

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420577

研究課題名(和文) 微動の水平上下スペクトル比に基づく不整形地盤構造同定手法の開発

研究課題名(英文) Development of a Method to Identify the Heterogeneous Subsurface Structure based on the Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio of Microtremors

研究代表者

松島 信一 (Matsushima, Shinichi)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：30393565

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：微動の水平/上下のスペクトル比の方位依存性を定量的に推し量る指標として、方位依存パワーを定義した。これまでに蓄積したり、新たに観測したりした観測記録の分析から、地下構造の不整形性に基づく方位依存性を示す定量的指標として使用できることを確認した。方位依存性が顕著に見られる地点のうち、面的に観測した微動の水平上下スペクトル比から地下構造の不整形性が示唆された港湾地域強震観測網の小名浜観測点周辺において、拡散波動場における微動の水平上下スペクトル比の新しい解釈方法に基づいた地下構造の不整形性を考慮した解析により、観測された微動の水平上下スペクトル比に見られる方位依存性を再現することに成功した。

研究成果の概要(英文)：As an index to estimate the directional dependency of the Horizontal-to-Vertical spectral ratio of microtremors (MHVR), we defined an index called "directional dependent power". The index was found to be effective from the analysis of the observed data that has been accumulated over the years, as well as newly obtained ones.

At one of the sites that showed clear directional dependence, we calculated the numerical MHVRs according to the new interpretation of MHVRs based on the diffuse field assumption by using a two-dimensional subsurface structure model. The target area was the area surrounding the Onahama strong motion observation station of the strong-motion earthquake observation network in port areas in Japan where the heterogeneity of the subsurface structure was suggested from the directional dependence of spatially distributed observed microtremor MHVRs. As a result, the numerical MHVRs showed a fairly good match to the observed ones.

研究分野：地震工学

キーワード：拡散波動場 微動 水平上下スペクトル比 不整形地盤構造 方位依存性 数値解析 方位依存パワー

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 微動を利用した地盤構造の振動特性の把握手法として、微動の水平/上下のスペクトル比 (MHVR) は観測方法が簡便であることから、研究のみならず実務にも数多く用いられている。利用方法としては、MHVR のピーク振動数による地盤種別の分類やピーク振動数などをターゲットにした地盤構造の同定などである。地盤構造の同定には、MHVR は表面波 (主に Ralyeigh 波) の水平成分と上下成分の振幅比に対応すると解釈する方法 (例えば、堀家(1980)、時松・他(1994) や S 波の増幅率 (基盤から地表までの地盤の伝達関数) であると解釈する方法 (例えば、中村(1988))、などが用いられてきた。これらの方法では、MHVR を計算するためには水平成層構造を仮定する必要がある。

(2) 最近になって、MHVR の新しい解釈として拡散波動場における自己相関関数と MHVR を結びつける新しい考え方 (Sánchez-Sesma・他, 2011) が提案されている。この方法では、拡散波動場では MHVR は加振点と受信点と同じ場合の水平加振に対する水平応答のグリーン関数の虚部と上下加振に対する上下応答のグリーン関数の虚部との比の平方根から求めることができ、ピーク振動数のみならず振幅の情報も使うことが出来る。また、グリーン関数の虚部が計算できれば MHVR が計算できるため、水平成層構造を仮定する必要がなく、不整形地盤における MHVR も計算することが可能である。

## 2. 研究の目的

(1) MHVR は簡便で利用価値が高いが、不整形地盤の影響がある場合は、水平成層構造を仮定した解析では誤った地盤構造を同定してしまう可能性がある。Sánchez-Sesma・他(2011)により提案されている新しい解釈に基づく計算方法では、MHVR のピーク振動数のみならず振幅情報を使ってより高精度な地盤構造が同定できる可能性が高い。さらに、不整形地盤における MHVR も計算することが可能であり、不整形地盤の同定も可能であると考えられる。

(2) このような状況を踏まえると、観測 MHVR を解釈する際に水平 2 成分を平均して求める従来の方法ではなく、水平 2 成分を別々に上下成分との比を取る方法で MHVR を計算することにより、不整形地盤の影響の有無を確認することが可能である。そして、両者が同じ特性を示す場合は水平成層構造と見なし、両者が異なる特性を示す場合は何かしら地盤の不整形性が存在することを考慮して、地盤構造の同定を行うことができるようになり、より高精度な地盤構造の同定が可能であると考えられる。

(3) 本研究では、以下の課題を達成することを目的として研究を行った。

① これまでに蓄積してきたデータを再整理し、必要に応じて新たに微動観測を行い、直交する水平 2 成分の平均ではなく 2 成分の方向別の MHVR に分解し、不整形地盤の影響がどのように現れているかを確認する。2 成分の MHVR を比較し、水平成層構造とみなせるか不整形地盤とみなすべきかの定量的な指標を提案する。

② 定量的指標により MHVR を観測した地点の地盤構造が水平成層構造だとみなせる場合について、水平成層構造を仮定して MHVR を計算し、観測 MHVR のピーク振動数および振幅値から地盤を同定する方法を開発する。

③ 定量的指標により不整形地盤とみなすべき場合について、二次元、三次元地下構造をモデル化し、スペクトルエレメント法などの三次元地盤構造を考慮できる数値解析手法を用いて MHVR を計算し、二次元、三次元構造を考慮した地盤同定を行う方法を開発する。

## 3. 研究の方法

(1) まず、過去に観測した現有の微動観測データを整理し、現有の微動観測データから、水平 2 成分についてそれぞれ上下成分との比をとって観測 MHVR を計算し、比較する。不整形地盤があると推定される地点では観測 MHVR に方位依存性が見られると考えられるため、水平成層地盤とみなせるか、不整形地盤であるかを判別する。

(2) 地盤の不整形性が既知の地点において観測 MHVR と不整形地盤の関係について整理する。方位依存性が見られる観測 MHVR を用いて、水平 2 成分の MHVR の差から不整形地盤かどうかを判断する定量的な指標を提案する。

(3) 水平成層構造と見なせる地点については、理論 MHVR を計算し、観測 MHVR のピーク振動数および振幅値から地盤を同定する方法を開発する。

(4) 方位依存性が顕著な地点において、スペクトルエレメント法などの三次元構造を考慮できる数値解析手法を用いて Sánchez-Sesma・他(2011)の方法により理論 MHVR を計算し、観測 MHVR のピーク振動数および振幅値から二次元、三次元構造を考慮した地盤同定を行う方法を開発する。

## 4. 研究成果

(1) 京都大学宇治キャンパス内の 4 地点で観測した微動の MHVR を水平 2 成分をそれぞれ上下成分との比をとることで、方位別の MHVR を計算した。その結果、図 1 に示すように、南北成分 (NS) / 上下成分 (UD)

と東西成分 (EW) /UD では、ピーク振幅およびピークとなる振動数が異なることが分かった。

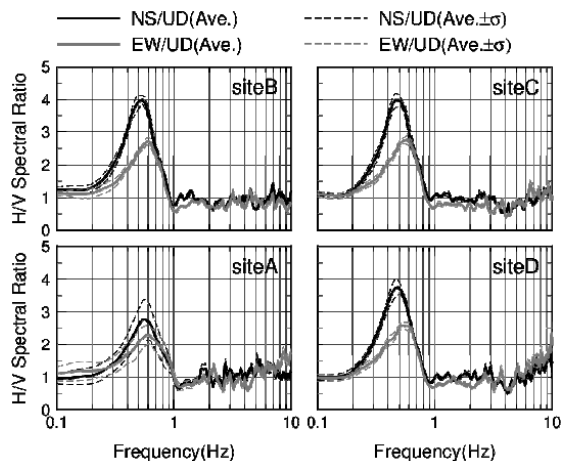


図1 京都大学宇治キャンパス内において観測された微動の水平上下スペクトル比 (Matsushima et al., 2014)

(2) 京都大学宇治キャンパスは、東側に位置する黄檗断層の断層運動により形成された盆地端部に位置し、基盤深さが東から西に向かって深くなる不整形性を有している一方で、断層は概ね南北に続いているため、南北方向の地盤構造は大きく変化していないことが推測される。図1に示したMHVRの方位依存性は、この地盤構造に起因しているものと考え、既往の調査結果に基づき2次元地盤構造モデルを構築した。この二次元地盤構造モデルを用いて、MHVRを計算するために、数値解析手法の一つであるスペクトルエレメント法 (De Martin, 2011) を用いた。図2に、数値解析により求めたMHVRを示す。点線が2次元盆地構造モデルを用いた場合のMHVRであり、黒点線がNS/UD、灰点線がEW/UDである。実線は、水平成層構造を仮定した場合のMHVRであり、顕著に差があることが分かる。図2の点線は赤線と青線で示す観測MHVRの方位依存性を定性的には再現できている。

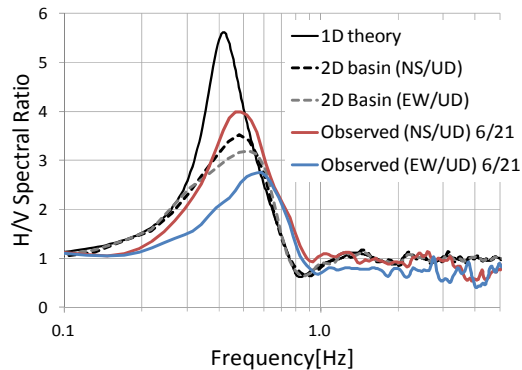


図2 数値解析により求めた理論水平上下スペクトル比 (黒点線: 理論NS/UD、灰点線: 理論EW/UD、実線: 水平成層構造、赤: 観測NS/UD、青観測EW/UD) (Matsushima et al., 2014 に加筆)

(3) 大阪盆地南部および京都盆地の複数地点において面的に微動観測を行った結果、観測MHVRには顕著な方位依存性が見られる地点がなかった。そこで、大阪盆地南部および京都盆地においては各微動観測点において水平成層構造を仮定し、地盤構造の同定を行った。図3に、京都盆地内の地点における観測MHVRとそれに基づき修正した地盤構造に基づく理論MHVRの比較の一例を示す。理論MHVRは観測MHVRの1Hz付近について良く再現できた。

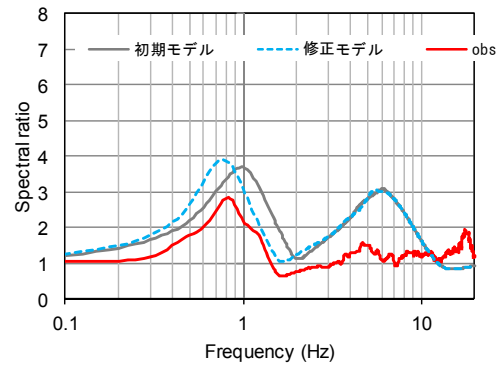


図3 理論MHVR (青点線: 修正モデル、灰実線: 初期モデル) と観測MHVRの比較 (吹原・他、2015 に加筆)

(4) 2011年東北地方太平洋沖地震の直後まで強震観測が行われていた港湾地域強震観測網の小名浜観測点が位置していた、福島県いわき市小名浜の国土交通省東北地方整備局小名浜港湾事務所の敷地内及びその周辺において微動観測や表面波探査などの地盤構造調査を行ったところ、微動MHVRに方位依存性が見られ、表面波探査結果から地盤の不整形性が確認された。図4に示す60地点における微動MHVRの中で図5のように方位依存性を示す地点と図6のように方位依存性を示さない地点があった。ここで、式(1)に示す方位依存パワー $\gamma$ を用いて方位依存性の有無について調べたところ、図4のように $\gamma$ の大きいところが一部に集中して表れた。

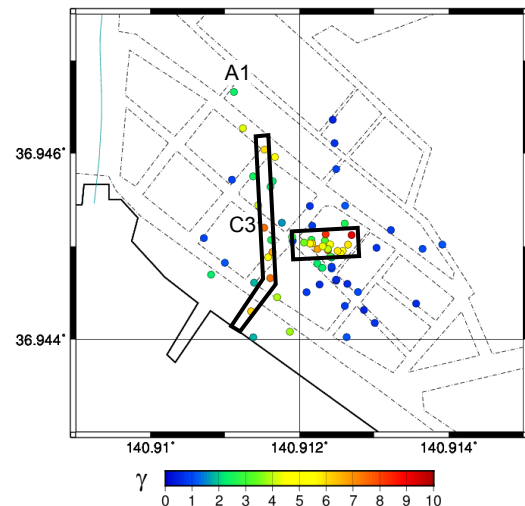


図4 小名浜港湾事務所周辺の微動観測点

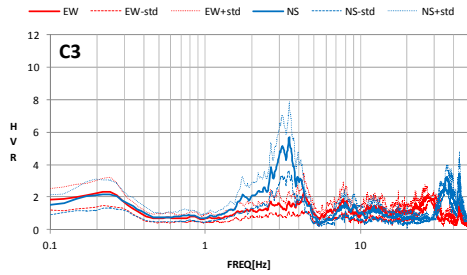


図5 C3地点におけるMHVR (赤線: NS/UD、青線: EW/UD、点線: 平均±標準偏差)

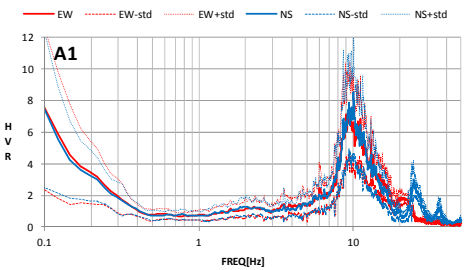


図6 A1地点におけるMHVR (図5と同じ)

$$\gamma = \frac{1}{N} \cdot \sum_{f_1}^{f_2} \frac{\sqrt{|NS^2 - EW^2|}}{RMS} \quad (1)$$

(5) 小名浜観測点における方位依存性が大きい地点が帯状に並んでいて、溝状の不整形性が存在する可能性を示唆していることから図7のような断面の地盤構造モデルを仮定して、数値解析によりMHVRを計算した。その結果、観測MHVRに見られる方位依存性が定性的に再現できた。NS/UDのピーク振動数にずれはあるものの、EW/UDはほぼ同じMHVRが得られた。この結果は不整形地盤構造の形状と地盤を伝わる波の速度構造が観測MHVRから同定できることを示している。

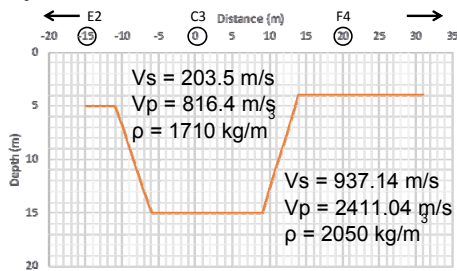


図7 C3地点を東西方向に横切る断面における地盤構造

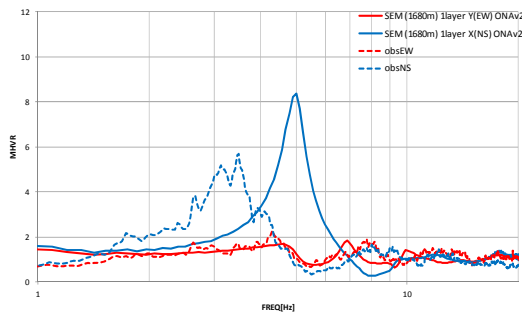


図8 C3地点における理論MHVR (実線) と観測MHVR (点線) の比較 (赤線: NS/UD、青線: EW/UD)

<引用文献>

- ① 堀家正則、微動の位相速度及び伝達関数の推定、地震2、33、1980、425-442
- ② 中村豊、常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定、鉄道総研報告、Vol.2、No.4、1998、18-27
- ③ 時松孝次、仲條有二、田村修次、短周期微動の水平鉛直振幅比と地盤特性の関係、日本建築学会構造系論文集、3、No.457、1994、11-18
- ④ Sánchez-Sesma, F. J., M. Rodríguez, U. Iturrarán-Viveros, F. Luzón, M. Campillo, L. Margerin, A. García-Jerez, M. Suarez, M. A. Santoyo, and A. Rodríguez-Castellanos, A theory for microtremor H/V spectral ratio: Application for a layered medium, Geophysical Journal International Express Letters, 186(1), 2011, 221-225, doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05064.x.
- ⑤ De Martin, F, Verification of a spectral-element method code for the southern California earthquake center LOH.3 viscoelastic case, Bulletin of the Seismological Society of America, 101 (6), 2011, 2855-2865

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3件)

- ① 吹原慧、松島信一、川瀬博、強震動予測のための地震動と微動を用いた京都盆地速度構造モデルの拡散波動場理論による同定に関する研究、日本地震工学会論文集、第15巻、第6号、2015、60-76  
[http://doi.org/10.5610/jaee.15.6\\_60](http://doi.org/10.5610/jaee.15.6_60)
- ② 飛田幸樹、川瀬博、松島信一、常時微動を用いた大阪平野南部における地盤構造の推定、日本地震工学会論文集、第14巻、第2号、2014、104-123  
[http://doi.org/10.5610/jaee.14.2\\_104](http://doi.org/10.5610/jaee.14.2_104)
- ③ Matsushima, Shinichi, Takanori Hirokawa, Florent De Martin, Hiroshi Kawase, and Francisco J. Sánchez-Sesma, The Effect of Lateral Heterogeneity on Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio of Microtremors Inferred from Observation and Synthetics, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.104, No.1, 2014, 381-393  
doi:10.1785/0120120321, 2014.2.

[学会発表] (計 18件)

- ① Matsushima, Shinichi, Hiroyuki Kosaka, Toba Kobayashi, and Hiroshi Kawase, Directional Dependent H/V Spectral Ratio of Microtremors at Onahama, Japan, Seismological Society of America 2016 Annual Meeting, 2016
- ② Furuoka, Yuri, Shinichi Matsushima, Hiroshi Kawase, John G. Anderson, and

Travis W. Loyd, Evaluations of the effects of the basin edge in H/V spectral ratios of microtremors based on diffuse field interpretation, Seismological Society of America 2016 Annual Meeting, 2016

③ Fukuoka, Yuri, Shinichi Matsushima, Hiroshi Kawase, and Francisco J. Sánchez-Sesma, The Relation between the Directional Dependent Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios of Microtremors and the Lateral Heterogeneity at the Basin Edge, 26th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) IASPEI symposia, 2015

④ Matsushima, Shinichi, Hiroyuki Kosaka, Toba Kobayashi, Hiroshi Kawase, Directional Dependent H/V Spectral Ratio of Microtremors at Onahama, Japan, Seismological Society of America 2016 Annual Meeting, 2016

⑤ Mori, Yuta, Hiroshi Kawase, Shinichi Matsushima, and Fumiaki Nagashima, Inversion of Velocity Structures Based on the Empirical Relationship of Earthquake and Microtremor Horizontal-to-Vertical Ratios, Seismological Society of America 2016 Annual Meeting, 2016

⑥ 松島信一、ドマルタンフロロン、川瀬博、サンチェスセスマフランシスコ、拡散波動場における微動の理論水平上下スペクトル比の方位依存性と不整形基盤形状の関係、第14回日本地震工学シンポジウム、2014、OS3-Thu-PM2-2

⑦ 小阪宏之、松島信一、川瀬博、ボアホール強震観測点近傍でのMASWの推定速度構造とボーリング調査結果に基づいた微動H/Vスペクトル比理論解との観測値との対応について、第14回日本地震工学シンポジウム、2014、OS3-Thu-PM2-1

⑧ 森勇太、長嶋史明、松島信一、川瀬博、地震動の水平上下比を用いた地下構造の推定とその構造から求められる微動の水平上下比理論解との関係、第14回日本地震工学シンポジウム、2014、OS3-Thu-PM2-8

⑨ 吹原慧、松島信一、川瀬博、地震動H/Vスペクトル比を用いた京都市の地盤同定その1 京都市消防署観測点における検討、日本地震学会2014年秋季大会予稿集、2014、D31-04

⑩ Matsushima, Shinichi, Yuri Fukuoka, Hiroshi Kawase, Florent De Martin, and Francisco J. Sánchez-Sesma, The Effect of the Basin Edge to the Directional Dependent Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios of Microtremors, The 7th AUN/SEED-Net Geological Engineering Conference & The 2nd AUN/SEED-Net Natural Disaster Conference, 2014

⑪ 松島信一、川瀬博、微動H/Vスペクトル

比の方位依存性と不整形基盤形状の関係、日本建築学会学術講演梗概集、Vol.B2、2014、351-352

⑫ Matsushima, Shinichi, Florent De Martin, Hiroshi Kawase, and Francisco J. Sánchez-Sesma, The Effect of The Basin Edge to the Directional Dependent Horizontal-To-Vertical Spectral Ratios of Microtremors, Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul Aug.25-29, 2014, No.1595

⑬ 松島信一、ドマルタンフロロン、川瀬博、福岡侑里、サンチェスセスマフランシスコ、盆地端部形状が微動の水平上下スペクトル比に与える影響、日本地球惑星科学連合2014年大会予稿集、2014、SSS35-08

⑭ 松島信一、Florent De Martin、川瀬博、Francisco J. Sanchez-Sesma、廣川貴則、微動H/Vスペクトル比の方位依存性と盆地端部形状の関係、日本地震工学学会年次大会2013予稿集、2013

⑮ 松島信一、De Martin Florent、川瀬博、Sánchez-Sesma Francisco J.、廣川貴則、不整形な基盤の形状と微動のH/Vスペクトル比の関係について—その1 盆地端部の形状—、日本地震学会秋季大会予稿集、2013、B22-05

⑯ 飛田幸樹、川瀬博、松島信一、常時微動を用いた大阪平野南部における地盤構造の推定、日本建築学会学術講演梗概集、Vol.B2、2013、209-210

⑰ Matsushima, Shinichi, Florent De Martin, Hiroshi Kawase, Francisco J. Sánchez-Sesma, and Takanori Hirokawa, Numerical simulation of H/V spectral ratios of microtremors with directional dependence caused by lateral heterogeneity, IUGG IAHS-IAPSO-IASPEI Joint Assembly, S104PS.03, 2013

⑱ 飛田幸樹、川瀬博、松島信一、常時微動を用いた大阪平野南部における地盤構造の推定、日本地球惑星科学連合2013年大会予稿集、2013、SSS33-01

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松島 信一 (MATSUSHIMA, Shinichi)  
京都大学・防災研究所・准教授  
研究者番号： 30393565

### (2) 研究分担者

川瀬 博 (KAWASE, Hiroshi)  
京都大学・防災研究所・教授  
研究者番号： 30311856