

常時微動の地域的特性 — 鳥取平野の西部地域 —

西田良平・野口竜也
土木工学科

Site Specific Response Characteristics Inferred from Microtremors — On the West Area of the Tottori Plains — Ryohei NISHIDA and Tatsuya NOGUCHI

Department of Civil Engineering
Tottori University, Tottori, 680 Japan
E-mail: nishidar@cv.tottori-u.ac.jp

Abstract: Microtremors were observed at 25 sites of the west area of the Tottori plains. This area is shown geological conditions at the subsurface as dune, delta and mountain, from the Japan Sea coast to the mountain. The purpose of this observation were to clarify the fundamental characteristics of microtremors and their relation to the subsurface geology in the area. Fourier spectra were analyzed from the data observed at every site. Fourier spectral ratios of horizontal component to vertical component (called H/V ratio in this paper) were calculated. The following is the results revealed by this study. (1) The peak frequency indicated in H/V ratio corresponds to the condition of the subsurface geology. (2) Estimate that the depth of base is gradually deep from the coast to the mountain

Key words: microtremors, H/V ratio

1. はじめに

地表面から数100mの地下構造を推定する方法は、地震波探査、重力探査、電気探査、放射能探査などいろいろな方法がある。その中でも、地震波速度を求める方法はよく使用される。通常は人工震源を使用して、地震波の反射・屈折波を利用する解析が行われる。しかし、これは求める構造が深いほど大がかりな観測・解析が必要となる。また、ノイズが多い都市部では観測の精度が上げられないなどの欠点がある。他方、地表面で常時微動を測定することによって、地盤特性を推定する方法が多くの研究者によって、その有効性が認められている[1]。

常時微動は地震が発生したときに伝播される地震動と異なり、地表面に常時存在し、発生源が特定されない地面の揺れ(地動)をいう。常時微動でも長周期波動(周期3~5秒)は脈動と呼ばれ、海岸の波浪によって生じる地動で、冬の日本海によって発生するのがよく観測される。ここで言う、微動は振幅が数マイクロン以下で、周期も2秒以下

の短周期の微小な地面の動きである。この微動は発生源が多種・多様な場所にあるので、定常状態に達していると考えられ、その場所の地盤特性を示すと推定される。

微動の正体は実体波(P波、S波)と表面波(レイリー波、ラブ波)の集合体と考えられる。特に、実体波(S波)の地下の構造による重複反射による定常波との解釈は一般的である。しかし、地表面を伝播するレイリー波の重ね合わせであるとの解釈もなされ、それぞれの立場から地下構造の推定がなされている。現在も、明確に広い周波数領域で微動の本性が定義されていない[2]。

微動によって、地盤特性を推定する方法は3つ提案されていて、第1番目は微動のスペクトルの卓越周期を利用する方法、第2番目はある基準点に対する別の地点の水平成分とのスペクトル比を利用する方法、第3番目は中村(1988)により提案された微動の上下成分に対する水平成分のスペクトル比を利用する方法である。地盤の卓越周期(卓越周波数)から地盤種別の判定に役立てる工学的な手法は、地盤へ入射する一定のS波の垂直入射

を仮定することで、卓越(ピーク)周波数と地下構造が関係づけられる。しかし、微動の卓越(ピーク)周期は微動源や伝播経路の影響を強く受けているとの考えもある。また、微動のスペクトル特性において地下構造は卓越(ピーク)周波数でなく、スペクトルの振幅の変化によく現れるとの報告もある[3]。

観測された微動のスペクトル自体に微動源や伝播経路の影響が含まれていることは否定できない。それを除去するために、基準観測点の振幅スペクトルに対する他の観測点のスペクトル比を採って、微動源と伝播経路の影響を取り除いた地盤の相対的増幅特性を推定する。しかし、微動の2点間のスペクトル比を利用するためにはどのくらいの範囲で微動の入力が共通とみなせるかの問題の解決が必要である。

地表面で観測された微動の上下成分に対する水平成分のスペクトル比を用いる方法(H/V スペクトル比)は、基盤と地表間のS波の伝達関数に一致される。特に、短周期微動において、地盤構造を推定する方法としての有効性が多くの研究者で認められている。しかし、長周期(周期1秒以上)の微動は表面波が優勢であるとの観測がある。微動の本性がS波の重複反射などによる実体波なのか、レイリー波の定常波であるかがここでも問題となっている。特徴ある地盤で観測例を積み重ねて、その分類を行うことが必要で、多くの事例の地盤で、微動を測定した結果についての議論は未だ不十分である。

本研究では、千代川の河口に形成された鳥取平野の地盤特性を常時微動を観測することによって求めた。特に、鳥取平野の西部地域は鳥取港の埋め立て、湖山砂丘、沖積平野(三角州)、山地と地盤種が異なる地域の地盤特性が観測できる地域である。常時微動を測定することによって、その場所の地盤特性を求め、分類することを目的として、観測と解析を行った。

2. 観 測

観測地域

鳥取平野は中国山脈を水源とし、北行する千代川により日本海に広がった河口に形成された沖積平野で、東側は久松山山系、西側は海跡湖である湖山池に挟まれている。千代川の急流によって山から砂が供給され、日本海の荒波によって海岸に

打ち上げられて海岸砂丘が発達し、東側には鳥取砂丘(福部砂丘)、西側には湖山砂丘が形成されている。平野の表層は千代川によって堆積された砂と泥の互層構造である。地質構造は、下位から中生代及び第三紀の火山岩類と花崗岩類を基盤岩とし、第三紀層、及び第四紀層から構成される。第三紀の鳥取層群は主に湖山池西方の山地を構成し、古第三紀の花崗岩及び火山岩類は久松山から海岸の賀露町海岸の島、鳥取平野南方の山地を構成している。ここで、基盤としたのは第三紀層までの地層である(図1)。

鳥取平野の基盤深度は詳細には判っていないが、電気探査、ボーリング調査などによって、千代川に沿って、上流から下流へと深くなり、河口の賀露では約100mになると推定される。鳥取平野西部地域の湖山池周辺では、賀露海岸から湖山砂丘、沖積平野、山地とほぼ南北方向に表層の地盤種が異なり、地盤特性を観測するのに最適な地域である。しかし、基盤の深さについては詳細な解析はされていない。

今回、常時微動の観測点の設定にあたっては、次の二つの観点から鳥取市西部で南北方向を基本とした測線に沿った地下構造を調べた。

① 表層地質と地盤特性の関係

鳥取平野西部を、海岸埋め立て地、新砂丘、古砂丘、沖積平野、山地の地形に大きく分ける。

② 基盤までの深さと地盤特性

一般的に基盤は海から山にかけて浅くなっていると考えられることから、南北方向の測線を基本とした。

鳥取平野の西方に海跡湖として形成された、湖山池の東岸地域を海岸部から山地にかけて5地域で各5点の25カ所で微動観測を行った。港(MNT)は千代川の河口整備による鳥取港の埋め立てが行われた鳥取港の港内で、海岸部での観測を実施した。しかし、鳥取港のすぐ沖には鳥島があり、基盤が一番深い地域とも言えない。賀露地域(KAR)は海岸砂丘の上で比較的締まった砂丘地である。住宅地が発達していて、宅地造成が至るところで行われている。湖山地域(KYM)は賀露町よりは内陸部だが大学をはじめ学校が多く、人口も多く宅地化が最も進んでいる地域である。湖山池の東に広がる田園地帯は足山地域(TRY)で、沖積層が発達している。湖山池の南側は山地で、桂見地域(KTM)は岩盤で

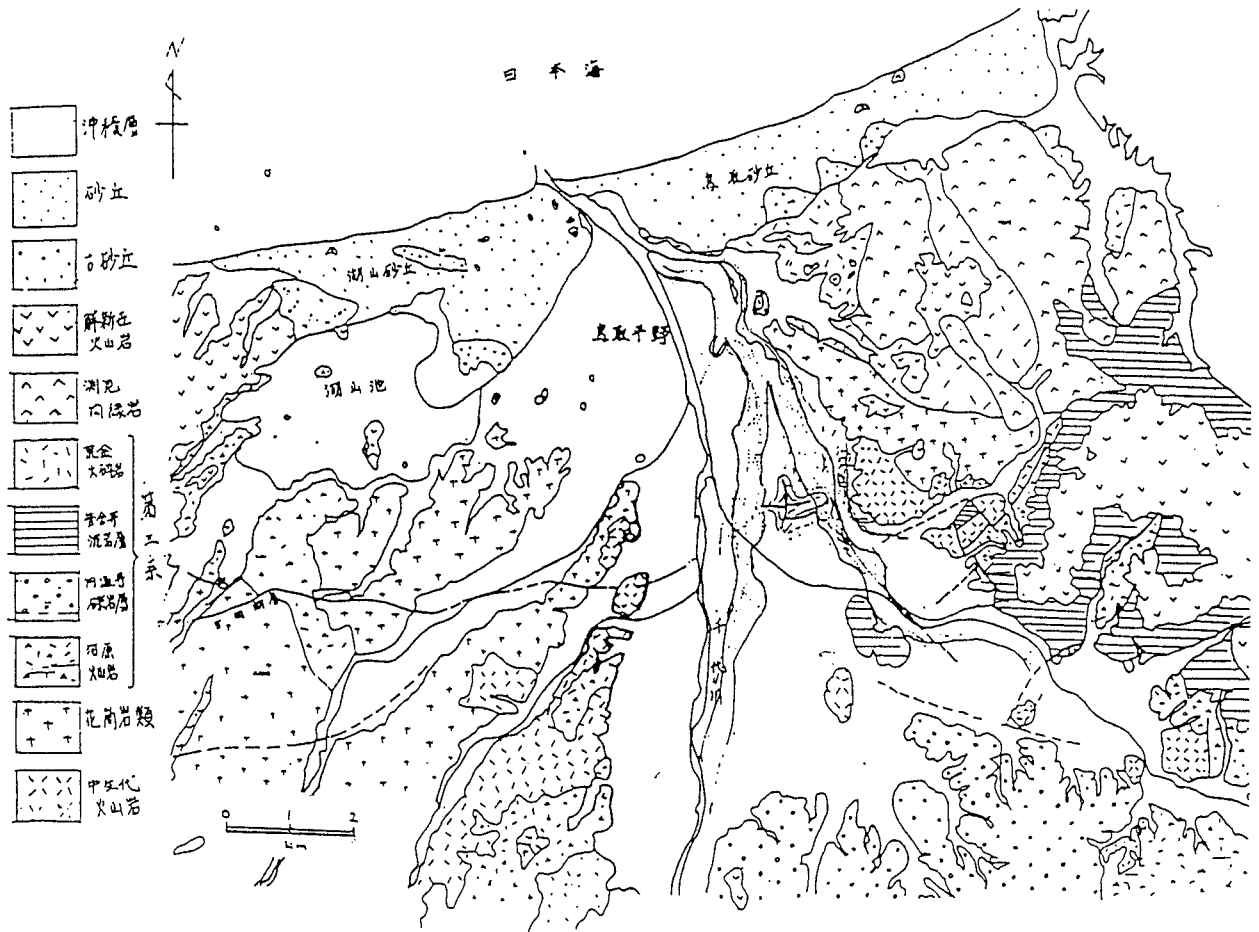


図1 鳥取平野の地質図 (赤木三郎より)

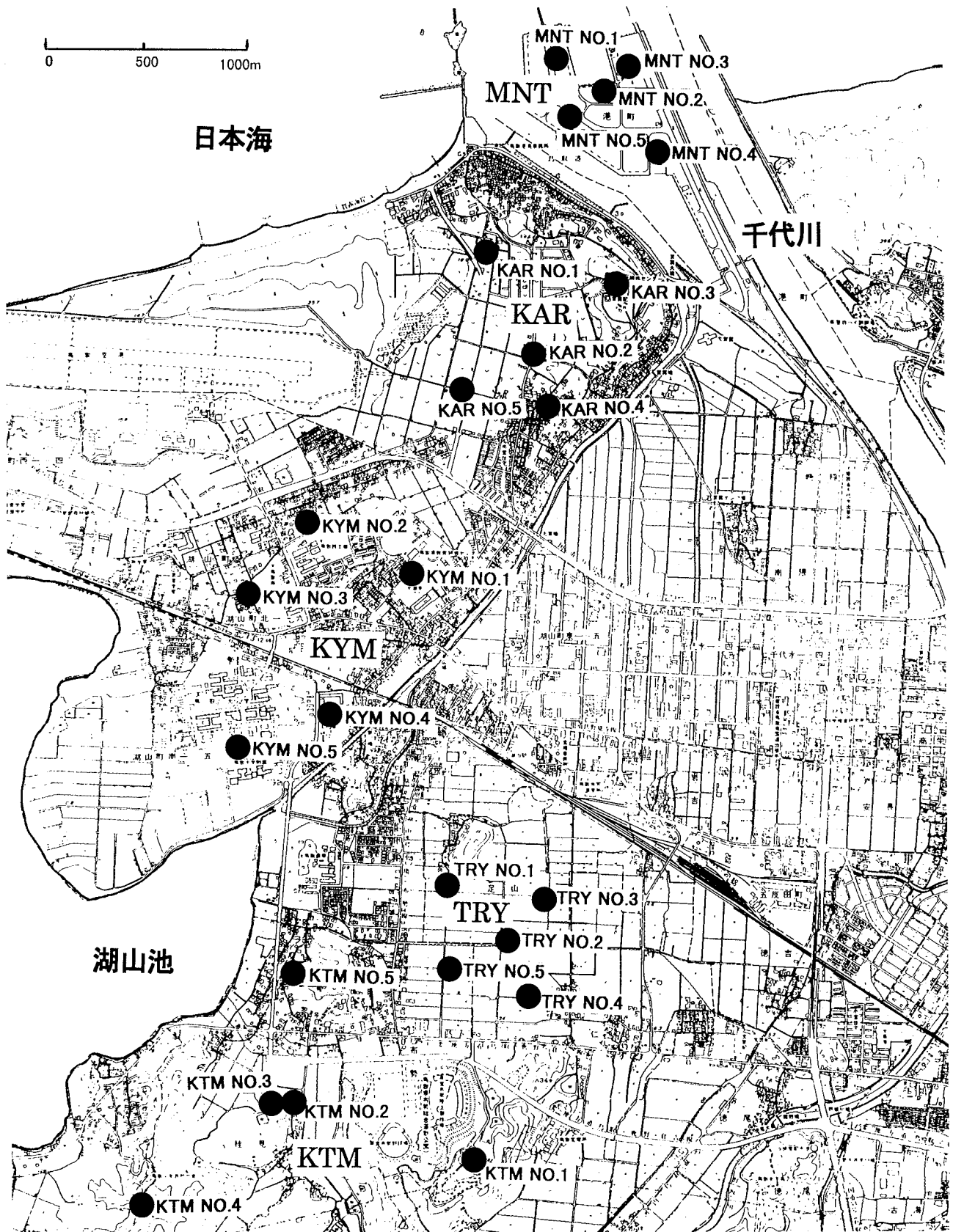


図2 鳥取平野西部域と観測点の分布。鳥取港(MNT)、賀露(KAR)、湖山(KYM)、足山(TRY)、桂見(KTM)の5地域に各地域に5観測点、計25観測点。

はないが、第3紀層、風化した花崗岩層が地表面にあり、その地域で微動の測定を行った。地形分類図では、5地域の地形について港(MNT)は砂州・浜、賀露(KAR)は砂州・砂丘、湖山(KYM)は砂丘・砂礫台地、足山(TRY)は三角州、桂見(KTM)は山地と分類される[4]。観測点の位置を図2に示す。

観測システム

観測システムは地震観測とほぼ同じで構成である。常時微動を測定するには少し特性が短周期であるが、勝島製作所の周期1秒の換振器（上下成分、南北成分、東西成分）と1000倍の増幅器、およびデジタル・データレコーダを使用した。換振器PK-110(勝島製作所)は、電磁式速度型振動計で、固有周期1秒、地動感度は速度震幅で3.0volt/kineである。周波数特性を図3に示す。

換振器(1.0Hz)

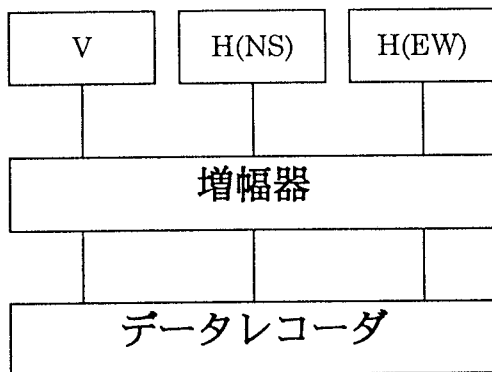


図4 微動観測システムのブロック図

増幅器AL-692(東京測振KK)は、直流増幅器で8チャンネル、1000倍までの利得を持っている。また、観測にあたって、各3成分の入力部に10kΩのシャント抵抗を取り付け、速度型の地震計として観測した。データレコーダSPC-35G(東京測振)は、分解能16bitのA/D変換部とラップトップコンピュータがセットになっており、観測記録をフロッピーディスクに収録する携帯用振動記録計である。記録波形はモニター画面で常にチェックできる。その観測システムのブロック図を示す(図4)。

観測の実施

各点での微動の観測は、上下成分(UD)、南北成分(NS)、東西成分(EW)の3成分の観測を、人工ノイズなどの影響を考慮して、比較的静かな時間帯を選んで、1点約5分間観測を行った。

微動記録は、観測点の状況に応じて増幅倍率を変えたが、原則的には1000倍とした。微動データはサンプリング周波数100Hzでデジタル化し、サンプル数3000個(30秒間)、1ファイルの基本単位とする10個のファイルを作成して、1観測点のデータファイルとして以後の解析に用いた。

現地における設置場所の選定は、なるべく同じような条件で観測をするように注意を払った。また、観測点周辺の状況として、風の強い場所、人や車など交通量の多い場所など、微動に悪影響を及ぼす場所があった。こういった場所では、風除けを立てたり観測時間を延長したりして対応した。観測点における設置場所、周辺の状況、観測機器の感度を表1に示す。

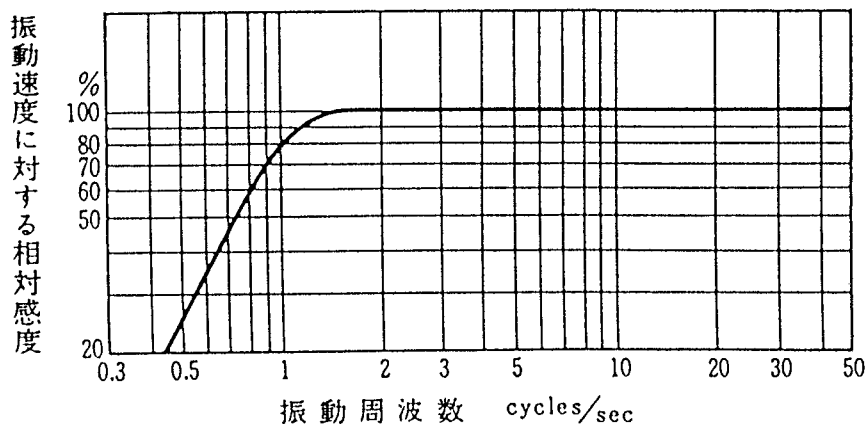


図3 地震計の周波数特性、地震計は周期1秒、速度型地震計として使用。

表1 各地域の観測点の状況と観測時の状況

観測点	NO.	設置場所	地表の様子	周辺の様子	増幅器倍率
MNT	1	港のふ頭	アスファルト、硬い	車の通過あるが少ない、風強	1000
	2	港のふ頭	土、粒子中、硬い	車などの通過なし静か、風強	1000
	3	港のふ頭	砂利混じり、硬い	車の通過あるが少ない、風強	1000
	4	工場用地	砂利混じり、硬い	風強	1000
	5	テトラ置き場	砂利多し、硬い	車の通過あるが少ない、風強	1000
KAR	1	駐車場	砂利多し、硬い	車などの通過なし静か	100
	2	資材置き場	土、粒子細、硬い	車の通過多い	1000
	3	グラウンド	土、粒子細、やや硬	車などの通過なし静か	1000
	4	公園	土、粒子細、硬い	車の通過あり	1000
	5	農道の路肩	砂利多し、硬い	車の通過あり、近くに駐車車両	1000
KYM	1	公園	土、粒子細、やや硬	人、自転車の通過多し	100
	2	投手練習場	土、粒子細、やや硬	人、自転車の通過あり	1000
	3	駐車場	砂利混じり、硬い	車の通過あるが少ない	1000
	4	グラウンド	土、粒子細、やや硬	人、自転車、車の通過多し	1000
	5	空き地(プール脇)	土、粒子細、やや硬	車の通過あり	1000
TRY	1	生け垣	土、粒子中、軟	人、車通過あり、田にトラクター	1000
	2	空き地(田埋立)	土、粒子細、やや軟	近くで工事	100・1000
	3	あぜ道	土、粒子細、軟	車などの通過なし静か	1000
	4	空き地(田埋立)	土、粒子細、やや軟	車の通過あり、工事現場見える	100
	5	軒下(畑道)	土、粒子細、硬い	車の通過あり、工事現場見える	1000
KTM	1	グラウンド(山間部)	土、粒子細、硬い	車の通過あり	1000
	2	宅地(切り土部)	土、粒子細、硬い	車の通過あり、山の裏側で工事	1000
	3	宅地(盛り土部)	土、粒子細、やや軟	車の通過あり	1000
	4	空き地(山頂)	土、粒子細、硬い	車などの通過なし、工事音する	1000
	5	空き地(山間部)	土、粒子細、硬い	車などの通過なし	1000

日時は、平成8年11月25日の午後5時頃から観測を始めて、港、賀露、湖山の順に観測を実施した。次の日の平成8年11月26日午前10時頃から始めて、足山、桂見の順に観測し、その日の午後8時頃に終了した。ただし、港地域のMNT-1、MNT-3、MNT-4については、風などの影響で、前日の微動データがよくなかったため、再度観測を行った。

3. 解析

微動の振動源の多くは地表面や海底面などにある。特に、短周期の微動源は人工ノイズである可能性が言われている。地表面に発生源があることから、微動を表面波のレイリー波として考えて、地盤構造との関係を見たとき、その微動の水平成分と上下成分のスペクトルの比(H/V)は地表面近くの地下構造のみに依存することが理論的に示されている[4]。したがって、微動に含まれるレイリー波の上下動と水平動成分を抽出できれば、地盤特性を求めることが出来る。この方法について、長周期微動および常時微動の両方の立場から、レイリー波の水平成分と上下成分のスペクトル比(H/V)を推定し、それが地下構造から計算される基本モードのそれによく対応されていることが示されている[5], [6], [7], [8], [9]。

レイリー波の粒子軌跡は、既往の研究から楕円軌道であるとされている。よって、レイリー波のH/Vは、その軌道の形状を現している。つまり、H/Vが大きければ(水平成分が上下成分より大きい)楕円軌道は横長に扁平し、逆にH/Vが小さければ(水平成分が上下成分より小さい)楕円軌道は縦長に扁平する(図5(a))。

この概念をもとに、大町 他は、水平2層弾性地盤モデルを用いて、レイリー波の粒子軌跡の周期特性から、H/Vの妥当性を理論的に説明している[6]。

すなわち、水平2層弾性地盤モデルにおいて、インピーダンス α と表層厚H(m)は、表層のS波速度 V_{S1} 、基盤のS波速度 V_{S2} より

$$\alpha = V_{S1} / V_{S2}$$

$$H = V_{S1} / 4$$

とする。地表におけるレイリー波の振幅は、周期によって著しく変動する。そして、その変動状況は、レイリー波の粒子軌跡の形状を考えると明らかになる。レイリー波基本モードの粒子軌跡は、

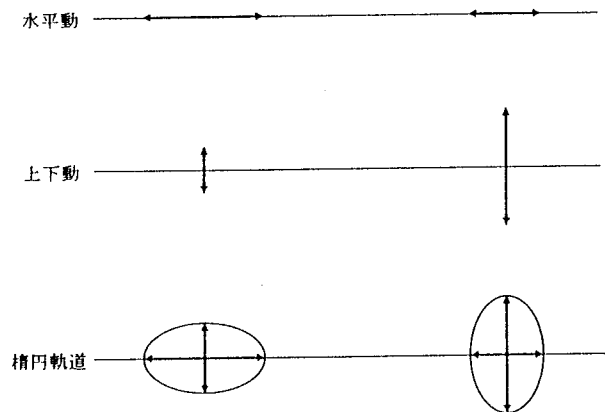


図5(a) レイリー波とH/Vの概念、左：H/Vが大、右：H/Vが小、(上：水平成分、中：上下成分、下：粒子運動)

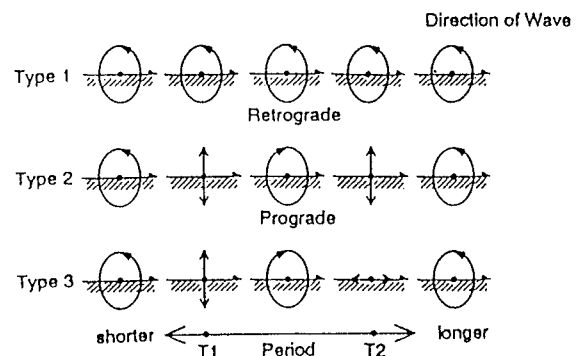


図5(b) レイリー波のH/V比の地盤分類
タイプ1： α 変化なし、タイプ2： α 小、タイプ3： α 大

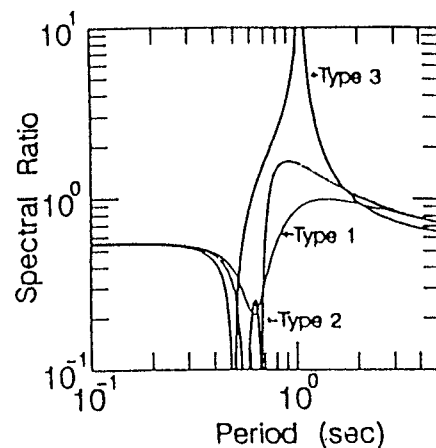


図5(c) 地盤によるタイプ別のH/Vスペクトル比の理論曲線

長周期側と短周期側の極限では地盤構造によらず逆転の楕円形を描く。そしてそれらの中間領域では、図5(b)に示す3つのタイプのうち、1つとなる。その支配要因は表層と基盤の速度のインピーダンス比 α である。インピーダンス比 α が、大きいということは表層と基盤のコントラストが大きいということである。つまり、基盤に比べ表層がより柔らかいことを意味する。この α が大きい場合、粒子軌跡は周期によって形状変化を示すものの全周期範囲にわたって逆転する楕円のままである(タイプ1)。ある程度 α が小さい場合、周期が短周期から長周期へ変動すると、ある周期(T_1)で水平動振幅が0となって楕円軌道は逆転から順転に移行する。さらに周期が長くなると、楕円軌跡は順転から逆転へと移行するが、この周期(T_2)では水平動振幅が0になる場合(タイプ2)と上下動振幅が0になる場合(タイプ3)とがある。また、このような粒子軌跡の周期特性に対して振幅比の周期変化、すなわちスペクトル比(H/V)も3種類に大別でき、その3つのタイプの典型的なH/Vのスペクトルを両対数グラフで示すと、図5(c)のようになる。そして、これから次のことが読み取れる。タイプ2では、2つの周期 T_1 と T_2 で水平動振幅が0となるため、これら2つの周期で深い谷を形成している。タイプ3では、 T_1 で水平動振幅が0となるため深い谷となるが、 T_2 で上下動振幅が0となるので鋭いピークとなっている。タイプ1では、両振幅とも0となる周期がないので谷もピークも比較的なだらかになっている。

よって、この理論においては、表層地盤について次のようにいえる。

- 表層地盤と基盤のコントラストが小さい。
…………… H/V がタイプ1
- 表層地盤と基盤のコントラストはそれ程大きくない。…………… H/V がタイプ2
- 表層地盤と基盤のコントラストが大きい。
…………… H/V がタイプ3

実際の微動ではスペクトル比(H/V)について、ピーク周期および谷周期を読み取れば、地下構造の推定が可能である。

今回の観測された微動記録を以下の手順で解析を行った。初めに、観測された波形データを30秒ごとに測定波形として出力し、その中から車や人の通行などのノイズがない静かな区間のデータを1区間選り出した。各観測点ごとの測定波形を図6に示す。この中の4CH、5CH、6CHは、そ

れぞれ上下動(UD)、水平動・南北方向(NS)、水平動・東西方向H(EW)成分の波形を示している。

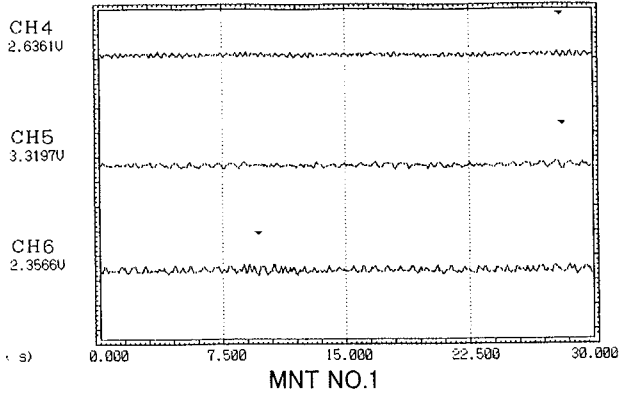
各地域の微動波形は、港地域(MNT)では比較的長周期の波形が卓越していて、上下成分より水平成分の振幅が大きいのが特徴である。賀露地域(KAR)では観測点による差が大きく、賀露地域としての特徴があまりない。KAR-2、KAR-3が振幅の大きさは違うがやや短周期が混じった微動波形を示している。湖山地域(KYM)も観測点によって異なるが、上下成分はやや短周期の振幅の小さい波形を示しているが、水平成分がバラバラである。特に、KYM-2、KYM-3の微動波形はノイズが含まれている可能性がある。足山地域(TRY)は、上下成分より水平成分の方の振幅が大きく、やや長周期の波形が見られ、この地域全体としての特徴が見える。桂見地域(KTM)は上下成分、水平成分ともに振幅が小さく、短周期微動という、基盤上での観測波形の特徴を示している。

それぞれの観測点で、比較的定常な微動波形の区間を選び出し、波形データをFFT(fast Fourier transform)によりフーリエ変換し、フーリエスペクトルを求めた。この時、データサンプル数は2048に設定した。各地域でそれぞれ1観測点の解析例を示す(図7)。縦軸がフーリエスペクトル振幅、横軸が周波数の両対数グラフである。このスペクトル解析には、解析ソフトSPC-35-8(東京測振)を用いた。

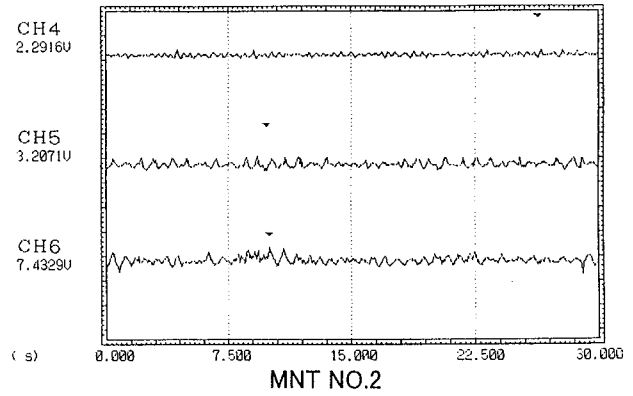
フーリエスペクトルの形状について、港地域(MNT)は周波数1~2Hz前後にそれぞれの成分で卓越周波数が認められる。周波数0.2Hz前後のピークは海洋波浪による脈動である。賀露地域(KAR)はバラバラで、短周期の卓越周期を示す地点あり、また周波数2~3Hzの卓越周波数を示しているのが3地点ある。湖山地域(KYM)は全体的に平坦な周波数特性を示している。足山地域(TRY)は卓越周波数3~5Hzを示し、右下がりの形状を示している。桂見地域(KTM)は卓越周波数3~10Hzの短周期領域にピークをもつ形状となっている。それぞれの地域での特徴をおよそ概観すればこれらのことが言える。

このフーリエスペクトルをそのまま表示すると、形状が複雑になり、後の解析が困難になるため、バンド幅0.3Hzのパーゼンウィンドウを1回かけて、平滑化を行った。スペクトル解析で得られ

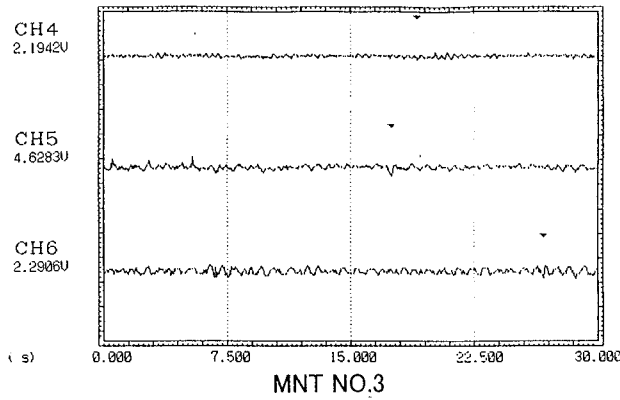
測定時刻 1998年11月28日 19:59:17.72
 修正時刻 0月 0日 0:0:0.0
 100(Hz) vel.(x1) 2×10^{-2} m/s (MNT118)



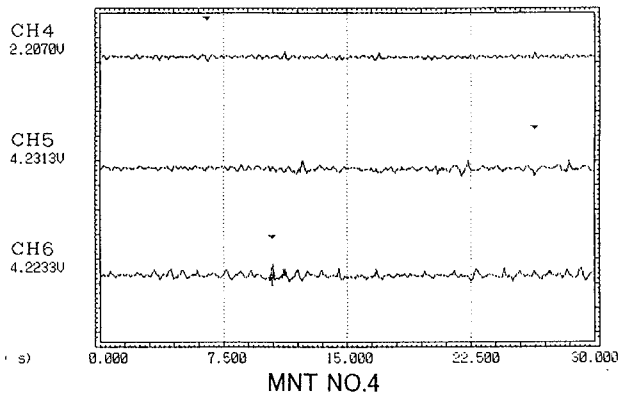
測定時刻 1998年11月25日 17:50:27.81
 修正時刻 0月 0日 0:0:0.0
 100(Hz) vel.(x1) 2×10^{-2} m/s (MNT201)



測定時刻 1998年11月28日 19:13:47.8
 修正時刻 0月 0日 0:0:0.0
 100(Hz) vel.(x1) 2×10^{-2} m/s (MNT315)



測定時刻 1998年11月28日 19:36:49.58
 修正時刻 0月 0日 0:0:0.0
 100(Hz) vel.(x1) 2×10^{-2} m/s (MNT410)



測定時刻 1998年11月25日 18:39:42.88
 修正時刻 0月 0日 0:0:0.0
 100(Hz) vel.(x1) 2×10^{-2} m/s (MNT508)

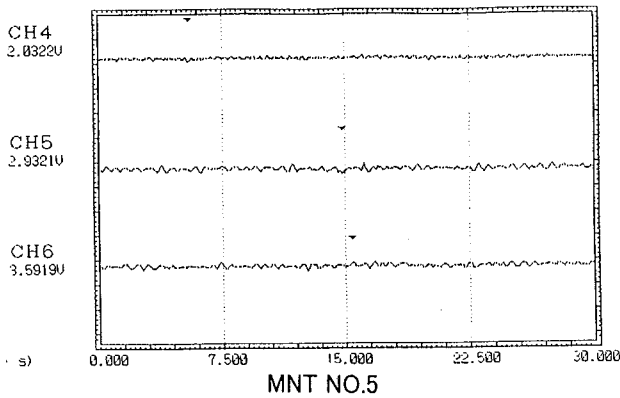
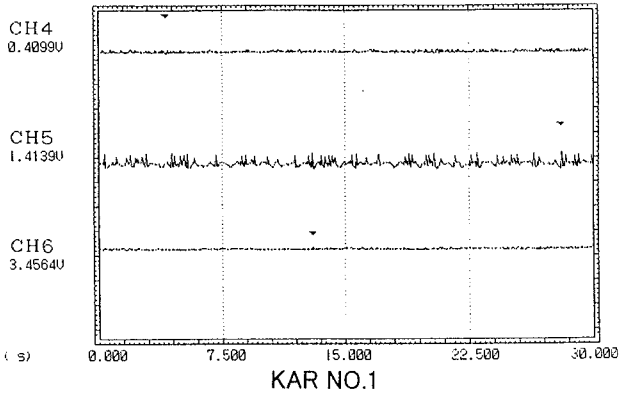
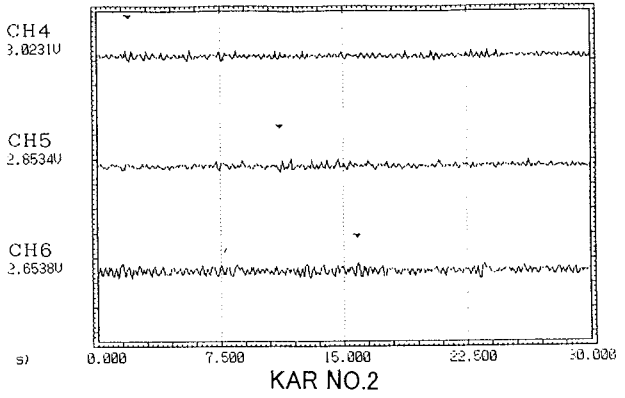


図6-1 鳥取港地域の観測波形（上から、上下、南北、東西成分）

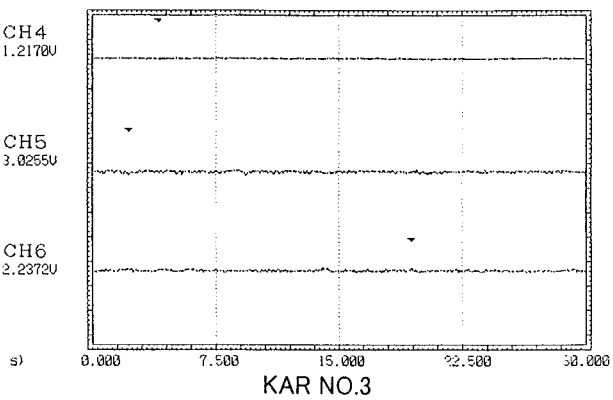
測定時刻 1996年11月25日 19:20:31 0
 修正時刻 0月 0日 0: 0: 0 0
 100(Hz) vel.(x1) 2×10^{-3} m/s (KAR107)



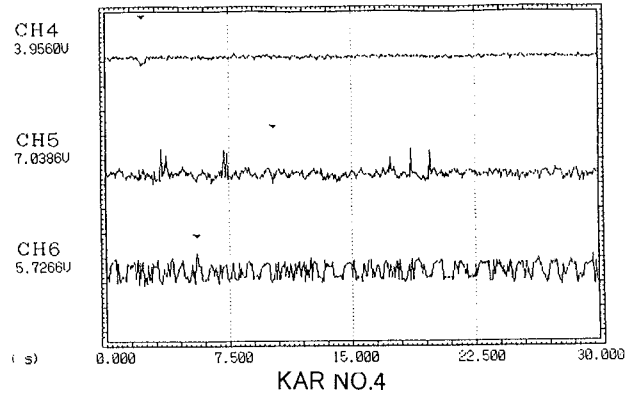
測定時刻 1996年11月25日 20:47:51 30
 修正時刻 0月 0日 0: 0: 0 0
 100(Hz) vel.(x1) 2×10^{-3} m/s (KAR205)



測定時刻 1996年11月25日 21: 9:36 44
 修正時刻 0月 0日 0: 0: 0 0
 100(Hz) vel.(x1) 2×10^{-3} m/s (KAR308)



測定時刻 1996年11月25日 20:20:42 38
 修正時刻 0月 0日 0: 0: 0 0
 100(Hz) vel.(x1) 2×10^{-3} m/s (KAR401)



測定時刻 1996年11月25日 19:56:43 80
 修正時刻 0月 0日 0: 0: 0 0
 100(Hz) vel.(x1) 2×10^{-3} m/s (KAR505)

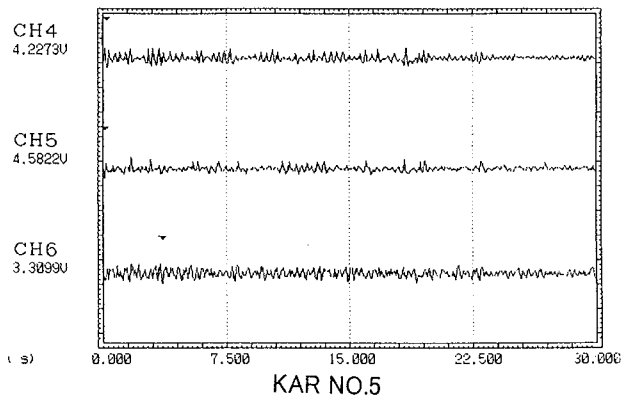
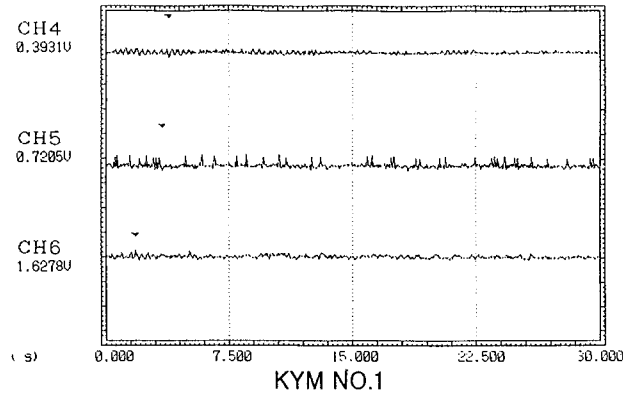
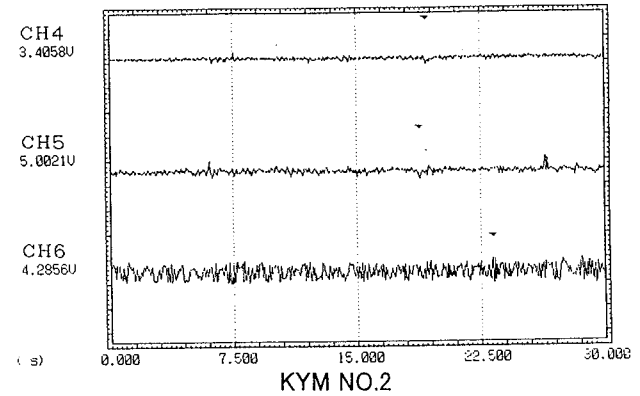


図6-2 賀露地域の観測波形 (上から、上下、南北、東西成分)

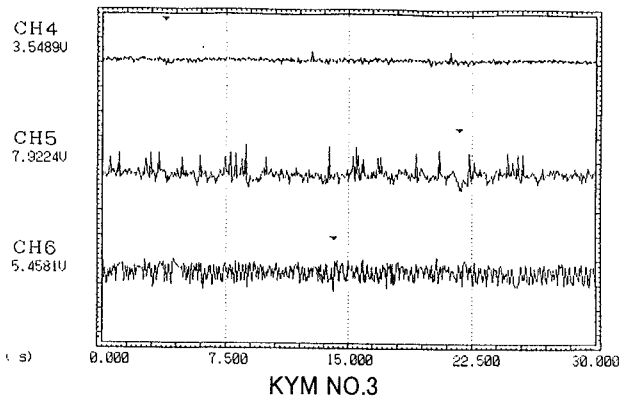
測定時刻 1998年11月25日 10 73
 修正時刻 0月 0日 0: 0: 0 0
 100(Hz) vel.(x1) 2×10^{-2} m/s (KYM110)



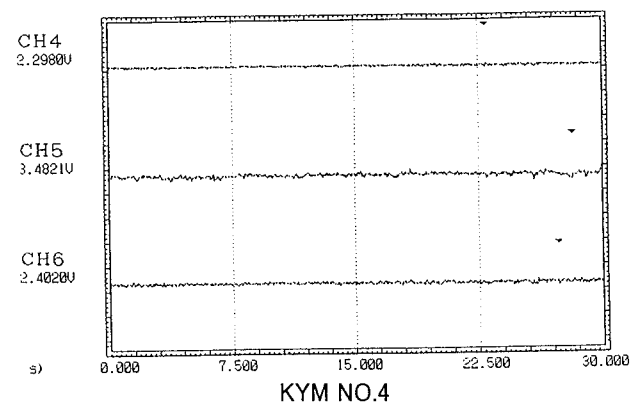
測定時刻 1998年11月25日 22:50:49 88
 修正時刻 0月 0日 0: 0: 0 0
 100(Hz) vel.(x1) 2×10^{-2} m/s (KYM208)



測定時刻 1998年11月25日 23:10:52 53
 修正時刻 0月 0日 0: 0: 0 0
 100(Hz) vel.(x1) 2×10^{-2} m/s (KYM310)



測定時刻 1998年11月25日 23:30:24 21
 修正時刻 0月 0日 0: 0: 0 0
 100(Hz) vel.(x1) 2×10^{-2} m/s (KYM401)



測定時刻 1998年11月26日 0: 0: 8 37
 修正時刻 0月 0日 0: 0: 0 0
 100(Hz) vel.(x1) 2×10^{-2} m/s (KYM502)

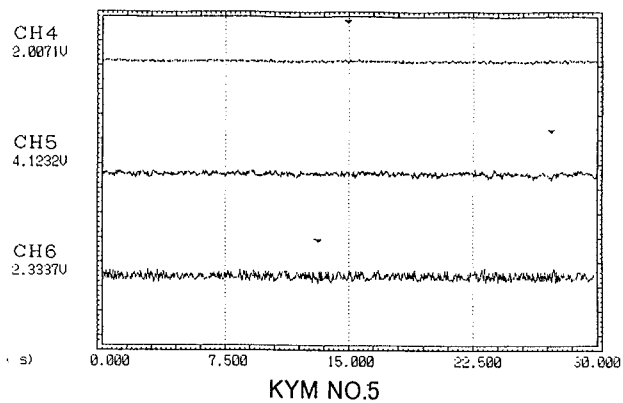
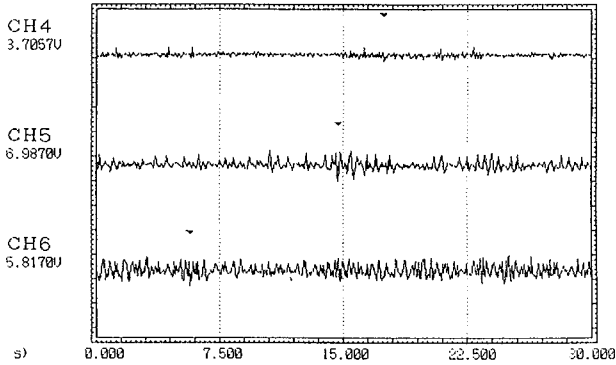


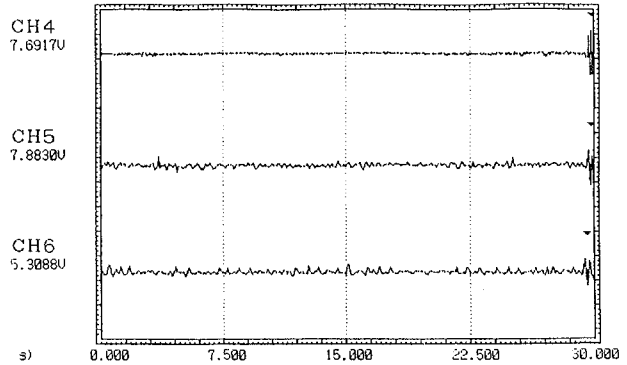
図6-3 湖山地域の観測波形（上から、上下、南北、東西成分）

測定時刻 1998年11月28日 11:35:58 0
 修正時刻 0月 0日 0: 0: 0 0
 100(Hz) vel.(x1) 2×10^{-2} m/s (TRY108)



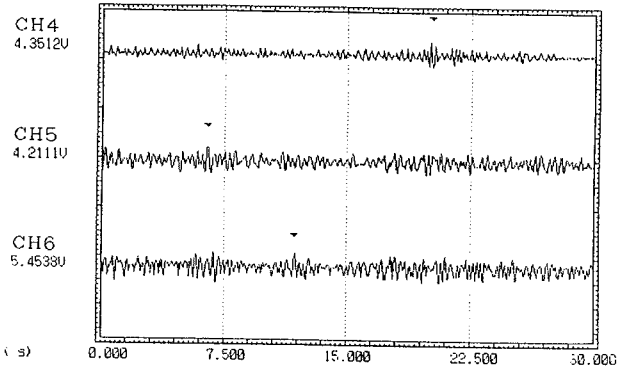
TRY NO.1

測定時刻 1998年11月28日 11:58:49 21
 修正時刻 0月 0日 0: 0: 0 0
 100(Hz) vel.(x1) 2×10^{-2} m/s (TRY210)



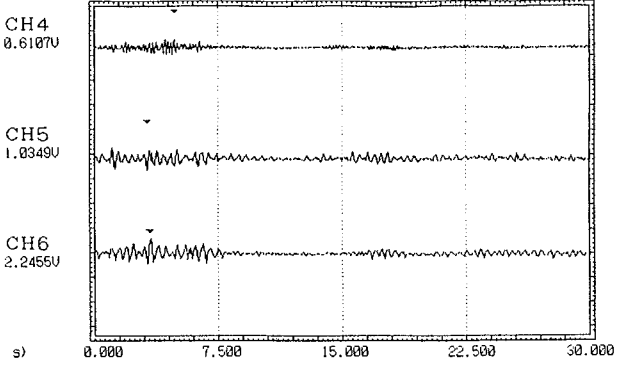
TRY NO.2

測定時刻 1998年11月28日 10:32:40 82
 修正時刻 0月 0日 0: 0: 0 0
 100(Hz) vel.(x1) 2×10^{-2} m/s (TRY312)



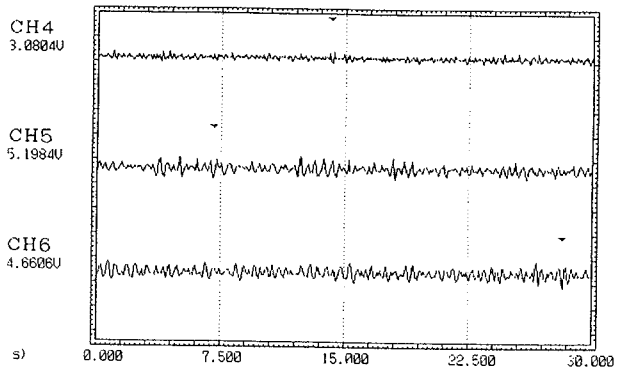
TRY NO.3

測定時刻 1998年11月28日 10: 5 5
 修正時刻 0月 0日 0: 0: 0 0
 100(Hz) vel.(x1) 2×10^{-2} m/s (TRY401)



TRY NO.4

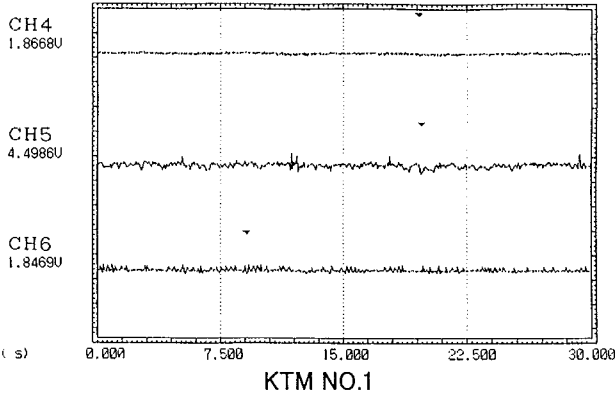
測定時刻 1998年11月28日 11: 9:54 39
 修正時刻 0月 0日 0: 0: 0 0
 100(Hz) vel.(x1) 2×10^{-2} m/s (TRY504)



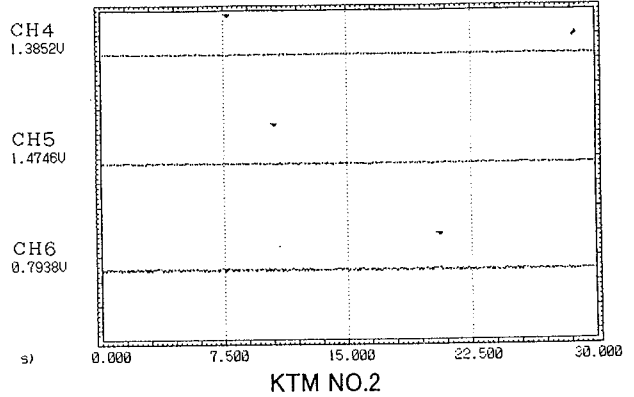
TRY NO.5

図6-4 足山地域の観測波形 (上から: 上下、南北、東西成分)

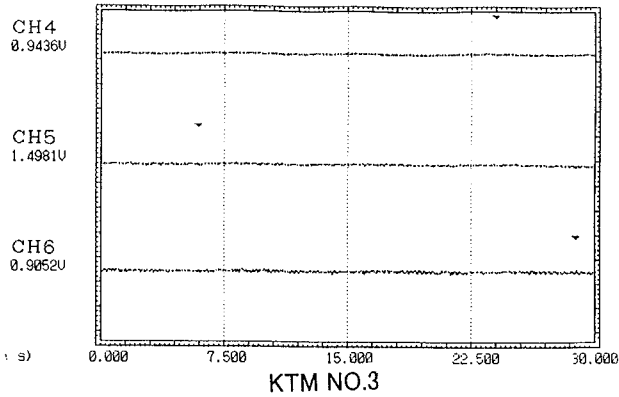
測定時刻 1998年11月28日 15: 12
 修正時刻 0月 0日 0: 0: 0
 100(Hz) vel.(x1) 2×10^{-2} m/s (KTM108)



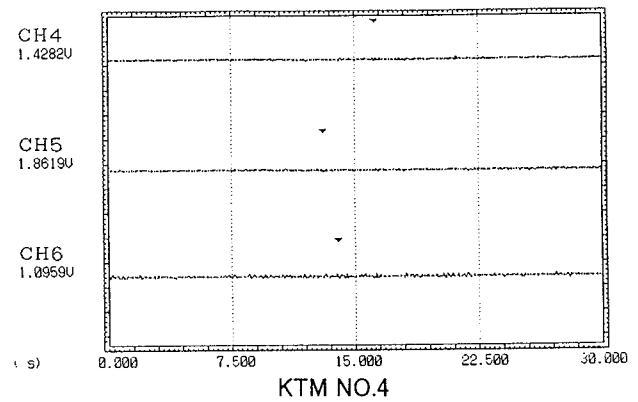
測定時刻 1998年11月28日 15:31:30 2
 修正時刻 0月 0日 0: 0: 0
 100(Hz) vel.(x1) 2×10^{-2} m/s (KTM210)



測定時刻 1998年11月28日 15: 54
 修正時刻 0月 0日 0: 0: 0
 100(Hz) vel.(x1) 2×10^{-2} m/s (KTM307)



測定時刻 1998年11月28日 18:20: 3 37
 修正時刻 0月 0日 0: 0: 0
 100(Hz) vel.(x1) 2×10^{-2} m/s (KTM408)



測定時刻 1998年11月28日 18:58:58 19
 修正時刻 0月 0日 0: 0: 0
 100(Hz) vel.(x1) 2×10^{-2} m/s (KTM502)

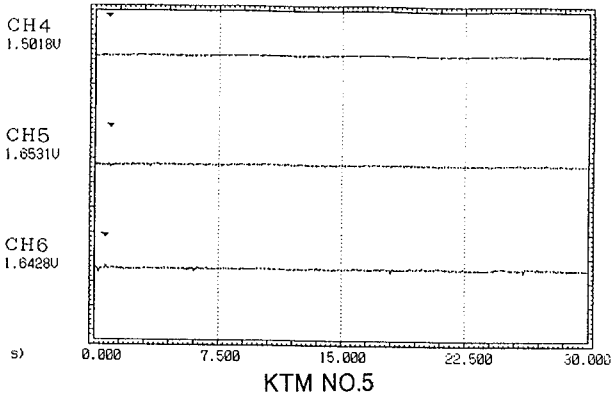
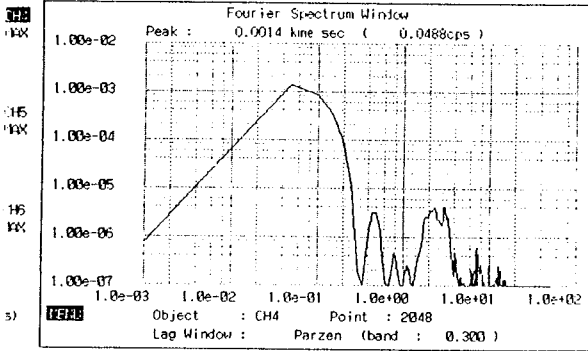


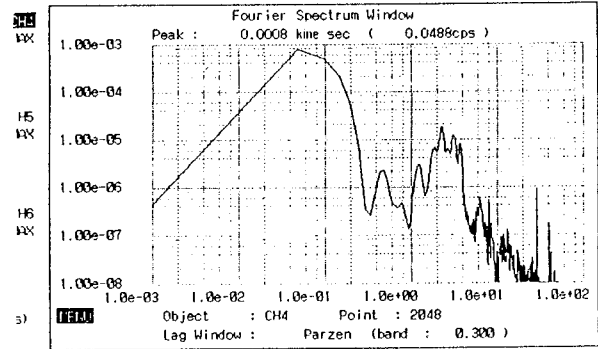
図6-5 桂見地域の観測波形 (上から、上下、南北、東西成分)

FILE] MNT118.DBL
 DATE] 11-26-1998 19:59:17.72
 REPAIR] 00-00 00:00:00.00
 SAMPLING] 100Hz [FUNCTION] Vel. [HPF] 1Hz [RANGE] 0.1kine



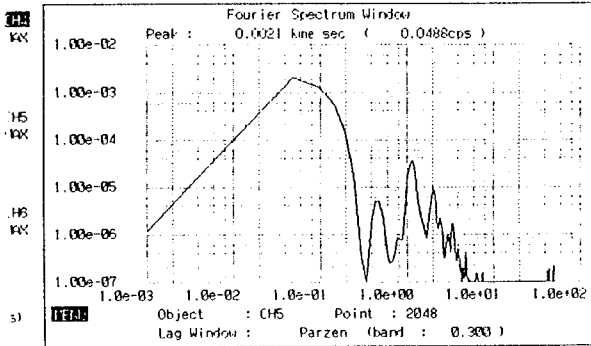
MNT NO.1 UD

FILE] KAR205.DBL
 DATE] 11-25-1998 20:47:51.30
 REPAIR] 00-00 00:00:00.00
 SAMPLING] 100Hz [FUNCTION] Vel. [HPF] 1Hz [RANGE] 0.1kine



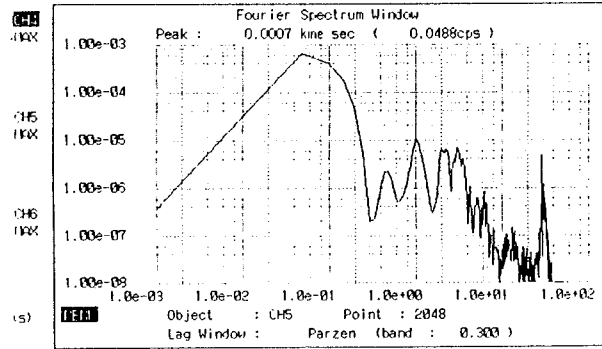
KAR NO.2 UD

FILE] MNT118.DBL
 DATE] 11-26-1998 19:59:17.72
 REPAIR] 00-00 00:00:00.00
 SAMPLING] 100Hz [FUNCTION] Vel. [HPF] 1Hz [RANGE] 0.1kine



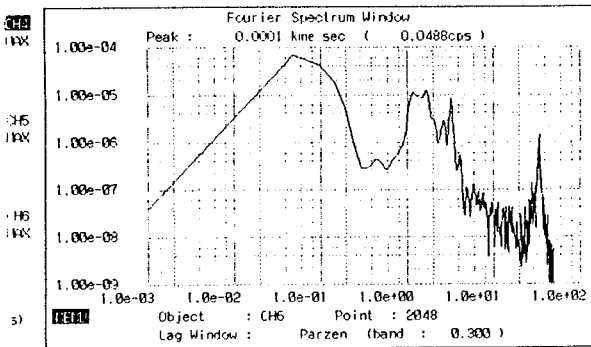
MNT NO.1 NS

FILE] KAR205.DBL
 DATE] 11-25-1998 20:47:51.30
 REPAIR] 00-00 00:00:00.00
 SAMPLING] 100Hz [FUNCTION] Vel. [HPF] 1Hz [RANGE] 0.1kine



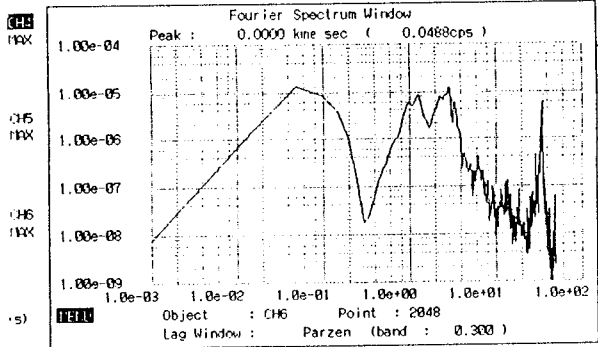
KAR NO.2 NS

FILE] MNT118.DBL
 DATE] 11-26-1998 19:59:17.72
 REPAIR] 00-00 00:00:00.00
 SAMPLING] 100Hz [FUNCTION] Vel. [HPF] 1Hz [RANGE] 0.1kine



MNT NO.1 EW

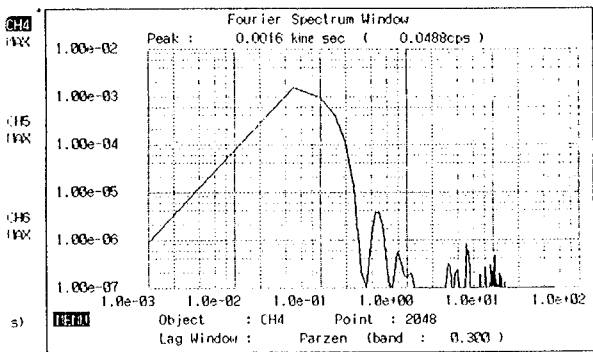
FILE] KAR205.DBL
 DATE] 11-25-1998 20:47:51.30
 REPAIR] 00-00 00:00:00.00
 SAMPLING] 100Hz [FUNCTION] Vel. [HPF] 1Hz [RANGE] 0.1kine



KAR NO.2 EW

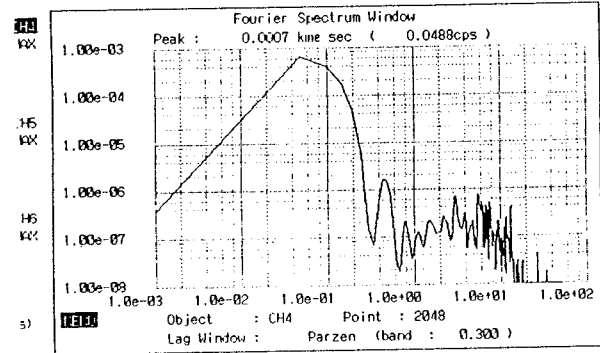
図7-1 フーリエスペクトル(MNT-1とKAR-2)、縦軸は振幅強度、横軸は周波数を示す。

[FILE] KYM401.DBL
 [DATE] 11-25-1998 23:30:24.21
 [REPAIR] 00-00 00:00:00.00
 [SAMPLING] 100Hz [FUNCTION] Vel. [HPF] 1Hz [RANGE] 0.1kine



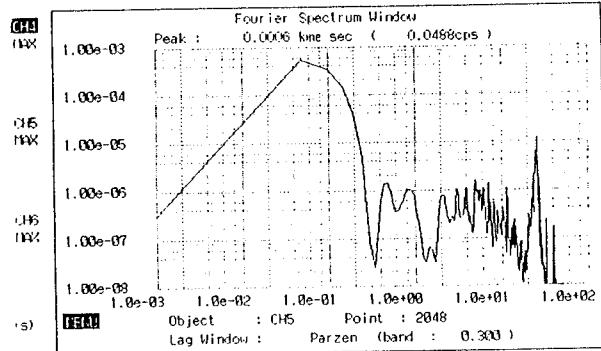
KYM NO.4 UD

[FILE] TRY210.DBL
 [DATE] 11-26-1998 11:58:49.21
 [REPAIR] 00-00 00:00:00.00
 [SAMPLING] 100Hz [FUNCTION] Vel. [HPF] 1Hz [RANGE] 0.1kine



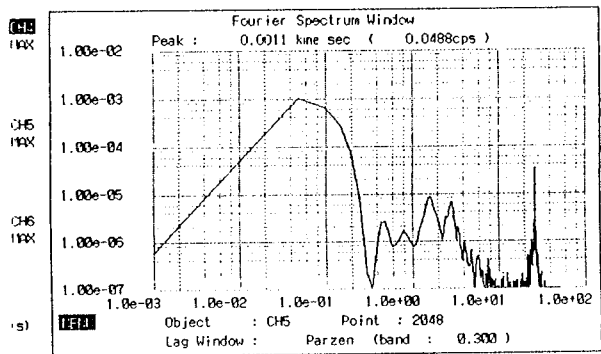
TRY NO.2 UD

[FILE] KYM401.DBL
 [DATE] 11-25-1998 23:30:24.21
 [REPAIR] 00-00 00:00:00.00
 [SAMPLING] 100Hz [FUNCTION] Vel. [HPF] 1Hz [RANGE] 0.1kine



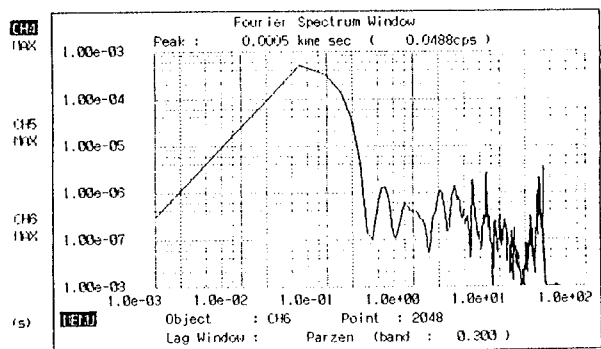
KYM NO.4 NS

[FILE] TRY210.DBL
 [DATE] 11-26-1998 11:58:49.21
 [REPAIR] 00-00 00:00:00.00
 [SAMPLING] 100Hz [FUNCTION] Vel. [HPF] 1Hz [RANGE] 0.1kine



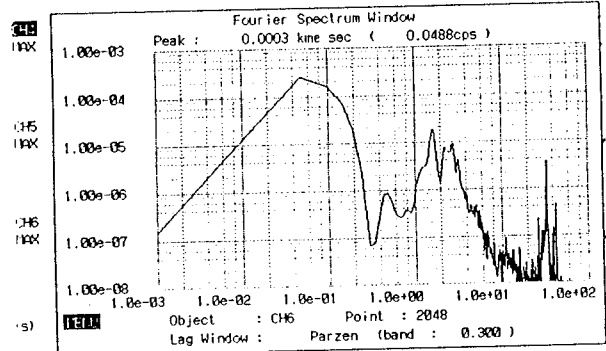
TRY NO.2 NS

[FILE] KYM401.DBL
 [DATE] 11-25-1998 23:30:24.21
 [REPAIR] 00-00 00:00:00.00
 [SAMPLING] 100Hz [FUNCTION] Vel. [HPF] 1Hz [RANGE] 0.1kine



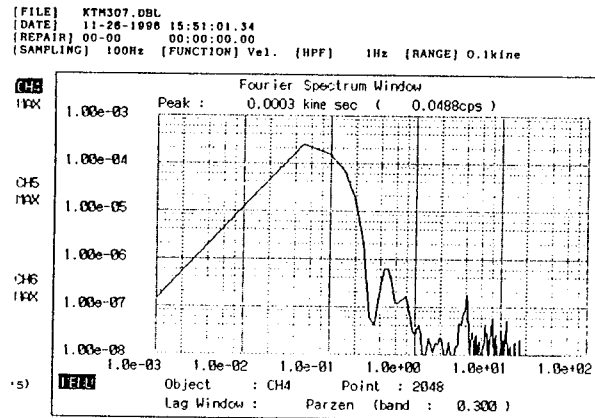
KYM NO.4 EW

[FILE] TRY210.DBL
 [DATE] 11-26-1998 11:58:49.21
 [REPAIR] 00-00 00:00:00.00
 [SAMPLING] 100Hz [FUNCTION] Vel. [HPF] 1Hz [RANGE] 0.1kine

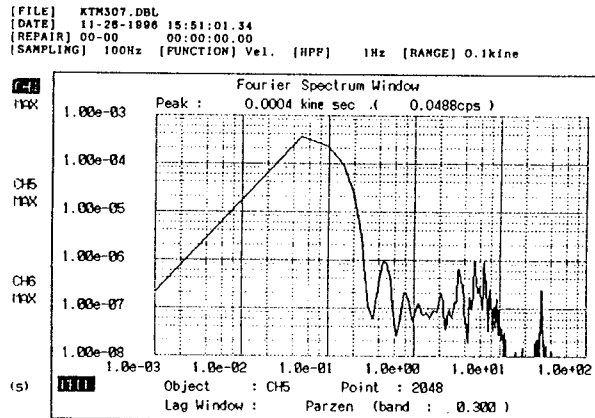


TRY NO.2 EW

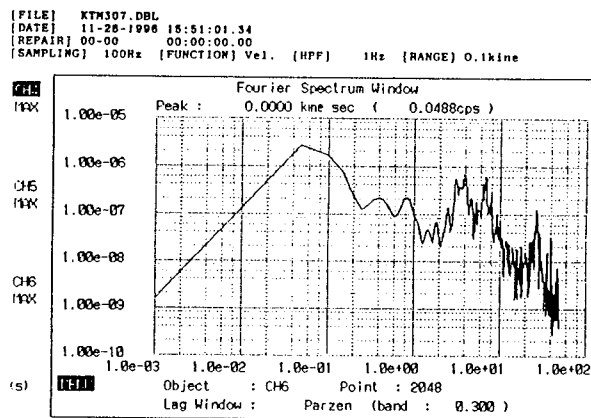
図7-2 フーリエスペクトル(KYM-4とTRY-2)、縦軸は振幅強度、横軸は周波数を示す。



KTM NO.3 UD



KTM NO.3 NS



KTM NO.3 EW

図 7-3 フーリエスペクトル(KTM-3)、縦軸は振幅強度、横軸は周波数を示す。

た各観測点の3成分のフーリエスペクトルから、0.2~20Hzの区間について、スペクトル振幅を読み取り、3成分のフーリエスペクトルを、3データによる移動平均(running mean)により平滑化した。この一連の作業によって各成分のフーリエスペクトルを作成した。

次に、合成した水平成分のフーリエスペクトル(S_H)は水平NS,EWの両成分のフーリエスペクトル S_{NS}, S_{EW} として、

$$S_H = (S_{NS} \cdot S_{EW})^{1/2}$$

で相乗平均して求めた。これらと上下動の平均スペクトル S_{UD} の比をとり、水平成分と上下成分のスペクトル比(H/V)を求めた。H/Vを次式で定義する。

$$H/V = S_H / S_{UD}$$

ここで、水平動の合成について、水平2成分を合成しないで、別々に処理しても、通常はほとんど同一のピーク周波数(周期)が抽出できるが、まれに両者が異なる場合があり、それは両者の差異が特別な意味を持つ場合があるとの指摘もあることから、参考までにN-S, E-W成分についても同様にH/Vを求めた[6], [9]。N-S, E-W成分および合成成分のH/Vを、図8に示す。縦軸がスペクトル振幅比(ratio)、横軸が周波数(frequency)の両対数グラフとなっており、N-S, E-W、合成成分はそれぞれ薄線、点線、実線で示してある。

このH/Vの形状およびピーク周波数(周期)、谷周波数(周期)とそれぞれのスペクトル振幅(以後、ピーク値と呼ぶ)を読むことで各観測点ごとの微動特性を考察した。港地域(MNT)は長周期側にピークを示している。卓越周波数は1Hz前後で右下がりの形状をし、2~5Hzで谷の形状を示している。賀露地域(KAR)はバラバラの形状で1つの特徴で現すことは出来ない。特に、KAR-3地点はピークが2つあり、他と大きく異なる。卓越周波数は1Hzよりも小さく、谷の形状をあまり示さない。湖山地域(KYM)もバラバラで、KYM-1地点は説明することが難しい形状を示している。KYM-2、-5地点は1Hzにピークを示しているが、他の形状は平坦な形状を示している。足山地域(TRY)は長周期側のピークと短周期側の谷の形状を示している。卓越周波数は1~2Hzの間にあり、周波数6~10Hzに谷の形状を示している。桂見地域(KTM)は短周期にピークをもつ、右上がりの形状を示し、

ほとんど谷の形状を示さない。卓越周波数は約3~6Hzである。

ここでは、観測された微動の波形、スペクトル分析、水平成分と上下成分のスペクトル比(H/V)について、観測・解析の特徴について考察した。尚、同じようなピークが複数ある場合は、低周波数(長周期)側のピーク周波数、ピーク値をとった。結果を表2に示す。また、図8にピークとして読んだ場所を矢印で示した。

表2 読み取られたスペクトル比(H/V比)のピーク周波数とH/V比のピーク値

観測点	NO.	ピーク周波数 (Hz)	ピーク値
MNT	1	1.13	110
	2	0.90	68
	3	0.80	28
	4	0.90	24
	5	1.63	12
KAR	1	2.00	330
	2	0.80	12
	3	1.00	12
	4	0.70	30
	5	0.85	20
KYM	1	0.70	62
	2	1.00	38
	3	0.60	6.9
	4	1.75	7.2
	5	0.90	18
TRY	1	1.40	160
	2	1.25	30
	3	1.25	25
	4	1.90	140
	5	1.45	36
KTM	1	3.50	13
	2	5.50	15
	3	6.00	18
	4	2.75	22
	5	4.25	11

4. 議 論

鳥取平野の地下構造との関係は埋め立て地、砂丘地域、沖積平野と山地での観測点で得られたス

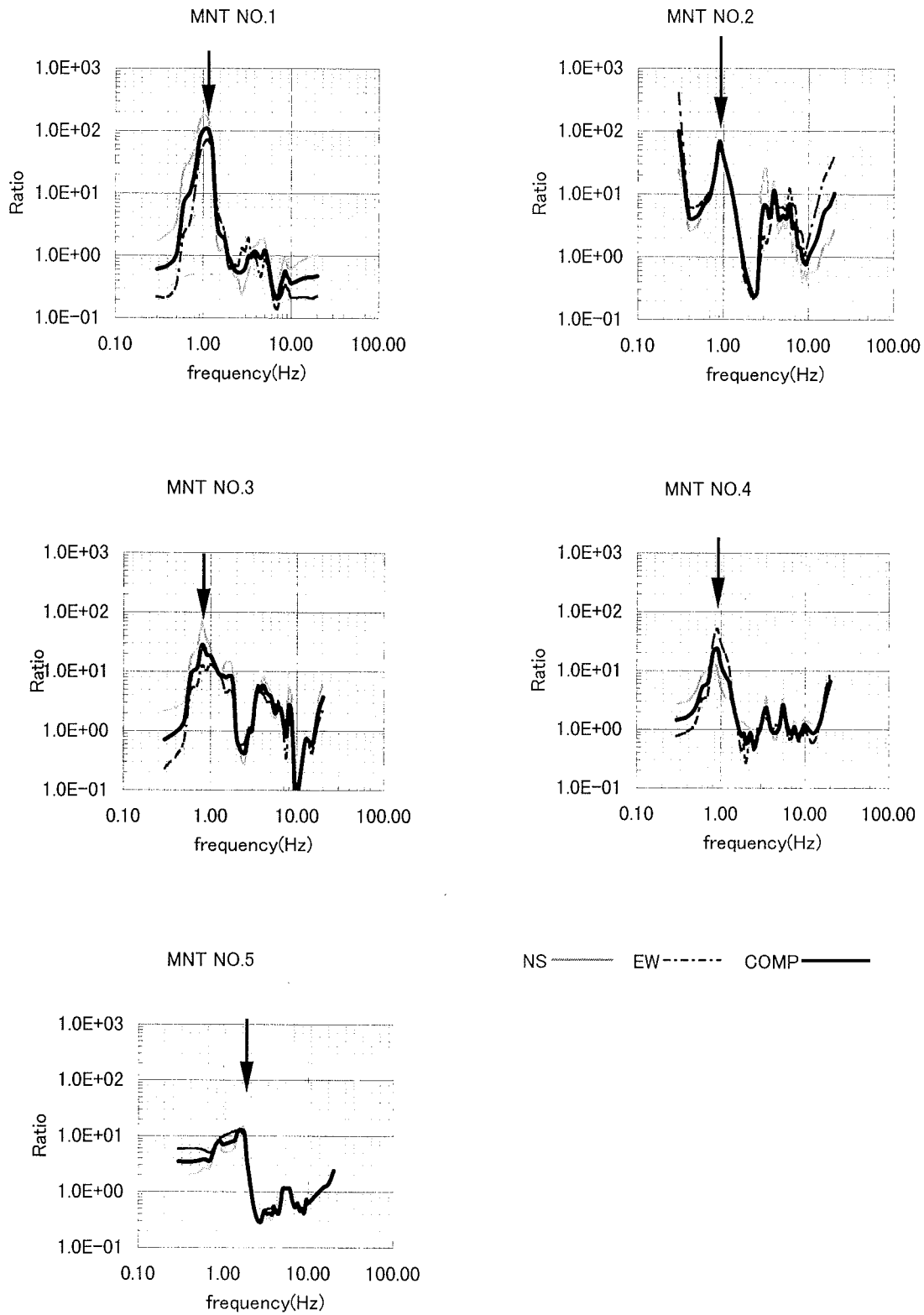


図8-1 港地域 (MNT) の水平成分と上下成分のスペクトル比 (H/V)、縦軸はH/V比、横軸は周波数を示す。矢印はピーク周波数を示す。

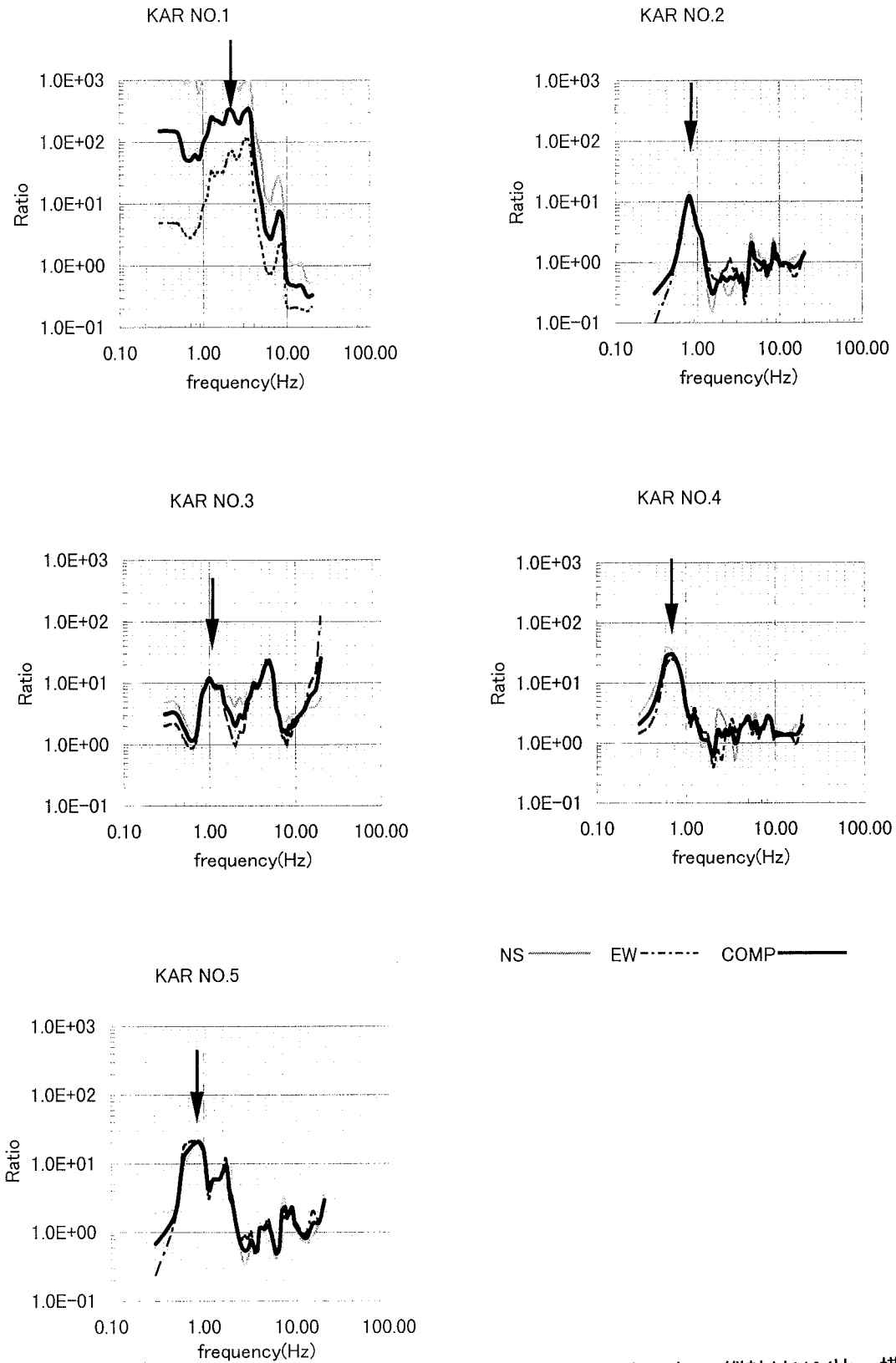


図8-2 賀露地域 (KAR) の水平成分と上下成分のスペクトル比 (H/V)、縦軸はH/V比、横軸は周波数を示す。矢印はピーク周波数を示す。

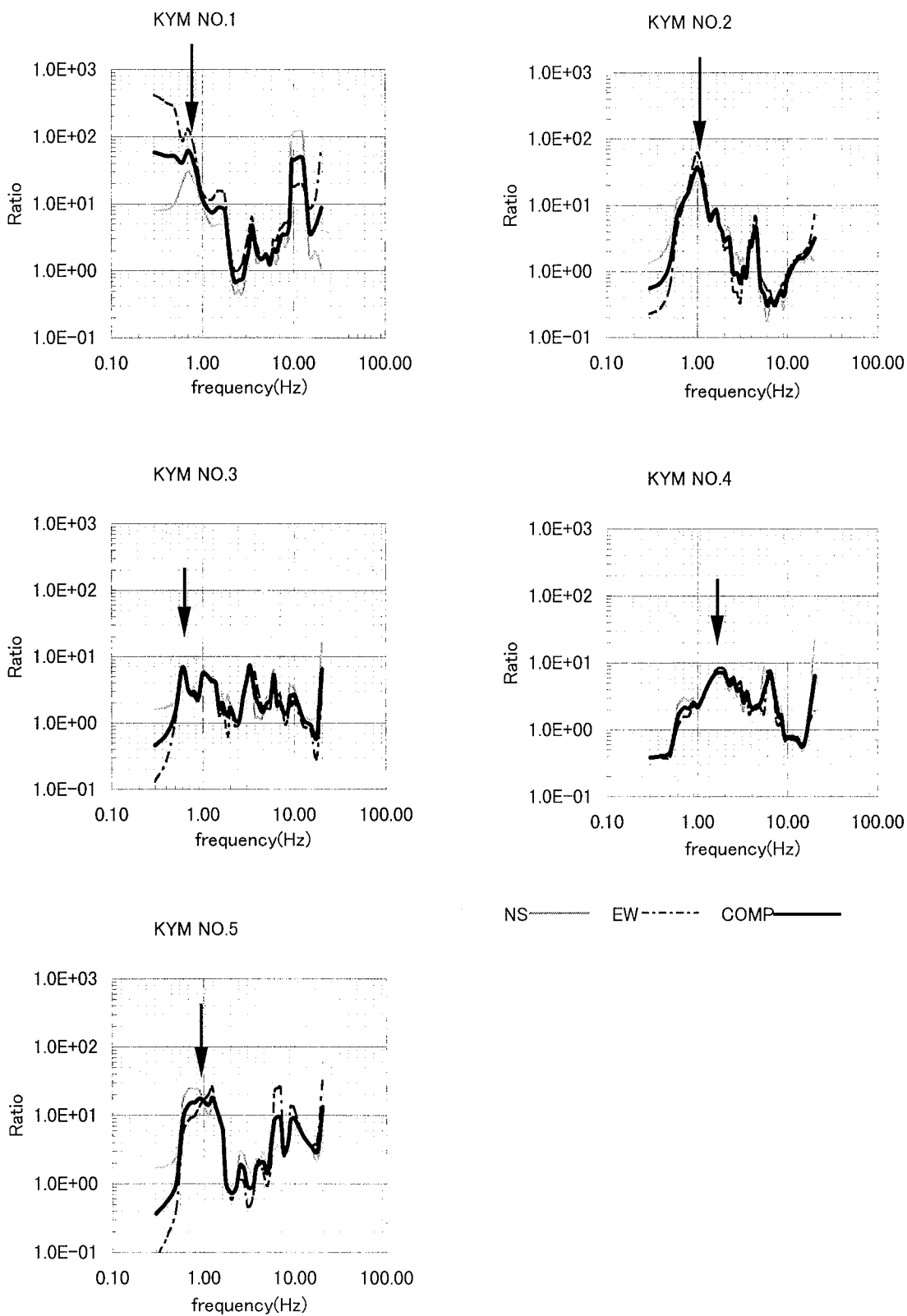


図8-3 湖山地域 (KYM) の水平成分と上下成分のスペクトル比 (H/V)、縦軸はH/V比、横軸は周波数を示す。矢印は卓越ピーク周波数を示す。

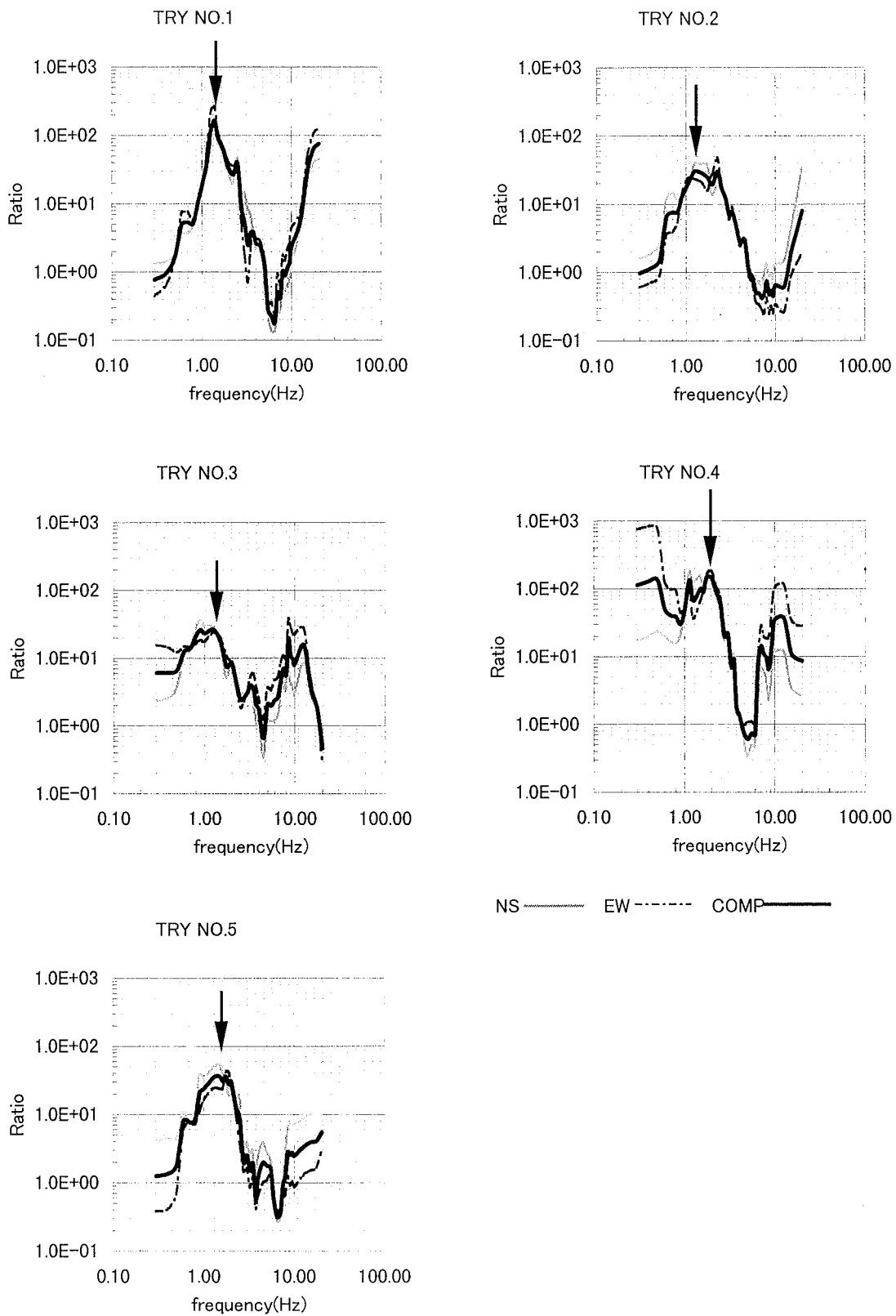


図8-4 足山地域 (TRY) の水平成分と上下成分のスペクトル比 (H/V)、縦軸はH/V比、横軸は周波数を示す。矢印はピーク周波数を示す。

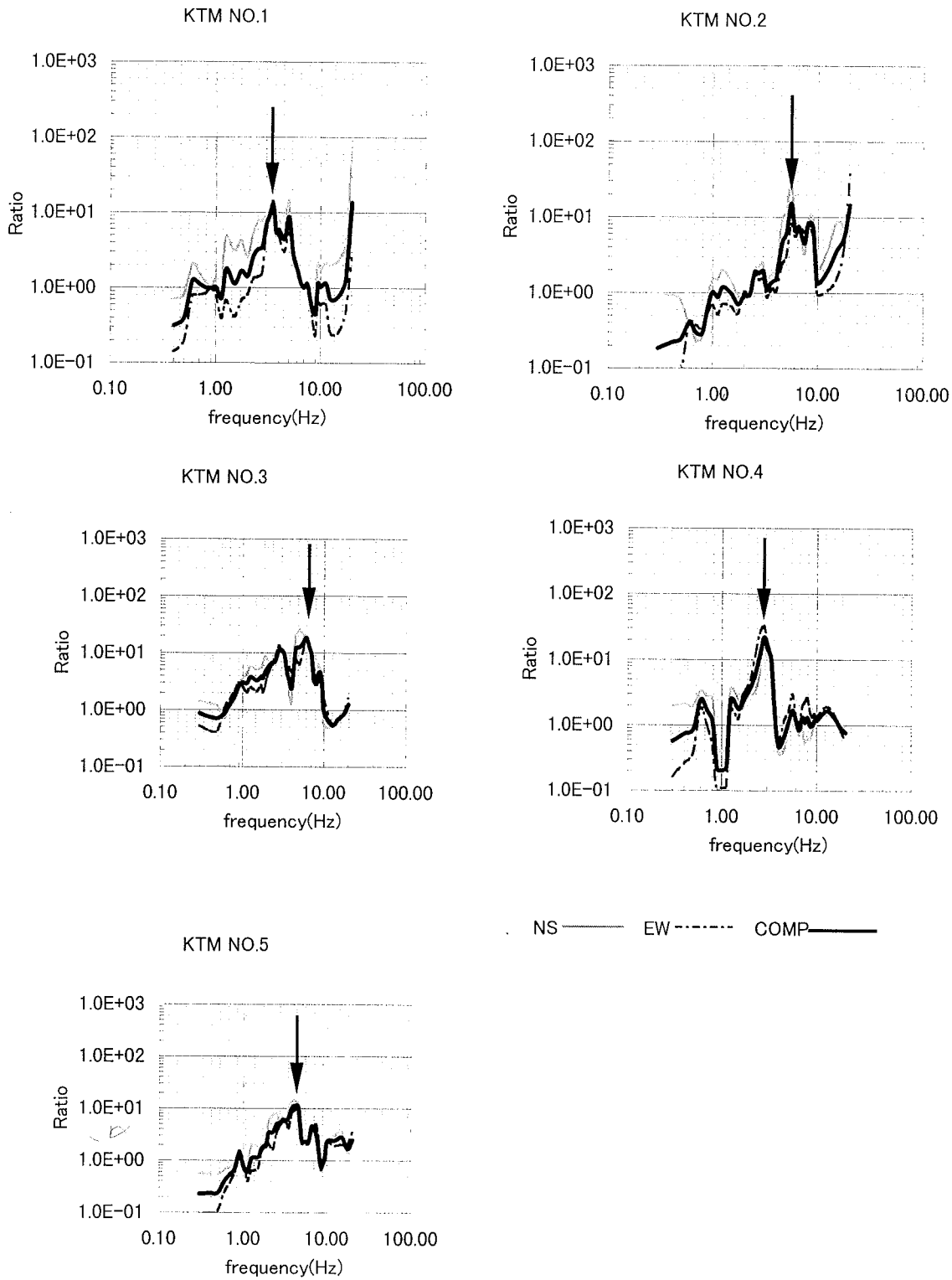


図8-5 桂見地域 (KTM) の水平成分と上下成分のスペクトル比 (H/V)、縦軸はH/V比、横軸は周波数を示す。矢印はピーク周波数を示す。

ペクトル比 (H/V) の特性について論じる。海岸から山地へ5地域に分割してそれぞれの地域における H/V の形状特性を見てみる。

鳥取平野の地形分類図により、5地域の地形について港(MNT)地域は砂州・浜を埋め立てた地域で海岸砂丘が発達した所である。賀露(KAR)地域は砂州・砂丘で古砂丘の上に新砂丘が厚く堆積している。湖山(KYM)地域は砂丘・砂礫台地で砂丘の発達が終わってから時間が経過して、古砂丘が地表面に露出している。宅地化が進み、元の地形が変化している可能性が大きい。足山(TRY)地域は湖山池が取り残されて、その周辺でゆっくりと堆積層が形成されていったと考えられ、砂層でなく土から粘土の性質を持っている三角州である。桂見(KTM)地域は鳥取平野の基盤岩からなる山地と分類される。5つの地域は地表面・地形・地質からは上述のように分類されるが、地下構造については表層のデータはあるが基盤までの情報が少ない。

各観測域の地盤について、地表から深さ 50m までの地盤構造はボーリングデータなどを総合して鳥取県の地盤図が作成された[10]。地表面付近の断面に、各地域の代表的なスペクトル比 (H/V) を図9に示した。各観測地域の表層(地表から基盤岩までの地層)地盤の概略は、次のようになる。

この地盤図から、港(MNT)付近は、 U_s (上部砂質土層)と L_s (下部砂質土層)で構成されているが、基盤までの深さは特定すること出来ない。賀露(KAR)付近も、港(MNT)付近同様、 U_s (上部砂質土層)と L_s (下部砂質土層)で構成されている。湖山(KYM)付近は、 U_s (上部砂質土層)・ U_c (上部粘性土層)と L_s (下部砂質土層)の互層の地域と、 U_s (上部砂質土層)と L (ローム層)をはさみ、 L_s (下部砂質土層)の沖積層の薄い地域など、複雑な地盤となっている。足山(TRY)付近は、 U_{mc} (最上部粘性土層)・ U_s (上部砂質土層)と L_g (下部礫質土層)・ L_c (下部粘性土層)で構成されている平野内部での堆積層の形状を示す。桂見(KTM)付近は、風化はしているが、B(基盤岩類)である。

各観測地域の地形及び地盤とスペクトル比 (H/V) の形状を考察する。港地域(MNT)においては、相関が悪いように思えるが、周波数 1Hz 付近に鋭く明瞭なピークが認められる。賀露地域(KAR)においては、KAR-1、KAR-3を除いて、港地域(MNT)ほどではないが、周波数 1Hz 付近に鋭く明瞭なピークが認められる。湖山地域

(KYM)においては、全体的に相関が悪いが、NO.2、NO.4には周波数 1Hz 付近に明瞭なピークが認められる。足山地域(TRY)においては、全体的に相関が良く、周波数 1~2Hz 付近に明瞭なピークが認められる。ただし、港地域(MNT)や賀露地域(KAR)のようなピークとは異なり、広範囲にわたるピークとなっている。桂見地域(KTM)においては、全体的にピークは、3~6 Hz 付近まで、なだらかにずれ込んでいる。観測点ごとの代表的な H/V を図9に示した。

これらの結果から、H/V の形状と地形・地盤の比較を次のようにまとめた。

○砂州・砂丘である港(MNT)及び賀露(KAR)では、表層は砂地盤で、H/V の形状において、周波数 1Hz 付近に鋭く明瞭なピークが認められる。

○砂丘・砂礫台地である湖山(KYM)では、表層は複雑な地盤で、各観測点における H/V の形状に相関性はないが、2点について、周波数 1Hz 付近に明瞭なピークが認められる。

○三角州である足山(TRY)では、表層は粘性土地盤で、H/V の形状は、周波数 1Hz 付近に広範囲の明瞭なピークが認められる。

○山地である桂見(KTM)では、基盤岩類が露出しており、H/V の形状においてピークが 3~5Hz 付近まで、なだらかにずれ込んでいる。

大町 他⁶⁾の水平2層地盤モデルからは、表層と基盤のコントラストの大きいときはピークが明瞭に現れ、逆に小さい時はピークがなだらかになるという結果が得られた。今回の解析結果では、コントラストの大きいと思われる砂州・砂丘、三角州は、ピークが明瞭に現れ、逆に小さいと思われる山地ではピークがなだらかになっている。よって、水平2層地盤モデルから得られる H/V と良く一致することがわかる。

次は、観測域全体における H/V の特性について、地形及び表層厚の2つの観点から、地下構造との関係を見る。

まず第一点目の地形と H/V の特性について、ピーク値-ピーク周波数分布(図10)及び、ピーク周波数マップ(図11)より考察する。周波数 1 Hz を境に、低周波数(長周期)側に港(MNT)・賀露(KAR)・湖山(KYM)の点、高周波数(短周期)側に足山(TRY)の点、周波数 3Hz より高周波数(短周期)側に桂見(KTM)の点が集まっていることが

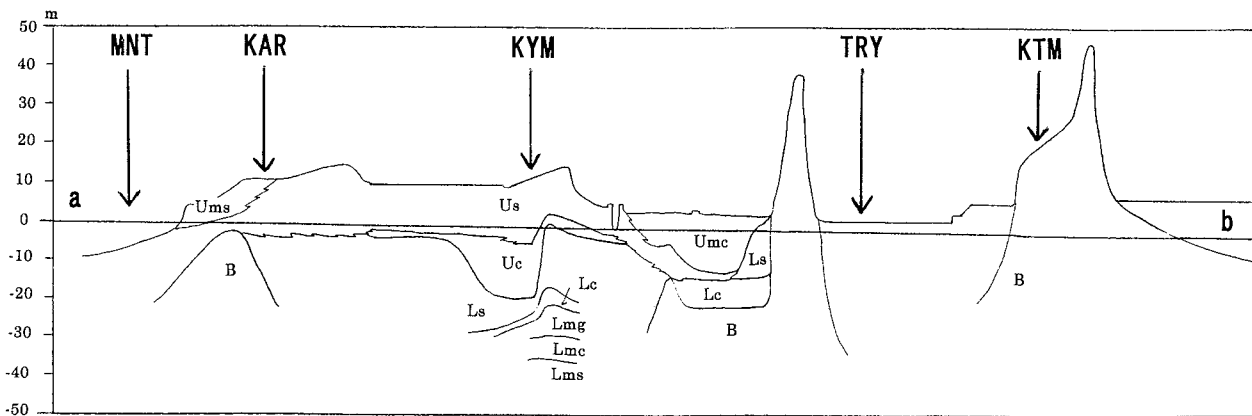
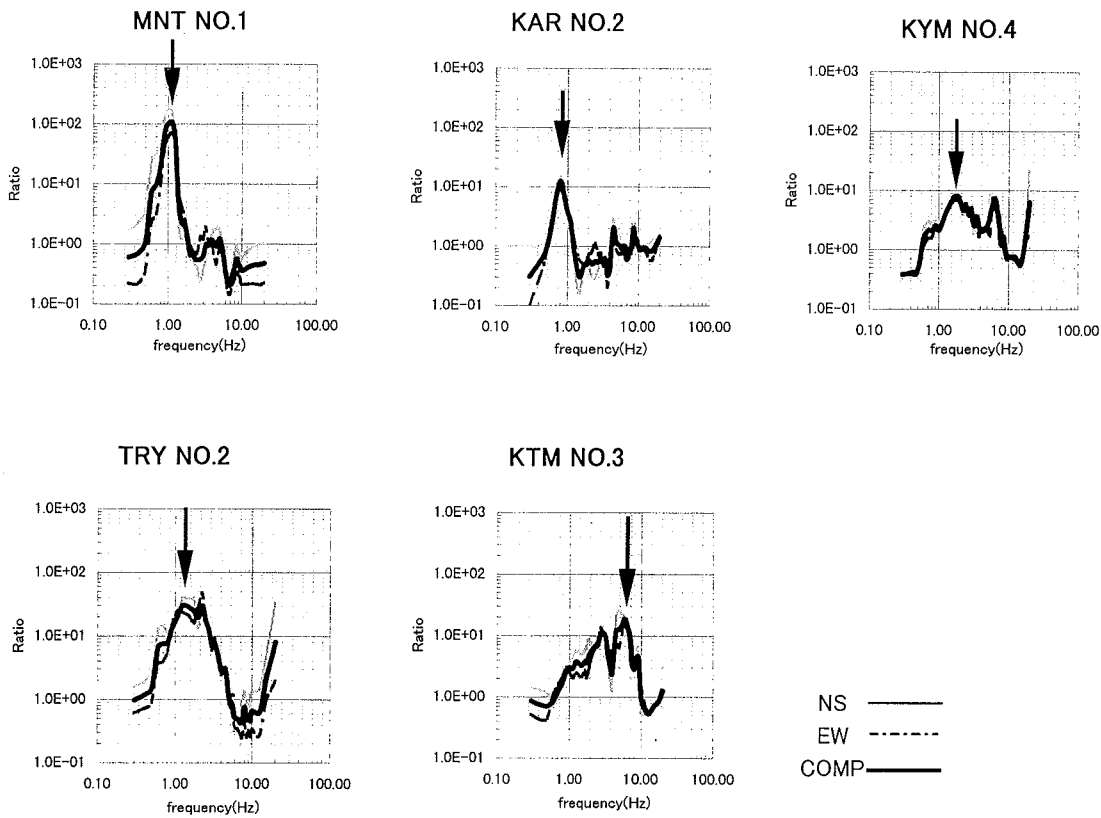


図9 各地域のH/V比—周波数図と地表面付近の地下構造、記号はそれぞれの地域を示す。断面図の走向は図12に示されている。

わかる。また、これらの点の集合は、前述した地形分類から、砂州・砂丘(港(MNT)・賀露(KAR)・湖山(KYM))のグループ、三角州(足山(TRY))のグループ、山地(桂見(KTM))のグループに分けることができる。ここで、ピーク周波数を1Hz以下、1Hz~2Hz、2Hz以上の3パターンにわけたピーク周波数マップを、図11に示した。周波数1Hz以下の点は、砂州・砂丘の港(MNT)・賀露(KAR)・湖山(KYM)に分布しており、周波数1Hz~2Hzの点は、足山(TRY)の三角州に集中している。2Hz以上の点については、全て桂見(KTM)の山地に分布している。

このように、地形の観点から観測域全体を見たH/Vの特性は、砂州・砂丘、三角州、山地の3つに大きく区分される。よって、このH/Vの特性が地下構造を反映して、地表面の地質の種別により、砂州・砂丘、三角州、山地に区分できる[12]。

次に、H/Vのピーク周波数(周期)と表層厚の関係で考察する。微動が実体波であれ表面波であれ、表層と下層のコントラストが大きい場合は、微動の卓越(ピーク)周期T、表層速度(S波速度)V、表層厚との間には、1/4波長則といわれる次の関係が成り立つ。

$$TV = 4H / (2n + 1)$$

(n; モード数=0, 1, 2, ...)

また、厳密には上式が成立しなくても、

$$TV = JH$$

という関係があり、J、Vが測定点ごとにHに比べて大きく変化しないとすれば、微動の卓越(ピーク)周期から表層厚の相対的な変化をおおむね推定できるとしている[11]。つまり、これらの式から、測定点における微動の卓越(ピーク)周期が長いほど、その点における表層厚が厚いと推定できる。ここで、各観測点をa-b線に垂直に投射し、その距離を横軸に、ピーク周波数を縦軸にして、ピーク周波数の分布を図12に示した。海側でピーク周波数(周期)が低く(長く)、山地に近づくにつれてピーク周波数(周期)が高くなる(短くなる)ことがわかる。よって、上述した1/4波長則が成り立つとすると、表層厚は海側で厚く、山地に近づくにつれて薄くなることと推定できる。

6. 結論

鳥取平野西部の海岸部から山地にかけて、常時微動のスペクトル比(H/V)を解析し、そのH/Vの特性と地下構造の関係を比較、検討してきた。その結果、次のことが解明された。

- ①各観測地域のH/Vのスペクトル形状が、次のように地形および地盤構造によって、違

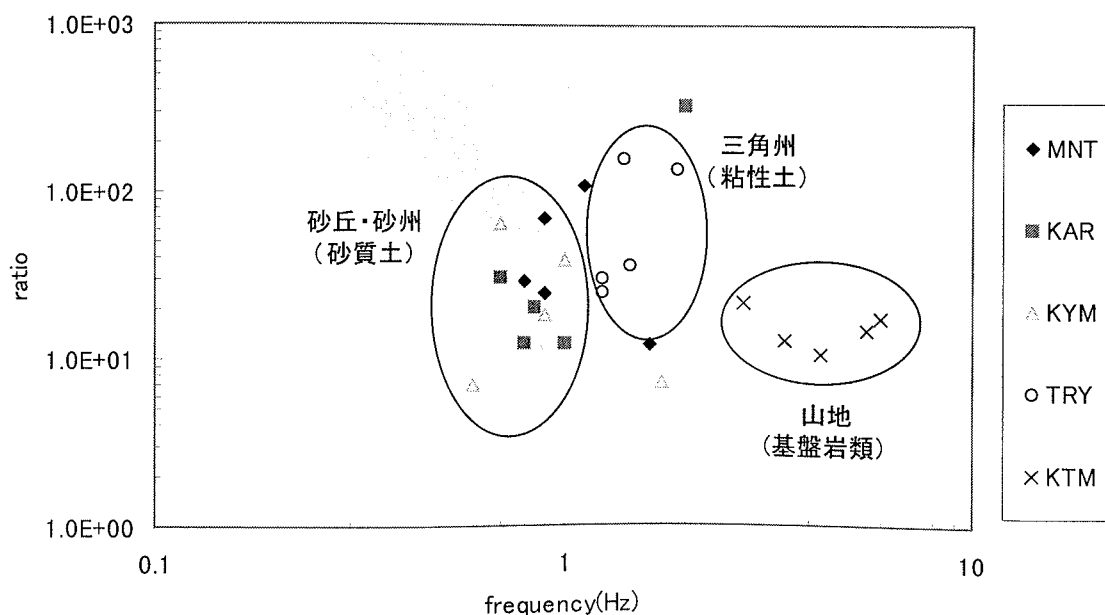


図10 H/V比のピーク周波数(横軸)とその時のH/V比の値(縦軸)、記号はそれぞれの地域を示す。砂丘・砂州、三角州と山地に分割できる。

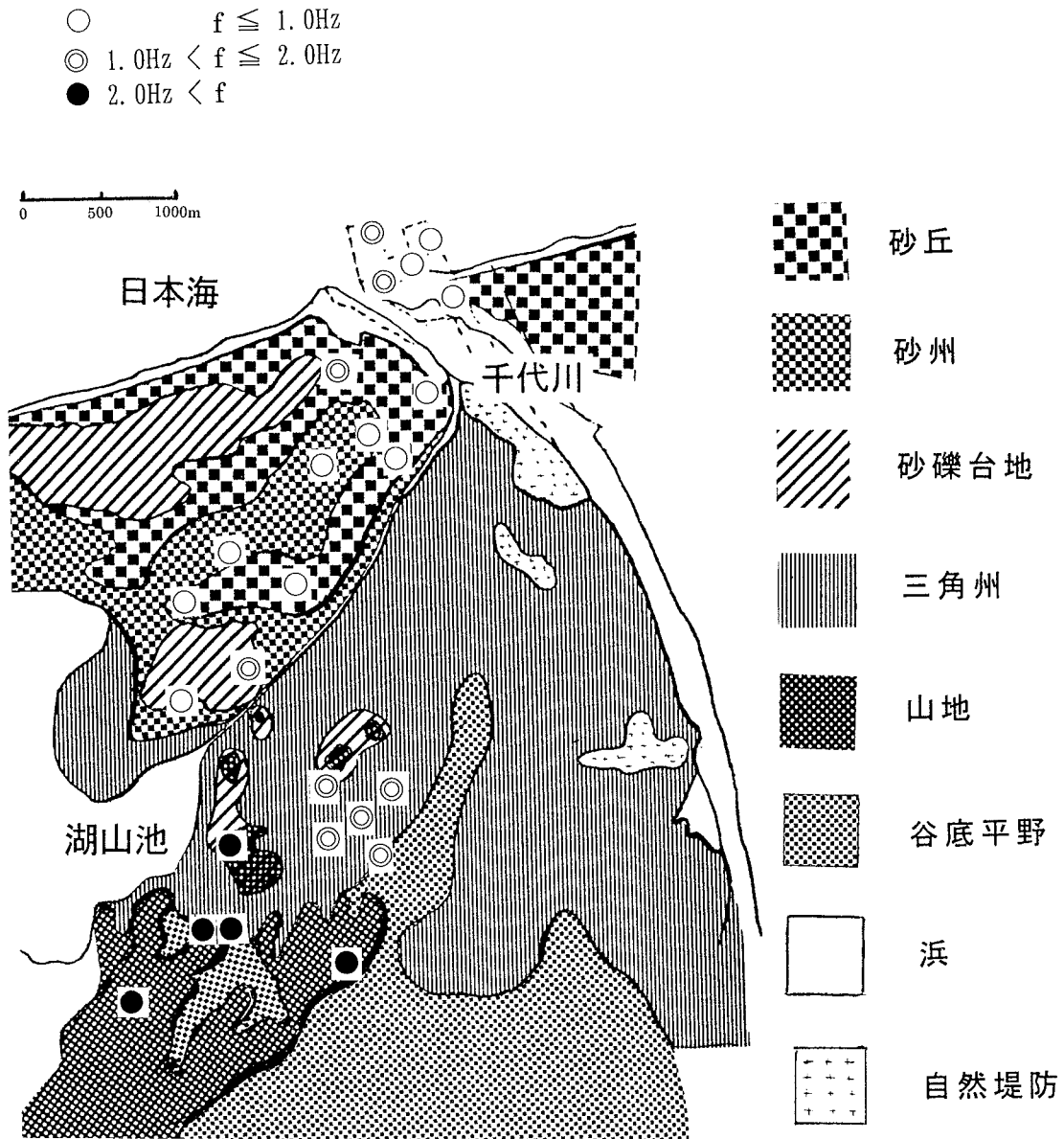


図11 地形分類図とHV比のピーク周波数、1Hz以下、1～2Hz、2Hz以上で分類される。

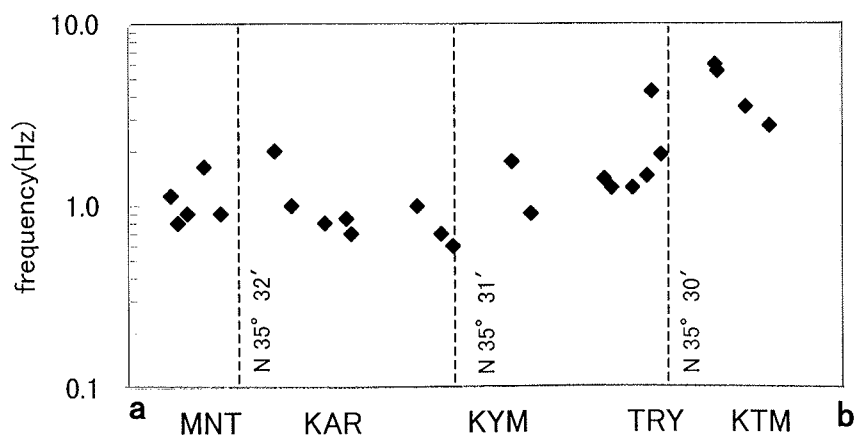
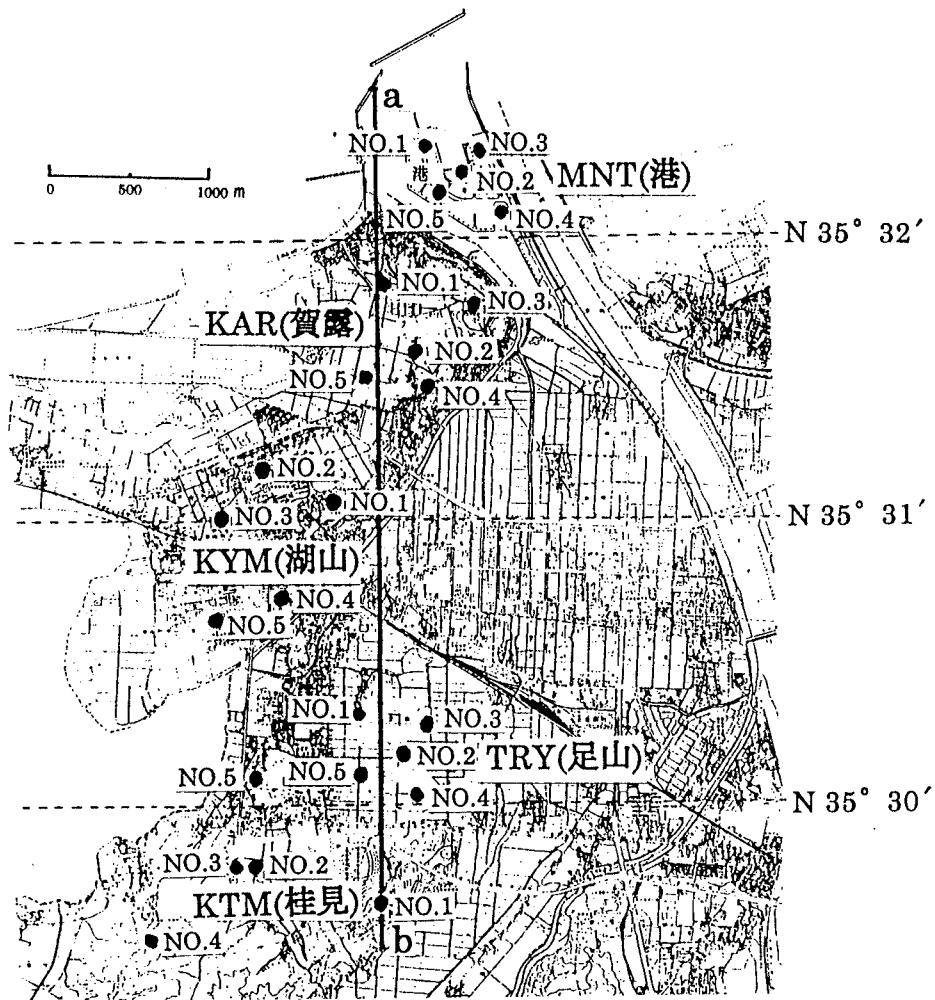


図12 H/V比のピーク周波数分布—南北方向—、上図：平面図、下図：分布図

った特性を示した。

- 表層が砂地盤である砂州・砂丘の港 (MNT)・賀露(KAR)では、周波数 1Hz 付近に鋭く明瞭なピークが認められる。
- 表層が複雑な地盤である砂丘・砂礫台地の湖山(KYM)では、相関は悪いが、場所によって周波数 1Hz 付近に明瞭なピークが認められる。
- 表層が粘性土地盤である三角州の足山 (TRY)では、周波数 1Hz 付近に広範囲の明瞭なピークが認めら、右下がりの形状をしている。
- 基盤岩が露出している山地の桂見(KTM)では、ピークが 3~5Hz 付近まで、なだらかに右上がりの形状が見られる。
この形状特性は、水平 2 層地盤モデルから得られる H/V の形状と良い一致が見られた。
- ②スペクトル比 (H/V) のピーク周波数から、今回観測した地域の地下構造を、砂州・砂丘 (1Hz 以上)、三角州 (1~2Hz)、山地 (2Hz 以上) に区分できた。
- ③H/V のピーク周波数から、表層厚は、海岸砂丘では厚く、山地に近づくと薄くなっていることが推定できた。

また、この H/V を利用して、アレー観測との併用で、より深い地下構造を推定する研究、地盤増幅特性の観点から、地震被害との関連性をみる研究がなされている。今後は、他の観測を同時に実施し、地盤構造との関係を解明して行きたい。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、大阪土質試験所の宮越研理学博士には、有益な御助言をいただきました。心から感謝いたします。また、観測で使用した増幅器は、京都大学防災研究所地震予知センターの梅田康弘助教授から借用致しました。厚く御礼申し上げます。微動の観測に協力していただきました地圏環境工学研究室の皆さんに感謝します。

参考文献

- [1] 物理探査学会；図解 物理探査、P25-34、1989
- [2] 趙伯明、堀家正則、竹内吉弘、川瀬博；微動と地震動から推定された地盤特性の比較、地震、第 50 巻、pp67-87、1997
- [3] 中村豊、上野真；地表面振動の上下成分と水平成分を利用した表層地盤特性推定の試み、第 7 回日本地震工学シンポジウム講演集、P265-270、1986
- [4] 国土庁土地局；地形分類図(鳥取北部、南部)、1975
- [5] 金井清；地震工学、P99-108、1969
- [6] 大町達夫、紺野克昭、遠藤達哉、年縄巧；常時微動の水平動と上下動のスペクトル比を用いる地盤周期推定方法の改良と適用、土木学会論文集、NO. 489、P251-260、1994
- [7] 塩野計司、太田裕、工藤一嘉；やや長周期の微動観測と地震工学への適用(6) - 微動に含まれる Rayleigh 波成分、地震 2. 32、P115-124、1978
- [8] 時松孝次、宮寺泰生；短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係、日本建築学会構造系論文報告集、第 439 号、P81-87、1992 時松孝次、宮寺泰生；短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係、日本建築学会構造系論文報告集、第 439 号、P81-87、1992
- [9] 岡田廣、松島建；長周期微動の観測による厚い地盤構造の推定について、第 7 回日本地震工学シンポジウム講演集、P211-216、1986
- [10] 鳥取地盤研究会；鳥取地盤図(東部)、1991
- [11] 堀家正則；微動の研究について、地震 2. 46、P343-350、1993
- [12] 香村一夫、楡井久；東京湾埋立地域で観測される微動と表層地質の関係、地質学雑誌、第 102 巻、第 8 号、pp715-729、1996

(受理 平成 9 年 8 月 26 日)