

傾斜およびひずみ地震動の観測について

小 沢 泉 夫

ON THE OBSERVATIONS OF COMPONENTS OF THE TILT AND THE STRAIN ON THE SEISMIC WAVE

By *Izuo OZAWA*

Synopsis

It shows azimuthal patterns of amplitudes of components of tilt and strain of some phases in the seismic wave.

Ratios of dynamical magnifications of components of the tilt and the strain versus that of the displacement which are observed by means of the tiltmeter and strainseismometer for the plain seismic wave are obtained as follows, ratio (tilt/displacement) is $gIT/2\pi c$, and ratio (strain/displacement) is $gITD/2\pi cb_1$ (these notations are shown in this main subject).

The observations of those oscillational components of the tilts and strains are performed on several earthquakes.

1. はじめに

数秒から数百秒といった比較的短い周期のひずみ地震動は比較的多くの人々によって観測されている^{1),2)}。しかし、短周期の傾斜振動については、B. Galitzin 等^{3),4),5)}の説明、また、地震計に現われる傾斜の影響の議論として、木沢⁶⁾は地盤の傾斜と水平振子の振動の位相角について、また、松沢⁷⁾は法外に大きな振幅の変位振動はないから地震計に記録される長周期の大きい変動は傾斜変化であろうといずれも簡単な説明をしているのみであって、まだ傾斜振動の観測が実際に試みられた例はないようである。

傾斜振動を観測する方法には高倍率の電氣的増幅装置で比較的単純に目的を達する方法があるけれども観測をする場所によっては雷害が不可抗力に近い場合がある。ここでは重力を復元力とする振動計では同じ記録の中に変位と傾斜の記録が共存する。この振動計の傾斜と変位振幅との割合について述べ、積極的に傾斜やひずみ地震動のみを大きく記録する計画について述べた。また、今迄著者が行ってきたこれらの観測例をまとめて見た。

2. 理 論

(1) 地震動の各位相の変位振幅、表式を簡単にするために地震波は平面波と仮定する。この波は直角坐標 x, y, z に関し、波面は y 平面に直交し、各位相の方位角成分は **Table 1** で与えられるものとする。

表中 l, m, n は観測方向の方向余弦である。各位相の方向分布は、P 波では進行方向に中心を持ち、原点で相接する 2 つの球面で、SH 波と Love 波とでは y 軸上に中心を持ち原点で相接する 2 つの球面、SV 波では進行方向と y 軸に直角な軸上に中心を持ち原点で相接する 2 つの球面、Rayleigh 波は x 軸上に中心を持ち原点で相接する球面となる。

傾斜およびひずみ地震動の場合は y 平面波面が直交する平面波であることを考慮すると $\partial/\partial y$ の項は消えるのでそれぞれ **Table 2, Table 3** に示すようになる。

Table 1. Azimuthal Pattern of Displacement Components of Phases of Seismic Wave.

Phase	Observing Component			
	x	y	z	(l, m, n)
P	u_P	—	w_P	$u_P l + w_P n$
SH	—	v_{SH}	—	$v_{SH} m$
SV	u_{SV}	—	w_{SV}	$u_{SV} l + w_{SV} n$
Love	—	v_L	—	$v_L m$
Rayleigh	u_R	—	w_R	$u_R l + w_R n$

Table 2. Azimuthal Pattern of Inclination Components of Phases of Seismic Wave.

Phase	Observing Component			
	x	y	z	(l, m, n)
P	$\frac{\partial w_P}{\partial x}$	—	—	$\frac{\partial w_P}{\partial x} l$
SH	—	—	—	—
SV	$\frac{\partial w_{SV}}{\partial x}$	—	—	$\frac{\partial w_{SV}}{\partial x} l$
Love	—	—	—	—
Rayleigh	$\frac{\partial w_R}{\partial x}$	—	—	$\frac{\partial w_R}{\partial x} m$

Table 3. Azimuthal Pattern of Extension Components of Phases of Seismic Wave.

Phase	Observing Component			
	x	y	z	(l, m, n)
P	$\frac{\partial u_P}{\partial x}$	—	$\frac{\partial w_P}{\partial z}$	$\frac{\partial u_P}{\partial x} l^2 + \frac{\partial w_P}{\partial z} n^2 + \left(\frac{\partial u_P}{\partial z} + \frac{\partial w_P}{\partial x} \right) nl$
SH	—	—	—	$\frac{\partial v_{SH}}{\partial z} mn + \frac{\partial v_{SH}}{\partial x} lm$
SV	$\frac{\partial u_{SV}}{\partial x}$	—	$\frac{\partial w_{SV}}{\partial z}$	$\frac{\partial u_{SV}}{\partial x} l^2 + \frac{\partial w_{SV}}{\partial z} n^2 + \left(\frac{\partial u_{SV}}{\partial z} + \frac{\partial w_{SV}}{\partial x} \right) nl$
Love	—	—	—	$\frac{\partial v_L}{\partial x} lm$
Rayleigh	$\frac{\partial u_R}{\partial x}$	—	$\frac{\partial w_R}{\partial z}$	$\frac{\partial u_R}{\partial x} l^2$

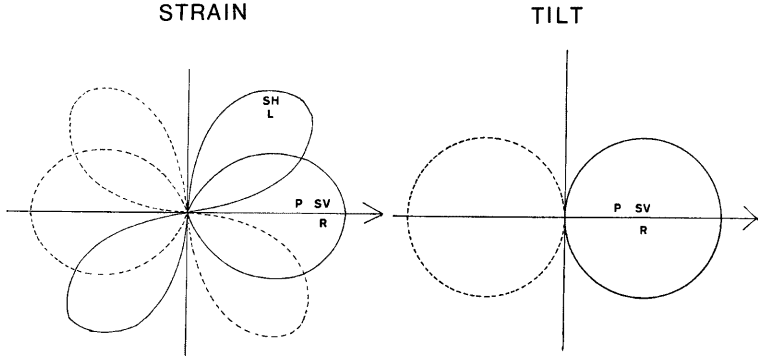


Fig. 1. Azimuthal pattern of amplitudes of each phase of the ground tilt and strain on the seismic plain wave. Solid lines are positive, and dotted lines are negative.

Table 2 より解るように傾斜成分の分布は x 軸上に中心を持ち原点で相接する 2 つの円となる。

Table 3 から解るように P 波, S 波の直線ひずみの方向分布は波の進行方向に焦点があり原点で相接する 2 つの楕円体面である。SH, Love 波では $z=0$ 平面にあって x および y 軸と 45° をなす線を軸とし原点を節点とする 4 つの正葉体面である。また, Rayleigh 波では x 軸上に焦点を持ち原点で相接する 2 つの楕円体面である。この場合 $z=0$ 面上での面積ひずみは Love 波では 0, Rayleigh 波では $\partial u_R/\partial x$ となる。

(2) 振動計で記録される変位と傾斜 重力を復元力とする振動計は必ず水平変位でも傾斜でも動き出す。いま振動計の一例として水平振子の回転軸が鉛直軸と小さい角 i だけ傾けて地盤に固定しているとする。いま軸の傾いている方向と直角の方向に地盤が ψ だけ傾くと振子の平衡点は元の位置から $\tan^{-1}(\tan \psi/\tan i)$ だけ回転した所となるので傾斜のない場合の絶対空間に対する回転角 θ と地盤に固定した回転軸に対する回転角 θ_1 との関係は $\theta = \theta_1 - \tan^{-1}(\tan \psi/\tan i)$ である。

いま, ψ, i が微小で振子の慣性率を I , 制振数常数を D , 質量を M , 回転軸から重心までの距離を H とし, $\dot{\psi}, \dot{i}$ が無視されてもよいとすると x 方向の成分の振子の運動方程式は

$$I\ddot{\theta}_1 + D\dot{\theta}_1 + MgH\theta_1 = -MH\ddot{u} + MgH\psi \quad \dots\dots\dots(1)$$

いま, 振子の回転角 θ_1 と記録紙上の動き a との関係が $a = VH\theta_1$, ここに V は振子の基本倍率, であるとすると式 (1) は

$$\ddot{a} + 2\varepsilon\dot{a} + n_0^2 a = -\frac{VH}{l_0}(\ddot{u} - g\psi) \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに, $2\varepsilon = D/I$, $n_0^2 = gi/l_0 = (2\pi/T_0)^2$, また, g は重力加速度, l_0 は相等振子長, $I = MHl_0$, T_0 は振子の自由振動周期である。

いま, 前の章とは別に平面波である地震波の進行方向の方向余弦を l, m, n とし, 変位の x, y, z 成分を u, v, w , 波の位相の進行速度を c , 波長を L , 時間を t , 波は単一の周期 T をもつとし, 例えば x 成分は $u = u_0 \sin\{(2\pi/L)(lx + my + nz - ct)\}$ の形で与えられるとする。ここに, u_0 は振幅である。 v, w も同様な形で与えられ, それぞれの振幅を v_0, w_0 とする。いま, 地盤の変形による引力ポテンシャルの変化を考えないとき弾性変化としての傾斜変化の x, y 成分は $\{\partial w/\partial x, \partial w/\partial y\} = (2\pi/L)\{w_0 l, w_0 n\} \cos(2\pi/L)(lx + my + nz - ct)$ であるから, このような変位や傾斜変化のあるとき x 成分の振子の定常部分の振動は

$$\frac{H}{l_0} \frac{VT_0^2}{\sqrt{\left(1 - \frac{T_0^2}{T^2}\right)^2 + 4h^2 \frac{T_0^2}{T^2}}} \left\{ \frac{u_0}{T^2} \sin(\omega t + \gamma - \delta) + \frac{g l w_0}{2\pi L} \cos(\omega t + \gamma - \delta) + \frac{g \psi_0 n}{4\pi L} \sin(\omega t - \delta) \right\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ただし、 $h = \frac{\epsilon}{n}$ 、 $\tan \delta = \frac{2hT}{\left\{ \left(\frac{T}{T_0} \right)^2 - 1 \right\}}$ 、 $T = \frac{L}{c}$ 、 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 、 $\gamma = -\left(\frac{2\pi}{L} \right) (lx + my + nz)$ 、 ψ_{0z} は引力ポテンシ

ルの変化による鉛直線変化の x 成分である。式(3)で振子が重力を復元力としている場合はその構造の如何にかかわらず3つの項の関係は不変である。ここで、まず第2項と第3項との大きさの比較をしよう。いま、震央距離は充分大きく、震源の深さは浅くこの影響は小さいとする。また物性的な変化はなく引力ポテンシャルの変化も弾性変形のみ起因しているとする。ある定常波動の時点で地球表面の変位分布は n 次の球関数の級数例えば $\sum u_n$ などで表現されるとすると、 x 方向の傾斜変化は $\sum \{ (1 + k'_n - h'_n) / r_0 l'_n \} u_n$ で与えられる。ここに r_0 は地球の半径、 k'_n 、 h'_n 、 l'_n はそれぞれ地球潮汐常数 k_n 、 h_n 、 l_n に対応する荷重潮汐常数に等しい。現実の地球に対する荷重潮汐常数の値は竹内その他⁸⁾の人々により精密に計算されている。この表式の k'_n に関する項は弾性変形に起因する引力ポテンシャルの変化によるもので、 h'_n は地心よりの距離の変化すなわち弾性変形そのものによるもので、 l'_n は同じく水平変位によるものである。従って式(3)の第2項と第3項との比は h'_n と k'_n との比に外ならない。例えば W. F. Farrell (1972)⁹⁾ の計算では、地球の半周を1波長とする変化に対しては、 $k_2/h_2 \approx 0.3$ 、波長が短くなると急速に小さくなり、波長 100 km 以下となると $k'_n/h'_n < 0.0014$ となる。従って周期が数分より短い場合は傾斜変化のほとんどは弾性変形そのものであると見做してよい。従って記録に現われる傾斜と変位との大きさの比は式(3)の第2項と第1項との比と見做してよい。地震波では通常、垂直変位と水平変位との比 w_0/u_0 は1より少し大きくなることはあるけれども著しく大きくなることはなく逆に0となることもある。いま式(3)で $w_0 \approx u_0$ の場合変位記録の振幅に対する傾斜記録の振幅の比は $glT^2/2\pi L$ にほぼ等しい。 $L = cT$ であるからこの表式は $glT/2\pi c$ で近似できる。この関係は g が復元力である振動計に対しては一定である。いま、地震波の進行方向の成分の場合 ($l = 1$) で、 $c = 3 \text{ km/sec}$ の場合は傾斜記録が変位記録より大きくなるのは地盤の振動周期が32.1分より長い場合である。この値は振子の周期には無関係であるけれども地盤振動は短周期の成分では変位の方が大きく記録されるから長周期の振子の方が傾斜振動を拾いやすいことは否定できないが周期を長くすると勿論短周期の傾斜振動も抑制される。安定のよい振動計ならば長周期のものであっても短周期の振動に対して周期の長い変化は障碍となる程には大きく現れないからしばしば云われることのある障碍の原因は地盤の傾斜にあるのではなく器械の不安定にあるのであろう。

(3) 変位振動を記録しない振動計、短周期の傾斜振動を積極的に観測しようとするならば振子の周期を長くすることでは問題を解決することはできない。重力を復元力としない計器を使わなければならない。例えば棒の重心を回転軸として地盤に固定すればこの棒は地盤が回転のない変位をしても地盤に対して相対運動はせず、地盤が絶対空間に対して傾斜するような回転運動をして始めて棒は地盤に対して回転運動をする。回転軸にばねを使っても差支なく、このばねが弱いときは $\theta_1 \approx -\psi$ となる。これを差動変圧器あるいはマグネセンサーのような電気計測器で記録すれば問題は解決する。しかし、いろいろな理由で機械的に記録しようとするときは、また、センサーに水平振子のような効率の大きい拡大装置を使うときはこの天秤棒を水平振子に連結すると棒の端の変位を充分大きくしてから水平振子の回転軸に傾斜を与えるようにすればよい。例えば天秤棒の長さを $2D$ あるいは優腕の長さを D とし、水平振子の回転軸を傾ける劣腕の長さを b_1 とするとこのために挺子倍率は D/b_1 となり式(3)より導いた変位記録に対する傾斜記録の比は $glDT^2/2\pi Lb_1$ あるいは $glDT/2\pi cb_1$ となる (Fig. 2)。この場合 $D = 200 \text{ cm}$ 、 $b_1 = 4 \text{ cm}$ 、 $c = 3 \text{ km/sec}$ 、 $l = 1$ とすれば地盤の周期が39秒より長いときは傾斜の方が変位より大きい倍率で記録される。勿論振子の周期が長ければ周期の2乗に比例して絶対的な振動倍率は大きくなる。

(4) 引力ポテンシャルの変化、変位振動の現れない傾斜振動計、前述の天秤棒の重心をピボット、ばねなどで回転軸とする代りに重心に充分近い点を固く地盤に固定して、この棒の端と地盤との相対変位を記録す

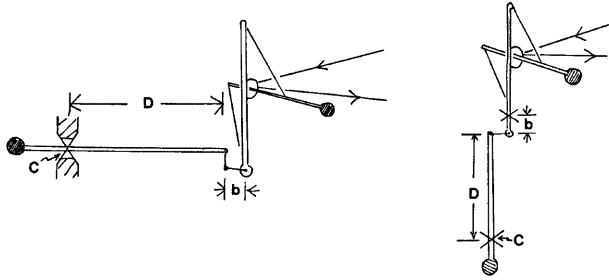


Fig. 2. Schematic construction of a tiltmeter with mechanical amplifier which has few influence of an irrotational displacement on the ground. C shows a center of the gravity of the balance.

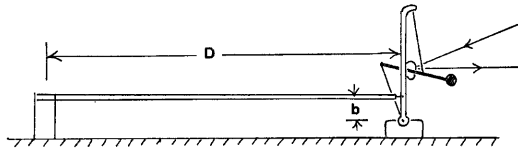


Fig. 3. Schematic construction of a strain seismograph which has few influence of an irrotational displacement on the ground.

ると、これは傾斜の弾性変形の項 ($\partial w / \partial x$ あるいは $\partial w / \partial y$ など) のみを記録する。これは前号¹⁰⁾で述べた垂直成分の回転ひずみ計に外ならない。

(5) ひずみ地震計に対する変位の影響、H-59型¹¹⁾あるいはH-70型伸縮計¹²⁾では一端を地盤に固定した長い定尺の自由端に拡大装置として水平振子を取り付けられている。定尺の長さを D 、定尺の自由端に連結される水平振子の支柱を傾斜させる劣腕の長さを b_1 とする (Fig. 3) と式 (3) に相当する式は

$$\frac{H}{l_0} \frac{VT_0 \mu_0}{\sqrt{\left(1 - \frac{T_0^2}{T^2}\right)^2 + 4h^2 \frac{T_0^2}{T^2}}} \left\{ \frac{1}{T^2} \sin(\omega t + \gamma - \delta) + \frac{gDl}{2\pi Lb_1} \cos(\omega t + \gamma - \delta) + \frac{g\psi_0 x}{4\pi^2 u_0} \sin(\omega t - \delta) \right\} \dots\dots\dots(4)$$

であって、変位記録に対するひずみ振動記録の比は $DglT^2/2\pi Lb_1$ あるいは $Dgl/2\pi cb_1$ である。また、第3項の占める割合は更に小さくなる。通常、 $D=10\sim 100$ m, $b_1=3\sim 4$ cm, $D/b_1=(0.25\sim 3.3)\times 10^3$ である。いま、 $D/b_1=10^3$, $c=3$ km/sec, $l=1$ ならば地盤の周期が1.9秒より長いときはひずみ振動の方が変位振動より大きい倍率で記録される。例えば周期20秒の地盤の振動に対して、長さ (D) 20 m, $b_1=3$ cm のひずみ地震計は $l=1$, $c=3$ km/sec の場合、ひずみ地震動の倍率は変位振動の倍率の約7倍以上となっているのでほとんどその記録はひずみ地震動の記録と見てよいであろう。

(6) 変位が定尺を伝わる時間の影響、一般に波が定尺を伝わるのに要する時間と地盤を伝わるのに要する時間とは等しくない。定尺の固定端に達した波は定尺の中も伝わり $dt=D/C$ 、時間後に自由端に固定端の変位が伝わる。ここに C_b は定尺の中を伝わる波の速度で定尺がインヴァールの場合には約5 km/sec である。このような dt が地盤と自由端との相対変位を変える最大値は $\Delta b = \sin(2\pi \times dt/T)$ である。例えば定尺の長さが22 m のとき Δb がこの相対変位の1%以下になるのは地盤の振動周期が2.7秒以上の場合である。従って通常はこの影響は無視してよい。

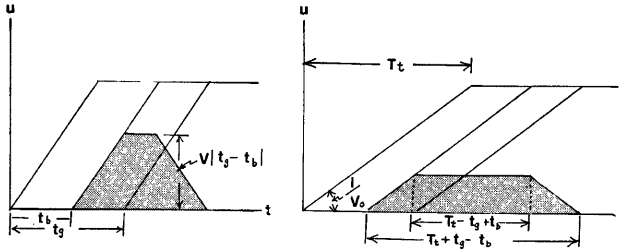


Fig. 4. Relation of an observing relative displacement vs. a permanent displacement which does not accompany with a permanent strain on the ground.

(7) 地盤の永久変位の影響，地盤に永久ひずみは残らないけれども永久変位が発生する場合について考えよう，定尺の中を変位が伝わるに要する時間を t_b ，地盤の中を変位が伝わるに要する時間を $t_g = (D \cos \phi) / V_g$ ，ここに ϕ は波の進行方向と定尺とのなす角， V_g は地盤を変位の伝わる速度，いま永久変位が一定の速度 V で進行し， T_t 時間継続したとする。Fig. 4 に定尺の自由端とその直下の地盤との絶対空間に対する変位と時間との関係を示す。また，定尺の自由端とその近くの地盤との相対変位と時間との関係を暗影で示す。このとき相対変位は図のように高さ $V|t_g - t_b|$ ，上辺の長さ $T_t - t_g + t_b$ ，下辺の長さ $T_t + t_g - t_b$ の梯形あるいは上辺の長さが 0 のとき三角形となる。例えば地震の時地球の自転速度（通常は 462.96 m/sec）が $V = 1$ cm/sec だけ，100 秒間変化したとすると東西方向のひずみ地震計で $|t_g - t_b| = 2 \times 10^3$ sec であったとすると定尺の長さが 22 m であれば自由端における相対変位の最大値は 2×10^{-3} cm，ひずみにして 9×10^{-7} に相等する変化が記録される。永久的な緯度変化，断層運動等も同様な変化となる。要は永久変位の進行する速さがある値以上であればおおよそひずみ地震計の記録に現れる。実際に大地震の際にしばしばこのような梯形あるいは三角形の記録が現われる。

3. 観 測

旧逢坂山トンネルの中で1965年より S 38°W 方向のひずみ地震動の観測を H-59 型伸縮計¹¹⁾（記録速度 12 cm/hr.）を使って，1967年より垂直成分のひずみ地震動の観測を V59 型伸縮計¹²⁾（記録速度 12 cm/hr. と 18 cm/hr.）で，S52°E 成分は H-59 型（1 cm/hr.）を使って，1979年より E 方向の成分を 18 cm/hr. の速度で行っている。このほかに方向と N 方向はそれぞれ 0.86 cm/hr. および 0.53 cm/hr. の記録速度である。また，傾斜振動は水管傾斜計を 1965 年に記録速度 1.17 cm/hr. で N 38°E 方向の成分を，また，1965 年より稍大型の水平振子（ $H = 15$ cm）を使って S 38°W 成分と S 52°E 成分の観測を記録速度 18 cm/hr. で行っている。これらの計器の制振係数はいずれも 0.3 以上 0.7 程度差である。また，この外に通称，垂直成分回転ひずみ計と呼ばれている引力ポテンシャル変化の影響を記録しない傾斜計，S 38°W 成分と S 52°E 成分の観測を記録速度 2 cm/hr. 1979 年より始めた。以下にひずみ地震計あるいは傾斜地震計で観測した地震動の例を示す。

Photo. 1-A は 1979 年 12 月 12 日 17 時（以下いずれも日本標準時）のコロンビア沿岸の地震，震央：2°4' N，79°0' W， $M = 7.8 \sim 8.1$ の記録である。旧逢坂山トンネルでは震央距離は 127°，地震波線の方位角は 45°.7 である。上の 2 つの記録はそれぞれ水平振子型傾斜計の S 52°E 傾下成分と S 38°W 傾下成分の記録である。この地震の波線の方位角では傾斜成分には Love 波の位相はなく，Rayleigh 波の振幅はそれぞれ理論的には $0.133 \times (\partial w_R / \partial X)$ ，および $0.991 \times (\partial w_R / \partial X)$ と求められる，ここでは波線の方向を X 方向とする。S 38°W 方向の成分では発震時より約 70 分と約 120 分より少し前に優勢な位相が見られる。それぞれ W_1 ， W_2 に類する位相と思われる。また，S 52°E 方向成分には発震時より約 40 分と思われる所に 80～90 秒の長

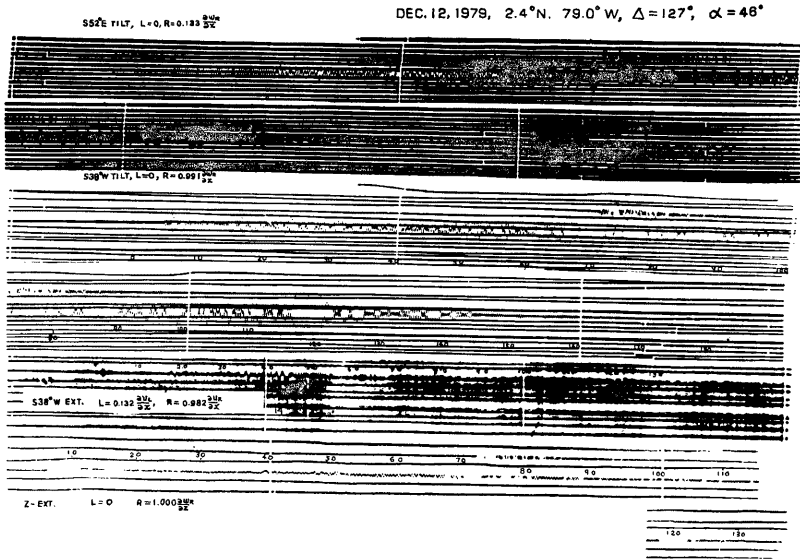


Photo. 1-A Records of components of S 52° E-tilt, S 38°W-tilt, S 38°W-extension and vertical extension at old Osakayama tunnel on the earthquake in Dec. 12, 1979.

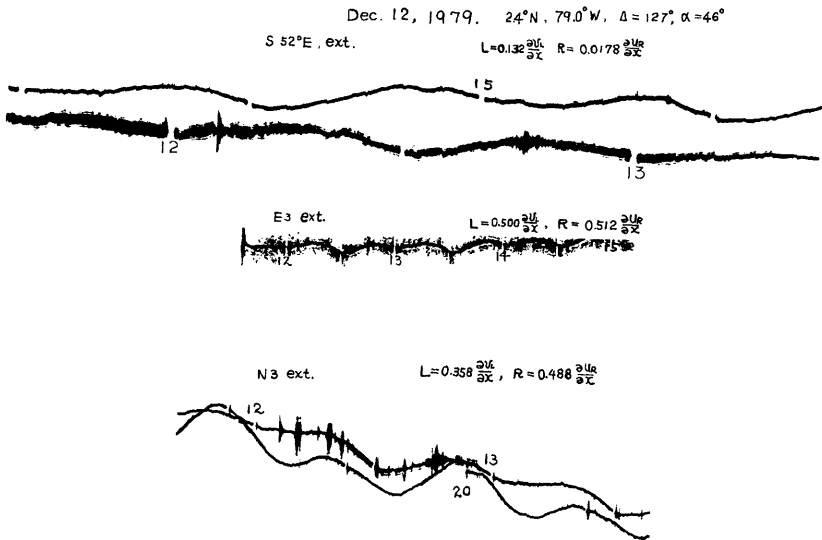


Photo. 1-B. Records of extensional components of S52°E, E and N at old Osakayama tunnel on the earthquake in Dec. 12, 1979.

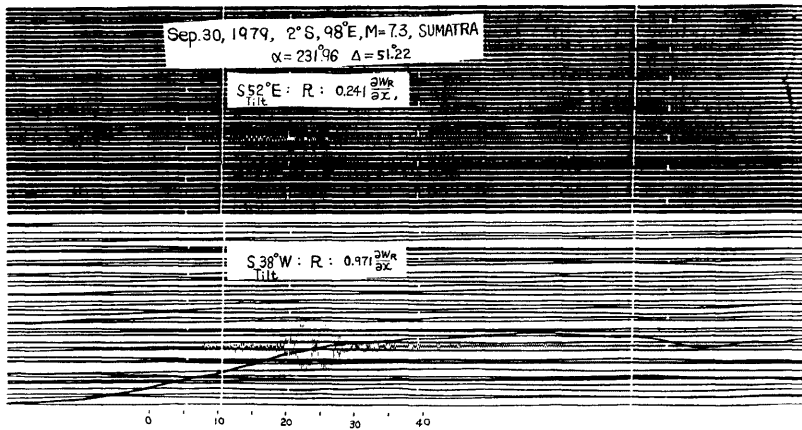


Photo. 2. Records of components of S 52°E-tilt and S 58°W-tilt at old Osakayama tunnel on the earthquake in Sep. 30, 1979.

い周期の位相が大きく現われている。同じ **Photo. 1-A** の上から3番目の記録は S 38°W方向のひずみ地震計の、4番目は垂直成分のひずみ地震動の記録である。理論的にはいずれも Love 波は小さいか全く現われないか、Rayleigh 波は優勢にほとんど最も大きく現われる方向に当たっている。記録でも発震時より70~80分と約120分の所に優勢な位相が見られる。また、約40分の所にはいずれの成分にも1分より長い周期の位相が明瞭に見られる。この位相が震源から伝わってきたものとする、この地震の他の成分の記録、また、他のいくつかの地震の場合の記録から、この位相の伝播速度は(3.9~4.2) km/sec と求められた。**Photo. 1-A** にコロンビアの地震より前に出ているのは12月12日午前2時の父島北方沖(29°2'N, 141°5'E, $h=200$ km)の地震の記録である。**Photo. 1-B** は上から伸縮の S 52°E 成分, E成分, N成分の記録でいずれも **Photo. 1-A** と同じ地震の記録を示している。理論計算では S 52°E 方向は Love 波も Rayleigh 波も小さく現われる方向で, E, N方向はともに Love 波も Rayleigh 波も可成り大きく現われる方向でその振幅比は記録に記入してある。N成分では約40分の所の長周期の位相が短時間鋭く現われており Rayleigh 波と思われる位相(Airy Phase と呼ぶ方が妥当かもしれない)が優勢に現われているのが分る。

Photo. 2 は1979年9月30日03時のスマトラの地震(2°S, 98°E, $M=7.3$)のときの S 52°E 方向傾下成分と S 38°W方向傾下成分の記録を示している。旧逢坂山トンネルでは震央距離51.2, 波線の方位角は232°であって S 52°E 成分では Rayleigh 波は小さく, S 38°W成分では大きく現われる計算になる。また、震源から伝わったとして, S 52°E 成分には速度 4.16 km/sec の付近に長周期の波が現れ, 速度 3.3 km/sec の波が最大振幅として現れている。S 38°W 成分では速度 3.2 km/sec と 2.8 km/sec の波がほとんど同じ位に優勢に現われている。3.2~2.8 km/sec の波の周期は19秒で、たまたまこの程度の接近した2つの周期があつて変調したかのようなのである。**Photo. 3** は1975年2月4日20時の海域地震(震央 122.6°E., 40°6'N, $M=7.5$, $\Delta=12^{\circ}.29$, 波線の方位角-89°0')の上から垂直ひずみ成分と S 38°W 方向ひずみ成分の記録で、**Photo. 4** は1976年7月28日10時の唐山地震(震央 118°0'E., 39°6'N., $h=23$ km, $M=7.6$, $\Delta=14^{\circ}.78$, 地震波線の方位角-66.5°)および同日19時の唐山地震の余震($M=7.1$)のときの S 38°W 方向のひずみ振動の記録である。両方の地震とも S 38°W 方向では Love 波, Rayleigh 波ともに小さく計算される方向である。記録では S 38°W 成分には短時間だけ実体波の位相の後に現れている。一方垂直成分は表面波の現れる時間に長

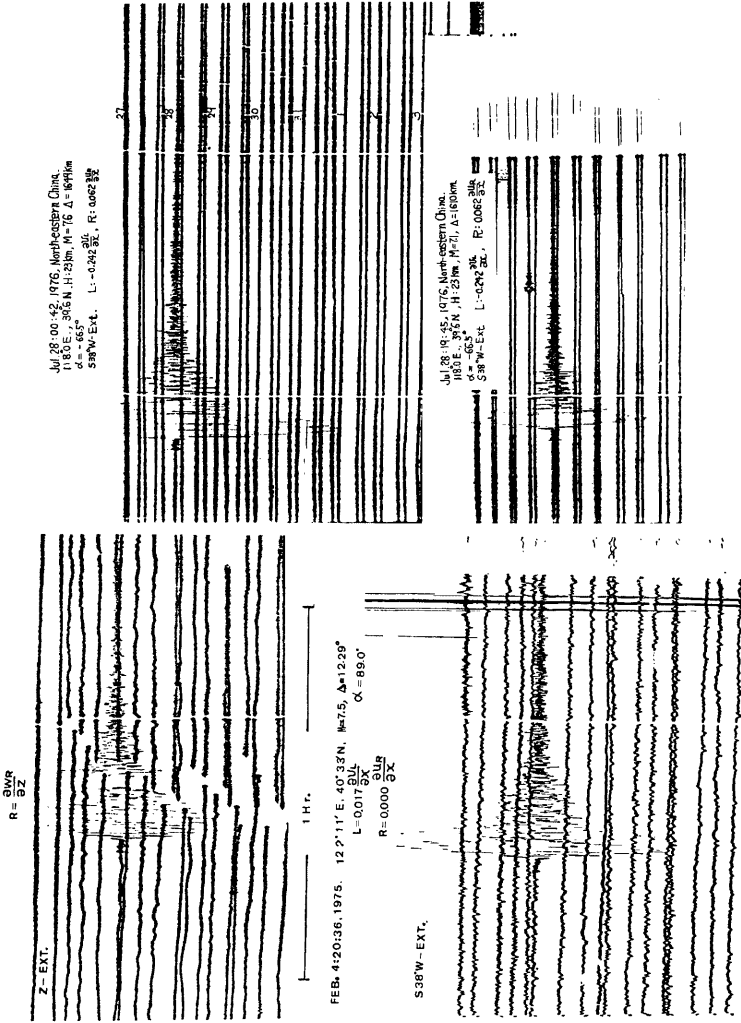


Photo. 4. Records of the component of S 38°W-extension at old Osakayama tunnel on these earthquakes in Jul. 28, 1976.

Photo. 3. Records of components of vertical-extension and S 38°W-extension at old Osakayama tunnel on the earthquake in Feb. 4, 1975.

い時間波が続いて現れているのが見られる。

Photo 5 の上の記録は1965年2月4日14時のアリュージョン地震（震央 $178^\circ.0$ E, $52^\circ.0$ N, $M=8.0$, $\Delta=34^\circ.8$, 地震波線の方位角 $47^\circ.2$ ）の際の水管傾斜計²³ N 38°E 傾下成分の記録である。地震動発生後間もなく 0.5 の S 38°W 方向への tilt step が起きた, step ができたのは初動から約 8 分後である。地震後周期の長い振動があり, 翌 2 月 5 日の午前は周期 5 ~ 7 分の小さい振動が連続していた。この水管傾斜計には制振装置が取り付けられており制振係数は 0.4 , 固有周期は 80 秒である。**Photo 5** の下の記録には地震の多

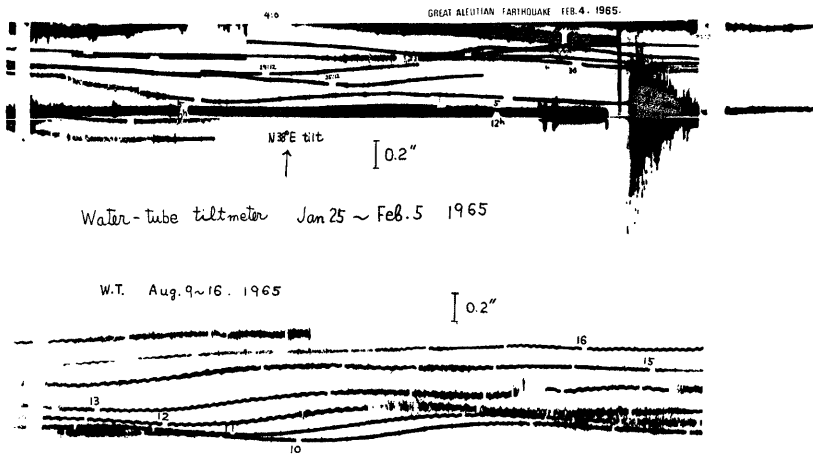


Photo. 5. Records of the component of N 38°E-tilt by the water-tube tiltmeter at old Osakayama tunnel on the Great Aleutian Earthquake in Feb. 4, 1965.

い週であるけれども特に地震とは無関係に20~30分周期の振動が続いているのが見られる。この程度の周期の振動は変位ではなく傾斜振動である可能性が強いかもしれない。以上の地震動の記録ではひずみ地震計の記録では変位ではなくひずみ振動である確率が大い、しかし水平振り型傾斜計の記録では変位振動である確率が大い。換言すれば重力を復元力とする地震計では特に天秤棒型とか回転ひずみ計のような装置を用いないかぎり地震動はほとんど変位振動と見てよく、異常な長周期の変化が現われることがあればその原因は地盤にあるのではなく装置自体にあるように思われる。

ここでは、震央の位置、発震時、規模は気象庁の地震速報あるいは地震月報によった。末筆ながら御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Benioff, H.: A linear strain seismograph, Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 25, 1935, pp. 283-309.
- 2) Ozawa, I. and T. Eto: On the observations of the long period's oscillations of the earth by means of the extensometers and the water-tube tiltmeter, Bull. Disaster Prevention Res. Inst., Vol. 15, part 2, No. 93, 1965, pp. 43-58.
- 3) Galitzin, B.: Vorlesungen über Seismometrie, B.G. Teubner, 1914, pp. 390-401.
- 4) 萩原尊禮: 振動測定, 宝文館, 1945, pp. 133-134.
- 5) Savarensky, E.F. und D.P. Kirnos: Elemente der Seismologie und Seismometrie, 1960, Akademie Verlag, Berlin, pp. 391-397.
- 6) 木沢 綏: 地盤の傾斜に伴う振子の運動について, 天気と気候, 第7巻, 1940, pp. 123-125.
- 7) 松沢武雄: 地震学, 1950, 角川書店, pp. 37-38.
- 8) Takeuchi, H., M. Saito and N. Kobayashi: Statical deformations and free oscillations of a model earth, Jour. Geophys. Res., Vol. 67, 1962, pp. 1141-1154.

- 9) Farrell, W.E.: Deformation of the earth by surface loads, *Rev. Geophys. & Space Phys.* Vol. 10, 1972, pp. 761-797.
- 10) 小沢泉夫, 藤井和成: 垂直成分回転ひずみ計による地殻変動の観測, 京都大学防災研究所年報, 第22号, B-1, 1979, pp. 79-82.
- 11) 小沢泉夫: 傾斜計を拡大装置に使った高感度伸縮計とそれによる土地のひずみの観測, 測地学会誌, 第6巻, 1960, pp. 1-5.
- 12) Ozawa, I.: New types of highly sensitive strainmeters—H-70 type extensometer and R-70 type rotationmeter—, *Special Contributions of the Geophys. Inst., Kyoto Univ.*, No. 10, 1970, pp. 137-148.