

ASRO 地震観測システムについて*

地震観測所**

550.34.034

§ 1. はじめに

最近の地震観測システムの発展には目を見張るものがある。10年ほど前までは、主としてアナログ記録が利用されていたが、地震学の調査研究の進歩によりアナログ記録をデジタル化して解析に用いる方法が普及し、デジタルエレクトロニクスおよびコンピューターの進歩と共に、デジタル記録の必要性が急速に増してきた。

アメリカでは1960年代にアナログ記録式の世界標準地震計観測網(WWSSN)を観測点125か所で作成し、地震学の発展に大きく寄与し、世界中の研究者にとって不可欠な資料となっている。つづいて高感度長周期地震計(HGLP)と称するデジタル記録ができるシステムを、1960年代の終りから1970年代始めに開発し、世界各地の11ヶ所に設置した。このシステムは長周期地震波の観測技術発展の基礎となり、1974年にはSRO(Seismic Research Observatorr)・ASRO(Abbreiated Seismic-Research Observatoryの略)と称するシステムが完成された。

松代でも1965年にWWSSNが、1972年にはHGLPが設置され、さらに1977年6月にHGLPがASROに改良された。SRO、ASROが開発されるまでの経緯とシステムの概要、特徴等を紹介する。

§ 2. SRO・ASROシステムが開発されるまで 長周期地震計の必要性

長周期地震波を捕えるための努力は古くから重ねられ、機械式の地震計では固有周期を長くするために、大型の地震計(国内では、中央気象台1トン地震計、京大佐々式大震計など)の開発が行われ、電磁式地震計に代ってからは、検流計の固有周期を伸ばす試みがなされてきた。機械式長周期地震計で得られた古い記録が現在でも、発震機構・震源過程等の解析に用いられ、資料の請求が後を絶たないのも、長周期地震波観測の重要性を示

している。震源過程論の進歩により、むしろ重要性が増してきているといってもよい。

地震観測において、短周期成分の観測は、増幅器を用いた電磁地震計の登場により、技術的な問題が解決され倍率100万倍を越える観測も行なわれている。現在では短周期成分の観測の限界は主として脈動、人工的雑微動などのバックグラウンドノイズにより決まり、条件さえ整えば1000万倍以上の観測も技術的に不可能ではない。

一方、長周期成分の観測においては、安定に動作する周期の長い振子を製作することが困難なために、試験的に50秒の固有周期をもつ振子も作られてはいるが、実用に耐えるものは、30秒が限界である。また地震計と組合わせる検流計については安定に動作するのは周期100秒が限界である。

一方、地上付近の気象条件の中で、温度、風による微気圧変化などが地震計に影響を与え、微気圧変動による空気浮力の変化が上下動地震計のノイズとなり、微気圧の変化による、地表の傾斜変化は、水平振子を用いた水平動成分の地震計に影響を与えている。これらの問題を解決するために、地震計を恒温槽に入れたり、気密容器に収容するなどの方法が用いられている。地中深く、地震計を埋める方法は、短周期地震計については広く行なわれるようになったが、長周期地震計については、小型化が困難であるため行なわれていなかった。これらの制約により、長周期成分の観測は、条件のよい所でも倍率5000倍が限界である。USGSのHGLP・ASRO・SROシステムの開発は、これらの問題点について完全ではないが、一応の解答を与えるものである。

HGLPシステム

固有周期30秒の長周期地震計を用いて、高倍率(数万倍)と低倍率(数千倍)のアナログ記録の外、磁気テープにデジタル記録がとれるようになっている。これによりそれまでできなかった長周期波の観測・解析が可能となった。前記のべたように、長周期地震計は非常に不安定で、設置場所の環境に影響されることが多く、特に風によって水平成分の観測はしばしば故障を生じた。しかしHGLPの観測データから、長周期帯のノイズ発生理論が確立した。小型で地中に埋設可能で、できるだけ周

* Seismological Observatory, JMA: On the Abbreviated Seismic Research Observatory (Received Dec. 18, 1978).

** 松代久義・浜田信生(現気象庁地震課)

期の長い振子の開発, 低雑音の超低周波増幅器の開発が行われ, SRO・ASRO システムが完成された。

SRO システム

SRO システムは, 地中地震計と最新のデジタルデータ処理技術が利用され, 完成した。1974年頃から設置されはじめ 13 か所に設置される計画とのことである。

センサーは周期 5 秒の地震計が用いられ, フィードバックをかけ, 地動加速度に比例した 0.02~1 Hz の広帯域の出力がとれるようになっている。直径 7 インチの円筒内に 3 成分がおさめられ, 地下 100m に埋められて使用される。これによって気象条件(主として風)によるノイズを非常に少なくすることに成功した。

記録システムはアナログ記録とデジタル記録がある。短周期 1 成分と長周期 3 成分のアナログ記録には, ヘリコーダーと称する熱ペン式レコーダー 4 台が用いられている。デジタル記録は短周期 1 秒 20 回のサンプル, 長周期 1 秒 1 回のサンプルで A-D 変換され磁気テープに記録される。長周期は全部のデータが記録されるが, 短周期はトリガーがかかったときだけ記録される。

ASRO システム

SRO 開発と同時に, HGLP 観測所のうち数点に, 短周期上下動地震計を加え, SRO と同等のデータをとれるように改良されることになった。これを ASRO と呼ぶ。

HGLP, SRO, ASRO 等のデジタルデータがとれる観測点は全部で 25ヶ所になる計画とのことである。なお, これらの観測点のデータは WWSSN 同様にデータセンターでまとめられ, 請求があれば研究者に配布されるようになっている。現在までの HGLP, ASRO, SRO の配置箇所を Fig. 1 に示した。

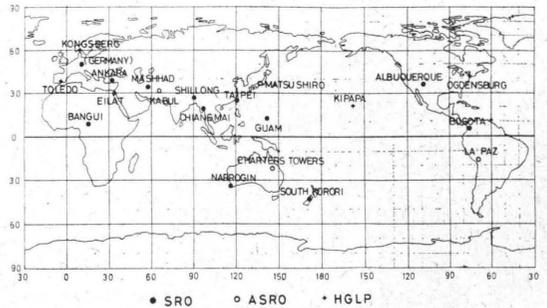


Fig. 1. SRO, ASRO, HGLP 観測点配置図

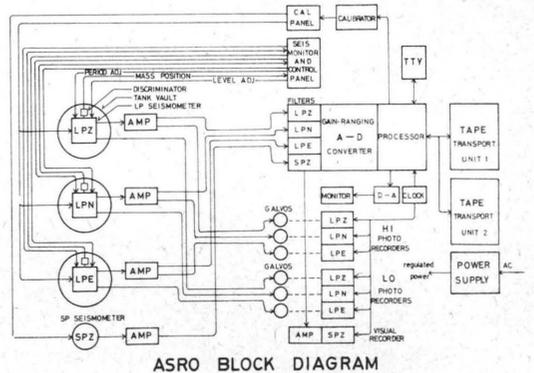


Fig. 2. ASRO システムのブロック図

§ 3. ASRO システムの概要

ブロックダイアグラムを Fig. 2 に示したが, 地震計は今までどおり HGLP の固有周期 30 秒の長周期 (LP) 3 成分と, 新しく固有周期 1.25 秒の短周期 (SP) 上下動 1 成分が加えられ用いられている。地震計は地下坑道内の密閉された部屋におかれ, LP 成分はさらに気密タンク内におかれている (Photo. 1)。これにより, 気圧の変化により生じる振子に与える浮力の変化を大幅に減らすことが可能になった。WWSS の長周期上下動は, 容器が気密でないために, 風によるノイズは三成分中最も大きかったが, この地震計では, 逆に上下動のノイズが最も小さく, 気密タンクでは取除けない傾斜変動による水平成分のノイズが大きくなっている。信号は有線で約 500 m はなれた記録室に導かれている。

アナログ記録は, LP の場合 HGLP と同じで, 地震計から二つの出力があり, 増幅部を通した高倍率 (4 万倍) と検流計 (100 秒) 直結の低倍率 (水平成分 100 倍, 上下 1000 倍) からなり, 今までどおり各々 3 成分ずつ光学記

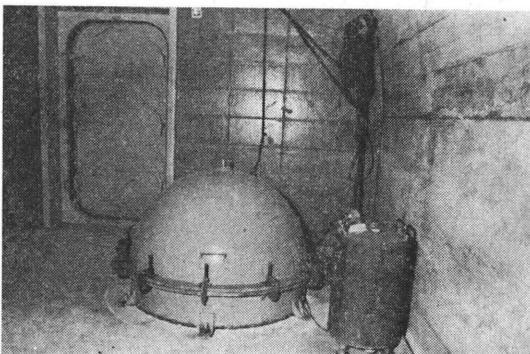


Photo. 1. 長周期地震計及び短周期地震計の変換器

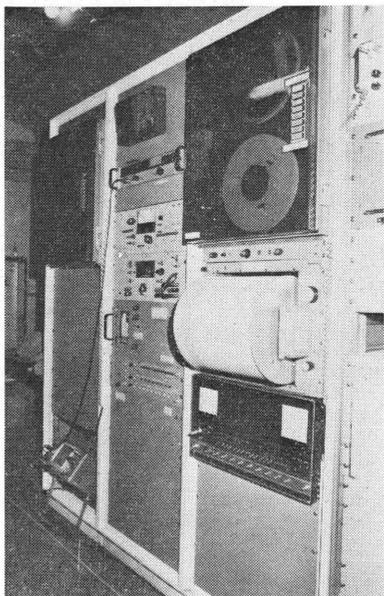


Photo. 2. ASRO 記録システム

録されている。当観測所では WWSSN-LP (3000倍) と組合せて広いダイナミックレンジを確保できるようになった。従来の WWSSN-LP の記録では、どこの観測点でも $M > 7.5$ の巨大地震についてはスケールアウトし、完全な記録が採れていなかったが、この低倍率の地震計では、 $\Delta > 60^\circ$ では $M 8$ クラスの地震についても良好な記録が得られ、利用価値が高いと思われる。

SP は熱ペンレコーダー (ヘリコーダ) で 25,000 倍の記録をとっている (Photo. 2)。この SP 記録は、デジ

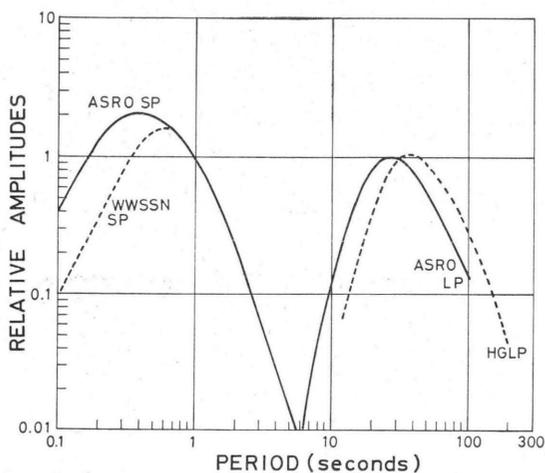


Fig. 3. ASRO システムの地震変位入力に対する周波数特性

タル記録を再生する時の検索に用いられる。Fig. 3 に LP, SP の周波数レスポンスを示した。

デジタル記録は、SRO と同一で 16 ビット 8 K のコアメモリーをもった CPU を記録の制御に使用し、LP・SP 共、増幅器からの出力を、倍率特性を SRO システムと同一にそろえるためのフィルター及び anti-alias filter に通し、LP は 1 秒 1 回のサンプルで連続、SP は 1 秒 20 回のサンプルでトリガーのかかったときだけ磁気テープに記録するようになっている。トリガーはプログラムにより行なわれ、遠地震の P 波 (周期 1 秒前後) を検出することを主眼としている。このトリガー方式は、NORSAR などアレー方式の観測システムで開発されたものを、一点観測にそのまま適用している。トリガー前の記録は、バッファの状態によるが 20~49 秒間記録される。

SP のトリガーのフローチャートを Fig. 4 に示したが、AD 変換されたあと、アナログデータは必要な整数データを取り出し、デジタル的に周期 0.5 秒から 2 秒のバンドパスフィルタで人工的ノイズや、脈動領域の信号をカットする。整流したあと、短期間 (1 秒) の平均 (積分といってもよい) と、長期間 (通常 20 秒だが 10, 20, 40 秒に変更可能) の平均をとる。長期間の平均にはレタイブから入力したスケールファクター A (通常 3~35) を乗じ、短期間の平均と比較し、短期間の平均が 1 秒以上つづけて大きくなればトリガーがかかり、記録をはじめ。記録をやめる場合は記憶しておいたスケールファクター B (通常 3.5~4) を乗じた値より、短期間の平均が小さくなったときである。このようにプログラムトリガー方式は、いくつかのパラメーターを観測点のバックグラウンドノイズの状況に応じて、もっとも地震を、

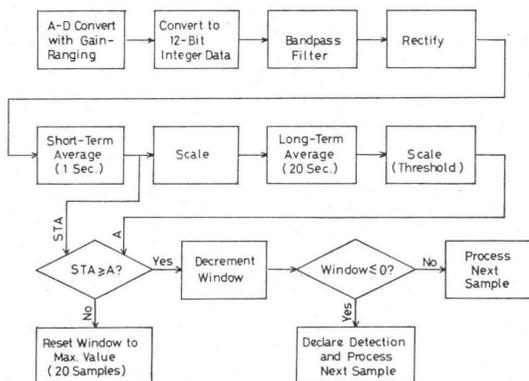


Fig. 4. ASRO 短周期地震トリガー方式のフローチャート

拾いあげる効率が高くなるように設定することが出来る。又、後から、プログラムの改良も可能である。

気象庁で、小地震観測用に展開している67型及び76型電磁地震計では、アナログトリガー方式を用いているため、設定できるパラメーターは、1、2種類に限られ、又、ハードウェアでロジックを組んであるために、後からの改良が困難である。

アナログ記録の場合、そのダイナミックレンジは制限されており、一つの記録で約44 dBである。FM方式のデータレコーダによるテープ記録でも成分あたりのダイナミックレンジは48 dB程度である。デジタル記録の特長は非常に大きなダイナミックレンジをもっていることにある。ASROに使用されている方法は、16ビットのうち4ビットを11 (60 dB) 段階のゲインレンジに用い、分解能を12ビット66 dBにしたため、全体で126 dBの大きさを持っている。実動振幅(周期25秒)で数 $m\mu$ から数百 μ 程度の信号を忠実に記録できる。

HGPLではデジタル記録の制御は、ハードウェアだけで行われ、書き込み専用のテープデッキが用いられたが、SRO・ASROでは、プログラムにより書き込んだデータを必ず読み出してチェックする方法を用いている。大型の電子計算機を使用する計算センターでは、システムの運用を効率よく行うために、使用するデータテープの質をきびしく制限する傾向があり、わずかな記録不良部分があるテープでも、処理不可能となる。従って記録テープの信頼度向上は、記録を利用する上で大きな利点となる。

その他、周辺装置の一つとしてテレタイプがあり、テ

レタイプからの入力でシステムが制御できるようプログラムが組み込まれている。例えば、地震検出パラメーターの変更、地震計の検定、モニターレコーダによるディスプレイ等ができる。SPでトリガーがかかった場合、自動的にそのオン・オフの時刻(時分)が打ち出される。また、システムに何らかの異常を検知したとき、その内容を打ち出すようになっている。

§ 4. 観測結果より

記録例

Fig. 5-aにSPのテープから再生した記録とヘリコーダーに記録されたものを、Fig. 5-b, cにLPのテープから再生した記録とLOの記録を比較したものを示した。テープに記録されたデジタル記録は、必要に応じて再生する大きさ、速度を自由に変えることができ、詳細な観察・解析が可能である。ここに示した再生記録はモニターレコーダによるものだが、アルバカーキにある本格的解析・再生装置では時刻・振幅等必要なデータを表示できるようになっている。

Fig. 6には、松代にあるアナログ型の主な地震計の記録の限界と範囲を示したが、10~100秒の長周期部分では、ノイズレベルから数百 μ までの記録がほとんど切れ目なく可能となっている。ASROデジタルLP記録は、その範囲を一つの記録でカバーできる。

SPトリガーの状況

松代では、最大倍率約36万のベニオフ地震計記録上で全振幅10 mm以上の地震をルーチンの観測基準としている(Fig. 6参照)が、この基準で年4000~6000回の地

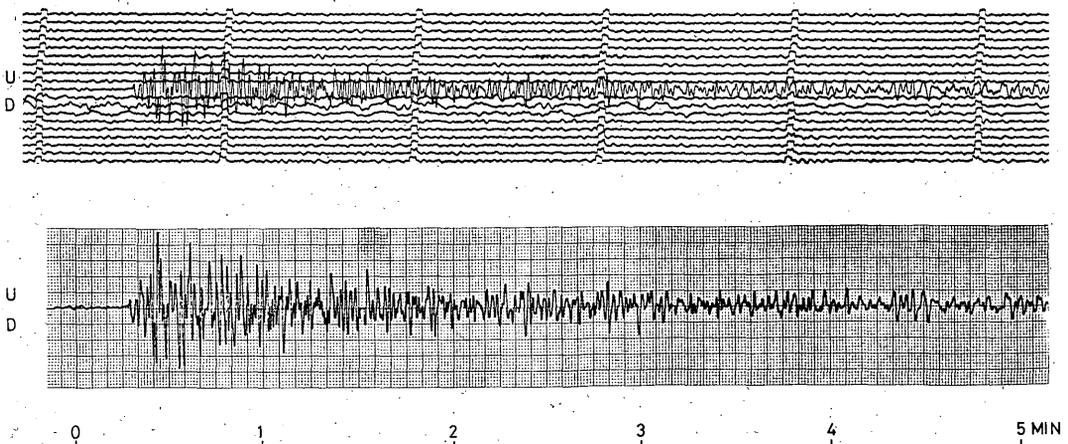


Fig. 5-a. 短周期成分記録の例。上は、ヘリコーダーの記録、下は、デジタルテープから再生したもの。

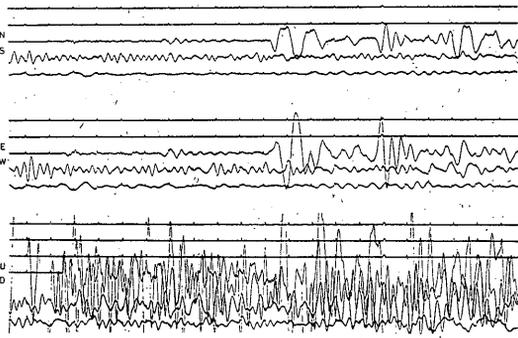


Fig. 5—b. 長周期低倍率の記録

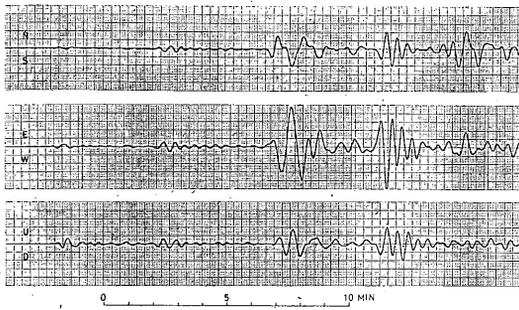


Fig. 5—c. デジタルテープから再生した1978年9月17日イラン地震の長周期成分記録

震を検測・報告している。SP トリガーでは、ルーチンで検測した地震の80%位が記録されている。

記録できなかった地震は、松代地震のような短周期の近地震がほとんどで、遠地震に対する動作は非常に良い。このトリガー方式は 2 Hz 以下の短周期成分の信号については除外するようになっているので、この結果はむしろ当然であろう。SP トリガーレベルはそのときのノイズレベルによって変動するので、ルーチンの検測基準とは一概には比較できないが、周期 1 秒前後では平均して同等と考えてよい。また脈動振幅の変化に対し、良好な動作を示し、現在用いているトリガーレベルは、遠地震を捕捉するには適当であると考えられる。Fig. 7 にトリガー例を示す。

LP の近地震に対する応答

振子とバネを用いた地震計では、大きな加速度を伴う振動に対する応答が問題となる。ASRO, SRO でもその例に洩れず、およそ 0.1 ガルを超えると変換器は正常に動作せず、良好な記録は得られない。近地震を解析する場合は注意が必要である。Fig. 8 (左) に記録不良の例を示す。

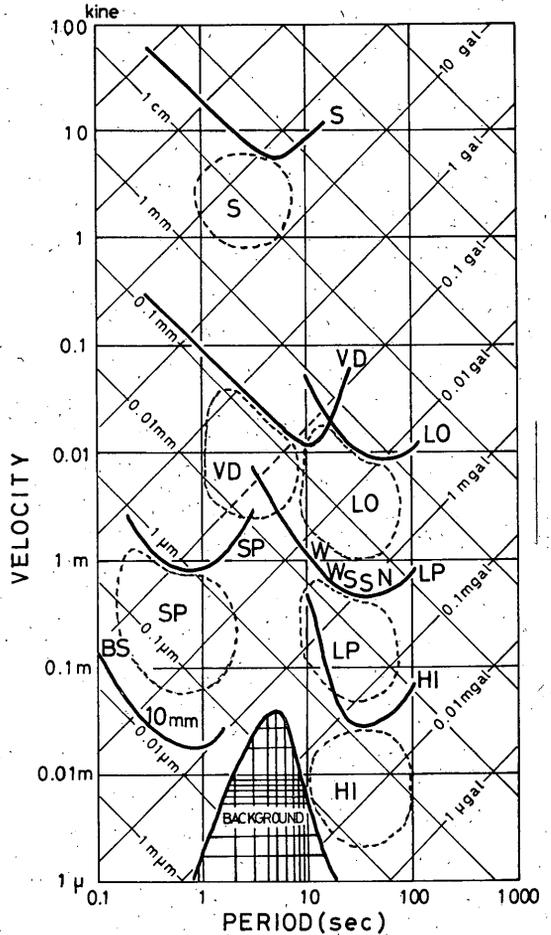


Fig. 6. 松代の各地震計で観測可能な地動振幅、周波数範囲。

有感の松代地震等の極近地震の場合も、ほとんど忠実な記録は得られない (Fig. 8 右)。

震源過程などを調べるために near field の長期周強震動を忠実に記録する必要性が叫ばれているが、気象庁で現在計画中の大震計についても、この点は今後克服されなければならない問題である。

LP の位相のおくれ

デジタル記録については、周波数特性を SRO システムに合わせるための増幅器・フィルタ等による位相の遅れが大きく、インパルスに対し、見かけ上約 13 秒の遅れがある。

アナログ方式の検流計直結の記録方式では、地動に対する記録の応答関数が単純な形で、正確に求められているのに対し、増幅器を用いた場合、その応答関数は複

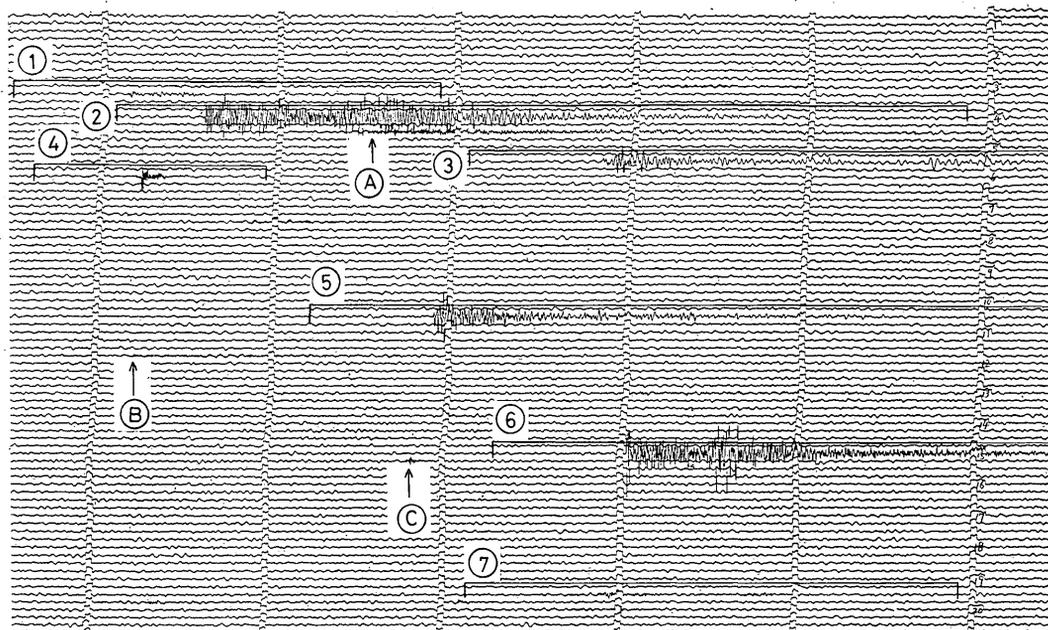


Fig. 7. 短周期成分記録の例。数字を付したものはトリガーがかかった地震を示し、英文字はトリガーされなかった地震を示す。

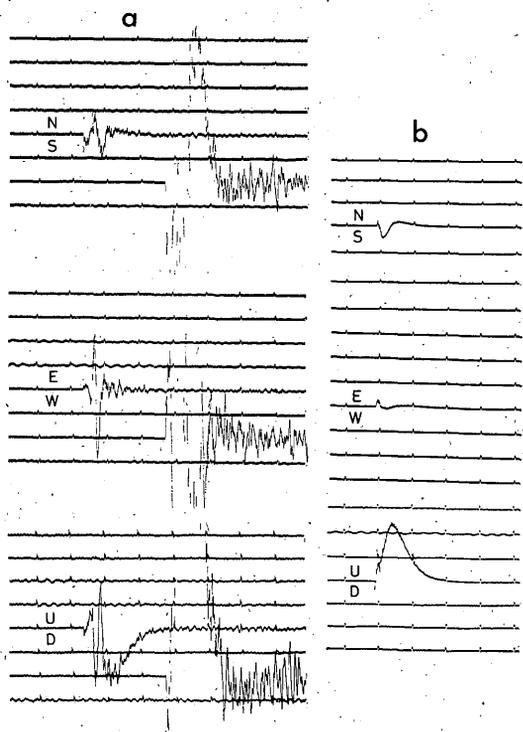


Fig. 8. 近地震の大きな加速度による正常でない記録の例。(左図)
松代地震の記録例。(右図)

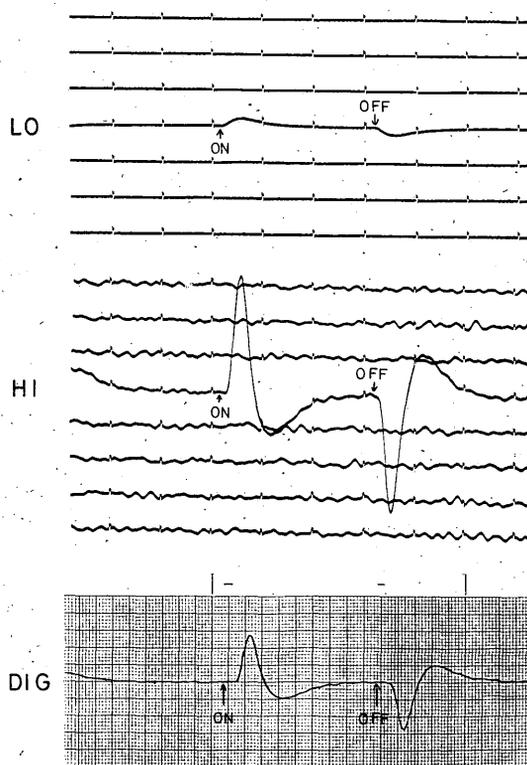


Fig. 9. 検定パルスの記録。

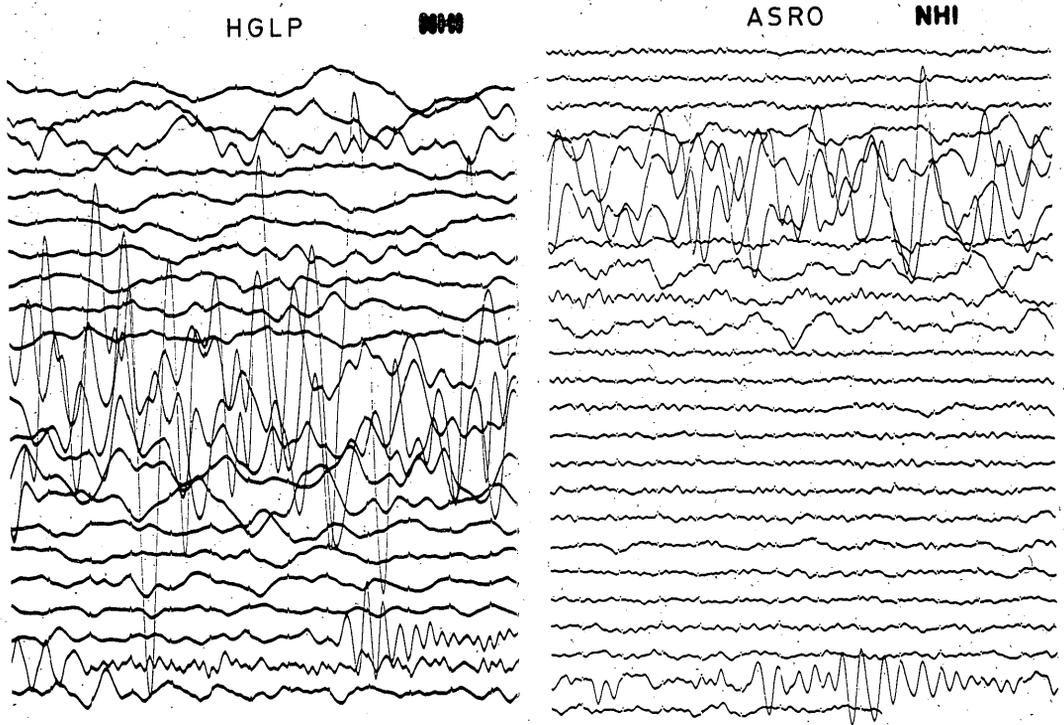


Fig. 10. 風による長周期成分ノイズの記録（南北成分）.

雑となり、SROについては最近、応答函数の近似式が報告されているが、信号が増幅器および二つのフィルタを通るASROについてはまだ報告されていない。位相特性が軽視されているのは、このシステムがより小さい地震についてまで、表面波マグニチュードを決めることを目的とし、振幅特性を重視している結果によるものと考えられる。しかし、地震波の理論合成波形と、観測波形を比較する上では、位相特性が明らかにされていることは不可欠であり、今後明らかにされることが望まれる。

なお、増幅器だけをとおしたアナログ記録HIでもインパルスに対し見かけ上6~7秒の遅れがある(Fig.9参照)。

気圧の影響（風によるノイズ）

HGLPでは長周期側に特性を伸ばしすぎたきらいがあり、ASROでは長周期側の感度をやや低くするように改められた。このため長周期のScSなどの相は見づらくなったが、動作は安定となった。しかし、風など気象条件による影響は依然存在する。松代の観測壕は他のHGLP、ASROの観測点に比べ、ノイズは小さく環境はすぐれていると言われているが、地中地震計を用いたSROシステムには及ばないようである。

HGLPとASROの水平動記録を比較すると、Fig. 10はいずれも強風による乱れが大きいものを示したが、HGLPの方が周期数分といった長周期の乱れが全体に多い。そのときのノイズの大きさと、風速についてみると、Fig. 11のような関係が見られる。HGLPのときには瞬間風速が5 m/s以上になると記録の乱れがはじまり、10 m/sをこすと記録紙上の振幅が50 mmをこえる。ASROになってからは10 m/sでもほとんど影響がないこともあり、乱れは記象紙上ではほとんど目立たなくなった。強風によるノイズは、主として気圧差による地盤の傾斜に起因し、水平動地震計で周期1~2分の振動となって現われる。その傾斜角は、風速10~15 m/sで0.003~0.004秒角程度である。風によるノイズは、その波長だけの深さまで影響があると言われるから、本格的SROシステムでは地中地震計を用いて地下に100 m埋設しているので、ノイズははるかに小さくできるものと思われる。

§ 運用・保守

SRO・ASROシステムは設置する前に、設置する観測所の職員を1~2名、アルパカーキ地震観測所によ

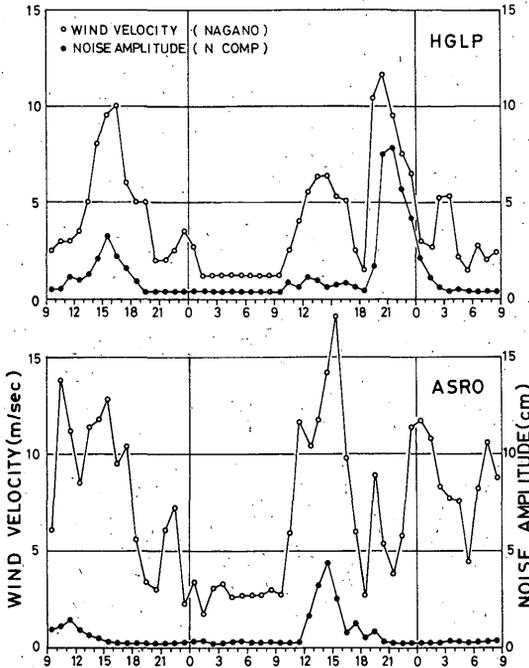


Fig. 11 風と風によって生じる長周期成分ノイズの関係を示す。白丸は、長野地方気象台(松代地震観測所から約10 km)で観測された平均風速 m/sec (毎時間値)。黒丸は ASRO 地震計記録上のノイズ振幅。

び、5週間の研修を行なっている。研修ではシステムの解説、運用、保守等、実際のシステムを用いて行なわれる。特に故障箇所発見に主眼をおいているように見受けられる。

故障の場合、現地には予備品が一切ないので、どの部分(モジュール単位)が故障なのか判断し、アルバカーキ地震観測所の担当者に直接電話連絡する。あるいは故障状況について相談すると、適切な指導を受けられる。故障箇所発見には10数種のテストプログラムが用意されており、それにより比較的容易に見つけ出すことができる。故障箇所がわかると必要な部品が送られてきて、交換すると修理できるようになっている。しかし、電話連絡をしてから部品到着まで約2週間かかる。故障が複雑で、現地で修理できないときは、修理班が出張してくる。アルバカーキ地震観測所では世界各地に配置した WWSSN・HGLP・SRO・ASRO等百数十箇所のシステムの保守を受けもっているが、わずか5~6名の修理班で行なっている。修理班は常時世界各地をたび歩いて修理点検の作業を行なっている。

松代の故障状況を見ると、特に CPU メモリー、イン

ターフェイス関係の故障が多い。CPU に用いられているミニコンは現在では旧型に属し、CPU の回路基板の故障は、新しい型のミニコンでは、ほとんど問題にならないものと想像される。

§ 6. あとがき

SRO・ASRO システムは今後の地震観測方法を示唆しているように思われるが、運用・保守をとおして気がついたことを2, 3述べておきたい。

装置の取扱いは定められたとおり行なっておれば簡単であり、わずかの説明で、初めての者でも可能である。松代では、毎日の点検、記録交換は当番者がルーチンの一部として行なっている。週1回の検定・点検、2週間毎のテープ交換等は専任の者が行なっているが、問題はほとんど起らない。取扱いが簡単であることは新しいシステムを開発するとき重要な条件の一つであろう。

故障のときは、運用・保守の項で述べたように、故障診断のプログラムが用意されており、時間はかかるが故障箇所を発見することは可能である。しかし、このシステムは少なくとも気象庁で観測に供されている如何なる地震計よりも複雑で、運用に手間がかかることもまた事実である。現在の気象台・測候所で運用することは、余程保守費をかけ、職員の研修を行なわない限り困難であろう。しかし、運用に必要な手間と、得られる記録の量と質から見れば、効率のいい器械であることも確かであろう。

USGS アルバカーキ観測所では、各観測点に留めておく保守部品を最小限に押え、主な保守部品はアルバカーキで全て管理し、職員自ら修理運用している。こうすることにより、寝かされて使用されない保守部品を減らすことが可能で、また製造中止された部品についても、合理的な運用により観測に支障をきたさないようにすることができる。WWSS システムの主要部品は、現在ではほとんど製造中止になっているにもかかわらず、世界中で現在も観測が続けられているのは、このような運用方式による所が大きい。

CPU で制御する方式の観測器械は、今後急速に普及するものと考えられる。それは電子回路の集積度が進み、マイクロコンピュータの登場に見られるように、CPU の小型化、低価格化が進みつつあるからである。ASRO システムの中にも、制御用の CPU の他に、マイクロコンピュータがすでに使用されている。それは、検定信号発生回路である。この回路は従来のアナログの発振器と異なり、マイクロコンピュータに、D-A変換器

が組合せになっており、デジタル的に信号を合成している。この方式では、振幅および周期の極めて正確な信号を発生させることができ、超低周波の領域では極めてすぐれた性能を発揮している。CPUに相当する素子を、いくつも含んだ器械が登場することも、そう遠くないと思われる。アルバカーキ観測所では、すでにSRO・ASROのミニコンをマイクロコンピュータに置きかえる技術開発に着手していた。松代でも、現在マイクロコンピュータを地震観測へ応用する試みをいくつか行っている。

デジタルテープの記録は、現在の所、日本国内では入手できないようである。しかし、松代で得られた記録をコピーする事については了解が得られているので、コピーは可能である。しかし、XYプロッタなどの端末装置が、今の所使用できないので、データの活用は著しく

制御されてしまう。これらが利用できるようになれば、有用な記録を編集したりして調査に有効に利用することも可能になる(ただし、目的にもよるが1か所のデータではどうにもならないことが多い)。

参 考 文 献

- McCowan, D. W. and R. T. Lacos (1978) : Transfer Functions for the Seismic Research Observatory Seismograph System : *Bul. Seism. Soc. Am.*, **68**, 501-512.
- Peterson, J. and N. A. Orsini (1976) : Seismic Research Observatories : Upgrading the Worldwide Seismic Data Network : *EOS*, **57**, No. 8 August 1976.
- Peterson, J., H. M. Butler, L. G. Holcomb, and C. R. Hutt (1976) : The Seismic Research Observatory : *Bul. Seism. Soc. Am.*, **66**, 2049-2068.
- Unitech (1974) : Operation and Maintenance Manual, Seismic Research Observatory Data Recording System. Unitech Inc. Austin, Texas