寄 書

GPS 時計付き地震観測用大容量 デジタルレコーダ

千葉大学理学部地球科学科*

篠原 雅尚

東京大学地震研究所**

平田 直

クローバテック株式会社***

松田 滋夫

Long-term Low-power DAT Seismic Digital
Data Recorder with GPS Clock

Masanao SHINOHARA

Department of Earth Sciences, Faculty of Science,
Chiba University, Yayoi-cho 1-33, Inage-ku,
Chiba, Chiba 263, Japan

Naoshi HIRATA

Earthquake Research Institute, University of Tokyo,
Yayoi 1-1-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

Shigeo MATSUDA

Clover Tech Co., Ltd., Naka-cho 3-1-5,
Musashino, Tokyo 180, Japan

(Received August 27, 1996;

Accepted March 3, 1997)

§1. はじめに

微小地震の機動観測や地下構造探査には、観測点の配置が重要である。そのために、商用電源、有線または無線回線の確保ができない場所にも設置することができる小型で機動性に富むデジタルレコーダがこれまでに開発されてきた [例えば、古村・森谷(1988), 西村・他(1994)]。機動観測用のデータレコーダは、電池駆動であるため、できるだけ低消費電力にしなければならない。記録媒体には半導体メモリーを使用したものが多い。この場合、記録容量を数百 MB 以上にするには、コストの

面からむずかしい。微小地震観測において、連続記録方式で、数週間の観測を行うとすると、数百 MB 以上の記録容量が必要となる。連続記録方式は、微小地震を確実に記録できる、構造探査実験では発震時刻に制限がないと言う長所がある。

近年、海底地震観測のために、DAT (Digital Audio Tape) を記録媒体とした低消費電力で、大記録容量のデジタルレコーダが開発された [篠原・他(1993)]。このレコーダに変更を加え、陸上での地震観測、特に微小地震観測、構造探査実験のため、小型でランニングコストの低い低消費電力大記録容量の連続記録方式データレコーダを開発した。

§2. レコーダ

レコーダの刻時精度は、高精度の微小地震震源決定や高分解能な構造探査において、重要である。最近では GPS (Global Positioning System) 受信機による時計が高精度な刻時装置として利用されている [森田・西村(1993), 西村・他(1994), 近藤・山田(1995)]。これらの刻時装置はミリ秒程度の高精度の刻時を、GPS 受信機を用いて確保している。そこで、海底地震計用に開発されたレコーダに GPS 受信機を付加し、正確な刻時を得ることを開発の方針とした。

2.1 ハードウェア

レコーダの基本的な構成は、海底地震計に利用している DAT レコーダ [篠原・他(1993)] と同じである (Fig. 1)。レコーダに入力された信号は、アナログアンプによって増幅され、ローパスフィルタ、マルチプレクサを経た後、A/D 変換される。A/D 変換の分解能は 16-bit である。入力チャンネル数とサンプリング周波数は、1ch 500 Hz, 2ch 200 Hz, 3ch 100 Hz, 4ch 100 Hz から選択できるようになっている。A/D 変換されたデータは、1 MB の SRAM に一時記録された後、DAT に書き込まれる。DAT には音楽録音再生用のもの (シャープ, RX-P1) を用いたために、安価で低消費電力のレコーダとなった。4ch 入力 100 Hz サンプリングで音楽用 180 分 DAT テープ (容量約 1.5 GB) を用いた場合、データを圧縮せずに、約 17 日間連続記録できる。データ収録ソフトウェアにデータ圧縮機能を付加すると、約 1 カ月の連続記録できる。CPU には、8-bit の HD 64180 (日立) を用いた。記録の刻時、A/D 変換のタイミング等の時刻管理は、CPU が管理するリアルタイムクロック (RTC) が行っている。RTC に使われている水晶発振子 (セイコー電子, DS-MGXO クラス A) は、 5×10^{-7} の精度を持っている。温度特性は、 -20°C から 70°C の動作範囲で、2 ppm 以内である。

* 〒263 千葉市稲毛区弥生町 1-33

** 〒113 東京都文京区弥生 1-1-1

*** 〒180 武蔵野市中町 3-1-5

刻時精度の向上及びレコーダ内の RTC の時刻校正のために、GPS 受信ボード (GARMIN 社, GPS20) を付加し、GPS 時刻およびアンテナの位置を、記録の中に取り込んでいる。CPU のシリアルコミュニケーションポートの一つをレコーダのセットアップのための外部コンピュータとの接続に用いて、残りの一つを GPS 受信ボードとのデータ、コマンドのやり取りに用いている。また、GPS 受信ボードが発生する 1 秒パルスがレコーダに入力されている。GPS 受信ボードが出力する 1 秒パルスの誤差は、 $1\mu\text{s}$ 以内である。しかし、GPS 受信ボードの 1 秒パルスは、CPU の I/O ポートに入力されるために、収録プログラムの実行にかかる時間が、RTC の校正データの実質的な誤差となる。これが最大となる場合は途中で A/D 変換の割り込みがなかった時で、その場合でも 1 ms 以内である。記録収録中、GPS 受信ボードには一定間隔 (通常は約 2.5 時毎) に電源が入り、正秒の GPS 時刻とそれに対するレコーダ内部の RTC の時刻を記録上に書き込む。同時に、観測点の緯度と経度も書き込む。このときの観測点の位置は、シングルポジショニングで得られたものであるが、リアルタイムデファレンシャル GPS 測位も可能である。GPS 受信ボードによる時計をシステムの基準時計としなかったのは、GPS 受信ボードが、5 V、180 mA と電力を消費するので常時電源を供給するのが困難であること、実際に設置される観測点において常に GPS 衛星に対する良好な視

界が得られるとは限らないためである。従って、例えば視界が悪い観測点では、視界の良好な場所で GPS 時刻を獲得した後、観測を開始し、観測終了後に再びレコーダを移動し GPS 時刻を獲得することによって、RTC の校正が可能である。しかし、この方法では、時間的に密な GPS 時刻と RTC の比較ができないため、刻時精度は悪くなる。さらに、GPS 受信ボードを用いなくてもレコーダの時刻校正できるように、外部に RTC の 10 秒パルスを出力した。

電源には、CPU、GPS 用に 6 V (アルカリ単一乾電池 16 本)、DAT 駆動用に 9 V (同電池 12 本)、アナログアンプ用に $\pm 9\text{ V}$ (同電池 12 本) 計 40 本のアルカリ単一乾電池を用いる。消費電流は、記録収録時に CPU 系が、約 20 mA、GPS 受信ボード移動時には、200 mA まで増加する。アナログ系は、常時約 20 mA の電流を消費する。DAT 駆動系が、DAT 起動時に約 1.6 A、記録中で 0.6 A 程度である。アルカリ乾電池 40 本の電源構成で、約 1 カ月駆動可能である。

2.2 ソフトウェア

収録プログラムも篠原・他 (1993) とほぼ同じである。A/D 変換されたデータは、1 MB の SRAM に一時記録され、SRAM が満たされると、DAT にデータを転送する。よってテープ上にできる物理ブロックは約 1 MB となる。また、DAT にデータを転送する時のみ、DAT には電源が入る。DAT レコーダに 8 回データ転送を行っ

Fig. 1. Schematic diagram of the CPU controlled DAT (Digital Audio Tape) recording system. Analog signals are amplified, filtered, and converted to digital data. Digital data are stored in an SRAM (1MB) temporarily. The data are transferred to the portable DAT recorder (SHARP, RX-P1) when RAM becomes full. A GPS receiver unit sends 1 pulse-per-second signal to the CPU, and communicates through an RS232C port.

Fig. 2. Flow chart of data recording software. The software uses many interrupt processes. A real-time clock controls timing of recording system. The GPS time is written in a record header every 8 physical blocks (about two and half hours).

た後、GPS 受信ボードに電源を入れて、GPS 時刻と観測点位置の情報を獲得する (Fig. 2)。時間と位置の情報は、4 KB のデータ毎に付加されているヘッダーに書き込み、篠原・他 (1993) のレコーダとのデータ形式の互換を図っている。

レコーダに各種の設定を行うには、RS232C を利用して、外部のパーソナルコンピュータから行う。パーソナルコンピュータは、通信機能を利用できればよい。現在はパームトップパソコンを用いている。記録開始時刻、記録チャンネル数、GPS 時刻に RTC の時刻を一致させる RTC の時刻設定等が設定できるほか、GPS 受信ボード、DAT レコーダや A/D 変換の動作チェックも行うことができる。また、RTC と GPS 時刻の差やセンサーからの波形を表示するなどの機能も持っている。なお、設定動作チェックは、記録収録中には行えないので、収録中である場合は、一旦収録を停止させないといけない。

2.3 実装

レコーダシステムは、大きさ 46 cm×26 cm×28 cm の FRP 製のケースに実装した (Photo 1, Fig. 3)。ケース

Photo 1. DAT recorder is prepared for an experiment. A GPS antenna cable, a sensor cable, and a cable to a PC as a controller of the DAT recorder are connected to the FRP container. The cable to a PC is disconnected during observation.

Fig. 3. Layout of DAT recorder package. Size of the container is 46 cm×26 cm×28 cm. Top view (upper) and side view (lower) are shown. Total weight including 40 dry cells is approximately 14 kg. The container is made of FRP. A GPS receiver board, a pre-amplifier, a DAT recorder, and batteries are housed in the container.

内には、GPS 受信ボード、レコーダ入力のためのプリアンプ、DAT レコーダ、CPU および A/D 変換基板、電池が格納される。重量は、電池装着時で約 14 kg、電池未装着時で約 7 kg である。

GPS 受信ボードとプリアンプは、FRP ケースに直接ネジ止めされているが、地震計センサーのためのダンピ

ング抵抗を取り付ける基板は、容易に取り外しできるようにした。プリアンプの倍率は、標準で 40 dB であるが、プリアンプ基板の抵抗を取り替えることによって、0 dB から 90 dB までの間で変更できる。

CPU 及び A/D 変換基板は、アナログ回路へのノイズの影響を考慮して、アルミニウムのケースに格納して、シールドを行った。RTC の水晶発振子は、CPU 基板上に実装されている。DAT レコーダは、車載用の防振取り付け材を使って、アルミニウムケースに取り付けた。

40 本のアルカリ単一乾電池は、バッテリーボックスに格納される。このボックスには、簡単な電圧計を取り付け、各電源の電圧をテスター等を使わずに確認できるようにした。

レコーダ部とバッテリーボックスは、ウレタン製のクッションで固定されている。このクッションは、移動時の防振のほか、ケース内の温度変化を軽減する目的もある。また、ケース内のスペースを有効利用して、GPS アンテナとセンサーケーブルを移動時には収納できるようにした。

実際に野外設置する際は、FRP 製ケースは簡易防水にはなっていないので、ポリエチレン製の袋にケースを密封し、地面の上に放置する。夏季など、直射日光による高温が予想されるときは、この上にダンボールの箱をかぶせ、日よけとしている。

§3. 再生システム

波形記録は音楽フォーマットを基にした独自のフォーマットで DAT に記録されているので、DAT 記録を再生する専用の再生システムが必要となる。再生システムは、再生用 DAT レコーダ、再生用ボードとホストコンピュータから構成されている。ホストコンピュータに UNIX ワークステーションを利用するシステムと、パーソナルコンピュータを利用するシステムの 2 種類がある。ワークステーションを用いる再生システムは、従来海底地震計に用いているもの [篠原・他(1995)] と同じである (Fig. 4a)。

ワークステーションを用いるシステムの再生ボードは、DAT レコーダのリモートコントロール機能、データの物理ブロックヘッダー検出機能と 1 MB の RAM を持っている。ワークステーションから再生ボードにデータ再生開始コマンドを転送することによって、再生ボードは、DAT レコーダの走行を開始し、ヘッダーを検出した場所から 1 物理ブロック分 (1 MB) のデータを再生ボードの 1 MB の RAM に転送した後、DAT の走行を停止する。ワークステーション側は、データ転送完了信号を再生ボードから受け取ると、データを再生ボード上

Fig. 4. Schematic diagrams of the two DAT reproduction systems. The original data is duplicated for safe keeping. It takes about 3 hours to reproduce data for 17-day-recording tape using either reproduction system. a) System consists of a Sun SPARC Workstation as a host computer, a converter between the VME bus and the S-bus, and a DAT playback board. Data from the DAT recorder are stored in a RAM on the DAT playback board temporarily and then sent to the host computer. b) System using an IBM PC/AT or compatible as a host computer. A DAT playback board is based on the ISA bus. Data from the DAT recorder are sent to the IBM PC/AT or compatible through 64 KB FIFO and ISA bus. The PC reads data from I/O port and then stores the data to a hard disk.

の RAM から VME バスを通してワークステーションのメモリーに転送する。メモリーに転送されたデータは、ワークステーションの磁気ディスクに保存される。海底地震計のレコーダに用いている再生プログラムでは、ヘッダーに書き込まれている情報を読み取れないために、書き込まれた時間と位置の情報を、転送されたデータから読み取るプログラムは新たに作成した。

パーソナルコンピュータを用いるシステムでは、IBM-PC/AT 互換機と ISA バスの再生ボードを用いる (Fig. 4b). 再生ボードは、このシステムのために開発したものである。ISA バス再生ボードは、DAT レコーダのリモートコントロール機能、64 KB の FIFO を持っている。ホストコンピュータとのデータのやり取りは、I/O ポートを通して行う。ISA バス再生ボードは、データの物理ブロックヘッダー検出機能を持っておらず、データ再生コマンドを受け取ると、テープの走行を始め、すぐにデータを FIFO を通して、I/O ポートに転送する。コンピュータ側の再生ソフトウェアでは、I/O ポートからデータを読み出し、メモリーに転送した後に、磁気ディスクに保存する。よって、ワークステーションの再生システムが、1 物理ブロック毎にテープの走行、停止を繰り返すのに比べ、パーソナルコンピュータの再生ボードでは、複数の物理ブロックのデータを、テープの走行停止なしで、磁気ディスクに保存することができる。物理ブロックのヘッダー検出、時間と位置情報の読み取り等は、後処理として行う。オペレーティングシステムには、MS-DOS か、PC-UNIX のどちらかを用いている。

§4. 観 測 例

開発されたレコーダは、これまでに、パイプロサイス

反射法地震探査におけるパイプロサイス震源の屈折・広角反射波の観測および微小地震の観測に用いられた。1995 年 8 月に行われた淡路島におけるパイプロサイス地震探査および余震観測 [HIRATA *et al.* (1995)] では、計 40 台のレコーダが使用された。この実験では、6 台または 7 台のレコーダからなる計 6 点の小スパンアレイが設置された。センサーには、Mark Products 社 L-28 (固有周波数 4.5 Hz) を用いた。Fig. 5 はそのうちの一つのアレイで得られた余震の波形例である。

レコーダに用いられている RTC と GPS 受信ボードによって得られた GPS 時刻の差を、Fig. 6 に示す。1 日の気温変化によるものと考えられる時間差の日変化も確認することができ、刻時が数 ms の精度を持っていることがわかる。また、この例の場合、GPS 時刻が観測点で得られず、観測期間の最初と最後に GPS 時刻とのキャリブレーションを行った場合にも、刻時誤差は 50 ms 以下であることがわかる。2.5 時間毎に記録された GPS 受信ボードによる観測点の水平位置データのばらつきの大きさは 20~30 m であった。

§5. おわりに

今回開発されたレコーダは、約 17 日間の地震連続記録を無人・メンテナンスフリーで収録し、GPS 受信機による時刻を用いているため、高精度の刻時が可能で

Fig. 5. Example of vertical component seismograms for an aftershock of the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake. Plotting starts at 10:17:20.1, Aug. 19, 1995 (JST). Data were collected at Awaji-shima island, Hyogo. Each trace was recorded by a different DAT recorder. Spacing of recorders is approximately 100 m.

Fig. 6. Temporal variation of the real-time clock (RTC) based on GPS time. The RTC has an accuracy of 5×10^{-7} . The RTC clock time minus the GPS time is calculated every two and half hours. Data were collected in August, 1995 on Awaji-shima island. The RTC has both a linearly changing variation and a periodic variation with a period of one day, suggesting that a daily change of an air temperature affects the RTC. The RTC temporal variations for a day is also shown (Right below). A rapid increase of the RTC-GPS time corresponds to a high air temperature in the daytime.

ある。一度設置してしまえば、回収まで手間がかからないために、多数のレコーダを小人数で、短期間に展開することができる。テープメディアを用いているが、動作は安定しており、1995年8月に淡路島で行った観測で

は、のべ80台のレコーダを設置され、77台分のデータが回収された。また、1996年4月に北海道浦河町で行った観測では、29台中28台からデータが回収された。

謝 辞

このレコーダの基となるDATレコーダは、末広 潔氏を中心とする東京大学海洋研究所のグループによって開発されたものである。また、レコーダの動作試験にあたっては、東京大学地震研究所吉本和夫氏（現東北大学大学院理学研究科）、関根真弓氏、千葉大学理学部津村紀子氏、蔵下英司氏に協力していただいた。

文 献

- 古村孝志・森谷武男, 1988, 微動用及び地震観測用デジタルレコーダの試作, 地震 2, **41**, 431-435.
- HIRATA, N. and TASP Research Group, 1995, Fault system of the 1995 Hyogo-Ken Nanbu (Kobe), Japan, earthquake deduced by aftershock observations and the trans-Awaji seismic profiling, EOS, Trans. Am. Geophys. Union, **76**, No. 46, 372.
- 森田裕一・西村太志, 1993, GPS 受信機基板を用いた地震観測用高精度時計の製作, 地震 2, **46**, 67-74.
- 西村太志・森田裕一・浜口博之, 1994, GPS を内蔵した小型データロガーの開発, 地震 2, **47**, 79-83.
- 近藤恵子・山田功夫, 1995, GPS 受信機を利用した刻時装置, 地震 2, **48**, 429-431.
- 篠原雅尚・末広 潔・松田滋夫・小沢和男, 1993, DAT レコーダを用いたデジタル大容量海底地震計, 海洋調査技術, **5**, 21-31.
- 篠原雅尚・松田滋夫・小沢和男・末広 潔, 1995, DAT レコーダーを用いた海底地震計—再生システム—, 日本地震学会講演予稿集, No. 2, 179.