

# オープンリール型磁気テープ (MT) に保存された データの現存するデバイスでの復元

中野 優\*・熊谷博之\*\*・及川 純\*\*\*

## Retrieval of Seismic Data Recorded on Open-reel-type Magnetic Tapes (MT) by Using Existing Devices

Masaru NAKANO\*, Hiroyuki KUMAGAI\*\* and Jun OIKAWA\*\*\*

### Abstract

Open-reel-type magnetic tapes (MT) were commonly used to record seismic and other observation data more than ten years ago. Although seismic data recorded on MT may contain useful information about past seismic activities, it becomes difficult to retrieve data from MT recently since the devices used to read and write MT have been disposed and replaced by recent higher capacity and portable recording devices. In this paper, we report detailed descriptions how to retrieve Kusatsu-Shirane seismic data recorded on MT using the existing devices and to decipher the data format without a priori information, which may be useful to retrieve MT data used in other seismic networks.

*Key words : Magnetic tape, MT, Seismic record, Data retrieval, Data format*

### はじめに

かつて地震観測の波形記録は、データの量が膨大であるために当時としては大容量の記憶メディアであるオープンリール型磁気テープ (MT) などに保存された。しかし、記憶装置の進歩とともに当時利用された MT などのメディアは現在使われなくなった。MT に保存されたデータの多くは、システムを入れ換える際に CD などの現在読み込み可能な媒体に変換されているが、当時の MT のまま保存されているデータも少なくない。一方、当時 MT の読み書きに利用した装置は年々廃棄されている。データの記録に用いられたミニコンはほとんどの機関では現在稼働しておらず、既に撤去された機関も多いと思われる。また、MT を再生するための装置は各大学の大型計算機センターなどに設置されていたが、それも現在は撤去される傾向にある。

名古屋大学情報連携基盤センター (元大型計算機センター) においても MT 装置が設置されていたが、これも 2000 年度には撤去された。代替りの装置として UNIX ワークステーションに接続されたドライブが用意されたが、これも故障した場合に交換部品の品切れなどの理由で利用できなくなる可能性がある。このように、MT に保存されているデータはいずれ読み出すことができなくなる可能性が大きい。そのため、機材が残っているうちに貴重なデータを取り出しておく必要がある。

近年、観測技術の進歩により高ダイナミックレンジかつ多点高密度の観測データが以前に比べて容易に得られるようになった。このような最新の質の高い観測データの解析からは、多くの新たな知見が得られるが、一方で長期間にわたって蓄積された過去の記録にも貴重な情報が隠されている。例えば、我々はこれまでに 1992 年の草津白根山で行なわれた集中観測のデータを用いて、火山性低周波地震の励起のメカニズムと固有周波数の時間変化の原因について調べた (Nakano *et al.*, 1998)。さらにこの手法を草津白根山の定常地震観測による、より長期間にわたったデータに適用しようと試みた。地震データは地震研究所火山噴火予知研究推進センターにおいて MT に保存されていたものの、MT の再生・記録に用いられていたミニコンは既に廃

2003 年 8 月 28 日受付, 2003 年 10 月 20 日受理.

\* 名古屋大学大学院環境学研究所,

\*\* 防災科学技術研究所,

\*\*\* 東京大学地震研究所.

\* Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University,

\*\* National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention,

\*\*\* Earthquake Research Institute, University of Tokyo.

棄されていた。しかし試行錯誤の結果、我々は MT に保存されていた草津白根山の定常観測のデータを現存のデバイスで読み出すことに成功した。このデータを用いた解析の結果、火山性低周波地震の震源モデルとして、山頂カルデラの下にある熱水系に横たわったクラックの振動が考えられ、さらにクラック内部の熱水系の状態が時間変化していると解釈できることが分かった (Kumagai *et al.*, 2002 a, 2002 b, Nakano *et al.*, 2003)。このように、過去に蓄積されたデータを最新の手法を用いて解析することで、新たな知見が得られることが期待される。

そこでこれを一つの例として、本論では MT に記録されたデータを現存のデバイスで再生する方法を紹介する。本論で扱ったものと異なるシステムで記録されたデータが全く同じ方法で再生できるとは限らないが、本論ではそのようなデータを再生する時にも参考となるよう、データのフォーマットを解読する際の試行錯誤の過程も詳しく記す。

### 観測・記録システムの概要

観測・記録システムについては井田ほか (1989) にまとめられている。ここでは MT のデータを復元する上で利用した情報について簡単に紹介する。観測点は草津白根山山頂の湯釜から半径約 1 km 以内に 6 点設置され、YGW, YNE, JIE, AIM の 4 点は三成分、YNW, JIW の 2 点は上下動の一成分観測である (1991 年 8 月末に上下動一成分の MZW が増設された)。地震計は固有周期が 1 秒、減衰係数が 0.7 の速度型で、出力感度は 240 V/m/s (2.4 V/kine) である。地震計の出力は 54 dB のアンプによって増幅され、AD 変換によって 120 Hz のサンプルレートでデジタル信号に変換される。AD 変換では  $\pm 5$  V の間が符合つき 12 bit の整数に変換される (表 1)。

表 1. 観測システムの概要 (井田ほか, 1989)

観測点数*	6 (7)
地震計固有周期	1 秒
地震計減衰定数	0.7
出力感度	240 V/m/s (2.4 V/kine)
アンプ増幅度	54dB
AD 変換入力電圧	$\pm 5$ V
データ分解能	12bit
サンプル周波数	120Hz

\* 草津白根山山頂設置のもの。1991 年 8 月末に 7 点に増設。

デジタル信号に変換されたデータは、地震研究所に無線により連続的に伝送されたあとミニコンピュータ HARRIS H-300 に転送される。そこでイベントの判定などの処理が行なわれ、対話型プログラムによって MT に記録された。MT は記録密度が 6250 BPI、テープの長さは 2400 フィートのオープンリール型のものである (表 2)。ここで扱うデータの場合、上記の 14 チャンネルに加えて少し離

れた 4 観測点 (上下動) の記録が付け加わり、全部で 18 チャンネルのデータが格納される (MZW 増設後は 19 チャンネル)。

以下に述べる磁気テープに記録されたデータの解読では、上記の情報以外のブロックサイズなどの MT のフォーマットに関する情報や、MT に書き込まれたイベント波形データのフォーマットなどに関しては全く情報が無い状態で再生を試みた。

表 2. 記録システムの概要 (井田ほか, 1989)

記録装置	ミニコンピュータ HARRIS H-300
記録媒体	オープンリール型磁気テープ (MT)
記録密度	6250BPI
テープ長さ	2400 フィート

## MT の再生とデータのフォーマットの解読の手順

### 1. MT の再生

MT の再生には名古屋大学情報連携基盤センターの媒体変換装置 “nucv” を利用した。これは Fujitsu 製 GP400S model 5 (OS は Solaris) に各種メディアの再生装置が付けられたものである (図 1)。この装置で利用できるメディアはオープンリール MT の他に、CD, MO, DVD-RAM, 8 mm テープ, DAT, DLT, 1/4 インチ CMT, カートリッジ型磁気テープなどがある。

これを用いて MT からデータを読み出すのであるが、MT 上のデータのフォーマットに関する情報はほとんどない。そこで直接内容をダンプすることとした。具体的には Solaris 上で次のようなコマンドを使って読み出した。

```
dd if=[デバイス名] of=[ファイル名] ibs=[ブロックサイズ]
```

ここで問題となるのはブロックサイズの指定である。ブロックサイズが不明な場合は、テープ上の実際のブロック



図 1. 名古屋大学情報連携基盤センターの媒体変換装置 “nucv”。ワークステーションの右に MT のドライブが設置されている。ドライブの前に置かれているのが本稿で扱った MT のメディア。

サイズまたはそれ以上の値を指定すればよい。従って読み出しに失敗した時は、この値を大きくして再挑戦すればよい。草津白根山の MT の場合は、ブロックサイズは 8073 バイトであった。テープ上には一般にいくつかのファイルに分けてデータが格納されていることが多い。デバイスを指定する時はこの点に注意し、no rewind (一つのファイルの読み込み終了時にテープを巻き戻さない) のデバイスを指定し、後続のファイルがなくなるまで繰り返し読み込みを行なう必要がある。草津白根山の MT の場合も、テープによって 5~20 程度のファイルに分けられてデータが格納されていた。それぞれのファイルが UNIX 上で一つのファイルとなる。テープ一巻当たり約 100 MB のデータが復元された。

このようにして読み出したファイルは UNIX 上のバイナリファイルとして扱えるので、内容をダンプしてフォーマットを解読すればよい。

## 2. データフォーマットの解読

先にも述べたように、再生したファイルの中に地震波形のデータがどのように配置されているのかという、フォーマットに関する情報はほとんどない。以下ではその解読の手順について詳しく述べる。なお、以下ではテープから読み出した一つのファイルのデータ (UNIX 上では一つのファイル) を「テープデータ」と呼ぶことにする。まず、テープデータを 16 進数でダンプし、さらに ASCII キャラクタで表示し様子を見た (図 2)。一部 ASCII キャラクタデータとして意味が読みとれる部分があるが、全体としてはバイナリで記録されていることが分かる。アドレスが 0x db (図 2 のダンプにおいて 0x 00 00 00 d0 行の 0x 0b 列、0x で始まる数字は 16 進数を表す) から 0x 01 46 までのデータには観測点名とその成分と思われる ASCII データが格納されていることが分かる。観測点名は 3 文字であり、成分は 2 文字であるが空白が 1 文字分補間されており

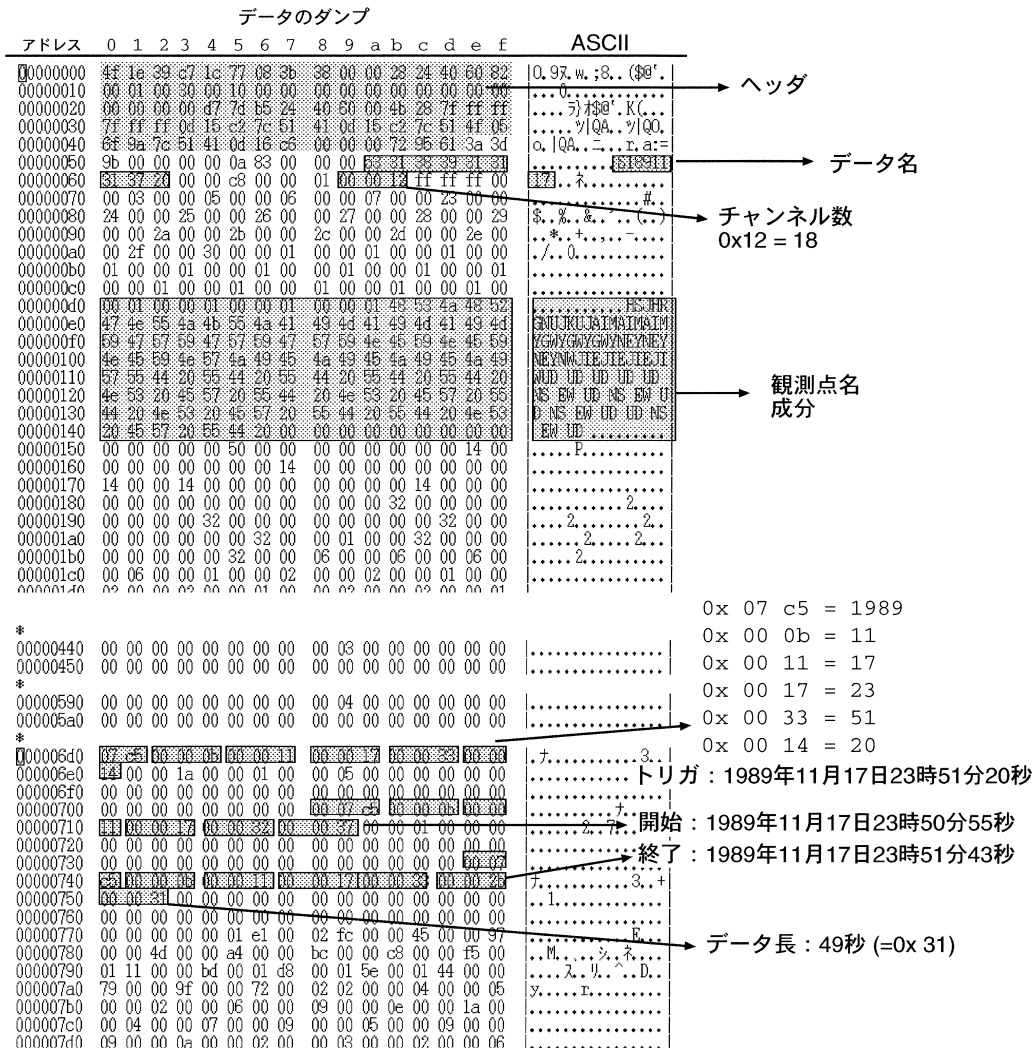


図 2. 磁気テープから再生したデータを 16 進数でダンプし、さらに ASCII キャラクタで表示した例。左端の 8 桁の 16 進数の列はアドレス、最上段に 0~f で示した 2 桁の 16 進数の列はダンプしたデータ、その右にデータに対応する ASCII キャラクタを表示する。ASCII 表示の “.” は、ASCII では表示できないデータを表す。データは 3 バイトを一つの単位として格納されていると思われる。

3 バイトを一つの単位として格納されているようである。また、その前のアドレスが 0x 72 から 0x a4 の辺りを見ると 3 バイト毎に 1 ずつ増えるバイナリのデータが格納されている。これより先のデータを見ても、同様に 3 バイトを一つの単位としてデータが格納されているらしいことが分かる。そこで、通常のバイナリデータは 1, 2, 4 バイトなどが一つの単位であるが、ここでは 3 バイトを一つの単位として、これを integer や float で解釈することで、波形データが得られるかを確認していく。前述のようにデータは 12bit の符合つき整数で記録されているので、まず integer で解釈して解読を試みる。

バイナリデータを読み込む場合にはバイトオーダーに注意する必要がある。すなわち 2 バイト以上の長さをもつ数値データをファイルに記録する際に、上位バイトから配置していくビッグ・エンディアンと、下位バイトから配置していくリトル・エンディアンがある。例えば、258=0x 01 02 をファイル中に [01 02] という順で配置するのはビッグ・エンディアンであり、[02 01] と配置するのはリトル・エンディアンである。どちらを使うかは使われている CPU などのシステムのアーキテクチャに依存する。もし、どちらが使われているかが分からない場合は、両方でデータを解釈してみて推測するなどの手段をとる必要がある。今回対象としたシステムも、どちらが使われているかを前もって知ることはできなかった。しかし 3 バイト単位でデータを見ていくと、数値が記録されていると思われる部分では、はじめの 12 ビット (16 進表示で 6 文字中 3 文字) が常に、000 または fff であった。従って、データは 24 ビット (=3 バイト) を単位とするが、その下位 12 ビットが意味のあるデータであり、ビッグ・エンディアンで格納されていると推測された (図 2)。

### 3. テープデータの構造

3 バイトずつ integer で解釈したデータをグラフにプロットすると、少し変ではあるが地震波のような波形が得られた。従って波形データが 3 バイト長の integer で時間順に記録されていると考えて良い。また、データの一部には波形とは思えないプロットになる部分があり、このような領域はヘッダなどの情報が格納されていると思われる。そこで、まず波形データを確実に得ることから始めた。データから波形が格納されていると思われる領域だけを切り出し、これを 18 (MZW 増設後のデータは 19) チャンネルのデータとして、18 (19) 列のデータに分けてプロットした。ここで、波形データは複数のチャンネルの時系列データの二次元配列になるのでその配置を知る必要がある。すなわち、ある時刻  $t$  のあるチャンネル  $ch$  のデータ  $x(t, ch)$  が、 $x(t1, ch1)$ ,  $x(t2, ch1)$ , ……のようにチャンネル毎にまとめて時系列が配列されているのか、それと

も  $x(t1, ch1)$ ,  $x(t1, ch2)$ , ……のように各時刻について全チャンネルのデータが順に配置されているのか、である。両方の配置を試したところ、後者の方がより地震波形に近い波形が得られた。

しかし、波形が途中で規則的に別のチャンネルのデータにずれて行くように見えたため、余計なデータが含まれると考えられた。波形がずれるところのデータを解析した結果、波形でないデータには次のようなものがあることが分かった。すなわち、テープの構造に関するものと波形以外のデータ (ヘッダなど) である。

テープの構造に関するものには以下のようなものが含まれた (図 3)。

- (A) テープデータの先頭に 78 バイト : ヘッダ,
- (B) 8073 バイト毎に 9 バイト : ブロックヘッダ,
- (C) 336 バイト毎に 3 バイト : デリミタ.

(A) は全てのテープデータの先頭に配置されていた。内容はそれぞれ少しずつ異なっていたが、その意味は容易には解読できなかった。(B) は 3 bytes integer では解読できない内容であり、同じパターンが 8073 バイトごとに出現した。出現の間隔がテープデータのブロックサイズと同じであることから、ブロックのヘッダまたはデリミタであると思われる。(B) は (A) の直後から出現し、テープデータの最後には配置されていないことから、ここでは (B) を「ブロックヘッダ」と呼ぶことにする。また (B) で始まり次に (B) が出現する直前のデータまでの 8037 バイトを「テープブロック」と呼ぶことにする。テープデータは (A) の後にこのテープブロックが必要な数配置された構造となっていた。(C) は (B) の直後とその後と 336 バイトごとに出現し、3 bytes integer で解釈すると値が 1 ずつ増えていた。しかし地震波形データとの関連はみられなかった。ここでは (C) を「デリミタ」と呼ぶことにする。

これらのテープの構造に関する不要な部分を取り除いたデータを連結すると、地震に関連したデータのみからなるデータの列が得られた。このデータは以下に示すように、一イベントごとのデータのブロックが時間順に配置された構造となっていた。この一イベントのデータのブロックを「イベントデータ」と呼ぶことにする。イベントデータは可変長である。

イベントデータは、波形を表すデータを含むがそのほかにも様々な内容が含まれた。データを 3 bytes integer で表示し解析した結果、以下のような部分に分けられることが分かった。なお、チャンネル数の変化によりこれらのデータの長さは変化するので、以下では 18 チャンネルの場合の長さを示し、19 チャンネルの場合を ( ) 内に示す。

- (a) イベントデータの先頭に 6660 (6993) バイト : イベントヘッダ,
- (b) 一秒分の波形データ 6660 (6993) バイト : 秒ブ

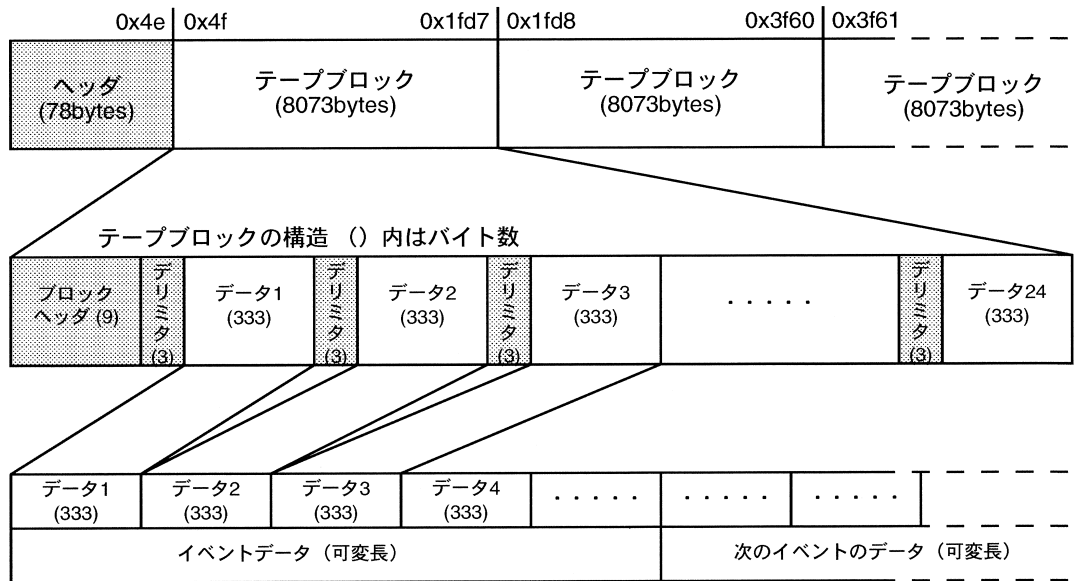


図 3. 磁気テープから再生したデータのフォーマット. データの先頭に 78 バイトのヘッダが配置され, その後ろに 8073 バイトのテープブロックが複数配置されている. テープブロックは 9 バイトのヘッダの後に 333 バイトのデータが 3 バイトのデリミタで区切られて配置されている. このデータを接続すると, 地震のイベントデータとなる.

ロック.

イベントデータは, 一つの (a) の後に (b) が必要な数続く構造となっていた (図 4).

さらに, 秒ブロックには波形の情報以外に時刻の情報などが含まれ, 以下のような構造であった (図 5).

- (b1) ブロックの先頭に 21 バイト: 時刻情報,
- (b2) 波形データ 6480 (6840) バイト,
- (b3) 0x 00 で埋めた 159 (132) バイト.

この中の (b2) のみを取り出すと 18 (19) チャンネルの波形データが得られた. 波形データは, 各時刻の 18 (19) チャンネル分のサンプルが時間順に並んでいる形式であった (図 5). また, (b1) は 3 bytes integer で表示すると, 年, 月, 日, 時, 分, 秒であり, 出現する毎に一秒ずつ値が増加していたので, その秒ブロックの波形データの開始時刻であると思われる.

最後に, 残されたイベントヘッダの内容を解読する. これを 3 bytes integer および character で表示して内容の解読を試みた. ヘッダの内容は一部未解読であるが, これまでに以下の内容が含まれることが分かった (図 2, 図 6).

- (a1) データ名 (9 バイト, character): "S" で始まり, テープデータの先頭のイベントの日付らしい数字が続く,
- (a2) チャンネル数 (3 バイト, integer): 18 または 19,
- (a3) 各チャンネルの観測点名と成分 (各 3 バイト ×

チャンネル数, character),

- (a4) トリガ時刻 (18 バイト),
- (a5) 先頭秒ブロックの開始時刻 (18 バイト),
- (a6) 最終秒ブロックの開始時刻 (18 バイト),
- (a7) データ長 (秒) (3 バイト).

上記の情報は, 以下の根拠に基づいてその内容を推定した. (a2) のチャンネル数は, 18 チャンネルのデータと 19 チャンネルのデータを比較し, 常にチャンネル数と一致していたため. (a5), (a6) の先頭, 最終秒ブロックの時刻は, 解読済みの秒ブロックの先頭及び最終ブロックの時刻と一致するため. (a7) は (a5) と (a6) の時刻の差 + 1 秒に一致するため. また, (a4) の時刻は (a5) の記録開始時刻より常に 15 秒 (時期によっては 10 秒や 25 秒など) 後と常に一定であり, 波形に見られる初動到達時刻とほぼ一致したことからトリガ時刻であると推定した. なお (a1), (a3), (a4), (a5), (a6) は integer または character で表示すれば容易に認識できたが, (a2) と (a7) はいくつものイベントのヘッダを比較する過程でこれらの内容がヘッダに記述されていることが認識された. また, ヘッダには未解読の部分が残っている (図 6 のハッチのかかった部分). これらの内容はほとんどが 0x 00 であるが, そうでない部分には何らかの情報が含まれ, 3 bytes integer で記述されているように見える. しかし, 波形の表示に必要な情報は既に十分取得でき, またこれらは容易には意味が推定できなかったためこれ以上の解読は試みなかった.

1 unit (u) = 3 bytes (b)

イベントヘッダ	秒ブロック (1秒目)	秒ブロック (2秒目)	...	次のイベント
2220 (u) = 6660 (b) : 18 ch. 2331 (u) = 6993 (b) : 19 ch.	2220 (u) = 6660 (b) : 18 ch. 2331 (u) = 6993 (b) : 19 ch.			

図 4. イベントデータのフォーマット. 先頭に 6660 バイト (18 チャンネル) または 6993 バイト (19 チャンネル) のヘッダがあり, その後ろに 1 秒分ずつのデータ (秒ブロック) が地震記録の長さだけ配置されている. イベントデータは可変長である.

1 unit (u) = 3 bytes (b)  
nch はチャンネル数  
fs はサンプル周波数 (120 Hz)

時刻情報 integer: 6 (u) = 18 (b) 年、月、日、時、分、秒	1 (u) = 3 (b)	波形データ integer: fs x nch (u) 120 x 18 = 2160 (u) = 6480 (b) 120 x 19 = 2280 (u) = 6840 (b)	0x00 で埋めてある 53 (u) = 159 (b) : 18 ch. 44 (u) = 132 (b) : 19 ch.
--	------------------	--	---

波形データ  $x(\text{時刻}, \text{チャンネル})$  は  
 $x(t_1, \text{ch}_1), x(t_1, \text{ch}_2), \dots, x(t_1, \text{ch}_{18}), x(t_2, \text{ch}_1), x(t_2, \text{ch}_2), \dots$   
 の順で配置

図 5. 秒ブロックのフォーマット. 先頭に秒ブロックの開始時刻が integer で記録され, その後ろに波形の振幅値が integer で記録されている. 波形データの後ろには, 秒ブロックの長さが 333 バイトの整数倍となるよう 0x 00 で補填している.

1 unit (u) = 3 bytes (b)  
nch はチャンネル数

データ名 character: 3 (u) = 9 (b) e.g. S1880614 先頭データの日付	2 (u) = 6 (b)	チャンネル数 (nch) integer: 1 (u) = 3 (b)	1 (u) = 3 (b)	nch x 2 (u) = nch x 6 (b)	観測点名 character: nch (u) = nch x 3 (b)
成分 character: nch (u) = nch x 3 (b)	nch x 26 (u) = nch x 78 (b)	トリガ時刻 integer: 6 (u) = 18 (b)	12 (u) = 36 (b) : 18ch. 13 (u) = 39 (b) : 19ch.	先頭秒ブロック時刻 integer: 6 (u) = 18 (b)	
12 (u) = 36 (b) : 18ch. 13 (u) = 39 (b) : 19ch.	最終秒ブロック時刻 integer: 6 (u) = 18 (b)	データ長 integer: 1 (u) = 3 (b)	1630 (u) = 4890 (b) : 18 ch. 1709 (u) = 5127 (b) : 19 ch.		

図 6. イベントヘッダのフォーマット. チャンネル数, トリガ時刻, 先頭秒ブロック時刻, 終了秒ブロック時刻, データ長などが integer で, 観測点名, 観測成分, などが ASCII キャラクタで記録されている. ハッチのかかった部分は 0x 00 などの意味の無いデータで埋められているか, または内容が未解読の部分.

## 再生した波形の例

図7にMTからデータを読み出すことで得られた低周波地震の波形の例を示す。波形の右上の数字は観測波形の記録の開始時刻であり、横軸は記録開始からの時間である。縦軸は表1のパラメータを用いて速度の値に変換したものであり、スケールは全ての波形で共通である。ここでは1989年10月後半から11月にかけて群発した50以上の低周波地震から代表的なものを選んで記した。時間の経過とともに、固有周波数と減衰定数が変化することが波形からも読みとれる。

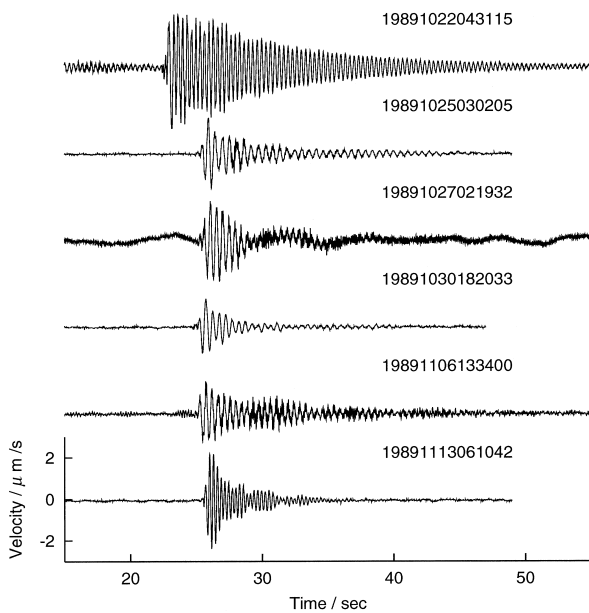


図7. 再生した波形の例(観測点JIEの上下動成分)。波形の右上の数字は観測波形の記録開始時刻、横軸は記録開始からの時間。縦軸は表2のパラメータを用いて速度の値に変換した。

## 本手法の適用性について

観測データがMTに保存されている観測網として、草津白根山以外にも例えば富士山、伊豆大島(井田ほか, 1989)や浅間山などがある。これらのうち、富士山と浅間山についてはMTのデータを再生する計画がある(本稿執筆時点)。MTの再生に関しては本論で述べた方法で可能である。データのフォーマットについては、富士山のデータについては本論で扱ったものと同じシステムで記録されているので(井田ほか, 1989)、観測点の数の違いによるヘッド長の違いなどを補正すれば、本手法をそのまま適用するこ

とができると思われる。浅間山のデータのフォーマットについては本論で述べたものと異なると思われるが、たとえフォーマットに関する情報が残っていても、再生したデータを本論で述べた手法を参考に順に解釈していけば、再び波形データが得られるはずである。

## おわりに

本論では、ミニコンを用いてオープンリール型磁気テープに記録された草津白根山のデータを例にデータの復元と解釈の方法を述べたが、現有のコンピュータ上のデータとして取得できれば、どのようなデバイスのデータでも記録フォーマットを順に解釈して波形記録を復元できる可能性がある。ここで一番問題なのは、記録メディアを再生するためのハードウェアが利用可能かということである。やはり古いメディアに記録されたデータは、再生用のハードウェアを廃棄する前に現有の媒体に変換しておくことが、過去の貴重なデータを失わないためには重要である。

過去のデータを再生し解析することは、長期間にわたった活動の推移や現在の活動の位置付け、さらには今後の活動の推移を予測する上で重要なものである。また近年開発された新しい手法を適用することによって、古いデータからも新たな知見が得られることも十分期待できる。本論で述べた手法が過去の貴重なデータの再生に役立てば幸いである。

## 文献

- 井田喜明・長田 昇・沢田宗久・小山悦郎・鍵山恒臣, 1989, 草津白根山における常設地震観測と1989年1月6日の小噴火, 地震研究所彙報, **64**, 325-345.
- Kumagai, H., B. A. Chouet, and M. Nakano, 2002 a, Temporal evolution of a hydrothermal system in Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, inferred from the complex frequencies of long-period events, *J. Geophys. Res.*, **107**, 2236, doi : 10.1029/2001JB000653.
- Kumagai, H., B. A. Chouet and M. Nakano, 2002 b, Waveform inversion of oscillatory signatures in long-period events beneath volcanoes, *J. Geophys. Res.*, **107**, 2301, doi : 10.1029/2001JB001704.
- Nakano, M., H. Kumagai, M. Kumazawa, K. Yamaoka and B. A. Chouet, 1998, The excitation and characteristic frequency of the long-period volcanic event: An approach based on an inhomogeneous autoregressive model of a linear dynamic system. *J. Geophys. Res.*, **103**, 10031-10046.
- Nakano, M., H. Kumagai and B. A. Chouet, 2003, Source mechanism of long-period events at Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, inferred from waveform inversion of the effective excitation functions, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **122**, 149-164.