

59型光学式電磁地震計の性能試験*

地震課技術係**

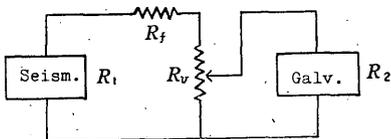
550.340.1

まえがき

気象庁観測網で使用している59型光学式電磁地震計は1964年2月現在20台に達した。この地震計の諸定数、周波数特性、および時刻精度について試験を行なった結果を報告する。これがこの地震計の記録を調査、研究上利用される方々の参考になれば幸である。

§ 1. 地震計の概要

動コイル型変換器と反照型検流計を第1図のような減衰器を介してつないだもので、振り子の周期 T_1 : 約1.5 sec, 検流計の周期 T_2 : 約0.3 sec, 振り子の減衰定数 h_1 : 約0.5, 検流計の減衰定数 h_2 : 約2.5~3.0, 結合定数 $\sigma \leq 0 \sim 0.03$, 最大倍率は減衰器の可変抵抗を加減することにより0~約3000の間連続可変である。倍率を加減しても、第1図からわかるように、変換器の減衰定数も、検流計の減衰定数もほとんど変化しないので、地震計の周波数特性の形はほとんど変わらないことが特長である。



第1図 59型光学式電磁地震計の回路
 $R_1=95\Omega$ $R_2=600\Omega$, $R_f=40\Omega$, $R_v=30\Omega$

記録は35mmフィルムを用い、送りは20mm/minである。記録光点は時間軸方向の長さ約30 μ , 振幅方向の長さ(記録線の幅)約60 μ である。記録ドラムは精度よく作られているので、毎分のタイムマークを水晶時計から入れ、また水晶時計からの標準周波数で駆動モーターを回すと時刻精度は ± 0.1 秒程度に保たれる。

* Seismological Section, J. M. A. : Calibration of the Electromagnetic Seismograph with Film-recorder (J. M. A. Type 59). (Received Dec. 20, 1963)

** 宇津徳治記

以下の試験結果は器械番号 No. 19 (相川に設置のもの) のN-S成分についての記述に限つてある。ただし、上下動成分について水平動と異なる方法を用いた場合は上下動成分についても記述した。

§ 2. 変換器部

(1) 振り子の M, H, l, K_1 等の測定

測定結果は次表のとおりである。

	記号	N-S成分	U-D成分
振り子質量	M	2.433kg	2.440kg
重心と回転軸との間の距離	H	0.098m	0.098m
振り子の当長***	l	0.113m	0.104m
回転軸の周りの慣性モーメント	K_1	kg-m ² 0.0270	kg-m ² 0.0248
変換器コイルの中心と回転軸との間の距離	L_1	0.192m	0.192m
読取顕微鏡軸と回転軸との間の距離	r	0.100m	0.100m

l の測定は盤を傾けて、振り子の回転軸と鉛直線のなす角 i を変えたときの振り子の周期 $T_{(i)}$ をストップウォッチで測った。(50振動の時間を測り1/50する) i と $T_{(i)}$ と l は、 β を板ばねの復動力の定数として

$$\frac{1}{T_{(i)}^2} = \frac{1}{4\pi^2} \left(\frac{\beta}{K_1} + \frac{g}{l} \sin i \right) \quad (1)$$

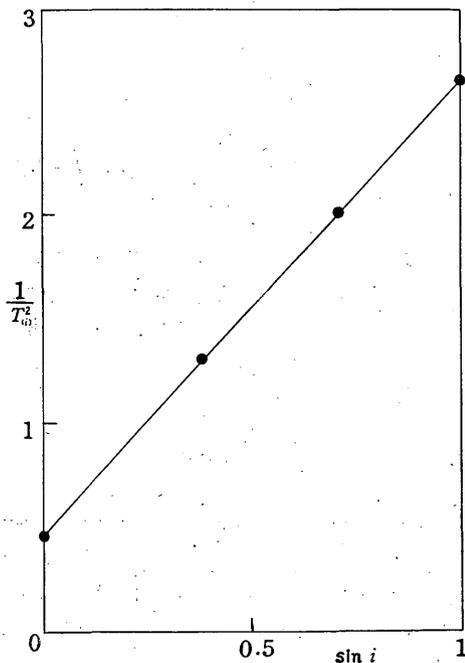
の関係があるから、 $1/T_{(i)}^2$ を $\sin i$ に対してプロットすると第2図のように一直線に乗る。この直線の傾斜から l が求められる。 K_1 は $K_1 = MHl$ から計算した。

(2) 変換器のコイル抵抗と巻線数

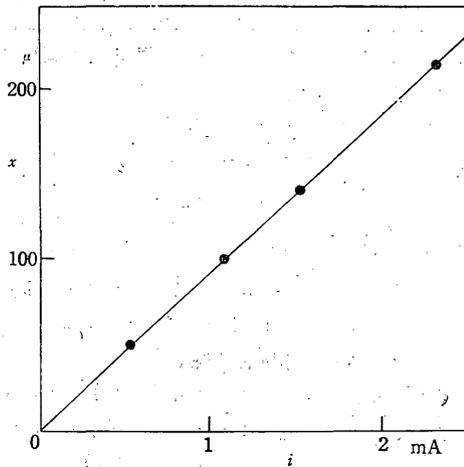
この変換器にはコイルが二つに分かれて巻いてあり、その一方だけを地震計として使用するようになってい。主コイルと補助コイルの抵抗 R_1 と巻線数 N_1 は次表のとおりである。

	記号	主コイル	補助コイル
コイル抵抗	R_1	96.33 Ω	95.32 Ω
巻線数	N_1	320	320

*** $l = K_1/MH$ で定義されるもの。



第2図 盤の傾き i と周期 T_0 の関係



第3図 変換器を流れる電流 i と振り子のふれ x

(3) 変換器の電圧感度の測定

i) 電流感度 s_1 の測定から求めること.

変換器に電流 i を流したときの振り子の振れの角を θ とすれば

$$s_1 = \theta / i \tag{2}$$

である. 読取顕微鏡による振り子の変位の読みを x とすれば $\theta = x/r$ であるから

$$s_1 = x / ri. \tag{3}$$

N-S成分の主コイルに, いろいろな大きさの電流を流したときの振り子の変位の読取りを第3図に示した. この図からN-S成分の主コイルに対して $s_1 = 9.30A^{-1}$ を得る. 同様にしてN-S成分の補助コイル, およびU-D成分の主コイルに対してそれぞれ $s_1 = 9.30A^{-1}$, $s_1 = 9.49A^{-1}$ を得る. s_1 は振り子の周期 T_1 の2乗に比例するが, この測定を行なったときの周期は, N-S成分成分: $T_1 = 1.53 \text{ sec}$, U-D成分: $T_1 = 1.50 \text{ sec}$ であった.

電流感度 s_1 と電圧感度 G_1/l の関係は

$$G_1/l = 4\pi^2 M H s_1 / T_1^2 \tag{4}$$

であるから, これから G_1/l , および G_1 を求めると下表のようになる.

ii) 盤の傾斜 (水平動) または小質量の付加(上下動)による振り子の変位を復原するための電流の測定から求めること.

水平動振り子では盤を角度 α だけ傾けたときに生じた振り子の変位が, 変換器コイルに電流 i を流すとちょうどもとの位置に戻るものとすれば

$$G_1 i = M g H \alpha \tag{5}$$

の関係があるから, α, i を測れば G_1 が求まる. $\alpha = 1/115$ のとき $i = 0.00473A$ で復原したので, これから G_1 を求めると, $G_1 = 4.29V\text{-sec}$, $G_1/l = 37.9 V/m/sec$ となり, 前記の s_1 から求めたものとほぼ一致する.

上下動では振り子に質量 m の小さなおもりを, 回転軸から L の距離の点に載せたとき生じた振り子の変位が, 変換器コイルに電流 i を流すとちょうどもとの位置に戻るものとすれば

$$G_1 i = m g L \tag{6}$$

の関係があるから, i を測れば G_1 が求まる. $m = 0.0200$

	記号	N-S成分主コイル	N-S成分補助コイル	U-D成分主コイル
電圧感度	G_1/l	37.4V/m/sec	37.4V/m/sec	39.8V/m/sec
動電定数	G_1	4.23V-sec	4.23V-sec	4.14V-sec

kg, $L=0.100\text{m}$ のとき $i=0.00470\text{A}$ で復原したのでこれから G_1 を求めると, $G_1=4.17\text{ V-sec}$ となり, また, $G_1/l=40.2\text{ V/m/sec}$ となる. これは前記 s_1 から求めたものとほぼ一致する. この方法は, 式にはいってくるパラメーターの数が少なくかつ測定しやすい量であるのすぐれているが, 水平振り子を用いた水平動には使えない.

【付記】 気象庁の「近地震用電磁地震計による地震観測要領 (暫定版)」(以下「要領」という)に記載の方法で G_1/l を求めたところ次のようになった.

DC 10 mV を加えたときの振れ $x: 93\frac{1}{2}\mu$ (N-S), $92\frac{1}{2}\mu$ (U-D), 振り子の周期 $T_1: 1.480\text{ sec}$ (N-S), 1.485 sec . (U-D), $G_1/l: 42.3\text{ V/m/sec}$ (N-S), 41.6 V/m/sec . (U-D).

ただし公式として

$$G_1/l=0.991x/T_1^2 \quad (7)$$

を用いた. この G_1/l の値は 1) 項で求めた値とくらべてやや大きい.

(4) 振り子の減衰定数

i) 開路状態における減衰定数 h_{01}

変換器の外部に何もつながらないときの振り子の減衰定数 h_{01} (残留減衰定数と呼ぶことにする) は非常に近く $h_{01} \approx 0.003 \sim 0.01$ である.

ii) 地震計の使用状態における減衰定数 h_1

変換器に負荷をつないだために生ずる電磁的な減衰定数を h_{e1} とすれば,

$$h_1 = h_{01} + h_{e1} \quad (8)$$

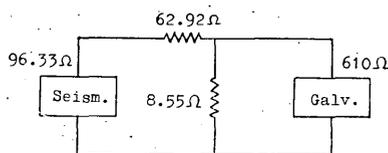
である. h_{e1} は s_1 または G_1 がわかれば

$$h_{e1} = \frac{4\pi^3 K_1 s_1^2}{T_1^3 (R_1 + r_1)} \quad (9)$$

$$h_{e1} = \frac{T_1 G_1^2}{4\pi K_1 (R_1 + r_1)} \quad (10)$$

から求められる. ただし r_1 は変換器の外部抵抗である.

h_{e1} は T_1 が変れば変るが, (10) からわかるように h_{e1}/T_1 は一つの変換器部に対して不変量 (長期的変化を考えないとき) である. 第4図の示す地震計の使用状態の回路 (第1図の可変抵抗を約 $1/4$ の位置にしたとき



第4図 特性を測定したときの回路

である. 東京は雑微動が大きいのでこれ以上倍率を上げた状態で試験することができない) に対する h_{e1}/T_1 を前節 i) 項で求めた $G_1=4.23\text{ V-sec}$ を用いて計算すると $h_{e1}/T_1=0.315\text{ sec}^{-1}$ となる. したがって $T_1=1.5\text{ sec}$ に対しては $h_{e1}=0.47$, $h_1=0.48$ となる.

§ 3. 検流計

(1) 検流計の電流感度

検流計の電流感度 s_2 は電流 i が流れたときの鏡のふれの角を φ , このとき記録ドラム上の光点の変位を y とすれば

$$s_2 = \varphi/i = y/2Ai \quad (11)$$

である. ただし A は検流計鏡から記録ドラム面までの距離である. $2As_2$ の測定結果は下表のとおりである. なお i_s は $y=1\text{ mm}$ にするために必要な電流である.

(2) 検流計の周波数特性

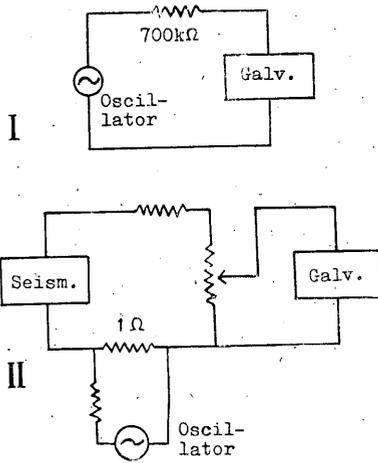
i) 開路状態における特性

第5図Iのように超低周波発振器と検流計を高抵抗を介してつなぎ, 発振器から種々の周波数の電流を流してそのときの検流計の振れを記録した. $700\text{ K}\Omega$ は検流計の (臨界制振抵抗+内部抵抗) 約 $2\text{ K}\Omega$ にくらべて著しく大きいから, この結果は検流計に何も負荷をつながらない状態の特性を与えると考えてよい. 結果は第6図の上の曲線 (F印) で示されるようになった. この曲線から検流計の固有周期 T_2 と残留減衰定数 h_{02} が求められる. T_2 は曲線の峰の少し左方で傾斜が 45° になる点の周期であり, h_{02} はその点の縦軸の目盛を η_1 , 周期が十分大きく曲線が水平になったところの縦軸の目盛を η_0 とすれば

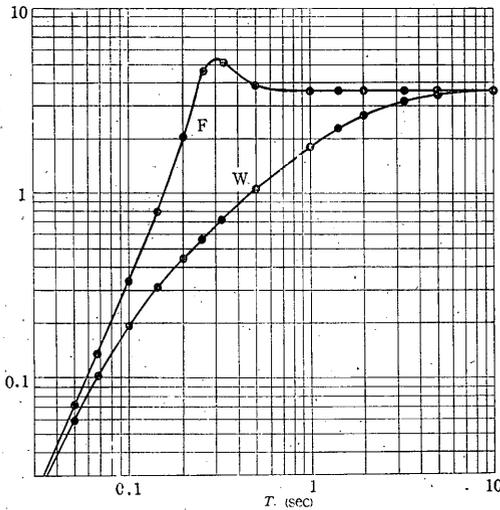
$$h_{02} = \eta_0/2\eta_1 \quad (12)$$

	記号	N-S成分	U-D成分
電流感度×光学長	$2As_2$	$3.50 \times 10^4 \text{ m/A}$	$3.53 \times 10^4 \text{ m/A}$
電流感度の慣習的表現	i_s	$2.86 \times 10^{-8} \text{ A}$	$2.83 \times 10^{-8} \text{ A}$

* 「低周波発振器」からは直流電圧もとり出せるようになっており, この直流を利用したのである.



第 5 図



第 6 図 検流計の周波数特性, W: 使用時.
F: 回路開放時

で与えられる。得られた値を次表に示すが h_{02} が 0 よりもやや大きいのは、検流計を浸してあるシリコン油の粘性による減衰が利いているからであろう。

ii) 地震計の使用状態における特性

第 5 図 II のように使用状態の回路 (可変抵抗は約 1/4 の位置) の一部に 1Ω の抵抗を挿入しそれに $50K\Omega$ を介して発振器の出力を加えた。 1Ω は変換器コイルの抵抗等にくらべて十分小さいので無視できる。なおこの際、変換器のコイルは振り子からはずしてから接続した。変換器につけたままで単に振り子をクランプしただけではうまくゆかない。結果は第 6 図の下の方の曲線 (W印) で示される。これから h_2 を求めた値を次表に示す。

	記号	N—S 成分	U—D 成分
固有周期	T_2	0.26sec	0.29sec
残留減衰定数	h_{02}	0.35	0.31
使用時の減衰定数	h_2	2.80	2.80

§ 4. 地震計の倍率曲線

(1) 6 定数 $T_1, T_2, h_1, h_2, \sigma$ および V_s から計算によつて求めること

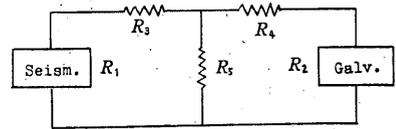
i) σ の計算

第 7 図に示す地震計の結合定数 σ は

$$\sigma^2 = \frac{h_{e1} h_{e2}}{h_1 h_2} \frac{1}{p_1 p_2} \tag{13}$$

$$p_1 = \frac{R_2 + R_4 + R_5}{R_5}, \quad p_2 = \frac{R_1 + R_3 + R_5}{R_5} \tag{14}$$

によつて計算できる。 $h_1=0.56, h_{01}=0.01, h_2=2.80, h_{02}=0.35, R_1=96.33\Omega, R_2=610\Omega, R_3=62.92\Omega, R_4=0\Omega, R_5=8.55\Omega$ を用いると $\sigma^2=0.00061$ となる。これは十分小さいから倍率曲線を求めるときは $\sigma^2=0$ としてさしつかえない。



第 7 図

ii) V_s の計算

地動の周期 $T (=2\pi/\omega)$ に対するこの地震計の振動倍率を $V(\omega)$ とすると、 $\sigma^2=0, T_1 > T_2$ の場合であるから

$$V(\omega) = V_s \cdot \frac{1}{\sqrt{(1-u_1^2)^2 + 4h_1^2 u_1^2}} \cdot \frac{1}{u_2} \cdot \frac{u_2^2}{\sqrt{(1-u_2^2)^2 + 4h_2^2 u_2^2}} \tag{14}$$

$$u_1 = T/T_1, \quad u_2 = T/T_2 \tag{15}$$

である。この V_s を仮に倍率係数と呼ぶことにする。 V_s は

$$V_s = 2AMH \left(\frac{2\pi}{T_1} \right)^2 \left(\frac{2\pi}{T_2} \right) s_1 s_2 / Q, \tag{16}$$

$$\text{ただし } Q = \frac{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4)}{R_5} + R_1 + R_2 + R_3 + R_4, \tag{17}$$

$$V_s = \frac{4A}{l} \sqrt{\frac{K_1}{K_2} \frac{T_2}{T_1} h_1 h_2 \sigma^2}, \tag{18}$$

$$V_s = \frac{4AG_1 h e_2}{l G_2 P_2} \quad (19)$$

$$V_s = \frac{4\pi A G_1 s_2}{l Q T_1} \quad (20)$$

などで表わされるが (16) または (20) が便利である。N-S成分についての既得の値 $M=2.433\text{kg}$, $H=0.098\text{m}$, $T_1=1.5\text{sec}$, $T_2=0.26\text{sec}$, $s_1=9.30\text{A}^{-1}$, $2As_2=3.50 \times 10^4\text{m/A}$, および第4図に与えられている諸抵抗値を用いて計算すると, $V_s=2710$ となる。

この地震計のように $T_1 \gg T_2$ で h_1 が1よりもあまり大きくない (実際は1以下である) ものでは, 最大倍率 V_{max} は次式で与えられる \bar{V} にほぼ等しい。

$$\bar{V} = V_s / 2h_2 \quad (21)$$

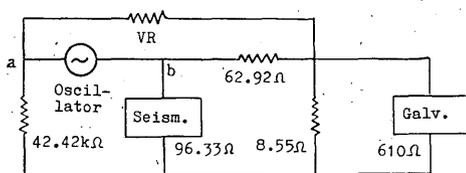
$h_2=2.80$ であるから $V_{max}=480$ となる。これは前にも述べたように減衰器の可変抵抗を約1/4にしたときの値であり, 地方の各気象官署に設置したときは $V_{max}=1000$ (または500) にして使用されている。

iii) 倍率曲線

以上で6定数 T_1 , T_2 , h_1 , h_2 , σ および V_s がわかったから倍率曲線をかくことができる。結果は第9, 10, 11図に示す曲線である (3図とも同じ曲線)。

(2) Willmore のブリッジによる振動倍率の測定

第8図のブリッジを組み, N-S成分の振動倍率を0.1秒から10秒までの周期範囲について測定した。減衰器の可変抵抗の位置は前と同じく1/4のところになっている。なお42.42K Ω およびVRは地震計各部の抵抗にくらべて十分大きいから, これらは地震計の特性には影響を及ぼさない。



第8図

まず振り子をクランプし a, b 端子間に直流電源 (最大DC 30V まで出せるもの) をつないで VR を可減して検流計に電流が流れないようにする。次に, 超低周波発振器 (最大30Vp-p まで出せるもの) をつないで1c/s と10c/s でバランスをとり直してみたが, 結局VRの位置は変らなかった。この場合, VR を可減してもわずかに検流計のふれが残るが, このふれが最小になるところを選んだわけである。この残りのふれの大部分は振り子をクランプしてもコイル支持うでの部分がたわんで

くわずかであるがコイルが振動することによるものである。(一部はコイルのインダクタンスの影響かも知れない)。バランスをとった後, 振り子のクランプをはずし, T_1 を測り $T_1=1.480\text{sec}$ を得た。ついで発振器から, 種々の周期の出力を出してこのときの検流計のふれを記録する。以下の扱いには二つの方法がある。

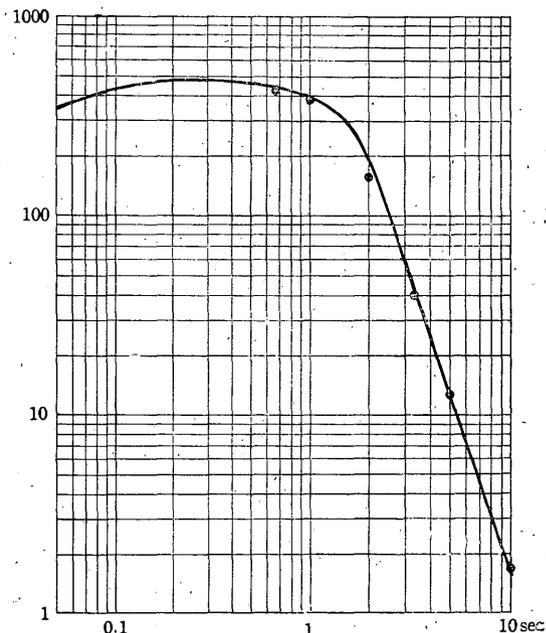
i) 振り子の振れの振幅 x_0 とその時の記録の振幅 y_0 を測定する方法。

ここでは振り子のふれを読取顕微鏡で読んだので, 周期1秒以下の振動の際は読取りが困難であった。 x_0 も y_0 も過大または過小にならないよう発振器の出力を各周期ごとに選んだ。周期 T に対する y_0/x_0 を知ればその周期に対する振動倍率 $V(x)$ は

$$V(\omega) = \frac{r}{l \sqrt{(1-u_1^2)^2 + 4h_1^2 u_1^2}} \cdot \frac{y_0}{x_0} \quad (22)$$

である。 l , r は, §1, (1) に示されているものである。たとえば $T=1\text{sec}$ においては $x_0=26\mu$, $y_0=10.5\text{mm}$ であるから $r=0.100\text{m}$, $l=0.113\text{m}$, $u_1=1/1.48$, $h_1=0.48$ を入れると $V(\omega)=383$ となる。同様にしてその他の周期に対しても $V(\omega)$ を求め, 結果を第9図にプロットした (黒丸), 図中の曲線は6定数から計算して求めた第9図の曲線が書いてあるが, 測定結果とかなりよく一致している。

この方法は, 発振器の出力を知る必要がない。また,



第9図

変換器の感度回路各部の抵抗値も測定する必要がないという長所があるが、振り子の T_1 と h_1 を知っていなければならない、また短周期 (たとえば $T < 1 \text{ sec}$) のとき振り子の振幅が読取り困難であるという短所がある。

ii) 振り子に与えた力のモーメントの振幅 N_0 とその時の記録の振幅 y_0 を測定する方法。

発振器からの電流 $i = i_0 \sin \omega t$ が変換器 コイルを流れることにより振り子には $N = N_0 \sin \omega t$ のモーメントをもつ力が働く、ただし $N_0 = G_1 i_0$ である。このとき周期 T に対する振動倍率は

$$V(\omega) = \frac{4\pi^2 MH y_0}{T^2 G_1 i_0} = \frac{y_0}{l s_1 u_1^2 i_0} \quad (23)$$

である。たとえば $T = 1 \text{ sec}$ においては、発振器の出力電圧 2.00 Vp-p , $R_1 = 96 \Omega$ $R_2 = 42.42 \text{ K}\Omega$ であるから $2i_0 = 4.70 \times 10^{-6} \text{ A}$, このときの $2y_0 = 9.0 \text{ mm}$ で、また前に求めたように $l = 0.113 \text{ m}$, $s_1 = 10.07 \text{ A}^{-1}$ であるから、 $V(\omega) = 369$ となる。同様にしてその他の周期に対しても $V(\omega)$ を求め結果を第 10 図にプロットした黒丸図中の曲線は 6 定数から計算して求めた第 9 図の曲線を比較のためそのまま書いてあるが、測定結果とかなりよく一致している。

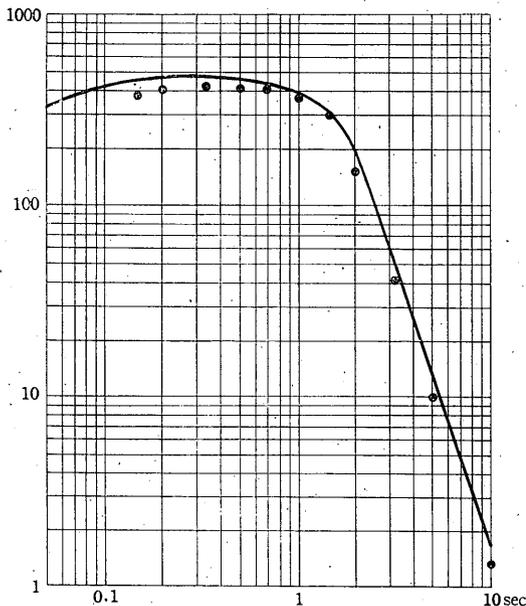
(3) 補助コイルによる振動倍率の測定

この地震計の変換器には主コイルと補助コイルが巻いてあるので、補助コイルに高抵抗を通して超低周波発振器の出力を加えれば、前項にのべたブリッジ回路を用い

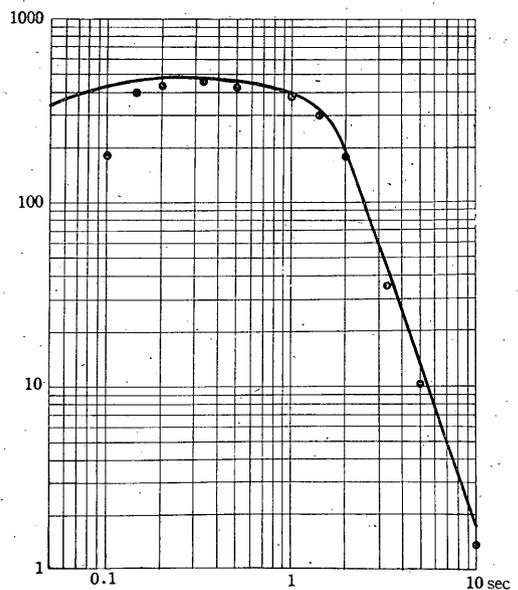
なくても、振動倍率を測定できるものと思われる。しかしこの場合、振り子をクランプしておいて補助コイルに電流を流すと、わずかであるが検流計もふれる。このふれは電流の周期が短いほど急激に大きくなり、 1 sec でクランプをはずしたときのふれの約 $1/1000$, 0.3 sec で約 $1/100$, 0.1 sec では $1/3$ に達する。したがって 0.3 sec 以上の周期ではほとんど問題がないがそれ以下では振動倍率に誤差を与えるものと思われる。この原因はコイル支持うでのたわみによるものが大部分であろうが、短周期のところでは主コイルと補助コイルの相互誘導もきいているであろう。これを避けるためには、別に補助変換器を振り子の重心近くに備えて振子の重錘部に直接力が加わるようにするべきであろう。

補助コイルを用いたときは前節 i) のの読取顕微鏡を使う方法は行わず ii) の方法のみを行なった。ただしこの場合には (21) の s_1 の代りに補助変換器の s_1' を用いるべきである。(この地震計ではたまたま $s_1 = s_1'$ である。測定結果を第 11 図にプロットした (黒丸)。図中の曲線は第 9 図と同じ曲線である。測定結果は $T > 0.2 \text{ sec}$ ではかなりよく曲線

[付記] (1) 「要領」記載の方法で「低周波発振器」から $N-S$ 成分の減衰器入力端子に 2.00 c/s , 1 mV (実効値) を 100Ω の抵抗を直列につないで加えたときの検流計の振れの記録の全振幅 y を測った。 y の値は減衰器の変換抵抗の位置が $1/4$ (第 4 図のとき 2.50 mm であ



第 10 図



第 11 図

った。これから 2 c/s における振動倍率 V は、公式として

$$V = 432(G_2/l)y \quad (24)$$

を用い G_2/l を 37.4 V/m/sec とすれば $V=404$ となる。

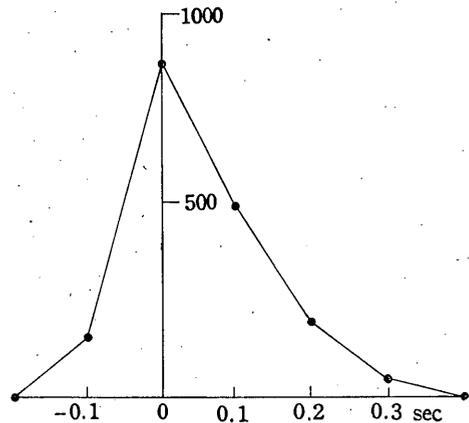
2 c/s における振動倍率は、倍率曲線をみればわかるように最大倍率 V_{max} とほぼ同じである。最大倍率は (1) で述べた 6 定数から決めた倍率曲線では $V_{max}=480$, (2) の i) (第9図) では $V_{max}=460$, ii) (第10図) では $V_{max}=430$, (3) (第11図) では $V_{max}=460$ が得られるが、これらはみなほぼ同じ値でありいずれの方法もかなり、信頼がおけるものであることを示している。

(2) 地震計の倍率曲線を求める方法には、振り子に衝撃的な力を加えたときの検流計の記録を周波数分析する方法もあるが、この地震計は短周期のため検流計の運動は 1 秒以内で終わってしまうので、特別に速送りの記録カメラを製作しない限り周波数分析可能な記録を得ることはできない。

§ 5. 記録装置の時刻精度

記録装置の時刻精度を調べるため、水晶時計からの毎秒のパルスを 30 分間にわたって記録し、その各秒のマークの時刻を、6 倍のフィルム読取器を用いて、分マークを基準にして読取った。ただし、フィルムの両端に当る 1 分間は除いた。

フィルム読取器、および読取用標準ガラス尺による誤



第 12 図 $\Delta\tau$ の度数分布

差は 0.1 秒よりもかなり小さいことは、二つの標準尺をいろいろな位置で重ね合わせてみて完全に重なることおよび標準尺をフィルム読取器にかけて拡大したものを別の標準尺で調べてみるにより確かめられた。なお、標準尺はフィルム読取器に記録フィルムをかけたとき、その投影面上で 0.1 秒に当る長さまで目盛が切つてある。

分マークから n 秒目の秒マークの読取値を $n + \Delta\tau$ とするとき、 $\Delta\tau$ の度数分布を示したものが第 12 図である。これをみると、誤差 $\Delta\tau$ が 0.0 秒と ± 0.1 秒のものが全体の 86% を占め、 ± 0.3 秒を越えることはないことがわかる。