

防災科学技術研究所における広帯域地震観測

堀 貞喜*

防災科学技術研究所

Broad-Band Seismic Observation by the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

by

Sadaki Hori

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

Abstract

Since early 1989, a very broadband seismographic system has been in operation at several seismic stations within the Kanto-Tokai network of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. The system consists of a Streck-eisen-1 broadband sensor (STS-1) and several devices for data acquisition. The STS-1 seismometer is equipped with three component BRB (BRoadBand) outputs corresponding to ground velocity in a dynamic range of about 140 dB and LP (Long Period) outputs corresponding to ground acceleration. The BRB output is digitized by the Quanterra Q52K-1 24-bit AD converter at a sampling interval of 0.05 s. The Q52K-1 digitizer can produce precise timing information by receiving pulses from the external clock synchronized to JJY or NHK clock signals. The data stream including a clock string as a header created by Q52K-1 is received by a personal computer (PC9801) and recorded continuously on 8 mm cartridge tape (EXB8200). The large capacity of the tape (about 2 GB/volume) ensures the storage of the data for a period of about 70 days. The STS-1 seismometer is installed at the base where a high sensitivity sensor for microearthquake observation and a middle period sensor for strong motion observation have already been installed. The high sampling-rate and continuous broadband seismic data enables us to determine the precise features of source processes of earthquakes.

Key words : brodbband seismic observation, data processing system

キーワード : 広帯域地震観測, データ処理システム

*地圏地球科学技術研究部地震前兆解析研究室

1. はじめに

防災科学技術研究所(以下「防災科研」と略す)は、国の地震予知計画と平行して始まった「首都圏南部における地震活動に関する特別研究(昭和44年度～)」と「関東・東海地域の地殻活動に関する特別研究(昭和53年度～)」において、関東・東海地域における地震予知研究のための基礎的なデータを収集する目的で、世界でも有数の高密度地殻活動観測網を完成させた(浜田ら, 1982)。その一方で、観測網から送られてくる大量のデータを効率的に処理するための計算機システムである、「地震前兆解析システム(APE, Analyzing System for Precursors of Earthquakes)」を開発し(松村ら, 1988)、高品位の地殻活動データを蓄積している。このシステムでは震源パラメータや地震波の初動時刻データの他に、地震波形記録も大容量の光ディスクを媒体として蓄積している(井元, 1988)が、こうした波形データは、反射波や変換波等を用いた地下構造の研究に役立っている(例えば, Obara and Sato, 1988 ; Hori, 1990)。

ところが、主として初動時刻の検測を目的として設計された固有周期1秒の高感度地震計によって収録された波形データは、周波数帯域やダイナミックレンジが非常に限定されており、地震によって励起される地震動を詳細に解析するには極めて不十分なものであると言わざるを得ない。従来、地震動を収録することを目的とした地震観測では、強震動の観測にはサーボ型加速度計のような強震計を、表面波や地球自由振動のような長周期地震動の観測には、ラコステ重力計のような長周期地震計を用いるなど、それぞれの目的に応じた機器を利用してきた。こうした観測手法の分業体制は、例えば(微)小地震と大中地震との相似性や短周期から長周期までの統一的な断層破壊現象の研究に、少なからぬ支障を与えてきた。

最近スイスのストレッカイゼン社が開発(Wielandt and Streckeisen, 1982)した、リーフスプリング型の変位帰還型地震計(STS-1地震計)は、従来の地震計と比較すると周波数帯域・ダイナミックレンジが格段に広く、上で述べた波形解析における問題に解決をもたらすものとして期待されている。STS-1地震計は、その優秀な機器特性が高い評価を受け、グローバルな地震観測網の標準器(Roult and Romanowicz, 1984 ; POSEIDON プロジェクト会議, 1988)としてだけでなく、ローカルな地震観測にも広く用いられるようになってきた(山田ら, 1989 ; Kanamori, 1989)。防災科研でも、関東・東海地域に発生する地震の震源過程を詳細に解析するために、千葉県館山市と山梨県都留市にこのSTS-1地震計を設置した。本論文ではこの地震計によって得られるデータ収集のためのシステムと実際に収録されたデータ例について報告する。

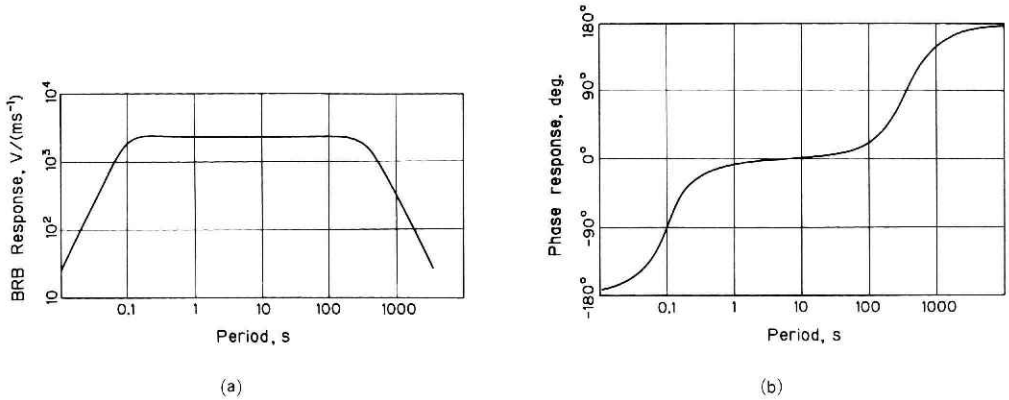


図1 STS-1地震計BRB出力の周波数特性。(a)振幅特性。(b)位相特性。

Fig. 1 Frequency dependence of the BRB output of the STS-1 seismometer. (a) Amplitude response. (b) Phase response.

2. データ収集システム

2.1 STS-1地震計の特性

STS-1地震計は上下動成分にリーフスプリングを応用した変位帰還型のセンサーであり、その出力には速度に比例した電圧が得られるBRBと、加速度に比例した電圧が得られるLPがある。この地震計の第1の特徴は広い周波数特性にある。Fig. 1にBRB出力の振幅と位相の周波数特性図を示す。この図からわかるように振幅特性は0.1秒から360秒までの広い範囲でほぼ平坦であり、位相のずれも1秒から100秒までの範囲でほぼ無視できるほど小さい。また、図には示していないが、LP出力は100秒以上から無限大の周期まで振幅・位相とも平坦な特性を持っている。第2の特徴は広いダイナミックレンジである。カタログによるとBRB出力のダイナミックレンジは140dBもあり、±5 mm/s以上の速度振幅を持つ地震動まで記録することができる。防災科研の定常観測に用いられている固有周期1秒の高感度地震計と比較すると、周波数帯域は問題にならないほど広いことは自明であるが、対数圧縮方式を採用した収録段階でのダイナミックレンジ78dB(浜田ら, 1982)と比較しても約1,000倍あることになる。

2.2 STS-1地震計の設置

STS-1地震計は千葉県館山市(館山, TYM)と山梨県都留市(菅野, SGN)の観測点に設置した。この地震計の設置場所としては、長周期地震動の記録まで安定して収録するためにも、温度変化の影響を受けにくい横坑の観測点が望ましい。防災科研が所有する地殻活動観測施設のほとんどはボアホール(縦坑)型であるが、館山観測点は国土地理院の所有する横坑の地殻活動観測場であり、菅野観測点は鉾山の廃坑跡を利用した横坑の観測点である。前者には

防災科研の定常観測用の高感度地震計が、後者には強震観測用の中周期地震計が設置されているが、STS-1地震計はこれらのセンサーと同一の台座に設置することにした。台座を共有しているため、STS-1地震計と高感度地震計または中周期地震計によって同一の地震を収録することにより、センサー特性等の比較観測をすることが可能である。

取扱説明書によると、台座に砂を敷き詰めてからグラススペースを置き、その上にセンサーをセットするように指定されているが、日本のように有感地震が頻発する地域では、このような設置方法は現実的でないため、両観測点ともグラススペースを台座にモルタルで固定した。また、説明書にはセンサーにグラスベルをかぶせて密封した後、内部を減圧するとの指定もあるが、SGNの水平動成分に関しては、内外の圧力平衡を保つ山田ら(1989)の設置方法を採用して、気圧変動の影響を少なくした。なお、STS-1地震計の固有周期はジャンパーの切り替えによって20秒と360秒が選択できるようになっているが、TYM、SGN 両観測点とも360秒に設定した。

2.3 収録システム

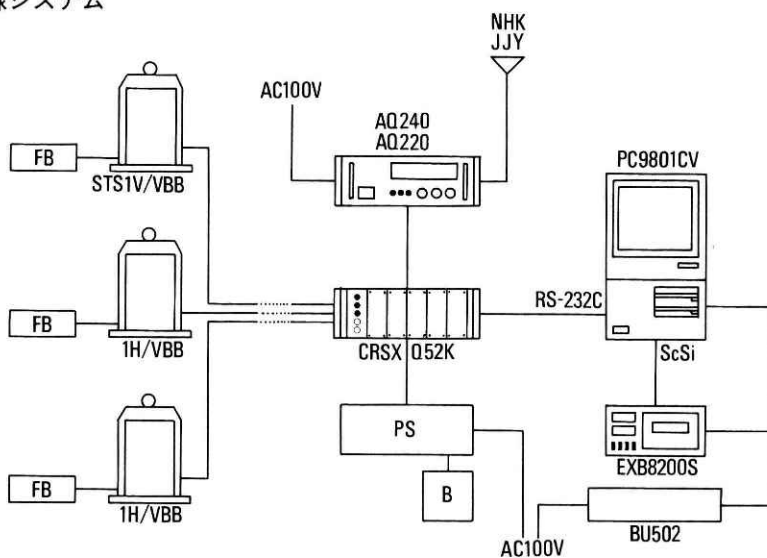


図2 STS-1地震計データ収録システムのブロック図。STS1V/VBB：上下動成分のセンサー。STS1H/VBB：水平動成分のセンサー。FB：フィードバックボックス。AQ220(AQ240)：時刻信号発生器。CRSXQ52K：24bitAD変換器。PS：無停電電源装置。B：バックアップ用バッテリー。PC9801CV：パーソナルコンピュータ。EXB8200S：データ記録装置。BU502：交流用無停電電源装置。

Fig. 2 Block diagram of the recording system for the broadband seismic observation. STS1V/VBB : Sensor of a vertical component. STS1H/VBB : Sensor of a horizontal component. FB : Feed back box. AQ220 (AQ240) : Clock pulse generator. CRSXQ52K : 24-bit digitizer. PS : Power supplying device. B : Battery unit for PS. PC9801CV : Personal computer. EXB8200S : Data recording device. DU502 : AC power supplying device.

STS-1地震計のための収録システムは、データ転送を含めた完成品がアメリカの Quanterra 社から提供されている。このシステムの特徴は、センサーの広いダイナミックレンジを生かすため、データの取り込み部分で24bitのアナログーデジタル変換器(AD変換器)を用いていることである。しかしこのシステムは高価であるため、日本の各機関はそれぞれに工夫を凝らしたシステムを採用している(例えば、山田ら、1989；鷹野ら、1989)。

防災科研のシステムは、AD変換器のみ Quanterra 社のもの(24bit)を用いることにし、波形記録の保存には大容量の記録媒体を用いて現地で行うこととした。Fig. 2 にシステムのブロック図を示す。Fig. 2 で CRSXQ52K と記してあるのが Quanterra 社の AD 変換器(以下「ADC」と略す)で、センサーからの出力電圧をデジタルデータに変換するとともに、STS-1地震計に必要な $\pm 15V$ の電源の供給も行っている。ADCに必要な電源(24V)は、アムコ社製のバックアップ用バッテリー付きの無停電電源装置から供給されており、これによって10時間以上の停電にも耐えられるようになっている。ADCには精度の高い時計が内蔵されているが、外部時計の信号も取り込むことが可能である。本システムではエコー計測器社製の JJY 較正の時刻信号発生器(TYM)と同社製の NHK 時報較正の時刻信号発生器(SGN)を外部時計として用いた。総合精度は前者の方が $1\mu s/day$ で、後者の $2ms/day$ と比べると3桁以上も良いが、SGNでは地形的に JJY 放送が受信できないためこの機種を用いた。ただし、ADCのサンプリング間隔は1/20秒なので後者の精度でも観測には支障はないものと考えられる。

地震波形を収録する方法としては、入力した信号の全てを収録する連続方式のほかに、信号のレベル判定を常時行い、そのレベルがあるスレッシュホールドを越えた場合のみデータを取り込むトリガー方式がある。一般に近地地震の収録には短いサンプリング間隔のトリガー方式が、遠地地震の場合長いサンプリング間隔の連続方式が採用されることが多い。前述したように STS-1地震計の出力には BRB と LP の2つがあるが、例えば前者の出力は近地地震のみを対象としてトリガー方式を、後者の出力は遠地地震のみを対象として長いサンプリング間隔の連続方式を採用することも考えられる。ところが本システムで採用した ADC は BRB 出力しか対象としていないため、LP 出力を連続収録するためには AD 変換器を含めた別の収録システムが必要となってくる。後述するように、STS-1地震計の BRB 出力は、地震計の特性を補正してやれば、地球自由振動などの超長周期地震動の解析にも十分利用できるため、LP 出力のための別システムは用意せず、ADC でデジタル化された BRB 出力の全データを連続で収録することにした。

ADC でデジタル化されたデータは毎秒9600bitの転送速度で RS-422(RS-232)から出力される。データは時刻情報等が付与された冗長な形式になっており、その量は1秒あたり328B(1日分で28MB以上)にも達するので、連続で収録するためにはアクセスの速い大容量の記録装置が必要となる。本システムでは記録装置として、EXABYTE 社製の EXB-8200を用いることにした。EXB 8200は、8mmカートリッジテープを用いた記録装置で、テープ1巻あ

たりの容量は最大2GBである。また、データの書き込み速度は実効で毎秒246KBもあるため、ADCの出力を連続収録するのに何ら支障はない。EXB-8200を用いることによって、70日以上のデータをそのまま連続で書き込むことが可能となっている。

ADCの出力をRS-232を介して受け取ってEXB-8200に書き込むという処理はNEC社製のパーソナルコンピュータPC9801で行った。そのためのプログラムはN88BASIC(MS-DOS)で書かれている。後の再生作業のことを考えると、例えば1日ごとにクローズ処理をしてファイルを細分化したほうがデータの検索が容易になると考えられる。ところがEXB-8200はファイルマークを書き込むのにやや時間がかかるため、ファイルをクローズするとその間欠測が生じてしまう。近地地震の場合、この欠測が支障を与えることはほとんどないが、遠地地震によって励起される地球自由振動を解析する場合、時には1週間を越えるような長さの連続データが必要となることもあるため、ファイルのクローズ処理は行わず、原則としてテープ1巻あたり1ファイルとした。

波形記録の収録されたカートリッジテープは1~2ヶ月に1度回収し、地震波形の記録された必要な部分を抽出することにした。再生・抽出のための処理は防災科研にあるパーソナルコンピュータで行う。テープに収録された波形データには1秒毎に時刻情報が付与されており、これを検索することによって必要な時刻のデータを抽出することが原則的には可能であるが、そのためにはかなりの時間がかかるため余り現実的でない。今回作成した再生・抽出のためのプログラムでは、必要とする時刻を入力すると、テープ先頭時刻からの経過時間とそれから割り出されるデータ量をあらかじめ計算し、その部分のデータを読み飛ばすことにした。こうすることによって、テープ終端部分のデータでもパラメータをパーソナルコンピュータに入力してから、約4時間放置すれば抽出できるようになった。抽出されたデータはフロッピーディスクに格納され、必要に応じて大型計算機やワークステーションに転送して解析することになる。

3. 収録された波形の例

実際にSTS-1地震計で収録された地震波形と、定常観測で使用している固有周期1秒の高感度地震計で収録されたものとを比較すると、近地の微小地震の場合、ほとんど差は認められない。むしろ、短周期の地震計では目立たない脈動(波浪による周期数秒のノイズ)まで忠実に記録するため、TYMのように海岸に近い観測点では、そのままでは地震波形が見にくくなるほどである。STS-1地震計の特長を最大限に活用できるのは、近地の中規模地震や遠地の大地震の波形データである。以下、その例を示す。まず、1989年7月に発生した伊東沖の群発地震の中の最大地震(M5.5)をTYMで観測したときのSTS-1地震計によって収録された波形と、同一台座に設置された微小地震計によって収録された波形をFig. 3に示す。この地

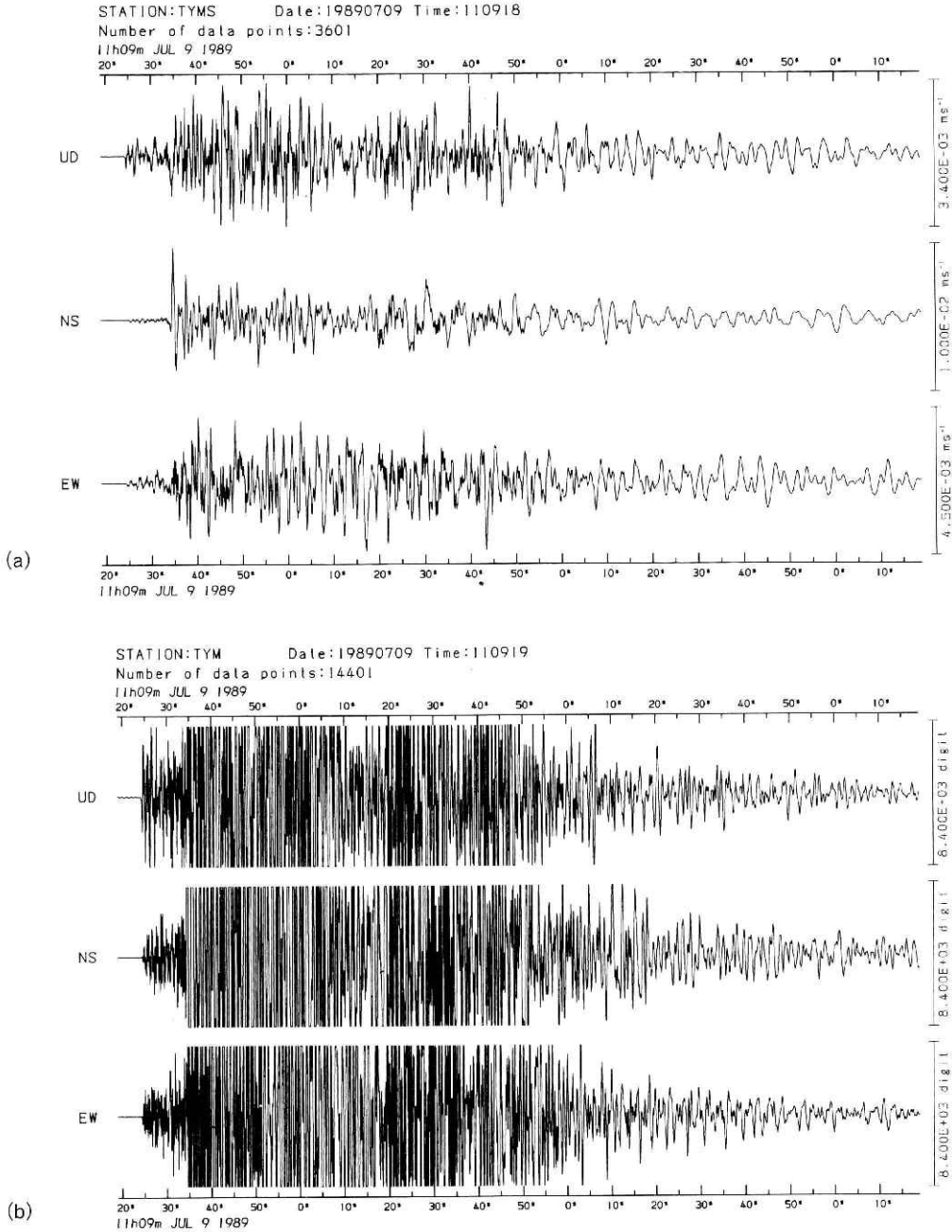


図3 1989年7月9日に伊東沖で発生した伊東沖群発地震の最大地震(M5.5)の波形記録。
 (a)STS-1地震計によって収録された地震波形。(b)高感度地震計で得られた地震波形。
 Fig. 3 Seismic records of the largest event (M5.5) of the swarm off the east of Ito on July 9, 1989. (a) Seismogram recorded by the STS-1 seismometer. (b) Seismogram recorded by the high sensitivity sensor. Units of the amplitude are ms⁻¹ and digit for Figs. 3a and 3b respectively.

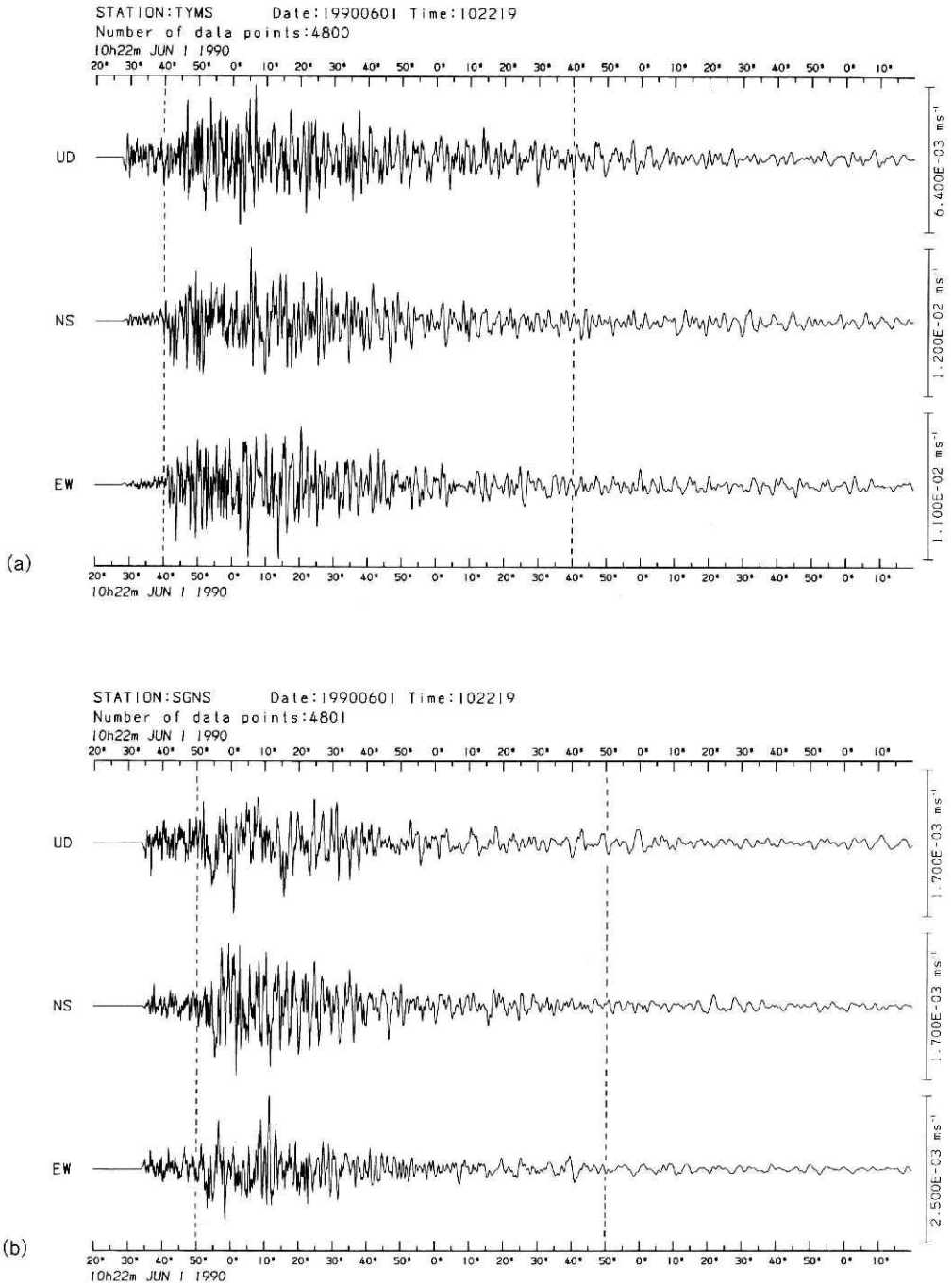


図4 1990年6月1日に銚子付近で発生した地震(M6.0)の波形記録。(a)TYMのSTS-1地震計で記録された地震波形。(b)SGNのSTS-1地震計で記録された地震波形。

Fig. 4 Seismic records of the event (M6.0) which occurred beneath Choshi on June 1, 1990. (a) Record section at TYM. (b) Record section at SGN.

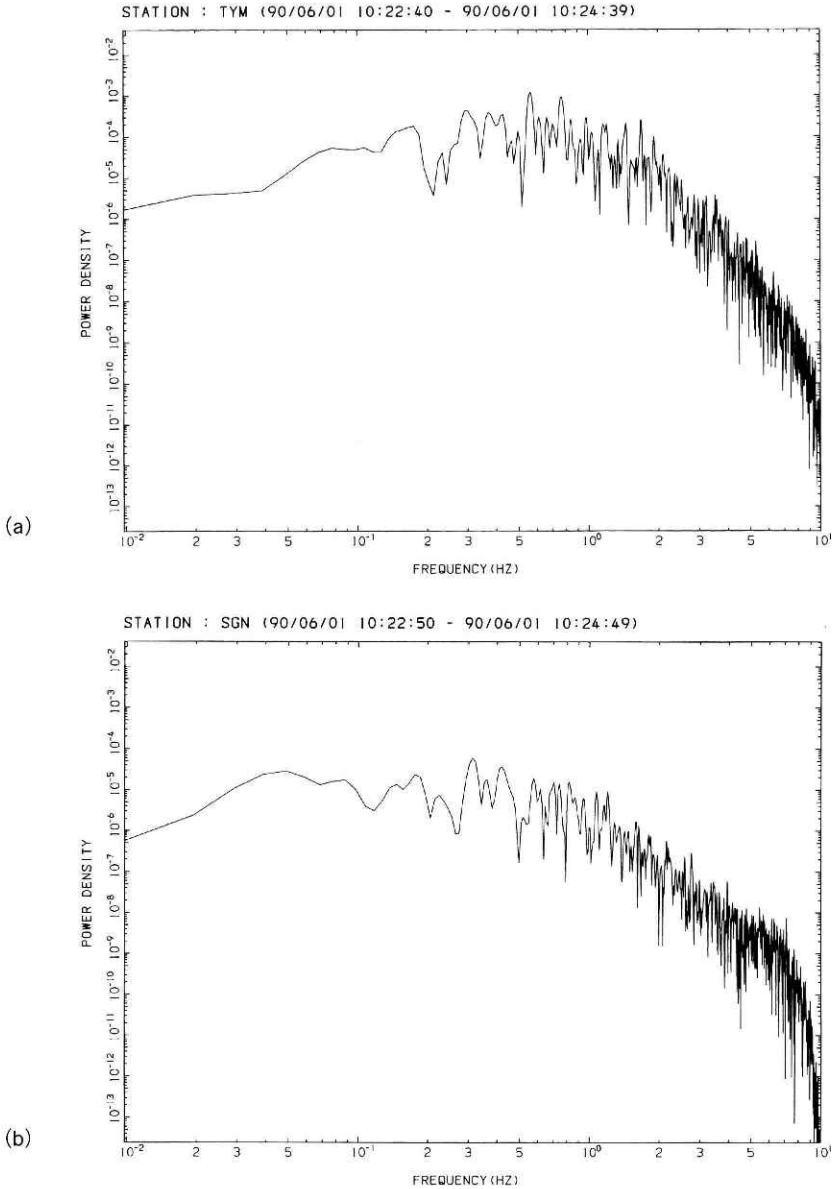


図5 図4のS波コーダ部分(点線で示した範囲)のパワースペクトル図。(a)TYM。(b)SGN。
 Fig. 5 Power spectra of the S coda wave indicated by broken lines in Fig. 4. (a) TYM. (b) SGN.

震の場合、後者の上下動成分の波形はP波部分で既に飽和しているが、STS-1地震計で収録された記録では、S波に至るまでその全容を見ることができる。特にNS成分に見られる、やや周期の長いS波初動のパルスなどは、従来の波形記録では全く検知することができないものである。Fig. 4とFig. 5は、1990年6月1日に銚子付近で発生した地震(M6.0)の波形記

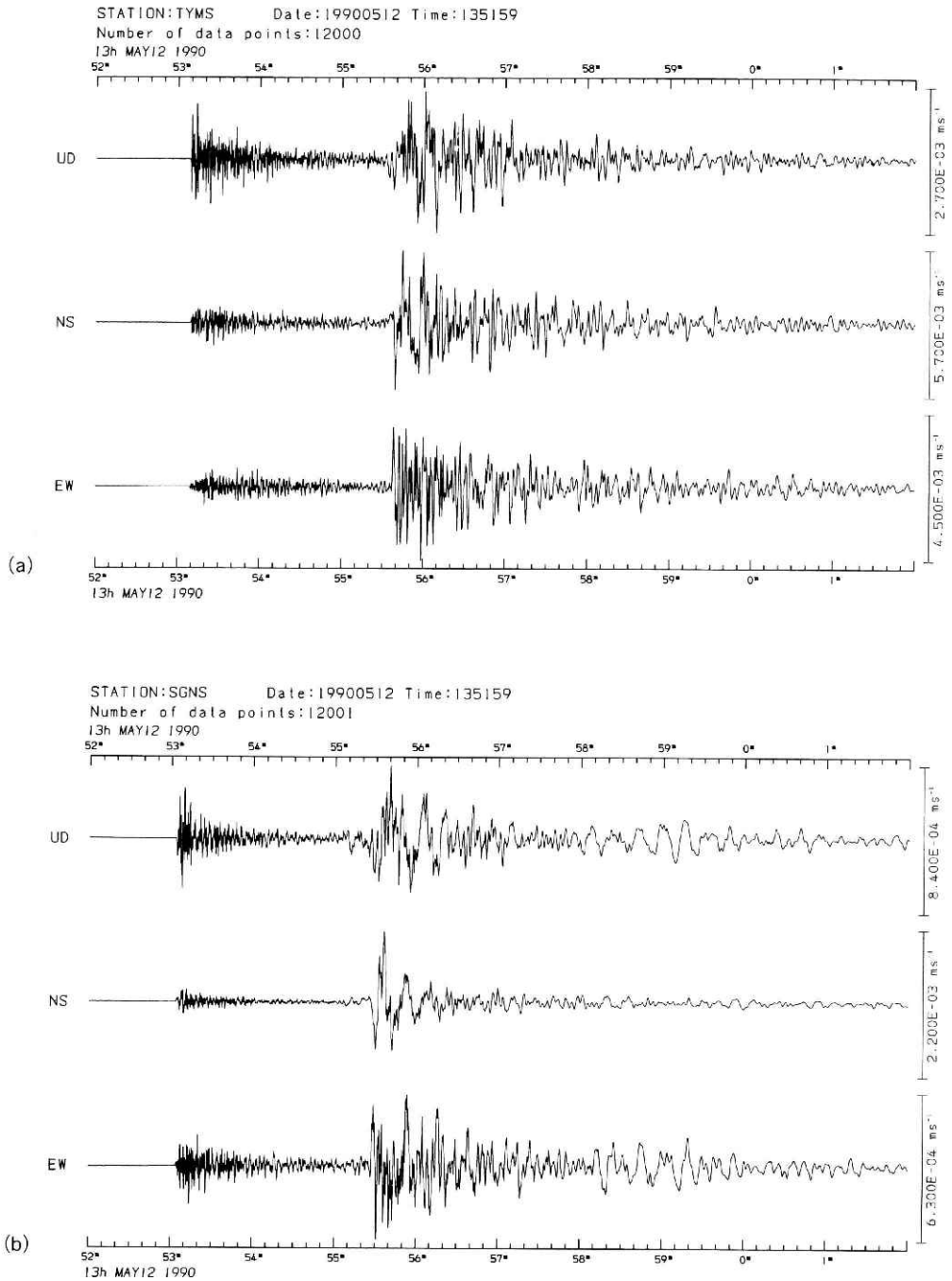


図6 1990年5月12日にサハリンで発生した深発地震(M7.7; m_b 6.5)の波形記録。(a)TYM,
 (b)SGN.

Fig. 6 Seismic records of the deep event (M7.7; m_b 6.5) beneath the Sakhalin Island. (a)
 Record section at TYM. (b) Record section at SGN.

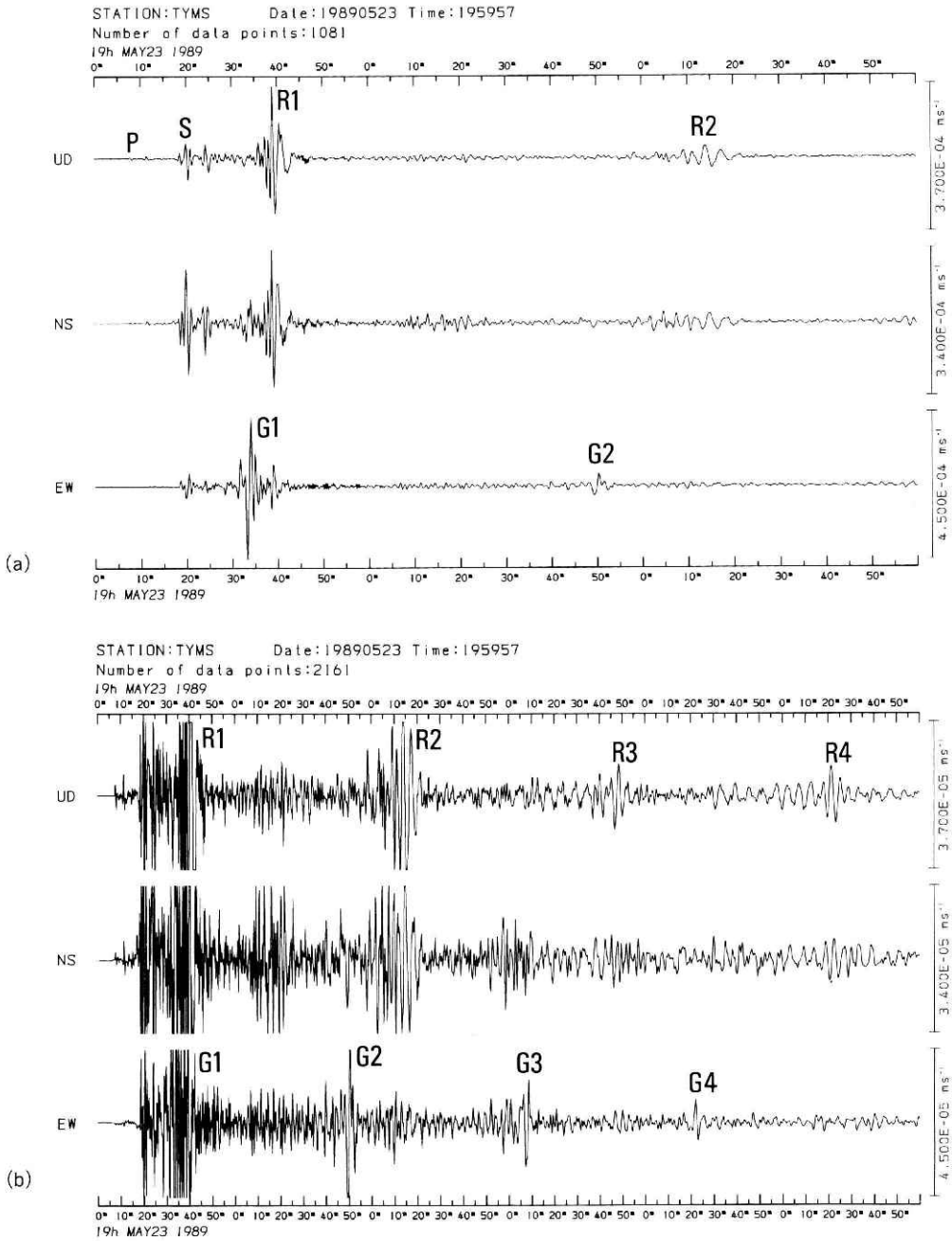


図7 (a) 1989年5月23日に Macquarie Ridge で発生した巨大地震(M8.2)のTYMにおける3時間分の波形記録。(b)同一地震の6時間分の波形記録。ただし振幅のスケールは10倍にして表してある。

Fig. 7 (a) Seismic records (3h) of the 1989 Macquarie Ridge earthquake ($M_s 8.2$) recorded at TYM. The amplitude scale is normalized by the maximum amplitude. (b) Seismic records (6h) of the same event as Fig. 7a. The amplitude scale is ten times exaggerated.

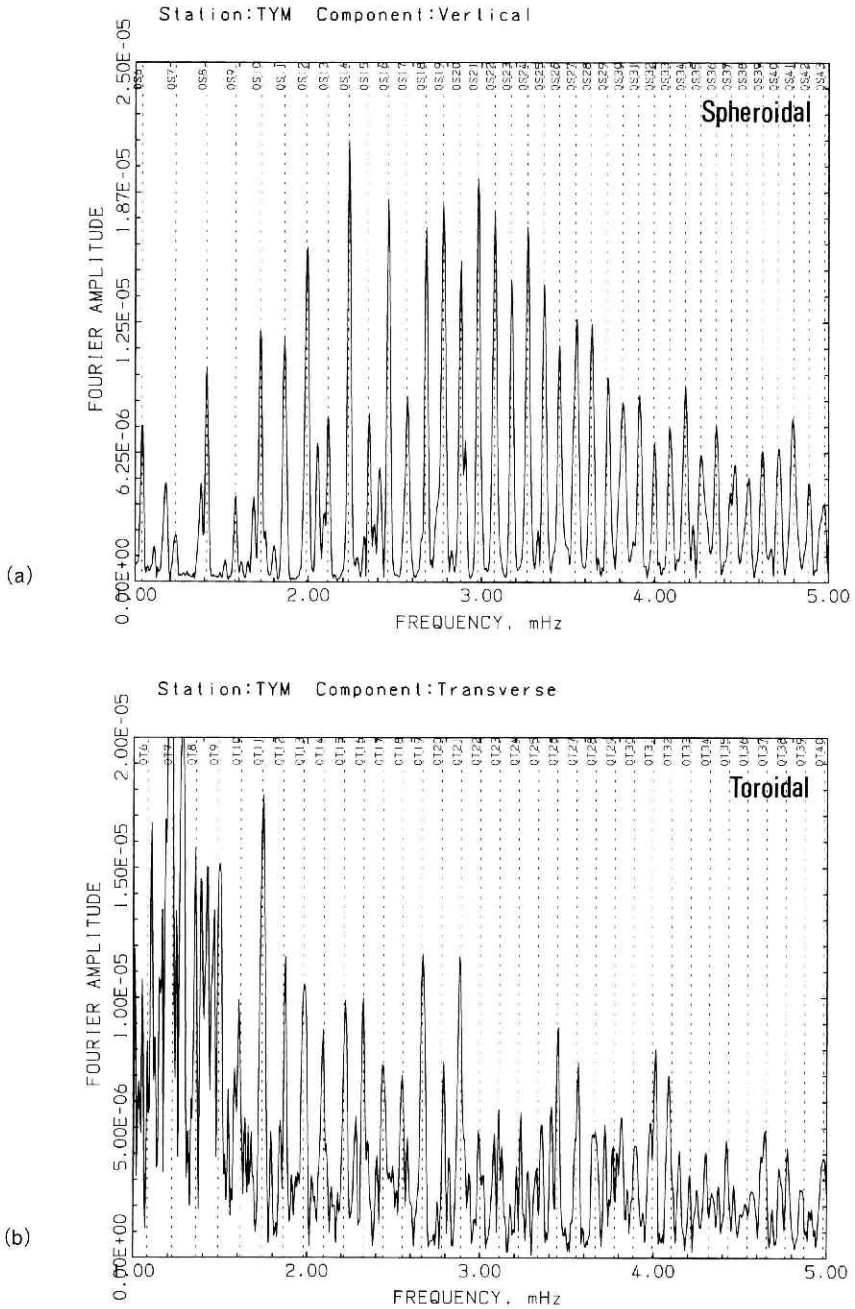


図8 図7に表した地震の1日分のデータを用いて求めたフーリエスペクトル図。(a)上下動成分。(b)transverse成分。地球自由振動の理論周波数を点線で示す。

Fig. 8 Amplitude spectra of the 1989 Macquarie Ridge earthquake. (a) Vertical component for spheroidal modes. (b) Transverse component for toroidal modes. Broken lines indicate the theoretical eigenfrequencies of the Earth's free oscillations.

録と、S波部分(120秒間)のスペクトル図をTYMとSGNの両観測点について示したものである。この地震の場合、10秒以上の長い周期範囲でも大きなエネルギーを持っているが、こうした震源過程に関係すると思われる低い周波数帯域の波動は、やはり従来の短周期地震計では記録することが不可能なものである。

前述したように本収録システムでは、1/20秒間隔というやや短いサンプリング間隔であるにも拘らず、連続で収録しているため、長いデータを必要とする遠地地震を詳細に解析するためのデータを得ることができる。Fig. 6に示したのは、1990年5月12日にサハリンで発生した深発地震(M6.5)の波形記録(10分間)である。この地震は、深発地震としては規模が大きかったこと、発生場所が珍しいこと、そして日本で広帯域地震計が多数展開されるようになってから発生したことなどから、地震学者達の注目を集めている。このような遠地地震の場合、TYMとSGNでは伝播経路にほとんど差はない。しかしSGNのS波コーダ部分にはTYMには見られないかなり長周期の位相が認められる。Fig. 7aは、1989年5月23日にNew Zealand南方のMacquarie Ridgeで発生した横ずれ断層型の地震(M8.2)のTYMにおける3時間分の波形で、見やすくするために低域通過フィルタを通した後、サンプリング間隔を10秒にして(最大振幅で正規化して)表したもので、Fig. 7bはさらに振幅を10倍にして6時間分の波形を表したものである。この地震の地震モーメントは、 $M_0=1.5\sim 2.5\times 10^{21}\text{Nm}$ と見積もられており(Ekström and Romanowicz, 1990 ; Satake and Kanamori, 1990 ; Tichelaar and Ruff, 1990)、最近10年間では最大の地震の一つである。TYMで収録されたSTS-1地震計のBRB出力の波形には、地球の表面を何周も回って伝播する表面波(R1, R2, … ; G1, G2…)を観測することができ、通常の長周期地震波形記録と何ら変わらない。Fig. 8aとFig. 8bは、それぞれ地震計の特性を補正した後座標軸を回転して得られた上下動成分とtransverse成分のスペクトルを1~5 mHzまで表したものであるが、この地震によって励起された地球自由振動のピークがspheroidal, toroidalともに、点線で示した理論周波数の付近に明瞭に認められる。このように、STS-1地震計の場合360秒以上の周期で特性が落ちるBRB出力の記録でも、特性の補正を施してやれば1000秒程度の周期の波形まで十分解析に利用することが可能であると考えられる。

4. 議論と結論

これまで見てきたように、広帯域地震計を用いることによって、従来の固有周期1秒の短周期地震計では考えられないほどの情報量を持った地震波計データを収録することができるようになった。その長所は特に近地の中規模地震や、遠地の大地震を観測することによって発揮される。しかし、STS-1地震計は強震観測用に設計されたものではないため、極端に近い大中地震を観測するには適していない。Fig. 9は、1990年2月20日に伊豆大島近海で発

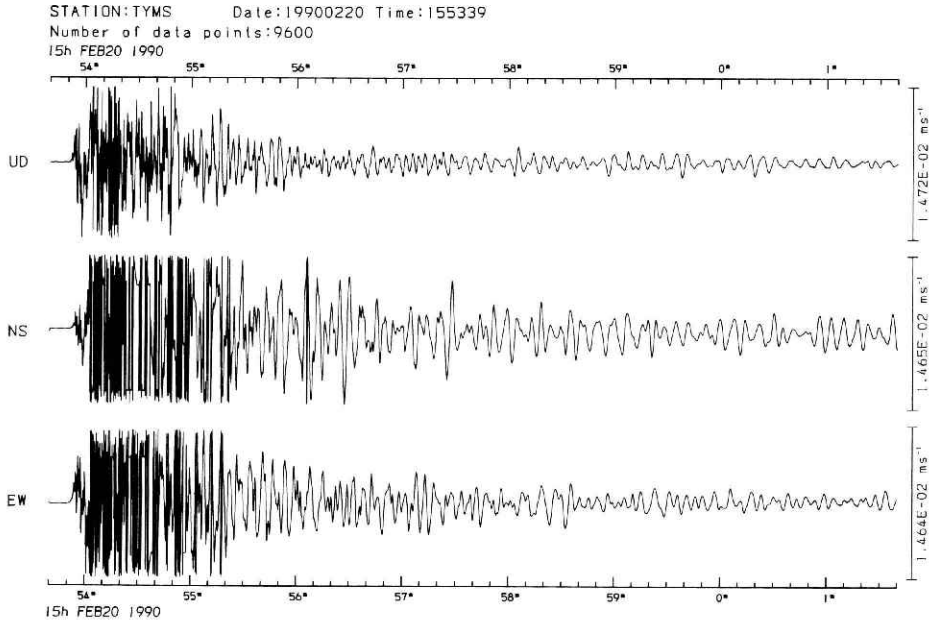


図9 1990年2月20日に伊豆大島近海で発生した地震(M6.5)のTYMにおける波形記録。
 Fig. 9 Record section of the Izu Oshima Kinkai earthquake (M6.5) on February 20, 1990 recorded at TYM.

生じた地震(M6.5)を震央距離が70km程度に位置するTYMで観測したときの波形であるが、特にS波部分では完全に飽和してしまっている。この地震ほどではないにしても、ダイナミックレンジの限界に近い振幅を持つ地震動に対しては、その応答が非線形になるということも十分に考えられる。こうした近地の大地震に対処するためには、まず、センサーの応答が線形である範囲を正しく把握するとともに、例えばSGNのように、強震計を併設するなどして観測可能なダイナミックレンジを強化することが望ましいであろう。

今回採用した比較的短いサンプリング間隔の連続収録方法は、得られるデータを最大限収録し保存するという意味で他に余り例を見ないものである。このシステムでは、従来手にすることのできなかった種類のデータが得られる可能性もある。例えば火山性微動のように、トリガー式収録方法では連続で収録されにくいデータを、広帯域で収録することが可能で、その発生メカニズムの解明に大きく貢献できるものとなるであろう。さらに、地球中心核に関係した位相であるcore phase等のように遠地震で観測されるさまざまな微弱な後続相を、やはり広帯域で収録することができるため、例えばマントル-核境界層の水平的不均質性を詳細に調べるための重要なデータも収録することが期待される。

とは言っても、現行システムに問題がないわけではない。まずデータの回収が1~2ヶ月に1度であるため、突発的な地震発生に対して直ちに対応できないということである。震源

や初動の押し引きによる発震機構解の決定だけでなく、地震波形データを用いたモーメントテンソルのインバージョン(Dzeiwonski et. al., 1981 ; Kawakatsu, 1989)までもが、既にルーチン処理化される傾向がある中で、即応性のない現行システムは、極めて不十分であると言えよう。また、収録を現地(無人)で行っているため、何らかのハード的な障害によって収録が停止していたとしても、知らずに放置され長期の欠測を生ずるということも考えられる。こうした問題点は、例えば現地の人にシステムの維持・管理を依頼するとか、テープの回収を不定期的にも実行できるような体制を作り上げるといったことで軽減されるかも知れない。しかし根本的な解決のためには、電話回線を利用したデータ伝送システム(テレメータ)が必須のものと言えるであろう。

謝 辞

館山における広帯域地震観測は、国土地理院の用地提供を含めた協力によるものである。特にその設置に際しては、同院地殻調査部観測課の今給黎哲朗前計測係長と野田沢雪夫現係長に多大の協力を頂いた。記してここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Dziewonski, A. M., T. A. Chou and J. H. Woodhouse (1981) : Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity, *J. Geophys. Res.*, 86, 2825-2852.
- 2) Ekström, G. and B. Romanowicz (1990) : The 23 May 1989 Macquarie Ridge earthquake : a very broadband analysis, *Geophys. Res. Lett.*, 17, 993-996.
- 3) 浜田和郎・大竹政和・岡田義光・松村正三・山水史生・佐藤春夫・井元政二郎・立川真理子・大久保正・山本英二・石田瑞穂・笠原敬司・勝山ヨシ子・高橋 博(1982) : 関東・東海地域地殻活動観測網—国立防災科学技術センター, *地震* 2, 35, 401-426.
- 4) Hori, S. (1990) : The seismic waves guided by untransformed oceanic crust subducting into the mantle : the case of the Kanto district, central Japan, *Tectonophys.*, 176, 335-376.
- 5) 井元政二郎(1988) : 光ディスクを用いた地震波形の格納とその利用, 国立防災科学技術センター研究報告, 41, 129-136.
- 6) Kanamori, H. (1989) : A slow seismic event recorded in Pasadena, *Geophys. Res. Lett.*, 16, 1411-1414.
- 7) Kawakatsu, H. (1989) : Centroid single force inversion of seismic waves generated by landslides, *J. Geophys. Res.*, 94, 12363-12374.
- 8) 松村正三・岡田義光・井元政二郎・島田誠一・堀 貞喜・大久保正・大竹政和・浜田和郎(1989) : 地震前兆解析システムの機能と構成, 国立防災科学技術センター研究報告, 41, 35-44.
- 9) Obara, K. and H. Sato (1988) : Existence of an S wave reflector near the upper plane of the double seismic zone beneath the southern Kanto district, Japan, *J. Geophys. Res.*, 93, 15037-15045.
- 10) POSEIDON プロジェクト会議(1988) : POSEIDON 地震観測網の設計, 地震学会講演予稿集, No. 1, 54.
- 11) Roult, G. and B. Romanowicz (1984) : Very long-period data from the GEOSCOPE network : preliminary results on great circle averages of fundamental and higher Rayleigh and Love modes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 74, 2221-2243.

- 12) Satake, K. and Kanamori, H. (1990) : Fault parameters and tsunami excitation of the May 23, 1989, Macquarie Ridge earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 17, 997-1000.
- 13) 鷹野 澄・武尾 実・高橋正義・阿部勝征(1989) : 広帯域地震計データの遠隔収集システム, 地震学会講演予稿集, No. 2, 254.
- 14) Tichelaar, B. W. and L. J. Ruff (1990) : Rupture process and stress-drop of the great 1989 Macquarie Ridge earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 17, 1001-1004.
- 15) Wielandt, E. and G. Streckeisen (1982) : The leaf-spring seismometer : design and performance, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 72, 2349-2367.
- 16) 山田功夫・深尾良夫・石原 靖・青木治三(1989) : STS 地震計による広帯域・広ダイナミックレンジ地震観測, *地震* 2, 42, 21-31.

(1990年8月20日 原稿受理)