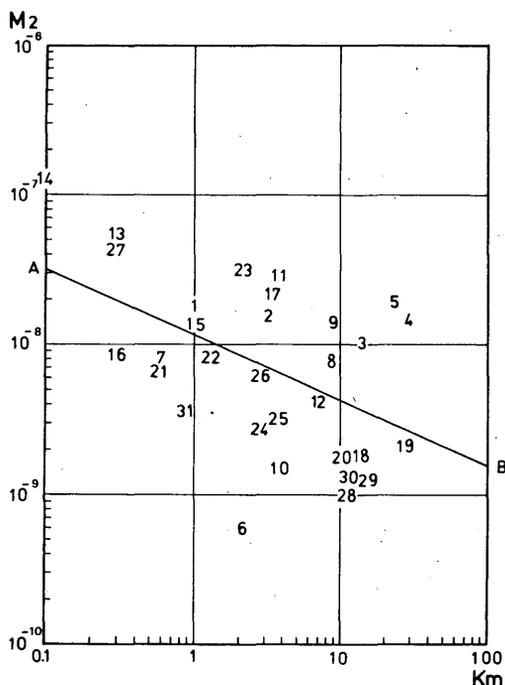


Fig.13 Relationship between the distance from the nearest coast to the observation point and amplitude of  $M_2$  constituent.

海岸からの距離に応じて减小しているようにみえる。この傾向はほかの分潮でも同じである。

一般に、体積歪に対する海洋潮汐の影響はそれによる地殻の変形だけを考えれば、例えば荷重変形についてのブシネスクの近似などで示されるように、体積歪計の深さが海岸からの距離に比べて十分浅い場合には無視できる(Melchior, 1978)。しかし、海岸の近くではある程度の大きさを有する(古館ら, 1983)。さらに、地形の影響や海水の上下運動に応じた海水とつながりのある地下水位の昇降なども加わり、複雑な地殻変形が生じると考えられる。実際、このような地殻の変形によって生じる体積歪は、潮位の変化によく対応し、潮位が高い時期に収縮、低い時期に膨張である(末廣, 1979)が、例えば石廊崎などでは数十分程度、潮位の変化に遅れて変化している。この潮位変化の原因は周知のように天体の引力が主因であり、天体のうち月だけを考慮しても大体の説明は可能である。月齢や場所によって若干の違いがあるが、太平洋に面した南関東の海岸では月が南中する2時間前位、東海では1時間前位が干潮であって、月の南中時には満ち始めているものの潮位は低い時期に相当する。この低い潮位による体積歪は膨張である。一方、月の起潮力によって生じる体積歪は南中時に膨張であって、その位相差は大変小さい。次に、月が子午線と天頂底の中間の位置に達した時、月の起潮力による体積歪は収縮である。この時潮位は高い時期に相当し、これによって生じる体積歪も収縮である。このように、天体の起潮力によって変化する体積歪と、潮位変化によって生じる体積歪は、ほとんど同位相で加わることになる。Tab.1およびFig.13に示すように、海岸に近い観測点では固体潮汐の理論値に比べ、例えば石廊崎で7倍以上、土肥、勝浦でも2倍以上になっている。また、これらの地点の位相はTab.2に示すように、固体潮汐の理論値に比較的よく合っている。これは、東海および南関東の海岸の近くでは海洋潮汐が地球潮汐の体積歪に、ほとんど同位相で影響していることを示している。なお、実際の潮位変化と体積歪計の出力の関係をFig.14に示した。これから、潮位1 mの変化によって

石廊崎	$3.6 \times 10^{-7}$
土肥	$1.4 \times 10^{-7}$
勝浦	$1.2 \times 10^{-7}$

の体積歪の変化が生じているようにみえる。しかし、この値は地域潮汐の影響を含んでいるので、実際はもう少し小さいと考えられる。

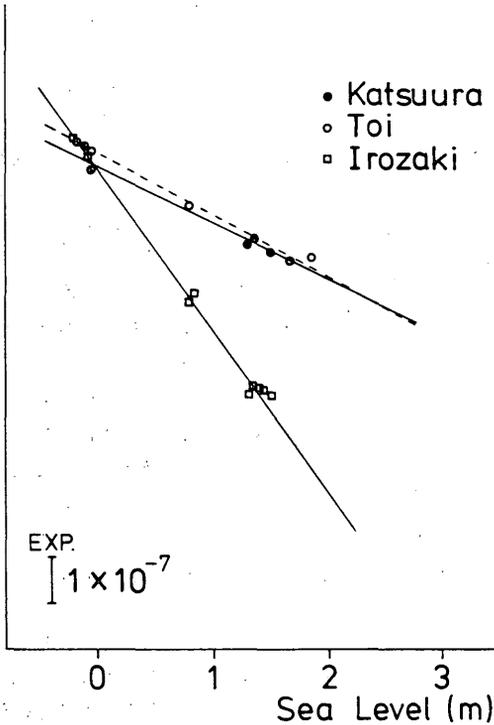


Fig. 14 Variations of volume strainmeter outputs as a function of sea level.

§ 5 地球潮汐に対する応答差と表面波

体積歪の気圧変化と遠地地震の表面波に対する応答は、Fig.11から前者に20倍、後者に185倍位の差があることがわかる。同様に、地球潮汐に対する応答の差をみるため最も振幅が大きく、擾乱は小さいM<sub>2</sub>について比較する。まず、Fig.13において直線ABから各M<sub>2</sub>の値との偏差をとり、それと遠地地震の表面波に対する出力の関係をFig.15に示した。したがって、M<sub>2</sub>の振幅に及ぼす海洋潮汐の影響は、直線ABの傾きにより海岸からの距離に応じ減小するものと仮定して、距離による補正を行ったことになる。もちろん、この大雑把な方法によって海洋潮汐の影響が完全に除けるわけではないが、Fig.15からM<sub>2</sub>に対する応答をみると、川根が最も大きく、浜岡のその95倍あることがわかる。なお、体積歪計の短周期出力は設置年度によって二つの方式(ACおよびBm)に分かれている。

Fig.15はBmに白丸を付して二つの方式を分類してある。特に、図の上の5地点①、③、⑦、⑩、⑭はセンサー内部の流体フィルターの特長上、短周期変化を記録しやすい指摘(メーカーによる)もあり、実際は図の位置より下がる可能性がある。これを考慮にいれて

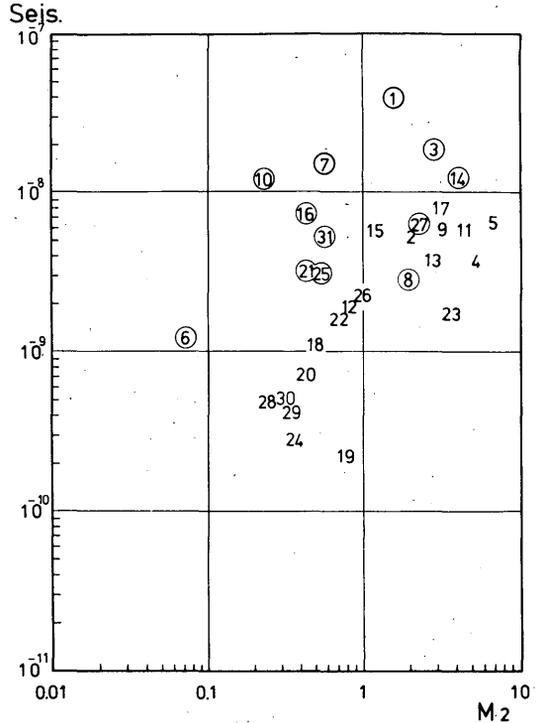


Fig. 15 Comparison between strainmeter outputs for Rayleigh waves from near New Zealand earthquake, May 25, 1981 and relative amplitude of M<sub>2</sub> constituent.

The abscissa is the residual from the straight line AB in Fig.13.

Notes: Sensors of the Borehole volume strainmeters at stations expressed by circles are more sensitive for seismic waves than the others.

それぞれのグループに分けてM<sub>2</sub>の振幅と表面波出力の関係をみると、いずれもM<sub>2</sub>の振幅が大きい地点は表面波出力も大きい傾向がある。

この関係はO<sub>1</sub>などの分潮においても認められるので、地球潮汐が大きい地点は表面波出力が大きいとみなしてよいだろう。

§ 6 あとがき

地殻体積歪の観測に及ぼす環境の影響を把握する目的で地球潮汐を解析したところ、体積歪データは各観測点の環境の影響を大きく受けていることがわかった。そのほかに、各種ノイズの影響も見逃せない。現在、

気象庁では体積歪に含まれる気象の擾乱、地下水の変化などによる各種ノイズを除去し、データの質の向上を目指している。すでに東海15地点に気圧計の設置が実行の段階にあり、また水位や水温などによる影響についても調査中である。特に、今回の調査で地球潮汐が小さく観測された観測点はノイズレベルが高い所が多いので、将来データの質の向上を図ったうえで改めて調査した方がよいと思われる。なお、この報告では、地球潮汐に及ばず気象の擾乱の影響等については述べなかった。これについては続報で報告する。

#### 謝 辞

地震予知情報課長長宗留男博士にはこの調査の全般を通して御指導を賜わった。また、同課浜田信夫氏および静岡地方気象台吉田明夫氏には、終始多くの御助言と協力をいただいた。さらに、気象大学校古屋逸夫先生そして静岡大学教養部里村幹夫助教授にも御助言をいただいた。以上の方々に深く感謝します。

#### 参考文献

- 小沢泉夫(1974)：地球潮汐変化の分類と分布，測地学会誌，**20**，178-187.
- 末廣重二(1979)：地殻変動連続観測と埋込式歪計(I)，測候時報，**46**，1-2号，9-26.
- 檜皮久義，佐藤馨，二瓶信一，福留篤男，竹内新，古屋逸夫(1983)：埋込式体積歪計の気圧補正，験震時報，**47**，3-4号，1-21.
- 二瓶信一，檜皮久義(1983)：三ケ日における埋込式体積歪計に対する降雨の影響，験震時報，**48**，1-2号，18-22.
- 古館友通，古屋逸夫(1983)：容積歪計で求めた地殻の弾性定数，地震学会講演予稿集，1983，No.1
- 古屋逸夫，檜皮久義(1983)：気圧変化及びレーリー波入射に対する埋込式体積歪計の応答，験震時報，**48**，1-2号，1-6.
- Melchior, P (1978)：The Tides of Planet Earth., 64-71, 316-318.
- 茂木清夫(1982)：1944年東南海地震直前の前兆的地殻変動の時間的变化，地震，II，**35**，145-148.