

土木研究所資料

沖洪積層を対象とした物理探査 (その2)

VSP法の開発とその浅部地盤評価への適用

1990年3月

建設省土木研究所
地質化学部地質研究室

Copyright ©(1990) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

沖洪積層を対象とした物理探査 (その2)

VSP法の開発とその浅部地盤評価への適用

地質研究室 稲崎富士
長 沢政和
阿部昌彦※

要 旨

地盤内の弾性波の透過・反射伝播特性、すなわち地盤の動的特性を現位置で測定する方法として、近年石油資源探在分野においても適用されてきている VSP (Vertical Seismic Profiling: 鉛直弾性波探査) を取り上げ、土質地盤の高密度探査用のゾンデを開発し、試験孔において探査実験を行なった。

キーワード：沖洪積地盤，物理検層，VSP，伝達特性，減衰定数

※現：中部地方建設局浜松工事事務所

ま え が き

平野部の地下地質の調査法では、いわゆるボーリング調査が最も一般的な方法であることは言うまでもない。地表踏査、弾性波探査、電磁波探査等も行なわれはするが、いずれも概査段階や特殊な調査に限られており、主体がボーリング調査であることに変わりはない。おそらく国内では平野部の地下地質調査活動の90%以上をボーリング調査が占めているものと思われる。

ボーリング調査は、空間的拡がりを持つ地下地質構造に対して、1次元的な限られた情報しか得られない、全区間に亘って直接的な観察を行なっている訳ではなく、スライム観察やマシン操作情報から間接的な推定を行なっている場合がある等の問題点は有するものの、地下地質を直接確認でき、採取試験や孔内試験で設計・施工に必要な物性値を得ることができるため、他に換えられない優れた方法であると言える。

ボーリング調査に伴う標準的な孔内試験としては、その名の如く“標準貫入試験”がある。孔内での測定/試験法として他にもPS検層、電気検層、放射能検層等のいわゆる“物理検層”があるが、残念ながらこれらは土質地盤の地下地質調査法としては標準的なものにはなっていない。何故であろうか？例えば電気検層では地層の見掛け抵抗、自然電位等が測定され、それらから地層の判別を行なうことができる。放射能検層からも、密度、土質/地質の変化、間隙率等を評価することができる。PS検層では今のところ地層のP波、S波速度分布が求められている。これらの情報は、特殊な用途を除いて、現在、必要不可欠な情報であるとは言えないのが実情である。また情報の“質”も定性的なものが多い。とりわけ重大な点は、これらの情報が、設計・施工に必要な地質工学的パラメータと結びつけられていないというところにある。それに対して標準貫入試験で求まるN値は、経験的・統計的ではあるが多く設計・判定式に用いられている。N値がこのように広く用いられるに至ったのは、その測定法が単純で、特殊な装置を必要としないことが前提としてあり、そのメカニズム・因果関係が未だに明確になっているとは言えないものの、とにかく実態を何らか反映しているとの認識が土質技術者の間に拡がり、データが蓄積されてきたためと思われる。

それに対して物理検層が幾度かの適用性検討の機を経ても、未だに土質調査法として十分な市民権を得ていないのは、求められたデータが、N値とは異なり、工学的示標と結びつけられていないところに帰することができるだろう。

近年、土質地盤調査に、物理検層法を利用しようとする機運が、また高まってきている。これは、都市域の大深度地下空間開発が現実的課題となってきたが、大深度地下の調査法としてボーリング調査は地表条件の制約から制限を受け、各孔毎に各種情報を大量に収集することでそれをカバーする方向に進まざるを得ないことがあるからである。また、計測機器の長足の進歩によって、現在、殆んどの物理検層データはデジタルで収録されるようになってきており、加えて多変量解析、非パラメトリック解析等の統計解析手法を用いて、複数の検層データから工学的パラメータを推定する手法が開発されてきたことが背景としてある。

PS検層も以前は初動走時のみを解析に用いていたため、紙出力した波形をトレースアップして解析

したり、ダイナミックレンジのせまいアナログ記録を処理していた。それに対し、近年S/N比の高いデジタル記録が行なわれるようになり、初動部分のみならず、アフターフェイズ（後続波形）をも解析に利用できるようになってきた。VSPは主としてその後続波形に着目して地盤の速度構造・弾性波伝播特性を評価する手法である。このVSPを用いて、地盤の工学的特性の一つである動的性質を評価する手法の開発を目指して、専用のゾンデ開発と測定実験を行ってきた。本報告が、VSPの測定機器の改良・測定・解析条件の改善と同法の土質調査分野への定着への一助とならんことを期待する。

1990年2月

稲 崎 富 士

目 次

まえがき

1. 序 説	1
2. VSP用ゾンデの開発	3
2.1 仕 様	3
2.2 特性試験	9
2.2.1 振動台実験	9
2.2.2 微動測定実験	21
2.2.3 地震計エレメント校正実験	32
2.2.4 振動実験の結論	33
2.3 孔内測定	37
2.4 インナーショッカー	37
3. VSPデータ処理	39
3.1 VSP処理の流れ	39
3.1.1 編集および波形の合成	39
3.1.2 前処理	39
3.1.3 波動場の分離	40
3.1.4 最終処理	40
3.2 P波のVSPデータ処理	40
4. 浅部地盤評価への適用	42
4.1 浅層反射法探査記録の解釈	42
4.2 減衰特性の推定	44
4.2.1 多重反射波を利用する方法	44
4.2.2 スペクトル比法	45
5. まとめ	51
参考文献	52
付図	

1. 序 説

VSP (Vertical Seismic Profile) とは、地表に設置した振源で発生した弾性波を、多くの深度でボーリング孔の孔壁に地震計を圧着して記録する測定方法である。通常の屈折法・反射法弾性波探査では、振源・受振器とも地表に設置されるのに対し、VSPでは図-1に示される様に、90°方向が異なっていることが特徴である。この受振器系の配向の違いは、受振器の応答の変化をもたらすことになる。すなわち、地表に設置された受振器では、地中から地表に向ってくる上向波 (Upgoing Waves : 一次反射と層間多重反射波) しか観測されないのに対し、VSPでは下向波 (Downgoing Waves : 振源からの直達波および層間多重反射波が含まれる) も観測することができる。

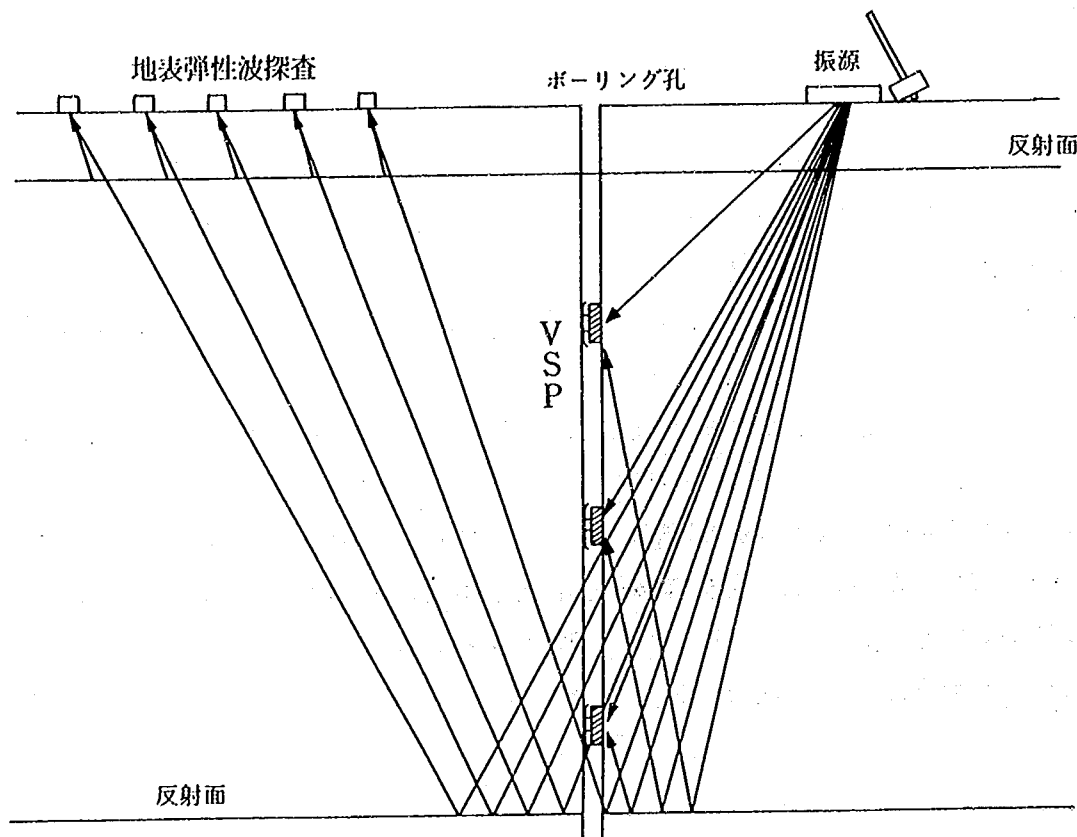


図-1 VSPと地表弾性波探査の比較

上述のようなVSPの探査法および取得データの特徴から、我々は次に示す種々の情報を引き出すことができる。

(1) 境界面の深度

地表面で実施される弾性波探査では、地下の情報は走時として時間軸上で間接的の深度情報として得られるに過ぎないがVSPでは、走時-深度の関係を情報として得ることができるので、境界面の深度を直接確認することができる上、地表での弾性波探査の解釈をより正確なものにすることができる。

(2) ボーリング孔近傍の地質構造

通常の zero offset VSPに加えて offset VSPを実施すれば、ボーリング孔近傍での地質構造の変化を解析することが可能である。平野部に広がる沖洪積地盤では、数10 mのオーダーで水平方向に地盤構造が急激に変化する場合があることが知られてきており、ボーリング調査間隔の適正化をはかる上でも効果的であろう。

(3) 地盤の伝達特性

VSPで観測される下向波・上向波は、地盤内の境界面で反射・透過を繰り返した波群であり、これらを解析することで、境界面の位置とその反射・透過特性、すなわち地盤の伝達特性を評価することができる。

(4) 区間速度

従来のPS検層と同様に、初動部分の走時解析によって、地盤内の区間速度を求めることができる。

(5) 減衰定数の現位置測定

深度に対する観測波形の変化に着目すれば、VSPデータから地盤の減衰定数を測定することができる。しかしそのためには、広い周波数帯域での記録と地盤の動きを忠実に記録することが必要不可欠である。地盤の減衰定数は、その増幅特性を評価する上で大変重要なパラメータであるにもかかわらず、従来、現位置での有効な調査法がなく、計算では便宜的に一定値を用いたりしていたが、VSPデータの解析によって正確な減衰定数の評価を行なうことが可能である。

VSPの測定方法は、原理的には従来のPS検層と同じである。ただし、PS検層では直達下向波の初動部分のみを解析の対象としているのに対し、VSPではそれに加えてアフターフェイズに含まれている下向波および上向波の全てを解析の対象とする。このようなVSPの記録から我々は、上述のように地下地盤内の成層構造、断層面の位置、波の伝達特性等の情報を抽出することができるが、そのためには現位置において地盤振動を歪ませることなく記録するシステムが必要である。そこでまず、VSP用に新しいタイプの検層ゾンデを開発した。

2. V S P 用 ゾ ン デ の 開 発

2.1 仕 様

V S Pでは前述のように、アフターフェイズを含めて全波形を記録・解析するため、現位置において地盤振動を歪ませることなく、忠実に変換するシステムを用意する必要がある。そのためのV S Pゾンデに求められる仕様について検討する前に、先ず、挿入するボーリング孔の仕様についてまとめたものが表-1である。

表-1 V S P測定ボーリング孔の仕様

項 目	諸 元
掘 削 孔 径	66mm ~116mm
掘 削 深 度	20m ~100m
泥 水 比 重	約 1.1
泥 水 粘 性	20 ~30 sec
ケーシングの有無	通常裸孔、孔口部を鉄ケーシングで保孔
水 位	状況による
温 度	常 温

これより、V S Pゾンデとしては、外径が50mm程度、耐圧15 kgf/cm²以上、耐熱性については考慮しなくとも良い等の必要要件を決めることができるが、他に、記録波形に影響を与えるものとして、以上の諸点についても留意する必要がある。

(1) ゾンデの形状・重量

V S Pにおいて問題となる雑音の一つに、孔内水中を伝播するチューブウェイブがあるが、この波のゾンデ先端部での散乱・反射を抑えるためには、先端部が円錐状を呈しているほうが良い。

またゾンデが小口径である程、ゾンデ内を伝播するチューブウェイブのエネルギーは小さくなり、その影響を受けにくくなる。また小口径であれば、孔径の小さなボーリング孔でも使用可能である。ただし裸孔の場合、掘削径が $\phi = 66\text{mm}$ であっても一部では100mm程度に広がっている場合があるので、孔径が変化しても圧着性を一定に保つにはあまり小口径にすべきではない。

地表に設置する地震計では、重量が軽く接触面積が大きい程良好な信号が得られることが知られている。同じことがV S Pゾンデにも言え、ゾンデ重量は軽く、かつ大きな接触面積を持つことが要求される。しかしながら、接触面積を大きくするにはゾンデの径を大きくするかゾンデ径を長くする必要があるが、これは相反する効果があるため、ゾンデ内の構造、耐水・耐圧性および圧着機構から適切なゾンデ形状を検討することが求められる。

(2) 圧着方式

V S Pではゾンデを孔内で上下方向に移動し、各深度で孔壁に圧着させて測定する。したがって移動時にジャミング事故を起こさない様、ゾンデの外部に圧着部が突出していないこと、すなわち引込式に

なっていることが必要である。また振動波形の定量的な議論をするには、圧着力をゾンデ重量の少なくとも2倍ないし4倍にすることが求められる。

表-2は、VSPゾンデおよびPS検層ゾンデに採用されている圧着方式の種類とその特徴についてまとめたものである。

表-2 圧着方式の種類

方 法	原 理		利 点	欠 点
ゴム風船型	空気圧	ゾンデ側面にゴムチューブをとりつけ、地表から空気を送り風船状にふくらませて孔壁に押しつける。	機構が簡易 安 価	ゴムチューブが破裂しやすい。カップリング状況が複雑で波形の議論ができない。
バネ型	復元力	バネの持つ復元力を利用して、ゾンデを壁に押しつける。	機構が簡単で修理しやすい。	動作に不確実性がある。 強い力では押しつけられない。
ピストン型	空気・油圧	ゾンデ横方向にとりつけた圧着板を側壁に押しつける。	確実に強い力で押しつける。	機構が複雑
モーター式 (電磁式)	電気	ピストンのかわりにモーターあるいは電磁石で圧着板を押し。	同 上	機構が複雑 電磁石の場合、ノイズが混入する恐れがある。

(3) ゾンデー孔壁カップリング測定システム

VSPデータを用いて地盤の減衰や境界面の反射係数等を求めるには、地震計-地層間の伝達関数、すなわち、位相および振幅特性を知る必要がある。その方法として、代表的なものに①：ゾンデ内に正確に制御できる機械的な振動子を内装し、それで地震計エレメントを測定周波数範囲で振動させる方法、②：地震計エレメントに機械的にインパルスを与えてその応答を調べる方法がある。いずれにおいても、地震計エレメントの応答記録を解析して、ゾンデー孔壁のカップリング特性が各深度で一定となる様に伝達特性を修正する。このカップリングテストでは、入力として与えるインパルス振動が一定に保たれていなければならないのは言うまでもない。

(4) ゾンデの方位測定システム

S波のVSPデータ処理等では、波動の伝播方向を把握することが必要不可欠であり、そのためには

ゾンデの孔内での固定方位を測定するシステムが要る。その方法としては①：地表からロッドを接続して、方位を確認してからゾンデを圧着させる。②：ゾンデに磁石をとりつけ、方位を測定する。③：レーザージャイロスコプを用いる。④：起振方向を限定し、間接的に推定する。等があるが、各々、①では煩雑な作業となる、②では鉄ケーシング中では測定が不可能となる、③は非常に高価である、④は間接的方法であり、厳密な波形処理が行えないという問題点を有している。

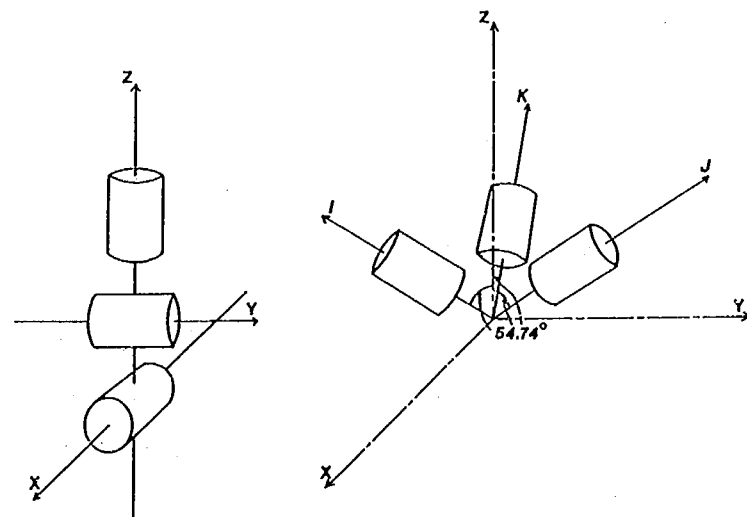
(5) 同時多点観測システム

VSPでは理想的には一回の起振で全深度の波形観測を行なうことが望まれる。これは、各起振を一定に保つことが不可能であり、その差違が後の波形解析に影響するからである。しかしながら、同時多点観測は、ゾンデの長大化、複雑化、制御の困難性を生ずるため、2～6点での同時観測が試行されているに過ぎない。

(6) 地震計エレメントの配置

VSPのデータ解析として、反射境界の位置決定やS波の主振動方向を決定するためには、ホドグラムを作成しなければならず、そのためには、少なくとも3成分の波形観測が必要不可欠である。

3成分の地震計の配置には、図-2(a)に示す直交3成分系と図-2(b)に示す 54° 傾斜3成分系とが考えられる。



(a) 直交3成分系

(b) 54° 系

図-2 ゾンデ内の地震計エレメント配置 (稲崎ほか, 1989a)

従来の検層ゾンデでは、図-2(a)の直交3成分系が採用されていた。この配置にはしかし、①：水平動・上下動用の地震計を使用し、同一規格の地震計を用いたとしても同じ特性が得られるか否が不明である。②：孔壁と地震計のカップリングの状態が水平動と上下動用で異なる。③：孔軸方向に間隔をあけてエレメントを配置するため、一点の運動に追随できない、という問題点を有していた。それに対し、直交座標系を 54° 傾け、Z軸に対して対称、水平面で 120° 間隔とした図-2(b)の配置では、①：傾斜の影響は3成分とも同等であり特性の変化が生じない。②：孔壁と地震計のカップリング効果はどの地震

計でも等しい。③・孔壁とゾンデのカップリングの校正を容易に行なうことができる、等の利点がある。しかし、直交3成分系の各問題点については、①についてはオフセットVSPのデータ処理を行なわない限りは、水平動成分と上下動成分記録を分離して扱うため、特性が必ずしも一致している必要はない。②については、孔軸方向とそれに直角な水平面方向ではカップリングの効果は地震計エレメント配置にかかわらず同一ではないので、別々に校正すべきである、という解決方向が示される、一方、54°系配置では、水平成分のホドグラム作成に先立って直交系への座標変換を行なわなければならない、データ処理が煩雑となるという問題点がある。直交系と54°系の応答の間には次の関係式が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} A_x(t) \\ A_y(t) \\ A_z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sqrt{\frac{1}{2}} & 0 & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ -\sqrt{\frac{1}{6}} & \sqrt{\frac{2}{3}} & -\sqrt{\frac{1}{6}} \\ \sqrt{\frac{1}{3}} & \sqrt{\frac{1}{3}} & \sqrt{\frac{1}{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_I(t) \\ B_J(t) \\ B_K(t) \end{bmatrix} \quad \cdots (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} B_I(t) \\ B_J(t) \\ B_K(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sqrt{\frac{1}{2}} & -\sqrt{\frac{1}{6}} & \sqrt{\frac{1}{3}} \\ 0 & \sqrt{\frac{2}{3}} & \sqrt{\frac{1}{3}} \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & -\sqrt{\frac{1}{6}} & \sqrt{\frac{1}{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x(t) \\ A_y(t) \\ A_z(t) \end{bmatrix} \quad \cdots (2.1')$$

以上の諸点を考慮して、VSP用の新しいゾンデを開発した(稲崎他, 1988)。主な特徴は、①: 地震計エレメント配置に54°傾斜3成分系を採用し、校正用の上下動1成分を含め4成分測定としたこと、②: インナーショッカーを内装し、ゾンデ・孔壁カップリングの校正を可能としたこと、③: 圧着方式として、空気圧によってピストンを水平に押しつける方式を採用し、ゾンデユニット重量の約4倍の横方向の圧着力を確保したこと、④: 2ユニットのゾンデ連結を可能としたこと、である。

ゾンデの仕様を表-3に、また構造を図-3に示す。

表-3 VSPゾンデの仕様

項 目	仕 様
外 径	50 mm
長 さ	453 mm／ユニット
重 量	4 kg／ユニット
耐 圧	30 kgf／cm ²
材 質	ステンレススチール
地 震 計	数量：4／ユニット
	型式：GS-14-L3
	固有周波数：28 Hz
配 置	上下動：1成分
	54°系：3成分
較 正 装 置	インナーショッカー方式
	ソレノイド
圧 着 装 置	ピストン圧着方式
	ガス圧：約15 kgf／cm ²

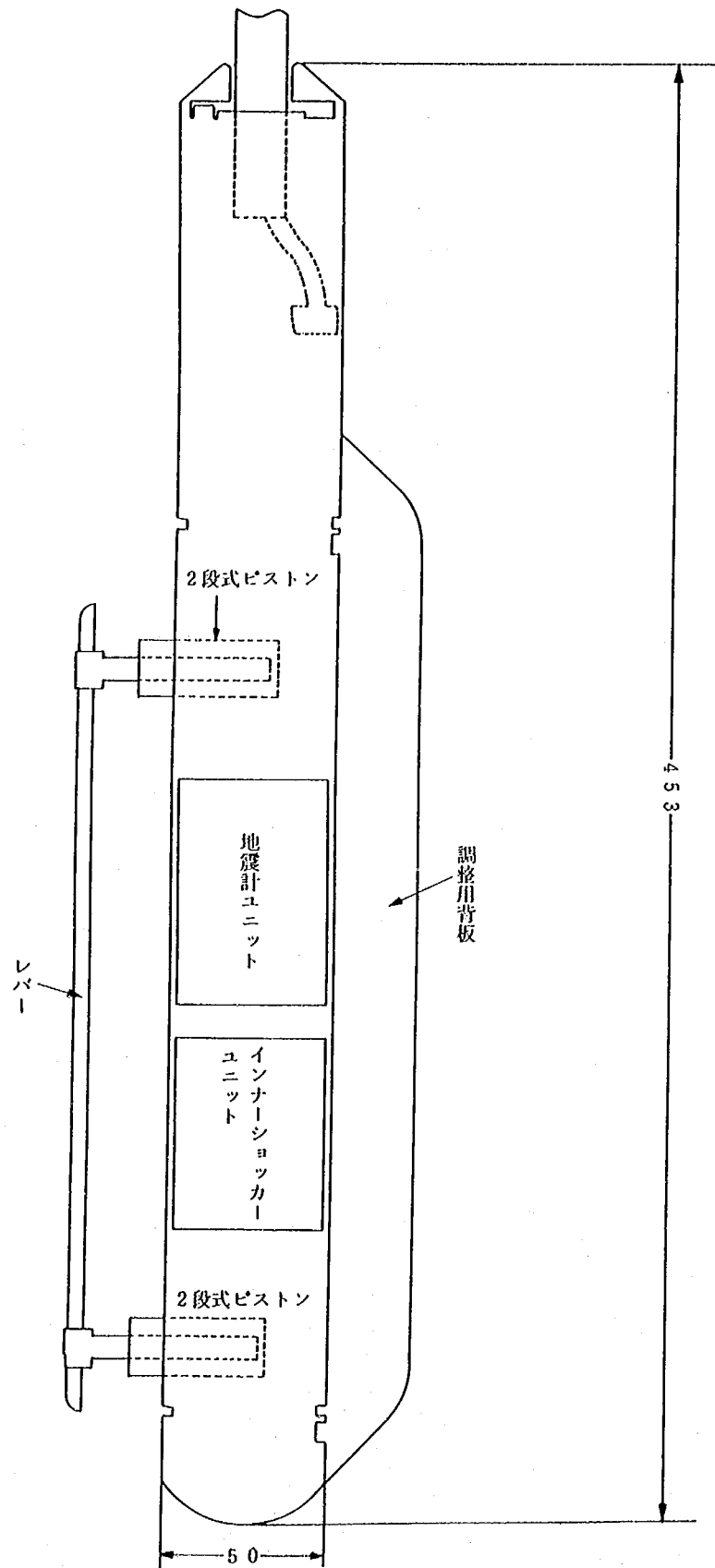


図-3 VSPゾンデの構造

2.2 特性試験

2.2.1 振動台実験

ボーリング孔内に挿入して、現位置での弾性波信号をフルウェーブで観測するVSP検層ゾンデの作成にあたって、ゾンデ内に据付ける地震計ユニットの特性を把握するために、振動台を用いて振動実験を実施した。

1個の地震計単体を地震計エレメントと称し、いくつか(3~5個程度)の地震計エレメントを1つの容器内に実際の検層用ゾンデ内に装着させる様に組み合わせたものを、地震計ユニットと称することにする。

今回実験に用いた地震計ユニットとその中の地震計エレメントの配置を図-4および図-6に示す。

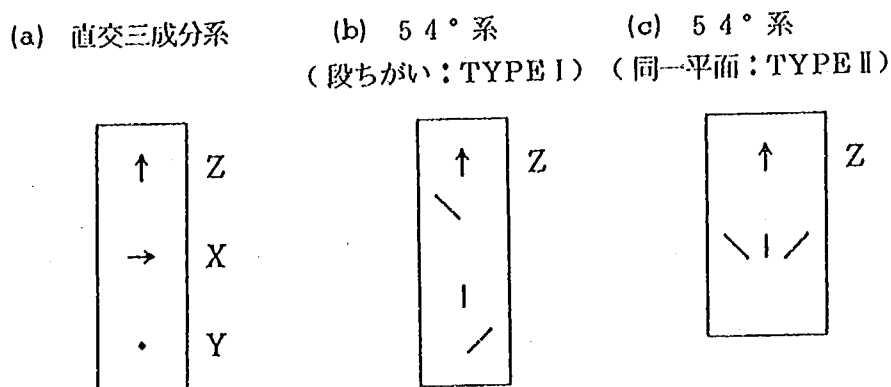


図-4 地震計エレメントの配置

図-4(a)の直交3成分系は、3個の地震計エレメントを直交座標系のXYZ軸に配置したもので、従来からPS検層用ゾンデ等に採用されてきたものである。この配置ではしかし、地震計エレメントは、孔軸上に離れて配置されており、同一平面上には設置されていない。すなわち、各軸は一点では交わらない。

図-4(b)と(c)の54°系では、3個の地震計エレメントを鉛直軸から約54°傾け、また鉛直軸方向から見ると互いに120°の角度を持つように配置した。なお3個の地震計エレメントの配置軸は互いに直交している。またこれらのエレメントの他に、校正用として上下動成分のエレメントを加え、計4個のエレメントで構成されている。(b)と(c)の違いは、(c)のユニットでは3個のエレメントを同一平面内に配置しているのに対し、(b)のユニットでは、異なるレベルに配置していることである。したがって(c)では各軸が1点で交わるのに対し、(b)では(a)と同様に各軸は互いに交わらない。

弾性波信号の測定にあたっては、理想的には質点の動きに対応できるように、各エレメントが同一平面にあり、かつ軸が一点で交わることが求められる。とりわけ、ゾンデの圧着装置が1体しかなく、孔径が変化している場合には、ゾンデが孔内で傾いたり、回転する可能性があるため、異なったレベルにあるエレメントでは一質点の動きに追従できなくなる。石油資源探査でのVSPでは、観測する弾性波は振源距離が大きいため平面波と見なして良く、また波長も数10m以上と見積られるので、レベルの

違いは実用上、無視することができる。しかし、浅部地盤を対象としたVSPでは、観測波形は球面波として扱われ、またその波長もS波探査では1 m前後となるため、可能なかぎり、同一平面に配置することが求められる。しかし、図-4にも示される様に、地震計エレメントが有限の大きさを持つため、同一平面への配置は、ゾンデの口径を増大させてしまうことになるので、実際的な配置は、ゾンデ口径の条件によって制約を受ける。

試験方法

試験方法は、振動台によって上下方向および水平方向の単一周波数の正弦波振動を発生させ、その振動に対する各ユニットの地震計エレメントの特性を測定することによって行なった。

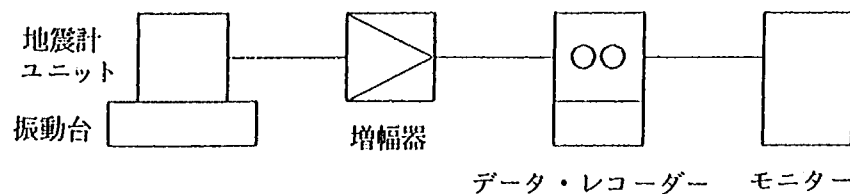
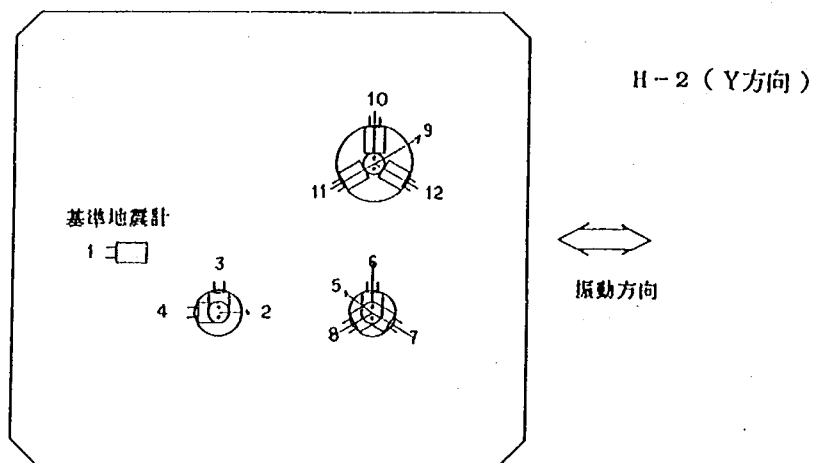
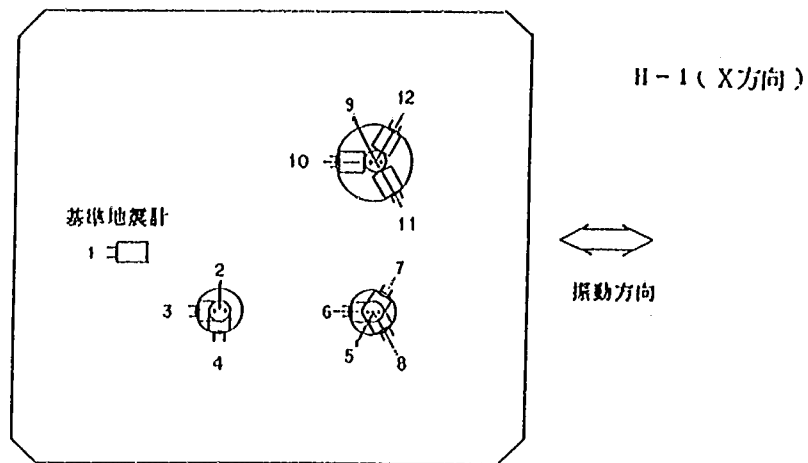


図-5 振動実験時の測定系

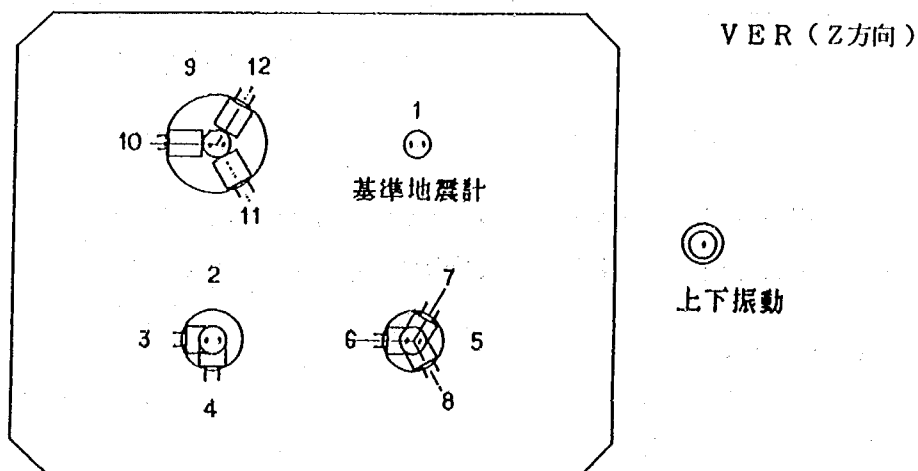
実験時の測定系を図-5に示す。測定した信号は計12チャンネルであるが、測定系によって各チャンネル毎の特性が変化しないように調整を行なった。しかし、各測定間においては、測定データから判断すると、測定系の特性が一定に保たれていなかった可能性がある。

振動方向による各ユニットの特性変化を調べるために、水平方向2方向および上下方向の3方向について測定を行なった。以後、水平方向の振動と測定記録をH-1（X方向）およびH-2（Y方向）、上下方向のそれをVER（Z方向）と称することにする。

各振動方向の測定時の地震計ユニットの設置状況を図-6(a)~(b)に示す。測定時には、図-4に示した3種の地震計ユニットの他に、基準用地震計として地震計エレメントの単体をそれぞれの振動方向に向け、直接振動台に固定している。振動台への各ユニットの固定には油粘土を使用した。また設置方位は振動台上に刻まれている示標を参照に目測で確認した。したがって、振動方向と地震計ユニットの方位との一致性は厳密には保たれていない。



(a) 水平方向の振動 (H-1, H-2) の場合



(b) 上下方向の振動 (VER) の場合

図-6 振動台上での地震計ユニットの配置

解析方法

測定データの解析にあたっては、まずデータレコードに収録したアナログデータをA/D変換し、デジタル化し磁気テープに書き込む。このデータを計算機で処理し、解析を行なった。

以下に、解析方法について項目別に述べる。

(1) 前処理

測定時およびA/D変換時の増幅器のゲイン補正、A/D変換値から実電圧値への変換を行なった。また54°系の地震計ユニットの記録については、直交3成分系データとの比較のため、(2-1)式に従って座標変換を行なっている。

ここまでの処理の流れを図-7に示す。

(2) 振動周波数の決定

振動台の指示計に表示される値が、必ずしも実際の振動の周波数と一致しないことから、測定記録より、ピーク法およびゼロクロッシング法を用いて振動周波数を決定した。

(3) 入力速度値の計算

振動台の変位指示計の読取り値 (mmp-pの単位) から、速度値 (単位はkine) へのデータ変換を行なった。変換にあたっては、振動台の振動が単一周波数の正弦波振動とみなせることから、以下の式を用いて変換した。

$$V_{in} = \omega \cdot D / 10 \quad \dots (2.2)$$

各パラメータとその単位は、

V : 入力速度 (kine = cm/sec)

ω : 角周波数 (sec⁻¹, $\omega = 2\pi f$)

D : 変位 (mm)

である。

(4) 周波数特性 (振幅および位相特性) の計算

測定記録は、前述のように単一周波数の正弦波とみなすことができる。従って理論波形を

$$I(t) = A \sin(\omega t + \phi) \quad \dots (2.3)$$

とし、測定記録を最もよく表わすことのできる様な振幅Aと位相 ϕ を読み取る。

各振動周波数に対する振幅特性は、振動台の入力速度値 V_{in} と地震計エレメントの出力振幅の比をとり、

$$A / V_{in} \text{ (Volt/kine)} \quad \dots (2.4)$$

の値として表示した。

また振動周波数に対する位相特性は、振動台の速度波形を直接測定できないため、基準地震計の位相 ϕ_r と測定波形との差をとり、

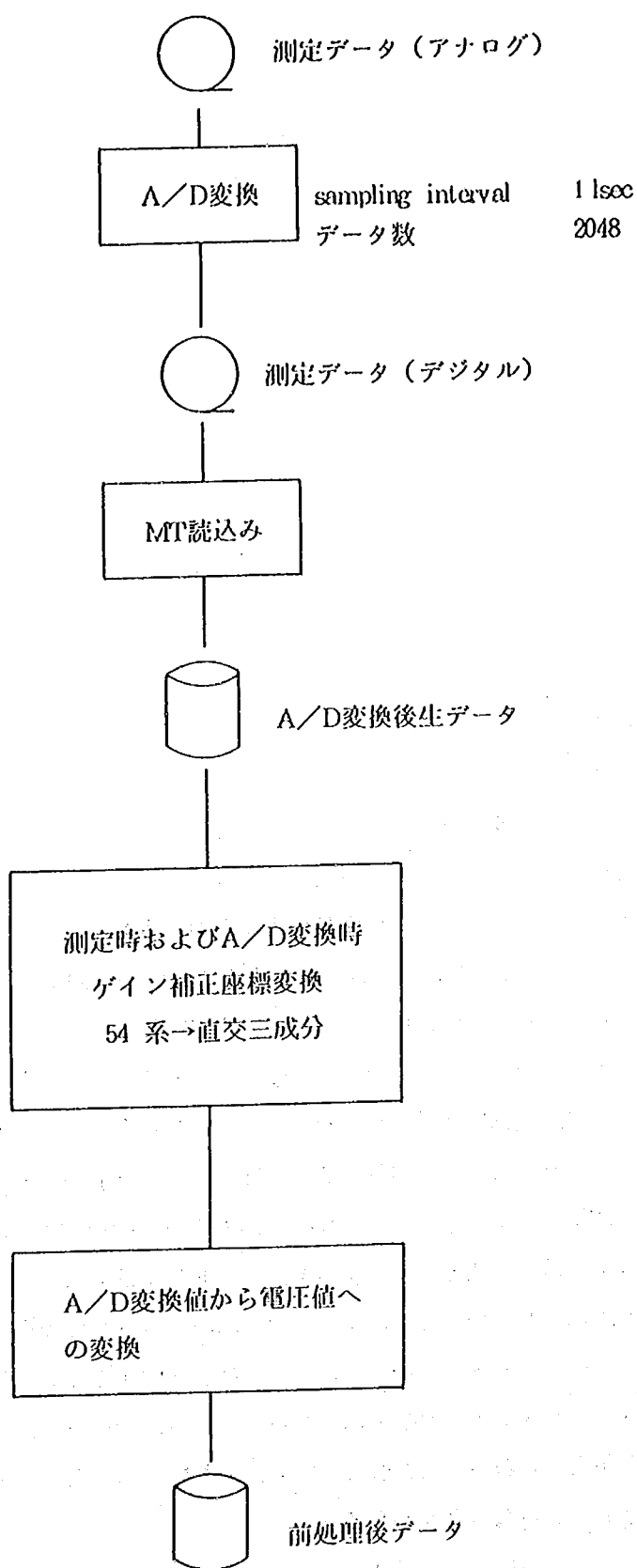


図-7 前処理の流れ

から計算した。

(5) ホドグラフの作成

2次元平面 (XY, YZおよびZX平面) 上で, 各地震計ユニットによる測定波形がどのような波形を描くかをみるために, ホドグラフを作成した。

直交3成分系では, 3個の地震計エレメントの出力波形のうち, 2つの波形から各々の平面でのホドグラフを作成している。それに対し54°系地震計ユニットに対してはまず式(2.1)で直交系に座標変換した合成波形からホドグラムを作成した。

(6) 振幅・位相特性の各エレメント・成分間コヒーレンス

(5)で求めた周波数特性(振幅および位相特性)から, それらの各エレメント間, あるいは合成出力成分間のコヒーレンスを計算した。

計算は各地震計ユニットで行ない, 振幅特性については基準地震計との感度比をとった。また位相特性については, (2.4)式で求めた位相差の値を用い, 地震計ユニット内における振動方向のエレメントあるいは合成波形の特性を基準とし, 他のものとの差を求めた。

解析結果

各地震計ユニットでのエレメント出力および合成波形とホドグラフの出力結果の一部を図-8および付図-1に示す。なおホドグラムは3枚が一組となっており, 振幅は3成分のうちの最大値で正規化しているので, 各ユニット間のホドグラフ上での振幅比較は意味を持たない。

振動方向の成分の出力のみが大きく, それと直交する2成分の出力が零であるのが理想であるが, 図-8および付図-1に示されるように, その要件はほとんど満たされている。しかし, Y方向(H-2方向)振動でのタイプIの54°系では, X方向成分にもある程度の出力があり, ホドグラムがX方向に傾いているのが認められる。この傾向は他の周波数での測定結果に共通して認められることから, Y方向振動実験でのタイプIの地震計ユニットの軸が振動方向と一致していなかったものと推定される。

直交3成分系は, 振動方向, 振動周波数にかかわらず, 良好な結果が得られている。すなわち, 振動方向と一致したエレメントのみが応答しており, 他の方向のエレメントからの出力は微弱である。一方54°系ユニットでは, 他方向への振動の“もれ出し”が直交3成分系に比べて大きい傾向が認められる。これは, 直交3成分系では, 各成分に対応するエレメントが1個であるのに対し, 54°系では2ないし3個のエレメントが応答しているので, エレメント間の微少な特性の違いが“もれ出し”の原因となっているのかも知れない。エレメント間のこのような特性の違いを除くことは一般に不可能であるので, なるべく多数の地震計エレメントについて試験を行ない, 特性のそろったものを選び出すことでその影響を小さくすることが求められる。また直交3成分系においても, 特性の違いを検討するためには, 軸方向以外の方向で振動実験を行なう必要がある。

図-9は振動方向H-1(X方向)での各地震計ユニットの各成分の振幅, 位相特性を調べたものである。また付図-2に全振動方向での各ユニットの周波数特性を示す。

Vertical (60Hz)

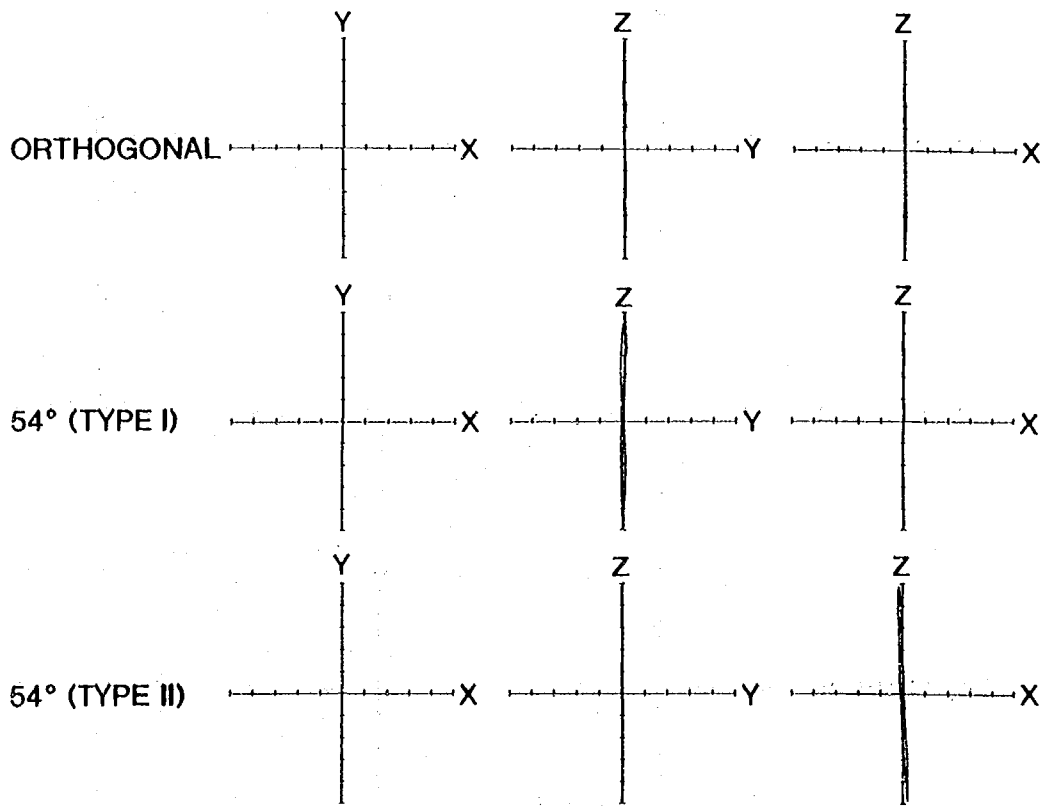
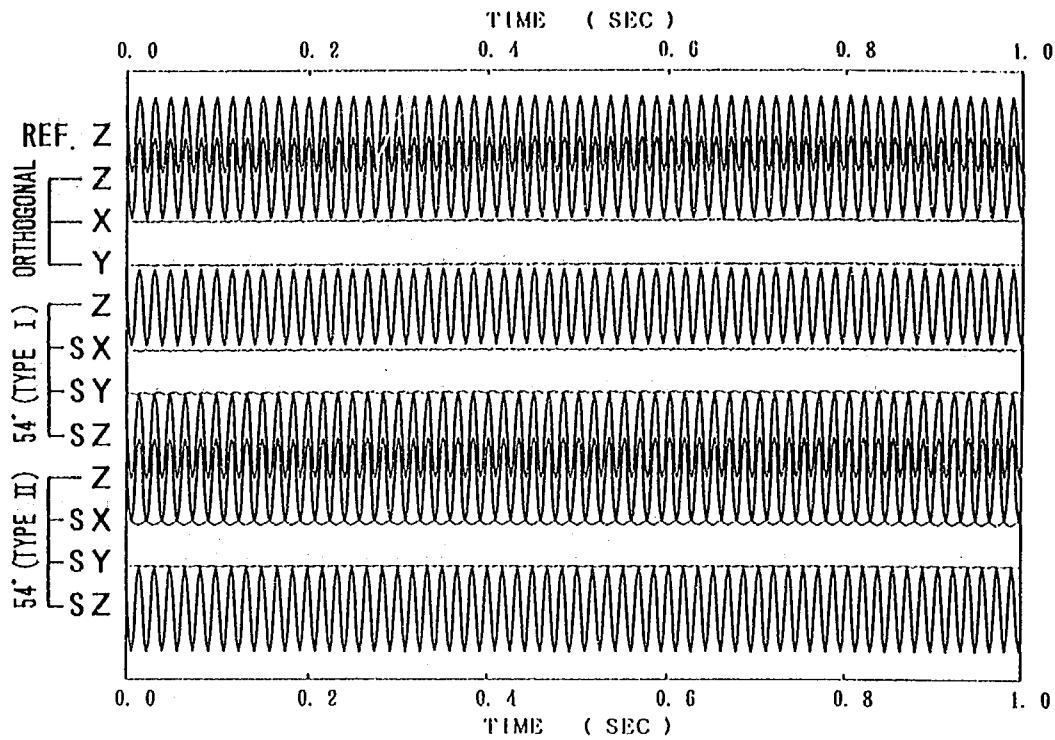


図-8.1 VER方向振動

図-8 振動波形およびホドグラム (60Hz起振時)

X:(H-1) (60Hz)

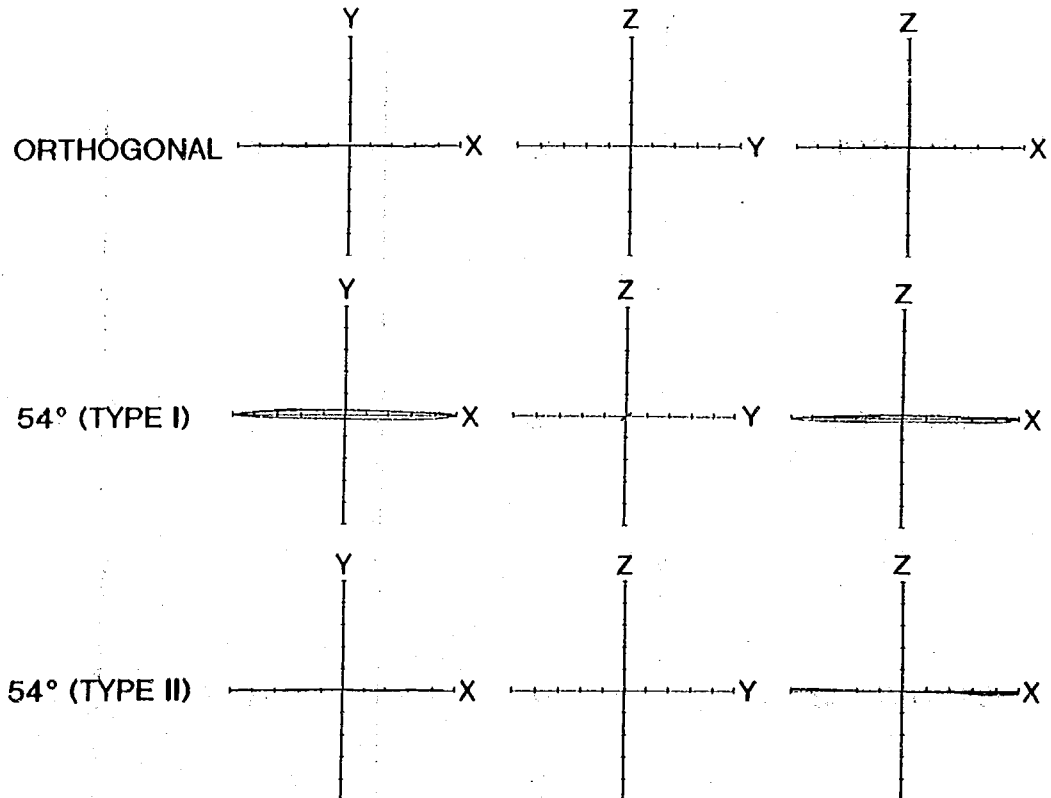
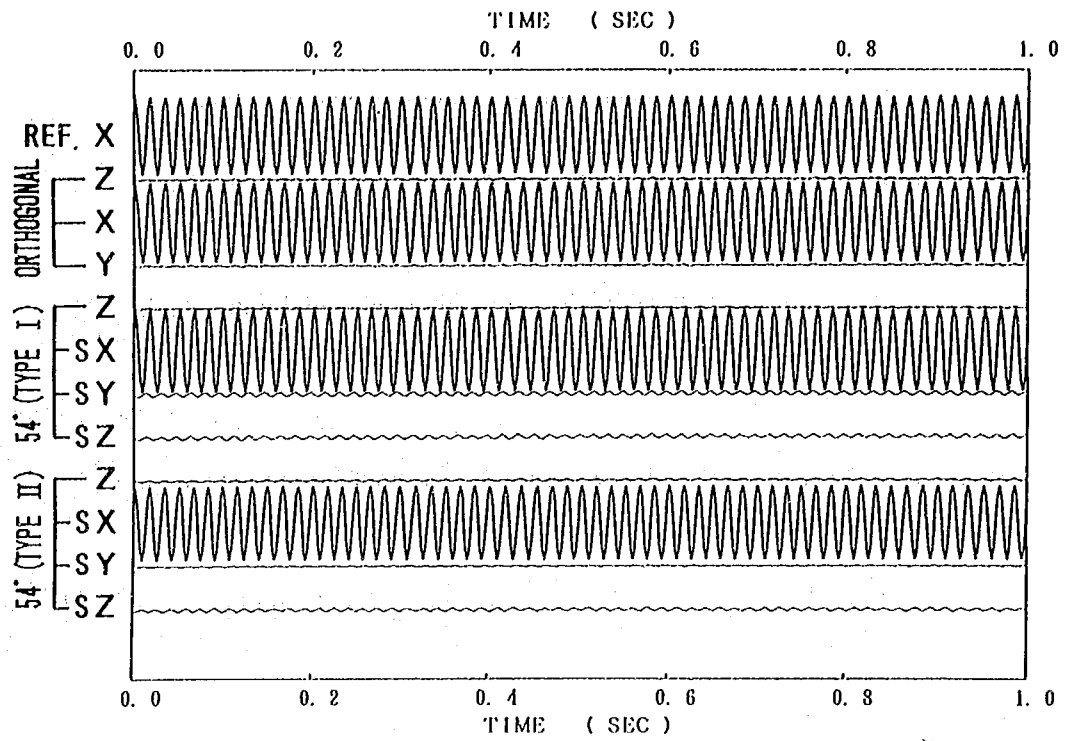


図-8.2 X (H-1) 方向振動

図-8 (続)

Y:(H-2) (60Hz)

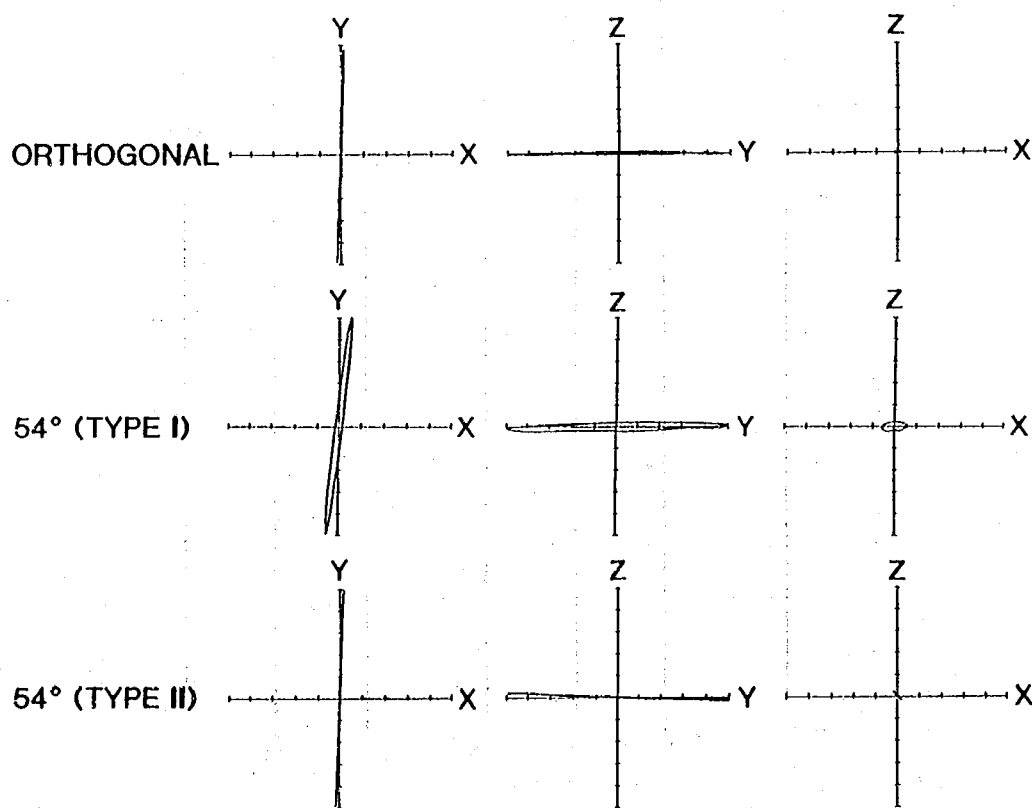
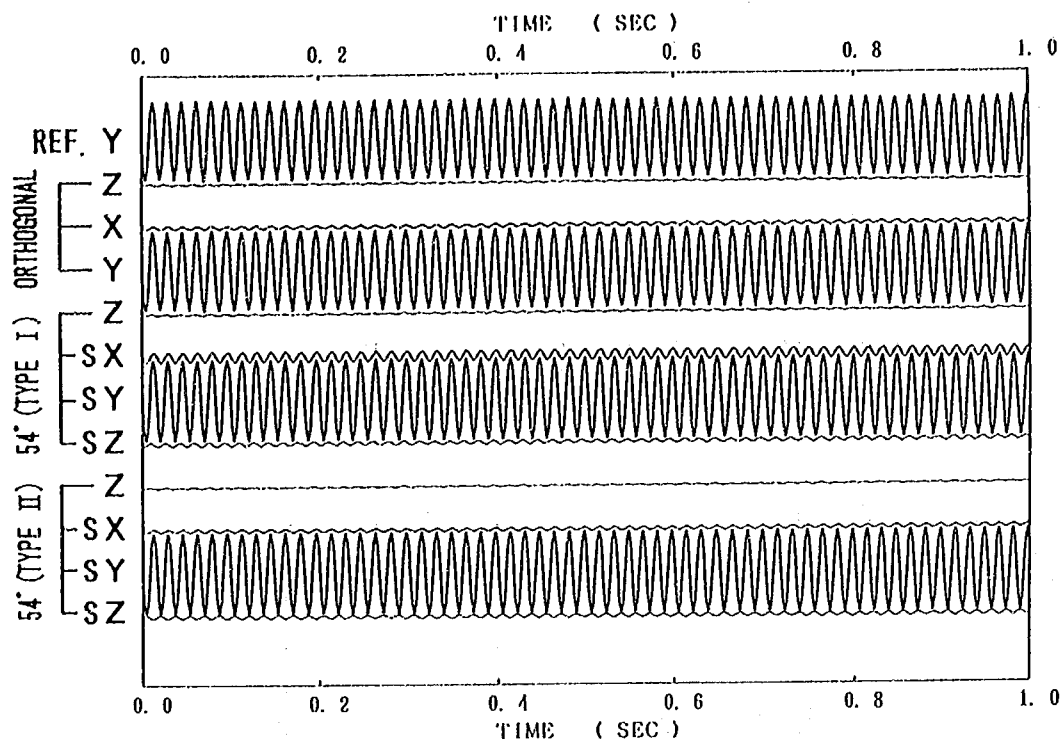


図 - 8.3 Y (H - 2) 方向振動

図 - 8 (続)

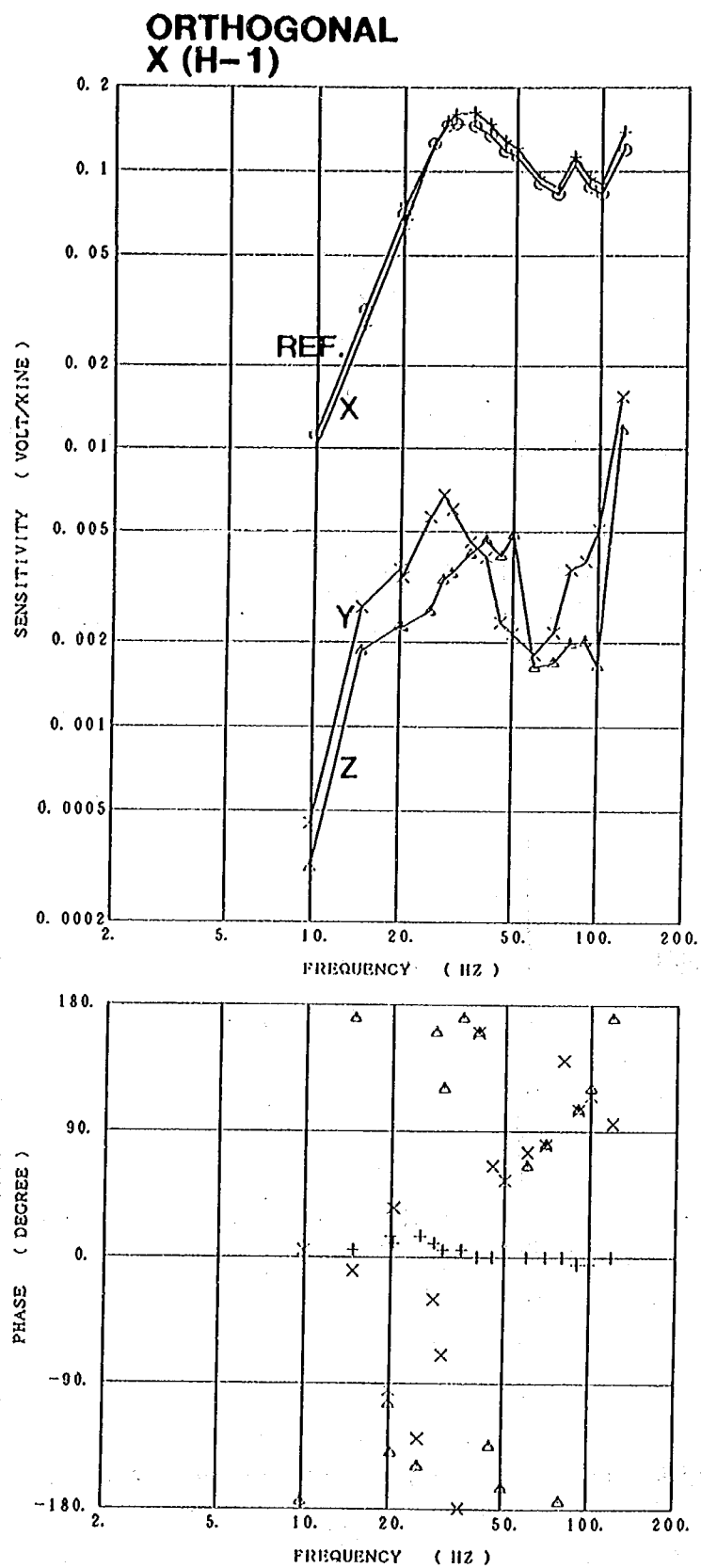


図-9.1 直交三成分系ユニット

図-9 振幅および位相特性

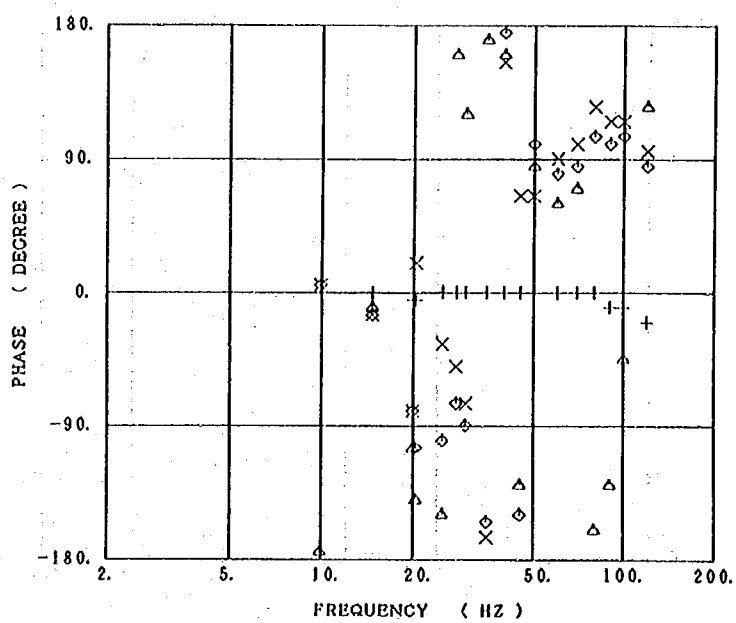
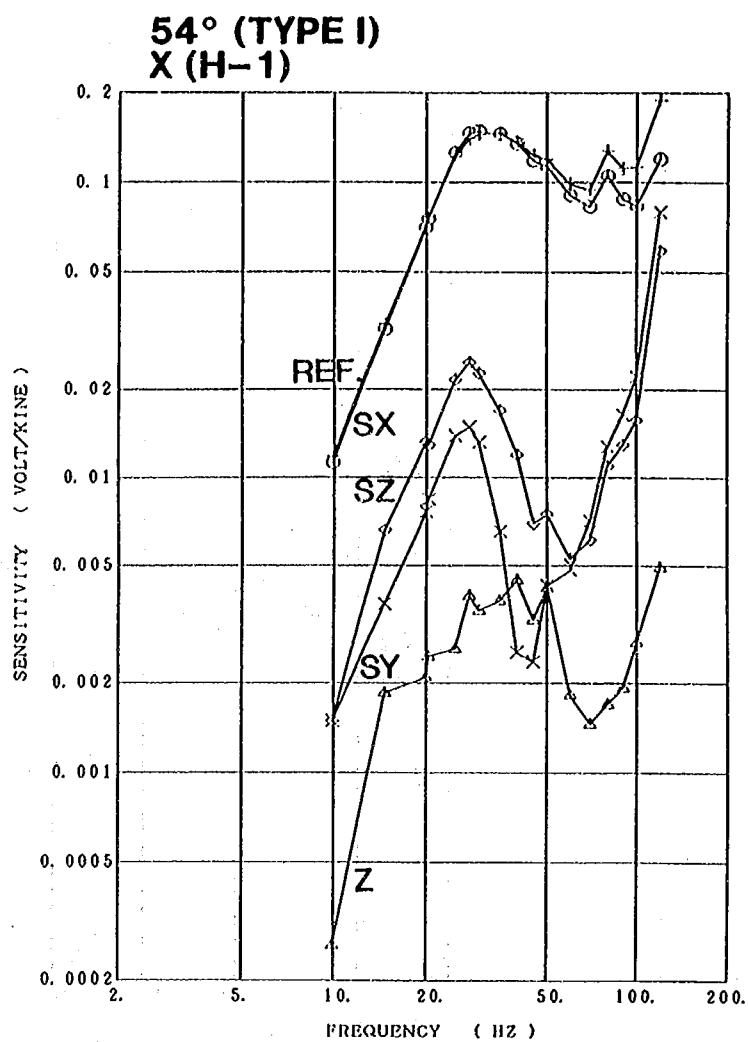


図-9.2 54°系 (段ちがい) ユニット

図-9 (続)

54° (TYPE II)
X (H-1)

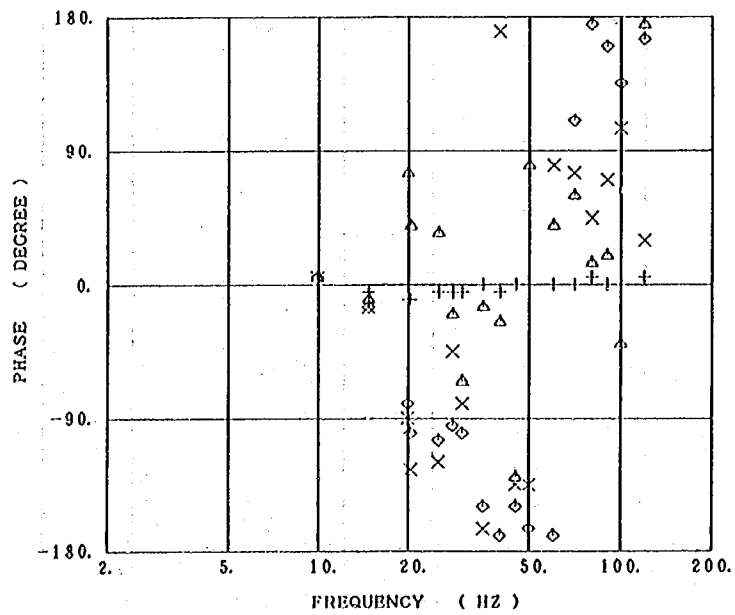
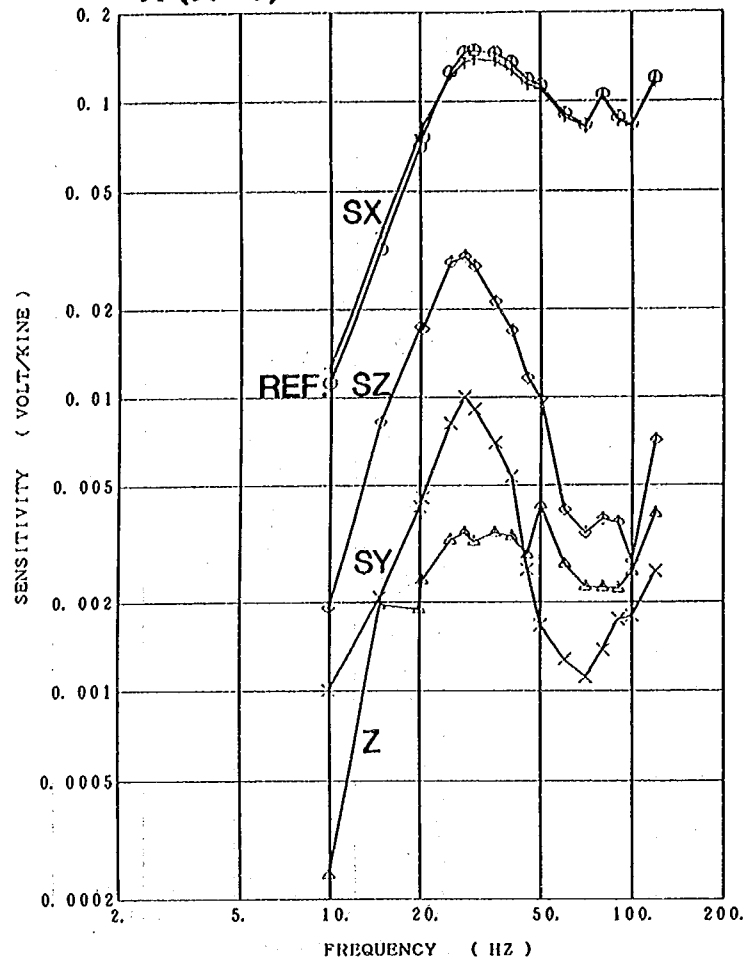


図-9.3 54°系(同一平面)ユニット
図-9 (続)

基準地震計の振幅特性曲線は、地震計の固有周期である28Hz付近にピークを有し、高周波帯域では、いくぶん起伏してはいるが平坦な形状を示している。80Hzおよび120Hzの測定で感度が上方にずれているが、これは、振動台の指示計の精度および制御限界に関係したものと考えられる。なお、測定時の地震計のダンピングは、感度を上げるために0.3にセットされており、共振部分と平坦部の感度比は、約2.3 dBに抑えられている。直交3成分系では、基準地震計とX成分の振幅特性がほとんど重なっているが、これは、地震計エレメントの配置条件が同一であるため、当然の結果である。一方、54°系においても両者はほぼ重なっており、振幅特性は極めて良好であると言える。また直交成分の振幅は、共振周波数近傍でやや大きくなるものの、直交3成分系では1%以下、54°系でも3%以下となっており、測定誤差および地震計エレメントの特性誤差の範囲内におさまっていると言える。また、100Hz以上の帯域では、直交成分の振幅が大きくなっているが、これは、振動台が制御限界を超えており、雑振動が発生しているためと考えられる。なおその影響は、地震計ユニットの長さの大きいもの程、あるいはアスペクト比の大きいもの程、大きい様に見うけられる。

次に位相特性については、振動方向成分では各ユニットとも、共振周波数部で15°ないし20°とやや大きくなるものの、高周波数帯域では5度以内におさまっており、問題ない。直交成分では、位相特性に一般的な傾向は認められず、雑振動の影響を強く受けていることが推定される。

周波数特性の各成分間のコヒーレンスを計算した結果を図-10および付図-3に示す。前述のように、感度比は基準地震計と、位相差は振動成分と比較した。各成分の感度比は、振動方向成分のものが全帯域にわたって1であり、また直交成分が微弱であることが求められるが、図をみると、振動方向の感度比はすべての地震計ユニットでほぼ1に近く、上の要件を満たしている。直交方向成分については、直交3成分系ではだいたい0.1以下で良好な結果を示している。一方54°系では、0.2程度になる場合があり、“もれ出し”の影響が認められる。位相差については、振動方向成分では、上下動成分を除けば、ほぼ0度であり満足できる結果を示している。しかし直交方向成分については、前図と同様に、ばらつきが大きく、また一般的な傾向も見い出せない。

2.2.2 微動測定実験

前述の振動台実験では、振動特性の評価は地震計ユニットの直交3成分方向でのみ行なったが、実際の測定では、ゾンデ内の地震計ユニットに入射する弾性波の方位は任意であるので、本実験では、常時微動および人工起振波の観測を行ない、各地震計ユニットの特性を把握することを試みた。

地震計ユニット内のエレメント配置は、前述の振動台実験で採用したものと同一とした(図-4参照)

測定方法

東京都内の台地上で、地震計ユニットによる常時微動測定および人工起振波形の観測を行なった。測定にあたっては、まず地表部を深さ約30cm径約40cmの規模で掘削し、石コウを流し込み観測台座を作成する。つぎに3種類の地震計ユニットを台座の上にセットし、さらに石コウで固定した。地震計ユニットの配置を図-11に示す。なお人工起振波形の観測(キックテスト)では、観測地点の西方約5mの地点で地面を上下方向に起振(キック)し、その際発生した振動を計測している。

ORTHOGONAL X (H-1)

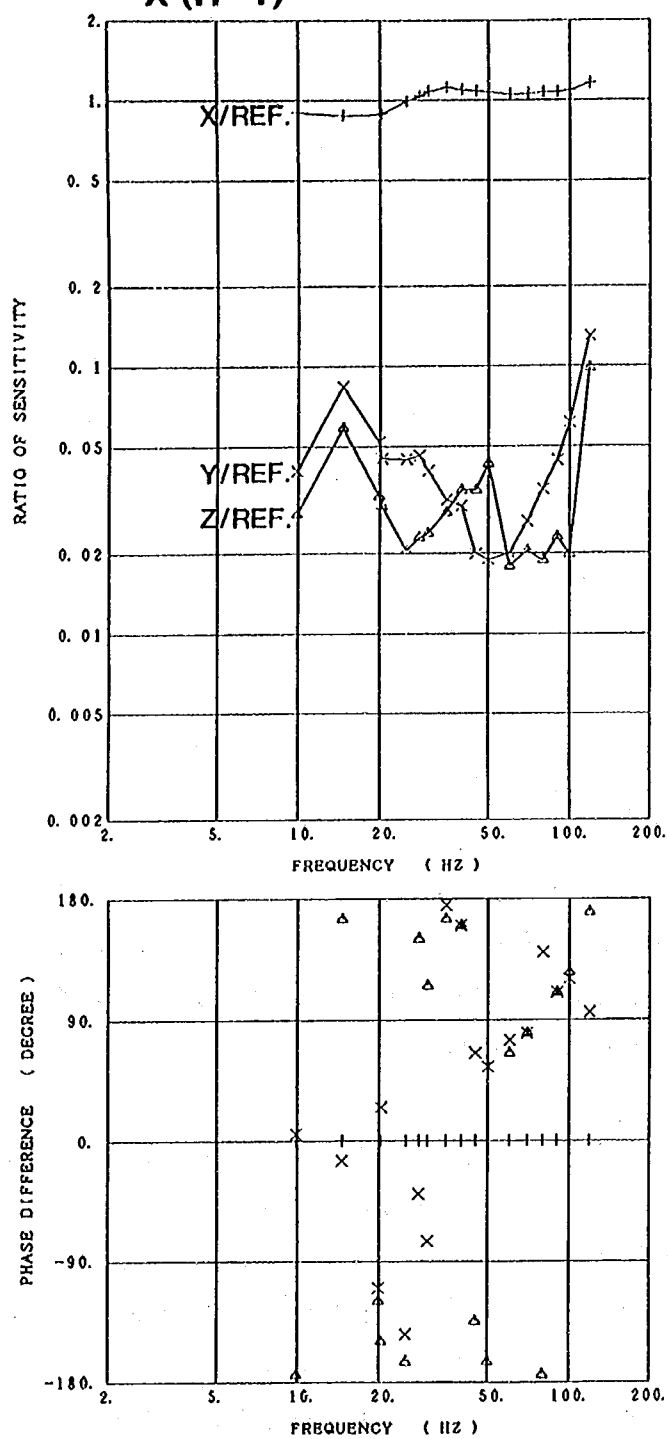


図 - 10.1 直交三成分系ユニット

図 - 10 振幅比および位相差特性 (H - 1 方向振動)

54° (TYPE I)
X (H-1)

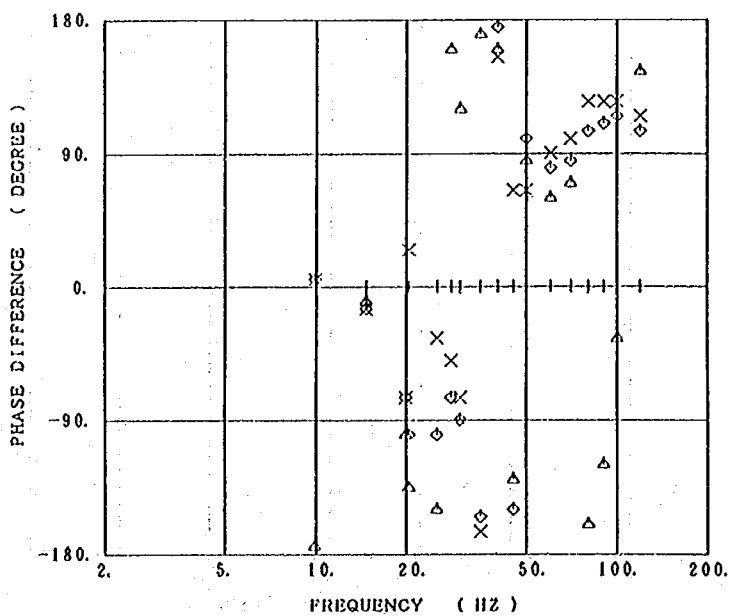
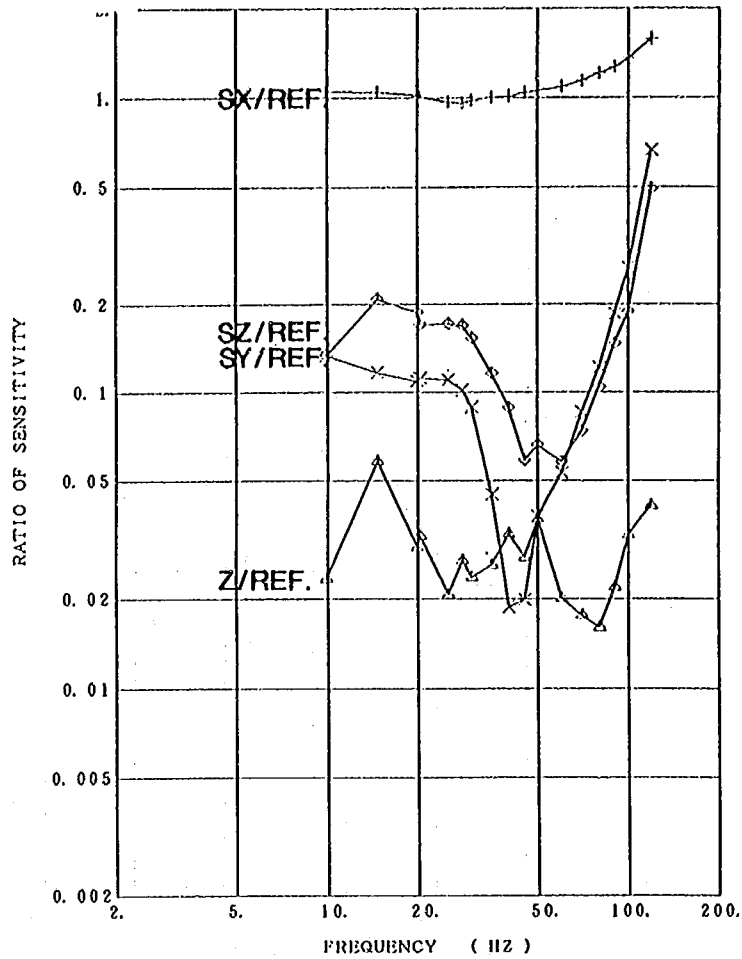


図-10.2 54°系(段ちがい)ユニット

図-10 (続)

54° (TYPE II)
X (H-1)

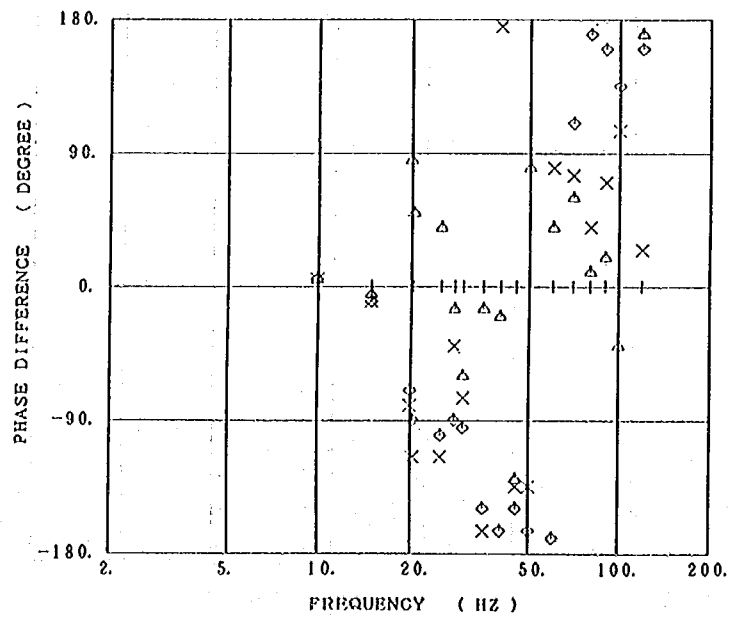
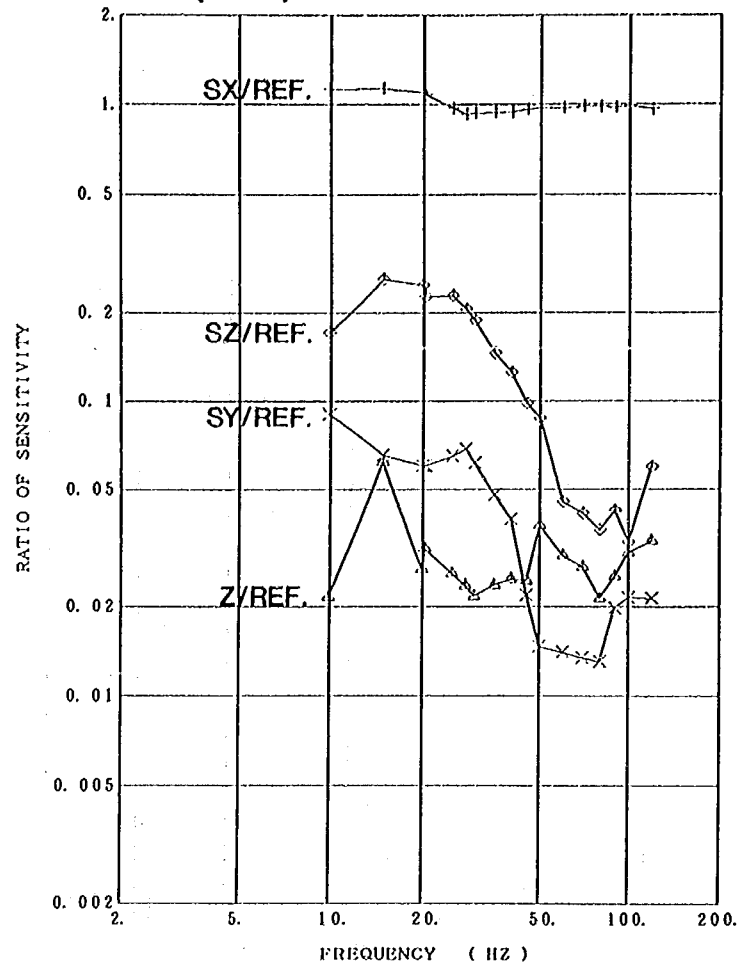


図-10.3 54°系(同一平面)ユニット
図-10 (続)

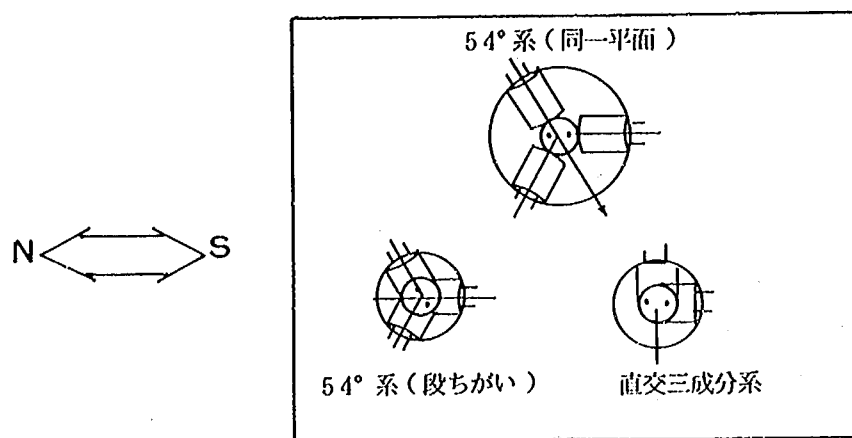


図-11 微動測定時の各地震計ユニットの配置

解析方法

測定データの解析は、概ね、以下の手順に従って実施した。

(1) 前処理

解析の前処理としてまず、データレコーダに収録したアナログデータをA/D変換し、この変換データを測定時およびA/D変換時の増幅器のゲインデータより補正して実電圧値を計算した。

また54°系ユニットの記録については、直交3成分系との比較のために、座標変換を行ない、NS、EW、およびUD方向のデータとした。

(2) フーリエスペクトル計算

デジタル化された測定データはFFTによるフーリエ変換をし、振幅スペクトルおよび位相スペクトルを計算し図化した。フーリエ変換に用いたパラメータは以下のとおりである。

サンプリング間隔	1 msec
データ数	2048
ウィンドウ	ハニング
ウィンドウの回数	5回

(3) フーリエスペクトル比の計算

直交3成分系の測定記録を基準にとり、54°系ユニットの座標変換された合成記録とのフーリエスペクトルの振幅比および位相差計算を各成分間で行なった。なお位相差の計算ではその値を -180° ～ $+180^{\circ}$ 間で表示した。

解析結果

図-12に各地震計ユニットの各成分の出力あるいは合成出力波形を示す。常時微動波形では、UD成分、NS成分では各ユニットの出力とも類似した波形を示しているが、EW成分では、直交3成分系と54°系でかなりの差異が認められる。一方キックテストの結果では、対応する各成分ともほぼ似か

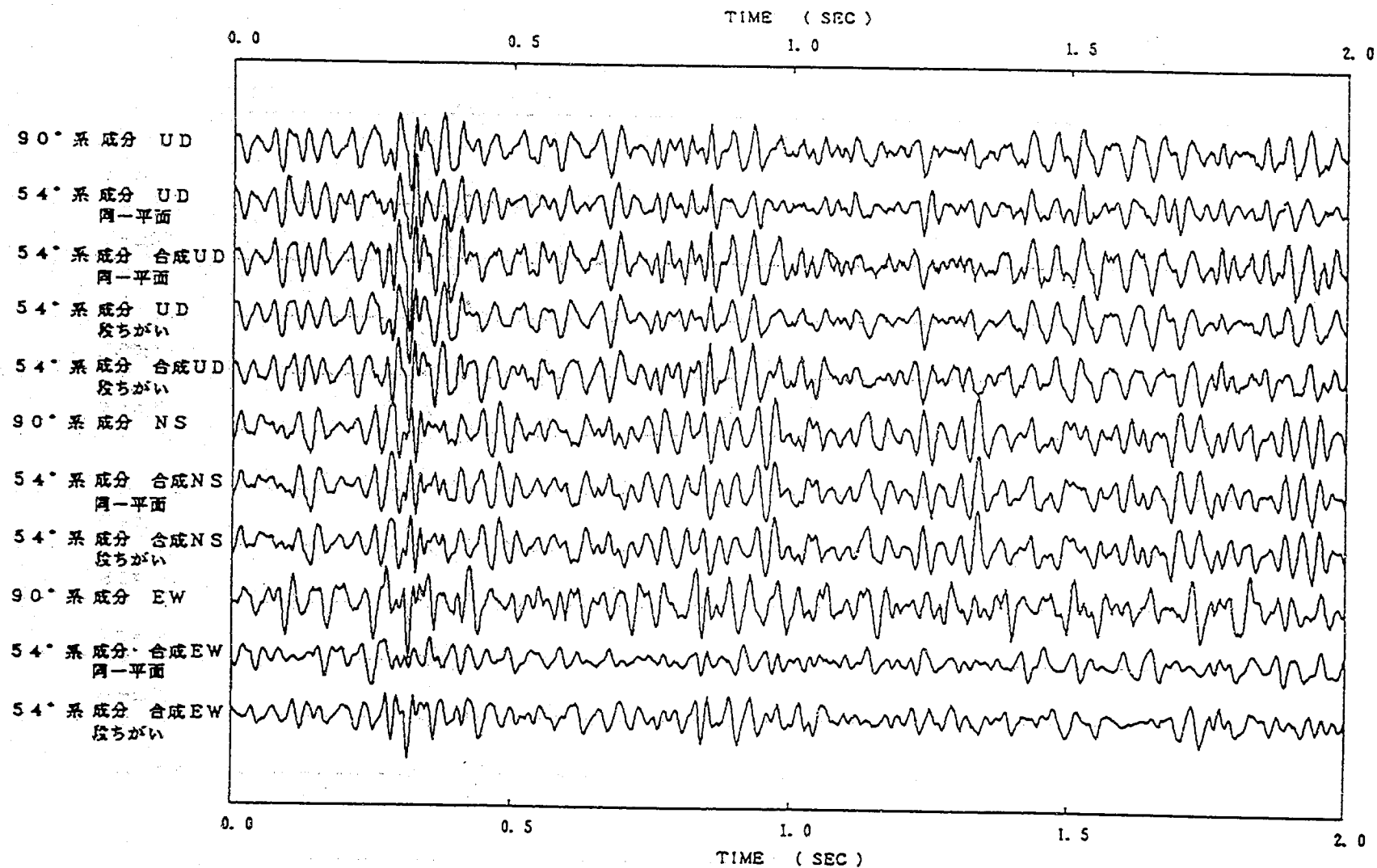
よった波形が測定されているものの、振幅がユニット間でかなり異なることが判る。この傾向はやはりEW成分において顕著である。

図-13は、各地震計ユニットのNS成分に対応する測定および合成波形のフーリエ振幅スペクトルを示したものである。地震計の固有周波数である28Hz付近をピークに、高周波側ではほぼ直線的に減衰している。スペクトルの形状は互いに類似しており、ユニット間に大きな差違は認められない。付図-4にキックテスト時の各成分のフーリエ振幅スペクトルを示す。

常時微動観測時の上下動成分記録のフーリエ振幅スペクトルから、直交3成分系のそれを基準にしてコヒーレンシを計算した結果を図-14に示す。振幅比はほぼ全周波数帯域にわたってほぼ1に近く、顕著な差違は認められなかった。なお、50Hz付近の谷は、50Hzのノッチフィルタの影響によるものである。キックテスト時の各成分間の振幅スペクトル比を付図-5に示した。

次に図-15は、図-14と同じ組合せの成分について位相差スペクトルを示したものである。いずれも、はげしく変動するものの、ほぼ 0° 付近に集中している。ノッチフィルタの影響が同様に50Hz近傍に認められる。また付図-6はキックテスト時の測定記録について各成分間のフーリエ位相差スペクトルを示したものである。これも大きく変動をくり返しており、また50Hz付近にフィルタの影響が表われている場合も認められる。

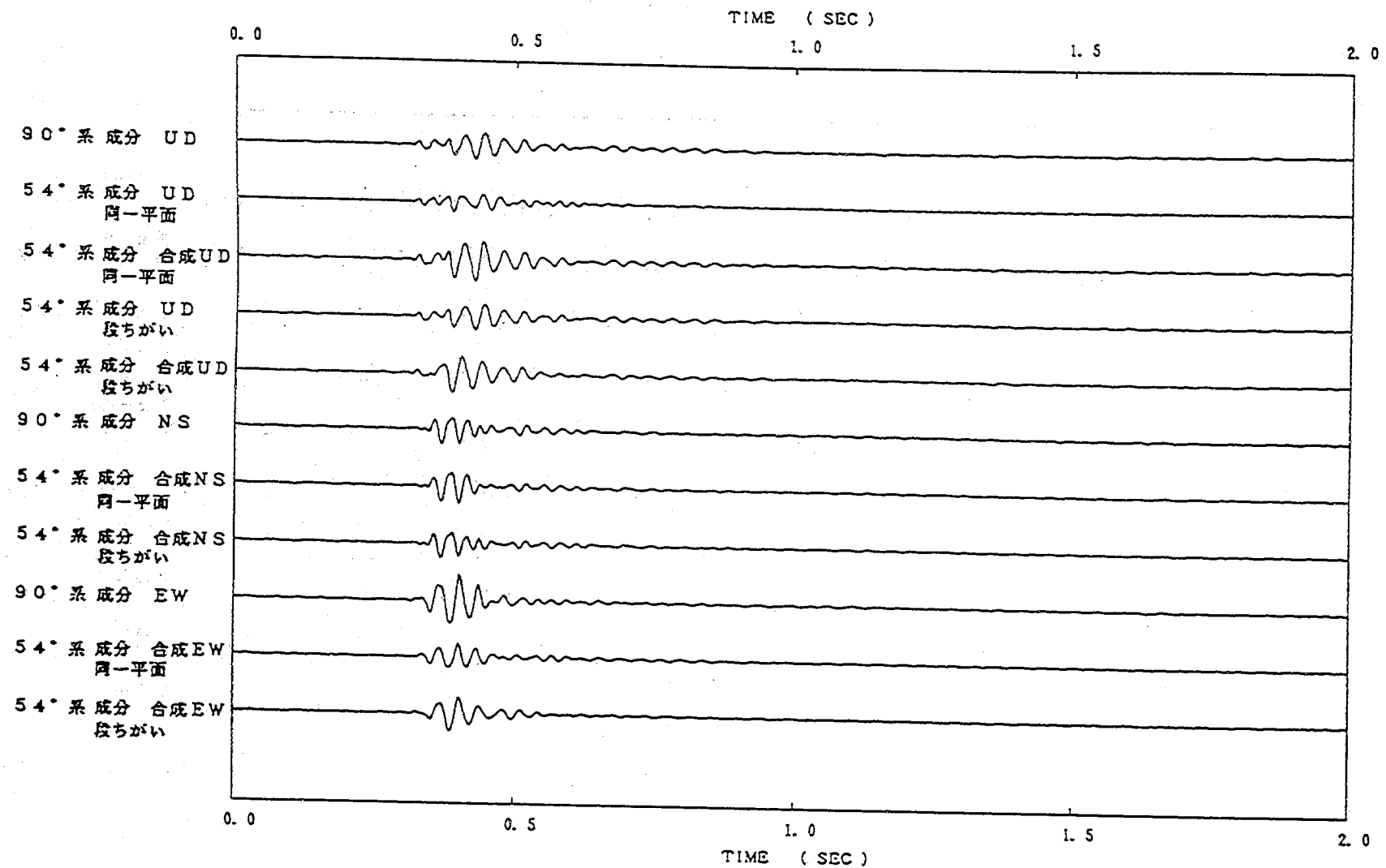
VSP MICRO TREMO. -1



(a) 常時微動波形

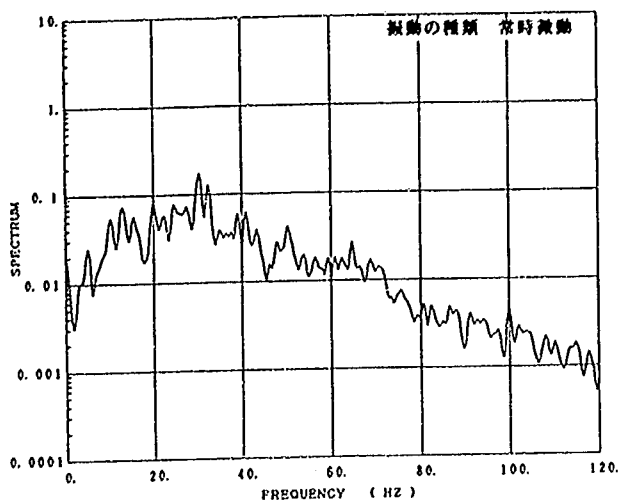
図-12 各成分の測定・合成波形

VSP KICK TEST -2

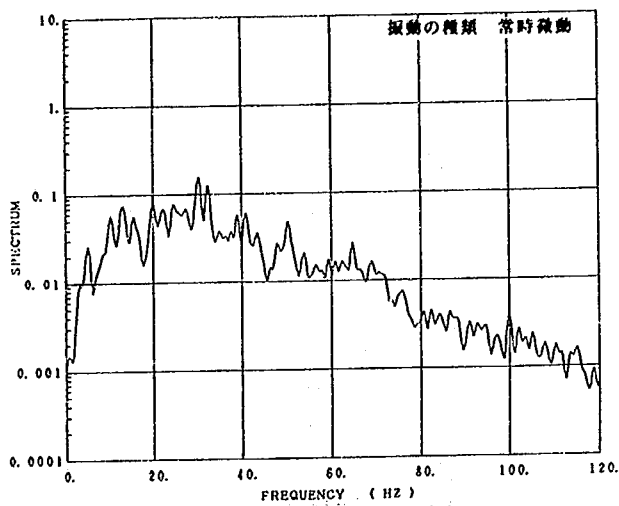


(b) キックテスト波形

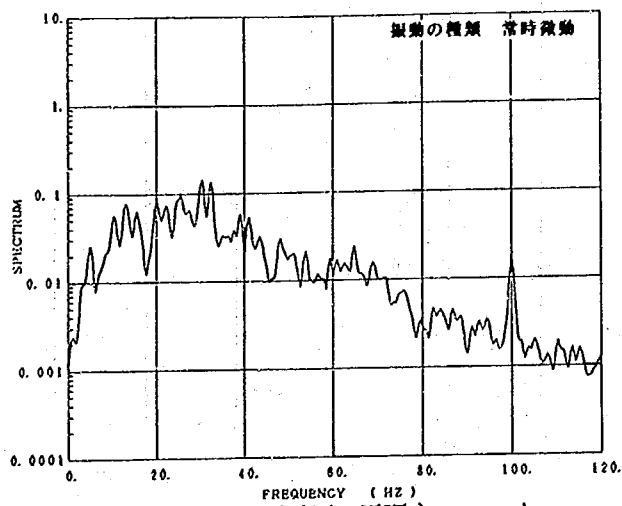
図-12 (続)



(a) 直交三成分系ユニット

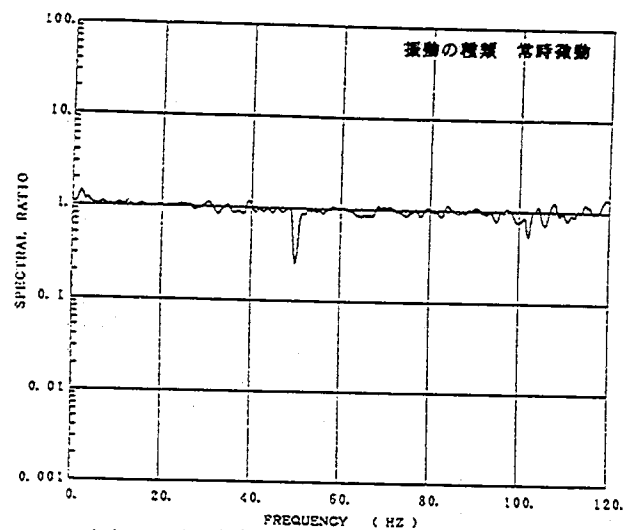


(b) 54° 系 (段ちがい) ユニット

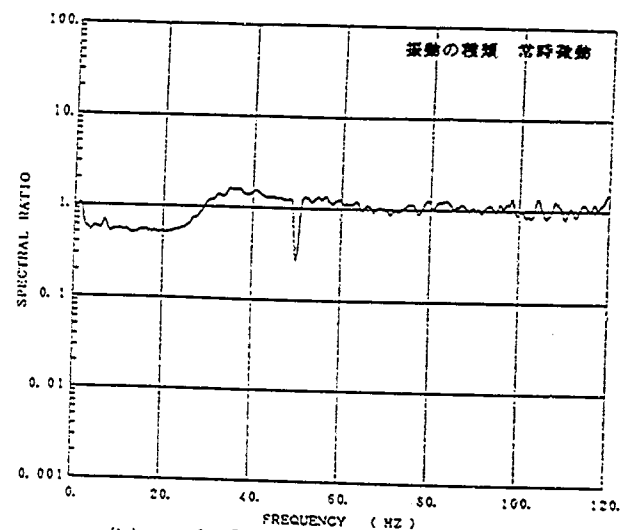


(c) 54° 系 (同一平面) ユニット

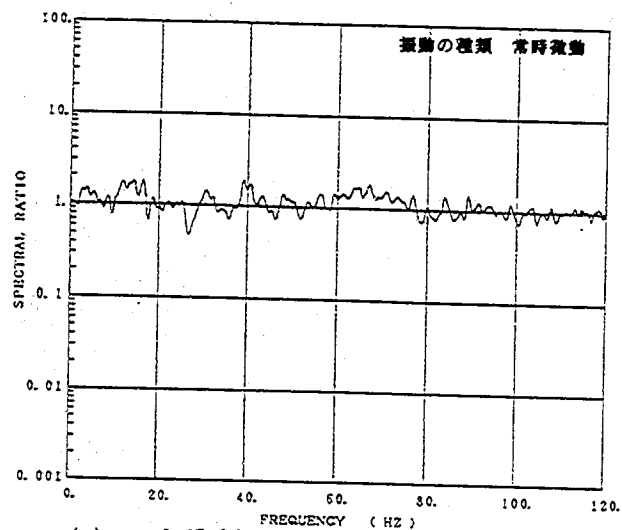
図 - 13 測定波形のフーリエ振幅スペクトル図 (常時微動, NS成分)



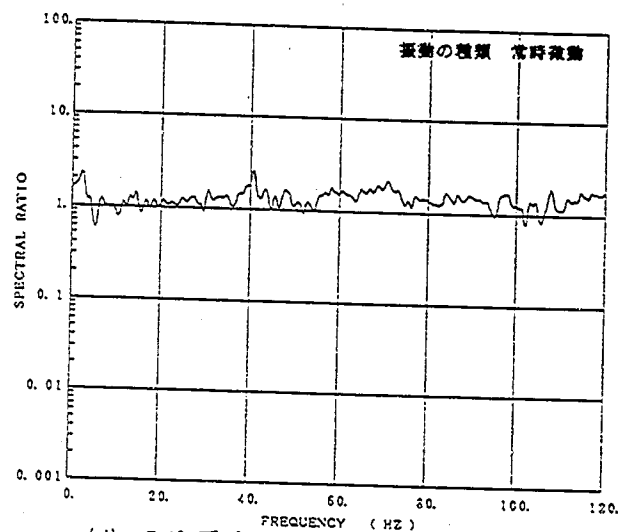
(a) 54° 系 (段ちがい) / 直交三成分系



(b) 54° 系 (同一平面) / 直交三成分系

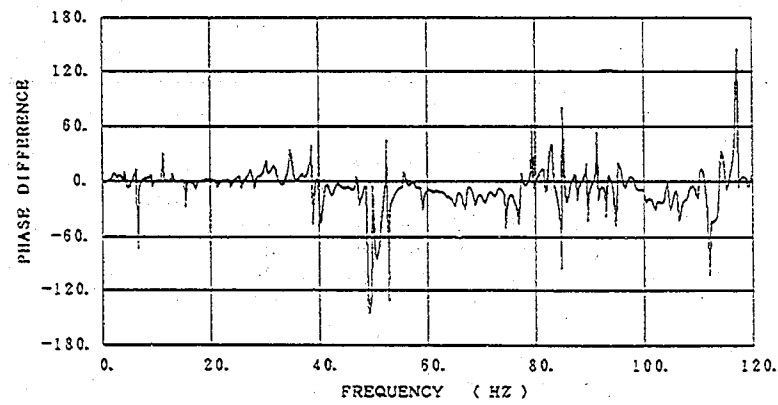


(c) 54° 系 (段ちがい) 合成 / 直交三成分系

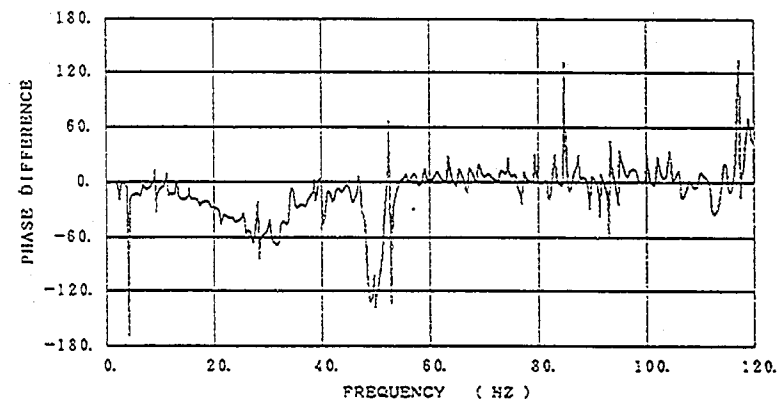


(d) 54° 系 (同一平面) 合成 / 直交三成分系

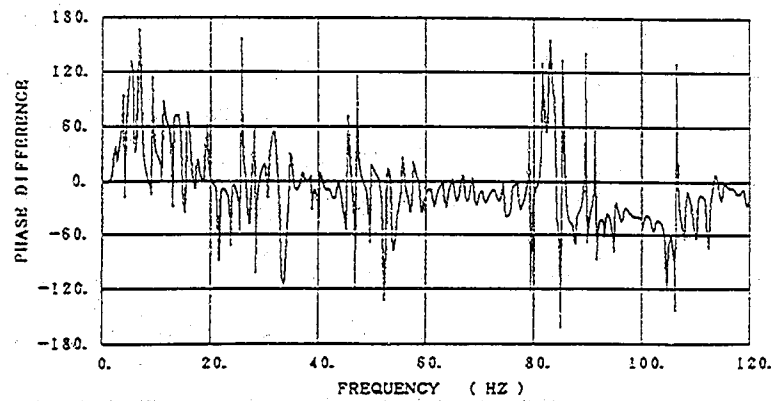
図-14 フーリエ振幅スペクトル比 (常時微動, 上下動成分)



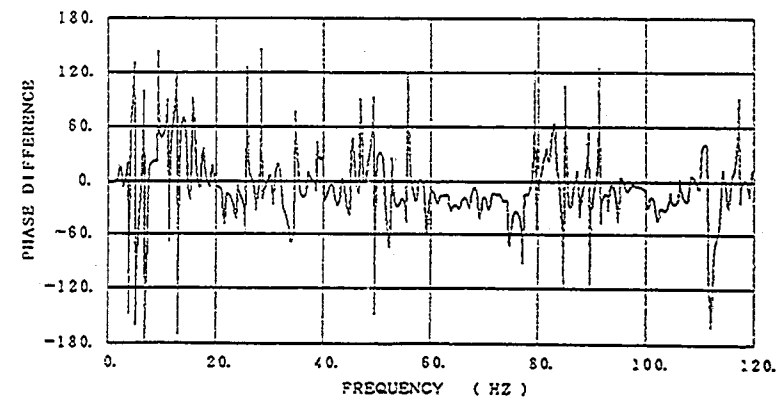
(a) 54° 系 (段ちがい) - 直交三成分系



(b) 54° 系 (同一平面) - 直交三成分系



(c) 54° 系 (段ちがい) 合成 - 直交三成分系



(d) 54° 系 (同一平面) 合成 - 直交三成分系

図 - 15 フーリエ振幅スペクトル位相差 (常時微動, 上下動成分)

2.2.3 地震計エレメント校正実験

ボーリング孔内に挿入して、現位置での弾性波信号をフルウェーブで観測するVSPゾンデの作成のために、ゾンデ内に組み込む地震計エレメントの周波数特性（位相特性および振幅特性）の相違を把握し、適当なものを選択することを目的として、エレメントの校正比較実験を行なった。

試験方法

コンクリートを打設して基礎を作成し、地表部に鉄製定盤を水平に埋め込み測定用の台座を作成し、その上に地震計エレメントを一列に並べて常時微動観測および重錐落下による振動を観測する。地震計エレメントの設置方向は鉛直および 54° 傾斜の2方向である。

表-4に測定条件を示す。実験に供した地震計エレメントは、GEOSPACE社製のGS-14-L3タイプのエレメント8個である。地震計の仕様を表-5に示す。また、周波数特性を図-16に示した。ダンピングは、増幅器の受け抵抗値を約 $25\text{K}\Omega$ にとり、0.3になるように調整した。

表-4 エレメント比較実験の測定条件

地震計の設置方向	測定した振動の種類
54° 系	常時微動
54° 系	20gの鉄球を40cmの高さから落下させる
54° 系	4kgの重錘を150cmの高さから落下させる
鉛直系	20gの鉄球を40cmの高さから落下させる
鉛直系	4kgの重錘を150cmの高さから落下させる
鉛直系	常時微動

表-5 地震計エレメントの仕様

項目	仕様	誤差
感度	114mV/kine	$\pm 15\%$
個有周波数	28Hz	$\pm 20\%$
コイル抵抗	570 Ω	$\pm 5\%$
コイルインダクタンス	45mh	
ダンピング係数	0.18	$\pm 30\%$
ダンピング定数	17.2	
ストローク	3mm	
高さ	17.3mm	
外径	16.8mm	
重量	19.0g	

解析方法

データレコーダに収録されたアナログデータをA/D変換し、増幅器のゲイン情報より実電圧値に変換後、FFTを施し、測定データのフーリエ振幅スペクトルを求めた。FFTをかけたデータ（時系列波形）を図-17に示す。鉛直系と54°系の同時測定を行なっていないため、厳密な比較はできないものの、鉄球および重錐落下振動波形については、リバウンドの有無を除けば両者はほとんど同一の波形をしている。

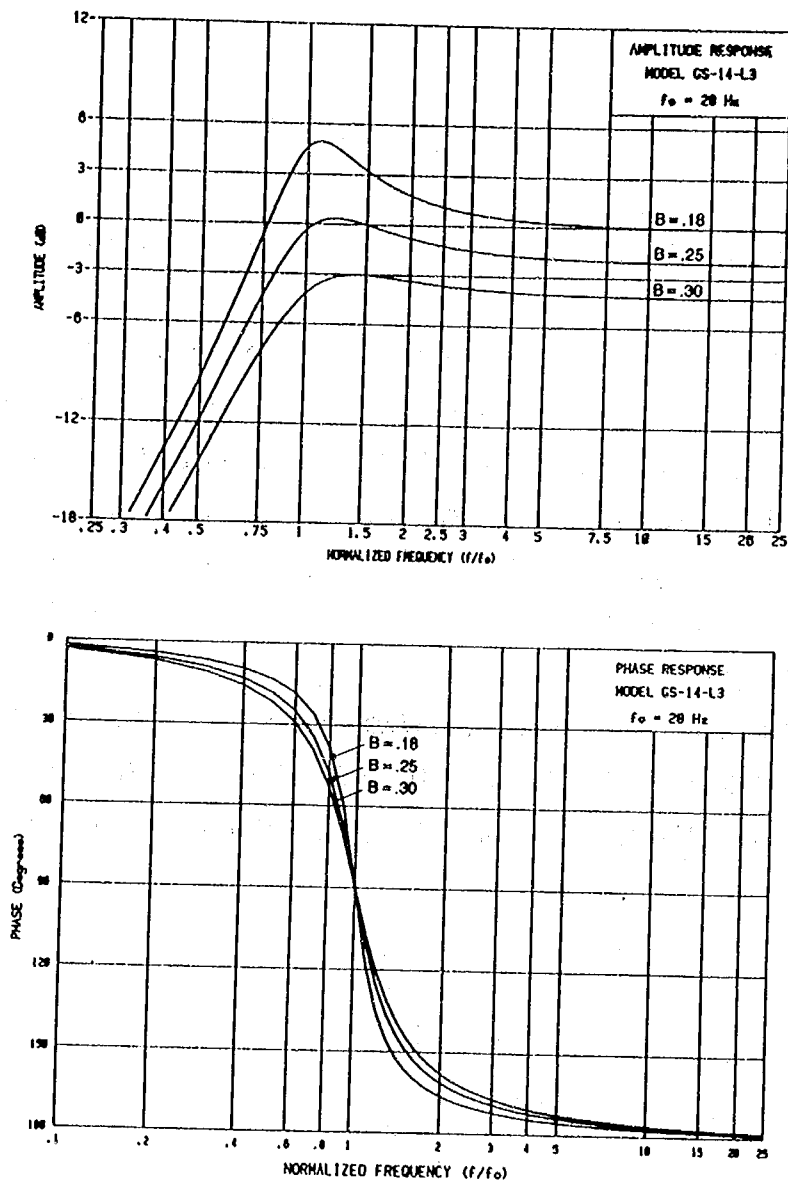
解析結果

測定波形のフーリエ振幅スペクトルを図-18に示す。同図では、一枚の図に一回の測定（常時微動鉄球落下および重錐落下）で得られた8個の地震計の記録波形に対応するスペクトルを重ねて表示している。その際、同一図内での相対振幅は確保されているため、スペクトルの形状のみでなく、電圧感度の比較も可能である。

時系列波形データおよびフーリエ振幅スペクトル図を見ると、8個の地震計エレメントの特性は、比較的良くそろっていると言えるが、鉄球落下測定データでは、振幅スペクトルが多少ずれて、2つのグループを形成しているようにも見るができる。時系列波形ではこの差は明瞭でなく、後続波形が微妙に異なっているにすぎない。しかし、同一系列で各4回の測定を行なっているものの、スペクトルパターンの分極化が定常的には現われていない点を考慮すると、地震計エレメントの特性が異なっていると見るよりも、むしろ地震計を設置した地点によって質点の動きが異なっていると考える方が良い。

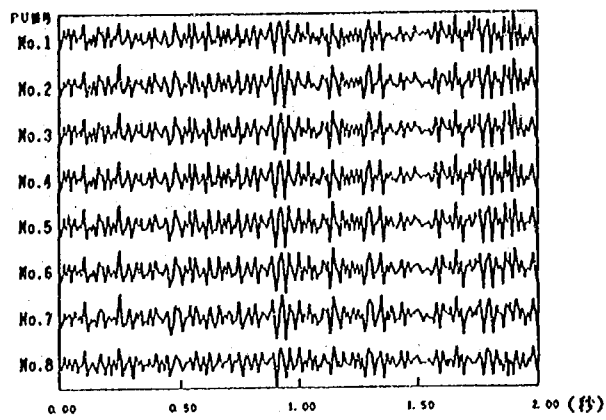
2.2.4 振動実験の結論

3回の振動実験の結果は、VSPゾンデ内に組み込む地震計エレメント（GS-14-L3：固有周波数28Hz、Geospace社製）の特性が良く揃っており、大きな差は認められなかったこと、また地震計配置として直交系は優れた特性を有しているが、54°系もまた良好な特性を有していることを明らかにした。

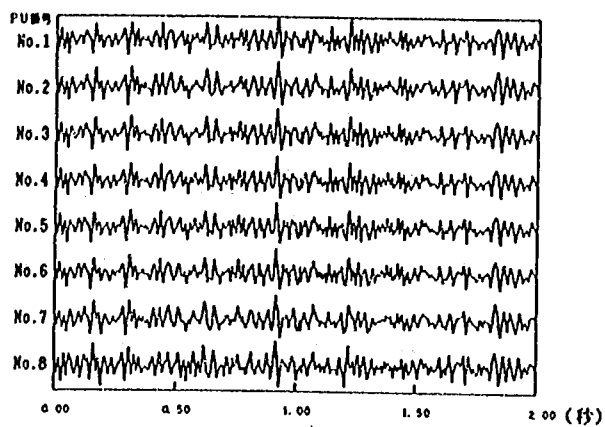


*These normalized frequency response curves illustrate amplitude and phase vs frequency of excitation (velocity of motion).

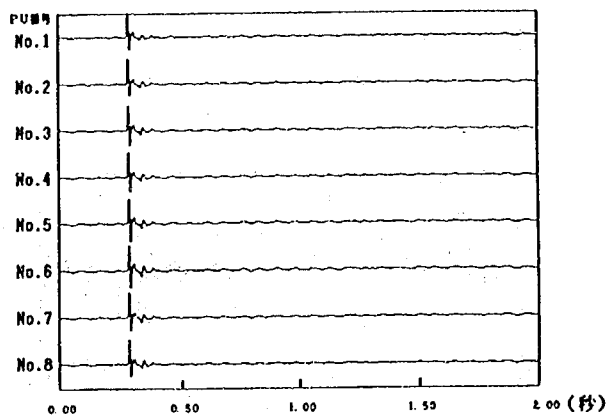
図 - 16 地震計エレメント (GS-14-L3) の周波数特性
(Geospace 社資料)



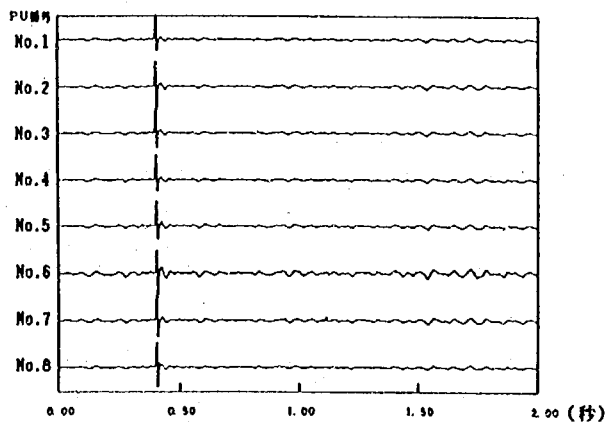
(a) 鉛直系, 常時微動



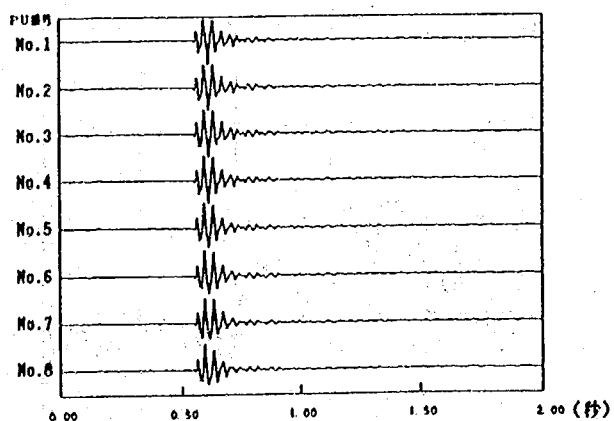
(b) 54°系, 常時微動



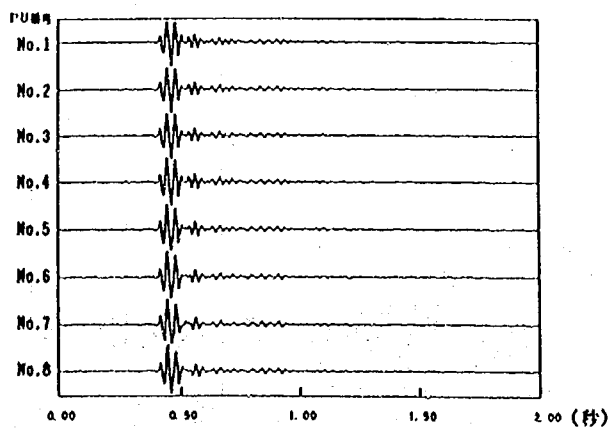
(c) 鉛直系, 20g 鉄球



(d) 54°系, 20g 鉄球

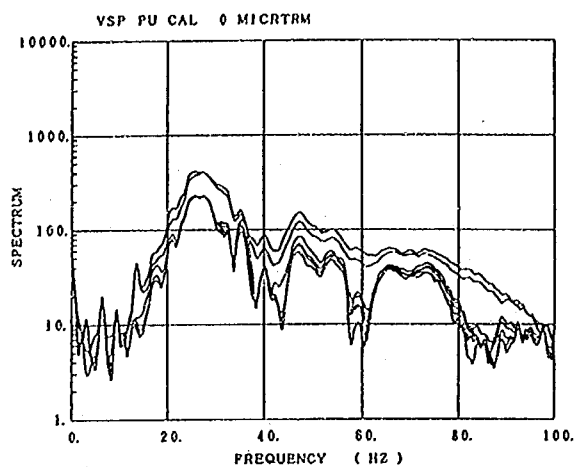


(e) 鉛直系, 4kg 重錘

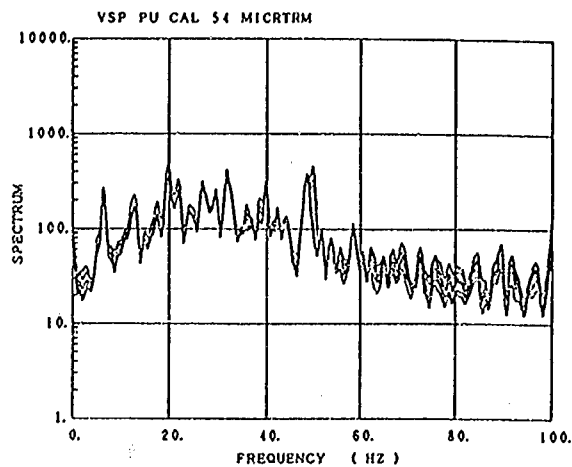


(f) 54°系, 4kg 重錘

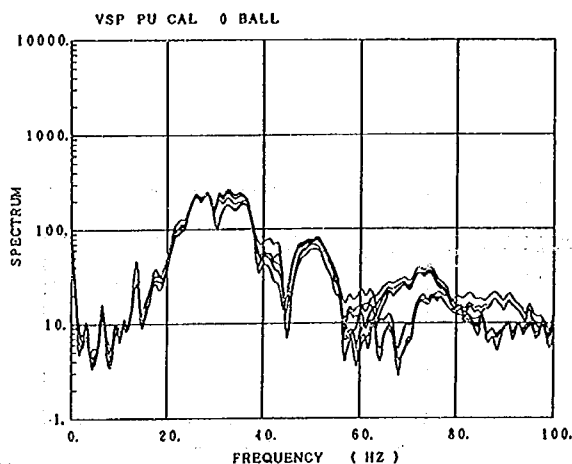
図-17 エLEMENT比較実験での測定波形



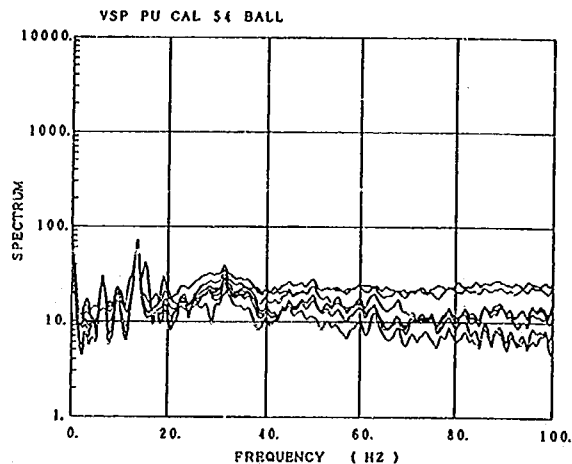
(a) 鉛直系, 常時微動



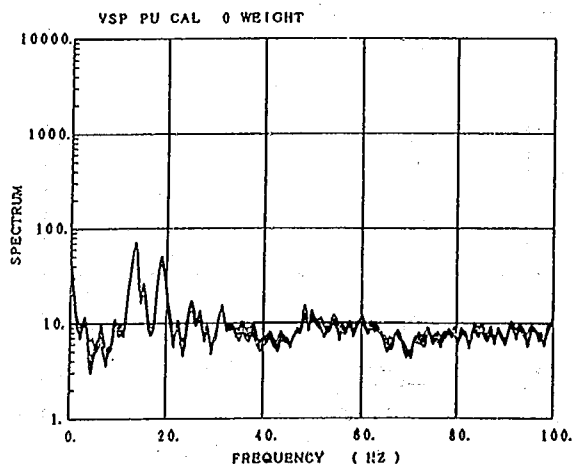
(b) 54°系, 常時微動



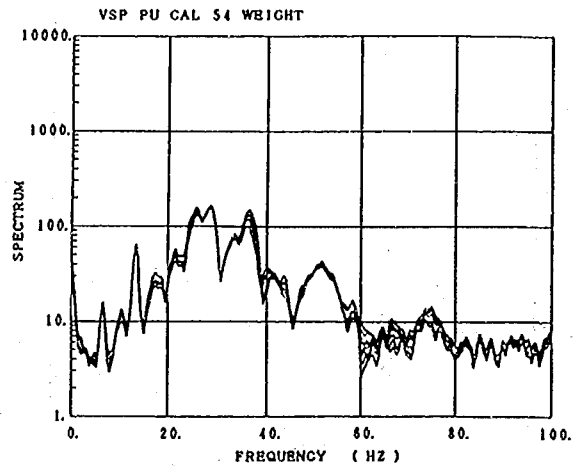
(c) 鉛直系, 20g 鉄球



(d) 54°系, 20g 鉄球



(e) 鉛直系, 4kg 重錘



(f) 54°系, 4kg 重錘

図-18 測定波形のフーリエ振幅スペクトル

2.3 孔内測定

土木研究所構内、地質野外実験場に掘削・ケーシング保孔されている試験孔（GSF-B孔）において、開発したゾンデの特性を評価するための孔内測定実験を行なった。

図-19は、上下動測定記録の比較を時間領域で行なったものである。

(a)の記録では波形がかなり乱れているが、これは圧着方式（ゴムのパッカーを膨張させてゾンデを孔壁に圧着させる）がフルウェーブ観測には不適であることを示している。一方54°系配置のゾンデでの記録は、鉛直地震計エレメントと54°系エレメントより合成した記録は区別がつかないほど酷似している。また波形自体もそろっており、乱れていない。S波測定記録についても同様の比較検討を行なったが、54°系ゾンデ記録のほうが上下動測定と同じく良好であることがわかった。

これらの結果は、54°系配置のVSP用ゾンデが、フルウェーブ記録に有効であることを示している。

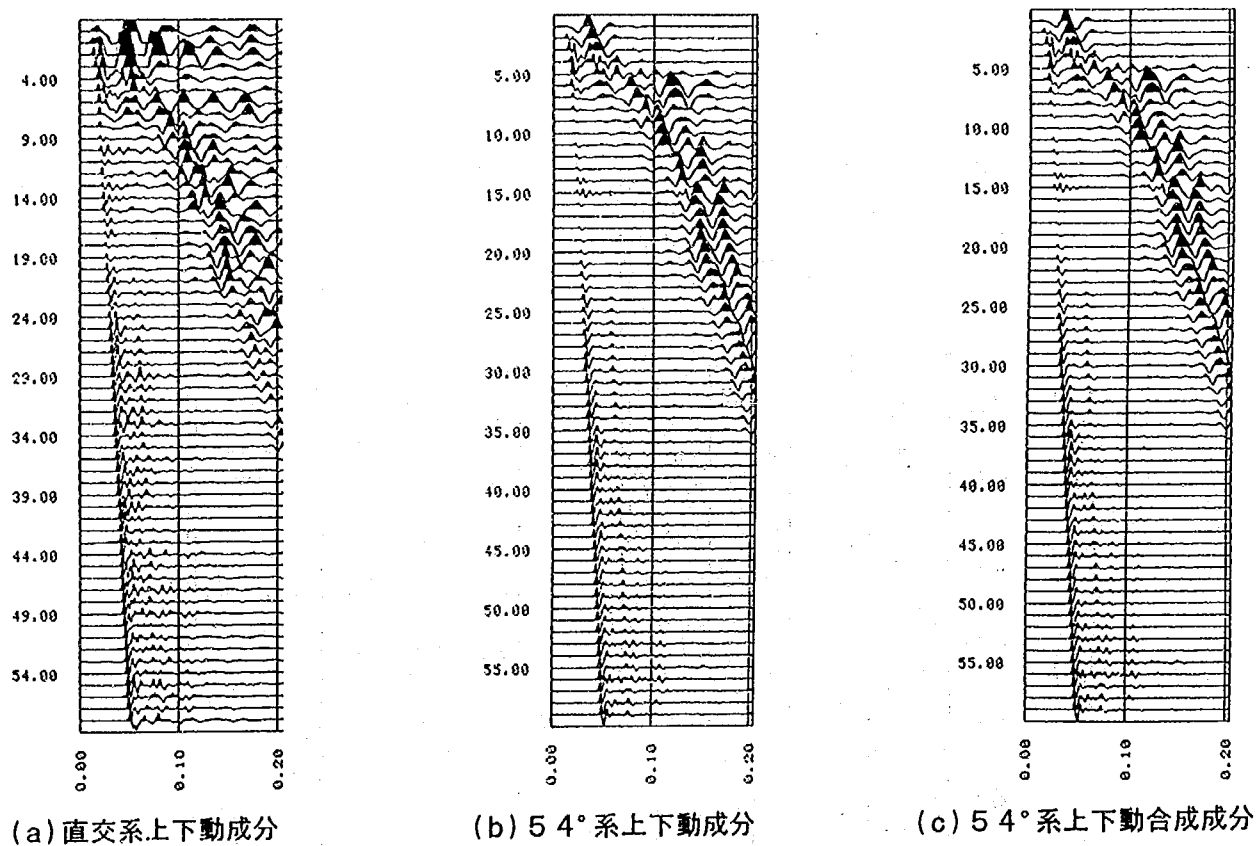


図-19 上下動測定記録の比較（稲崎ほか，1989bを改変）

2.4 インナーショッカー

新たに開発したVSP用ゾンデの特徴の1つは、前にも記したように、インナーショッカーを内装したことである。

従来のエアパッカーを膨張させてゾンデを孔壁に圧着する方法に対して、新たに開発したゾンデでは、より大きい力（約10倍）でピストンを孔壁に圧着させる方式を採っているが、それでも、ゾンデの圧着の程度、すなわち、地震計-地層間の伝達関数を測定しておくことは、波形に対するより精度の高

い処理を施す上で必要不可欠である。とりわけ、各層の減衰定数や分散性等の層相によって大きく変化するパラメータを推定するには、特に重要となる。

この地震計-地層間のカップリングを測定する方法として、(1) 特性のはっきりしている振動子をVSPゾンデ内に組み込み、ゾンデを孔壁にロックした後に観測周波数領域で振動子をスウィープさせて、地震計エレメントの応答を測定する方法、(2) 孔壁に圧着後、ゾンデ内に組み込んだハンマーで地震計をたたきインパルスレスポンスを測定する方法が考えられている。このうち、ゾンデ内構造と操作性を考慮して後者のシステムを採用した。

図-20 はインナーショッカー起振時の鉛直エレメントおよび 54° 系エレメントの合成応答である。深度25m地点の記録は誤って記録された受振波形であり、インナーショッカーの応答波形ではない。両者はきわめて良く一致しているとともに、深度方向にもほとんど変化せず、ゾンデの圧着状態がほぼ均一であったことを示している。

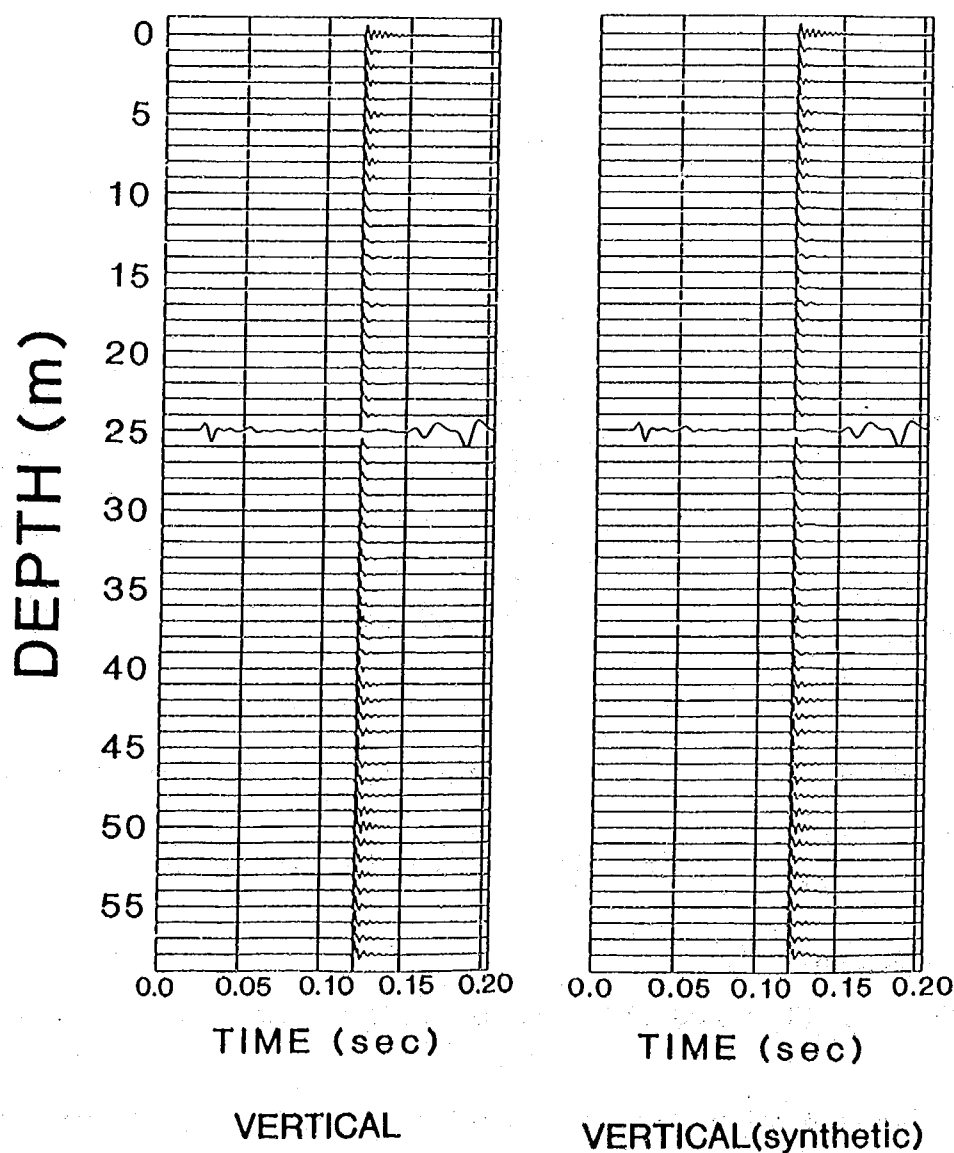


図-20 インナーショッカー起振測定波形

3. V S P データ処理

土木研究所地質野外実験場内にある2本の試験孔で測定されたP波およびS波記録に対してデータ処理を施したが、その詳細については紙面の都合上（予算上）、本報文に含めることが出来なかったため、次報に譲り、本報文ではその概要についてのみ記す。

3.1 V S P 処理の流れ

V S P 処理の流れの概要を図-21 に示す。各処理の内容についての概略を以下に述べる。

3.1.1 編集および波形の合成

第一段階としてV S Pの現場記録から必要なデータを抽出し、データ・ファイルの作成を行なう。次に波形の合成として、以下の処理を行なう。

- (1) P波については、54度系ゾンデによる測定記録から上下動成分の波形を合成する。
- (2) S H波については、54度系ゾンデによる測定記録から水平2成分の波形を合成する。更にホドグラムを作成し、その最大振幅方向の波形を合成する。

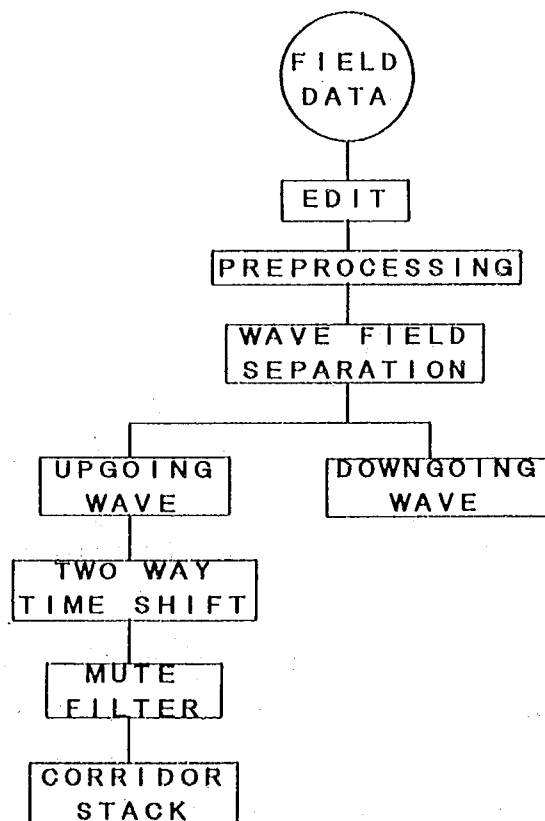


図-21 V S P 処理流れ図（稲崎ほか，1989b）

3.1.2 前処理

前処理という呼び方は非常に抽象的であるが、V S P 処理の中で最も重要な処理である波動場の分離処理の前に行なう処理を意味している。

前処理の目的としては、まず直達波（以下 downgoing primary を直達波と呼ぶことにする）の

初動走時を決定し、トリガー波形を参照してサンプリング開始時間のばらつきを補正する。この直達波の初動走時データは、ミュートや two-way time shift においても用いるものであり、精度よく決めておく必要がある。また後の処理において障害となる波（他種の波・変換波やチューブウェーブ等）をこの段階でできるだけ除去しておく方が望ましい。

更に必要に応じて、微弱な上向波を強調するために AGC およびミュートを行なう。またアフターフェイズが記録の終りまで大きな振幅で続いている記録には、データの打切りの効果を低減するためにデータ・ウィンドウ（テーパー・ウィンドウ）をかける。

前処理には主に以下の処理が含まれる。

- (1) タイム・シフト
- (2) デジタル・フィルター
- (3) AGC
- (4) ミュート
- (5) データ・ウィンドウ（テーパー・ウィンドウ）

3.1.3 波動場の分離

VSP データの波動場の分離、即ち上向波と下向波との分離に対して以下の方法を用いた。

- (1) 速度フィルター（F-K フィルター）
- (2) メディアン・フィルター
- (3) τ - p 変換（ラドン変換）

3.1.4 最終処理

波動場の分離処理によって抽出された上向波に対して、ミュートやデジタル・フィルター等を必要に応じてかけ、two-way time shift の後コリドール・スタックを行なって VSP 断面を得る。

3.2 P 波の VSP データ処理

P 波の処理過程のうち、代表的なものを図-22 に示す。またその処理内容を以下に概述すると、

(a) AGC

編集後・前処理としてタイムシフト（静補正）、AGC 処理を施した結果である。孔底深度で走時約 50 msec 付近に連なる P 波初動および、同じく 250 msec 付近に連なる SV 波初動が顕著に認められる。

(b) FAN FILTER

前処理として(a)のデータに対して SV 波などの遅い波群をカットする処理を行なったものである。

(c) TWO WAY TIME SHIFT および DOWN GOING WAVE SUBTRACTION

波動場分離を行なうために、往復走時シフト後に、カルフーネン・ロェーブ変換を適用して下向波を除去した結果である。

(d) MUTE

(c)の結果に S/N 比の悪い部分、すなわち一次反射波以外の成分を含む部分を削除するミュートを施した結果である。

(e) CORRIDOR STACK

(d)の結果にコリドールスタックを施し，最終処理結果とした。

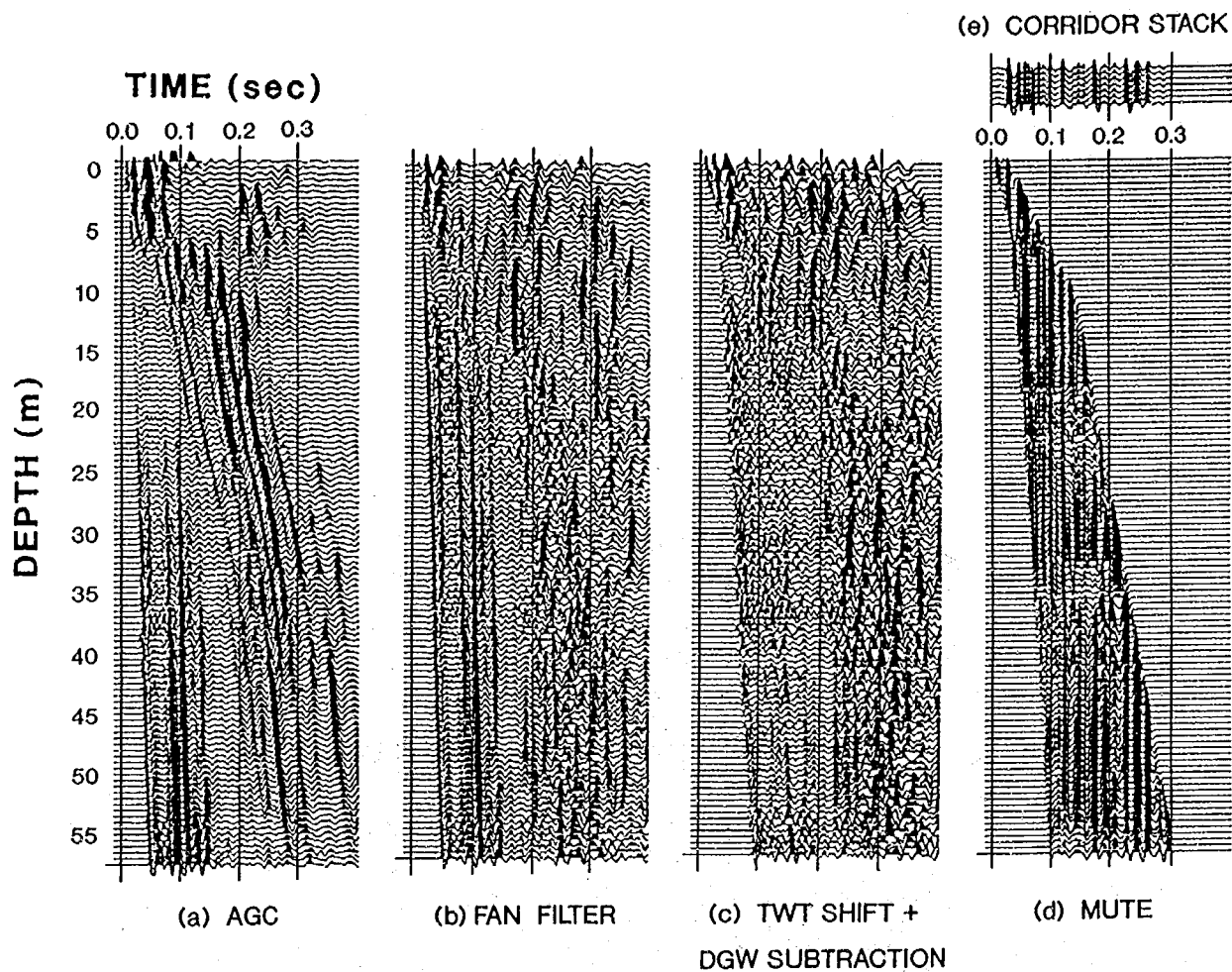


図 - 22 V S P 処理過程図

4. 浅部地盤評価への適用

4.1 浅層反射探査記録の解釈

図-23 は、SH波浅層反射断面にVSP合成記録を投影したものである。両者は良く対応している。これらの対比から反射面を同定すると0.5秒付近の反射波は深度約5.7mに位置するシルト-砂層境界に、0.4秒付近の連続性の良い反射面は深度約3.7mの砂-砂礫層境界に対比することができる。さらに0.25秒付近の反射面は深度1.3m付近にある有機質土-砂層境界に、最上部の0.05秒前後の反射は盛土-砂層境界に対比できる。

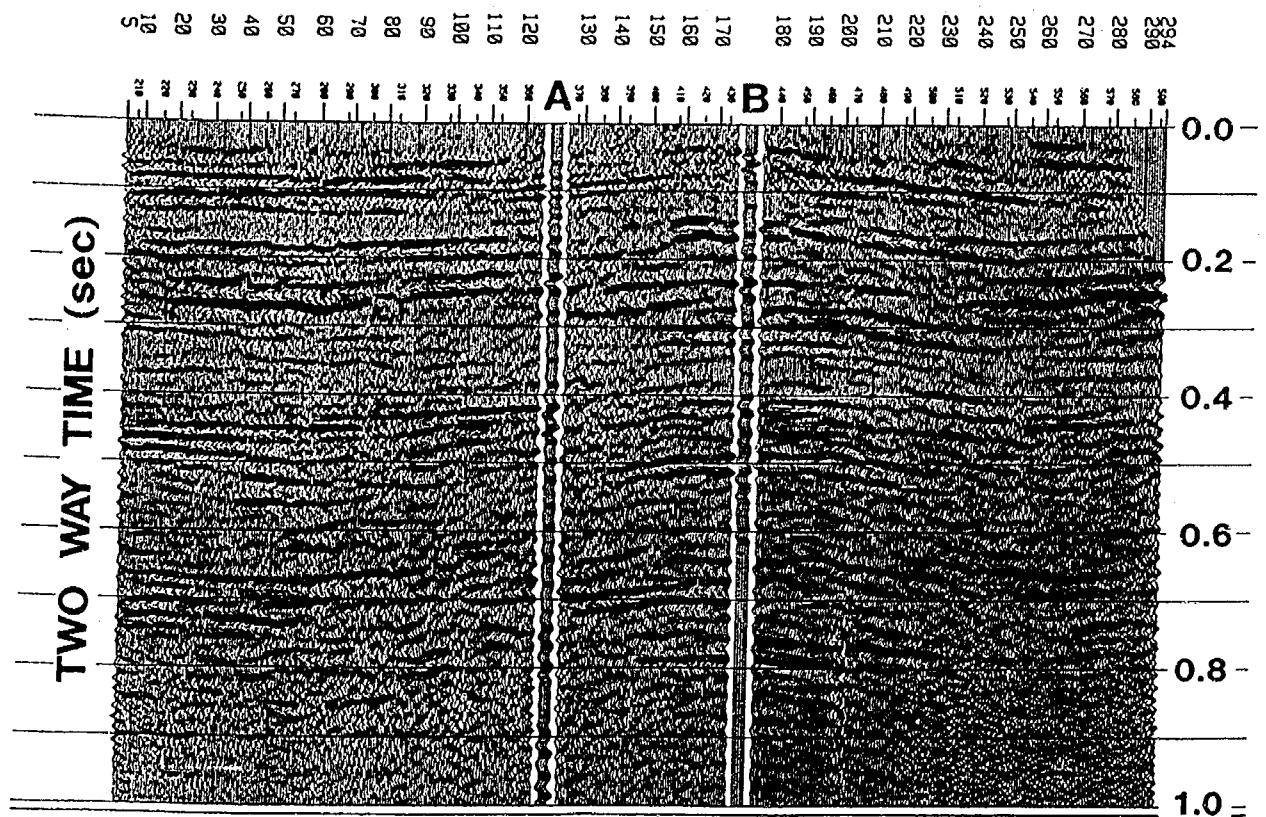


図-23 SH波反射法断面とVSP合成記録の対比（稲崎ほか，1989b）

また図-24 は、VSP処理結果と柱状図との対比を行なったものである。柱状図データはVSP探査で別に求められた走時-深度曲線から時間変換して表示してある。B孔では60msec付近にA孔では認められない強い反射が出現しているが、これは盛土と下位の沖積粘性土との境界に対応していることがわかる。また深度40m付近に分布するレキ層については、反射波の強度がその上面よりむしろ下面において大きい傾向にあることがわかる。さらにA孔では深度10m付近に砂礫層が発達しているが、B孔ではこれは認められていない。この水平方向への層相の変化は、VSPの処理結果にも明瞭に表われている。

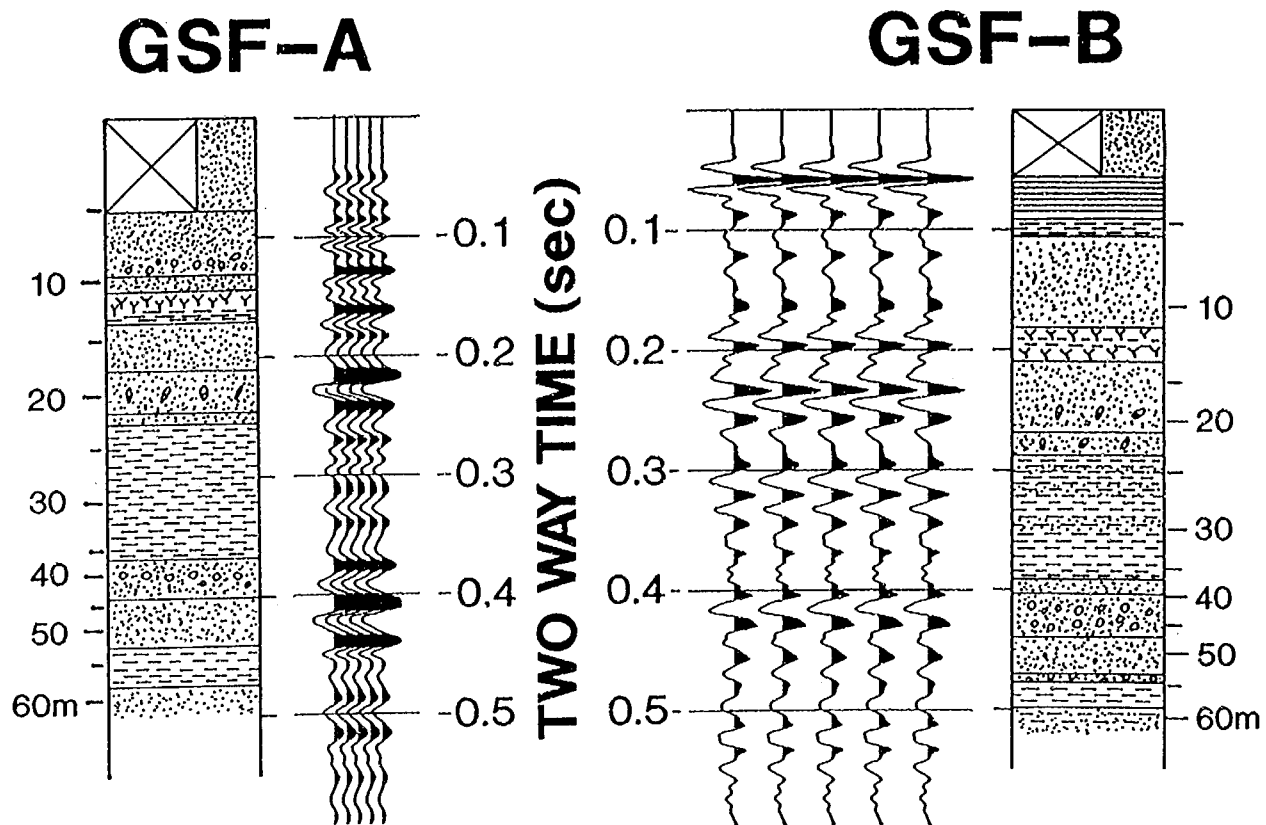


図 - 24 VSP合成波形と柱状図との対比

4.2 減衰特性の推定

VSP測定記録には図-22にも認められる様に初動下向波の後に、表層で多重反射して下向する反射群がいくつか認められる。これらを用い、以下の手順で表層の減衰定数を求めてみた。

4.2.1 多重反射波を利用する方法

深さ z における直接波 D_p 及び多重反射波 D_{ls} の周波数スペクトル $A_p(f, z)$, $A_{ls}(f, z)$ は、以下のように表される (図-25)

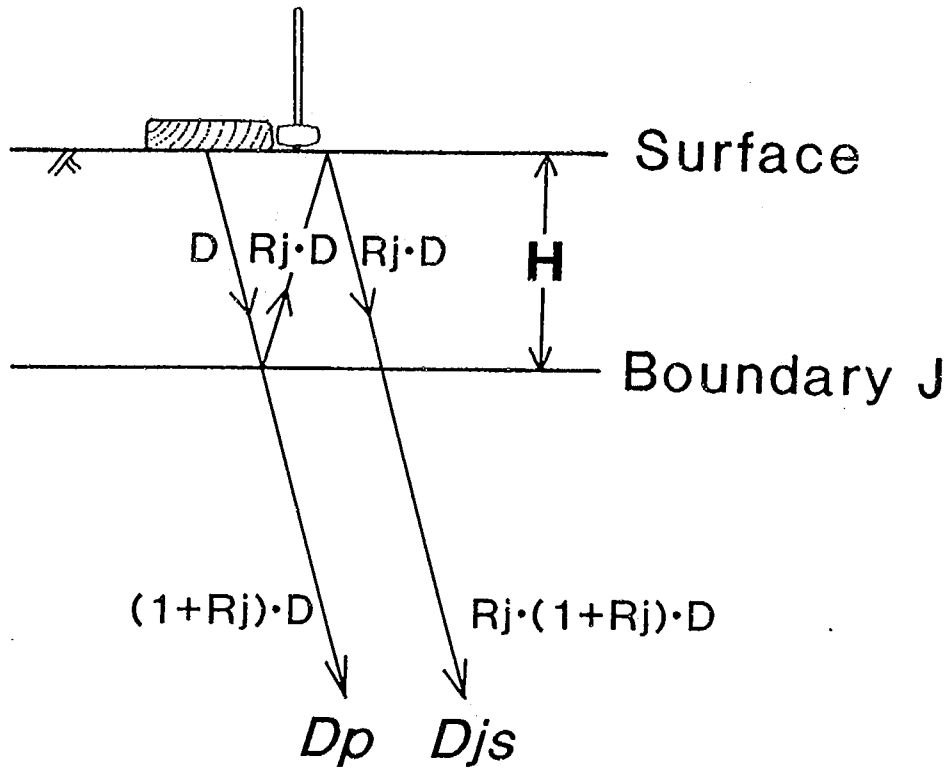


図-25 表層内での多重反射

$$A_p(f, z) = S(f) * M(f) * G_p(f, z) * \exp\{-\alpha(f, z) * z\} \quad \dots (1)$$

$$A_{ls}(f, z) = S(f) * M(f) * G_{ls}(f, z) * \exp\{-\alpha(f, z) * (z+2H)\} \quad \dots (2)$$

$S(f)$: 振源特性, $M(f)$: 計器特性, $G(f, z)$: 地盤の伝播特性

$\alpha(f, z)$: 減衰定数, H : 表層の層厚

両者のスペクトル比を対数で表すと,

$$\ln\{A_{ls}(f, z)/A_p(f, z)\} = \ln\{G_{ls}(f, z)/G_p(f, z)\} - \alpha(f, z) * 2H \quad \dots (3)$$

D_p と D_{ls} の伝播特性の違いは、表層内での多重反射の有無だけであり、後は同一の経路をたどるので、球面発散を仮定すると、

$$G_{ls}(f, z)/G_p(f, z) = z \cdot R_1 / (z + 2H) \quad \dots (4)$$

R_1 : 表層-下位層間の反射係数

(3), (4)式より

$$\alpha(f, z) = \ln \{ z \cdot R_1 \cdot A_p(f, z) / (z + 2H) \cdot A_{ls}(f, z) \} / 2H \quad \dots (5)$$

上式より R_1 を実測値より 0.28 と見積り、表層の減衰定数を求めたところ、その値は 15~55 程となり同実験場内において表面波の減衰から求めた値と調和的であった。

4.2.2 スペクトル比法

初動部分(直達波)のスペクトルの深度変化から Q 値を求める方法がスペクトル比法である。以下、土家・稲崎(1989)からその概要部を引用すると、VSPデータに含まれるいろいろな波動から、観測深度 Z 及び基準深度 Z_0 ($Z_0 < Z$) での初動ウェーブレットだけを取り出し、それぞれの振幅スペクトルを $D_z(f)$, $D_{z_0}(f)$ と書けば、それらは一般に次のように分解される。

$$D_z(f) = S_z(f) \cdot R_z(f) \cdot I_z(f) \cdot G_z(f) \cdot T_z(f) \cdot A_z(f) \cdot M_z(f) \cdot L_z(f) \cdot H_z(f) \quad \dots (1.1)$$

$$D_{z_0}(f) = S_{z_0}(f) \cdot R_{z_0}(f) \cdot I_{z_0}(f) \cdot G_{z_0}(f) \cdot T_{z_0}(f) \cdot A_{z_0}(f) \cdot M_{z_0}(f) \cdot L_{z_0}(f) \cdot H_{z_0}(f) \quad \dots (1.2)$$

ここで

$S(f)$: 振源特性

$R(f)$: 受振器特性

$I(f)$: 計器特性

$G(f)$: 幾何学的発散効果

$T(f)$: 透過減衰

$A(f)$: 屈折による波面の拡がりに伴う減衰効果

$M(f)$: 多層構造によるフィルター作用

$L(f)$: 反射波の干渉による効果

$H(f)$: 非弾性減衰

である。

スペクトル比法 (Toksöz et al. 1979) を用いて、 Q 値を得るためには、スペクトル比 $D_z(f)/D_{z_0}(f)$ の周波数に依存する因子が $H_z(f)$ 及び $H_{z_0}(f)$ だけで表わされるようにデータをデコンボリューションする必要がある。ところが一般に因子 $S \sim L$ を求めることは困難であるから、そのかわりに各因子の周波数依存性を極力小さくしてやるより他ない。そこで板たたき式振源による SH 波の観測データを念

頭において、その方法を考察することにする。

S, I

発振毎に、同じ波形の得られる機械的振源を用い、計器特性は一定とする。このようにすることによって次式が書ける。

$$S_z(f) = S_{z0}(f) \quad \dots (2.1)$$

$$I_z(f) = I_{z0}(f) \quad \dots (2.2)$$

G, T, A

$G(f)$, $T(f)$, $A(f)$ は振源が有限の大きさを持つことによって、振源近傍においてのみ周波数に依存する。そこで振源近傍と考えるべき深度を算出し、基準深度 Z_0 をこれより深く設定することによって次式が書ける。

$$G(f) = G \quad \dots (3.1)$$

$$T(f) = T \quad \dots (3.2)$$

$$A(f) = A \quad \dots (3.3)$$

$G(f)$, $T(f)$, $A(f)$ の周波数依存性は、簡単のために長方形とする振源の接地面の各部に同時にインパルス $\delta(t)$ が与えられると仮定すれば次のようにして比較的簡単に解析できる。

ボーリング孔口を原点、孔軸をZ軸、原点と接地面中心を通る直線をX軸とする3次元座標を考え、振源の接地面は点 $(x_1, -y_1)$, (x_1, y_1) , (x_2, y_1) 及び $(x_2, -y_1)$ を頂点とする長方形であるとする。 G , T , A によるフーリエ・スペクトルの積を $X_z(f)$ とすると、

$$X_z(f) = \int_{x_1}^{x_2} \int_{-y_1}^{y_1} \frac{t(x, y, z, m)}{\bar{r}(x, y, z, m)} \cdot d(x, y, z, m) \cdot e^{-i2\pi f d(x, y, z, m)} dx dy \quad \dots (4.1)$$

となる。ここに t , $\bar{r}$ を狐崎(1967)による総合透過率、等価震源距離、 d は振源と受振器の指向性による振幅変化で、走時 d とともに、地下構造 m の関数である。水平多層構造と密度一定を仮定すると、 z が第 n 層内にある時、

$$t = \prod_{k=1}^{n-1} \left[\frac{2V_k \cos \theta_k}{V_k \cos \theta_k + V_{k+1} \cos \theta_{k+1}} \right] \quad \dots (4.2)$$

$$\bar{r} = \left[\left\{ \sum_{k=1}^n \left(\frac{V_k}{V_1} \cdot \frac{Z_k}{\cos \theta_k} \cdot \left(\frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_{k+1}} \right)^2 \right) \right\} \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\sin \theta_1} \right]^{1/2} \quad \dots (4.3)$$

$$d = \left[(x^2 + y^2 \cos^2 \theta_1) (x^2 + y^2 \cos^2 \theta_n) \right]^{1/2} / (x^2 + y^2) \quad \dots (4.4)$$

$$d = \sum_{k=1}^n \frac{Z_k}{V_k \cos \theta_k} \quad \dots (4.5)$$

と書ける。ここに V_k , θ_k , Z_k はそれぞれ点 $(x, y, 0)$ から $(0, 0, z)$ へ向かう波動の第 k 層内の速度、波線が鉛直線となす角度及び第 k 層の層厚である。また d には波線に垂直な成分のみを考慮し (ファー・フィールド近似), 速度型の受振器を打撃方向に向けて設置することを仮定している。 V_k , Z_k は VSP データの初動走時を解析することによって得られ, θ_k もスネルの法則と幾何学的な関係を示す, 次の2式

$$\cos \theta_k = \left[1 - \left(\frac{V_k \sin \theta_1}{V_1} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \dots (4.6)$$

$$\left[x^2 + y^2 \right]^{1/2} = \sum_{k=1}^n Z_k \tan \theta_k \quad \dots (4.7)$$

を数値的に解くことによって得られる。周波数と深度をパラメータとし, V_k , θ_k , Z_k を (4.1) ~ (4.5) に代入して計算すれば, 適当な誤差範囲で $G(f) \cdot T(f) \cdot A(f)$ が周波数に依存しなくなる深度が求められる。

M

多層構造によるフィルター作用については, 多くの研究 (O'Doherty & Anstey (1971), Schoenberger & Levin (1974), 石井 (1975), Spencer et al (1977), Schoenberger & Levin (1978), Spencer et al (1982)) が行なわれてきたが, そのほとんどは石油資源を対象とする深い井戸での観測結果に基づいた統計的な考察である。ところが土木地質調査における比較的浅いボーリング孔でのデータに寄与するのは, まばらに存在するあまり多くない薄層による効果だと思われる。そこでこのような仮定によって解析的に考察してみる。

図-24 に示す薄層による効果を考える。薄層上・下面に上から波が入射する時の粒子速度についての反射係数をそれぞれ $r_{1,u}$, $r_{1,d}$ とすると, 初動①及びマルチプル②, ③の応答 h_1 , h_2 及び h_3 は, 初動到着時刻を時間原点として,

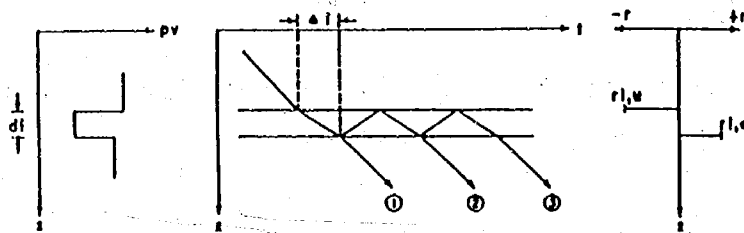


図-26 薄層による層内マルチプル (土家・稲崎, 1989)

$$h_1(t) = \{1 + (r_{1,u} + r_{1,d}) + r_{1,u} \cdot r_{1,d}\} \delta(t) \quad \cdots (5.1)$$

$$h_2(t) = \{-r_{1,u} \cdot r_{1,d} + O(r^2)\} \delta(t - 2di) \quad \cdots (5.2)$$

$$h_3(t) = O(r^4) \delta(t - 4di) \quad \cdots (5.3)$$

と書ける。従って3次以上の項を無視すると、透過波の応答 $m_{d,i}(t)$ は次式となる。

$$m_{d,i}(t) = \{1 + (r_{1,u} + r_{1,d}) + r_{1,u} \cdot r_{1,d}\} \delta(t) - r_{1,u} \cdot r_{1,d} \delta(t - 2di)$$

$r_{1,u} + r_{1,d} = R_i^{(1)}$, $r_{1,u} \cdot r_{1,d} = R_i^{(2)}$ として、フーリエ変換すれば次式を得る。

$$\tilde{M}_{d,i}(f) = 1 + R_i^{(1)} + R_i^{(2)}(1 - e^{-i4\pi f di}) \quad \cdots (5.4)$$

基準深度 Z_0 と観測深度 Z の間に、層厚によって m 種類に分類される合計 N 個の薄層がまばらに存在するとし、第 j 種の層厚は d_j 、個数は n_j だとすると、透過波 $\tilde{M}_d(f)$ はまばらに存在することから $\tilde{M}_{d,i}$ ($i = 1, \dots, N$) の単純積で表わされ、次のようになる。

$$\tilde{M}_d(f) = 1 + \sum_{i=1}^N R_i^{(1)} + \sum_{k=1}^N R_k^{(1)} R_i^{(1)} + \sum_j^m \sum_{n_j}^{n_j} R_{(j)}^{(2)} (1 + e^{-i4\pi f d_j}) \quad \cdots (5.5)$$

上向き波についても、同様の式が導かれる。

$$\tilde{M}_u(f) = 1 - \sum_{i=1}^N R_i^{(1)} + \sum_{k=1}^N R_k^{(1)} R_i^{(1)} + \sum_j^m \sum_{n_j}^{n_j} R_{(j)}^{(2)} (1 + e^{-i4\pi f d_j}) \quad \cdots (5.6)$$

ここで、薄層の数が多いという仮定により3次以上の項を無視している。 $R_i^{(1)}$ は一般にゼロに近い値をとり、かつランダムであると期待されるから、次のような近似が行なえる。

$$\sum_{i=1}^N R_i^{(1)} = 0, \quad \sum_{k=1}^N R_k^{(1)} R_i^{(1)} = 0 \quad \cdots (5.7)$$

(5.5) ~ (5.7) 式より次式を得る。

$$\tilde{M}(f) = \tilde{M}_d(f) = \tilde{M}_u(f) = 1 + \sum_j^m \sum_{n_j}^{n_j} R_{(j)}^{(2)} (1 - e^{-i4\pi f d_j}) \quad \cdots (5.8)$$

再び、薄層の数が多いという仮定と、 $\sum R_i^{(2)}$ が小さいという仮定を用いると、多層構造による効果 $M_z(f)/M_{z0}(f)$ は次のように近似される。

$$\frac{M_d(f)}{M_{z0}(f)} = \left[1 + 4 \sum_j^m \sum_{n_j}^{n_j} (R_{(j)}^{(2)} \cdot \sin^2(2\pi f d_j)) \right]^{1/2} \quad \cdots (5.9)$$

$\sum_{n_j}^{n_j} R_{(j)}^{(2)} < 0$ と考えてさしつかえないから、 $C_{z,j} = -2 \sum_{n_j}^{n_j} R_{(j)}^{(2)} (> 0)$ を使って次のように書き換えることもできる。

$$\frac{M_z(f)}{M_{zo}(f)} = \left[1 - 2 \sum_j^m (C_{z,j} \cdot \sin^2(2\pi f d_j)) \right]^{1/2} \quad \dots (5.10)$$

I

VSPデータ処理における波動場の分離技術を用いて反射波を除去すると、次式が書ける。

$$L(f) = 1 \quad \dots (6.1)$$

H

Q値が周波数に依存しないと考えると次式が書ける。

$$\frac{M_z(f)}{M_{zo}(f)} = \exp(-B_z f) \quad \dots (7.1)$$

ただし、

$$B_z = \int_{z_0}^z \frac{\pi}{V_\xi Q_\xi} d\xi \quad \dots (7.2)$$

であり、Schoenberger & Levin(1978)にならい、これを累積減衰と呼ぶ。

R

(1)~(3), (5)~(7)式より初動ウェーブレットのスペクトル比は次のように簡単になった。

$$\begin{aligned} \frac{D_z(f)}{D_{zo}(f)} &= \frac{G_z \cdot T_z \cdot A_z}{G_{zo} \cdot T_{zo} \cdot A_{zo}} \cdot \frac{R_z(f)}{R_{zo}(f)} \cdot \left[1 - 2 \sum_j^m (C_{z,j} \cdot \sin^2(2\pi f d_j)) \right]^{1/2} \cdot \exp(-B_z f) \\ &= \alpha \cdot \frac{R_z(f)}{R_{zo}(f)} \cdot \left[1 - 2 \sum_j^m (C_{z,j} \cdot \sin^2(2\pi f d_j)) \right]^{1/2} \cdot \exp(-B_z f) \quad \dots (8.1) \end{aligned}$$

ところが、(5.8)式の示すところから上向きウェーブレットのスペクトル比 $U_{zo}(f)/U_z(f)$ にも同様の式が書け次のようになる。

$$\frac{U_{zo}(f)}{U_z(f)} = \beta \cdot \frac{R_{zo}(f)}{R_z(f)} \cdot \left[1 - 2 \sum_j^m (C_{z,j} \cdot \sin^2(2\pi f d_j)) \right]^{1/2} \cdot \exp(-B_z f) \quad \dots (8.2)$$

従ってS/N比の高い上向き波が抽出できれば、両方のスペクトル比の積をとることによって

$$\frac{D_z(f)}{D_{zo}(f)} \cdot \frac{U_{zo}(f)}{U_z(f)} = r \cdot \left[1 - 2 \sum_j^m (C_{z,j} \cdot \sin^2(2\pi f d_j)) \right] \cdot \exp(-2B_z f) \quad \dots (8.3)$$

となる。ここで $r = \alpha \cdot \beta$ は周波数に依存しない因子である。

以上の考察により、適切な処理を施せば、簡単な(8.3)式で近似されるスペクトル比を得ることができることがわかった。しかし(8.3)式もまだかなりやっかいである。ところが、 d_j 、 $C_{z,j}$ 及び m に応じて適当に低い周波数範囲で、

$$1 \gg 2 \sum_j^m (C_{z,j} \cdot \sin^2(2\pi f d_j))$$

と考えると良い深度においては次式が導ける。

$$\begin{aligned} 1 - 2 \sum_j^m (C_{z,j} \cdot \sin^2(2\pi f d_j)) \\ = \exp \left[\ln \left\{ 1 - 2 \sum_j^m (C_{z,j} \cdot \sin^2(2\pi f d_j)) \right\} \right] \\ = \exp \left[-2 \sum_j^m (C_{z,j} \cdot \sin^2(2\pi f d_j)) \right] \quad \dots (9.1) \end{aligned}$$

(8.3)式の左辺の対数を $P_z(f)$ と書けば、(9.1)式によって次式を得る。

$$P_z(f) = \delta - 2 \left\{ B_z f + \sum_j^m (C_{z,j} \cdot \sin^2(2\pi f d_j)) \right\} \quad \dots (9.2)$$

(9.2)式は、初動と上向き波のスペクトル比の積の対数を周波数に対してプロットすれば、そのグラフは、累積減衰をあらわすトレンドの上を振動する形になることを示している。 $\sin^2$ の項が正であることから、真の累積減衰はこのグラフの極大値をつないでいくことによって得られるとも考えられる。しかし2つの観測深度 $Z1$ と $Z2$ の間が均質であれば、この項は等しくなるので、変動の小さい適当な低周波帯域に最小自乗法を用いて見かけの累積減衰を計算し、この値を深度に対してプロットすれば、その傾きは少なくともこの区間の真の累積減衰の変化率を現すことになる。従ってこのグラフから(7.2)式によって Q 値を得ることができる。

5. ま と め

54°系配置の地震計とインナーショッカーを内蔵したVSP用ゾンデを試作し、それらを用いて土木研究所構内にある2本の試験孔においてVSPを実施した。解析結果は同地でとられていた反射法探査結果と良く対応するとともに、測定記録から表層の減衰定数の推定が可能であることがわかった。

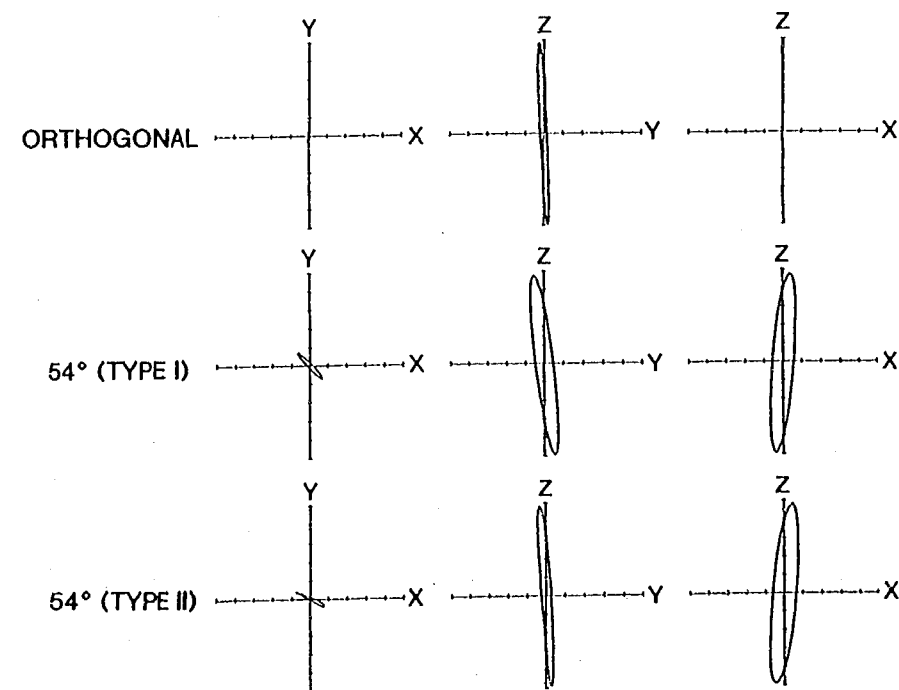
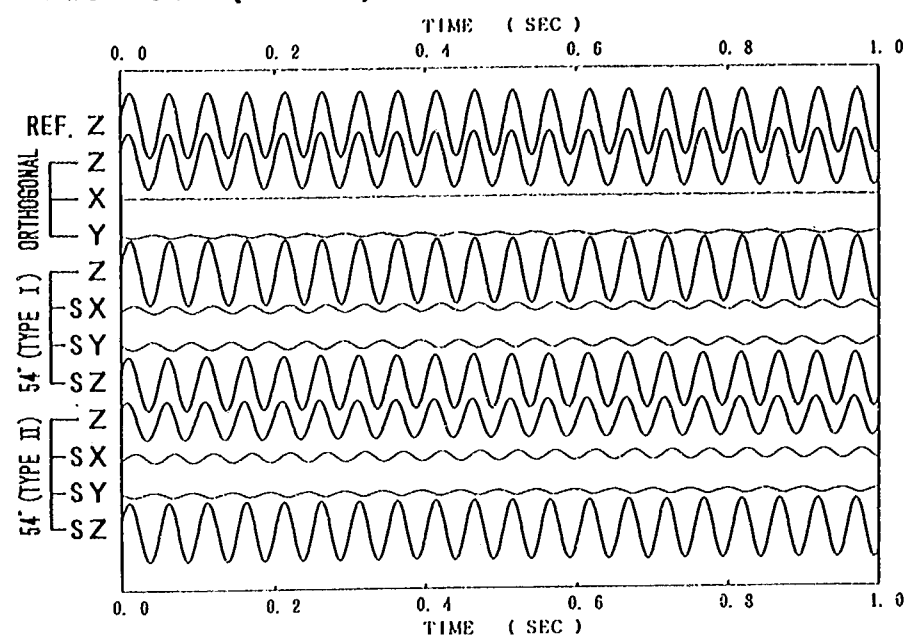
なおVSPゾンデの試作にあたっては、日本物理探鉱株式の協力を得た。またゾンデの特性試験および孔内測定・データ解析にあたっては同社渡辺文雄氏、星野達也氏、河村茂樹氏に尽力いただいた。さらに東京大学地震研究所の柳沢助教授には振動台実験に際して便宜をはかっていただいた。ダイヤコンサルタント㈱の土屋輝光氏には、業績の一部の引用を御快諾いただいた。以上の各氏にここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 稲崎富士・渡辺文雄・鈴木文大・河村茂樹・星野達也(1988):小孔径VSPプローブの開発, 物理探査学会第78回学術講演会講演論文集, p.77-81
- 稲崎富士・神保悟・阿部昌彦・長沢政和(1989a):沖洪積層を対象とした物理探査(その1)-土木研究所地質野外実験場における総合的調査-, 土木研究所資料, No.2759, 61p
- 稲崎富士・阿部昌彦・長沢政和(1989b):VSPを利用した浅部地盤の評価, 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, p.93-96
- 土家輝光・稲崎富士(1989):VSPデータによるQ値解析, 物理探査学会第81回学術講演会講演論文集, p.118-123

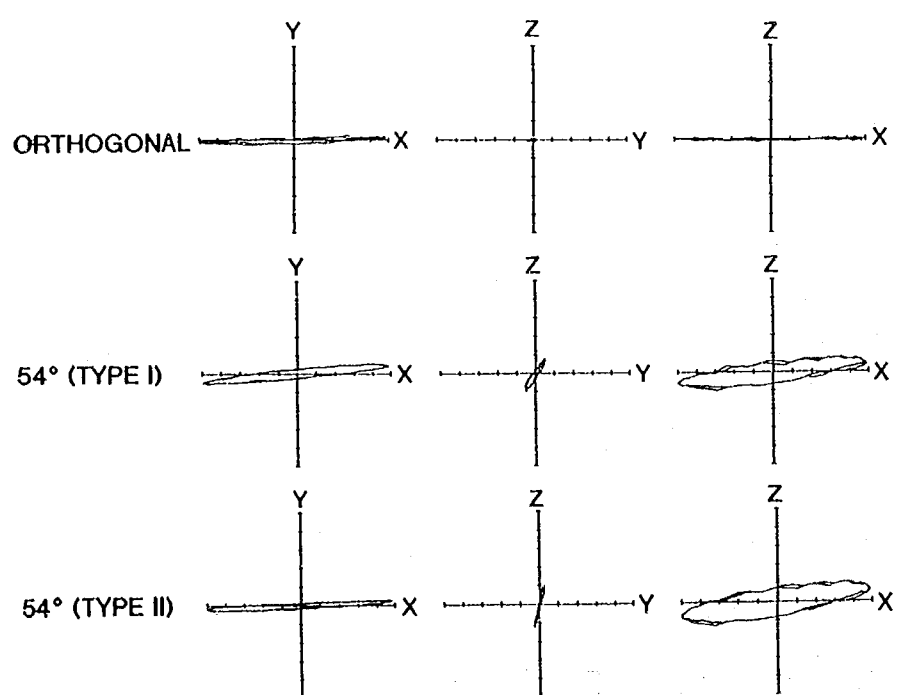
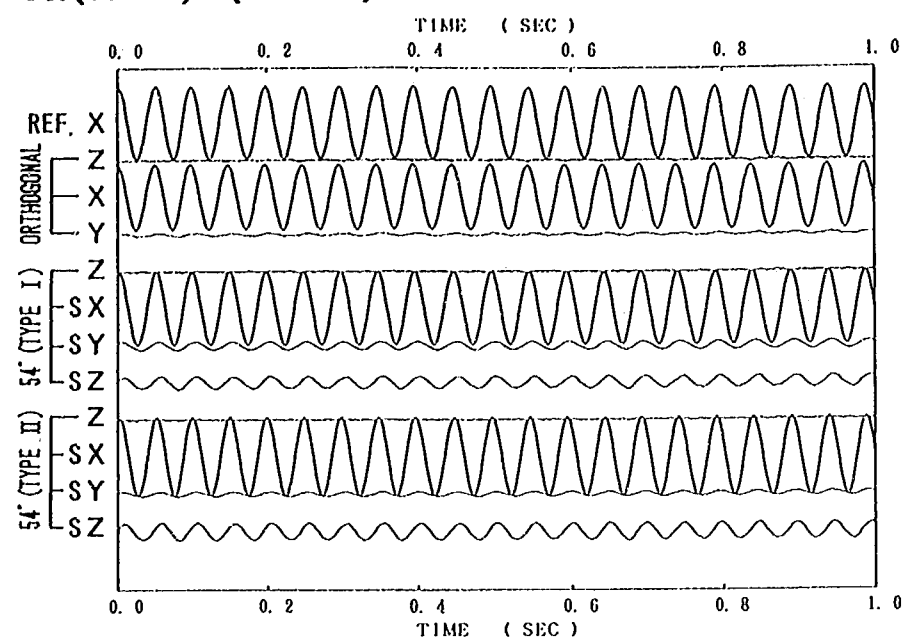
付 図

Vertical (20Hz)



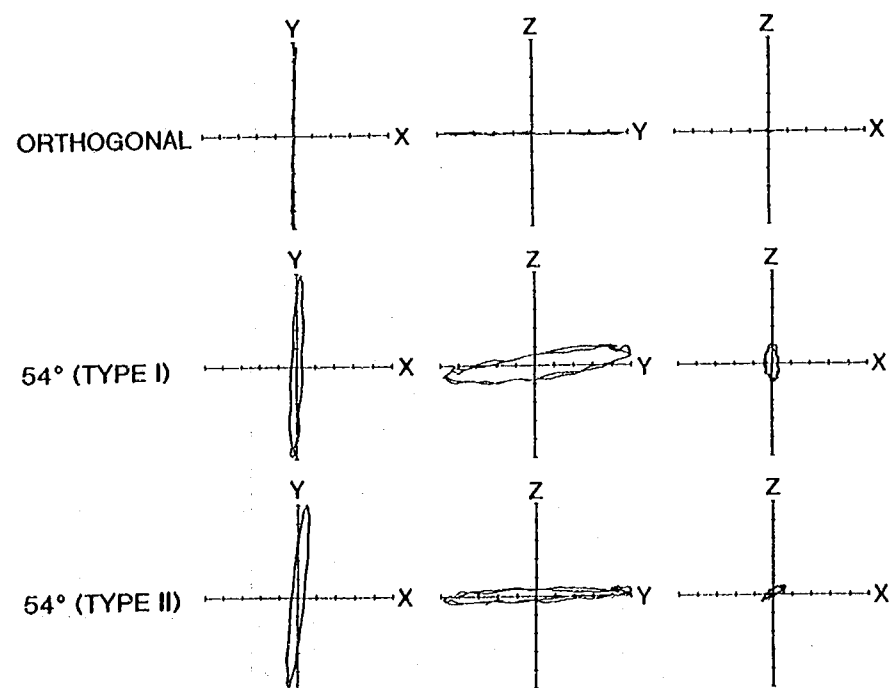
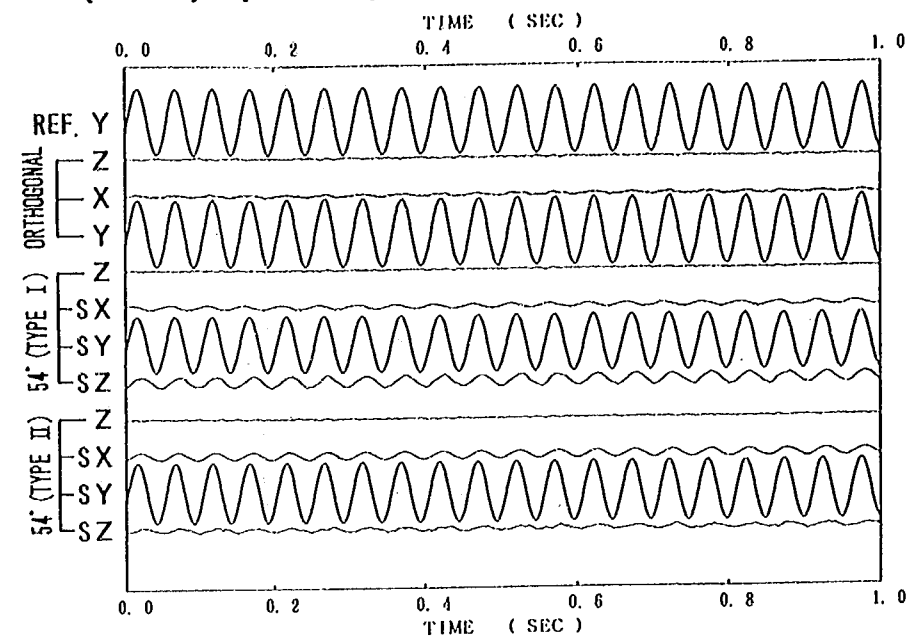
1-1-a

X:(H-1) (20Hz)



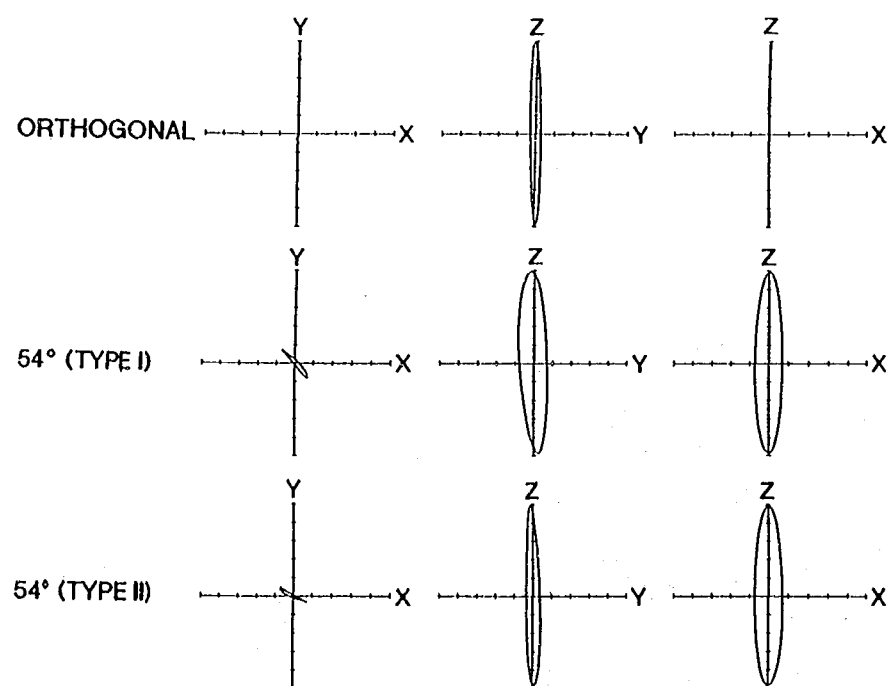
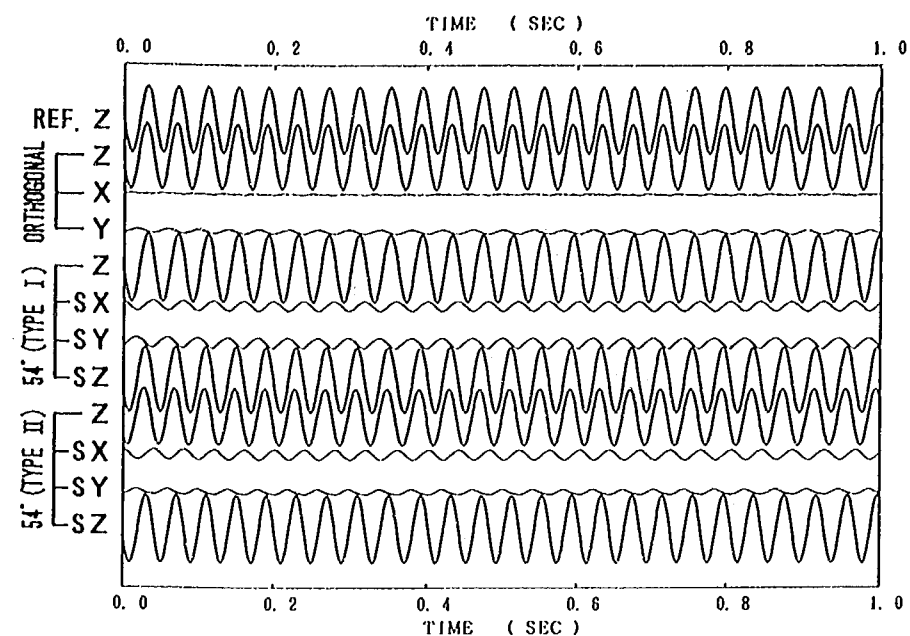
1-1-b

Y:(H-2) (20Hz)



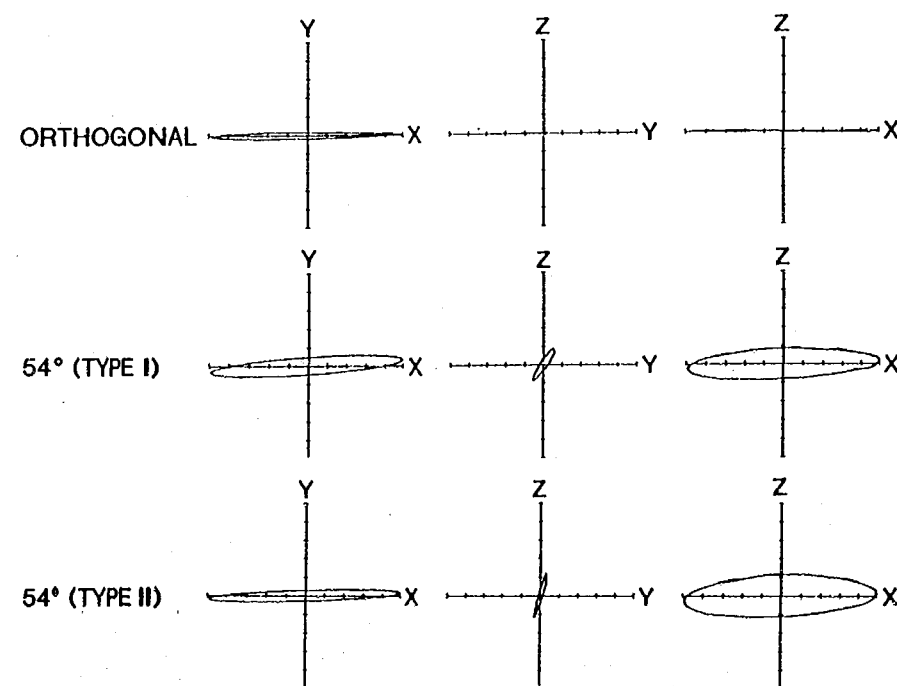
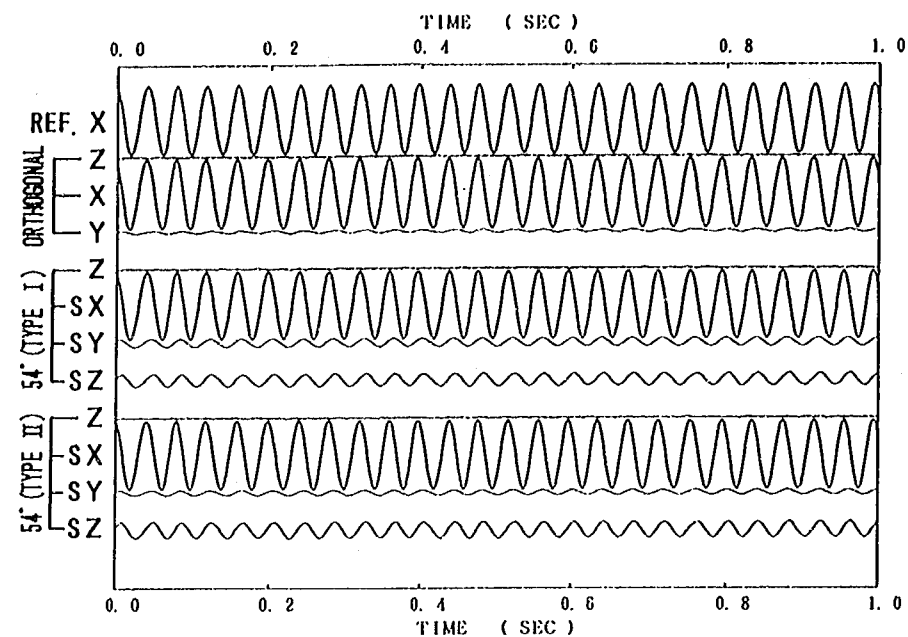
1-1-c

Vertical (25Hz)



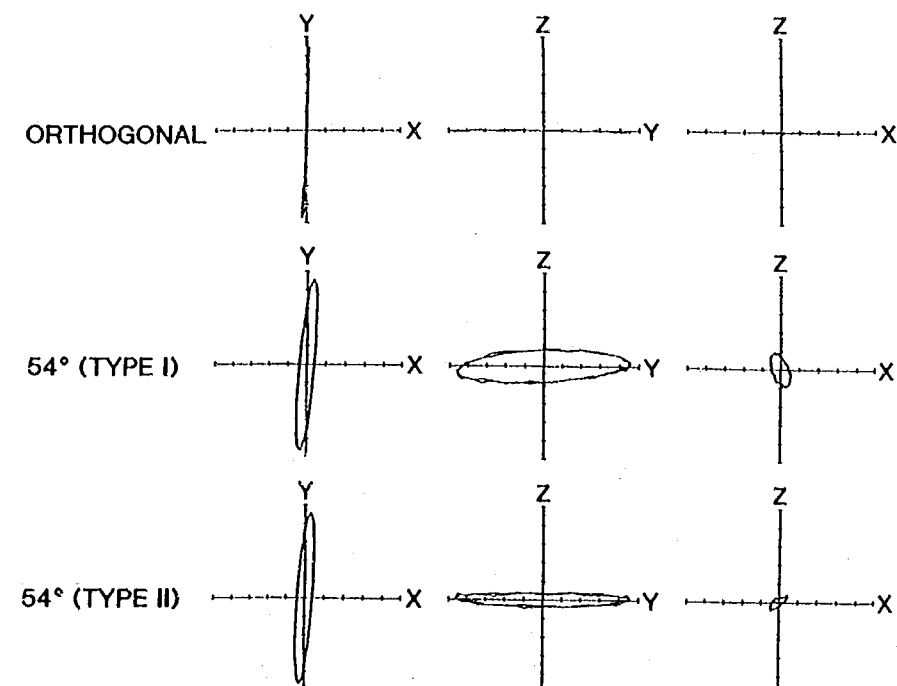
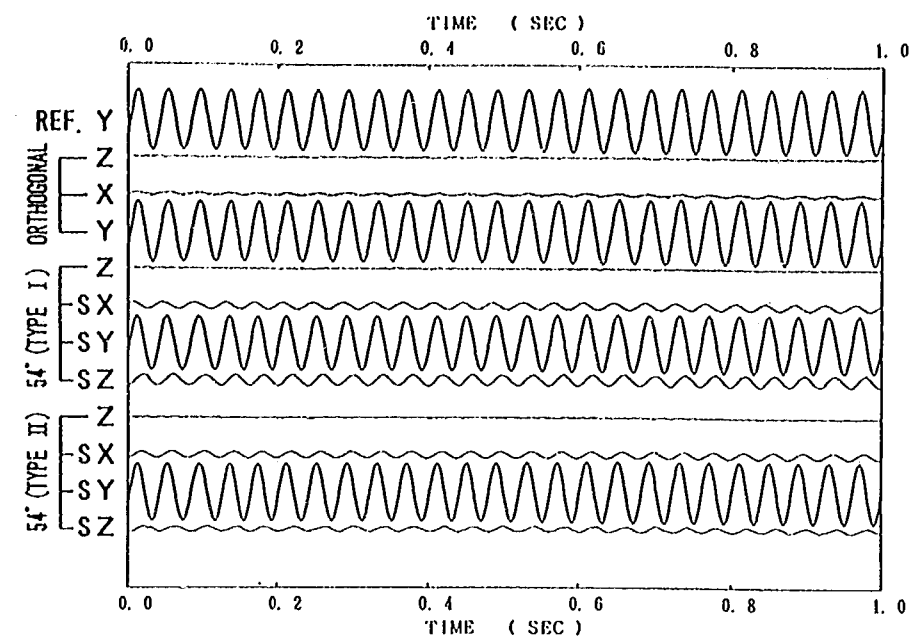
1-2-a

X:(H-1) (25Hz)



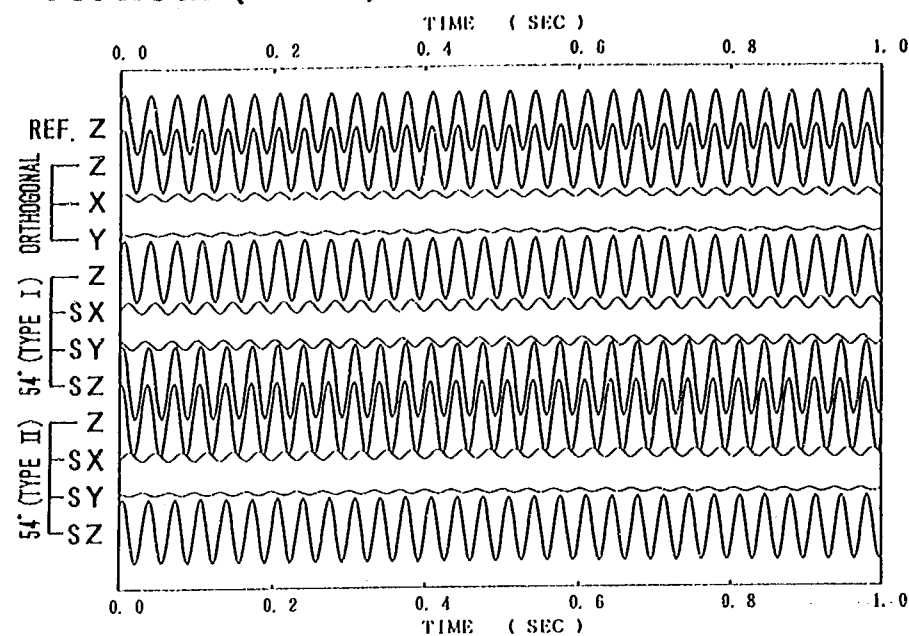
1-2-b

Y:(H-2) (25Hz)

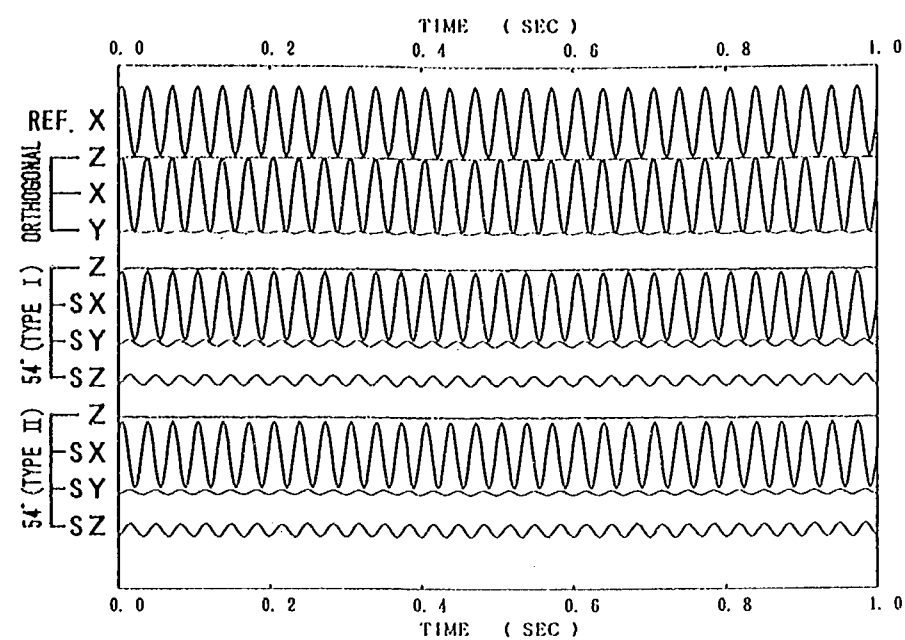


1-2-c

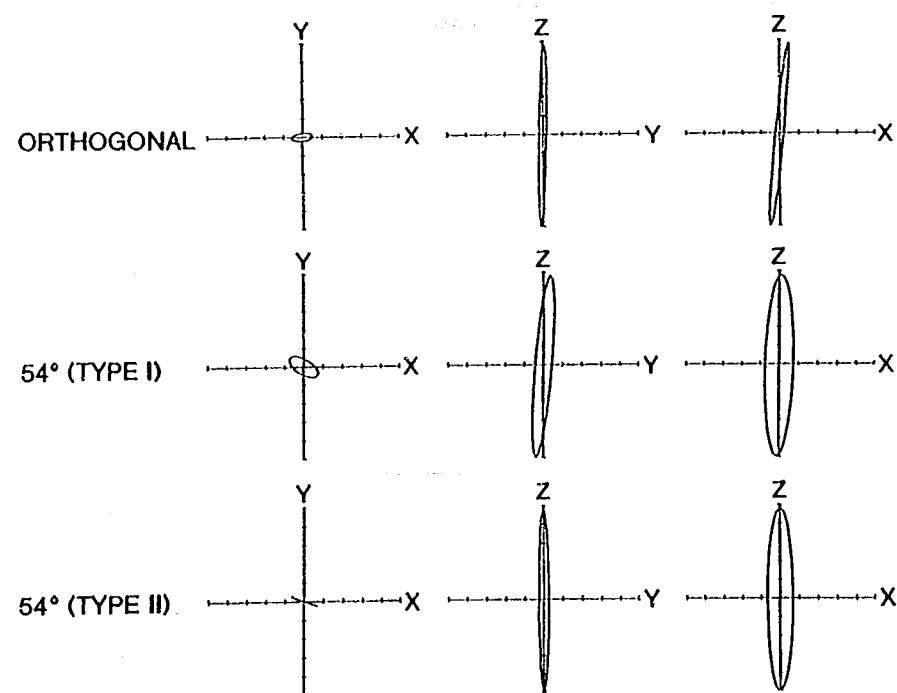
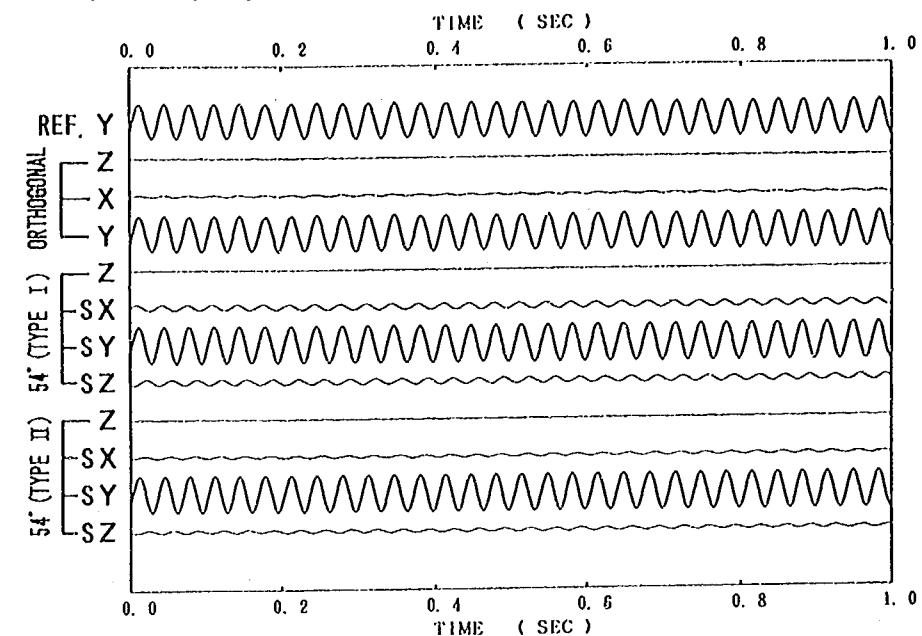
Vertical (30Hz)



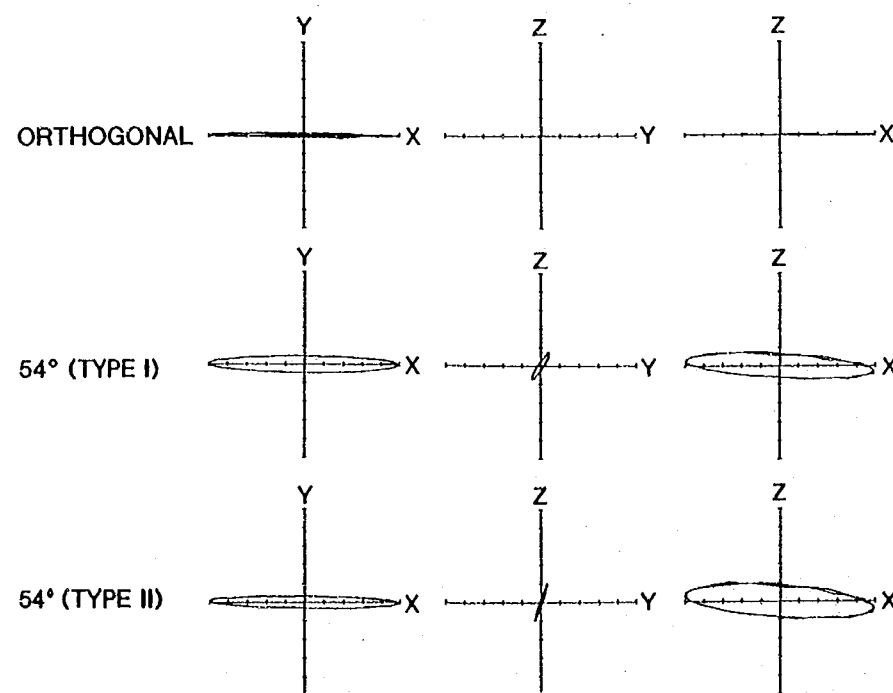
X:(H-1) (30Hz)



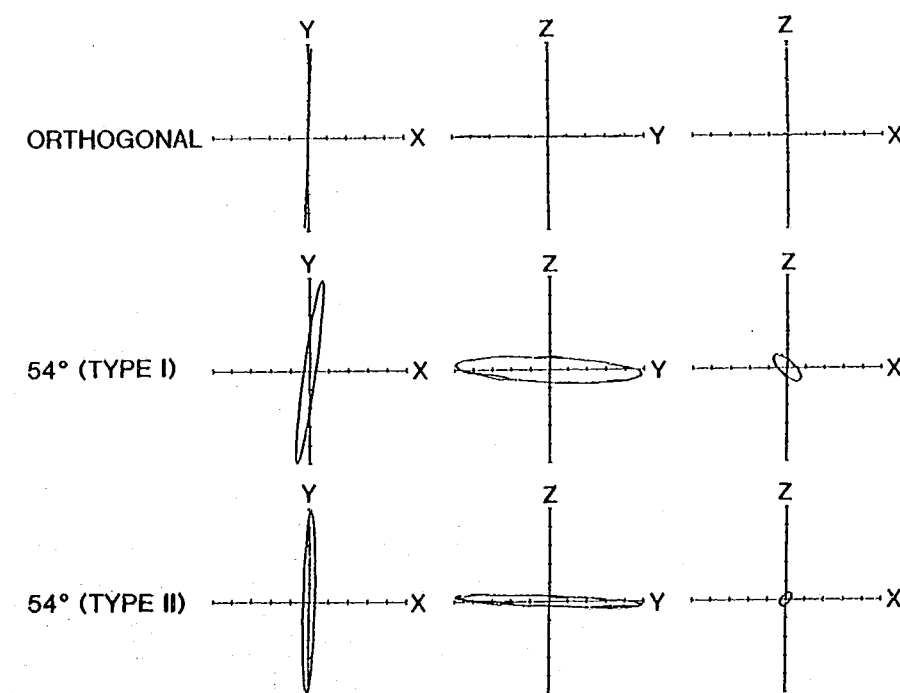
Y:(H-2) (30Hz)



1-3-a

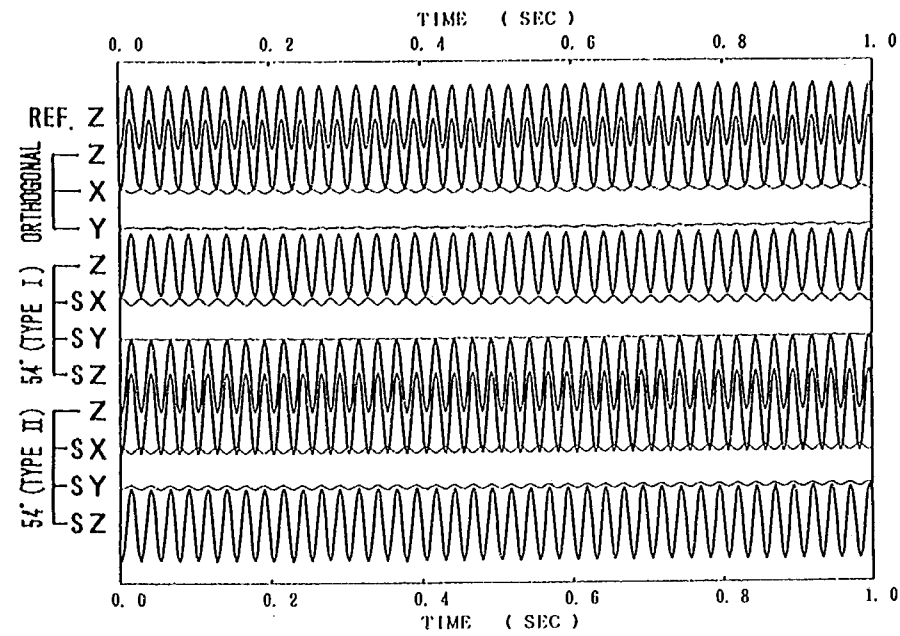


1-3-b

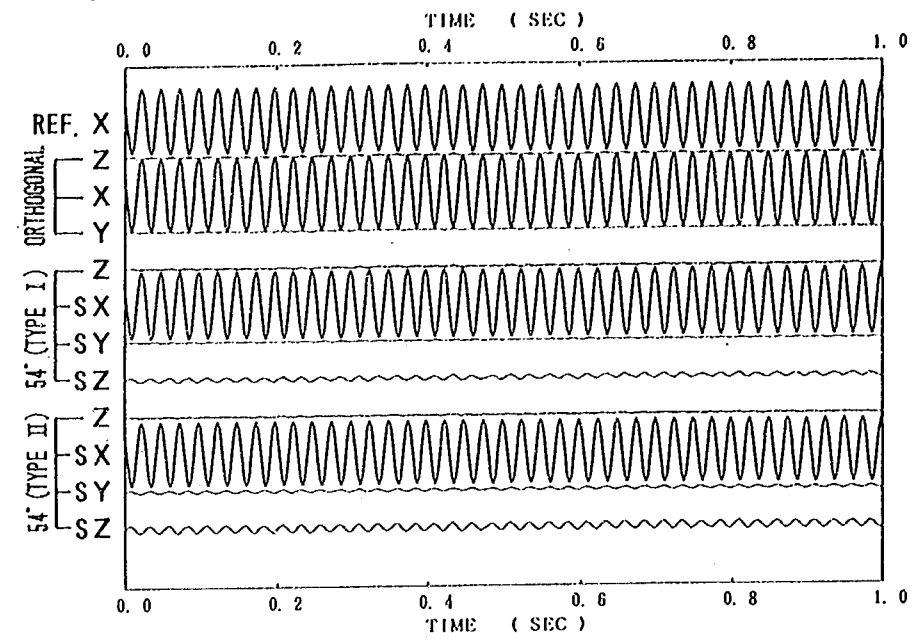


1-3-c

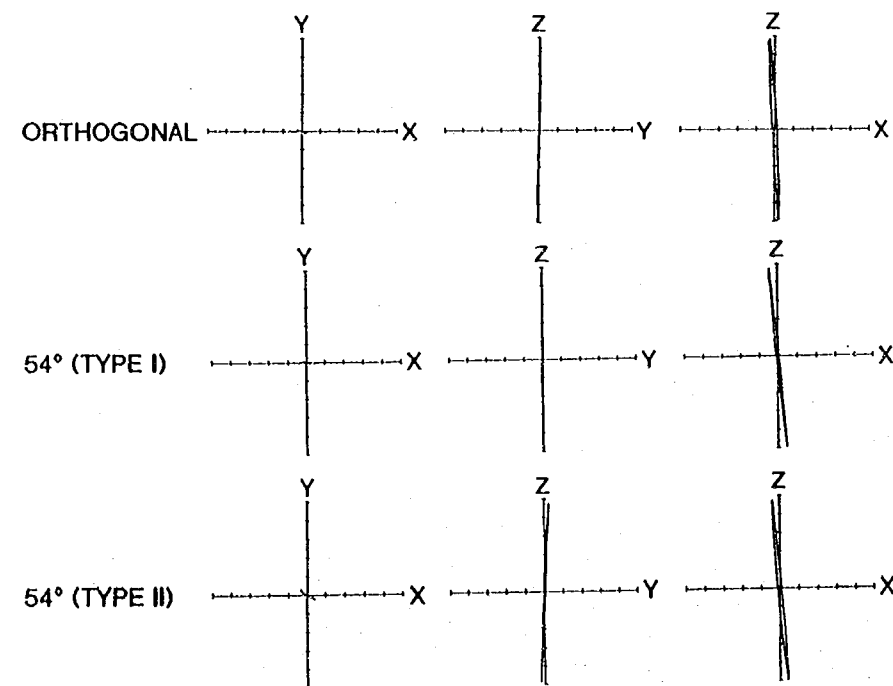
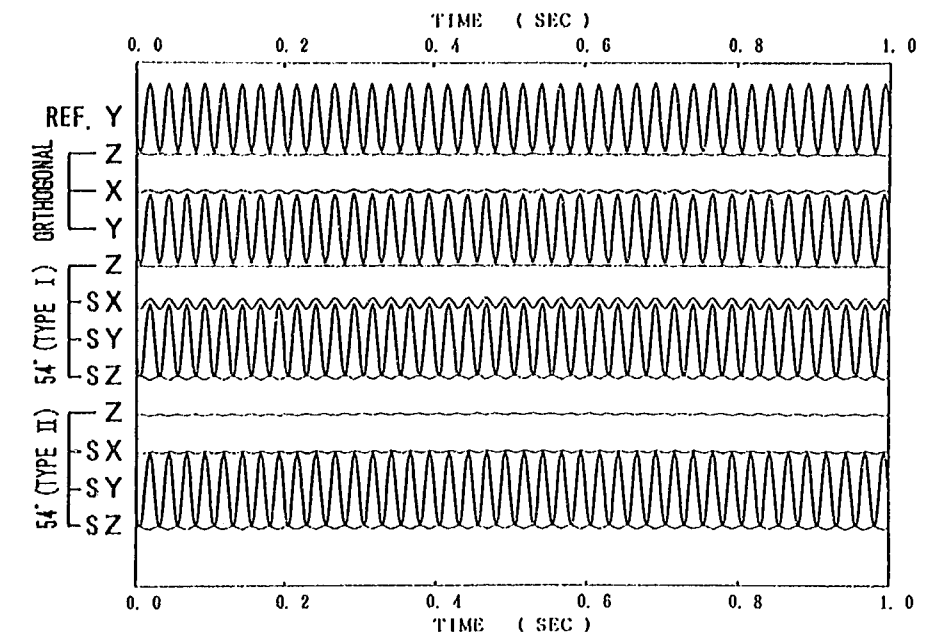
Vertical (40Hz)



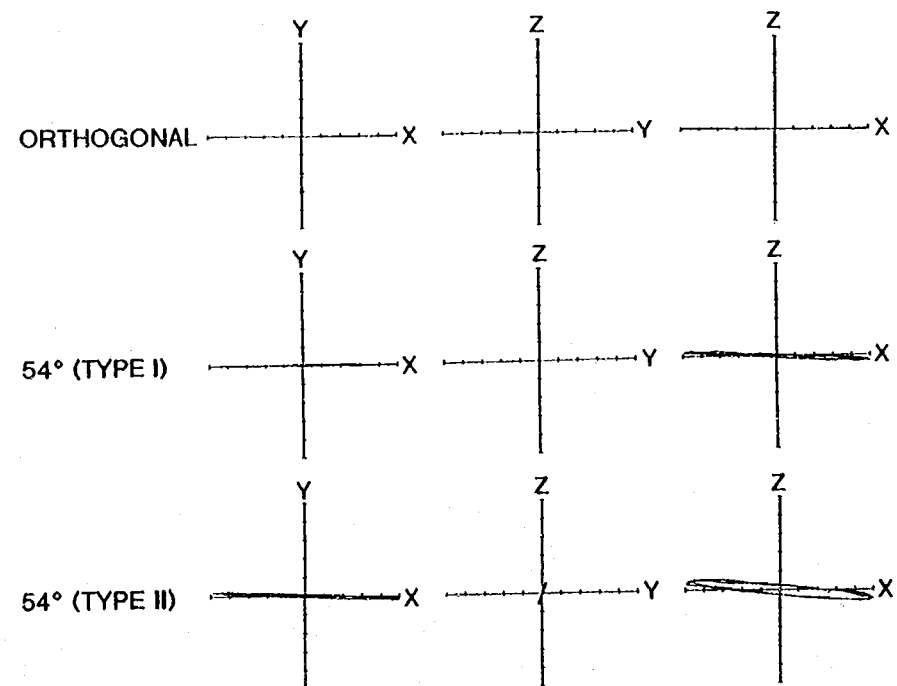
X:(H-1) (40Hz)



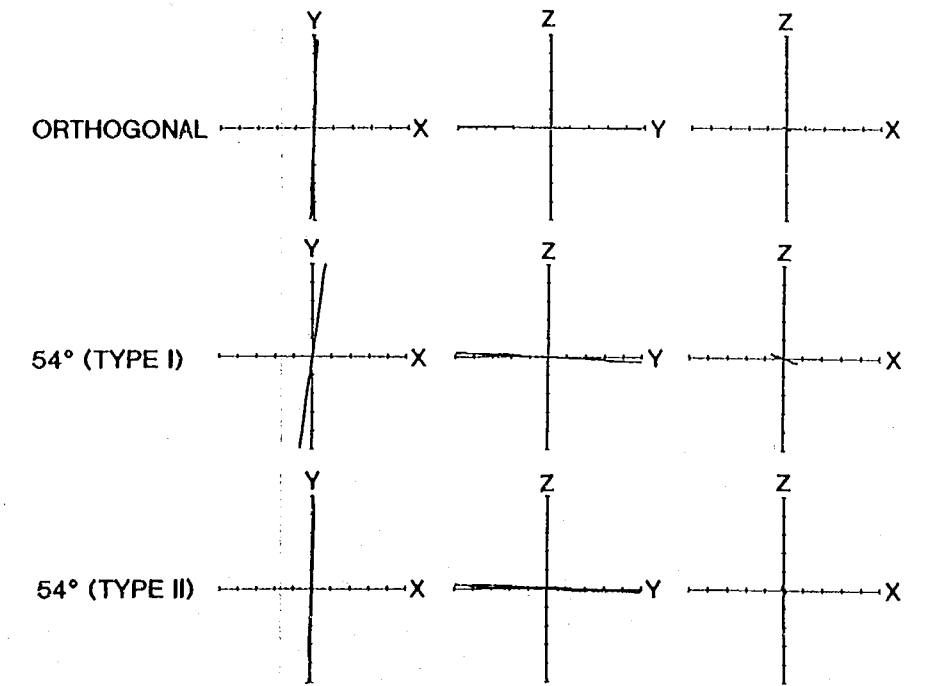
Y:(H-2) (40Hz)



1-4-a

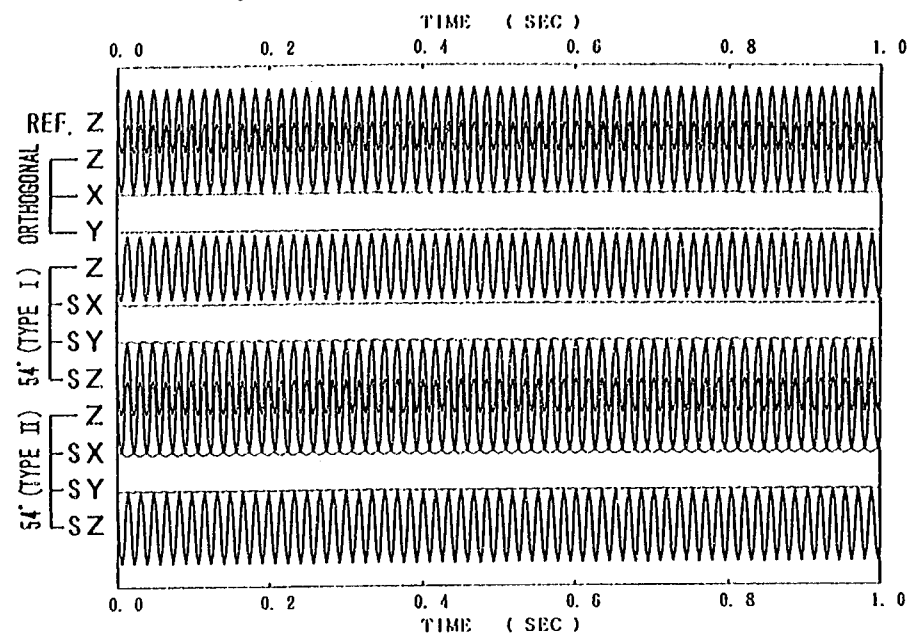


1-4-b

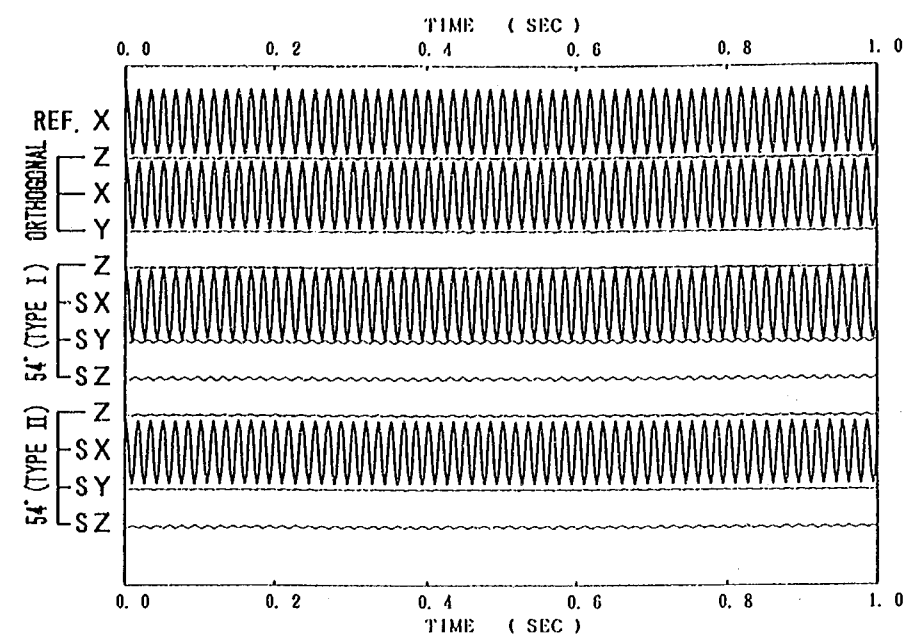


1-4-c

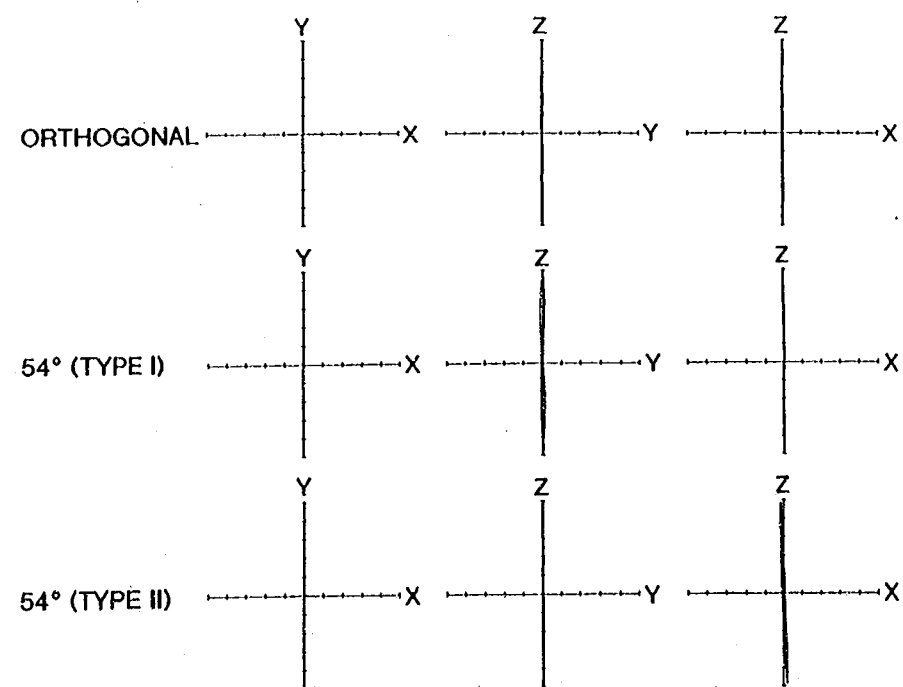
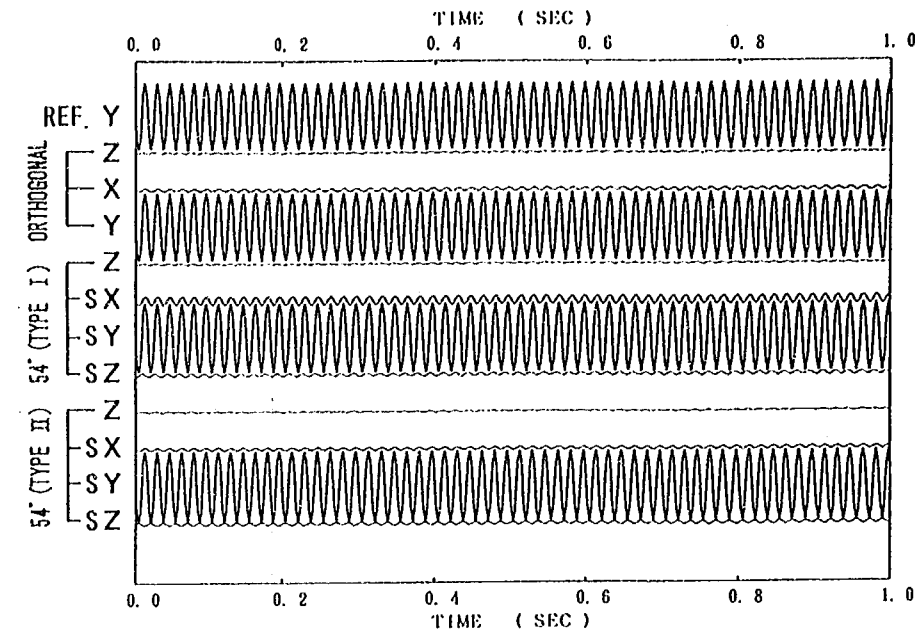
Vertical (60Hz)



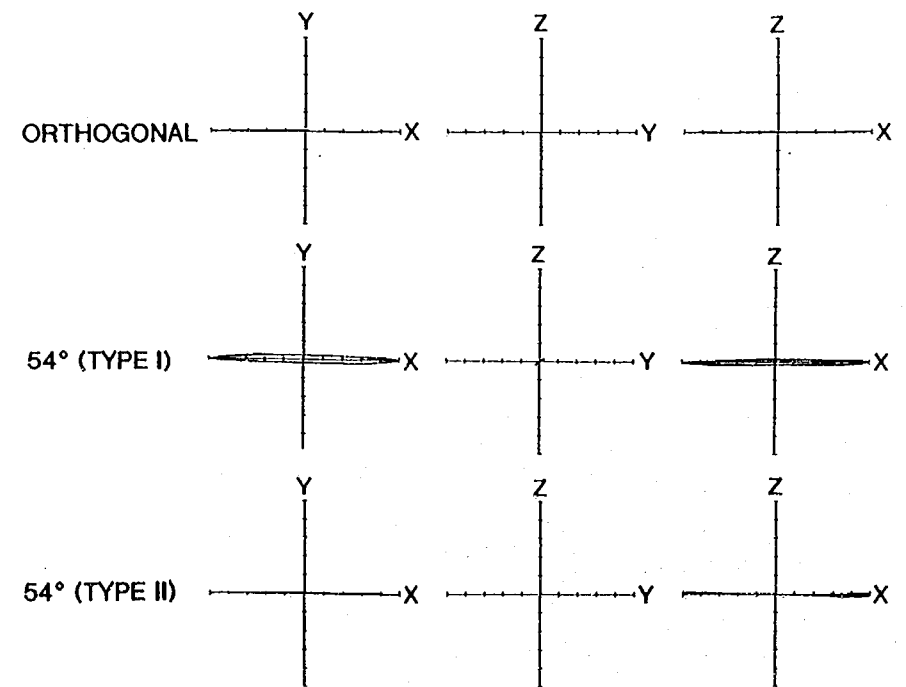
X:(H-1) (60Hz)



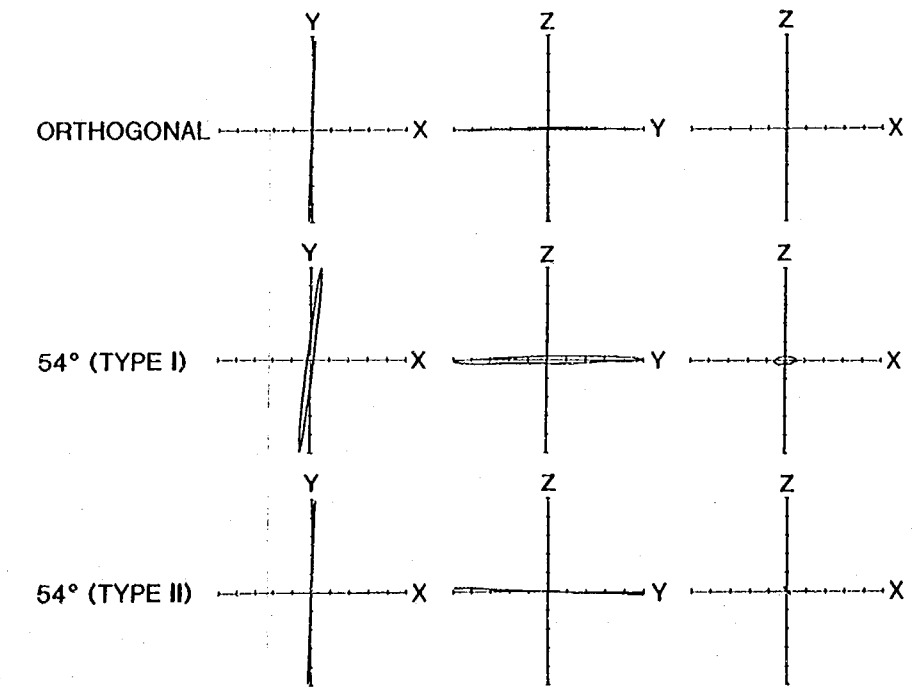
Y:(H-2) (60Hz)



1-5-a

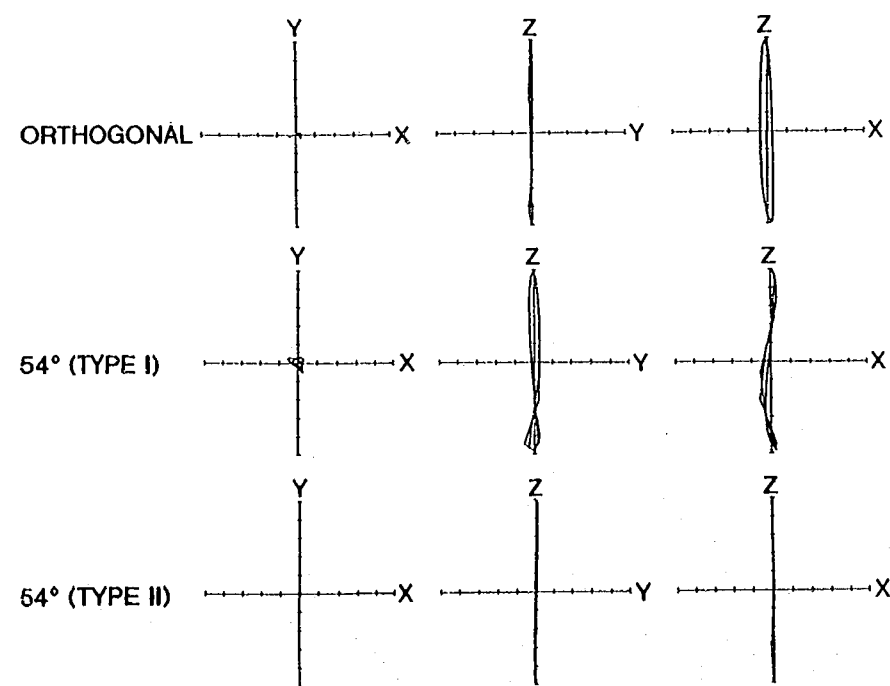
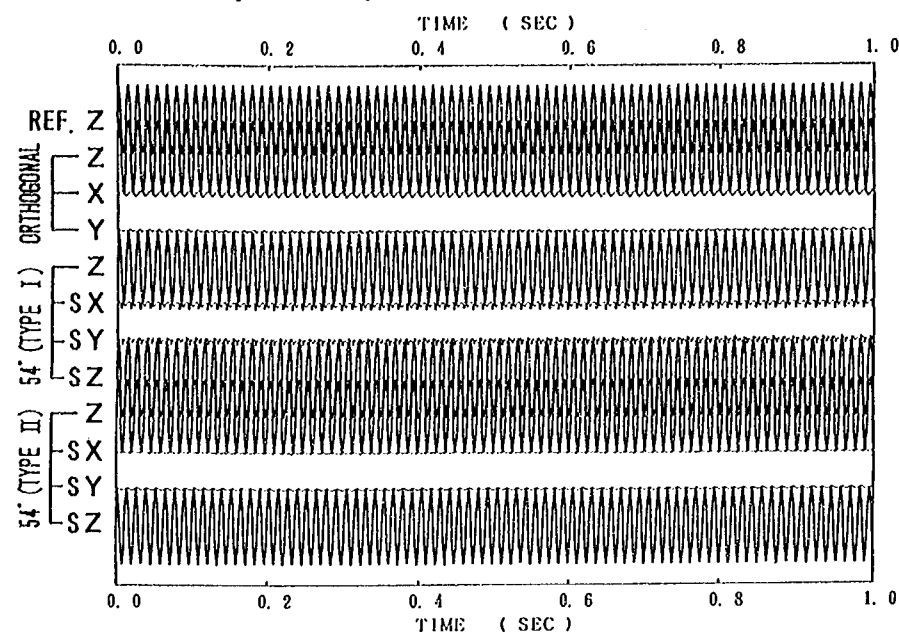


1-5-b



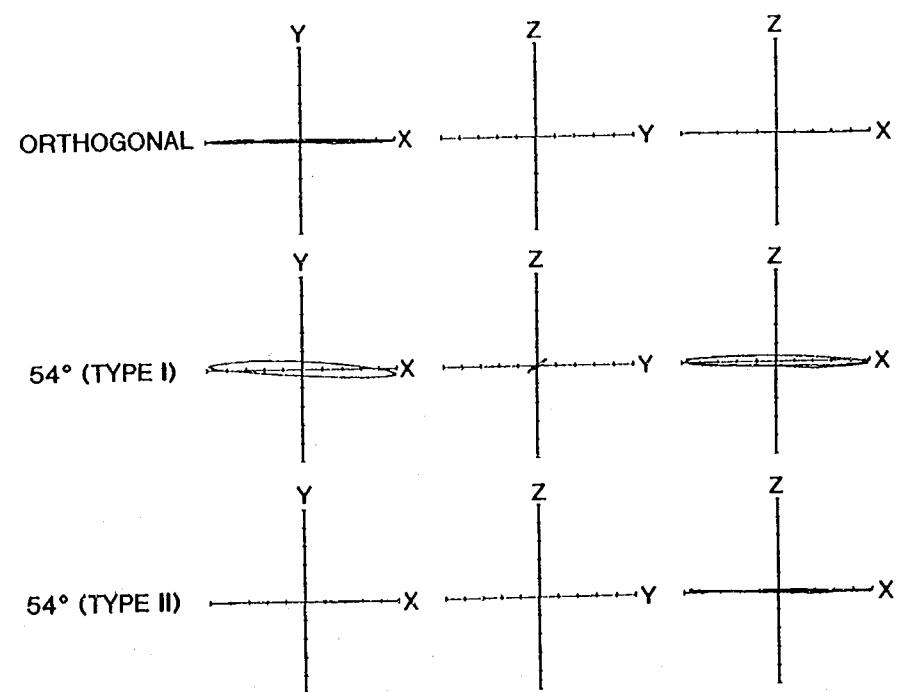
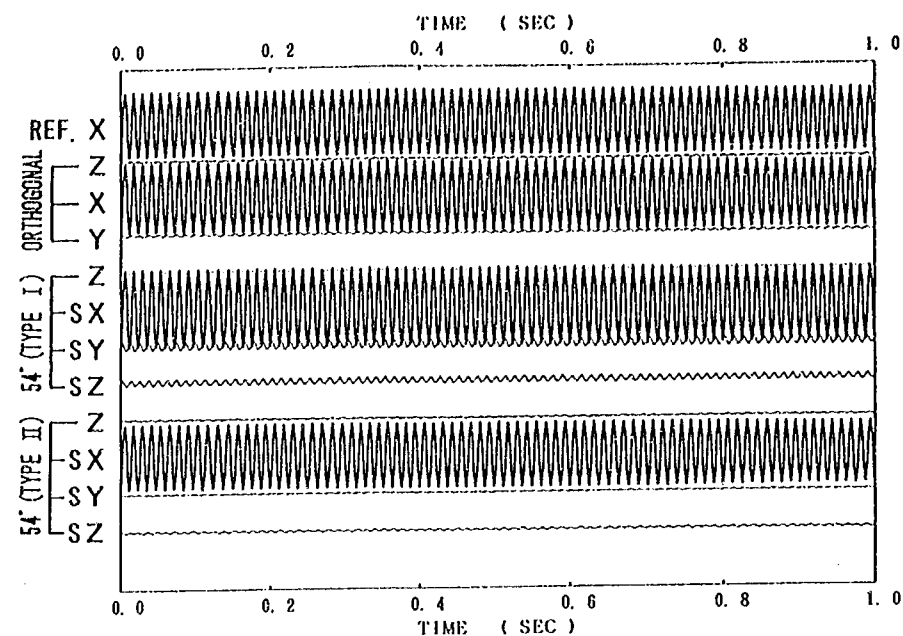
1-5-c

Vertical (80Hz)



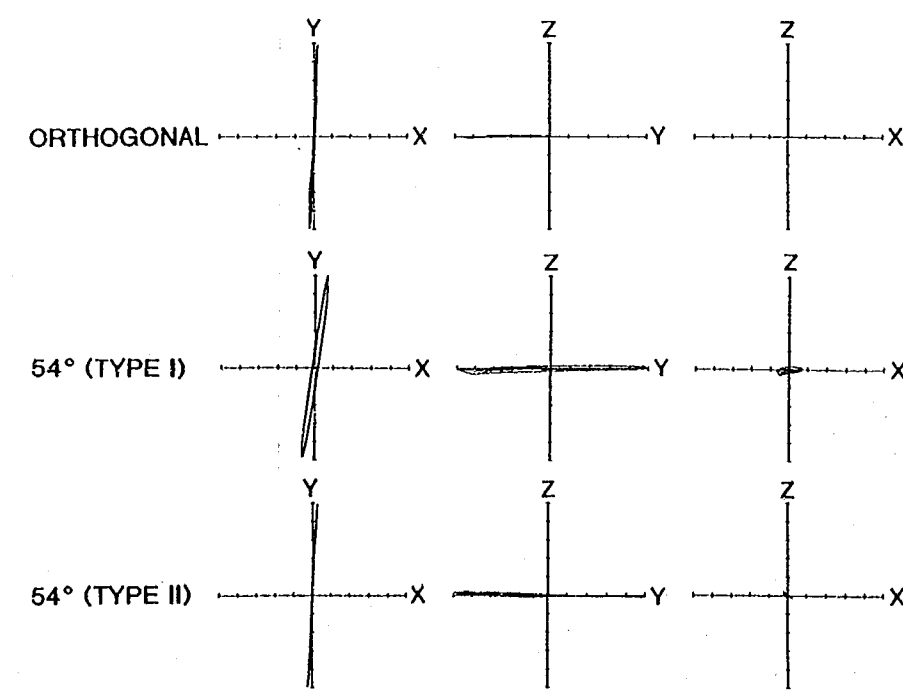
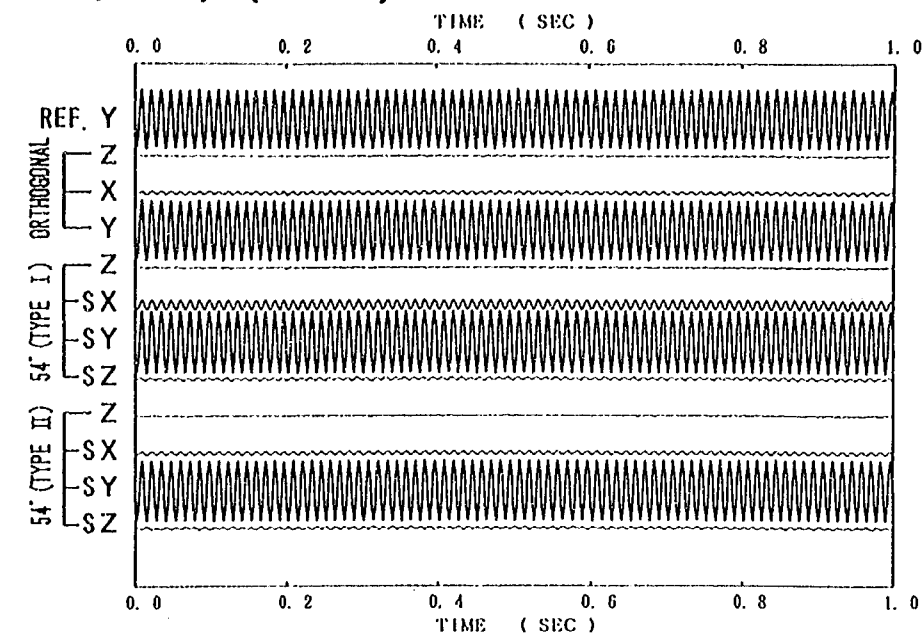
1-6-a

X:(H-1) (80Hz)



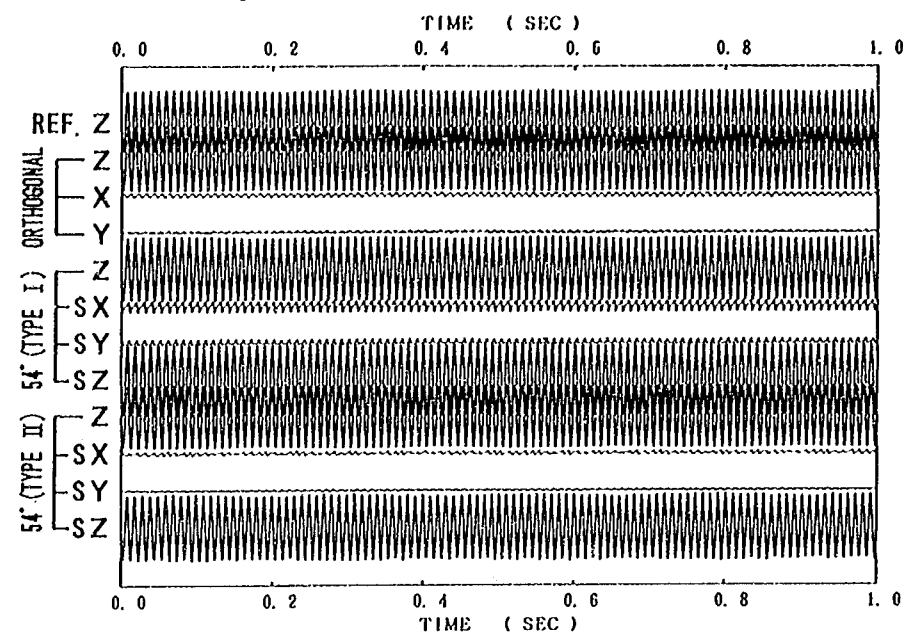
1-6-b

Y:(H-2) (80Hz)

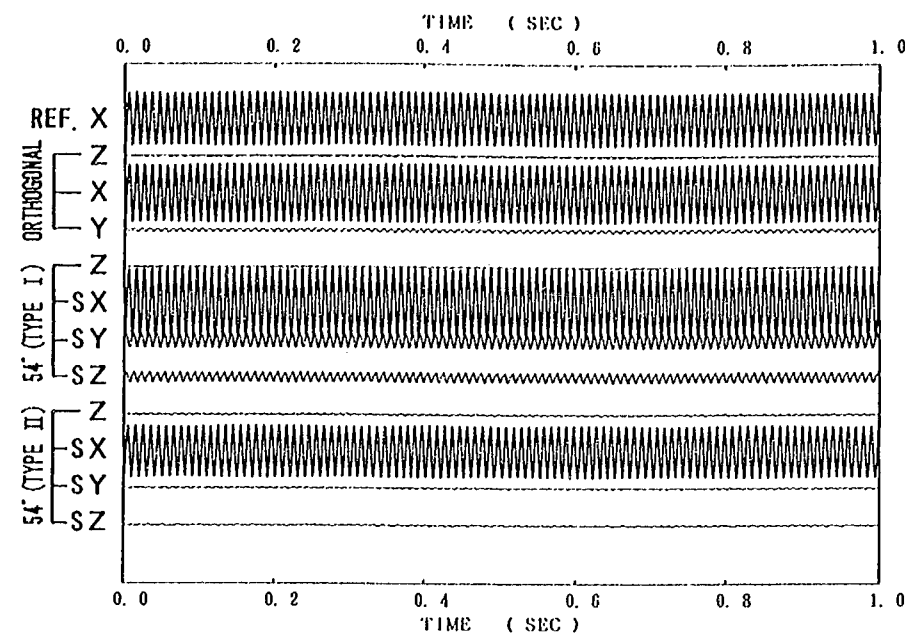


1-6-c

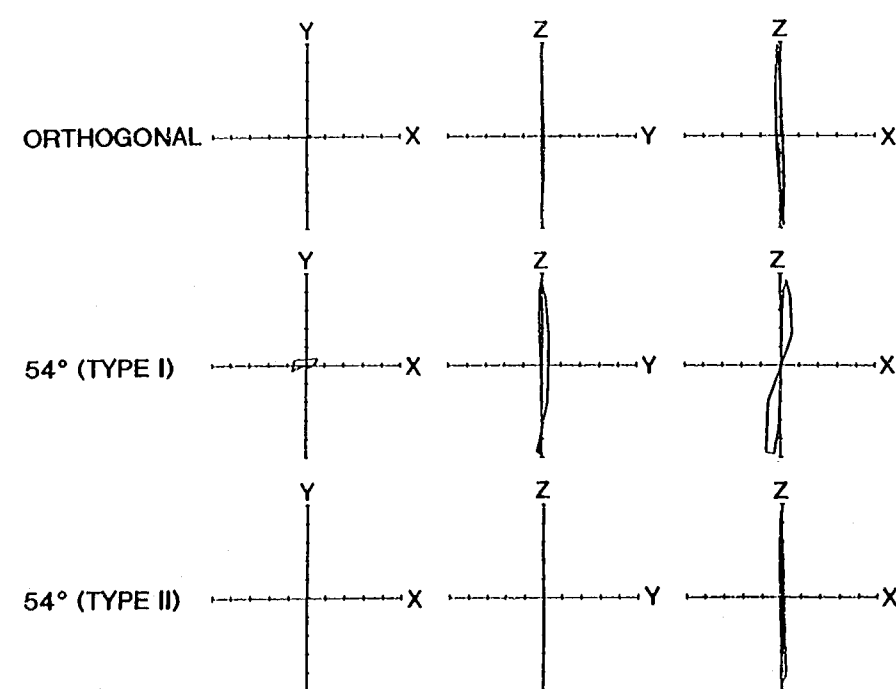
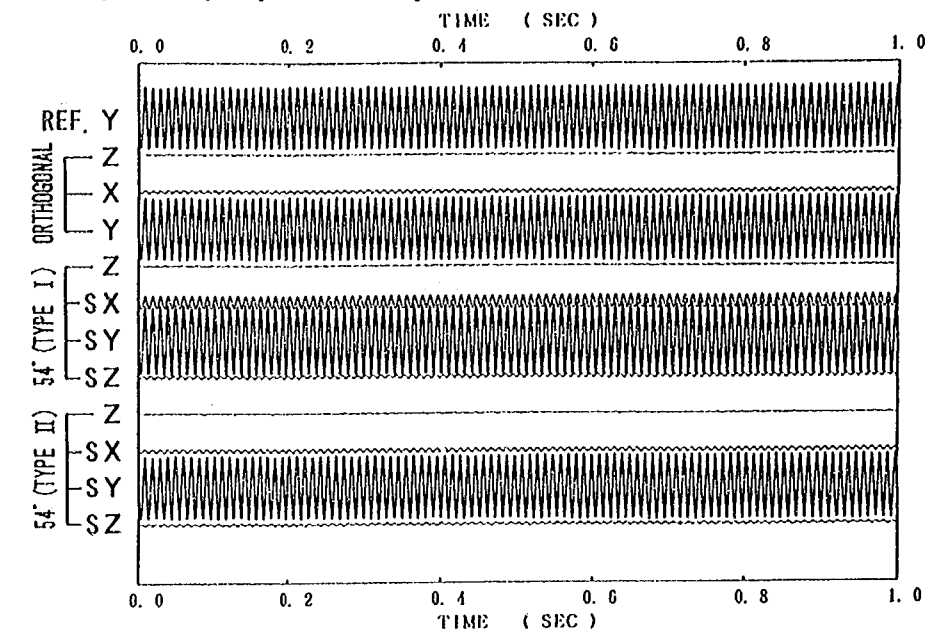
Vertical (100Hz)



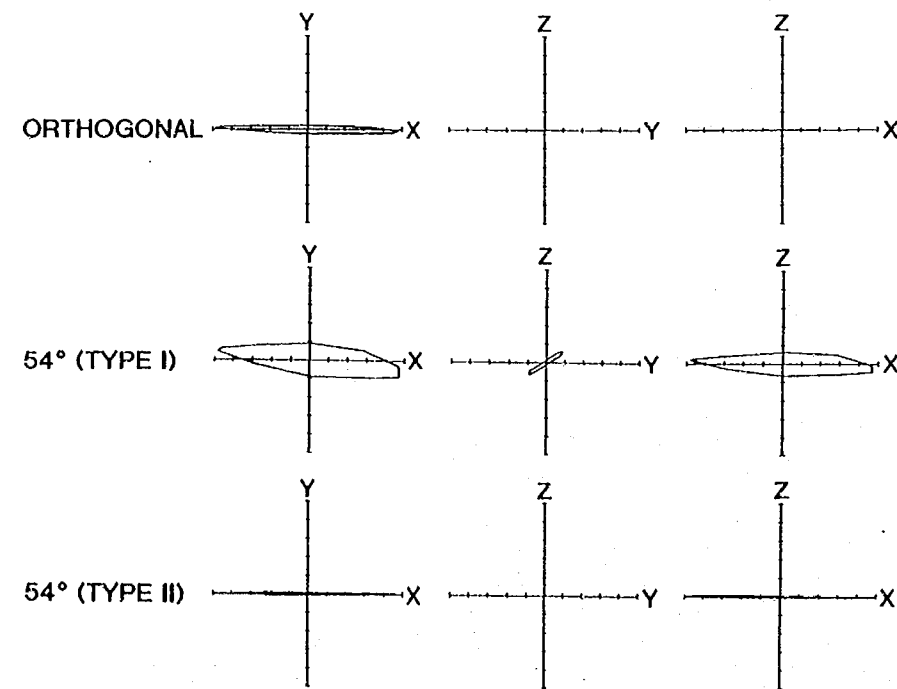
X:(H-1) (100Hz)



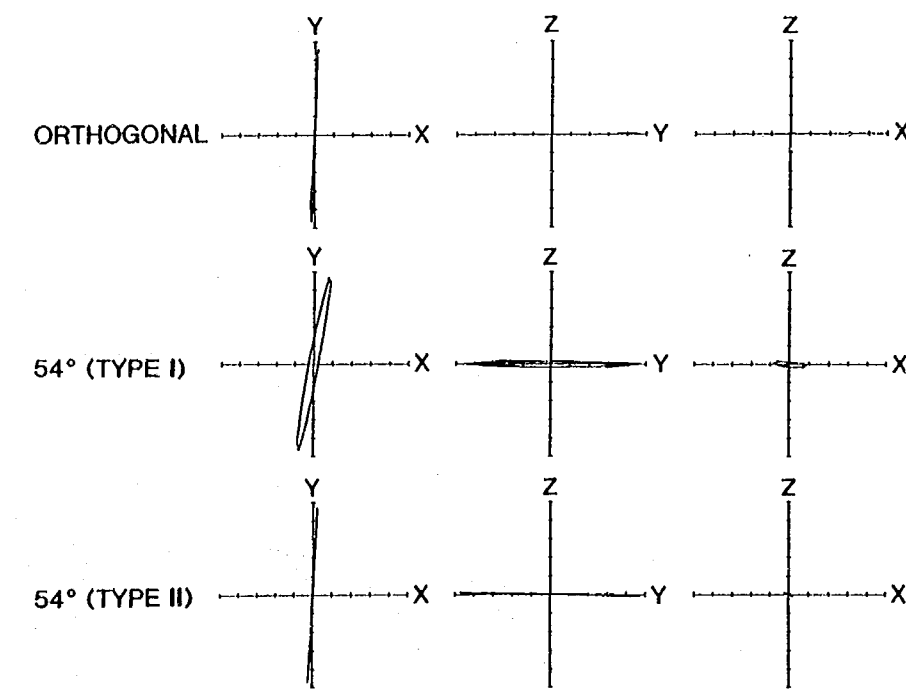
Y:(H-2) (100Hz)



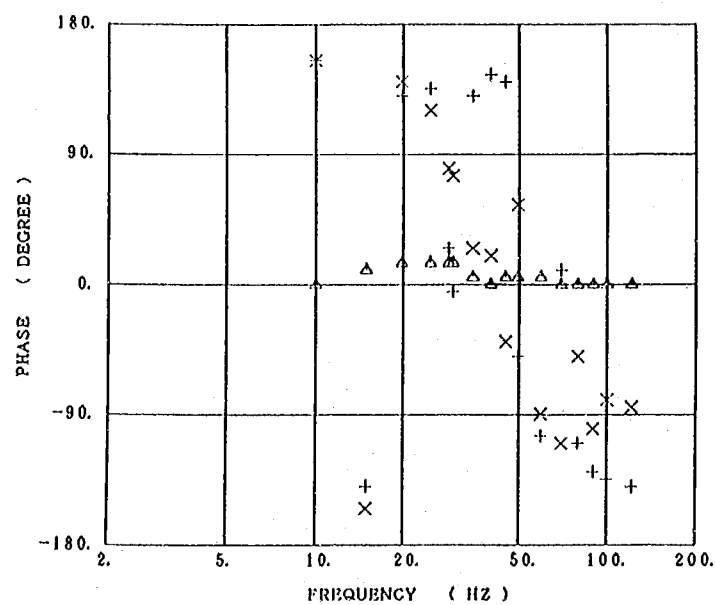
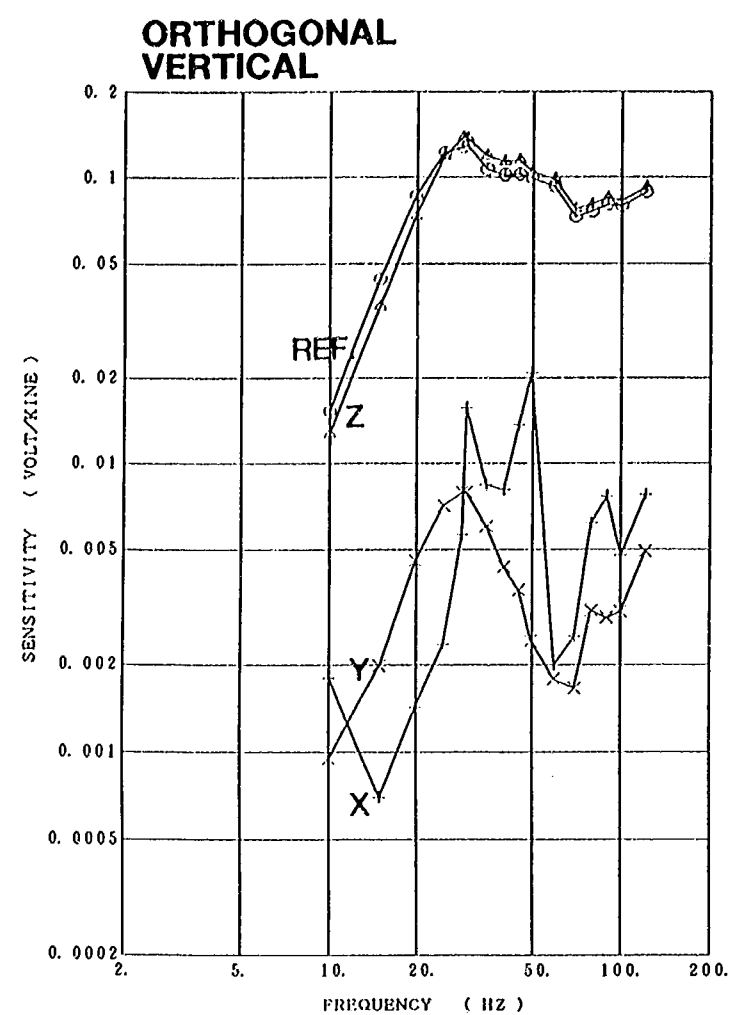
1-7-a



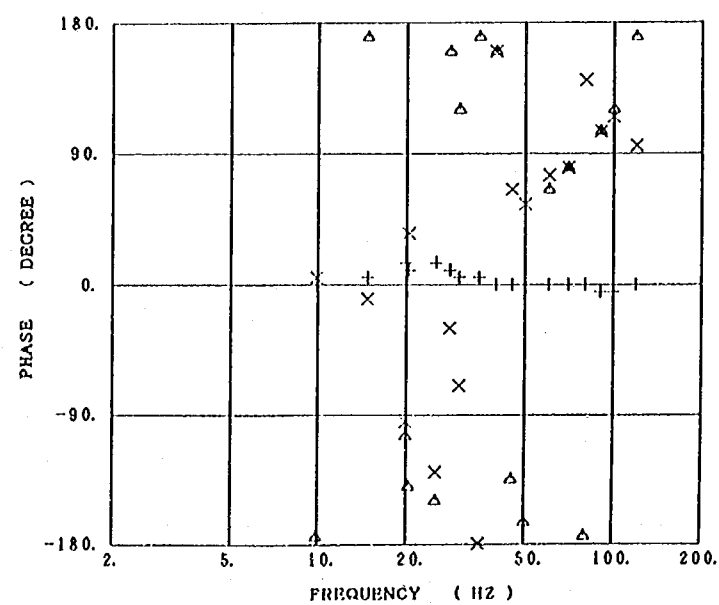
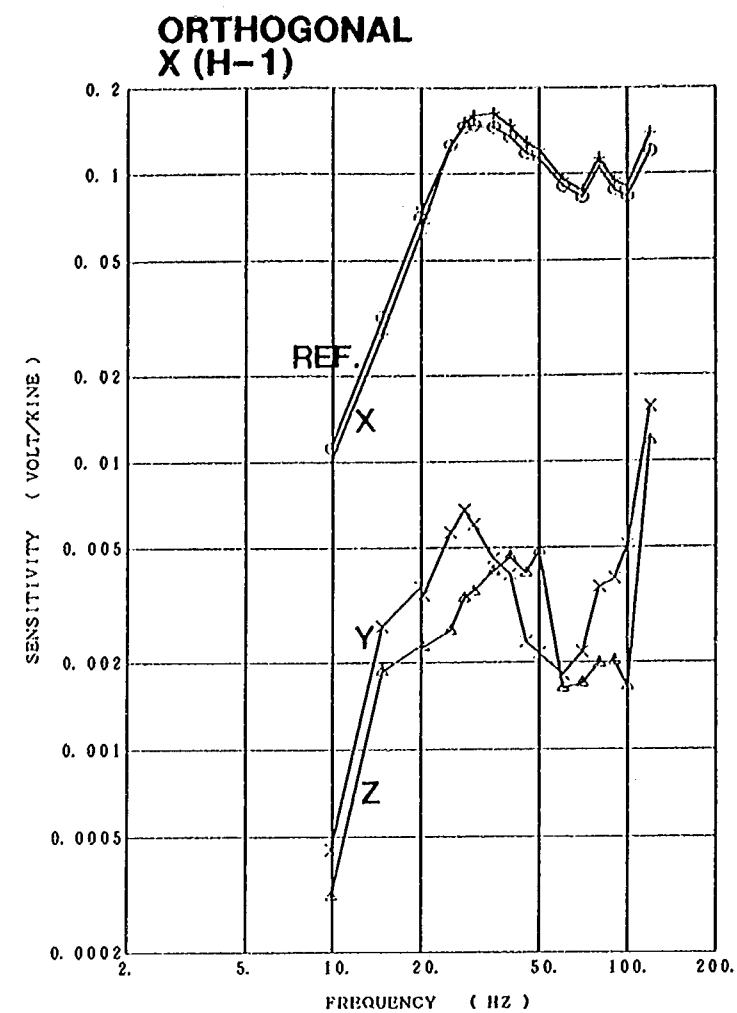
1-7-b



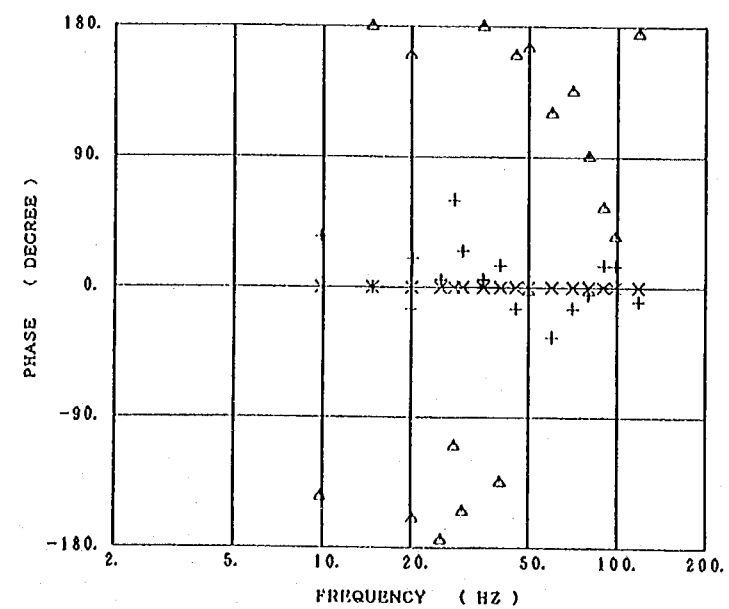
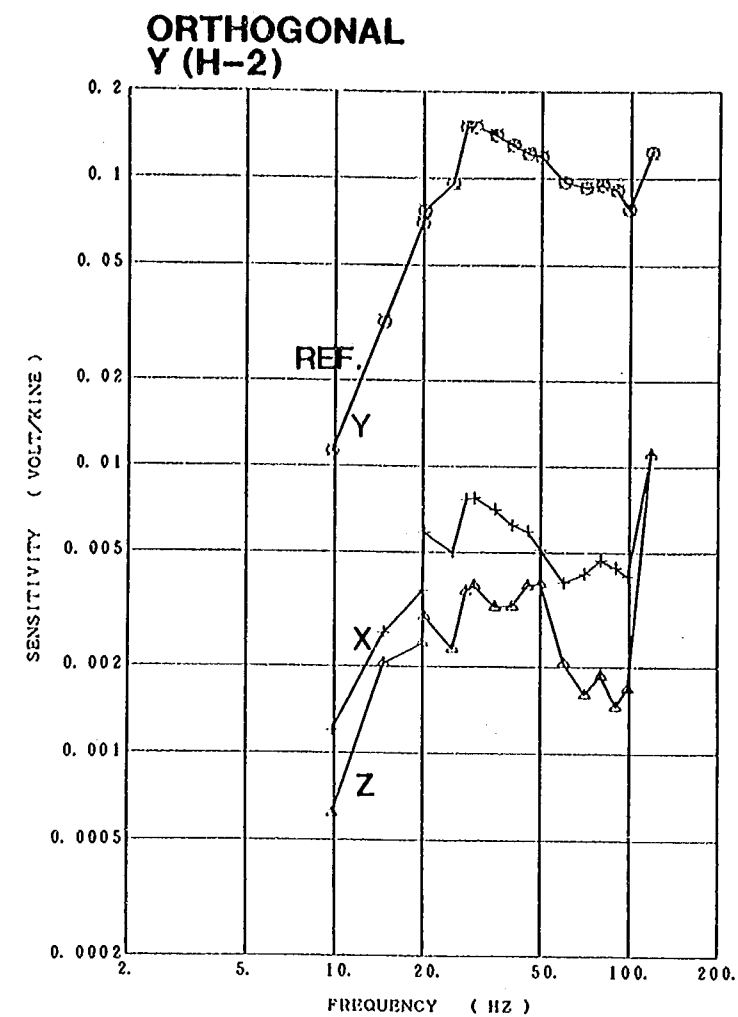
1-7-c



2-1-a



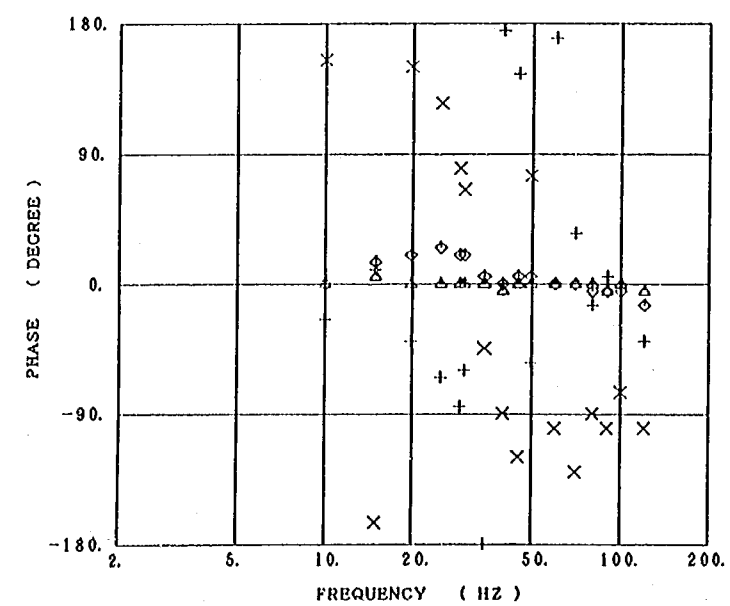
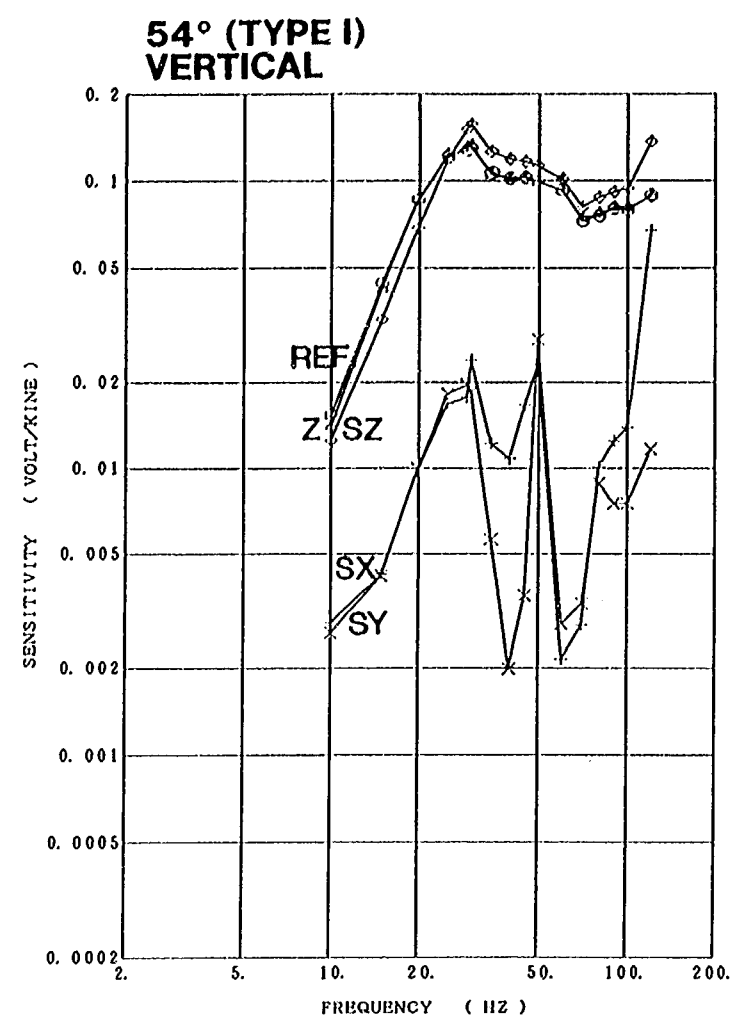
2-1-b



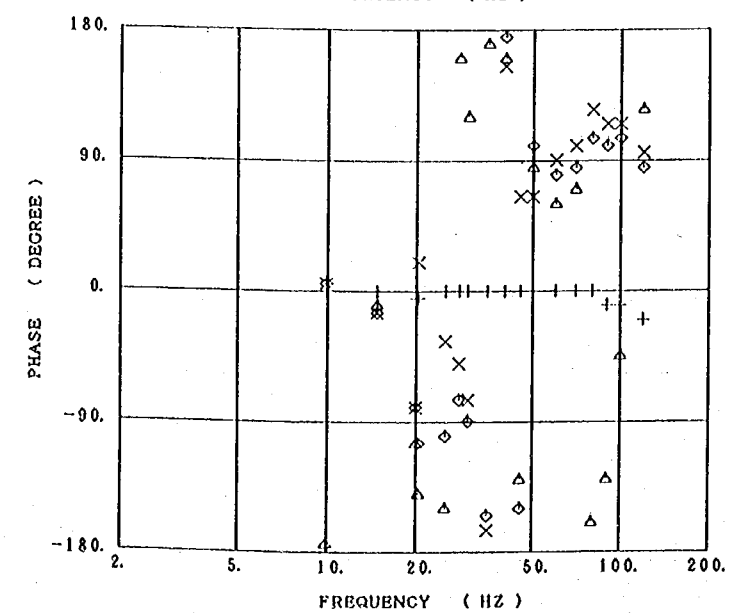
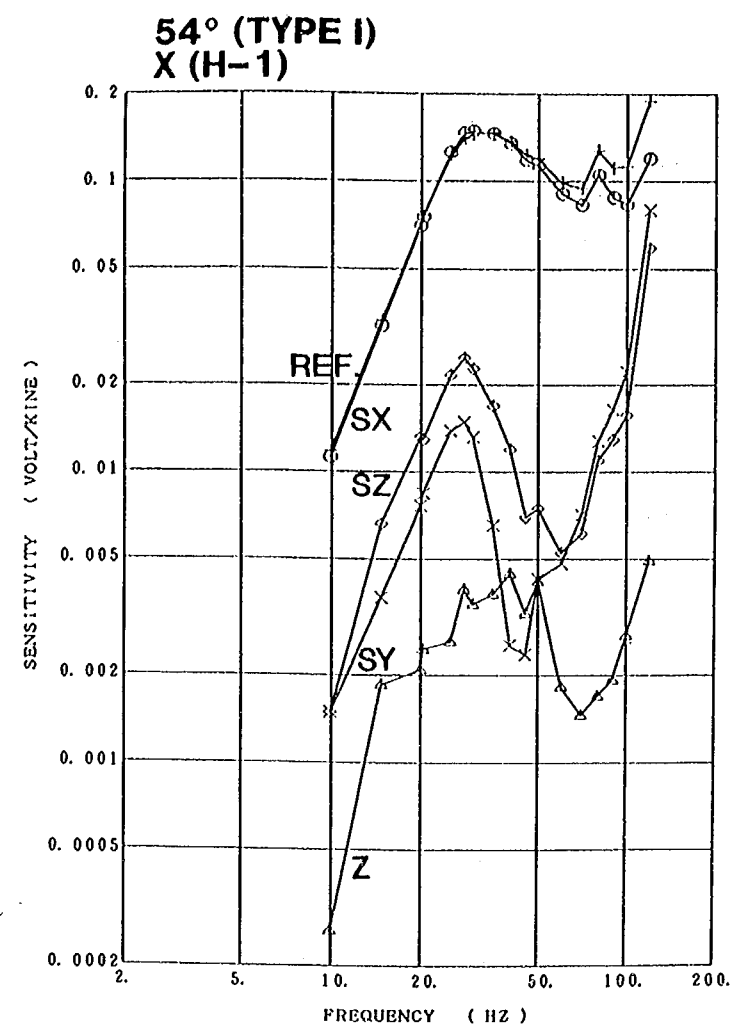
2-1-c

2-1 直交三成分系ユニット

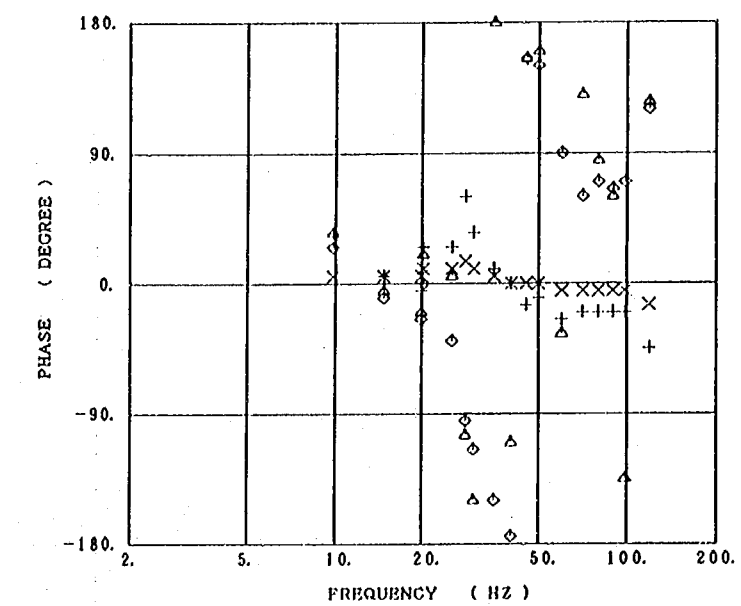
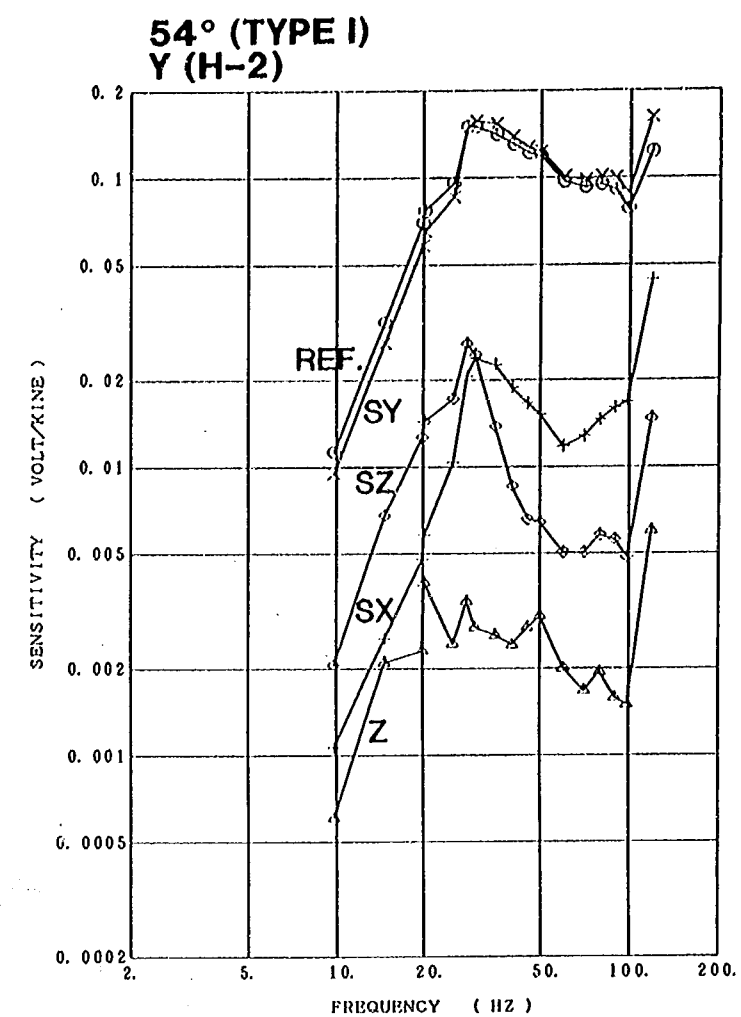
付図-2 振動台実験での測定波形の周波数特性



a



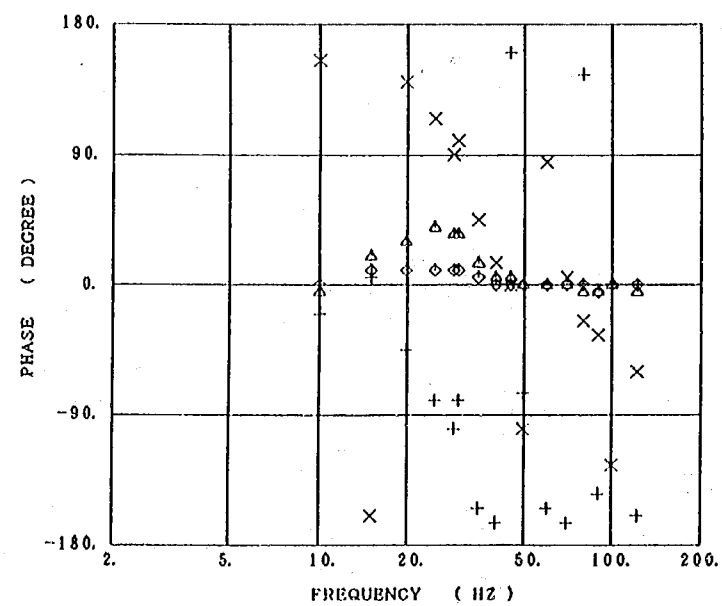
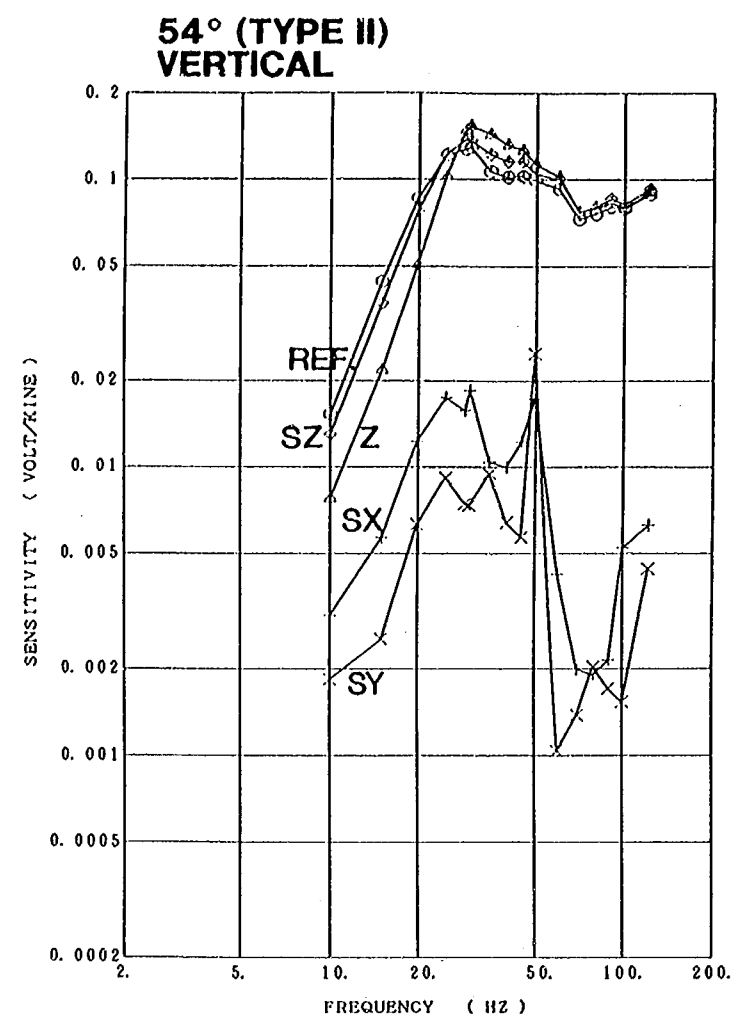
b



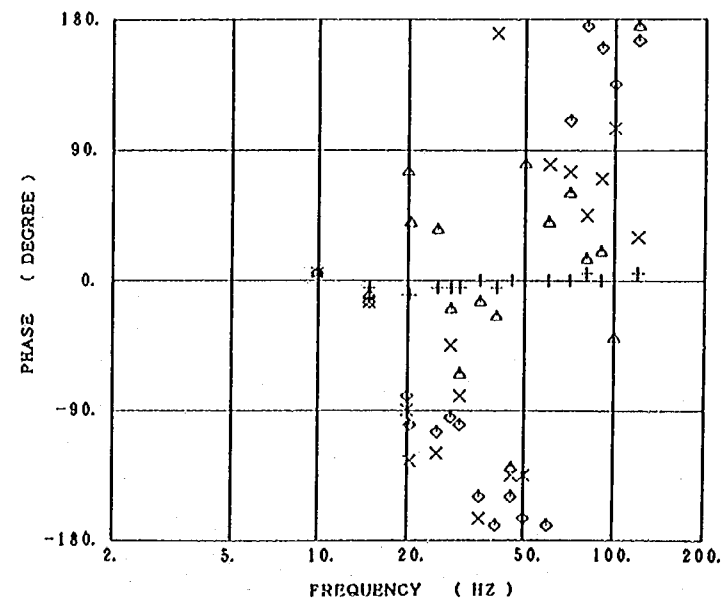
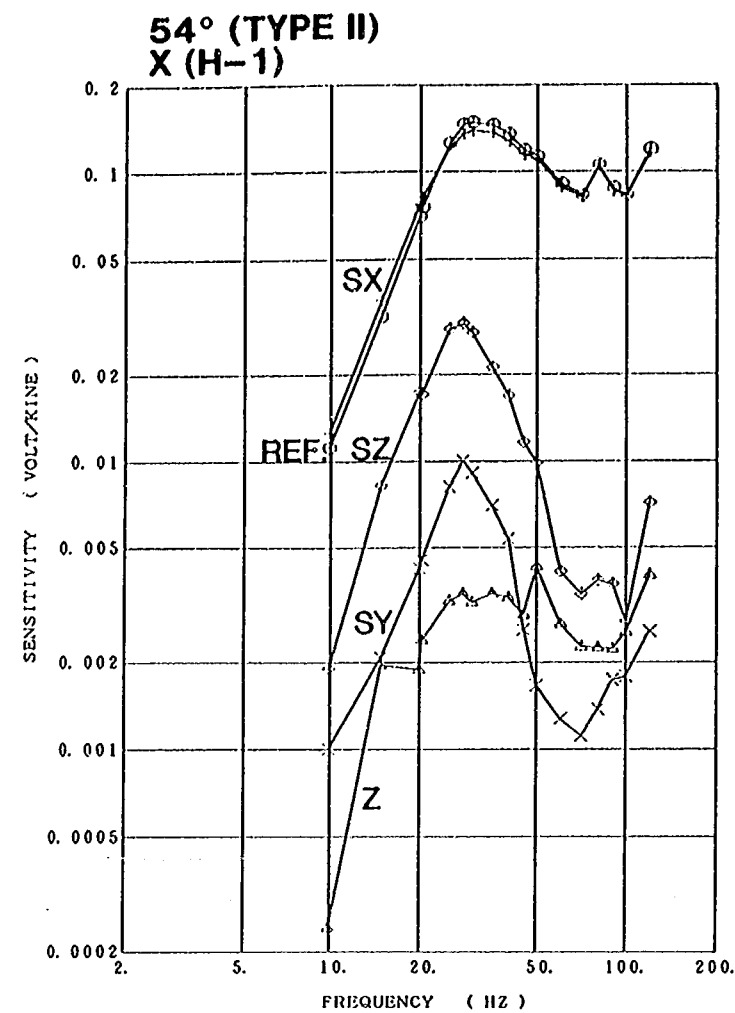
c

2-2 54°系(段ちがい)ユニット

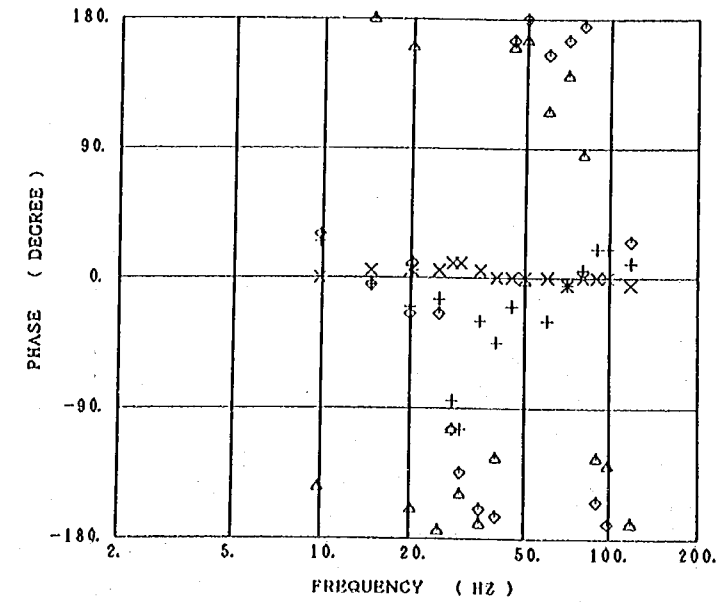
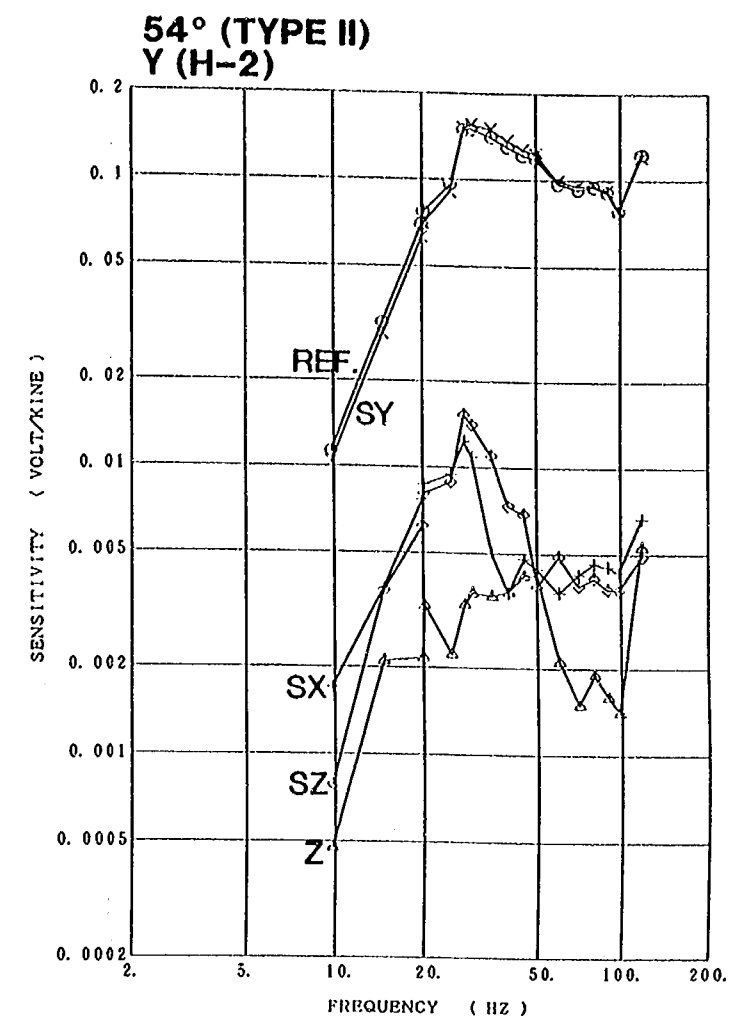
付図-2 (続)



a

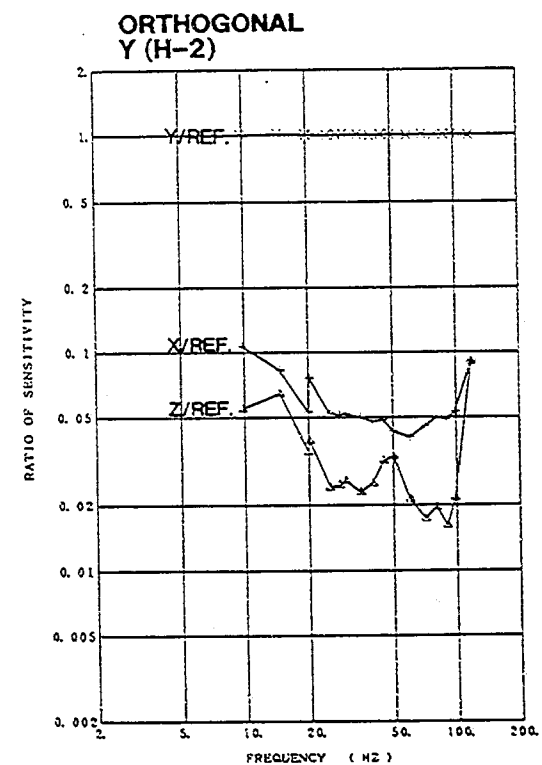
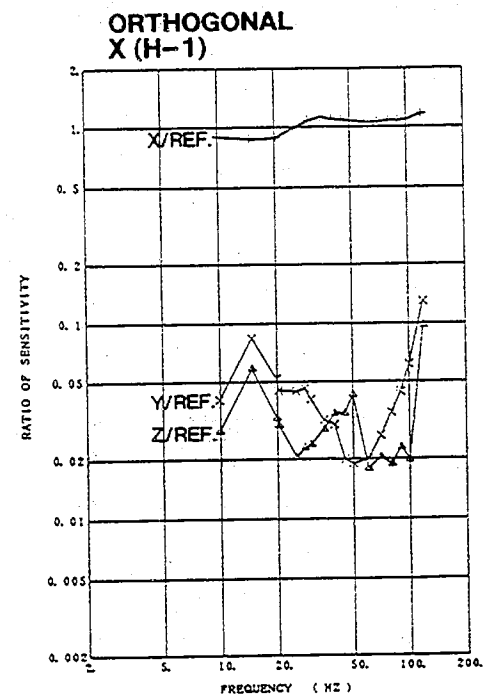
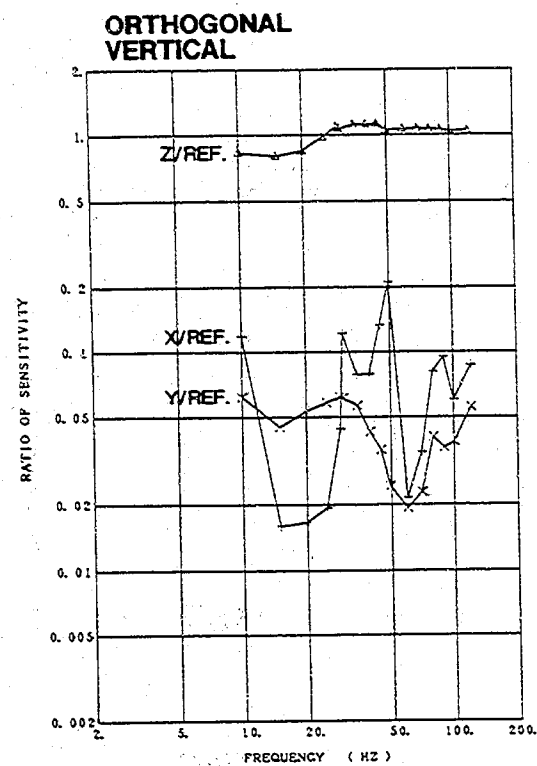


b



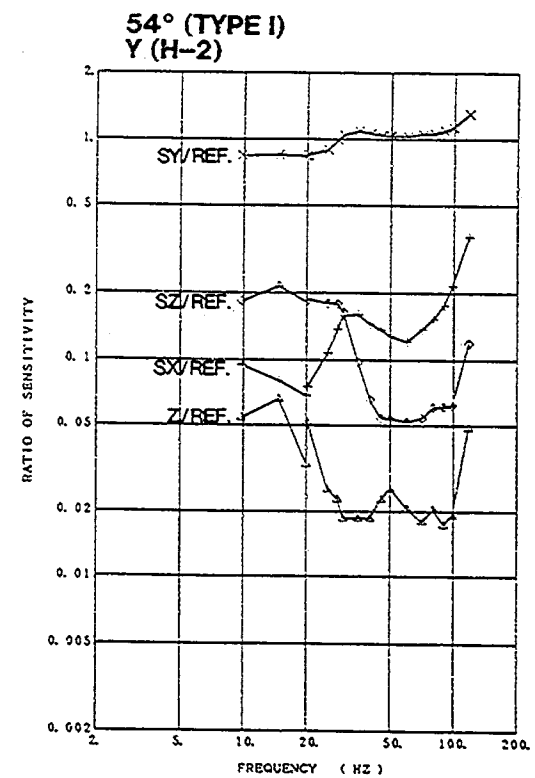
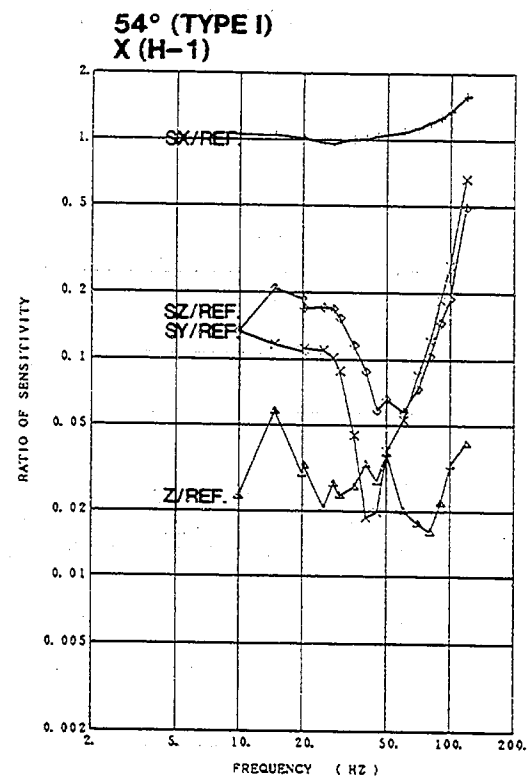
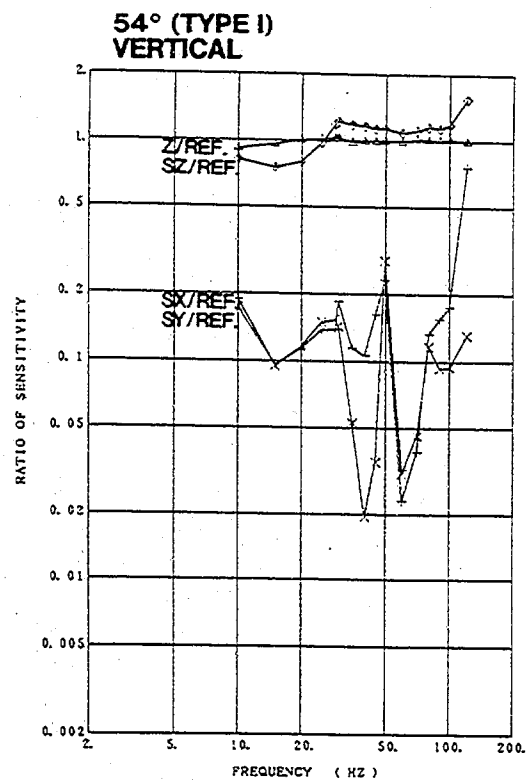
c

2-3 54°系(同一平面)ユニット



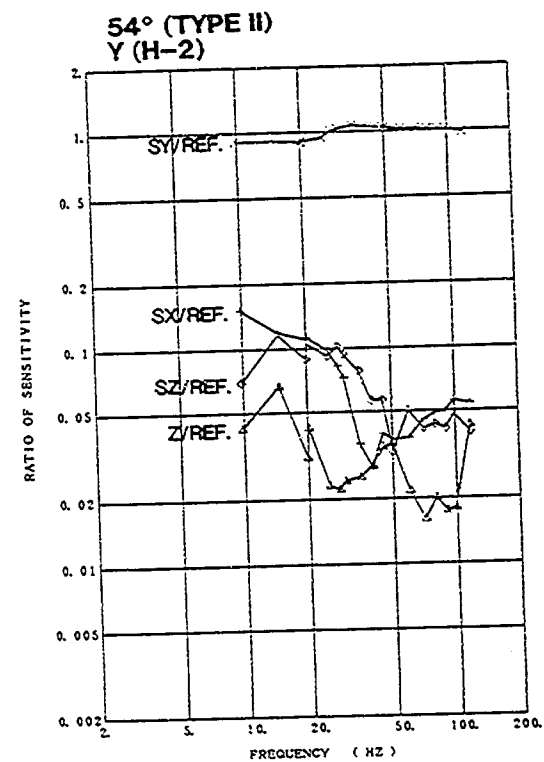
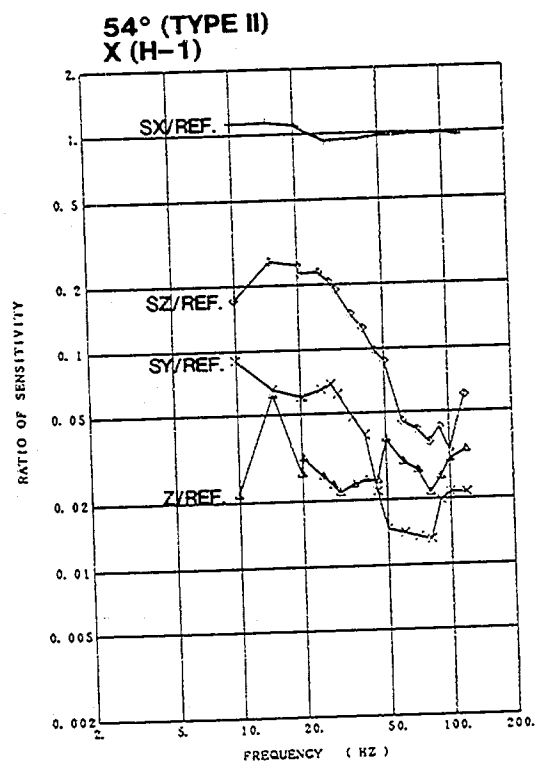
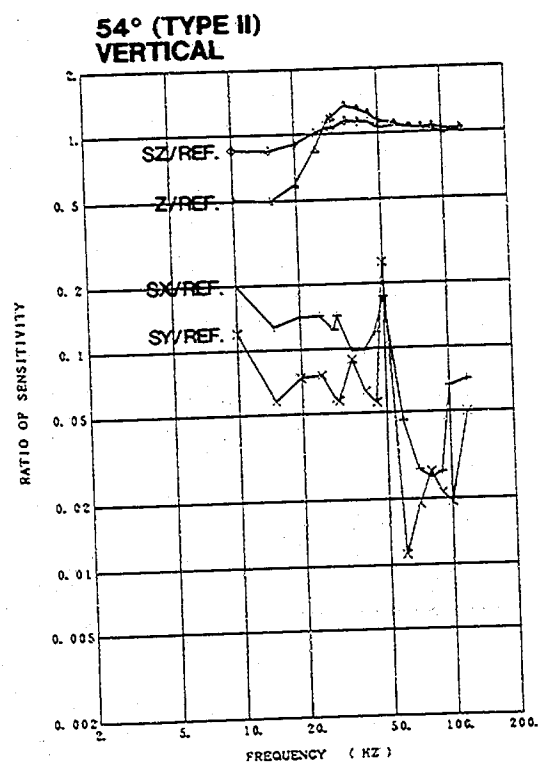
3-1 直交三成分系ユニット

付図-3 振動台実験での測定波形の振幅スペクトル比



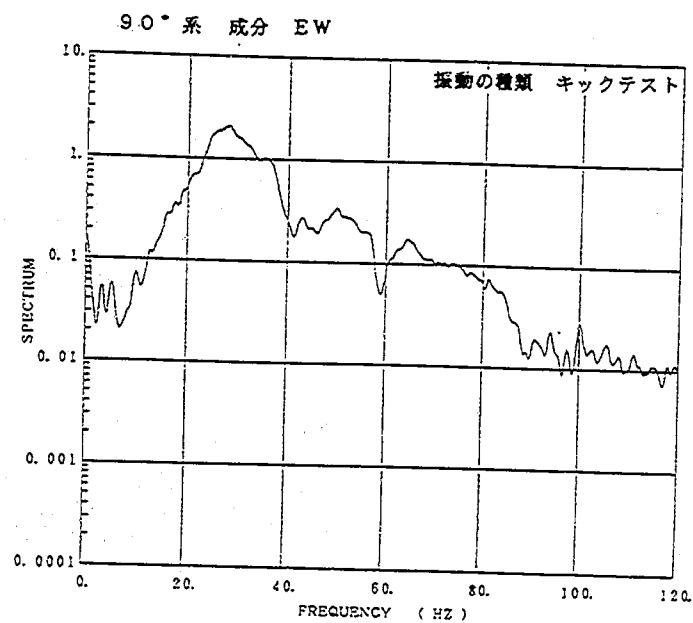
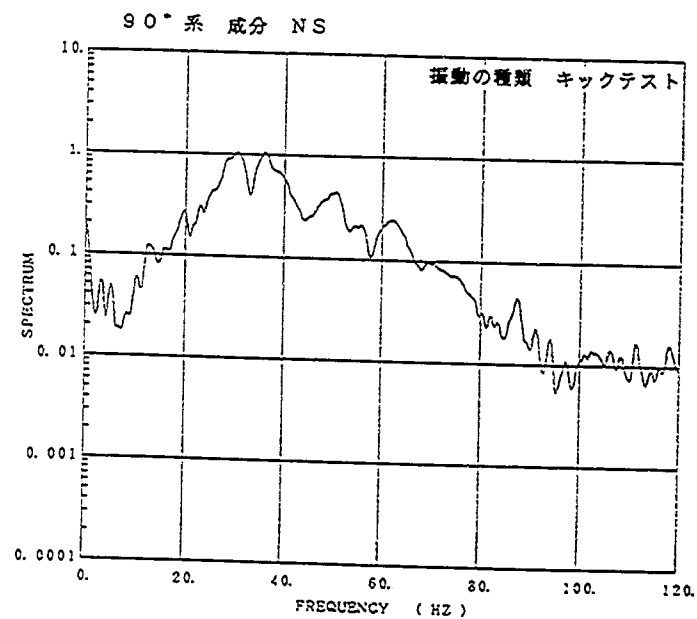
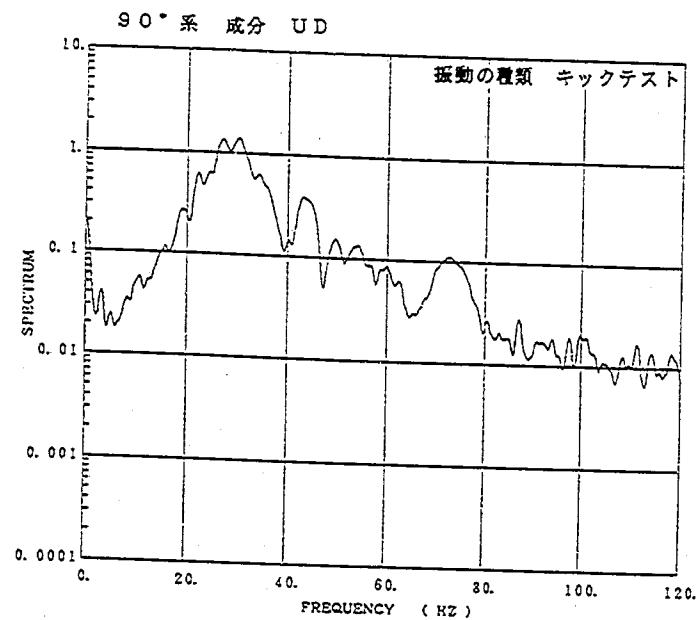
3-2 54°系(段ちがい)ユニット

付図-3 (続)



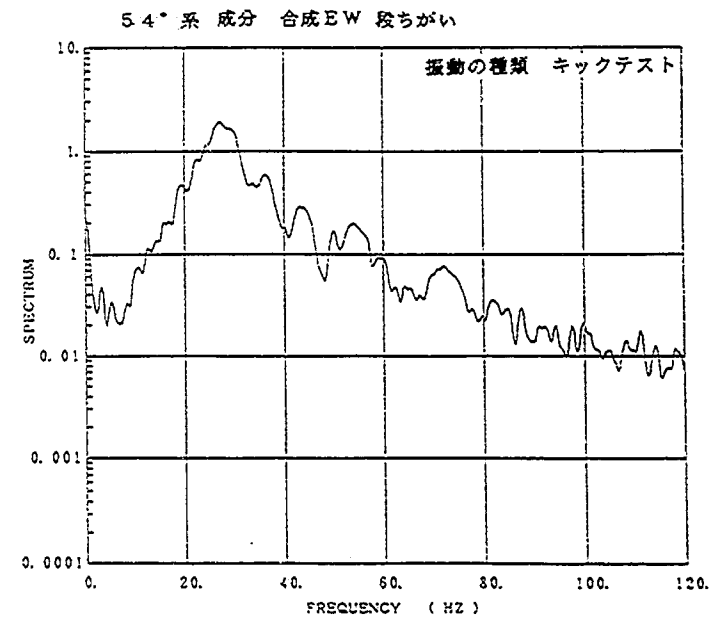
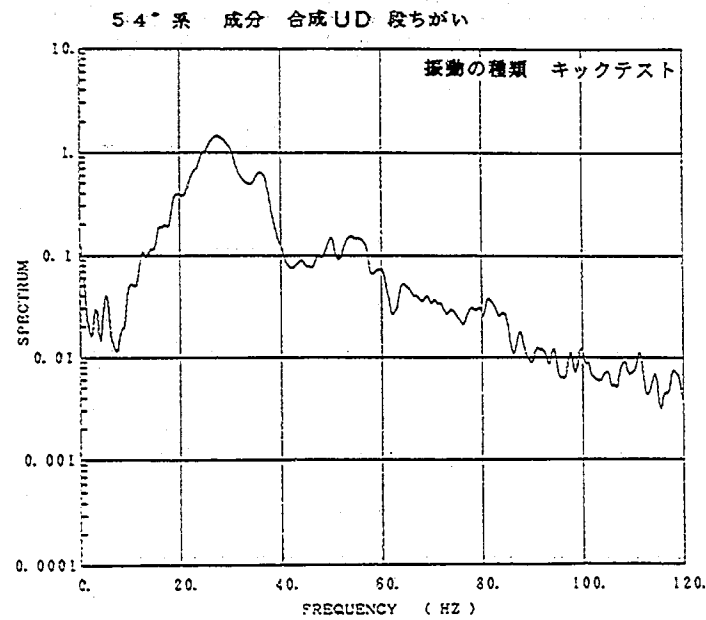
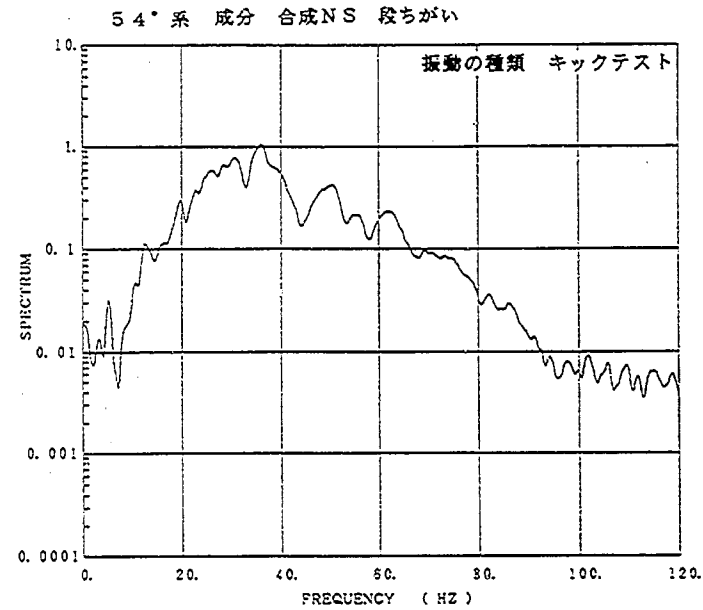
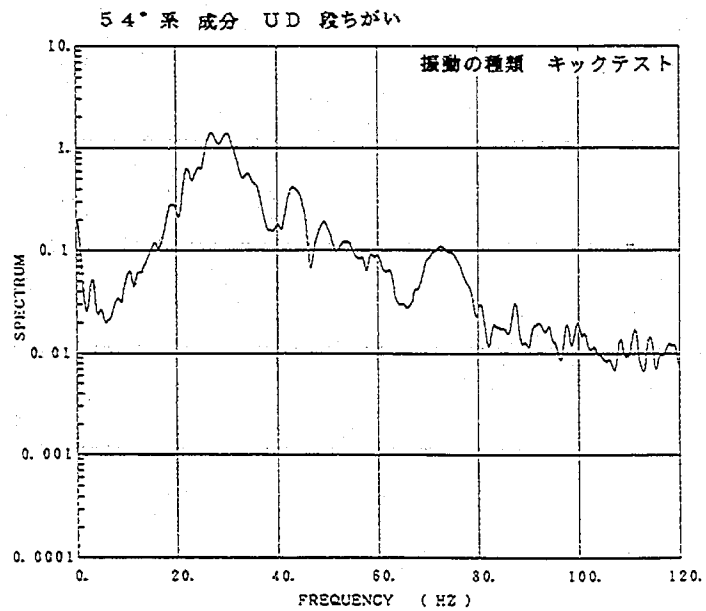
3-3 54°系(同一平面)ユニット

付図-3 (続)



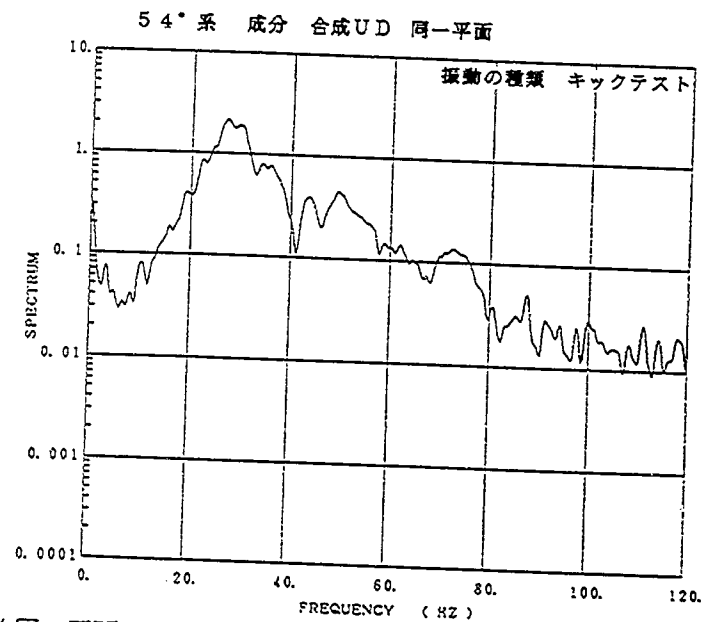
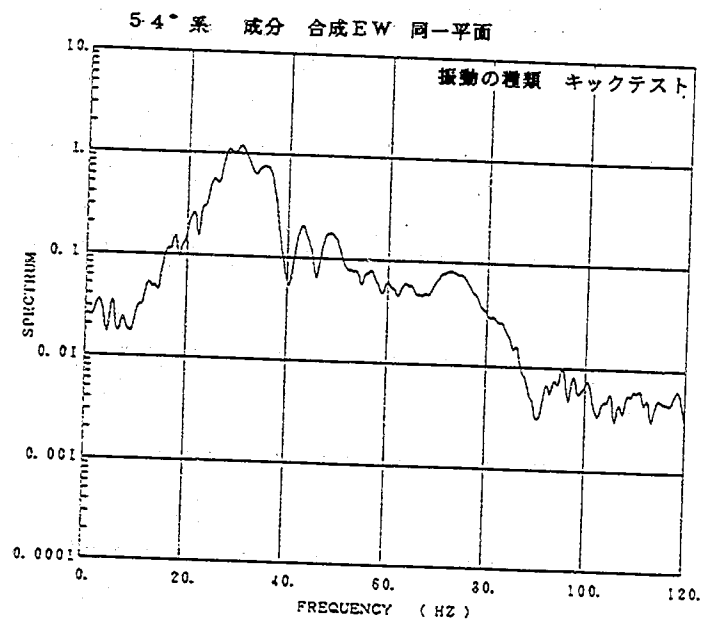
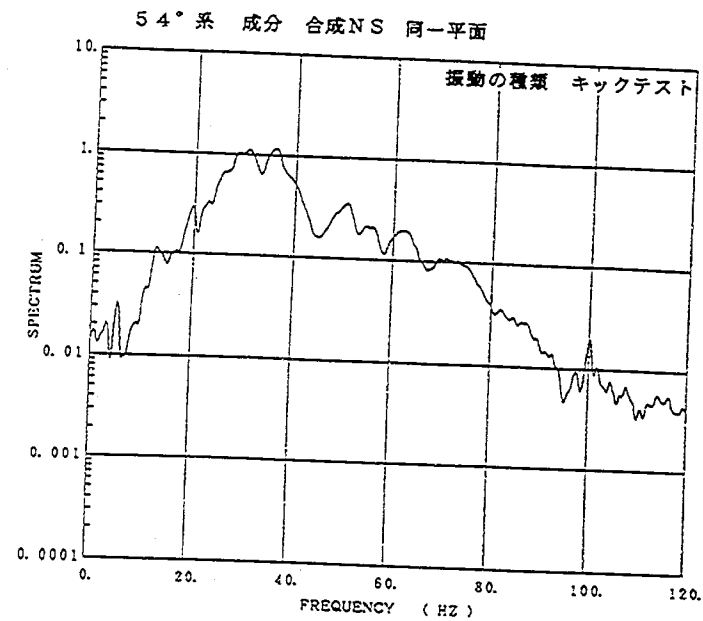
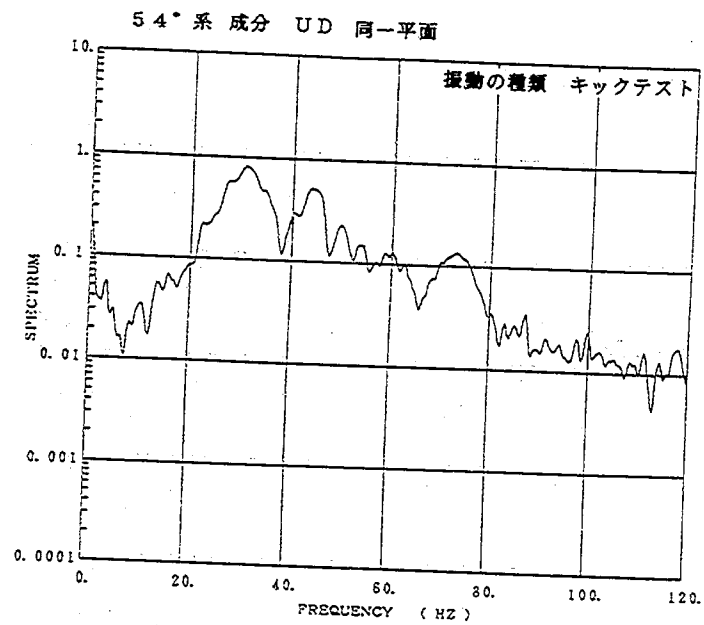
4-1 直交三成分系ユニット

付図-4 微動測定実験での測定波形のフーリエ振幅スペクトル



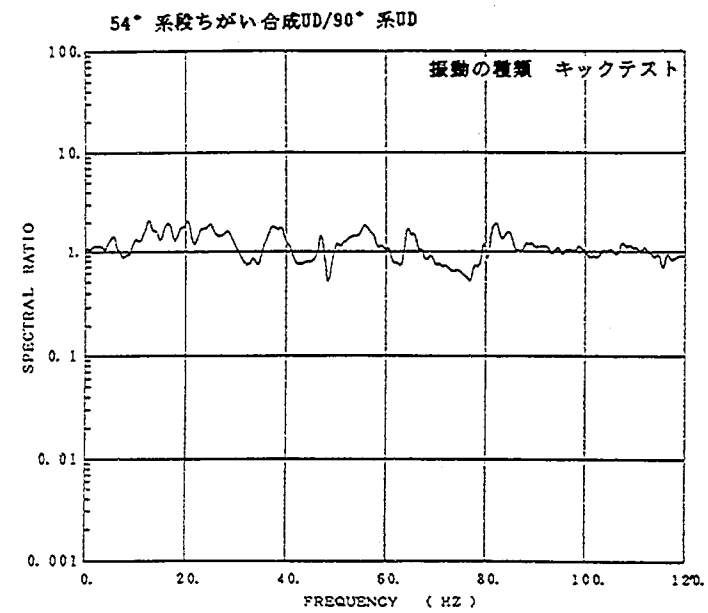
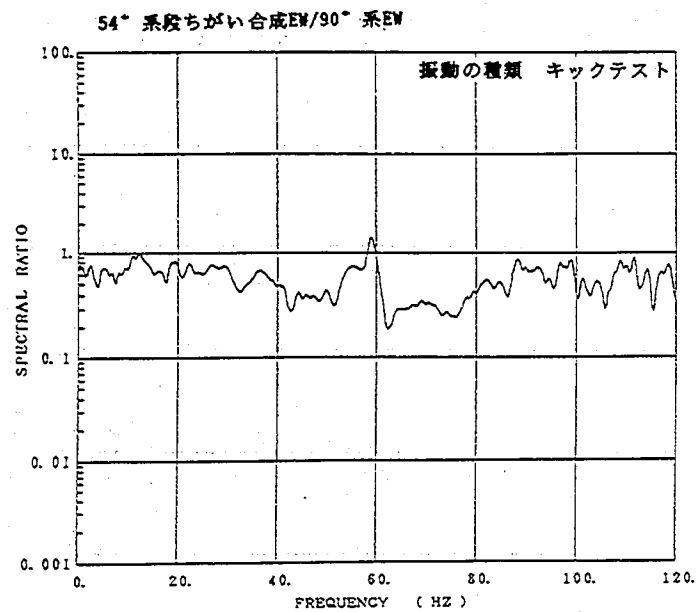
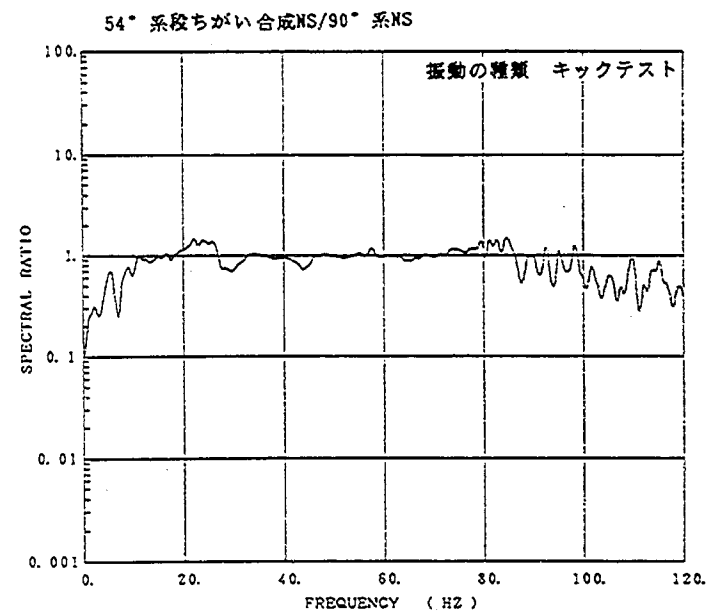
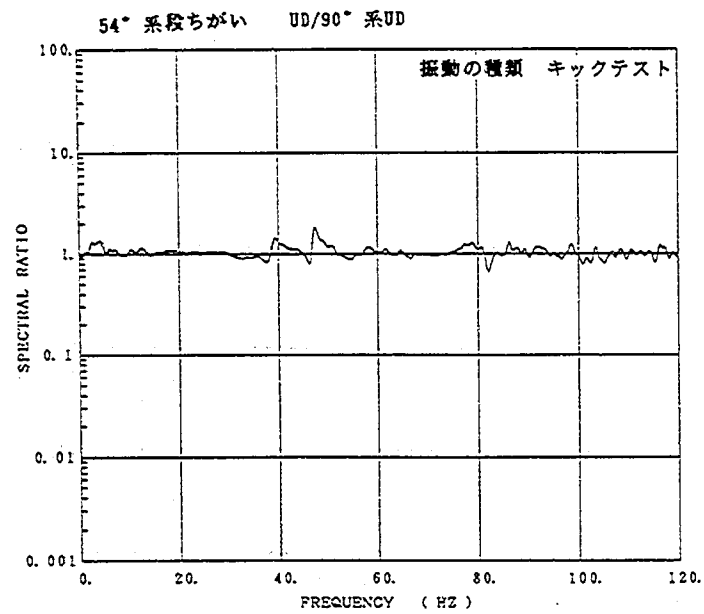
4-2 54°系 (段ちがい) ユニット

付図-4 (続)



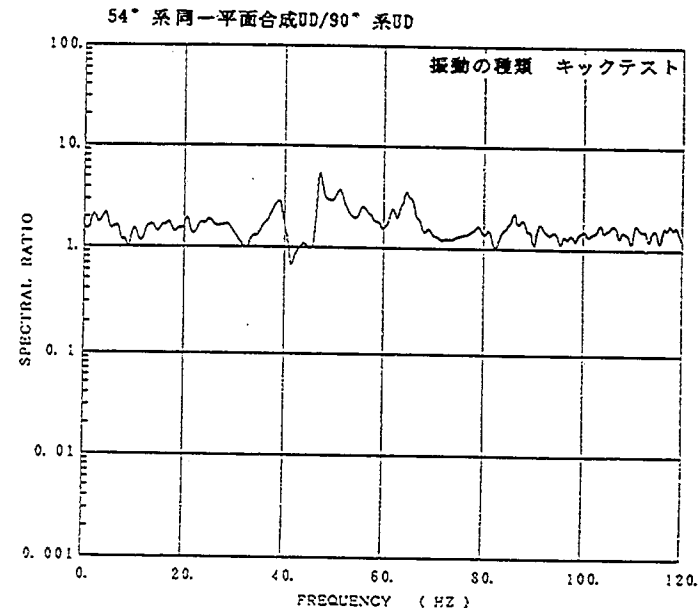
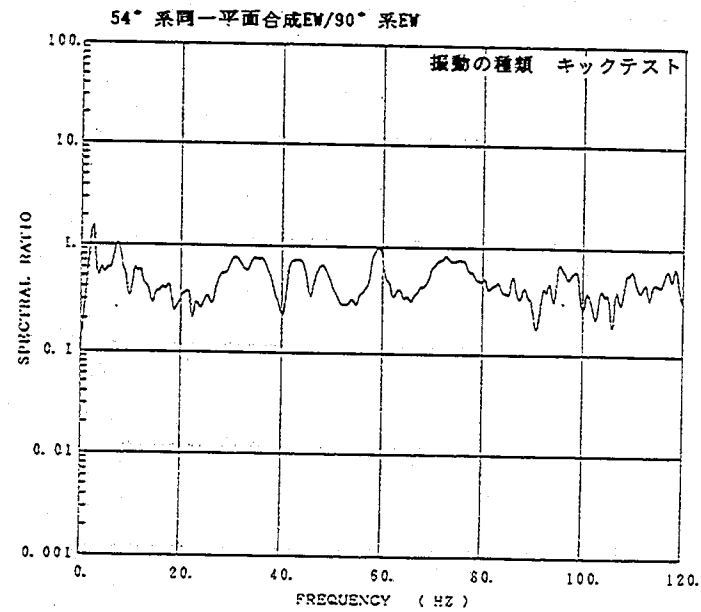
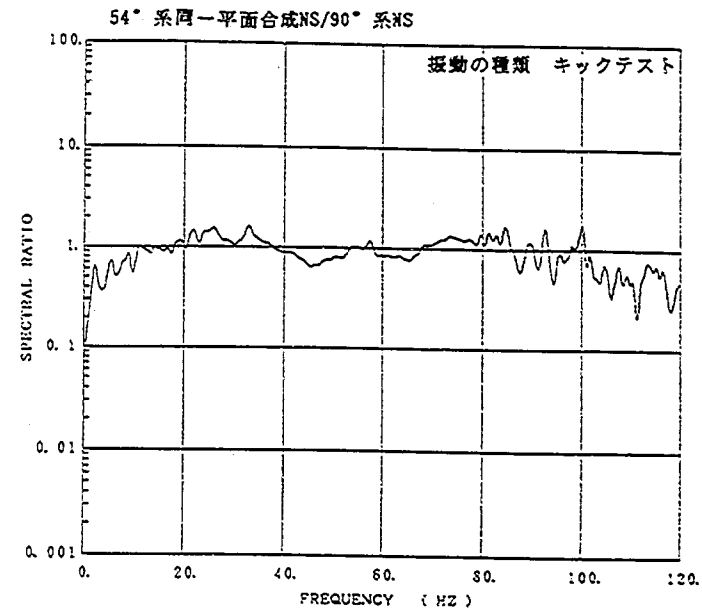
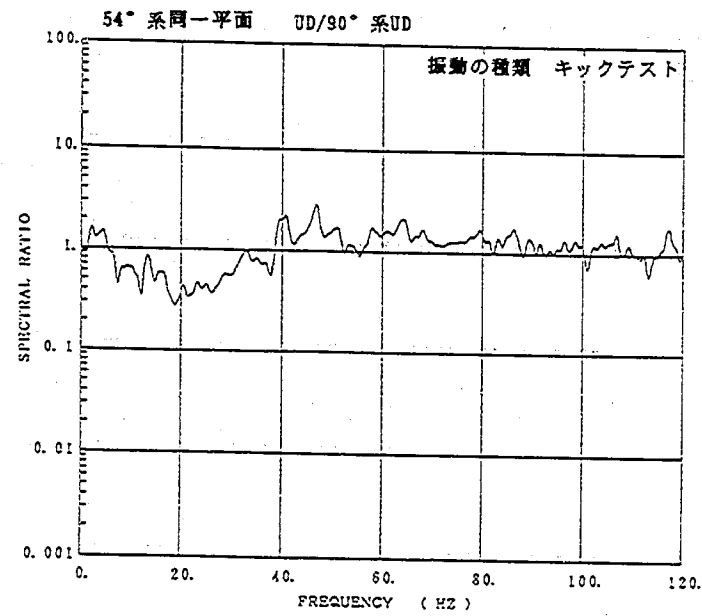
4-3 54°系(同一平面)ユニット

付図-4 (続)

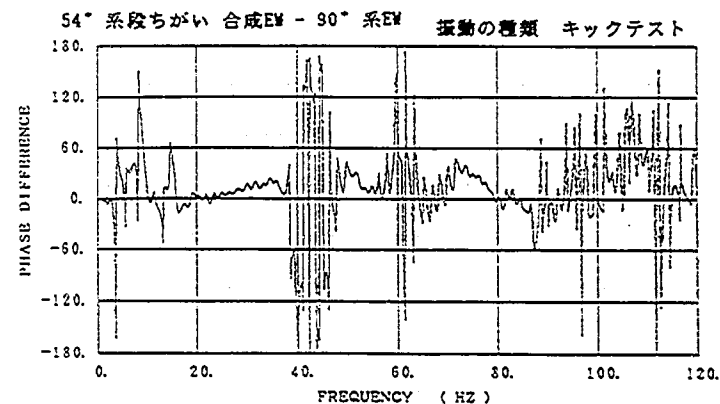
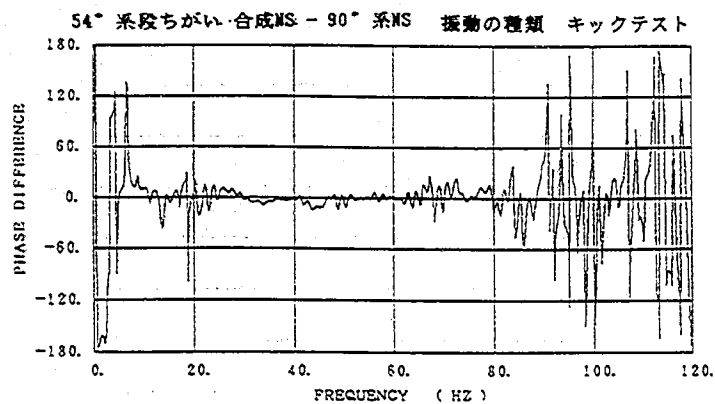
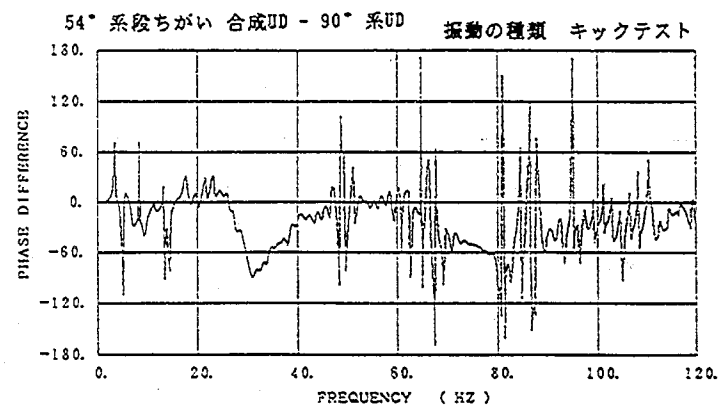
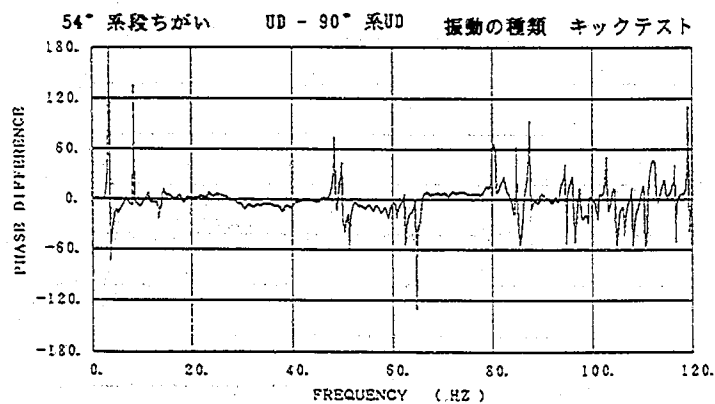


5-1 54° 系(段ちがい) / 直交三分系

付図-5 微動測定実験での測定波形の振幅スペクトル比

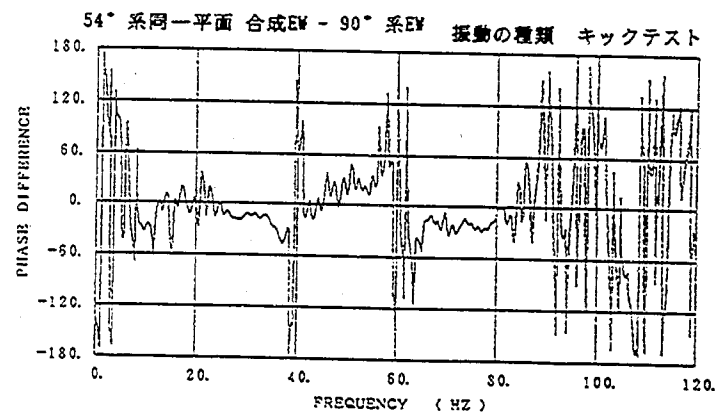
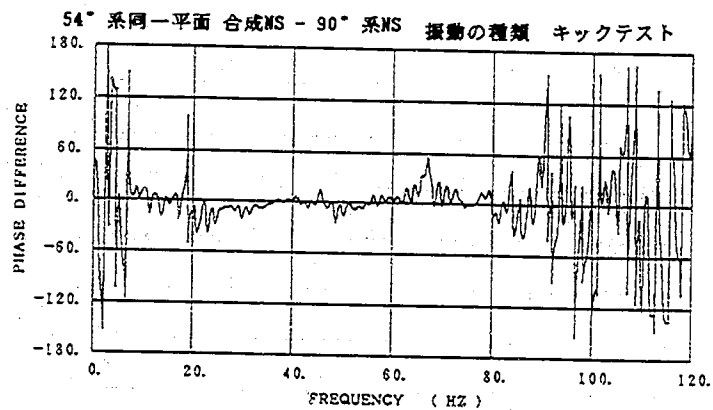
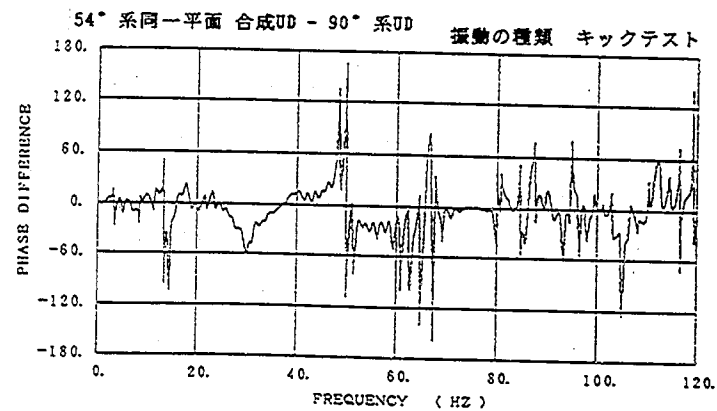
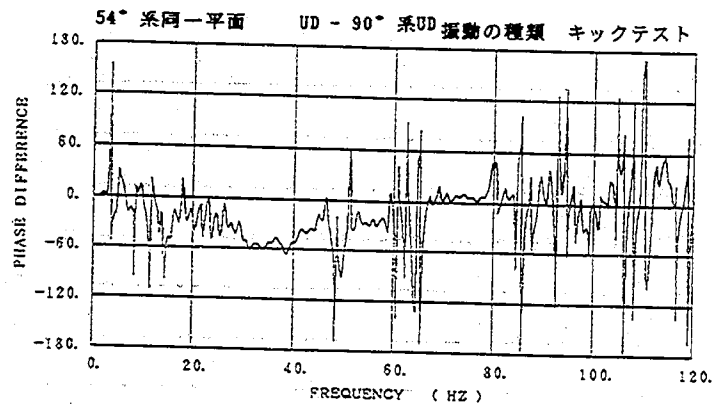


5-2 54° 系 (同一平面) / 直交三成分系



6-1 54° 系 (段ちがい) - 直交三分成分系

付図-6 微動測定実験での測定波形のフーリエ位相スペクトル差



6-2 54° 系 (同一平面) - 直交三分系

沖洪積層を対象とした物理探査
(その2)
VSP 法の開発とその浅部地盤評価への適用

ISSN 0386—5878
土木研究所資料第2863号
平成2年3月 (1990)
稲崎富士, 長沢政和
阿部昌彦

要 旨 地盤内の弾性波の透過・反射伝播特性, すなわち地盤の動的特性を現位置で測定する方法として, 近年石油資源探査分野においても適用されてきている VSP (Vertical Seismic Profiling: 鉛直弾性波探査) を取り上げ, 土質地盤の高密度探査用のゾンデを開発し, 試験孔において探査実験を行なった。

キーワード: 沖洪積地盤, 物理探査, VSP, 伝達特性, 減衰定数

郵便はがき

305□□

41円切手
をはって
下さい。

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

地質化学部 地質研究室

No. 008

No. _____

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第2863号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印