

地震計用増幅器のトランジスタ化について*

竹 山 一 郎**

550.345

A Transistorized Amplifier for Seismographs

I. Takeyama

(Seismological Section, J. M. A.)

The author designed a transistorized amplifier (Fig. 2) for routine seismic observations. This amplifier is used together with a seismometer and a recording galvanometer as shown in Table 1. It has operational circuits of integration, the equivalent circuit of which is given in Fig. 3. The magnification of the seismograph is several thousand times, and the amplitude on record is proportional to the ground displacement in the period range from about 0.15 sec. to 1 sec. (Fig. 1).

The various characters of the amplifier are shown in Figs. 5—9.

Since 1960, a seismograph with this amplifier has been used in telerecording volcanic tremors at Asamayama. The output of the seismometer set on the mountainside is fed to the amplifier and recorder at the foot of the mountain through wires usually used as telephone line (twisted, not shielded) of about 4 km length. The examples of records are shown in Figs. 11.

§ 1. はしがき

気象庁で火山活動の監視用に電磁地震計を始めて用いたのは1956年(桜島)である。この地震計¹⁾は、動コイル型の変換器の出力電圧を増幅して、ペン書き記録させる方式のもので、増幅器には真空管を用いた。

さて、近年におけるエレクトロニクスの急速な進歩は地震計測の部門にも反映し、いろいろの新しい試みがなされている。なかんずく、その一つはトランジスタの実用化であろう。トランジスタのもつ幾多の利点のために増幅器をトランジスタ化した地震計は、すでに国内・国外の試験研究機関で次第に利用されつつある²⁾。

* Received July 18, 1962

** 気象庁地震課

- 1) 測候時報(気象庁) 25 (1958) 496.
- 2) 実用例としては、アフリカのニラゴンゴ火山、阿蘇山(以上九州大学)、浅間山(東京大学)、人工地震の観測などがあり、また文献としては *Geophysica* 7 (1960) 107—116, *J. Geophys. Res.* 62 (1957) 267—278, *Zeit. für Geophysik* 29 (1960) 1—8, 地震研究所彙報 38 (1960) 345—354, 爆破地震動研究グループ会報 20 (1962) 43—50 など。

筆者も同じ試みを行ない、1960年地震計用増幅器をトランジスタ化し、浅間山で実用化した。また、最近(1962年)桜島でも実用に供した。

そもそも、筆者が地震計の増幅器をトランジスタ化した発端は、有線テレメータ用の地震計の改良に関するものであったが、同時に、商用電源がない地域でも安い維持費で使用できる地震計の開発をもねらった。

この地震計を動作させ始めてから、すでに2か年を経過したので、ここに、これまでの結果を報告する。

§ 2. 仕 様

現在、気象庁で全国主要火山に配置してある地震計は、振子の固有周期が1秒、倍率300倍の機械式地震計(変位計)³⁾である。今回製作した地震計は、地動の周期ほぼ0.15秒から1秒までの倍率特性曲線の形は上記地震計とほぼ同じで、倍率数千倍のものまでである(Fig. 1)。

ところで、地震計用増幅器をトランジスタ化して常時連続動作させることは、気象庁としては最初の試みでもあるので、今回は性能上のことより、長期間にわたる実用性の実証に重点を置いて計画を進めた。

3) 気象庁での名称は56型高倍率地震計。

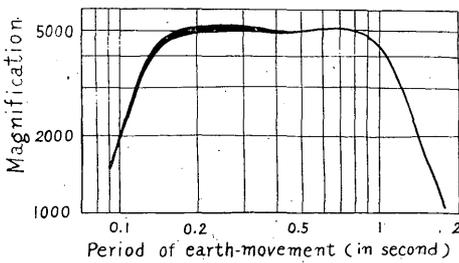


Fig. 1. Standard magnification curve of the seismograph with the transistorized amplifier.

さて、この地震計⁴⁾は、動コイル型の変換器—増幅器—記録検流計から構成される。その変換器および記録検流計は Table 1. の諸元をもった市販品である。増幅器はこれと組み合わせて使用できるようにしたもので、そのおもな仕様は次のとおりである。

- (1) 最小入力信号電圧 0.1 mV.
- (2) 最大利得・記録検流計と組合わせたとき、2 c/s において 10 mm/mV 以上.
- (3) 増幅対象周期約 0.1 秒から約 1 秒までの範囲.
- (4) 周期特性約 0.1 秒以下積分特性.
- (5) 入力インピーダンス 2~3 kΩ (1 c/s) 可変.
- (6) 入力回路 平衡.
- (7) 刻時入力回路を有する.

Table 1. Characters of the seismometer and the recording galvanometer used together with the amplifier described in this paper.

	Seismometer	Galvanometer
	Ewing type vertical pendulum with a moving coil type transducer	Pen-recorder on smoked paper
Natural period	1.0 second	ca 1/5 second
Sensitivity	2 V/cm/sec	5 mm/mA
Resistance of coil	375 Ω	(650+650)Ω
Damping resistance	3000 to 3300 Ω (damping factor 0.5)	—

§ 3. 回 路

回路は製作の容易な CR 結合回路で、全段プッシュプル⁵⁾の 4 段増幅によった。その回路図を Fig. 2 に示す。この回路は、おもに前 2 段で演算増幅を、後 2 段で電力増幅をつかさどる。回路の細部について、次に二三述べる⁶⁾。

(1) 演算回路

増幅器の周期特性に積分特性を持たせるための回路にはいろいろの方法があり、その一つ CR 回路網 (逆 L

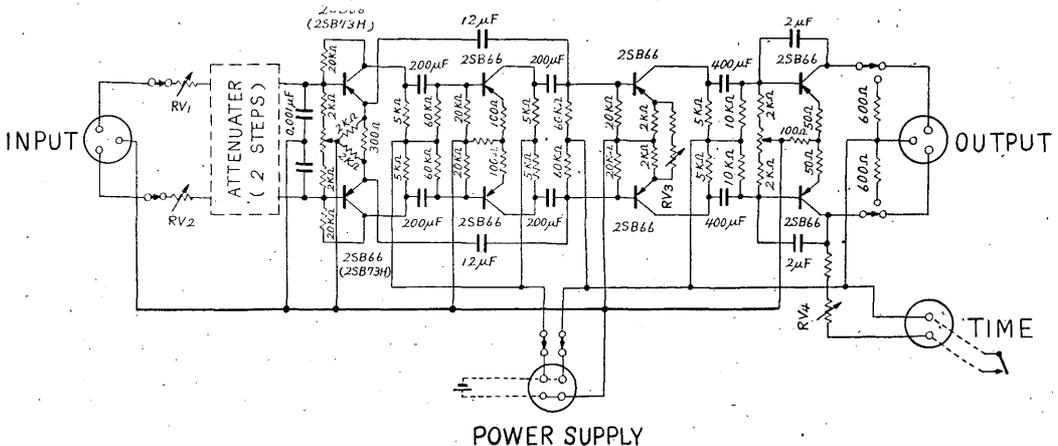


Fig. 2. Circuit of the transistorized amplifier.

- (8) 電源 直流 6V.
- (9) 変換器を離して、山岳地で少なくとも数 km のテレメータができること.
- 4) 気象庁での名称は 58 型直視式電磁地震計.

- 5) トランジスタは特性のそろったものを選択して使用した。結合コンデンサは tantalum 電解コンデンサが高価なため、アルミ電解コンデンサ (JIS 特殊級) を用いた。

型4端子回路網)は真空管による増幅器によく用いられている⁶⁾。トランジスタによる増幅器では、ふつう次段の入力インピーダンスが比較的小さいので、この方法では、コンデンサの容量が大きくて不便ことが多い。

そこで、筆者は帰還型の演算回路を用いることにした。この回路の要図は Fig. 3 に示すとおり、いわゆる二

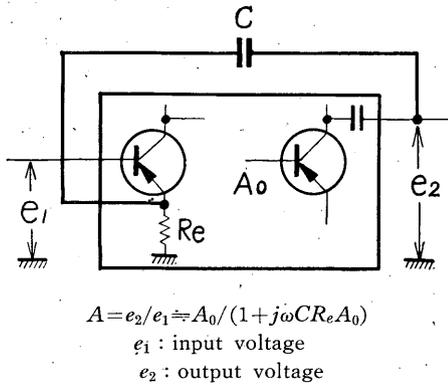


Fig. 3. Equivalent circuit to the operational circuits in the amplifier.

重帰還回路で、第2段目のトランジスタのコレクタから、第1段目のトランジスタのエミッタに電圧帰還を行なわせてある。

この演算回路は帰還型であることの特徴として、次に述べるように、温度や電源電圧の変動に対して、増幅器の利得は安定化される。すなわち、いま、Fig. 3において演算用のコンデンサをはずしたとき、およびつけたときの電圧利得(= e_2/e_1)をそれぞれ A_0, A とすると

$$A \approx A_0 / (1 + j\omega CR_i A_0) \quad (1)$$

で、ここに

C : 演算用コンデンサの静電容量

$R_i \approx R_e$,

$\omega = 2\pi f$ f : 周波数

$j = \sqrt{-1}$

である。これから

$$\frac{dA}{A} \approx \frac{1}{1 + j\omega CR_i A_0} \frac{dA_0}{A_0} \quad (2)$$

となる。増幅対象の周波数領域では、 $1 < \omega CR_i A_0$ であるから、 $|dA/A| < |dA_0/A_0|$ となり、帰還型演算回路によって、電圧利得が安定化され、その変化が小さくなることがわかる。いま、Fig. 2 の実際の回路について、その計算をした結果を示すと、近似値は

周期1秒のときは、

$$|dA/A| \approx 0.3 \times |dA_0/A_0| \quad (3)$$

周期0.1秒のときは、

$$|dA/A| \approx 0.09 \times |dA_0/A_0| \quad (4)$$

(ただし、 $A_0 = 50 \text{ db} \approx 3 \times 10^2$ とした.)

となる。

ところで、この回路の積分特性のまようは、記録検流計を用いて実測した結果では、理想的な積分の状態から、わずかながらはずれていた。これは、回路設計に関するもののほかに使用する記録検流計 (Table 1) がもともと制動不足気味であったため、その影響が加味されたためもあると思う。そこで、その補正のために、また一方では、交通機関などによる土地の短周期雑微動で、見掛けの信号対雑音比を悪化させるので、それをあわせて改善させるために、増幅回路の最終段にミラー積分回路を入れた。

(2) 利得調整回路

利得調整回路は2か所に設けてある。その一つは、入力回路に入れた減衰器で、これによって、測定入力電圧の dynamic range を2段に切換えるようになっている。

他の一つは、第3段目のトランジスタのエミッタ回路に設けてあり、これによって、利得は連続的に変られる。この回路は一種の電流帰還回路である。従って、利得を下げるのに応じて、電流帰還量は増加し、温度や電源電圧の変動に対して利得は安定化される。ふつう、地震計は利得を適当に下げて使っているから、この部分の回路はかなり安定化される。

ただ、この回路は利得を変えることによって、この部

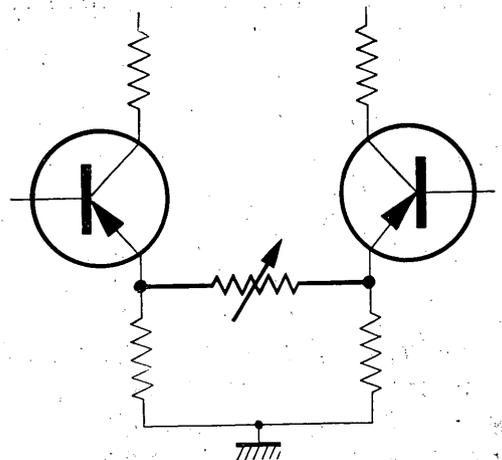


Fig. 4. Gain control circuit with negative feedback.

6) 測候時報 (気象庁) 27 (142—149).

分のトランジスタ回路の入力インピーダンスも変り、これによって演算特性の状態に若干の影響を与えるのは否めないが、実測によると、それほど著しい影響はなかった (Fig. 9).

(3) 安定指数

トランジスタ回路のコレクタ遮断電流 I_{co} の変化に対するコレクタ電流 I_c の変化の割合 $\partial I_c / \partial I_{co}$ をふつう安定指数と呼んでいる。これを回路の各段について計算した結果を Table. 2 に示す。

Table 2. Calculated values of stability factors for each stage of the amplifier.

Stage of amplifier	1 st	2 nd	3 rd	4 th
Value of $\partial I_c / \partial I_{co}$	1.3	7.5	7.5	9

I_c : current of collector, I_{co} : saturation current of collector.

§ 4. 特 性

この増幅器について、いろいろの特性を測った結果を Fig. 5~9 に示す。とくに説明を要しないと思うが、図について若干補足する。

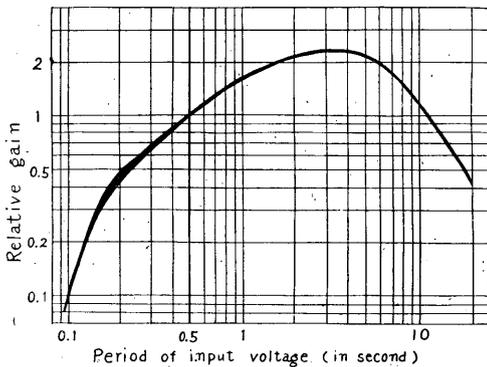


Fig. 5. Response of standardized relative gain for the amplifier as used with the galvanometer.

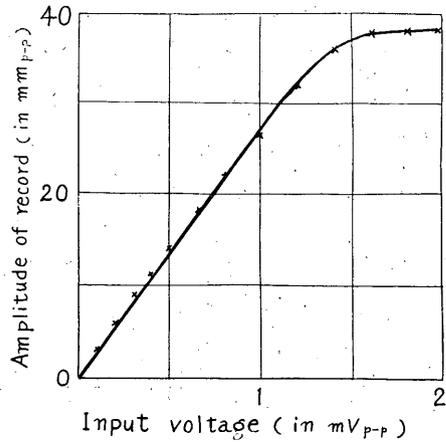
(The value of relative gain is fixed to 1.0 at the period of input 0.5 seconds.)

(1) 周波数特性 (Fig. 5)

増幅器の入力回路の可変抵抗 RV_1, RV_2 (Fig. 2) を最大にし、出力インピーダンス数百 Ω の発振器をつないで、記録検流計のふれから求めた図である。

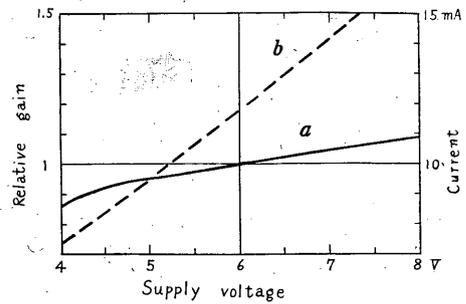
(2) 直線性 (Fig. 6)

上記(1)と同じ方法で、2c/s について求めた図である。



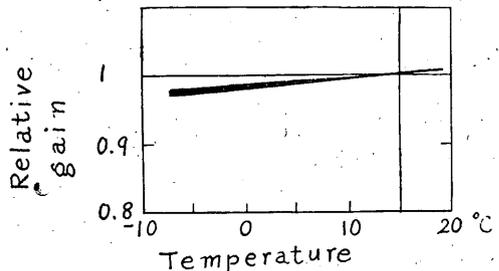
Frequency: 2 c/s. Gain: max.
Supply voltage: 6.3 V. Temp.: 18°C

Fig. 6. Linearity test for the amplifier. (for various input voltage.)



a: gain. b: current

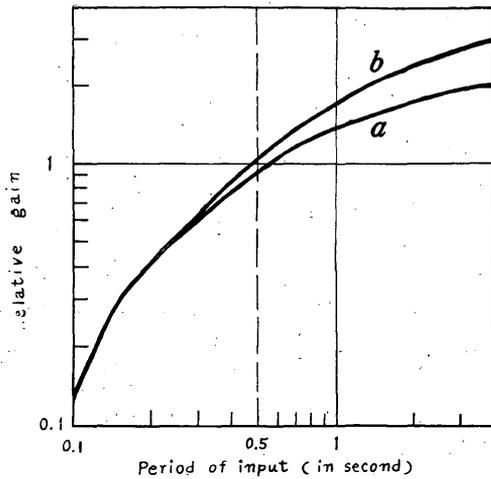
Fig. 7. Relative gain and consumption current of the amplifier for various supply voltages.



Frequency: 2 c/s
Supply voltage: 7.3 V.

Fig. 8. Relative gain of the amplifier for various temperatures.

(The value of relative gain is fixed to 1.0 as the temperature 15°C.)



a : curve at max. gain.
 b : curve at min. gain.
 Fig. 9. Change in the gain of the amplifier by the gain-control resistor (RV_2 in Fig. 2).
 (The response curves overlap at the part of shorter periods.)

(3) 増幅器の利得および消費電流に対する電源電圧の影響 (Fig. 7)

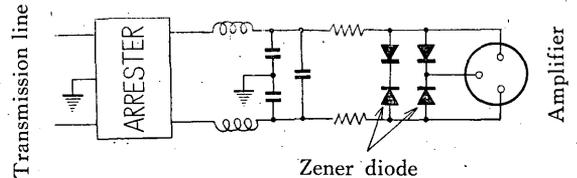
増幅器の利得は上記 (2) と同じ方法による。

§ 5. 実用結果

この地震計は、1960年9月以来すでに2か年、浅間山で連続動作 (率倍8000倍) させている。ここでは、浅間山の山腹に地震計の変換器を置き、その出力を通信線で導いて、約4km離れた山ろく追分で増幅記録させている。テレメータに関することは本論外のことであるから、概略だけを記すにとどめるが、このテレメータに使用した電線は、2コより電線⁷⁾ (シールドは施していない) で、地上1~2mの高さに張ってある。しかも、増幅器は雷のサージ電圧にはきわめて弱い半導体製品である。だから、避雷器にはとくに留意し、送信側および受信側には、真空避雷管による保安器⁸⁾ を用いたほか、受信側

7) 防衛庁規格の通信線 JWD-1/TT
 8) 送信側には電力型1号保安器 (放電開始電圧180~220V)、受信側には線条回路用1型保安器 (放電開始電圧75±10V).
 9) 記録検流計と商用電源側との間には直流的には絶縁されているが、衝撃電圧に対しては絶縁されているとはみなせないようで、後述のように、このコイルが雷で絶縁破壊を起したことがある。

にはさらに定K低域濾波回路と定電圧ダイオードを組み合わせた保護回路 (Fig. 10) を併用してある。また、商用電源側も特別の保安器⁹⁾ を取付けてある。ただし、上記保安器のうち、定電圧ダイオードと商用電源側の保安器は取付けてから日もまだ浅く、雷発生期を経験していないので、その効果は今後に残されている。



The arrester is vacuum-type.
 Fig. 10. Protector for the amplifier.

さて、このような状況で現在観測継続中であるが、今までに次のような事故があったほかは、とくに異常なく動作を続けている。

(1) 部品不良: 1回

動作開始後2か月くらいで雑音増加。原因は初段部分の部品劣化。

(2) 雷災: 2回

1回は増幅器の終段回路部分が事故。他の1回は増幅器が使用不能となる。このときは、トランジスタ、結合コンデンサ全部不良。また、同時に通信線 (変換器側から数百mの地点) が絶縁破壊、記録検流計のコイル、記録用モーターなども損傷。

以上のほかにも、記録検流計のコイルだけ断線した雷災が1回あった。

このように、増幅器に関する事故としては、テレメータに関連した雷災によるものの方が多く、増幅器自体に関するものとしては、1回だけであり、これとても部品の初期劣化と見なしてよいと思うので、エージングを完全に行なった部品を用いれば、このような事故は極度に軽減できるであろう。

桜島の方は、据付けてから日もまだ浅く、結果はまだ出ていないが、今のところ正常に動作している。

今までに得られた記録の中から、二、三の例を Fig. 11 に示す。なお、とくに遠地地震の記録例も示したのは、ほかの種類地震計と記録の容容を比較するのに便利のためである。

§ 6. 考 察

この増幅器について、増幅器単独の場合と、テレメータに関することに分けて検討しよう。はじめに前者の場

合について述べる。

この増幅器を用いた地震計は、現在のところ安定に動作している。また、増幅器の消費電力も、Fig. 7 に示すようにきわめて小さく、ちなみに 60 Ah の一次電池を用いると、増幅器 1 台当り年間 2 個の電池で事足りる。このように、全般的にはほぼ満足すべき状態であるが、一方、今後の開発計画を考慮するとき、次に述べる事柄について検討を要する。

(1) 同一種類の地震計 2 台を一つの台にのせてとった記録の detail は、大まかにはよく相似しているが、細かい点まで比べると違いが見られる。これは地震計の周波数特性の形が完全にそろってないためである。現在は 1 点観測しか行っていないので、その違いも問題にならないが、将来多点観測を行なうとき、とくに観測網が小さいときには、地震計相互の特性を正確にそろえることが必要になる¹⁰⁾。

(2) 増幅器の各段に電流帰還を施し、さらに演算回路や利得調整回路にまで帰還方式を応用したので、温度や電源電圧の変化に対して、増幅器は当初の予想以上に安定であった。しかし、他面、演算回路が帰還型であるため、増幅器の入力インピーダンスはリアクタンス分を含み、そのため、変換器と増幅器を結ぶループインピーダンスは抵抗分だけでは表わされず、地震計の特性を正確に求めようとするときの計算が複雑になる。また、利得を変えると、増幅器の周波数特性の形も若干変り、厳密な特性曲線が欲しいときに、支障を与える。

(3) 現在、増幅器の直線性が成立つ範囲は、記録上の全振幅で 30 mm くらいである。そもそも、直線性に関係するおもな要素は、電源電圧と負荷抵抗で、この 2 つから否応なしに直線性の限界が決ってしまう。ところで、直線性の範囲を拡げることは、記録しうる振幅の dynamic range を拡げることになる。現在の 30 mm くらいでは、やや不足気味であり、今後の改良が望まれる。

次に、テレメータに関することについて述べる。これには、次の 2 項がとくに重要な問題である。

(1) トランジスタは真空管に比べて、過大な電圧にはきわめて弱いのが欠点である。そのため、有線テレメータの場合、雷によって損傷を受けやすい。このときの異常電圧の加わり方には、(i) 素子の両端に電圧が加わる場合と、(ii) 増幅器内を貫通するように電圧が加わる場合とが考えられ、後者の方はとくに厄介である。いず

れの場合でも、機器の保護能力以上の電圧がかからないように、異常電圧をバイパスさせなければならない。他の分野でも、半導体機器の避雷対策には苦勞しているようである。今後とも改善を要する問題である。

(2) これはトランジスタ化増幅器の使用に限ったことではないが、ミリボルトくらいの微小信号電圧を現在行なっているように、裸線にも等しい電線で、数 km ものテレメータを行なうことに関する問題である¹¹⁾。

このようなテレメータでは、電気的な外来雑音の影響を非常に受けやすい。この雑音には連続性のものと衝撃性のものがある。

連続性雑音については、電波、電力機器類以外の原因はまだわかってなく、とくに近年急速に進歩した電気通信工学の分野でも、この超低周波領域の雑音研究はあまり行なわれてないようである。いろいろのことから類推して、この雑音は $1/f$ 雑音に似た特性をもち、気象電磁気現象なども関係して、おもに静電結合によって電線に誘起されるのではなからうかと、筆者は想像している。現在記録上のこの雑音は現われていないが、これは経験的に解決したことであり、機器設計の客観的資料を得るためには、この雑音の諸性質を究明することが必要である。

次に、衝撃性雑音について、これは雷放電に起因すると見て間違いなからう。雑音は夏季、とくに雷雲発生時に多く、他の季節でも積雲や不連続線の通過などのときに現われる。増幅器の結合回路の時定数や記録検流計の応答時間に比べると、この雑音の継続時間はおそらくミリ秒以下のきわめて短いものであろう。だから、ふつうなら記録にはこの雑音はほとんど現われそうに思われぬのに、実際にはしばしば記録される。これについて、筆者は、たとえば CR 結合回路をもつ増幅器の電源を開閉したとき、記録描線がゼロに復帰するのにずい分時間がかかることなどから類推して、この原因は増幅器のコンデンサ、とくに結合コンデンサ（このコンデンサは大容量の電解コンデンサ）の吸収現象に基くものと解釈している。この観点から、今後の問題として、過渡特性の改善のために、結合回路の時定数をなるべく小さくした増幅器の開発、たとえば信号電圧をいったん AC 変換して増幅するなどが必要であると思う。

§ 7. む す び

以上を要約すると、地震計用増幅器をトランジスタ化

10) 位相特性をそろえることがとくに必要であるが、地震計は線型とみなしうるとき、振幅特性がそろえば、位相特性もまたそろふ。

11) 送端でレベルを上げて伝送するのが好ましいが、そうもいかぬ場合がある。

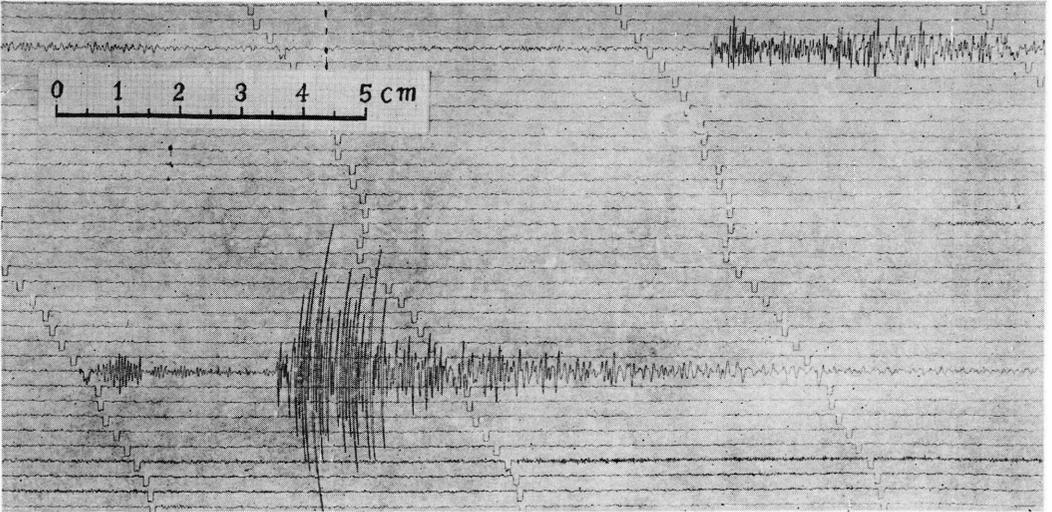


Fig. 11 a. Seismogram (vertical component) recorded at Sakurajima.
Magnification : 3000
By an explosion of the volcano.

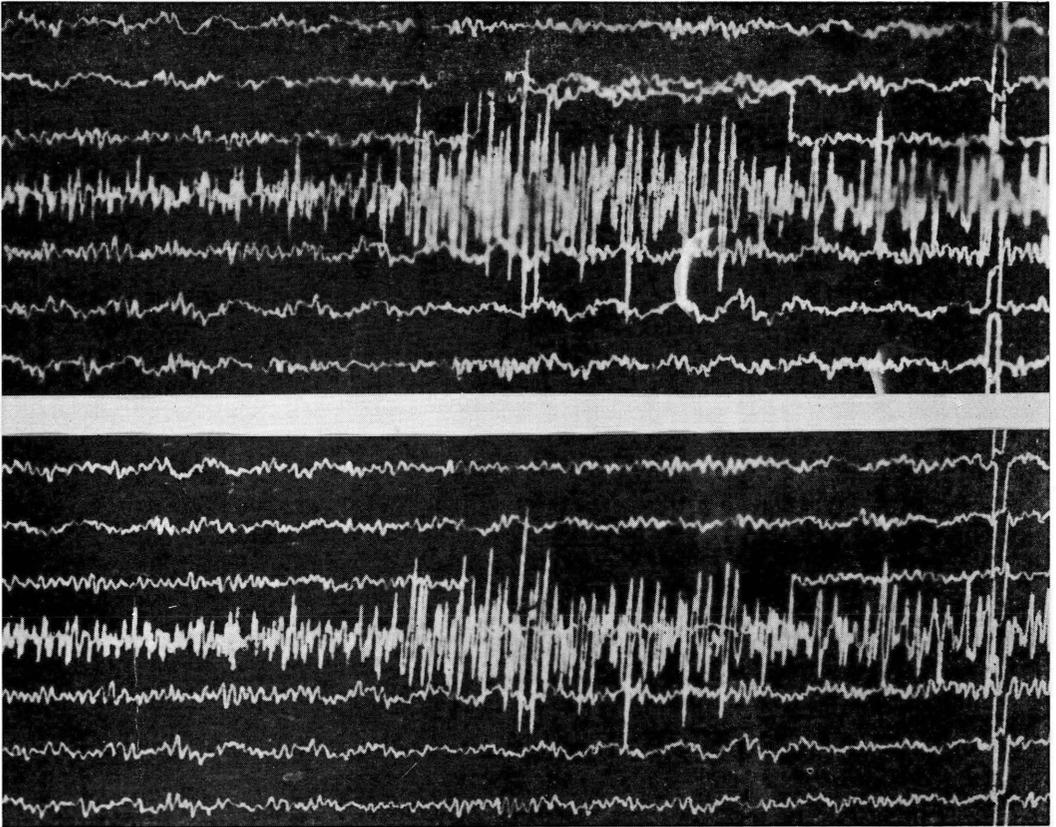
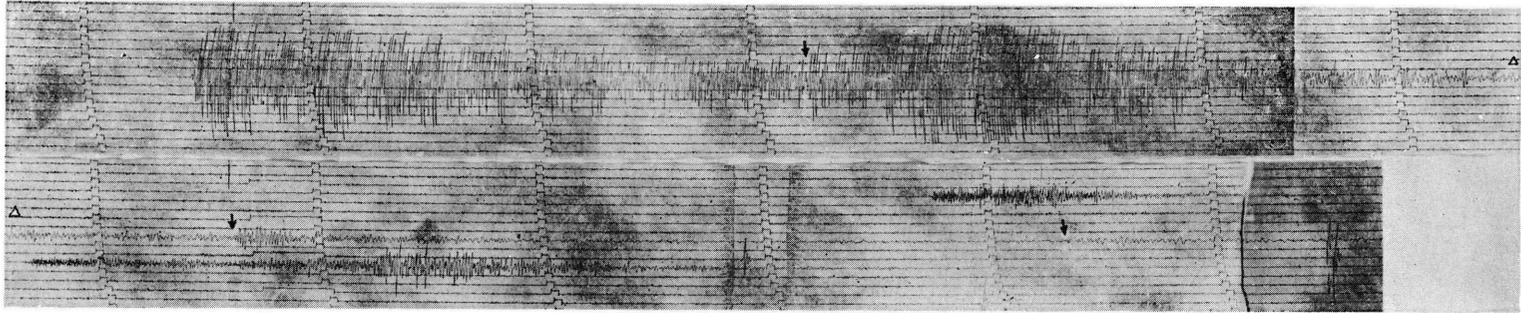
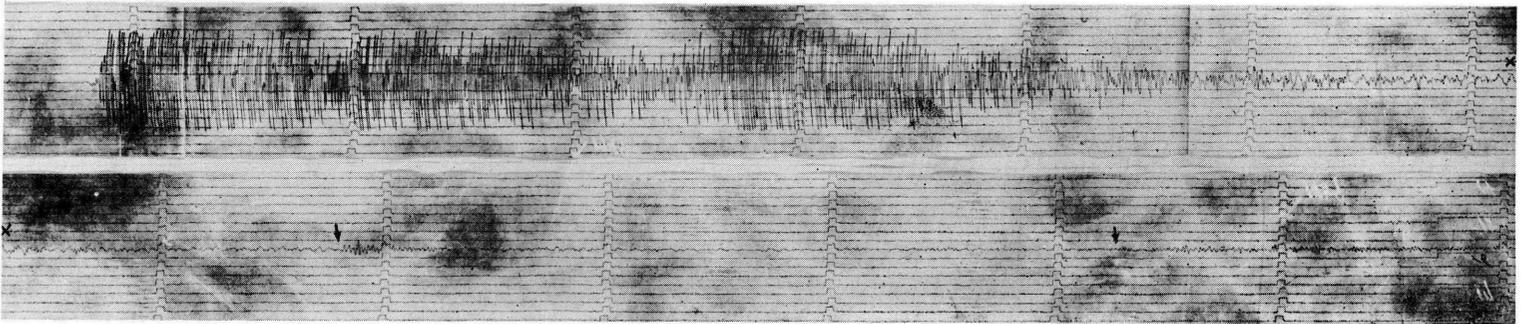


Fig. 11 b Seismograms by the same kind of seismographs on one location.



Magnification : 8000

Fig. 11 c. Record of the earthquake which occurred near Mariana Is., 18.9°N , 144.7°E , depth 466 km (after U. S. C. G. S.) at $11^{\text{h}}18^{\text{m}}$ (G. M. T.) on Sept. 29, 1960. Arrows indicate phases.



Magnification : 8000

Fig. 11 d. Record of the earthquake which occurred near Ogasawara Is., 22.1°N , 142.6°E , depth : 257 km (after U. S. C. G. S.), at $06^{\text{h}}28^{\text{m}}$ (G. M. T.) on May 31, 1962. Arrows indicate phases.

し、有線テレメータ方式ですでに2か年間連続使用している。現在とくに異常なく動作しているが、なお次の点に改良すべき点が残されている。

(1) 同時多点観測に適するように、特性の均一化を計ること。

(2) 直線性の改善

(3) 耐電圧の向上

(4) 過渡特性の改善など

筆者としては、いままでの結果が礎石となり、今後その性能がさらに改善されることを希望する。

なお、この実用化のために、軽井沢測候所の所員各位の熱心なご協力を受けた。ここに、謝意を表するしだいである。