

RC 回路をもちいた長周期地震計の特性

三 雲 健

NOTES ON A LONG-PERIOD SEISMOGRAPH SYSTEM WITH RC NETWORK

By Takeshi MIKUMO

Abstract

Characteristics of a long-period seismograph system with RC network are described. The system consists of an electromagnetic seismograph of Press-Ewing type, resistance-capacitance double integrating network, DC amplifiers, and a rectilinear ink-writing galvanometer with a long-duration recorder. This study includes theoretical evaluation of the behavior of a condenser-shunted pendulum, the transfer characteristics of the RC network and of the overall system response. Experimental procedure by applying a calibration signal with steady state or step function current to an auxially coil leads to determination of the amplitude and phase responses of the system to the ground acceleration and hence the ground displacement. The impulse response of the system and theoretical waveforms for the incidence of impulsive *P* and *SV* waves at the base of the crust, are computed for later discussions. Examples of the seismograms from a distant earthquake and aftershock sequences are also presented.

1. 近年、長周期地震波（実体波および表面波）の観測によって、地震発生機構や地殻およびマントル構造などの研究が著しく進展して来た。現在、世界標準地震計観測網 WWSSN でもちいられている長周期地震計システムは Press-Ewing 型電磁地震計¹⁾（固有周期 15~30 sec）と長周期（90~100 sec）検流計の直結による光学記録方式であって、防災研究所においても、すでに数年前から鳥取微小地震観測所（1965年11月より）、上宝地殻変動観測所（1966年8月より）、天ヶ瀬地殻変動観測室（1968年9月より）などに同様な方式の地震計を設置して、常時観測を行なっている。しかしながらこの方式においては、地震計振子、検流計とも観測場所の温度変化その他の原因による drift のために、かなり頻繁な調整が必要であり、また光学記録による種々の不便さを伴う。

こゝではこれに代るものとして、新しく直流増幅器、RC 積分回路、直線書き pen-galvanometer、長時間レコーダーの組合わせによる直視記録方式を採用し、各種の実験の結果、安定な観測が可能なが確認されたので、これを上宝観測所に設置した。この方式は特に新しいものではなく、すでに Benioff²⁾ によって開発され、辻浦³⁾ その他が観測にもちいているものと原理的に同じものであるが、この報告では、その特性と観測された記録について少し詳しい考察を加える。

2. Fig. 1 は今回もちいた方式の概略を示す。

(1) 地震計 S は通常の Press-Ewing 型上下動または水平動電磁地震計で、その器械常数は Table 1 の通りである。固有周期は 8~30 sec の間で可変、moving-coil 型換振器を有し、coil は 4,000 回巻、内部抵抗約 1k Ω 、電圧感度 ($G_0=2\pi aNH$) は約 1.5volt/kine である。

(2) 換振器からの出力は (A) または (B) の RC 積分回路へ導かれる。今の場合、換振器内部抵抗が小さく、gain の損失を少なくするため回路の抵抗は比較的小さく選んだが、これらと組合わせて長い時定数を持たせるために、こゝでは 1,000~4,000 μ F の大容量のコンデンサーを使用した。このコンデンサー

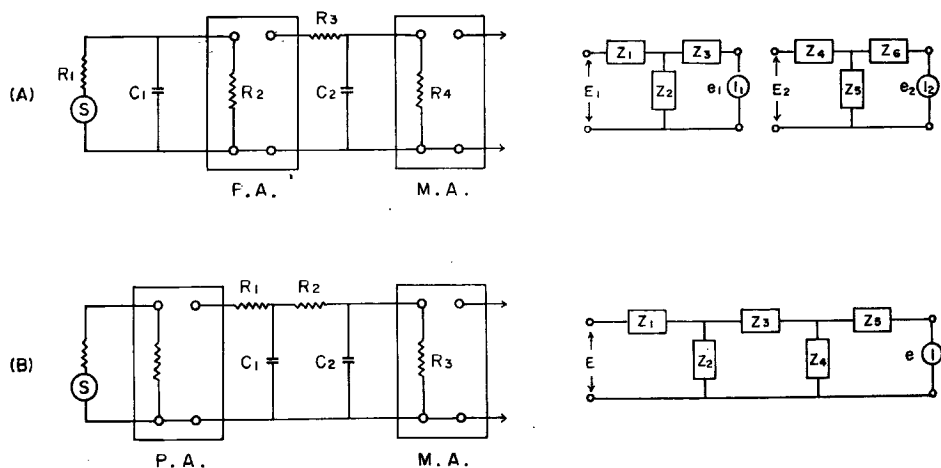


Fig. 1 Schematic representation of the long-period seismograph system now mentioned.

Table 1

	V-comp.	H-comp.
M (gr)	6.78×10^3	7.75×10^3
K (gr.cm ²)	7.60×10^6	8.50×10^6
H (cm)	35.7	33.7
L (cm)	37.0	37.5
D_0 (c.g.s. e.m.u.)	1.52×10^8	1.50×10^8
G (c.g.s. e.m.u.)	4.75×10^9	4.86×10^9

 M : mass of the pendulum K : moment of inertia H : distance between the center of gravity and the rotation axis L : distance between the center of coil and the rotation axis G_0 : voltage sensitivity

$$G = G_0 L$$

は普通ブロック型電解コンデンサー（耐圧 25V）であるが、今の場合のように 1V 以下の電圧に対してはその極性はほとんど問題にならない。長期間の安定性に関しては後に述べる。

(3) P.A. は渡辺測器製作所製 WA221 型直流増幅器を前置増幅器としたもので、最大感度 1 mV/V, 入力抵抗 10k Ω /mV, 入力フローティング型式, 出力インピーダンス 2k Ω 以下である。M.A. は同製作所製 WTR281 型ペンレコーダーの直流増幅器部 WA291 型を主増幅器として使用, 入力抵抗 5k Ω /5 mV, フローティング入力型式で、これに G13 型 pen-galvanometer (固有周波数 30 c/s, 減衰係数 0.7) を連結したときの最大感度は 5 mV フルスケール (± 40 mm) である。

(4) レコーダーとしては、記録紙の経費、整理保存上の便宜を考慮して、Fig. 2 (写真) に示すような 48 時間捲のものを製作した。送り速度は 3 cm/sec, 線間隔 5 mm, 1 回転 (180 cm) 1 時間を要する。これに上記の pen-galvanometer を移動式に取付けた。この galvanometer はペンの支点附近に円弧→直線変換機構を有するため、記録は直線書きとなって波形の歪が避けられる。



Fig. 2 Recorder.

3. 次に、地震計—RC 回路—増幅器—pen-galvanometer より成るこの system の地動に対する周波数特性を考える。

(1) 地震計振子の運動方程式は、(A), (B) 何れの場合にも、

$$K\ddot{x} + D\dot{x} + Ux = -MHL\ddot{\xi} - LGi - LG'i' \quad \dots\dots\dots(1)$$

i は振子 coil を流れる電流であるが、振子の運動によって coil に誘起される電圧は、

$$E = G_0\dot{x}, \quad E' = G'_0\dot{x} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ただし E', i' は振子に取付けられた calibration 用 coil に関する量であって、 $i' = E'/Z'$ である。

(B) の場合には $i = E/Z$ (Z は coil 抵抗と増幅器入力抵抗の和)、したがって (1) は普通の振子の場合と同じく、

$$\ddot{x} + 2\varepsilon_0\dot{x} + \omega_0^2x = -\alpha\ddot{\xi} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 $2\varepsilon_0 = (D + G^2/Z + G'^2/Z')/K$, $\omega_0^2 = U/K$, $\alpha = MHL/K$

定常状態の地動変位に対する解は

$$x/\xi = -\alpha\omega^2/(\omega_0^2 - \omega^2 + j \cdot 2\varepsilon_0\omega) \quad \dots\dots\dots(4)$$

(A) の場合は振子 coil をコンデンサーで shunt した形^{2), 4)}である。さらに簡単な場合の振子の運動式⁵⁾や、今の場合に対する地動と出力電圧との関係⁶⁾についてはすでに計算されているが、こゝでは最も一般的な形で運動方程式とその解を求め、さらに振子周期と減衰の増加についても考察する。(A) の場合について、 C_1, R_2 を流れる電流を i_1, i_2 とすれば、

$$\left. \begin{aligned} i &= i_1 + i_2 \\ e_1 &= E_1 - R_1i = R_2i_2 = \frac{1}{C_1} \int i_1 dt \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(5)$$

これから i_1, i_2 を消去すれば、

$$(R_1 + R_2)i + C_1R_1R_2\dot{i} = E_1 + C_1R_2\dot{E}_1 \quad \dots\dots\dots(6)$$

(1), (2), (6) より

$$\begin{aligned} (R_1 + R_2)[K\ddot{x} + (D + G'^2/Z')\dot{x} + Ux + MHL\ddot{\xi}] \\ + C_1R_1R_2[K\ddot{x} + (D + G'^2/Z')\dot{x} + Ux + MHL\ddot{\xi}] = -G^2\dot{x} + C_1R_2G^2\ddot{x} \end{aligned}$$

これを整理して、

$$\ddot{x} + (2\varepsilon_0 + \beta + \gamma)\dot{x} + (2\beta\varepsilon_0 + \gamma/C_1R_2 + \omega_0^2)\ddot{x} + \beta\omega_0^2x = -\alpha(\beta\ddot{\xi} + \ddot{\xi}) \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここに $2\varepsilon_0 = (D + G'^2/Z')/K$, $\beta = (R_1 + R_2)/C_1R_1R_2$, $\gamma = G^2/KR_1$

(B) の場合に比べて、この場合の振子の運動は (7) で表わされるような 3 階微分方程式となり、やや複雑な形を取る。定常状態の地動変位に対しては、

$$[-j\omega^3 - (2\varepsilon_0 + \beta + \tau)\omega^2 + j(2\beta\varepsilon_0 + \tau/C_1R_2 + \omega_0^2)\omega + \beta\omega_0^2]x = \alpha(\beta\omega^2 + j\omega^3)\xi$$

ここで

$$\omega_c^2 = \omega_0^2 / (1 + \tau/\beta + 2\varepsilon_0/\beta), \quad 2\varepsilon_c = \frac{2\varepsilon_0 + \tau/\beta C_1R_2 + \omega_0^2/\beta}{1 + \tau/\beta + 2\varepsilon_0/\beta} \quad \dots\dots\dots (8)$$

で表わされるような ω_c, ε_c を導入すれば、

$$\frac{x}{\xi} = \frac{\alpha(\omega_c/\omega_0)^2(\omega^2 + j\omega^3/\beta)}{\omega_c^2 - \omega^2 + j[2\varepsilon_c\omega - (\omega_c/\omega_0)^2\omega^3/\beta]} \quad \dots\dots\dots (9)$$

これを (B) の場合の (4) 式と比較すれば、分母の ω^3 の項は、みかけ上 damping が周波数に依存することを示すが、 $\omega^2 \ll 2\varepsilon_0\beta(\omega_c/\omega_0)^2$ なる範囲においては、分子の ω^3 の項および係数 $(\omega_c/\omega_0)^2$ を除いて ω_0, ε_0 をそれぞれ ω_c, ε_c で置きかえた形である。すなわちこの場合は固有周期 T_c 、減衰係数 h_c を持った振子とみなすことが出来る。(8) および (7) の係数などから、

$$\left. \begin{aligned} T_c &= T_0 \left[1 + \frac{G^2 C_1}{K} \cdot \frac{1}{1 + R_1/R_2} + \frac{T_n}{T_0} \cdot \frac{2h_0}{1 + R_1/R_2} \right]^{1/2} \\ h_c &= \left[h_0 + h_n + \frac{T_n}{T_0} \cdot \frac{1}{2(1 + R_1/R_2)} \right] \cdot \frac{T_0}{T_c} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに $T_n = 2\pi C_1 R_1$, $h_n = \frac{T_0}{4\pi} \cdot \frac{G^2}{K(R_1 + R_2)}$, $h_0 = \varepsilon_0/\omega_0$

T_n はこの回路の時定数、 h_n は C_1 のない場合の電磁 damping を示す。

Table 2 の (A) の場合、 $T_0 = 12$ sec, $h_0 = 0.42$ に対して、(A1)…… $T_c = 44.8$ sec, $h_c = 0.64$, (A2)…… $T_c = 33.5$ sec, $h_c = 0.76$ となり、固有周期、減衰常数の何れもかなり増加する。 $R_2 = \infty$, $h_0 \approx 0$ の場合は Benioff の近似式²⁾に相当する。

(2) 振子の運動によって coil に誘起される電圧は (2) 式で与えられるから、

$$E/x = j\omega G_0 \quad \dots\dots\dots (11)$$

(3) 次に RC 積分回路と直流増幅器の伝達特性は次のように表わすことができる。(A) の場合は P.A. の前に 1 段、P.A. と M.A. の間に 1 段の RC 回路を持ち、それぞれ 3 要素 4 端子回路 (右側参照) であるから、

$$\frac{e_1}{E_1} = \frac{Z_2 Z_3}{Z_2(Z_1 + Z_3) + Z_1 Z_3}, \quad \frac{e_2}{E_2} = \frac{Z_5 Z_6}{Z_5(Z_4 + Z_6) + Z_4 Z_6} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 $Z_1 = R_1$, $Z_2 = 1/j\omega C_1$, $Z_3 = R_2$; $Z_4 = R_3$, $Z_5 = 1/j\omega C_2$, $Z_6 = R_4$ であるから、

$$e_2/E_1 = \mu R_2 R_4 [(R_1 + R_2 + j\omega C_1 R_1 R_2)(R_3 + R_4 + j\omega C_2 R_3 R_4)]^{-1} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここに $\mu = E_2/e_1$ は P.A. の増幅率である。

(B) の場合は、P.A. と M.A. との間に 2 段の RC 積分回路を持つから、右側に示すような 5 要素 4 端子回路で置き換えられる²⁾。すなわち

$$\frac{e}{E} = \frac{Z_2 Z_4 Z_5}{Z_1(Z_2 + Z_3)(Z_4 + Z_5) + Z_4 Z_5(Z_1 + Z_2) + Z_2 Z_3(Z_4 + Z_5)} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 $Z_1 = R_1$, $Z_3 = R_2$, $Z_5 = R_3$, $Z_2 = 1/j\omega C_1$, $Z_4 = 1/j\omega C_2$ であるから、

$$e/E = R_3 [R_1(1 + j\omega C_1 R_2)(1 + j\omega C_2 R_3) + R_3(1 + j\omega C_1 R_1) + R_2(1 + j\omega C_2 R_3)]^{-1} \quad \dots\dots\dots (15)$$

各抵抗およびコンデンサーの値には多くの組合わせが考えられるが、種々のテストの結果、Table 2 に挙げた 4 通りの場合を選んだ。各抵抗値には地震計 coil の内部抵抗、増幅器の入力、出力抵抗等が含まれる。Fig. 3 は上の 4 通りの場合について振幅および位相特性を (13) または (15) によって計算した結果である (位相は π を単位として遅れを示す)。黒丸は B2 の場合に、oscillator によって正弦波入力電圧を与えて実験した値であって計算値とよく一致する。

(4) 以上によって伝達された電圧は pen-galvanometer へ導かれるから、その運動方程式は、

$$\ddot{y} + 2\varepsilon_g \dot{y} + \omega_g^2 y = k e \quad \dots\dots\dots (16)$$

Table 2

Case	C_1 μF	C_2 μF	R_1 K Ω	R_2 K Ω	R_3 K Ω	R_4 K Ω
A1	4,000	4,000	2	10	22	20
A2	2,000	4,000	4	10	22	20
B1	1,000	4,000	2	20	20	
B2	2,000	4,000	2	20	20	

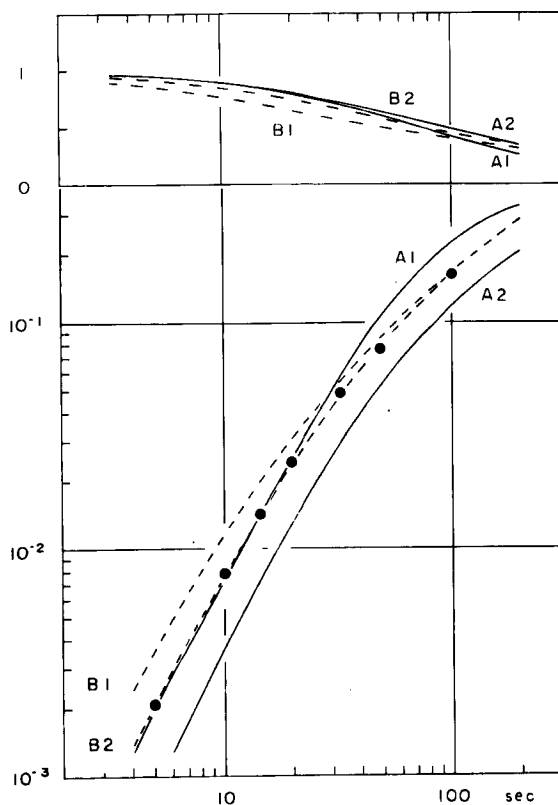


Fig. 3 Transfer characteristics of the RC integrating network.
upper: phase delay in a unit of π , lower: amplitude response.

ここに $2\varepsilon_g = d/k_g$, $\omega_g^2 = u/k$, $k = g^2/k_g Z_g$ である。定常状態に対する解は、

$$y/e = k/(\omega_g^2 - \omega^2 + j \cdot 2\varepsilon_g \omega) \quad \dots\dots\dots (17)$$

(5) したがって system 全体の地動変位に対する response は (4) または (9), (11), (13) または (15), および (17) より

$$\frac{y}{\xi} = \frac{x}{\xi} \cdot \frac{E}{x} \cdot \frac{e}{E} \cdot \frac{y}{e} \equiv S(\omega) \quad \dots\dots\dots (18)$$

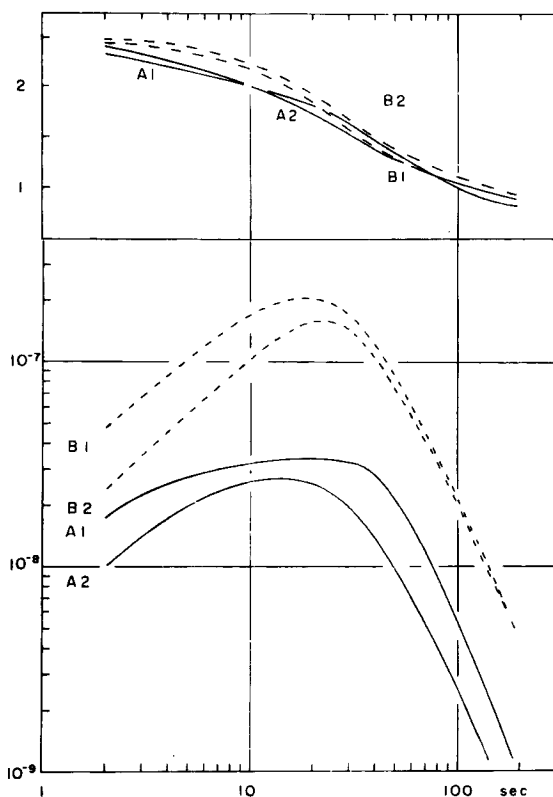


Fig. 4 Theoretical response of the present seismograph system to the ground displacement. upper: phase response, lower: amplitude response.

Fig. 4 は Table 2 の 4 通りの場合について理論的に計算した $\text{response } S(\omega)/\alpha G_0 \mu k$ を示したものである。(B)の場合は $T_0=30 \text{ sec}$, $h_0=0.79$ として計算した。たゞしこの場合、固有周期を 30 sec に調整して長期間の安定な観測を継続することは、種々の点でかなり困難である。これに比べて (A) の場合は、先に述べたように固有周期を 12 sec 程度に調整して置くことにより 30~50 sec の周期を得ることは簡単であり、振子の動作は安定である。また前段の回路によって振幅の大きい短周期の波動またはノイズを cut して P.A. の飽和を防ぐことが出来る。以上のような点から現在、常時観測には A1 の場合を採用している。

4. 次に地動変位に対する response を実験的に決定する。こゝで用いた方法は、この system に既知の calibration input を与えて、これによる output を測定する方法で、先に Espinosa et al. (1961)⁷⁾ が直結式電磁地震計にもちいたものと同じである。input (地動加速度) および output (pen-galvanometer による記録) を $\xi(t)$, $y(t)$, その Fourier transform をそれぞれ $\Phi(\omega)$, $Y(\omega)$ とする。

地震計振子に取付けた calibration 用 coil に入力電圧 $E_c = E_0 \cdot f(t)$ を与えれば、このために生ずる振子の運動の moment は $GE_0 f(t)/Z'$ である。 $(Z'$ はこの coil 側からみた calibration 回路の抵抗)。運動方程式から明らかなように、これは地動によって生ずる振子の運動の moment $MH\ddot{\xi}$ に等価である。したがって calibration input と等価な地動加速度は、

$$\ddot{\xi} = \frac{G}{MH} \frac{E_0}{Z'} f(t) \quad \text{あるいは} \quad \Phi(\omega) = \eta F(\omega) \quad \cdots \cdots (19)$$

こゝに $\eta = GE_0/MHZ'$ である。入力電圧の形として正弦波または step function を取ると、

$$\left. \begin{array}{l} 1) \quad f(t) = \sin \omega t \\ 2) \quad f(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ 1 & (t \geq 0) \end{cases} \quad F(\omega) = 1/j\omega \end{array} \right\} \dots\dots\dots (20)$$

これによって生ずる output $y(t)$ は recorder に記録されるから、1) の場合には $y(t)$ の最大振幅を測定し、2) の場合には $y(t)$ から Fourier transform $Y(\omega)$ を計算すればよい。 $Y(\omega) = \ddot{\phi}(\omega) \cdot S(\omega)$ であるから、この system の地動が速度に対する response $S_A(\omega)$ は

$$S_A(\omega) = Y(\omega) / \ddot{\phi}(\omega) \quad \dots\dots\dots (21)$$

Fig. 5 は入力電圧として電池の接続により 2) の形を与えたときの記録例 (EW 成分) である。上の方

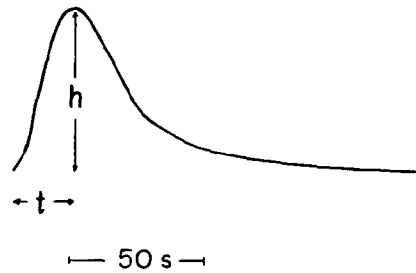


Fig. 5 Example of a record for the calibration input with step function type.

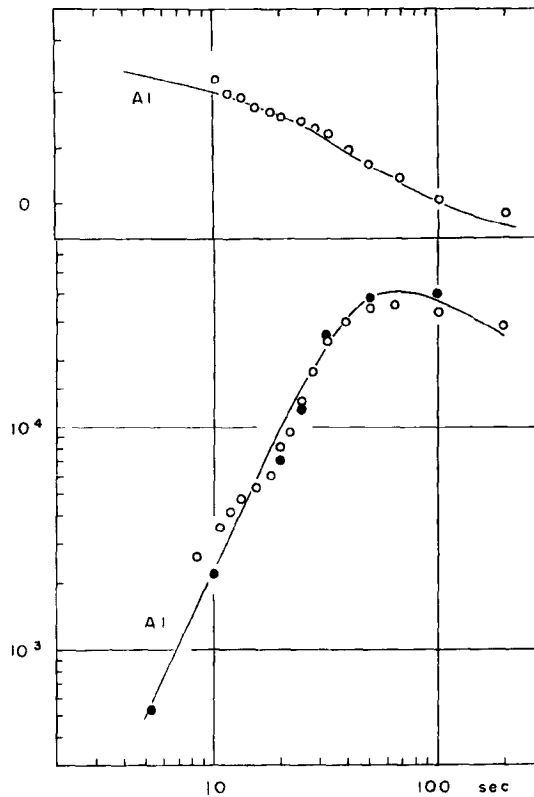


Fig. 6. Theoretical and experimental responses to the ground acceleration.

法によって求めた $S_A(\omega)$ を **Fig. 6** に白丸で示した。10 sec 以下の周期に対しては, noise や読取誤差などのために, 信頼できる値を得ることは難しい。黒丸は oscillator により正弦波入力電圧 1) を与えて決定した値である。図中の曲線は先に述べた方法により A1 の場合について理論的に計算した地動加速度に対する response で, 実験値をよく説明する。

calibration input と等価な地動変位は (19) より,

$$\xi = \eta \cdot f(t + \pi/\omega) / \omega^2 \text{ あるいは } \Phi(\omega) = \eta F(\omega) e^{+j\pi} / \omega^2 \quad \dots\dots\dots(22)$$

と書くことができるから, 地動変位に対する response $S(\omega)$ は

$$S(\omega) = Y(\omega) / \Phi(\omega) = S_A(\omega) \cdot \omega^2 \cdot e^{-j\pi} \quad \dots\dots\dots(23)$$

Fig. 6 の実験的に決定した $S_A(\omega)$ から (23) によって $S(\omega)$ を定めた値を **Fig. 7** に示した。このようにして決定した曲線 (E) は理論的に予期される曲線 (Th.) と多少の差を生ずるが, 大体満足すべき結果である。今の場合最大倍率を1,000倍になるように調整してある。なお, 比較のために, Press-Ewing 型直結式電磁地震計の response も同時に示した。P は $T_0=30$ sec, $T_g=100$ sec, $h_0=h_g=1$ の場合, T は $T_0=20$ sec, $T_g=100$ sec, $h_0=2.0$, $h_g=0.7$ の場合で, 後者は鳥取観測所で観測中のものである。こゝで述べた system の response をこれらの場合と比較すると, 長周期側でやゝ感度が低い。しかしこの方が周期 60~90 sec の noise からまぬがれ, かつ 10~40 sec 程度の実体波および表面波の観測には適している。現在の WWSSN における標準は $T_0=15$ sec (その他は同じ) あって, その response は大体こゝに述べた system に近い。

Fig. 8 はこの system (B1) の impulse response であって, impulsive な地動変位に対して記録されるべき波形を計算したものである。比較的 magnitude の大きい深発または稍深発地震の際にしばしば記録

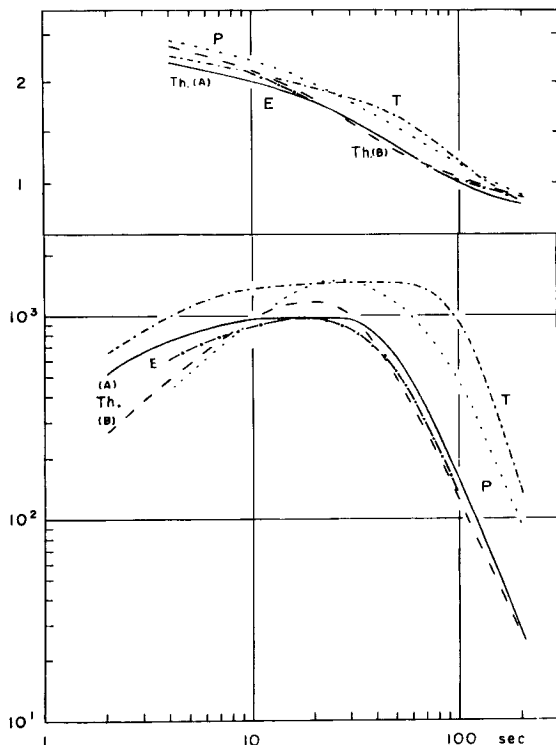


Fig. 7 Theoretical and experimental responses to the ground displacement.

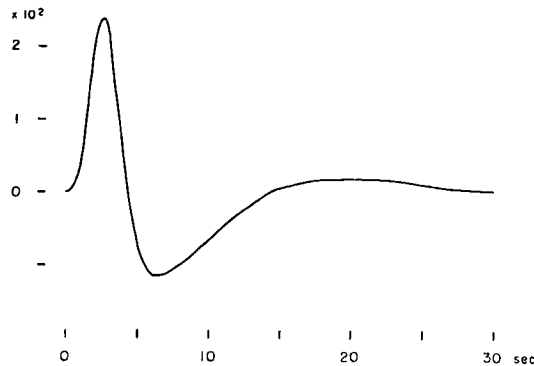


Fig. 8 Computed impulse response of the present system to the ground displacement.

される P 波初動部分の波形はほぼ $\vee$ の形に近い⁸⁾。A1 の場合も大きい差はない。

5. 以上に述べたような長周期地震計 system 3 成分 (V , EW , NS) を製作し、現在これを上宝地殻変動観測所に設置して観測を実施中である。設置地点は蔵柱観測坑内に設けたブロック製観測室であるが、坑内の温度変化は年間を通じて 0.1°C 以内ではほとんど一定とみなされ、観測は安定した条件の下で行われている。calibration は観測記録が取替えられる 2 日に 1 回の割合で行われるが、これによる波形 (Fig. 5) の変動を t および h の平均値と標準偏差で表わせば

$$V: t=16.7 \pm 0.56 \text{ sec}, b=29.8 \pm 1.1 \text{ mm (359 日間)}$$

$$EW: t=17.6 \pm 0.83 \text{ sec}, h=15.5 \pm 1.3 \text{ mm (70 日間)}$$

の程度であって、何等の調整を行わなかった上記期間中では特に目立った drift は見られない。上の値の変動の主な原因は、calibration pulse の与え方の不整、地震計振子の平衡位置のわずかな移動、さらに読取誤差などによるものと思われ、response の実際の変動はこの期間内では 5 % 以内にとどまるものとみなしてもよからう。

Fig. 9 は上宝観測所で観測された長周期地震波の 1 例である。この地震の震源は $\phi=30.9^{\circ}\text{N}$, $\lambda=131.7^{\circ}\text{E}$, $h=40 \text{ km}$ (屋久島東方沖) で、 $M=5.5$, $\Delta=785 \text{ km}$ である。

振幅の小さい P 波初動後約 80 sec で S 波の到着がみられ、そのうち EW , NS 両成分に Love 波、 V 成分に Rayleigh 波が観測され、何れの表面波もよく分散を示している。このような観測記録の蓄積を待って group velocity から地殻構造を議論することが可能となろう。また他の観測点との相関から phase velocity による方法も期待される。

Fig. 10 は同観測所で記録された、1969 年 9 月 9 日の奥美濃地震 ($\phi=35.8^{\circ}\text{N}$, $\lambda=137.0^{\circ}\text{E}$, $M=6.6$ の余震 5 個を示したものである。対応する各成分の記録を比較すると、はじめの 2 個、後の 2 個の余震の波形はそれぞれ極めてよく類似していることが分る。9 月 14 日の余震の V 成分記録を拡大したものを Fig. 11 に示す。他の余震と同様、特徴的なことは、周期約 6 sec 程度の P 波、続いてさらに長い周期の S 波が著しく、 $\Delta=60 \text{ km}$ 程度の近距離においてかなり大きい地震からこのような比較的単純な波形が観測されたことはめずらしい。同地点における短周期地震計の記録には約 10 c/s の振幅の大きい波が卓越し、上のような波は見られない。

8. Fig. 12 は、impulsive な実体波が上宝観測点下の地殻へ入射した場合に、上の長周期上下動地震計によって記録されるべき P 波および SV 波の理論波形を計算したものである。上宝附近の地殻構造としては、爆破地震動、表面法、重力異常などの data から得られた 1 つの model C4A3⁹⁾ を 1 例として採用し、入射角 35° に対する多層構造の crustal response を Thomson-Haskell の matrix 法によって求めた。こ

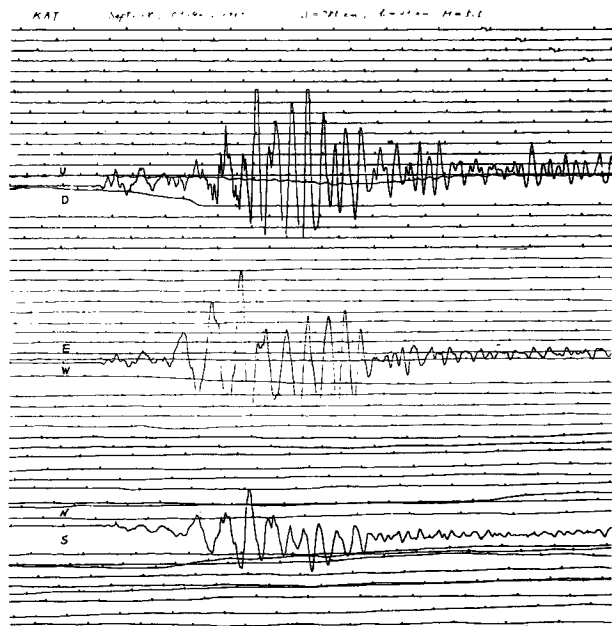


Fig. 9 Example of the three-component seismograms recorded at the Kamitakara station ($J=785$ km).
Epicenter: $\phi=30^{\circ}.9$ N, $\lambda=131^{\circ}.7$ E, $h=40$ km, $M=5.5$.

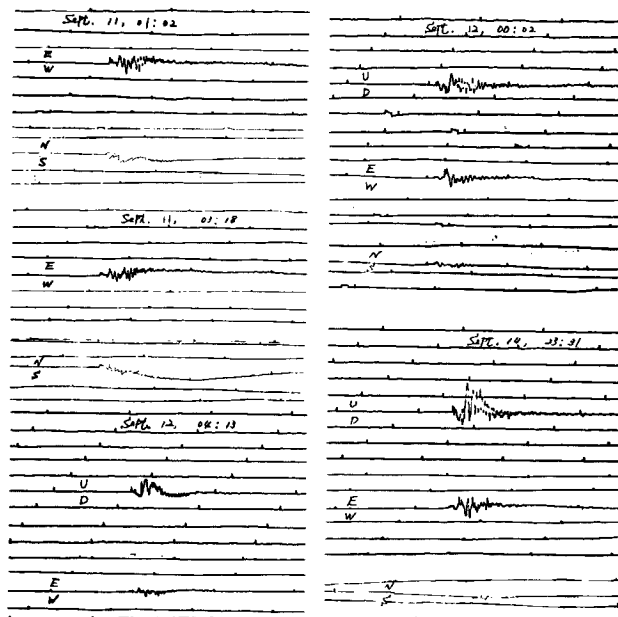


Fig. 10 Examples of the seismograms recorded at the Kamitakara station at the time of aftershocks of the Sept. 9 Oku-mino earthquake ($\phi=35^{\circ}.8$ N, $\lambda=137^{\circ}.0$ E).

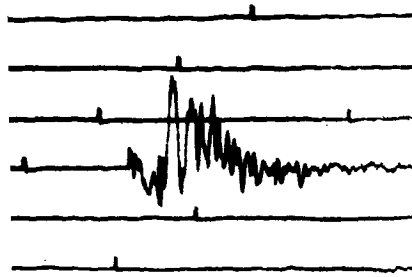


Fig. 11 Waveform of the vertical component seismogram from one of the aftershocks mentioned above.

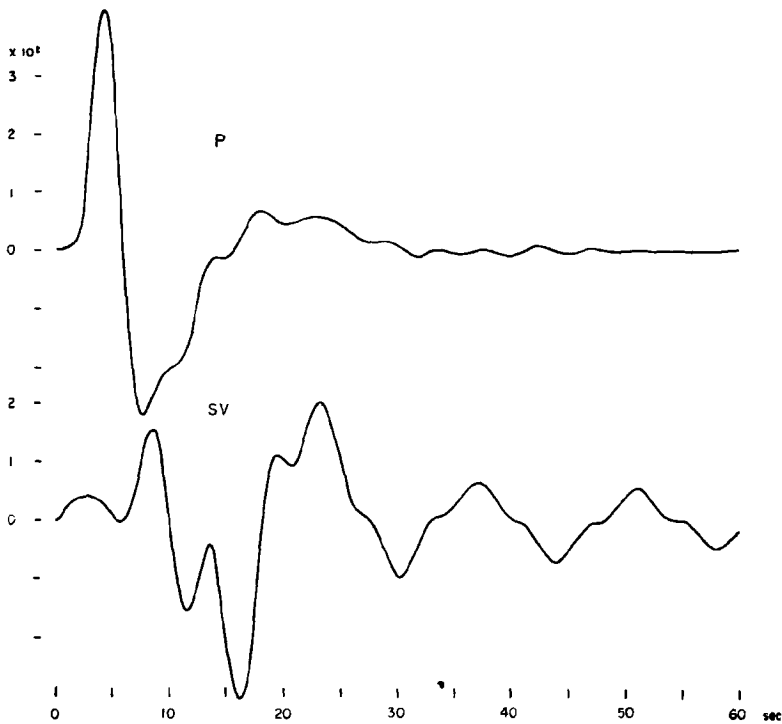


Fig. 12 Theoretical waveforms for the incidence of impulsive P and SV waves, with an incident angle of 35° at the base of the crust.

れと地震計 system の response との積を Fourier 逆変換することにより、図のような波形が得られる。**Fig. 11** の余震の場合は、こゝで計算した場合と条件が異なるので、波形を直接比較することはできないが、実際に記録された波形が理論波形の場合のように割合簡単であることから、さらに詳しい解析によって、この余震の source time function に関して何等かの情報が得られるかも知れない。

7. ここで述べたような長周期地震計 system によって、さらに長周期 (50~300 sec 程度) の地震波を観測するには次のような方法が考えられる。換振器 coil の捲数を大きくし内部抵抗を増大させ、かつ磁場を強くして電圧感度を高める。(A) において P.A. と coil の間の RC 回路を2段以上として振子周期をさらに長くすると共に、積分回路の特性を長周期側で大きくする。また別の方法としては、moving coil 型 velocity transducer の代りに、displacement transducer を使用すれば、換振器の出力電圧は振子の変位に比例するから、system の amplitude response の長周期側での減少の仕方がゆるやかになるはずである。なお、condenser の使用によって大型電磁地震計の必要性が少なくなり、また P.A. の代りに IC 回路をもちいる等、全体を小型化することも可能であろう。

おわりに、この研究全般にわたって助言を頂いた防災研究所 尾池和夫氏、当初の設計に種々の示唆を頂いた東北大学 高木章雄博士、熊本大学 大塚道雄博士、および理論に関して御意見を頂いた加茂幸介博士に厚く御礼申し上げる。

また、長時間レコーダーの設計・製作に当られた津嶋吉男、松尾成光の両氏、実験および観測結果の解析をして頂いた小泉律子夫人、現地での観測に当って頂いた上宝地殻変動観測所 故富永進博士、および和田安男、和田博夫の両氏に深く感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) Press, F., M. Ewing and F. Lehner: A Long Period Seismograph System, Trans. Amer. Geophys. Union, **39**, 1958, pp. 106~108.
- 2) Benioff, H.: Long-period seismographs, Bull. Seism. Soc. Amer., **50** (1960), pp. 1~13.
- 3) 辻浦 賢: 直視記録方式による長周期地震計 (1, 2, 3), Bull. Earthq. Res. Inst., **40** (1962), 889-905, 907-916; **43**, 1965, pp. 429~440.
- 4) Bernard, P.: Sur l'amplification des séismographes dont la période est allongnée par condensateurs, Ann. Geophys., **11**, 1955, pp. 374~375.
- 5) Coulomb, J.: Accroissement de la période d'un galvanomètre par emploi d'un condensateur, Mesures, **179**, 1952, pp. 221~224.
- 6) 鈴木次郎・長谷川武司: コンデンサーを制動に用いた場合の地震計の動き, 爆破地震動研究グループ会報 No. 25, 1966, pp. 30~34.
- 7) Espinosa, A.F., G.H. Sutton and H.J. Miller: A Transient Technique for Seismograph Calibration, Bull. Seism. Soc. Amer., **52**, 1962, pp. 767~779.
- 8) Mikumo, T.: Long-period P Waveforms and the Source Mechanism of Intermediate Earthquakes, J. Phys. Earth, **17**, 1969, pp. 169~192.
- 9) Mikumo, T.: A Study on Crustal Structure in Japan by the Use of Seismic and Gravity Data, Bull. Earthq. Res. Inst., **44**, 1966, pp. 965~1007.