

地熱地域における微動の到来方向に関する研究

研究課題番号 63550458

平成元年度科学研究費補助金（一般研究C）

研究成果報告書

平成2年3月

研究代表者 齋藤徳美

（岩手大学工学部 助教授）

はしがき

地熱資源は我が国で自給できる数少ないエネルギー源であるが、その利用のためには有望な地熱地域の探査手法の確立が望まれている。

本研究は、昭和62年度科学研究費補助金一般C “微動による地熱貯留層の探査に関する研究”により見いだされた地熱微動の特性を明らかにするため、岩手県葛根田地熱地域および八幡平東部地域において、1点3成分観測・トリパタイト観測を行い微動の到来方向の解析を行ったものである。

本報告書はこれらの成果を取りまとめたものである。

研究組織

研究代表者	齋藤徳美	(岩手大学工学部助教授)
研究分担者	佐藤七郎	(岩手大学工学部教授)

研究経費

昭和63年度	1、600千円
平成元年度	400千円
合計	2、000千円

研究発表

(1) 学会誌等

斎藤徳美・佐藤七郎・石川淳一：パーソナルコンピュータによる
微動解析システム、岩手大学工学部研究報告、第42巻、
pp. 67-81、1989年12月

Saito, T., S. Sato and J. Ishikawa : Seismic Noise Measurements
in the Eastern Part of Hachimantai Geothermal Area,
Northeast Japan, Proceedings of international
Symposium on Geothermal Energy, pp.469-472, 1988.11

(2) 口頭発表

斎藤徳美・佐藤七郎・石川淳一：八幡平東部地域における地熱微
動観測について、物理探査学会第79回学術講演会講演論文
集、pp. 64-68、1988年10月

斎藤徳美・佐藤七郎：粒子軌道法による葛根田地熱地域の微動の
到来方向、日本地熱学会平成元年度学術講演会講演要旨集、
S21、1989年10月

研究成果

目次

1. パーソナルコンピュータによる微動解析システム 5
2. 相関法による葛根田地熱地域の微動の到来方向の解析 . . . 29
3. トリパタイト観測による八幡平東部地域の微動
の到来方向の解析 . . . 48

1. パーソナルコンピュータによる微動解析システム

1-1 はじめに

微動特性の解析は、データレコーダに記録されたアナログデータをAD変換して、パーソナルコンピュータにより行われる。当研究室においては、NEC・PC9800シリーズ3台が解析処理に供されているが、微動解析のソフトは、研究の進展とともに適宜増強されているため、系統的な解析にはしばしば混乱を生じる場合があった。また、測定システムが増えるとともに、地震計・増幅器等の特性が異なるため解析時にはプログラムの変更が必要となる等、正確かつ迅速な解析に適切な系統化されたソフトウェアの構築が必要とされていた。

そこで、到来方向の解析の基礎となる、A/D変換、平均振幅計算、FFT、スペクトル・波形・粒子軌道書き出し、到来方向、自己相関、相互相関、確率密度、その他の解析ソフトを系統化して解析処理の迅速化を図った。

その結果については、既に、「岩手大学工学部研究報告」に発表しているため、その論文を次節に示す。

パーソナルコンピュータによる微動解析システム

(平成元年9月7日受理)

齋藤 徳美*・佐藤 七郎*・石川 淳一**

岩手大学工学部研究報告 Vol. 42 1989 別刷

パーソナルコンピュータによる微動解析システム

(平成元年9月7日受理)

齋藤 徳美*・佐藤 七郎*・石川 淳一**

Analysis System of Microtremors Using Microcomputer

Tokumi SAITO*, Shichiro SATO* and Junichi ISHIKAWA**

Ground vibration characteristics have been investigated for the purpose of seismic zoning and geothermal prospecting in the Laboratory of Underground Prospecting, Department of Resource Development Engineering.

Formerly, characteristics of microtremors were analysed by means of a large computer. With the advance of the microcomputer, analysis can be made in individual laboratories. We developed systematic software for microtremors by means of a microcomputer using the NEC 9800 series.

Software consists of some programs as analog-digital conversion, fast Fourier transform, auto-correlation function, cross-correlation function, particle motion, direction of arrival, digital filter, various drawing figures and others. Consequently, an investigation of microtremors could be made rapidly in a laboratory.

1. はじめに

資源開発工学科地下探査学研究室では、地震時における地盤の振動特性の把握および地下構造の推定を目的とした短周期微動、また地熱貯留層探査を目的とした地熱微動の調査・解析を進めている。

微動は人体に感じられないごく微小な地盤の揺れであり、高感度地震計で地動を電気信号に変換し、増幅器で増幅したうえでデータレコーダに記録する。微動特性の解析は、振幅・スペクトル等の基本的な解析の他、種々の解析が行われるが、いずれもコンピュータによる計算処理が必要である。

当研究室においては、1981年頃までは振動波形のA/D変換データをカードあるいは紙テープに出力し、岩手大学計算機室のHITAC8250で解析処理を行っていた⁽¹⁾。パーソナルコンピュータが研究室で稼働するようになった1982年頃から、NEC・PC

8000シリーズに解析の一部を移行することとした⁽²⁾。その後、パーソナルコンピュータの能力が著しく向上したことから、PC9800シリーズを導入して微動解析ソフトの開発を進めた結果⁽³⁾⁽⁴⁾、基本的な解析プログラムを系統化した解析システムが構成された。

解析機器の進展はなおめざましいものがあり、今後の改良はもちろんのこと、解析手法そのものも新たに開発されつつあり、新たな解析プログラムの拡充が図られねばならないことはいままでもないが、本稿においては、現在稼働している当研究室の基本的な微動解析システムについて報告する。

2. 解析システムの概略

当研究室における微動解析システムの概略を図1に示す。測定は1測点3成分(E-W・N-S・U-D)

* 岩手大学工学部資源開発工学科

Department of Resource Development Engineering Faculty of Engineering, Iwate University, Morioka, 020, Japan

** 東北地方建設局

Tohoku Regional Construction Bureau

微動解析システム 1989.
 岩手大学資源開発工学科地下探査学研究室

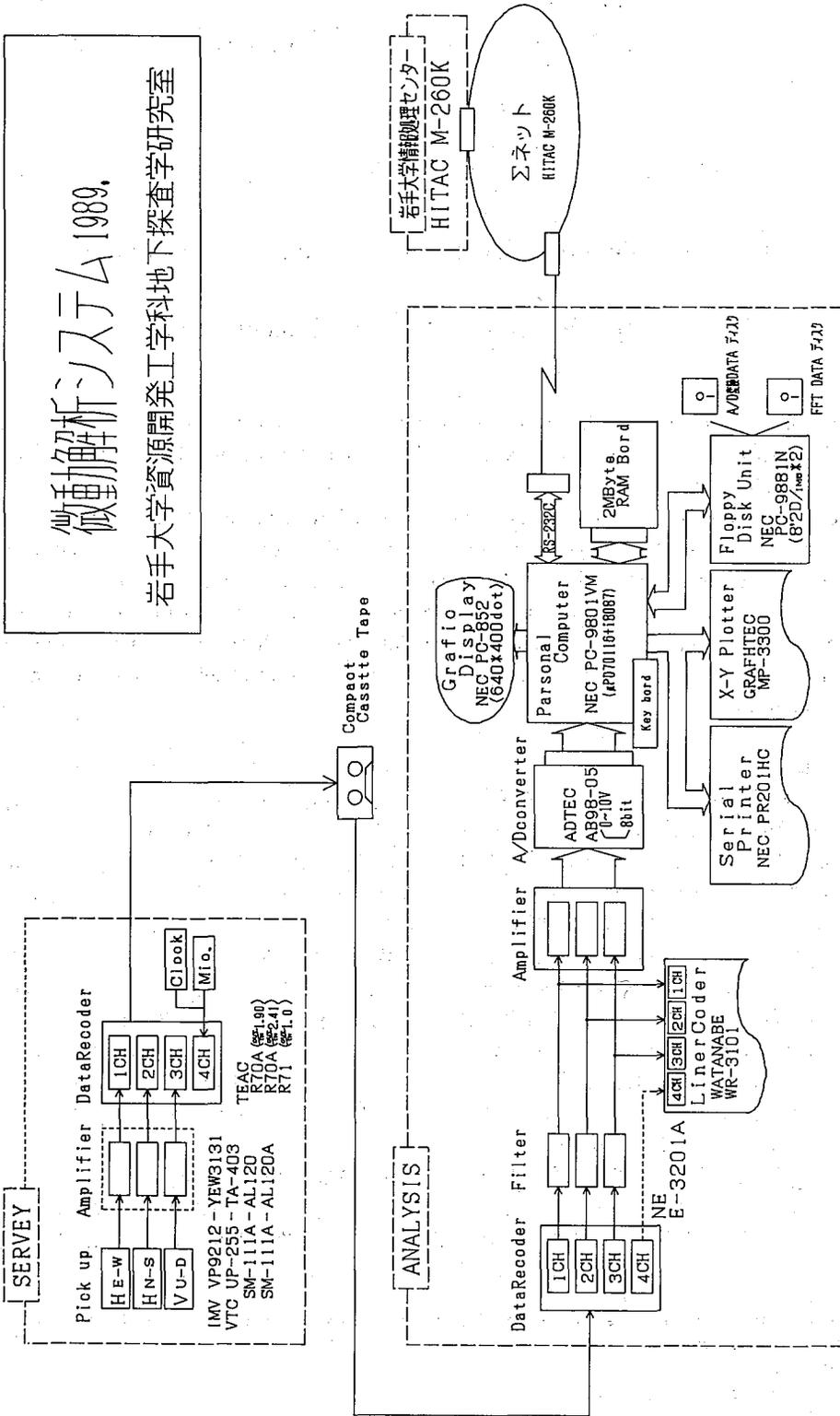


図1 微動解析システムの概要

の地震計で検出された振動をそれぞれ電気信号に変換し、増幅器で約1Vに増幅してデータレコーダでカセットテープに記録する。この記録を研究室でリニアコーダに書き出し解析区間を選定する。選定した区間についてはそれぞれ平均最大振幅を求める。次に、解析目的に合わせナイキスト周波数を考慮してフィルターをかけ、プリアンプで3倍に増幅し、A/DコンバータでA/D変換する。

A/D変換された振幅が小さいと量子化誤差が大きくなるため、場合によってはフィルターとプリアンプの間に更に増幅器を挿入する。A/Dコンバータの入力レンジは0~10Vで0~255の数値に変換される。サンプリング周波数は都市近郊の微動で50Hz、地熱微動では100Hzである。サンプリング数は通常2048個で、このデータは機械語ファイルとしてフロッピーディスクに保存する。このデータをそのままあるいは実振幅に変換して、以降解析を行う。

解析の基本は、得られたデータの周波数成分を知るためにスペクトルを求めることである。その方法として近年多用されているものはFFTとMEMであるが、当研究室では通常はFFT（高速フーリエ変換）を用いている。FFTを行う場合、分解能の向上と不連続接点の影響を受けるためデジタル化された波形に窓関数をかけるが、ここではスペクトルの広がりが大きくなるものの波形を歪ませない方形窓を使用した。FFTされたデータはN88BASICの4バイト単精度実数型の機械語ファイルとしてフロッピーディスクに保存される。

スペクトルはFFT終了と同時にグラフィックディスプレイに表示され、これをプリンターにコピーをとるかスペクトル書き出しプログラムを用いてX-Yプロッターに書き出させる。プロッターに書き出させると同時にその数値はプリンターに打ち出され、更にどの周波数帯の成分が強いかを知るためのフーリエ振幅の総和も計算される。

デジタル化された波形からスペクトルを求める一連のシステムの他、A/D変換データをもとに各種解析がなされ、結果はプリンター及びX-Yプロッターに出力される。

これらの解析に使用される機器は以下の通りである。

- (1) リニアコーダ
グラフテック(株)製・リニアコーダMarkVII・WT-R331(4ch)。
- (2) フィルター

エヌエフ回路設計ブロック(株)製・マルチファンクションディケードフィルター・E3201。通常解析においては、入力は全てDC結合で使用し、更にローパスフィルターとして用いる時にはフェイズリニアで使用する。

- (3) プリアンプ
倍率3倍の自作プリアンプ。

- (4) A/Dコンバータ
ADTEC(株)製・A/DコンバータAB98-05を、入力範囲0~10V・量子化量8ビット(ダイナミックレンジ46db)に設定し、パーソナルコンピュータPC-9801VMOに内蔵。

- (5) パーソナルコンピュータ
日本電気(株)製・PC-9801VMO・VX21・RX2。浮動小数点数値演算コプロセッサ8087がVMO、80287がVX21に内蔵され、演算精度と速度の向上が図られている。また、I/Oデータ方式2MバイトRAMボードが全機種に内蔵されている。

フロッピーディスクユニットは、VMOに日本電気(株)製・PC-9881N(8インチ2D×2)、VX21にはPC-9881K(8インチ2D×2)が接続され、5インチ2HD×2がVX21およびRX2に内蔵されている。ディスクの容量はそれぞれ1Mバイトである。

- (6) シリアルプリンター・ディスプレイ
シリアルプリンターは日本電気(株)製・PR-201HCおよびEPSON(株)製・VP-1000ESC/Pである。ディスプレイは640(H)×400(V)ドットの解像度をもつ日本電気(株)製・アナログカラーディスプレイPC-KD852および854である。

- (7) X-Yプロッター
グラフテック(株)製・MP2000および3300で最小ステップ0.1mmとして使用する。

なお、1測点3成分観測の他、微動の到来方法等のさらに精度良い解析等の為、3~9台の地震計を数10m間隔で展開する観測も行われる。これらの解析(FK法・トリパタイト解析等)は計算量が膨大なため、岩手大学情報処理センターのHITAC-M26-0K、東北大学大型計算センターのACOS-2000等を使用する必要がある。TSSを利用して解析システムの拡張が図られつつある。しかし、波の基本的性質の解析はパーソナルコンピュータによる本解析システムで充分対応が可能である。

3. 解析プログラム

微動解析の一連のA/D変換, 平均振幅計算, FFT, スペクトル・波形・粒子軌道書き出し, 到来方向その他のプログラムについて述べる。これら一連のプログラムは, 2048個8ビットA/D変換データと1024個4バイトのFFTデータの機械語ファイルの2種類のもののみに対応している。

使用した言語はプログラムの生産性, 保守性, ハードの操作性, 容量等の面からBASICを使用した。A/Dコンバータ等のハードのコントロール, FFT等演算時間が多大に要するものは機械語を使用している。プログラムの操作性を向上させるため, プログラムは全て対話型とし, ファイル名の入力の一部を除いてディスク内のファイル名を一覧表示させ選択出来るようにした。また, プログラムを途中で中断させないためにエラーを極力マスクした。作成したプログラムは図2および図3に示すように2枚のフロッピーディスクにまとめられている。実線で囲まれた項目はメニューの項目で, 破線で囲まれた項目は選択されたメニューに対応するプログラム名である。DISK1は主に計算プログラムで構成され, DISK2には主にDISK1で計算された結果をX-Yプロッターに書き出させるプログラムで構成されている。

当研究室では図4に示すように4種類の地震計・アンプのセットと3種類のデータレコーダを使用している。通常は組み合わせを4システムに固定しているが, 機材の運用によってはさらに多数の組み合わせが生じ, 感度・増幅倍率・出力比等が異なるため, 振幅計算式も多数必要となる。従来, プログラム内でA/D変換データから実振幅値に変換する際には, 手計算で換算した値を入力するかプログラムをその設定毎に変更する等の対応をしていた。しかし, それでは実質同様のプログラムが多数存在し, また, 解析手法の多様化に伴い同一データを何度も多数のプログラムで使用するために, 計算の度にデータごとに設定を行うことは, プログラムの複雑さおよび操作の複雑さとそれに伴うエラーの増大が懸念される。

そこで, 今回のプログラムでは作成されたデータにデータとして最低限必要な項目の値を付加するようにした。即ち, A/D変換データにはインターバルタイムと実振幅換算するのに必要な総合倍率を, FFTデータにはインターバルタイムをデータの最後に付加した。どちらも機械語ファイルとしてディス

クに保存する為, 付加データのフォーマットを設定しなければならないが, 図5に示すように内部演算精度と共通で数値変換が容易なN88BASIC(86)の4バイト単精度実数型のフォーマットで付加した。このデータを付加するのはA/D変換時である。解析目的によってインターバルタイムを変更する必要はなく, また, 測定中に観測機材を変更することは稀であるので, 一度測定システムを設定すれば後は測定時のアンプのゲインのみに留意してA/D変換すればよく, 操作者の負担とエラーが軽減される。以降の解析に際しては, 自動的にこれらの値を参照することにより操作の簡略化, エラーの減少, 解析時間の短縮, プログラムの簡略化等が計られる。また, 測定機材の増備, 設定変更等が生じた場合でもA/D変換プログラムの設定の変更で対処ができる。

以下に主要なプログラムの内容について述べる。

(1) A/D変換プログラム

A/Dコンバータボードにはタイマーが内蔵されていないため, サンプリングする際のタイミングはパーソナルコンピュータに内蔵されているプログラマブルカウンタ/タイマーLSIを使用している。このタイマーをコントロールする場合にBIOS(Basic Input Output System)を使用した。これを使用すると機種と設定クロックに関係無く10msec以上のインターバルタイムについては容易に設定でき, また機械語ルーチンの暴走を防ぐ事が出来る。しかし, 解析においては10msec以下のインターバルタイムを必要とする場合もあるので, インターバルタイムが10msec以上に対応するものとしなないものの2種を作成した。BIOSを使用しないA/D変換プログラムではI/Oを高速サンプリングに対応させるため割込みをかけていないので, PC9801VMのみで正確に作動し, サンプリング中にSTOPキーを押した場合暴走するので操作に注意が必要である。

A/D変換プログラムのフローチャートを図6に示す。プログラムは大別してサンプリング, ディスプレイ・データ保存, ゲインの設定, 測定システム・インターバルタイムの設定, データの読み込み部からなり, それぞれをメニューで選択する。プログラム内で地震計・アンプの感度, 増幅方式, データレコーダの出力比がそれぞれ設定されており, 選択状態に応じて図4に示した計算法で換算倍率を計算する。測定機材の設定の変更あるいは機材の増備に際しては, プログラム自体の設定変更も容易である

微動解析プログラムメニュー構造

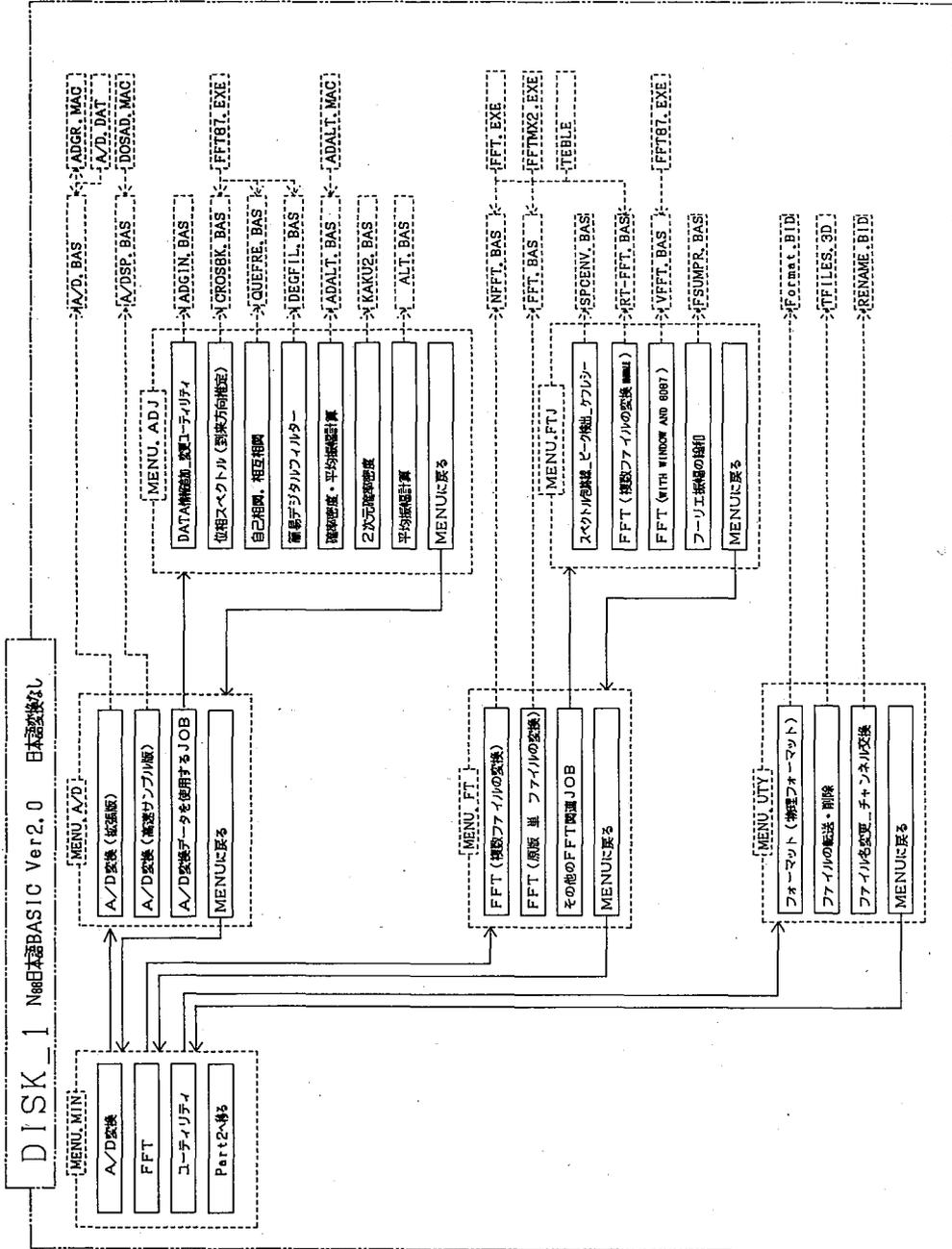


図2 微動解析プログラムメニュー構造 (DISK-1)

微動解析プログラムメニュー構造

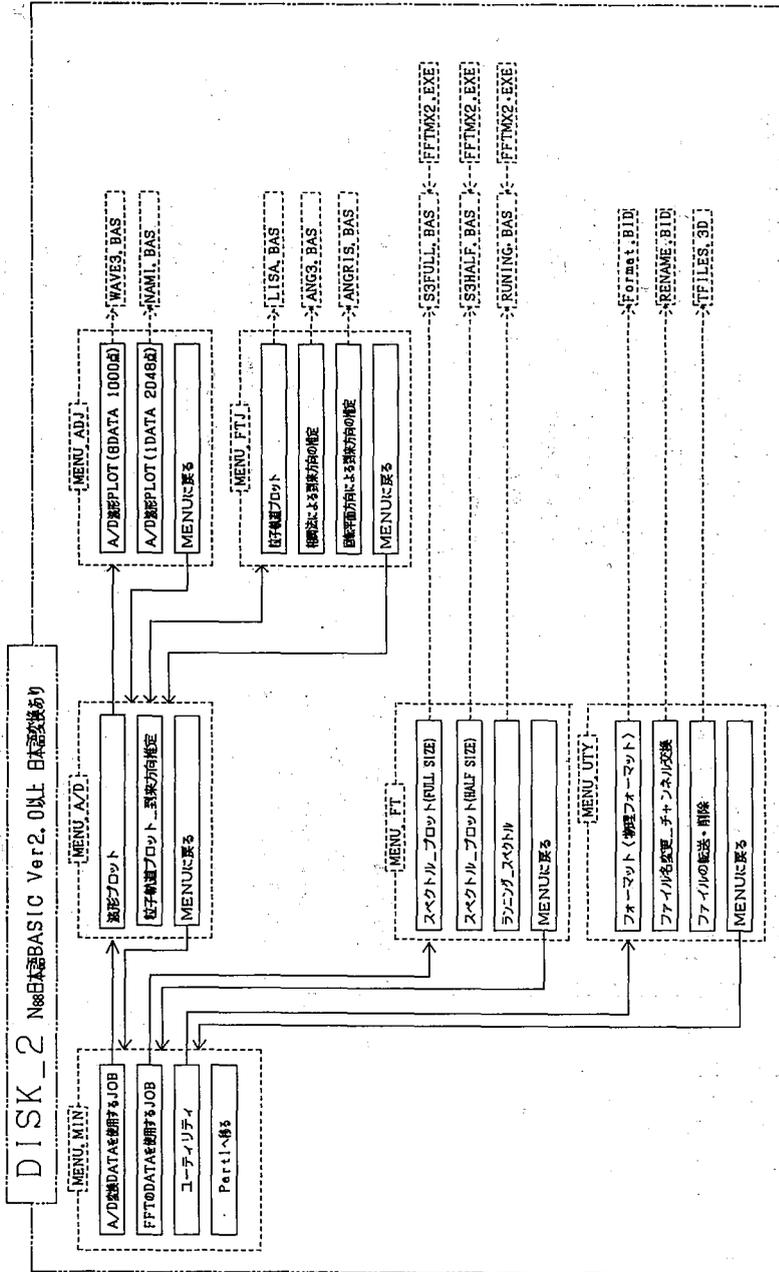


図3 微動解析プログラムメニュー構造 (DISK-2)

A/D変換プログラムフローチャート

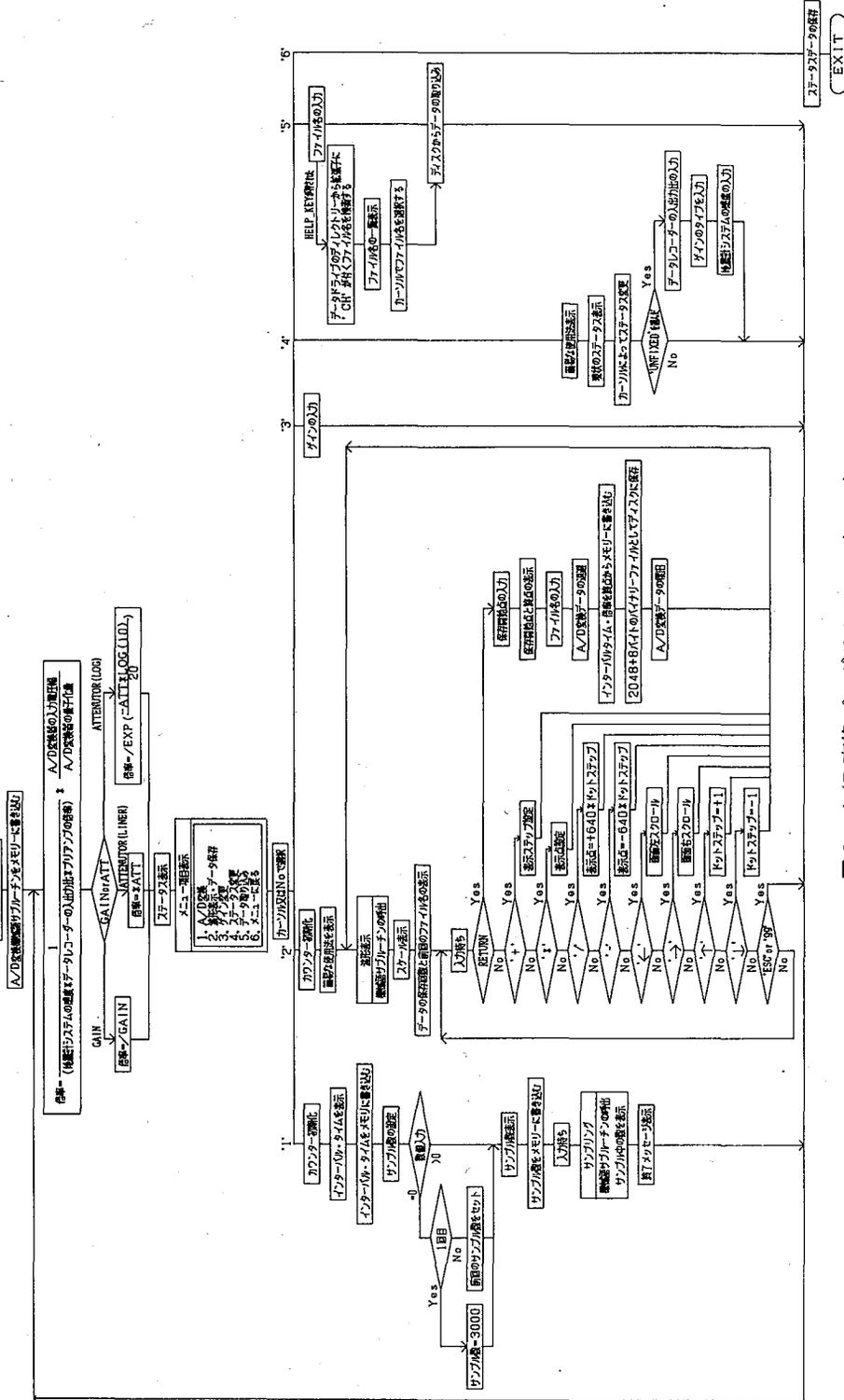


図6 A/D変換プログラムフローチャート

が、地震計・アンプ、データレコーダそれぞれ1種類に限りプログラム自体を変更しなくても自由設定が可能である。このような設定状況等は全てプログラムの終了時にA/D.DATというファイルに保存される。これを自動的に参照し、以後前回の終了時の設定と同じ状態で起動することにより、操作の簡略化を図っている。作成されるファイルは、ファイル名には拡張子に'CH'+チャンネル番号がついたデータ数+8バイトの機械語ファイルである。

従来、A/D変換をする際にはデジタル化された波形をチェック出来ず、スペクトルを書き出すまでデータの質の良否を判別出来なかった。そのため、何度も区間を変更してA/D変換するという労力と時間を要していた。このプログラムに於いては最大65524個のデジタル化された波形を3チャンネル同時にディスプレイに表示し、任意に保存区間を選択出来る。更に、緻密な選定と大量データ全体の確認が出来るように、表示した波形の拡大・縮小が可能である。サンプリングを中断しても、その時までのデータとサンプリング数を保持してメニューに戻るため、従来のリニアコーダに書き出させて解析区間を選定する作業を省略する事も可能であり、初期解析時間が短縮出来る。波形を表示するのにBASICでは1画面数10秒要するため、このルーチンは機械語で作成した。そのため、表示データ量にも依るが1画面の描画は数秒でなされる。通常保存するデータ数は2048個であるが、必要に応じてデータ数はプログラム作動中に設定変更が可能である。

(2) 平均最大振幅計算プログラム

従来、平均最大振幅は、リニアコーダに書き出されたノイズの少ないと思われる1分間の記録を3秒間隔で20箇所分割し、各ブロックにおける最大振幅を読み取り算術平均を行い、測定時の総合倍率から実振幅値を計算し求めていた。このプログラムでは通常デジタル化された2048個の波形データを100個ごとに20ブロックに分割し、その中で選択したブロック毎の最大振幅を検索し平均化した値を平均最大振幅としている。なお、低周波等が卓越したデータの場合には、計算された値は小さく見積もられる傾向がある。この場合、ブロック長を大きくとることが必要となるため、分割ブロック長は変更出来るようになっていた。

(3) FFTプログラム

複数のファイルを一括してFFTするプログラムのフローチャートを図7および8に示す。従来のプ

ログラムでは計算させるファイル名やゲイン等の入力ミスで計算途中で停止したり誤った結果を得ることがしばしばあった。このプログラムではディスク内の拡張子に'CH'のついたファイル名を検索、ディスプレイに表示しカーソルで選択する。また、実振幅の変換倍率はデータに付加された値から読み取っているため、確実な計算がなされ解析時間が短縮されるようになった。

計算されたフーリエ振幅データとパワースペクトルデータは4チャンネルのN88BASIC(86)フォーマットで、チャンネルあたり8196バイトの機械語ファイルとして、データあたり6ファイルがフロッピーディスクに保存される。1枚のフロッピーディスクにA/D変換データは50データ(150ファイル)が保存されており、このデータを全てFFTする場合フロッピーディスク2枚のファイルが作成される。大量のデータを一度にFFTするため、全A/D変換データを最初にRAMボードに読み込み、そのデータをFFTし、2枚のフロッピーディスクを自動的に切替えながらデータを保存する。

また、1データをFFTする毎に結果をディスプレイに表示しハードコピーを取り、さらに計算結果をプリンターに打ち出すことも可能であるので、この機能を利用することにより迅速に測定結果の確認ができ、以降の測定をより効率的に進めることが可能になる。

1チャンネル分のデータをBASICでFFTを行うと数10分の時間を要するため、このプログラムでは機械語ルーチンを使用して変換速度を向上させている。機械語ルーチン自体は数秒で処理を終了するが、振幅計算にBASICを使用しているため、3チャンネル分を処理するのに1分30秒余りの時間を要する。振幅計算ルーチンを機械語で置き換えると30秒以下で終了するが、プログラムの保守性が悪化するため使用していない。

データによっては2048個以外のデータ個数のもの、分解能を向上させるために窓関数を必要とするもの等条件を変えてFFTをさせるために、別に単一ファイル用のFFTプログラムを作成した。このプログラムの機械語ルーチンは、先の複数ファイルを一括してFFTするものとは別に浮動小数点演算コプロセッサを使用して演算精度の向上と高速化を図ったもので、容易に窓関数が使用でき逆FFTも可能である。このため、汎用性があるもののコプロセッサが追加された機種以外では作動しない。複数

FFTプログラム フローチャート

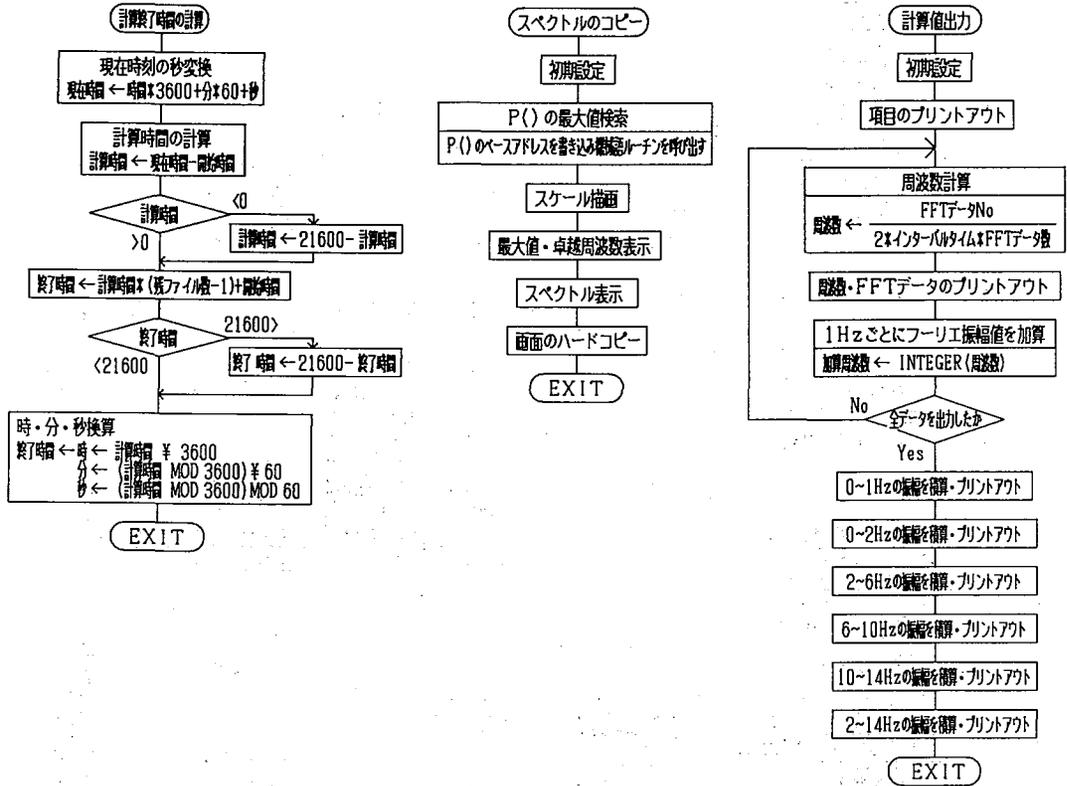


図8 FFTプログラムフローチャート

データのFFTプログラムはコプロセッサの有無に関係なく作動するが、I/Oデータ方式のRAMボードが実装されていない場合プログラムを一部書き換えなければならない。

(4) 作図プログラム

①A/D波形書き出しプログラム

A/D変換されたデータを波形としてX-Yプロッターに書き出させるもので、1000個のデータを複数ファイル同時に1枚の紙に書き出すプログラムと、1ファイルの全データのみを書き出すプログラムの2種類がある。書き出すデータはチャンネル毎に最大振幅で基準化したものである。

②スペクトル書き出しプログラム

従来書き出されていたスペクトルは、縦軸が最大値で基準化し横軸が解析最大周波数のもののみであった。しかし、近年解析方法は多様化しており、図9に例示するように縦軸のスケールを任意に設定

出来るもの、横軸の周波数帯を任意に設定出来るもの、スペクトルウィンドウの回数を任意に設定出来るもの、片対数表示、ランニングスペクトル等多数のスペクトル書き出しプログラムが作成された。

通常使用されるスペクトル書き出しプログラムのフローチャートを図10に示す。このプログラムはグラフィック(株)のX-YプロッターにFFTプログラムで計算されたスペクトルを書き出すと同時にプリンターに振幅データを打ち出し、さらに周波数帯ごとのフーリエ振幅の総和を求めるものである。書き出されるスペクトルはチャンネル毎に最大値で基準化したものの他に、最大値を任意に設定したものの書き出しが可能である。また、スペクトルウィンドウは通常6回かけたものを書き出すが、この回数も0回から9回まで設定できる。書き出させる項目には漢字表示が可能である。算出されるフーリエ振幅の総和のバンドは0~2, 2~6, 6~10, 10~14,

スペクトル書き出しプログラムフローチャート

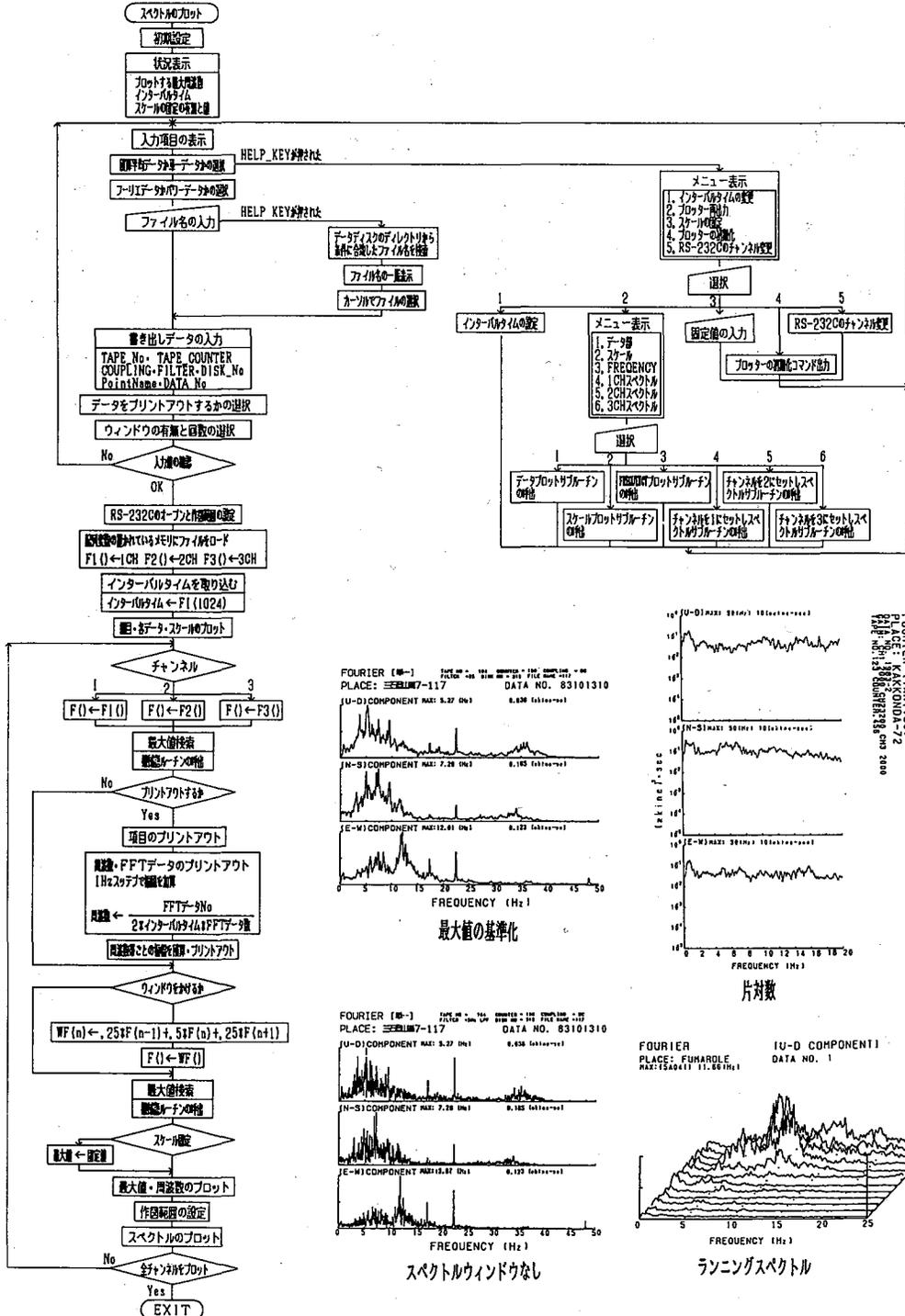


図10 スペクトル書き出しプログラム
フローチャート

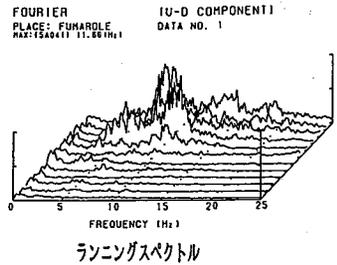
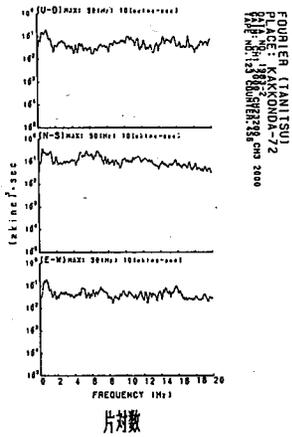
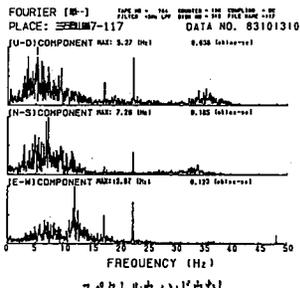
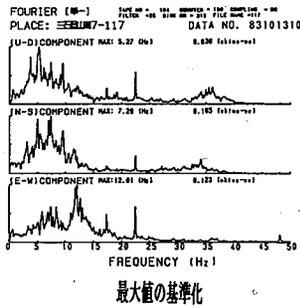
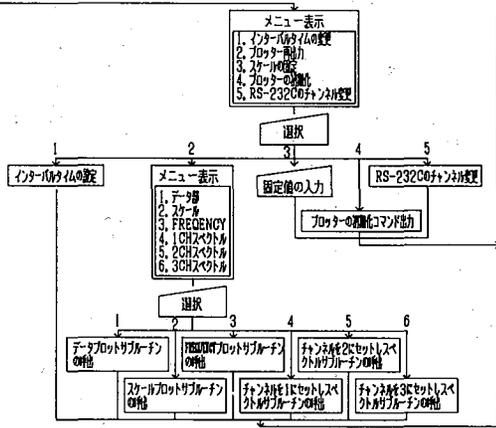


図9 スペクトル表示例

14~25, 2~14Hz についてのみであるが, これ以外のバンドについて必要な場合は, 別に作成したプログラムで対応している。

(5) 粒子軌道法および相関法により到来方向推定プログラム

微動の到来方向は, 多数の地振計を群設置するアレイ観測等によって検討されるが, 地形等の制約がある場合には, 1 地点で上下動成分・水平動 2 成分の同時 3 成分観測を行い, 粒子軌道から到来方向を推定することが行われる。これらのプログラムは図 11 に解析のフローチャート, 図 12 にプログラムのフ

ローチャートを示すように, FFTにより解析の対象とする周波数を決定した上でバンドパスフィルターをかけてA/D変換を行い, EW-UD・NS-UD・EW-NSそれぞれの粒子軌道を描かせる。通常は対象とする周波数帯が3~12Hzであるので0.25秒毎に80組の粒子軌道を描き出しているが, これらの値は変更できる。粒子軌道からは到来する象限しか定まらないため, 3成分間の相互相関を計算し到来角度を求めるのが Darbyshire の方法⁽⁶⁾である。

1点3成分観測における解析フローチャート

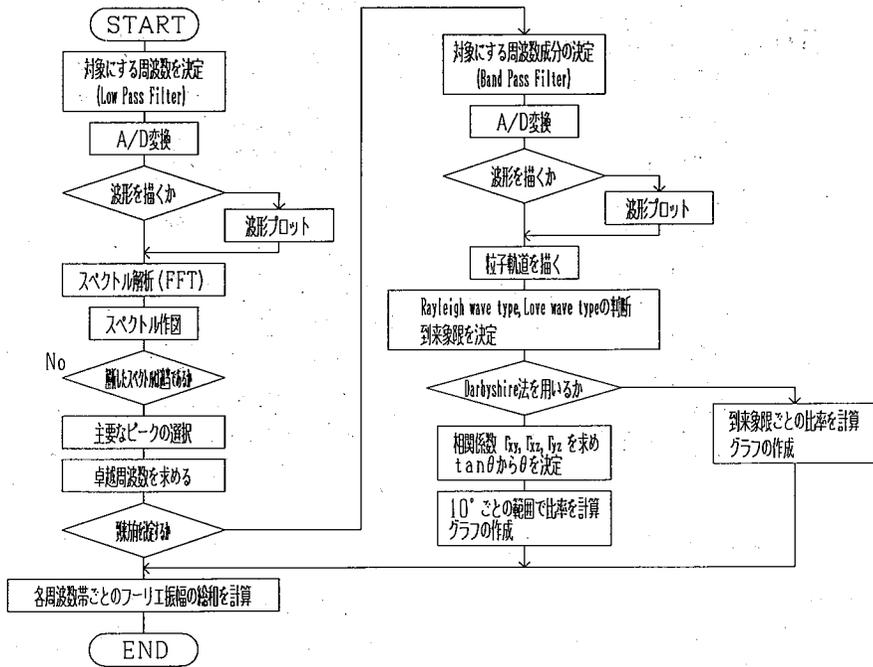


図 11 1 点 3 成分観測における到来方向解析フローチャート

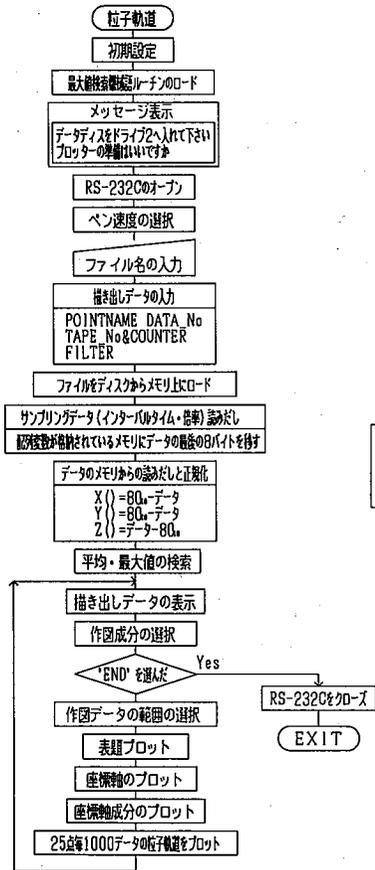
(6) その他の関連プログラム

①自己相関プログラム

パワースペクトルの逆フーリエ変換は Winer-Khintchine の関係より自己相関関数として定義される。このプログラムはフーリエ変換を経由して自己相関を求めるもので, 計算を大幅に短縮出来る。計算結果の有効データ長は 2 分の 1 となり中央で折り返しが起きる。通常, 自己相関はスムーズ化して表示するが, このプログラムではパワースペクトルを

算出した際に高周波成分をカットして逆フーリエ変換する事によりスムーズ化をしている。表示・保存されるデータは最大値で基準化され, 基準化倍率で変換倍率を補正し A/D 変換データと同様のフォーマットの拡張子に 'AC' + チャンネル番号のついた機械語ファイルとしてフロッピーディスクに保存出来る。FFT を経由して算出される自己相関関数は通常の算出法で得られるものと必ずしも一致しない場合があるので解析には注意が必要である。

粒子軌道プロットプログラムフローチャート



到来方向の推定 (Darbyshire法)

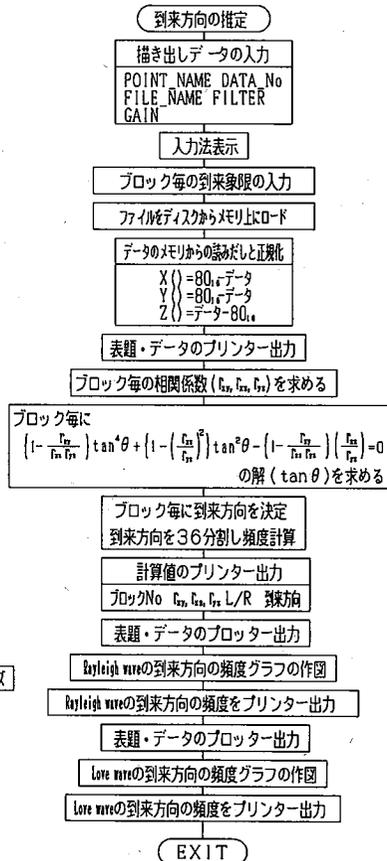


図12 粒子軌道プロットおよび到来方向推定プログラムフローチャート

②相互相関プログラム

自己相関と同様に、パワースペクトルの逆フーリエ変換を経由して相互相関関数を求めるものである。計算される相互相関関数は1チャンネルが1チャンネルと2チャンネル、2チャンネルが1チャンネル3チャンネル、3チャンネルが2チャンネルと3チャンネルのそれぞれ相互相関である。保存する場合、ファイル名の拡張子には'CC'+チャンネル数が付加される。

③位相速度計算プログラム

このプログラムではチャンネル間の位相差と各速度から周波数の遅れ時間を算出している。FFTから算出される位相スペクトルは必ずしも正確な値を示していないが、使用法によっては精度の高い時間

差を推定可能である。

④デジタルフィルタプログラム

微動解析においては観測波から特定の周波数帯の波のみを取り出す必要があるが、市販のフィルターではバンド幅・減衰特性・Q等を任意に設定することが困難な場合がある。このプログラムではデジタル化された波形をFFTし、位相情報を残したまま必要周波数帯以外の振幅を減衰させ逆FFTすることにより、任意のフィルターをエミュレート出来る。なお、このプログラムには方形窓のフィルター関数のみを組込んである。

⑤ユーティリティ

一連の微動解析プログラムを使用する際に必要となるプログラムで、データファイルの一括削除・転

送・ファイル名変更プログラム群, A/D変換データに付加されたデータの変更・追加プログラム, フロッピーディスクのフォーマット等である。

⑥ケフレシー, スペクトル抱絡線, 確率密度, その他

4. むすび

資源開発工学科地下探査学研究室において, パーソナルコンピュータ・NEC9800シリーズを中心とした, 微動解析ソフトの開発を進めた結果, 基本的な微動解析システムが構築された。その結果, 研究室において, 微動の基本的性質の解析を迅速に行うことが出来るようになった。

今後, 新たな計測システム・解析手法に対応した解析ソフトの開発をさらに進め, 解析システムの質的向上を図る所存である。

謝 辞

微動解析プログラムの開発は, 資源開発工学科地下探査学研究室の多くの大学院生・学生諸氏が携わり, 微動研究の進展と共に順次改良がなされてきたものである。特に, 当時の資源開発工学専攻の大学院生佐藤伸夫氏(現:通産省), 野村松信氏(現:(株)日本ビジネスコンサルタント), 菊地英光氏(現:寒河江高校), 現大学院生富田昌伸氏・深田秀美氏の労に依るところが大であった。

岩手大学情報処理センターの上野行秀技官, 情報

工学専攻の当時の大学院生田口之博氏(現:(株)富士通), 電子工学科の当時の学生安田威彦氏(現:(株)松下通信工業), 工学部電気系学科・土木工学科の教職員の方々には多くの御助言を頂いた。秋田大学教育学部野越三雄氏, 東北大学工学部阿部司氏からは微動解析全般にわたって有益な御教示を賜った。

これらの方々に深く感謝の意を表する。

参考文献

(1) 佐藤伸夫(1980): 常時微動による地下構造の推定に関する基礎的研究, 岩手大学大学院工学研究科修士論文。

(2) 野村松信(1984): 微動法の地熱探査への応用に関する基礎的研究, 岩手大学大学院工学研究科修士論文。

(3) 菊地英光(1988): 液状化地盤の振動特性に関する研究, 岩手大学大学院工学研究科修士論文。

(4) 石川淳一(1989): 八幡平東部地域における地熱微動に関する研究, 岩手大学大学院工学研究科修士論文。

(5) DARBYSHIRE, J. (1954): Structure of Microseismic Waves; Estimation of Direction of Approach by Comparison of Vertical and Horizontal Components, Proc. Roy. Soc. A., Vol. 223, pp. 96-111.

1-3 おわりに

パーソナルコンピュータ9800シリーズを中心とした微動解析ソフトの開発を進めた結果、基本的な微動解析システムが構築された。その結果、到来方向の解析の基本となる微動特性の迅速かつ正確な解析がなしうるようになった。

トリパタイト解析等のソフトはなお改良を図りつつあり、本解析システムには組み込まれていないが、今後さらに新たな解析手法に対応したソフトの開発を進め、開発システムの質的向上を図る所存である。

2、 相関法による葛根田地熱地域の微動の到来方向の解析

2-1 はじめに

微動の到来方向を求める観測方法および解析方法については、これまで多くの研究が行われており、特に最近では、到来方向の他に位相速度をも求める周波数-波数解析法 (CAPON: 1973) 等が注目されている。しかし、この方法は多数の地震計を設置するために広い平坦地を必要とし、地形の急峻な地熱地帯での観測には不向きな場合が多い。このような条件下では、1測点で上下動1成分水平動2成分の同時3成分観測を行い、粒子軌道から到来方向を求めることが行われる。

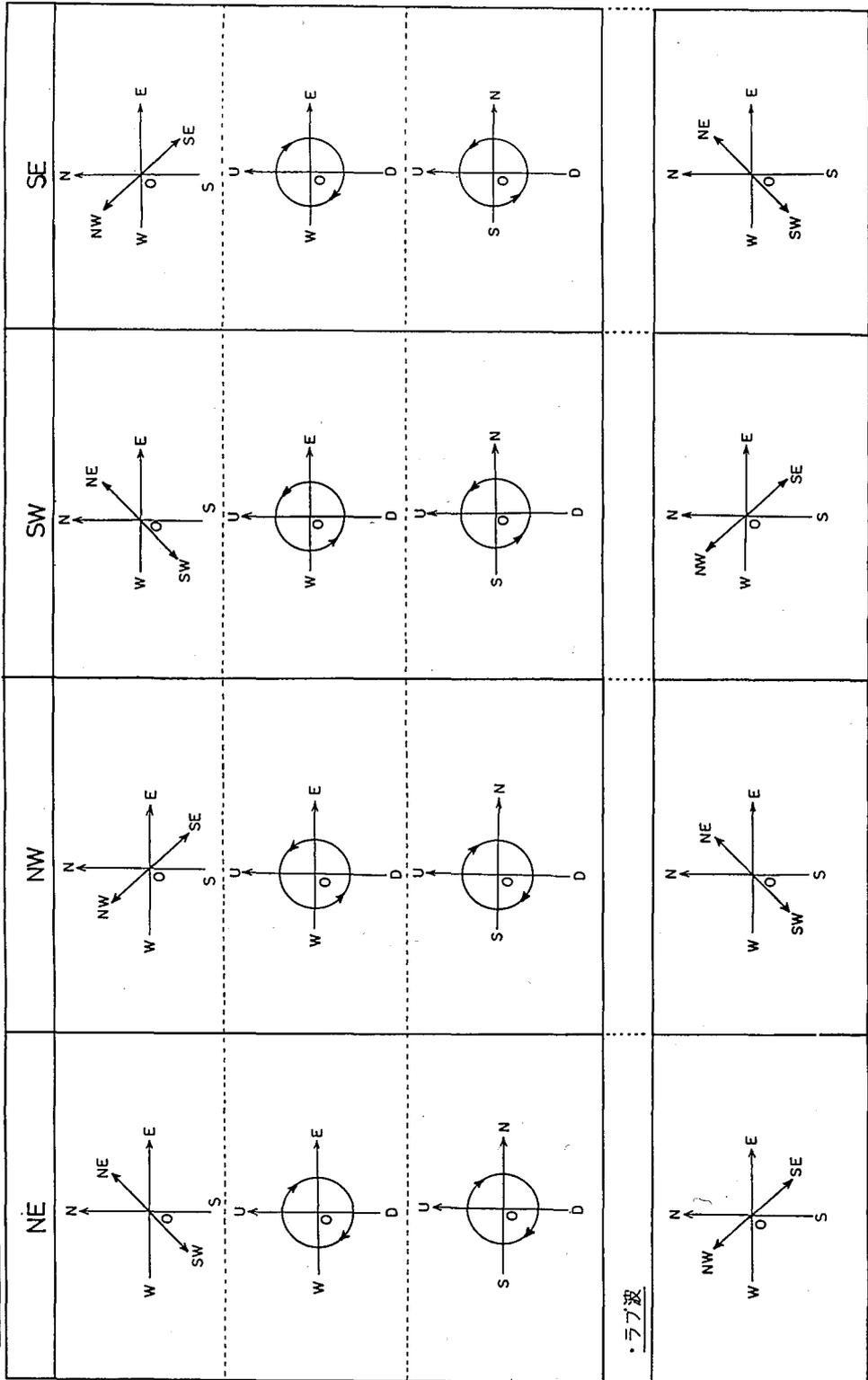
筆者等は、これまで葛根田地熱地域で粒子軌道法による微動の到来方向の解析を試みてきたが (斎藤他: 1985他)、新たに相関法による解析手法の検討を行うとともに、葛根田地熱地域の微動の到来方向と地熱活動との関係について検討した。

2-2 相関法による解析の原理

微動を構成する波の多くは、レーリー波およびラブ波の表面波とされている。ラブ波の粒子運動は波の進行方向対し直角であるが、半無限等方均質弾性体における自由レーリー波 (理想的なレーリー波) の粒子運動は進行方向と逆方向である。

粒子軌道法においては、図1に示すように、EW-NS, EW-UD, NS-UDそれぞれの粒子軌道から波の到来象限を求めるものである。相関法は、理想的なレーリー波には水平動成分と上下動成分との間に90°の位相差あること、水平動成分間に0°ある

・レ-リ-波



・ラ-波

図 1 粒子軌道法による到来象限の判別方法

・レリー波

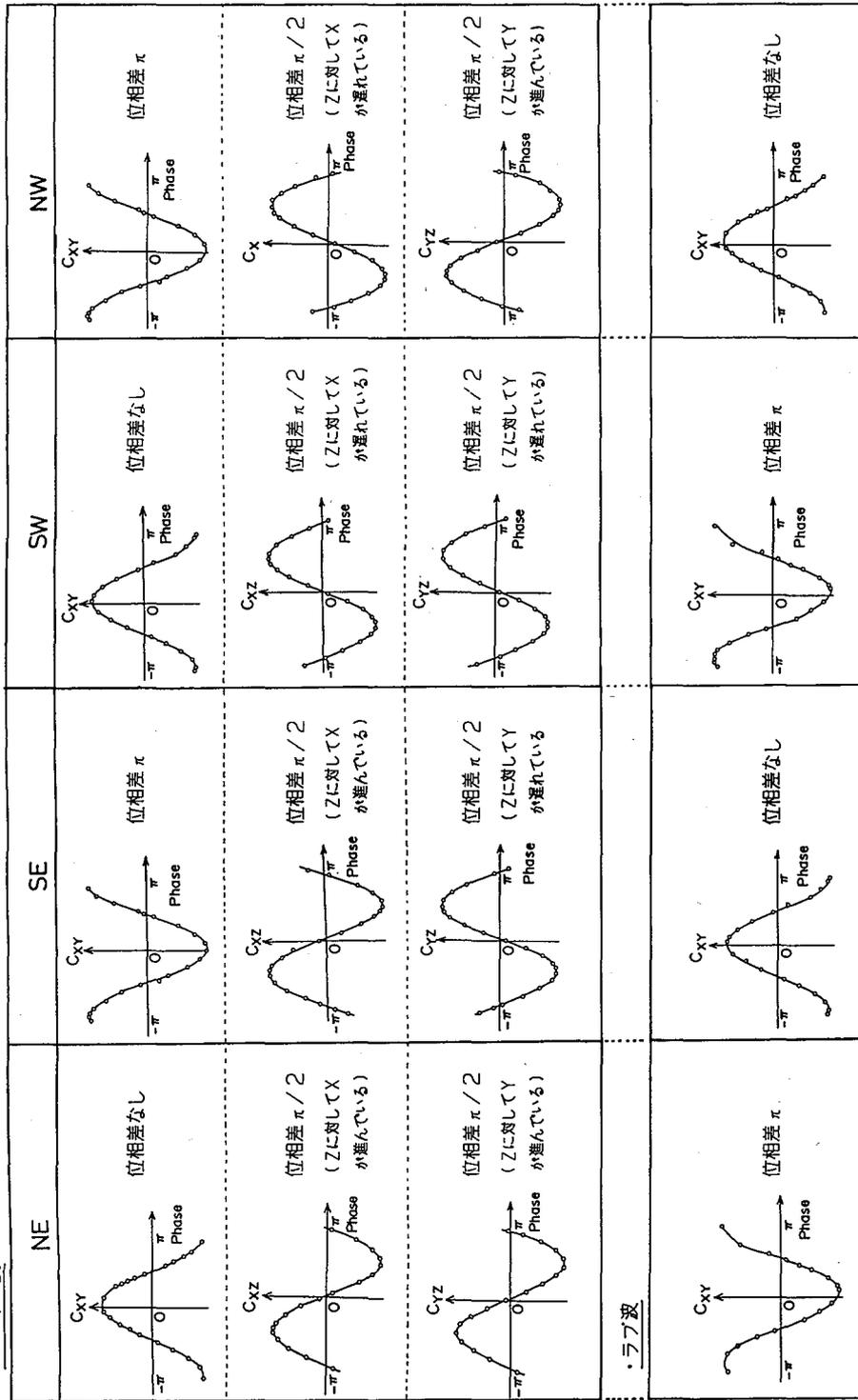


図 2 到来象限ごとの 3 成分の相互相関関数

いは 180° の位相差があることを利用して波の到来象限を求めるものである。図 2 に、波がそれぞれ NE・SE・SW・NW 象限方向から到来した場合の相関関数の組み合わせを示すが、ラブ波のみが到来した場合は第 1 象限と第 3 象限、あるいは第 2 象限と第 4 象限の区別はつけられない。

2-3 解析方法

観測データの解析は、図 3 に示すような手順で行った。20.48 秒の観測記録を 0.01 秒間隔で A/D 変換し、0.25 秒ごとに 80 個の区間に分割した。そして、分割されたそれぞれについて最大ラグ 13 まで相互相関関数を計算した。0.25 秒ごとに分割したのは、解析の対象となる周波数が 3 ~ 10 Hz なため、粒子軌道法において粒子の回転が 1 ~ 2 回転となるように定めたものと対応させたことによるものである。

2-4 モデル実験

葛根田地熱地域における実観測データについて、相互相関関数を計算し到来方向の解析を行うと、図 2 に示したようなパターンはごく少数しか見いだされない。すなわち、野外においては理想的なレーリー波は殆ど観測されない。これは、多方面から到来する波の干渉、レーリー波とラブ波との干渉などにより、地動がより複雑な挙動をしているためと考えられる。

この地動を粒子軌道として捕らえると、地表面に垂直な面ではなく斜交した面内で回転する動きとして見る事が出来る。そこで、このような回転運動をなす場合の相互相関関数がどのような値を示

相互相関関数の計算方法

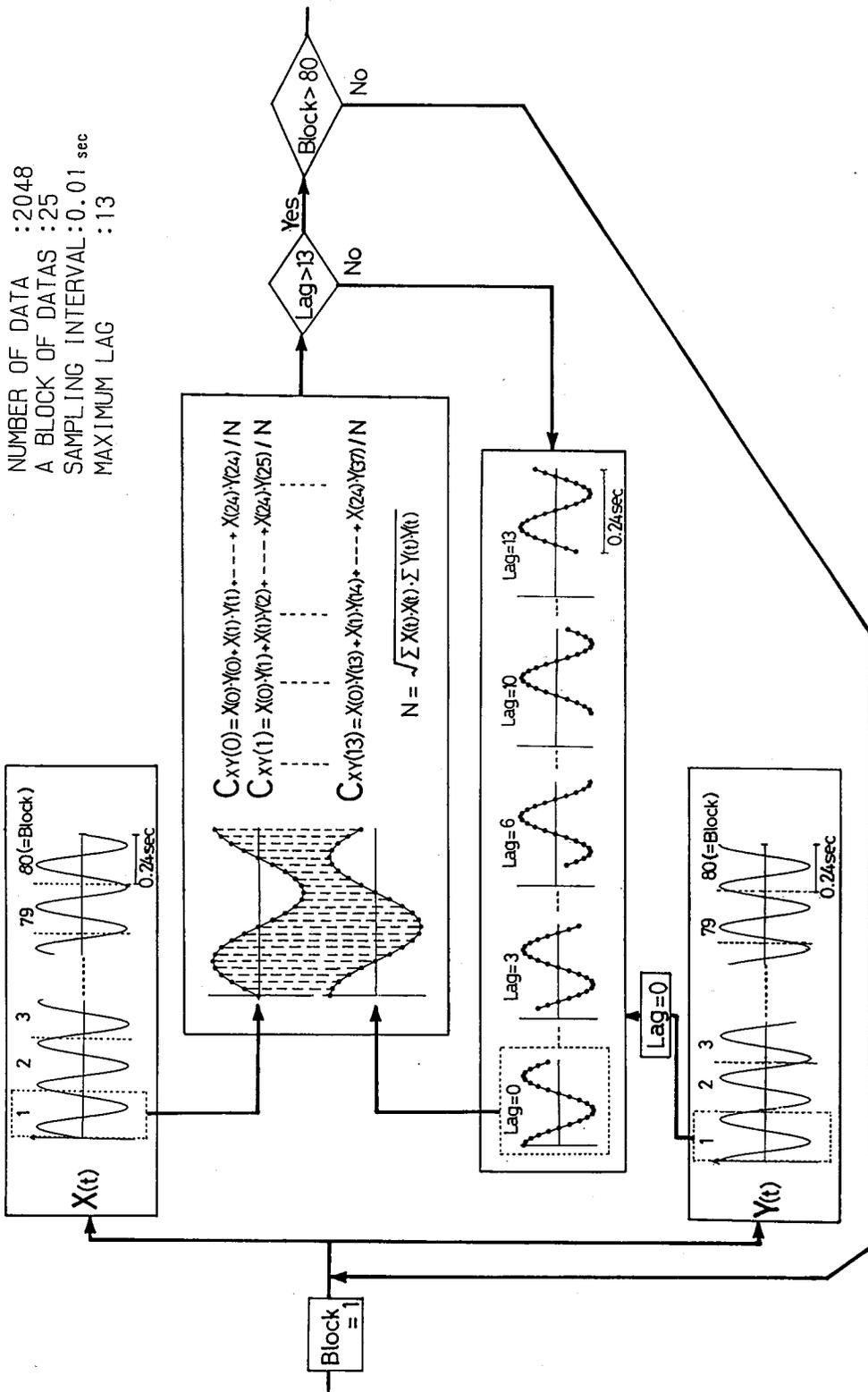


図 3 相互相関関数の計算方法

すかについて、モデル波形を入力し計算を行った。

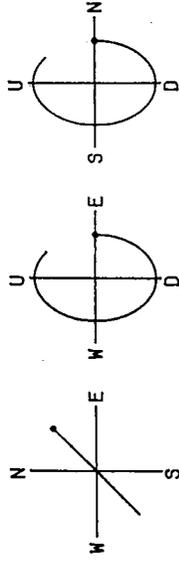
図4に1例として、NE方向から到来角度 45° 、傾斜角 0° で5Hzの波が到来したときの、E-W・N-S・U-Dの入力波形と粒子軌道および計算された相互相関関数を示す。到来角度はEから到来する場合を基準として反時計回りに、傾斜角は地表面に垂直な面を基準に反時計回りにそれぞれ正の値を取るように定め、到来角度および傾斜角度の多数の組み合わせについて検討を行った。

図5に、到来角度が $0^\circ \cdot 10^\circ \cdot 45^\circ \cdot 80^\circ \cdot 90^\circ \cdot 100^\circ \cdot 135^\circ \cdot 170^\circ \cdot 180^\circ \cdot 190^\circ \cdot 225^\circ \cdot 260^\circ \cdot 270^\circ \cdot 280^\circ \cdot 315^\circ \cdot 350^\circ$ 、傾斜角がそれぞれ $-80^\circ \cdot -45^\circ \cdot -10^\circ \cdot 0^\circ \cdot 10^\circ \cdot 45^\circ \cdot 80^\circ$ の場合の相互相関関数を示す。傾斜角が 0° の理想的なレーリー波（到来角 $0^\circ \cdot 90^\circ \cdot 180^\circ \cdot 270^\circ$ を除く）の場合以外は図2に示したような相互相関関数が描かれていない。しかし、タイムラグ0における相互相関関数の傾きに注目すると、傾斜角によらず象限ごとの水平2成分と上下成分との相互相関関数の傾きの組み合わせが一定の関係を示していることがわかる。すなわち、E-W-U-DおよびN-S-U-Dの相互相関関数の傾きは、表1に示すように第1象限で $- \cdot -$ 、第2象限で $+ \cdot -$ 、第3象限で $+ \cdot +$ 、第4象限で $- \cdot +$ となり、この傾きの組み合わせから到来象限を決定することが可能であることが明らかになった。

しかし、この判別方法は上下動成分の動きに着目して到来方向を判別するもので、純粋なラブ波の場合には判別が出来ないこととなる。

到来方位 : NE

・粒子軌道

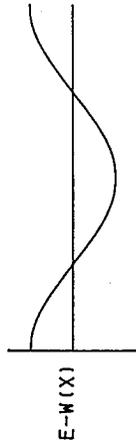


【 設定 】

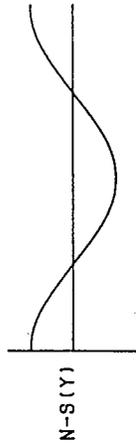
- ・到来角度 : 45 (°)
- ・傾斜角度 : 0 (°)
- ・周波数 : 5 (Hz)

・波の3成分

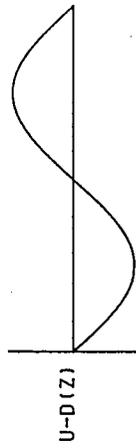
AMPLITUDE (MAX) = .707



(MAX) = .707



(MAX) = 1



20 (SEC/100)

・相互相関関数

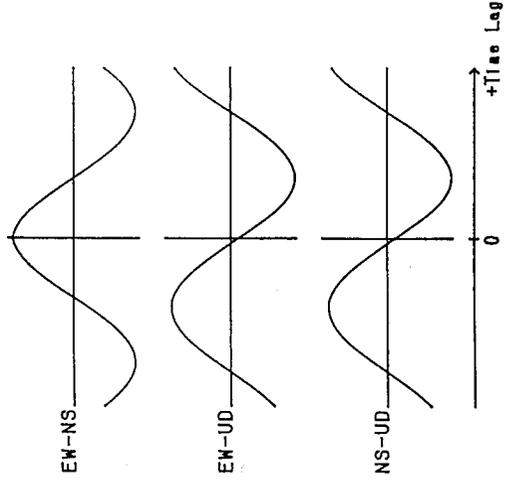


図4 到来角度 45° 傾斜角 0° の場合の粒子軌道及び相互相関関数

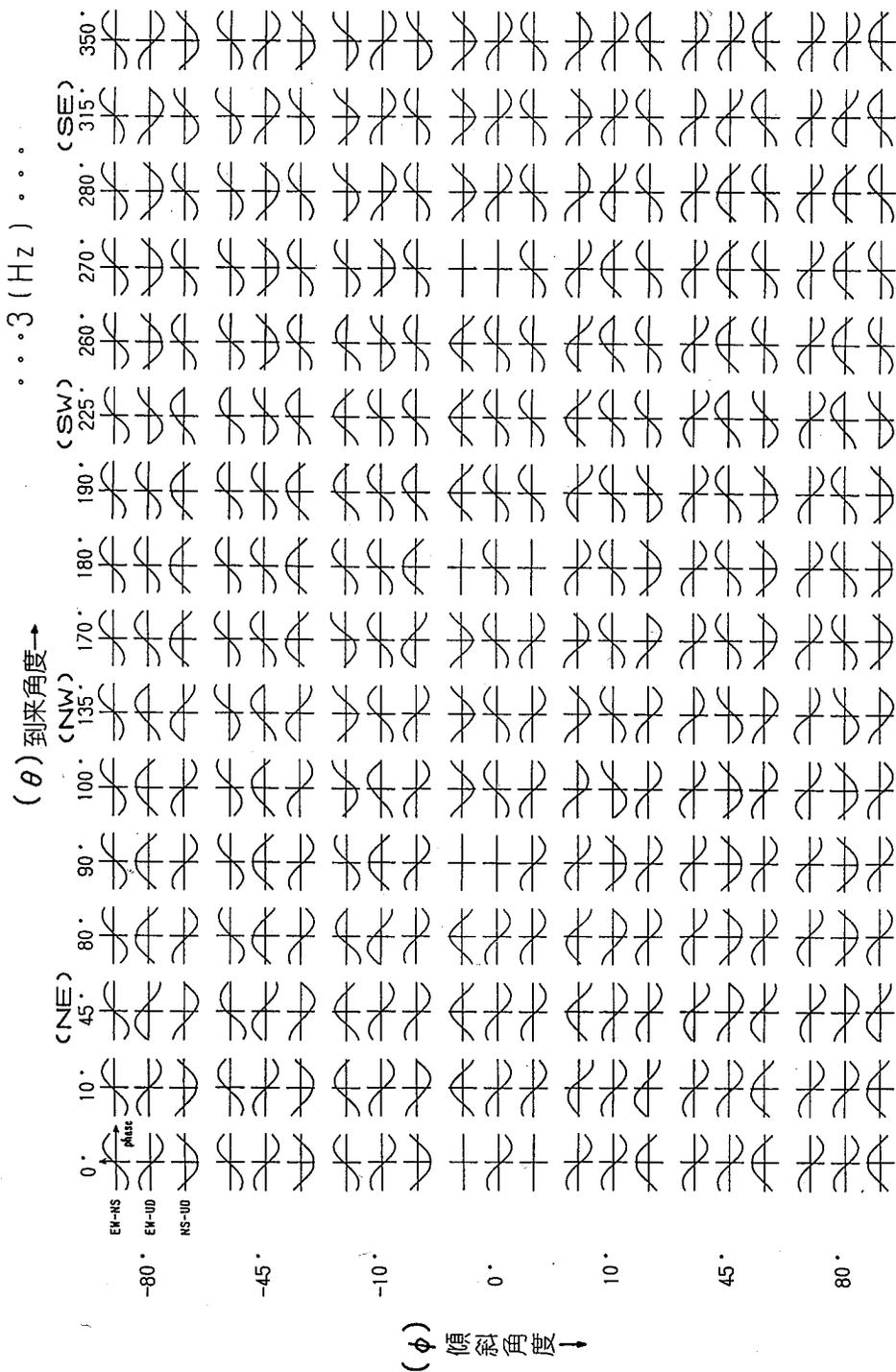


図5 モデル計算による到来角度・傾斜角と相互相関関数との関係

表1 到来角度・傾斜角による相互相関関数の傾き (time lag=0)

傾斜角	相関	到来象限															
		第1 (NE)			第2 (NW)			第3 (SW)			第4 (SE)						
		10°	45°	80°	90°	100°	135°	170°	180°	190°	225°	260°	270°	280°	315°	350°	360°
0°	EW-NS	0	0	0		0	0	0		0	0	0		0	0	0	
	EW-UD	-	-	-		+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
	NS-UD	-	-	-	-	-	-	-		+	+	+	+	+	+	+	+
10° / -10°	EW-NS	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+
	EW-UD	-	-	-	0	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
	NS-UD	-	-	-	-	-	-	-	0	+	+	+	+	+	+	+	0
45° / -45°	EW-NS	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+
	EW-UD	-	-	-	0	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
	NS-UD	-	-	-	-	-	-	-	0	+	+	+	+	+	+	+	0
80° / -80°	EW-NS	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+
	EW-UD	-	-	-	0	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
	NS-UD	-	-	-	-	-	-	-	0	+	+	+	+	+	+	+	0

2-5 粒子軌道法と相関法の比較

葛根田地熱地域での測定データについて、粒子軌道法と相関法で求められた到来方向の比較検討を行った。粒子軌道法においては、描かれた粒子軌道から波がレーリー型かラブ型かを判定する必要がある。この判定基準は明確ではなく、実技上便宜的に上下動の動きが水平動の5分の1以下のものはラブ波が優勢と考えてラブ波と取り扱っている。そのため、ラブ波と判定するかレーリー波と判定するかによって到来方向は90°異なることとなる。また、相関法においては、粒子軌道法においてラブ波と取り扱われたものであっても上下動の動きがわずかでもあれば、レーリー波成分の到来方向が求められるので、粒子軌道法による結果とは異なってくる。

図6および図7に、粒子軌道法と相関法で求められた微動の到来方向を比較した例を示す。粒子軌道でEW-UD・NS-UDの矢印は粒子の回転の向きを、EW-NSの矢印はレーリー波の到来象限を、点線はラブ波の到来方向を表す。×印は粒子軌道が複雑で到来方向を決定できなかったことを示している。図から、粒子軌道法でレーリー波と区分されたものの到来方向は相関法による到来方向と一致しており、粒子軌道法でラブ波と区分されたものの到来方向は当然のことであるが相関法による方向とは90°異なっている。

表2に、80個のデータにおける両手法での解析結果を比較した例を示すが、相関法で求められた到来象限の割合は、粒子軌道法でレーリー波型と区分された波の到来方向の割合と類似しており、相関法による解析結果は、レーリー波成分の到来方向を示しているといえる。

なお、粒子軌道法においては、粒子軌道を描かせて人間が判定す

POINT NAME: 8000 C-up
 DATA NO. : 83071174
 FILE NAME : K07405-F
 FILTER : 5.0

GAIN: CH1 25000
 CH2 10000
 CH3 25000

TAPE NO. : 152
 COUNTER : 109

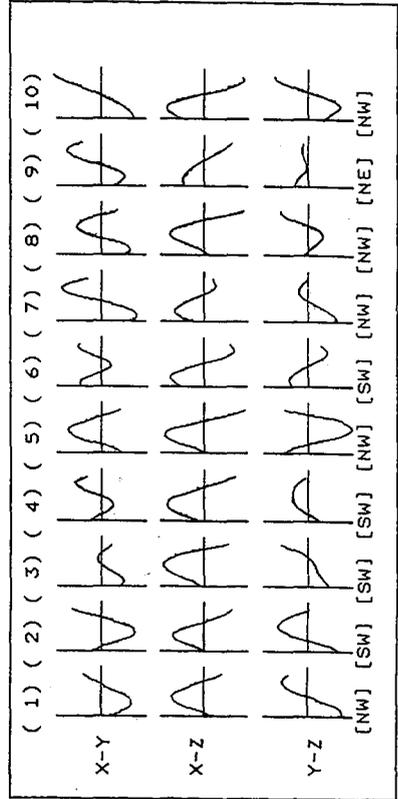
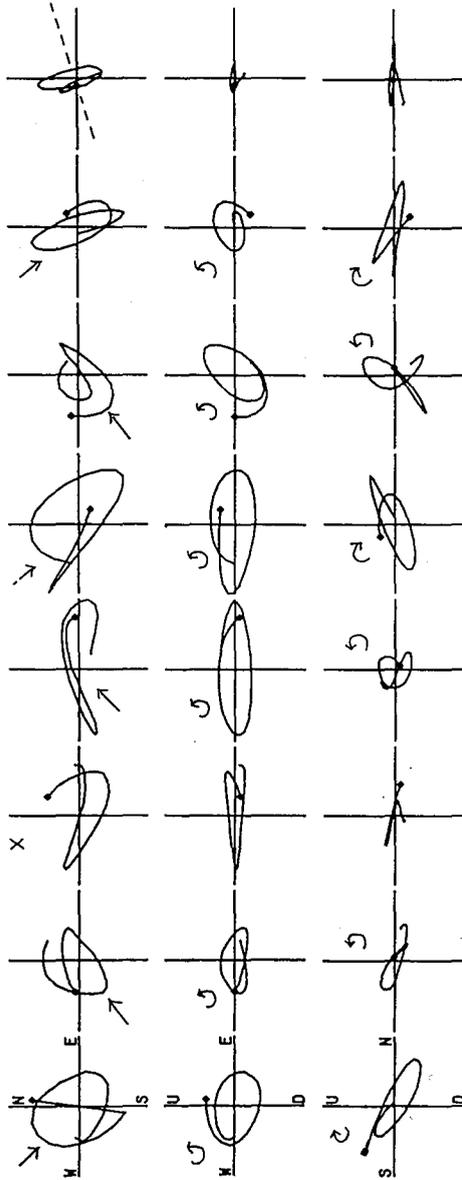
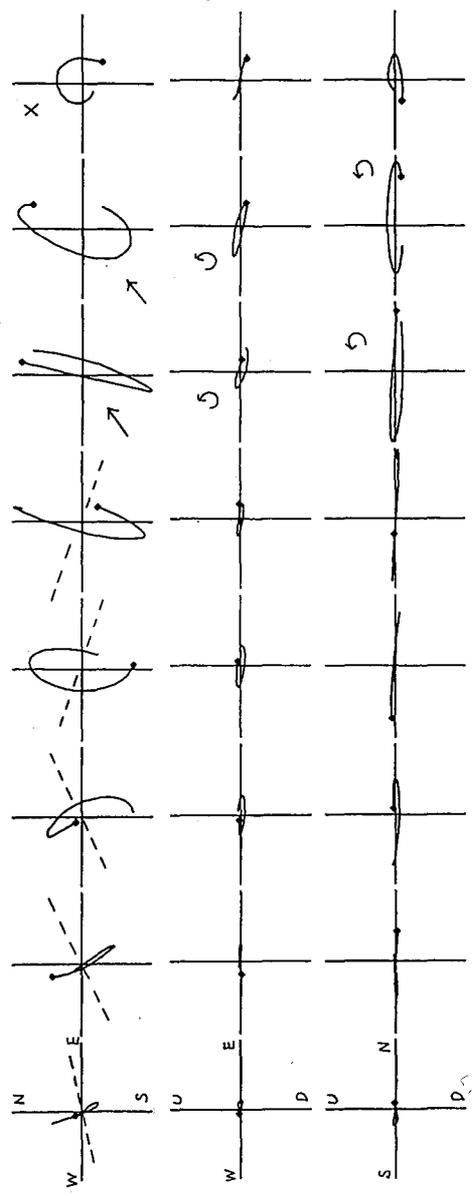


図 6 粒子軌道法および相関法で判定された到来象限の比較

POINT NAME: Base C-up
 DATA NO.: 83071174
 FILE NAME: KC7403-F
 FILTER: 3.0

GAIN: CH1 25000
 CH2 10000
 CH3 50000

TAPE NO.: 152
 COUNTER: 108



	(17) (18) (19) (20) (21) (22) (23) (24) (25)
X-Y	
X-Z	
Y-Z	
	[NW] [NW] [NW] [SW] [SW] [SW] [SW] [SW] [SW]

図 7 粒子軌道法および相関法で判定された到来象限の比較

表 2 - 1 粒子軌道法および相関法で判定された到来象限の比較

測定場所 : 葛根田 Base C1 測定日時 : 1983年07月14日11時00分～
 ファイル名 : KC7403 テープナンバー : 152
 周波数 : 3 (Hz) カウンター : 109

	解析 個数		解析 不能	ラフ 波	レーリー波				
					総数	NE	NW	SW	SE
粒子軌道法	80	頻度	9	37	53	15	10	25	3
		%	11.2	46.3	66.3	28.3	18.9	47.1	5.7
相関法	80	頻度	1	1	79	15	17	37	10
		%	1.2	1.2	98.8	19.0	21.5	46.8	12.7

表 2 - 2 粒子軌道法および相関法で判定された到来象限の比較

測定場所 : 葛根田 Base C1 測定日時 : 1983年07月14日11時00分～
 ファイル名 : KC7405 テープナンバー : 152
 周波数 : 5 (Hz) カウンター : 109

	解析 個数		解析 不能	ラフ 波	レーリー波				
					総数	NE	NW	SW	SE
粒子軌道法	80	頻度	21	2	57	3	15	30	9
		%	26.3	2.5	71.3	5.3	26.3	52.6	15.8
相関法	80	頻度	0	0	80	3	20	40	17
		%	0	0	100	3.8	25.0	50.0	21.3

るため、解析に多くの時間と労力を要し、かつ解析者の個人差が含まれるのに対し、相関法では相互相関関数を描写することなく、ラグ0における相関関数の傾きをコンピュータで計算して集計しているため迅速な解析が可能である。

2-6 葛根田地熱地域における微動の到来方向

葛根田地熱地域においては、現在開発中の区域を中心に2～15 Hz程度の地熱活動に関連すると推測される微動が観測されている(斎藤他:1985、1986、1987a、1987b)。この度は1983年から1985年に観測された1点3成分データのうち、図8に示すBase C₁・C₂・3・5・6・7・8・9・10・11・12について解析を行った。なお、図で点線で囲まれた範囲は生産井および還元井が掘削されている範囲で、各Baseはこの範囲をとり囲むように選定した。

解析は、20.48秒の記録を各Baseに共通して含まれる3(4)・5・7・8・10(11)Hzごとにバンドパスフィルターを通して、0.01秒間隔でA/D変換し、80個のブロックに分割し、相関法で到来象限を求めた。

まず、いくつかのBaseについて到来方向の時刻変化、季節変化等について検討した。図9に、例としてBase C₁における到来方向の時刻変化を示す。当地域では、蒸気生産基地近傍では生産活動による振動が発生しているため、蒸気生産施設が稼働中と停止時で振幅に変化が見られる。図で、7月11日および12日は生産施設が稼働中、7月14日は停止中であるが、停止中と稼働中で到来象限に変化が認められるものの、それぞれにおいて時刻による変

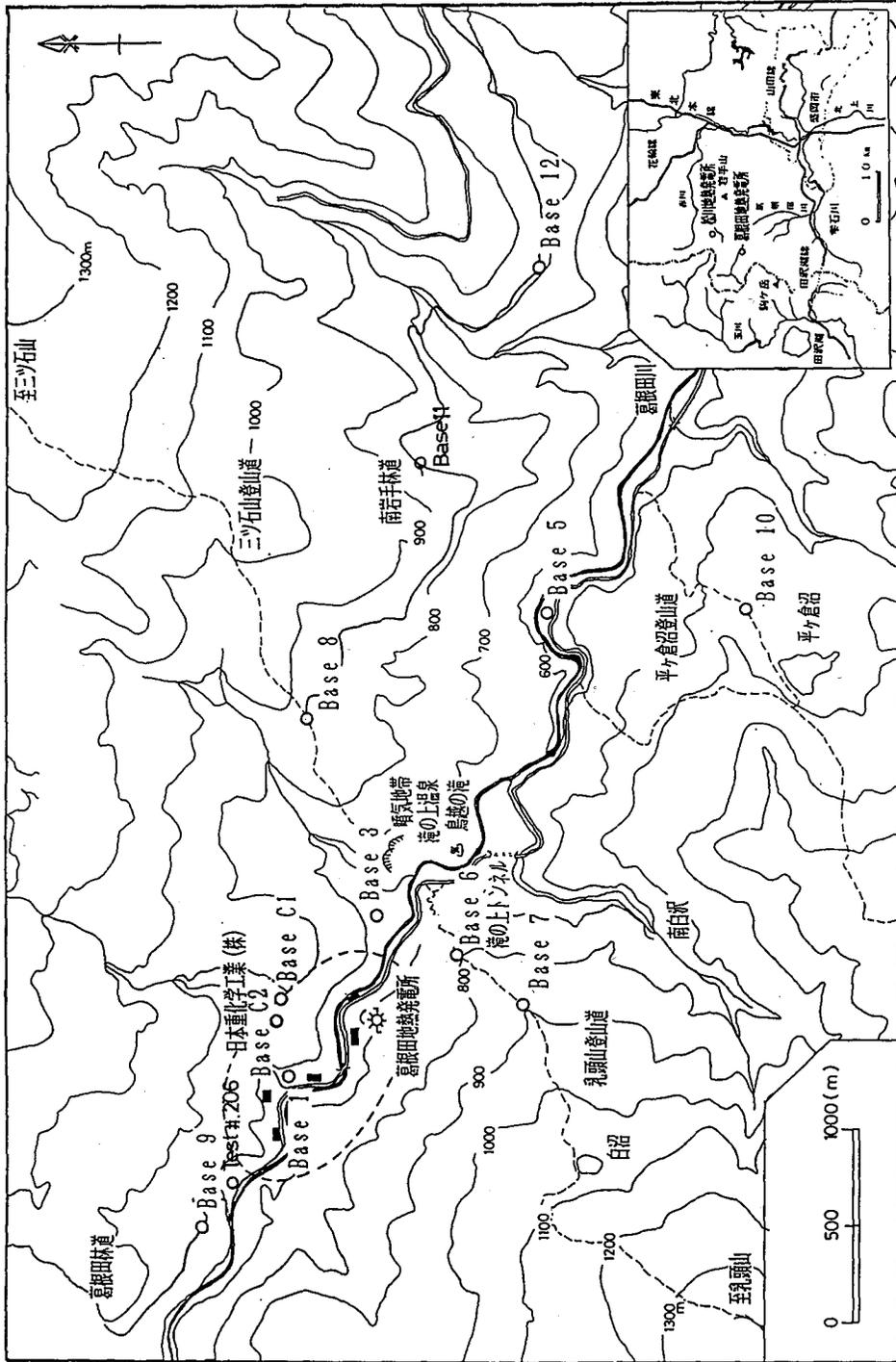


図 8 測点位置図

---BPF: 7(Hz)---

(Base C1 1983.7.11-14)

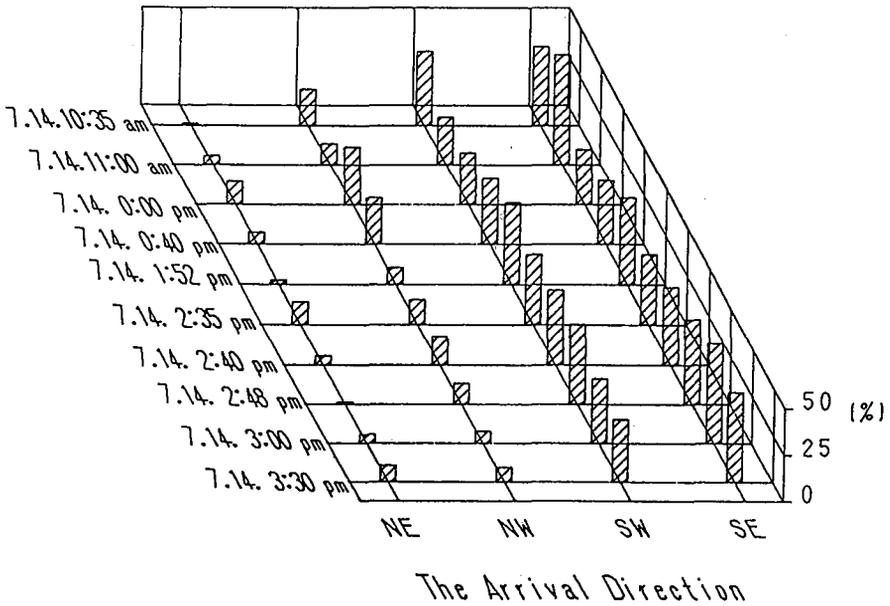
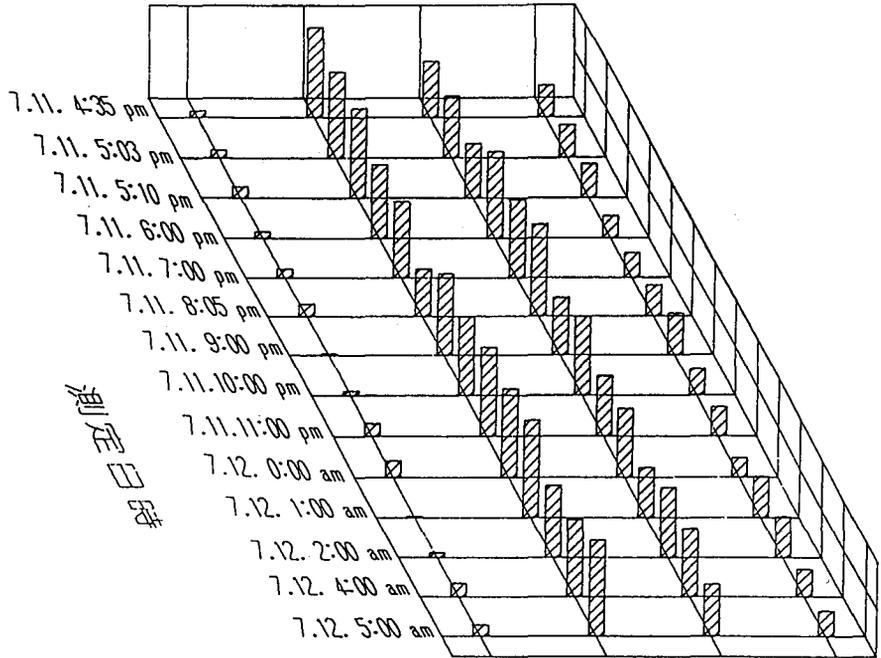


図 9 観測時刻による微動の到来象限の変化 (Base C₁)

動は小さく主たる到来象限は一定である。観測時期が異なっても到来象限がほぼ一定していることから、生産活動の影響を除外すれば当地域の微動の到来方向は安定しているものと考えられる。

図10に、13 Baseにおける微動の到来象限を地図上にまとめて示す。同心円の内側から、3・4・5・7・8・10・11 Hzを示し、黒塗りは45%以上、斜線は25～45%が到来していることを示す。図から、微動の到来方向は必ずしも貯留層の存在すると推測される方向とは一致していない。これは、地熱地域の微動が表面波からのみ構成されていないこと、波の伝播経路が複雑であることに依るものと考えられる。

この度は、解析手法の確立に多くの労力を要し、観測データの解析は小数に留まったが、葛根田地域では約200点の1点3成分観測が実施されており、解析データを統計的に取り扱うことにより、地熱活動と微動との関係がより明らかになるものと考えられる。

2-7 むすび

1点3成分観測データについて、相関法による微動の到来方向の解析システムを構築し、葛根田地熱地域における微動の到来方向の解析を行った。

その結果、レーリー波成分の到来方向の迅速な解析が可能となった。今回の解析では、データ数も少ないことにもより地熱貯留層と微動の到来方向について、十分な対応を見い出せなかったが、1点3成分観測は地形の急峻な地域でも容易に実施できる利点があり、多くの解析データについて統計的処理をすることにより、地熱貯留層の探査に適用できる可能性があるものと考えられる。

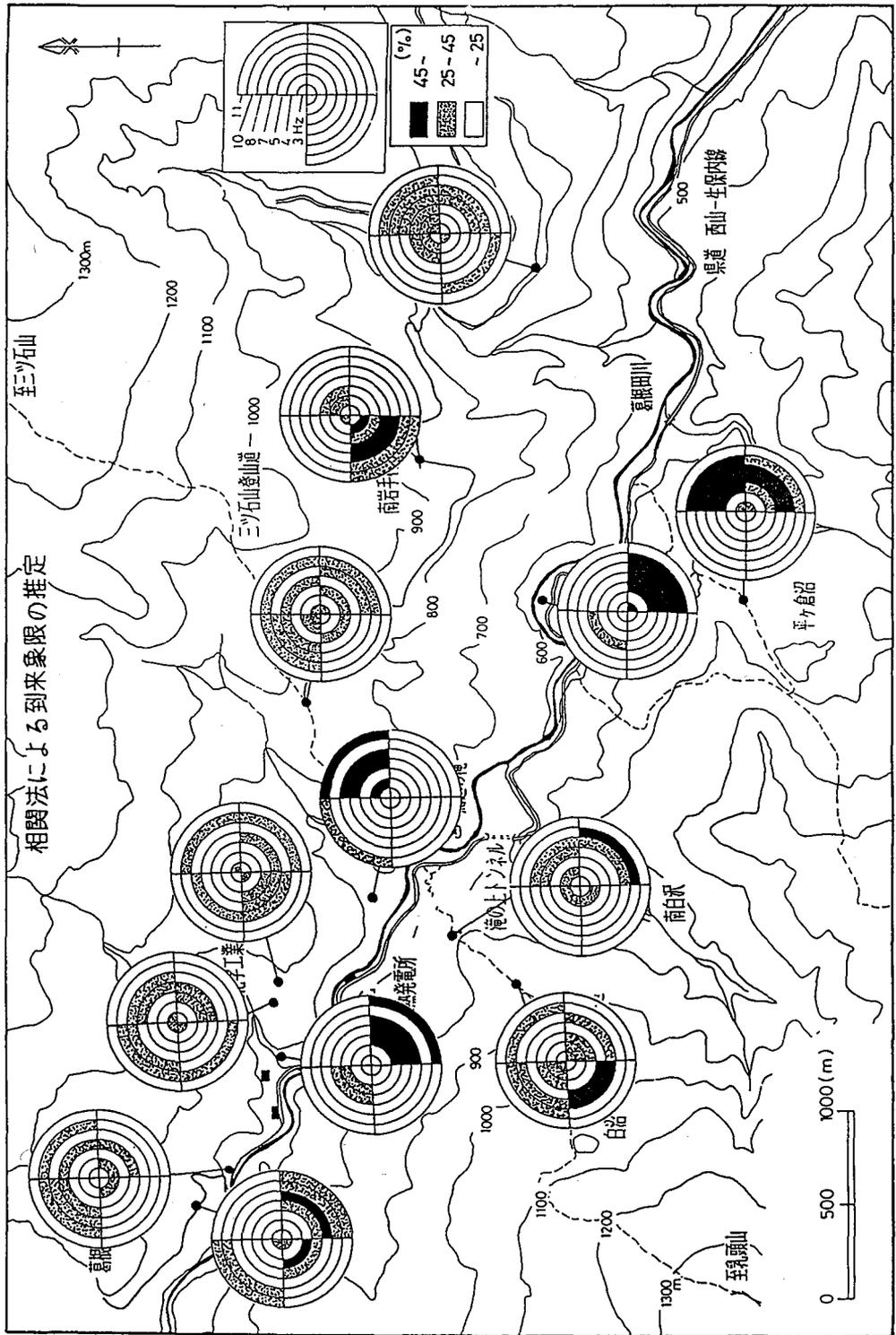


图10 葛根田地域における微動の到来方向

参考文献

- 1) 斎藤徳美・佐藤七郎 (1985) 粒子軌道から推定される葛根田地熱地域の微動の到来方向、日本鉱業会昭和60年度研究業績発表講演会講演要旨集、301~302
- 2) 斎藤徳美・佐藤七郎 (1985) 滝の上(葛根田)地熱地域における微動(1) - 微動の安定性および経年変化について、日本地熱学会誌、7、111-130
- 3) 斎藤徳美・佐藤七郎 (1986) 滝の上(葛根田)地熱地域における微動(2) - 河川・蒸気生産施設および奮起活動と微動との関係、日本地熱学会誌、8、73-100
- 4) 斎藤徳美・佐藤七郎 (1987a) 滝の上(葛根田)地熱地域における微動(3) - ビルドアップテスト時における蒸気生産井バルブ閉止前後での振幅およびスペクトルの変化、日本地熱学会誌、9、57~86
- 5) 斎藤徳美・佐藤七郎 (1987b) 滝の上(葛根田)地熱地域における微動(4) - 振幅および卓越周波数分布と地熱活動との関係、日本地熱学会誌、9、109~132
- 6) CAPON, J., (1973) Signal Processing Spectrum Analysis for a Large Aperture Seismic Array, Method in Computation Physics, 13, 1-58

3、トリパタイト観測による八幡平東部地域の微動の到来方向の解析

3-1 はじめに

八幡平東部地域の、アスピーテライン・松川温泉・藤七温泉を含む広範囲な地域で1点3成分観測を行った結果、松川温泉から藤七温泉に至る区域に見い出された2～6 Hzの振動が、地熱活動との関連で注目された(斎藤他：1988)。

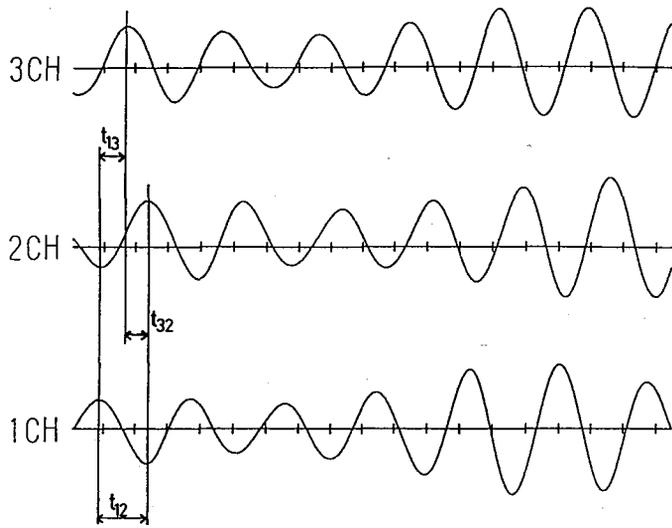
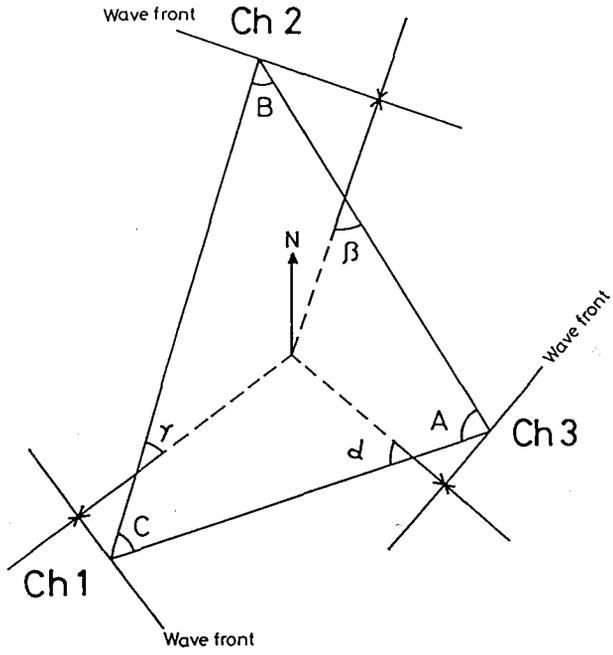
そこで、同地域の比較的広い4ヶ所の平坦地でトリパタイト観測を実施し、微動の到来方向・見掛け速度の解析を行い、地熱活動との関係について検討した。

3-2 測定・解析方法

トリパタイト観測は、図1に解析の概念を示すように、一辺数10 mの三角形の各頂点に、上下動地震計を3台設置し、各チャンネルに到来する波の遅れを計測し、波の到来方向および見掛け速度を求めるものである。

測定は、図2に示す Base 4、5、6、7の4ヶ所で1989年6月から10月にかけて、延べ6日間、無風状態の日を選んで実施した。測定は、昼間12時頃から深夜にかけ1時間ないし30分おきに10分程度行った。

当観測区域は山間部であり、地形が急峻なため、広いネットを張ることが困難であり、各 Baseにおける地震計の間隔は図3に示すように、22.4 m～37.9 mである。また、ネットは正3角形に近いことが望ましいが、Base 7では地形の制約上から図のような形状となった。



Reading of the time differences arrival of a microtremor.

- (A) : $\tan d = \frac{t_{32} \times \overline{AC} - t_{31} \times \overline{AB} \times \cos \angle A}{t_{31} \times \overline{AB} \times \sin \angle A}$, $v = (\overline{AC} \times \cos d) / t_{31}$
- (B) : $\tan \beta = \frac{t_{21} \times \overline{AB} - t_{23} \times \overline{BC} \times \cos \angle B}{t_{23} \times \overline{BC} \times \sin \angle B}$, $v = (\overline{AB} \times \cos \beta) / t_{23}$
- (C) : $\tan \gamma = \frac{t_{13} \times \overline{BC} - t_{12} \times \overline{AC} \times \cos \angle C}{t_{12} \times \overline{AC} \times \sin \angle C}$, $v = (\overline{BC} \times \cos \gamma) / t_{12}$

図1 トリパタイト観測の概念

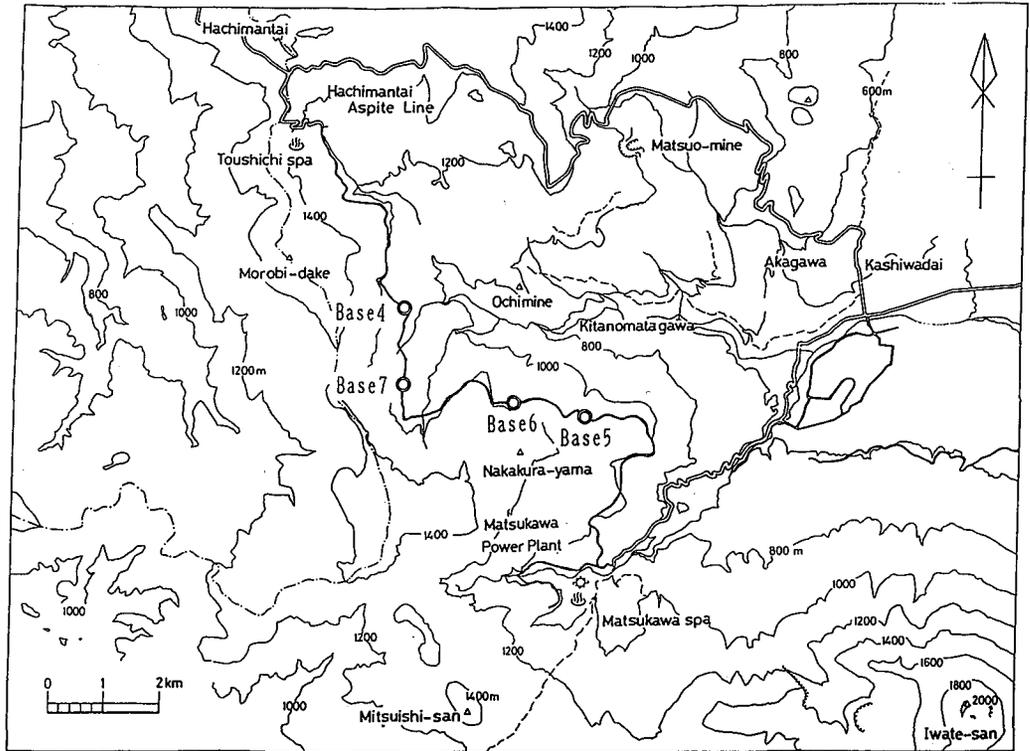


図2 トリパタイト観測点位置

測定に用いた地震計は、固有周期1秒の動電速度型3台で、増幅器で数1000倍に増幅し、データレコーダに記録した。記録はリニアコーダに描かせ安定した区間を選定した後、通常0.01秒間隔でA/D変換し、2048のデータからFFTによりスペクトル解析を行った。また、コヒーレンシ等から各地震計に定常的に含まれ相関の強い波の成分を選定し、バンドパスフィルターをかけ、各チャンネル間の相互相関関数を計算して、時間遅れを求めた。

図4に、Base6における昼間における観測波形の例を、図4に

Tripartite network

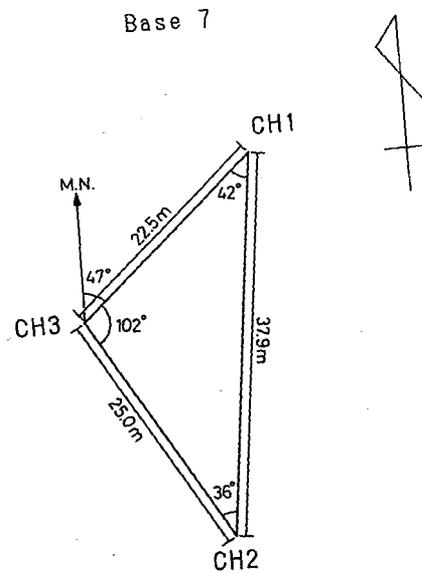
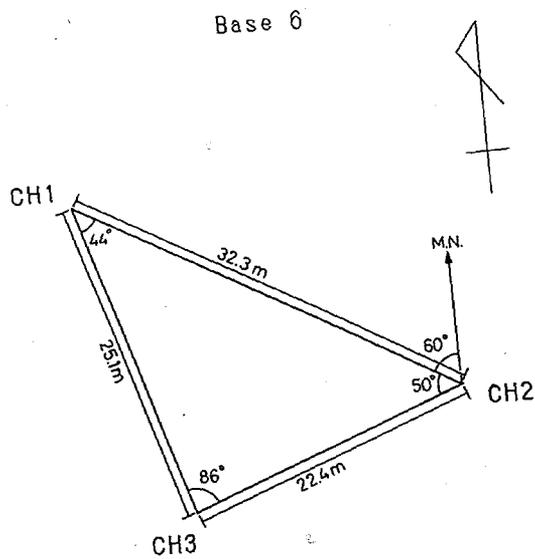
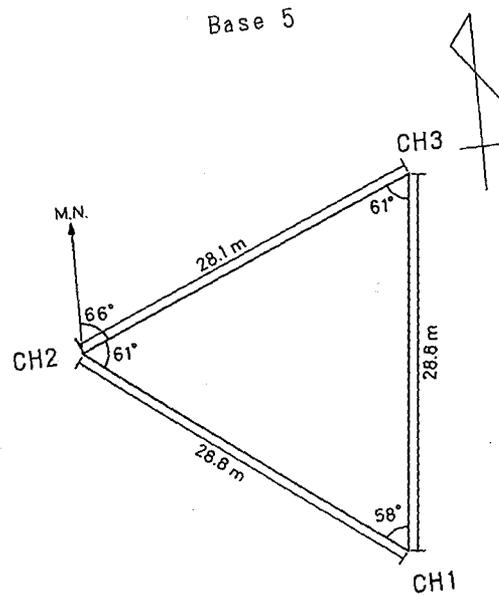
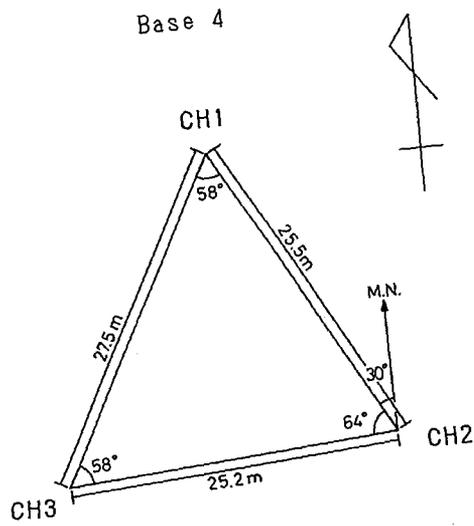


図3 各Baseにおける地震計の配置

ADC WAVE

FILE-NAME : 6-2A

COMMENT : 1989.6.23/ HACHIMANTAI BASE6/ 25HzL.P.F.

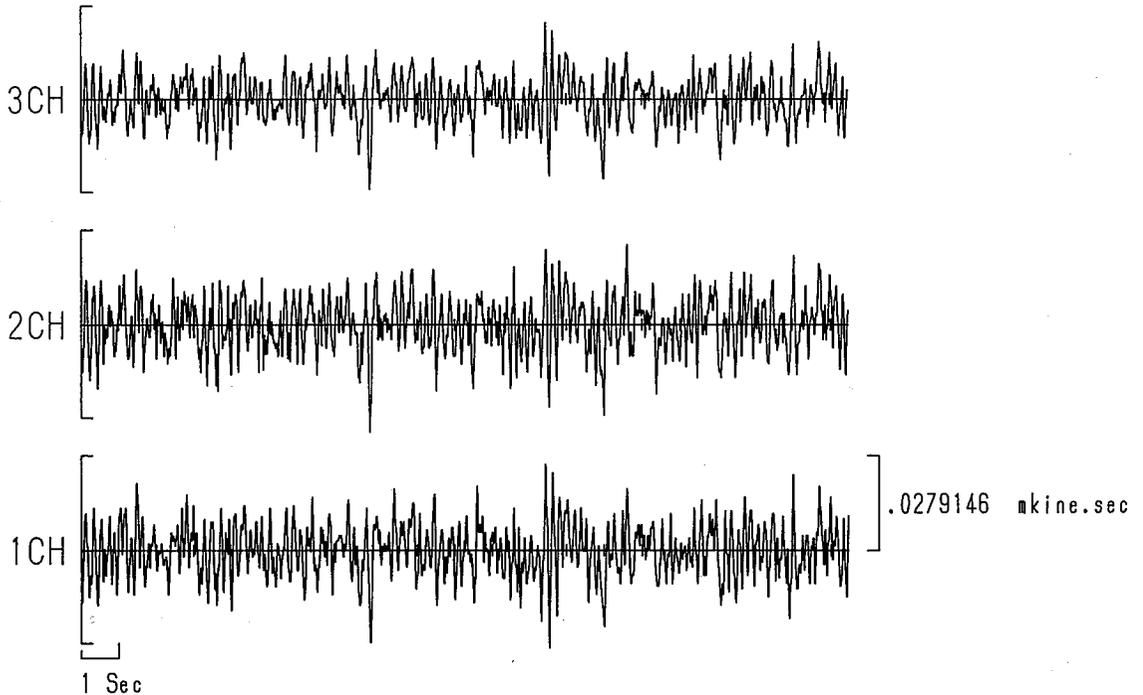


図4 観測波形の例 (Base6、1989年6月23日)

スペクトルを示す。3チャンネルとも1Hz以下の脈動とみなされるピークの外、2~6Hz程度にやや強い成分が見いだされる。3~1ch, 2~1ch, 3~2chそれぞれのコヒーレンシーを図6に示すが、2Hz付近を除くと5Hz以下の値は大きく相関の強い波が伝播してきているとみなされる。

各チャンネルの相互相関関数から、時間遅れを求めたところ、その値は0.001秒オーダーであり、通常の0.01秒間隔での

FOURIER [単一]

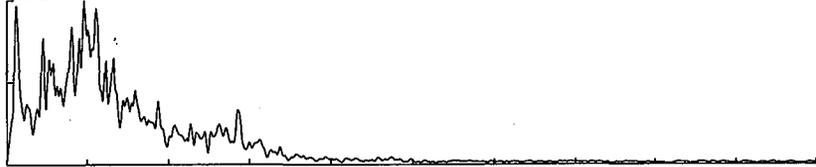
TAPE NO = 547 COUNTER = 261 COUPLING = DC
FILTER = 25Hz LPF DISK NO = 404 FILE NAME = 6-2A

PLACE: 八幡町定点

DATA NO. 890623

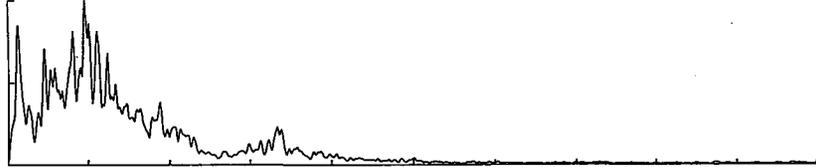
[UD1] COMPONENT MAX: 5.03 (Hz)

0.042 (mkine-se)



[UD2] COMPONENT MAX: 6.15 (Hz)

0.044 (mkine-se)



[UD3] COMPONENT MAX: 5.03 (Hz)

0.041 (mkine-se)

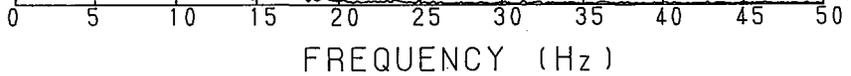
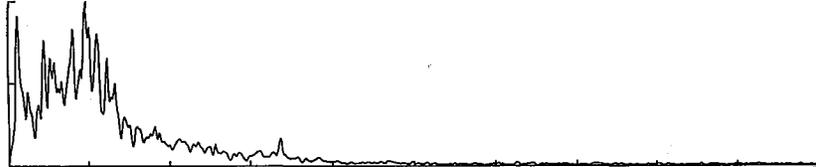


図5 スペクトルの例 (Base6、1989年6月23日)

COHERENCY (LOG)

PLACE : HACHIMANTAI BASE 6
DATA NO : 1989.6.23
FILTER : 25Hz L.P.F.
SAMPLINGTIME: .01 Sec

TAPE NO = 547
COUNTER = 281-
COUPLING = DC
DISK NO = 401
FILENAME = 6_2A

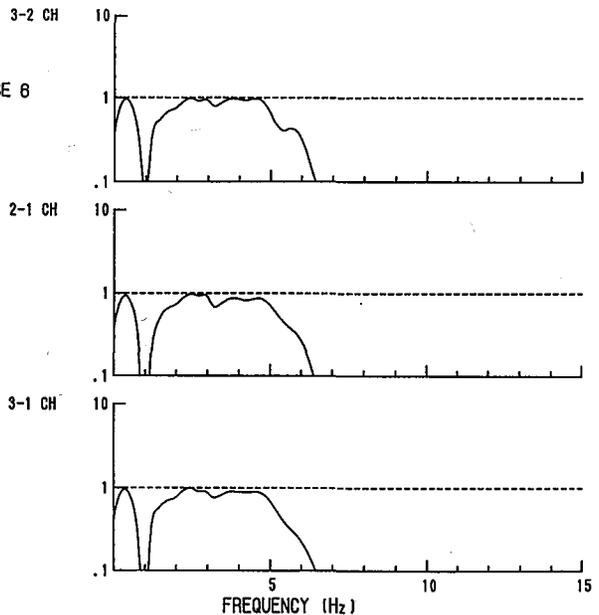


図6 各チャンネル間のコヒーレンシの例 (Base6, 1989年6月23日)

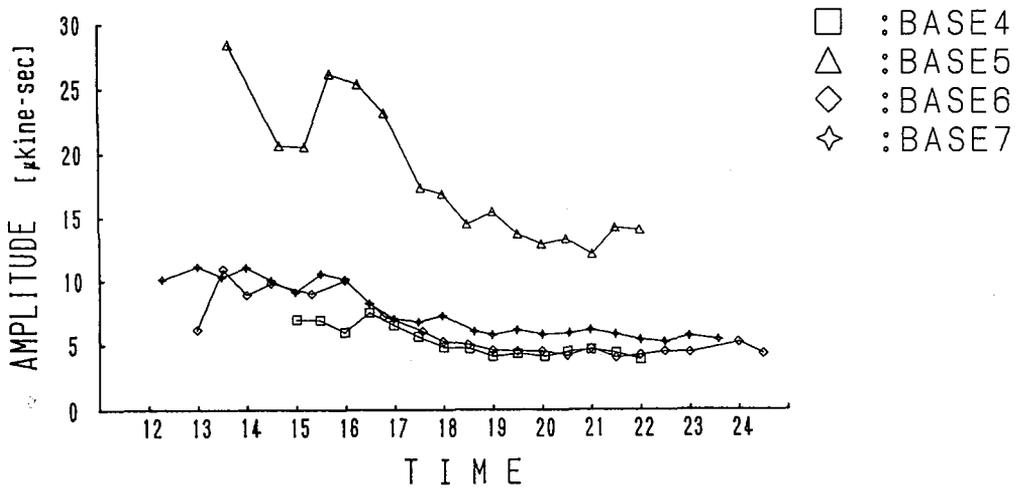


図7 各Baseにおける平均速度振幅の観測時刻による変化

FOURIER (U-D COMPONENT)
 PLACE: KOTEI 4 DATA NO.
 MAX: {H4-3A} 2.734(Hz) .0067(mkine-sec)

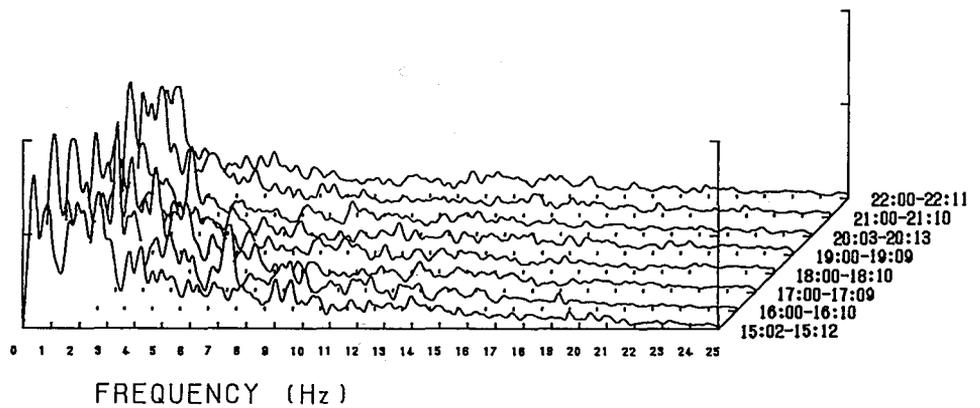


図8 観測時刻によるスペクトルの変化の例 (Base4,1ch)

A/D変換では解析できないことが明らかになった。そこで、各チャンネル間の相互相関関数は、2.048秒の区間ごとに0.00

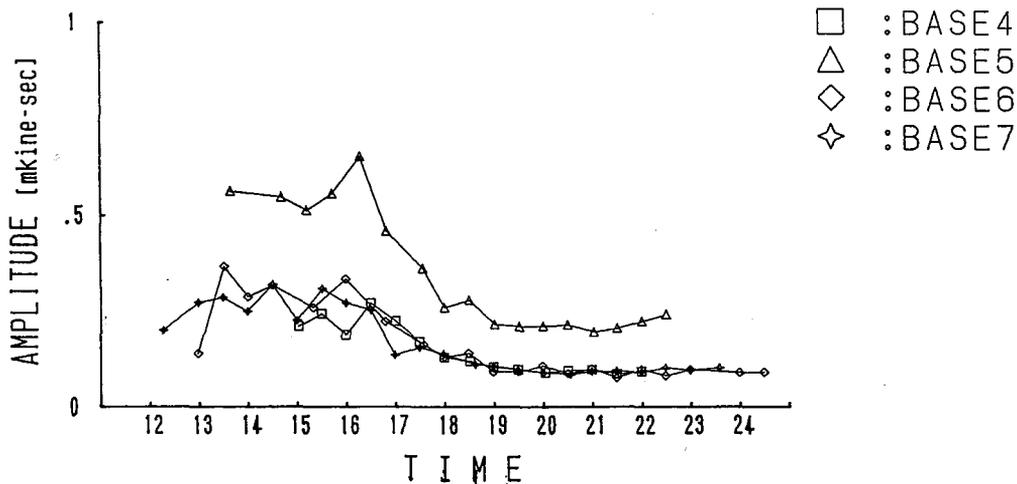


図9 観測時刻による2～6 Hzのフーリエ振幅の変化

1秒間隔でA/D変換して解析を行うこととした。また、時間遅れが0.001秒オーダーの場合には、個々のフィルターの特性が解析精度に影響するため、位相差の少ないフィルターを組み合わせ、解析を行った。

3-3 解析結果

通常、山間部では、微動の振幅は時刻による変化はほとんど見いだされていない。しかし、図7に観測時刻による平均速度振幅の変化を示すが、当区域では各Baseとも日中において振幅が大きく、夕刻に減少し、19時以降は低いレベルに安定する傾向を示している。図8に、一例として、Base4におけるch1の15時から22時までほぼ1時間おきでのスペクトルの変化を示す。1 Hz以下の脈動と推測される成分はほとんど変化せず、2～6 Hz程度のやや高周波の成分が夜間において減少している。図9に2～6 Hzの周波数帯のフーリエ振幅の変化を示すが、各Baseともその傾向が明らかであり、昼間においては特定の人為的振動源からの波が伝播してきて

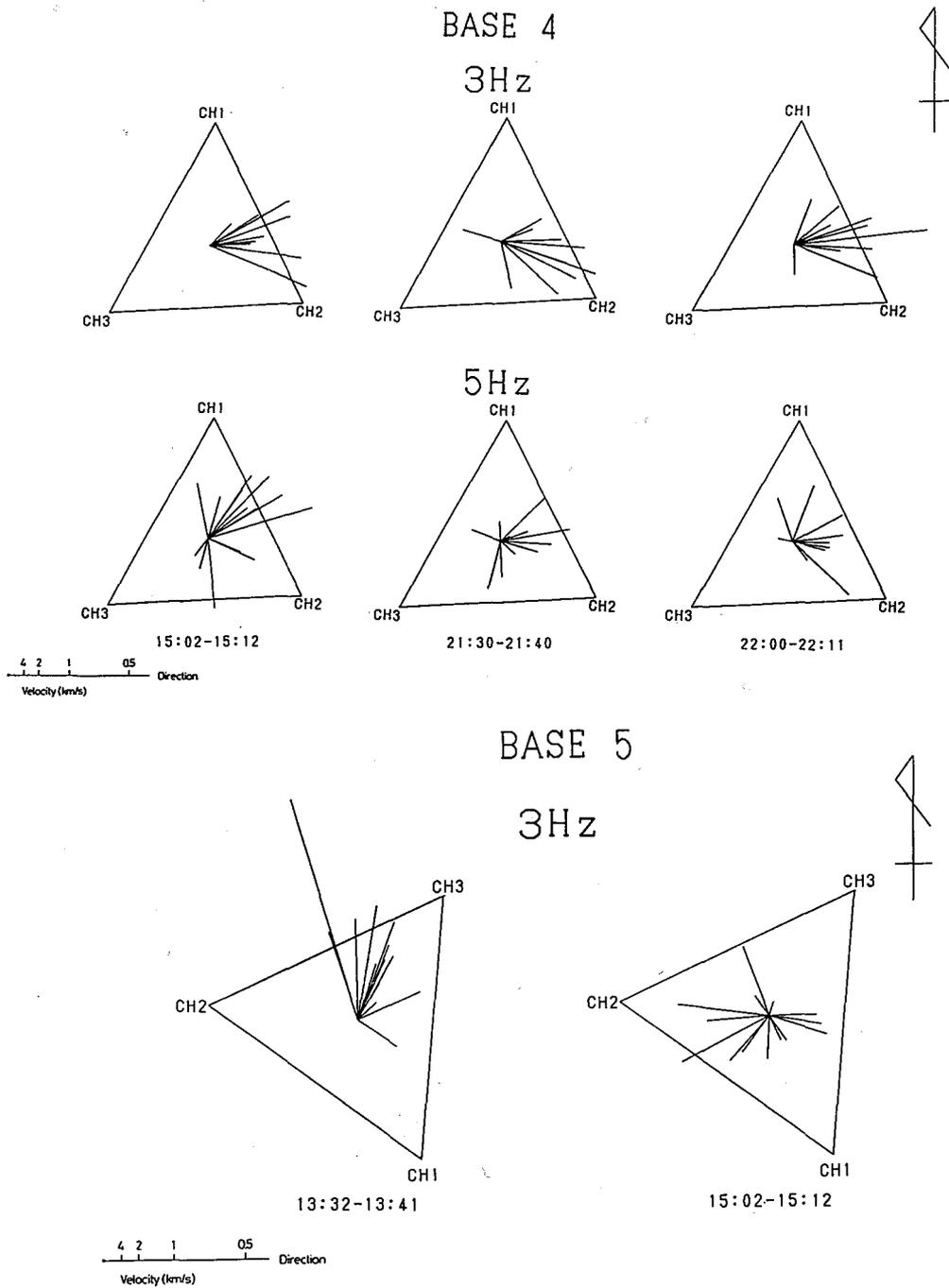


図10 Base4 および5における微動の到来方向

線の長さは見掛け速度（短いもの程速い）を表す

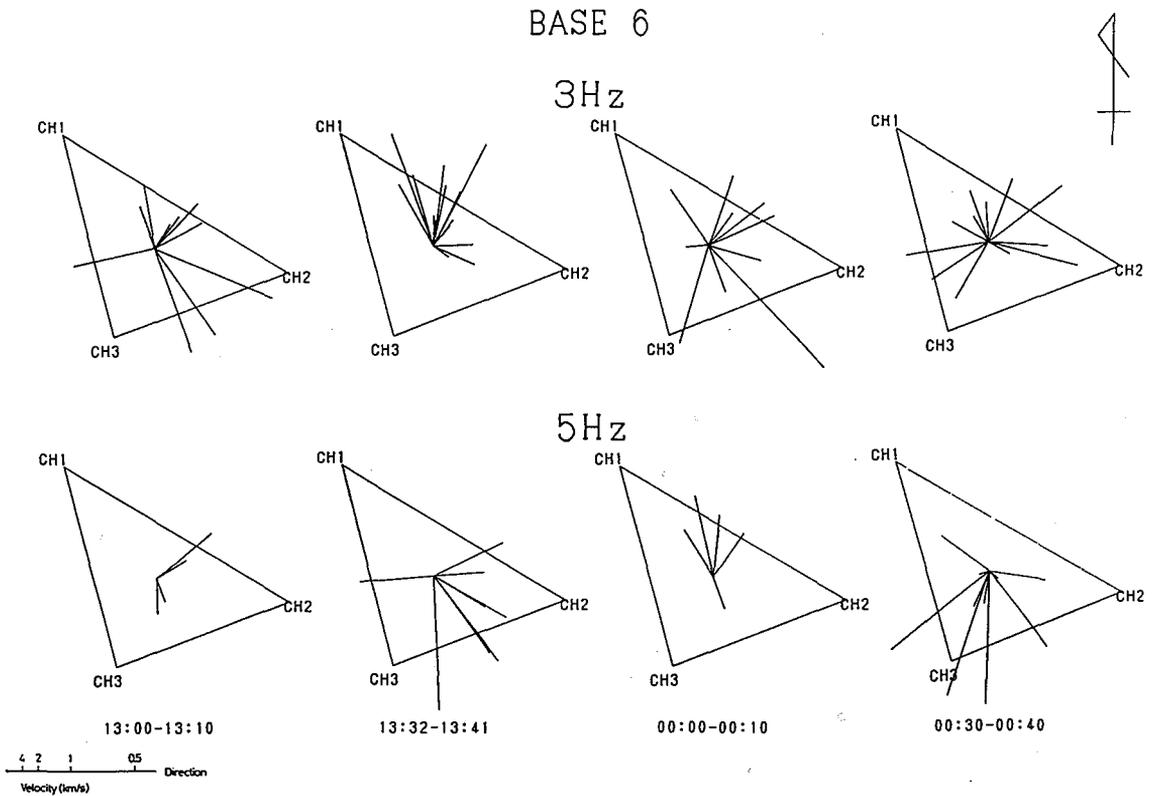


図11 Base6における微動の到来方向

線の長さは見掛け速度（短いもの程速い）を表す

いる可能性があるものと考えられる。

昼間および夜間でのスペクトルを比較すると差異が認められるものの、12時～17時および19時～24時の時間帯では変化がほとんど見いだされないので、到来方向の解析は昼間および夜間の2～3区間をとりあげて解析し比較検討を行った。また、解析の対象とする周波数は、各Baseに共通して含まれる3および5Hzをとり

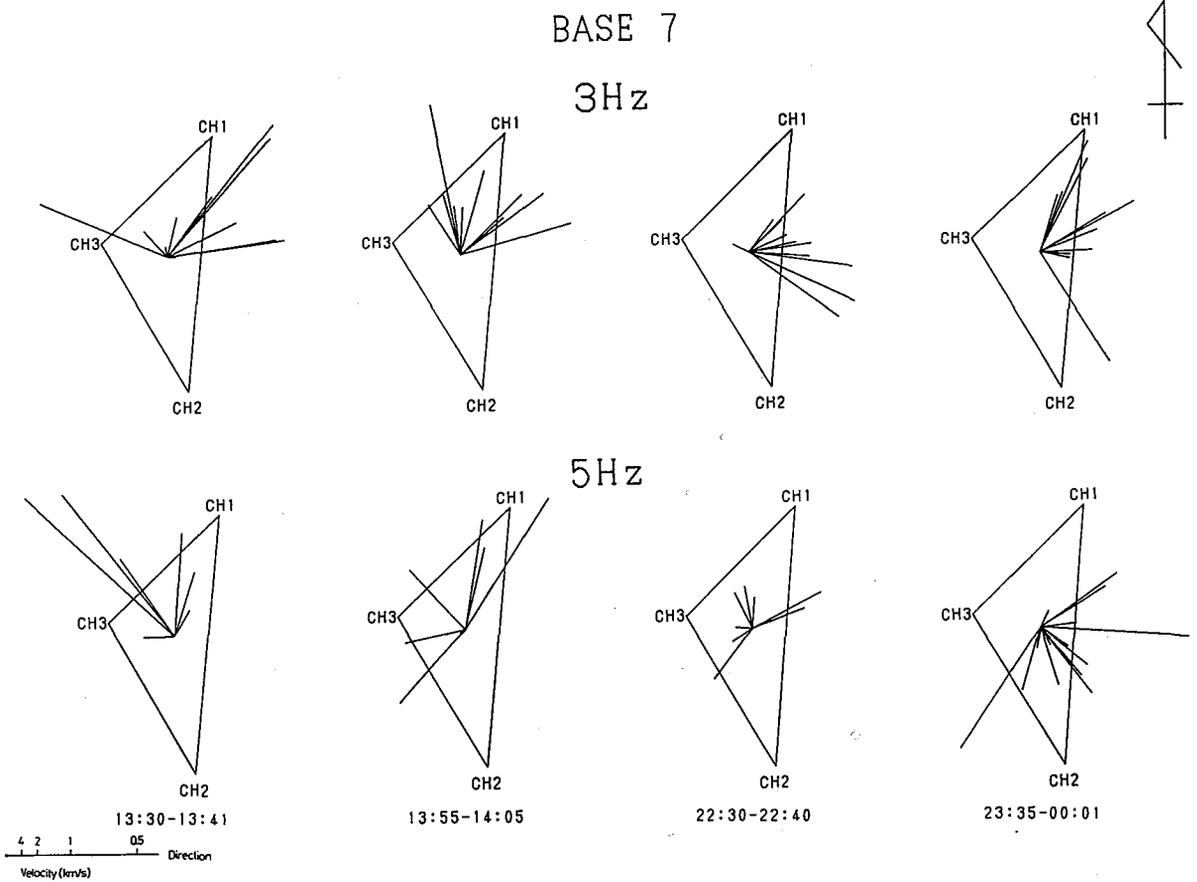


図12 Base 7における微動の到来方向

線の長さは見掛け速度（短いもの程速い）を表す

あげることとした。

図10～12に、各Baseにおける3および5Hzの微動の到来方向を示す。線の向きが到来方向を示し、線の長さが見掛け速度を示すが、ここでは見掛け速度の速い波は地下深所から到来することを表す意味で、速い波ほど短く表示している。Base5の5Hzの波は相関が悪く解析を成し得なかった。

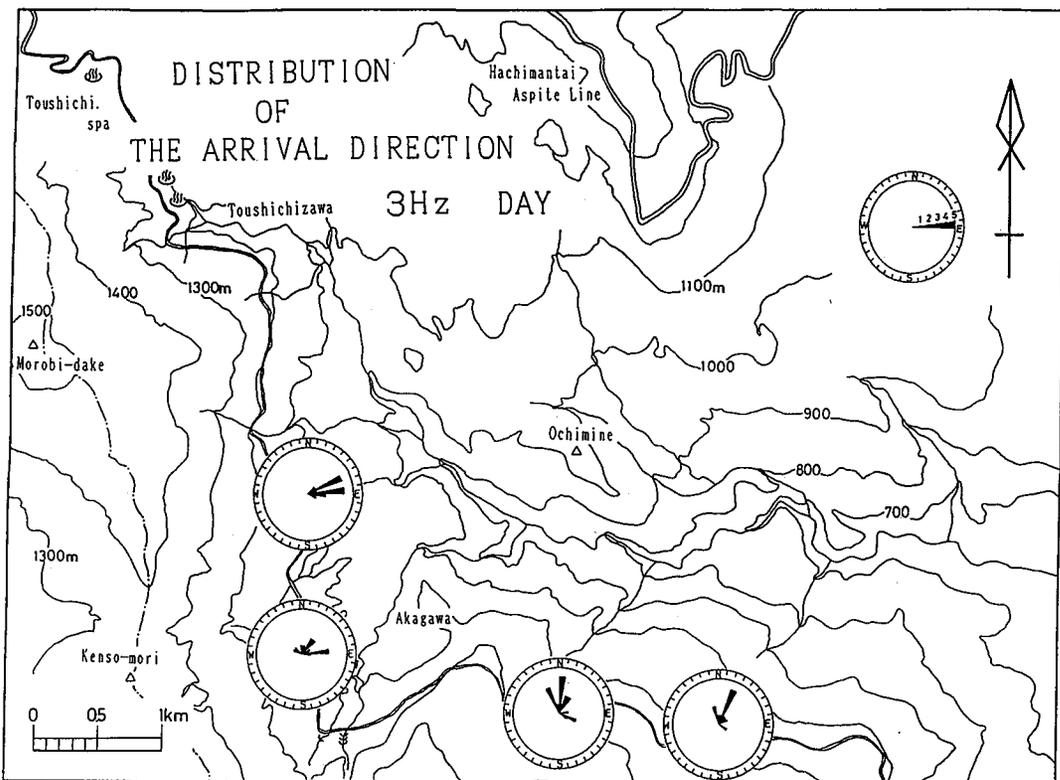


図13 昼間における3Hzの微動の到来方向

Base4の3Hzの波は、昼間の15時02分および夜間の21時30分・22時00分ともほぼ東から到来しており、一方5Hzの波は昼間および夜間とも到来方向はばらついている。

Base5の3Hzの波は、昼間の15時02分では到来方向がややばらついているが、13時32分では北東方向から伝播している。Base5の夜間は、わずかながら風があり、その影響のためか各チャンネル間の相関が悪く解析が出来なかった。また、5Hzについては昼間・夜間とも各チャンネル間での相関が悪く、解析を成し得な

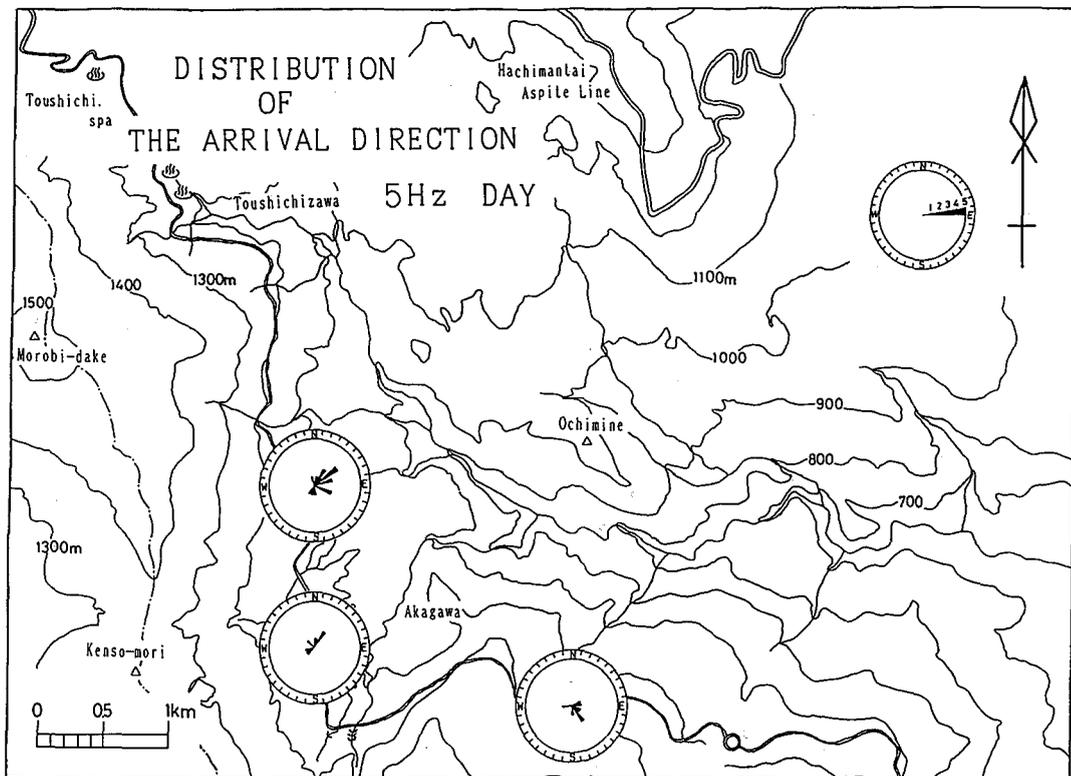


図 14 昼間における 5 Hz の微動の到来方向

えなかった。

Base 6 の 3 Hz の波は、昼間の 13 時 00 分ではややぼらつきがみられるものの 13 時 32 分では北東方向から到来している。夜間では 0 時 00 分および 0 時 30 分ともぼらついている。5 Hz の波は昼間および夜間ともぼらついている。

Base 7 の 3 Hz の波は、昼間の 13 時 30 分および 13 時 55 分とも北東方向から伝播しており、夜間の 22 時 30 分および 23 時 35 分とも東側から伝播している。5 Hz の波は、昼間は北西方向

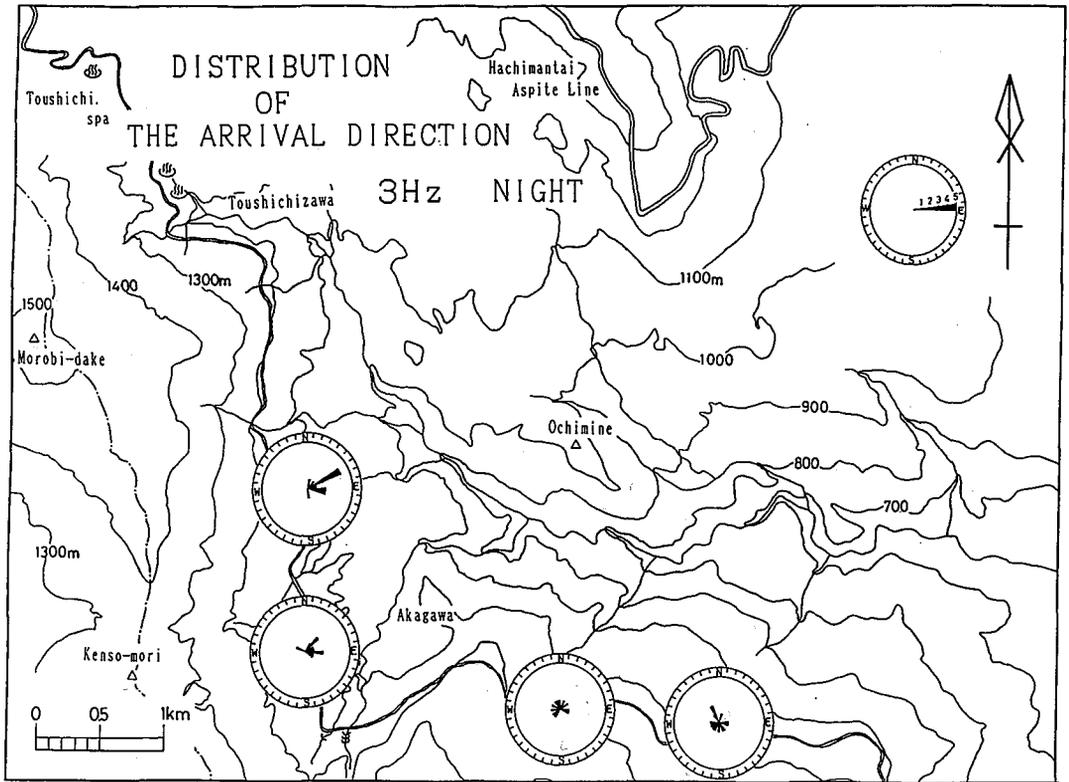


図15 夜間における3Hzの微動の到来方向

から伝播しており、夜間ではばらついている。

以上のように、5Hzの波の到来方向は各Baseともばらつきがみられるが、これは各Baseともチャンネル間の波の相関が5Hz以上で不良なためであろう。また、3Hzの波は昼間ではほぼ一定方向を示す傾向がある。

そこで、解析結果を10度ごとでのヒストグラムとして表示し、各Baseでの代表例を地図上にまとめた。その結果を、図13から図16に示す。5Hzの波は昼間および夜間とも一定の傾向を示さない。

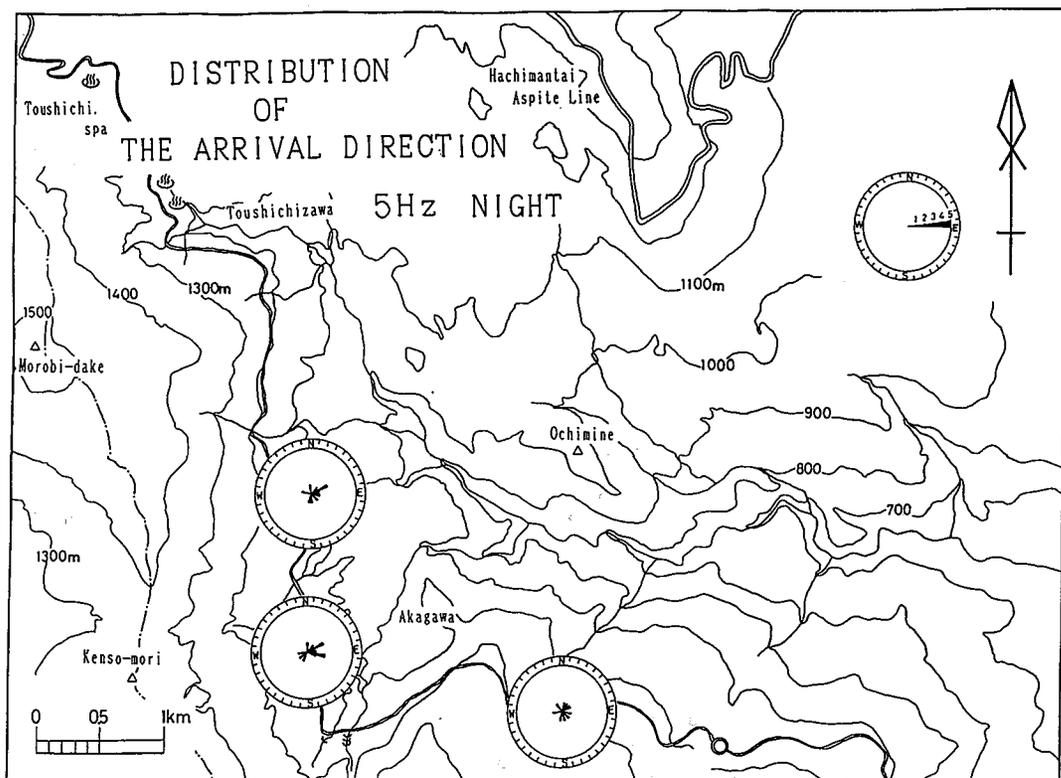


図 16 夜間における 5 Hz の微動の到来方向

一方、3 Hz の波の到来方向は、昼間では北の又沢上流方向に振動源が存在することを示している。測定期間中、北の又沢上流では岩手県企業局の北の又第 2 発電所の工事が行われており、通常の作業は日没には終了しその後人為的振動はほとんどなくなっていたことから、昼間に観測された 3 Hz の波は、発電所の工事に関連して発生していたものである可能性が大きいと考えられる。夜間においては到来方向は多方面にばらつく傾向を示している。

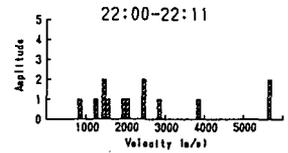
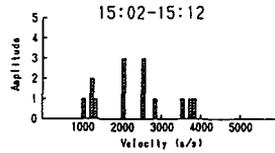
図 16 に、各 Base ごとの 3 Hz および 5 Hz の波の見掛け速度の頻

3Hz

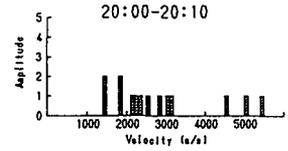
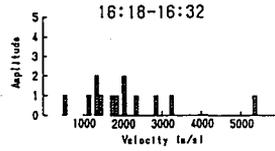
DAY

NIGHT

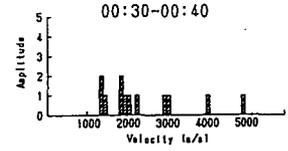
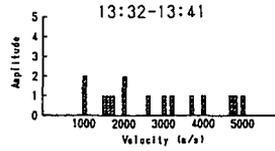
BASE 4



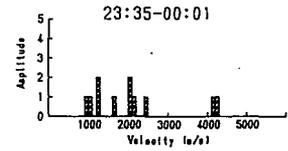
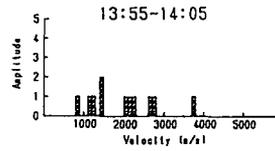
BASE 5



BASE 6



BASE 7

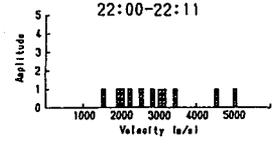
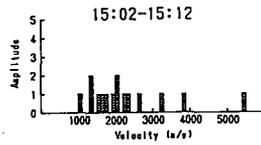


5Hz

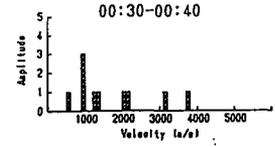
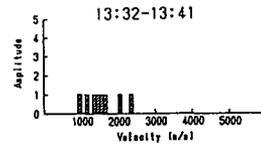
DAY

NIGHT

BASE 4



BASE 6



BASE 7

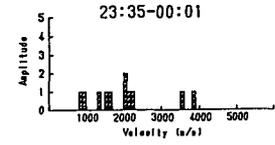
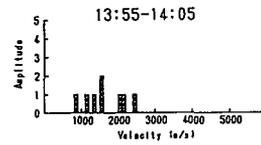


図 16 各 Base における 3 Hz および 5 Hz の波の見掛け速度の頻度分布

度分布を示す。見掛け速度は一般に $1000\sim4000\text{ m/sec}$ の範囲にあり、この値は数 100 m/sec 以下と推測される表面波の速度に比して著しく大きい。とくに、夜間における 3 Hz の波の速度が昼間に比して速い傾向があること、また、当地域の山体が新規火山噴出物から構成されていることを考慮すると、多方面に到来方向がばらついている夜間の 3 Hz は地下深所から伝播してきた波である可能性が大きい。

当地域における地下深部構造は明確にされていないが、NEDOによる地熱開発促進調査によると、当地域の地下数 $100\sim1000\text{ m}$ に地熱貯留層の存在が予測されている（NEDO：1983）。八幡平東部地域のその他の山間部では、 $2\sim5\text{ Hz}$ の振動はほとんど見い出されておらず、当区域で夜間に観測された 3 Hz 程度の振動は地熱活動に関連したものであるとするならば、トリパタイト観測による微動の到来方向の解析は、地熱貯留層探査の1手法として有用となりうる可能性を示唆しているものと考えられる。

3-4 結 び

八幡平東部地域の $2\sim6\text{ Hz}$ の地熱活動に関連している可能性のある振動が観測される4ヶ所でトリパタイト観測を行い、微動の到来方向および見掛け速度について検討した。

その結果、トリパタイト観測による微動の到来方向および見掛け速度の解析システムが構築され、精度良い解析が可能になるとともに、当地域で夜間に観測された 3 Hz 程度の波は地下深所から到来する実体波であり、深部の地熱貯留層に関連する可能性のあることが示された。

今後、多くの地域で同様の観測・解析を実施し、観測データの蓄積を行い、地熱地域の微動の特性を明らかにすることが必要と考えられる。

参考文献

- 1) 斎藤徳美・佐藤七郎・石川淳一(1988) 八幡平東部地域における地熱微動観測について、物理探査学会第79回学術講演会講演論文集、64-68
- 2) Saito, T., S. Saito and J. Ishikawa (1989) Seismic Noise Measurements in the Eastern Part of Hachimantai Geothermal Area, Northeast Japan, Proceedings of International Symposium on Geothermal Energy, 469-472
- 3) 新エネルギー財団(1983) 地熱開発促進調査総合解析報告書——No. 1 八幡平東部地域(第2次)

おわりに

本研究により、1点3成分観測による相関法およびトリパタイト観測による微動の到来方向の解析を行うための基礎的なシステムが構築され、本手法により地熱微動の到来方向を推定できる可能性が示唆された。

今後、多くの地熱地域での観測データを蓄積することにより、地熱微動法の実技上の有効性が深められるものと期待される。