

中伊豆におけるSTS地震観測
—観測方式および傾斜計との比較—

岡田義光*・石田瑞穂**

防災科学技術研究所

**Observation with STS seismometer at Nakaizu, central Japan
— Observation system and comparison with tiltmeter —**

By

Yoshimitsu OKADA and Mizuho ISHIDA

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan

Abstract

A broad-band seismometer, STS-1, was equipped in the vault of Nakaizu Observatory, central Japan, in March, 1988. To record and transmit the observed seismic waveform, a data acquisition system, PDAS-100, was introduced for its ability of flexible data recording schedule, resolution enhancement by over-sampling and offline telemetry with dial-out mode.

To utilize the obtained data, some basic software systems are developed as well as those for routine data processing. They include the functions to store the data, to list up the files, to operate filtering/differentiation/integration and to display the processed waveforms with arbitrary scaling and time interval.

As tilt observation by pendulum-type tiltmeter has been continued in the same vault, both records were compared each other. This tiltmeter is adopting a force balanced feed back system which is the same principle as that employed in STS seismometer. It was confirmed that the waveforms for local and global earthquakes are almost identical in both time and frequency domains. It is expected that borehole tiltmeters of this type can work as excellent horizontal broad-band seismometers.

Key words : STS seismometer, borehole tiltmeter, broadband seismic observation

キーワード：STS地震計，ポアホール傾斜計，広帯域地震観測

* 地圏地球科学技術研究部 地震・噴火予知研究調整官
** 地圏地球科学技術研究部 地震活動研究室

1. はじめに

地震観測の広帯域化およびダイナミックレンジの拡大をめざして、近年いくつかの高性能地震計が発表されている。スイス Streckeisen 社製の S T S 地震計 (Wielandt and Streckeisen, 1982) は、それらの中でも高い評価を得て、現在、世界中の近代的な地震観測システムに取入れられつつある測器である。

防災科学技術研究所では昭和 62 年度にこの S T S 地震計を初めて導入し、伊豆半島中央部の中伊豆観測点に設置した。これは、主として、神奈川県西部から伊豆半島東方の地域にかけて発生する中規模以上の地震による地動を高精度で振り切れることなく収録し、その波形解析から M 3 以上の地震の発生過程を詳細に研究することを目的としたものである。

本稿では、この中伊豆観測点の S T S 地震計による広帯域地震観測の方式とその変遷について報告すると同時に、同観測施設で従来より実施されている傾斜観測との比較結果について述べる。この傾斜計は力平衡式と呼ばれる型であって、原理的には S T S 地震計と同じ方式のフィードバック型計器である。

2. 中伊豆での S T S 地震計による広帯域地震観測

1974 年の伊豆半島沖地震 (M 6.9) 発生以来、伊豆半島周辺地域では、群発地震活動や地殻変動がにわかに活発化した。この地殻活動の様子を捉えるため、防災科学技術研究所 (当時の国立防災科学技術センター) では、1976 年 12 月に中伊豆地殻活動観測施設を開設し、以来、横坑内での微小地震および地殻傾斜の観測を継続してきた。

その後、昭和 62 年度に開始された、科学技術振興調整費による「マグニチュード 7 級の内陸地震の予知に関する研究」の一環として、同施設には高性能・広帯域の S T S 地震計が 1988 年 3 月に導入され、周辺地域に発生する微小地震から大地震までの地震波形を高精度で観測することが可能となった。当初、観測は現地記録方式で開始されたが、まもなく公衆回線を用いたデータの蓄積伝送方式に変更され、また、この間、様々なゲイン設定・トリガレベル・収録フォーマット・データ処理方式などが実験的に試されてきた。

ここでは、この S T S 地震計の設置からデータ処理に至る各部分について、観測方式とその変遷を詳述する。

2.1 S T S 地震計の設置

中伊豆観測点 (JIZ : 34°54'46.40"N, 138°59'48.40"E, h = 230 m) では、1976 年 12 月以来、横坑内における微小地震と地殻傾斜の連続観測が続けられてきたが、1988 年 3 月、この微小地震計と傾斜計の間の位置に、150 cm × 50 cm の大きさのコンクリート台を新たに設け、この上に上下動 1 台、水平動 2 台の STS-1 型地震計をモルタル接着にて設置した (図 1)。坑口

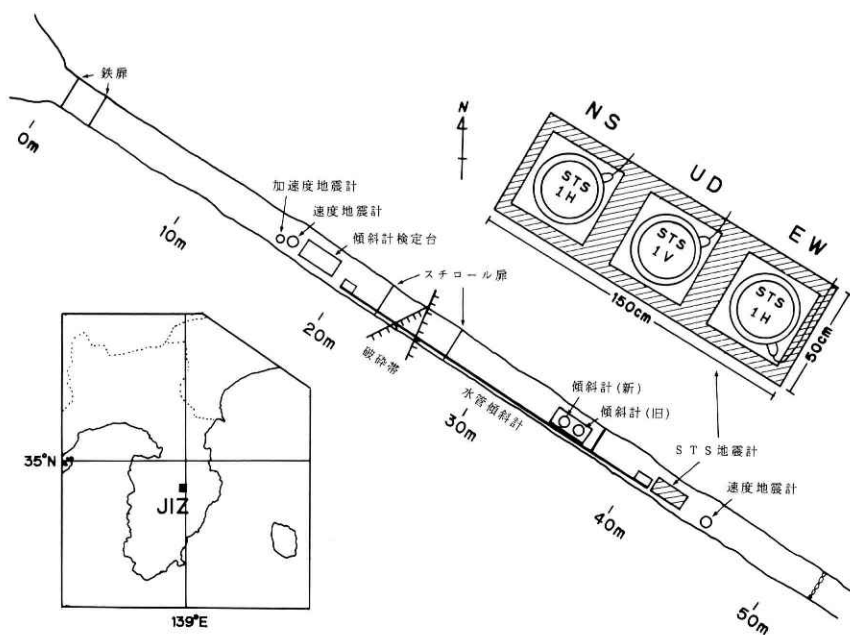


図1 中伊豆観測点の横坑内におけるSTS地震計の設置状況
 Fig. 1 Layout of STS seismometer in the vault of Nakaizu station.

からの距離はおよそ 40 m である。地震計の固有周期は、近地震を対象とする目的で当初は 20 秒にセットしたが、STS 地震計の特性を十分に生かすため、1990 年 5 月には 360 秒に再調整を行い、今日に至っている。坑内に設置されたSTS 地震計の出力は、横坑入口わきの観測小屋に導かれ、ここで記録またはデータ収録がなされる。当初の観測は、アナログレコーダを用いた現地記録方式で開始されたが、1988 年 9 月には、Teledyne 社製のデータ収録装置によるデジタル記録方式に切り替えられ、公衆回線を用いたオフラインのテレメータ観測が実現した。なお、1992 年 10 月からは、Quanterra 社製のダイアルアップ式デジタル収録装置を用いた方式に置き換えられている。

2.2 PDAS-100 によるデータ収録および伝送

STS 地震計の性能を十分に引き出すためには、その出力の高分解能デジタル収録が不可欠である。また、無人運転を効率的に実施するためには、通信によるデータ伝送機能や、データ収録パラメータの遠隔操作機能が必須となる。これらの要件を満たすものとして、中伊豆観測点では Teledyne 社製のデータ収録装置 PDAS-100 がSTS 地震観測用に導入された。

同装置は図2に示すような構成を有しており、データ収録パラメータの多くはプログラム指定でソフト的に制御できるようになっている。以下に各ブロックの機能を述べる。

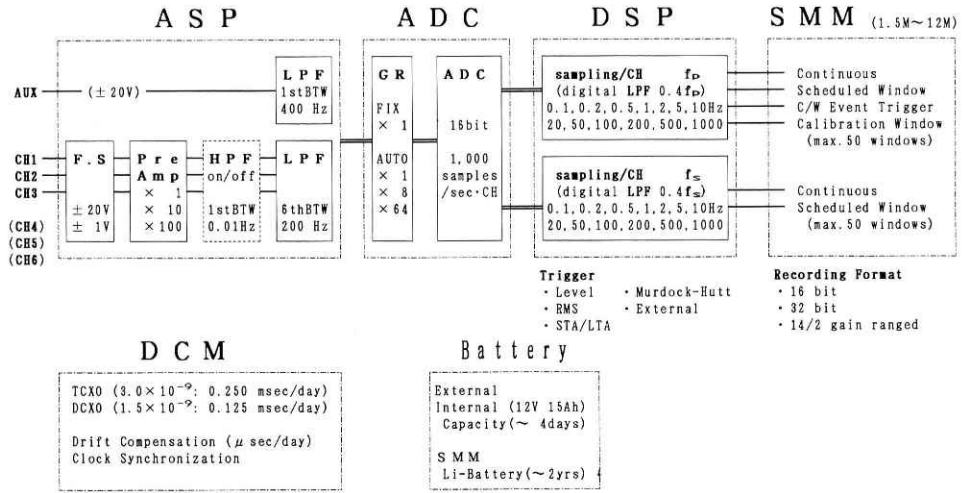


図2 データ収録装置 PDAS-100の機能ブロック図
 Fig. 2 Block diagram of the data acquisition system, PDAS-100.

(1) ASP (アナログ信号処理部)

主入力3 (又は6)成分, 補助入力1成分の信号の増幅およびアナログ・フィルタリングを行う。主入力の各成分はコネクタのピン接続によりフルスケール±20 Vか±1 Vを選択し, プリアンプ増幅度(1倍, 10倍, 100倍)及びHPF(0.01 Hz, 1次バターース)の使用をプログラム選択したのち, 200 Hzの6次バターースLPFがかけられる。一方, 補助入力フルスケール±20 V固定で, 400 Hzの1次バターースLPFを通過する。

(2) ADC (A/D 変換部)

上記ASPの各チャンネル出力に対し, 1000 Hz サンプリングで16ビットのA/D変換を行う。この際, A/D変換を固定ゲイン(1倍)で行うか, またはIFP(Instantaneous Floating Point)アンプによる自動ゲイン増幅(1倍, 8倍, 64倍)で行うかを選択する。

(3) DSP (デジタル信号処理部)

上記ADCの出力を, ユーザ指定のサンプリング間隔データに変換する。サンプリング周波数は, 0.1 Hz~1000 Hzの13種類の中から2つ(正サンプリング, 副サンプリング)を選択でき, 出力には, 指定したサンプリング周波数の0.4倍をカットオフとするデジタル・フィルタリングが施される。ナイキスト周波数での減衰率は120 dBである。

正サンプリング周波数はトリガ収録のほか, 最大50パターンまでの定時収録および較正信号収録に適用される。一方, 副サンプリング周波数は上記と独立に最大50パターンまでの定時収録に適用される。各収録方式は以下の通りである。

- ①トリガ収録: DC レベル判定, RMS レベル判定, STA/LTA 判定, Murdock-Hutt 判定,

外部トリガのいずれかによりデータを取得し、トリガ前後の収録時間や収録チャンネル等はプログラムで指定する。

②定時収録：収録開始時刻・収録時間・繰返し回数・繰返し間隔・収録チャンネルを指定してデータを取得する。連続収録の指定も可能であり、また、正サンプリングデータについては、この定時収録時間帯内に限ったトリガ収録も指定できる。

③校正信号収録：指定する特性の正弦波、疑似ランダム波、またはパルス波を12ビットのD/A変換器で作成して地震計に出力し、その応答データを取得する。収録時刻や繰返し指定は、定時収録の場合に準じる。

(4) SMM (メモリ部)

収録されたデータを蓄積保存する。保存形式は16 bit、14/2 bit、32 bitの3種の中から選択する。図3は、入力信号レベルの範囲と、この3つのデータ保存形式及び固定ゲイン/自動ゲインを組合わせた場合のデータ収録範囲との関連を示したものである。塗り潰された部分が16ビット相当であり、斜線を引いた部分は、次節に述べるオーバサンプリングによる分解能向上の効果分を示している。各保存形式の得失は以下の通りである。

①16 bit：A/D変換を固定ゲインで行った場合に指定し、A/D変換器の16 bit出力をそのまま保存する。メモリ消費は少なくすむが、分解能向上の恩恵には浴せない。また、収録データから入力レベルを求めるにはプリアンプの増幅率による換算が必要となる。

②14/2 bit：出力を仮数部14 bitと指数部2 bitで表現する。メモリ消費は少ないまま、ダイナミックレンジの拡大を望む場合に指定するが、収録データから入力レベルを求めるには特殊な変換が必要とされる。

③32 bit：プリアンプ及びA/D変換での増幅率を組込んで、出力の32ビット全体がASP入力のフルスケールに一致するよう調整される。分解能向上とダイナミックレンジ拡大の効果が最大限に得られるが、メモリ消費は大きくなる。

(5) DCM (刻時部)

刻時信号に用いられる 1.5×10^{-9} 精度の内部時計に対しては、デジタル的にドリフト補償を与えて高精度化を図れるほか、1秒パルスによる外部時計への同期も可能である。

(6) Battery (バッテリー部)

PDAS-100は、常時フローティング充電される内部バッテリーより給電され、停電時も4日間くらいは動作を続行できる。また、これとは別にSMMには独立のリチウム電池が搭載され、停電後も2年間ほどは収録データを保持できる。

(7) Modem (データ通信部)

公衆回線を介して、データ収録パラメーターの変更、収録状況のモニター、時刻修正などの作業を遠隔地から行うほか、収録されたデータファイルや管理ファイルの呼出し(ダイアルアップ)、定時またはファイル作成直後の自動転送(ダイアルアウト)を行う。モデムとし

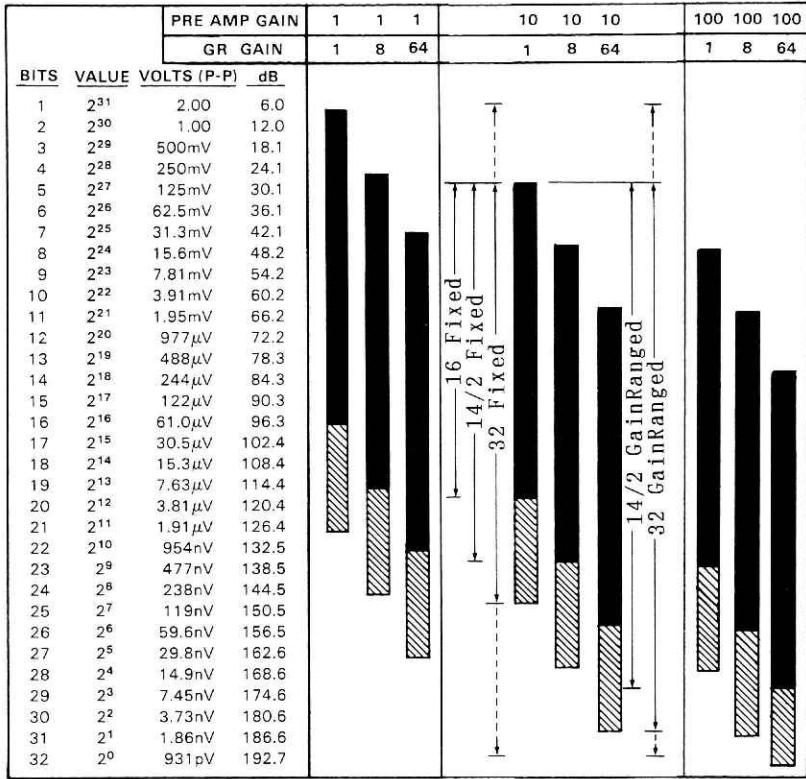


図 3 PDAS-100の入力信号レベルとデータ収録形式の関連. 16,14/2,32はデータ保存形式, Fixed,GainRanged は固定ゲイン及び自動ゲインの場合を示す. 斜線部はオーバサンプリングによるビット分解能拡大効果分を示し, 破線矢印の範囲はプリアンプゲインを含めて収録可能な32ビット全体を示している. (Teledyne,1987に加筆)

Fig. 3 Relation between input signal level and data acquisition modes. 16, 14/2 and 32 designate data saving formats, while Fixed and GainRanged correspond to the selection of amplifier modes. Hatched parts show the resolution enhancement brought by oversampling effect and dashed ranges correspond to full 32 bits which can include preamp gain selection (modified from Teledyne, 1987).

ては, Microcom 社製の AX/2400 c(2400 bps,MNP 5)を使用している.

S T S地震計による観測は初めてであったため,当初は様々なゲイン設定・トリガレベル・収録フォーマットの選択が試みられ,最適なパラメーターのチューニングがなされた.表1はその観測方式の変遷を示しており,最終的には32ビット自動ゲイン収録モードによる50 Hz サンプリングのトリガ収録と,5秒サンプリングの12時間定時収録とが併行して行われるようになった.

表 1 中伊豆観測点における PDAS-100による STS 地震観測方式の変遷
 Table. 1 History of STS observation by PDAS-100 at Nakaizu station.

	固有 周期	機番	収録 方式	ch-0			ch-1~3(or 5)			Event leng.			Trigger	Prim Wind	Second Window
				Prim	Prim	Sec	Gain	Pre	Max	Min					
88/ 9/ 5	20s	012	固定16												
89/ 3/15	"	"	"	100	100	0.2	1	5	300	10	STA/LTA	10s	23h50m*		
89/ 4/ 7	"	"	"	"	"	--	"	"	"	"	"	"	--		
89/ 5/26	"	"	"	"	"	--	"	"	"	"	0.2%	"	--		
89/ 8/29	"	"	"	50	50	--	10	"	95	"	1.0%	"	--		
89/10/19	"	"	"	"	"	--	1	"	300	"	1.2%	"	--		
89/12/16	"	"	"	"	"	0.2	"	30	600	60	"	"	連続		
89/12/23	"	"	"	"	"	--	10	"	"	30	"	"	--		
90/ 5/14	360s	"	"	"	"	--	"	"	"	"	"	"	--		
90/ 5/25	"	"	"	"	"	--	1	"	"	"	0.763%	"	--		
90/ 6/ 2	"	"	"	"	"	0.2	"	"	"	"	"	--	連続		
90/ 6/10	"	"	固定32	"	"	"	"	"	"	"	"	10s	"		
90/ 6/13	"	"	自動32	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"		
90/ 7/16	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	STA/LTA	--	12hr.		
90/ 7/17	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	0.763%	--	"		
90/ 8/ 7	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	--	連続		
91/10/ 3	"	163	"	"	"	"	"	"	"	"	"	--	"		
91/12/ 7	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	--	11:59:57		
91/12/ 9	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	--	00:00:00		
92/ 1/ 7	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	--	11:59:56		
92/ 2/24	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	--	12hr.		

89/ 3/15 ch=NSBRB, EWBRB, UDBRB, UDLP

* ch3 only

89/ 4/ 7 ch=UDLP, UDBRB, NSBRB, EWBRB

92/ 2/24 ch=UDLP, UDBRB, NSBRB, EWBRB, TLNS, TLTEW

観測開始以来のデータ収集状況を振り返ってみると、必ずしも順調だったとはいえない。とくにモデムによる遠隔データ転送は不安定であって、今日に至るまで主要なトラブルの元になっている。症状としては、大きな地震の発生時に作られたイベントファイルをダイヤルアウトで送ってくる際にハングアップしてしまうケースが目立ち、このため、肝心な時に限ってシステムがダウンするという事態になってしまう。また、電話回線が接続のままとなるため、後日回線使用料の高額請求を受けるということになる。ダイヤルアップ式を採用すれば、このような問題は避けられるが、親局からいちいちアクセスが必要なことと、転送中はデータの連続収録を一時ストップさせねばならないという大きな難点がある。メーカーによる早急な改善を望みたいところである。ひとたびシステムがダウンすると、現地に赴いてのリセット操作が必要となるため、なかなか足を運べない場合には長期にわたって欠測となってしまうことが少なくなかった。図4に、連続収録を開始してから今日までの、システムの稼働状

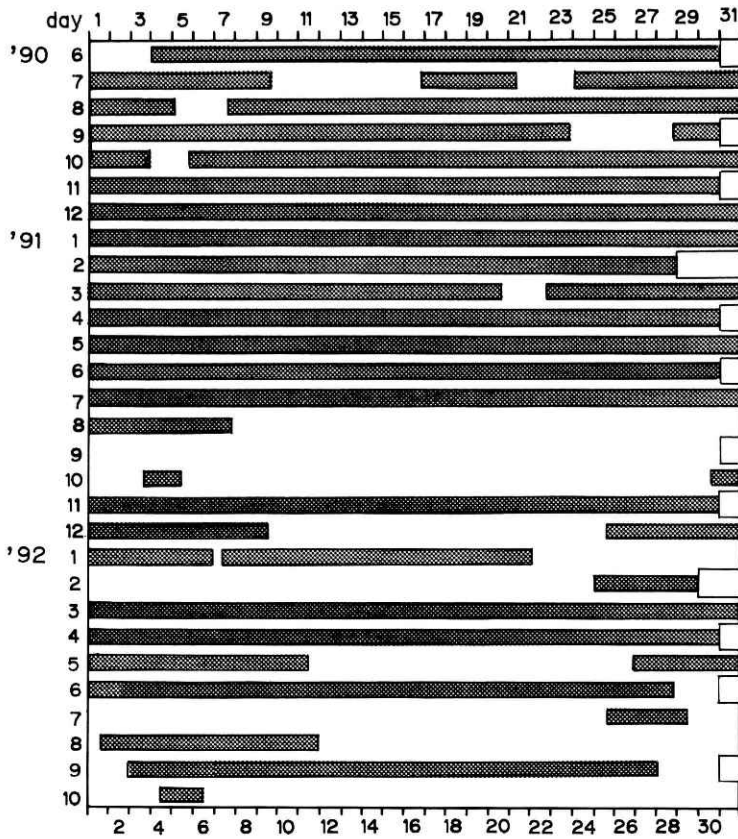


図 4 中伊豆観測点における S T S 地震計による連続収録の稼働状況
 Fig. 4 Periods of successful continuous recording of STS seismometer at Nakaizu station.

況を示す。

2.3 オーバサンプリングによる分解能向上と自動ゲイン増幅器によるダイナミックレンジ拡大

前節に述べたとおり, PDAS-100 は, すべてのデータを一旦 1000 Hz サンプリングで A/D 変換したのち, 指定された, より低いサンプリング周波数のデータへとデジタル変換を行っている(オーバサンプリング)。このような方式を用いると, 白色雑音の低減によって実質的なビット分解能の向上が図られ, オーバサンプリング比を N とすれば, その理論的な向上率として, $\log N / \log 2$ が期待される。たとえば, 希望する出力サンプリング周波数を 4 Hz とすれば ($N=250$), 上記の向上率はほぼ 4 となり, 16 bit の A/D 変換器でも 20 bit の分解能が得られるというわけである。

上記の効果に加えて、A/D 変換器の自動ゲイン増幅器を用いた場合には、6 bit 分(64 倍)のダイナミックレンジ拡大を図ることができるので、この両者を組合せれば、結局、全体として 20 数ビットの広いダイナミックレンジの観測が実現可能となる。実際には、これに伴って入力換算雑音レベルも変化し、これと最大入力可能レベルとの比が現実のダイナミックレンジを規定することになるが、メーカーによるサンプリング周波数と実効的なビット分解能の関係は図 5 のようになっている。上に述べた効果を実際の例で見るため、図 6 および図 7 に、STS 地震計 3 成分による中伊豆での常時微動の観測結果を示す。図 6 は 50 Hz サンプリングによる 10 秒分のデータ、図 7 は 5 秒サンプリングによる 1 時間分のデータである。両図とも、左側は 16 bit 固定ゲイン収録、中央は 32 bit 固定ゲイン収録、右側は 32 bit 自動ゲイン収録にてデータ採取を行ったものである。左側では 16 bit の 1 ビット分がそのまま見えるのに対し、中央ではオーバーサンプリング効果による分解能拡大が図られ、右側ではさらに自動ゲイン増幅器の効果によってノイズの低減が図られている。

2.4 STS 地震計記録のデータ処理

STS 地震計による観測データは、中伊豆の PDAS-100 内にいったん蓄積した後、トリガ収録されたイベントファイルは作成後直ちに、それ以外のファイルは定時に、ダイアルアウト

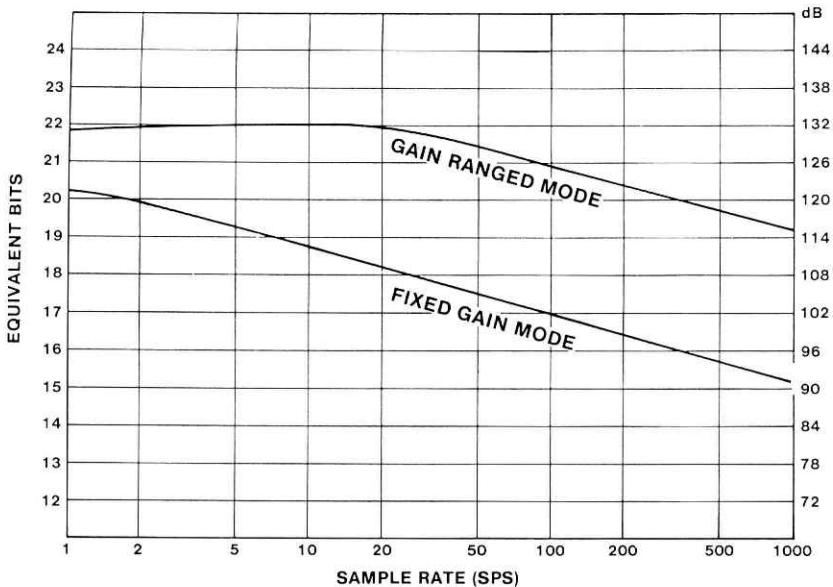


図 5 PDAS-100 のサンプリング周波数と実効的なビット分解能の関係 (Teledyne,1987)

Fig. 5 Relation between sampling rate and equivalent bits achieved by oversampling effect (Teledyne,1987).

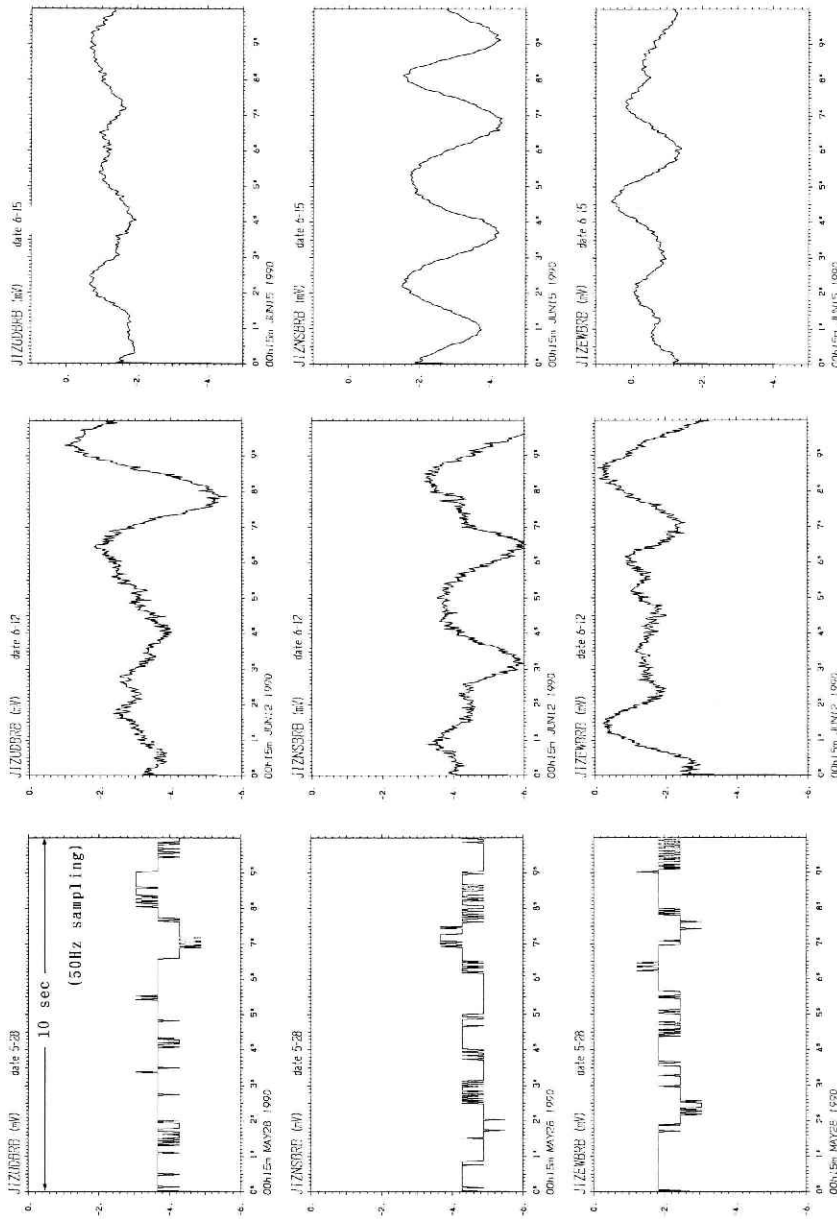


図 6 中伊豆観測点における常時微動(50Hz サンプリング10秒間)の記録, 左側は16bit固定ゲイン収録, 中央は32bit固定ゲイン収録, 右側は32bit自動ゲイン収録の場合を示す。
 Fig. 6 Ground noise at Nakaizu (10sec data with 50Hz sampling) recorded by (left) 16bit/fixed gain mode, (middle) 32bit/fixed gain mode and (right) 32bit/gain ranged mode.

ト方式によって, 公衆回線で筑波へ自動的に伝送するようプログラムされている。

受信したファイルは, まず AX パソコン(Sanyo: MBC-17 JH 40) のハードディスク内に, 図 8 のような構造で蓄えられる。ディレクトリ PDAS の下には何種類かの管理ファイル(テキスト形式)が収められ, ディレクトリ CH 0 ~CH 3 に各成分のデータ(テキスト形式のヘッダとバイナリ形式のデータ本体)が収められる。この際, 各ファイルのファイル名は,

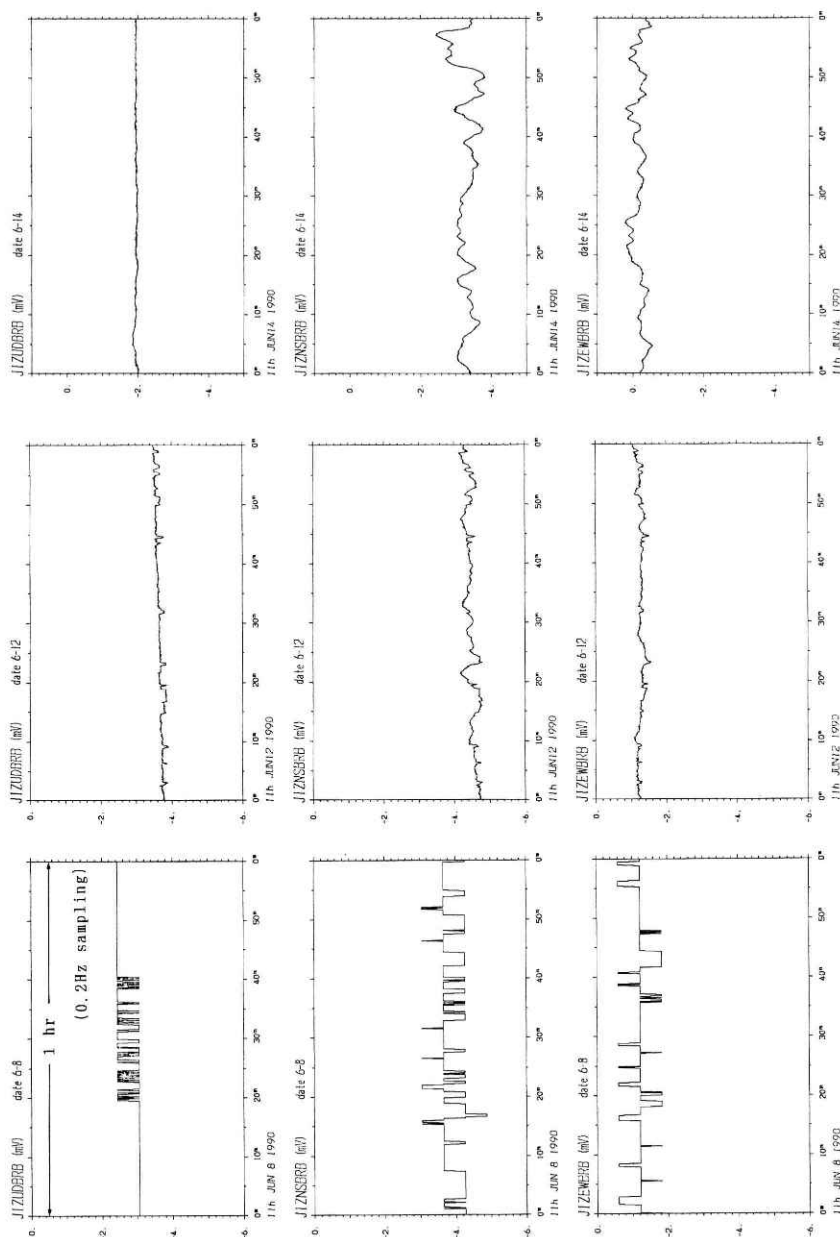


図 7 中伊豆観測点における常時微動(5秒サンプリング1時間)の記録。左側は16bit 固定ゲイン記録, 中央は32bit 固定ゲイン記録, 右側は32bit 自動ゲイン記録の場合を示す。
Fig. 7 Ground noise at Nakaizu(1hour data with 5sec sampling) recorded by (left) 16bit/fixed gain mode, (middle) 32bit/fixed gain mode and (right) 32bit/gain ranged mode.

図 8 に示すような命名規約により自動的に定められる。

このように蓄えられたデータを, 当初はほぼ1週間ごとにフロッピー経由で別のパソコン(NEC: PC-9800)へ移し, そこでDAT(TEAC: RS-2)に保存用コピーを作ると同時に, ワークステーション(Fujitsu: F-9450Σ)へRS-232Cによるデータ伝送を行い, さらにこのワークステーションから汎用機(Fujitsu: M-360)へと, もう一段のファイル転送を行うと



図 8 収録されたデータファイルの命名規約
 Fig. 8 Naming convention for obtained data files.

いう手間のかかる作業を行っていたが、その後、構内 LAN の環境が整ったおかげで、現在は AX パソコンから直接ワークステーション(Fujitsu : Σ 200)にアクセスして、FTP によるファイル転送を行えるようになった。また、データの保存も、AX パソコンに光磁気ディスク装置(Sony : NWP 539 N)を接続して、直接行えるように変更した。

このようにして汎用機に転送された S T S 地震計の記録を処理するため、幾つかの基本的なプログラムの開発を行った。これらは、収録データのルーチン処理用と、利用のためのユーティリティとに分けられる。

(1) S T S 収録データのルーチン処理プログラム

現在、ワークステーションから汎用機へのデータ転送は FEXPORT コマンドを用いているが、このコマンドには図 8 に示したような沢山のファイルを同時に送る機能がないため、これらのファイルは一旦ワークステーション内でひとつにまとめられ、単一のファイルとして汎用機に送られている。

ルーチン処理プログラム PDASJIZ は、まずこの単一ファイルを元の複数ファイルに分解するが、その際、図 8 に示すような規約でファイル名(メンバ名)を再命名する。これは、メンバ名が 8 文字以内という制約があることと、アルファベット順ソートを行った際に、正しい時間順のメンバリストが得られるようにとの配慮からである。分解されたファイルは、テキスト部分についてはそのまま、バイナリ部分については整数列のテキストに変換してディスクへの格納がなされ、後の利用に供される。

また、これと同時に、データを入力電圧値に換算し、全体を包含するように自動スケールした波形を、ルーチン出力として作図している。図 9 は、連続収録データ(12 時間分)およびトリガ収録データ(1991 年 5 月 18 日房総半島南東沖 : M=4.7 , 深さ 97 km) に対す

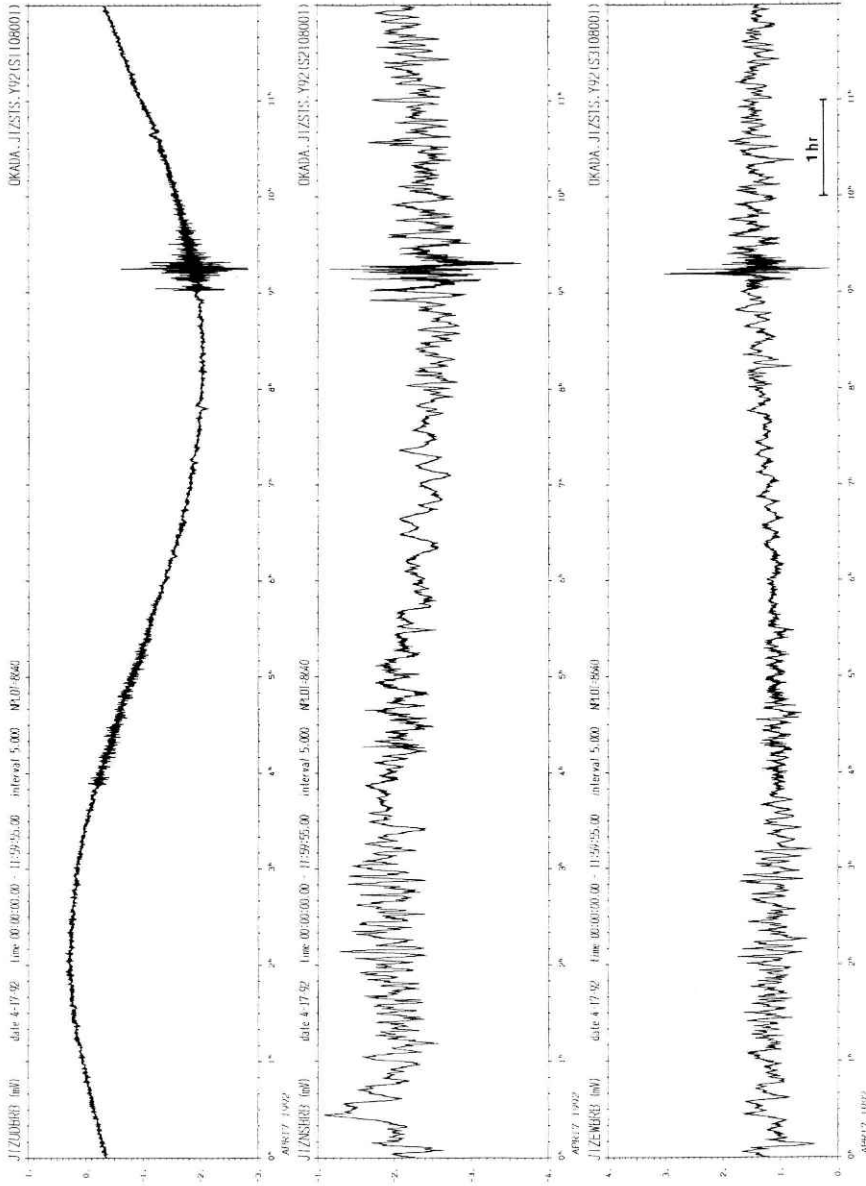


図9(a) 連続収録データ(12時間)に対するルーチンの波形出力例
 Fig. 9 (a) An example of routine output for continuous record (12 hour).

る出力例を示したものである。

(2) STSデータの利用ユーティリティープログラム

上のルーチン処理プログラムによってディスク内のメンバとして蓄えられたデータを利用するために、2つの基本的なプログラムを開発した。そのひとつは、保存されたメンバの一覧リストや各メンバの諸元リスト、および任意の波形表示を行わせるユーティリティーSTSであり、他方は、得られた波形に微分・積分やフィルタリング等の加工を施すユーティリ

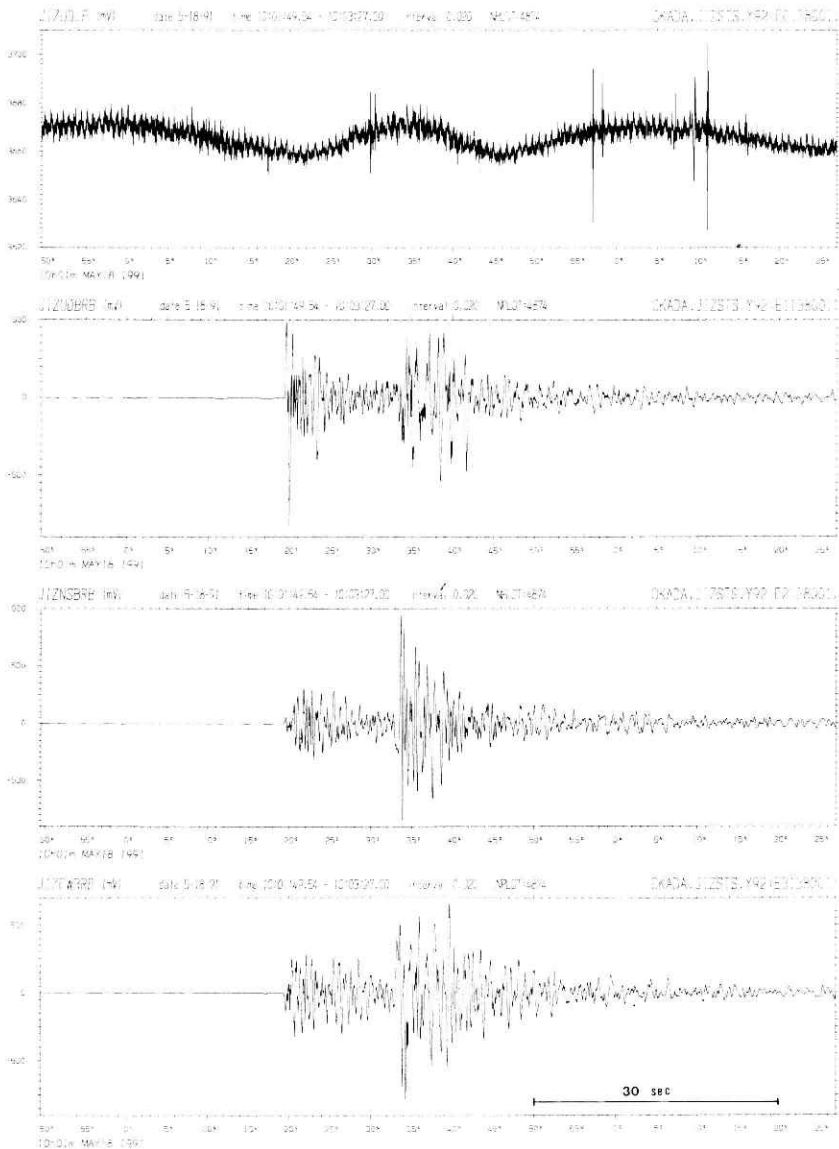


図9(b) トリガ収録データに対するルーチンの波形出力例(1991/5/8 房総半島南東沖M4.7, H97km)

Fig. 9 (b) An example of routine output for triggered record(SW off Boso Peninsula: M4.7,H97km).

ティーWINTEGである。これらはそれぞれ、バッチモード、TSS モード(GD を用いた対話処理)の、どちらでも実行できるようになっている。

プログラム STS の波形出力については、任意のメンバの組合わせを与え、連続するファイルを統合したプロット、時間範囲の切り出し、出力のスケージング等を指定することができ

る。図 10 は、このプログラムによる出力の例として、1990 年 2 月 20 日伊豆大島近海地震(M 6.5)の記録を取り上げ、4 つの連続するファイルを接続統合した波形、ならびに上下動初動部分の拡大波形を示したものである。BRB成分については、プリアンプゲインを 10 倍に設定していたため、記録が飽和している。

一方、プログラム WINTEG における波形変換は、与えられた時間範囲の 5 % の長さの cos-bell 関数をデータの先頭及び末尾にかけて FFT 演算を行い、地震計の周波数特性、希望する帯域フィルター特性、微分・積分演算(積分の場合、出力の低周波側を cos-bell でカット)を織り込んだのち、逆 FFT を行って最終出力を得ている。このプログラムによる出力の例は、次節に示されている。

3. STS地震計と傾斜計の比較観測

中伊豆観測点では、STS地震計の設置されたすぐ横で、ルーチンの傾斜観測が実施されている。この傾斜計との比較観測を行うことを目的として、1992 年 2 月 24 日、PDAS-100 にチャンネル増設を行い、東西・南北の 2 成分の傾斜計出力を接続して、データの同時収録を開始した。

防災科学技術研究所で使用している傾斜計は力平衡式と呼ばれるポアホール型測器(図 11)であり(佐藤ほか,1980)、原理的にはSTS地震計と同じ方式のフィードバック型計器である。この傾斜計に用いられている振子の機械的な固有周期は約 1 秒であるが、フィードバックによって、その直接出力は数 10 Hz の高周波にまで加速度平坦特性が延びている。しかし、ルーチン観測では、傾斜計がそもそも地殻変動観測用ということから、その出力に周期 30 秒の低域通過アナログフィルターがかけられ、さらにテレメータの際にもソフトウェアによるフィルター操作が行われて、記録が”暴れ”ないような処置がなされている。

今回は、PDAS-100 にこの傾斜計の直接出力を接続することにより、超低周波から数 10 Hz に至る帯域において、STS地震計との比較が行えるようにした。以下に、近地地震、遠地地震、潮汐変動のそれぞれの帯域において両者の記録を比較した結果について述べる。なお、傾斜計の出力感度は 10 秒角が 1 V になるように規格化されており、加速度に対する感度は $\pi/180 \times 10/3600 \times 9.8 \text{ m/s}^2/\text{V}$ すなわち 2105 V/m/s^2 である。また図 12 に示されるように、地盤が北下がりになる場合と、北方向に加速度が働く場合とでは、出力の極性が逆になることに注意する必要がある。

3.1 近地地震

図 13 は、1992 年 3 月 2 日浦河南方沖の深さ 68 km に発生した M 4.8 の地震について、STS地震計東西成分の原波形(速度)及び微分波形を、傾斜計東西成分の積分波形及び原波形(加速度)と比較したものである。サンプリング周波数は 50 Hz(カットオフ 20 Hz)で

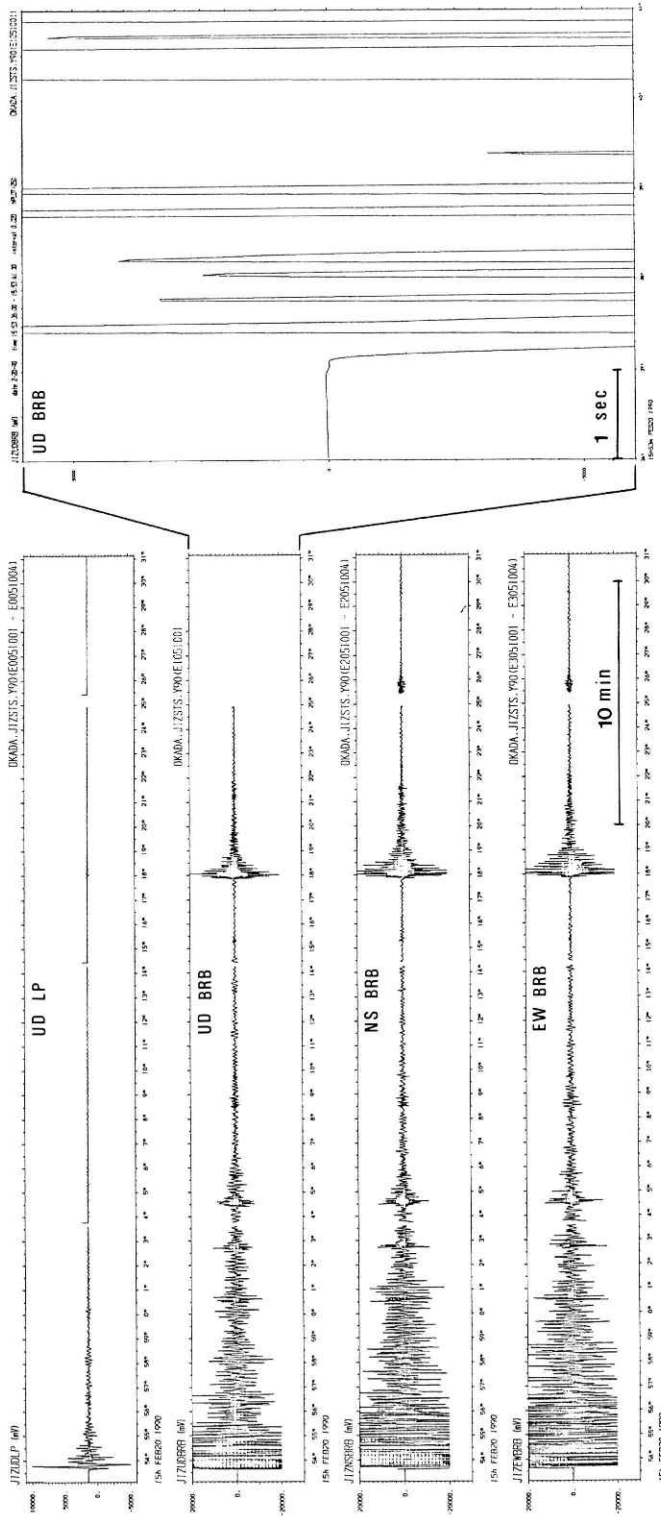


図10 1990年2月20日伊豆大島近海地震(M6.5)の記録。4つの連続したファイルの接続波形、及び上下動初期部の拡大波形を示す。
 Fig. 10 STS record for Izu-Oshima-kinkai earthquake of Feb. 20, 1990 (M6.5).
 Combined waveform of four continuous files and enlarged waveform of the initial part of UD BRB component are displayed.

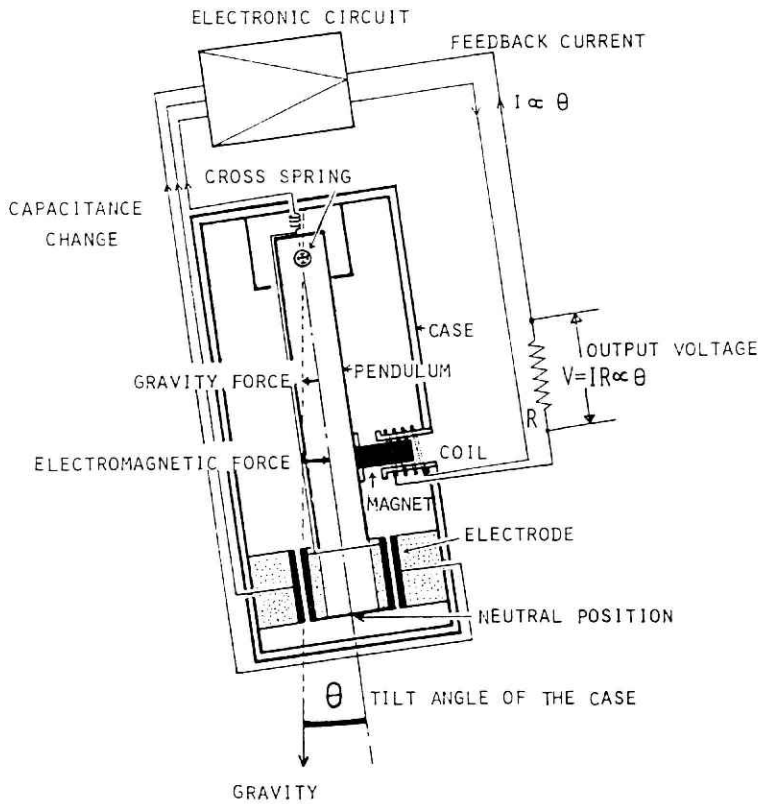


図11 力平衡型ボアホール傾斜計の原理図 (佐藤ほか,1980)
 Fig. 11 Principle of force-balanced type borehole tiltmeter (Sato et al.,1980).

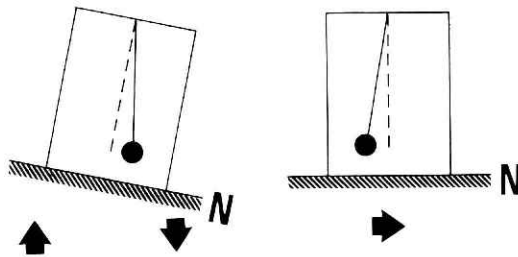


図12 地盤傾斜と水平加速度に対する振り子の応答の違い
 Fig. 12 Response of a pendulum to tilting motion and to horizontal acceleration.

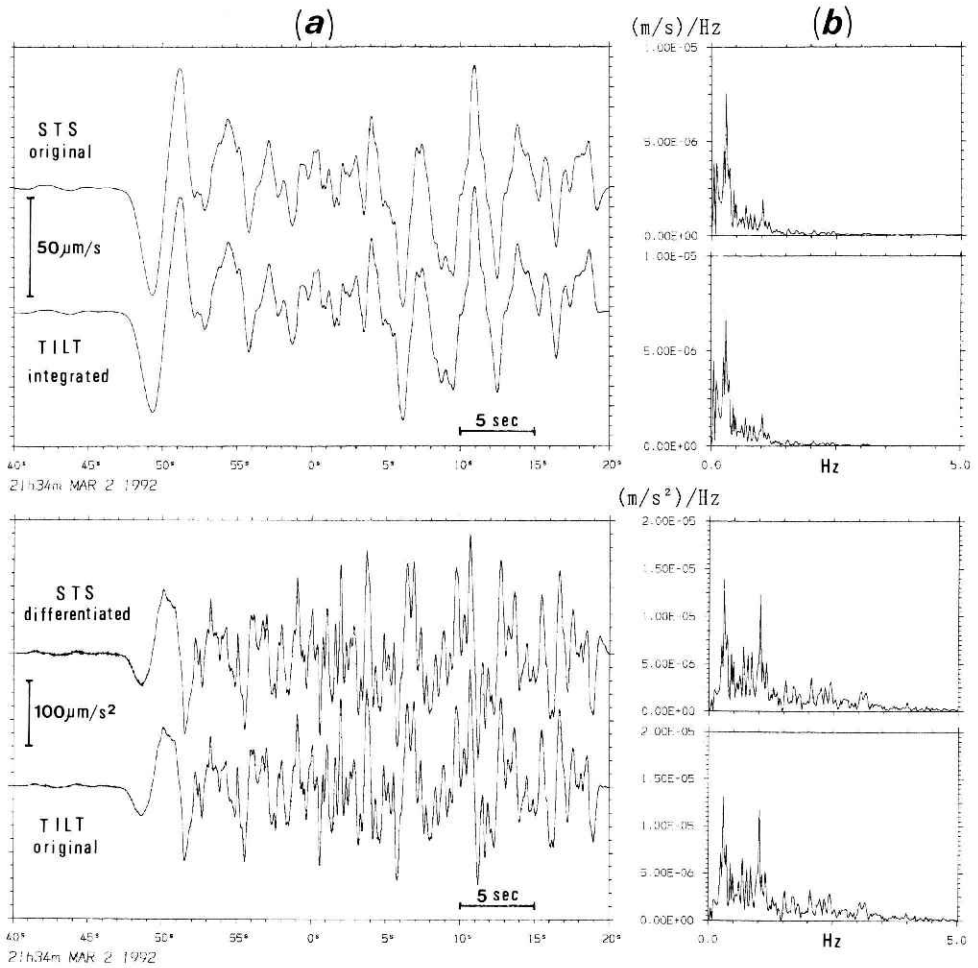


図13 1992年3月2日浦河南方沖の地震(M4.8)に対する、STS地震計記録と傾斜計記録の(a)時間領域および(b)周波数領域における比較

Fig. 13 Record for the earthquake south off Urakawa of Mar. 2, 1992 (M4.8). Original and differentiated STS waveforms are respectively compared to integrated and original tiltmeter records in (a) time domain and (b) frequency domain.

あるが、細部に至るまで地震波形は極めて良好な一致を見せ、同図に示すスペクトルにおいても、数 Hz に至るまでの全周波数で非常に良く一致している。ただ、この傾斜計については、STS地震計のように速度フィードバックを行っていないため、ごく近地の地震で大きな加速度が働いた場合には、飽和し易いという問題がある。

3.2 遠地地震

図14は、1992年4月26日(日本時間)カリフォルニア北部沿岸で発生したM7.0の地

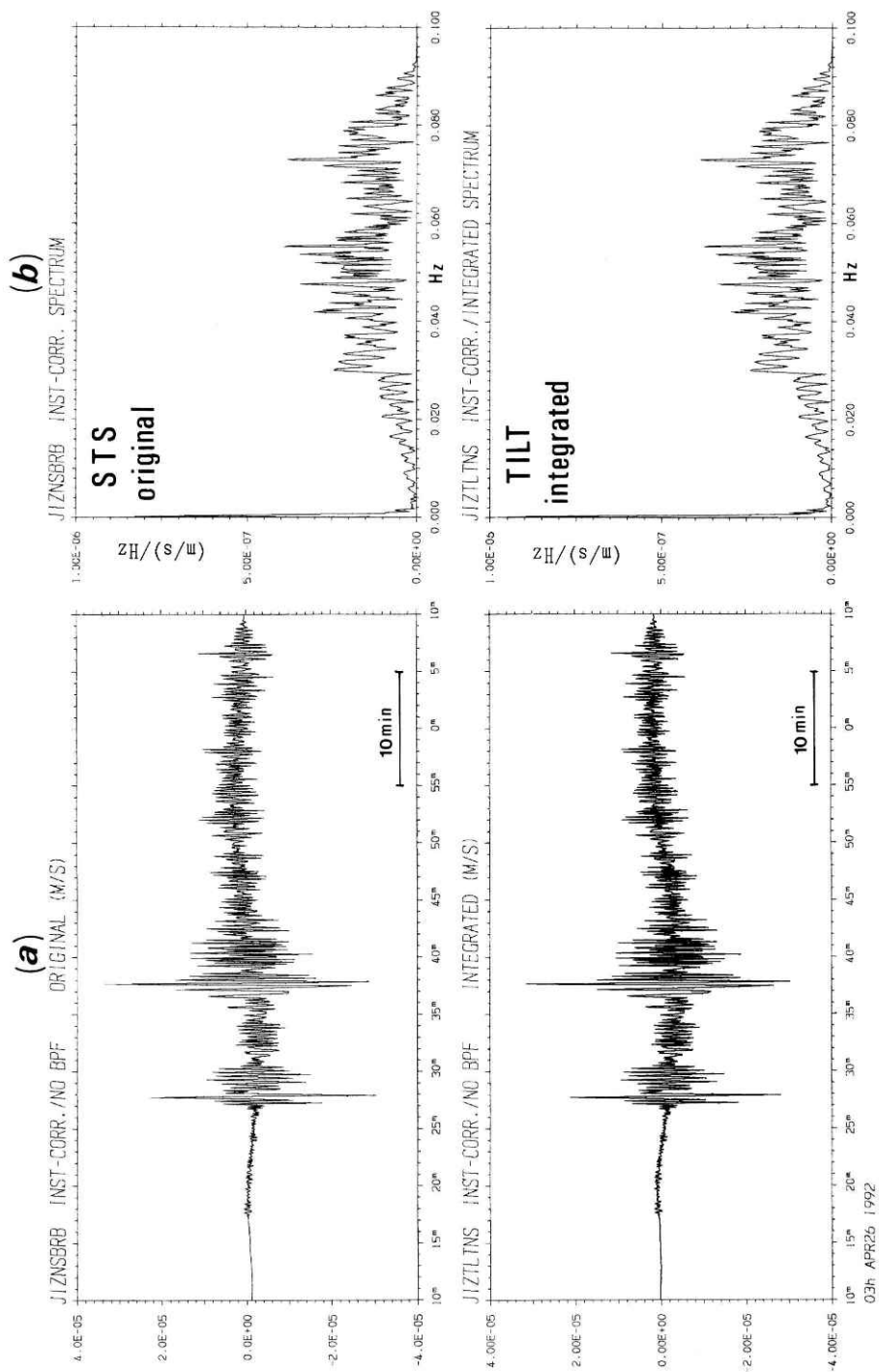


図14 1992年4月26日カリフォルニア北部沿岸の地震(M7.0)に対する、傾斜計記録の積分波形とSTS地震計記録の原波形の(a)時間領域および(b)周波数領域における比較

Fig. 14 Record for the earthquake at northern coast of California of Apr. 26, 1992 (M7.0). Original STS waveform and integrated tiltmeter record are compared in (a) time domain and (b) frequency domain.

震について、傾斜計の南北成分(加速度)を積分した波形とSTS地震計の南北成分(速度)の原波形とを比較したものである。サンプリングは5秒間隔で、1時間分の記録が示されているが、時間領域においても周波数領域においても、両者の一致は大変に良好である。

3.3 潮汐変動

図15は、1992年3月から4月までの2ヶ月間における5秒サンプリングの連続データについて、上下および南北成分のSTS地震計記録と南北成分の傾斜計記録を比較したものである。これらの記象でスパイク状に見える信号は、すべて地震動である。傾斜計には降雨による長期間の影響が大きく現われているのに対し、STS地震計ではそのような長周期の変動に対するレスポンスがないことがわかる。また、STS地震計同士では、上下動がきれいに

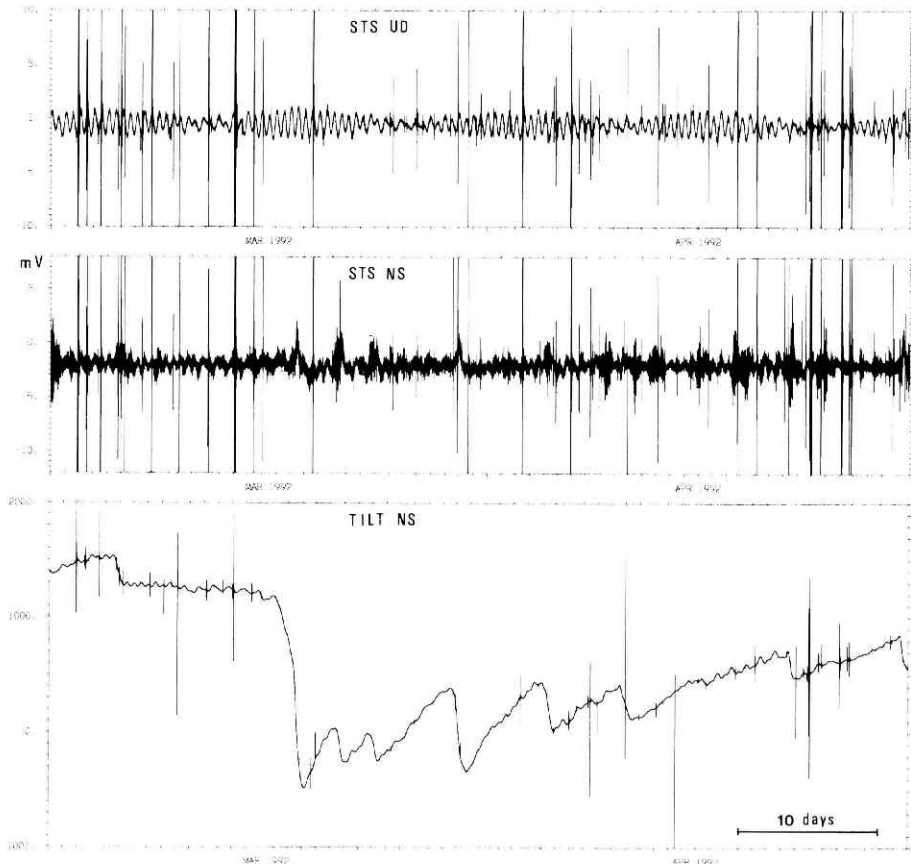


図15 1992年3月～4月の2ヶ月間における、STS地震計(上下及び南北成分)と傾斜計(南北成分)の連続記録の比較

Fig. 15 Comparison of 2-month long continuous records of STS seismometer (UD and NS components) and tiltmeter (NS component).

潮汐を記録しているのに対し、水平動は非常に大きなノイズを伴っている特徴が見られる。

次に、潮汐成分を取り出して比較するため、図15の各記録の原データ100個ずつの中央値をとって500秒間隔のスムーズ化したデータを作成したのち、40,000秒～90,000秒の帯域

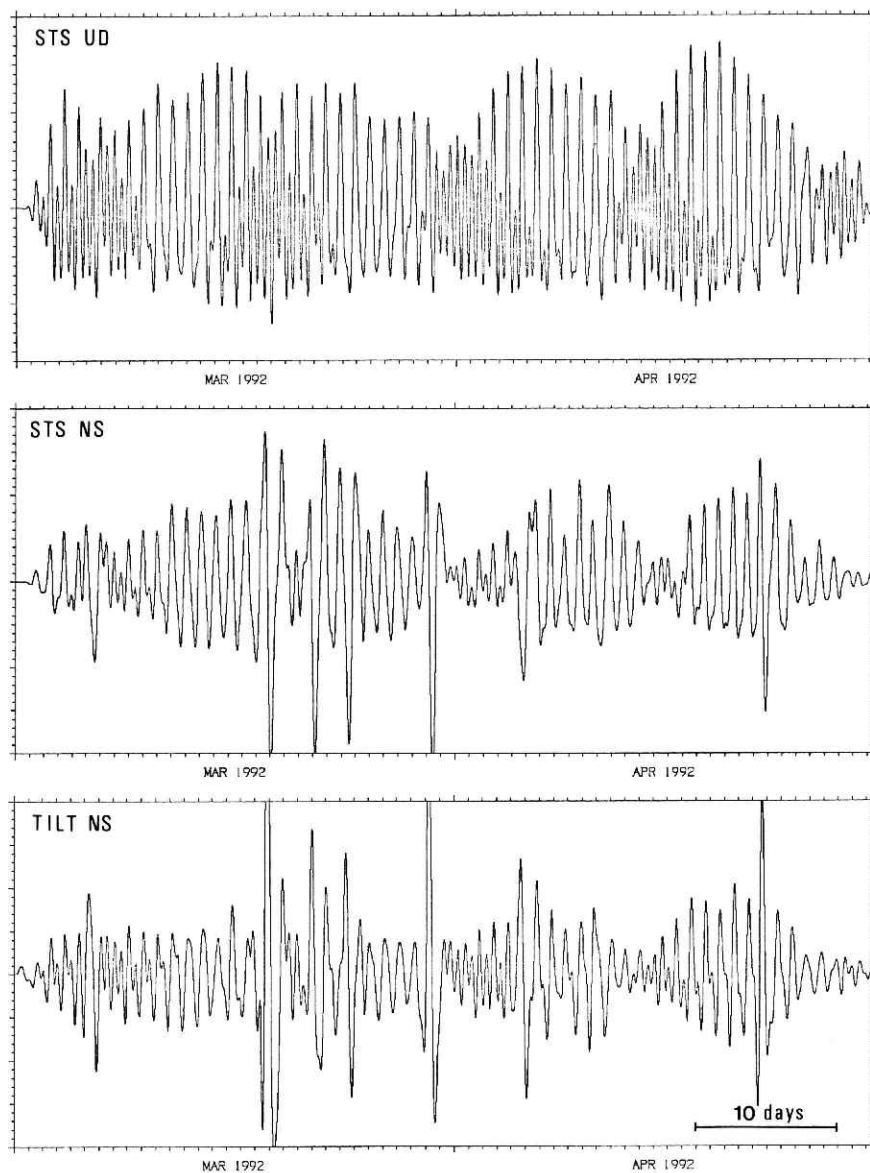


図16 図15のSTS地震計および傾斜計の記録に40,000～90,000秒の帯域通過フィルターを施した結果

Fig. 16 Comparison of STS seismometer and tiltmeter records through 40,000～90,000 sec band pass filter.

通過フィルターを施した結果を図 16 に示した。傾斜計記録では当然のことながら、S T S 地震計記録についても、かなり明瞭な潮汐記録が得られていることがわかる。

4. おわりに

中伊豆観測点における S T S 地震観測の経験を通して、その有効な観測方式およびデータ処理方式の模索がなされた。その結果、まだモデムによるデータ伝送に若干の問題は残されているものの、基本的なデータ取得および処理の体制はほぼ確立された。

この方式を用いてなされた S T S 地震計と傾斜計との比較観測結果によれば、防災科学技術研究所で現在使用されているボアホール型傾斜計は、高精度の S T S 地震計による記録と同程度の性能を有することが確認された。岡田(1992)は、地殻変動連続観測用の測器に近代的なデジタルデータ収録装置を組み合わせれば優秀な長周期地震観測システムが実現できることを述べているが、今回の実験はこのことを実証する一例となった。

図 9(a)や図 15 の例に見られる通り、S T S 地震計の水平動出力は上下動に較べてノイズが非常に大きい。一般に、長周期地震観測において、水平動成分はボアホール化することにより観測の高感度化・高精度化が図られるのに対し、上下動成分については地表近くでも十分な精度での観測が期待できることが知られている。ボアホール式傾斜計を広帯域の水平動地震計として用いる一方、地表では S T S や I D A 等の長周期上下動地震計を半地下式で併設することにすれば、かなり理想的な 3 成分の広帯域地震観測が実現できよう。次のステップとして、深層地殻活動観測施設に設置されているボアホール型傾斜計を用いて今回と同様の実験観測を実施してみることは、価値が高いものと思われる。

謝 辞

中伊豆観測施設における S T S 地震計および PDAS-100 の設置にあたっては、防災科学技術研究所の山本英二主任研究官に便宜をはかっていただいた。ここに記して感謝の意を表します。この研究は科学技術振興調整費によるものである。

参 考 文 献

- 岡田義光(1992)：歪計/傾斜計による広帯域地震観測. Proceedings of Pre-POSEIDON Workshop, 25-27.
佐藤春夫・高橋博・山本英二・福尾信平・上原正義・寺沢康夫(1980)：孔井用傾斜計による地殻傾斜観測方式の開発. 地震, 33, 343-368.
Teledyne(1987)：PDAS User's Guide, 180 pp.
Wielandt, E. and Streckeisen, G. (1982)：The leaf-spring seismometer: Design and performance, Bull. Seism. Soc. Am., 72, 2349-2367.

(1992 年 12 月 28 日 原稿受理)