

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*

古屋 逸夫,** 檜皮 久義***

On an Observed Strain Change by Rayleigh wave Incidence and
Atmospheric Pressure Change

Itsuo Furuya

(Meteorological College, J. M. A.)

and

Hisayoshi Hikawa

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

Japan Meteorological Agency (J. M. A.) is now operating Sacks-Evertson strainmeters at 31 locations in Kanto and Tokai districts. It is the main purpose for the strainmeter array to catch precursors of big earthquakes but it also observes strain changes by an earthquake, atmospheric pressure change and by other causes.

Soon after early observation began, the fact that the output amplitudes are very different at the respective stations, particularly for seismic wave incidence was recognized. The comparison of amplitudes by seismic Rayleigh waves with those by atmospheric pressure change shows a tendency that the stations which record larger amplitudes for seismic waves have smaller outputs for atmospheric pressure change or conversely smaller amplitudes for seismic waves larger amplitudes for atmospheric pressure change.

In this paper the reasons of the fact stated above are investigated qualitatively and theoretically. According to simple theory, larger Poisson's ratio gives larger outputs for atmospheric pressure change and larger rigidity gives larger outputs for Rayleigh waves. Maximum output for atmospheric pressure change is expected when the strainmeter is installed in water where perfect coupling between strainmeter and the surrounding "material" must be realized. The observation agrees well with this fact.

So called precursor-like phenomena are often observed at the stations which may have large Poisson's ratio and small rigidity. This fact may be related to easy movability of surrounding water.

§1 まえがき

1976年以来、気象庁によって関東・東海地方に埋込式体積歪計(サックス・エバートソン型歪計)が設置され、1983年現在31カ所の歪計が稼働中である。歪計は、いわゆるテクトニックな地殻歪みの他に気象・地象及び海象現象の変動に対応する地殻歪みをも記録している。設置当初から、特に地震の記録振幅が観測点によってかなり違っていることが気付かれていた。

1977年8月19日のスンバワ島南の地震(11.16°S, 118.41°E, $d = 33$ km, $M = 6.8$; ISC)は31点中最初の10点が観測中に発生し、その記録例はいくつかの文献にみられる(例えば、観測部地震課, 1979)。気圧変動に対する歪計の応答の違いも各観測点について調べられており(檜皮ら, 1983)。その応答の違いが各観測点における「気圧補正」として現在気象庁で利用されている。気圧変動に対する各観測点の歪出力の違いは、地震に対する違いほど大きくはないが無視することはできない。地震波と気圧変動に対する歪計の応答の違いの実際をみて、それに対する何らかの解釈を試みようというのが本論文の目的である。

* Received Mar. 5, 1983

** 気象大学校

*** 気象庁地震予知情報課

§2 地震波（レーリー波）と気圧変動に対する歪計の応答

前節に記した地震の発生時には10点の歪計が稼動中であった。その後歪計の設置場所が31点に増えてから、1981年5月25日にニュージーランド付近に発生した地震（ 48.8°S , 164.4°E , $d = 33\text{ km}$, $M_s = 7.6$: USGS）が展開されている歪計に記録された。この地震のレーリー波の部分の記録を Fig.1-1, 1-2 及び 1-3 に載せる。実際の歪みは各歪計の出力電圧に各歪計の感度を掛けて歪みになおすわけであるが、図中の記録は各歪計の生の出力である。以上の2個の地震はほぼ真南（正確には前者は南南西、後者は南南東）から歪計の展開域に入射している。どちらの地震も十分

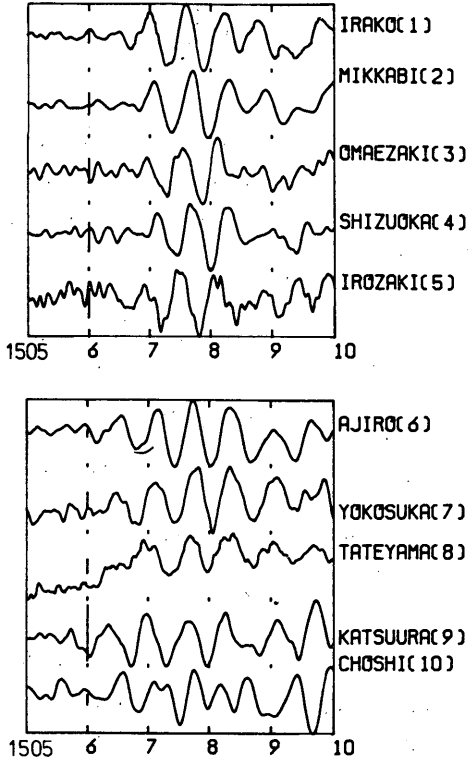


Fig. 1-1 Strain records of near New Zealand earthquake, May 25, 1981. Plotted data are raw and not corrected by instrumental sensitivities. The lengths of bars arranged along 6 minute tick marks correspond to 1 Volt outputs for stations 1-5 and 9, and 0.1 Volt for stations 6-8 and 10.

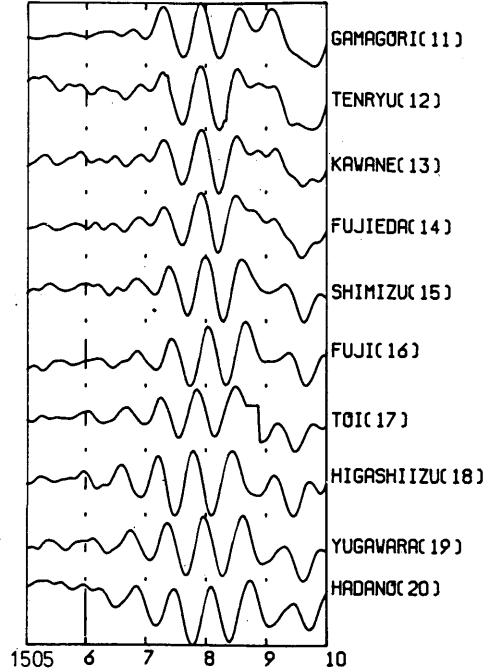


Fig. 1-2 Strain records of the same earthquake in Fig. 1-1. The lengths of all bars correspond to 0.1 Volt outputs.

遠震とみなせ、従って入射方向も震央距離もほぼ同じとみなせるので、各観測点には大体同じ振幅のレーリー波が入射すると考えられる。それにもかかわらず各観測点における歪出力には大きな差がある。

レーリー波と気圧変動に対する各観測点の応答の違いをみやすくするために、横軸に一定の気圧変動に対する歪計の出力を縦軸にレーリー波入射に対する歪計の出力をどちらも対数でとった図を用意する。Fig.2は1977年の地震に対するものである。

Fig.2はまだ観測点が10点の時代であり、観測点番号はFig.1-1に示す番号である。横軸、縦軸とも相対振幅であり、ある観測点の出力はある観測点の出力の何倍かということのみ意味がある。例えば観測点1（伊良湖）と観測点8（館山）を較べるとレーリー波では伊良湖は館山の約50倍の振幅を記録し、逆に一定の気圧変動に対しては館山は伊良湖の約2倍の振幅を記録する。なおFig.2においてレーリー波に対する相対振幅は歪計の生の出力であり歪計の感度で補正されていない。各観測点の感度はそれほど異ならないが、もし補正すればもう少し点のパラッキは小さくなるだろう。ともかく全体としては観測点10（銚子）を除い

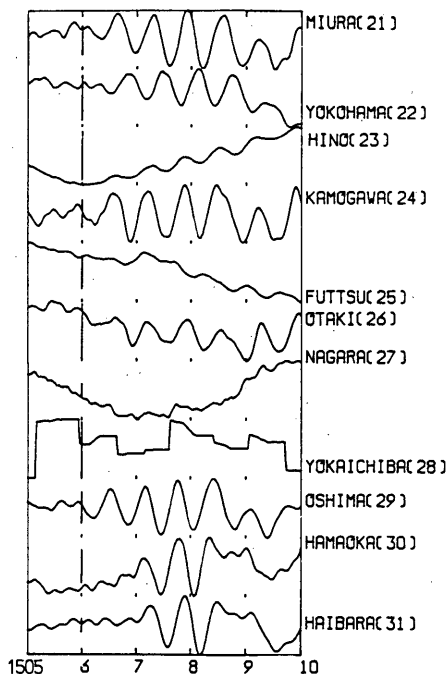


Fig. 1-3 Strain records of the same earthquake in Fig. 1-1. The lengths of all bars except station 27 correspond to 0.1 Volt outputs and 0.01 Volt for station 27.

て右下りの傾向を示し、レーリー波に対して応答の大きい場所は気圧変動に対してより小さく応答し、逆に気圧変動に対して応答の大きい場所はレーリー波にはそれほど大きく応答しない。銚子だけは他と異なった状況にあるように思われる。

1981年の地震に対する Fig.3 をみると上の傾向がもっとはっきりするよう思われる。Fig.3 の縦軸は各観測点の感度を掛けたあとのものであるがやはり相対振幅である。横軸は 1mb の気圧変動に対する絶対振幅をとっている。観測点番号はやはり Fig.1-1 ~ 1-3 に示す番号に対応している。観測点 27 (長柄) と観測点 28 (八日市場) は横方向の位置は正しいが Fig.1-3 をみても分るようにレーリー波の振幅が求められなかったので縦方向の正しい位置は不明である。そこで、この 2 地点については 1982 年 12 月 20 日 トンガ諸島付近に発生した地震 (23.8°S, 175.7°W, $M_s = 7.7$: USGS) を参考に観測点 24 (鴨川) に対する相対の大きさを求めて Fig.3 にプロットした。全体としての右下りの傾向は変わらないが、やはり銚子は他とは異なった様相を示しているのも Fig.2 と同じである。

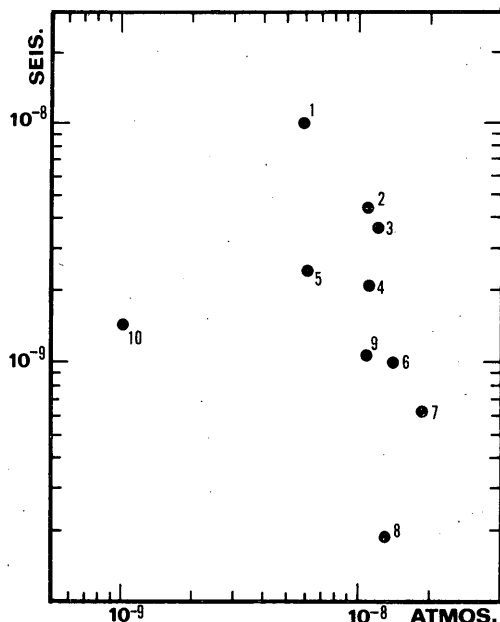


Fig. 2 Correlation between strainmeter outputs for atmospheric pressure change and for Rayleigh waves from near Sumbawa earthquake, Aug. 19, 1977. Correspondence of station numbers and station names is seen in Fig. 1-1. Values for the earthquake are raw and not corrected by the instrumental sensitivities. The values of both axes are relative ones and then only differences of values are significant.

§ 3 考 察

前節で述べたような歪み記録上の傾向はどのように起るのであろうか。現在のところ我々に直接測定不可能であって、かつ歪計の応答に直接かかわってくると思われる歪計とその回りの媒質とのカップリングの状態の違いが上のような傾向となって現れるのであろうか。カップリングの状態は掘った井戸の微妙な形の違い、固着するのに用いるセメントの性質のわずかの違い、あるいはその固り具合等のかなり偶然的なもので決まると思われる。しかし、Fig.2 あるいは特に Fig.3 をみると、偶然このような結果が得られたとは思われない。もしカップリングの状態がバラバラだとするともう少し点は散らばるよう思われる。むしろカップリングの状態は各観測点でほぼ同じであるのに歪計の回りの媒質の弾性的あるいは塑性的性質に関連している

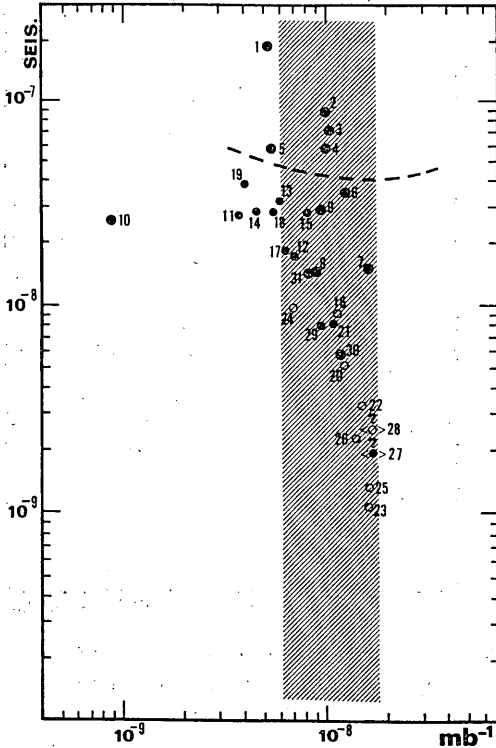


Fig. 3 Correlation between strainmeter outputs for atmospheric pressure change and for Rayleigh waves from near New Zealand earthquake, May 25, 1981. The values along the ordinate are relative ones but corrected by the instrumental sensitivities. The values along the abscissa are absolute ones. Hatched belt is such a one that all points should be in this belt if our theory is perfectly correct. The meaning of horizontal width of the belt is that the value of the right side of the belt is three times as large as that of the left side. The location in this figure of the belt is not significant but the right side is placed tentatively near the expected maximum value for atmospheric pressure change. Correspondence of station numbers and station names is seen in Fig. 1-1, 1-2 and 1-3. The instruments of large circles are somewhat different from those of other circles. The instruments above and below the dotted line are fixed to

surrounding rocks with somewhat different cement. Precursor-like phenomena are often observed at the stations of open circles. We could not read amplitudes of stations 27 and 28 for this earthquake. Then we plotted relative amplitudes to station 24 using other earthquake which took place near Tonga, Dec. 20, 1982(23.8° S, 175.7° W, $M_s = 7.7$: USGS).

現象のように思われる。もっとも銚子については、他の観測点と特にカップリング状態が違うと考えると一応の説明ができる。

Fig.2あるいはFig.3の点の分布傾向を定性的に解釈すると次のようになる。歪計の埋っている極端な構造として次の2種類を考えよう。まず水の入った池のようなものと考え歪計はその池の中につかっている(構造Aと呼ぶことにする)。もう一つは通常の弾性体と考えられる固体の中に歪計が固着されている(構造Bと呼ぶことにする)。

構造Aの場合、レーリー波が入射しても歪計にはそれほど影響を与えない。従ってレーリー波が入射しても歪計の応答は小さい。しかし気圧変化に際してはその分だけの静水圧の変化として歪計に直接作用する。さらにこの場合、歪計と周辺媒質(実は水)とのカップリングはほぼ理想的なものと考えられる。従って気圧変化はそのまま歪計の出力となって現れる。

これに対して構造Bの場合、レーリー波入射に際しそれ相応の反応を示すが、気圧変化に際しては静水圧としてはきいてこないで構造Aの場合ほどの出力は得られない。

以上のことから、定性的ではあるがFig.2あるいはFig.3の点の分布傾向について次のように言える。右下にいくほど構造Aに近く、左上にいくほど構造Bに近くなる。

上の結論を弾性論の範囲でもう少し定量的に考えてみる。簡単のために、歪計は非常に薄い材質でできているとする。この場合は、実は歪計がなくて単に井戸が掘られている場合の、その井戸の体積変化を考えるのと同じである。歪計(実は空の井戸)の体積歪みは

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1}{E} \{ (2-\nu)(\sigma_x + \sigma_y) + (1-2\nu)\sigma_z \} \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表わされる(古屋, 1983)。ここでE, ν はそれぞれ媒質のヤング率及びポアソン比, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ は歪

計あるいは井戸のない場合、従って井戸のある場合には井戸から十分離れたところでの主応力である。z軸は下方にとられている。媒質は半無限弾性体である。全表面に気圧変化 Δp が生じたとき、理論的に

$$\sigma_x = \sigma_y = -\frac{\nu}{\nu-1} \Delta p, \sigma_z = -\Delta p \quad \dots (2)$$

が求まる。(2)を(1)に代入すれば

$$\frac{\Delta V}{V} = -\frac{1}{E} \frac{1+\nu}{1-\nu} \Delta p \quad \dots (3)$$

が求まる*。Eの変化を無視すると $0 < \nu < \frac{1}{2}$ の範囲で体積歪みは3倍の範囲におさまることになり、 ν が大きいほど歪計出力は大きくなること分る。Fig.3の斜線の帯の幅はこの3倍の幅を示す、この帯は図中の位置にある必要はなく左右どちらにずらしても意味はない。気圧変化による歪出力の最大値は歪計が水につかっている時と考えられる。この場合、歪計と水とのカップリングは流体の性質からして理想的であろうと考えられるし、気圧変化は直接歪計側壁への静水圧の変化として現れるであろうからである。この最大値は歪計の形状及び歪計の材質の弾性定数を考慮に入れて

$$\frac{\Delta V}{V} = 1.77 \times 10^{-8} / \text{mb} \quad \dots (4)$$

となる(古屋, 1983)。Fig.3においては試みにこの帯の右側をだいたい上の値に等しいところに置いてある。最大値の付近にいくつかの観測点(7, 22, 23, 25, 26, 27, 28)があるが最大値より特に大きい観測点はない。この事実と多くの観測点がこの帯の中に入っていることを考慮すると、各観測点のカップリング状態がそれぞれの観測点でそれほど変わらず周辺媒質の弾性的性質によってFig.2あるいはFig.3の点の分布が決まるという我々の前提と現実とは少なくとも矛盾していない。上の理論は半無限弾性体に対するものであるが実際の地形はずっと複雑である。地表に単純な形の山を置いただけで山の頂上では気圧変化に対する“媒質”の体積歪みが大きくなること知られている(古館, 1983)。実際の地形に対しては、従ってFig.3の帯の幅はもっと拡くなり、ますます都合に思われる。(3)式によると $\nu \rightarrow \frac{1}{2}$ すなわち媒質が水に近づくほど気圧変化に対する歪計の出力が大きくなり、定性的な説明とも矛盾しない。

レーリー波入射の際生ずる応力あるいは歪みを計算することは気圧変動の時に比べていささかやっかいで

ある。あえて解釈すると次のようなことになる。

簡単のためにここでも一様な半無限媒質を考える。レーリー波のx方向、z方向の変位u、wは

$$u = A \left\{ e^{-k\gamma z} - \frac{2\gamma\gamma'}{1+\gamma'^2} e^{-k\gamma'z} \right\} \sin(\omega t - \kappa x)$$

$$w = A \left\{ -e^{-k\gamma z} + \frac{2\gamma}{1+\gamma'^2} e^{-k\gamma'z} \right\} \cos(\omega t - \kappa x) \quad \dots (5)$$

で表される。ここで

$$\gamma = \sqrt{1 - \left(\frac{c}{\alpha}\right)^2}, \quad \gamma' = \sqrt{1 - \left(\frac{c}{\beta}\right)^2}$$

であり、 κ は波数、 α 、 β 、 c はそれぞれP、Sおよびレーリー波の速度である。(5)を微分してフックの法則を用いると地表での最大応力について

$$\sigma_x + \sigma_y = \kappa \mu \frac{1+\nu}{1-\nu} \left(\frac{c}{\beta}\right)^2 A \quad \dots (6)$$

が求まる。もちろん $\sigma_z = 0$ である。(6)を(1)に代入すると

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\kappa}{E} \mu (2-\nu) \frac{1+\nu}{1-\nu} \left(\frac{c}{\beta}\right)^2 A \quad \dots (7)$$

となる。ここで μ は媒質の剛性率である。ポアソン比の変化による $\frac{c}{\beta}$ の変化はFig.4にみられるとおりでである。(7)のオーダーは主に μ のオーダーに依存していることが分る(Eは(3)にも同じ形で入っているのでも無視する)。 $\mu \rightarrow 0$ すなわち媒質が水に近づくほど歪計の出力は小さくなるという定性的な説明と矛盾しない結果がここでも得られた。

§ 4 結 論

Fig.2およびFig.3の点の分布の解釈を定性的および理論的に試みた。Fig.3の中では観測点が異なった記号でプロットされている。大きい黒丸とその他の丸とは実は歪計の型が少し違う。大きい黒丸は旧型でありその他は新型である。図中の点線の上で歪計を井戸の壁に固定するセメントの性質が少し違う。これらの事実が点の分布に本質的に関係している可能性もないではないが点の分布傾向をみると歪計の埋っている媒質の方により強く関係しているように思われる。

定量的な説明のうち、気圧変化に対する歪計の応答の解釈はうまくいっていると考えたい。レーリー波に対する応答については局所的な構造であるべき設置場所を半無限弾性体で置きかえるといういささか苦しい説明ではある。これが許されるとするならばポアソン比は $0 < \nu < 0.5$ という範囲に限られるのに対して剛性率にはそういう制限はない(もちろん $\mu \geq 0$) ので μ が数百倍違うという状況(とくに長周期の波に対し

* 井戸のない場合、媒質自身の体積歪みは $-\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E(1-\nu)}$ となり井戸に歪みが $\frac{1}{1-2\nu}$ 倍集中していることになる。

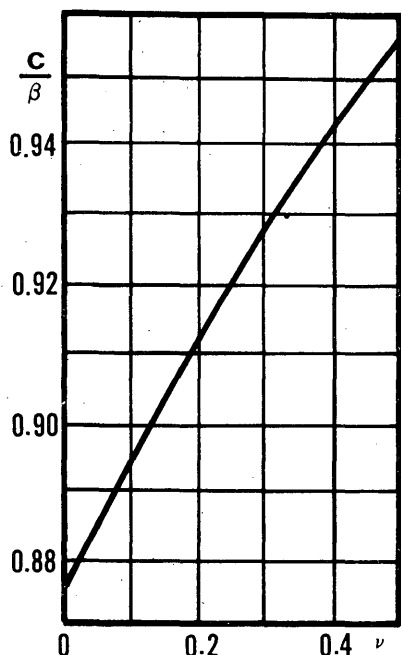


Fig. 4 c/β as a function of Poisson's ratio (after Knopoff)

ては) もあり得ないことではない。点の横方向の分布幅より縦方向の分布幅の方がずっと大きいという事実を説明するのはそれほど困難なことではなからう。

Fig. 3 中の白丸は“地震の前兆”らしきものがしばしば観測される点である。上の議論が正しいとすると、

歪みを観測するという立場に立てばこれらの観測点はあまりよくない場所に設置されていることになる。しかしながら、それらの設置場所が“水的”であることは本当の水の流動が容易におこる場所であると考えられることもできよう。地震予知という立場に立ってみると地下水の流動しやすさが利点になっていると考えることも可能であろう。ともかくこの最後の結論は以後の研究およびデータの蓄積を待たねばならない。

謝 辞

本研究に全般にわたって、佐藤馨、福留篤男および二瓶信一の各氏に大変お世話になった。ここでつつしんで感謝の意を表します。

参考文献

- 古館友通(1983) : 有限要素法による歪の解析, 気象大学卒業論文
- 古屋逸夫(1983) : 体積歪計の理論応答, 験震時報, 47, 1, 2,
- 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,
- 観測部地震課(1979) : 地殻変動連続観測と埋込式歪計(I), 測候時報, 第46巻, 第1-2号, pp9-26
- Knopoff, L. (1952) : on page 34 in "Elastic Waves in Layered Media" by Ewing, Jardetsky and Press, 1957, McGraw-Hill.