

地震探査データ集録装置 (McSEIS-1500) の開発

大久保秀彦・五江淵通

DEVELOPMENT OF SEISMIC DATA ACQUISITION SYSTEM (McSEIS-1500 SYSTEM)

Hidehiko OHKUBO and Tohru GOEBUCHI

Abstract

Engineering seismographs using signal enhancement to improve S/N ratio has prevailed and measurement with use of it has proved expected improvement. On the other hand, computer spread accelerated by recent progress of electronics engineering is worthy of special mention. Seismic survey sector as well can not be an exception from such trend: computer-assisted data processing has been promoted wherever feasible. Even for field equipment digital recording or interface device with computer is demanded. Keeping such increasing demand in mind the writers have developed field engineering seismograph (McSeis 1500 system) based on something innovative idea. The system consists of an amplifier with digital memory, a display with CRT to monitor the seismic data, a printer to printout hard copy and a processing unit to perform analog-digital conversion as well as waveform processing. A micro-computer set inside each unit allows respective unit to function independently. The entire system is built up with building blocks. One unique feature lies in that the floppy disk is used not only for record media but for data processing with appropriate program. The program is read in machine language so that execution may be done quickly at field work site for efficient data treatment. The paper intends to illustrate both hardware and software of the system with field application examples.

1 まえがき

地層探査は、通常的な調査法として、土木地質の分野において有効に利用されている。通常の屈折法探査はもちろん、近年においては、高層建築物や原子力発電所などのような、大規模な構造物の地震時の耐震設計上必要なデータの1つとして、S波速度測定も重要な調査項目に加えられている。一方、VSP (Vertical Seismic Profiling) や浅層反射法なども試みられるようになった。このように、地震探査の利用の多様化に伴い、そのハードウェアであるサイズモグラフも発展的に変化してきた。

探査には必ずといっていいほど雑音を伴い、場所によっては、特に市街地ではそのレベルが高く、震源として火薬を用いることができないことも重なって、測定を困難にしている場合が少なくない。このように S/N 比の低下しているフィールドの場合には、従来から石油探査で用いられている信号を重合処理することが考えられるが、そのシステムが大掛りになること、また費用がかかることなどの理由により、そのままの形で土木の分野に普及させることは困難であると考えられた。そのために、河野・原 (1977) が述べているように、安価で、操作性に優れているシグナルエンハンスメントシステムが開発され、McSEIS-1200として実用に供せられた。これ

によって著しく S/N 比の改善が試みられるようになり、それ以後のエンジニアリングサイズモグラフィにおいては、必要不可欠なものとして、この機能を採用するようになってきた。

さらに、コンピュータの普及とデータ処理技術の確立に伴い、土木の分野においても、簡単な屈折法の解析から膨大なデータ処理を要する反射法に至るまでの、あらゆる探査のデータを速やかに処理できるようになってきた。このために、サイズミックシステムにおいては、デジタル記録機能とコンピュータとの接続機能が求められるようになり、各機種とも、GP-IB (IEEE-488) や RS-232C などの標準インターフェースを装備するようになってきた。

今回開発した McSEIS-1500 システムは、シグナルエンハンスメントシステムを採用するとともに、記録媒体にフロッピーディスクを採用し、単にデータの記録・再生のみならず、フロッピーディスクを有効に活用し、デジタル化によりダイナミックレンジを増すとともに、コンピュータによる各種のデータ処理を容易に行うことができる。

2 McSEIS-1500の構成と仕様

2-1 構成

McSEIS-1500 システムの基本構成は、図-1 に示すように、

1. シグナルエンハンスメントユニット
2. ディスプレイユニット
3. プロセッシングディスクユニット

からなり、それぞれは同一形体、同一サイズのケースに収納されている。

2-1-1 シグナルエンハンスメントユニット

シグナルエンハンスメントユニットの役割は、受振器からの信号を A/D 変換器によりデジタル化し、半導体メモリに記憶させることである。また、信号の加算をも同時に行なっている。

サイズミックシステムのように、多成分の信号を A/D 変換する場合、図-2 に示すようなマルチプレクサ方式は、コスト的に有利であろう。しかし、サンプラーホールドの時間補正やメンテナンスのことなどを考慮すると必ずしも得策とはいえない。さらに 50 μ sec の高速度サ

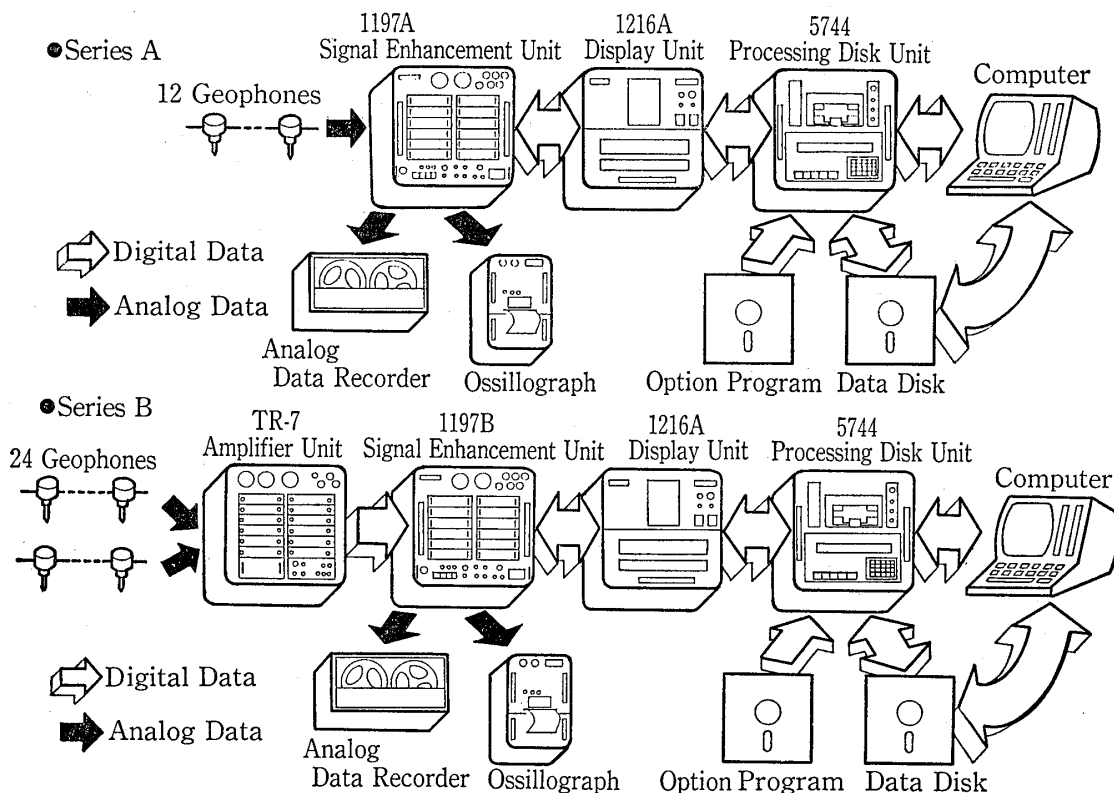


図-1 McSEIS-1500システムの構成

Fig. 1 McSEIS-1500 System

ンプリングを行うことは困難である。理想的には、各成分ごとにA/D、D/A変換器を用意することである。そして、データ加算を回路的にしかもリアルタイムで行う方法としては、図-3に示すように、全加算器を用いるデジタル加算方式が最も正統的な手法といえることができる。しかし、この方式は、1)コスト、2)スペース、3)消費電力の3点において問題がある。

そこで、1)回路部品が少なく、スペース的にも電力消費の面でも有利であること、2)回路が簡単でメンテナンスが容易であること、3)高速度サンプリングが可能であること、4)安価であること、の4つの条件を満たし、さらに、SN比の改善を得るためのアナログ加算機能を備えたシグナルエンハンスメント方式を開発採用した。この方式は、1個のD/A変換器をA/D、D/A共通で使用しており、その回路構成は図-4の通りである。

なお、図-1に示すように、シリーズB (24成分) の場合には、シグナルエンハンスメントユニットの前に、別個の増幅器を必要とするが、シリーズA (12成分) の場合には、シグナルエンハンスメントユニットの中に増幅部が含まれている。

(1) アンプモジュール

入力に関しては、シールドを施したトランスを採用し、高い同相雑音除去比 (CMRR) を得ている。また、受振器の接続や絶縁状態を容易に確認するためのテスト回路が含まれている。

商用周波数からの誘導雑音を除去するための狭帯域除去 (ノッチ) フィルタは、ツインT型のハイブリッドICで構成し、極めて高い周波数確度と -55dB 以上の大きな減衰量を達成した。

サイズミックデータの飽和を防ぐためのAGC機構に

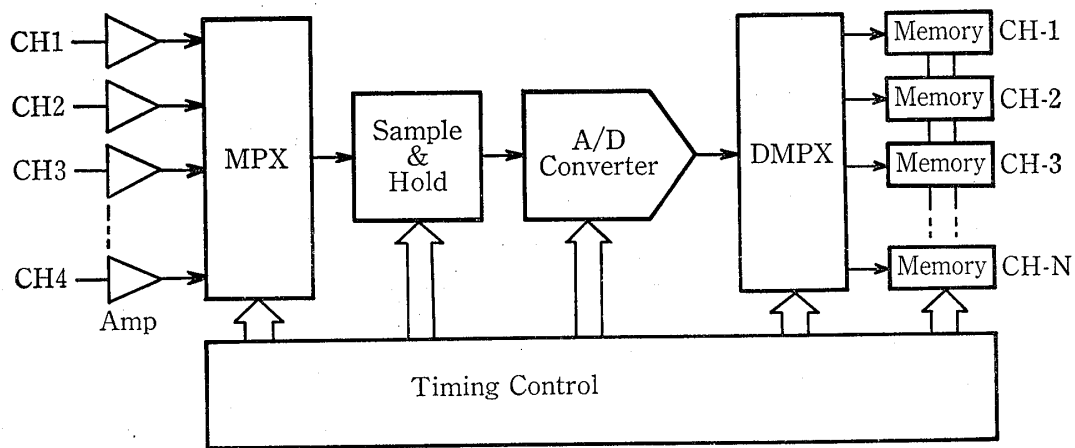


図-2 マルチプレクサ型A/Dコンバータ
Fig. 2 Multiplexing A/D Converter

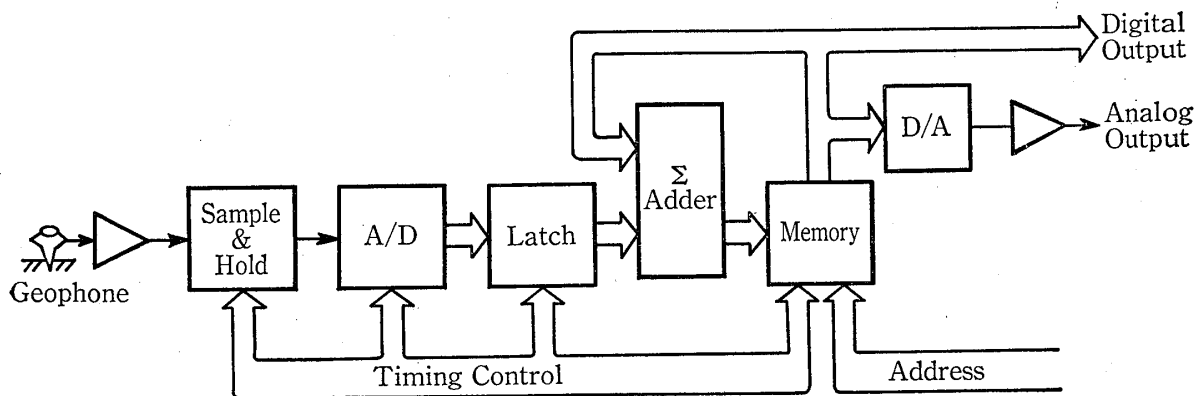


図-3 デジタルデータ加算
Fig. 3 Digital Data Adder

は、ダイナミックレンジの広い電圧制御型可変抵抗素子を採用し、性能の向上をはかった。

A/D/A変換器は12ビット型を用い、大きなダイナミックレンジを得ている。

アンプモジュールの回路構成は、図-5に示す通りである。

(2) コントロールモジュール

コントロールモジュールは、図-6に示すように。

A/D・D/A コントロール、CRT コントロール、プリンタ用 A/D コントロールの各部から構成され、すべて内蔵のマイクロコンピュータによって処理されている。

A/D・D/A コントロール部は、アナログ信号をデジタル信号に、デジタル信号をアナログ信号に変換するためのタイミング回路で、サンプリング信号やメモリアドレスクロックを発生する。

CRT コントロール部において、CRT の同期信号は、

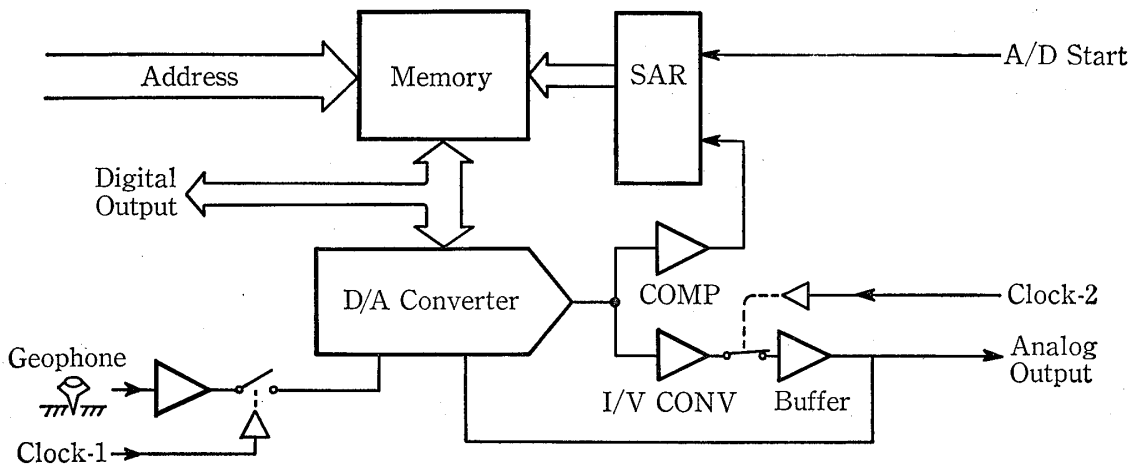


図-4 シグナルエンハンスメントの原理
Fig. 4 Principle of Signal Enhancement

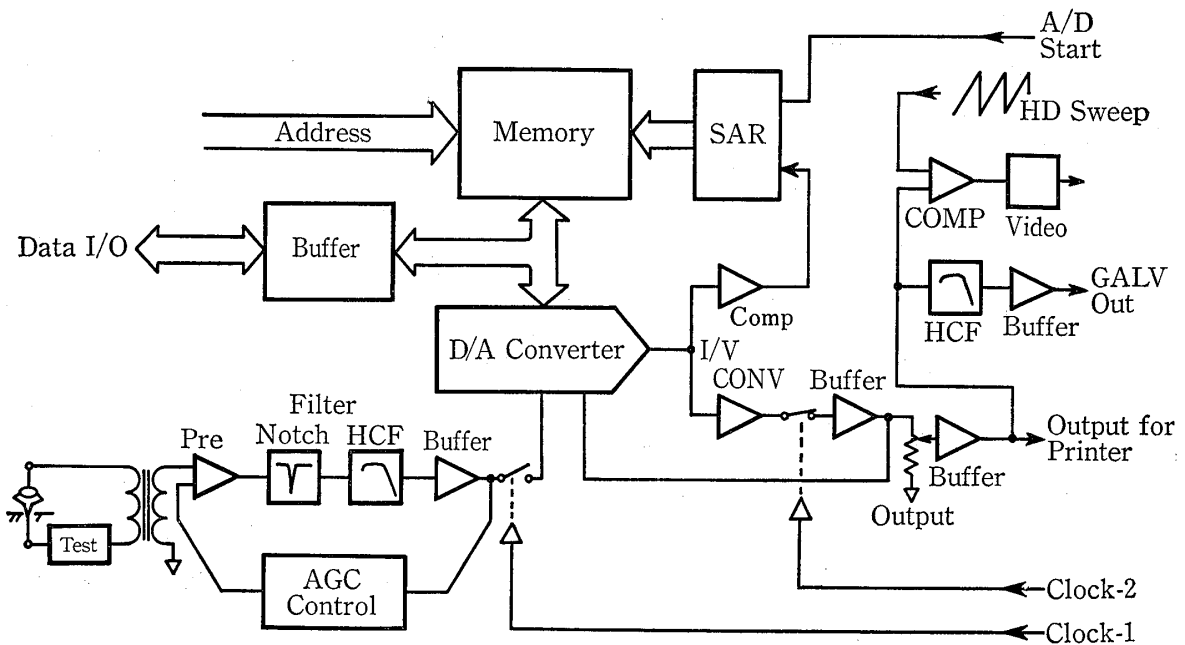


図-5 増幅器モジュール
Fig. 5 Amplifier Module

通常の家産用テレビと同様に、水平 $64\mu\text{sec}$ 、垂直 16.4 msec である。したがって、1画面のCRTデータは、256本の水平走査線で 16.4 msec 毎に書き換えられる。このために、CRTに表示できるデータ(ワード長)は、水平走査線数に等しい256ワードである。各アンプのメモリ語長は1024ワードであるから、1度に表示できるデータは全語長の $\frac{1}{4}$ 弱である。CRT表示方法において、コンプレッション(圧縮)モードとは、1024ワードのデータを4ワード毎にサンプリングし、256ワードのデータとし、それをD/A変換してCRTに表示するものである。一方、ズームアップ(拡大)モードとは、1ワードデータを1水平走査線として処理する方法で、拡大表示が可能である。なお、メモリのアドレスコントロールには、

アップ/ダウンカウンタを用い、CRTに表示したデータの右シフト左シフトを可能にしている。

つぎに、プリンタ用D/Aコントロール部においては、各アンプモジュールのメモリに記録された波形データは、常時はCRTクロックによりD/A変換され、リアルタイム表示の可能なラスタコンパレータ方式を用いてCRTに表示される。その振巾は各アンプモジュールの出力レベル調整つまみによって、0~100%可変できる。プリンタに波形データを記録する場合、各メモリのデジタルデータを用いるのが最も簡単であるが、本システムにおいてはCRT上の振巾と記録紙上の振巾を同一にするため、D/A変換されたデータを再度高速A/D変換を行い、セントロニクス規格に準拠して、そのデータをプ

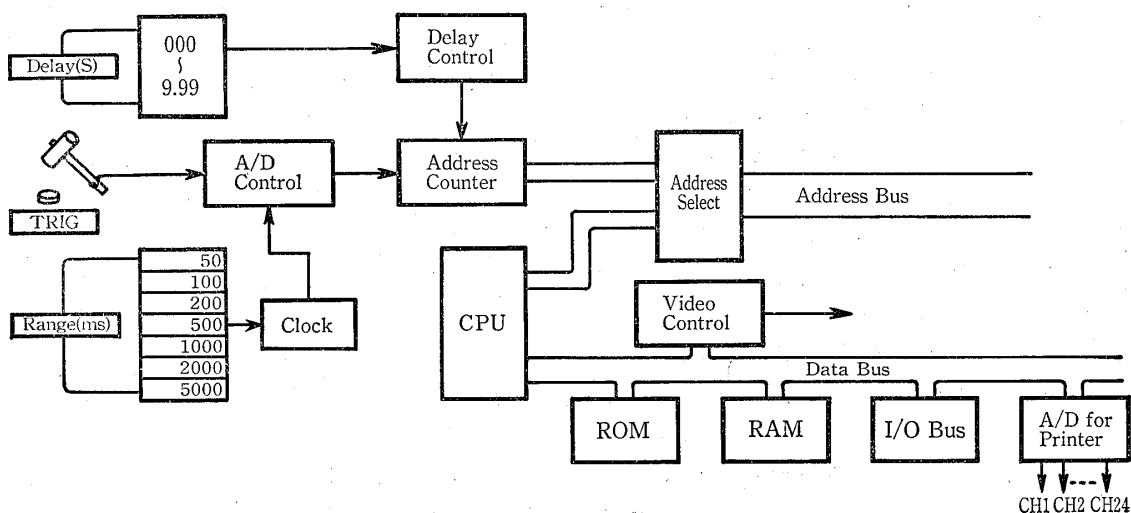


図-6 コントロールモジュール
Fig. 6 Control Module

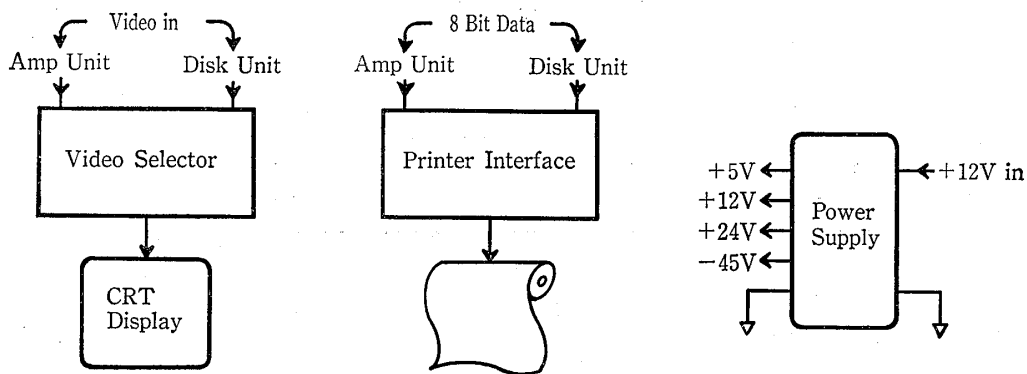


図-7 ディスプレイユニット
Fig. 7 Display Unit

リントに転送している。

2-1-2 ディスプレイユニット

ディスプレイユニットは、図-7に示すように、16 MHz 以上の高帯域である5.5インチの CRT モニタおよび 216mm 巾の高速・高分解能を示す放電プリンタ部より構成されている。

ディスプレイユニットでは、シグナルエンハンスメントユニットに記憶されたデジタル波形データを用いて、CRT に表示させるとともに、内蔵のプリンタによって、観測の諸条件（レコードレンジ、ディレイ等）も含めてデータがプリントされる。波形の表示方法は、通常のウィグルトレースモード以外に、位相情報の判断に有効なバリエブルエリアモードが選択できる。もちろん、プリンタで得られるデータも、CRT の表示モードと同じである。また、プロセッシングディスクユニットからのデータを CRT に表示したり、あるいはプリントさせることも可能である。

このユニットに採用したデジタルデータ入出力 (Digital Data I/O) コネクタは、標準インターフェースである GP-IB の規格品であるが、データのフォーマットは GP-IB とは異なっている。すなわち、デジタルデータは 8 ビットパラレルで、セントロニクスに準拠しているが、コネクタの空ピンをビデオ信号用に利用しており、これを OYO-IB と呼んでいる。

2-1-3 プロセッシングディスクユニット

プロセッシングディスクユニットは、図-8に示すように、記録容量の高い両面倍密度型フロッピーディスク装置を主体として、データ I/O インターフェース、デジタル制御型バンドパスフィルタ、および外部用データ I/O 部より構成されている。

プロセッシングディスクユニットでは、シグナルエンハンスメントユニットより送られるデジタル波形データをディスクに記録させる。と同時に、各種の処理プログラムにより、波形処理装置としての役割を果たす。

波形処理されたデジタルデータは、再度シグナルエンハンスメントユニットに転送できる。そのデータは再びディスプレイユニットに送られ、CRT に表示される。また、プリンタにデータを描かせることもできる。

フロッピーディスクに記録されたデータは、標準インターフェース (GP-IB または RS232C) を介して、コンピュータに接続できる。また、そのデータフォーマットが、使用するコンピュータのもと同じであれば、直接ディスクベースでの接続が可能である。なお、RS-232C のデータ転送速度は、1200 ボーから 9600 ボーまでコンピュータ処理速度に応じて、4 種の設定が可能である。

デジタル制御型バンドパスフィルタは、ハイパス、ローパスともに、24dB/OCT の遮断特性を持つパターワースフィルタである。そのカットオフ周波数は、キーボードから任意に設定できるようになっている。回路的には既存の方式と大差はないが、3-4において詳しく述べるように、独特なフィルタリング処理手法を用いて、アナログフィルタでありながら、位相遅れは全く生じないようにしてある。さらに、1回のフィルタリング処理では 48dB/OCT の遮断特性が得られるが、これを 2回、3回と繰り返すことによって、96あるいは 144dB/OCT のフィルタ処理を行ったものと等価と見ることができる。

1セクタ当りの記録容量、1トラック当りのセクタ数、1シリンダ当りのトラック数、記録モードなどのようなフロッピーディスクのデータフォーマットは、他のシステムとの互換性を考慮する上で重要である。データフォ

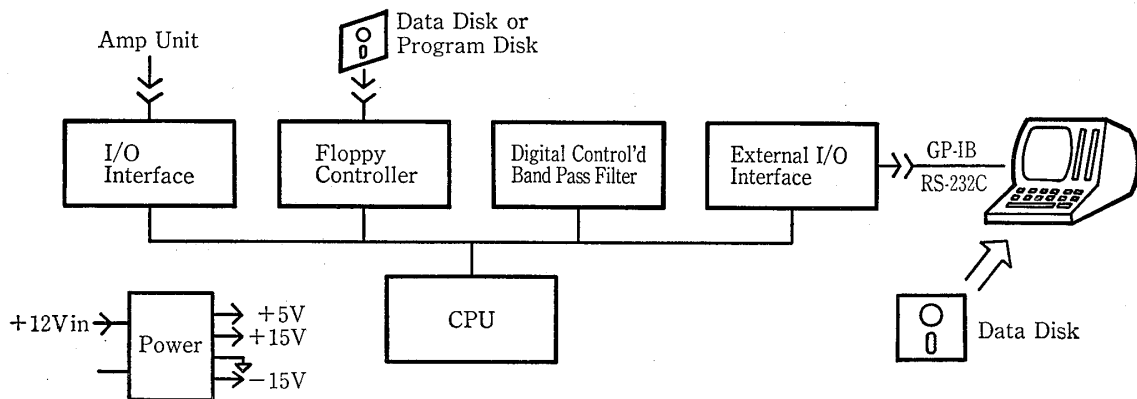


図-8 プロセッシングディスクユニット

Fig. 8 Processing Disk Unit

フォーマットには、ハードセクタフォーマット方式とソフトセクタフォーマット方式があるが、最近のう勢としてはソフトセクタ方式の IBM が、8 インチサイズフロッピーディスクで採用した、いわゆる IBM フォーマットが主流になっている。一方、5.25 インチ用のデータフォーマットは、8 インチにおける IBM フォーマットのような支配力を有する統一的なものは、現状では特にない。しかし、最近 ISO (International Standard Organization) によって、8 インチ用 IBM フォーマットに準じた 5.25 インチ用フォーマットが提案されており、各社共ほとんど同様の考え方に立ったフォーマットを採用している。

本システムにおいては、より多くのコンピュータとディスクベースでの互換性を得るため、IBM 両面倍密度型に準拠したフォーマットを採用した。本システムのフォーマット仕様を表-1 に示す。また、普及型パーソナ

ルコンピュータのデータフォーマットと本システムとの互換性を表-2 に示す。

2-2 仕様

本装置を構成している 3 つのユニットの仕様は、表-3、表-4、表-5 に示す通りである。

3 プロセッシングディスクユニットの信頼性

数々の特長を持つフロッピーディスク装置は、今や記録媒体の主流であり、コンピュータ関係やデータ集録装置などで広く利用され、その高い信頼性は実証されている。しかし、それら多くのシステムの大部分は、環境の整った室内で使用されているのである。これに対して、振動、異常な温度、湿気、粉じんなどのような過酷な条

表-1 ディスクフォーマット
Table 1 Disk Format

Disk Size	5.25 Inch
Recording Mode	M-FM
Disk Format	Double Density MFM of IBM 8" Disk
Recording Capacity	327.68 K Bytes/Disk
No. of Tracks	40 Tracks/Side
No. of Sectors	16 Sectors/Track
Sector Length	256 Byte/Sector

表-2 代表的なパーソナルコンピュータのディスクフォーマット
Table 2 Disk Formats of Some Representative Personal Computer

Personal Computer	Sector Length (Bytes/Sector)	No. of Sectors (Sectors/Track)	No. of Tracks (Tracks/Side)	Recording Mode	Compatibility with McSEIS-1500
APPLE-II (APPLE)	256	16		M ² FM	×
TRS-80 (TANDY)	256	18	40 (One Side)	FM	×
HP-9836 (HP)	256	16	35 (Double Side)	MFM	△
PC-8001 (NEC)	256	16	35 (Double Side)	MFM	△
MZ-80 (SHARP)	256	16	35 (Double Side)	MFM	○
PASOPIA (TOSHIBA)	256	16	35 (Double Side)	MFM	○
FM-8 (FUJISTU)	256	16	40 (Double Side)	MFM	○
IF-800 (OKI)	256	16	35 (Double Side)	MFM	○

件下におかれるサイズミックフィールドにおける信頼性については、その実績はほとんどなく、大いに懸念される所であった。そこで、フロッピーディスク装置をサイズミックシステムの記録媒体として採用するにあたっては、単に規格上の試験だけでなく、粉じんやディスクの浸水などのフィールドテストも含め、各種の信頼性試験を行い、その耐久性を調査した。

振動試験については、MIL-STD-202C-204Aに基づいて、その共振周波数において、1Gから4Gまでの振動の加速度を1Gごとに3方向にそれぞれ15分間の加振試

験を行った。この結果によれば、いずれの場合でも本装置は正常に作動し、規格内での性能を十分に示した。

温度試験においては、シグナルエンハンスメントユニット、ディスプレイユニット、プロセッシングディスクユニットのトータルシステムを恒温恒湿槽に入れ、25°C(常温)→40°C→55°C→60°C→25°C→0°C→-10°C→-20°C→25°Cのように温度を変化し、各温度において、データの記録、再生、データプリントなどの総合試験を行った。この結果によれば、-20°Cから55°Cの範囲において、トータルシステムは正常に動

表-3 シグナルエンハンスメントユニット
Table 3 Signal Enhancement Unit

Item		Specifications	
		1197A	1197B
Channel		12	24
Input Impedance		600Ω (Transformer)	100kΩ (Single Ended)
Frequency Range	LPF on	5~70 Hz (12dB/O)	(Non)
	LPF off	5~1000 Hz (12dB/OCT)	5~1000 Hz
A/D Resolution		12 Bit	8 Bit
Memory Size		12 Bit×1024 Word×12 CH	8 Bit×1024 Word×24 CH
AGC.(Attenuation)		0~30 dB	(Non)
Notch Filter	Freq. (Hz)	50, 60 Hz	(Non)
	Rejection (dB)	-55 dBmin (1/560)	
Line Test	Geophone	Led	(Non)
	Leakage	Meter	
Record Range (ms)		50, 100, 200, 500, 1000, 2000 5000	50, 100, 200, 500, 1000, 2000 5000
Trigger Delay (ms)		0~9990 (in 10ms step)	0~9990 (in 10ms step)
Trigger Source		Hammer SW, Geophone, TB from Blaster etc.	Hammer SW, Geophone, TB from Blaster
Phone Circuit		Hand-set	Hand-set
Analog Output (D/A Conversion Time) (ms)		1024 (const)	1024 (const)
Input Gain		50~50000 (1,2,5×10 step)	1 (Fixed)
Output Gain		1 (0~100% Adjustable)	1 (0~100% Adjustable)
Power		DC-12V, 3A max	DC-12V, 3A max

表-4 ディスプレイユニット
Table 4 Display Unit

Item Item		Specifications		Note
CRT Display	Size	5.5	Inch	
	Raster	P-31	(Green)	
	Video Amp	16	MHz	
	Horizontal Drive	15.625 ~15.75	KHz	
	Vertical Drive	53~60	Hz	
Graphic Printer	Method	Electro Sensitive		
	Dot Density	5.7	Dots/mm	
	Dot Capacity	24×1120	Dots/Line	
	Printing Speed	3	Lines/S	
	Recording Paper	21.6cm×40m		
General	Power	Quiescent	1	A
	12V	Max	3	
	Size	34×33×31		cm
	Weight	11		kg

作することが確認され、実用上全く支障ないことが実証された。ただし、60°Cにおいては、ディスクが大きく変形し、データにエラーが生じた。また、LCD（液晶表示器）は高温時においては全体的に濃く表示され、一方、低温時においては逆に薄く表示されるが、上記の温度範囲においては判読できた。

つぎに、ぬらしてしまったディスクが使用できるか否かを調べるために、データディスク全体を水中につけ、充分乾燥させた後にデータの再生試験を行った。その結果、ディスクは正常に作動していることを確認した。

また、粉じんが多いフィールドにおいて長時間の使用試験を行ったが、正常に作動することがわかった。

以上のような試験の結果、このフロッピーディスク装置は、サイズミックフィールドのような相当に過酷な環境においても高い信頼性を有することが確認できた。この結果を表-6に示す。

4 データ処理

現場で直接、観測データを処理する意義は大きく、作

業の省力化に大いに役立つ。このシステムでは、プロセッシングディスクユニット内のマイクロコンピュータを用いることによって、各種アプリケーションのソフトウェア処理が可能となる。そこで、システムを設計するにあたっては、波形データ処理において、単能機なみの使い易さと高速性を保持すること、処理能力が単能機と比べてすぐれていること、ミニコンピュータやパーソナルコンピュータと比べて特別な専門知識を必要としないシステムであることを目標とした。

今回開発したデータ処理用のソフトウェアは、アセンブラ言語を用いることにより、内蔵マイクロコンピュータの性能を活用し、データ処理のフレキシビリティを、ディスクによる処理プログラムの交換という形で可能とした。そして、その内容は、記録データからの雑音成分の除去と信号成分の検出という基本的な波形処理であり、つぎに示す5つのプログラムを含んでいる。

1. 高速フーリエ変換処理
2. スタック・アベレージ・ミキシング処理
3. アナログフィルタ処理
4. オービット描画処理
5. 自動利得制御処理

表-5 プロセッシングディスクユニット
Table 5 Processing Disk Unit

Item		Specifications		Note
Floppy Disk Section	Diskette Size	5.25	Inch	
	Recording Mode	MFM		
	Format Standards	IBM (Double Side Double Density)		
	Recording Capacity	327.68	K Byte/Disk	
	Recording Capacity	12 Files { 12 Bit 12 channel Data 8 Bit 24 channel Data		
	No of Tracks	40	Tracks/Side	
	No of Sectors	16	Sectors/Track	
	Sector Length	256	Bytes/Sector	
Control Section	Interface	GP-IB (IEEE-488), RS-232C OYO-Interface Bus		
	Data Selection	12 Bit 12 channel Data 8 Bit 24 channel Data		
	ID No	3	Digits	
	LCD Display	80	Characters	
General	Power	12V, 3A		
	Size	34×31×33	cm	
	Weight	11	kg	

表-6 信頼性試験結果
Table 6 Durability Test Results

Test Objective	Safe Operating and Storage Conditions		Tested Range of Operation
	Operation	Storage	
Temperature	5~43°C	-10~50°C	-20~55°C
Humidity	20~80%	Below Dew Point	20~80%
Vibration	0.25G	3G (Max)	4G (Max)
Shock	—	5G (Max)	—

4-1 高速フーリエ変換 (FFT) 処理

波形解析を行うに際して、波形に含まれる周波数成分

を知ることや、指定周波数成分領域でフィルタリングすることは、効果的な手段である。一般に、時間領域のデータを周波数領域のデータに変換する場合、フーリエ変

換処置が行われる。しかし、この処理には多量の演算を要するため、高速演算機能をもつ大型装置が用いられていたが、FFT手法により、マイクロコンピュータによって、容易にフーリエ変換が行われるようになった。

今回開発したFFT処理プログラムは、ディスクユニットに内蔵されているマイクロコンピュータの性能を活かした手法を採用し、処理時間の短縮化が計られており、その仕様は下記の通りである。

- FFTアルゴリズム 時間間引き型FFT
- 変換データ長 256, 512, 1024点
- 周波数分解能 測定データレンジに対応
- 処理 周波数パワースペクトラム表示
逆FFTによるフィルター処理

4-1-1 FFTによるフィルタ原理

時間領域データである測定データを、フーリエ変換によって、いったん周波数領域のデータに変換して不要周波数成分を除去し、再び時間領域に戻すことによってフィルタ処理波形を得ることができる。この方法は2度のフーリエ変換を行うために時間がかかるが、雑音の周波数が既知の場合には、きわめて有効な方法である。

この方法は、信号と雑音の周波数特性の違いを利用して両者を分離するものであり、測定データそのものからは除去が困難な、特定周波数成分をもった雑音に対しては、除去が容易にできる。たとえば、電源リップルやドリフト系といったシステムノイズの除去に対しても有効である。

(1) FFTによる演算

一般に、FFTは $N=2^n$ 個の点について実行され（アルゴリズムについては後述する）、 N 個の実数部と虚数部をもつ。 N 個の測定データを実数部に格納し、虚数部をすべて0とする。ここで N 点のFFTを実行すると、実数部には $N/2$ 点を中心として対称なデータが得られ、また同様に、虚数部にも $N/2$ 点を中心として対称なデータが得られる。そこで、この実数部と虚数部に対して、同じように適当なフィルタ関数を乗じる。この場合、データが $N/2$ 点に対して対称なため、フィルタ関数も $N/2$ 点を中心として左右対称に乗ずる。この結果を逆フーリエ変換することによって、測定データに対応した処理データが得られる。（本プログラムでの周波数スペクトラムは、最初の半分のデータに対してのみ表示している。）

(2) フィルタ関数

フィルタ関数としては、任意の形のものを考えることができるが、本プログラムにおいては図-9に示すような関数を用いている。図-9(a)に示す関数を用いると、周波数の設定によって、ドリフト雑音などの低周波雑音

の除去を可能とするバンドパスフィルタとしての機能をもたせることができる。一方、図-9(b)に示す関数を用いると、設定周波数成分を除去するノッチフィルタとして使用できることになる。図-10は一定周波数の雑音成分をFFT処理法によって除去した例である。この図において、(a)は512点の測定データを示し、(b)はFFTを用いてフーリエ変換した結果の実数部の片側を示している。(c)は逆フーリエ変換した結果で、完全に雑音成分が除去されている。この例では、雑音成分がはっきり分離されているため、図に示すような矩形フィルタによって雑音を除去することができる。

本プログラムにおいては、測定データをFFT処理して周波数スペクトラムを求めた後に、CRTディスプレイ上のカーソルを移動し、処理周波数を設定し、バンドパス関数あるいはバンドリジェクト関数を用いて、逆FFT処理を行うようになっている。

4-1-2 FFTアルゴリズム

本プログラムにおけるフーリエ変換は「時間間引き型

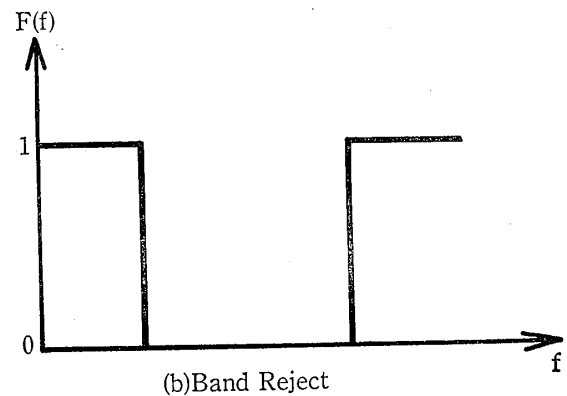
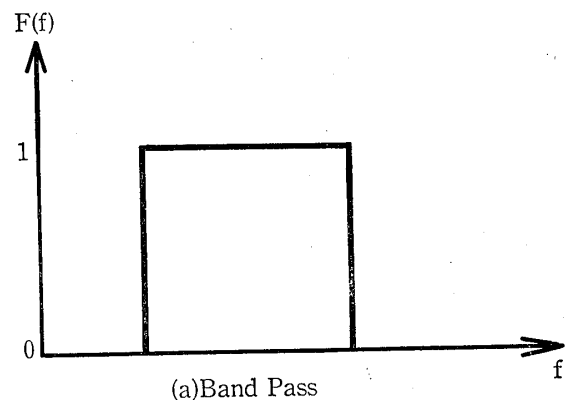


図-9 FFT処理によるフィルタ関数
Fig. 9 Filtering Function used in FFT

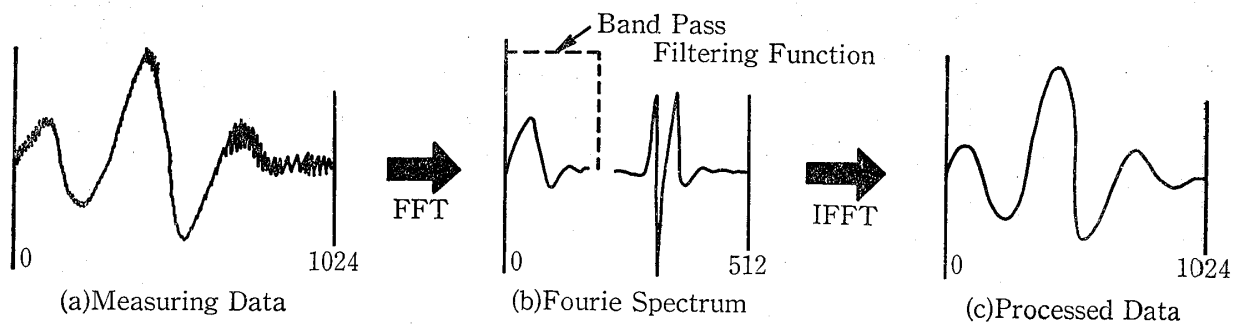


図-10 FFT処理によるノイズの除去
Fig. 10 Noise Elimination by FFT

離散的フーリエ変換」のアルゴリズムを使用している。

(1) 時間間引き型FFT

サンプル値データの数 N が、2の倍数であるとする。このとき、 N 個のデータ $g(n)$ 、($n=0, 1, \dots, n-1$)を偶数番目と奇数番目の数値列に分け、各々を $e(n)$ および $h(n)$ とすると、

$$\begin{aligned} e(n) &= g(2n) \\ h(n) &= g(2n+1) \end{aligned}$$

となる。ここに、 $n=0, 1, 2, \dots, N/2-1$ である。

最初の N 個のデータから構成される $g(n)$ の離散的フーリエ変換(DFT)を G_K とすれば、 G_K は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} G_K &= \sum_{n=0}^{N-1} g(n)W^{nK} \\ &= \sum_{n=0}^{N/2-1} \{e(n)W^{2nK} + h(n)W^{(2n+1)K}\} \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、係数は $1/N$ 省略する。

一方、 $N'=N/2$ 個のデータから構成される $e(n)$ および $h(n)$ のDFTを、それぞれ E_K および H_K とすれば、

$$\left. \begin{aligned} E_K &= \sum_{n=0}^{N'-1} e(n)W'^{nK} \\ H_K &= \sum_{n=0}^{N/2-1} h(n)W'^{nK} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

で表される。そして、 $N'=N/2$ 個のデータに対する回転子 W' と、 N 個のデータに対する回転子 W の関係は、つぎの式によって示される。

$$\begin{aligned} W' &= \exp(-j2\pi/N') \\ &= \exp(-j4\pi/N) \\ &= \exp(-j2\pi/N)^2 \\ &= W^2 \end{aligned}$$

したがって、(2)式を書き代えると、

$$\left. \begin{aligned} E_K &= \sum_{n=0}^{N'-1} e(n)W^{2nK} \\ H_K &= \sum_{n=0}^{N'-1} h(n)W^{2nK} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

と表され、(1)式および(3)式より、

$$\begin{aligned} G_K &= \sum_{n=0}^{N/2-1} \{e(n)W^{2nK} + h(n)W^{2nK}\} \\ &= \begin{cases} E_K + W^K H_K & (0 \leq K \leq N/2-1) \\ E_{K-N/2} + W^K H_{K-N/2} & (N/2 \leq K < N-1) \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

という式が得られる。

(4)式は、 N 個のサンプル値データに対するDFTである G_K が、 N' ($=N/2$)から求められる2つのDFT、 E_K および H_K から求められることを示している。

G_K を直接DFT演算式より求めると、 N^2 回の乗算と加算が必要であるが、それに対して(4)式は、 E_K および H_K を求めるためにそれぞれ $(N/2)^2$ 回の乗算と加算が必要であり、また、 E_K および H_K を組合わせて G_K を求めるために N 回の乗算と加算が必要であることを示している。したがって、(4)式を用いて G_K を求めるときは、 $\{2(N/2)^2 + N\}$ 回の乗算と加算で求められ、 N が大きい場合には、 N 個のDFTで求めるより約半分の計算量ですむ。また、 $N/2$ が2の倍数であるならば、 E_K および H_K のDFTも G_K と同様にして計算量を減らすことができる。一般に、 N が2のべき乗である場合には、FFTの演算量は、 $(N \log_2 N)/2$ 回の乗算と $3N(\log_2 N)/2$ 回の加算が必要となる。

本プログラムで行っている1024点の場合、乗算数のみで比較しても、DFTの $1024 \times 1024 = 1048576$ 点に対して、FFTでは $1024 \times 10/2 = 5120$ 点となり、99%以上の演算時間の短縮化が計られている。

(2) フーリエ逆変換

DFTおよび逆変換(IDFT)は、次式によって与え

られる。

$$\text{DFT} : G_K = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} g(n) W^{nK}$$

$$\text{IDFT} : g(n) = \sum_{k=0}^{N-1} G_K \cdot W^{-nK}$$

上式によって明らかなように、DFT と IDFT との相異は、回転子 W^{nK} が W^{-nK} となっている点と、係数 $1/N$ の有無の 2 点だけであり、その他は同様である。したがって、高速フーリエ逆変換 (IFFT) も FFT と同様なアルゴリズムで高速化が可能である。

(3) 数値の表現

FFT 処理においては、データの演算が何回も繰り返される。そのために単に固定長の整数演算では、途中のオーバーフローは避けられず、精度の低い結果を招くことがある。そこで、本プログラムでは、測定データ (12ビットあるいは 8ビット長) のビット長にかかわらず、「16ビット×2」の複素数で表してある。その実数部と虚数部は、それぞれ図-11に示すように、16ビットで表現される固定小数点の実数であり、負数は 2つ補数で取り扱っている。小数点は MSB の次におき、絶対値を 1 より小さくしている。演算中はデータの最大値を常に監視して、その絶対値が 0.1875~0.375 の範囲になるよう修正し、演算によるオーバーフローを防ぎ、精度を保

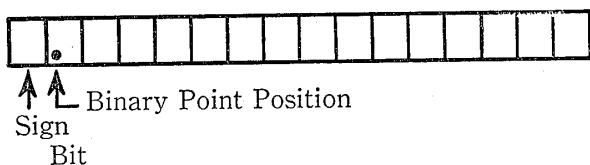


図-11 データフォーマット
Fig. 11 Data Format

持できるようにしている。

4-1-3 FFTプログラム使用例

図-12は、測定データにFFT処理を行い、周波数スペクトラムを表示したものであり、図-13は、周波数スペクトラム上の 2本のカーソルではさまれた 16~50Hz 間でバンドパスを行い、逆FFT処理を行った結果である。いずれの場合も、生データに比べると、フィルタリングされたデータに変化していることがわかる。

4-2 スタック・アベレージ・ミキシング処理

くり返し測定が可能な波形測定において、雑音を低減する方法としては、しばしば、測定データを加算平均する方法が用いられている。地震探査装置では、従来よりシグナルエンハンスメント手法として、スタッキング処理が行われてきた。アナログ方式によるスタッキングの場合、デジタル方式に比べ、同期精度の影響が現れやすい欠点がある。

本プログラムでは、測定と同時に行うリアルタイム処理と、ディスクに記録後行うディスクベース処理の 2通りの方法で、デジタルスタックを行って雑音成分の低減を計っている。いづれもデジタル方式であるために、アンプユニット内で行うアナログ方式と異り、同期精度の影響が少なく、回数が多い場合に効果がある。また、チャンネル間の位相の違いを調べるために、チャンネルデータの重合、反転重合を行うことができる機能を持っている。

4-2-1 原理

同一条件のもとで、くり返し測定された波形の加算を行うと、

$$\sum_{i=1}^N S_i = N \cdot S \quad (N \text{ は回数, } S \text{ は平均信号})$$

FFT-IFFT ANALYSIS

ID-NO 001
RANGE(msec) 500
DELAYx10msec 000
STACK 05
CH-NO 03

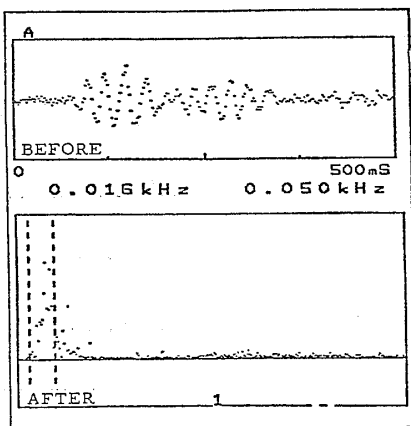


図-12 FFT処理による周波数スペクトラム
Fig. 12 Frequency Spectrum by FFT

FFT-IFFT ANALYSIS

ID-NO 001
RANGE(msec) 500
DELAYx10msec 000
STACK 05
CH-NO 03
H.F 0.050KHz
L.F 0.016KHz
BAND PASS

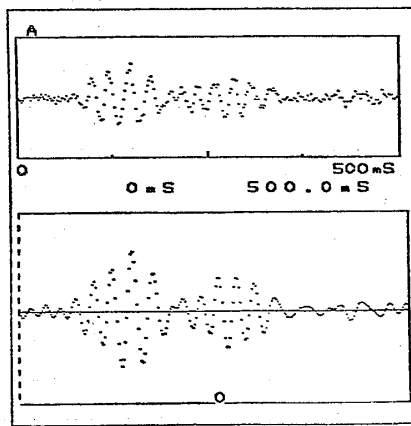


図-13 IFFT処理によるフィルタ処理
Fig. 13 Filtering by IFFT

であり、一方、雑音強度はその分散の平方平均

$$\sqrt{\sum_{i=1}^N n_i^2} = \sqrt{N} \cdot n \quad (n \text{ は平均雑音})$$

で表される。したがって、SN比を求めると、

$$N \cdot S / (\sqrt{N} \cdot n) = \sqrt{N} \cdot S / n$$

となる。すなわち、N回の加算平均化によって、SN比は \sqrt{N} 倍向上することになる(図-14)。

各回の測定で得られたN個の波形は、時間的に離れた

ものであり、各波形間の相関も少なく、ほぼ独立して扱うことができる。したがって、電源ドリフトのような相関のある雑音に対しても低減することができる。

このスタックアベレージ法は、その効果を発揮できる雑音の範囲が広いという利点がある一方、くり返し測定を行うために、同期性が不完全な場合には、信号波形に対する歪が大きくなることがある。したがって、処理結果を評価するに際しては、測定器の同期精度について十分検討しておく必要がある。

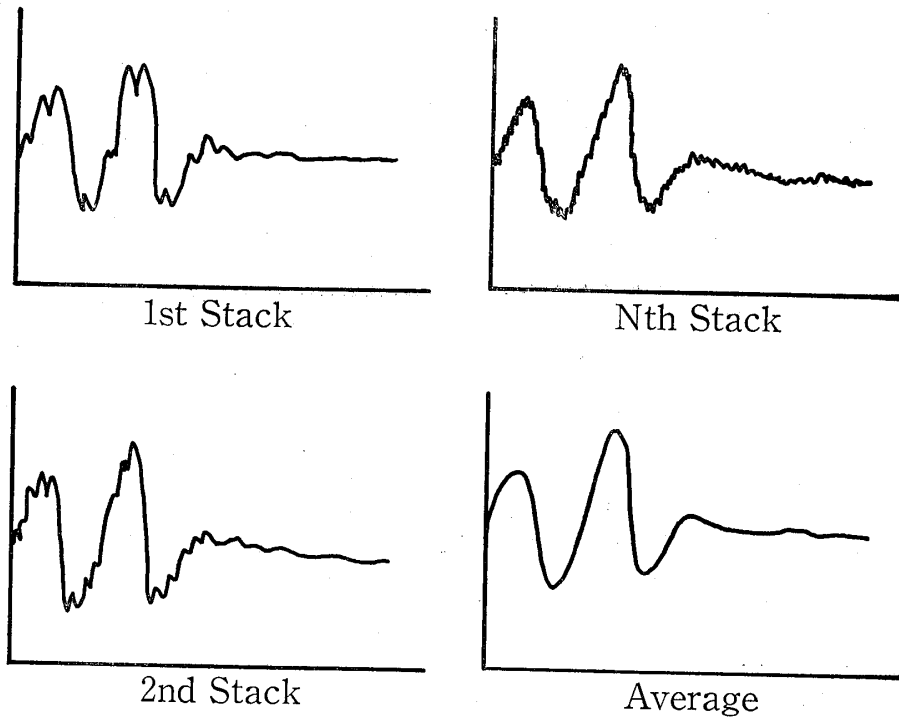


図-14 スタック・アベレージ処理
Fig. 14 Stack-Average Processing

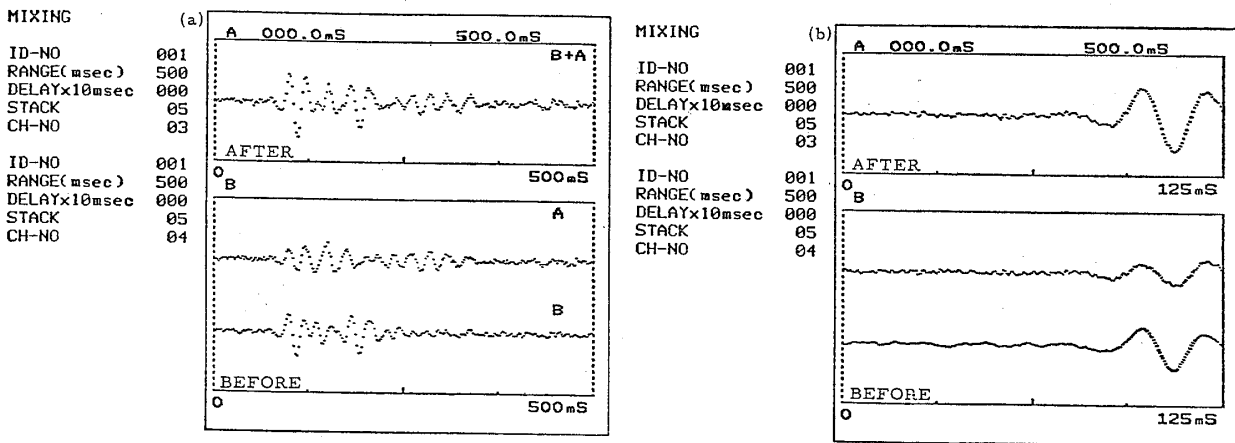


図-15 ミキシング処理
Fig. 15 Mixing

4-2-2 スタック・アベレージ・ミキシングプログラム使用例

図-15は、このプログラムを使用して行った2チャンネルの重合処理結果を示すもので、(a)は測定時間全域を示し、(b)は最初の1/4の時間域を拡大したものである。

4-3 アナログフィルタ処理

アナログフィルタを設計する場合には、位相を特に顧慮することなく、振幅特性を近似することが多い。一方、フィルタを用いる場合、理想的には位相特性が0か直線的であることが望ましい。因果性のフィルタでは、0位相をもたせることは不可能であるが、処理をリアルタイムで行うのでなければ、デジタル処理を応用して位相特性を0にすることができる。

本プログラムでは、プロセッシングディスクユニット内にあるプログラマブルアナログフィルタ回路と、デジタルデータ処理との組合せによって、位相遅れのないフィルタを構成している。

このフィルタの仕様は以下の通りである。

- 処理項目 バンドパスフィルタ処理
- 処理内容 設定時間領域内における波形データのフィルタリング処理
- 周波数設定 H P F : 1 ~ 999 Hz
- L P F 1 : 10 ~ 9990 Hz

4-3-1 原理

ユニット内に取り付けられているバンドパスフィルタ(図-16)には、遅延特性はカットオフ周波数近辺でピークをもっているが、振幅特性は平坦であるバターワース特性回路が採用されている。

フィルタ処理の手順はつぎの通りである(図-17)。

- 1) データメモリ④に貯えられた波形データを測定時の時間レンジでメモリからとり出す。
- 2) とり出されたデジタル波形信号は、D/A変換器によってアナログ化されるため、D/A変換器の出力においては、測定時と同じアナログ波形が得られる。
- 3) アナログ波形は、バンドパスフィルタ(BPF)によってフィルタリングされ、A/D変換器によって再びデジタル化される。
- 4) デジタル波形データは、いったんデータメモリ⑤に貯えられ、つぎに時間軸を反転して(すなわち最後のデータが最初にくるようにして)、データメモリ⑥の内容をデータメモリ④に移す。
- 5) 再度1)→2)→3)を行うことによって、得られたデジタル波形は、原波形と位相差のないフィルタリングされた波形となる。

この処理においては、BPFを2度通過させるため、Qの高いフィルタ処理が行われることになる。一般に、任意の位相特性をもつ因果性フィルタの単位サンプル応

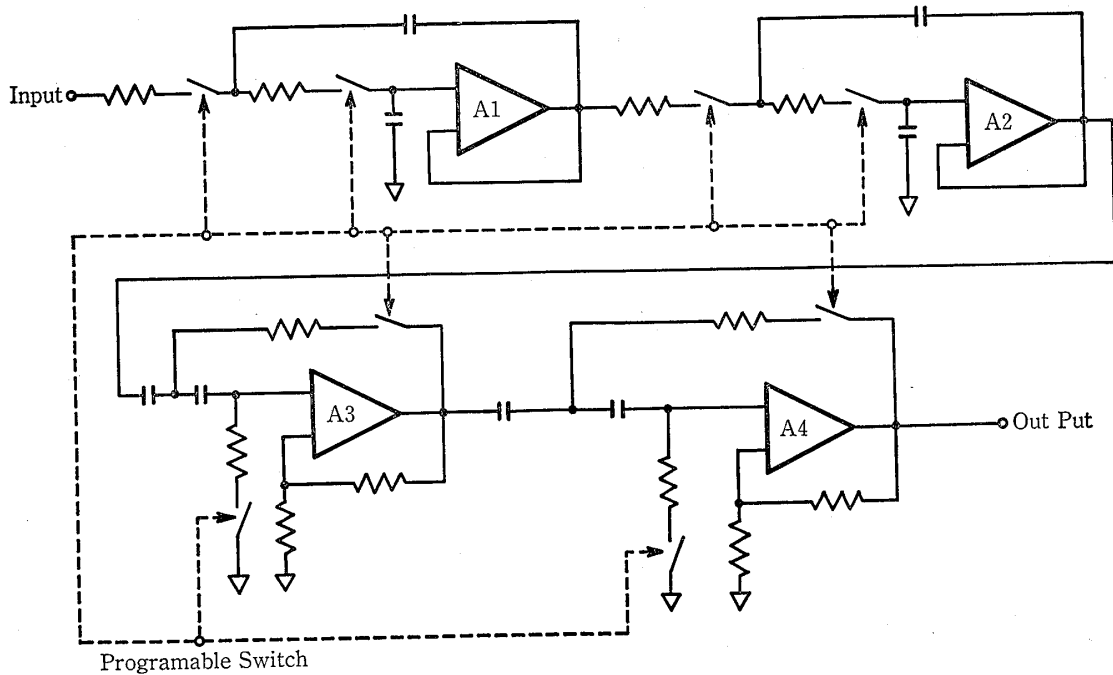


図-16 バンドパスフィルタ回路
Fig. 16 Band Pass Filter Circuit

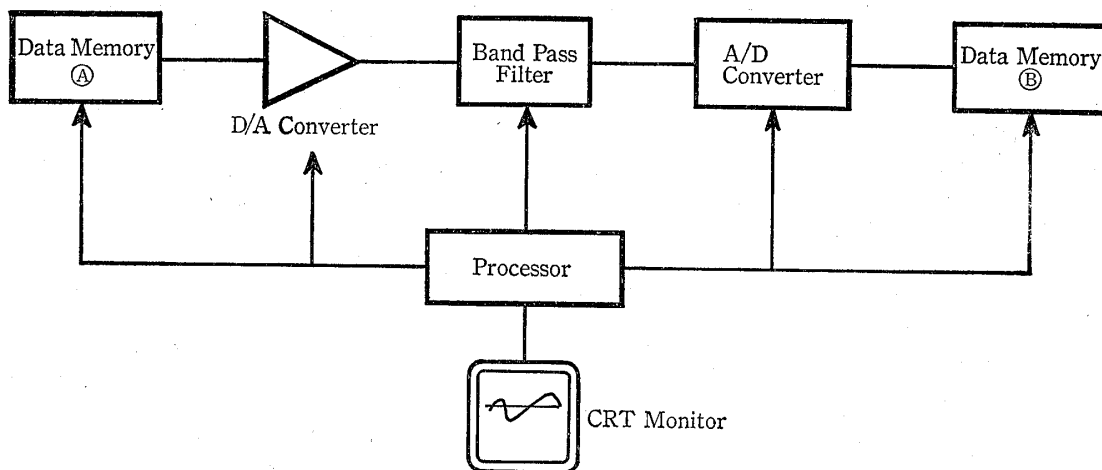


図-17 アナログフィルタ処理ブロックダイアグラム
Fig. 17 Analog Filtering Block Diagram

答を $h(n)$, フィルタ処理されるデータを $x(n)$ とすると,

$$x(n) \rightarrow [h(n)] \rightarrow g(n)$$

$$g(-n) \rightarrow [h(n)] \rightarrow r(n)$$

であり, $s(n)=r(-n)$ とすると, $x(n)$ と $s(n)$ を関係づける単位サンプル応答 $h(n)$ は零位相となる。

本プログラムにおいては, 上記の原理を利用して, まずディスクに記録された有限長のデータをフィルタに順方向に通し, つぎに逆方向に通して, 位相のづれを補償している。

4-3-2 アナログフィルタ処理プログラム使用例

図-18は, アナログフィルタ処理を行った例である。

(a)は原データ全体に処理を行ったもの, (b)は2つのカーソル間のデータにのみフィルタ処理を行ったものであ

る。(b)によれば, フィルタ処理を行った領域と行わない領域の境目に, 時間的なづれが生じていないことがわかる。

4-4 オービット描画処理

2チャンネル波形データの位相特性の関係は, 時間軸に対する2チャンネルデータの振幅軌跡(オービット)を調べることによって知ることができる。

本プログラムでは, 2チャンネルデータをCRT画面上に表示し, 設定時間範囲内の信号軌跡をCRT上に描画することができる。

4-4-1 原理および特徴

図-19(a)に示すように, AチャンネルとBチャンネルの波形を比べると, ①の領域では位相が一致しているが,

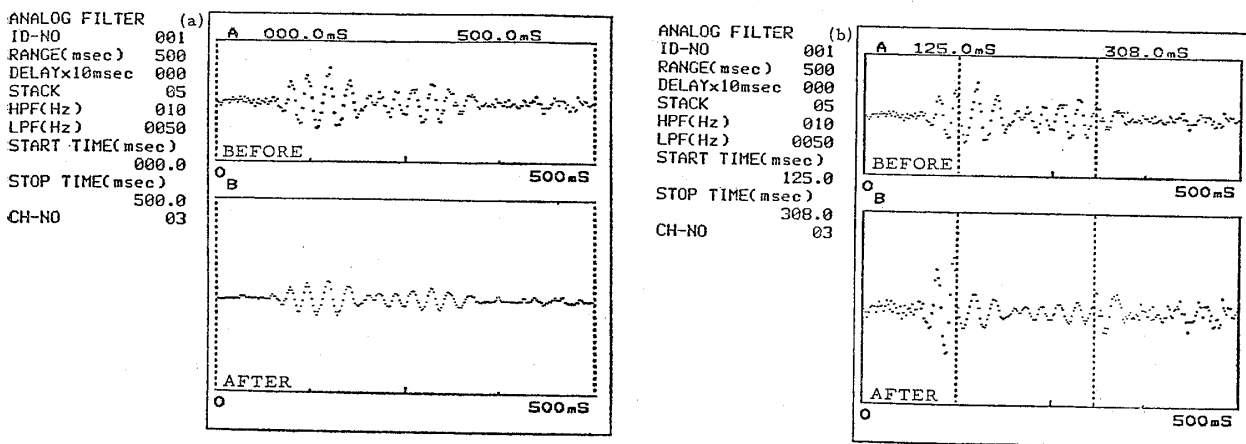


図-18 アナログフィルタ処理
Fig. 18 Analog Filtering

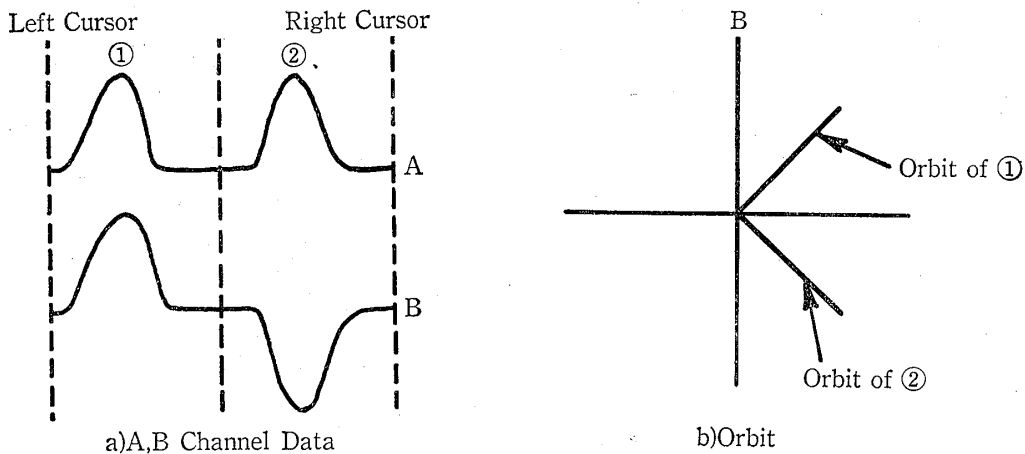


図-19 オービット処理
Fig. 19 Orbit Processing

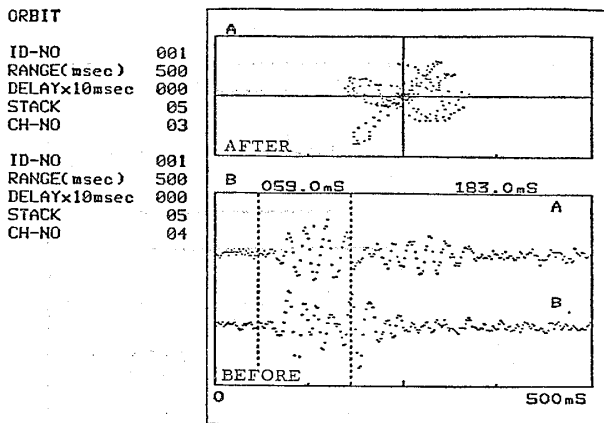


図-20 オービット処理
Fig. 20 Orbit Processing

②の領域では反転している。

このような場合、時間軸を左カーソル位置より右カーソル位置に移動し、両波形のオービットをとると、①の領域では傾きが1の直線になり、②の領域では傾きが-1の直線になる。オービットの描画は、左カーソルを順次移動して行われるため、描画動作をモニタしながら位相関係の移り変りを知ることができる。

4-4-2 オービット描画プログラム使用例

図-20は、オービット処理プログラムを使用した例で、AおよびBの2チャンネルデータの59~183msの領域で処理を行ったものである。この図では、位相が一致している領域から反転に近い領域までのオービットが描かれており、途中で位相づれが生じていることが判る。

4-5 自動利得制御処理

記録された地震データから信号成分をとり出す方法と

しては、フィルタ処理やスタック処理によってSN比を高めることが行われるが、これに反して、反射信号のようにトリガー時点から受信までの時間が長い場合には、最初に受信する信号に比べ、はるかに小さい信号であるために、記録からこのような信号を検出することは困難なことである。自動利得制御処理とは、このような微小な反射信号をとり出すために、時間の経過とともに利得を自動的に増大させる処理のことである。

本プログラムにおいては、4種類の利得特性を選択することによって、遅れて到達する微小な信号を容易に検出できるようになっている。その仕様は下記の通りである。

- 利得特性
 - 直線利得 (リニア)
 - 指数利得 (エクスポネンシャル)
 - 正規化利得 (オートマッチック)
 - 固定利得 (プログラム)
- 処理内容
 - 設定時間領域内における波形データに対し、設定利得特性に従って利得制御を行う。

4-5-1 原理および特徴

CRT画面上の2つのカーソルで示される時間領域内で利得制御を行うもので、その利得特性は下記の通りである。

1) 直線利得特性

図-21に示すように、最初のデータから左カーソル位置 (A点) のデータまでを $1/256$ に減衰させ、A点から直線的に増幅し、右カーソル位置 (B点) で利得が1になるように制御する。

2) 指数利得特性

図-22に示すように、最初のデータからA点のデ

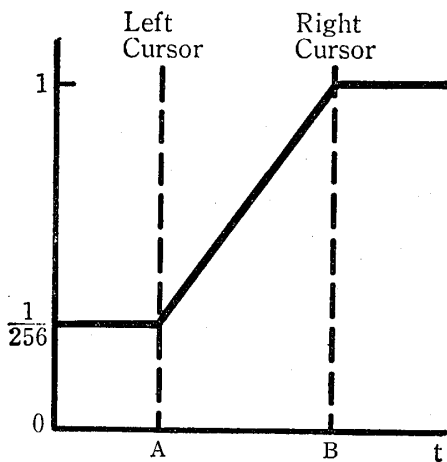


図-21 直線利得特性
Fig. 21 Linear TVG Function

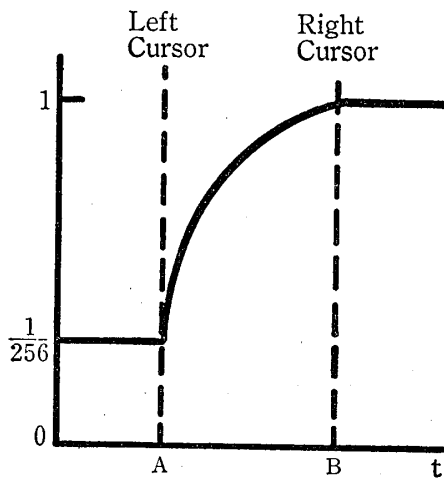


図-22 指数利得特性
Fig. 22 Exponential TVG Function

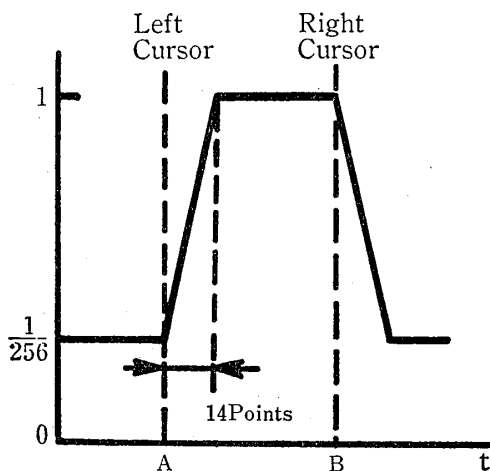


図-23 固定利得特性
Fig. 23 Programed Gain

ータまでを $1/256$ に減衰させ、A点から対数関数的に増幅し、B点で利得が1になるよう制御する。

3) 正規化利得特性

左右のカーソル間のデータから最大値を取り出し、その最大値がデータサイズ(12ビットあるいは8ビット)で表現できる最大値になるように、カーソル間のデータ全体を利得制御する。

4) 固定利得特性

図-23に示すように、最初のデータからA点までのデータを $1/256$ に減衰させ、A点から14ポイントまでを1ポイントごとに $20/256$ づつ直線的に増加させ、その後はB点までを利得1に保ち、B点から14ポイントまでを1ポイントごとに $20/256$ づつ直線的に減少させ、それ以後は $1/256$ の利得となるように制御する。

AIN CONTROL
LINER
ID-NO 001
RANGE(msec) 500
DELAYx10msec 000
STACK 05
CH-NO 03
START TIME(msec) 057.5
STOP TIME(msec) 450.5

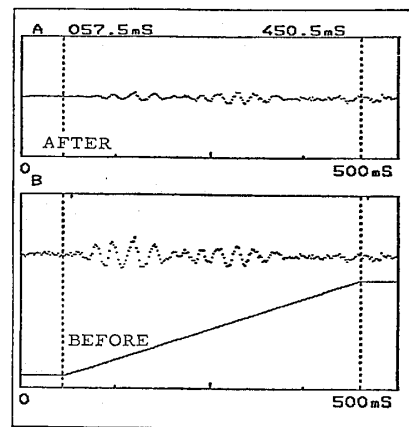


図-24 直線利得特性処理による記録例
Fig. 24 Data with "LINEAR" Gain Control

GAIN CONTROL
EXPONENTIAL
ID-NO 001
RANGE(msec) 500
DELAYx10msec 000
STACK 05
CH-NO 03
START TIME(msec) 000.0
STOP TIME(msec) 500.0

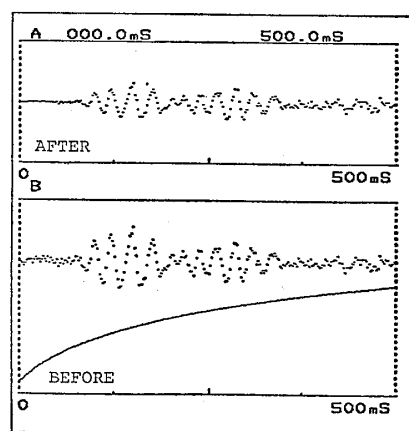


図-25 指数利得特性処理による記録例
Fig. 25 Data with "EXPONENTIAL" Gain Control

4-5-2 自動利得制御プログラム使用例

さきに述べた4種の利得制御プログラムを使用した例を、それぞれ図-24から図-27までに示す。

利得制御を行う場合、測定データの個々のサンプルデータに対して利得を変えているため、設定を誤るとかえって処理効果が落ちることになる。したがって、探査の対象、測定条件に応じて、慎重に特性や時間領域を設定することが必要となる。

5 現場における適用性

現場測定において、得られた記録の信頼性を確認することは重要なことであり、本システムのアプリケーションプログラムの有効性を調べた。

(a) 雑音の除去

図-28は、雑音の多い工事現場に近い鉱山において、雑音成分をとり除く効果を調べるために行った地震探査

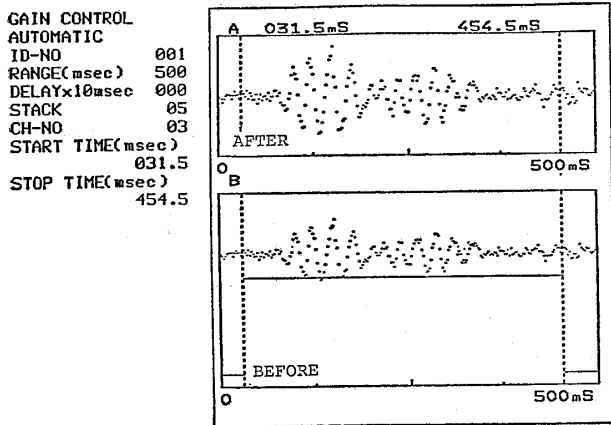


図-26 自動利得制御処理による記録例
Fig. 26 Data with "AUTOMATIC" Gain Control

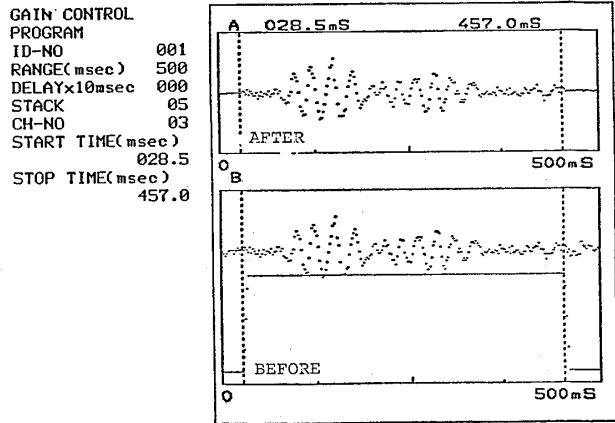


図-27 固定利得制御処理による記録例
Fig. 27 Data with "PROGRAM" Gain Control

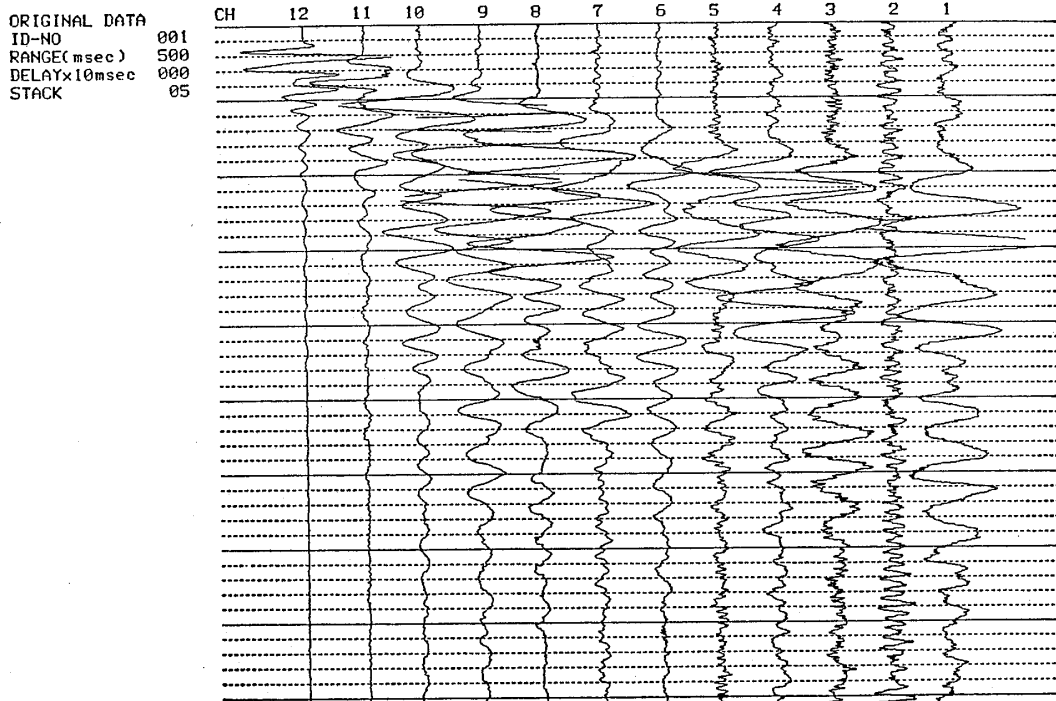


図-28 建設現場における記録例
Fig. 28 Observation Data at Construction Site

の記録である。この記録によれば、第2チャンネルのジオフォーン設置位置が雑音成分を強く受けているために、増幅器のゲインも十分でなく、そのままでは信号の識別が不可能である。

このような場合、他のチャンネル記録からFFT処理によって周波数成分をとり出し、その中から雑音成分を知り、逆FFT処理およびアナログフィルタ処理によ

て、信号成分をとり出すことができる。図-29は、FFT処理プログラムを用いて、第1チャンネルデータから周波数スペクトラムを求めたものである。この周波数スペクトラムによって、雑音成分は100Hz付近に、また信号成分は36Hz付近にピークがあることを知ることができる。

そこで、図-28に示す原記録に対して、アナログフィルタ処理プログラムによって、10~50Hzのバンドパスフィルタ処理を行うと、図-30に示すような記録が得られる。すなわち、第2チャンネルの原データから雑音はとり除かれており、信号成分を確認することができる。

(b) S波位相の反転の確認

図-31および図-32は、板叩き法によるS波測定データで、それぞれ左叩きおよび右叩きのデータである。

これらの記録のうち、第7チャンネルの左叩きおよび右叩きのデータを用いて、波の位相の反転性を確認するために、ミキシング処理およびオービット描画処理の2通りの方法で調べた。

図-33は、ミキシング処理による重合を行ったもので、185~245msの区間で位相の反転が見られる。

図-34は、オービット描画処理による結果である。图中的(a)は185~245msの区間のオービットで、明らかに位相の反転性を示す型となっている。ちなみに、(b)は185

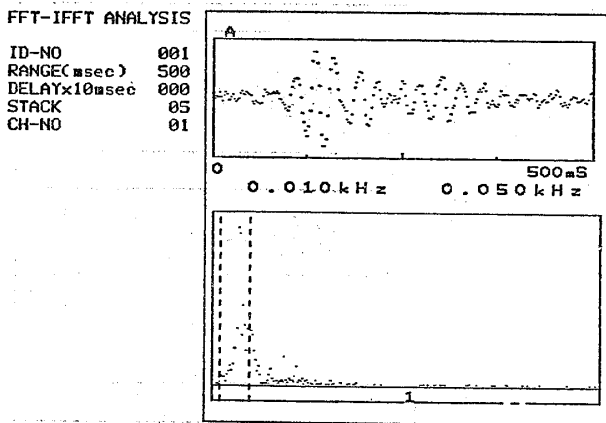


図-29 チャンネル1データの波形と周波数スペクトラム
 Fig. 29 Waveform and Frequency Spectrum in CH-1 Data

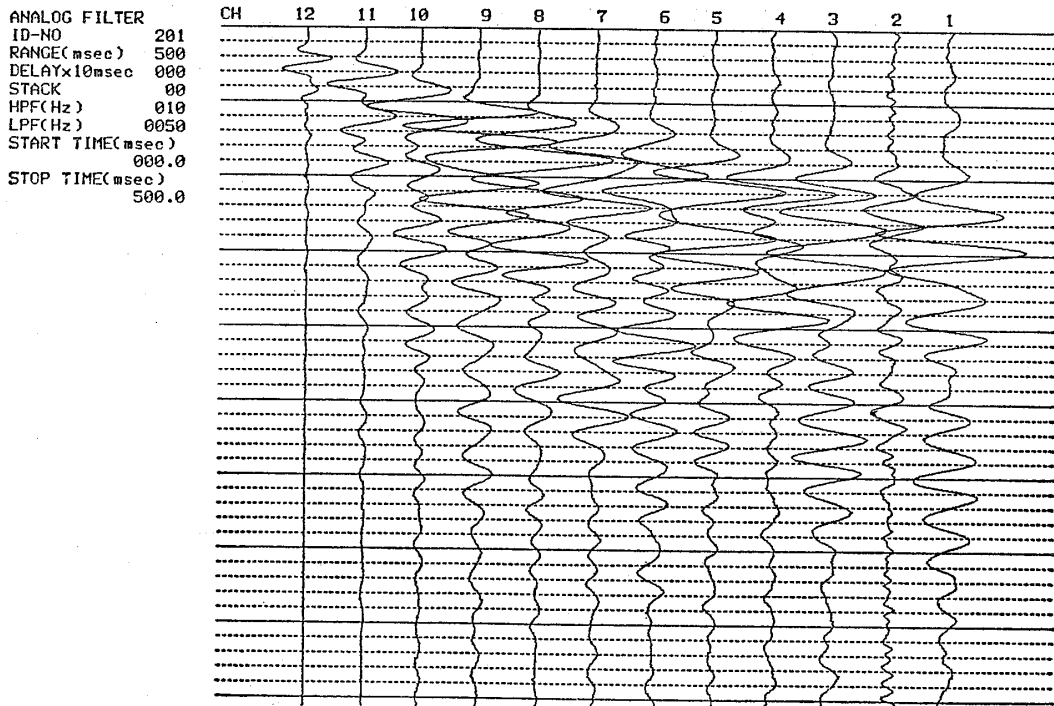


図-30 アナログフィルタ処理後のデータ
 Fig. 30 Data after Analog Filtering

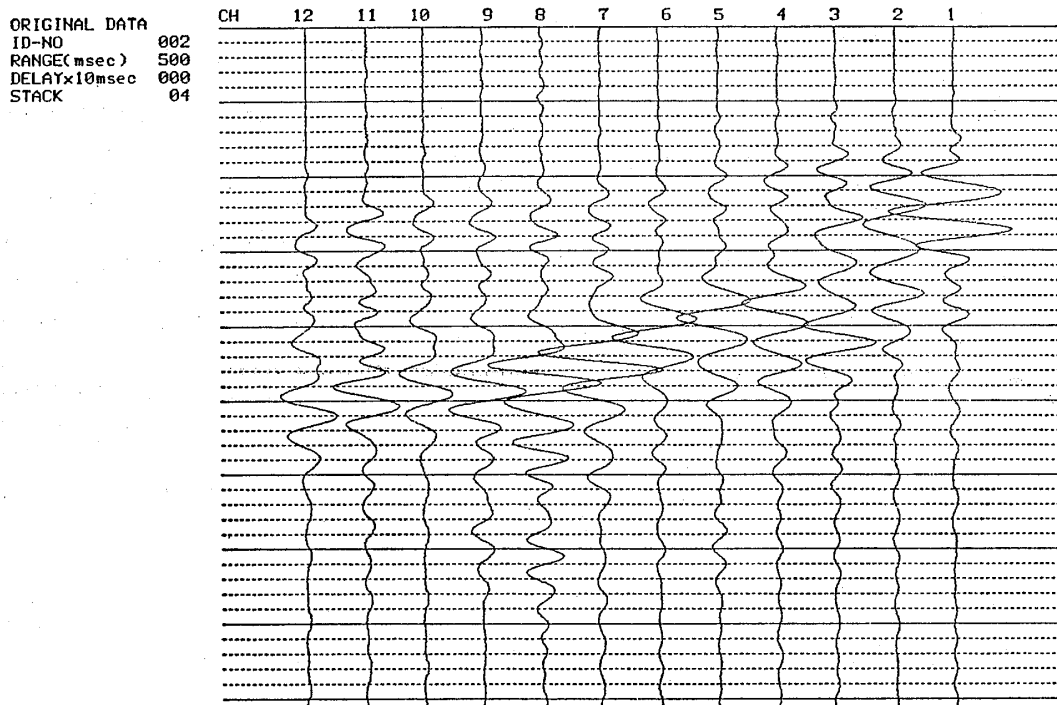


図-31 板叩き法による観測データ (右叩き)
 Fig. 31 Observation Data by Plate Hammering (Right Hand Side)

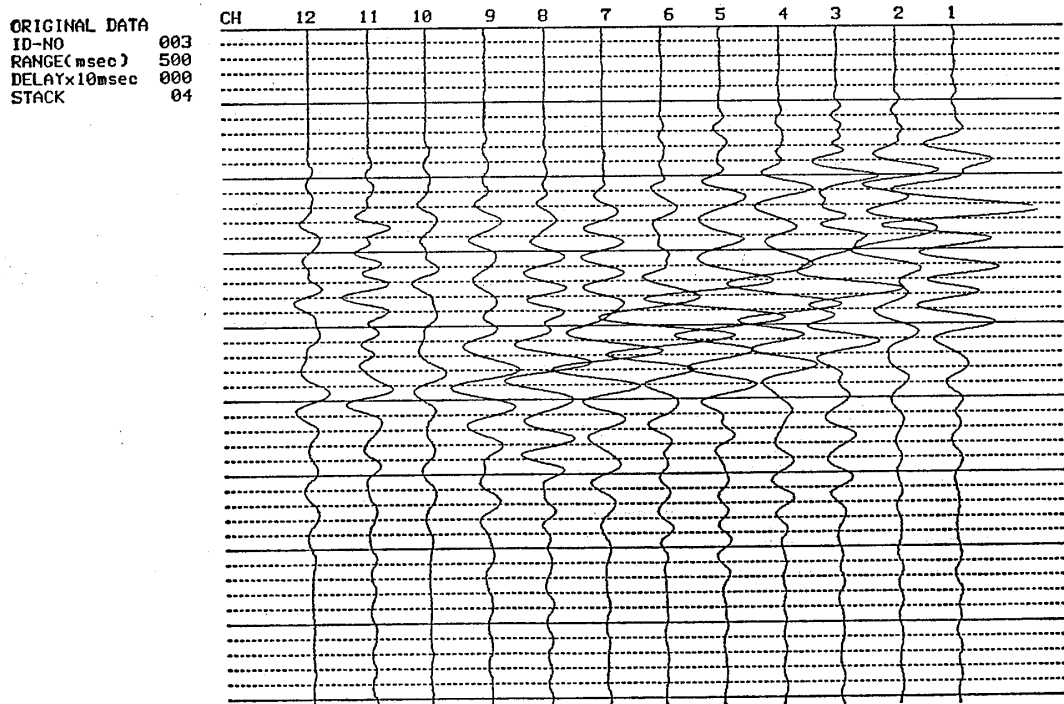


図-32 板叩き法による観測データ (左叩き)
 Fig. 32 Observation Data by Plate Hammering (Left Hand Side)

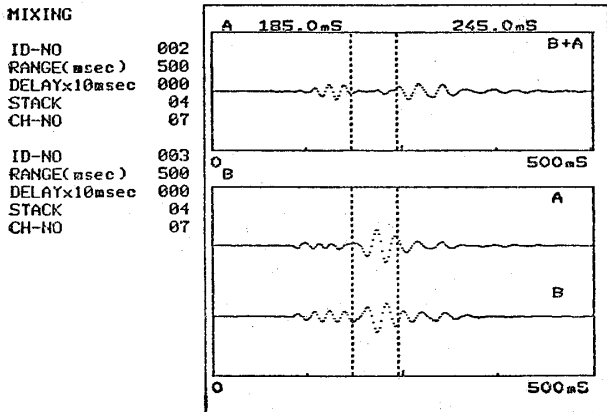


図-33 2つの波形のミキシング処理
Fig. 33 Mixing for Two Waveforms

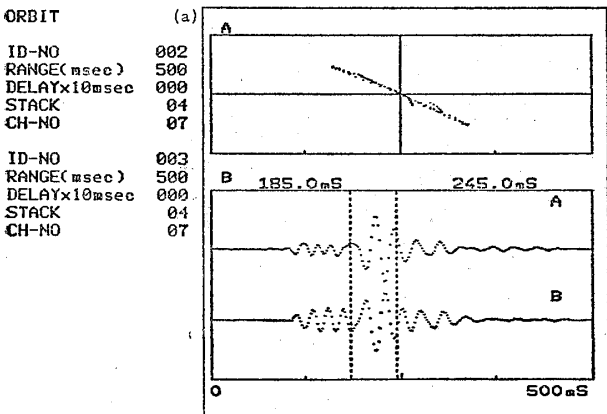
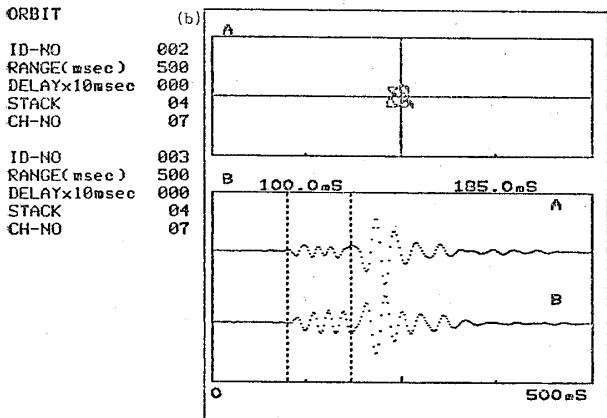


図-34 オービット処理
Fig. 34 Orbit Processing

ms 以前のデータによるオービットで、この区間では位相の反転性は見られない。

6 あとがき

以上に述べたように、地震探査装置にマイクロコンピュータを導入し、各ユニット毎に機能向上を計った。とくに、野外現場ではほとんど実績のないフロッピーディスクの信頼性については、当初不明点が多々あったが、本稿で述べたような各種試験や、これまでの数々の現場実験によって、その信頼性は充分得られたものと確信している。

なお、今回開発したシステムのアプリケーションソフトウェアは、現場におけるデータ収録と雑音除去に重点をおいたものとなったが、データ処理プログラムの増設がディスクベースで可能なため、各種の処理プログラムに対応できる。データの解析処理機能までを含んだソフトウェアを開発し、総合システムとしての機能を充実させることは、今後の課題であると考えている。

参考文献

- A. V. Oppenheim. R. W. Schafer (1980) : デジタル信号処理(上) 伊藤玄(訳) コロナ社
- E. Oran Brigham(1979) : 高速フーリエ変換 宮川洋, 今井秀樹(訳) 科学技術出版社
- CQ出版社(1983) : インターフェース No.69
- 河野雄平, 原 徹夫(1983) : McSeisによる弾性波探査 応用地質 第18巻 第1/2号 pp. 52-62
- 応用地質調査事務所(1982) : McSeis 1500プロセッシング ディスクユニット取扱説明書
- 応用地質調査事務所(1982) : ソフトウェアパッケージ 取扱説明書 PDS 01~05