

20. 地震計用トランジスター増幅器

地震研究所 松本英照

(昭和34年11月24日発表——昭和35年3月30日受理)

§ 1.1

簡単な装置でたかい感度と安定度をもつ地震計がてがるに使用できるならば、地震の研究はもつと多角的にすすめることができるとおもわれる。よりたかい感度をもとめ、おおくのひとびとは、それぞれことなつた目的の観測に対し、いろいろな地震計を設計してきたが、まだ充分な感度のえられていない分野もおおい。

地震計のなかで、現在もつともたかい感度と安定度のえられる方式は、動線輪型動電換振器を使用し、増幅器で増幅した出力を記録させる方式であるが、この場合換振器と増幅器の結合における増幅器入力インピーダンスの制動作用、あるいは増幅器内発生雑音および増幅器電源の安定度から、安定な感度は制限をうける。

真空管を使用した E.L.F. 増幅器はいろいろ発表されているが、信号を直接真空管で増幅する方法では入力換算の発生雑音が $1\mu\text{V}$ 以下におさえることができず、最高の感度はこれにより限界をあたえられる。信号をチョッパーで交流化し、トランスでこの電圧を昇圧したのち増幅する方法では入力換算雑音はひくくおさえられるが、入力インピーダンスがひくく、これに結合できる高感度の小型換振器はえがたいから、総合してたかい感度の地震計はえられず、真空管を使用して構成される地震計の感度は既存の装置で限界になつているとおもわれる。

筆者はさきに簡単で安定堅牢な電子地震計用増幅器として H.F.S.A. (M-1), M.F.S.A. (M-2)¹⁾ および地震計用対数増幅器²⁾ を発表したがこれは使用目的の関係で装置を簡略化しているから、電源の安定度が充分たかくとれず充分たかい感度をうることはできなかった。

この感度を補足するために筆者はさきにトランジスターの前置増幅器³⁾ を設計し、地震計の安定度と簡易さをそこなうことなく、感度をあげることに成功したが、このことからトランジスターが地震の経常観測にも高信頼度をもつて使用しうることと、真空管増幅器よりもたかい感度の観測がトランジスター使用の増幅器では期待できることが判明した。

電子管とトランジスターの一般的な特長の比較はすでに論議しつくされているとおもわれるが、ここにトランジスターが電子管よりもすぐれている点を要約してみると、

- 1) H. MATUMOTO, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **37** (1959) 375.
- 2) H. MATUMOTO, *ditto.*, 381.
- 3) H. MATUMOTO, *ditto.*, 525.

1. 装置の小型軽量化が容易である。
2. 消費電力がすくなく低電圧で動作するので、電源に乾電池の長期使用が可能で電源からうけるおおかたの束縛から解放される。
3. 使用法により入力換算の回路雑音をひくくおさえることができるから、これにより制限される利得をよりたかめうることが期待できる。

以上であるが、筆者は今回これらの特長を活用するように、全部トランジスター使用の増幅器を試作したところよい結果をえたのでここに発表する。

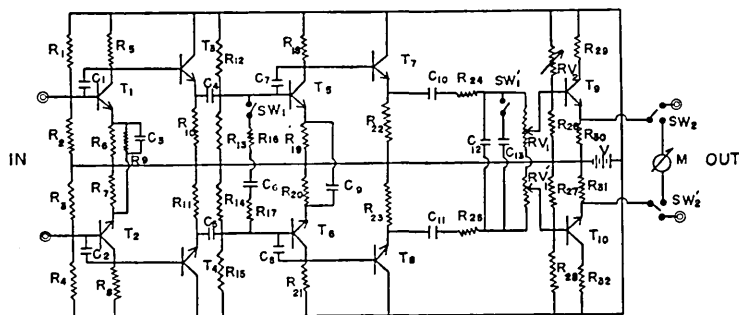
§ 1.2

この増幅器の設計の主目的はトランジスターの利点を増幅器にいかに関活用するか、そしてトランジスター使用で現存する増幅器の特性感度をいかに改良するかということにおいた。

真空管増幅器の設計上の難点である回路内発生雑音の低減と、電源の高度の安定化は、前者は前置増幅器の時にすでにトランジスターで克服できたし、後者は乾電池使用で完全に解決できるから、今回はさらに、トランジスター使用でよりひくい周波数での感度をあげることも考慮して設計したところ、おおくの目的に使用できる便利で高感度の増幅器を小型軽量しかも電源内蔵の完全な可搬型で製作することに成功した。

§ 2.1

Fig. 1 にこの増幅器の配線図をしめす。



$R_1, R_4, R_{12}, R_{15}.$	200 K Ω .	$C_4, C_5, C_{10}, C_{11}, C_{13}.$	200 μ F.
$R_2, R_3, R_{13}, R_{14}.$	100 K Ω .	$C_6.$	10 μ F.
$R_5, R_6, R_7, R_8, R_{10}, R_{11}, R_{15}.$		$C_{12}.$	1 μ F.
$R_{19}, R_{20}, R_{21}, R_{22}, R_{23}.$	50 K Ω .	$RV_1.$	500 K Ω .
$R_9.$	3 K Ω .	$RV_2.$	30 K Ω .
$R_{16}, R_{17}, R_{24}, R_{25}, R_{26}, R_{27}.$		$V.$	6 V.
$R_{28}.$	20 K Ω .	$M.$	50 μ A full scale DC ammeter.
$R_{29}, R_{32}.$	1 K Ω .	$T_1, T_2.$	2 T 68 (Sony).
$R_{30}, R_{31}.$	10 K Ω .	$T_3, T_4, T_5, T_6, T_7.$	
$C_1, C_2, C_7, C_8.$	0.1 μ F.	$T_8, T_9, T_{10}.$	2 T 65 (Sony).
$C_3, C_9.$	400 μ F.		

Fig. 1. Circuit of the amplifier.

この増幅器は使用目的によつて特性や出力の検出器をきりかえるように設計してある。

SW₁ は周波数特性, SW₂ は出力のきりかえスイッチで, SW₁ により装置を地震中間周波 (Seismic medium frequency 0.3~3.0 c/s) と, 地震高周波 (Seismic high frequency 3.0~30 c/s) の観測装置にきりかえ, SW₂ により, 出力検出を内蔵電流計と外部記録器にきりかえることにより, 装置を土地微動検出器と, 普通地震計とにきりかえる。

この増幅器の回路は雑音の低減をはかり, 低周波の利得をあげるためと, 出力端の直流の平衡をとるために対称型にくみだてている。

回路構成は初段はエミター接地コレクター接地の直結回路で, この結合法は温度特性がよく入力換算の雑音を他の回路に比較し, もつともひくくおさえることができる。この回路から発生する入力換算の雑音は約 $0.5 \mu\text{V}$ で, このような低雑音は, 真空管回路では容易にうることはできない。

この結合からは, さらに入力・出力のインピーダンスの面でも利点がえられる。入力インピーダンスは地震中間周波帯においては約 $50 \text{ K}\Omega$ でトランジスター回路としては比較的たかく, 現存するおおかたの換振器にたいしては増幅器から過度の制動作用をあたえない。出力インピーダンスは $10 \text{ K}\Omega$ 以下であるから, 次段との結合により損失はなく, 周波数特性調整回路にトランジスターが影響をあたえない利点がある。この利点を必要とするので二段目も初段と同様の結合にしたが, この結合では一段あたりの利得が約 35 db で, トランジスター使用数にたいして電圧利得はすくない。

最終出力段は電流増幅のコレクター接地回路の変形で, 高感度の検流計を接続しても, ドリフトの影響をうけないよう, コレクターに直流平衡用負帰還抵抗を挿入して, 回路の安定をはかっているから, 可変偏倚抵抗 RV_2 の加減とあわせて, 直流の平衡を安定に保持することができる。

この増幅器の総消費電流は約 1.8 mA であるから, 単三乾電池を電源として連続使用しても, 正常な動作を保持する電池寿命は約1週間である。回路構成に使用した部品はすべて市販品を使用し, 電源は単三乾電池4本を 6 V で使用, 内蔵している。

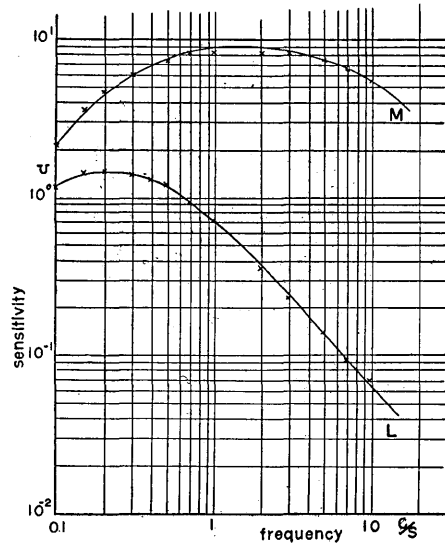


Fig. 2. Gain-frequency characteristic of the amplifier for two ways (at 20°C). M is the characteristic of the amplifier used for high frequency seismograph, and L is the characteristic of the amplifier used for medium frequency seismograph.

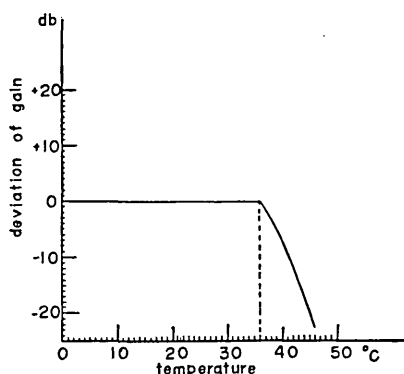


Fig. 3. Gain deviation of the amplifier versus temperature.

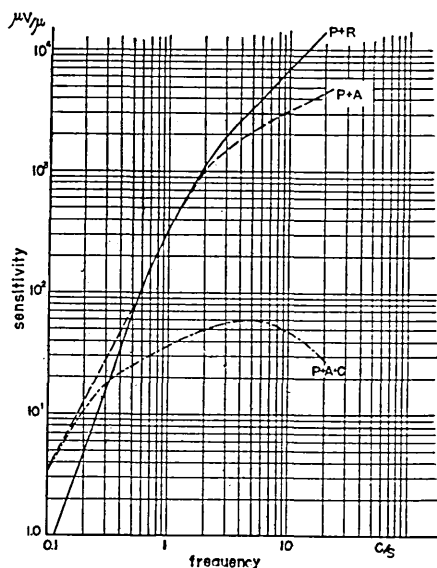


Fig. 4. Displacement sensitivity-frequency characteristic of the transducer. P+R is the characteristic when the out-put is terminated with 60 kilo-ohm resistance, P+A is the characteristic when the out-put is terminated with the amplifier directly, and it is applied to high frequency seismograph, P+C+A is the characteristic when the out-put is terminated with $10\mu\text{F}$ capacitance and the amplifier, and it is applied to medium frequency seismograph.

Fig. 2 にこの増幅器の周波数特性をしめす。感度はトランジスタの使用数にたいして、たかいものではないが、この感度が低雑音で安定度たかくえられ、市販の高感度検流計と結合することにより、現存する地震計よりも高感度の地震計を構成できたことで、本増幅器は設計の目的を充分満足させたものといえる。

Fig. 3 にこの増幅器の利得の温度特性をしめす。高温時に利得がさがるので使用条件に制限をうけるが、常温では満足すべき特性をしめす。

§ 2.2

この増幅器の入力インピーダンスは、小型で電圧感度のよい換振器にたいしても制動作用をつよくあたえぬように、充分たかく設計しているから真空管増幅器に結合する目的をもつて設計したおおかたの換振器を使用することが可能である。

また使用する検流計は内部抵抗が 100Ω 以下で感度 $0.1\text{ mm}/1\mu\text{A}$ 以上のものであれば記録最大振幅 100 mm まではひずみなく記録できる。市販されている電磁オシログラフの振動子でこの増幅器の検流器として条件の適合する製品は横河電気の D 型振動子と三栄測器の 30 c/s 振動子があるから、これらの電磁オシログラフを記録器に使用して地震計を構成すれば高感度の地震計をうることができる。

Fig. 4 に小型軽量で調整が簡単、しかも機械強度がつよく移動用換振器として便利のため今回おもに使用した地震研究所技術部製作の 1 c/s 水平動動線輪型換振器の変位感度周波数特性をしめす。図中で (P+R) は出力端に $60\text{ K}\Omega$ の抵抗を接続し、振子の制動を、この抵抗をながれる電流の作用で、臨界

制動状態にしたときの換振器出力端における出力周波数特性をしめし、(P+A)は換振器とこの増幅器を接続したときの増幅器入力における換振器出力周波数特性、(P+A+C)は地震中間周波の波動を測定するためには不必要な高周波を換振器出力にふくませないように、 $10\ \mu\text{F}$ のコンデンサーを出力端に並列に接続してこの増幅器に結合したときの増幅器入力における平坦化された換振器出力の周波数特性である。

Fig. 5 に上述の増幅器と $1\ \text{c/s}$ 水平動換振器の外観写真をしめす。装置の小型化にたいするトランジスターの効用が本装置にも充分発揮されていることを証明するものである。

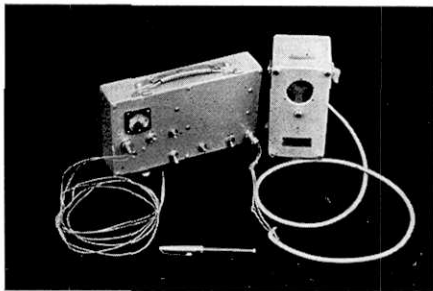


Fig. 5. Appearance of the amplifier and the transducer used.

§ 2.3

以上にのべた換振器、増幅器、記録器から構成される地震計は地震中間周波ならびに地震高周波の観測に使用できるが、つぎにこれらの二種類のくみあわせによつて構成した二様の地震計の周波数特性をしめす。

Fig. 6 は近地地震あるいは、爆破地震動を観測するのに適当な特性をもつように構成された、地震高周波観測用途地震計の総合特性で図中 1-H は上述の $1\ \text{c/s}$ 水平動換振器、3-V はすでに紹介した地震研究所技術部製作の $3\ \text{c/s}$ 上下動換振器⁴⁾を使用し、増幅器を (H) の状態において、記録器三栄測器製作の電磁オシログラフを使用したときにえられる。

Fig. 7 にこの装置の地震中間周波用途地震計構成時における総合特性を、萩原式電磁地震計⁵⁾の長周期型 H·E·S·L、ならびに標準型 H·E·S·B の特性と比較してしめす。図

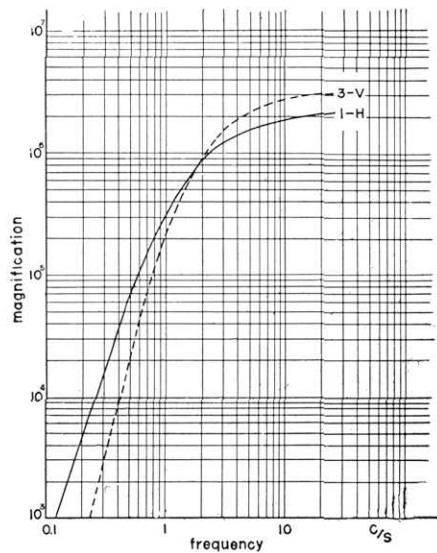


Fig. 6. Over all characteristic of the seismograph used for high frequency observation. 3-V is the characteristic obtained when a $3\ \text{c/s}$ vertical transducer⁴⁾ ($6\ \text{V/kine}$) is used, and 1-H is the characteristic obtained from a $1\ \text{c/s}$ horizontal transducer ($1.2\ \text{V/kine}$).

4) H. MATUMOTO, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **37** (1959), 527.

5) T. HAGIWARA, *Kagaku*, **28** (1958), 342.

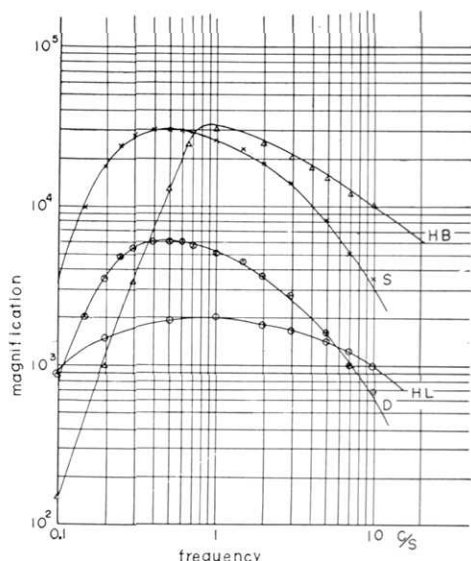


Fig. 7. Over all characteristic of the seismograph set in medium frequency way compared with two types of routine seismograph H.E.S³). (HL..... $T_p = 1s$, $T_g = 20s$, HB..... $T_p = 1s$, $T_g = 1s$.)

S is the characteristic of the seismograph with the recorder having a sensitivity of $1mm/\mu A$ at $0 \sim 30c/s$. (manufactured by K.K. Saiei Sokuki).

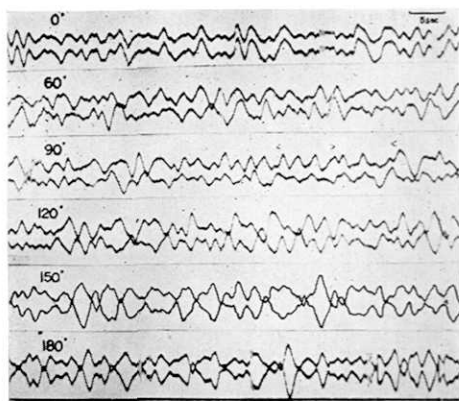


Fig. 8. Seismograms of microseisms recorded at Naarai on Oct. 21st 1959 by the two seismographs of which characteristic is indicated in Fig. 7. as D. Numerals show the directional angle between two transducers for the seismographs used.

中 (D) および (S) でしめす特性は Fig. 4 (P+A+C) でしめした増幅器出力を Fig. 2 (M) でしめした状態の、この増幅器に供給して、記録器横河電気電磁オシログラフおよび三栄測器電磁オシログラフを使用したときにえられる、それぞれの地震計の感度特性である。

§ 3.1

この増幅器は地震中間周波の感度が携帯用とすれば、かなりたかいものであるから、三東哲夫はこの増幅器によつて構成した地震計 (D) を、颱風時の波浪とそれによつて発生する脈動とを海岸で同時に観測して、両者の関係を定量的にしらべる実験に使用し、よい結果をえた⁶⁾。この結果からみるとこの装置の特性は脈動全般を観測するには、低周波の特性がなお不満足であるが、颱風によつて発生する脈動の主成分を観測するには、ほぼ満足すべきものであることが判明し、さらにその観測が颱風によつて誘起された停電によつて、さまたげられなかつたので、このような観測にたいするこの増幅器の価値を、充分認識させた。

Fig. 8 に千葉県下名洗港において、三東によつて颱風 59-19 号近接時に観測してえられた記録をしめす。記録から 2 台の装置間には振幅、位相の周波数特性の相違はみとめられず、この装置が 3 点観測法や波動の合成を目的とするような高度の観測に使用しうることが証明できた。

§ 3.2

この増幅器は内蔵されたメーターによつ

6) T.A. SANTÔ, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 38 (1960), 241.

て、換振器と出力の周期と振幅を、よみとることができる。その感度は使用している $50 \mu\text{A}$ の直流電流計で地動 1μ ($0.1 \sim 1.0 \text{ c/s}$) にたいし指針が $400 \mu\text{A}$ 相当目盛の振動をするから、たいへん小さい地動でも検出できる。爆破地震動観測の観測点の選定に、この装置を携帯使用したところ、非常によい観測点をうることができたので、この装置が観測点選定の調査に威力を発揮することを証明できた。

§ 3.3

真空管増幅器を使用した高感度地震計はいまでもよく爆破地震動の観測に使用されてきた⁷⁾。

しかしこれらの地震計は、真空管の電源を商用交流から供給あるいは補充しなければならないため、観測点選定に相当制約をうけてきたし、その設備や附帯設備も移動用とすればおおきすぎるくらいがあつた。筆者等は 1959 年 11 月 20 日の第 5 次御母衣大爆破地震動観測に、このトランジスター増幅器を使用し、 $\Delta = 290 \text{ km}$ の地点で観測を実施し信号の記録に成功した。このときの装備は三栄測器の電磁オシログラフと本増幅器 (H)，それからすでにのべた 3 c/s 上下動換振器と 1 c/s 水平動換振器で構成した地震計，ならびに刻時用のトランジスター短波受信機で、従来になく小設備で、設置が容易であつたから、移動用の地震計は、かくあるべきであるとおもわしめた。Fig. 9 にこの時えられた記録をしめす。

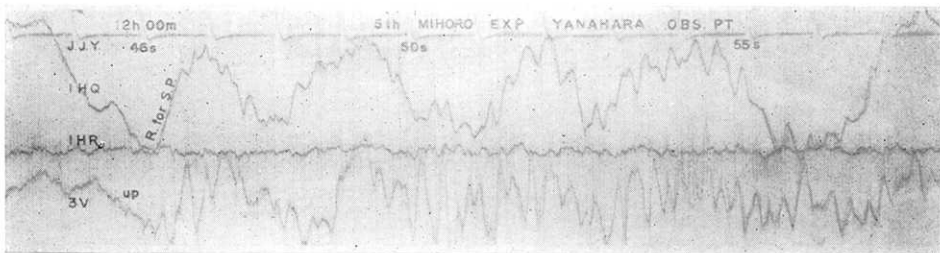


Fig. 9. Seismogram obtained at a station of 290 km distance from the shot point in the 5th Miboro explosion seismic observation by the seismograph, characteristic of which is shown in Fig. 6..

§ 4

われわれの目的は、おもにひとつの現象に着目し、記録の中からその現象を摘出してその解析をおこなうことであるが、今回設計した増幅器は多目的に使用できるようにつくられているので、ことなつた性質の現象が重畳して観測されるおそれもある。Fig. 9 の記録にもその難点が現実にあつた。脈動と爆破地震動が重畳して記録されているが、爆破地震動観測のためには、のぞましい状態の記録ではない。勿論このときは颱風 59—21 号

7) T. ASADA, *Zisin*, **7** (1954), 116.
N. DEN, *Zisin*, **6** (1953), 101.

が発生していて脈動の振幅もおおきかつたので、とくにそれがおおきく記録されたのではあるが、電氣的に容易に除去できることであるから、今後製作するときには、 SW_1 と連動で C_3, C_9 を $200 \mu F$ から $50 \mu F$ にきりかえ、入力インピーダンスをあげ、地震高周波の感度をよりたかめたうえに、中間周波の感度をさげるような回路にして、この不都合を除去することがのぞましい。

また今後は記録をテープレコーダーに記憶させて直接解析のできるような装置⁸⁾にも、この増幅器を結合したいから、電圧利得のたかい回路構成にもきりかわるよう設計をすすめていきたい。

§ 5

以上この増幅器について利点欠点をいろいろあげてみたが、これらを総合して、トランジスターの採用は、電子地震計におおくの利点をあたえ、地震観測技術の向上に資するところがおおきいことが判明したのであるから、今後もトランジスターのすぐれた性質に着目し、すぐれた観測装置をつくりだすよう研究をつづけていきたいとおもう。

おわりにこの研究をおこなうにあたり、うけた研究室主任宮村助教授ならびに同僚三東哲夫、後藤健一の両氏の御指導と御援助を深く感謝する。

20. A Transistor Amplifier for Seismographs.

By Hideteru MATUMOTO,
Earthquake Research Institute.

Many seismologists realized various types of seismographs having sufficient quality to make satisfactory observations for their special research purposes.

Nevertheless, at present we find no instrument to observe satisfactorily in the seismic high frequency band, which is important in a study of local small earthquakes or explosion seismology from the standpoint of sensitivity, portability, and robustness for field use.

It is really important to construct an instrument that is able to be set up easily for frequent movement in the field.

The author selected a seismograph which consists of a amplifier with a usual galvanometric recorder and an electro-dynamic transducer for those purposes, because they are robust and small relative to their quality and show excellent characteristics in sensitivity, stability and internal noise.

The sensitivity of a seismograph with vacuum tube amplifier^{1), 2), 7)} seems to have already reached its maximum at present.

We need higher sensitivity in order to construct an adequate seismograph for the study stated above, and we must develop some techniques for decreasing internal noise of the amplifier and simplification of the instrument.

Recently the author clarified³⁾ that a transistor amplifier is superior to the vacuum tube amplifier in circuit noise, and consumption of source, and size of instrument, i.e.,

8) K. AKI, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **35** (1957), 415.

S. MIYAMURA, M. TUJIURA, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **37** (1959), 359.

as a whole, in portability and quality of the instrument.

Thus the author designed and constructed a new seismograph, making use of those advantages in the amplifier.

The limit of the sensitivity due to the generated noise in the head tube and delicacy of operation could be improved in this amplifier by using transistors and dry cells instead of vacuum tubes and an eliminated DC source, and also could expand its frequency characteristic more widely to a lower frequency than before.

This amplifier has its power source in the small cabinet, and consequently it seems to be almost an ideal portable seismograph for the present.

The circuit of the amplifier is shown in Fig. 1.

The characteristics can be changed by switches according to observational purposes, namely, it is changed by SW_1 from that of seismic high frequency seismograph to that of seismic medium frequency seismograph, and SW_2 can change the instrument from a back-ground noise meter to a usual seismograph.

The circuit is set up as an all push-pull connection, in order to decrease internal noise and to increase low frequency gain or stability of the seismograph.

First and second stages of the amplifier circuit are connected as earthed emitter circuit directly coupled to earthed collector circuit.

The noise of the amplifier referred to the input level can be compressed less than $0.5 \mu V$ by this circuitry, and such an excellent value cannot be easily obtained by the other amplifiers of existing seismographs.

This connection gives us an advantage in the input impedance, too, and most of the transducers in common use at present can be coupled to the amplifier without any over reaction.

As the out-put impedance of each stage in this circuit is less than $10 K\Omega$, voltage loss from coupling to the next stage is not induced, and consequently design of full circuit is simplified.

Voltage gain per one stage is about 35 db. It seems rather low for the number of transistors used.

Last stage of the amplifier is earthed collector connection. A stabilizing resistor is put into the collector circuit in order to keep DC balance of the out-put more stable.

Source consumption of the amplifier is about $1.8 \text{ mA}/6 \text{ V}$, and life of dry-cells (4 UM-3 A cells) to keep ordinary characteristic of the amplifier is about a week.

Fig. 2. shows the frequency characteristics of the amplifier sensitivity in conductivity.

It does not seem so sensitive, when its sensitivity is represented with conductance, but we can detect lower level signals than any other existing amplifier without trouble from circuit noise.

Fig. 3. shows temperature effect of gain, which seems to be satisfactory within the ordinary temperature range.

Input impedance of the amplifier was designed so high that it can be connected with most of usual transducers without any over reaction, thus, we can immediately use most transducers which were designed for vacuum tube amplifiers, without introducing any change of construction.

Galvanometer for the amplifier recorder needs following conditions.

- i) Internal resistance of the galvanometer must be less than 100Ω .
- ii) Sensitivity of the galvanometer must be higher than $0.1 \text{ mm}/\mu A$.

We can construct a high sensitive distortionless seismograph within 100 mm amplitude range on seismogram by using such galvanometer for the amplifier recorder.

We have used Y. E. W. D type oscillograph and Sañei 30 c/s oscillograph for the recorder, because they are suitable and convenient for the amplifier.

Fig. 4. shows the characteristic of the transducer used for the several observations to examine the amplifier utility.

Fig. 5. shows the appearance of the amplifier and the transducer, and it clearly illustrates the portability of the instrument.

The characteristic of the amplifier is shown in Fig. 6., and Fig. 7. shows the overall characteristics of the seismograph in high frequency way and medium frequency way, when the seismograph was constructed with the preceding amplifier, transducer and galvanometer.

It seems the highest sensitivity in medium frequency portable existing seismographs.

T. A. Santo utilized this seismograph in a observation of microseisms at a coast in stormy weather, and succeeded to analyze the relations between microseisms and sea waves⁶⁾.

Reproduction in Fig. 8. indicates the seismograms obtained on Oct. 21 st 1959 at Harbour Naarai, Chiba Pref., by Santo.

This result cleared the effect and uniformity of the seismographs sensitivity and frequency characteristic for accurate observation of microseisms.

The amplifier has a meter in its cabinet to read frequency and amplitude of seismic signals from the transducer, and we can detect weak movement of the earth without any special recorder. The meter of $50\mu\text{A}$ DC full scale can indicate a signal with sensitivity of about 4 divisions/ 10^{-8} cm in $1\sim 10$ c/s, when the seismograph is used in high frequency way.

We succeeded to search for a suitable place to do a temporary observation for distant timed blast by using this back-ground noise meter.

We had formerly used vacuum tube amplifiers⁷⁾ for such explosion seismic observations, and we were restricted ourselves by the commercial AC source both in the location of the observatory and in the upper limit of sensitivity owing to the circuit noise coming from the AC source.

We had also had to carry too heavy instruments for temporary observation. But, now we can observe equally well by small size instruments without any restriction from commercial AC source by using this amplifier.

Fig. 9. shows the seismogram obtained at a station of 290 km distance off from a shot point at Miboro on Nov. 20 th 1959 (5 th Miboro explosion) by the amplifier.

It cleared that this amplifier is superior to other vacuum tube amplifiers in sensitivity of seismograph constructed with them.

On the other hand, the frequency band of the amplifier sensitivity is so wide that microseisms and seismic waves can be recorded similarly in a seismogram. It is unnecessary and rather troublesome for explosion seismological study to record two kind of waves, but we can remove disturbance due to microseisms from such seismogram by changing capacitors C_3 C_9 from $200\mu\text{F}$ to $50\mu\text{F}$ in order to cut-off low frequency waves.

Thus, we conclude that the utilization of transistor to increase portability and to minimize internal noise of seismograph amplifiers was clarified by the amplifier, and the technique of seismological observation will become higher and higher by introducing transistors in future.

The author intends to develop various aspects of electronic seismometry⁸⁾ using transistors for the wider field of seismology.