

無線制御による地震観測システム

瀬戸憲彦*・中村正夫*・北浦泰子*・田上貴代子*

Radio-controlled Seismograph System

Norihiko SETO*, Masao NAKAMURA*, Yasuko KITAURA* and Kiyoko TAGAMI*

Abstract

To analyze the micro-structure below the Kii Peninsula using multi-observation sites, we have developed a radio-controlled seismograph system. This system has the following characteristics :

- 1) Using VHF (60 MHz) band radio frequency, it has a large control area.
- 2) Using a GPS clock, it can ensure the time accuracy of each observation station.
- 3) Data loggers at each observation sites are controlled by radio commands (DTMF signal) at the same time, with which we can increase logging efficiency.

For this purpose, we produced 200 VHF receivers (including DTMF decoders) and 50 data loggers. Using this system for operations, we obtained suitable data sets for analyzing the structure.

Key words : Radio-controlled Seismograph System, VHF (Very High Frequency), GPS clock, DTMF (Dual Tone Multiple Frequency)

はじめに

多点地震観測による、地殻構造の解明のため、無線制御による地震観測システムを開発した。図1にシステムの概念図を示す。このシステムは一つの無線制御送信装置と複数の観測装置からなっている。各観測点の一つの無線制御送信点からの制御信号により同時に収録制御される。常時は時刻のスローコードを送信し、自然地震発生時は自動、爆破観測などの場合は手動により収録制御信号が送信される。このシステムは次のような特徴を持っている。

- 1) 時刻信号は無線によって送られるため、各観測点の収録装置は時計を持つ必要がない。これにより高精度の相対時刻を確保することが可能となる。
- 2) 60 MHz 帯の無線周波数を使用することによって、広範囲な観測網を展開することができる。特に見通し外におけるこの周波数帯の伝播特性の良さがこのシステムを支えている。
- 3) 同時に収録装置を起動することにより収録効率の良い観測を可能とする。

制御用無線周波数の伝播特性

無線制御による地震観測システムの制御範囲は、使用される無線の伝播特性に依存する。地震研究所は移動無線テレメータのため、複数の VHF (60 MHz) 帯周波数を確保してきた。このシステムでは、これらの VHF 帯周波数の伝播特性を生かすことによって、広範な観測範囲を得ることを可能にした。

無線の伝播において、その自由空間損失は周波数と距離の関数であらわされる。例えば、今回使用した VHF 帯周波数と出力によって、どの程度の観測範囲を確保できるかを見積もってみる。送信局の仕様は以下の通りである。

- 1) 送信機の出力 10 (W) $P_t=40$ (dBm)
- 2) 送信アンテナゲイン (無指向) $G_t=0$ (dB)
- 3) 同上ケーブル損失 $L_t=3$ (dB)
- 4) 受信アンテナゲイン (無指向) $G_r=0$ (dB)
- 5) 受信アンテナケーブル損失 $L_r=3$ (dB)
- 6) その他の損失 (フェージングなど) $C=10$ (dB)

dBm は電力の単位で、1 (mW) を 0 (dB) で表したもので、下記の式による。

$$10 \cdot \log (\text{Power}/1 \text{ mW})$$

L_f , D , F , P_r をそれぞれ、自由空間伝播損失 (dB), 距離 (Km), 使用する周波数 (MHz), 受信機の入力電力とすると、これらの間には (2) 式に示す関係が成り立つ。また、自

1999 年 8 月 30 日受付, 1999 年 10 月 26 日受理.

* 東京大学地震研究所地震地殻変動観測センター和歌山地震観測所.

* Wakayama Earthquake Observatory, Earthquake Observation Center, Earthquake Research Institute, University of Tokyo.

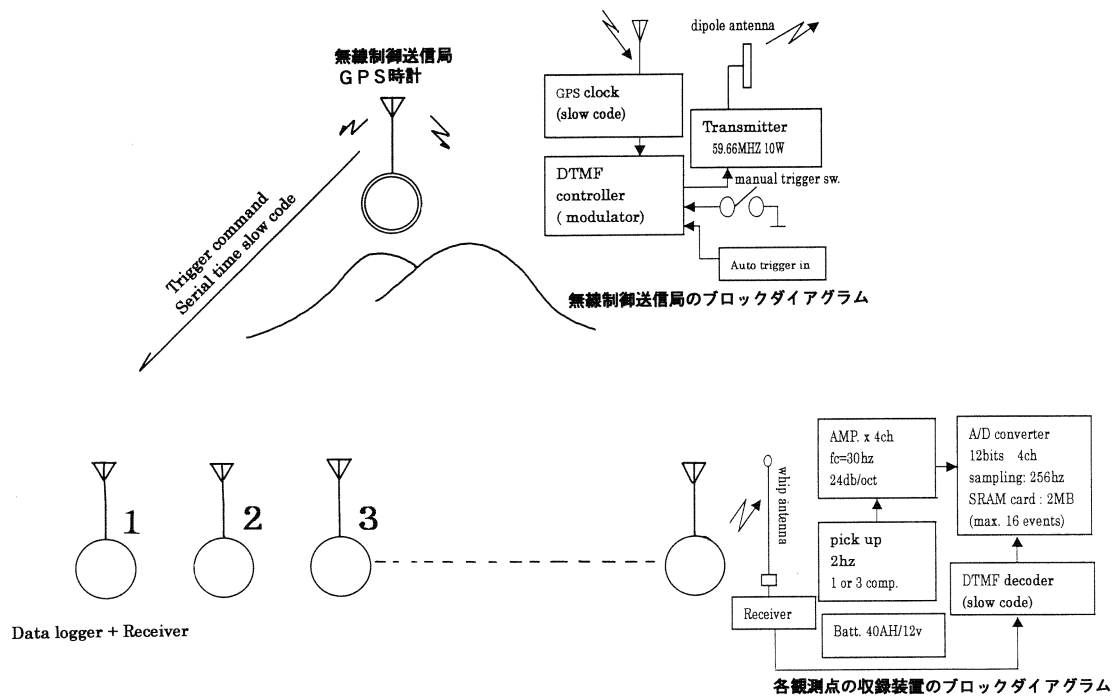


図 1. 無線制御による地震観測システムの概念図

観測地域が見渡せる場所に無線制御送信局を設置し、そこから各観測点の収録装置をコントロールする。常時は GPS 時計による時刻のスローコードを放送する。

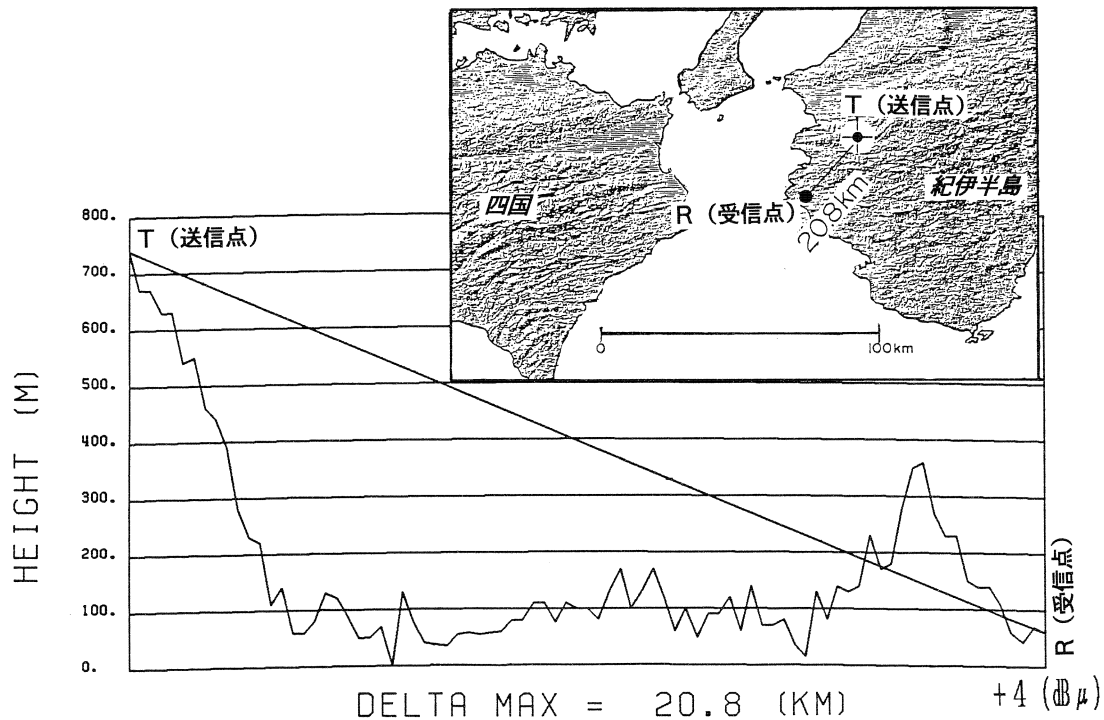


図 2. VHF 帯周波数の電波伝播観測例

横軸は距離。この場合は 21 km。縦軸は高さ (単位 m)。T は送信点、R は受信点。見通し距離外であるが VHF 帯周波数が持つ回折特性により約 4 (dBu) ($1\mu\text{V}/\text{m}$ を 0 dB とする) の受信レベルを得ている。この程度の受信レベルでも収録制御が可能である。この場合の制御送信側無線機の出力は 10 W、アンテナはスリーブアンテナ (垂直無指向特性)、受信アンテナはホイップアンテナ (垂直無指向特性) である。

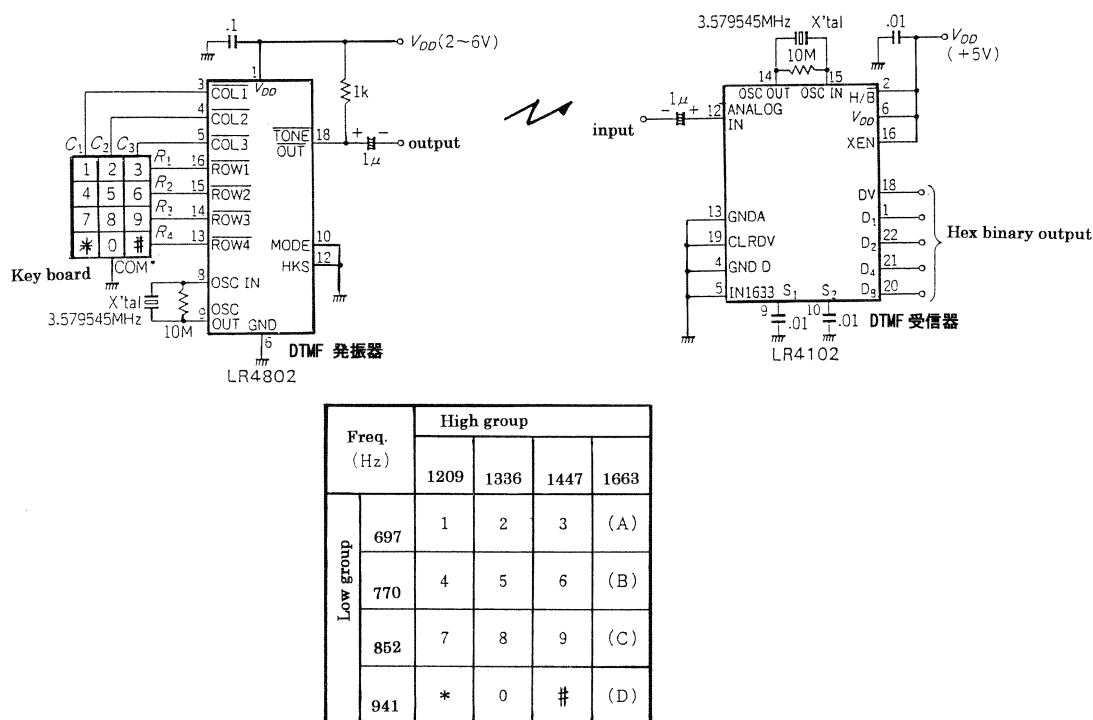


図 3. 左上はDTMF 変調器，右上は同復調器である。いずれもワンチップ IC を使用した簡単な回路で構成できる。表は 8 種類の周波数 (high group, low group おおの 4 波) の周波数から 2 波の組み合わせで DTMF 信号を作成している。例えば，# のコマンドは 1,447 Hz と 941 Hz により作られる。

由空間伝播損失 L_f は (3) 式で表される (竹田ほか, 1976)。なお (1) 式の C (その他の損失) については固定局間の回線設計ではないので厳密に考慮していない。

$$P_r = P_t + G_t - L_t - L_f + G_r - C \quad (2)$$

$$L_f = 32.45 + 20 \log D + 20 \log f \quad (3)$$

仮に受信機の必要入力電力 P_r を、概ね -100 (dBm) (この値は受信機の S/N を 20 (dB) 程度確保するための受信電力)，使用する周波数 $f=59.66$ (MHz) とし，上記条件を代入すると，受信電力 P_r は (1) の条件及び (2) 式から，

$$\begin{aligned} P_r &= 40 + 0 - 3 - L_f + 0 - 10 \\ &= 27 - (32.45 + 20 (\log D + \log f)) \text{ となる。} \end{aligned}$$

受信機が必要とする所要受信レベルを $P_r = -100$ (dBm) とすると，

$$\log D = 2.9 \quad (4)$$

よって $D=794$ (Km) となり，この受信機が受信できる距離 D は計算上約 800 (km) ということになる。この距離はあくまで見通し内での値であるので現実的ではない。すなわち，この距離 (電波の見通し距離) を確保するためには地球の球面を考慮すると高度約 13,000 (m) を必要とする。

現在，和歌山地震観測所は生石山地震観測中継局に制御送信局を設置している。この場所 (高度約 860 m) から半径 50 (km) の地点における受信電力を計算してみると，概ね -75 (dBm) となる。この値は受信機が必要とする電力に対し，約 25 (dB) のマージンを持つ。実際の観測におい

ての伝播の形態は見通し外である場合がほとんどであるが，見通し外であっても VHF 帯周波数が持つ回折特性がこれを可能にする (例えば図 2 参照)。受信電力のマージンとして約 25 (dB) 確保できる程度の距離 (この場合は 50 km) を安定して無線制御できる距離，すなわちサービスエリアとする。もちろん少数の観測点で，アンテナにゲインを持たせることによって距離を稼ぐことは可能であるが，本システムの使用形態はホイップ型のアンテナを使用し，あらかじめ厳密な受信レベルを確認しない場合を想定した観測である。

DTMF 制御信号

各観測点の収録装置を制御することと時刻信号 (スローコード) を送るために DTMF (Dual Tone Multiple Frequency) 信号を使用している。この信号は 8 種類の可聴周波数から 1 対の組み合わせにより 16 種類の制御信号 (DTMF) を作っている。図 3 はこれらの周波数の組み合わせを示している (シャープ半導体データブック, 1992)。DTMF 信号は，二つの周波数を使用することによって誤動作に強い制御信号となる。また，簡単な回路で発振受信を可能とし，同時に水晶発振器の使用により安定した動作を確保することができる。ただし，DTMF 変復調回路において若干の時間遅れを生じる。この値は受信機の入力電力にはほぼ無関係に一定である。

制御信号送信システム

制御信号送信側のブロックダイアグラムを第4図に示

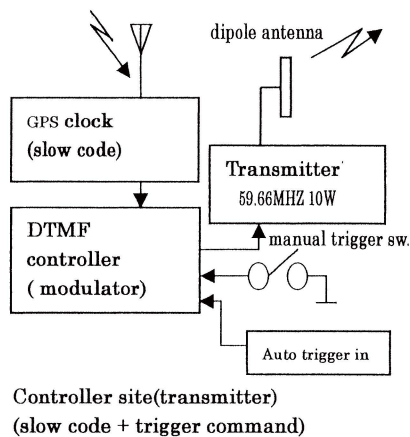


図 4. 制御信号送信システムのブロックダイアグラム
GPS 時計, DTMF 発振器, 10 W 送信機からなる。送信アンテナは通常、無指向性のものが使用されるが、観測点が直線上にある場合は、受信電界を得るため3素子型八木・宇田アンテナ（指向性を持つもの）を使用する場合がある。送信機の電源は通常 100 V が使用されるが、バッテリーでの駆動も可能である。

す。これらは GPS 時計, DTMF 変調器, 10 W の VHF 送信機からなる。アンテナは、平面上に観測点がある場合は無指向性のものが使用されるが（スリーブアンテナなど）、直線上にある場合は指向性を持った八木・宇田アンテナが使用される。システムの仕様を下記に示す。図 5 は DTMF 発振器, GPS 時計, VHF 送信機で構成される制御送信局側のシステムの写真である。現在これらの制御システムは

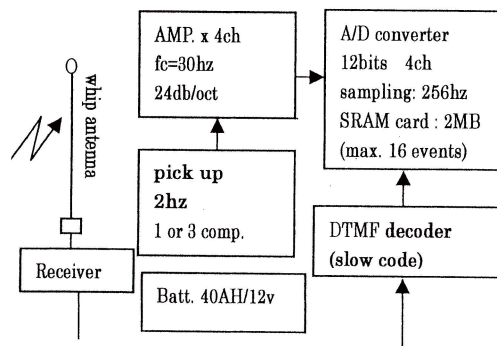


図 6. 各観測点における収録システムのブロックダイアグラム
ホイップアンテナ, 受信機, 地震計, アンプ, A/D コンバーター, DTMF 復調器からなる。電源は車用バッテリー（約 40 AH/12 V）を使用する。連続で 15 日間稼働可能。

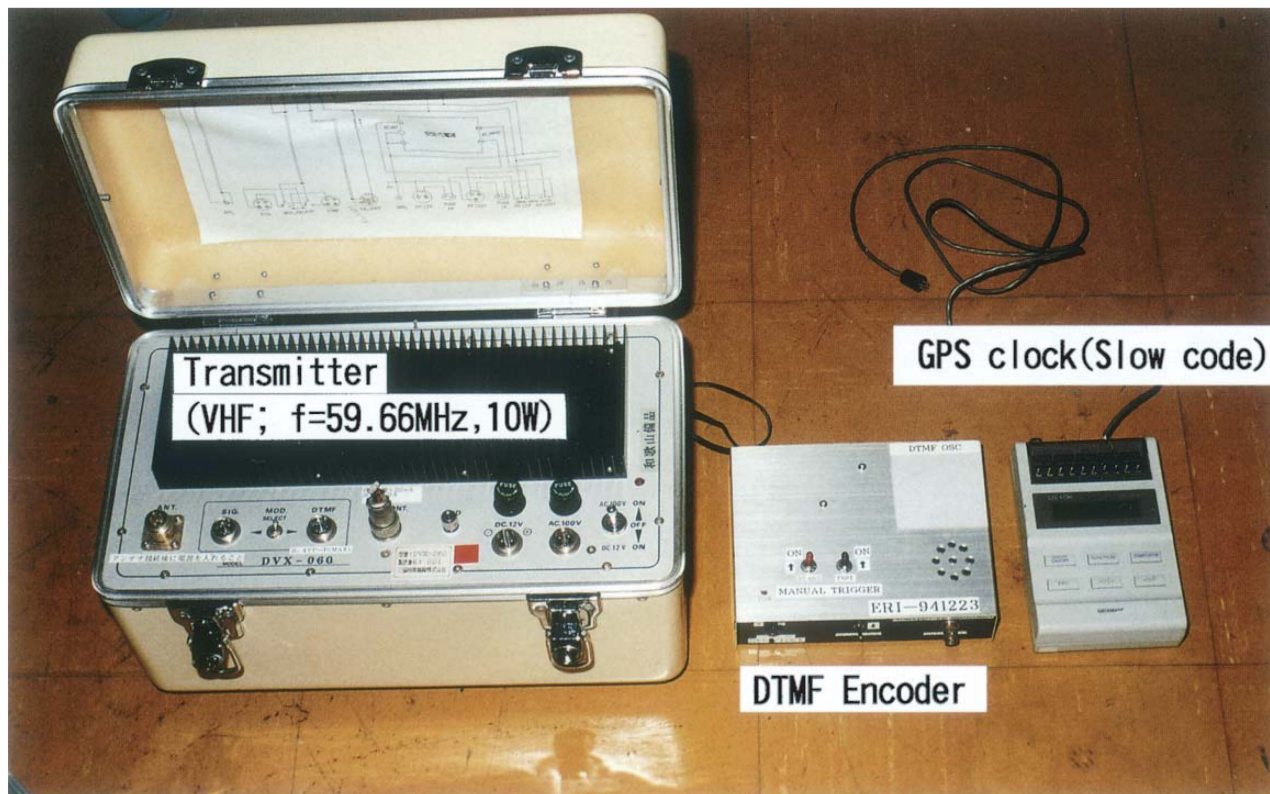


図 5. 制御送信側システム
左から, VHF 帯送信機 (59.66 MHz), DTMF 発振器, GPS 時計 (スローコード)

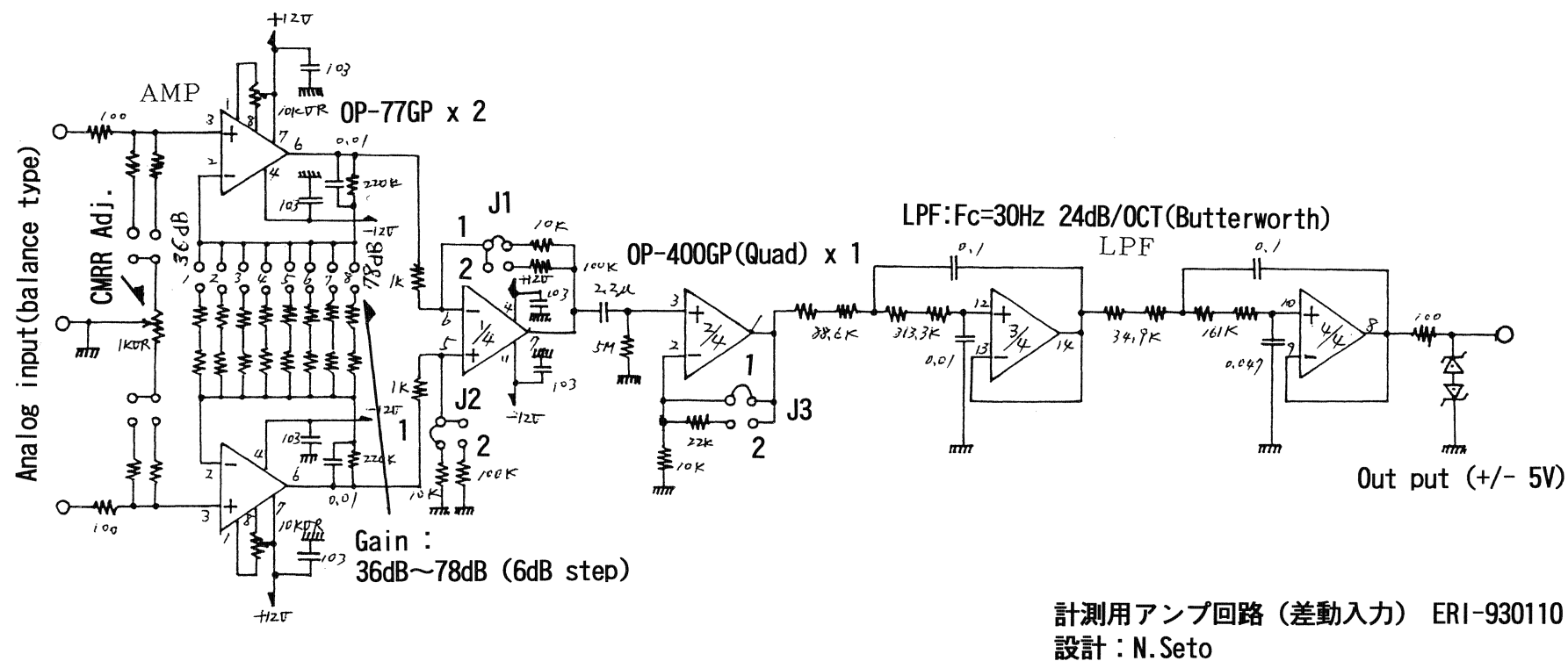
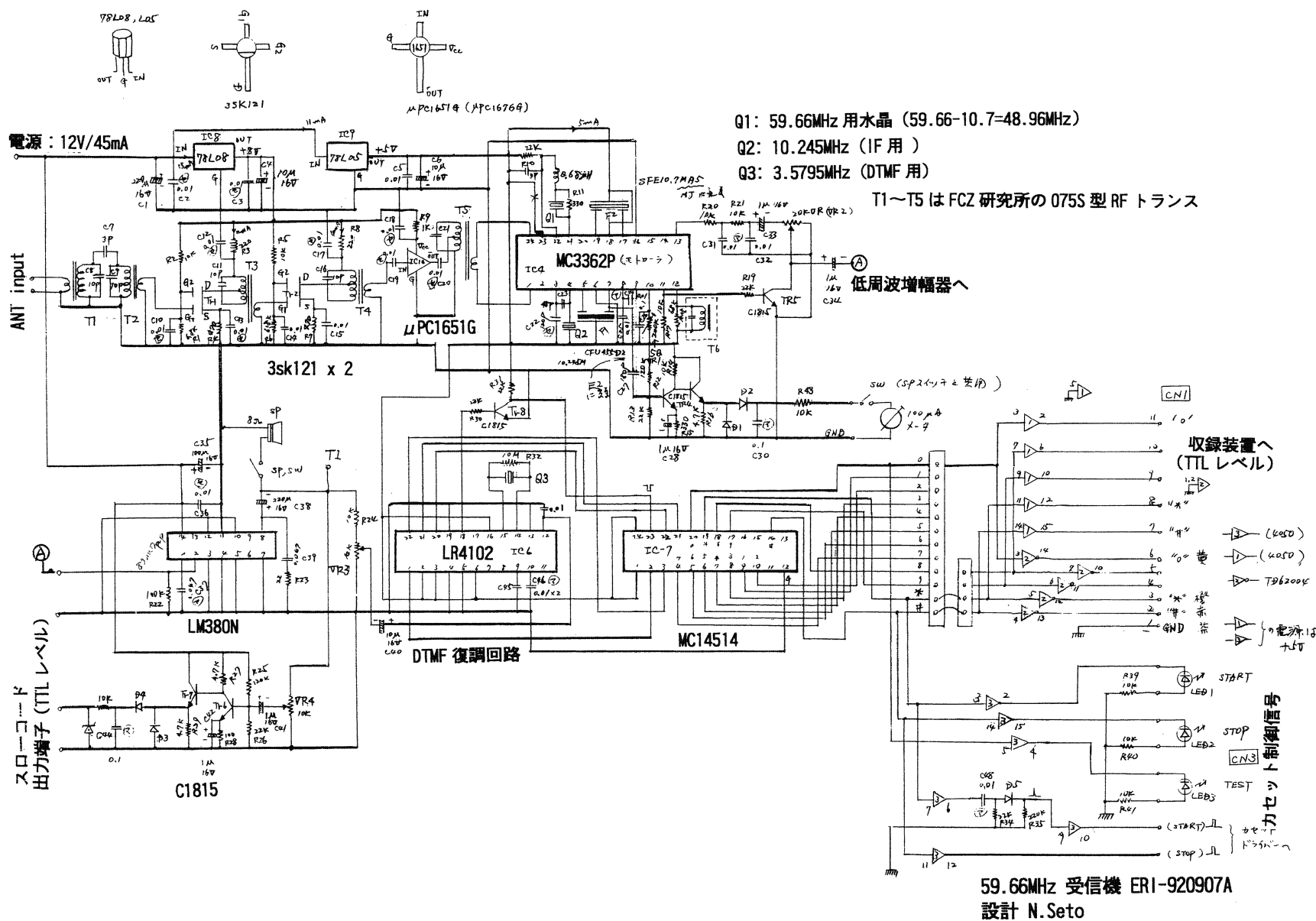


図 7. 計測用アンプ回路 (差動入力). 4 チャンネル分を一つの基板に作製. 増幅度は, ジャンパースイッチ J1 が 1 側, J2 が 1 側の時 36dB~78dB となる. J3 を 2 側に接続することによりさらに 6dB 増す.



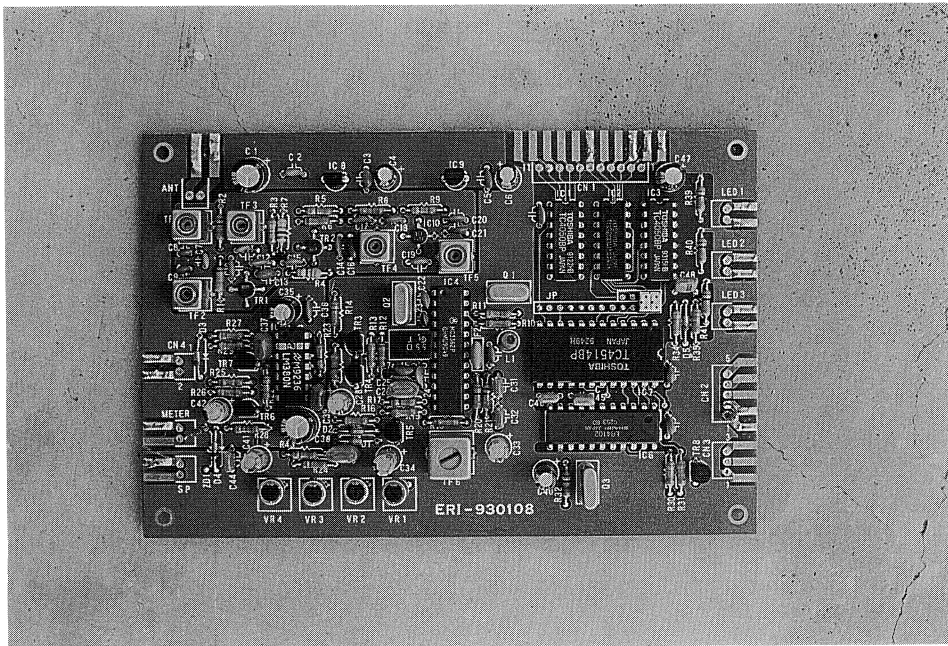


図 11. 59.66 MHz 受信機および DTMF 復調器基板



図 12. 図 11 の基板をケースに実装した状態。アンテナを含む。

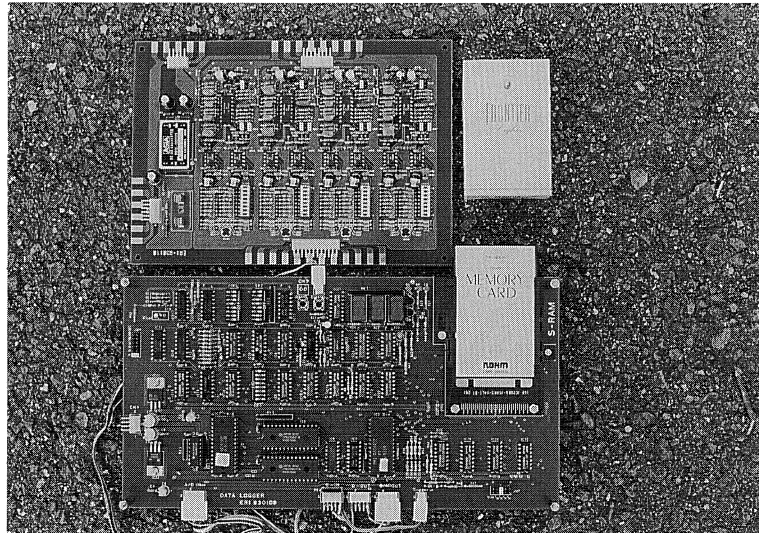


図 13. 上は4チャンネルアンプ基板，下はカードメモリーを使用した収録制御基板（A/D，遅延回路，メモリーカードを含む）。

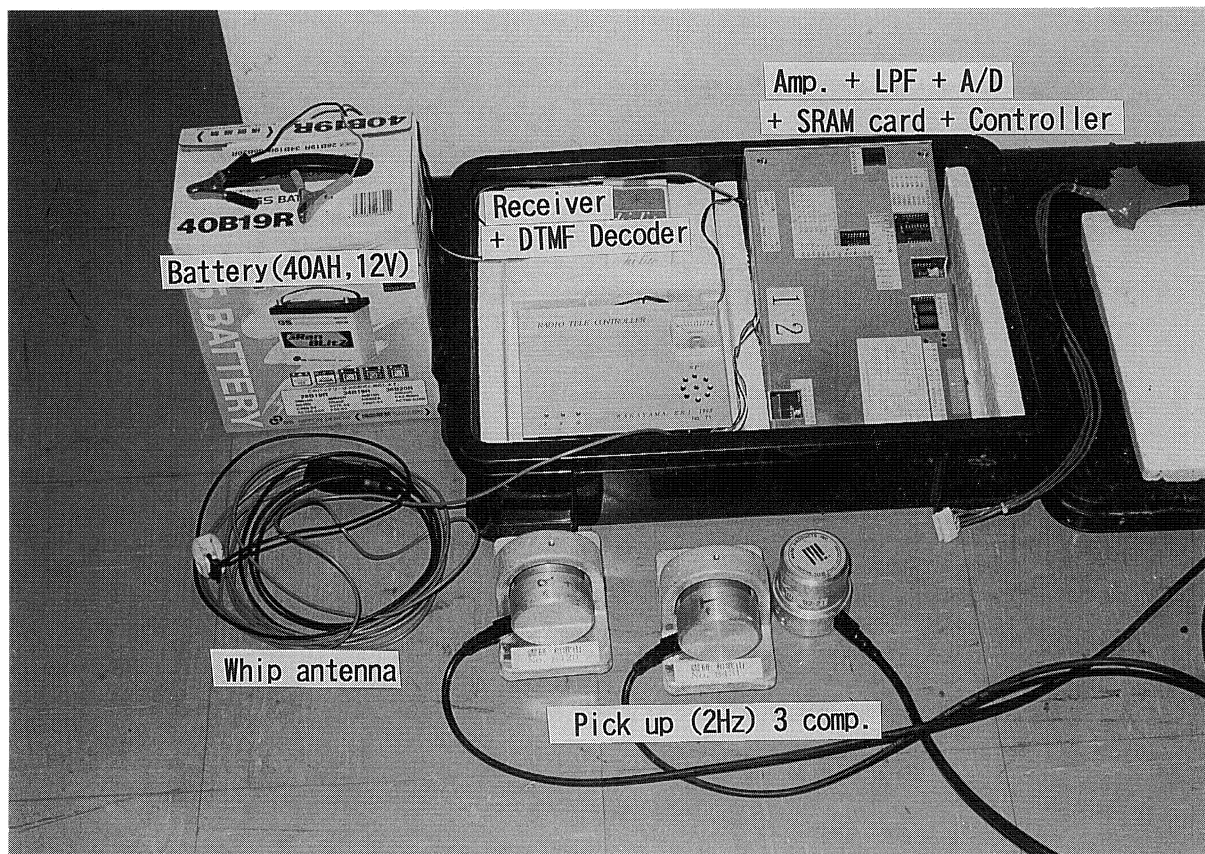


図 14. 観測点で使用する収録システム一式
VHF 受信機（DTMF デコーダーを含む），アンプ+LPF+遅延回路+S-RAM カード，ホイップアンテナ，バッテリー，地震計（2Hz，3成分）。

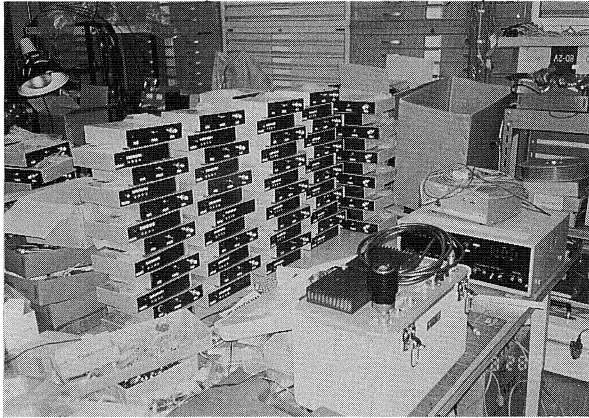


図 15. 受信機 200 台の板金およびコネクタ類取り付け状況

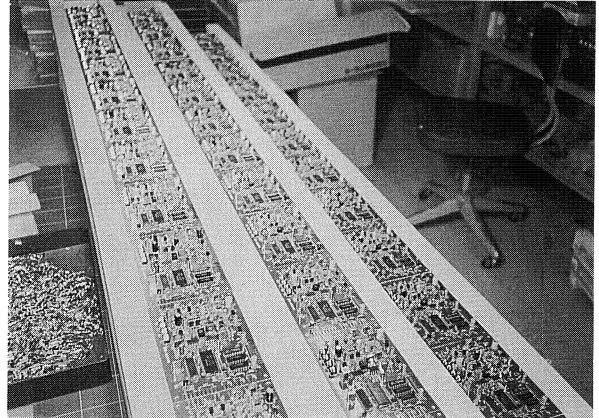


図 18. 部品を基板に取り付けた状態

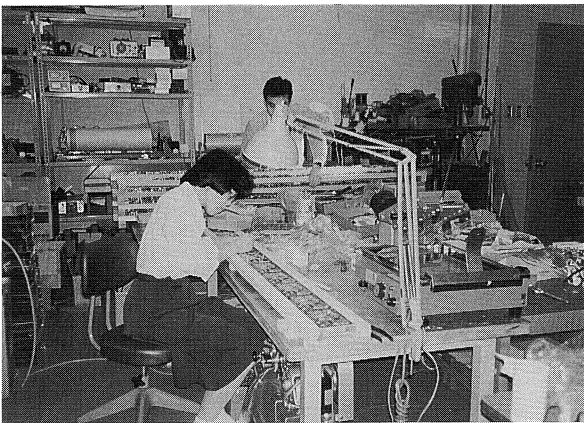


図 16. VHF 受信機作製（基板に部品を取り付ける）

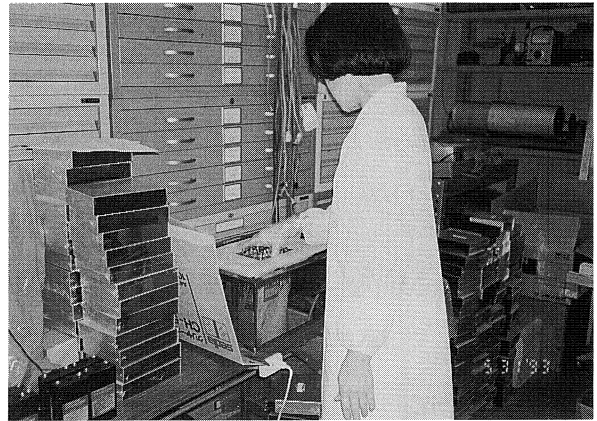


図 19. 基板に部品を取り付けた後、ハンダ上げをするため、泡状のペースト（松脂）をつける作業。

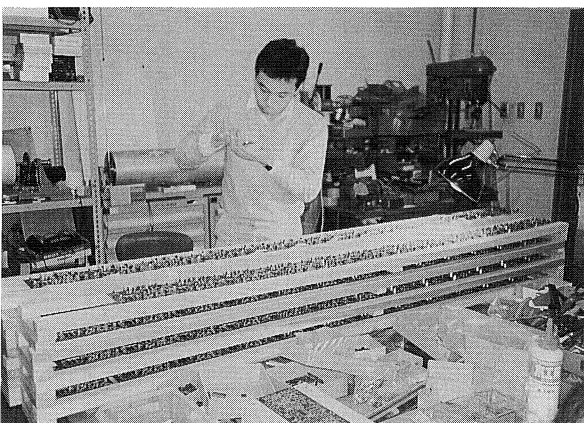


図 17. 大量の基板に部品を取り付けるため専用の架台を用いた。

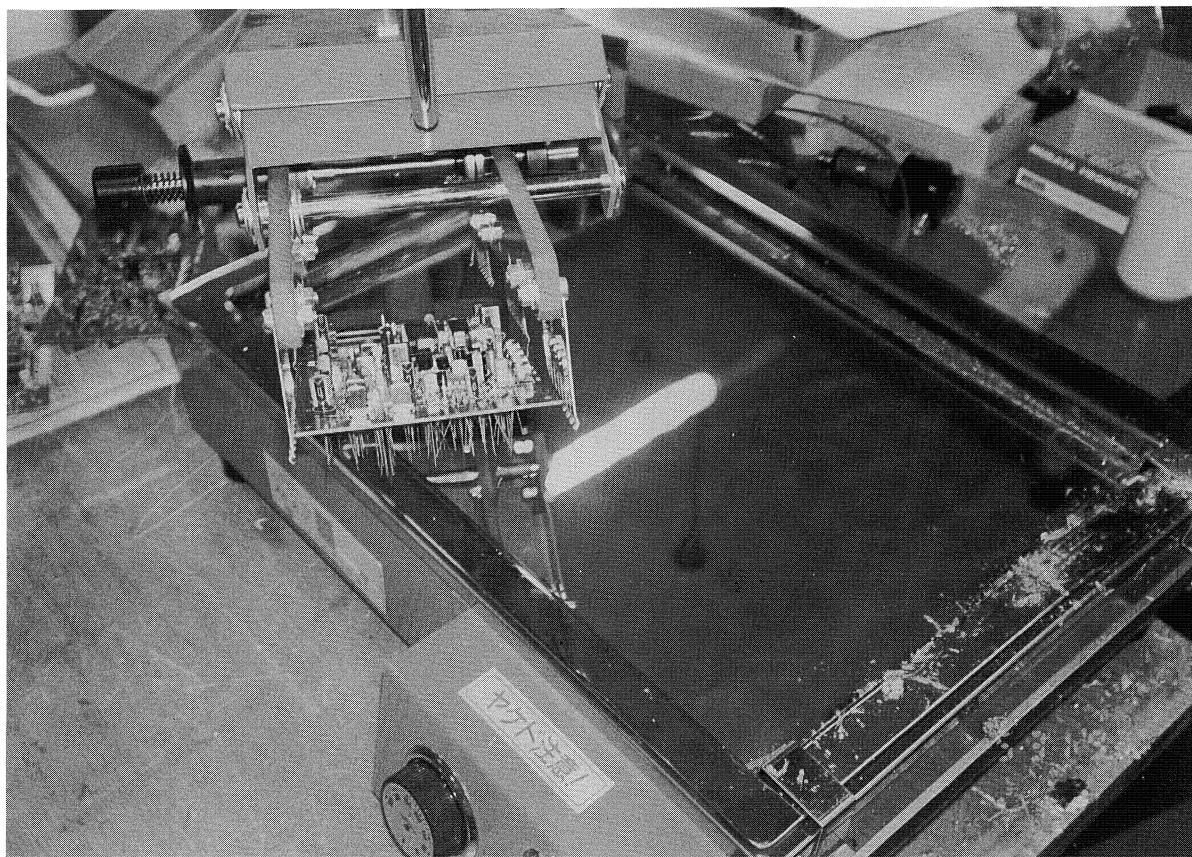


図 20. ハンダ槽を使用したハンダ上げ。一枚の基板は約 10 秒程度でハンダ付ができる。



図 21. 受信基板をケースに実装した後，SG（RF Signal Generator）を使用して調整される。

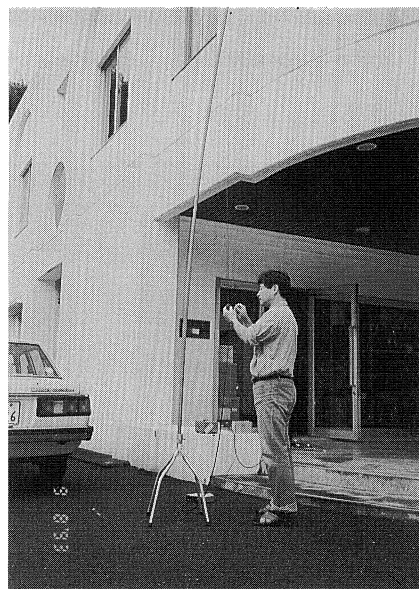


図 22. 受信用アンテナは通常の受信環境において最大の感度を得ることができるように 1 W の送信機を使用して同調をとる（SWR 計による調整）。

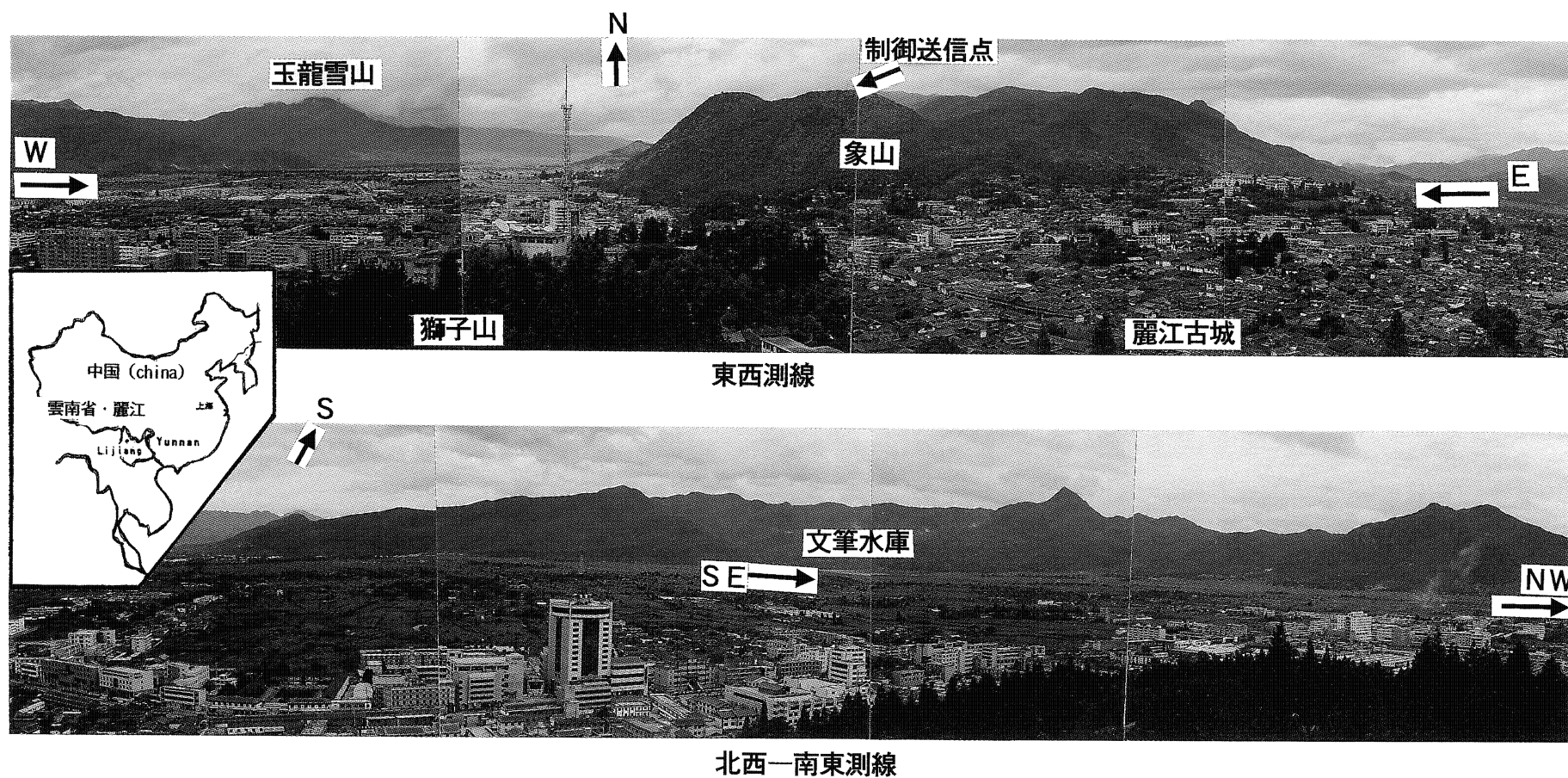


図 23. 雲南省・麗江における爆破観測例

1998年8月、雲南省・麗江において麗江盆地の基盤調査のため、無線による爆破観測を行なった。送信制御装置は象山頂上のテレビ送信局内に設置し、アンテナも同アンテナタワーに取り付けた。測線はEW、NW-SE、NSであり、どの測線も送信局から見通し距離にあった。観測点は20点、測線長はいずれも約12kmある。各観測点から制御送信点までの距離は20km以内である。

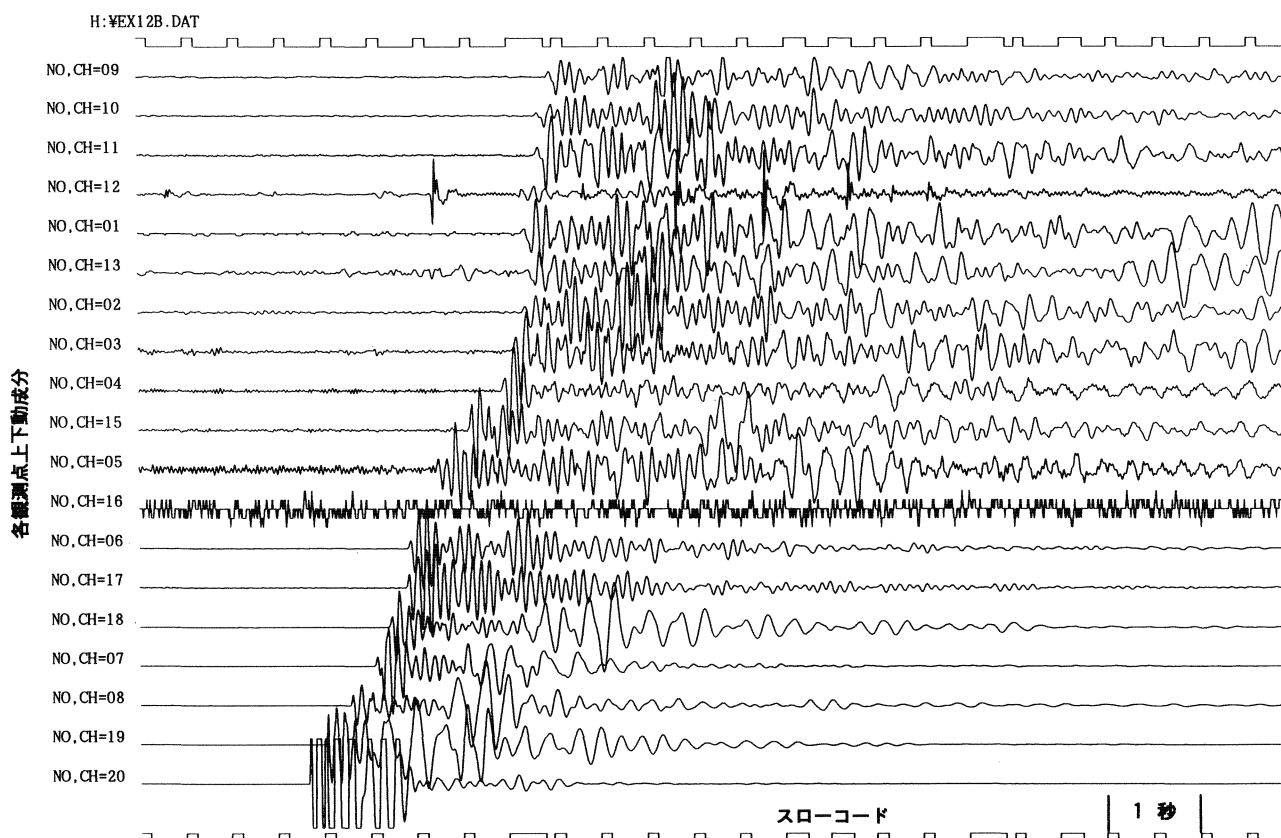


図 24. 雲南省・麗江における爆破観測記録例

各測線は 8 点が 4 成分（低感度を含む），12 点が上下動のみの観測（感度を変えて 4 チャンネル使用），波形記録例はその内の上下動のみである。

和歌山地震観測所観測所生石山無線中継観測点に半固定的に設置されており，いつでも利用できる状態である（瀬戸，1998）。

1) 無線送信周波数及び出力 周波数：59.66 MHz，出力：10 W，明星電気製，電波の形式：F3D。

2) アンテナ 3 素子八木・宇田アンテナ（指向性）またはスリーブアンテナ（無指向性）。

3) DTMF 発振器信号の種類は 16 通りあるが，実際はトリガー信号と時刻信号の二つのみ使用している，自作。

4) トリガー信号 アナログ信号（地動）により作られる。または既存システムのトリガー信号を使う。爆破観測の場合は手動で起動される，自作。

5) GPS 時計 時刻コード：IRIG-H（30 秒フレーム，年月日時分秒）True Time 製，Model 505-113，または白山工業製（LS-10 K，この場合はフォーマットが違う）

収録システム

図 6 は収録システムのブロックダイアグラムである。これらはアンプ，遅延回路，メモリーカード，VHF 受信機，DTMF 復調器，収録制御回路からなっている。図 7～10 はこれらの具体的な回路図および写真である。消費電流はア

ンプ，A/D（遅延回路を含む），VHF 受信機がそれぞれ 23 mA，45 mA，40 mA（12 V），計 103 mA/12 V である。すべての収録条件はディップスイッチにより設定される。次にその仕様を示す。図 11～14 はそれぞれ VHF 受信機（DTMF 復調器を含む）基板，同写真，アンプ・収録装置基板，収録装置システムの全体写真である。

1) 前置増幅器 36 dB～78 dB，6 dB ステップ，チャンネル数：4 f_c ：30 Hz，LPF：24 dB/oct（バターワース型），入力形式：差動入力，型名：ERI-930110，自作。

2) 遅延回路（A/D 基板）サンプリング周波数：16 Hz～2 KHz，A/D 変換精度：12 bit チャンネル数：最大 4（1 から 4 チャンネルまで任意に設定可能），遅延メモリー：16 k ワード，遅延量は上記メモリー量とチャンネル数，サンプリング周波数に依存する。例えば，4 チャンネル，サンプリング周波数 128 Hz とすれば，31 秒の遅延量を得ることができる。

型名：ERI-920826 A，B，自作。

3) 収録媒体 メモリーカード（JEIDA Ver 4 相当品）512 k，1 M，2 M，4 M，8 Mbyte の各カード。例えば 2 Mbyte のメモリーカードで 1 地震の収録時間を 60 秒とすると，4 チャンネル分のとして約 64 Kbyte となり，約 31 個の地震

を収録可能。

4) VHF 受信機 感度：約 -100 (dBm) この値は $S/N = 20$ (dB) 確保するために必要な受信機の入力レベル。

型名：ERI-920907, 自作。

機 器 製 作

このシステムは送信制御側のシステム以外に、各観測点はアンプ（電源を含む）、遅延、VHF 受信（DTMF 復調を含む）の計 3 枚の基板からなっている。このうち受信基板（収納箱を含む）は 1993 年の日光における稠密地震観測のために約 200 台が作られた。このように大量の基板を作るにあたって、回路設計は自前で、基板の製作は業者に依頼した。各部品の基板への取り付けと半田付、ケースの板金、部品の取り付けは自前で行った。半田付は半田槽を使用することによって迅速な製作を可能にした。図 15～22 はこれらのシステムを製作した過程を示した写真である。これらの製作過程で種々の工夫を行った。例えば、部品を基板に取りつける場合に専用の台を作成した（図 16～18）。半田曹で半田付をする前に、あらかじめ基板を暖めておく必要があるため、電気ヒーターを利用した装置を作成した。半田付の後、不良個所の修正、受信基板にあっては SG (RF Signal Generator) による周波数の調整を行って所定の感度を満足しているかを確かめた（図 21）。受信アンテナを調整するために送信機を使用した SWR による調整（VSWR 値が最小になるようにアンテナとの整合をとる）を行った。

波形のデータフォーマットおよび再生システム

メモリーカードに収録される波形データは、あらかじめディップスイッチによって設定された条件により連続的に書き込まれる。1 サンプルのデータは 2 バイトで構成される。2 バイトのデータの内訳は、データ部分、トリガー信号、時刻コードがそれぞれ 12 ビット、1 ビット、1 ビットとなっている。よって 2 ビット分のあきがある。

メモリーカードに収録された波形データは観測点ごとにファイル名がつけられハードデスクに書き込まれる。デスク容量が不足する場合は圧縮して保存される。各地震波形はメモリーカード単位（観測点単位）でプリンターに出力し、同じ地震グループにまとめられた後プリンターに出力

する。各プログラムはアセンブラーとフォートランによって作られた。

観 測 例

このシステムを使用した観測は 1992 年の西表島での群発地震の観測（瀬戸他, 1993）（収録はカセットによった）、1993 年日光での合同地震観測（収録は Hot : 名古屋大学藤井氏製作、制御用受信機を 200 台製作）、1994 年新宮沖爆破地震動観測（見通し外を考慮し、2 個所で時分割的に時刻信号を送信）、1995 年兵庫県南部地震余震観測（新しいタイプの受信機を使用）、1997 年エジプト・シナイ半島南部での地震観測（23 の観測点を展開）、1998 年中国・雲南省・麗江における爆破地震動観測（20 の収録装置を 3 測線に展開）（赤松ほか, 1999）がある。これらの内、雲南省における観測および記録の一部を図 23～24 に示す。

あ と が き

このシステムの開発は長期にわたったため、一部に時代遅れの部分が出てきた。例えば、高集積度のメモリーカード（フラッシュメモリー）出現など。本システムは基本的に収録効率の良い安定したシステムであり、今後これらの長所を生かし、新たにワンボードコンピュータを使用したプログラム可能なシステムができればと考えている。

謝 辞：1993 年の日光合同観測のため、受信機用基板作成に助力いただいた飯高 隆氏、この報告書作成にあたり助言していただいた方々に感謝します。

文 献

- 赤松純平, 盛川 仁, 西村敬一, 瀬戸憲彦, 駒澤正夫, 尾上謙介, 将 楽群, 李 康龍, 王 玉梅, 1999, 脈動, 地震探査, 重力異常から推定される中国雲南省麗江盆地の地下構造, 京都大学防災研究所年報, 第 42 号 B.
- 瀬戸憲彦, 橋本信一, 飯高隆志, 1993, 西表島群発地震の地震観測, 東京大学地震研究所彙報, 68, 195-208.
- 瀬戸憲彦, 1998, チルト角付放射パターンを有する 60 MHz 帯アンテナの構築, 東京大学地震研究所技術報告, No. 4, 66-71.
- シャープ株式会社, 1992, シャープ半導体ブック, 誠文堂新光社, 137-143.
- 武田 仁・大瀧泰朗・河村幸吉・富岡 優・片山修二, 1976, 陸上移動無線実務ハンドブック, 水橋喜七, 武田 仁, 大瀧泰朗監修, オーム社, 55-74.