

国土技術政策総合研究所 研究報告

RESEARCH REPORT of National Institute for Land and Infrastructure Management

No.75

March 2024

港湾地域におけるサイト増幅特性のゾーニング手法に関する研究

菅原法城・竹信正寛・佐野新・野津厚
長坂陽介・福永勇介・小林怜夏

Study on Microzonation of Port and Harbor Area Based on the Site Amplification Factors

SUGAHARA Noriki, TAKENOBU Masahiro, SANO Arata, NOZU Atsushi
NAGASAKA Yosuke, FUKUNAGA Yusuke, KOBAYASHI Reina

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

港湾地域におけるサイト増幅特性のゾーニング手法に関する研究

菅原法城*, 竹信正寛**, 佐野新***, 野津厚****, 長坂陽介*****, 福永勇介*****,
小林怜夏*****

要 旨

港湾施設の耐震設計で用いられる入力地震動（レベル1地震動，レベル2地震動）は，サイト特性（増幅特性，位相特性）を考慮した時刻歴波形として設定する．サイト特性は，地震動の振幅，周期特性，継続時間に影響し，その影響は大きいことが知られているため，サイト特性を適切に評価した上で，入力地震動を設定することは重要である．港湾地域においては，野津・長尾（2005）等が実施したスペクトルインバージョンにより，強震観測点位置のサイト増幅特性が評価されている．そのサイト増幅特性が，設計対象地点にそのまま適用できない場合は，①臨時の地震観測に基づくサイト増幅特性の評価法，②常時微動観測に基づくサイト増幅特性の評価法，③港湾と周辺の強震観測点（K-NET，KiK-net）のサイト増幅特性の経験的關係を利用する評価法のいずれかで評価するが，評価されたサイト増幅特性が適用可能な空間的な範囲をこれまで示せていなかった．

本研究では，全国の港湾を対象に，港湾地域で得られた常時微動観測記録（常時微動H/Vスペクトル）や各観測点の座標値等を基にして，地図上にゾーンの境界線を引き，サイト増幅特性のゾーニングを行った（そのようにして作成したマップをゾーニングマップと呼ぶ）．本稿は，上記の検討内容・結果，そこから得られた知見について，新たにゾーニングを行う際や，新たな観測記録に基づき既往のゾーニングを更新する際に活用できるようにとりまとめるものである．

キーワード：サイト増幅特性，設計入力地震動，常時微動観測，常時微動H/Vスペクトル

* 港湾・沿岸海洋研究部 主任研究官
** 港湾・沿岸海洋研究部 港湾施設研究室長
*** 港湾・沿岸海洋研究部
**** 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域長
***** 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 地震動研究グループ 主任研究官
***** 前 国土技術政策総合研究所 港湾研究部 主任研究官
***** 港湾・沿岸海洋研究部 港湾施設研究室 研究官

Study on Microzonation of Port and Harbor Area Based on Site Amplification Factors

SUGAHARA Noriki*
TAKENOBU Masahiro**
SANO Arata***
NOZU Atsushi****
NAGASAKA Yosuke*****
FUKUNAGA Yusuke*****
KOBAYASHI Reina*****

Synopsis

Design earthquake ground motions (as time history wave) for the seismic design of port and harbor facilities are set considering site effects (site amplification and phase characteristics). Site effects have significant effects on the amplitude, frequency content, and duration of earthquake ground motions. Thus, it is important to evaluate the site effect appropriately for setting design earthquake ground motions. In the Japanese port and harbor area, Nozu and Nagao (2005) evaluated site amplification factors [SAF] of strong motion site (seismic station). If the SAF can't be used for the construction site (as the results of microtremor measurements at the construction site and a nearby strong motion station), the following three methods can be applied. The three methods are (1) Evaluation of site amplification factors based on earthquake observations, (2) Evaluation of site amplification factors based on microtremor measurements, and (3) Evaluation of site amplification factors without in-situ earthquake observations or microtremor measurements. However, the spatial range to which the SAF evaluated by these methods are applicable have not been previously identified.

In this study, we conducted microzonation of port and harbor area based on the SAF for ports all over Japan. In the microzonation, boundary lines of the zones were drawn on the map based on the microtremor measurements (microtremor H/V spectrum) and the coordinate (Latitude, Longitude) of each observation point. As a result, we developed microzonation maps for ports all over Japan and published them on the website of NILIM. This paper describes the detail, results and knowledge of our study for future microzonation or updating the existing microzonation based on new observational records.

Key Words: Site Amplification Factor, Design Ground Motion, Microtremor, H/V Spectrum

* Senior Researcher, Port and Coastal and Marine Department, NILIM
** Head, Port Facilities Division, Port and Coastal and Marine Department, NILIM
*** Researcher, Port and Coastal and Marine Department, NILIM
**** Director, Earthquake Disaster Prevention Engineering Department, PARI
***** Senior Researcher, Engineering Seismology Group, Earthquake Disaster Prevention Engineering Department, PARI
***** Former Senior Researcher, Port and Harbor Department, NILIM
***** Researcher, Port Facilities Division, Port and Coastal and Marine Department, NILIM

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5019 Fax : +81-46-842-9265 e-mail : ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

目 次

1. はじめに	1
1.1 本研究の目的・内容	1
1.2 本稿の構成	1
2. サイト増幅特性と港湾におけるその評価法	2
2.1 サイト特性	2
2.2 港湾におけるサイト増幅特性の評価法	3
3. サイト増幅特性のゾーニング方法	7
3.1 サイト増幅特性のゾーニングの手順	7
3.2 サイト増幅特性のゾーニングのための常時微動観測の実施方法とデータの処理方法	9
3.3 常時微動H/Vスペクトルを用いたサイト増幅特性のゾーニング方法	10
3.4 ゾーニングマップの作成方法	11
3.5 ゾーニングを行う際の留意点	11
4. ゾーニングの結果	14
4.1 ゾーニングの事例紹介	14
4.2 重要港湾以上の港湾におけるゾーニングの結果	19
4.3 地方港湾（56条港湾を含む）におけるゾーニングの結果	22
5. まとめ	22
謝辞	23
参考文献	23
付録A 八戸港の常時微動観測点と常時微動H/Vスペクトル	25
付録B 高松港の常時微動観測点と常時微動H/Vスペクトル	32
付録C 重要港湾以上の港湾でサイト増幅特性のゾーニングマップを作成した港湾の一覧	43
付録D 地方港湾（56条港湾を含む）でサイト増幅特性のゾーニングマップを作成したゾーンの一覧	44

1. はじめに

1.1 本研究の目的・内容

港湾施設の耐震設計で用いられる設計入力地震動（レベル1地震動，レベル2地震動）は，サイト特性（増幅特性，位相特性）を考慮した時刻歴波形として設定する¹⁾。地震動に影響を及ぼす要因として重要なのは，震源断層の破壊過程の影響（震源特性），震源から地震基盤に至る伝播経路の影響（伝播経路特性），地震基盤上に存在する堆積層の影響（サイト特性）の三者である。その中でもサイト特性の影響は非常に大きいことが知られており，新たに設計入力地震動の設定を行う際には，まず，対象施設設置地点[対象地点]におけるサイト特性を適切に評価し，そのサイト増幅特性を用いて地震動を設定することが重要である。サイト特性は，周波数領域で考えた際に，周波数毎の振幅を表すサイト増幅特性と位相角を表す位相特性に分けられるが，それらは時間領域において，地震動の振幅，周期特性，継続時間に影響する。

港湾地域においては，港湾地域強震観測²⁾が実施されており，長期間にわたる地震動の観測記録が得られている観測点においては，野津・長尾（2005）³⁾等が実施したスペクトルインバージョンにより，サイト増幅特性が評価されている。強震観測点以外の地点のサイト増幅特性については，常時微動観測を用いて，近隣の強震観測点のサイト増幅特性をそのまま対象地点に適用できないかを判断することができる。適用できない場合は，①臨時の地震観測に基づくサイト増幅特性の評価法，②常時微動観測に基づくサイト増幅特性の評価法，③港湾と周辺の強震観測点（K-NET，KiK-net）⁴⁾⁵⁾のサイト増幅特性の経験的関係を利用する評価法のいずれかで，近隣の強震観測点のサイト増幅特性を基に，対象地点のサイト増幅特性を評価できる。一方でこれまでは，これらの方法で評価したサイト増幅特性が適用可能な空間的な範囲を示せていなかった。

本検討では，これまでに港湾地域で得られた常時微動観測記録（それを基に計算された常時微動H/Vスペクトル），各常時微動観測点の座標値（緯度，経度）等の情報を地方整備局等から収集し，それを基にサイト増幅特性のゾーニングを行った。サイト増幅特性のゾーニングでは，各常時微動観測点の座標値やそれらの観測点で得られた常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数等の情報を基にして，工学的な判断（主に3.3，3.5で述べる内容）に基づき，地図上で，サイト増幅特性が大きく変化すると考えられる地点に境界線を引くことで，サイト増幅特性が類似するゾーンを設定した。そのように作成したマップを，ゾーニングマップと本稿では呼ぶ。最後に，ゾーン毎に評価したサイト増幅特性を用いたレベル1地震動について，速度PSI値⁶⁾を計算し，一つの港湾内で複数のゾーンが存在する港湾を対象にして，“最大の速度PSI値－最小の速度PSI値”等の量を計算し，1つの港湾程度の空間的範囲の中でのサイト増幅特性の違いが，岸壁の変形量と相関のある⁶⁾速度PSI値にどの程度影響するかについて，全国的な実態を確認した。

本報告では，上記の一連の検討内容・結果，そこから得られた知見について，新たにゾーニングを行う際や，既往のゾーニングを新たな観測記録に基づき更新する際に活用できるようにとりまとめるものである。

なお，本検討で作成したサイト増幅特性のゾーニングマップは，設計入力地震動（レベル1地震動，レベル2地震動）の設定の際に使用できるだけでなく，港湾計画を考える際にも利用できる¹⁾。

1.2 本稿の構成

本稿の構成を説明する。2.では，サイト特性と，過去の地震被害からも明らかになったその重要性について説明する（2.1）とともに，港湾において用いられている，サイト増幅特性の4つの評価法について紹介し，それらの評価法毎に，サイト増幅特性のゾーニングと関係する点についても述べる（2.2）。3.では，まず，常時微動観測によるサイト増幅特性のゾーニングの手順（3.1）と常時微動H/Vスペクトルを算出するためのデータの処理方法（3.2）について基本的な内容を説明した上で，常時微動H/Vスペクトルを用いたサイト増幅特性のゾーニング方法（3.3），ゾーニングマップ作成の方法（3.4）について述べる。更に，これまで著者らが多くの港湾でサイト増幅特性のゾーニングを行ってきた経験に基づき，今後新規でゾーニングを行う際や，新たな観測記録に基づきゾーニングの更新を行う際の留意点について述べる（3.5）。4.では，3.で述べたサ

イト増幅特性のゾーニング手法に基づいた実際のゾーニング事例を2例（八戸港の事例，高松港の事例）紹介する（4.1）．また，国際戦略港湾，国際拠点港湾，重要港湾（以降，これらをまとめて「重要港湾以上の港湾」と表記する）における，本稿執筆時点（2024年1月時点）でのゾーニングマップ作成の進捗について示すとともに，設定したサイト増幅特性のゾーン毎に設定したレベル1地震動の速度PSI値について，全国のヒストグラムを示すとともに，同一港湾内における“速度PSI値の最大値-最小値”等の量について計算した結果のヒストグラムを示す（4.2）．また，地方港湾と56条港湾（以降，これらをまとめて「地方港湾（56条港湾を含む）」と表記する）についても，ゾーニングマップ作成の進捗について示す（4.3）．

2. サイト増幅特性と港湾におけるその評価法

2.1 サイト特性

地震動におけるサイト特性（増幅特性，位相特性）の影響は非常に大きいことが知られており，サイト特性を適切に評価して設計入力地震動を設定することは構造物設計において重要である．サイト特性としては，工学的基盤面より上方の表層地盤の影響のみならず，工学的基盤面より下方の深層地盤の影響も重要であることが認識されている⁷⁾．そのため，工学的基盤位置で与えることとされている港湾施設の耐震設計に用いる設計入力地震動は，深層地盤のサイト増幅特性（地震基盤面～工学的基盤面）を考慮して設定される．なお，工学的基盤面より上方の表層地盤のサイト特性については，個々の設計で実施されるFLIP⁸⁾⁻¹⁰⁾等を用いた地震応答解析において考慮される．表層地盤と深層地盤の位置関係，及び1.で述べた震源特性・伝播経路特性・サイト特性の関係を図-2.1に示す．

港湾地域においても，堆積層が地震の揺れに大きな影響を与えた事例は多い．例えば，多くの港湾施設に被害をもたらした1995年兵庫県南部地震の際には，周期1～2[s]のパルス状の地震動が，神戸市直下の堆積層の影響で増幅されたことが，震災の帯の成因であるとされている¹¹⁾．また，2000年鳥取県西部地震の際には，弓ヶ浜半島の地下にある堆積層が地震動を増幅させたため，弓ヶ浜半島の堆積層上に位置している港湾の観測点（境港-G）²⁾と気象庁観測点¹²⁾では，島根半島の山麓に位置している防災科学技術研究所の観測点（SMN001とSMNH10）^{4),5)}に比べ，最大速度が4倍も大きい記録が得られた¹⁾．これらの観測点の位置関係を図-2.2に，各観測点で観測された地震記録（速度波形）を図-2.3に示す．このように，堆積層の存在が地震動に及ぼす影響は非常に大きいため，設計入力地震動の設定等を行う場合は，このようなサイト特性を適切に考慮することが重要である．このような過去の経験から，港湾における設計入力地震動は，サイト特性を適切に考慮して設定することとされている¹⁾．港湾におけるサイト増幅特性の評価方法については，2.2で述べる．

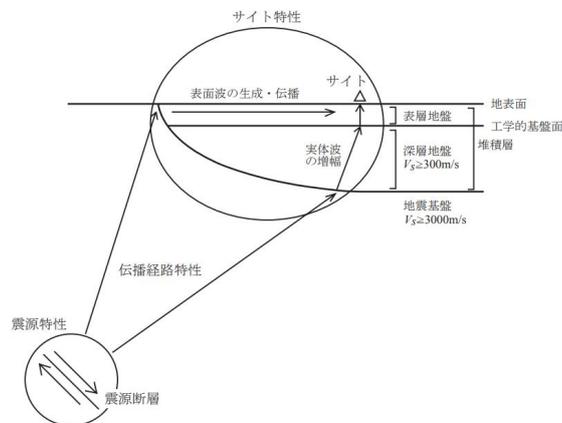


図-2.1 地震基盤，工学的基盤，表層地盤の位置関係と震源特性，伝播経路特性，サイト特性との関係¹⁾



図-2.2 境港周辺の強震観測点の位置関係（写真は第八管区海上保安本部提供）¹⁾

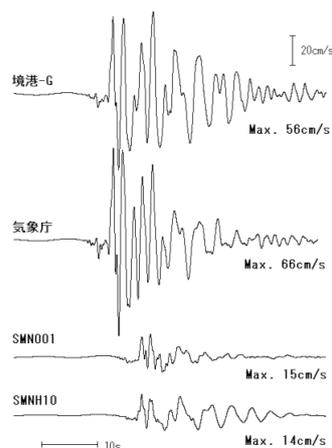


図-2.3 2000年鳥取県西部地震の際に境港周辺で観測された速度波形（断層直交成分）¹⁾

サイト位相特性については、サイト増幅特性のゾーニング方法を示す目的の本報告では、詳細の説明は省くが、対象地点の地表面において観測された地震観測記録を位相波として用いて設定することが望ましいとされている¹⁾。その際には、対象地点における中小地震観測記録から、群遅延時間が平均的となるようなデータを選択し、選定した地震波を地震観測点での土質データにより工学的基盤の2E波に変換し、その位相特性を用いる（具体的な計算方法については、錦織らの資料（2019）¹³⁾が詳しい）。なお、対象施設設置地点のサイト増幅特性を常時微動観測結果に基づいて評価する場合は、もとのレベル1地震動の位相特性をそのまま用いても良いとされている¹⁾。港湾と周辺の強震観測点（K-NET, KiK-net）のサイト増幅特性の経験的關係を利用する評価法でサイト増幅特性を評価する場合もそのように設定する。

なお、本検討で設定したサイト増幅特性が類似するゾーンは、サイト増幅特性の違いに基づき設定したものであるが、レベル1地震動を設定する際に用いたサイト位相特性が個々のゾーン毎に存在している場合が多いため、ゾーン毎にサイト増幅特性と位相特性が設定されている場合が多い。

2.2 港湾におけるサイト増幅特性の評価法

(1) スペクトルインバージョンによる強震観測点のサイト増幅特性の評価法

スペクトルインバージョン（岩田・入倉（1986）¹⁴⁾）は、複数の地点で得られた強震記録のフーリエ振幅スペクトルに対して一種の回帰分析を適用することで、震源特性、伝播経路特性、サイト増幅特性を分離して評価できる手法である。港湾地域においては、野津・長尾（2005）³⁾が、港湾地域強震観測²⁾、K-NET, KiK-net^{4),5)}等の強震観測記録を対象にスペクトルインバージョンを適用し、各強震観測地点のサイト増幅特性を評価している。スペクトルインバージョンで評価されたサイト増幅特性は、その適用範囲が常時微動観測によって確認されない限り、その強震観測点（港湾地域強震観測, K-NET, KiK-

net等)のみに点的に適用可能である。そのため、後述のゾーニングマップ作成では、スペクトルインバージョンで評価されたサイト増幅特性の場合には、その対象となった強震観測地点のみを小さな円で囲ってゾーニングした。

ここで参考に、野津・長尾(2005)³⁾がスペクトルインバージョンの対象とした強震観測地点(K-NET, KiK-net⁴⁾等も含む)を図-2.4に示すが、これらの強震計の設置間隔は概ね20~30[km]程度であり、スペクトルインバージョンに基づきサイト増

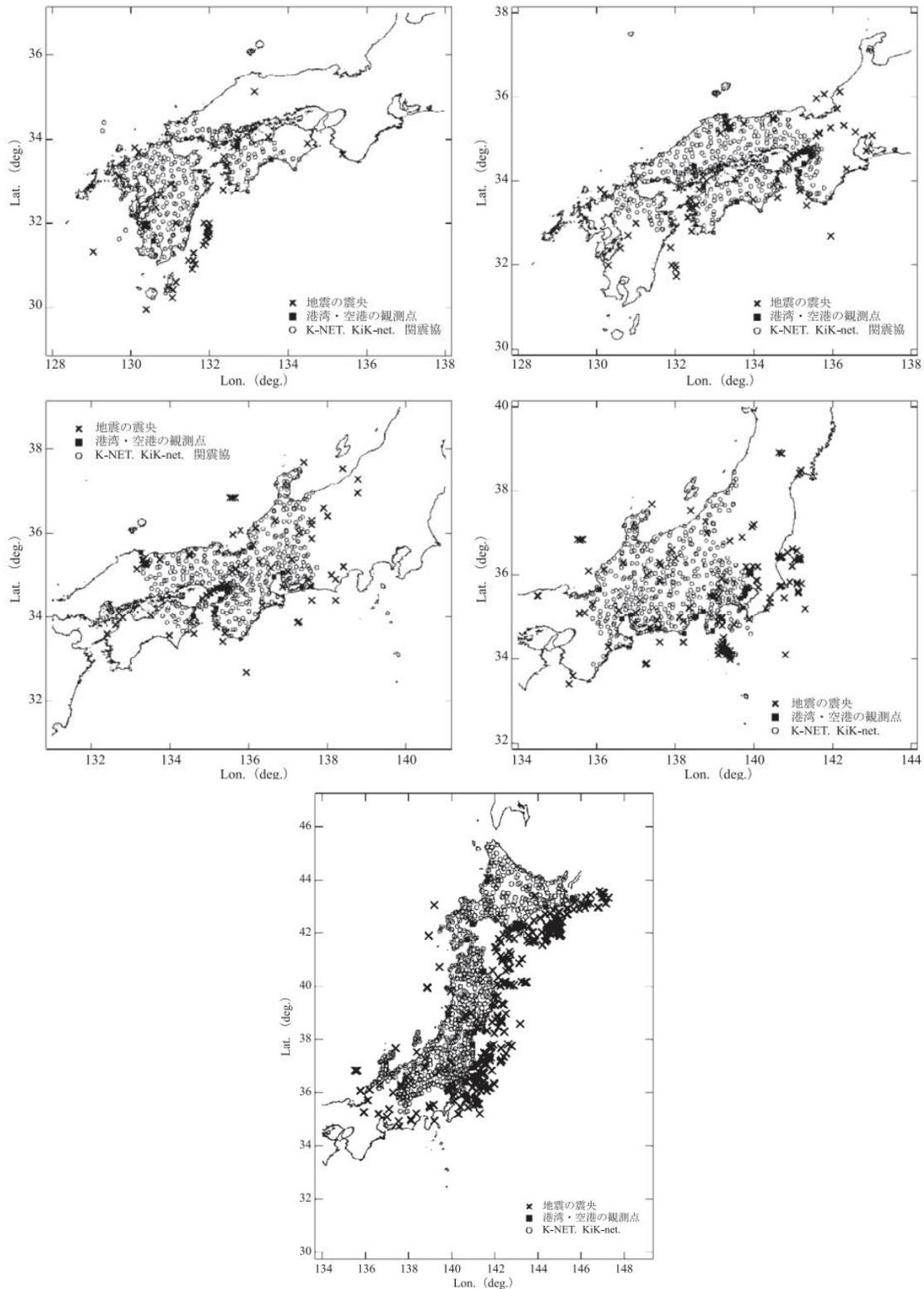


図-2.4 野津・長尾(2005)³⁾が解析の対象とした強震観測地点¹⁾

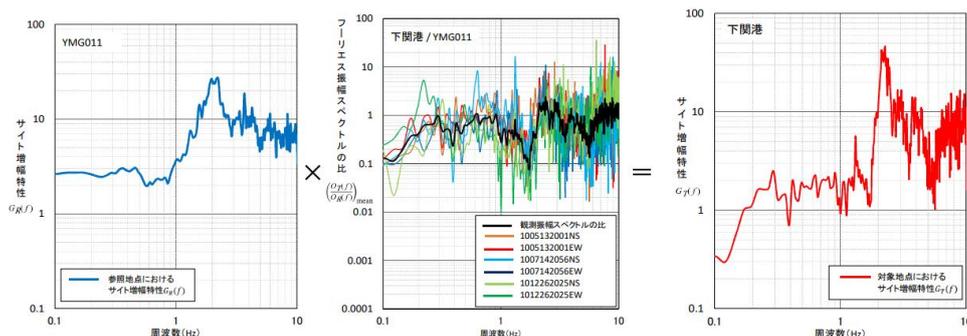


図-2.5 臨時の地震観測に基づくサイト増幅特性の評価法のイメージ図¹³⁾

幅特性が評価されている地点はこれらの地点等に限られている。

(2) 臨時の地震観測に基づくサイト増幅特性の評価法

スペクトルインバージョンでサイト増幅特性が精度良く評価されている地点は、(1)で示した強震観測点等に限られている。常時微動観測を用いて、スペクトルインバージョンで評価された近隣の強震観測点のサイト増幅特性をそのまま対象地点に適用できないか判断する方法¹⁾もあるが、適用できない場合には、新たな観測記録（臨時の地震観測記録、常時微動観測記録）と近隣の強震観測点のサイト増幅特性を基にして、対象地点のサイト増幅特性を推定することができる。その方法として最も信頼性が高い手法が、本節で述べる臨時の地震観測に基づくサイト増幅特性の評価法である。

臨時の地震観測に基づくサイト増幅特性の評価法を用いるためには、対象地点の近傍に臨時の地震観測点[臨時観測点]を設けて、概ね1年程度の地震観測を実施し、サイト増幅特性の評価に必要な中小地震記録、もしくは遠方での大地震の記録を得ることが必要である（記録数は3個以上であることが望ましい）¹⁾。

その上で、臨時の地震観測に基づく評価法では、スペクトルインバージョンで精度高く評価されている付近の強震観測点[参照点]のサイト増幅特性を基にして、それに2地点間（臨時観測点と参照点）の同時観測記録のフーリエ振幅スペクトルの比の幾何平均を乗じることにより、対象地点のサイト増幅特性を評価する。この評価方法のイメージ図を図-2.5に示す。なお、この評価法における計算方法の詳細は文献13が詳しい。

臨時の地震観測に基づく評価法で評価されたサイト増幅特性は、その適用範囲が常時微動観測によって確認されない限り、その臨時観測点のみに点的に適用可能である。そのため、後述のサイト増幅特性のゾーニングマップ作成では、スペクトルインバージョンで評価されたサイト増幅特性の場合と同様に、臨時観測点のみを小さな円で囲ってゾーニングした。なお、臨時観測点を設置する際には、臨時観測点と対象地点で、地盤の震動特性が大きく異なることをあらかじめ常時微動観測で確認しておくことが望ましいとされている¹⁾ため、臨時の地震観測に基づくサイト増幅特性の評価がなされている場合には、それを確認するための常時微動観測が過去に実施されている可能性がある。ゾーニングの検討では、その際の常時微動観測記録を基に、臨時観測点や対象地点の周辺をゾーニングできる可能性がある。

(3) 常時微動観測に基づくサイト増幅特性の評価法

スペクトルインバージョンで評価された近隣の強震観測点のサイト増幅特性をそのまま対象地点に適用できない場合において、更に、工期が差し迫っているなどの理由で（概ね1年程度要する）臨時の地震観測が実施できない場合には、常時微動観測に基づくサイト増幅特性の評価法で、周辺の強震観測地点におけるサイト増幅特性を基にして、対象地点でのサイト

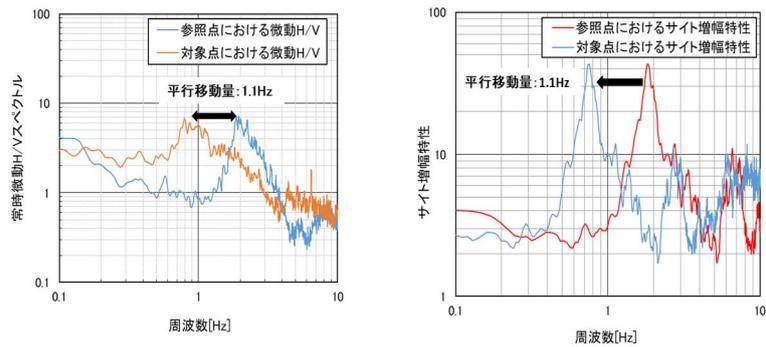


図-2.6 常時微動観測に基づくサイト増幅特性の評価法のイメージ図

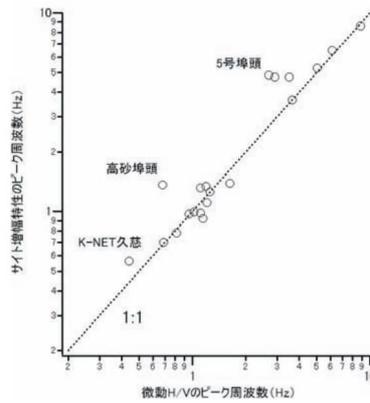


図-2.7 サイト増幅特性（地震基盤面から地表面）のピーク周波数と常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数の対応関係（東日本大震災）¹⁷⁾

増幅特性を評価できる。

常時微動観測に基づくサイト増幅特性の評価法では、まず、参照地点と対象地点の両地点において常時微動観測を行い、その記録から常時微動 H/V スペクトルを算出する（常時微動 H/V スペクトルの具体的な計算方法は3.2で示す）。次に、参照地点の評価済のサイト増幅特性のピーク周波数と参照地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数がおおよそ一致していることを確認する。なお、本稿では、常時微動 H/V スペクトルや、サイト増幅特性を表すフーリエ振幅スペクトルにおいて、主要なピーク（際立ったピーク）のうち、より（地震動による港湾構造物の変形への影響が大きい）低周波数側にあるピークに対応する周波数のことをピーク周波数と呼ぶ。その上で、スペクトルインバージョンで評価された参照地点のサイト増幅特性を、そのピーク周波数が、対象地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数に一致するように、対数軸上で平行移動させて、対象地点のサイト増幅特性を求める。この評価法のイメージ図を図-2.6に示す。なお、この評価法における計算方法の詳細は文献13が詳しい。この評価法を改良した方法として、ピーク高さも参照地点と対象地点の常時微動H/V スペクトルに基づいて補正する方法（長尾ら（2010）の方法¹⁵⁾と福永ら（2017）の方法¹⁶⁾）もあるが、ゾーニングとの関係については、この評価法の場合と同様である。

なお、この評価法は、常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数とサイト増幅特性のピーク周波数との間に良好な対応関係があることに基づいている（例えば、図-2.7）。後述するサイト増幅特性のゾーニングも、主に、常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数に基づいて行われるが、その根拠も、この常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数とサイト増幅特性のピーク周波数との間の良好な対応関係にある。

常時微動観測に基づく評価法を用いる際には、対象地点における常時微動観測を1地点だけ行った場合、局所的な振動源や埋設物などの予期せぬ影響で特異なデータが得られてしまう可能性があることから、少なくとも3カ所程度で観測を行うことが必要であるとされている。そのため、対象地点の付近において、少なくとも3カ所以上で常時微動観測が実施されて

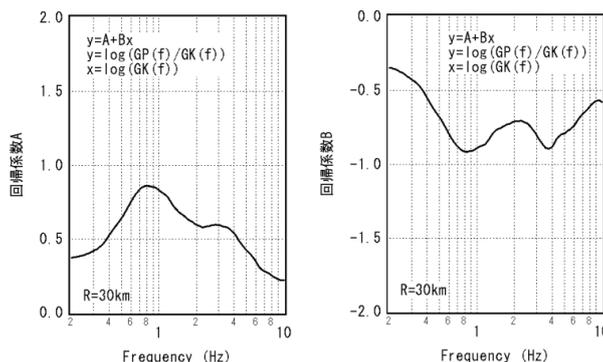


図-2.8 港湾地域の観測点と周辺の K-NET または KiK-net 観測点のサイト増幅特性の経験的関係を示す係数

いることが多く、それらの記録はゾーニングを検討する際に利用できる。また、常時微動観測は、地震観測に比べて安価で、1つの観測点あたり短時間（11分間以上の観測が必要とされており¹⁾、著者らが観測を実施した際は、1つの観測点あたり15分程度観測を行った）で観測できることから、周辺地域でサイト増幅特性の評価が将来的に必要となる可能性を考慮して、対象地点周辺の広い範囲で観測を実施している場合も多い。ゾーニングの検討では、それらの常時微動観測記録を利用することができる。

(4) 港湾と周辺の強震観測点（K-NET, KiK-net）のサイト増幅特性の経験的関係を利用する評価法

スペクトルインバージョンで評価された近隣の強震観測点のサイト増幅特性をそのまま対象地点に適用できない場合において、更に、臨時の地震観測及び常時微動観測のいずれも実施できない場合には、(式-1.1)に示す港湾と周辺の K-NET または KiK-net の観測地点のサイト増幅特性の経験的関係を利用する方法を用いることができる。

$$\log_{10} \frac{GP(f)}{GK(f)} = A(f) + B(f) \log_{10} GK(f) \quad (\text{式-1.1})$$

ここに、 f は周波数[Hz]、 $GP(f)$ は港湾における地震基盤～工学的基盤のサイト増幅特性（これを対象地点のサイト増幅特性とする）、 $GK(f)$ は周辺の K-NET（または KiK-net）の観測地点での地震基盤～工学的基盤のサイト増幅特性、係数 $A(f)$ と $B(f)$ は周波数毎に図-2.8 の値が与えられている。これらの係数は、野津・長尾（2005）³⁾ が、スペクトルインバージョンで評価したサイト増幅特性を基に、全国の港湾地域の強震観測点のサイト増幅特性とその周辺（30[km]以内）の K-NET, KiK-net の観測点におけるサイト増幅特性の、全国の平均的な関係（経験的関係）として求めたものである。

この方法によるサイト増幅特性の評価精度は、地震観測や常時微動観測に基づく評価法の場合と比較して大きく低下するため、地震観測や常時微動観測に基づくサイト増幅特性の評価を行うことが望ましいとされている^{1),18),19)}。重要港湾以上の港湾では、ほとんど全ての港湾で地震観測や常時微動観測に基づくサイト増幅特性の評価が行われているが、地方港湾においては、この経験的関係で評価されたサイト増幅特性のみしか存在していない港湾が大部分を占めているのが現状である。

港湾と周辺の強震観測点（K-NET, KiK-net）のサイト増幅特性の経験的関係を利用する評価法を用いて評価されたサイト増幅特性は、対象地点での観測記録に基づかずに評価されたサイト増幅特性であるため、その空間的な適用範囲を示すことができない。そのため、この評価法で評価されたサイト増幅特性しかない港湾においては、ゾーニングマップの作成は行っていない。

3. サイト増幅特性のゾーニング方法

3.1 サイト増幅特性のゾーニングの手順

本節では、新たに常時微動観測を実施して、その結果に基づきサイト増幅特性のゾーニングを実施する手順について述べ

る。以下に、その具体的な手順を示す。なお、ここで示す手順は、港湾の施設の技術上の基準・同解説[基準・同解説]¹⁾に記載されている内容に、本検討で実施した内容や得られた知見を追加したものである。

① 地盤データ、強震観測記録、常時微動観測記録、既存のゾーニングマップの収集・整理：

ゾーニングを検討する地域およびその周辺の深層・浅層の地盤データを収集し、工学的基盤（地震基盤）、堆積層の状況等に関する既往の知見を整理する。また、付近の強震観測記録やそれに基づき評価されたその強震観測点のサイト増幅特性もゾーニングの際の参考にできることから準備しておくことが望ましい。また、既往の常時微動観測記録（常時微動 H/V スペクトル）が存在し、それらが入手可能な場合には、その常時微動 H/V スペクトルと観測点の座標値（緯度、経度）等を収集するとよい。地盤データについては、ボーリングデータや地質図も参考にできるが、その詳細は 3.5 で示す。また、既存のゾーニングマップが国土技術政策総合研究所港湾施設研究室の HP¹⁸⁾・¹⁹⁾で公開されている港湾については、そのゾーニングマップを基にしてゾーニングの変更等を検討する必要がある。

② 常時微動観測点の設定：

①で収集・整理した情報等に基づき、地図を確認しながら、常時微動観測点を設定する。また、既存のゾーニングマップ¹⁸⁾・¹⁹⁾に、常時微動観測点が表示されている場合は、常時微動観測の観測点を定める際に、それらを参考にできる。なお、観測点配置を検討する際には、3.5 に示す留意点も参考にすることができる。

③ 常時微動観測の実施：

設定した観測点で常時微動観測を行う。常時微動観測の実施方法の詳細については、3.2 に示す。

④ 常時微動 H/V スペクトルの算定：

常時微動観測記録を基にして常時微動 H/V スペクトルを算出する。常時微動 H/V スペクトルの具体的な計算方法については、3.2 に示す。

⑤ サイト増幅特性のゾーニングの実施：

各地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数や形状を比較し、ピーク周波数等の特性が類似している範囲をサイト増幅特性が類似しているゾーンとして設定する。この具体的な方法については、3.3 に示す。また、3.5 に示す留意点も参考にすることができる。

⑥ ゾーン毎のサイト増幅特性の設定：

⑤で設定したゾーン毎に、2.2 で示した評価法により、サイト増幅特性を評価する。なお、設定したゾーン内でも常時微動観測記録にはある程度のばらつきがあることが一般的である。その場合に、ゾーン内のどの常時微動観測記録に着目してサイト増幅特性を評価するかについては、3.3 で述べるので、それを参考にできる。またその具体的な事例については 4.1 を参考にできる。なお、基準・同解説に示されているこの手順では、ゾーニングを行った後にゾーン毎にサイト増幅特性を設定する手順となっているため、本節でもそのような順序で説明しているが、本検討で実施したゾーニングでは、過去の設計の際等に既に評価されたサイト増幅特性が存在している上で、後に入手もしくは著者らが現地で取得した常時微動観測記録に基づいて、そのサイト増幅特性が適用できるゾーンを決めた場合も多かった。

上述の一連の手順について、図-3.1 にそのフロー図を示す。

3.2 サイト増幅特性のゾーニングのための常時微動観測の実施方法とデータの処理方法

常時微動とは、遠方の交通機関や工場機械等の人工的振動源、風・潮汐・波浪・火山活動などによる自然振動源から伝播した波動の集合体で、その卓越周期は 0.1[s]から 2.0[s]程度（振動数が 0.5Hz から 10Hz 程度）の比較的安定して現れる波である。常時微動は、伝播する過程で、その地盤固有の性質を反映することから、地盤の振動特性を検討するための重要な情報として利用できる¹⁾。

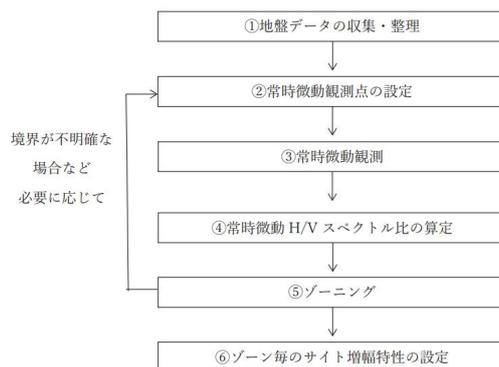


図-3.1 サイト増幅特性のゾーニングの手順を示したフロー図

常時微動の観測（地表面における観測）は、地震観測と比較して比較的安価に実施することができ、1つの観測点あたりの観測時間も短くて済む（11分以上の観測が必要とされており）、著者らが観測を実施した際は、1つの観測点あたり15分程度観測を行ったことから、一度の観測機会でも多くの地点を観測することに向いており、サイト増幅特性のゾーニングを行う上では、重要な役割を果たす。

続いて、港湾におけるその標準的な常時微動観測方法と常時微動 H/V スペクトルの算出方法を、以下の(a)~(d)に示す。

- (a) 各観測点において、11分以上の連続観測（水平2方向及び上下1方向の合計3成分を同時観測、サンプリング周波数は100[Hz]）を行い、観測記録から交通ノイズなどの影響の少ないと判断される163.84[s]の区間を3区間抽出する。
- (b) 水平、鉛直成分のフーリエ振幅スペクトルを計算し、バンド幅 $b=0.05$ [Hz]の Parzen ウィンドウで平滑化する。Parzen ウィンドウの関数 $W(f)$ を(式-3.1)に示す。

$$W(f) = \frac{4}{3}u \left(\frac{\sin \frac{\pi u f}{2}}{\frac{\pi u f}{2}} \right)^4 \quad \text{(式-3.1)}$$

ここで、 f は周波数[Hz]、 u はウィンドウのバンド幅 b に関するパラメータであり、バンド幅 b との間には $b=280/(151u)$ の関係がある。平滑化は、Parzen ウィンドウの関数 $W(f)$ を用いて、フーリエ振幅スペクトルに対して移動平均をとることに対応するが、具体的な計算法としては、フーリエ振幅スペクトルと Parzen ウィンドウの関数の周波数領域における畳み込み積分を行えばよい。

- (c) その上で、水平成分は、直行する水平2成分（Parzen ウィンドウで平滑化したフーリエ振幅スペクトル）の自乗平均の平方根とする。ただし、必要に応じ、岸壁法線平行方向成分あるいは岸壁法線直交方向成分のみを水平成分として採用する場合もある（波の影響が想定される場合等）。
- (d) 水平成分と鉛直成分の比を求め、常時微動 H/V スペクトル(式-3.2)を計算する。

$$HV(f) = \frac{\sqrt{\frac{|F_{H1}(f)|^2 + |F_{H2}(f)|^2}{2}}}{|F_v(f)|} \quad \text{(式-3.2)}$$

ここで、 f は周波数[Hz]、 $|F_v(f)|$ は平滑化を施した鉛直成分のフーリエ振幅スペクトル、 $|F_{H1}(f)|$ 、 $|F_{H2}(f)|$ は平滑化を施した直交する水平2成分のフーリエ振幅スペクトルを示す。最後に、(式-3.2)で計算したスペクトルについて、抽出した3区間で平均したものを、その観測地点の最終的な常時微動H/Vスペクトルとする。

3.3 常時微動 H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性のゾーニング方法

本節では、本検討で実施したゾーニングの方法について述べる。常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数とサイト増幅特性のピーク周波数との間には良好な対応関係があることは 2.2(3)で述べたとおりである。そのため、常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数を基にして、各観測点のサイト増幅特性の類似性を確認してゾーニングを行う。手順としては、まず、常時微動 H/V スペクトルの全体を見て、明瞭なピークの場所を確認する（各観測点の常時微動 H/V スペクトルに対してこの確認を行う）。常時微動 H/V スペクトルに複数のピークが見られる場合は、より低周波数側にあるピークに対応する周波数を選択する。このように選択した周波数を、本稿ではピーク周波数と呼ぶ。なお、その際には、ゾーニングを考える範囲の観測点の常時微動 H/V スペクトルを一枚の図等にまとめて、一覧できるようにしながら確認を行うと効率的である。本検討で行った確認の具体例は 4.1 に示す。先述の通り、ゾーニングの目的は、深層地盤の影響が類似していると考えられる範囲を設定することである。そのため、地震基盤（一般に花崗岩で S 波速度が 3[km/s]以上の地層）～地表のサイト増幅特性に対応するピーク周波数を抽出することがここでの目的である。そこで、周辺の強震観測点での常時微動観測結果にも着目し、地震基盤～地表のサイト増幅特性に対応するピーク周波数を抽出できているか確認することが望ましい。また、港湾周辺の地形・地質にも着目し、抽出したピーク周波数が地震基盤～地表のサイト増幅特性に対応するものであるか総合的に判断することが望ましい。その際に参考となる資料の一つとして、中央防災会議による「長周期地震動の卓越周期と深部地盤の固有周期」²⁰⁾がある（同資料の図 4.20。この資料の URL については、参考文献に示している。）。同資料に基づけば、例えば中国・四国地方は他の地方に比べ厚い堆積層の存在しない地域であるため、常時微動 H/V スペクトルに例えば 0.2～0.3[Hz]といった極めて低い周波数のピークが見られたとしても、そのピークは地盤の特性を表していない可能性が高いといった判断が可能である。また、例えば金沢港周辺では 0.2[Hz]付近と 1[Hz]付近にピークのある常時微動 H/V スペクトルが得られる場合が多いが、同資料に基づけば、このうち 0.2[Hz]付近のピークが地震基盤～地表のサイト増幅特性に対応すると判断することもできる。さらに、同資料からわかるように、例えば関東平野などは極めて深い堆積層が存在する地域である。これらの地域では、仮に 1～2[Hz]程度のピーク周波数が得られたとしても、それは地震基盤～地表のサイト増幅特性に対応するピーク周波数ではないと判断できる。以上のように同資料は有用である。なお、解像度の関係で同資料には明示されていない堆積層が日本の各所に存在するという点には注意する必要がある。

以上のように常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数を抽出した上で、ピーク周波数がほぼ同じ程度と考えられる地点はサイト増幅特性の類似した地域と考える。常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数にもある程度ばらつきがあるため、それを考慮したうえで、常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数に基づき、サイト増幅特性の類似しているゾーンを設定する。なお、例えば新潟港周辺のように、堆積層の層厚があまりに厚いために、地震基盤～地表のサイト増幅特性に対応するピーク周波数が常時微動 H/V スペクトルの解析対象に入らず、常時微動 H/V スペクトルに明瞭なピークの表れない地域もある。このような場合、常時微動 H/V スペクトルの全体の形状が類似していることをもって、サイト増幅特性が類似している範囲であると判断する場合もある。

ここで、本検討において、サイト増幅特性が類似していると考えた周波数幅の目安について示す。まず、前提として、周波数帯域毎にある程度分けて判断する必要がある。常時微動の精度に鑑みて、1.0[Hz]未満では、特にピーク位置をどこに設定するかの影響が大きいことから概ね 0.3[Hz] 幅程度とした。1.0[Hz]以上では、1.0[Hz]幅程度で考え、1.0[Hz]と 2.0[Hz]は特に明確に区別した。また、4.0[Hz]以上の高周波数側の帯域では、港湾構造物への影響が小さく、ピーク位置に応じてサイト増幅特性のゾーンを細かく分ける効果は小さいと考えられるため、1つのゾーンとしてまとめる場合が多かった。

なお、一般的に、港湾構造物にとっては、より低周波数側にピークがある場合に、地震動による構造物の変形への影響がより大きくなることから、上記のように決めたゾーンのうち、最も低周波数側にピークを持つ観測地点にそのゾーンを代表させて、サイト増幅特性の評価を行うことが望ましい。

3.4 ゾーニングマップの作成方法

本検討では、国土地理院が提供している地理院地図（淡色地図）²¹⁾を用いて、その淡色地図上に既往の地震観測点、常時微動観測点をプロットした上で、サイト増幅特性の類似するゾーンを囲う線を描き、そのゾーン名等を示して、ゾーニングマップを作成した。

具体的な作業手順としては、まず、フリーオープンソース GIS である QGIS²²⁾というアプリケーションを使用して、作成対象とする港湾の周辺の地理院地図を表示した。次に、強震観測点、常時微動観測点の座標値（緯度、経度）を読み込んで、地図上にプロットした。実際には、座標値の情報がない観測点も多く、その場合は、観測点の示された地図を QGIS にラスターデータとして読み込み、観測点の座標値を設定した。その上で、サイト増幅特性の類似している観測点を包含するように線で囲って、サイト増幅特性の類似しているゾーンを設定した。続いて、QGIS で編集した結果を jpeg ファイルとして出力し、最後に Microsoft PowerPoint で、線で囲ったゾーンが国土技術政策総合研究所港湾施設研究室の HP^{18),19)}で公表しているどの地震動のゾーンに対応しているかがわかるように、ゾーン名と対応するレベル 1 地震動の番号（レベル 1 地震動が未設定である場合はその旨）を、線で囲った範囲の内側に示すか、あるいは外側に配置した上で、矢印でその対応するゾーンを指し示した。「●既往微動観測点」等の凡例も Microsoft PowerPoint 上で追加している。最後に、Microsoft PowerPoint から、pdf ファイルとしてゾーニングマップを出力した。

また、周辺の強震観測点が、臨港地区の外に位置する場合であったとしても、対象とする港湾と同じ地図上に示せる程度の距離に位置していれば、ゾーニングマップ上に示すこととした。これにより、参照点とした強震観測点の位置が分かりやすくなり、新たにサイト増幅特性の評価を行う際にも参考にできる。

本節の最後に、観測点の座標値の取得方法を示す。常設されている強震観測点については、それぞれの HP（港湾地域観測の HP²⁾、防災科学技術研究所の HP⁴⁾等）で公表されている座標値（緯度、経度）を用いた。なお、K-NET の強震観測点は同じ名称でも移設されている場合があることにも注意する。臨時の地震観測点については、設置主体である地方整備局等の情報を基にして、座標値を取得した。また、常時微動観測点については、観測時に GPS ロガー等で取得された座標値を、地方整備局等から収集して使用した。

3.5 ゾーニングを行う際の留意点

本節では、本検討において著者らがサイト増幅特性のゾーニングを多くの港湾で行ってきた経験をもとに、その際の留意点について述べる。これらの留意点は、今後新規でゾーニングを行う際、または新たな観測記録に基づきゾーニングの更新を行う際にも参考にできる可能性がある。

(1) 適用範囲が十分に明確でないため、実務で適用する際には微動観測を実施するのが望ましいゾーンの設定

本検討でサイト増幅特性のゾーニングを実施した港湾の中には、常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数は概ね類似しているものの、常時微動観測点が十分に密でない地域が存在する港湾もあった。その場合は、ゾーニングマップ上は、常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数が概ね類似している観測点を包含するように点線で囲むこととした。そうすることで、サイト増幅特性の適用範囲が明確である実線で囲まれたゾーンと区別できるようにした。その上で、点線で囲んだゾーンは、実務で適用する際は、常時微動観測を実施するのが望ましいゾーンであることを国土技術政策総合研究所港湾施設研究室の HP^{18),19)}上で凡例として示した。なお、本検討では、「既往の事例では 200[m]間隔程度に観測点を設定している例が多い」という基準・同解説¹⁾の記載を参考にして、観測点が 200[m]間隔程度で設定されていることを、実線で囲むか、点線で囲むかを判断する一つの目安とした。また、ボーリングデータや地質図等の情報から、同じ地層が連続していると考えられる地域の場合には、観測点間隔がある程度密でなくとも、実線で囲んだ事例もあった。しかしながら、200[m]という数値は、あく

まで一つの目安に過ぎず、それぞれの現場毎に、ボーリングデータや地質図等から分かる地層の連続性なども考慮して、工学的に判断するのがよいと考える。

なお、サイト増幅特性の適用範囲が明確でないゾーン（赤の点線）では、実務設計を行う際等には、あらためて常時微動観測を実施してあらためてサイト増幅特性の確認を行うことになるため、その際の新たな観測結果に基づきゾーニングマップを更新できる可能性がある。

(2) ゾーン境界が1つの施設の中や、連続バースや護岸など連続性が求められる施設を横切の場合の考え方

一つの施設（係留施設等）の中や、連続バースや護岸など連続性が求められる施設を横切るようにサイト増幅特性のゾーン境界を設定すると、その境界線を境として設計入力地震動が変わることになる。そのため本検討では、常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数のばらつきも考慮した上で、ゾーン境界が不必要に一つの施設の中や連続バースや護岸など連続性が求められる施設を横切らないように、角部や施設の端にゾーン境界を設定した。その際、境界付近の施設の設計が安全側となるようにゾーン境界を設定した。

(3) 防波堤、埋立地に建設される施設等の、設計時点では付近での常時微動観測が困難な施設の取扱い

防波堤、埋立地に建設される施設等は、設計時点には海上に位置しているため、当該施設位置における陸上での常時微動観測が困難である。そのため、陸上での地震観測記録や常時微動観測記録を基に、その施設位置のサイト増幅特性が、陸上で評価されているどのサイト増幅特性のゾーンに属することにするかを判断する必要がある。そのための常時微動観測を陸上で行う際には、施設を建設予定の位置から距離が近い位置での数点のみの観測ではなく、海上の対象地点を取り囲むように面的に観測点を配置するのが望ましい。その上で、面的に配置した観測点で得られた常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数等を確認することにより、その施設位置のサイト増幅特性が、陸上で評価されているどのサイト増幅特性のゾーンに属するかを判断するのがよいと考える。本検討で対象とした港湾の多くでは、既の実施された常時微動観測の記録を基にゾーニングを行ったため、観測点配置は著者らが設定したものではない場合も多かったが、このような面的な観測がある程度行われている場合は、それらを基にして、当該施設位置のゾーニングを検討した。なお、陸上での常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数に対応する S 波速度コントラストの明瞭な地層境界が陸上のボーリングデータにおいて確認でき、その地層境界を海上のボーリングデータまで追跡できる時は、これをもとに海上まで含めたゾーニングを行うことも可能である。この点については次節で述べる。

(4) ボーリングデータ、地質図の活用

常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数に対応する地層が空間的に続いていることを確認する際には、ボーリングデータを活用できる場合もある。一般にボーリングデータから確認できる土層の固有周波数は、ボーリングデータ等で得られている層厚 H_i 、せん断波速度 V_{s_i} (N 値から推定される場合もある) から、(式-3.3)に示す 1/4 波長則で算定できる。

$$T = 4 \sum_i \frac{H_i}{V_{s_i}} \quad (\text{式-3.3})$$

ここで、 T は固有周期[s]であり、 i は土層の番号に対応したインデックスである。なお、周波数 f [Hz] と周期 T の間には $f = 1/T$ の関係がある。ただし、この式を適用する際、下端となる地層境界の選定により、算定される固有周波数は異なるものとなる。そこで、常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数との対応を検討するためには、S 波速度コントラストの大きい地層境界に着目することが必要となる。例えば図-3.2 のような場合では、図中に緑の両矢印で示した土層が、常時微動 H/V ス

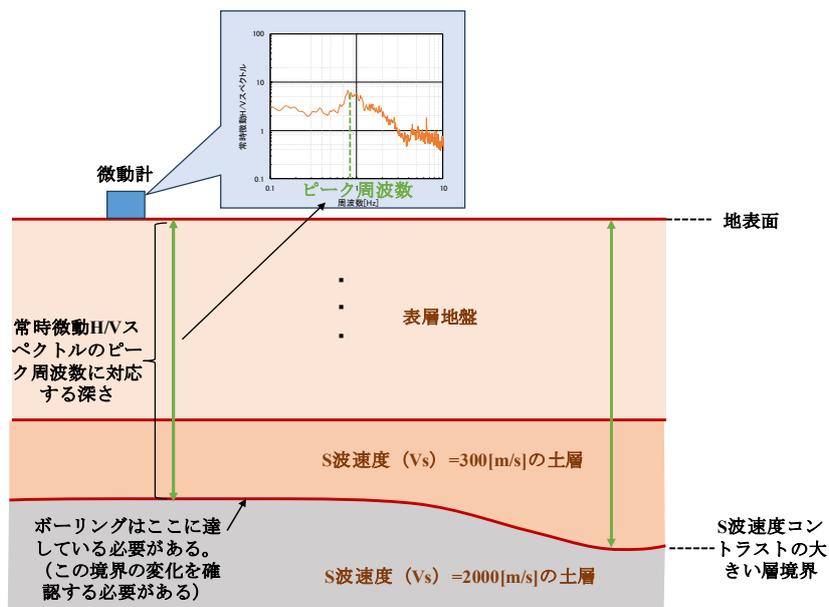


図-3.2 S波速度コントラストが大きい層境界が存在する場合の例
(常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数との関係)

ペクトルのピーク周波数に対応していると考えられるため、ピーク周波数の空間的な変化をボーリングデータから推定するためには、S波速度が2000[m/s]の層までボーリングが達している必要がある。その上で、S波速度が2000[m/s]の層の上面深さの空間的な変化を複数のボーリングデータを基に確認できれば、常時微動観測が困難な海上においてもピーク周波数の空間的な変化をボーリングデータから推定できる。このように、S波速度コントラストの大きい地層境界が地震基盤上面に対応しない場合も多いという点には注意する必要がある。常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数が0.3[Hz]程度(周期3[s]程度)と低い場合は、そのピークに対応するS波速度コントラストの大きい地層境界は数百メートルといった深部に存在しており、その深度までボーリングを掘ることは現実的ではないため、そのような場合には、ピーク周波数の空間的な変化をボーリングデータから推定することは難しい。

なお、常時微動データを補完する資料として地質図も参考にできる。一般に地質図は深さ方向の情報をもたないが、十分に古い地層が露頭している場所では地震動の増幅が小さいと考えることもできる。本検討では、一部の港湾において、産業技術総合研究所の提供するシームレス地質図²³⁾を参考にしてゾーニングを行った。

(5) 波の影響の考慮

常時微動観測記録から計算した水平方向のフーリエ振幅スペクトルや、常時微動 H/V スペクトル、係留施設上の観測点と背後地盤上の観測点のフーリエ振幅スペクトルの比(水平方向の成分の比)として表される H/H スペクトルの低周波数側の帯域において、波の影響と考えられるピークが出現する場合があることが、既往研究^{24,25,26)}で報告されている。なお、水圧式波高計を使用して栈橋前面の海面変動を観測した研究²⁵⁾では、栈橋前面の波浪の卓越周波数は、外洋に面した港湾では0.1[Hz]程度、内湾に面している港湾では0.3[Hz]程度であることが確認されている。したがって、常時微動 H/V スペクトルの低周波数側の帯域にピークが見られた場合、真に地盤の固有周波数を捉えたピークであるか、あるいは波の影響により現れたピークであるかを慎重に見極める必要がある。鈴木ら(2016)²⁴⁾は、波の影響が小さくなるように岸壁法線から30[m]程度離れた地点で観測し、かつ岸壁法線平行成分に着目することを提案している。また、基準・同解説¹⁾では鈴木ら(2016)の提案に基づき岸壁高さの3倍程度岸壁法線から離れた位置で観測することを推奨している。しかし、係留施設の近傍で地盤特性が大きく変化していると考えられる場合や、観測可能な場所に制限がある場合は、岸壁や護岸(栈橋の土留めを含む)

の法線から岸壁高さの3倍程度離れていない地点で観測を行う場合も多いのが実情である。そのため、波の影響について考察しなければならない場合も、実務では生じ得る。

次に、常時微動観測結果から計算された常時微動 H/V スペクトルの低周波数側の帯域において、波の影響と考えられるピークが確認された場合に、それが真に地盤の固有周波数を捉えたピークであるか、あるいは波の影響により現れたピークであるかを判断するための方法について述べる。常時微動 H/V スペクトルを、3.2 で示したように水平2成分を統合して算出するのではなく、鈴木ら（2016）が提案しているように、岸壁や護岸（栈橋の土留めを含む）の法線に平行な方向と直交する方向に分けて算出をし、岸壁や護岸（栈橋の土留めを含む）の法線に直交する方向にのみ波の影響と考えられるピークが出現していることをもって、そのピークは、波の影響により生じたピークであり、真に地盤の固有周波数を捉えたピークではないと判断できる可能性がある。更に、菅原ら（2019）²⁵⁾が行ったように、常時微動観測と同時に、その観測点の付近において、水圧式波高計を用いた海面の変動の同時観測を行うことにより、波の影響によるピークであるか否かを、海面変動の観測結果から確認することも有効である。

(6) 周辺の観測地点と異なるH/Vスペクトルが局所的に得られた際の考え方

ゾーニングを目的とした常時微動観測の場合は、常時微動の観測点を一定の間隔で連続的に配置することが多い。観測結果として得られた常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数が、連続的に配置された観測点のうち、途中の観測点で、近隣の観測点と極端に異なる結果（常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数）が得られることがあり、本検討でもそのような結果が得られた事例があった。常時微動観測は、地下の埋設物、排水溝等の影響を受けている可能性があるが、観測前に観測点配置を考える際に、地中の埋設物や舗装下の排水溝の位置等を全て確認した上で、それを避けるように全ての観測点を配置することは難しい。そのため、地中の埋設物や舗装下の排水溝等の影響が、常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数に現れることはよく起こることである。連続的に配置した観測点のうち、一部の観測点の結果のみにそれらの影響が現れた場合には、その地点でゾーンを区切るべきか連続させるべきかの判断に迷う場合がある。そのような場合には、特異な結果が得られた観測点の、更にその先の観測点の H/V スペクトルのピーク周波数や、面的に観測がなされている場合は、周辺の観測点における H/V スペクトルのピーク周波数を確認した上で、その特異なピークが、真に地盤の固有周波数を捉えたピークであるか否かを判断するのがよいと考える。その際は、その特異な結果が得られた観測点以外の観測点の H/V スペクトルのピーク周波数が同程度となっていることを確認することで、その特異な結果が得られた観測点も含めてサイト増幅特性の類似した1つのゾーンとして設定してもよいと考える。また、(4) で述べたように、ボーリングデータを活用して、同一の地層（土層）が空間的に連続していること、あるいは変化していることを確認することも有効である。

なお、少数の観測点においてのみ、H/V スペクトルに0.3[Hz]等の低周波側のピークが見られる場合は、港湾構造物への影響が大きいこともあり、慎重に判断する必要がある。0.3[Hz]程度のピーク周波数が地盤の特性に対応するのであれば、地震基盤上に数百メートルの堆積層が存在することを意味するため、0.3[Hz]付近のピークが限られた観測点にのみ局所的に現れることは地質学的に考えづらい。そのため、常時微動 H/V スペクトルにおいて0.3[Hz]等の低周波側のピークが見られた場合は、先に述べた中央防災会議の資料なども参考にして、真に地震基盤～地表のサイト増幅特性に対応するものであるかを慎重に見極める必要がある。

4. ゾーニングの結果

4.1 ゾーニングの事例紹介

ここでは、新たにゾーニングを行う際や、新たな観測記録に基づき既往のゾーニングを更新する際に参考にできるように、代表的なゾーニングの事例を2例（八戸港の事例、高松港の事例）紹介する。

(1) 八戸港でのゾーニングの事例

ここでは、八戸港でのゾーニングの事例について紹介する。八戸港での常時微動観測により得られた常時微動 H/V スペクトルを一覧できるように表示した図を図-4.1 に示す。図中には各観測点位置も示しているが、八戸港では、港湾全体で、ある程度密な間隔で常時微動観測が実施されており、サイト増幅特性が面的に確認できている。なお、図中に示している個々の常時微動 H/V スペクトルの拡大図は、付録 A に示す。

八戸港全体の傾向として、図の上側（東側）から下側（西側）に向かうに連れて、常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数が高周波数（短周期）から低周波数（長周期）に変化している。これは、西側に向かって港湾構造物の変形に大きく影響する長周期成分がより卓越することを意味しており、この方向に堆積層がより深くなっていると考えられる。

このことから、八戸港では、海岸線に沿った方向にゾーンを分けることを考え、常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数が大きく変化する地点の付近をゾーン境界として設定した。結果として、以下に示す4つのサイト増幅特性の類似するゾーンを設定した。まず、最も北側に位置する八戸-G²⁾の付近の地域は、常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数が概ね 0.40～0.50[Hz]程度であり、この地域を「八戸-G ゾーン」として設定した。このゾーンを代表させるサイト増幅特性については、野津・長尾（2005）がスペクトルインバージョンで評価した八戸-G のサイト増幅特性（ピーク周波数：0.36[Hz]）を用いることとした。次に、「八戸-G ゾーン」の南側に隣接する常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数が概ね 0.60～0.70[Hz]程度の地域を、「0.6～0.7Hz ゾーン」として設定した。このゾーンを代表させるサイト増幅特性の設定法としては、常時微動観測に基づくサイト増幅特性の評価法を用いることとし、この地域で観測された常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数のうち最も低周波数側のピークである 0.60[Hz]を選定し、野津・長尾（2005）がスペクトルインバージョンで評価した八戸-G のサイト増幅特性の（ピーク周波数（0.36 [Hz]）を、ピーク周波数が 0.60 [Hz]となるように平行移動させてサイト増幅特性を設定した。続いて、「0.6～0.7Hz ゾーン」の南側に隣接する常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数が概ね 0.80～1.2[Hz]程度の地域を、「K-NET 八戸ゾーン」として設定した。このゾーンを代表させるサイト増幅特性の設定法としては、常時微動観測に基づくサイト増幅特性の評価法を用いることとし、この地域で観測された常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数のうち最も低周波数側のピークである 0.80[Hz]を選定し、スペクトルインバージョンで評価された K-NET 八戸のサイト増幅特性（ピーク周波数：1.2 [Hz]）を、ピーク周波数が 0.80 [Hz]となるように平行移動させてサイト増幅特性を設定した。最後に、最も南側に位置する、気象庁の地震観測点である八戸測候所¹²⁾ 付近の地域を「八戸測候所ゾーン」として設定した。このゾーンで得られた常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数は 4.3～10.0[Hz]の範囲に分布しており、高周波数側の広い帯域にわたってピーク周波数が分布している。常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数が高周波数側の広い帯域で分布する場合のゾーニングの考え方を、3.3 で述べたが、ここではそれに従い、H/V スペクトルのピーク周波数が高周波数側の広い帯域（4.0[Hz]以上）で分布する地域を1つのゾーンとしてまとめた。このゾーンを代表させるサイト増幅特性の設定法としては、臨時の地震観測に基づくサイト増幅特性の評価法を用いて、野津・長尾（2005）がスペクトルインバージョンで評価した K-NET 八戸のサイト増幅特性（ピーク周波数：1.17 [Hz]）を基にして、K-NET 八戸と八戸測候所での同時観測記録のフーリエ振幅スペクトルの比を K-NET 八戸のサイト増幅特性（ピーク周波数：1.17 [Hz]）に乗じることで評価されている。そのサイト増幅特性を「八戸測候所ゾーン」のサイト増幅特性として用いることとした。

また「0.6～0.7Hz ゾーン」については、サイト増幅特性が類似するゾーンの設定はできているが、工学的基盤まで達しているボーリングデータがないため、工学的基盤位置のサイト増幅特性は計算できていない。

上記のようにゾーニングを行い、作成したゾーニングマップを図-4.2 に示す。なお、K-NET 八戸については八戸港の臨港地区の外に位置しているが、K-NET 八戸ゾーン及び八戸測候所ゾーンのサイト増幅特性の基になっており、空間的な位置関係が分かると、今後ゾーニングを更新する場合等に参考にできることから、ゾーニングマップ上にその位置を示した。

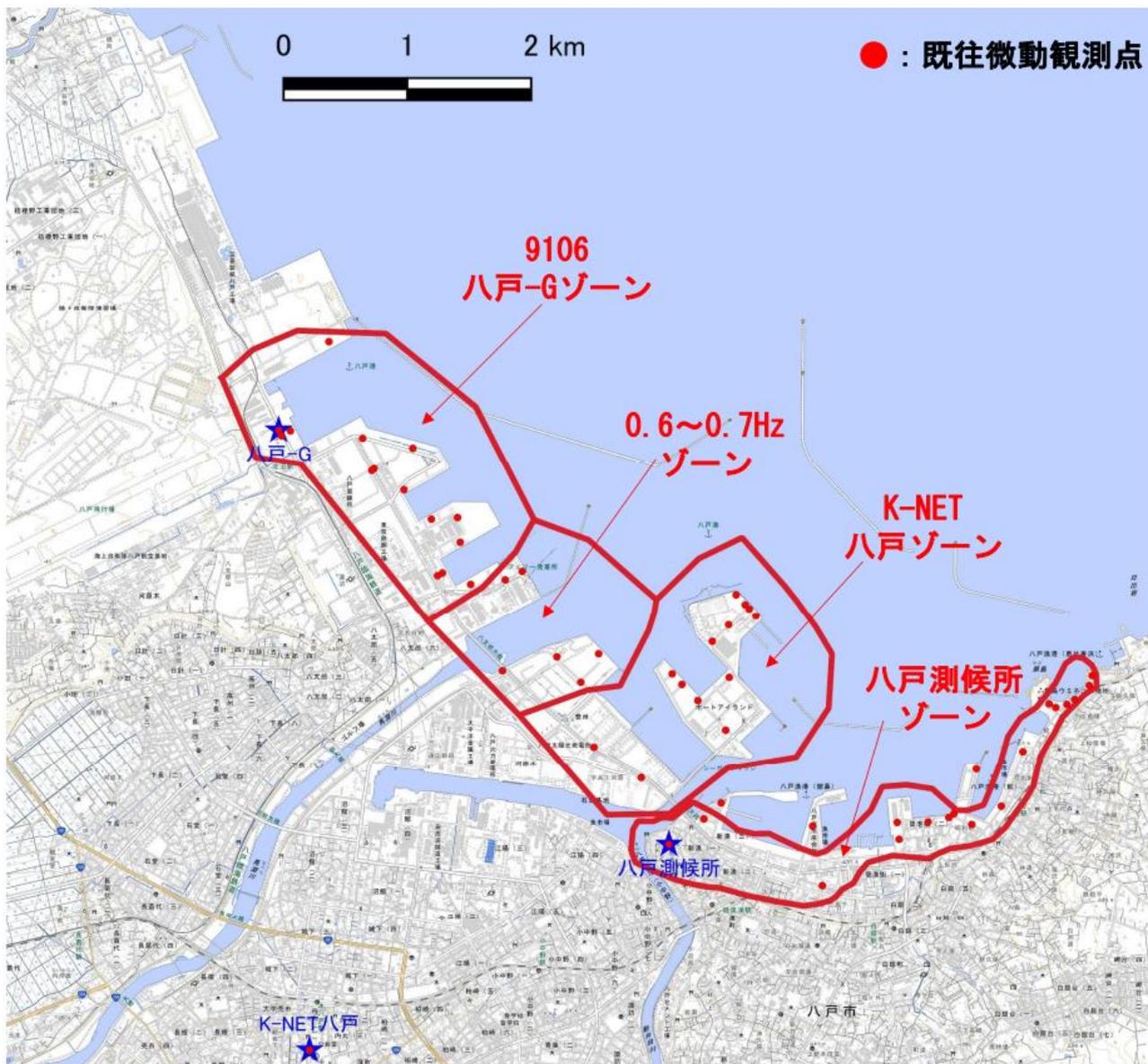


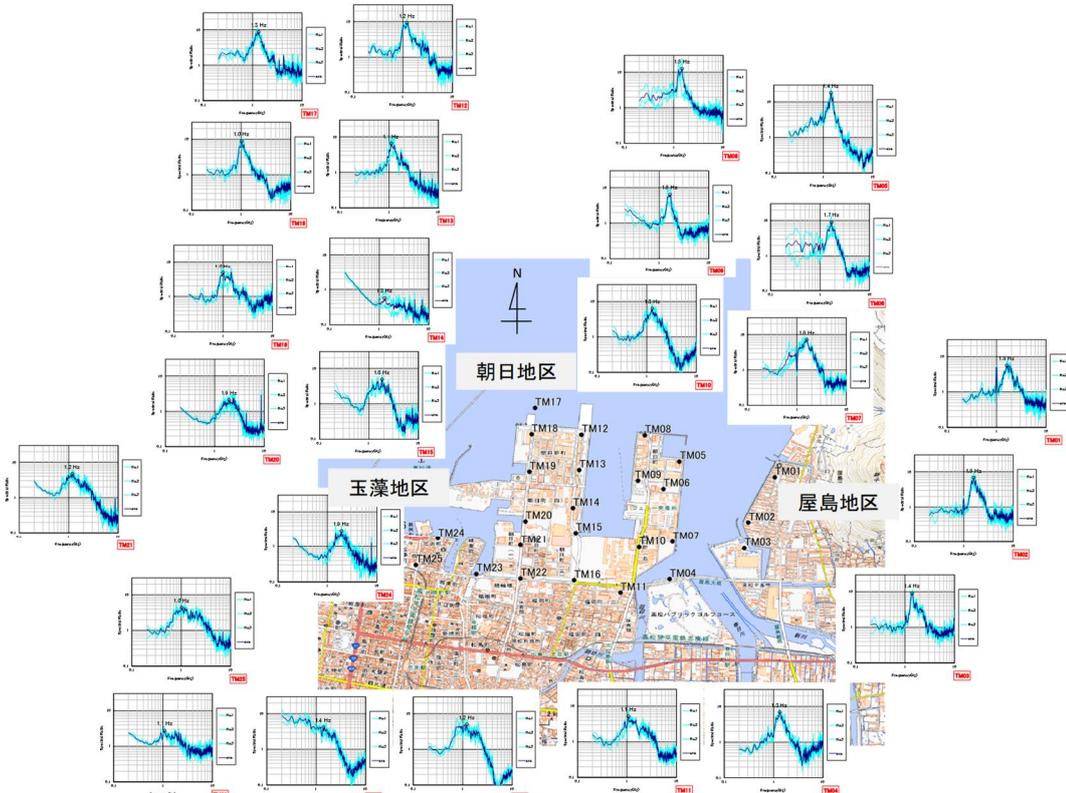
図-4.2 八戸港のゾーニングマップ

(2) 高松港でのゾーニングの事例

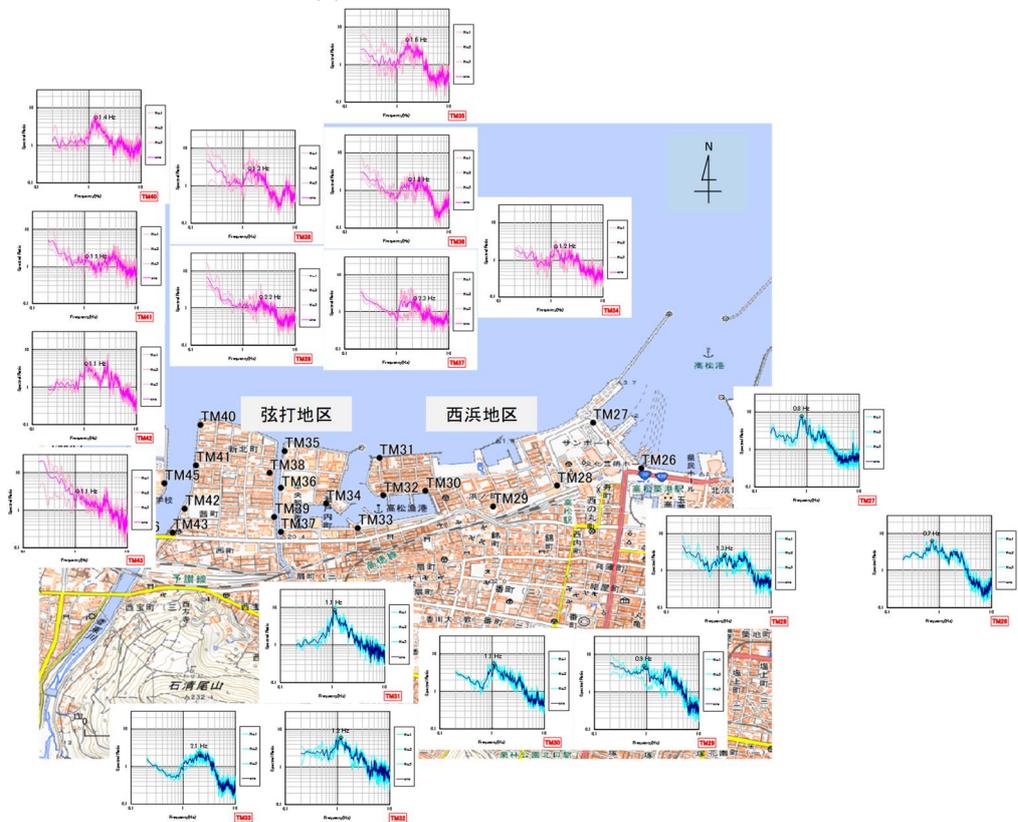
ここでは、高松港でのゾーニングの事例について紹介する。高松港での常時微動観測により得られた常時微動 H/V スペクトルを一覧できるように表示した図を図-4.3 に示す。図中には各観測点位置も示しているが、高松港では、港湾全体で、ある程度近い間隔で常時微動観測が実施されており、サイト増幅特性が面的に確認できている。なお、図中に示している個々の常時微動 H/V スペクトルの拡大図は、付録 B に示す。

全体的な傾向として、高松港の中央付近にあたる玉藻地区、西浜地区、弦打地区の付近において、常時微動 H/V スペクトルが、1.00[Hz]より低周波数側にピークを有する地点が多くみられたため、これらの地点を含む地域では、長周期（低周波数）成分が卓越している。また、海に向かって右側（東側）の方に位置する屋島地区の付近と、海に向かって左側（西側）の方に位置する香西地区の付近では、低周波数側が卓越する結果は見られず、概ね 1.00~2.00[Hz]程度が卓越している地点が多くみられた。このことから、高松港の中央付近（玉藻地区、西浜地区、弦打地区付近）では堆積層が厚く、高松港の両端（屋島地区、香西地区）に向かうに連れて堆積層が薄くなっているような地下構造であると推測された。したがって、高

松港の中央付近にあたる玉藻地区、西浜地区、弦打地区の付近を「ゾーン① (0.6Hz ゾーン)」, 海に向かって右側 (東側) にあたる屋島地区の付近と海に向かって左側 (西側) にあたる香西地区の付近をまとめて「ゾーン② (1.0Hz ゾーン)」とし



(a) 朝日地区, 屋島地区



(b) 玉藻地区, 西浜地区



図-4.5 本検討以前に考えられていた高松港のサイト増幅特性のゾーニング

うに平行移動させてサイト増幅特性を設定した。なお、0.60[Hz]のピークは、図-4.3に示した常時微動 H/V スペクトルには表れていないが、本検討を実施する以前から、過去の観測記録を基に 0.60[Hz]をピーク周波数として設定したサイト増幅特性を当該地域では使用していたことに基づき、0.60[Hz]にピーク周波数を有するサイト増幅特性を設定することとした。また、「ゾーン② (1.0Hz ゾーン)」を代表させるサイト増幅特性については、このゾーンにおける常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数が 1.0[Hz]～2.0[Hz]程度の範囲に分布していたことから、その中で最も低周波数側である 1.0[Hz]にピークがある KGW004 のサイト増幅特性 (野津・長尾 (2005) がスペクトルインバージョンで評価したもの) をそのまま用いることとした。

上記のようにゾーニングの検討を行い、作成したゾーニングマップを図-4.4に示す。海に向かって右側 (東側) の境界については、過去の国土技術政策総合研究所における検討²⁷⁾に基づいて設定されたゾーニング (図-4.5) を参考にして設定した。また、海に向かって左側 (西側) の境界をどこに設定するかは判断が難しかったが、地理的に分かりやすいことから、本津川をゾーン境界とすることとした。

4.2 重要港湾以上の港湾におけるゾーニングの結果

重要港湾以上の港湾は、全国で 125 港あるが、そのうち 119 港において、本稿執筆時点 (2024 年 1 月時点) で既にゾーニングマップを作成済である。これは、重要港湾以上の港湾全体の 95%にあたる。重要港湾以上の港湾でゾーニングマップが作成済の港湾の一覧は付録 C に示す。また、本検討で作成したサイト増幅特性のゾーニングマップは、国土技術政策総合研究所港湾施設研究室の HP (重要港湾以上の港湾のレベル 1 地震動)¹⁸⁾において確認することができる。

ゾーニングマップに示されたゾーン毎に、2.2 で述べた方法によりサイト増幅特性を評価しており、レベル 1 地震動もゾーン毎に設定している。ここでは、本検討におけるゾーニングを実施した後の全国のレベル 1 地震動を対象に、速度 PSI 値を算出した。速度 PSI 値は、野津・井合 (2001)⁶⁾により提案された地震動の強度指標であり、(式-4.1)で表される量である。

$$PSI[v(t)] := \sqrt{\int_0^{\infty} (v(t))^2 dt} \quad (\text{式-4.1})$$

速度 PSI 値は、速度 $v(t)$ の二乗の継続時間における時間積分の平方根として定義される。野津・井合 (2001) は、FLIP を用いた非線形地震応答解析の結果から、重力式岸壁の天端残留水平変位と速度 PSI 値の相関が良好であることを確認している。なお、本稿における速度 PSI 値の単位は $[cm/s^{0.5}]$ とするが、これ以降、速度 PSI 値の単位は省略して表示する。

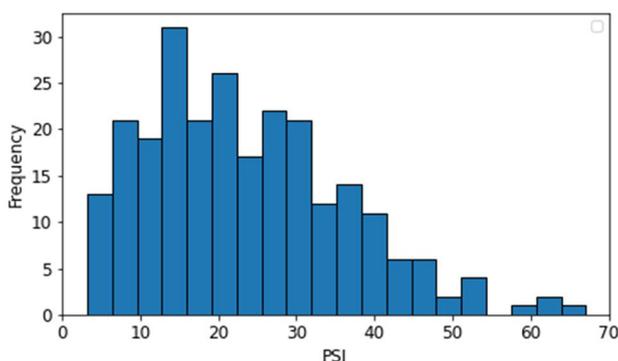


図-4.6 速度 PSI 値のヒストグラム (重要港湾以上の港湾)

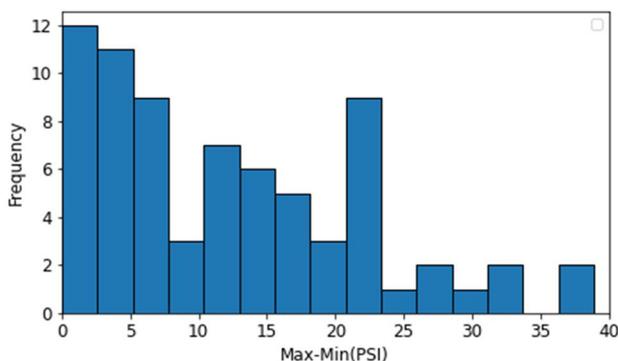


図-4.7 1つの港湾内の「最大の速度 PSI 値-最小の速度 PSI 値」のヒストグラム (重要港湾以上の港湾)

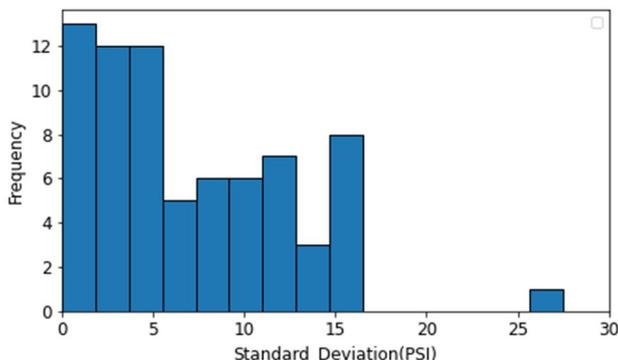


図-4.8 1つの港湾内の速度 PSI 値の標準偏差のヒストグラム (重要港湾以上の港湾)

算出した全国のレベル1地震動の速度 PSI 値のヒストグラムを図-4.6に示す。このヒストグラムから、現行設定されているレベル1地震動の速度 PSI 値は3.2~67.1の範囲に分布していることがわかる。また、全国の平均値は23.6、標準偏差は、12.8であった。なお、標準偏差を計算する際は、残差平方和をN-1で除してから1/2乗して、不偏推定量として標準偏差を算出している。全国で、特に速度 PSI 値の数値の大きいレベル1地震動は、大きいものから順に、熊本港夢咲島地区(速度 PSI 値:67.1)、釧路港ゾーンE(速度 PSI 値:63.9)、釧路港ゾーンD(速度 PSI 値:61.7)、小名浜港ゾーン1(速度 PSI 値:58.5)、青森港(速度 PSI 値:54.0)であった。

また、2つ以上のゾーンが設定されている港湾において、そのゾーンの間で「最大の速度 PSI 値-最小の速度 PSI 値」を計算した。その結果のヒストグラムを図-4.7に示す。図を確認すると、「最大の速度 PSI 値-最小の速度 PSI 値」は0.0~38.9の範囲に分布している。全国の平均値は12.5、標準偏差は、9.8であった。なお、標準偏差を計算する際は、残差平方和をN-1で除した量を1/2乗して、不偏推定量として算出している。また、全国で特にレベル1地震動の速度 PSI 値の差が大き

い港湾は、大きいものから順に、松山港（速度 PSI 値の最大差：38.9）、和歌山下津港（速度 PSI 値の最大差：37.7）、釧路港（速度 PSI 値の最大差：33.4）、小名浜港（速度 PSI 値の最大差：31.2）、横須賀港（速度 PSI 値の最大差：29.3）であった。ここで示した 1 つの港湾内における「最大の速度 PSI 値－最小の速度 PSI 値」は、1 つの港湾内でサイト増幅特性がどの程度異なるのかの情報を示している。一つの港湾という空間的な範囲であっても、大きい場合で速度 PSI 値は 40 程度異なる場合があることが分かったことは、同一港湾内でもサイト増幅特性を分けて評価することの重要性を示唆している。更に、同一港湾内で 2 つ以上のゾーンが存在する港湾を対象に、港湾毎に速度 PSI 値の標準偏差を算出した。そのヒストグラムを図-4.8 に示す。この港湾毎の速度 PSI 値の標準偏差ヒストグラムも、1 つの港湾内で、サイト増幅特性の影響により、速度 PSI 値がどの程度ばらつくかの一つの目安となる。なお、ここでも、標準偏差を計算する際は、残差平方和を $N-1$ で除した量を $1/2$ 乗して、不偏推定量として算出している。

4.3 地方港湾（56 条港湾を含む）におけるゾーニングの結果

国土技術政策総合研究所港湾施設研究室の HP（地方港湾のレベル 1 地震動）¹⁹⁾において公表している地方港湾（56 条港湾を含む）の地震動の数は、全国で 997 個あるが、そのうち 121 個のゾーニングマップが本稿執筆時点（2024 年 1 月時点）で公開されている、これは、全国の 12%程度にあたる。なお、2024 年 4 月に、100 個程度のゾーニングマップを新たに公開する予定である。なお、地方港湾（56 条港湾を含む）については、国土技術政策総合研究所港湾施設研究室の HP（地方港湾のレベル 1 地震動）¹⁹⁾において、サイト増幅特性のゾーン単位で管理されており、それを港湾数に変換することが現時点で難しかったため、地方港湾（56 条港湾を含む）については、地震動単位でその進捗率をここでは示している。地方港湾（56 条港湾を含む）でゾーニングマップが作成済の港湾の一覧は付録 D に示す。また、本検討で作成したサイト増幅特性のゾーニングマップは、国土技術政策総合研究所港湾施設研究室の HP（地方港湾のレベル 1 地震動）¹⁹⁾において確認することができる。

5. まとめ

本稿では、全国の港湾を対象にサイト増幅特性のゾーニング（ゾーニングマップの作成）を実施した著者らの経験を基に、新たにゾーニングを行う際や、新たな観測記録に基づき既往のゾーニングを更新する際に活用できるように、一連の検討内容・結果、そこから得られた知見についてとりまとめた。また、本稿執筆時点（2024 年 1 月時点）でのサイト増幅特性のゾーニングマップ作成の進捗についても示した。更に、それらのサイト増幅特性のゾーンごとに設定したレベル 1 地震動について、速度 PSI 値の全国的な分布や、1 つの港湾の中でのサイト増幅特性の違いによる速度 PSI 値への影響度合いについても示した。以下では、本稿の要点と主要な結論について改めて示す。

- ・港湾分野で用いられている 4 つのサイト増幅特性の評価法について説明し、評価法毎にサイト増幅特性のゾーニングに係る点について示した (2.2)。
- ・常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数等を用いてサイト増幅特性の類似性を確認する方法とゾーニングの考え方について、その要点をまとめた (3.3)。特に、サイト増幅特性がある程度類似しているゾーンを設定する際の周波数幅の目安は、周波数帯域毎にある程度分けて考える必要があり、1.0[Hz]未満では特にピーク位置をどこに設定するかの影響が大きいことから概ね 0.3[Hz] 幅程度、1.0[Hz]以上では 1.0[Hz]幅程度で考えるのがよいと述べた。また、1.0[Hz]と 2.0[Hz]は特に明確に区別すべきであることにも言及した。更に、4.0[Hz]以上の高周波数側の帯域では、ピーク周波数をどこに設定するかによる港湾構造物への影響が小さいため、1 つのゾーンにまとめてもよいことを述べた。
- ・ゾーニングマップの具体的な作成手順をまとめた (3.4)、本検討で用いた、国土地理院の提供する地理院地図（淡色地図）

を基にして、フリーオープンソース GIS である QGIS と Microsoft PowerPoint を使用して、強震観測点と微動観測点の座標値（緯度、経度）を読み込み、地図上にプロットした上で、ゾーニングマップを作成する一連の作業手順を示した。

- ・ゾーニングを行うための留意点として、適用範囲が十分に明確でないため、実務で適用するには微動観測を実施するのが望ましいゾーンの設定が必要な場合があること、ゾーン境界が1つの施設の中や、連続バースや護岸など連続性が求められる施設を横切る場合の考え方、防波堤、埋立地に建設される施設等の、設計時点では付近での常時微動観測が困難な施設の取扱い、ボーリングデータ、地質図の活用、波の影響の考慮、周辺の観測地点と異なる H/V スペクトルが局所的に得られた際の考え方について示した。
- ・新たにゾーニングを行う際や、新たな観測記録に基づき既往のゾーニングを更新する際に活用できるように、代表的なゾーニングの事例を2例（八戸港の事例、高松港の事例）紹介した。
- ・重要港湾以上の港湾と地方港湾（56条港湾を含む）について、ゾーニングマップ作成の進捗（重要港湾：港湾単位で119港/125港が作成済、地方港湾（56条港湾を含む）：サイト増幅特性のゾーン単位で121個/997個が作成済）を示した。重要港湾以上の港湾については、設定したゾーン毎に評価したサイト増幅特性を用いたレベル1地震動について、その速度PSI値の全国のヒストグラムを示した。更に、1つの港湾内に2つ以上のサイト増幅特性のゾーンが存在する港湾を対象に、“最大の速度PSI値－最小の速度PSI値”等を計算し、その全国のヒストグラムを示した。その結果から、1つの港湾の中でもサイト増幅特性の違いにより、大きい場合で速度PSI値は40程度異なる場合があることを明らかにし、1つの港湾の中でもサイト増幅特性を地点毎に評価することの重要性を示した。

本検討で実施したように、全国の港湾の多くの地点で地震観測や常時微動観測を行い、サイト増幅特性を評価すること（ゾーニングマップの作成も含む）は、設計入力地震動（レベル1地震動、レベル2地震動）の設定やそれを用いる耐震設計の合理化につながる。また、サイト増幅特性を適切に評価しておくことは、港湾の地震リスクを事前に把握することにもつながると考える。更に、施設配置等を港湾計画で考える際にも利用できるか可能性がある¹⁾。今後、全国の港湾において、まだ現地観測がされていない地点で地震観測や常時微動観測が行われ、本稿で示した知見を活用して、サイト増幅特性の評価やゾーニングが進むことを期待したい。

謝辞

常時微動観測結果を提供していただくにあたっては、北海道開発局、東北地方整備局、関東地方整備局、北陸地方整備局、中部地方整備局、近畿地方整備局、中国地方整備局、四国地方整備局、九州地方整備局、沖縄総合事務局にご協力いただきました。また防災科学技術研究所の強震記録を利用しました。ここに記して深く感謝の意を表します。

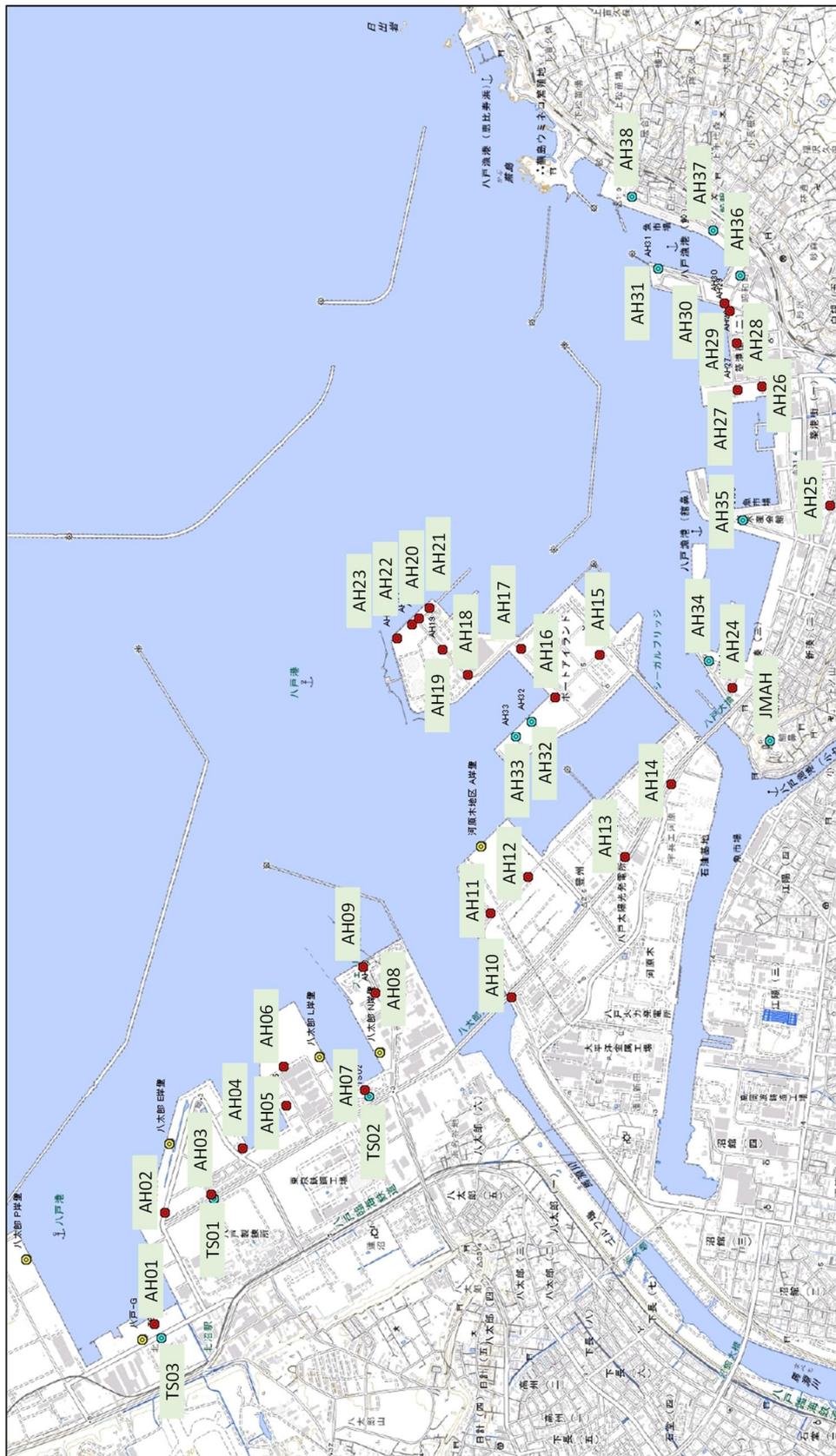
参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，（公社）日本港湾協会，2018.
- 2) 国土交通省港湾局:港湾地域強震観測ホームページ. (<https://www.mlit.go.jp/kowan/kyosin/eq.htm>).
- 3) 野津厚，長尾毅：スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性，港湾空港技術研究所資料，No.1112，2005.
- 4) 防災科学技術研究所のホームページ（K-NET, KiK-net）(<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>)
- 5) Aoi, S., Asano, Y., Kunugi, T., Kimura, T., Uehira, K., Takahashi, N., Ueda, H., Shiomi, K., Matsumoto, T. and Fujiwara, H.: MOWLAS: NIED Observation Network for Earthquake, Tsunami and Volcano, Earth, Planets and Space, Vol. 72, 126, 2020.
- 6) 野津厚，井合進：岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察，第28回土木学会関東支部技術研究発表会講

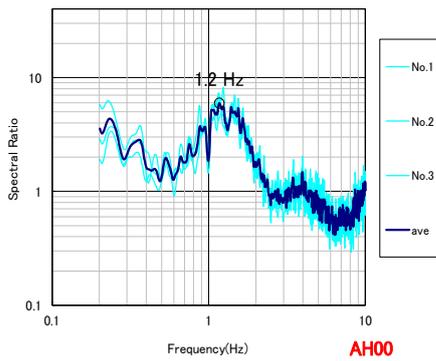
演概要集, Vol.28, 2001.

- 7) 土木学会：土木建造物の耐震基準等に関する提言「第三次提言」解説，2000.
- 8) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, 港研報告 Vol.29, No.4, 1990.
- 9) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Soil and foundations Vol.32, No.2, 1992.
- 10) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Parameter Identification for a Cyclic Mobility Model, 港研報告 Vol.29, No.4, 1990.
- 11) 入倉孝次郎：阪神・淡路大震災－防災研究への取り組み－阪神大震災を引き起こした強震動，京都大学防災研究所年報 No.39A, 1996.
- 12) 気象庁のホームページ（気象庁震度観測点），（<https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/jma-shindo.html>）
- 13) 錦織勇人，福永勇介，野津厚，宮田正史：港湾におけるレベル1地震動の補正手法に関する包括的整理，国土技術政策総合研究所資料 No.1065, 2019.
- 14) 岩田知孝，入倉孝次郎：観測された地震波から震源特性，伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み，地震2, Vol.39, 1986.
- 15) 長尾毅，山田雅行，野津厚：常時微動 H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性の経験的補正方法に関する研究，構造工学論文集, Vol.56A, 2010.
- 16) 福永勇介，野津厚，山田雅行，長坂陽介：常時微動 H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性の統計的な推定法の提案，土木学会第72回年次学術講演会，2017.
- 17) 野津厚，若井淳：東日本大震災で被災した港湾における地震動特性：港湾空港技術研究所資料 No.1244, 2011.
- 18) 国土技術政策総合技術研究所港湾施設研究室 HP（重要港湾以上の港湾のレベル1地震動），（<https://www.yokohama-nippon-fairtrade.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/level1.html>）.
- 19) 国土技術政策総合技術研究所港湾施設研究室 HP（地方港湾（56条港湾を含む）のレベル1地震動），（<https://www.yokohama-nippon-fairtrade.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu>）.
- 20) 中央防災会議（東南海，南海地震等に関する専門調査会）：長周期地震動の卓越周期と深部地盤の固有周期，2008，（https://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/tounankai_nankaijishin/pdf/shiryoku4.pdf）.
- 21) 国土地理院ホームページ（白地図の公開ページ）（<https://maps.gsi.go.jp/help/intro/school/blankmap.html>）.
- 22) QGIS のホームページ，（<https://qgis.org/ja/site/>）.
- 23) 産業技術総合研究所のホームページ（シームレス地質図），（<https://gbank.gsj.jp/seamless/index.html>）.
- 24) 鈴木晴彦，眞鍋俊平，永田伸也，山田能弘，長坂陽介，野津厚：岸壁の存在が常時微動観測結果に及ぼす影響に関する一検討 焼津漁港の事例，地盤工学会誌， Vol.64, No7, 2016.
- 25) 菅原法城，竹信正寛，宮田正史，福永勇介，野津厚，長坂陽介：常時微動観測による実橋固有周期の推定手法に関する基礎的検討，国土技術政策総合研究所資料, No. 1082, 2019.
- 26) 佐藤昌宏，久保田崇仁，山内浩，柴下達哉，服部俊朗，鬼童孝，川端稔教，野津厚：既設の直杭式横橋における常時微動観測による固有周期の算定について，沿岸技術研究センター論文集, No.17, 2018.
- 27) 長尾毅，平松和也，平井俊之，野津厚：高松港における被害地震の震度再現に関する研究，海洋開発論文集, Vol.22, 2006.

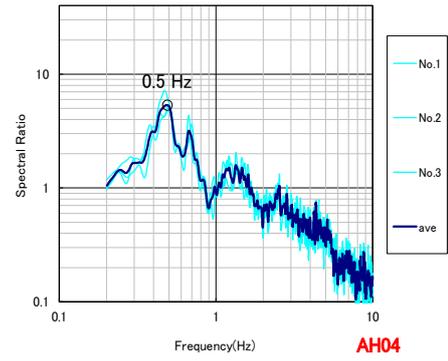
付録 A 八戸港の常時微動観測点と常時微動 H/スペクトル (八戸港湾・空港整備事務所提供)



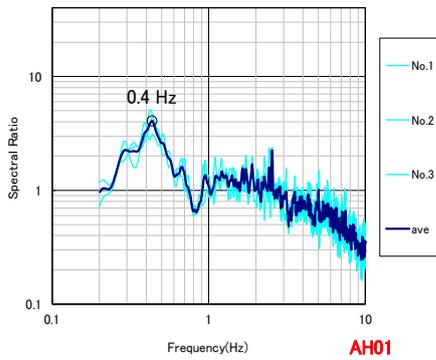
(A-1) 八戸港の常時微動観測点



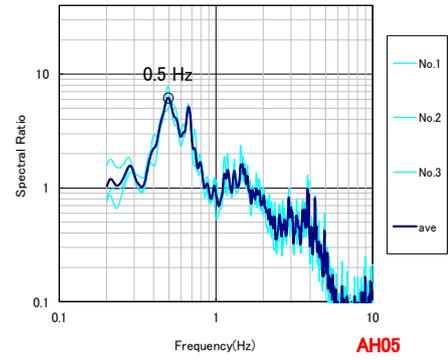
(A-2) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH00 (K-NET 八戸)



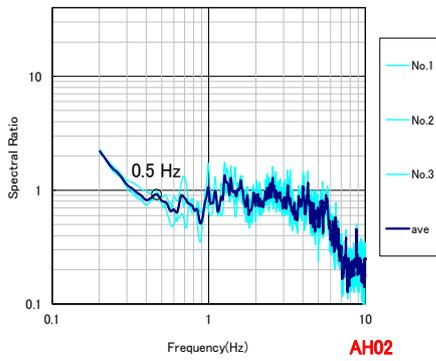
(A-6) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH04



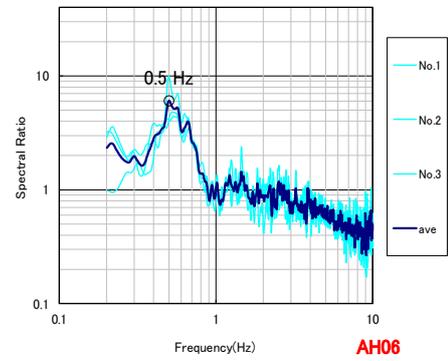
(A-3) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH01



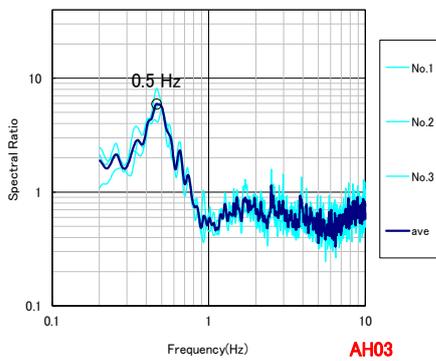
(A-7) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH05



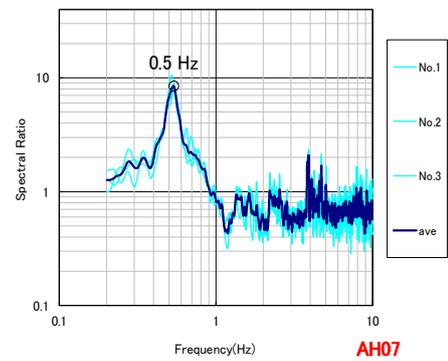
(A-4) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH02



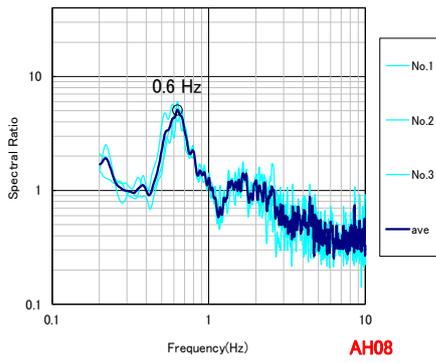
(A-8) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH06



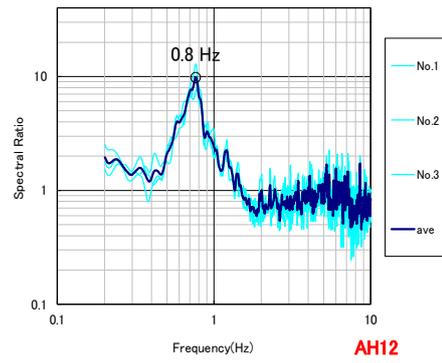
(A-5) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH03



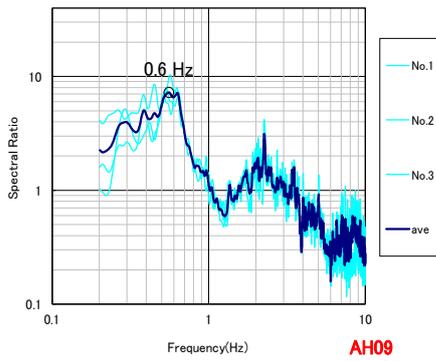
(A-9) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH07



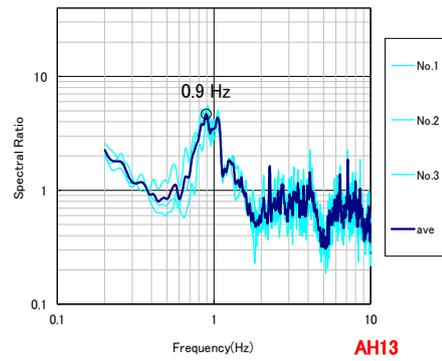
(A-10) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH08



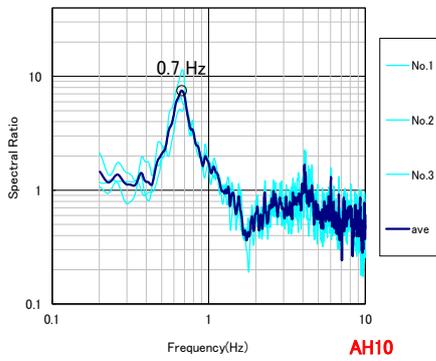
(A-14) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH12



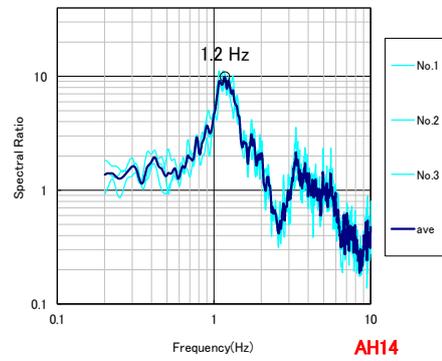
(A-11) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH09



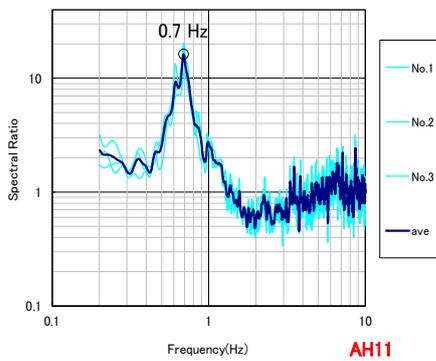
(A-15) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH13



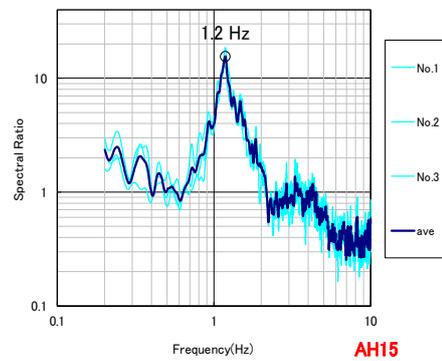
(A-12) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH10



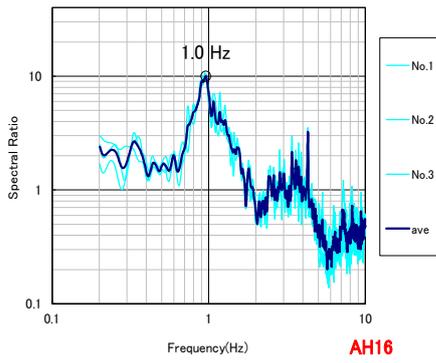
(A-16) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH14



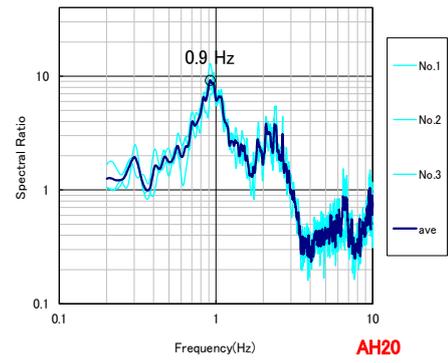
(A-13) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH11



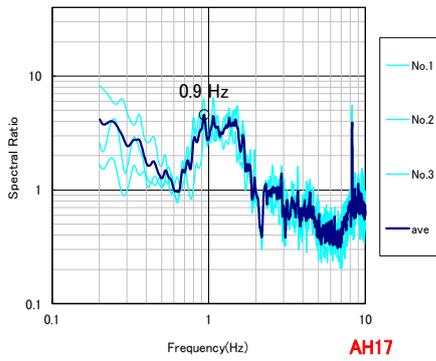
(A-17) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH15



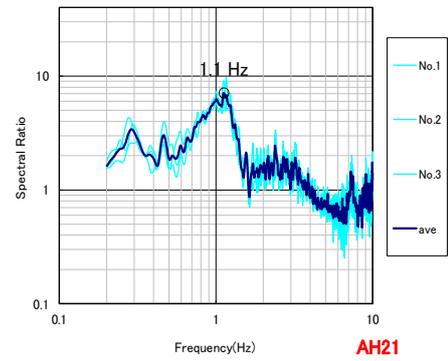
(A-18) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH16



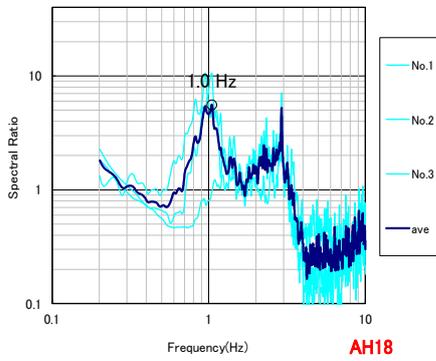
(A-22) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH20



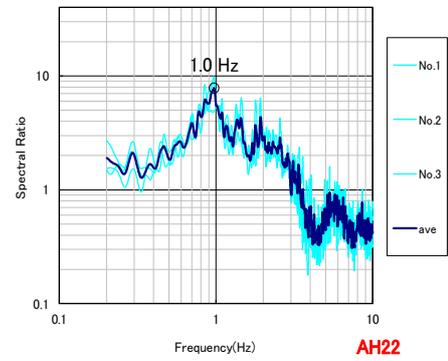
(A-19) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH17



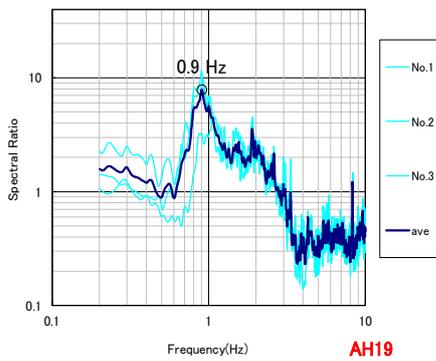
(A-23) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH21



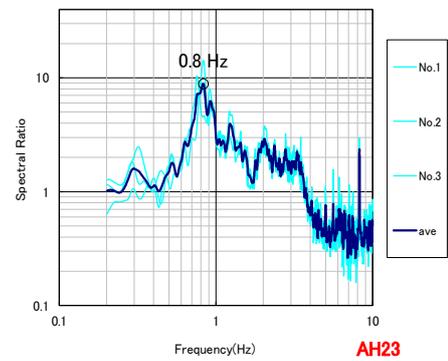
(A-20) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH18



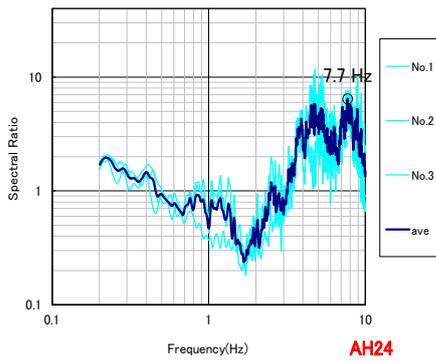
(A-24) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH22



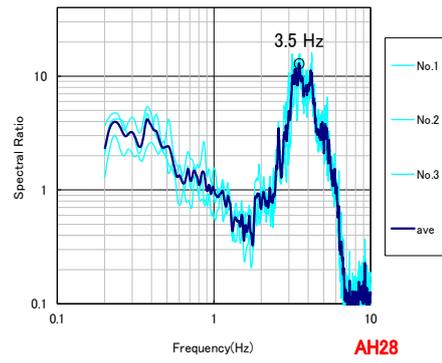
(A-21) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH19



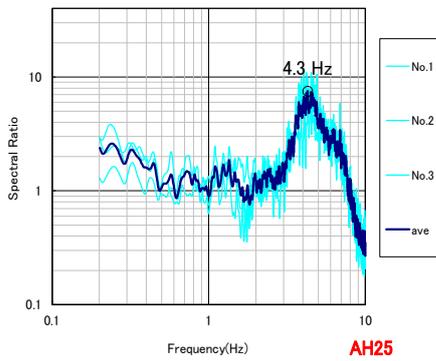
(A-25) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH23



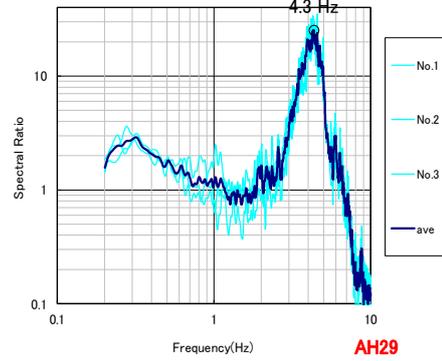
(A-26) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH24



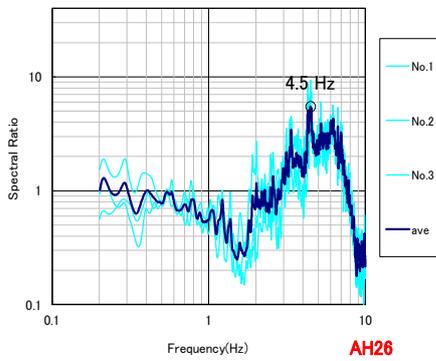
(A-30) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH28



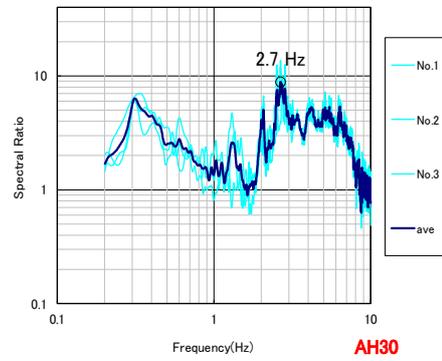
(A-27) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH25



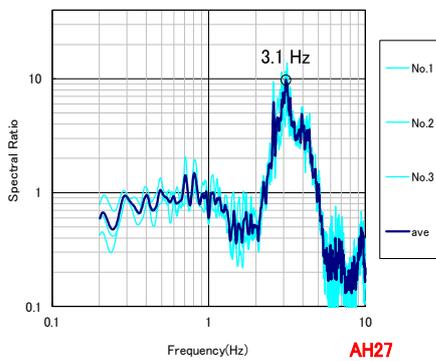
(A-31) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH29



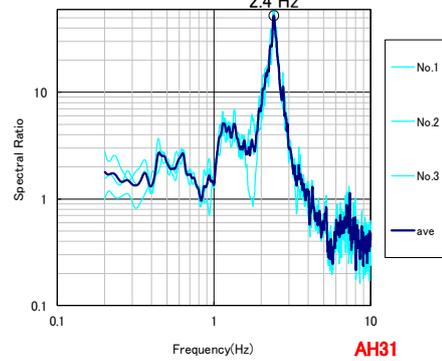
(A-28) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH26



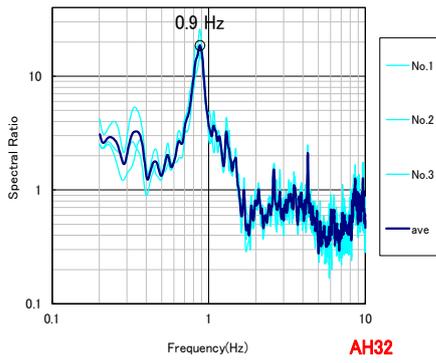
(A-32) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH30



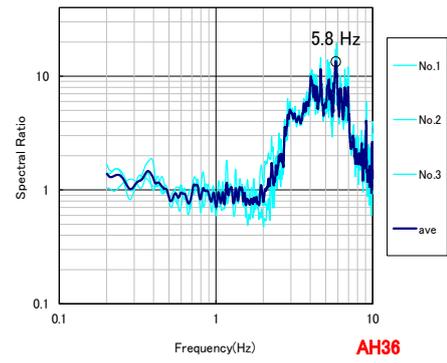
(A-29) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH27



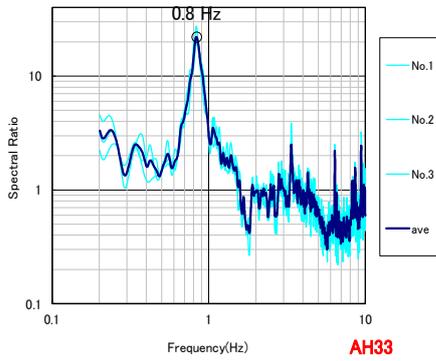
(A-33) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH31



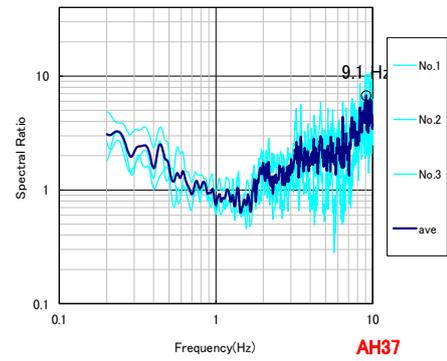
(A-34) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH32



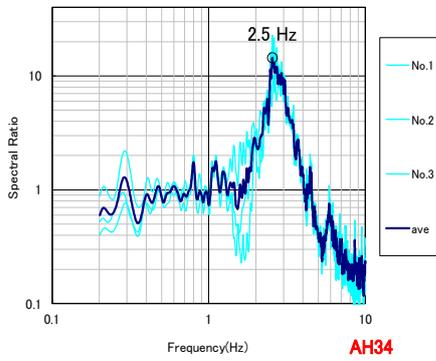
(A-38) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH36



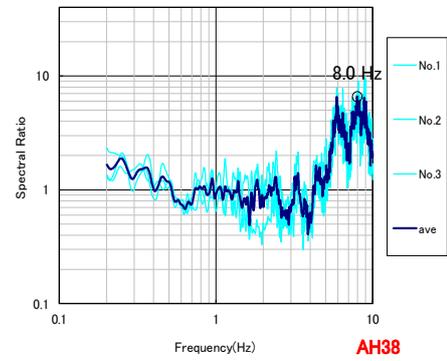
(A-35) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH33



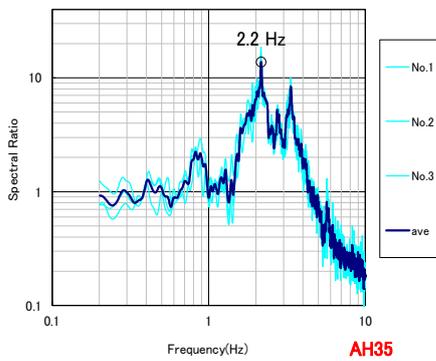
(A-39) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH37



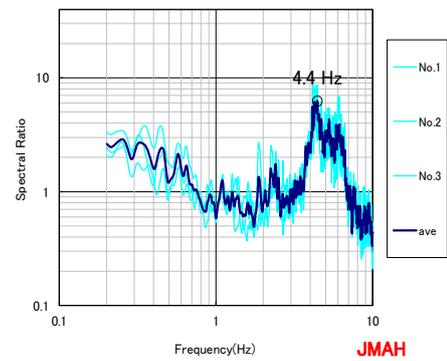
(A-36) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH34



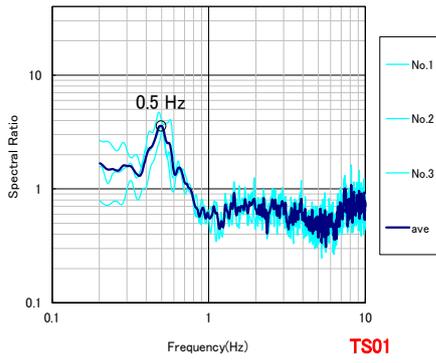
(A-40) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH38



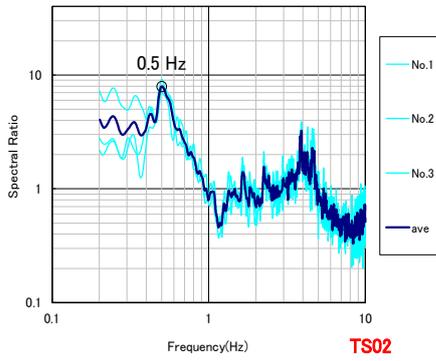
(A-37) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：AH35



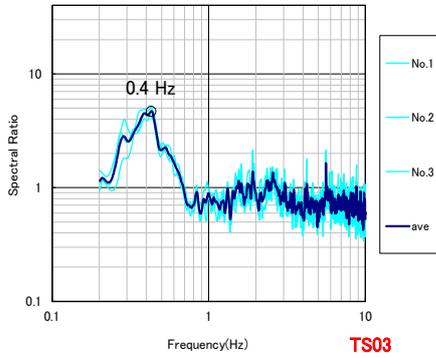
(A-41) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：JMAH



(A-42) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TS01

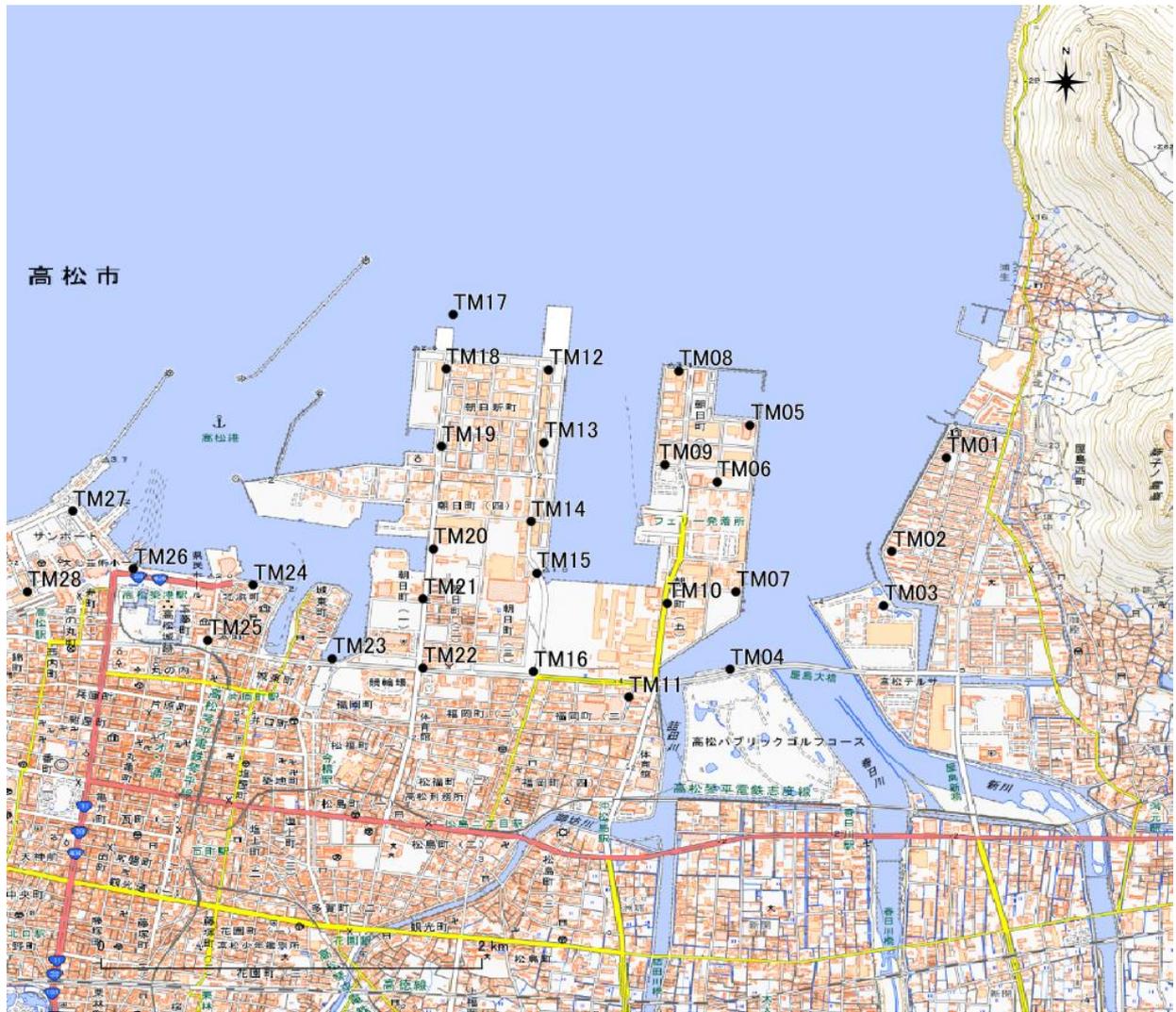


(A-43) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TS02



(A-44) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TS03

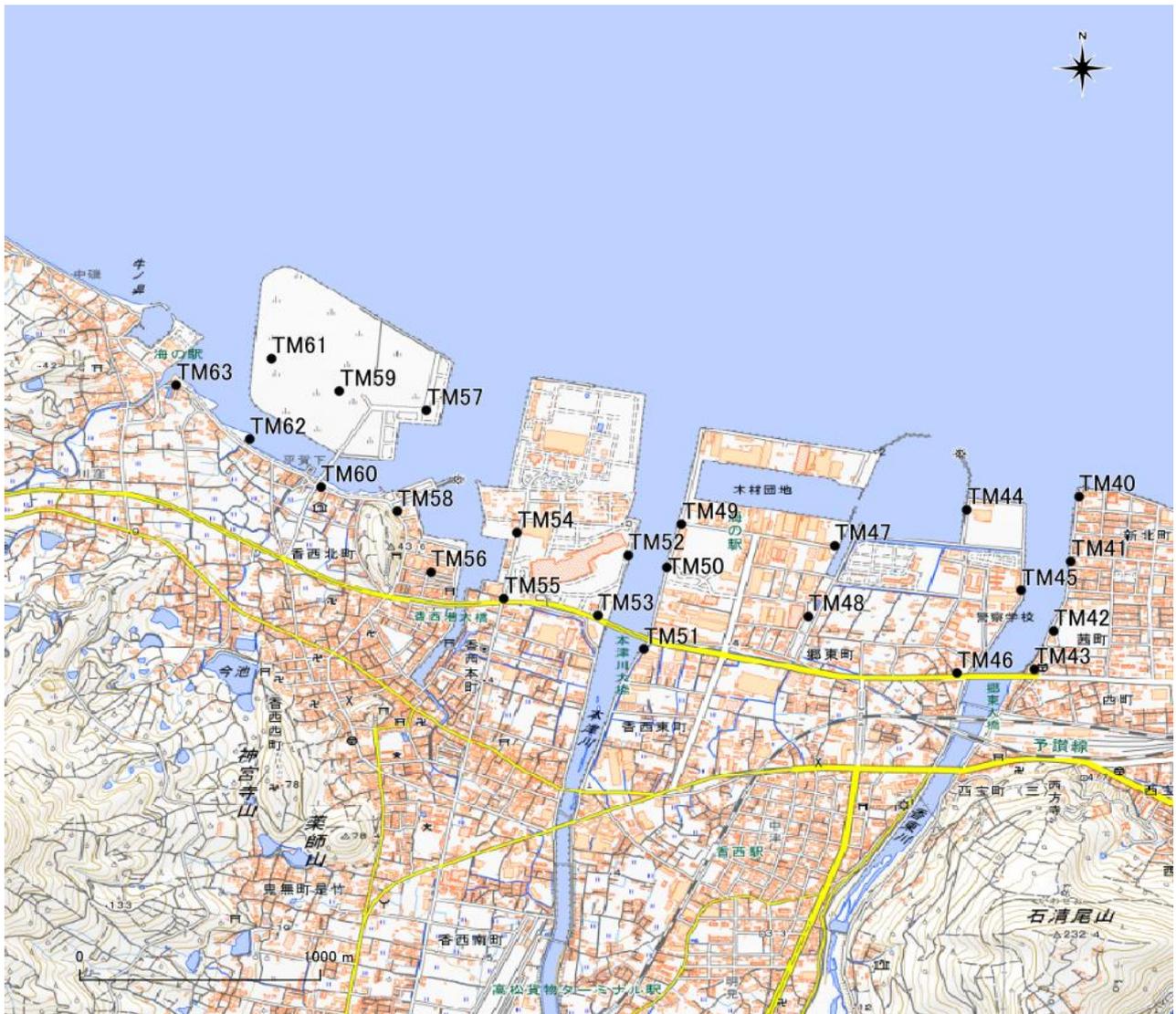
付録 B 高松港の常時微動観測点と常時微動 H/V スペクトル



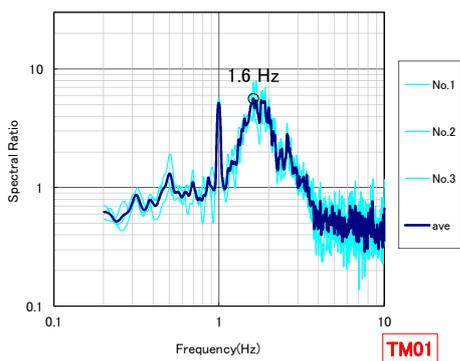
(B-1) 高松港の常時微動観測点 (朝日地区, 屋島地区)



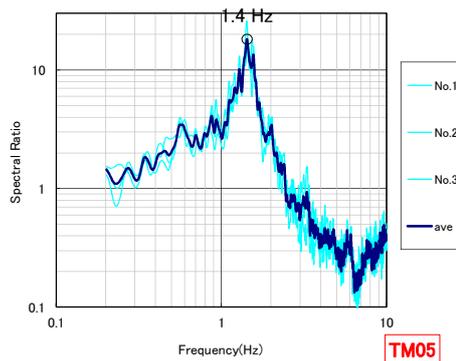
(B-2) 高松港の常時微動観測点 (玉藻地区, 西浜地区)



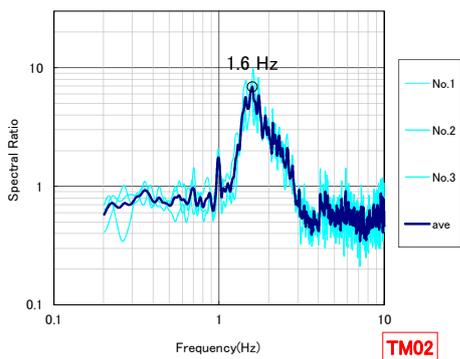
(B-3) 高松港の常時微動観測点 (弦打地区, 香西地区)



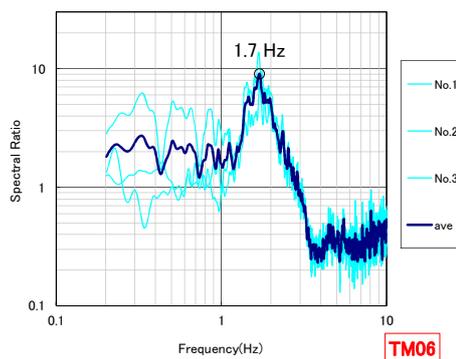
(B-4) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM01



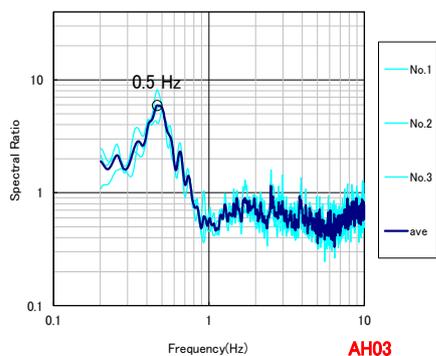
(B-8) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM05



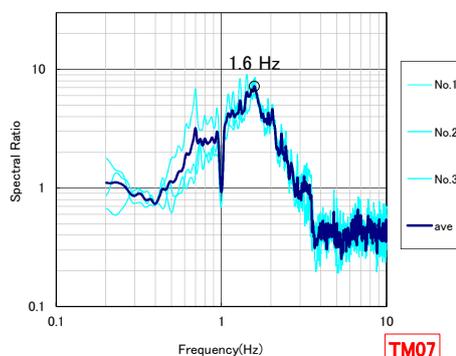
(B-5) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM02



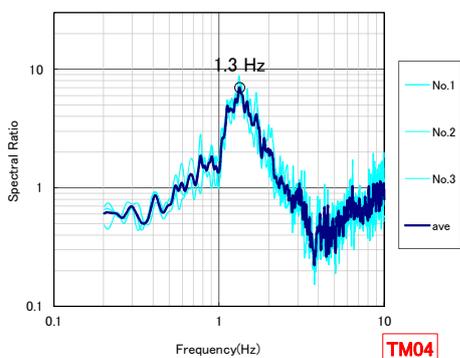
(B-9) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM06



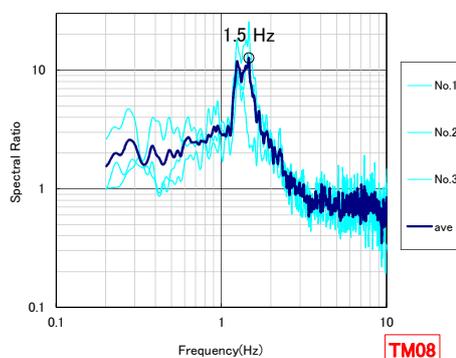
(B-6) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM03



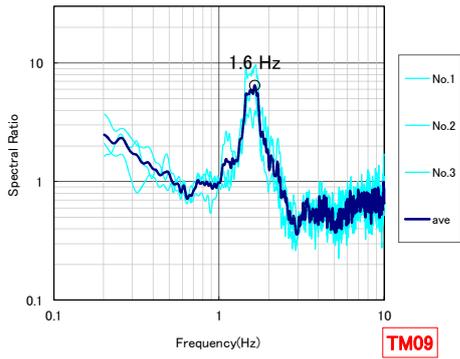
(B-10) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM07



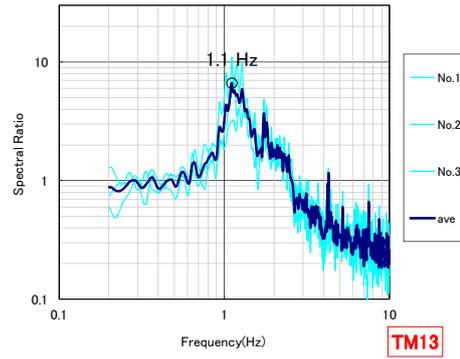
(B-7) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM04



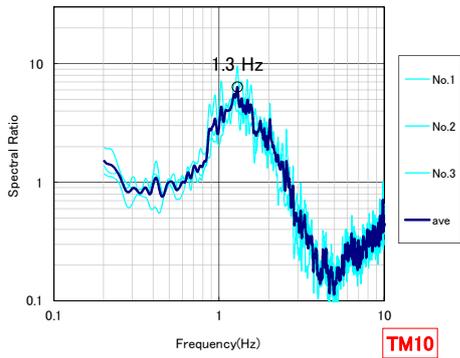
(B-11) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM08



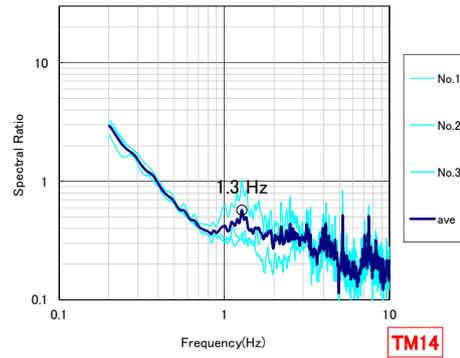
(B-12) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM09



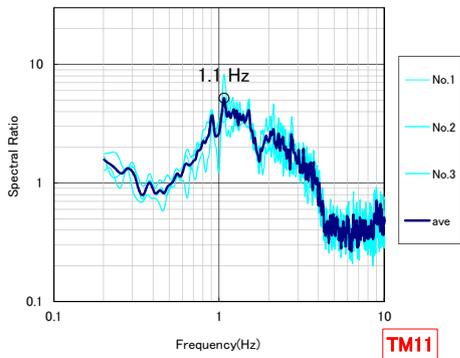
(B-16) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM13



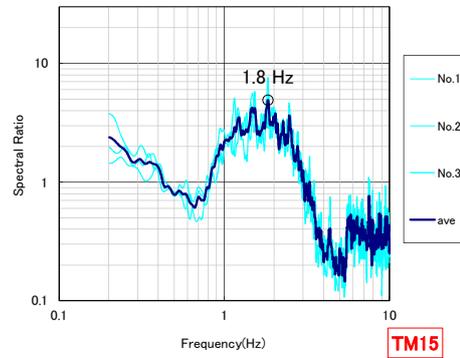
(B-13) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM10



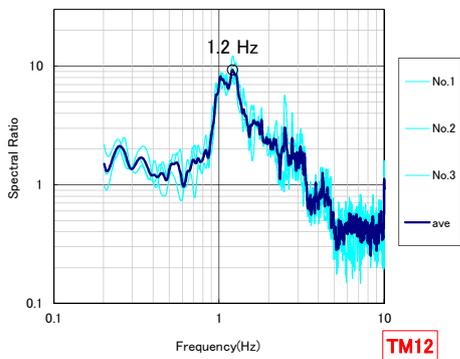
(B-17) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM14



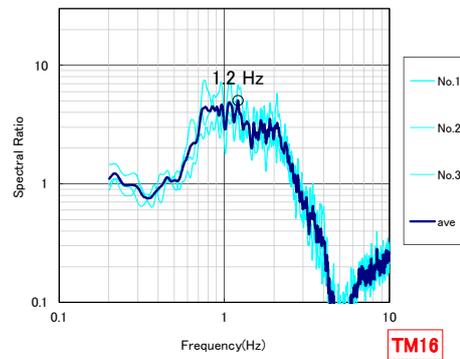
(B-14) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM11



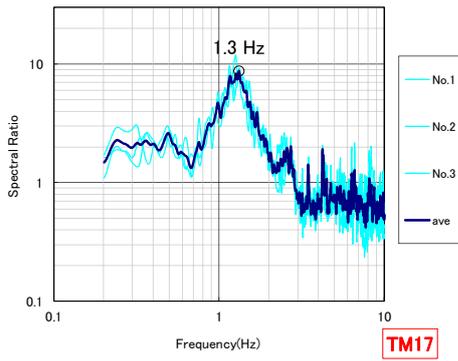
(B-18) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM15



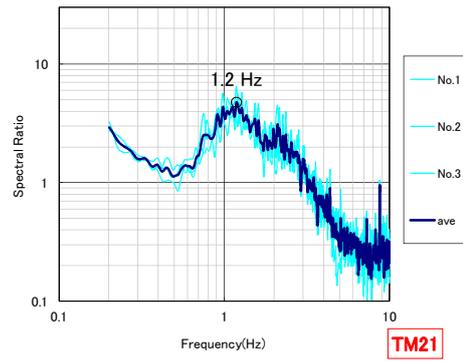
(B-15) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM12



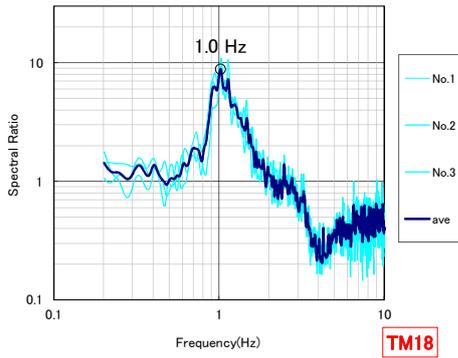
(B-19) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM16



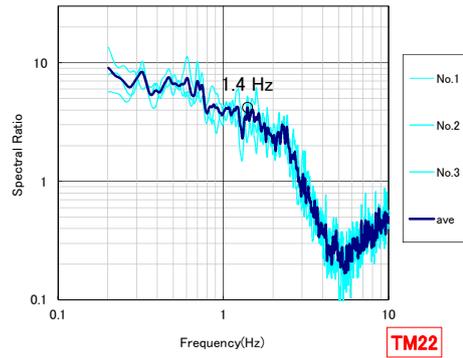
(B-20) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM17



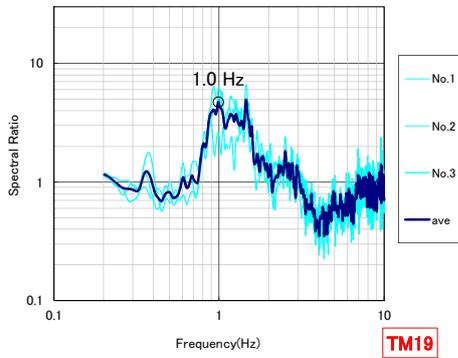
(B-24) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM21



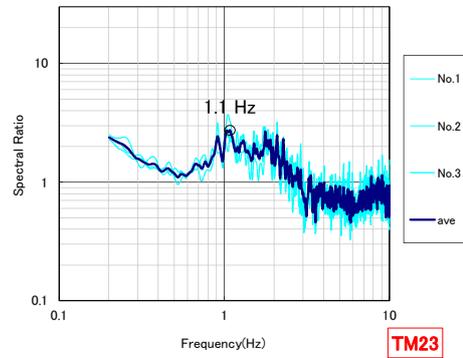
(B-21) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM18



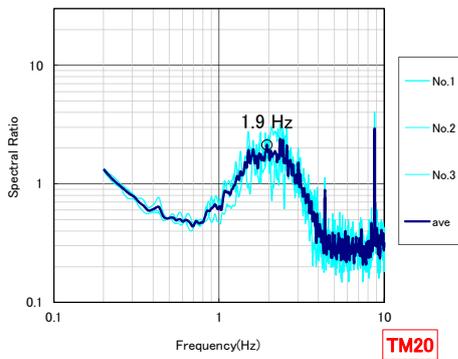
(B-25) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM22



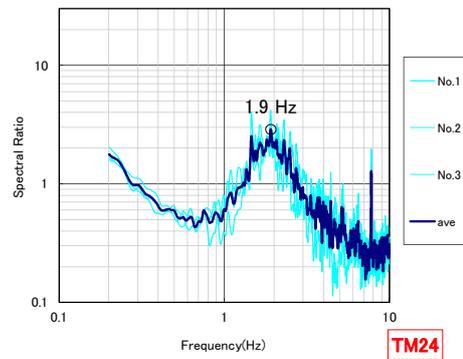
(B-22) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM19



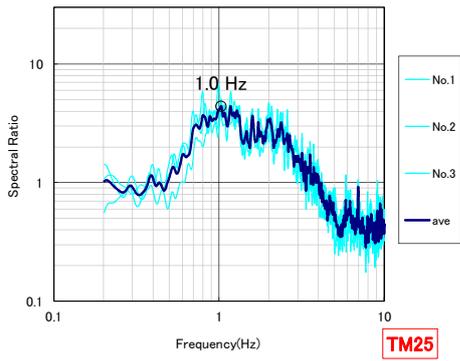
(B-26) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM23



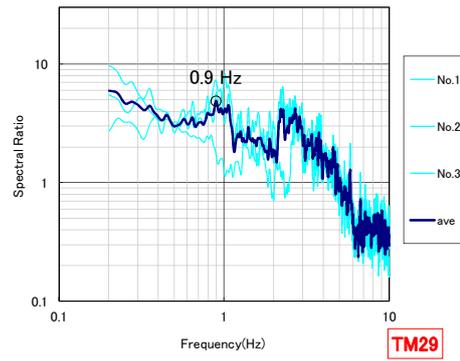
(B-23) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM20



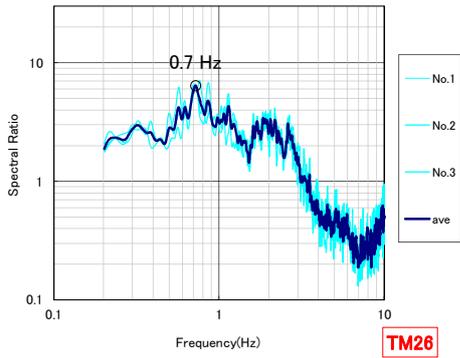
(B-27) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM24



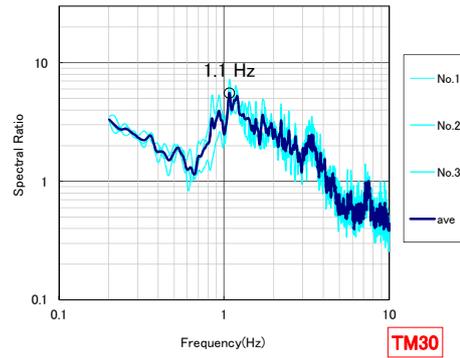
(B-28) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM25



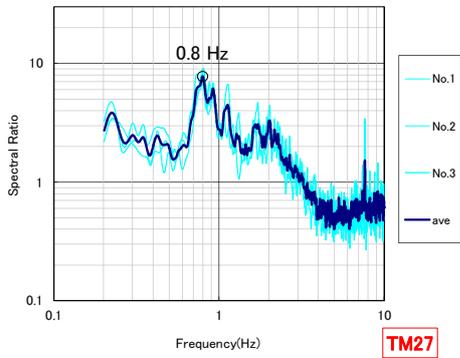
(B-32) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM29



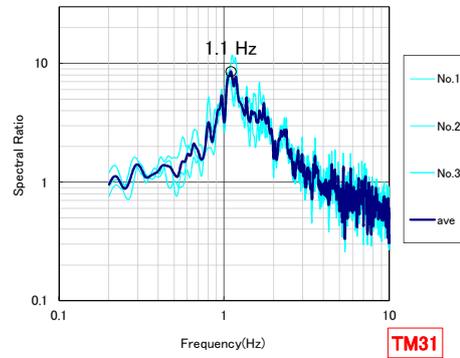
(B-29) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM26



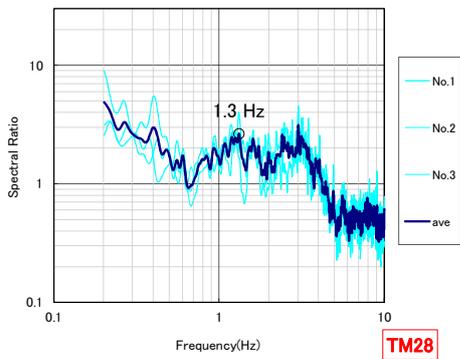
(B-33) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM30



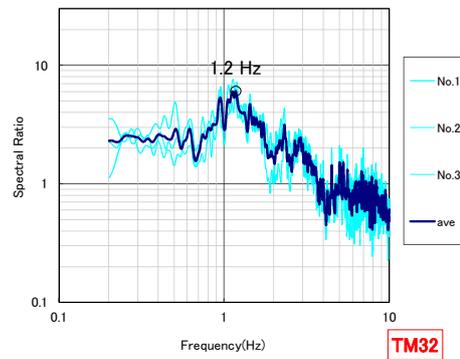
(B-30) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM27



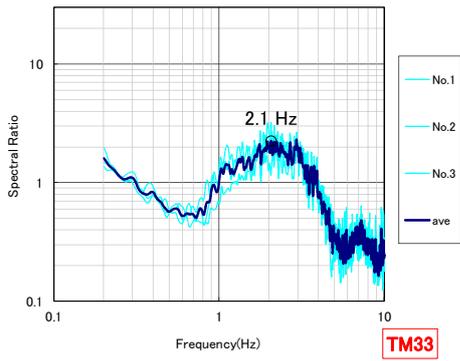
(B-34) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM31



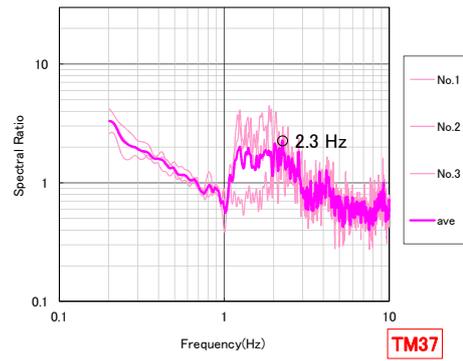
(B-31) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM28



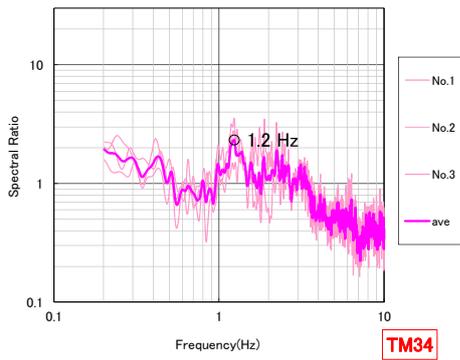
(B-35) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM32



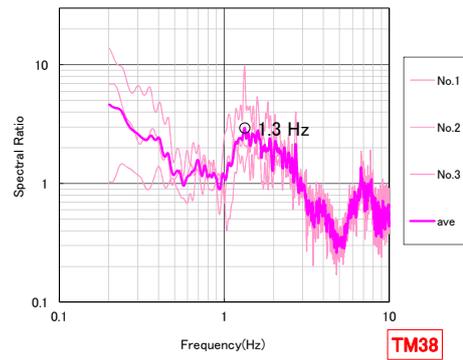
(B-36) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM33



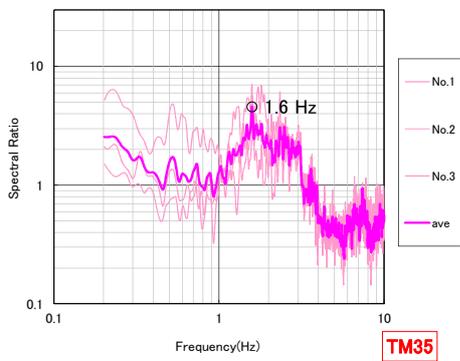
(B-40) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM37



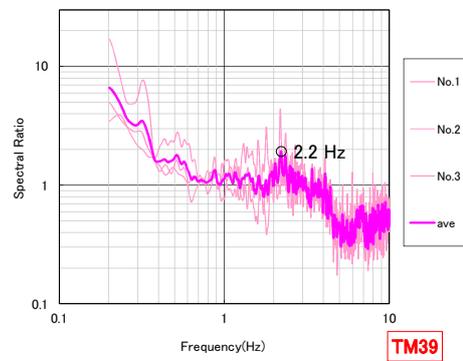
(B-37) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM34



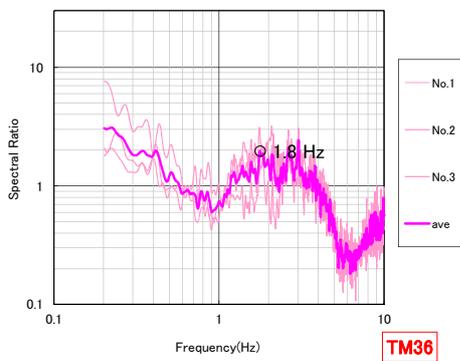
(B-41) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM38



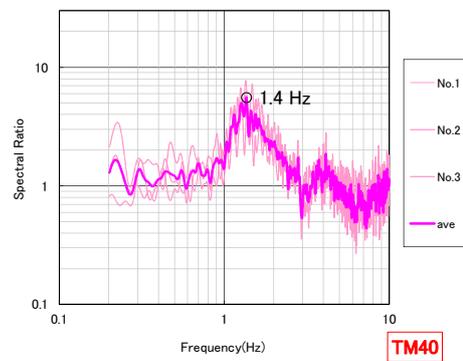
(B-38) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM35



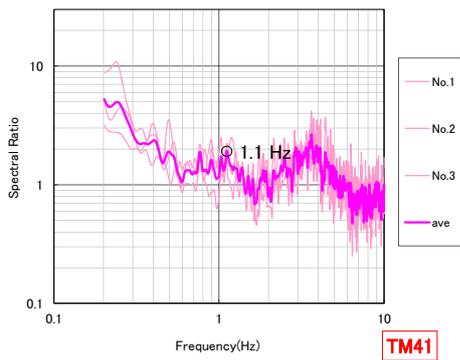
(B-42) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM39



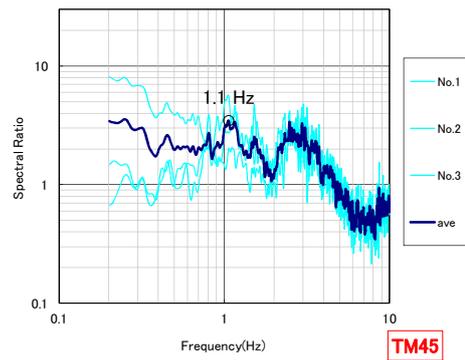
(B-39) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM36



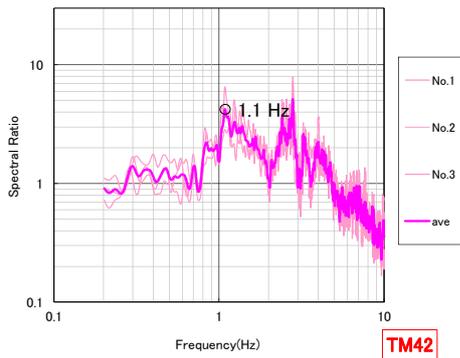
(B-43) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM40



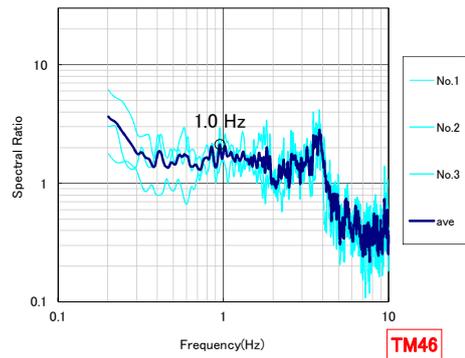
(B-44) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM41



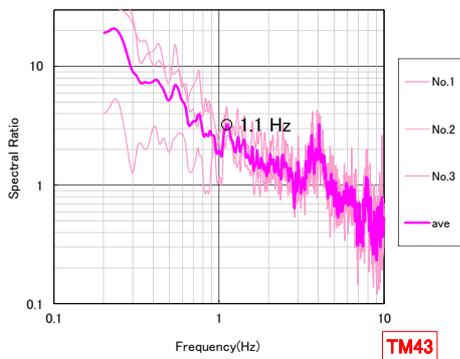
(B-48) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM45



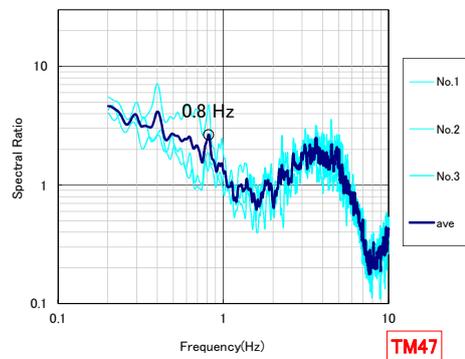
(B-45) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM42



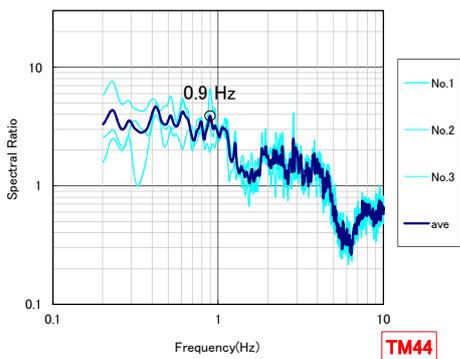
(B-49) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM46



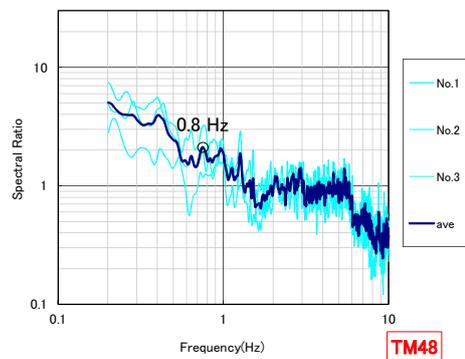
(B-46) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM43



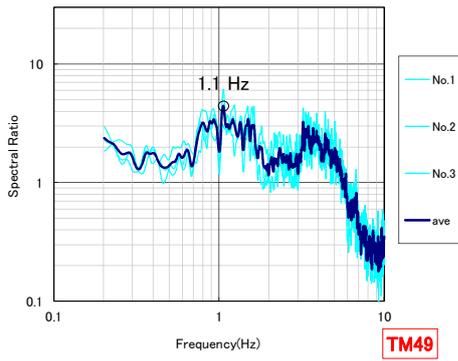
(B-50) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM47



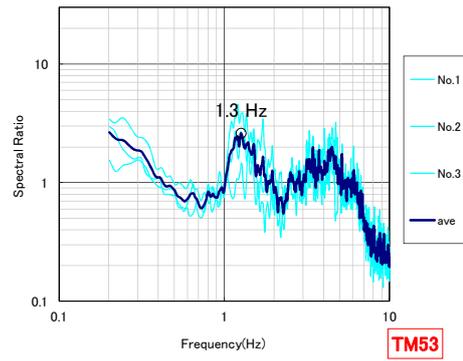
(B-47) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM44



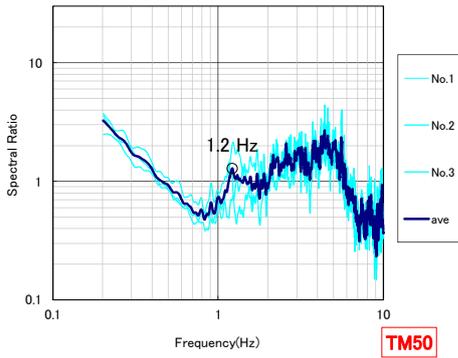
(B-51) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM48



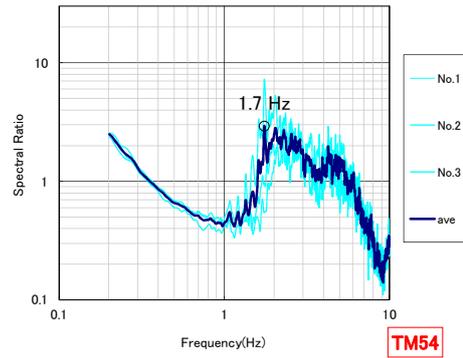
(B-52) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM49



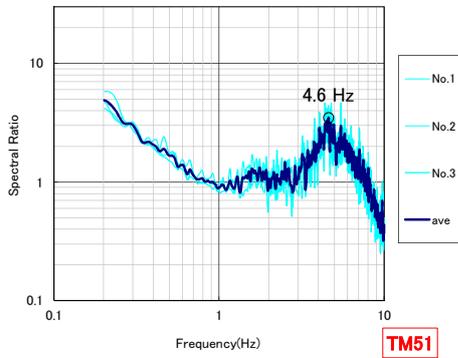
(B-56) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM53



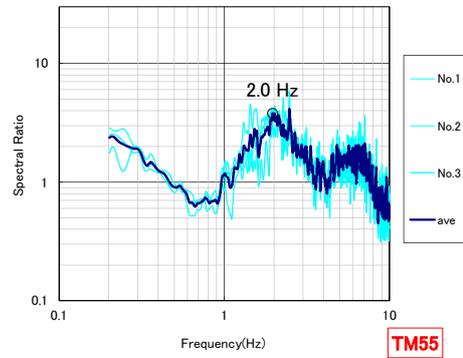
(B-53) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM50



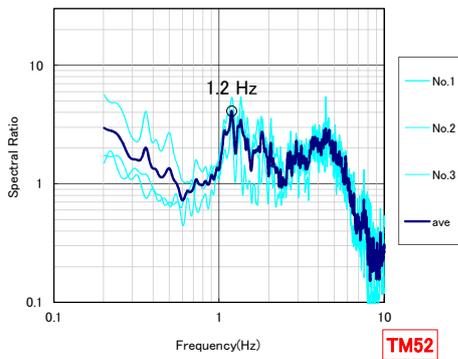
(B-57) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM54



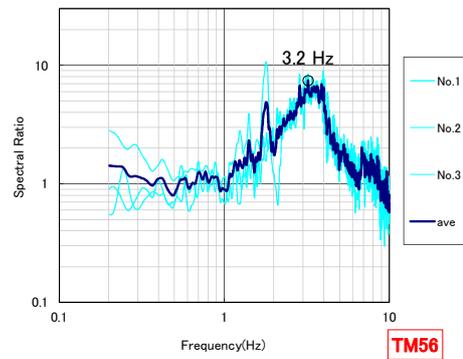
(B-54) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM51



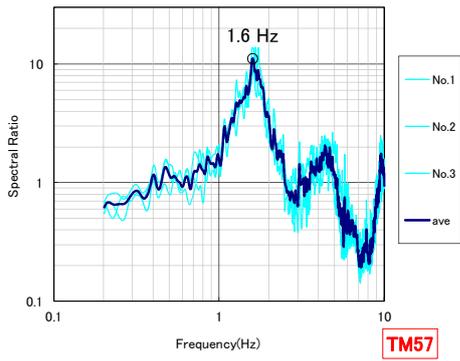
(B-58) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM55



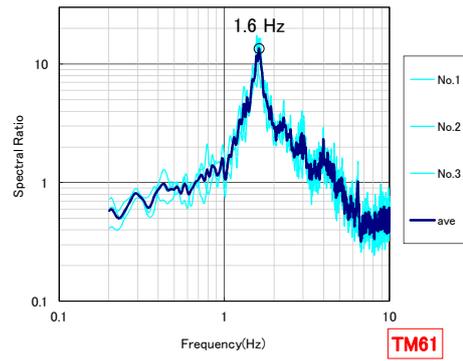
(B-55) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM52



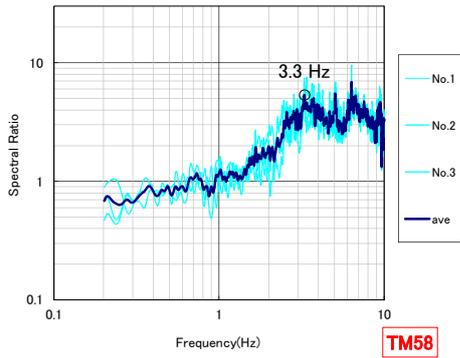
(B-59) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM56



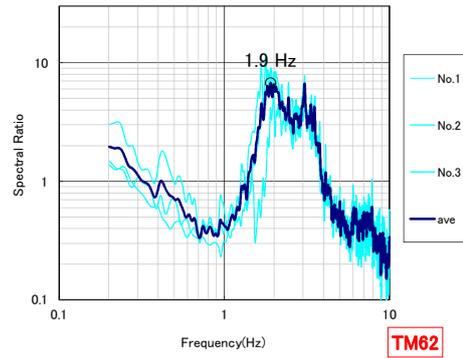
(B-60) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM57



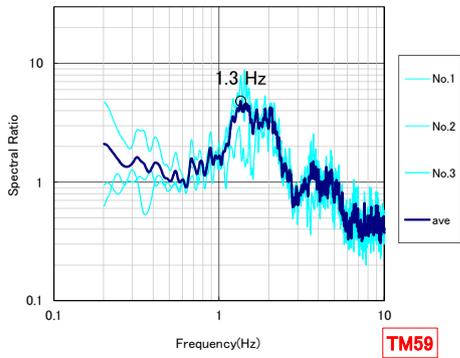
(B-64) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM61



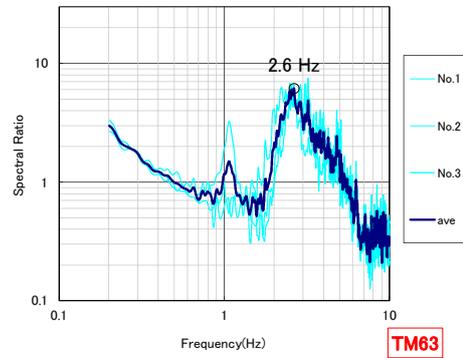
(B-61) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM58



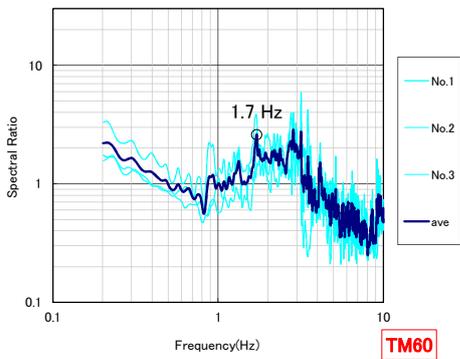
(B-65) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM62



(B-62) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM59



(B-66) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM63



(B-63) 常時微動 H/V スペクトル
観測点：TM60

付録 C 重要港湾以上の港湾でサイト増幅特性のゾーニングマップを作成した港湾の一覧

(C-1) 重要港湾以上の港湾でサイト増幅特性のゾーニングマップを作成した港湾の一覧表

北海道	横須賀港	岡山港	荻田港
稚内港	千葉港	宇野港	三池港
石狩湾新港	北陸	水島港	長崎港
根室港	直江津港	福山港	佐世保港
釧路港	両津港	尾道糸崎港	厳原港
十勝港	小木港	呉港	郷ノ浦港
室蘭港	七尾港	鳥取港	福江港
函館港	敦賀港	浜田港	中津港
留萌港	新潟港	西郷港	津久見港
網走港	伏木富山港	宇部港	佐伯港
紋別港	金沢港	三田尻中関港	唐津港
苫小牧港	中部	徳山下松港	伊万里港
小樽港	尾鷲港	岩国港	油津港
東北	津松阪港	広島港	熊本港
久慈港	三河港	境港	八代港
能代港	名古屋港	四国	三角港
八戸港	清水港	橘港	川内港
釜石港	四日市港	坂出港	西之表港
仙台塩釜港	田子の浦港	高松港	名瀬港
相馬港	御前崎港	宇和島港	細島港
小名浜港	衣浦港	今治港	宮崎港
青森港	近畿	東予港	大分港
宮古港	舞鶴港	新居浜港	別府港
大船渡港	堺泉北港	三島川之江港	鹿児島港
秋田港	阪南港	須崎港	志布志港
酒田港	姫路港	宿毛湾港	沖縄
関東	東播磨港	高知港	那覇港
茨城港	日高港	松山港	中城湾港
鹿島港	神戸港	徳島小松島港	平良港
木更津港	大阪港	九州	石垣港
東京港	和歌山下津港	下関港	
川崎港	尼崎西宮芦屋港	博多港	
横浜港	中国	北九州港	

付録 D 地方港湾（56 条港湾を含む）でサイト増幅特性のゾーニングマップを作成したゾーンの一覧

(D-1) 地方港湾（56 条港湾を含む）でサイト増幅特性のゾーニングマップを作成したゾーンの一覧表

北海道	熱海港	近畿	室津港
宗谷港	伊東港（川奈地区）	岩屋港（長浜地区）	上川口港
枝幸港	伊東港（伊東地区）	相生港（鰺浜地区）	甲浦港
天塩港	下田港	福良港	奈半利港
鬼脇港	松崎港	家島港（家島地区）	手結港
鴛泊港	宇久須港	家島港（網手地区）	久礼港
杓形港	土肥港	新宮港（佐野第一岸壁）	九州
香深港	沼津港	中国	呼子港
船泊港	相良港	田後港（浦富地区）	島原（三会地区）
浜猿払港	相良港（鬼女新田）	牛窓港	須川港
東北	浜名港	益田港（大塚地区）	茂木港
小本港①	手石港	来居港	田平港（田平地区）
小本港②	榛原港	重栖港	多比良港（南東部）
関東	大井川港	安芸津港	神ノ浦港
元町港	師崎港	御手洗港（三角地区）	松島港（釜浦地区）
岡田港	常滑港	蒲刈港（宮盛地区）	大島港（的山地区）
波浮港	吉田港	釣士田港（早瀬・藤協地区）	青方港
新島港	福江港	巖島港（杉之浦地区）	竹敷港
神津島港	東幡豆港	大竹港（小方地区）	早岐港（大島地区）
大久保港	河和港	安下庄港	上天草港
八重根港	千代崎港	由宇港	黒之浜港
神湊港	宇治山田港（神社地区）	角島港	里港
利島港	鳥羽港	四国	島間港
御蔵島港	浜島港	撫養港①	安房港
三池港	長島港	撫養港②	中之島港（中之島地区）
青ヶ島港	木本港	八幡浜港（沖新田地区）	瀬崎港
式根島港	白子港	寒川港	長島港（口之福浦港）
二見港	吉津港	中島港	湯湾港（湯湾地区）
二見港	的矢港	松前港（東レ前岸壁）	加計呂麻港（瀬武地区）
沖港	二木島港	玉津港	加計呂麻港
北陸	鶴殿港	玉津港	加計呂麻港（俵地区）
福井港	賀田港	御荘港	沖縄
中部	三木里港	三崎港	本部港

国土技術政策総合研究所研究報告

RESEARCH REPORT of NILIM

No. 75

March 2024

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〔〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019〕
E-mail:ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

