高機能小型オフラインデータロガーを用いた 高密度地震観測システム

東京大学地震研究所* 蔵下英司・平田 直・森田裕一
白山工業株式会社** 結城 昇

A Dense Seismic Observation System with Small High-performance Off-line Data Loggers

Eiji KURASHIMO, Naoshi HIRATA and Yuichi MORITA

Earthquake Research Institute, The University of Tokyo,
1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan

Noboru YUKI

Hakusan Corporation,
J Tower 10F, 1-1 Nikko-cho, Fuchu, Tokyo 183-0044, Japan

(Received September 2, 2005; Accepted July 14, 2006)

We developed a small-size, light weight, and high-performance data logger, that can be used for crustal scale refraction/reflection experiments, in which hundreds of instruments are deployed over several hundred kilometers. Our new data logger has a single-channel 24-bit analog-to-digital converter. The timing is corrected automatically by a built-in GPS receiver, and its accuracy is always within an error of 1 ms. The waveform data are stored in a NAND-type flash memory with capacity of 128 MB. Recordings are performed based on a programmable schedule. The maximum continuous recording period is about 96 hours at a sampling rate of 125 Hz. The maximum sampling rate is 1000 Hz. The logger has a dimension of 200 mm×120 mm×75 mm, and it weighs 1.5 kg including four 1.5 V D-size dry cells. The small size and light-weight body enhance portability and manageability. Parameters for recording such as sampling rate and schedule of observation are easily set through a Universal Serial Bus (USB) cable by a laptop computer. In order to easily operate hundreds of loggers, we have developed a special container for transportation, storage, and control of logger. The container stores and controls up to 10 loggers, which are simultaneously operated by the computer. During deployment of the logger, its status including GPS clock, and geophone connection and orientation is automatically checked and displayed by a Light Emitting Diode (LED). After the observation, the loggers are restored to the container and the data are downloaded to the computer. We conducted a seismic reflection experiment on the eastern side of Mt. Fuji, in central Japan. Eight people deployed 148 data loggers in a day and recorded seismic signals from explosive sources using a standard 4.5 Hz geophone. We obtained data with well-calibrated time information and high signal-to-noise ratio. The newly developed data logger is confirmed to be useful to obtain spatially dense seismic data with only a small number of crews.

Key words: Small-size data logger, Precise timing system using GPS receiver, Portability, 24-bit analog-to-digital converter

§1. はじめに

近年の地震観測では、広域でかつ空間的に高分解能な構造の推定のために、震源や観測点を多点高密度に配置し、観測される地震波形記録の空間密度を上げることが

* 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

** 〒183-0044 府中市日鋼町 1-1 J タワー 10F

求められている。そのため、地殻・上部マントル規模の屈折法・広角反射法地震探査や深部反射法地震探査では、数百から数千チャンネルのデータ取得が行われるようになった [例えば, Iwasaki *et al.* (2001), Sato *et al.* (2005)]. また、自然地震観測でも 50 から 100 観測点規模の臨時観測が行われている [例えば, Kato *et al.* (2005a)]. 空間密度の高い地震波形記録を得る手段としては、ケーブル設置によるオンライン多チャンネル・デジタル・テレメトリシステム [岩城・他 (1991)] があり、主として反射法地震探査で使用されている。しかし、オンライン多チャンネル・デジタル・テレメトリシステムを用いた観測は、大勢の人数や大きな機材を必要とする大掛かりな観測となるため、測線長を長くするに従って多大な時間と労力が必要となってくる。さらに、複雑な起伏のある場所ではケーブル設置が難しくなり、連続した測線を設定できない場合もある。このような地形的な悪条件下でも観測点を設置したい場合には、オフラインのデータロガーを使用することが考えられる。近年、小型で機動性に富むデジタルレコーダ [森田・浜口 (1996)] や大記録容量のデジタルレコーダ [篠原・他 (1997)] が開発され、観測点間隔が 500 m から 1 km 程度の屈折法・広角反射法地震探査に使用されている [例えば, 蔵下・他 (2002)]. しかし、それらのレコーダは、1 観測点あたりの設置時間が 20~30 分程度かかるため、オンライン多チャンネル・デジタル・テレメトリシステムを用いた構造探査における受信点間隔と同程度の観測点密度 (数十メートル間隔で数百チャンネル) で設置しようとする、ケーブル設置方式よりも多大の時間と労力を必要とする。そのため、オフラインのデータロガーは、反射法地震探査のような空間密度の高い地震波形記録を得るためには、これまで積極的に使われてこなかった。そこでわれわれは、少人数でも短時間に効率良く設置・回収作業が可能なデータロガーとそれをサポートする地震観測システムの開発を行った。小論では、新しく開発したデータロガーと地震観測システムについての性能や、実際に観測して得られた記録について述べる。

§ 2. 単チャンネルデータロガーを用いた地震観測システム

2.1 新しい地震観測システムの設計思想

新しい地震観測システムを開発するにあたっての目標は、可能な限り少ない労力で、しかも高精度な観測データを数百からなる観測点で比較的容易に取得でき、観測後はできる限り迅速に処理できることである。つまり、設置や運用に大変な手間とコストのかかるオンライン多

チャンネル・デジタル・テレメトリシステムに代わる新たなシステムを構築することを目的としている。また、本システムでは、発破のような小数の発震だけでなく、パイプリーク震源や、エアガンのような連続的な多数発震にも十分対応できることも目標とした。

これらを実現するためには、単にデータロガー本体を新たに設計・製造するだけでなく、観測に関わるすべての要素を見直す必要がある。すなわち、①共通の観測スケジュールを数百台程度のデータロガーに確実に、かつ効率的に設定するためのソフトウェアの開発や計算機システムの実現、②データ収録の終了したデータロガーから大量の地震波形データを短時間にかつ効率的に回収すると同時に、ロガーの故障や観測されたデータの異常を表示し、データロガーのメンテナンスを容易にするシステムの実現、③観測点で、地震計センサーとデータロガーが簡便にかつ容易に設置できる方法の実現、などである。

われわれは、上記の点を考慮して、小型・軽量で、短時間での設置・回収作業を可能にしたデータロガーとそれをサポートする観測システムを開発した (Fig. 1)。この観測システムでは、10 台までのデータロガーとそれらを収納できる専用トランク、およびデータロガーの設定・データ回収などを行うプログラムをインストールした 1 台のパソコン (ワーク PC) を 1 つの基本ユニットとし、ワーク PC を使用して、トランクに収納した 10 台のデータロガーに対して、データロガーの測定条件の設定などや観測終了後のデータ回収を一度に行うことができる。また、複数のワーク PC をイーサネットで接続し、それらを 1 台のパソコン (メイン PC) で管理することで、個々のワーク PC で回収された観測データをメイン PC に集めることができる。小論では、まず、新たに開発したデータロガー本体の基本的な性能を紹介し、次に、前述の①および②を実現するために開発した観測システムやソフトウェアの内容を紹介し、最後に、③で述べた観測点の設置時における作業の簡便化を実現するためにロガー本体に内蔵されている機能について紹介する。

2.2 データロガー本体の性能

新しく開発したデータロガーの外見を Photo 1 に、ハードウェアのブロック図を Fig. 2 に、仕様を Table 1 に掲げる。本体の大きさは 200 mm×120 mm×75 mm で、電源の乾電池 (単一 4 本) を装着した状態での重量は約 1.5 kg である。電池の装着のためには、ふたのネジ止めを外す。このネジ穴も含めて、後述のコネクター・容器は防水・防塵規格 IP66 を満たしている。このようにデータロガー本体は小型・軽量であるので、車両を利用した運搬ができない急峻な登山道に沿った測線で観測

Fig. 1. Data flow of the newly developed data logging system. (a) Set up of parameters that control data loggers. (b) Schematic view of the data loggers which record a seismic signal. (c) Download of data from the loggers in standard format.

Photo 1. External appearance of the newly developed data logger. The logger has a dimension of 200 mm×120 mm×75 mm, and it weighs 1.5 kg including four dry cells.

する場合にも、人力による運搬が容易である。データの
入力チャンネル数は1チャンネルとした。これは、この
ロガーの主たる使用目的が、制御震源による構造探査で
あるため上下動地震計のみを利用する場合が多いこと、
および機能を単純化して操作性を向上させるためであ
る。ロガー本体には、2種類の防水コネクタと1つの
LED (Light Emitting Diode) だけが付いておりスイ
ッチ類はない。防水コネクタはGPS (Global Position-
ing System) アンテナ用コネクタと共通コネクタで

Fig. 2. Block-diagram of the newly developed data logging system. The output of the TCXO (temperature compensated crystal oscillator) is compared with the GPS time base, and the frequency of the crystal is adjusted appropriately. A thermometer records temperature every hour (corresponding to the GPS schedule) to verify any large change of the frequency.

ある。ロガー外部にはスイッチを付ける代わりに、地震
計センサーケーブルをロガーに接続することによってロ
ガーが動作を開始するようにした。このような仕組み
は、観測点設置の操作性を上げるために設計したもの
で、2.4節において詳しく述べる。

データロガーの刻時精度は、多点高密度に設置する高
分解能構造探査においては、非常に重要な要素である。

Table 1. Specifications of the newly developed data logger. The logger has a single-channel 24-bit analog-to-digital converter. Its status including GPS clock, and geophone connection and orientation is automatically checked.

Input channel	1
Maximum input signal	0.5 V p-p
Sampling frequency	125, 250, 500, 1000 Hz
A/D resolution	24 bits
Dynamic range	120 dB (250 Hz sampling)
External clock for calibration	GPS receiver
Internal clock TCXO	(± 1 ppm at $-10^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$)
Clock error	less than ± 1 ms when calibrated by GPS
Memory storage	128 MB (flash memory)
Recording period	about 48 hour (250 Hz sampling)
Recoding mode	programmable schedule (Up to 400 windows) or continuous
Self check function	automatic checking of status of a logger and a sensor
Power supply	4 alkaline D-size dry cells
Power consumption	about 0.5 W
Dimension	200 mm×120 mm×75 mm
Weight	1.5 kg (including dry cells)
Water and dust proof	IP66

最近では水晶発振器を GPS 受信機によって補正する時計が高精度時計として使用されている [例えば森田・西村 (1993)]. 本データロガーにも, 精度 1 ppm の温度補償型水晶発振器 (TCXO) とそれを校正する GPS 受信機が内蔵されている. GPS 衛星を捉えることで TCXO の時刻誤差を間欠的に測定し, これをもとにして TCXO の発振周波数を調整し, 長期的に絶対時刻に同期した A/D クロックを生成することで, 常に誤差 1 ms 以下の刻時精度を保つことを可能にした. ただし, GPS 衛星の捕捉失敗等により時刻誤差が 1 ms もしくは 1/2 サンプルを超えた場合には, TCXO の発振周波数の調整を行わず, データ回収後に時刻校正情報ファイルを確認しながら, 後処理で時刻校正を行う. これは誤った時刻校正を行い, 取得した観測データの時刻情報に誤差が生じる危険を避けるためである. 実際の観測では, データロガーの設置条件にもよるが 90% 以上の観測点で常に 1 ms 以内の誤差で時刻校正されている.

データロガーに入力された信号は, $\Delta\Sigma$ 型 A/D 変換器の $\Delta\Sigma$ モジュールにより原サンプリングレート 512 kHz でデジタル・データ化し, さらに $\Delta\Sigma$ モジュール専用の集積回路により, アンチ・エイリアシングのために最小位相の高域遮断フィルタ処理を行い, デシメーション (間引き) され, 最終的なサンプリング周波数は, 1000 Hz, 500 Hz, 250 Hz, 125 Hz の中から選択する. A/D 変換の分解能は 24 bit であり, サンプリング周波数が 250 Hz の場合には実効値で 120 dB 以上のダイナミックレンジを有する. A/D 変換されたデータは時刻情報とともに 128 MB の容量をもつ NAND 型 Flash メモリに書き込まれ, 電池が消耗してデータロガーが停止しても, 記録終了時点までの観測データはメモリに残される. 記録可能時間はサンプリング周波数に反比例し, サンプリング周波数 1 kHz 時で約 12 時間, 125 Hz で約 96 時間の連続記録が可能である.

連続測定以外にも, 人工地震探査に利用することを想定して任意の測定開始・測定終了の時刻を設定して測定することができる (スケジュール観測機能). 測定時間以外は時計を除き, すべての回路がスリープ状態に移行して消費電力を節約する. データロガー本体の消費電力は GPS 衛星捕捉時を含めた平均で約 0.5 W と小さく, 単一アルカリ乾電池 4 本の電力で, 約 1 週間のスケジュール観測ができる. スケジュールの設定は, ワーク PC から, 共通コネクタを用いて USB (Universal Serial Bus) 通信インターフェイスを介して行われる. この通信インターフェイスによって, データロガー内の Flash メモリが USB 大容量記録装置デバイスとしてワーク PC で認識されるため, 記録された観測データの回収も

OS のファイルコピー機能により容易に実現できる. さらに, データロガーの仕様変更を行う際にも, 専用の USB ケーブルを用いてデータロガーのファームウェアの変更を行うことができる.

このデータロガーでは, 固有周波数 4.5 Hz, コイル抵抗 4000 Ω の地震計センサー (Geo Space 社 GS-11D) を専用を使用するようにシャント抵抗 (18.2 k Ω) が内蔵されている. また, 後述の地震計センサーの設置状況試験もこのセンサーを利用することを前提として各種パラメーターが設定されている. データロガー内部のシャント抵抗の変更とファームウェアの修正により, 他の地震計の利用も可能になる.

2.3 データロガー測定条件設定・データ回収システム

観測に使用するデータロガーの台数が増えると, 個々のデータロガーに観測スケジュールや測定条件を設定することやデータの回収に長い時間を要し, このようなシステムの実用に極めて大きな制約を与える. そのため, データロガーの観測スケジュール, 測定条件の設定やデータの回収をできるだけ簡単な操作で, 短時間に実行できることは必須の要件である. また, 多数のデータロガーの状態を表示し, 異常の有無を即時に判断するのを支援し, データロガーの管理を容易にすることも不可欠な機能である. われわれはこのようなことを実現するシステムを開発した.

このシステムでは, 2.1 節で述べたように 10 台までのデータロガーとそれらを収納できる専用トランク, およびデータロガーの設定などを行うプログラムをインストールしたワーク PC を 1 つの基本ユニットとしている (Fig. 1). 1 つの基本ユニットでは, トランクに収納したデータロガーの共通コネクタに USB ケーブルを接続し, ワーク PC 上でトランクに収納した各データロガーを USB 大容量記録装置デバイス (外部ハードディスク) として認識できるようにした. その結果, データロガーの観測スケジュール・測定条件の設定, ロガーの状態の表示, 観測データの回収はワーク PC から見れば, 大容量記録装置デバイスの所定のファイルに読み書きするという単純な作業になる. このほか, ワーク PC は個々のデータロガーについて, 観測スケジュールや測定条件とデータロガー内部のデータ記憶容量の整合性をチェックし, 電源電圧 (電池の電圧) の確認を行い, 観測時に発生する不具合を未然に防ぐことができる. 観測終了後のデータ回収は, トランクに収納したデータロガー内にあるデータを一度にワーク PC に転送する. 転送時にデータは, ワーク PC で win フォーマット [卜部 (1994)] に変換して, 保存することができる (Fig. 3).

Fig. 3. Processing flow of observed data.

さらに、100 台以上のデータロガーを一度に効率的に取り扱うため、いくつかの基本ユニットのワーク PC をイーサネットで接続し、それらをメイン PC で管理する (Fig. 1)。メイン PC は LAN 接続されたワーク PC のファイルサーバー (samba server) として動作する。つまり、メイン PC の下に何台かのワーク PC がつながり、各ワーク PC の下にデータロガーがつながっている。これらがメイン PC から見るとあたかも階層的なファイルのような構造をもち、その読み書きもファイルのコピーと同様に行える。このような仕組みによって、すべてのデータロガーに共通の観測スケジュールや測定条件ファイルを設定し、GPS のアルマナック情報をすべてのロガーで共通にすることも容易に実現できる。さらに、個々のワーク PC で回収された観測データをメイン PC に集め、そこで DDS4 テープドライブに記録し、データのバックアップテープが作製できる。このようにメイン PC、ワーク PC、データロガーという階層構造を取ることによって、100 台以上のデータロガーを極めて容易に取り扱うことが可能になった。

ワーク PC からメイン PC に転送されたデータは、ロガーごとの記録 (共通受振点記録) になっており、それぞれは設定した測定期間ごとの連続データになっている。メイン PC には、このような各ロガーで取得した連

続データから、データの先頭時刻とデータ長を指定することで、発破やパイブレータ震源などの発震ごとのデータに編集するプログラムが備えられている (Fig. 3)。出力データフォーマットとして、アスキー、win、バイナリー形式が選択可能である。バイナリー形式の場合、データは 1 サンプルが符号付 4 バイト整数型で、ファイルの先頭部に 240 バイトのトレイスヘッダーが付加されている。トレイスヘッダーのフォーマットは Barry *et al.* (1975) に記述されている SEG-Y のトレイスヘッダーと同じである。したがって、すべてのデータロガーで得られたデータから、共通な震源からの信号を観測したバイナリデータを抽出した後、それらを結合して、データ先頭部に 3600 バイトのリールヘッダー [Barry *et al.* (1975)] を付加することで、物理探査データ処理において標準的に使用されている SEG-Y フォーマットのデータになる。

2.4 データロガー設置

従来のオフライン・データロガーを用いた観測では、各設置場所における作業時間のほとんどが、地震計やレコーダの動作確認のための時間であり、この作業の簡便化が観測の効率化に大きく寄与する。例えば、時計を校正する GPS 受信機の受信状態や地震計センターの設置状況を手動で確認していたのでは、1 観測点あたりの設

置時間が大変長くなる。また、正常に設置されているか否かを判断するのに専門的な知識やオシロスコープのような専用の機器が必要であれば、未熟者に設置を託すことは事実上不可能であろう。新しく開発した単チャンネルデータロガーでは、設置作業を簡単に、しかも単純にし、誰でも設置できるようにすることに多くの工夫を凝らした。まず、このデータロガーには外部にスイッチがない。共通コネクタに地震計をつないだコネクタを接続することで、低消費電力のスリープ状態にあったデータロガーが動作を開始する。動作開始後は次に述べる手順で設置状態を確認し、正常であればLEDは緑ランプを点滅して次のチェック項目に進み、異常であればLEDは赤ランプを点滅しそのテスト項目で動作を停止する。点滅の回数はそれぞれのテスト項目によって異なることから、設置作業を行う人は設置後ランプの点滅を確認するだけで、正常に設置できたか否かを容易に判断できる。

データロガーは動作開始後、以下の項目のチェックを行う。①観測スケジュールファイルが存在し、記述の書式が正しいかどうか。GPSのアルマナック情報が存在するかどうか。②主電源である単一乾電池と内蔵時計バックアップ用リチウム電池の電圧が規定値（主電源：4.4 V、リチウム電池：2.9 V）以上であるか。③地震計センサーが短絡・断線することなく正常に接続されているか。地震計が横に倒れていないか、あるいは傾いていないか。④GPSアンテナが正常に接続されているか。現在のアンテナの設置場所で、GPS信号を正常に捕らえ、時刻較正が正常に行えたか。⑤ロガー内蔵時計の較正後、観測開始または終了時刻（観測スケジュール）が現在時刻に対して未来の時刻で設定されているか。もし、現在の時刻が、設定していた観測スケジュールのすべての時間帯を過ぎていれば、記録すべき時間帯がないのでエ

Fig. 4. Examples of input pulses and calibration signals for automatic seismometer-sensor installation. The data logger automatically checks the condition of the seismometer by measuring the voltage between input terminals under constant current, and checking the pendulum swing after constant positive and negative currents are cut off. Broken lines and shaded areas indicate the normal range. (a) Input pulses of current. (b) Output voltage for a correctly operating seismometer. (c) Output voltage if the seismometer is not normally connected. (d) Output voltage if the seismometer is turned over. (e) Output voltage if the seismometer is tilted.

ラーとなる。これらのチェックがすべて正常であれば、その時点で観測スケジュール内であれば測定を開始し、観測スケジュール前であれば、観測開始までスリープモードに入る。先ほど述べたように、いずれかの項目が異常であれば、チェックはそこで終了し、LED は異常があったチェック項目に対応した回数の赤い点滅を繰り返すので、作業者が設置時に異常を見逃す可能性は極めて低い。

上記のチェックのうち、地震計センサーのチェックは最も重要なもので、このデータロガー開発の重要な部分の一つであるので、ここで詳しく説明する。地震計が正しく接続されているか否かは地震計に定電流を流し (Fig. 4(a)), その電圧値が地震計のコイル抵抗とシャント抵抗を接続した場合に期待される値を基にして設定した規定値の範囲に収まるか否かで判断する (Fig. 4(b)). また、地震計が正しく設置されているか (横倒しになっていないか) は、一定の正電流と負電流を流し (Fig. 4(a)), 電流を切った後の振り子の反動を測定し判断する。正常の場合は、正負の値が規定値の範囲に収まる (Fig. 4(b)). 地震計の接続が悪い場合や地震計のコイルが断線している場合は、定電流を流したときにコイル抵抗がなくシャント抵抗分のみの電圧となるから、正常なときと異なった電圧を示す (Fig. 4(c)). また、センサーが横倒しの場合は、定電流を流した際の電圧値は正常であるが、振り子が動かないので正負の電流を流した後の正負の出力が見られない (Fig. 4(d)). 地震計センサーが、上下動地震計の場合には鉛直方向から約 25 度以上、水平動地震計の場合には鉛直方向から約 10 度以上傾斜していると、正または負の電流を流した後の出力が規定値の範囲に収まらない (Fig. 4(e)). このように、センサーに定電流を流したときの信号からセンサーの設置状況が正常か否かを判断している。

これまで述べたように、データロガー設置時に、地震計を接続することで自動的に各種のチェックを行い、誰でも判別できる方法でそれを表示する機能をこのデータロガーは有している。この機能は、オンライン多チャンネル・デジタル・テレメトリシステムに匹敵する機能をこのシステムにもたせるために必要不可欠なもので、この観測システム開発の中でも最も配慮した点の一つである。

§3. 観 測 例

新規に開発した単チャンネルデータロガーは、これまでに、制御震源 (ダイナマイト・エアガン・パイプレータ) を用いた屈折法・広角反射法地震探査や反射法地震探査に用いられている [例えば、蔵下・他 (2005)]. ま

た、1 カ所に上下動 1 成分、水平動 2 成分のロガーを設置することにより、3 成分の自然地震観測にも用いられた [Hirata *et al.* (2005), Kato *et al.* (2005b), Sakai *et al.* (2005)].

一例として、富士山東部で実施した反射法地震探査実験の運用結果を述べる。2003 年 9 月に第 6 次火山噴火予知計画に基づく屈折法・広角反射法地震探査が富士山を東西に横断する測線で実施された [及川・他 (2004)]. 制御震源としてダイナマイト発破 (薬量 500 kg) が用いられ、測線上の 5 カ所で発破が行われた。われわれは富士山を横断する東西測線上の最も東側に設定された発破点 (神奈川県相模町) から南に 50 m 間隔で 148 カ所にデータロガーを設置し、ダイナマイト震源からの信号を観測した。測線長は 7.5 km である。収録時のサンプリング周波数は 1000 Hz で行った。148 カ所へのデータロガーの設置・回収作業は 3 班 (各班 2~3 人) で行い、設置作業は 1 日、回収作業は半日で行った。また、データロガーへの電池詰めと設定作業は 5 時間、データ回収作業も 5 時間で完了することができ、少人数でも高密度地震観測データを取得する観測が可能であることが確認できた。この実験では、設置したデータロガーの 98% にあたる 145 台より、解析に使用できるデータが回収できた。このうち、144 台の観測点 (90% 以上) で常に 1 ms 以内の誤差で時刻校正されていた。

得られた記録を Fig. 5 に示す。波形の S/N 比も極めて良好であり、初動は測線全体で明瞭に記録されている。また、地殻深部からの反射波と考えられる後続波も確認できる。これらのことから新しいデータロガーを用いた地震観測システムは、少人数でも空間密度の高い地震波形記録を得るための手段として有効であることが証明された。

§4. 結 論

小型・軽量で、短時間に設置・回収作業が可能であるデータロガーとそれをサポートする観測システムを開発した。新たに開発したロガーは、ロガーとセンサーの設置時に、これらが正しく観測・記録できる状態になっているかを自動的に診断する機能 (セルフチェック機能) をもち、観測点での設置作業を大幅に効率化した。本研究によって開発された観測システムでは、観測時には独立して記録するオフライン方式の観測であるが、測定条件の設定時とデータの回収時には、多数のロガーを同時に接続して操作することができるため、短時間に確実に多数観測点での観測を行うことが可能となった。その結果、地形的に悪条件な地域における稠密観測や、地殻深部をターゲットとした屈折法・広角反射法地震探査の測

Fig. 5. Example of observed seismograms for a 500 kg explosive source detonated on the eastern side of Mt. Fuji. A band-pass filter of 6–25 Hz and a 4 s automatic gain control are applied. Note the high signal-to-noise ratio data along the entire length of the profile.

線（測線長 200～300 km）全体に数百メートル間隔で稠密に観測点を設置するなど、今まで実現が困難であった新しい観測が可能となった。また、このデータロガーは機動性に富み、125 Hz で約 96 時間の連続観測が可能であることから、2004 年新潟県中越地震の発生直後から実施された緊急稠密余震観測にも使用された。本研究によって開発されたデータロガーは、これまで広く用いられてきた高精度小型データロガー〔森田・浜口 (1996)〕の後継機種として商品化され入手可能である。

今後、このデータロガーを用いて数多くの観測が行われることで、新たな地球科学的知見が得られることが期待できる。

謝 辞

このデータロガーの開発は、文部科学省の委託事業として東京大学地震研究所が実施している『大都市大震災軽減化特別プロジェクトⅠ地震動(強い揺れ)の予測「大都市圏地殻構造調査研究」』の一環として行われた。デー

タロガーの運用試験にあたっては、東京大学地震研究所の岩崎貴哉氏、河村知徳氏、松多信尚氏（現 国立台湾大學）に協力して頂きました。ここに記して深く感謝の意を表します。

文 献

- Barry, K. M., D. A. Cavers and C. W. Kneale, 1975, Recommended standards for digital tape formats, *Geophysics*, **40**, 344–352.
- Hirata, N., H. Sato, S. Sakai, A. Kato and E. Kurashimo, 2005, Fault system of the 2004 Mid Niigata Prefecture Earthquake and its aftershocks, *Landslides*, **2**, 153–157.
- Iwasaki, T., W. Kato, T. Moriya, A. Hasemi, N. Umino, T. Okada, K. Miyashita, T. Mizogami, T. Takeda, S. Sekine, T. Matsushima, K. Tashiro and H. Miyamachi, 2001, Extensional structure in northern Honshu Arc as inferred from seismic refraction/wide-angle reflection profiling, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2329–2332.
- 岩城弓雄・橋田 功・多田正明・井川 猛・八木 章, 1991, 高精度多チャンネル地震探査システム, *物理探査*, **44**, 232–240.
- Kato, A., S. Sakai, N. Hirata, E. Kurashimo, S. Nagai, T. Iidaka, T. Igarashi, Y. Yamanaka, S. Murotani, T. Kawamura, T. Iwasaki and T. Kanazawa, 2005a, Short-term spatiotemporal variations in the after-shock sequence of the 2004 mid-Niigata prefecture earthquake, *Earth Planets Space*, **57**, 551–556.
- Kato, A., E. Kurashimo, H. Hirata, S. Sakai, T. Iwasaki and T. Kanazawa, 2005b, Imaging the source region of the 2004 mid-Niigata prefecture earthquake and the evolution of a seismogenic thrust-related fold, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L07307, doi: 10.1029/2005GL022366.
- 蔵下英司・加藤愛太郎・岩崎貴哉・平田 直・松村一男・澁谷拓郎・上野友岳・廣瀬一聖・伊藤 潔・山崎文人・宮下 芳・河原 純・中川茂樹・小原一成・笠原敬司, 2005, 紀伊半島南部下の遷移領域における沈み込むプレート境界面の微細構造, *地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会予稿集*, S053-007.
- 蔵下英司・徳永雅子・平田 直・岩崎貴哉・小平秀一・金田義行・伊藤 潔・西田良平・木村昌三・井川 猛, 2002, 四国東部地域における地殻及び最上部マン托ルの地震波速度構造と沈み込むフィリピン海プレートの形状, *地震 2*, **54**, 489–505.
- 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.
- 森田裕一・浜口博之, 1996, 火山体構造探査のための高精度小型データロガーの開発, *火山*, **41**, 127–139.
- 及川 純・鍵山恒臣・田中 聡・宮町宏樹・筒井智樹・池田 靖・潟山弘明・松尾綱道・西村裕一・山本圭吾・渡辺俊樹・大島弘光・山崎文人, 2004, 人工地震を用いた富士山における構造探査, *月刊地球*, 号外 48, 23–26.
- Sakai, S., N. Hirata, A. Kato, E. Kurashimo, T. Iwasaki and T. Kanazawa, 2005, Multi-fault system of the 2004 Mid-Niigata Prefecture Earthquake and its aftershocks, *Earth Planets Space*, **57**, 417–422.
- Sato, H., N. Hirata, K. Koketsu, D. Okaya, S. Abe, R. Kobayashi, M. Matsubara, T. Iwasaki, T. Ito, T. Ikawa, T. Kawanaka, K. Kasahara and S. Harder, 2005, Earthquake Source Fault Beneath Tokyo, *Science*, **309**, 462–464.
- 篠原雅尚・平田 直・松田滋夫, 1997, GPS 時計付き地震観測用大容量デジタルレコーダ, *地震 2*, **50**, 119–124.
- ト部 卓, 1994, 多チャンネル地震波形データのための共通フォーマットの提案, *日本地震学会講演予稿集*, No. 2, 384.