

## 岩手県滝の上地域における微小地震観測システム

伊藤久男\* 杉原光彦\*

ITO, H. and SUGIHARA, M. (1987) Earthquake data acquisition system in the Takinoue geothermal area. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 38(5), p. 247-264.

**Abstract:** We have exploited a microearthquake data acquisition system and have been continuing observation at the Takinoue geothermal area (around the Kakkonda geothermal power plant). The system has seven 3-component seismic stations distributed to attain uniform source locations. We installed seismometers in the boreholes to reduce surface noises. Signals from 3-component seismometer are transmitted through cables via V/F transformation, and recorded by digital and analog. Digital data is recorded on a magnetic tape at a sampling speed of 500 Hz. An analog data recorder is used for continuous recording. Magnetic tapes are sent to the Geological Survey of Japan to be processed by a computer system. We have attained very wide dynamic range (more than 100 dB) and very high quality data acquisition with the aid of borehole seismometer, signal transmission via V/F transformation, BGA and digital recording.

## 1. はじめに

WARD (1972)により、熱水活動と微小地震との間に強い相関があり、微小地震の観測が地熱探査法として有効であると指摘されて以来、多くの地熱地帯で微小地震観測が行われて来た(WALTER and WEAVER, 1980; HUNT and LATTER, 1982; PHILLIPS and OPPENHEIMER, 1984).

微小地震調査は開発前の初期探査のみでなく、開発の各段階に応じて、継続的に利用され得る。例えば、坑井のビルドアップテスト時の微小地震の観測結果は、その後の生産井、還元井の掘削計画の参考になるであろう。

微小地震はまた高温岩体研究において、水圧破壊によって生じたキ裂のマッピングに重要な役割をになっている(BATCHELOR *et al.*, 1983; HOUSE *et al.*, 1985).

微小地震は、震源分布、震源パラメーター等震源そのものに関する情報に加えて、例えばフォーカルメカニズムの解析により、地下の応力状態を知ることでもできる(ANGELIER, 1984; GEPHART and FORSYTH, 1984)。また、震源より観測点までの経路の情報を得ることも可能であり、このことにより3次元的な地下構造を知ることが可能である(AKI and LEE, 1976)。実際多くの地熱地帯、火山地帯での地下構造がわかりつつある(KISLING *et al.*, 1984)。

以上の様に微小地震の解析により他の方法では得られ

ない、しかも重要な情報を得ることができる。しかしながら地熱以外の資源探査では、微小地震を使うことはほとんどなく、このため探査法としての確立がなされていない状態にある。このため、我々はデジタルシステムによるデータ集録、データ処理、解析システムの構築、フィールドでのデータ集録、データの解析、解釈を行ってきた。データ処理、解析システムについてはすでに報告した(杉原・伊藤, 1986)が、本稿ではデジタル集録システムと、岩手県滝の上でのデータ集録の内容について報告する。解析結果、地熱構造との関連については順次公表していく予定である。

データ集録を行うにあたって、新たに高S/N、高ダイナミックレンジ、広帯域のデータ集録の行えるデジタル集録システムを開発した。データ集録は岩手県滝の上地域で行っている。滝の上地域は出力5万kWの葛根田地熱発電所をもつ我が国の代表的地熱地域であり、地上調査、坑井掘削、坑井を利用した各種調査等で地下構造がよくわかっており(NAKAMURA and SUMI, 1981; SATO, 1982; 中村ほか, 1984; 井出, 1985)、微小地震の観測結果との比較検討が可能である。

## 2. 滝の上地域における微小地震観測の経緯

滝の上地域においては、葛根田地熱発電所が昭和53年5月に出力5万kWの運転を開始したが、発電開始以前の昭和52年1月より昭和56年3月まで工業技術院サンシャイン計画委託研究「熱水の地下還元メカニズムの調査

\* 地殻熱部

第1表 地質調査所による観測の経緯

年 月 日	内 容
1981. 9. 24	観測候補点ノイズ調査, ケーブルルート測量, 及びGS1, GS5, GS6, GS7の4観測点建設(1982年3月25日完了)
1981. 10. 22	工業技術院サンシャイン計画「熱水の地下還元メカニズムの調査研究」に使用していた微小地震観測装置一式(GS2, GS3, GS4の3観測点を含む)を工業技術院より管理換え
1982. 2. 16	デジタルデータ集録装置(マークランド電子工業製 MARK9324 H)長時間連続記録計(三栄測器製8D01), JJY時刻信号発生器(エコー計測製 AQ1000E)を設置し, 管理換えを受けた微小地震観測装置との接続及び総合調整を行う
1982. 6. 25	信号ケーブル敷設. GS1, GS2, GS3, GS4, GS5, GS6の6観測点から日本重化学工業(株)葛根田事業所まで信号ケーブルを敷設し, 事業所内に設置した記録装置に接続
1982. 12. 20	6観測点(GS1, GS2, GS3, GS4, GS5, GS6)による観測を開始
1983. 5. 28	デジタルデータ集録装置に磁気テープ装置を一台増設. バックアップ用に, アナログデータレコーダ(ソニーマグネスケール製 UFR31400 AL)を設置
1983. 9. 1	GS7観測点用の信号ケーブルを敷設(1983年10月4日完了)
1983. 10. 4	GS7観測点観測開始. GS7観測点を含めた7観測点による観測体制が整う
1984. 10. 18	GS1, GS3, GS4の3観測点について地震計(マークプロダクツ社製, L22E-3DS)を坑井内に設置. GS5とGS6の2地点についても地上設置型地震計としてマークプロダクツ社製, L22E-3DLに変更. 伝送方式をアナログ伝送からPFM伝送に変更
1984. 12. 12	PFM伝送方式を導入した高周波数広ダイナミックレンジ地震観測開始
1985. 6. 7	GS2, GS7の2観測点について地震計(L22E-3DS)を坑井内に設置(1985年7月15日完了)
1985. 7. 15	7観測点全点について固有周波数2Hzの地震計(L22E), PFM伝送方式への移行が完了し, 高周波数広ダイナミックレンジ微小地震観測システムとして稼働開始
1986. 2. 7	集録装置のための安定化電源を導入
1986. 4. 19	モニター用の電磁オンログラフを更新

研究」の一環として3点の観測点による微小地震観測が行われた。データ集録は上記3点に、日本重化学工業(株)所有の地震計1点を加え合計4点についてアナログデータレコーダーにトリガー方式で行われた。

その後、一時観測の中断があったが、昭和57年12月より、地質調査所によりサンシャイン計画「深部地熱資源探査技術に関する研究」の一環として、観測が再開された。種々の事情から、システムの最終的な完成は昭和60年7月になった。この間、観測点の追加、地震計の交換、設置方法の改良、伝送方式の改良等を行った。これらの詳細を第1表に示す。

### 3. システムの構成

#### 3.1 システムの概要

7点の観測点のそれぞれ3成分の地震波形データをV/F変換し、専用ケーブルにより、集録装置に送り、デジタルおよびアナログ集録を行っている(第1図)。デジタル記録は、トリガー方式により行われる。A/D変換は500サンプル/秒で行われ、データは計算機用テープに記録される。またアナログデータレコーダーに

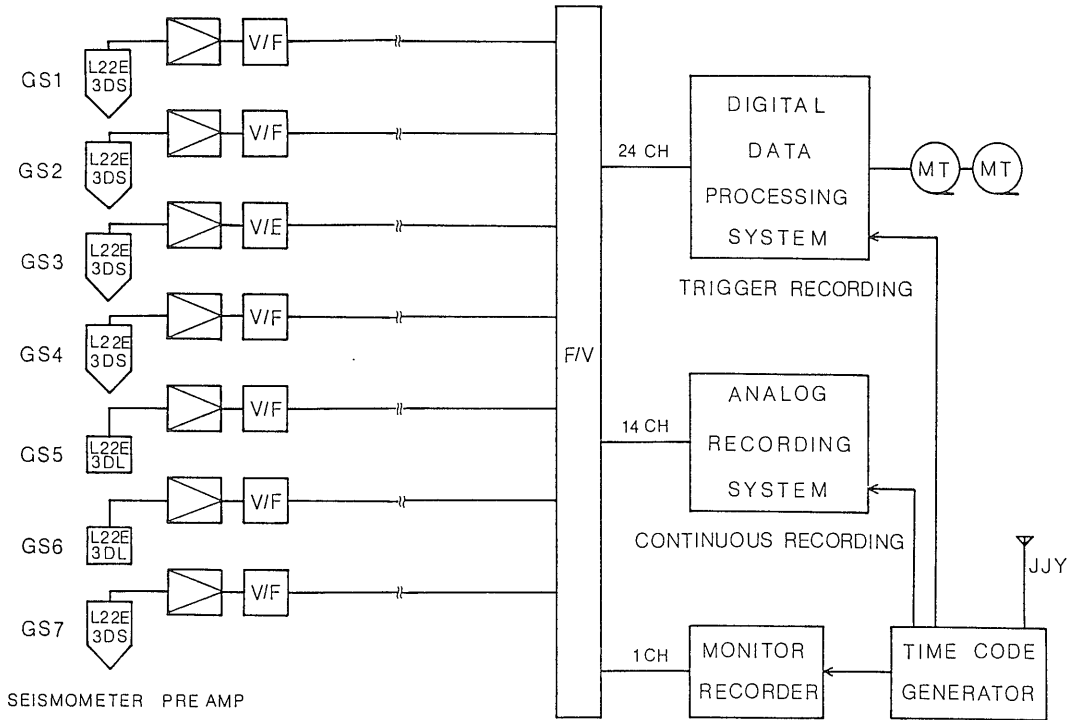
よる連続記録も行われ、テープ等を地質調査所へ送った後に、解析される。

#### 3.2 観測点及び地震計

観測点選定にあたっては地形等の制約が大きかったが、滝の上地熱地域をとり囲んでできる限り均質に配置すること、委託研究による観測点を継続することを考慮して決定した。第2図に観測点位置を示す。ここで、GS2, GS3, GS4の3観測点は工業技術院サンシャイン計画委託研究「熱水の地下還元メカニズム」における微小地震観測点と同地点である。観測点の座標、地震計種類等を第2表に示す。

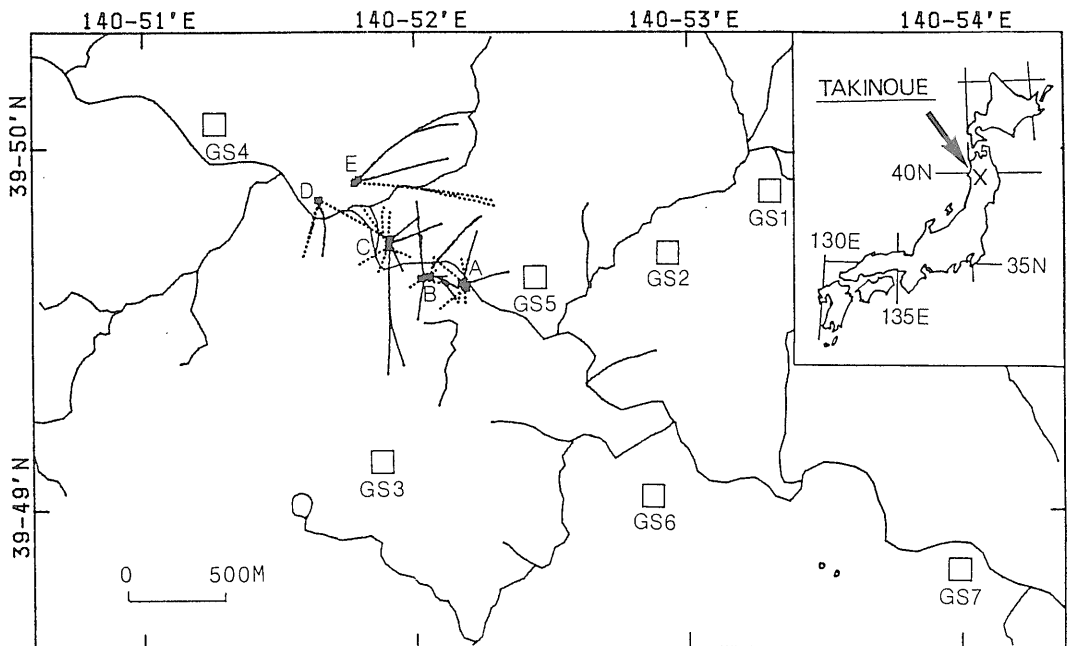
GS5, GS6の2地点は地上の露岩に地上型地震計、GS1, GS2, GS3, GS4, GS7の5地点については、深度50m程度の坑井内に坑井内地震計を設置した。各地点とも上下動1成分、水平動2成分の合計3成分記録を行っている。地上型、坑井内設置型とも水平動の1つは真北にあわせている。地上型、坑井内設置型とも、固有周期2Hzの速度計マークプロダクツ社製L-22Eを使用しており、坑井内地震計L-22E-3DSはL-22Eエレメントを耐圧容器に組み込んだものである。

岩手県滝の上地域における微小地震観測システム (伊藤久男・杉原光彦)



第1図 滝の上における微小地震観測システムブロック図

Fig. 1 Schematic diagram of earthquake data acquisition system in the Takinoue geothermal area.



第2図 観測点位置図 A, B, C, D, Eは坑井基地を示す

Fig. 2 Locations of seismometers. A, B, C, D and E denote geothermal well basements.

第2表 観測点一覧

STATION NAME	GS 1	GS 2	GS 3	GS 4	GS 5	GS 6	GS 7
LATITUDE	39° 49.885 N 140° 53.307 E	39° 49.719 N 140° 52.926 E	39° 49.137 N 140° 51.877 E	39° 50.068 N 140° 51.260 E	39° 49.648 N 140° 52.437 E	39° 49.042 N 140° 52.868 E	39° 48.851 N 140° 53.994 E
ALTITUDE (SURFACE)	917.7 m	807.3 m	981.3 m	745.3 m	717.5 m	698.6 m	502.9 m
DEPTH OF THE SEISMOMETER FROM SURFACE	46.3 m	47.5 m	48.2 m	28.8 m			49.7 m
TYPE OF SEISMOMETER	L22E 3DS 17 $\mu$ kin	L22E 3DS 13 $\mu$ kin	L22E 3DS 9 $\mu$ kin	L22E 3DS 27 $\mu$ kin	L22E 3DL 40 $\mu$ kin	L22E 3DL 17 $\mu$ kin	L22E 3DS 17 $\mu$ kin
NOISE LEVEL	36 dB	36 dB	36 dB	36 dB	36 dB	36 dB	36 dB
PRE AMP. GAIN	1.89	1.81	1.83	1.76	1.95	1.86	1.89
SENSITIVITY, V/kin	1.80	1.79	1.77	1.78	1.86	2.00	1.99
V	1.81	1.80	1.82	1.80	1.96	2.04	1.76
NS							
EW							

地表に露岩が見つからないため、GS5, GS6 以外の 5 地点については、地震計設置坑を掘削し、坑井内地震計を設置した。本地域は浅部でも高い地下温度をもつことが予想される(藤倉ほか, 1970)ため、掘削深度は約50 m 程度とした。GS4 地点では特に高温が予想されたため、掘削予定深度を30 m とした。

地震計設置坑は、地表より深度約 5 m までは75/8インチビットで掘削し、6 インチケーシングを挿入し、その後55/8ビットで予定深度まで掘削した。坑井内地震計が正常動作をするためには、坑井傾斜が約 3 度以内であることが必要であるため、掘削中最低10 m 毎に傾斜測定を行い、必要な場合は、孔曲がりの修正を行った。その結果傾斜は最大でも 1°10'、その他は 1°以下の良好な掘削結果が得られた。また最終的な地震計設置深度決定のために、深部10 m 間はコアリングを行った。コアとスライムの観察による各坑の地質柱状を第3図に示す。

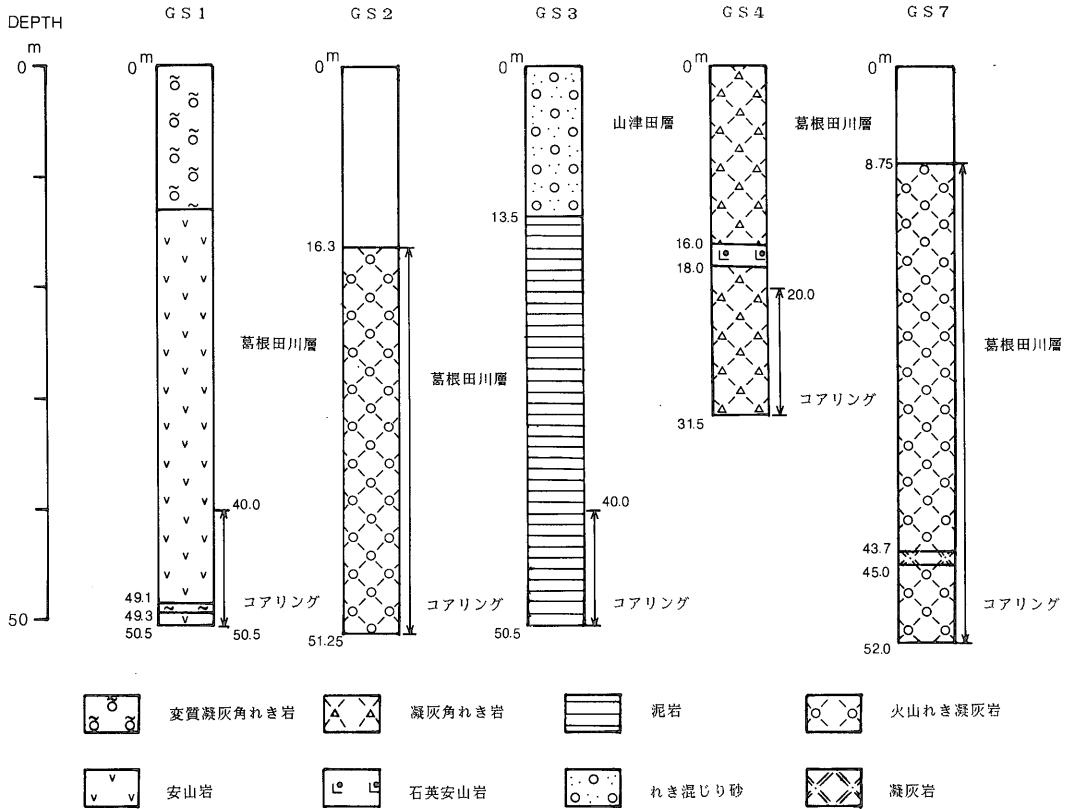
坑井内地震計を方位を決めて坑井内に設置するために、第4図に示す様に地震計設置用台座を4インチ塩ビパイプの先につけた後坑井内に下げ、フルホールセメンチングした。その後台座のキー溝の方位を測定し、地震計下部にこのキー溝に入り、しかも地震計が真北を向く様に調整した治具を取り付け、地震計を坑井内に設置した。地震計の正常動作を確認した後、坑井を川砂で充填した。設置深度等を第2表にまとめた。

### 3.3 信号伝送

地震計よりの信号は、地震計観測点に設置したスレイブ装置により、増幅、V/F 変換された後、専用の信号ケーブルにより、日本重化学工業(株)葛根田事業所内のデータ集録装置まで伝送される。

スレイブ装置の機能は、(1)地震計からの信号増幅、(2) V/F 変換、(3)地震計キャリブレーション等の制御であり、DC 電源をデータ集録装置より供給して動作する。信号入力については 3CH の平衡入力で、0 dB, 12 dB, 24 dB, 36 dB の 4 段階のゲイン設定がデータ集録装置側と、スレイブ装置の両方から行える。センサーテストについては、第5図に示す正負のステップ電圧を地震計のコイルに加えることにより行う。センサーテストはマニュアルモードの他、定時に集録装置からのコマンドを受けて行うことができる。現在毎日午前9時に実施している。

信号伝送は、専用のケーブルを敷設して行っている。伝送距離は最大 4 km 以上もあり、高品質のデータ伝送を行う必要があるため、アナログ伝送にかえて、V/F 変換して行っている。V/F 変換による信号伝送では500 Hz まで平坦な周波数特性(振幅)をもつ。また伝送系の



第3図 地震計設置坑の地質柱状図 尚、図中の葛根田川層は、佐藤ほか(1981)では玉川溶結凝灰岩類に対応する  
 Fig. 3 Geology of the wells in which seismometers are installed.

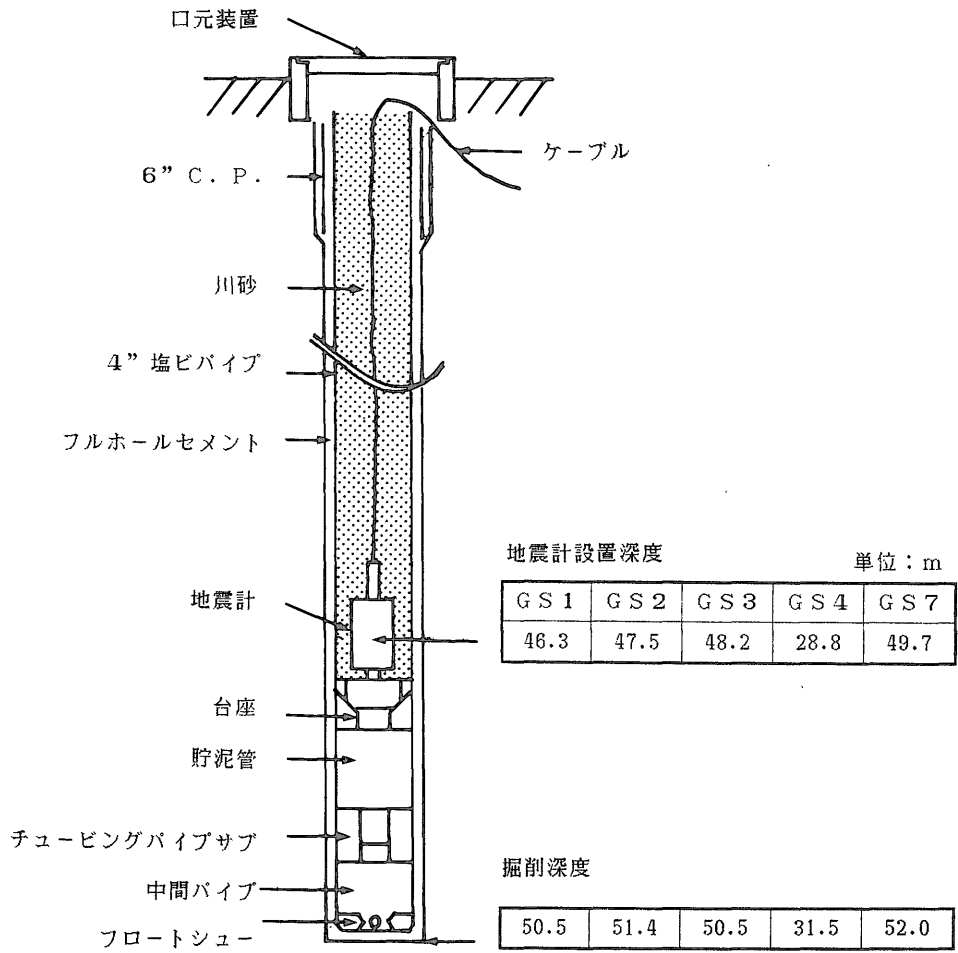
ノイズはブリアンプの内部雑音を含めて $\pm 0.3$ - $\pm 0.5$  mV程度に収まっている。

### 3.4 データ集録

V/F変換されて伝送されたデータをF/V変換し、1 Hzのローカットフィルターを通した後データ集録を行っている。F/V変換器を含めデータ集録装置は日本重化学工業(株)葛根田事業所内に設置した(第6図)。データ集録はデジタルトリガー集録を主としているが、バックアップとしてアナログデータレコーダーによるアナログ連続記録を行っている。アナログ連続記録はソニーマグネスケール製UFR-31400 AL型14チャンネルレコーダーにより0.19 cm/secのテープ速度で行っており、一週間毎にテープ交換を行っている。さらにモニターとして、ペンレコーダー(日本電気三栄(株)8D01形長時間連続記録計)にGS5観測点の上下動1成分を連続記録するとともに、24成分の電磁オシログラフにセンサーテスト波形を出力している。

デジタル集録装置(マークランド(株)製MARK-

9324H)のブロックダイアグラムを第7図に示す。入力には24チャンネルあり(ただし実装は7観測点3成分の合計21チャンネル)、各チャンネル毎に、ノッチフィルター、アンチエイリアスフィルター、BGAアンプをへた後マルチプレックスされ、A/D変換される。A/D変換は12ビット(ただしBGAアンプによりゲインビット付き)であり、サンプルホールド回路により同時サンプリングされる。記録はトリガー方式により、9トラックのMTに書込まれる。MT装置は2台あり、自動的に切替動作が行える。1つの地震あたりの記録時間は予め設定する。この記録時間には、トリガー時刻以前のデータも含まれているが、この遅延時間も予め設定する。ディレイメモリーの制約から、サンプリングレート、遅延時間、入力チャンネル数には第3表に示す関係がある。現在はサンプリングレート:2 ms, 遅延時間8秒, 記録時間30秒でデータ集録を行っている。この条件で、1600 bpi, 2400フィートのMT1巻に50個の地震が記録できる。MTフォーマットは杉原・伊藤(1986)に示した。地震毎



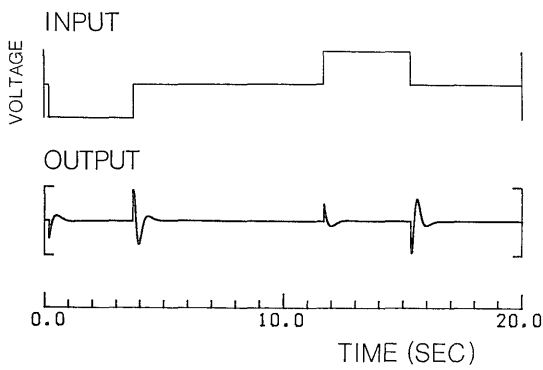
地震計設置深度 単位：m

GS 1	GS 2	GS 3	GS 4	GS 7
46.3	47.5	48.2	28.8	49.7

掘削深度

50.5	51.4	50.5	31.5	52.0
------	------	------	------	------

第4図 地震計の坑内設置方法  
Fig. 4 Installation method of borehole type seismometer.

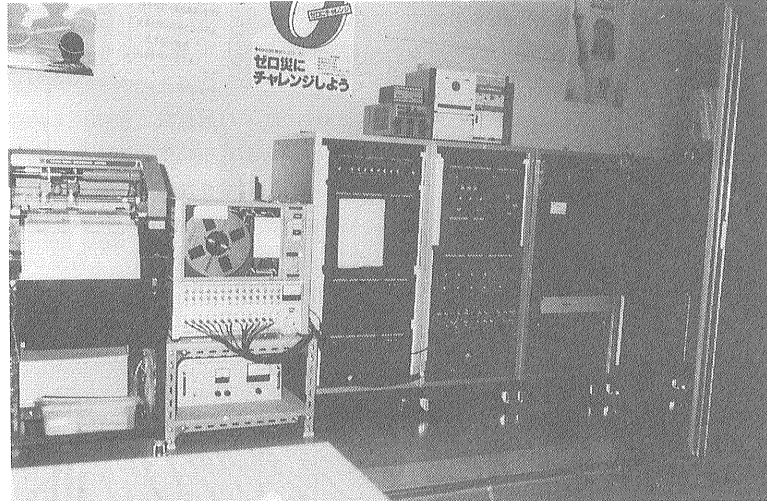


第5図 センサーテスト例  
Fig. 5 An example of sensor test.

にヘッダーブロックとデータブロックが書き込まれる。ヘッダーブロックには、地震計感度、プリアンプゲイン、トリガー時刻、サンプリングレート等、記録の解析に必要なほとんどの情報が書き込まれる。データは2の補数として、ゲインとともにデータブロックに書き込ま

第3表 デジタル集録部集録条件

Sampling Rate	0.5 msec (2 kHz)	1 msec (1 kHz)	2 msec (500 Hz)
Delay Time	2 sec	4 sec	8 sec
Input Channel	12 CH.	24 CH.	24 CH.
Recording Time	0.5/1/2/4 min. AND MANUAL		
High-cut Filter	125 Hz/-6 dB		



第6図 デジタルデータ集録装置

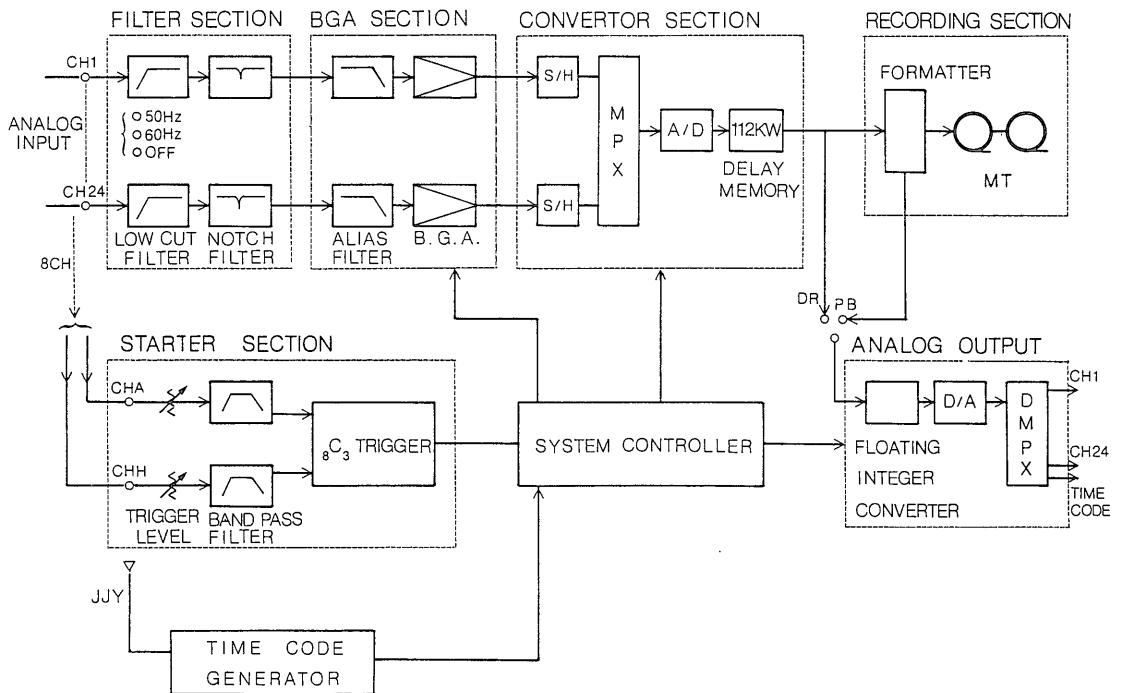
Fig. 6 Photograph of the data acquisition equipments in the Takinoue geothermal area.

れる。

更に24チャンネルの信号と時計信号用にそれぞれ8ビットのD/Aコンバーターがついており、入力信号を直接モニターすること、MTをプレイバックしてアナ

グ再生することができる。システム全体のタイムベースとして、JJY信号で較正された、 $5 \times 10^{-10}$ の高精度水素を内蔵した時計装置を使用している。

第7図でスターター・セクションはトリガーを受け持



第7図 デジタルデータ集録部ブロックダイヤグラム

Fig. 7 Schematic diagram of digital data recording system.

つ. 入力24チャンネル分の信号を選択し, スターター・セクションに入力する. 8チャンネルの信号に対しては, バンドパスフィルターを通し, 一定時間内に予め設定したしきい値を越えたものが, 3チャンネル以上あれば, スタータートリガーを発生し, データ取り込みを開始する信号を作り出す.

ノッチフィルターは50 Hz, 60 Hz, OFF(スルー)のスイッチ切換えができるが, OFF(スルー)に設定してある. エリアフィルターは125 Hz/-6 dBのものであり, 振幅, 位相特性ともになるべく平坦になる様にした. BGAについては4.観測条件の設定で述べる.

#### 4. 観測条件の設定

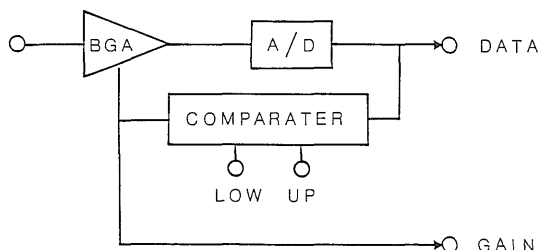
##### 4.1 概要

スレイベ装置のプリアンプゲインは各点とも36 dBに設定した. デジタル集録は, サンプルングレート: 2 ms (500 Hz サンプルング), 遅延時間: 8 秒, 記録時間: 30秒, アンチエリアスフィルター(ハイカットフィルター): 125 Hz/-6 dB, ノッチフィルター: OFFの条件で行っている.

センサーテストは毎日午前9時定時に行い, 結果をデジタルテープに集録するとともに, 電磁オシログラフに可視記録として出力する.

##### 4.2 観測条件の評価一特に BGA アンプについて

滝の上地域におけるデータ集録装置にはバイナリーゲインアンプ(BGA: Binary Gain Amp.)を用いている. BGAはオートゲインアンプの一種である. A/Dコンバーターの出力の絶対値を見て, 出力レベルが高ければゲインを半分に, 出力レベルが低ければゲインを2倍にする(第8図). 比較のためのしきい値は, ウインドコンパレーター値として予め設定する. 以下の説明では, ゲインを下げるしきい値をLOWしきい値, ゲインを上げるしきい値をUPしきい値と称し, ウインドコンパレーターの値を(Lowしきい値, UPしきい値)のようにして



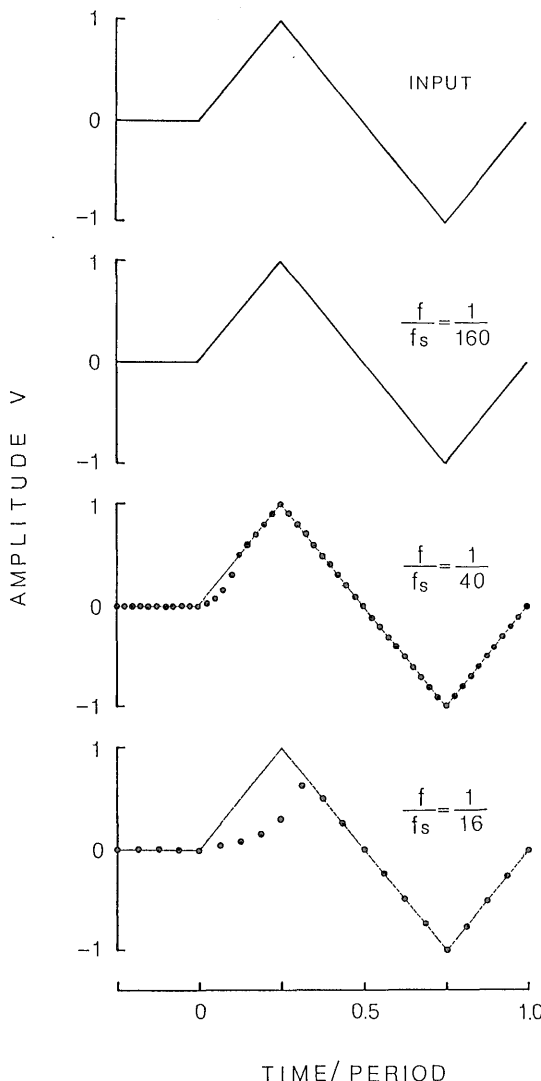
第8図 BGAの原理 (物理探査用語辞典より)

Fig. 8 Principle of BGA (Binary Gain Amplifier).

表示する.

このようにして BGA はダイナミックレンジを上げているが, ゲイン切換えのタイミングがサンプルング周波数の他に信号の周波数と振幅にも依存するので, 周波数が高く, しかも振幅変化の大きな信号に対してはゲイン切換えが追従できないこともあり得る.

第9図に BGA の簡単なシミュレーションの結果を示す. ここではノイズ状態に三角波が入った場合の波形がどの様に記録されるかを,  $f/f_s$  が異なる三つの場合について計算した. ここで  $f$ : 信号の周波数,  $f_s$ : BGA のサ



第9図 三角波入力による BGA のシミュレーション

Fig. 9 Results of simulation of BGA with triangle wave.



ンプリング周波数である。計算にあたっては、バックグラウンドノイズレベル±1mVの状態に振幅±1Vの三角波信号が入力した場合について、BGAの有効ゲインビット数=3、ウインドコンパレーター値=(256,512)の条件を設定した。サンプリング周波数に比べて信号周波数が十分小さい場合( $f/f_s=1/160$ )は波形は正確に記録されるが、信号周波数が大きくなるにつれて( $f/f_s=1/40$ )、初動波形が歪む様になり、更に信号周波数が大きくなると( $f/f_s=1/6$ )、初動振幅値さえ正しく表現できなくなる。

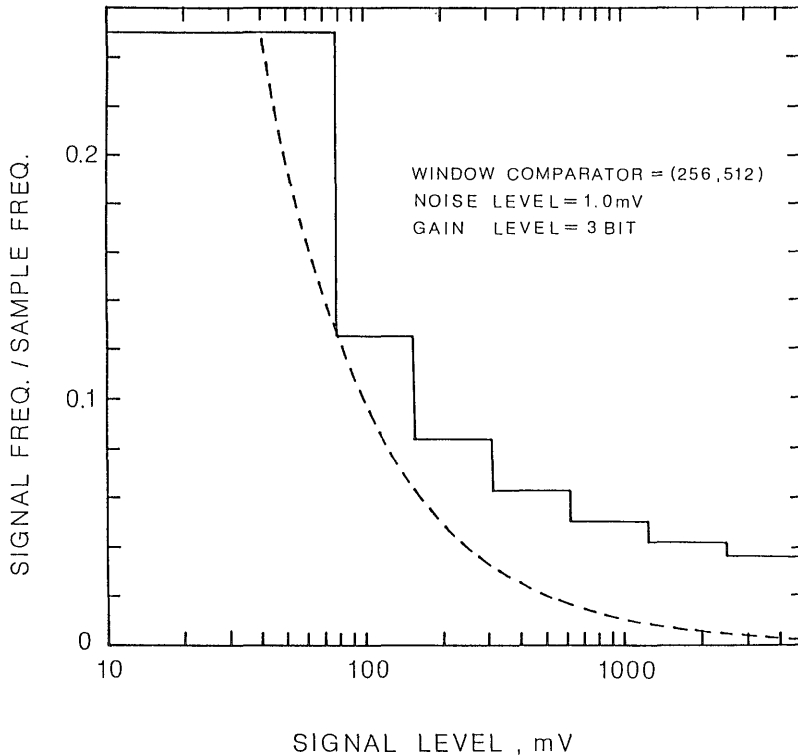
以上の様にBGAの周波数特性は、 $f/f_s$ の比に依存す

るが、またその他の設定条件によっても変化する。すなわち、ゲイン切り換えの判断条件となるウインドコンパレーターしきい値及び4ビットのゲインビットのうち実際に変化させる有効ゲインビット数である。従って対象とする地震波形記録に最適なBGAの設定条件を検討する必要がある。

地震記録に必要な条件として、広いダイナミックレンジと有効数字及び広い周波数範囲があるが、地震波形では特に立上り波形表現の忠実さが重要である。地震信号は一般に低いレベルの振動状態に急激に立上がる高レベル信号が混入し、その後は徐々にレベルが低くなる。従

第4表 BGAの有効ゲインビット数設定とダイナミックレンジ

有効ゲインビット数	表現可能最小単位	システムノイズ	設定地動ノイズレベル	地動ダイナミックレンジ	記録計ダイナミックレンジ
0	2440 $\mu$ V	±0.5 mV	±80 mV	36 dB	66 dB
1	1220	±0.5	±40	42 dB	72 dB
2	305	±0.5	±10	54 dB	84 dB
3	19.1	±0.5	±1	74 dB	108 dB
4	0.07	±0.5	±1	74 dB	157 dB



第10図 BGAの性能評価：表現可能な振幅と周波数範囲

Fig. 10 Evaluation of BGA: the range of amplitude and frequency for which BGA can express.

って、ゲインの切換えについては、ゲインを下げる切換えは早く、ゲインを上げる切換えは遅くするのが適している。そのためにはゲイン切換えのしきい値を、LOW も UP も小さくしておけば良い。

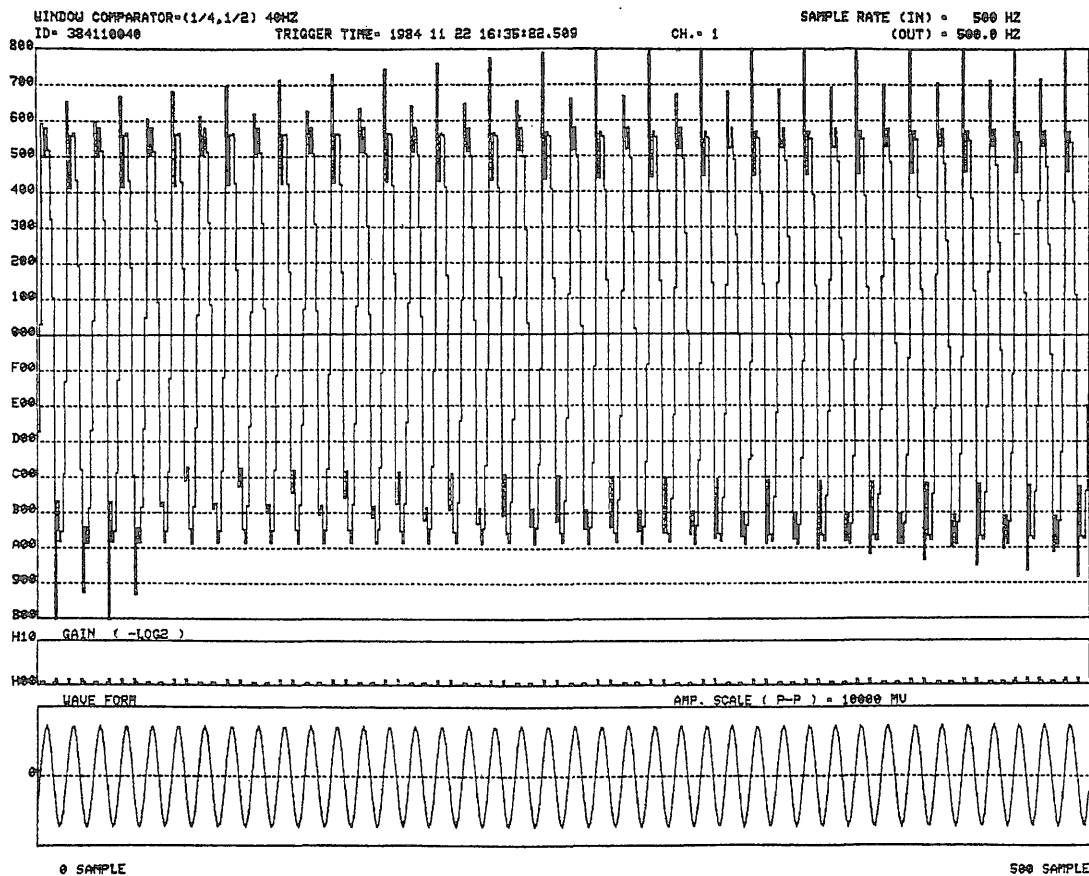
一方、データの有効数字は本来はデータ仮数部の12ビット分あるが、実際はウインドコンパレータの UP しきい値と LOW しきい値の範囲に抑えられる。従ってウインドコンパレータしきい値を小さくすると有効数字

も落ちてしまう。有効数字として8ビットを要求すれば、LOW しきい値は、256以上にしなければならない。

第4表にBGAの有効ゲインビット数設定値とダイナミックレンジの関係を示す。各々の場合について、表現可能最小単位とシステムノイズレベルを考慮して、地動ノイズに相当させるべきプリアンプ増幅後の信号レベルを示し、地動のダイナミックレンジと記録計自体のダイナミックレンジを示してある。ここで地動ダイナミック

第5表 BGA 設定条件の比較表

ウインドウ コンパレータ	512/1024				256/512				128/256			
	2000	1000	500	200	2000	1000	500	200	2000	1000	500	200
サンプリング周波数 (Hz)	2000	1000	500	200	2000	1000	500	200	2000	1000	500	200
ゲイン ビット	4 3 2 4	3 2 4 3	2 4 3 2	4 3 2	4 3 2 4	3 2 4 3	2 4 3 2	4 3 2	4 3 2 4	3 2 4 3	2 4 3 2	4 3 2
46 dB パルス立上り	△○○×	○○×	×△×	××	△○○△	○○×	×△×	××	△○○△	○○×	×△×	××
66 dB パルス立上り	△△×	×△×	××	××	△△×	×△×	××	××	△△×	×△×	××	××
定常サイン波記録	○---	△-----				○-----				○-----		
有効数字	○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○○○○○	△△△△△△△△△△△△	△△△△△△△△△△△△	△△△△△△△△△△△△	△△△△△△△△△△△△

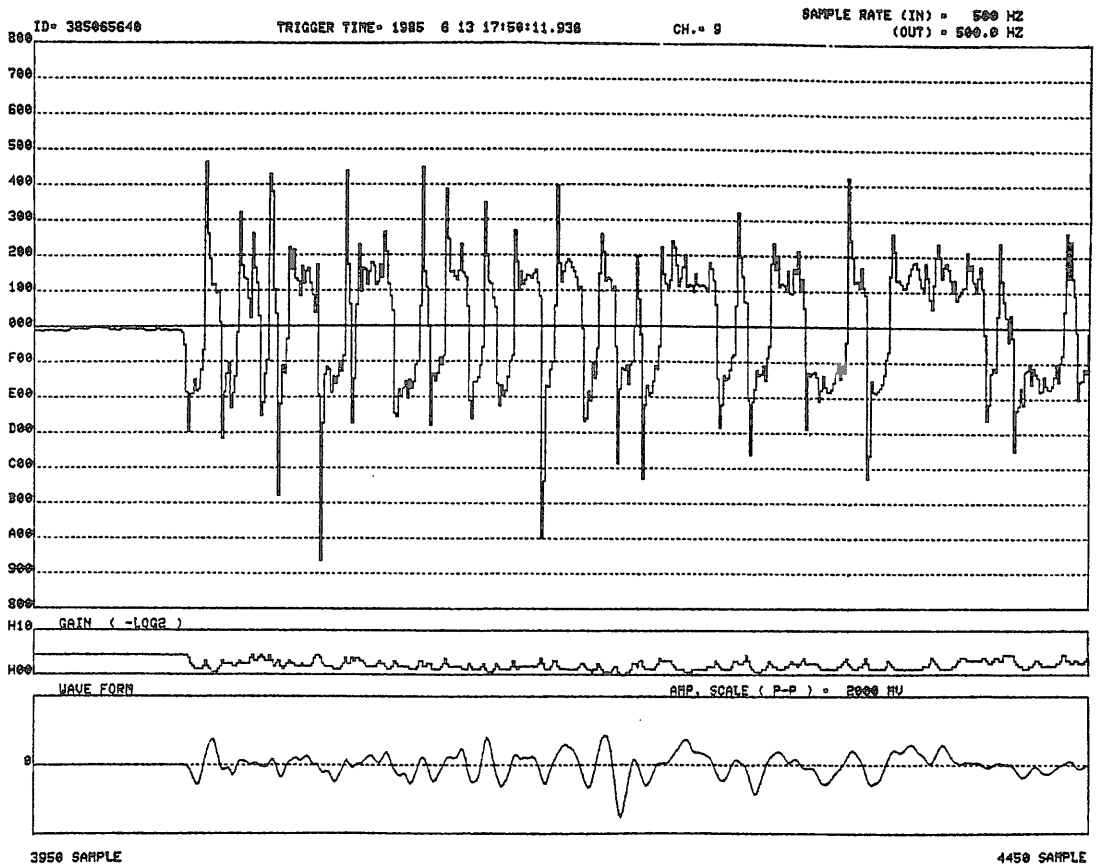


第11図 BGA による定常サイン波の記録  
Fig. 11 Records of continuous sine wave with BGA.

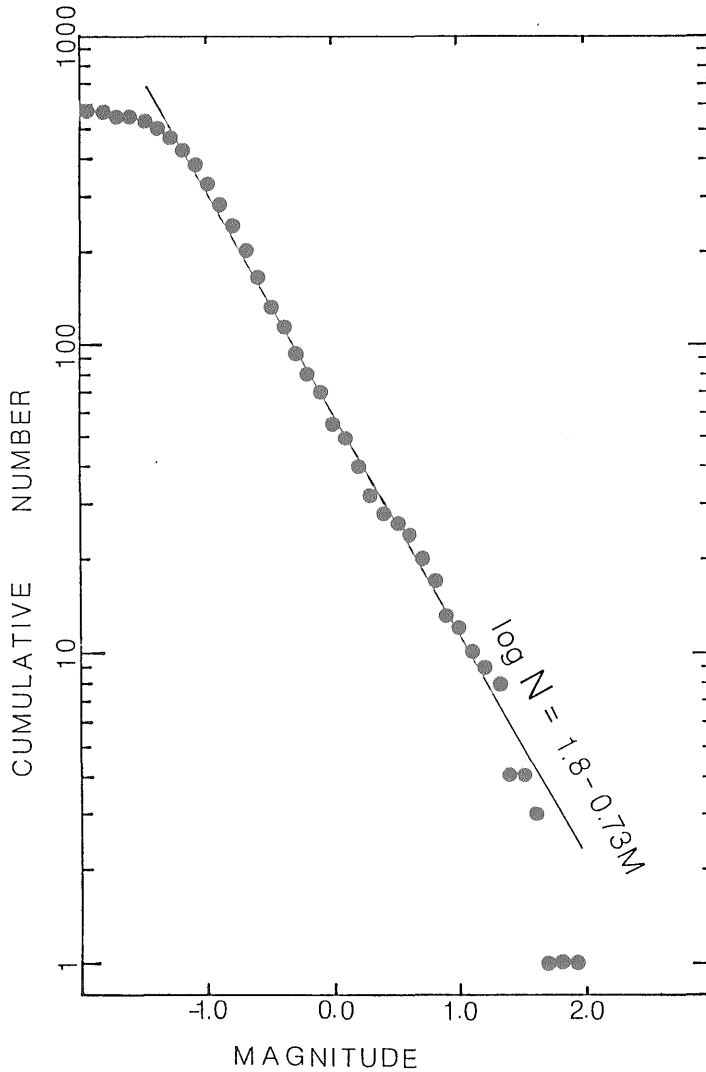
レンジとは、フルスケール±5Vと地動ノイズレベルの比、記録計ダイナミックレンジとはフルスケール±5Vと最小表現量の比である。この表からゲインビット数として3は必要になることがわかる。

立上り波形の表現特性については第9図で検討した様に、 $f/f_s$ に依存する。第10図に三角波パルスが混入した時に、その立上り波形を正確に記録できる限界の信号周波数を、入力信号振幅値に対して示した。ここでは有効ゲインビット数=3、ウィンドコンパレーターしきい値=(256,512)、バックグラウンドノイズ=±1mVの条件で三角波が入力した時、その立上りを正確に表現できる限界信号周波数を初動振幅値に対して示した。周波数については信号周波数とサンプリング周波数の比で示した。実線は初動振幅値を正確に表現する限界周波数、破線は初動波形を正確に表現する限界周波数を示す。実線より下の範囲ならば初動振幅値を正しく表現でき、破線より下の範囲ならば立上り波形を正確に表現できる。

BGAの性能を判断する際に、滝の上地域に発生する地震を正しく表現できることを条件とする。できるだけ小さい地震まで解析対象にしようとするれば、地動ノイズレベルの信号について波形を検討しなければならないので地動ノイズについてもデジタルデータとして30階調程度以上の分解能があることが望ましく、また地動ノイズが伝送ノイズ等のシステムノイズより大きくなるようにプリアンプで増幅する必要がある。第4表で示した様に、滝の上地域の地震の場合は、有効ゲインビット数が3か4の場合は地動ノイズを±1mV程度、有効ゲインビット数が2の場合は地動ノイズを±10mV程度になるようにプリアンプで増幅することになる。A/D変換のLSBの値が小さくて伝送ノイズも小さければ記録計ダイナミックレンジの大部分を地動ダイナミックレンジに割り当てることができる。一方、記録信号のフルスケールは±5Vなので、波形解析に有効なオーバーフローのないデータとして、初動振幅値が2V程度の大きさの



第12図 BGAによる実際の地震波の記録  
Fig. 12 Actual seismogram with BGA.

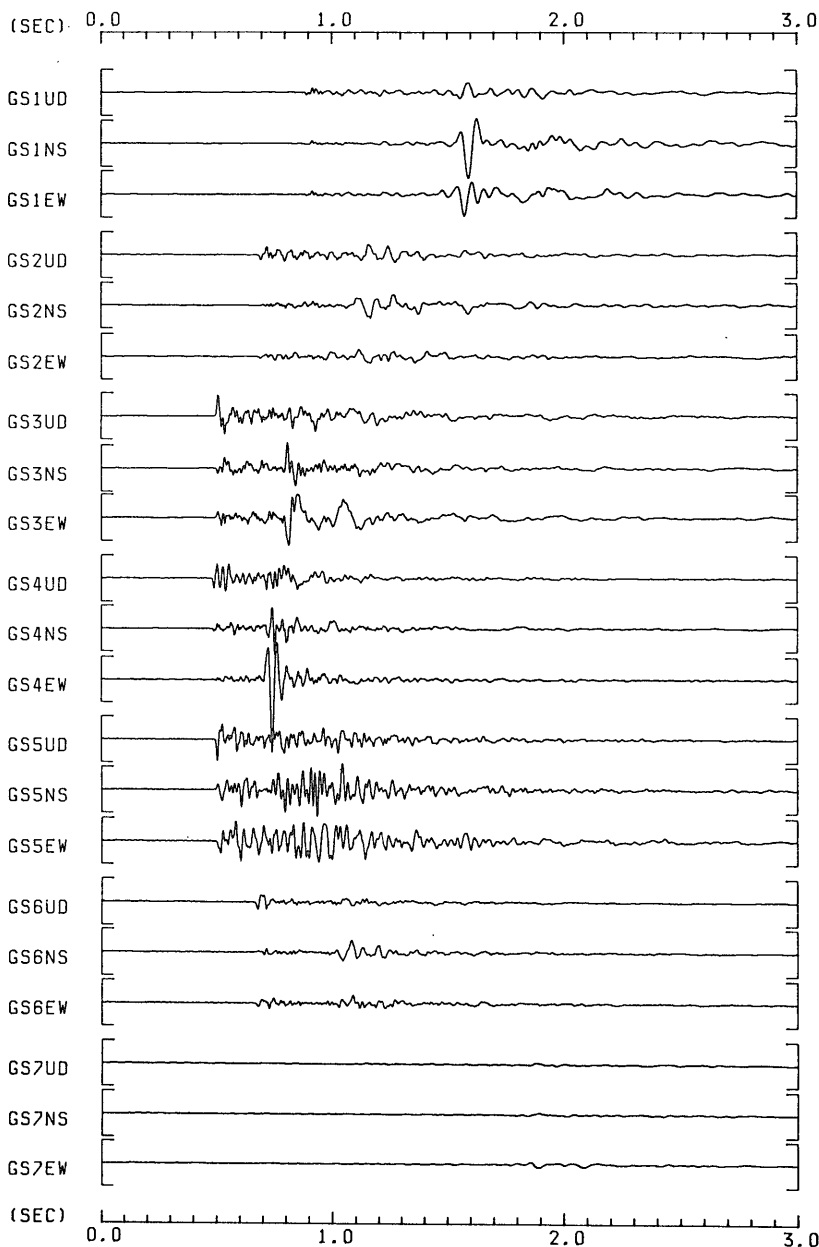


第13図 マグニチュード・頻度分布図  
Fig. 13 Magnitude-frequency relation.

地震を対象に考える。また滝の上地域の地震の卓越周波数は40 Hz程度である。そこで、(初動振幅レベル/バックグラウンドノイズレベル)が46 dB, 66 dBの2例について初動記録特性を比較してみる。様々な設定条件でのBGA特性評価を示したのが第5表である。ここで○は波形の歪みが全くないこと、△は波形は歪むが振幅値は正しく表現できること、×は振幅値も不正確なることを示す。有効ゲインビット数が2の場合は66 dBのダイナミックレンジがとれないので、66 dBの欄は×としてある。比較表では40 Hzしか見ていないので必ずしも明瞭でないこともあるが、ウインドコンパレーターのしき

い値が小さい程、サンプリング周波数が高い程周波数特性は良くなる。比較表にはこの他、有効数字と定常サイン波記録特性についても示してある。定常サイン波記録は実際にBGAを設定して、40 Hz, ±4 Vのサイン波を入力して得た記録を評価したものである。第11図が定常サイン波記録である。上よりデータ仮数部、ゲイン部、合成波形データを示す。横軸は時間軸で全長が1秒に相当する。データ仮数部はフルスケールで示してあるので、この図の例の様にオーバーフローしていると、そこでは波形は歪んでいることを示す。ただし、オーバーフローがこの様に連続せず、頻度も小さい場合は、歪みの

ID= 385073710 1985.07.20 13:01:59.542 AMP.SCALE=20MKINE(P-P)



第14図 全チャンネルの波形例

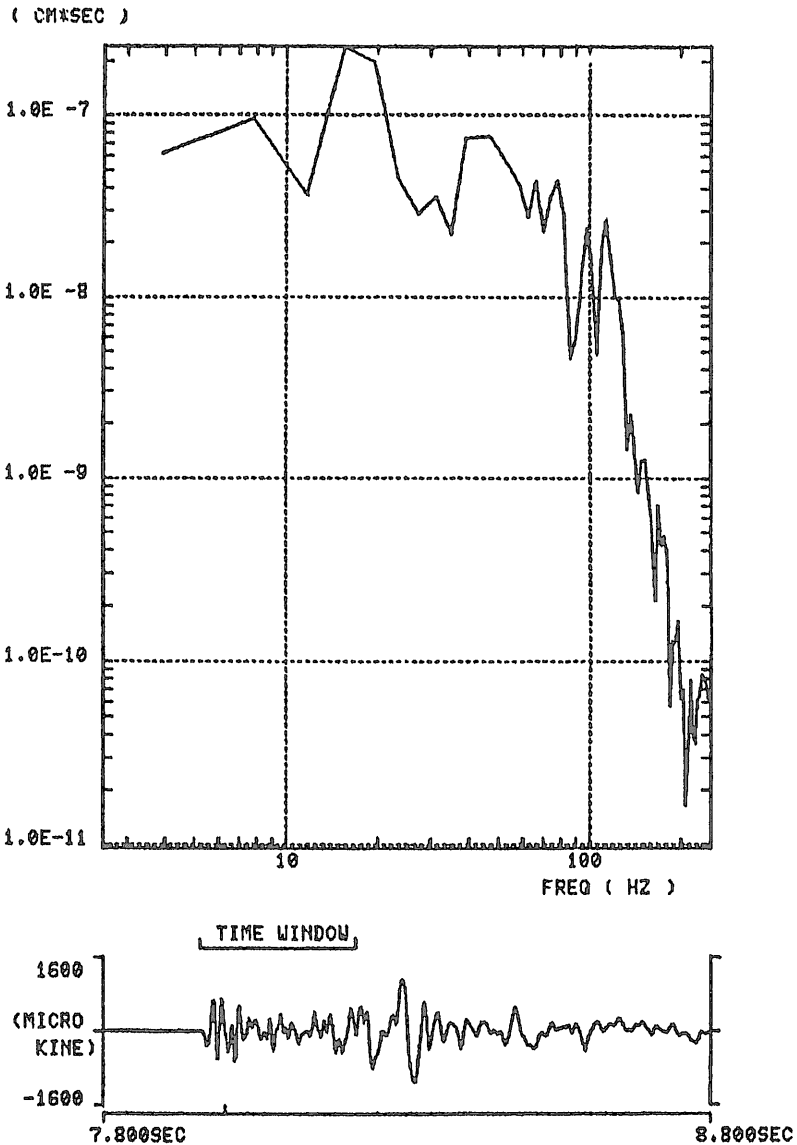
Fig. 14 An example of waveform record.

程度も小さいので、比較表では△とした。全くオーバーフローが発生しない場合は○とした。

以上の検討から、滝の上地域での BGA 設定条件として、サンプリング周波数：1000 Hz、ウィンドコンパレーターしきい値：(256,512)、有効ゲインビット数：3

を選択した。サンプリング周波数については、高いことが必要であるが、現集録装置の安定動作の限界から 1000 Hz にとどめた。

第10図は縦軸を信号周波数について kHz で表現しているとして見れば、滝の上地域用に設定した BGA の、



第15図 スペクトル解析例  
Fig. 15 An example of spectrum analysis.

バックグラウンドノイズ $\pm 1$  mV の場合の立上り波形記録特性図となる。信号周波数が40 Hz の場合240 mV まで、30 Hz の場合320 mV までの振幅の三角パルス波形を歪みなく記録できることがわかる。滝の上地域でも大きな地震については信号周波数は40 Hz より小さいので、ほとんどの場合、波形を正確に記録できる。実際の滝の上地域の地震波形の記録例を第12図に示す。この図の形式は時間軸の全長が0.5秒であること以外は第11図と同じである。この例では初動部分の周波数が約30 Hz、振幅

が300 mV であるが、実際に歪みのない波形記録が得られていることがわかる。

滝の上のシステムの設定条件では、12ビット A/D 本来のダイナミックレンジ66 dB を BGA の適用により108 dB に広げている。そのうちノイズレベルの表現に34 dB、ノイズレベル以上の地動に74 dB を割り当てている。このように大きい地動ダイナミックレンジは BGA によって見かけ上の LSB を小さくできたこと、PFM 伝送により伝送ノイズを小さく抑えることができたことに

よって実現したのである。前述の様に、初動の立上りを正確に表現できる範囲は約50 dB であるが、地震動の最大振幅は初動の後で記録されることが多く、その場合は残りの24 dB の範囲でも正確に表現できる。従って滝の上のシステムでは、ノイズから十分大きな地震まで、様々な波形解析に耐える108 dB の広いダイナミックレンジを持ったデジタル波形記録が得られる様になったといえる。

### 6. データ解析および結果

以上に述べたかたちでの観測システムの最終的な完成は昭和60年7月であり、以来極めて高品質のデータ集録が行われている。滝の上で集録された計算機用MT等は地質調査所へ送られ、地質調査所の専用計算機で処理、解析される(杉原・伊藤1986)。

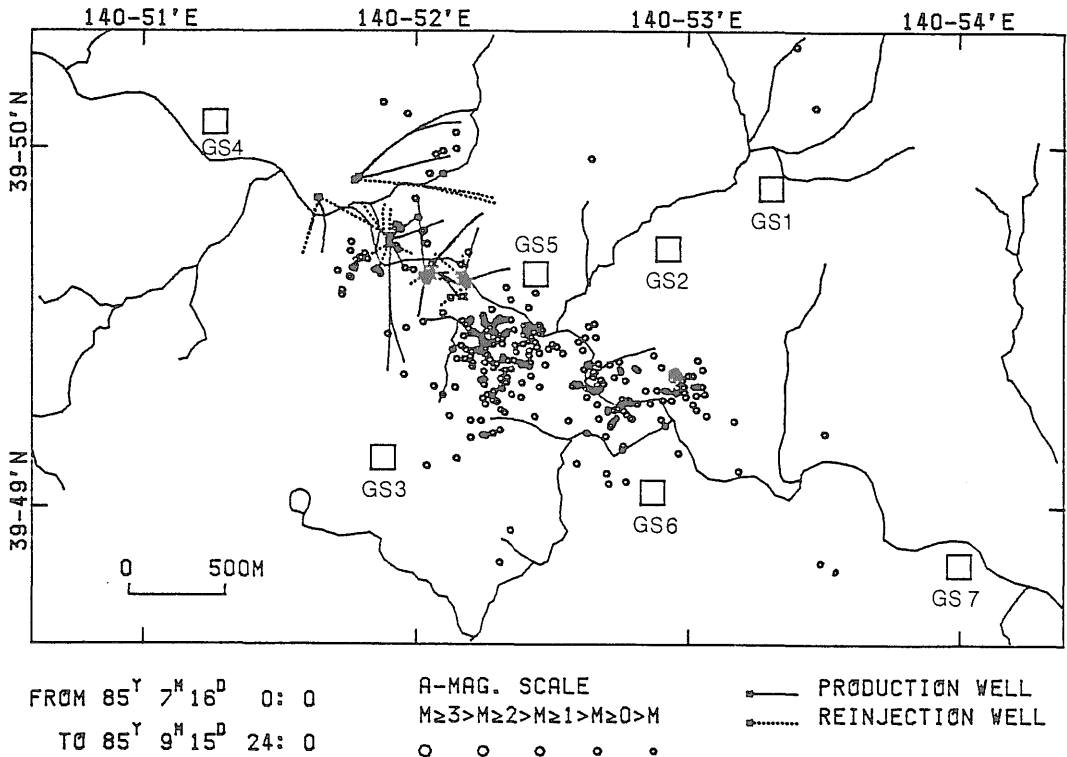
本集録システムの目標は高S/N、高ダイナミックレンジ、広帯域の地震波形データ集録である。地震計の坑井内埋設、V/F変換によるデータ伝送により、ノイズレベルの低い記録が得られている。各観測点毎のノイズレベルを第2表に示すが、ほぼ十数  $\mu\text{kin}$  以下のノイズ

レベルであり、微小地震の観測に十分な状態を達成できた。

第13図に、マグニチュード頻度分布を示す。マグニチュードと累積頻度が直線になる範囲まで検知能力があるとされているが、第13図から、 $M=-1.0$ 程度の小さな地震までの検知能力があることがわかる。波形が振り切れずに記録できる範囲は、観測網内の深さ1 km程度の代表的な地震で $M=1.3$ である。従って、本システムで、 $M=-1.0$ から $M=1.3$ までの幅広い範囲にわたって地震波形データの集録が可能であることがわかる。

第14図に全チャンネルの波形例を示すが、特にP波部分の高周波成分が忠実に記録されている。また極めて近い浅い地震であるにもかかわらずS波がはっきり分離できている。

第15図に波形のスペクトル解析の例を示すが、コーナー周波数が約50 Hzと極めて高周波成分に富んでいることがわかる。P波部分の立上りも明確であり、0.002-0.005秒の精度で読み取りを行っている。震源決定結果を第16図に示す。ここでは走時残差が0.02秒以内のものだけを示した。



第16図 滝の上地域における震源決定結果  
Fig. 16 Result of epicenter location.

8. お わ り に

滝の上地域における地質調査所の微小地震観測システムについて述べた。高 S/N, 広帯域, 高ダイナミックレンジの高品質のデジタルデータ集録が安定して行えるようになった。現在, 種々の事情から観測点は 7 点であるが, データ集録装置のチャンネル数にはまだ余裕があるので今後更に詳しい解析のために観測点の増設も検討したい。

滝の上地域は日本の代表的地熱地域であり, 各種地表調査, 坑井調査により地下状況が詳しくわかっている。また今後葛根田地熱発電所 II 期工事等も計画されており, 本システムによる観測が世界的にもユニークなデータを提供するものと期待される。

今後とも, 必要な場合は臨時観測を行うことも含め, 観測を継続するとともに, 滝の上地域の地下構造, 地熱地域に発生する地震の特性を明らかにして行きたい。

謝 辞 本システムを作っていく上で, 元物理探査部馬場健三, 地殻熱部小川克郎, 金原啓司各氏には終始はげましていただいた。地殻熱部竹野直人技官には, コア, スライムをみていただいた。地震計設置抗掘削, 地震計設置, データ集録システムの製作, 設置, 調整はマークランド(株)笠松隆幸, 武田仁郎, 住鉱コンサルタント(株)植木保吉, 智田明夫の各氏に御協力いただいた。

日常の観測メンテナンスあるいは本システム設計の全体について, 花野峰行氏はじめ日本重化学工業(株)の各位の御協力をいただいた。

文 献

AKI, K. and LEE, W. H. K. (1976) Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first P arrival times from local earthquakes, 1, A homogeneous initial model. *J. Geophys. Res.*, vol. 81, p. 4381-4399.

ANGELIER, J. (1984) Tectonic analysis of fault slip data sets. *J. Geophys. Res.*, vol. 89, p. 5835-5848.

BATCHELOR, A. S., BARIA, R. B. and HEARN, K. (1983) Monitoring the effects of hydraulic stimulation by microseismic event location: A case study. *Society of Petroleum Engineers*, 12109.

藤倉孝次・柳原親孝・中川忠夫・野口 勝・大久保太治(1970) 岩手県雫石町葛根田川(滝の

上温泉)地域の地熱地帯における試錐による地温の分布について. 地調月報, vol. 21, p. 133-154.

GEPHART, J. W. and FORSYTH, D. W. (1984) An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: application to the San Fernando earthquake sequence. *J. Geophys. Res.*, vol. 89, p. 9305-9320.

HOUSE, L., KEPLER, H. and KAIEDA, H. (1985) Seismic studies of a massive hydraulic fracturing experiment. *Proc. of Geothermal Resources Council Annual Meeting, Kona.*

HUNT, T. M. and LATTER, J. H. (1982) A survey of seismic activity near Wairakei geothermal field, New Zealand. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 14, p. 319-334.

井出俊夫(1985) 松川および葛根田地域の地熱系モデル. 日本地熱学会誌, vol. 7, p. 201-213.

KISSLING, E., ELLSWORTH, W. L. and COCKERHAM, R. S. (1984) Three dimensional structure of the Long Valley caldera, California region by geotomography. *U.S. Geol Surv. Open File Rep.* vol. 84-939, p. 151-187.

中村久由・佐藤 浩・宮崎真一・千葉義明(1984) 岩手県滝の上(葛根田)地熱地域におけるフラクチャの特性. 地熱, vol. 21, p. 271-281.

NAKAMURA, H. and SUMI, K. (1981) Exploration and development at Takinoue, Japan. in *Geothermal Systems; Principles and Case Histories*, p. 247-272.

PHILLIPS, D. E. and OPPENHEIMER, D. H. (1984) Induced seismicity in The Geysers Geothermal Area, California. *J. Geophys. Res.*, vol. 89, p. 1191-1207.

SATO, K. (1982) Analysis of geological structure in the Takinoue geothermal area. *J. Geotherm. Res. Soc. Japan.*, vol. 3, p. 135-148.

佐藤 浩・安藤重幸・井出俊夫・鷹 守彦・斎藤清次・千葉義明・土井宣夫・岩田忠雄(1981) 八幡平地域, 玉川溶結凝灰岩類の層序. 地質学雑誌, vol. 87, p. 267-275.

杉原光彦・伊藤久男(1986) 地質調査所における微小地震解析システム. 地調月報, vol. 37,



p. 525-553.

WALTER, A. W. and WEAVER, C. S. (1980)  
Seismicity of Coso Range California, *J.*  
*Geophys. Res.*, vol. 85, p. 2441-2458.

WARD, P. L. (1972) Microearthquakes: prospecting

tool and possible hazard in the development  
of geothermal resources. *Geothermics*, vol. 1,  
p. 3-12.

(受付：1986年9月26日；受理：1987年3月13日)