

## 28. 直視記録方式による長周期地震計

(第3報)

地震研究所 辻 浦 賢

(昭和39年12月22日発表—昭和40年3月31日受理)

今回試作した地震計は、現在標準型長周期地震計として使用されている Press-Ewing ( $T_0=30$  sec,  $T_g=90$  sec) と同等の特性をもち、総合倍率 3000 倍 (周期 30 秒における値) を有する直視記録方式による長周期地震計、ならびに固有周期 600 秒の検流計の直結方式とほぼ同等の特性をもち、総合倍率 1700 倍 (周期 80 秒) を有する直視記録方式による超長周期地震計である。

### § 1 序 言

すでに第1<sup>1)</sup>、第2報<sup>2)</sup>でのべたごとく長周期表面波の多点観測を実施するため、可搬型長周期地震計の製作を目的としたものであり、現在標準型長周期地震計として使用されている Press-Ewing 型地震計の特性にあわせるよう設計した。第1図としてすでに完成

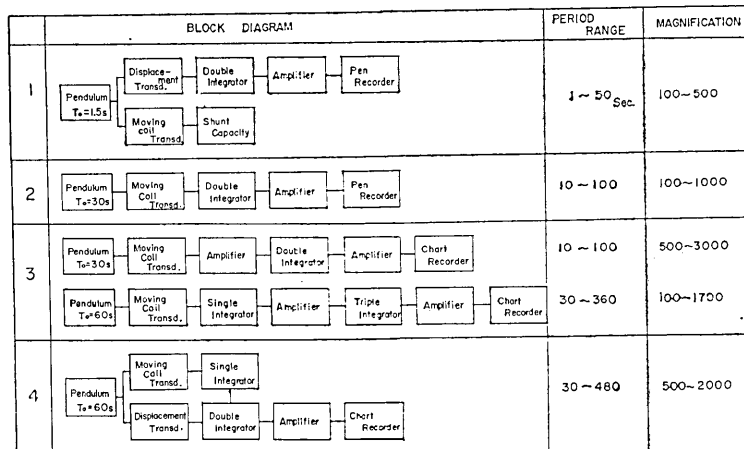


Fig. 1. Development plan for long and ultra long period seismographs.

し報告したもの、および今後研究し開発をすすめる予定である地震計のブロックダイアグラムをしめす。このうち今回報告するものは、No. 3 にしめす可動線輪型換振器、直流増幅器、記録装置の直結方式による地震計である。検流計のかわりにもちいるトランジスター化されたこれらの電子装置は、それぞれ固有周期 90 秒、および 600 秒の長周期検流

- 1) M. TSUJURA, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 40 (1962), 899~905.
- 2) M. TSUJURA, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 40 (1962), 907~916.

計に比し、働作安定にしてかつ簡便に取扱うことができる特徴を有する。もちいた記録装置は最大振幅  $\pm 100$  mm の直線性をしめすサーボモーターをもちいた自動平衡型記録装置である。したがって従来の地震計の記録装置としてもちいたインク書き記録電流計にくらべ、記録の直線性、ならびにダイナミックレンジの拡大をはかることができた。そしてまず上述の方式による地震計1台の試作を完了し、東大、安田講堂地下室、および地震研究所、筑波山支所において連続観測をこころみ、標準地震計との比較試験をおこなった。

以下地震計の構成と装置の概要、ならびに今後研究し改良すべき点などについて簡単に報告する。

## § 2 地震計の構成

長周期地震計の標準として、固有周期 15 秒—30 秒の振子、75 秒—90 秒の固有周期をもつ高感度検流計との直結型が今日世界の標準型地震計<sup>3)</sup>として、遠震実体波あるいは表面波の研究に多大の功績をのこしている。ここにのべる地震計もこれと同等の特性をもち、かつ可搬型として安定度ならびに取扱の簡便さを目的とし設計した。すなわち上述の標準地震計は、検流計のもつ固有周期より短い周期にたいして  $-12$  db/oct の高域通過特性を利用し、振子特性をふくむ通過帯域にたいしほぼ平坦特性をもたしたものである。そこでこれと等価な特性を、RC の組合せによる電気回路網によつて構成し、倍率を高めるため直流増幅器を並用する。そしてこれらを適当に縦続接続することによつて、上記長周期地震計を構成したものである。

### 1) 地震計振子

地震計振子は、すでに第2報<sup>4)</sup>で報告したものにいくらか改造したものを製作し、その固有周期は 60 秒においてなお安定である。可動線輪型換振器は、質量の両側に各1個配列した。そのうち1つは、巻数 4000 回、内部抵抗 4 K $\Omega$  を有する低インピーダンスコイル、他方は、巻数 50000 回、内部抵抗 480 k $\Omega$  を有する高インピーダンスコイルをもち、低インピーダンスコイルは長周期ならびに超長周期用換振器として、高インピーダンスコイルは超長周期用換振器として使用することができる。また特に超長周期用換振器として、誘電体（滑石磁器、酸化チタン磁器）を可動片とする可変容量型の変位型換振器をも設備している。

### 2) 直流増幅器

換振器からの出力電圧は、50 c/s の誘導を除去するための低域濾波器を通過したのち、次の直流増幅器にくわえられる。今回試作した増幅器は、小型低雑音チャッパ（大倉電気）をもちい、トランジスター化された交流変換型直流増幅器である。したがって従来もちいられていた真空管方式に比し、使用電力はすくない（約 10 W）。したがってたとえ温度変動のきらう地震計室に設置したとしても熱源となる心配はすくない。増幅器の入力インピーダンスは不平衡時 50 K $\Omega$  であり、倍率は最高 1000 倍、以下 500, 200, 100,

3) F. PRESS and M. EWING, *Trans. Am. Geophys. Union*, 39 (1958), 106~108.

4) M. TSUJURA, *loc. cit.*, 2)

50 倍のステップ減衰器をもち、倍率 1000 のレンジにおいて 60 db の負饋還をかけている。以下倍率の減少にしたがつて負饋還量が增大し、ドリフトの減少をはかると同時に入力インピーダンスの増大をはかり、信号源からのパワーの吸収を防止している。出力電圧は、最高  $\pm 2V$  までの直線性を有し、正負の電源をもちいることによつて、無信号時の出力電圧を零に調整することが可能である。第 2 図に使用した増幅器の配線図をしめす。一般に高感度直流増幅器は、構成上の問題として入力雑音電圧がある。すなわち雑音は、入力インピーダンスの如何にかかわらず熱起電力、電磁誘導に起因し、特に高インピーダンス入力においては、チョッパーの接触電位差、あるいは電気化学的なものがかんがえられる。

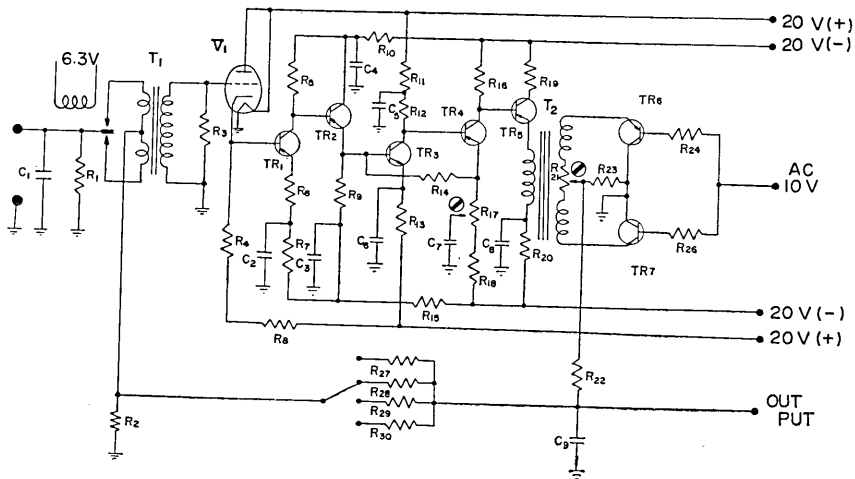


Fig. 2. Circuit diagram of D. C. amplifier with negative feed back loop.

これらの雑音のうち、熱起電力によるものは接点部分、ベースピン、ソケットおよび半田付け部分等に温度傾斜をもつ場合に発生し、電磁誘導によるものは、外部よりの磁束がベース、ソケット部に作用し電磁誘導を発生せしめる。そこで総合倍率 3000 倍程度の高感度長周期地震計を製作するうえにおいては、当然装置自体、あるいは周囲の温度傾斜をすくなくするとともに完全な磁気遮蔽をほどこすことも必要である。また一方、入力回路にもちいる抵抗には金属皮膜抵抗器をもちいること、および入力チョッパーをふくむ回路の接続には Cd, Sn による低雑音半田を使用し、熱起電力による雑音の発生を防止することが必要である。以上の点に留意し、細心の注意をもつて製作するならば、入力雑音電圧を  $0.2 \mu V$  以下におさえることも可能であり、総合倍率 5000 倍 (30 秒) を有する長周期地震計の製作もさほど困難ではない。

### 3) R-C 積分回路

第 2 報<sup>5)</sup> において 2 組の RC を連続接続することによつて、検流計と等価な特性のえ

5) M. TSUJURA, *loc. cit.*, 2)

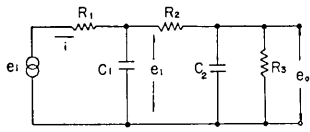


Fig. 3. Basic circuit of double integrating network.

られることをのべたが、今回のものも同様な方式を採用した。これは Benioff の論文<sup>6)</sup>にも記されているごとく、その等価特性は、第3図の回路網において、 $E_0$  と  $E_i$  の比、すなわち所要の伝達函数は、 $j\omega=S$  とし、まず  $R_3C_2$  の並列インピーダンス  $Z_1$  をもとめると、

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{R_3}{1+C_2R_3S} \\ &= \frac{R_3}{1+T_{23}S} \end{aligned} \quad (1)$$

つぎに  $C_1$  と  $(R_2+Z_1)$  の並列インピーダンスを  $Z_2$  とすると  $Z_2$  は

$$Z_2 = \frac{R_2(1+T_{23}S)+R_3}{1+(T_{12}+T_{13}+T_{23})S+T_{12}\cdot T_{23}S^2} \quad (2)$$

したがって  $i(s)$  は

$$i(s) = \frac{E_i(s)}{R_1 + \frac{R_2(1+T_{23}S)+R_3}{1+(T_{12}+T_{13}+T_{23})S+T_{12}T_{23}S^2}} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} E_1(s) &= E_i(s) - R_1 i(s) \\ &= E_i(s) \left[ 1 - \frac{R_1}{R_1 + \frac{R_2(1+T_{23}S)+R_3}{1+(T_{12}+T_{13}+T_{23})S+T_{12}T_{23}S^2}} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$E_0(s) = E_1(s) \frac{R_3}{R_2(1+T_{23}S)+R_3} \quad (5)$$

(4), (5) 式から

$$\frac{E_0(s)}{E_i(s)} = \frac{R_3}{R_1+R_2+R_3+R_1 \left[ \left\{ T_{12}+T_{13} + \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) T_{23} \right\} S + T_{12}T_{23}S^2 \right]} \quad (6)$$

ただし  $T_{12}=C_1R_2$ ,  $T_{13}=C_1R_3$ ,  $T_{23}=C_2R_3$

ここで  $C_1=C_2=C$ ,  $R_1=R_3=R$ ,  $R_2=2R$ ,  $T=RC$  とすると (6) 式は

$$\frac{E_0(s)}{E_i(s)} = \frac{1}{4+6TS+2T^2S^2} \quad (7)$$

すなわち所要の伝達函数は (7) 式のごとくあらわされ、出力対入力絶対値すなわち振幅比を実測により求めたものを第4図にしめす。この結果をみると、まず振幅特性  $A$  は  $R_1=R_3=75\text{ K}\Omega$ ,  $R_2=150\text{ K}\Omega$  の値をもちいた結果であるが (第6図参照)、実際問題として記録装置の入力インピーダンスが  $R_3$  と並列に接続されるので、負荷抵抗  $R_3$  の値をおおきくしなければならぬ。今回の結果から、検流計の固有周期 90 秒、減衰定数  $h=$

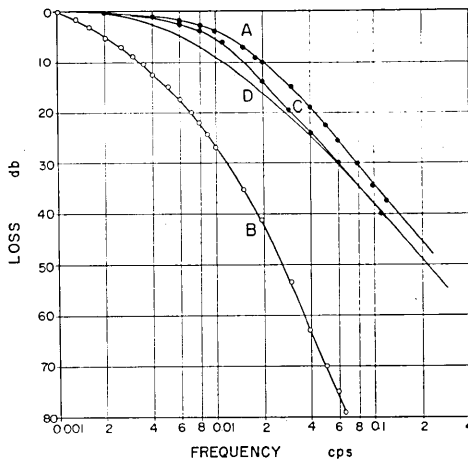


Fig. 4. Amplitude characteristics of integrating networks (see Fig. 6 A, B.)

A,  $R_3=75\text{ K}\Omega$ , C,  $R_3=150\text{ K}\Omega$ ,  
 D,  $R_1=75\text{ K}\Omega$ ,  $R_2=75\text{ K}\Omega$ ,  $R_3=2\text{ M}\Omega$

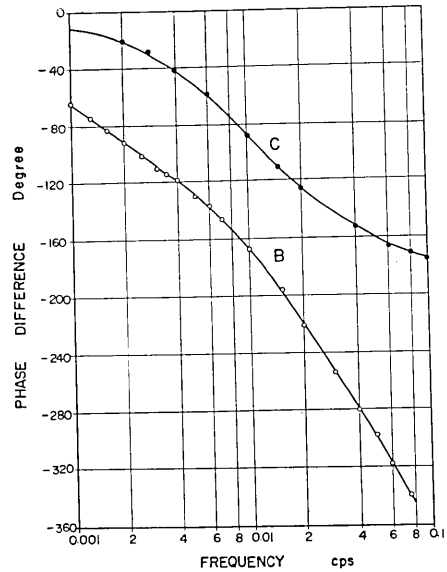


Fig. 5. Phase characteristics of integrating networks (see Fig. 6. A, B.)

1.0 の特性に相当する抵抗値は  $150\text{ K}\Omega$  であった (Fig. 4 の C)。同図 D は第 2 報<sup>7)</sup>でのべたごとく,  $R_1=R_2=75\text{ K}\Omega$ ,  $R_3=2\text{ M}\Omega$  のときの値であり, これは検流計の減衰定数  $h=1.5$  の値に相当する特性である。第 5 図は位相特性をしめし, 同図 C は第 4 図における C に対応する位相特性である。同様に両図にしめす特性 B は次のべる超長周期地震計増幅部 (第 6 図 B 参照) の振幅特性ならびに位相特性をしめす。

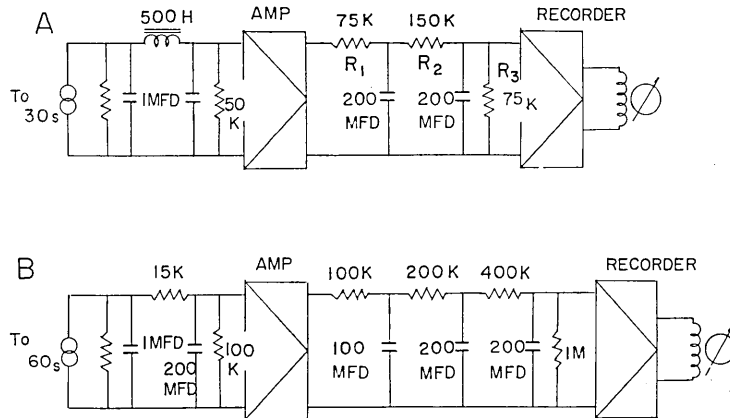


Fig. 6. Circuit diagram of long-period (A) and ultra long-period (B) seismographs.

7) M. TSUJIURA, *loc. cit.*, 2)

上述の積分回路のうち、直列抵抗は換振器からの出力を消費する。したがって換振器のすぐ後に積分回路を接続するときは、誘導を防止する利点、近地地震による飽和を防止するなどの利点を有するが、増幅器入力端における  $S/N$  を悪くする。そこで本装置では、第6図にしめすごとく、増幅器の出力側に接続し、高感度記録装置 (10 mV full scale) をもちいることによつて、増幅器の利得をさげ (500)、短周期成分による飽和を抑制している。もちいた容量は metallized Mylar condenser であり、絶縁抵抗は 3000 M $\Omega$  以上である。超長周期地震計については、高利得 (1,000) の前置増幅器をもちいるため同図Bにしめすごとく、換振器と増幅器の間に、脈動域および近地地震による増幅器の飽和をさけるため  $R=15\text{ K}\Omega$ ,  $C=200\ \mu\text{F}$  による低域濾波器を挿入し、増幅器出力側に  $RC=10\text{ sec}$ ,  $40\text{ sec}$ ,  $80\text{ sec}$  の時定数をもつ3段の積分回路を挿入した。

#### 4) 記録装置

記録装置としては、従来の欠陥であつた円弧状記録をなくするため、自動平衡型方式による記録装置 (日本電気機材製 Varicorder Model VR-100 標準型) をもちいた。本装置

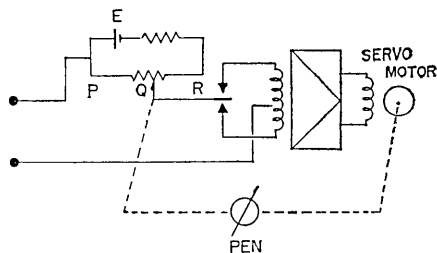


Fig. 7. Basic circuit of recorder.

は第7図にしめすごとく、入力端にくわえられた未知電圧は、 $PQ$  間の標準電圧 ( $E$ ) と比較され、両者の間に差があれば、入力チャッパによって交流の誤差電圧にして、増幅器にくわえられ、増幅器付属のサーボモーターを回転せしめる。一方サーボモーターとポテンシオメーター  $Q$  とは、ベルトを介して結ばれ、ポテンシオメーターの摺動子  $Q$  を駆動せしめる。入力電圧と  $P-Q$  間の電圧が

等しくなれば、増幅器の入力電圧は零となり、モーターは停止する。したがってモーターとポテンシオメーターの間にペンを直結してをけばペンの値は当然入力電圧を指示し、その目盛は直線目盛をしめすことになる。具体的仕様は、1) 入力電圧 10 mV (full scale), 2) 入力抵抗 200 K $\Omega$  (不平衡時), 3) 感度  $\pm 0.2\%$ , 4) チャートスピード 10, 20, 50 mm/min である。地震計3成分の記録を同時に、同一記録紙上に画かせる場合は、取りつけるペンの位置を約 1 mm ずつずらすことによつて可能であり、現在独立したタイムマーク用ペンをもつた3ペン式記録装置を製作し実験中である。

#### § 8 総合特性

第8図に地震計の総合特性をしめす。(A)はすでに筑波山支所において観測中である Columbia type long period seismograph ( $T_0=15\text{ sec}$ ,  $T_g=90\text{ sec}$ ) の特性をしめし、 $B$ は振子の固有周期を 30 秒とし、第6図のブロックダイアグラムAにしめす長周期地震計の特性をしめす、また同図Cは振子の固有周期を 60 秒とし、ブロックダイアグラムBにしめす超長周期地震計の特性である。

一般に標準型長周期地震計によつて観測される遠震の記録をみると、地震規模の大小をとわず 10 秒~30 秒の波動が卓越して記録される。したがって mantle Rayleigh 波な

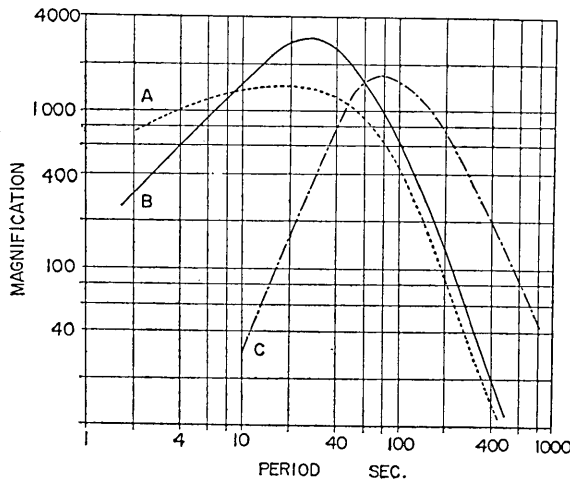


Fig. 8. Period response curves.

- A) Characteristic of Press-Ewing seismograph ( $T_0=15$  sec,  $T_g=90$  sec)
- B) Characteristic of our long-period seismograph (see Fig. 6 A.)
- C) Characteristic of our ultra long-period seismograph (see Fig. 6 B.)

最高倍率である。これらの雑振動は温度に急激な変化が生じたとき、あるいは低気圧の通過とともに強い風の強い日には特に大きく、その周期は温度による場合は一般にながく、風による影響とおもわれるものについてはみじかく数 10 秒である。もちろん上述の二種類の地震計によつて記録される雑振動の周期は異なり、超長周期地震計の記録には 7 分 - 10 分周期のものが卓越して記録され、その値は  $100 \mu$  に達することもある。これらの雑振動の原因としては、先にのべた、温度、気圧等の変化以外に地震計振子の機構上の点についてもかんがえなければいけない問題であるが、いまだ決定的な解決法は見当らない。ただ現在実施している方法として、地震計室特に振子機構部の設置する部屋を十分気密化すること、さらに機構部を厚さ 50 mm のホームステレンで包い、その内側上部に 7.5 W の電球を付け内部空気の対流を防止し、電球の Power の増減による影響、取付位置の変更等の実験を続けている。

#### § 4 観測

観測は当初東大、安田講堂地下室において Press-Ewing seismograph ( $T_0=30$  sec,  $T_g=90$  sec) と共におこない、その後 1964 年 11 月より既設の筑波山観測所地震計室から約 50 米離れた位置に新設された地震計室<sup>8)</sup>に設置した。

8) K. AKI, H. MATUMOTO, M. TSUJIURA and T. MARUYAMA, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 43 (1965), 381-397.

どの超長周期の波を明瞭に識別しうる記録をうるためには、30 秒以下の周期にたいして sharp cut off 特性をもたせることがのぞましい。そこでまず設計基準として、標準地震計 A にたいして、20 秒で 1/10 の減衰をあたえ、200 秒で 10 倍、倍率を高めることを基準とし、CR 積分回路の定数ならびに直流増幅器の利得を決定した。えられた定数は第 6 図にしめしたとおりであり、増幅器の利得 1000 倍における総合特性が同図 C である。B, C ともさらに倍率を高めることも可能であるが地面の雑振動あるいは気圧、温度などの変化のため記録が乱され、現状が筑波山における最

第9図にえられた記録の1例をしめす。(1)(2)(3)でしめす3成分記録は、すでに観測中の Columbia type long period seismograph の記録をしめし、(4)は今回試作した長周期地震計 E-W 成分の記録である。記録紙速度が異なるため、対応する phase に印を付した。第10図は上述の標準地震計と今回試作した超長周期地震計の記録をしめし、成

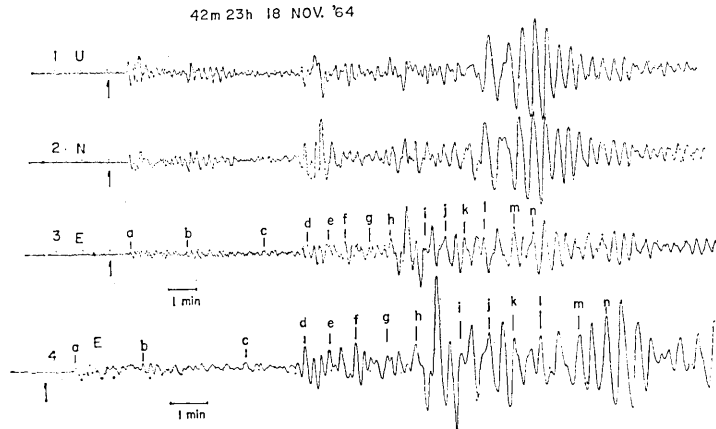


Fig. 9. Comparison of seismogram of New Britain earthquake, Nov. 18, 1964 obtained by our long-period seismograph (lower trace 4) with those by Press-Ewing seismograph,  $T_0=15$  sec,  $T_g=90$  sec. (upper traces 1, 2 and 3).

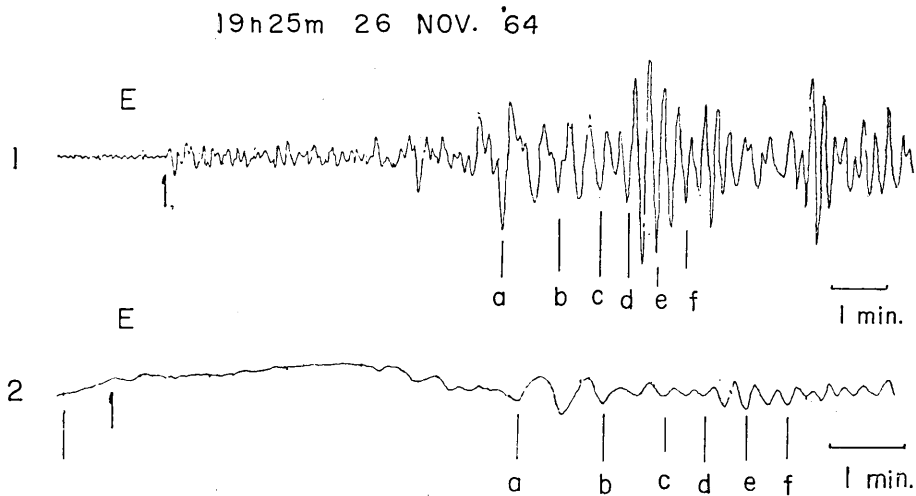


Fig. 10. Comparison of seismogram of Taiwan region earthquake, Nov. 26, 1964 obtained by our ultra long-period seismograph (lower trace) with that by Press-Ewing seismograph,  $T_0=15$  sec,  $T_g=90$  sec. (upper trace).  $M=5.4$ ;  $h=33$  km.



分は共に  $E-W$  である。マグニチュードが小さく ( $M=5.4$ ) 超長周期地震計の記録例として不適當であるが、両者を比較することによつて地震計のもつ Response のちがいを知ることができる。第 11 図は同様に超長周期地震計によつて観測された記録の一例をしめす。倍率は冬季季節風による影響をすくなくするため 800 倍 (80 秒) とした。周期約 120 秒の  $G_2$ ,  $G_3$  および 100 秒~240 秒の  $R_2$ ,  $R_3$  などの長周期表面波を明瞭に識別することができる。第 12 図は同様に 1965 年 2 月 4 日に発生した Aleutian 地震  $M=7.5$  (USCGS) の記録の一部をしめす。

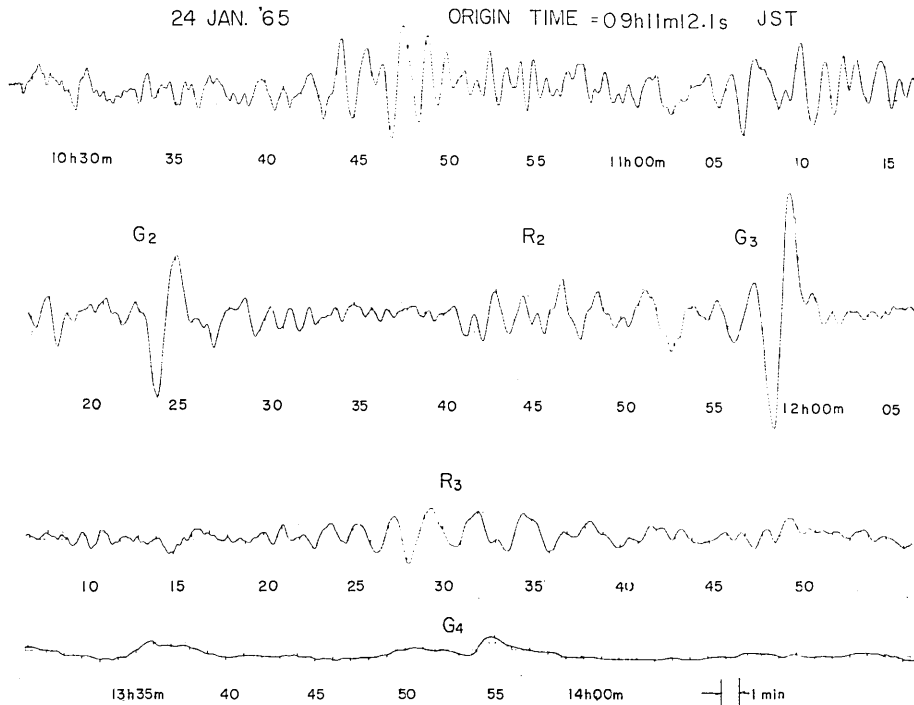


Fig. 11. Later part of Ceram Sea earthquake seismogram of Jan. 24, 1965 written by ultra long-period seismograph shown in Fig. 6 B.  $M=6.6$ ;  $h=6$  km.

### § 5 検 討

以上地震計の構成ならびに特性の概要についてのべた。要するに今回試作した地震計の目的は、すでにのべたごとく移動用の長周期地震計および将来、長周期無線地震計の開発にたいする基礎的資料をうるため、安定な長周期振子の製作ならびに付随するエレクトロニクスの開発をおこなつたものである。この結果一応長周期地震計の実用化に成功した。しかし無線地震計として無人観測点に設置するには、地震計振子の安定性に不安がある。すなわち振子の周期 15 秒~30 秒の間で使用するときには Drift はなく、長期の Routine 観測に適用することができる。しかし今回実験した周期 60 秒においては Drift が生じ、

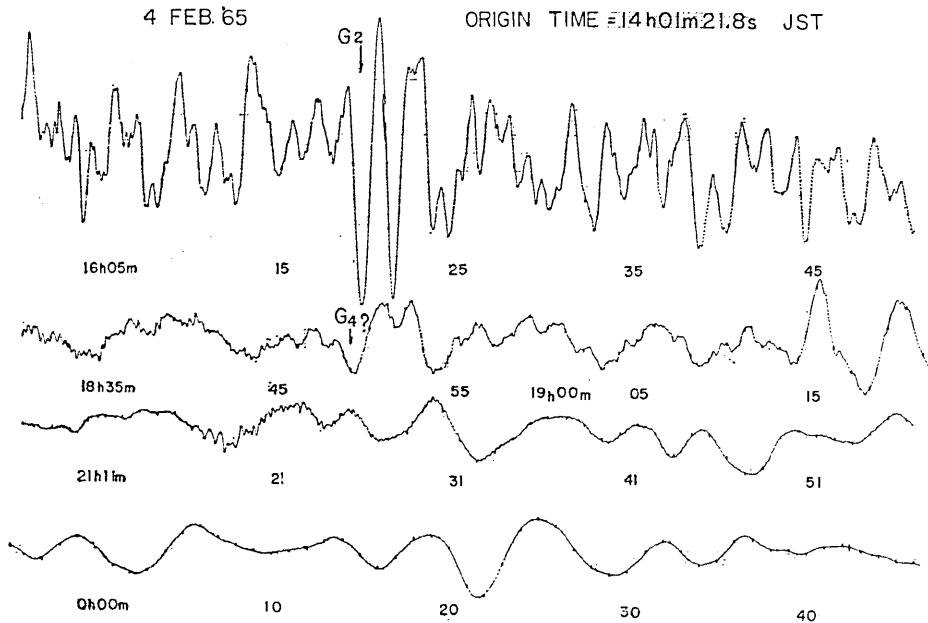


Fig. 12. Later part of Aleutian earthquake seismogram of Feb. 4, 1965 written by ultra long-period seismograph.  $M=7.5$ ;  $h=40$  km.

約1週間毎に振子の零点補正が必要であった。これは振子の周期増大にしたがつて当然おきる問題である、したがつて Drift の軽減をはかるため、今後とも機構上の研究をすすめると同時に Drift を自動的に補償する装置の開発、あるいは Drift の遠隔操作による補正なども今後へのこされた問題である。Drift の自動補正のひとつの解決法として、第1図(4)にしめす方法がかんがえられる。これは地震動周波数帯域外、たとえば周期10000秒の時定数をもつ積分回路を feed back loop にもち、振子の Drift がある値以上に達した時、周期10000秒で自動的に零復帰をおこなわしめる方法である。

また今回の System を無線地震計に適用する場合、積分回路は短周期による飽和の問題を考慮し、直流増幅器の前に接続することがのぞましい。これは一般に無線伝送にともなう周波数変調において、所要の変調をおこなうためには約1~2Vの出力電圧を必要とし、一方地震計からの出力電圧は  $10 \mu\text{V}/\mu(30 \text{ sec})$  であるため、この間に挿入する増幅器は約80db以上の利得を必要とするからである。あるいは利得40dbをもつ増幅器を2台直列に接続し、この間に積分回路を挿入する方法がより得策であるが、増幅器自体は高価なものとなる。

また今回使用した記録装置における記録紙の流し記録は、長時間継続する大地震の記録装置として、記録の重量をさける利点を有するが、記録の整理上、また経済的な面において好ましくない。したがつて現在前置増幅器をふくむ自動平衡型ドラム記録装置を設計し試作をすすめている。

## § 6 謝 辞

長周期地震計の開発にあたり御指導をたまわつた研究室主任宮村教授, 安芸助教授にあつく御礼申しあげたい。また地震計振子の設計, 製作にさいし御教示, 御協力をいただいた安藤誠一氏をはじめ技術部の方々に, また直流増幅器の試作に従事された北斗理研, 高松浩氏に深く感謝する。筑波山支所での観測に際しては同支所渡辺正雄, 渡辺唯夫技官に御支援を得た。しるして感謝する次第である。

28. *A Pen-Writing Long-Period Seismograph**Part 3.*

By Masaru TSUJIURA,  
Earthquake Research Institute.

New seismographs by a visible recording device have been developed which permits wide adjustment of the response characteristics to ultra long-period as shown in Fig. 1. In this paper, we report on the seismographs designed as No. 3 in Fig. 1.

The seismographs are; 1) long-period seismograph with double *RC* integrating network having transfer characteristic equivalent to a long-period galvanometer; 2) ultra long-period seismograph with single *RC* integrating network and triple *RC* integrating network connected in series through the *DC* amplifier.

The period of pendulum for the former seismograph is 30 seconds. The mechanical part of seismograph is almost the same as for the seismograph No 2<sup>(2)</sup> reported in 1962. The output voltage of moving coil type (velocity) transducer is fed into a low pass filter to reject 50 c/s and goes to a *DC* amplifier as shown in Fig. 2. The gain of amplifier is 500. Maximum peak output is 2 volts. Noise level of input is 0.2 micro volt when the input impedance is 4 k $\Omega$ . The output of *DC* amplifier is fed into a double integrating *RC* network which has the transfer characteristic nearly identical to a 90 sec galvanometer.

The visible recorder is of an automatic balanced type by the use of servo-motor. The sensitivity of recorder is 20 mm per 0.001 volt and the maximum amplitude is  $\pm 100$  mm.

The maximum magnification of the long-period seismograph is approximately 3,000 at a period of 30 sec. The response curve covers the period range 10 to 100 sec.

The ultra long-period seismograph developed for recording very long period seismic waves is presented. In order to record clearly the mantle Rayleigh waves and *G* waves, it is better that the period response of the seismograph has a characteristic function for sharply cutting off the short period waves (<30 sec) than a flat response for a wide range.

Fig. 6 shows this seismograph in a schematic form. The period of pendulum is 60 seconds. The output voltage of the moving coil type transducer is fed to the *RC* integrat-

ing network having time constants of 3 sec, which precede the amplifier to prevent saturation caused by the large-amplitude shorter-period waves and microseisms. The output of the *DC* amplifier is fed to triple integrating networks having time constants of 10, 40, and 80 sec. The output of the network goes to a recording amplifier which has an input resistance of 1 megohm. The reason for separating networks is that, if all the networks precede the amplifier, the signal will be attenuated by the series resistance in these networks and the signal to noise ratio will become poor. The maximum magnification of the ultra long-period seismograph is approximately 1,500 at a period of 80 sec. The response curve covers a period range 30 to 300 sec.

The seismographs were constructed in October 1964, and have been operated at Tsukuba seismological station at a distance of 65 km. from Tokyo.

A typical record of a long-period seismograph is shown in Fig. 9, where the upper traces 1, 2 and 3 are the records of Press-Ewing seismograph ( $T_0=15$  sec.  $T_g=90$  sec) and the lower trace is that of our seismograph.

Fig. 11 shows an example of records of our ultra long-period seismograph. The transient nature of  $G$  waves is clearly evident and the fact that the amplitude of  $G_3$  is larger than that of  $G_2$  wave at a period of about 100 sec. is noteworthy, and it may give some information about the source mechanism of the earthquake.

Fig. 12 shows a part of the  $G$  wave and Rayleigh wave trains from the Aleutian earthquake of February 4, 1965.

---