



Title	12. 地震観測用の諸計器の試作
Author(s)	田, 望; DEN, Nozomu
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 10, 143-169
Issue Date	1963-03-25
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/gbhu.10.143">https://doi.org/10.14943/gbhu.10.143</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/13855">https://hdl.handle.net/2115/13855</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	10_p143-169.pdf



## 12. 地震観測用の諸計器の試作

田 望

(北海道大学理学部地球物理学教室)

— 昭和37年7月受理 —

### I. はし が き

自然地震や爆破地震、或いは地震工学の研究もその対象が次々と拡大し、内容が深まるとともに、その計測のための器械や技術もその目的や対象に適應したものが必要となり、数多くの研究者によって開拓されている。

爆破地震動の観測には極めて高感度の計器を必要とし、地震工学における、いわゆるスターターを使用した自動的観測には、装置全体の安定性と耐久性が要求され、また記録の周波数分析をする場合には地震計の周波数特性が良好であることが望まれるなど、計器に課せられる特性は枚挙に暇ない。計算機や解析装置の発達してきた今日“良い記録”を得ることは重要な課題である。

一口に地震計測と云っても、その範囲は広く、著者の携ったのはその一端に過ぎないが、本論文においては著者の試作した地震観測用の諸計器の概略を述べる。

### II. 可動線輪型の地震計と Galvanometer の特性図示と等価回路について

可動線輪型の地震計および Galvanometer の特性については、既に多くの研究者により詳細に論ぜられており、また実際に使用する計器についてその特性を計算することはそれ程面倒なことではない。しかし新たにこれらの計器を、或いは一般に多階の線型微分方程式で動作が表現されるような計器を設計する場合などには、自動制御理論でしばしば利用される如く、周波数特性を近似的に図示したり、また電氣的な等価回路で表現する方法は便利である。

#### 1. 電磁式地震計の特性

可動線輪型の地震計の振子の運動および線輪の起電力は次式により表わされる。

$$K \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + U\theta = -MH \frac{d^2x}{dt^2} - GI_1 \quad (\text{II-1})$$

$$E_s = G \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II-2})$$

ただし  $K$ : 振子の慣性能率

$D$ : 回路を開放したときの振子の減衰の係数

$U$ : 復原力の係数

- $M$ : 振子の質量  
 $H$ : 振子の重心と廻転軸との間の距離  
 $G$ : 振子の電圧感度の係数  
 $\theta$ : 振子のふれの角  
 $x$ : 地動の変位  
 $t$ : 時 間  
 $E_s$ : 線輪に誘起される起電力  
 $I_1$ : コイルに流れる電流

いま地震計の線輪の impedance を抵抗  $R_c$  のみと見なし、外部に抵抗  $R_{\text{ext}}$  を接続した場合には

$$I_1 = \frac{E_s}{R_c + R_{\text{ext}}} \quad (\text{II-3})$$

であるから、これと (II-1), (II-2) 式から

$$K \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \left( D + \frac{G^2}{R_c + R_{\text{ext}}} \right) \frac{d\theta}{dt} + U\theta = -MH \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (\text{II-4})$$

となる。いま

$$f_{s0} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{U}{K}} \quad : \quad \text{地震計の固有周波数}$$

$$h_s = \frac{1}{4\pi f_{s0} K} \left( D + \frac{G^2}{R_c + R_{\text{ext}}} \right) \quad : \quad \text{地震計の減衰常数} \quad (\text{II-5})$$

$$l = \frac{K}{MH} \quad : \quad \text{相当質点振子長}$$

と記せば、(II-4) 式は

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + 4\pi f_{s0} h_s \frac{d\theta}{dt} + (2\pi f_{s0})^2 \theta = -\frac{1}{l} \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (\text{II-6})$$

と書ける。

地動が

$$x = x_m \sin 2\pi ft$$

なる単弦振動であるときの定常状態に対する解はよく知られている通り、

$$\theta = -A_0(v_s, h_s) \frac{1}{l} x_m \sin \{2\pi ft + \delta_0(v_s, h_s)\} \quad (\text{II-7})$$

$$= -\frac{1}{4\pi f_{s0} h_s} A_1(v_s, h_s) \frac{1}{l} \frac{d}{dt} x_m \sin \{2\pi ft + \delta_1(v_s, h_s)\} \quad (\text{II-8})$$

$$= -\frac{1}{(2\pi f_{s0})^2} A_2(v_s, h_s) \frac{1}{l} \frac{d^2}{dt^2} x_m \sin \{2\pi ft + \delta_2(v_s, h_s)\} \quad (\text{II-9})$$

である。ここで

$$v_s = \frac{f}{f_{s0}} \quad (\text{II-10})$$

$$A_0(v, h) = \frac{v^2}{\sqrt{(v^2-1)^2 + 4h^2v^2}} \quad (\text{II-11})$$

$$A_1(v, h) = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{v^2-1}{2hv}\right)^2 + 1}} \quad (\text{II-12})$$

$$A_2(v, h) = \frac{1}{\sqrt{(v^2-1)^2 + 4h^2v^2}} \quad (\text{II-13})$$

$$\tan \delta_0(v, h) = \tan \delta_2(v, h) = \frac{2hv}{v^2-1} \quad (\text{II-14})$$

ただし  $0 \leq \delta_1 < \pi$ ,  $-\pi < \delta_3 \leq 0$  とする。

$$\tan \delta_1(v, h) = \frac{1-v^2}{2hv} \quad (\text{II-15})$$

ただし  $-\frac{\pi}{2} < \delta_2 \leq \frac{\pi}{2}$  とする。

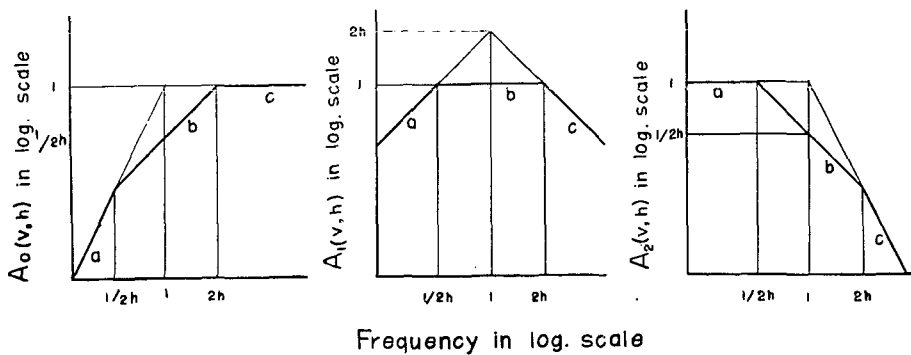
いま  $A_0(v, h)$  につき考えると

(i)  $v \ll 1$  では近似的に  $A_0(v, h) = v^2$

(ii)  $v \gg 1$  では近似的に  $A_0(v, h) = 1$

(iii)  $v=1$  では  $A_0(1, h) = \frac{1}{2h}$  で、 $2h$  が 1 に比し可成り大である場合には  $v=1$  の近傍で近似的に  $A(v, h) = \frac{v}{2h}$  となる。

したがって  $A_0(v, h)$  と  $v$  をそれぞれ縦軸・横軸に対数尺度でとった BODE 図表では第 1 図の如く  $A_0(v, h)$  は三つの直線 a, b, c で近似される。



第 1 図 周波数特性の近似表現

Fig. 1. Approximate representation of the frequency characteristics.

同様に  $A_1(v, h)$  および  $A_2(v, h)$  も第 1 図の如く、それぞれ 3 本の直線で近似される。これらの直線の tangent はそれぞれ 0,  $\pm 1$ ,  $\pm 2$  のいずれかである。すなわち  $A_i(v, h)$ ,

$i=0, 1, 2$  はそれぞれの周波数領域で  $0, \pm 6, \pm 12$  db/octave のいずれかで近似される。 $A_i(v, h)$  の正しい値は  $a, c$  直線を漸近線としてもち、 $v=1$  で  $b$  直線に切する曲線である。

$A_i(v, h)$  と  $\delta_i(v, h)$  との間には回路網における BODE の定理<sup>1,2)</sup> が成立することが容易に知れる。すなわち、いま  $A_i(v, h), \delta(v, h)$  を単に  $A_i(v), \delta_i(v)$  と略記し、或る周波数比  $v_c$  における位相  $\delta_i(v_c)$  を考えると、

$$\theta = \ln \frac{v}{v_c}$$

$$u_i(\theta) = \ln A_i(v)$$

とすれば、

$$\begin{aligned} \delta_i(v_c) &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \frac{du_i}{d\theta} \right) \ln \coth \frac{|\theta|}{2} d\theta \\ &= \frac{\pi}{2} \left( \frac{du_i}{d\theta} \right)_{\theta=\infty} + \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \left( \frac{du_i}{d\theta} \right) - \left( \frac{du_i}{d\theta} \right)_{\theta=0} \right\} \ln \coth \frac{|\theta|}{2} d\theta \end{aligned} \quad (\text{II-16})$$

が成立する。

したがって  $A_1(v)$  の折線近似において  $0, \pm 6, \pm 12$  db/octave により表現される部分の位相特性は  $0, \pm \frac{\pi}{2}, \pm \pi$  により近似される。

## 2. Galvanometer の特性

Galvanometer についても地震計と同様に考えることができる。即ち方程式として次式を考える。

$$\left. \begin{aligned} k \frac{d^2\phi}{dt^2} + d \frac{d\phi}{dt} + u\phi &= gI_2 \\ E_g &= g \frac{d\phi}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II-17})$$

- ただし  $k$ : 可動部分の慣性能率  
 $d$ : 回路を開放したときの減衰の係数  
 $u$ : 復元力の係数  
 $g$ : 電磁的常数  
 $\phi$ : ふれの角  
 $E_g$ : 線輪に誘起される起電力  
 $I_2$ : 線輪に流れる電流

記録紙上の変位を  $\xi$  とすれば

$$\xi = L_0 \phi$$

ただし  $L_0$ : 光学長、すなわち電流計の鏡と記録紙の間の距離の 2 倍

1) H. W. BODE; Network Analysis and Feedback Amplifier Design (1945), D van Nostrand, N.Y.  
 2) E. A. GUILLEMIN; The Mathematics of Circuit Analysis (1949), John Wiley & Sons, N.Y.

であり、また galvanometer の直流電流感度  $S_{gi}$  は

$$S_{gi} = \frac{L_0 g}{u}$$

である。

いま galvanometer に並列に制動抵抗  $r_d$  を付し、定電流電源よりこれに

$$I_i = I_{im} \sin 2\pi ft$$

なる電流を加えれば、記録紙上のふれは

$$\xi = \frac{r_d}{r_d + r_c} S_{gi} A_2(v_g, h_g) I_{im} \sin \{2\pi ft + \delta_2(v_g, h_g)\} \quad (\text{II-18})$$

$$= -\frac{r_d}{r_d + r_c} S_{gi} \frac{\pi f_{g0}}{h_g} A_1(v_g, h_g) \frac{I_{im}}{2\pi f} \cos \{2\pi ft + \delta_1(v_g, h_g)\} \quad (\text{II-19})$$

$$= -\frac{r_d}{r_d + r_c} S_{gi} (2\pi f_{g0})^2 A_0(v_g, h_g) \frac{I_{im}}{(2\pi f)^2} \sin \{2\pi ft + \delta_0(v_g, h_g)\} \quad (\text{II-20})$$

ただし  $v_{g0} = \frac{f}{f_{g0}}$

$$f_{g0} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{u}{k}} \quad : \text{galvanometer の固有周波数}$$

$$h_g = \frac{1}{4\pi f_{g0} k} \left( d + \frac{g^2}{r_c + r_d} \right)$$

$$= h_{g0} + (1 - h_{g0}) \frac{r_c + r_{ecd}}{r_c + r_d} \quad : \text{galvanometer の減衰常数}$$

$$h_{g0} = \frac{d}{4\pi f_{g0} k} \quad : \text{回路を開放したときの減衰常数}$$

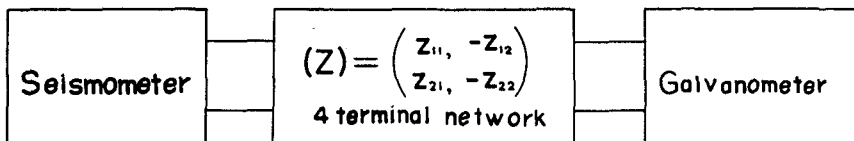
$r_c$ : 線輪の抵抗

$r_{ecd}$ : 外部臨界制動抵抗値

である。したがって galvanometer の場合にも地震計と同様に、その周波数特性の折線近似を利用すると便利である。

(II-19) 式で見られる如く、減衰常数  $h_g$  を大きくとったときには、 $\frac{f_{g0}}{2h_g} < f < 2h_g f_{g0}$  の周波数範囲で記録  $\xi$  は入力電流  $I_i$  の積分値に比例する。特にこのような使用のために設計されたものを“積分 galvanometer”と称することがある。

### 3. 地震計と Galvanometer の結合



第 2 図 地震計と電流計の接続

Fig. 2. Connection of a seismometer and galvanometer.

第2図の如く、地震計を四端子回路の入力側に接続し、その出力側に galvanometer を接続した場合を考える。

その四端子回路の impedance matrix を  $(Z)$  とし、その入力および出力側端子の電圧をそれぞれ  $E_1, E_2$  とすれば、

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} = (Z) \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & -Z_{12} \\ Z_{21} & -Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad (\text{II-21})$$

であり、また

$$E_1 = G \frac{d\theta}{dt} - R_c I_1$$

$$E_2 = g \frac{d\phi}{dt} + r_c I_2$$

の関係があるから、これらの式と (II-1), (II-17) 式から

$$K \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + U\theta = -MH \frac{d^2x}{dt^2} - \frac{G^2}{R_c + Z_{i1}} \frac{d\theta}{dt} + \mu_2 \frac{Gg}{r_c + Z_{i2}} \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{II-22})$$

$$k \frac{d^2\phi}{dt^2} + d \frac{d\phi}{dt} + u\phi = \mu_1 \frac{Gg}{R_c + Z_{i1}} \frac{d\theta}{dt} + \frac{g^2}{r_c + Z_{i2}} \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{II-23})$$

を得る。ただし

$$Z_{i1} = Z_{11} - \mu_1 Z_{12}$$

$$Z_{i2} = Z_{22} - \mu_2 Z_{21}$$

$$\mu_1 = \frac{Z_{21}}{r_c + Z_{22}}$$

$$\mu_2 = \frac{Z_{12}}{R_c + Z_{11}}$$

この関係は四端子回路が真空管或いはトランジスタ増幅器等を含む能動四端子回路網の場合にも成立する。一般に impedance matrix の各元素が純抵抗でない場合には  $Z_{i1}, Z_{i2}, \mu_1$ , 或いは  $\mu_2$  などに微分 operator が含まれることとなり、これらの式の表わす動作は必ずしも簡単でない。いま特に impedance matrix の各元素が純抵抗の場合を考えると、(II-22), (II-23) 式の右辺の第2項はそれぞれ地震計および galvanometer の制動の作用をする。四端子回路の各素子が純抵抗のみからなる受動四端子に関するいわゆる coupling の問題は既に多くの研究者により扱われている<sup>3), 4), 5)</sup>。実用上 coupling の影響が無視できるような場合、すなわち (II-22) 式の右辺の第3項が省略できる場合が多いが、その場合には地動と記録との関係は次の諸式で

- 3) K. TAZIME; Coupling-effect of the Galvanometer Connected Directly to the Electrodynamical Seismometer, Zisin **8** (1955) 23.
- 4) T. HAGIWARA; A Note on the Theory of the Electromagnetic Seismograph, Bull. Earthq. Res. Inst., **36** (1958) 139.
- 5) T. UTSU; Response Curves of Electromagnetic Seismograph, (1) Quart. J. Seism. **22** (1957) 5. (2) idid., **22** (1957) 19.

表わされる。

$$\xi = -\frac{G}{l} \frac{\mu_1}{R_c + Z_{i1}} \frac{\pi f_0}{h_g} S_{\theta i} A_0(v_s, h_s) \cdot A_1(v_g, h_g) x_m \sin \{2\pi ft + \delta_0(v_s, h_s) + \delta_1(v_g, h_g)\} \quad (\text{II-24})$$

$$\xi = -\frac{G}{l} \frac{\mu_1}{R_c + Z_{i1}} S_{\theta i} A_0(v_s, h_s) A_2(v_g, h_g) \cdot \frac{d}{dt} x_m \sin \{2\pi ft + \delta_0(v_s, h_s) + \delta_2(v_g, h_g)\} \quad (\text{II-25})$$

$$\xi = -\frac{1}{4\pi f_{s0} h_s} \frac{G}{l} \frac{\mu_1}{R_c + Z_{i1}} S_{\theta i} A_1(v_s, h_s) \cdot A_2(v_g, h_g) \frac{d^2}{dt^2} x_m \sin \{2\pi ft + \delta_1(v_s, h_s) + \delta_2(v_g, h_g)\} \quad (\text{II-26})$$

ただし

$$h_s = \frac{1}{4\pi f_{s0} K} \left( D + \frac{G^2}{R_c + Z_{i1}} \right) \quad (\text{II-27})$$

$$h_g = \frac{1}{4\pi f_{g0} k} \left( d + \frac{g^2}{r_c + Z_{i2}} \right) \quad (\text{II-28})$$

この場合にも振幅特性  $A_i(v_s, h_s) A_j(v_g, h_g)$  と位相特性  $\delta_i(v_s, h_s) + \delta_j(v_g, h_g)$  との間には (II-16) 式の関係が成立する。さらに一般的に言って四端子が最小位相推移回路網である場合には BODE の関係式が成立する。

#### 4. 地震計と Galvanometer の等価回路について

電磁式地震計も galvanometer も受動的電気力学変換器であるから等価回路を考え、それを利用することは便利である<sup>6), 7), 8)</sup>。これらは電磁的変換器で電気力学的逆相反定理が成立するものであるから、定電流等価回路表示が有利である。

(II-1) と (II-2) 式から

$$I_1 = -\frac{MH}{G} \alpha - \frac{E_s}{Z_{sm}}$$

ただし

$$\alpha = \frac{d^2 x}{dt^2} \quad \text{地動の加速度}$$

$$\frac{1}{Z_{sm}} = \frac{K}{G^2} p + \frac{D}{G^2} + \frac{U}{G^2 p}$$

$$p = \frac{d}{dt}$$

- 
- 6) K. TAZIME; On the Motional Impedance of the Moving-coil-type Transducer, 秋田大学鉱山学部 地下資源開発研究報告 8 (1952) 13.  
 7) 田 望; 長週期地震計の試作, 地震研究所第317回談話会 (Dec. 12, 1954).  
 8) E. SHIMA; Theoretical and Experimental Approach to the Design and Calibrations of Electromagnetic Seismograph, I, Voltage Sensitivity of the Moving-coil Type Seismometer, Bull. Earthq. Res. Inst., 38 (1960) 29.

となる。 $Z_{sm}$  は impedance の dimension をもち、これは  $C_s, R_s, L_s$  の並列共振回路で表現できて、その値は

$$C_s = \frac{K}{G^2}, \quad R_s = \frac{G^2}{D}, \quad L_s = \frac{G^2}{U}$$

である。 $Z_{sm}$  はいわゆる地震計の motional impedance であり、地震計の特性検定などに利用される量である。また galvanometer についても同様に等価回路表現ができて、その値は

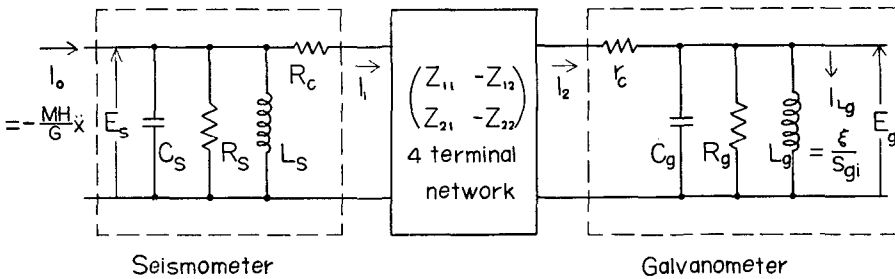
$$C_g = \frac{k}{g^2}, \quad R_g = \frac{g^2}{d}, \quad L_g = \frac{g^2}{u}$$

である。

したがって、第2図の回路の等価回路は第3図の回路となる。 $L_g$  を流れる電流を  $I_{L_g}$  とすれば、記録  $\xi$  は

$$\xi = S_{gi} I_{L_g}$$

となる。



第3図 地震計と電流計の等価回路

Fig. 3. Equivalent circuit of a seismometer and galvanometer.

等価回路により地震計と galvanometer の系の周波数特性の analogue 計算をすることができるが、周波数範囲や  $L, C$  等の数値が実験に不適當になる場合が多い。かかる場合は周波数および回路定数を適當な常数  $\eta$  により

$$f' = \eta f, \quad C' = \frac{C}{\eta}, \quad L' = \frac{1}{\eta} L, \quad R' = R$$

と変換すれば便利である。

地震計の出力端子に並列に condenser を接続すると、線輪抵抗  $r_c$  がその condenser の impedance に比し小なる周波数範囲では振子の慣性能率を実効的に増加させる働きをすることが等価回路により容易に知れる。これを振子の長週期化に利用することができる<sup>7),9),10)</sup>。

9) P. BERNARD; Sur l'amplification des seismographes dont la période est allongée par condensateurs, *Ann. d. Geophys.*, **11** (1955), 374.

10) H. BENIOFF; Long Period Seismographs, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **50** (1960), 1.

実際の地震計はその固有周波数の数 10 倍、およびそれ以上の周波数において、種々の寄生振動を伴うことが多い。したがってそのような周波数範囲においては (II-1) 式は適用できないから、ここに述べた、折線近似や等価回路表示も適用できないことに留意すべきであり、その特性は振動試験器により実験的に求めなければならない。寄生振動の原因は種々あるが、主な原因は板バネの buckling、コイルバネの振動、振子の腕の部分の振動などである<sup>11)</sup>。これらの寄生振動は振子の型式やその各部の形状、バネなどの力の配分などにより大いに影響を受けるから、地震計の設計にあたってはこの点に充分注意を払わねばならない。

### III. 地震計

#### 1. 加速度計

地震計に強い制動がかけられたとき、振子の運動が地動の速度に比例し、したがってその出力電圧が加速度に比例することに着目して、可動線輪型の加速度計を試作した。強い電磁的制動を得るためには、強力な磁石を必要とするが、近年における磁石材料の発達には、この種の加速度計を設計するのに重要な貢献をしているものと云える。

振子の制動が線輪に流れる電流のみによる場合、即ち (II-1) 式で  $D=0$  と見なして差支えない場合は、(II-5) 式は

$$h_s = \frac{G^2}{4\pi f_{s0} K (R_c + R_{ext})}$$

であるから、これと (II-2), (II-3), (II-8) 式から次式を得る。

$$I_1 = -S_\alpha A_1(v_s, h_s) \frac{d^2}{dt^2} x_m \sin \{2\pi ft + \delta_1(v_s, h_s)\} \quad (\text{III-1})$$

ただし

$$S_\alpha = \frac{MH}{G} \quad (\text{III-2})$$

$h_s$  が 1 に比し充分大きいときには、II-1 において論じた通り、 $f_{s0}/2h_s < f < 2h_s f_{s0}$  の周波数範囲で  $A_1(v_s, h_s)$  は近似的に 1 であり、また  $\delta_1(v_s, h_s)$  は 0 に近い。したがって出力電流  $I_1$  は地動  $x$  の加速度に比例し、その係数は  $S_\alpha$  となる。この場合有利なことは、 $S_\alpha$  は  $M, H$  および  $G$  に依存するのみで、回路抵抗値 ( $R_c + R_{ext}$ ) や固有周波数  $f_{s0}$  に依存しないから、安定にかつ正確に加速度を測定することができる。 $(R_c + R_{ext})$  や  $f_{s0}$  は  $h_s, v_s$  に、したがって周波数特性  $A_1(v_s, h_s)$  および  $\delta_1(v_s, h_s)$  に影響を与えるのみである。このような意味から、 $S_\alpha$  を電磁式加速度計の感度と定義するのが合理的である。

第 2 図の如く、この加速度計を galvanometer と接続した場合には、記録は (II-26) 式より次の如く書ける。

11) 田 望； 爆破地震観測のための高感度電磁式地震計の試作，地震学会講演会 (1954)。

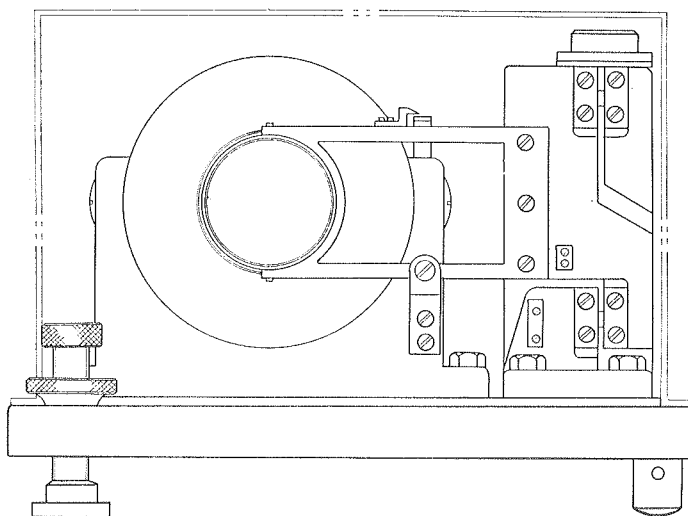
$$\begin{aligned} \xi = & -\mu_1 S_\alpha S_{q\delta} A_1(v_s, h_s) A_2(v_q, h_q) \cdot \\ & \frac{d^2}{dt^2} x_m \sin \{2\pi ft + \delta_1(v_s, h_s) + (\delta_2 v_q, h_q)\} \end{aligned} \quad (\text{III-3})$$

ただし

$$h_s = \frac{G^2}{4\pi f_{s0} K (R_c + Z_{i1})}$$

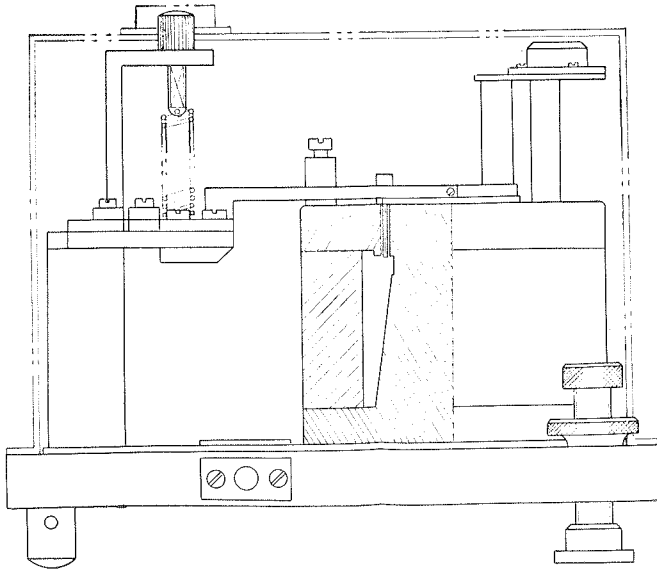
自然地震の観測に際し、加速度計としては数 1/10 c.p.s. から 20 c.p.s. 程度の周波数範囲で平坦な特性を持つことが望ましい場合が多い。構造物の耐震構造の研究などの地震工学上の問題では 0.5~20 c.p.s. が重要であり、特に固い岩盤上に構築された構造物の研究には 3~20 c.p.s. の振動を測定することが重要であって、従来の機械式加速度計ではその周波数特性が充分とは云えぬ場合が多かった。試作にあたってはこれらの点を考慮した次第である。

水平動加速度計 (DEN-3CH) の構造は第 4 図および第 6 図に示されている。その振子は水平振子型である。また上下動加速度計 (DEN-3CV) の構造は第 5 図および第 7 図に示されている。その振子の吊り方は Ewing 型である。強い制動を得るために、両者とも振子の慣性能率は小さく設計され、磁石は強力である。磁石は外磁型であり、材料は MK-5 が使用されている。Pole piece 中央部の棒状部分は円錐状にしてあるので、この部分を飽和させることなく、大きな有効磁束を通すことが可能であり、円柱状の場合より gap の磁束密度が約 10% 増加した。



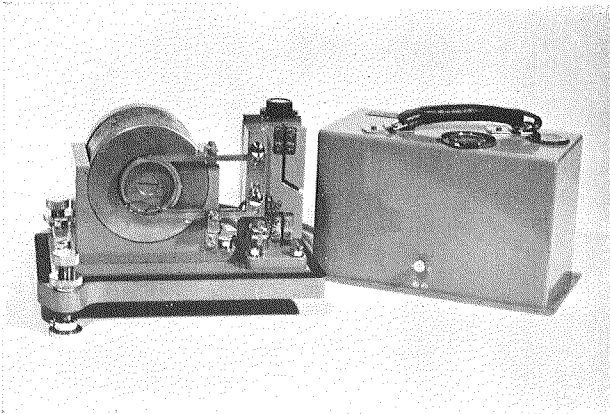
第 4 図 DEN-3CH 型電磁式加速度計

Fig. 4. Electrodynamic accelerometer DEN-3CH.



第 5 図 DEN-3CV 型電磁式加速度計

Fig. 5. Electrodynamic accelerometer DEN-3CV.

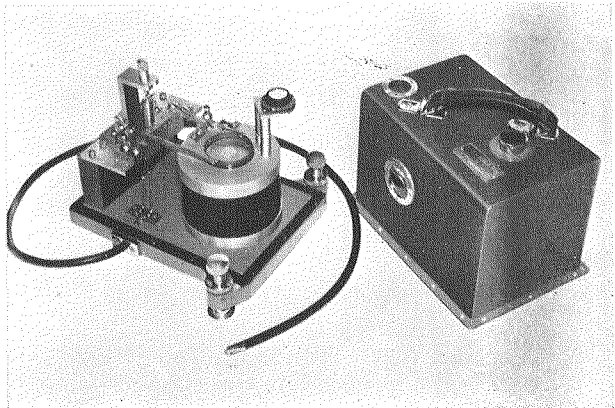


第 6 図 DEN-3CH 型電磁式  
加速度計の写真

Fig. 6. Photograph of the  
electrodynamic accelerometer  
DEN-3CH.

第 7 図 DEN-3CV 型電磁式  
加速度計の写真

Fig. 7. Photograph of the  
electrodynamic accelerometer  
DEN-3CV.



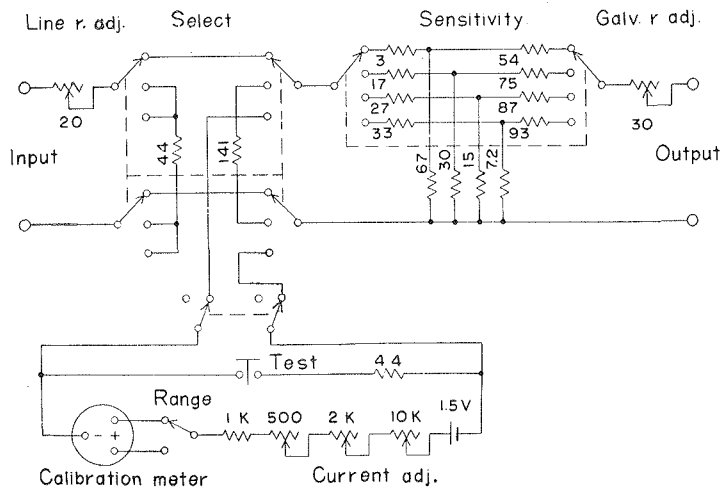
これらの加速度計の諸定数は第 1 表に示されている。水平動と上下動の加速度計は  $K, l, f_{s0}, S_a$  および  $R_c$  の値が一致するよう設計されている。第 1 表に示された  $S_a, R_c$  および  $R_{ext}$  の値は galvanometer に直結するために設計された線輪についての値である。増幅器に接続する場合にはその入力抵抗に整合した線輪を使用すべきである。

第 1 表 DEN-3CH 及び 3CV 型電磁式加速度計の諸定数

Table 1. Constants of the electrodynamic accelerometers DEN-3CH and 3CV.

	Notation	Unit	DEN-3CH	DEN-3CV
Component			Horizontal	Vertical
Moment of inertia	$K$	$\text{gr} \cdot \text{cm}^2$	5800	5800
Mass of the pendulum	$M$	gr	440	300
Distance between the center of gravity and the axis of rotation	$H$	cm	2.2	3.2
Natural frequency	$f_{s0}$	cps	3.0	3.0
Sensitivity	$S_a$	$\mu\text{A}/\text{gal}$	15	15
Resistance of the coil	$R_c$	$\Omega$	121	121
External resistance ( $h=10$ )	$R_{ext}$	$\Omega$	69	69

Attenuator としては第 8 図に示される  $T$  型回路を試作した。 $R_c$  および  $r_c$  を指定すれば、 $Z_{i1}, Z_{i2}$  および  $\mu_1$  を与えることにより  $T$  型回路の各素子の抵抗値が決定される。 $Z_{i1}$  と  $Z_{i2}$ , すなわち  $h_s$  と  $h_q$  を一定にして  $\mu_1$  を切替えることにより同一周波数特性で総合感度を切替えることができる。Attenuator の入力に地震計のかわりに電池より既知の直流電流を加えることにより、(III-3) 式のうちの  $\mu_1 S_{qi}$  が検定できる。図中の calibration circuit はこのためのもので



第 8 図 DEN-3CH 型または 3CV 型加速度計用の感度調整器の配線図

Fig. 8. Circuit diagram of the attenuator for the accelerometer DEN-3CH or 3CV.

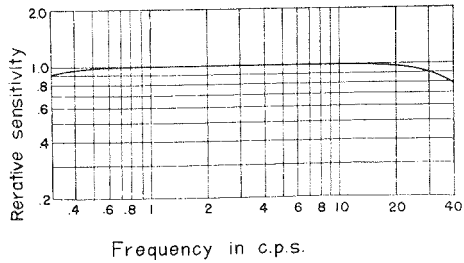
ある。Galvanometer としては  $f_{g0}=50$  c.p.s.,  $S_{g0}=600$  mm/mA,  $r_c < 30 \Omega$  を使用してある。その場合の総合感度は最高 4 mm/gal ( $\mu_1=4/9$ ) であり、その周波数特性は第 9 図に示される。

第 10 図に示された地震計 ND 3 C は上述の DEN-3 CV と類似の設計であるが、

$K=4000$  gr · cm<sup>2</sup>,  $M=228$  gr,  $H=3.15$  cm,  $l=5.58$  cm である。これは上下動にも水平動に

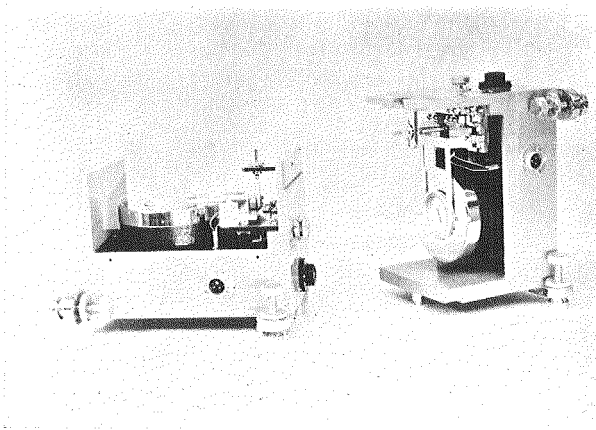
簡単に切替えられるようになっており、いずれの場合も  $f_{s0}=3.0$  c.p.s. で殆んど変化しないよう

にしてある。勿論加速度計としても使用されるが、一方外部抵抗を大にし臨界制動に近い状態で高感度の真空管増幅器<sup>12)</sup>と併用して爆破地震動の観測にも利用されている。増幅器用線輪を付けた場合にはこの地震計は  $G/l=4.5$  volt/(cm/sec) であり、記録は  $f_{s0}$  以上で大体振動速度に比例するが、10 c.p.s. における地震計、増幅器および電磁オフシログラフの総合感度は倍率にして  $2 \times 10^7$  以上に及ぶ。



第 9 図 DEN-3CH, 3CV 及び電流計の総合周波数特性

Fig. 9. Over-all frequency characteristics of the accelerometer DEN-3 CH, 3 CV and the galvanometer.



第 10 図 ND-3 C 型電磁式地震計

Fig. 10. Electrodynamic seismometers ND-3 C.

## 2. 変位計

電磁式地震計は臨界制動又はそれに近い状態で使用されるときは、 $f_{s0}$  より高い周波数では起電力は振動速度に比例するから、その場合には従来使用されているように、その係数を感度

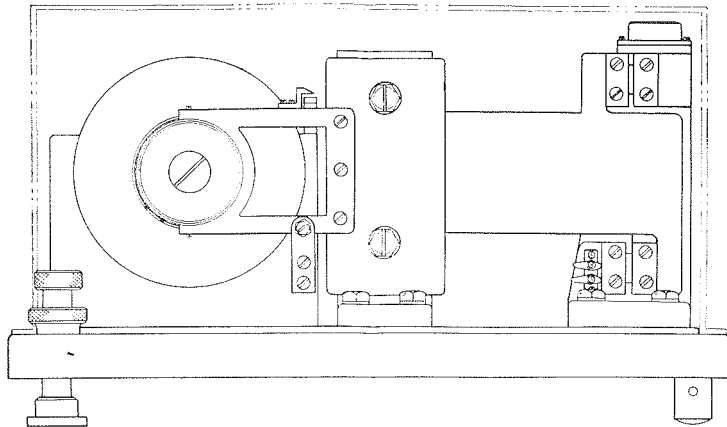
$$S_v = \frac{G}{l} \tag{III-4}$$

と定義するのが便利である。この出力を II 2 において述べた積分 galvanometer に加えれば、 $f_{s0} < f$  かつ  $f_{g0}/2 h_g < f < 2 h_g f_{g0}$  である周波数範囲で記録  $\xi$  は地動の変位に大体比例する。

すなわち (III-4) と (II 24) 式とより  $\xi$  は次式の如く書かれる。

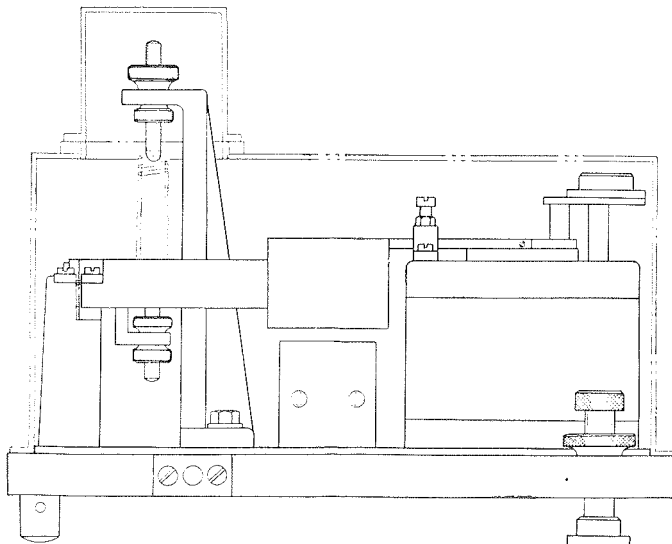
$$\xi = -\mu_1 S_v S_{q\theta} \frac{1}{R_c + Z_{\theta_1}} \frac{\pi f_{q\theta}}{h_q} A_0(v_s, h_s) A_1(v_q, h_q) \cdot x_m \sin \{2\pi ft + \delta_0(v_s, h_s) + \delta_1(v_q, h_q)\} \quad (\text{III-5})$$

地震観測や地震工学上の多くの要求を考慮して、上述の如き使用法に適するような地震計を試作した。水平動地震計 (DEN-1 CH) の構造は第 11 図および第 13 図に示されている。この振子は水平振子型であり、復元力はバネによってのみ与えられている。また、上下動地震計 (DEN-1 CV) の構造は第 12 図および第 14 図に示されている。これらの地震計の諸定数は第 2



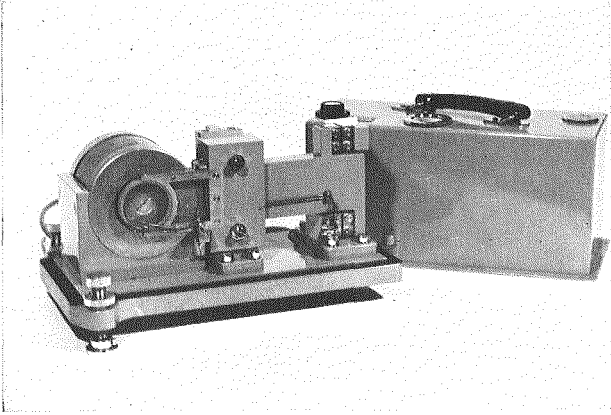
第 11 図 DEN-1 CH 型電磁式地震計

Fig. 11. Electrodynamic seismometer DEN-1 CH



第 12 図 DEN-1 CV 型電磁式地震計

Fig. 12. Electrodynamic seismometer DEN-1 CV.

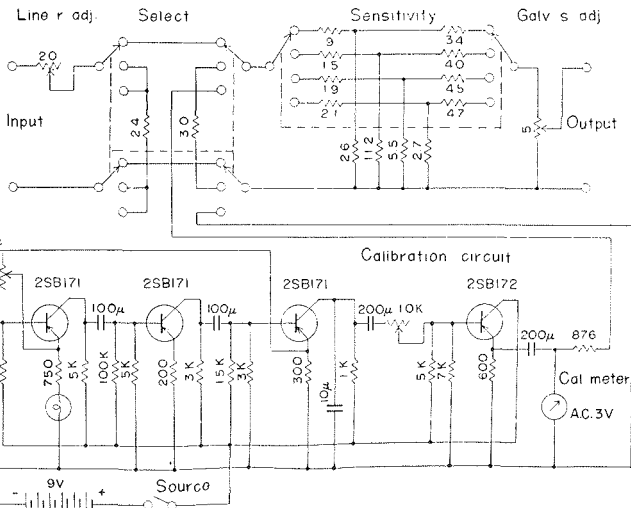
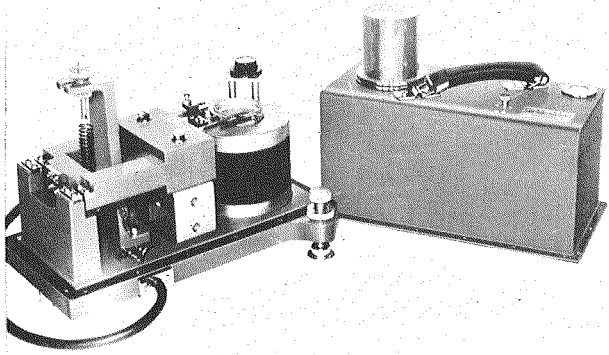


第13図 DEN-1 CH 型電磁式地震計の写真

Fig. 13. Photograph of the electrodynamic seismometer DEN-1 CH.

第14図 DEN-1 CV 型電磁式地震計の写真

Fig. 14. Photograph of the electrodynamic seismometer DEN-1 CV.



第15図 DEN-1 CH 型または 1 CV 型用の感度調整器の配線図

Fig. 15. Circuit diagram of the attenuator for the seismometer DEN-1CH or 1 CV

表に示されている。Attenuator としては第 15 図に示される回路を試作した。これも  $h_s, h_g$  を一定にして  $\mu_1$  を切替えることにより、同一の周波数特性で総合感度を切替えることができる。積分 galvanometer を使用する場合には、attenuator と galvanometer の総合感度を較正するために正弦波発振器が必要であるので、図に示される如く、transistor を使用した Wien bridge 型の 10 c.p.s. の発振器を試作した。積分 galvanometer としては、 $f_{g0}=7$  c.p.s.,  $S_{gi}=7$  mm/ $\mu$ A のものを約  $h=10$  で使用した。この場合の総合倍率は最高 400 倍である。

第 2 表 DEN-1 CH 及び 1 CV 型電磁式地震計の諸定数

Table 2. Constants of the electrodynamic seismometers DEN-1 CH and CV.

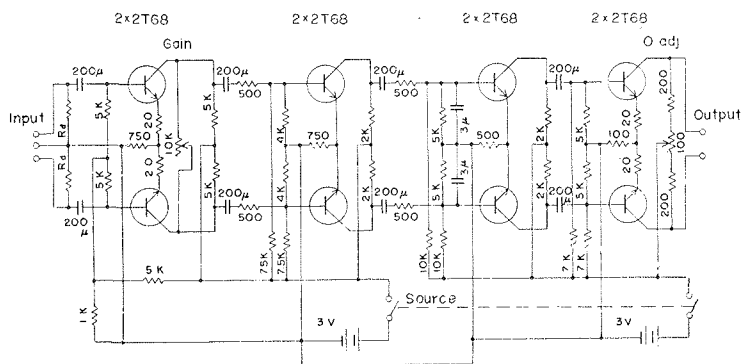
	Notation	Unit	DEN-1 CH	DEN-1 CV
Component			Horizontal	Vertical
Moment of inertia	$K$	gr · cm <sup>2</sup>	$1.84 \times 10^5$	$1.84 \times 10^5$
Mass of the pendulum	$M$	gr	$2.4 \times 10^3$	$2.2 \times 10^3$
Distance between the center of gravity and the axis of rotation	$H$	cm	7.3	8.2
Natural frequency	$f_{s0}$	cps	1.0	1.0
Sensitivity	$\frac{G}{l}$	volt/kine	0.27	0.27
Resistance of the coil	$R_c$	$\Omega$	10	10
External resistance ( $h=1$ )	$R_{ext}$	$\Omega$	23	23

#### IV. 増 幅 器

##### 1. 爆破地震動観測用の Transistor 増幅器

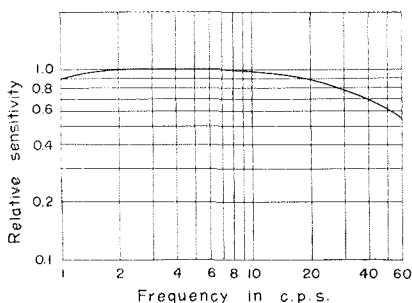
爆破地震動研究グループによる爆破地震動の観測には、従来真空管増幅器が使用されていた<sup>12)</sup>。しかし transistor 増幅器は小型軽量であるばかりでなく、増幅器の動作が安定であり、また商用電源を必要としないから、観測に有利である。試作した増幅器の配線図を第 16 図に示す。これは NPN 型 transistor の push-pull 型 4 段増幅である。Push-pull にすることにより、emitter 回路の大容量の by pass condenser を省略することができるから、強い温度補償のもとに超低周波帯域の増幅をするのに有利であり、特に地震観測には有力である。出力は 30 mm/mA の galvanometer に接続するが、その場合の最高総合感度は 0.54 mm/ $\mu$ V であり、また circuit noise は入力換算値で約 2  $\mu$ V p-p である。周波数特性は第 17 図に示されるが、観測に際し S/N を高めるためには、観測地点の雑微動の振幅の spectrum 分布を考慮して、coupling circuit および low pass filter の時定数を変えて、周波数特性を改良することが望ましい。周囲温度を 18°C より 45°C まで上昇させることにより約 20% の増幅度の増加を見たが、この温度までは circuit noise は殆んど増加しなかった。

12) N. DEN; On Very Low Frequency Amplifiers to Observe the Explosion Seismic Waves and the Weak Seismic Waves, Zisin 6 (1953), 101.



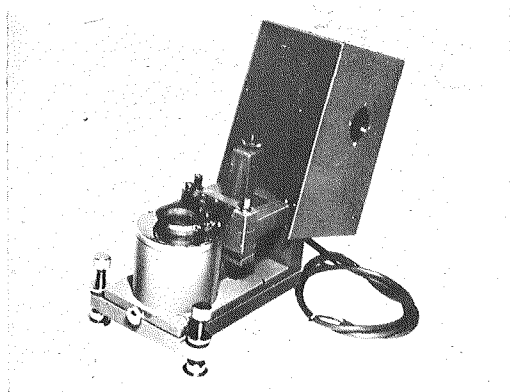
第16図 爆破地震動観測用増幅器の配線図

Fig. 16. Circuit diagram of the amplifier to observe the explosion seismic waves.



第17図 増幅器の周波数特性

Fig. 17. Frequency characteristics of the amplifier.



第18図 DEN-2 CV 電磁式地震式地震計

Fig. 18. Electrodynamic seismometer DEN-2 CV.

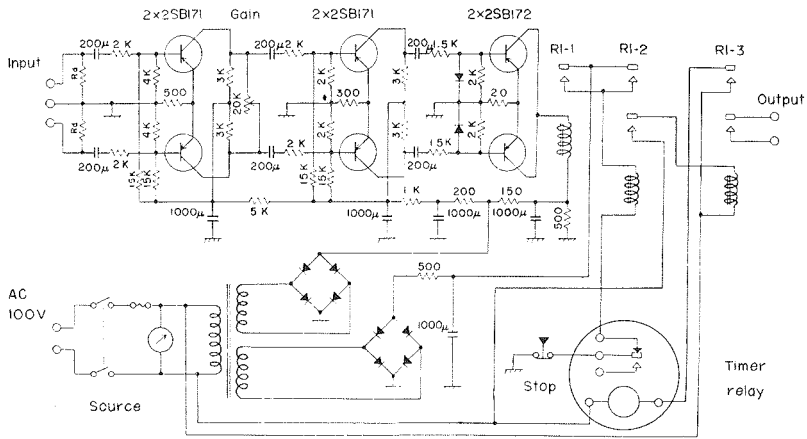
これに接続する地震計は III-3 に述べた DEN-1 CV 型地震計に捲数の多い線輪  $\{G/l=2.3$  volt/(cm/sec),  $R_c=1000 \Omega\}$  を付けて使用し、或いは第18図に示されている DEN-2 CV 型地震計  $\{K=3.0 \times 10^4$  gr · cm<sup>2</sup>,  $M=870$  gr,  $H=5.2$  cm,  $l=6.7$  cm,  $G/l=2.2$  volt/(cm/sec) $\}$  を使用する。

## 2. 地震観測用 Starter

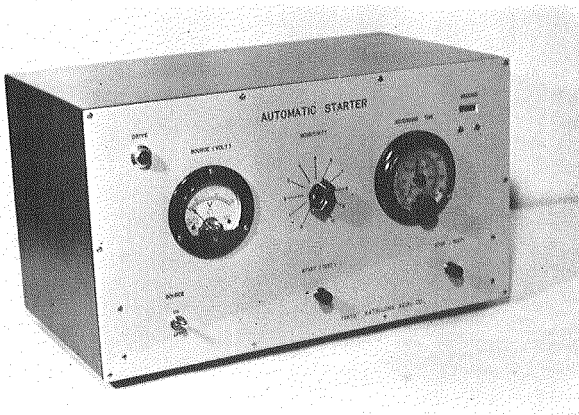
地震動の周波数分析などを行うには、送り速度の早い記録が望ましく、従来常時観測に使用されている 0.5 乃至 1 mm/sec の送り速度で書かれた地震記象では解析に使用できない場合がある。常時観測で送り速度を高めるのは保守上困難であるから、starter により地震時のみ記録装置を動作させることが必要になる。一般に starter は到達した地震波が或る一定振幅に達したときに起動するから、それ以前の部分は記録されない。地震工学上の要求からはこのことは必ずしも問題にならない場合が多いが、初動部分が必要な場合には遅延装置を備える必要がある。

Starter は古来種々のものが試作されてきた。初期の starter は接点を利用した型式のものが多く低感度であるが、その後増幅器、光電管或いは photo-transistor などを利用した starter が種々の目的に応じて試作されてきた<sup>13),14)</sup>。

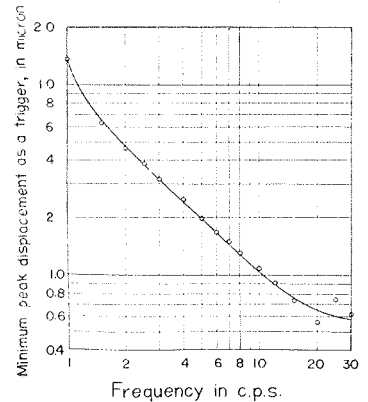
Starter は長期間にわたり安定にかつ確実に動作することが必要であるが、高感度である場合には、この要求を満たすことは必ずしも簡単でない。特にこの要求に重点をおいて次の如き starter を試作した。その構成は第 19 図に示され、外観は第 20 図に示されている。III-2 に述べられた電磁式地震計 DEN 1 CV または 1 CV (増幅器用 coil を付す) からの電圧は transistor



第 19 図 スターターの配線図  
Fig. 19. Circuit diagram of the starter.



第 20 図 スターター写真  
Fig. 20. Photograph of the starter.



第 21 図 スターターの周波数特性  
Fig. 21. Frequency characteristics of the starter.

13) T. ASADA, and N. DEN; On a Trigger for High Sensitive Seismometer, Zisin 5 (1952), 29.  
14) H. KAWASUMI, E. SHIMA, M. SIBANO and M. YANAGISAWA; A Seismographic Starter Using a Phototransistor, Bull. Earthq. Res. Inst., 36 (1958), 447.

増幅器により増幅され、その出力電流によって relay 回路が動作させられる。増幅器の最終段の transistor の collector 回路は二つが共通に relay RL-1 の field coil に接続されているから正負いずれの振幅に対しても起動する。Relay RL-1 が一度動作すると timer relay が動作している期間中、以下の全 relay 回路が動作し、timer relay の動作終了後全装置は最初の状態に復元し、次の地震を待機する。Starter の出力回路に記録装置の制御回路を接続すれば、この時間だけ記録装置が動作する。この時間は timer relay の目盛を調節することにより任意に設定できる。

周波数特性は地震計、増幅回路および relay RL-1 の特性により決定される。地震計 DK-1 CH をこの starter に接続したときの最小起動変位振幅の周波数特性は第 21 図に示される。高感度で観測するときは、高い周波数の感度を高め過ぎると、観測地点近傍の人為的振動により起動することが多くなるので、観測地点の状況で増幅回路の周波数特性を変更することが望ましい。

## V. 振動試験器

前述の如く地震計はその固有周波数の数 10 倍或いはそれ以上で、様々の寄生振動を生ずることがあり、必ずしも 2 階線型の方程式 (II-1) に従うとは限らない。したがって地震計の周波数特性を調べるためには、試験器により検定しなければならない。地震計の検定や或いは耐震構造物の模型実験をする場合には、歪率の極めて小さい超低周波の正弦波形を出す振動試験器が必要である。さらに進んでは地震動と同じ波形の振動を与えて総合的研究をするために、任意波形で駆動し得る振動試験器が要求される。現在機械式或いは電磁式駆動方法を用いた振動試験器が存在するが、これらは上述の要求を満足しているとは限らない。今回この点を考慮して、平衡変調波を利用した増幅器による駆動方法を実験したのでその結果について述べる。

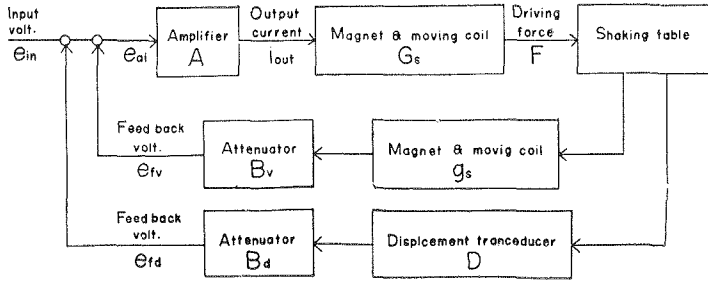
### 1. 駆動用増幅器

地震計の検定などのために振動台を使用する場合には、その周波数帯域の下限として少くも数 1/10 c.p.s. まで必要であり、また試験器としては一般に相当大きな駆動力を要求されるから、増幅器の電力増幅段では impedance 整合をとることが望ましいが、普通の低周波増幅回路ではこの要求を満たすことは容易でなく、10 c.p.s. 程度以下で大きな波形歪をもたらすこととなる。ここで考えらるべきことは信号波を変調して増幅する方法であるが、今回実験したものは平衡振幅変調を利用したものである。その増幅器の block diagram は第 22 図に、また実際の回路は第 23 図に示されている。

Wien bridge 型回路にて 1000 c.p.s. の正弦波を発振させてこれを搬送波として使用した。信号波の周波数帯域幅を拡げるためには、さらに高い周波数の搬送波が必要であり、また変調の能率と安定性および復調の能率を増すためには、搬送波として矩形波を使用することも有利であろう。



必要がある。試験物を含めた振動台の固有振動に対する制動はこのように最も重要な問題であるが、可動部分の質量が大であるから、特別の制動器を備えるのも容易でなく、それよりも feed back の方法を利用することが有利である。



第24図 振動試験器の帰還系

Fig. 24. Feedback system of the shaker.

第24図において入力信号電圧  $e_{in}$  は feed back 電圧とともに上述の増幅器に加えられ、増幅器出力電流  $i_{out}$  は振動台に付けられた線輪に供給される。線輪は固定された磁石の gap 内で動き得るようになっていて、この電流により力  $F$  が台に加えられることになる。増幅器の入力における電圧を  $e_{ai}$  とし、相互変換係数を

$$A = \frac{i_{out}}{e_{ai}}$$

とする。また磁石および可動線輪の変換係数を

$$G_s = \frac{F}{i_{out}}$$

とする。振動台の振動速度の検出器として別に小型の磁石および可動線輪を設け、その変換係数を  $g_s$  とし、この出力を減衰率  $B_v$  なる attenuator を通して得られる電圧、

$$e_{fv} = B_v g_s \frac{dy}{dt} \quad (V-1)$$

ただし  $y$ : 振動台の変位

を増幅器の入力に feed back させる。いま簡単のため試験物を剛体と見なし、これと振動台可動部分を合せた質量を  $M$ 、台のバネによる復元力の係数を  $U$  とすれば、

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + Uy = G_s i_{out} \quad (V-2)$$

$$i_{out} = A(e_{in} - e_{fv}) \quad (V-3)$$

の関係が成立する。(V-1)、(V-2) と (V-3) 式から

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + AB_v g_s \frac{dy}{dt} + Uy = AG_s e_{in} \quad (V-4)$$

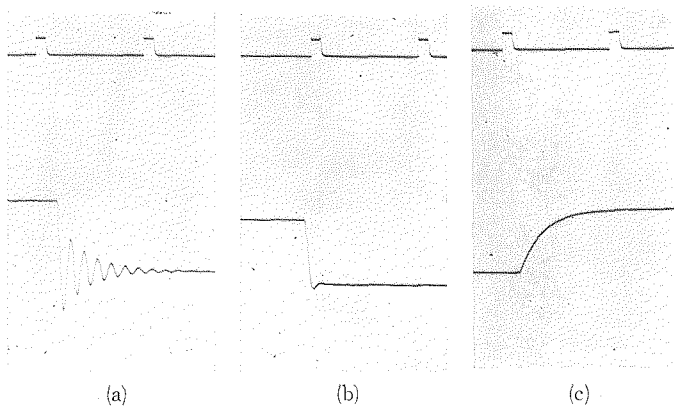
となり、この左辺第2項は feed back によるものであって、制動の作用をする。左辺はその固有周波数附近では第2項が主要項となるから、feed back 回路の一般的理論から期待される如く、増幅器の変換能率  $A$  に非直線性がある場合には、その周波数附近での直線性の改善にも役立つものである。第25図は係数  $B_v$  を変化させた場合の制動の状態を示す記録である。

第24図に示される如く、振動台の変位に比例する電圧をも feed back させる場合には、運動方程式は

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + AB_v g_s \frac{dy}{dt} + (U + AB_d D) y = AG_s e_{in} \quad (V-5)$$

となる。この feed back 回路は固有周波数を高めると同時に、それ以下の周波数での直線性の改善に役立つであろう。

これらの feed back は相当強くかける必要があるので、増幅器としては低周波帯域において位相推移の小さいことが必要となる。前述の増幅器はこの点で優れた性能を持っている。



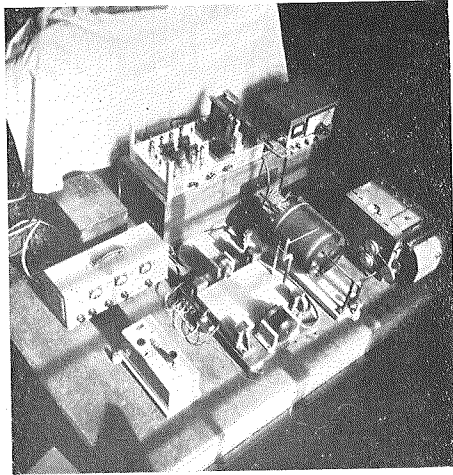
第25図 帰還法による振動試験器の制動

Fig. 25. Damping of the shaker by the feedback method.

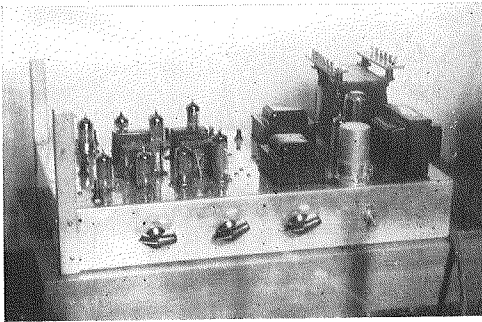
第26図はこの実験装置の全体および各部の写真であり、第27図は任意波形により振動台を駆動した場合の入力電圧波形(下段)と振動台の変位(上段)を比較した記録である。台の変位は差動変圧器<sup>15),16)</sup>を用いて測定した。

15) 西口 譲; 機械量の電気計測・制御 (1959), オーム社.

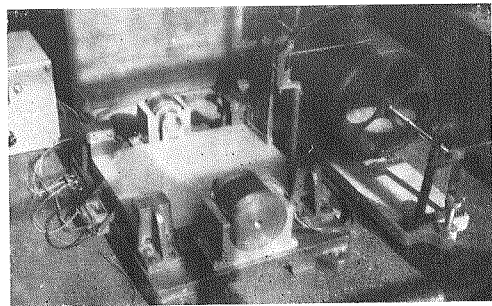
17) K. AKAMATU; The Variable Inductance Type Seismograph, Zisin 7 (1955), 241.



(a)

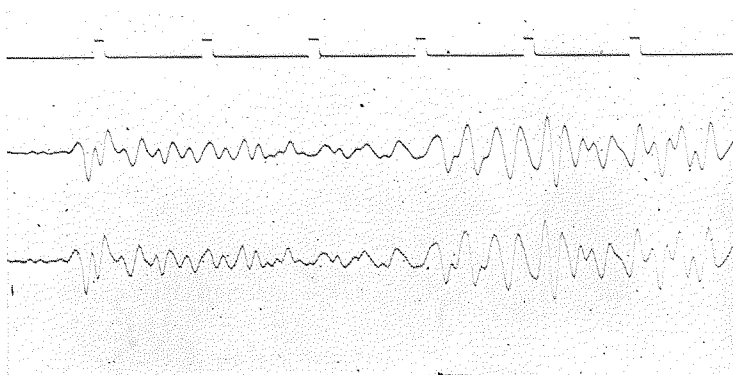


(b)



(c)

第26図 振動試験器の写真  
Fig. 26. Photographs of the shaker.

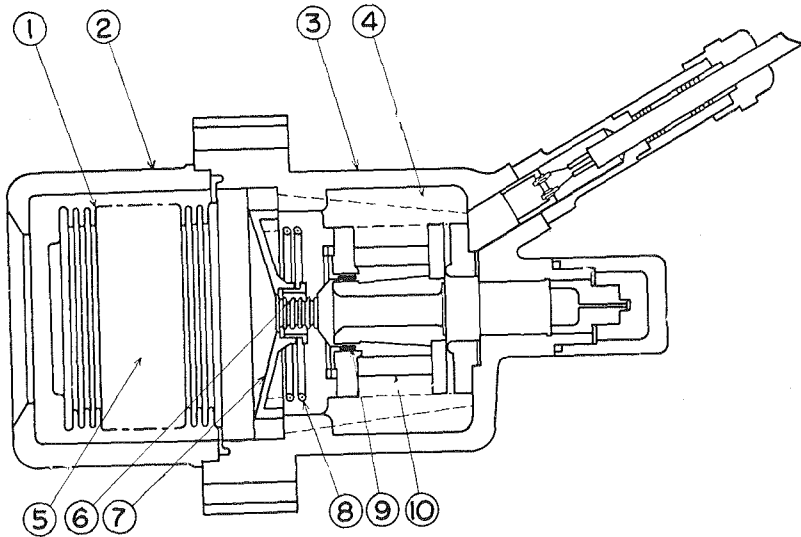


第27図 任意波形入力による振動試験器の駆動記録  
記録上：入力信号，記録下：振動台の変位  
Fig. 27. Record of the shaking table by the input of an arbitrary wave form.  
Upper trace: input signal. Lower trace: displacement of the table.

## VI. 動水圧計

Dam の耐震構造の研究には堤体の振動に関してばかりでなく、地震のために貯水池の水が堤体に及ぼす動的な水圧の影響をも考慮しなければならない。この動水圧の問題については、H. M. Westergaard<sup>17)</sup> および他の研究者<sup>18)</sup> により理論的に求められ、また模型実験も行われているが、実際の堤体についての観測はその測定技術の困難さから、未だ実施されていなかった。近年建設される dam は大型化し、また重力 dam 以外の各種の形式も採用されるようになり、動水圧の実測は重要な問題となってきたので、この測定装置を試作した。

動水圧計はその観測の性質上その性能に数多くの条件が満たされねばならない。Pick-up は dam の堤体の上流面に受圧部を水面にさらして埋設されるので、埋設後は調整や修理をすることは不可能であって、極度の耐久性と安定性が要求される。また常時大きな静水圧を受けているから漏水や腐蝕などに対し安全でなければならない。静水圧は貯水池の水位の変化により緩慢な変化をするが、これによって記録上の零線が変動しないことが望ましい。圧力の検出方法としては数多くの方法があるが、上記の条件を満足するものとして、以下に述べる可動線輪型のものを採用した。

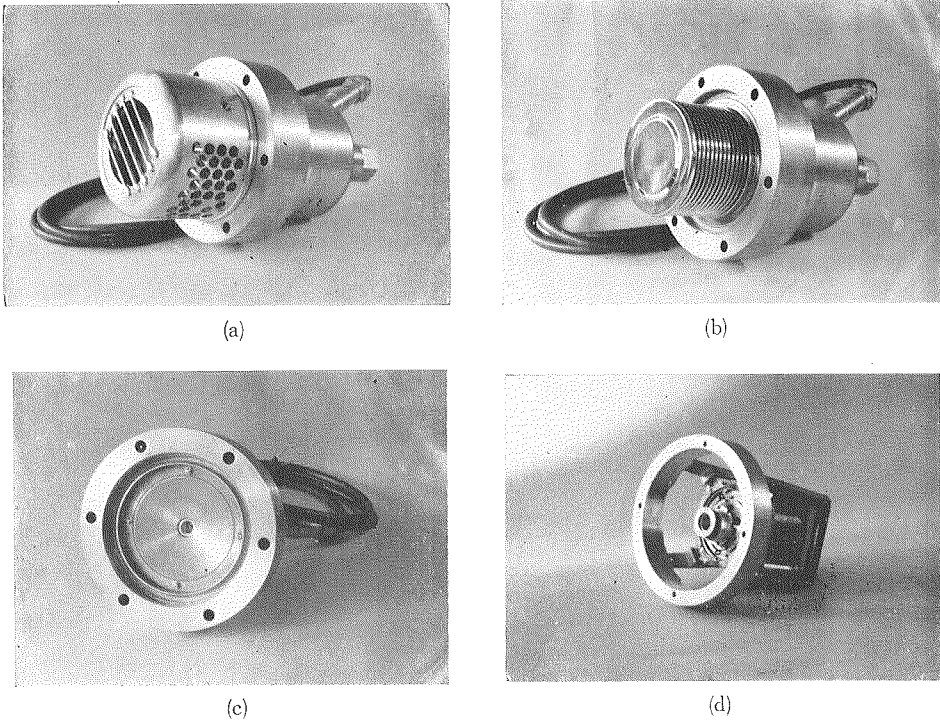


第28図 動水圧計の断面図

Fig. 28. Cross-section of the hydrodynamic pressure gauge.

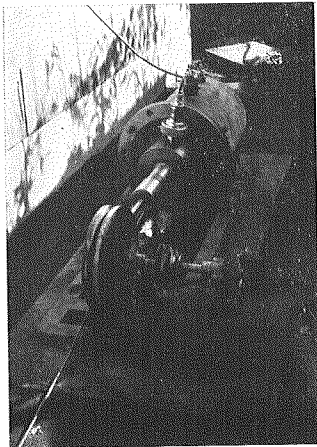
- |                   |                   |               |                |
|-------------------|-------------------|---------------|----------------|
| (1) large bellows | (2) protector     | (3) case      | (4) 2nd vessel |
| (5) 1st vessel    | (6) small bellows | (7) partition |                |
| (8) pipe          | (9) coil          | (10) magnet   |                |

17) H. M. WESTERGAARD; Water Pressure on Dams during Earthquakes, Trans. A.S.C.E. (1933), 418.  
 18) S. KOTSUBO; Dynamic Water Pressure on Dams during Earthquakes, Proc. 2nd World Conf. Earthq. Eng. (1960), 799.



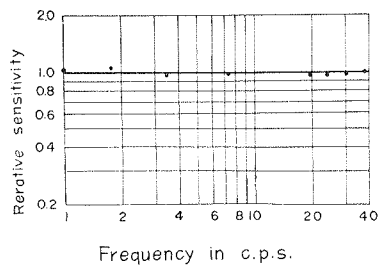
第29図 動水圧計の写真

Fig. 29. Photographs of the hydrodynamic pressure gauge.  
(a): a complete gauge. (b), (c) & (d): inner parts.



第30図 動水圧計検定装置の写真

Fig. 30. Photograph of the apparatus for the calibration of the hydrodynamic pressure gauge.



第31図 動水圧計の周波数特性

Fig. 31. Frequency characteristics of the hydrodynamic pressure gauge.

Pick-up の構造は第 28 図の断面図に示されている。外体は厚い砲金で作られており、その内部は 2 室より成っている。この両室とも silicon oil が完全充填されている。第 1 室は貯水池の水と大きな bellows により仕切られているが、この bellows は圧力をよく伝達するように弱い力で変形し得るものである。この材料は耐腐蝕性の強い Monel metal を使用した。第 2 室は内部に磁石が固定され、第 1 室と第 2 室は、小さい bellows により仕切られており、これに可動線輪が付けられている。この bellows も圧力伝達の損失が小さいように力の弱いものであるが、一般に bellows の変形は hysteresis を伴い、また力に対し直線性を特たないので、材料としては優れた弾性を持つ beryllium 銅を使用し、さらに巴形の板バネで復元力を与えてある。

この pick-up に外部から動的水圧がかかると圧力は二つの bellows を介して、第 1 室および第 2 室の silicon oil に作用する。Silicon oil は圧縮されるから、線輪は動圧に比例して動き、外圧の時間微分に比例した電圧が誘起される。

第 1 室と第 2 室は細長い管により連結されている。測定のための周波数範囲、すなわち 1~30 c.p.s. では管内の粘性抵抗のため silicon oil は殆んど流通せず、それ以下の周波数では少ない抵抗で流通し得るから、静水圧の緩慢な変化や温度変化の影響によって線輪が移動するのを避けられる。

測定周波数帯域では圧力と起電力の関係は次式により表現される。

$$E = S_p \frac{dP}{dt}$$

ただし  $S_p = A(1-l) \frac{\beta v_2}{S_2}$  : 感度

$E$ : 線輪の起電力

$P$ : 動水圧

$A$ : 磁石と可動線輪の電圧感度係数

$\beta$ : silicon oil の圧縮率

$v_2$ : 第 2 室の silicon oil の体積

$S_2$ : small bellows の有効断面積

$l$ : bellows などによる損失の割合

良好な動作を得るためには各部分の形状や寸法、或いは力の配分に、また silicon oil の体積や充填方法に細心の注意を払う必要があった。この pick-up では  $A=0.12$  volt/(cm/sec),  $\beta=1.0 \times 10^4$ /bar,  $v_2 \approx 1 \times 10^3$  cm<sup>3</sup>,  $S_2 \approx 2$  cm<sup>2</sup> であり、また  $l$  は 0.1 以下になるように設計した。

この pick-up の出力を積分 galvanometer に接続すれば圧力に比例した記録が得られる。Attenuator としては III-2 に述べたものと同じ型式のものを使用する。pick-up の感度は、 $S_p=0.007$  volt/(bar/sec) であり、装置全体の感度は 140 mm/bar である。

第 29 図は動水圧 pick-up 全体および各部の写真であり、第 30 図は pick-up の検定装置の写真である。

検定は pick-up の前面に水槽を取付けて種々の静水圧を加え、さらに piston によりその水槽に正弦波動圧を加えて行なった。加えた動水圧は工業用の strain gauge 式の水圧計と増幅器を用いて測定し、この記録と pick-up の出力電圧とを比較した。第 31 図はこの検定によって得た pick-up の周波数特性で 1~40 c.p.s. で完全に平坦である。感度は低周波では前述の静圧補償のため 6 db/octave で低下するが、その -3 db 点は計算上では 0.056 c.p.s. となる。また 50 c.p.s. 以上の高周波では線輪や silicon oil の慣性および silicon oil の粘性のために周波数特性に乱れを生ずる筈である。

## 12. Trial Fabrication of the instruments to Observe Seismic Waves

By Nozomu DEN

(Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University)

With the advance of the studies in the fields of seismology and earthquake engineering, various characteristics are demanded upon the instruments to observe seismic waves. The computers and analysers have highly developed in recent years, and it still remains as an important theme to obtain good records.

The instruments described here are the electrodynamic seismometers, amplifiers, shaker and hydrodynamic pressure gauge.

The pendulums of the electrodynamic accelerometers DEN-3 CH and 3 CV are damped so heavily that their forced motions are propotional to the velocity of ground motion and the output currents to the acceleration.

The electrodynamic seismometers DEN-1 CH and 1 CV are used for various purpose. When they are used in combination with the integrating galvanometers, they serve as displacement seismometers.