簡 易 地 震 計 の 開 発

——その必要性と試作——

九州大学理学部 大 塚 道 男

(昭和 55 年 12 月 23 日受理)

Development of Handy Seismograph

Michio OTSUKA

Department of Physics, Kyushu University

(Received December 23, 1980)

Although dense networks of microseismic stations are spread over wide area of Japan for the purpose of forecasting disastrous earthquakes, it also is to be noted that still broader area is left unmonitored as regards their seismic activities. It is much more true when we talk the matter in the international sence.

To cope with the situation, a handy, compact and maintenance-free seismograph has been developed. The object is

- a) to supplement the gap of microseismic observations,
- b) to serve as a tool for teaching aids and
- c) to facilitate mobile observations of seismic activity.

The basic idea and design of its development are described in some detail.

§ 1. 開発の動機

(1) 微小地震観測網の補間

微小地震観測の技術は、この 10 年程の間に飛躍的に向上し、日本全土に多くの観測点が気象庁による観測網をうめて日夜地震活動を刻明に監視するに至つた。この状況を、四半世紀前、微小地震研究計画が緒についた頃のそれと比較するとき、まさに隔世の感を禁じえないと共に、現代の固体地球科学の世界において、定着しつつある重要な概念の多くが微小地震観測の成果に源流を発していることを思うとこのプロジェクトの重大さが、あらためて実感される。

しかし、一方このように稠密でしかも正確な地震観測のおこなわれているのは、日本とアメリカ西海岸の一部だけであり、他の地域、例えばフィリピン、インドネシア、南米など多くの地震頻発国の微小地震は、その存在すら知られていない。

このように微小地震観測点が偏在している状況を、当面は特定地域における地震活動の監視

昭和 54 年 9 月 30 日発表

又は地震予知の実験ととらえるとしても、やがて実験でえられた知識を一般化し、各地域に個有の地震の特性を論じようとする段階では必らず再燃すべき問題である。しかも、これは単に外国での問題というだけにとどまらない。1979年の御岳山の噴火に不意打ちを喰ったこと、1980年の川奈崎沖群発地震のうちでも被害を出す寸前だったM 6.7の地震が予知できなかったことなど、地震観測体制のいちじるしく進んだ我が国でさえ、なお観測網の整備が必要であることを思わせる材料が多い。

この問題を解決するのに、現在微小地震観測の主流をしめている電話回線によるテレメータ観測点を増設しようというのは誰もがすぐ思いつく容易な方法である。しかし完璧ではあつても、著しい設備費と消耗品費を要するこの方式のみを念頭においてこの問題を考えることは、経済的効率から考えて必らずしも得策でないかもしれない。もつとも、簡単に考えるとテレメータで結ばれていない独立の地震観測所を多く設けることは観測所ごとに人員の配置を要し、地震学が過去に悩まされた状態への逆行を意味しているように思えるのだが、果してそうであろうか。

筆者は、かたや観測点の増設、かたや経費や保守人員の節約というおたがいに相容れないかに見えるテーマは、保守に労力を要しないで、しかも正確なデータを自動的に生産する能力をもった地震計を開発し、ごく簡単な保守管理については地震学の専門家以外の方（学校の生徒、アマチュアなど）の協力を仰ぐことにより両立させうるのではないかと考えた。

今日のすばらしい電子技術をもつてすれば昔難解だった問題を解決する道はすでに拓けているかもしれない。こういう考え方のもとに試作した機械について報告するのが本稿の目的である。

なお本装置を開発するに当り、筆者は当初開発途上国への技術援助も念頭においたし、そうでないといけなかつたが、国際的視野でものごとを考えようとすると、電話線はおろか、電力事情、道路条件など、もつと根本的な悪条件を考慮する必要があることを考え、とりあえず当面は、我が国での使用のみを念頭におくことにした。

(2) 地震計測の教材としての貢献

(1) でのべた動機は、無人の地震観測所で良質の地震観測データを生産しつづける地震観測装置を開発することにあるが、“無人であること”は必ず想定しなければならない条件ではない。もし地震観測という事業に情熱を傾けてくれる人がえられるならば、それにこしたことはないだろう。このことから筆者は、学校の理科クラブやアマチュア観測家を想うかべた。その理由は、気象学や天文学の分野ではこのグループの人達の活躍が著しいということと、もう一つは地学実習についての教育的見地である。今地震学界で活躍している人の何パーセントが

教育の最終段階を終える前に実際の地震を観測するという感動的な実験にたずさわられたことだろう。これは、天体望遠鏡や顕微鏡が、簡易型ではあつても、普通では見えない自然を見せることによつて天文学や生物学への入口の役をはたしているのと対照的である。勿論、地震計を教材化しようという試みが古来なかつたわけではない [例えば保坂 (1955)]。しかし、いつおこるとも分らない現象を高精度で測定しなければならないという地震学に特有の困難を克服することは往年の技術をもつてしては不可能であつたろう。

ここで筆者は、質量やダンパーの働らきを説明するという原理的な部分を一切ブラックボックス化して、ともかく出来るだけ高精度で人手の要らない地震観測装置を作ることにした。

ただ、ほとんど人手を要しない地震計を開発するということが、教育的だろうかという反論があるのは当然なので、それに対する筆者の考えをのべておきたい。

たしかに本機の開発の思想は、地震観測の、殊に基本的な部分をスポイルすることを前提にしていると言える。しかし地震計測学という立場から見れば、地震をつかまえ、記録するという作業はまだその一部に過ぎず、地震の震源を求め、あるいは、地震活動の推移を見るというような、むしろ地震計測にとつて根幹とも言うべき部分が残されている。慣性質量の働きを理解させることから始めることが正統と考えられた従来の地震学の実習は、地震観測にとつて最も本質的な部分まで、ゆきつけなかつたのではないかというのが、筆者の意見である。

(3) 機動観測への貢献

本機の開発を考える段階で、筆者はその目標が余震や群発地震などを機動的に観測する移動観測用の測定器に必要とされる機能と共通している部分が多いことに気がついた。それらを列挙すると、

- (1) 測定に広い場所を専有しない工夫が必要であること
- (2) 全体が簡潔にまとまつており、測定に複雑な手続きを要しないこと
- (3) 維持管理に人手が不要であること など。

ただし、現在機動的な地震観測は通例、地震学の専門家の手でおこなわれ、研究的色彩が濃く、高い機能が要求され、又それらがフレキシブルであることも必要とされる。残念ながら、この要求は、この計器を開発しようとした動機とは矛盾する。そこで、筆者は一般むきの機械ということに第1順位を置き、専門家むきの要求に応えることは思い切つて第2順位と考える立場を押し通すことにした。専門家むきの要求には、オプションという形でこたえられるが、元のままの形でも、その機動性、簡便性などの故に地震学に貢献できる面は少なくないと筆者は期待している。

§ 2. 地震観測の一般化を阻んでいた原因

1) 地震観測には専門家の指導や助言が要ること

昔の地震観測が煤のかけ方、猫針の磨き方、ダンパーの調整などにどれほど熟練を要したかを考えると、今日の地震観測技術がいかに単純化され、専門的知識を必要としなくなっているが実感される。しかし、この単純化はいまだに、ポピュラー化の域にまで達していない。即ち、あるアマチュアが、ある日一念発起して計器を買って来たら、その日から、地震観測が始められるというほど、簡単な構造にはなっていないからである。つまり地震観測にはセンサーだの、アンプだのというコンポーネントがあり、それらの組合わせが目的に応じて選択出来るようになっていて、どういう地震をどういう精度で測定する必要があるかによつてその組合わせが異なる。その部分について、どうしても専門家の指導が要するという構造になっているからである。この事情は写真機が、絞りや焦点深度に関して専門知識を要する時代があつたことを想起するとよく判る。写真機のポピュラー化は一般人にとって専門的知識の無用化から始まつている。

2) 地震観測装置は高級品であるというイメージ

農家の軒先をかりて臨時観測を始める段階になつたとしよう。次は家の人に依頼すべき作業を説明することになる。記録紙の交換・インク補充・テープかけかえなど。このとき例外なしに家人に持たれる印象は、操作の手順を誤つて高級品をこわすのではないかという恐怖心であろう。これをとり除くには、どうすればいいのだろう。筆者は、かつてデータレコーダーと並行してオーディオデッキを使つて地震観測を実施したことがあるが[大塚・他(1972)]、データレコーダーにくらべてオーディオデッキの取扱いの依頼はきわめて容易であつたのを記憶している。製造販売台数が、地震観測装置と比較して問題にならないほど多い一般用機器は、一般人のもつ機械アレルギーをとり除きながら、しかも元来の高い性能を損なわないことだけを目的に多大の資本をつぎ込んでいることを忘れるべきではない。その意味から言えば地震観測装置は、受注台数の少なさの故に、いまだに“高級品”というレッテルをはがす余裕のない器械なのかも知れない。とにかく、このレッテルは委託観測にとつて大変邪魔なしろものである。

3) 地震観測は一日も休めないということ

地震学者が家の人に委託項目を説明するとき、一番言いだしにくい項目は“地震観測は一日中しかも、日曜も祭日も休まず続けてほしい”という項目ではあるまいか。委託している以上、家人に機械マニアがいるというような幸運にでもめぐり合わない限りこの項目を強制するわけにもゆかないから、気の弱い地震学者ほど、欠測の多い記録を作らねばならないし、逆にこれを強行すれば、観測が永続きしないことにもなろう。

筆者の経験によれば、このような地震観測の特殊性から来る問題は、且に委託観測のときだけにおこる問題ではなく、自発的に地震観測を志向している筈の学校の理科クラブでもおこる悩みである。

§3. どのような装置の開発が必要か

筆者が開発の方針として、まず念頭においたのは、地震観測ということから考えられる項目をあれもこれも盛り込んだ汎用機を作らないように気をつけることであつた。そのためにはどの機能をもたせるかということよりも、どの項目を落とすかを決断することに主力を注ぐ必要があつた。

一例を挙げると本機は直視記録式で、データ出力端子をもたない。しかし本機の内部では記録の見やすいことだけを目的にしてはデータのデジタル処理がおこなわれていて、デジタル出力をとり出すことも可能である。したがつて直視記録だけでは、あまりにもつたいないという気持は最後まで残つたが、地震観測にとつて基本的に大切な「まず波形をよく見る」ことと、「読みとりが簡便であること」に重点をおき、しかも高級品のイメージから逃れるために出力端子さえも設けないことに踏み切つた。

その他、成分数を一成分にしたこと、遅延時間を4秒間しかとらなかつたことなど、いたる所にこの考えが採用されている*。

観測すべき地震として、マグニチュードが6をこえるものの観測や、遠地地震、深発地震は、この測定器に期待する項目から外すべきことは言う迄もない。これらは気象庁の観測網で充分なデータがえられるからである。問題なのは、むしろ観測網の希薄な地域におこる微小もしくは極微小地震の活動を監視することである。しかも震源距離にして30 km以上のものは対象外と考えてもよいだろう。何故ならそのような地震は多分、既存の地震観測網に捉えられるだろうから。

§4. 各ユニットの設計

(a) ドラム式記録方式

ペン書きにせよ、煤書きにせよ一日一回記録紙のとりかえ作業を要するので採用しなかつた。

(b) 長時間レコーダー

一日一回記録紙のとりかえは不要だが、ペン先管理、インク補充、紙送り点検などが必要なので採用しなかつた。

* オプションとしてはデジタル出力をとり出すことも遅延時間を永くすることも可能である。

Fig. 1(a). Examples of record obtained by the present instrument. Kawanazaki-oki (off east coast of Izu Peninsula) swarm recorded at Usami in June, 1980; by the courtesy of Dr. K. Ishibashi.

Fig. 1 (b). When instrument is triggered, date, hour, minutes, seconds are printed out, and seismogram (delayed by 4 seconds) follows with accurate second signals on both sides of record.

(c) 磁気記録

記録後の処理や解析になくってはならないものだが、現地で記録が見られることを重視する立場を優先させて採用しなかつた。

(d) トリガー方式

常時記録方式に較べて、消耗品に要する費用、メンテナンスに要する労働力等が少なくてすむこの方式を採用した。トリガーは、振幅のみによる弁別方式を採用したため、雑微動によるミストリガー振幅が閾値に達しない極端に小さな地震の観測もれなど、避けられない問題を抱え込むことになったが、考えてみると雑微動で絶えずミストリガーが発生するような所で地震観測をすることはないし、極端に小さくノイズレベルと同程度の振幅の地震を見逃すことは、いかなる方法をもつても避けられないものである。

記録の終了の方は、振幅が設定閾値よりも低い状態が 10 秒間つづくことをもつて判断した。

(e) 遅延方式

地震観測にトリガー方式を採用するときには遅延回路が必要である。そのとき遅延時間としては永いものをとるにこしたことはないが、価格の点を考慮して 4 秒を採用した。§3 に述べたように、観測すべき地震の最大震源距離を 30 km とすると、S 波でトリガーがかかるとしてもこれで充分である。

(f) サーマルドット方式

感熱紙による記録方式は、ペン先の保全、インクの管理などに余り気をつかわなくてよい上に、地震の休止期間にもペン先の乾燥に類した問題がおこらない。ここに採用したサーマルドット方式は特に、本機を強く特徴づける部分で、熱記録の利点の他に、従来の熱ペン方式では実現出来なかつた印字（邦文・英文・数字など何でも）を可能にした。第 1 図に本機で記録された地震の一例を示すが、まずトリガーのかかつた時刻（秒以下切り捨て）が、○年○月○日○時○分○秒と印刷され、ついで 4 秒分遅延された地震記録があらわれる。このとき地震記録の両端に 1 秒ごとのマークがしるされる。記録の最初の部分に印字された時刻に対応する秒マークだけは他のものに較べて、やや長くしてある（第 1 図の矢印）。従つてトリガー時をたよりに相の発震時を読むことは、大変やさしい作業になる。紙送りが 4 mm/秒 であるから、シャープな立ち上りを示す相ならば 1/20 秒の誤差で読めるであろう。次に述べる刻時の精度はこのことを考慮してきめられたものである。

(g) 刻時機構

本機の刻時は、内蔵された水晶発振器（固有振動数 3.2768 MHz を基準として秒パルスを作る。時計は毎日 4 回（0, 6, 12, 18 時）時報信号で較正している。誤差は $\pm 1/20$ 秒以内

に収まるようにした。

(h) 成分数

一般に地震観測は三成分観測が原則で行なうのが普通であるが、すべてのユニットが大型化するので、価格と機動性を考えて一成分とした。

(i) 記録紙幅

既製品を流用できる 30 mm を採用した。一般に地震観測に用いられるものよりせまいので、小さい振幅でオーバースケールしてしまうことは避けられないが、価格のことは考えず例えば 60 mm のものを開発したとして、そのことによつてすくわれる（つまり最大振幅が 30 mm より大きくて 60 mm より小さい）地震の数と、開発に要する経費を見較べて上のように決心した。上の見積りについては付録を参照されたい。

(j) 感度

直流増幅器に 30 c/s のローパスフィルターを附し、増幅器の電圧利得は 40 dB から 6 dB ずつ 7 段階に加変とした。従つて最大電圧利得は 82 dB となる。今、1 volt/kine のピックアップを用いたとすると、記録紙上の 1 mm ふれは 50 μ kine に相当する。

(k) トリガーレベル

トリガーレベルは増幅器の電圧利得レンジと連動して変るが、どのレンジを採用してもトリガーレベルは記録上

Fig. 2. An exterior view of the apparatus.

Fig. 3. Dimensions of the apparatus (mm).

Fig. 4. Block diagram of apparatus showing the internal connection of parts.

Fig. 5. Side view of the apparatus showing the loaded role of recording paper.

の振幅のみできまるようにした。振幅の閾値としては 1, 2, 3, 4 mm の 4 段階に可変とした。

(1) 電源

100 V A.C. の商用電源がえられることを前提とした。この点機動観測としての要件には合わないで将来改善が必要とされるところである。現状では、非記録時に 30 ワット 記録時に

70 ワットの電力を消費する。これだけの電力を電池でまかなうことはできず、従つて停電中は記録できないが、現状でも内蔵時計をバックアップする電池だけは装備されており、実験室で待機中に動作状態にしておけば、いざ機動観測の必要なときには内部電池は充電されており、電源を外して現地におもむいても、時計は 72 時間動作しつづけるので、時計を現地で補正することなく、すぐ観測に入れる。

(m) 全体の構成

委託観測、機動観測における要件を考えあわせ、センサーを除く全ユニットは一体化した。第 2 図は本機の外観、第 3 図はその寸法である。重量は 17.5 kg である。第 4 図は本機内部の機能のつながりを示すブロック図である。

(n) 動作と保守

地震観測にのぞんで観測者がなすべきことは次に示す通りである。

- (1) センサーの適地をさがし、設置する。
- (2) センサーのコードを本体につなぐ。
- (3) 本体の電源をつなぐ。
- (4) 増幅度とトリガーレベルをきめる。
- (5) 内蔵ラジオの周波数を放送にあわせる。

以上で、地震観測準備は完了である。裏蓋をしめると、後に調整する所はない。地震が発生すれば、前パネルの出口から記録がはき出され、振幅が充分小さくなつたとき停止して次の地震への待機姿勢に入る。この間、人手は全く必要でない。ただ、人手が必要なのは記録紙の補充だけである。第5図に、本体の側面の蓋の内部にしまわれてくる記録用紙のロールが見えるが、記録用紙一巻は100mあり、もし、1個の地震が20秒続くとすると1000個以上の地震が記録されるあいだは、維持管理は不要ということになる。

余震観測のように寸刻を争い、P.U.の設置にかかる時間も惜しいような場合には、多分、現地到着後五分間で最初の記録がえられるので本機は、本領を発揮出来るものと期待している。

現に静岡県下の八つの高等学校で、本機による地震の常時観測がおこなわれ、その他の地学観測データと共に地震観測データも持ち寄られて研究会が定期的にもたれている。また1980年6月の静岡県川奈崎沖地震以来、建築研究所は現地で本機による移動観測を行なっている。

謝 辞

本機の開発にあたり終始暖い御激励をたまわつた建設省建築研究所、中野清司博士、開発の動機づけを与えて下さつた元国際協力事業団理事、長尾満氏に深甚の謝意をささげる。

開発は、蒼星工業株式会社と高見沢サイバネティックス株式会社の手によつてなされた。開発項目をきめる段で、地震計測という面に関心のなかつた方々に対して無理難題を出して辟易されたことも多かつたことと思うが最大限の努力でそれにこたえていただいた。新しい地震計測の夢が着々と実現してゆくのをみるのは筆者にとつて、実に楽しい経験であつた。

付 録

直視記録のダイナミックレンジ

ここでは、記録紙幅の決定のためにおこなつた評価を紹介する。直視型の地震記録において必要なことは出来るだけ微細な地震から大きな振幅の地震までを分解能よく、またオーバースケールすることなく記録することである。記録紙幅は、そのような観点から定めることが望ま

れる。

本機に用いられたサーマルドット方式ではドット間隔が 0.16 mm あり、ルーペではこれらはつきり識別されるから、これを最小振幅としてよい。ちなみに 1 volt/kine のセンサーと最大の増幅レンジを使用したとすると、これは 8.3 μ kine に対応する。一方、最大振幅は 30 mm であるから、記録のダイナミックレンジは

$$20 \times \log (30/0.16) = 45 \text{ (dB)}$$

となる。

次に、この数字を大きくするために、紙幅を大きくすることが、どの程度の利得をもたらすかを、地震の性質を考慮に入れて考えてみよう。

地震観測をある期間おこなつて「地震と判別され、しかもオーバースケールしないで記録される」地震の数 N は

$$\int_{a_1}^{a_2} n(a) da \quad (1)$$

で与えられる。ここに a_1, a_2 は地震と判別可能な最小の振幅及び記録紙幅であり、 $n(a)$ はその期間におこり最大振幅が $a \sim a+da$ の範囲にある地震の数である。石本—飯田の法則

$$n(a) = ka^{-m} \quad (2)$$

が成り立つものとするとき式 (1) は

$$N = \frac{-k}{1-m} [a^{-m+1}]_{a_2}^{a_1} \quad (3)$$

(但し $m \neq 1$)

となる。 m として代表的な値 2 を代入すると

$$N = k \left(\frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2} \right) \quad (4)$$

を得る。式 (4) において、 $a_1=1$ mm, $a_2=30$ mm を代入すると $N=0.967 k$ を得る。今紙幅が 60 mm のものを開発したとして $a_2=60$ とすると、 $N=0.983 k$ となり、紙幅 30 mm のときとくらべてオーバースケールしない地震が全個数の 1.6% ふえるにすぎない。このことは、紙幅を広くすることにより、オーバースケールしない地震記録を作る努力は大変困難な作業であることを物語っている。このことと経済性から既製の 30 mm を採用した。 m の値の違う所でもこの結論は変わらない。

これに対して a_1 の選択は大きく地震観測の成果に反映する。こころみに $a_2=30$ のままとし $a_1=0.5$ とすると $N=1.967 k$ となり、 $a_1=1$ のときと比較して優に 2 倍の地震が観測されることは重要なことで、地震観測に、バックグラウンドノイズの低い所をえらぶことが、い

かに大切かを教えている。

文 献

- 大塚道男・久保寺 章・檜垣 強, 1972, 微小地震観測に市販のテープレコーダーを応用する試み,
地震 2, 25, 164-171.
保坂勝造, 1955, 教材地震計の製作について, 地震 2, 8, 115-116,