

和歌山における局所地震前後の微細土地変動の 研究 (第2報)

岸本 兆方・田中 寅夫

STUDY ON RELATION BETWEEN THE LOCAL EARTHQUAKES AND THE MINUTE GROUND DEFORMATION AT WAKAYAMA (PART 2)

by Dr. Sci. Yoshimichi KISHIMOTO and Torao TANAKA

Synopsis

Amounts of the ground tilt and strain due to the meteorological and oceanic tidal disturbances are calculated by the same method as reported in the previous paper for Oura and Akibasan observation stations.

The residual deformation obtained by subtracting effect of these disturbances from the observed ground deformation, is too large to explain the crustal movement related with the local earthquakes. Therefore, a more suitable method to eliminate these disturbances is required.

Statistical examinations are made also about periodicity and time interval of the local earthquake occurrences.

1. 緒 言

気象変化等によつて生じる土地の傾斜, 伸縮変化を, 各々の地殻変動観測所において定性的定量的に詳しく調べることは, 地震活動に伴う地殻変動を研究するために必要欠くべからざることである。特に大浦あるいは秋葉山地殻変動観測所のように観測室が地表から 10m 程度の浅い場所にあるときは, 気象変化による影響が非常に大きく, したがつてこれらの擾乱を何等かの方法で除去しなければ本来の意味の地殻変動を見出すことは困難である。長期間にわたるこれらの擾乱を取り去ることは, 移動平均をとるとか, 月あるいは年平均値を採用することにより, かなり有効におこなうことができるが, 数日間程度の短い期間については気象影響などを取り除くには上に述べたような方法は適当でないと考えられる。このような場合にはどうしても各々の擾乱要素を定性的定量的に検討して, これらを除去する方法を導入することが必要となる。また和歌山の両観測所のように, 海岸に近接した場所では特に近海の潮位変化による荷重変形の影響が著しいので, この点についても同時に考慮しなければならない。

今回は第1報¹⁾で報告した方法によつて決定した大浦, 秋葉山両観測所の擾乱要素が土地の傾斜または伸縮におよぼす影響量と, それらの値を使用して局所地震前後の地殻変動記録を解析した結果, ならびに1960年12月1日から1961年9月15日までの地震観測から得た結果について述べる。

なお本論中において下記の略号を使用する

<i>Aa</i> : Akibasan	E-W tilt (+ E down)
<i>Ba</i> : "	N-S tilt (+ S down)
<i>Eae</i> : "	E-W strain (+ extension)
<i>Ena</i> : "	N-S strain (+ extension)
<i>Ao</i> : Oura	E-W tilt (+ E down)
<i>Bo</i> : "	N-S tilt (+ S down)
<i>Eec</i> : "	E-W strain (+ extension)
<i>Eno</i> : "	N-S strain (+ extension)

2. 気象変化および海洋の潮位による傾斜, 伸縮変化

気象変化あるいは海洋潮位の変化によつて生じる傾斜, または伸縮変化量を次のような簡単な仮定が成立するものとして近似的に決定した。

(a) 海洋潮汐の影響

両観測所の潮位による傾斜, 伸縮変化量は和歌山港潮位の変化に比例すると仮定し, それぞれの M_2 分潮の振幅比から, 潮位変化による傾斜, 伸縮量を決定する。また両者の位相のずれについては, M_2 分潮の位相差がそのまますべての分潮について等しいとみなし, 和歌山港検潮所の潮位の読取値を使用して引き去る。

(b) 気圧影響と気圧勾配影響

気圧変化と傾斜, 伸縮変化の間には比例関係が成立するものと仮定する。気圧勾配が土地の変形におよぼす影響について概略の値を知る目的で, 気圧の時間勾配 (mb/hour) を採用し, 気圧変化項および (c) に述べる気温影響と共に 1 カ月間の平均日変化曲線より潮位影響を除いたものから, 最小自乗法でその係数を求める。なお気圧変化および気圧時間勾配と, 傾斜, 伸縮変化との間に位相差はないと仮定する。

(c) 気温影響

大浦に設置した温度計の読取値を, 土地の変形を生ぜしめる有効気温とみなして (b) で述べた気圧変化項および気圧時間勾配項とともに最小自乗法でその係数を決定する。気温と土地変形との間の位相差は, 相互に 1 時間ずつずらしてその平均自乗誤差を最小とするものを採用する。この場合の位相差は日変化の原因となる程度の温度変化についてのものであり, さらに急激な, もしくは緩慢な温度変化については成立しない。このことは年周変化の位相をみても明かであるが, 数日間にわたる地殻変動を解析する場合には, 平均的な意味において, この程度の周期の温度変化に注目することが最も適当であると考えられる。

(d) 観測室内温度影響

秋葉山観測所では数日程度の期間については特に著しい坑内の温度変化は観測されず, 大体直線的な変化とみなすことができる。大浦観測所では主として地下水のためにおこると考えられる不規則な温度変化がしばしばみられるので, 特にその変化量の大きい期間を選び出して, その振幅比より坑内の温度影響の量を図式的に求める。

(e) 降雨の影響

数カ月あるいは数年というような長期間にわたつての降雨影響は, 総雨量あるいは坑内地下水量などにより比較的簡単な取扱いによつて, その影響を除去しうることが報告されている²⁾。しかしながら 1~数日間の降雨による土地の変形は特に観測室が浅い場合には非常に複雑である。Fig. 1 に降雨量に対する傾斜, 伸縮の最大変化量を示したが, *Eno*, *Eeo* などのように時によつては逆むきの変化を示すものもあり, その形を定量的に決定することは非常にむづかしい。したがつて数日間の解析をおこなうときは, 和歌山の両観測所については降雨時をさける以外に方法がないのが現状である。

Fig. 1 より降雨量と最大傾斜量, 伸縮量の関係を, *Aa*, *Ao*, *Ba*, *Ena* について求めると次のようになる。

<i>Aa</i>	$0.5'' \times 10^{-2}$	per 1mm precipitation
<i>Ao</i>	$0.25'' \times 10^{-2}$	
<i>Ba</i>	$-0.35'' \times 10^{-2}$	
<i>Ena</i>	-6.5×10^{-9}	

以上 (a)~(d) に述べた方法により計算した値をまとめて Table 1 に示す。

気圧時間勾配の項は他の項に比較して各成分共小さいので, 現在の近似の段階では省略することができる。

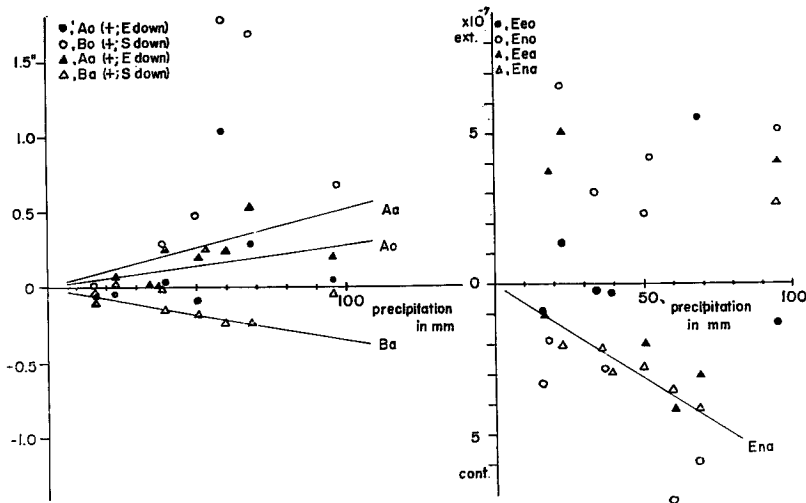


Fig. 1 Relations between the ground tilt and strain, and precipitation

Table 1 Coefficients of the disturbing factors to the ground tilt and strain

Disturbance Instrument	Water height change of Wakayama Houbour of 1cm	Atmospheric temperature change of 1°C	Atmospheric pressure change of 1mb	Time gradient of pressure (mb/hour) $\frac{1}{2}\{P(t+1)-P(t-1)\}$	Room temperature change of 1°C
A_a (Akibasan)	$-0.0366'' \times 10^{-2}$ (+0.43 hour)	$(-0.544'' \pm 0.014) \times 10^{-2}$ (-1)	$(-0.346'' \pm 0.048) \times 10^{-2}$	$(0.098'' \pm 0.076) \times 10^{-2}$	
B_a	$0.0190'' \times 10^{-2}$ (+0.10)	$(-0.115'' \pm 0.015) \times 10^{-2}$	$(-0.0781'' \pm 0.0053) \times 10^{-2}$	$(-0.032'' \pm 0.098) \times 10^{-2}$	
E_{no}	-0.084×10^{-9} (+0.40)	$(0.95 \pm 0.23) \times 10^{-9}$ (-1)	$(3.28 \pm 0.83) \times 10^{-9}$	$(7.5 \pm 1.4) \times 10^{-9}$	
E_{ea}	-0.024×10^{-9} (-0.34)	$(-4.24 \pm 0.34) \times 10^{-9}$ (-1)	$(0.3 \pm 1.2) \times 10^{-9}$	$(-1.3 \pm 1.5) \times 10^{-9}$	
A_o (Oura)	$-0.0249'' \times 10^{-2}$ (+0.32)	$(0.008'' \pm 0.010) \times 10^{-2}$	$(-0.426'' \pm 0.035) \times 10^{-2}$	$(0.000'' \pm 0.065) \times 10^{-2}$	$6.0'' \times 10^{-2}$
B_o	$0.0107'' \times 10^{-2}$ (+1.68)	$(0.008'' \pm 0.017) \times 10^{-2}$	$(-1.367 \pm 0.059) \times 10^{-2}$	$(0.11'' \pm 0.11) \times 10^{-2}$	$20'' \times 10^{-2}$
E_{na}	0.436×10^{-9} (-0.06)	$(7.61 \pm 0.43) \times 10^{-9}$	$(-5.5 \pm 1.4) \times 10^{-9}$	$(-1.4 \pm 2.2) \times 10^{-9}$	120×10^{-9}
E_{eo}	-0.013×10^{-9} (+2.04)	$(0.527 \pm 0.030) \times 10^{-9}$	$(-6.4 \pm 1.1) \times 10^{-9}$	$(-2.74 \pm 0.16) \times 10^{-9}$	-35×10^{-9}

Positive signs of the ground tilt and strain mean E-down or S-down tilt and extension. Positive signs of phase difference mean advancement of the disturbing factor. Time gradient of the atmospheric pressure

is assumed to be : $\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{2}\{p(t+1)-p(t-1)\}$, (mb/hour)

ものと考えられる。なお Table 1 の係数は、傾斜変化については1961年5月10日から6月8日、伸縮変化については同年8月9日から9月7日までの1カ月の値を使用して決定したものである。

(f) 年 周 変 化

気象要素の変化によって生じた年周変化の振幅および位相を 2 年間の観測結果から求めた値は次の通りである。

<i>Aa</i>	1.0'' >	Max. (E-down)	Dec.	Min. (W-down)	June
<i>Ba</i>	1'' >				
<i>Eea</i>	3×10^{-6}	(extension)	May	(contraction)	Dec.
<i>Ao</i>	12''	(E-down)	Dec.	(W-down)	May
<i>Bo</i>	>5''	(S-down)	Dec.	(N-down)	June
<i>Eno</i>	2×10^{-6}	(extension)	Mar.	(contraction)	Oct.
<i>Eeo</i>	4×10^{-6}	(extention)	Jan.	(contraction)	June

年間変化について議論するためには現在までの観測では不充分であり、その振幅も毎年一定ではないので、上の量は極く大まかな値である。数日程度の期間を取る場合には、勿論年周変化は直線的とみなしてさしつかえない。

土地変形の年周変化を主として気温の変化により生じるものと考えれば、両観測所の傾斜、伸縮変化と、気温の最高あるいは最低時期との間に数カ月におよぶずれがみられる。これは日変化を生ぜしめる気温影響の機構と、年周変化を生ぜしめる機構とが異なっている、詳しく言えば気温の日変化によって生じる土地の変形は極く表層の温度変化により生じたひずみが、地下の観測室まで弾性的に伝わったものであり、気温の年間変化によるものは、土地の更に深い部分への熱伝導によって生じたひずみが変形を与えたものであると考えられる。

3. 気象影響を除去した一つの解析例

Fig. 1 に示した係数を使用して 1960 年 11 月 14 日に和歌山市周辺で発生した局発性地震の前後数日について、大浦および秋葉山観測所で観測された傾斜、伸縮変化と、各擾乱要素について補正した結果を、Fig. 2 a, b に示す。*Eea* は欠測であり *Ba*, *Bo*, *Ao* の気温補正係数は小さいので、補正は省略した。また地震発生時の記録の不連続は器械的に生じたものとも考えられるが、Fig. 2 にはそのまま記してある。

11 月 14 日には 07 時 47 分、11 時 08 分、13 時 31 分および 23 時 28 分の 4 回有感地震が発生し、そのうち 23 時 28 分の地震は前の 3 回の地震に較べてやや規模が小さい (震度 II)。気象庁発行の地震月報には 07 時 47 分、11 時 08 分および 13 時 31 分の地震の震源と深さはそれぞれ 34.1°N , 135.0°E , $H=0\sim 10\text{km}$, 34.25°N , 135.1°E , $H=0\sim 10\text{km}$, 34.25°N , 135.1°E , $H=10\text{km}$ と発表されている。東京大学地震研究所の猿谷、甲斐川、七川、耐久の 4 観測所で記録された地震波の P-S 時より、上記の 3 つの地震についてその震源を図式的に求めるとそれぞれ $34^{\circ}01'\text{N}$, $135^{\circ}09'\text{E}$, $33^{\circ}55'\text{N}$, $134^{\circ}05'\text{E}$ および $34^{\circ}13'\text{N}$, $135^{\circ}10'\text{E}$ となり 07 時 47 分の地震の震源は和歌山市の南約 20 km, 11 時 08 分の地震は和歌山市の南西約 30 km の附近であるが、13 時 26 分の地震は和歌山市、即ち大浦および秋葉山観測所の直下附近に発生している。(和歌山気象台での P-S 時と震度はそれぞれ 0.8 秒, 震度 II, 1.0 秒, 震度 II および 1.2 秒, 震度 III となつている) 他の三つの地震はともかくとして、13 時 28 分の地震は観測所のほとんど直下に震源があると考えられ、又その規模も和歌山市周辺で発生する局発性地震の中では特に大きいものとみなされる。Fig. 2 にみられるように第 1 報より引き続いて、これまで述べてきた補正方法は気象および潮汐影響を除くには不充分であり、まだかなりの擾乱影響が残っている。したがってさらに有効な近似方法を導入しなければ現在の観測結果から局所地震の前後数日間に地殻の異常変動が存在するかどうか結論することはできない。逆に言うならば局所地震に伴って地殻変動が存在するとしても現在の観測精度より小さい量、傾斜変化で $0.02''$ 以下、伸縮変化で 10^{-8} 以下のひずみであることになる。

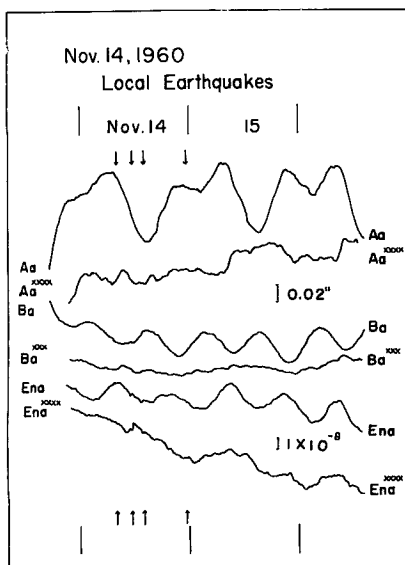


Fig. 2a

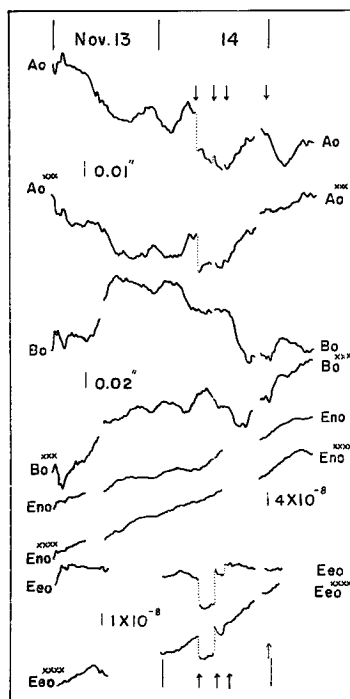


Fig. 2b

Fig. 2 Tilting motions and variations of linear strains before and after the remarkable local earthquakes on Nov. 14, 1960 (××××; corrected curve)

4. 地震観測の結果

大浦において局所地震発生数の消長を調べる目的で1960年11月25日よりR_i型上下動地震計（最高倍率約8000倍，記録紙送り速度毎分12mm）で地震観測をおこなっている。P-S時が2秒以内あるいはP-F時が3秒以内の地震のみを，和歌山市周辺に発生した局所地震とみなし，1960年11月25日より1961年9月14日までの期間に観測された地震について調べた二三の結果を報告する。

(a) 地震発生数

1960年11月25日から1961年9月15日までの1日毎の地震の発生数を示すとFig. 3のようになる。

2月および5月には地震発生数が減少している傾向がみられるが，木下²⁾によれば和歌山地方に発生する無感地震は夏に多く冬に少い傾向があり，又有感地震については2月と8月に極大，5月と10月に極小があるとされている。大浦で観測された地震についての統計は木下の資料より狭い範囲で，小さい地震まで対象にしているため年周変化の傾向が一致しないのか，あるいは上記の期間だけについて一致しないのかは観測期間が短いので結論することができない。

次に太陽，太陰時に関して地震発生数の周期性をみるため1時間ごとの発生数を太陽時については上記全期間，太陰時については1960年12月27日より1961年5月31日までの期間を取り，太陽時又は太陰時の24時間を基本周期として調和解析を行った。

今1基本周期の中で*i*時から(*i*+1)時までの間に起つた地震の数を*y_i*として，*y_i*を

$$y_i = a_0 + \sum_{\nu=1}^q \{a_\nu \cos \nu x_i + b_\nu \sin \nu x_i\} \quad (i=1, 2, \dots, P)$$

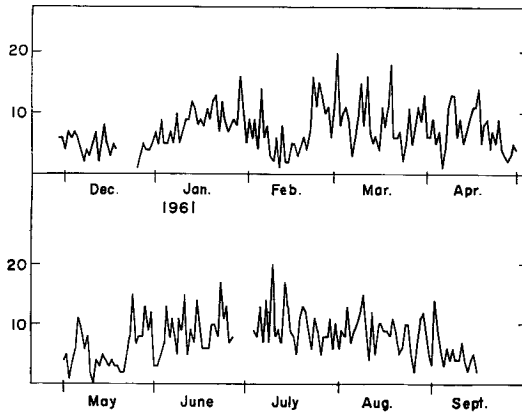


Fig.3 Changes of the number of local earthquakes in a day at Oura

で表わし, この調和常数 a_ν, b_ν を最小自乗法で求めれば

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^p y_i}{p}, \quad a_\nu = \frac{2}{p} \sum_{i=1}^p y_i \cos \nu x_i,$$

$$b_\nu = \frac{2}{p} \sum_{i=1}^p y_i \sin \nu x_i$$

となる。ただし

$$x_i = i \left(\frac{2\pi}{p} \right), \quad 2q+1 \leq p$$

とする。地震の総回数 $n = \sum_{i=1}^p y_i$ を考えている期間に全く偶然に分布させて, これを調和解析して得られる a_ν', b_ν' および a_0' から求めた相対振幅 $c_\nu' = \sqrt{a_\nu'^2 + b_\nu'^2} / a_0'$ の平均値は Expectancy と呼ばれるもので ν とは無関係に

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\pi}{n}}$$

となる。このとき相対振幅 c_ν' が $c_\nu' < k\varepsilon$ となる確率 $W(k)$ は

$$W(k) = e^{-\frac{\pi}{4} k^2}$$

で与えられる。よつて地震回数を調和解析して求めた相対振幅 $c_\nu = \sqrt{a_\nu^2 + b_\nu^2} / a_0$ と Expectancy ε との比 $k = c_\nu / \varepsilon$ から $W(k)$ を計算すれば, c_ν が全く偶然の結果として生じる確率を知ることができる。Fig. 2 に上記の期間について求めた c_ν の値および W を示す。 W の値がいずれの周期についてもかなり大きく, すべて偶然の結果と結論することもできるが傾向的にみて太陰 24 時間と太陽 2.4 時間周期がやや卓越しているようである。

Table 2 Result obtained from harmonic analysis of the numbers of the local earthquakes

ν	Solar daily variation		Lunar daily variation	
	C_ν	W	C_ν	W
1	0.06712	0.13	0.12184	0.0073
2	0.05409	0.27	0.01138	1.0
3	0.04631	0.39	0.01085	1.0
4	0.01463	0.93	0.05812	0.32
5	0.04664	0.39	0.05532	0.32
6	0.05664	0.13	0.07300	0.17
7	0.03852	0.53	0.07965	0.10
8	0.01691	0.88	0.02941	0.75
9	0.02604	0.75	0.02958	0.75
10	0.10000	0.011	0.02433	0.82
11	0.02550	0.75	0.04674	0.46

n : Total number of earthquakes, ε : Expectancy, $c_\nu = \sqrt{a_\nu^2 + b_\nu^2} / a_0$, $W = e^{-\frac{\pi}{4} k^2}$

太陽 12 時間周期のものがほとんど零に等しいことから潮汐の地震発生に対する影響は全くみられないと考えてよく、又太陽 12 時間および 24 時間周期の項も目立って卓越していない。太陽 24 時間周期が卓越しているように見えるのは全く偶然によるものか、あるいは何かの意味をもつものであるか不明であるが太陽 2.4 時間周期がやや卓越しているのは木下の結果と比較してみると興味ある事実である。木下は太陽 2.4 時間周期のものは偶然の結果かもしれないと述べているが、対象にした地震の大きさも異なつた解析で同じような結果が得られたことは偶然として見過すには問題があると考えられる。この現象が地震発生に実在するものであるかあるいは解析上の見かけの周期にすぎないものか、引続き検討する積りである。

(b) 時間間隔の分布

世界の大地震あるいは日本近傍で発生する有感地震などのうちで、1～数日以上隔つた時間間隔を有する地震は一般に $f(\tau) = be^{-\lambda\tau}$ (λ は常数) なる頻度分布をもつとされている。また友田⁴⁾ によれば火山性地震および大地震に伴う余震等については時間間隔の分布曲線として $f(\tau)d\tau = k\tau^{-p}d\tau$ (k, p は常数) が適当であるとされている。これに対し茂木⁵⁾ は、地震の発生の時間間隔分布は定常状態で指数分布を示し、任意の過程のもとでもいくつかの定常過程にわけらば、それぞれについて指数分布を示す、すなわち一つの地震が発生し、次の地震がいつ発生するかは前の地震が発生してから時間の経過には無関係であると述べている。大浦で観測された 1960 年 12 月より翌年 9 月までの地震について記録取替時を除いたものにつき、地震発生の時間間隔と頻度を、片対数および両対数座標上にプロットしたものを Fig. 4a, 4b に示す。

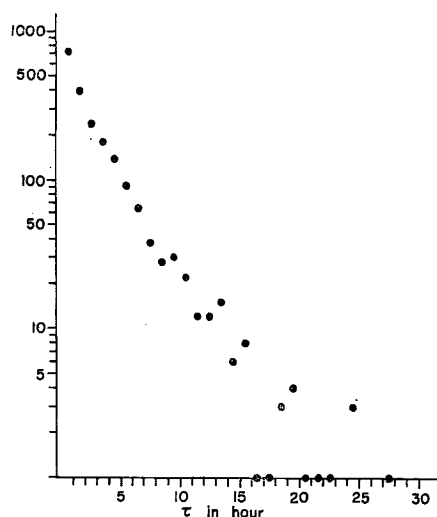


Fig. 4a Time interval distribution of local earthquakes observed at Oura

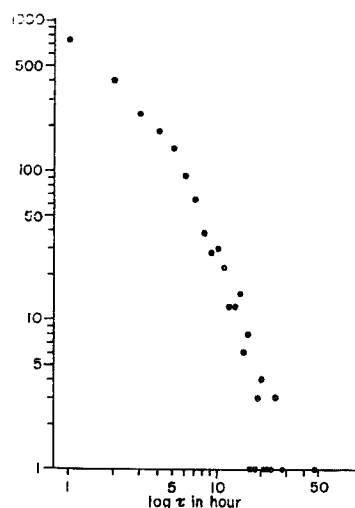


Fig. 4b Time interval distribution with logarithmic scale of τ , for the same data used in Fig. 4a

横軸を τ として頻度曲線を求めた結果 (Fig. 4a) をみるとやや下に凸となる傾向があり、 $\log \tau$ についての頻度曲線は 5 時間附近を境にする 2 本の直線で表わされる (Fig. 4b)。この結果よりただちに時間間隔の分布曲線を決定することはできないが強いて結論するならば、指数分布に近い傾向をもっているといえる。

5. 結 語

第 1 報より続いて、潮汐および気象影響等によつて生じる大浦、秋葉山地殻変動観測所の傾斜、伸縮量を

各擾乱要素について近似的に計算した。その結果を使用して、震源が極く近くかつ局発性地震としてはその規模が最も大きいものの一つと考えられる地震について、その発生前後1～2日を取り解析したが、地震と関係あるとみなされる異常な地殻変動は確認できなかった。もし異状な変動が存在するとしても傾斜量で $0.02''$ 以下、ひずみで 10^{-8} 以下の量と推察されるので、さらに擾乱を有効に取除くことが必要である。

大浦における地震観測の結果を太陽時および太陰時について調和解析すると、太陽2.4時間周期のものがやや卓越している。偶然にその周期が現われる確率 $W(k)$ の値が充分小さくないので、その有意性は疑わしいが、木下によつても同様の事実が報告されていることを考えると興味深い問題である。また地震発生の時間間隔分布は大体指数分布に近い分布を示すとみられる。

終りに当つて、終始御指導を頂いた西村英一教授に厚く御礼申し上げる。気象、潮汐等の数多くの資料を貸与下さった和歌山地方気象台ならびに、地震観測資料の使用をお許し下さった東京大学地震研究所宮村撰三博士に深甚なる謝意を表する。また有益なる御助言を頂いた田中豊、大塚道男の諸氏、ならびに観測器械の整備に御尽力頂いた津島吉男技官、煩雑なる計算を手伝って頂いた松村律子、小林誠の諸氏に心から感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 西村英一, 岸本兆方, 田中寅夫: 和歌山における局所地震前後の微細土地変動の研究(第1報), 京大防災研究所年報, 第5号A, 1962, pp. 44—56.
- 2) Takada, M.: On the Observation of the Crustal Deformation and Meteorological Effect on it at Ide Observatory, Dis. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Bull. No. 23, 1958, pp. 2—12.
- 3) 木下潤一: 紀伊半島西側の地震の統計的研究, 地震10, 1938, pp. 129—150.
- 4) 友田好文: 地震の時間間隔の分布及び之と地震動の最大振幅の分布との関係に関する記述, 地震, 第2輯, 7巻, 第3号, 1954, pp. 155—169.
- 5) Mogi, K.: Study of Elastic Shocks Caused By the Fracture of Heterogeneous Materials and its Relations to Earthquakes Phenomena, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 40, Part 1, March, 1962, pp. 125—173.