

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560670

研究課題名(和文) 広帯域強震動予測のための微動探査手法の不整形地盤領域における推定精度の検証

研究課題名(英文) Verification of Velocity structures estimation in a irregular subsurface structure using the microtremor H/V spectral method

研究代表者

上林 宏敏 (Uebayashi, Hirotoishi)

京都大学・原子炉実験所・准教授

研究者番号：30300312

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)：微動の水平動と上下動のスペクトル比(H/Vスペクトル)は水平成層地盤構造(1次元構造)の推定に利用されてきた。本研究では大阪堆積盆地の断層帯近傍や盆地端部のような地層境界面が不整形な3次元構造域のH/Vスペクトルが1次元構造から求まるH/Vスペクトルとは異なることを数値実験によって示した。H/Vスペクトルにおいて、ピーク値、ピーク周波数およびスペクトル形状の3指標に着目し3次元と1次元構造モデル間の差を評価した。また、ピーク値については不整形性の度合いが強い領域ほど異方性(水平動の振幅が方位によって変わる)が見られた。

研究成果の概要(英文)：Beyond the traditional framework of the 1-D velocity structure, the horizontal-to-vertical spectral ratio (HVSr) of microseisms, derived from full-wave field in a three-dimensional topographical model (the Osaka sedimentary basin) was produced by finite differential method (FDM)-based simulation. The FDM simulations confirmed the phenomena such as the polarization of the peak amplitude of the HVSr in grabens and step structures in the sediment-bedrock interface. In addition, it was showed that the features of the peak frequency, the peak value and the shape of HVSr in areas with strong irregularities in the sediment-bedrock interface are different from those of the HVSr estimation based on the 1-D velocity structure model.

研究分野：工学・建築学・建築構造・材料・地震防災

キーワード：強震動予測 地下構造推定 3次元モデル 微動 水平・上下動スペクトル比 差分法 大阪堆積盆地

1. 研究開始当初の背景

シナリオ型の強震動予測手法が構造物の耐震設計や耐震照査に適用されている。一般的に周期 2~3 秒程度を境として長周期側は地震基盤から工学基盤迄の不整形(水平方向に地層境界深度が変化)な領域を含む速度構造モデルを用いて、波動方程式に基づく地震動予測波形が求められている。工学基盤以浅の表層地盤による増幅特性については、S 波 1 次元重複反射理論を用いて評価されるケースが多い。しかしながら、軟弱な沖積層が厚く堆積している平野では、表層地盤の増幅特性が S 波 1 次元重複反射理論のみでは説明が困難な周期 1~2 秒の表面波が生成され、地表面では継続時間が長い大振幅の揺れとなることが報告されている。さらに、表層の不整形性は沖積層で増幅する表面波の発生や伝播様式に影響するだけでなく、数秒以下の短周期成分を含む S 波の散乱を発生させることで地震動の振幅や位相の空間変動を大きくする。従って、短周期~長周期までの広帯域の強震動予測の高精度化には、沖積層から地震基盤までの浅部構造と深部構造をシームレスに繋げた速度構造のモデル化が必要である。

2. 研究の目的

(1) 速度構造の推定において、1 次元(柱状)速度構造が直接得られるボアホール探査法と 2 次元弾性波反射断面図が得られる反射法探査法が現在、最も推定精度が高いと考えられる。しかしながら、これらの手法は高コストであることや交通規制の必要性などの機能上の問題があるため、堆積盆地全域の 3 次元速度構造を隈無く正確に表現するために必要な探査地点数や測線数を展開するまでには至っていない。

(2) 微動探査手法は低コストで機動性があること、観測および解析が容易であることから近年、多用されている。既往の微動探査手法として、微動の多くの成分が速度構造によって特徴づけられる表面波と解釈し、分散曲線と水平動と上下動のスペクトル比(以下、H/V スペクトルと称す)に着目した二つの方法が使われている。これらの手法は理論的に 1 次元速度構造モデルを対象としており、不整形な構造領域を推定する場合、観測点直下の 1 次元速度構造を空間的に補間することにより求める場合が多く、不整形性が強い場所での推定精度が低くなる可能性がある。また、工学基盤を境とする浅部と深部の構造を先見的に分けた上で、独立して速度構造の推定が行われている場合が多く、レイリー波とラブ波及びそれらの波の高次モードの影響を考慮した場合におけるこの仮定の妥当性が必ずしも明確化されていないのが現状である。

(3) 微動に含まれるレイリー波とラブ波及び

各波のモード成分のエネルギーの割合は震動源の時空間特性に加えて、不整形構造の影響を大きく受ける。また、不整形性が強い領域では波動散乱により、表面波以外の実体波の割合も大きくなると考えられる。従って不整形構造およびその周辺領域における浅部及び深部のシームレスな速度構造の推定において、既往の微動探査手法の適用限界の明確化と高度化(平行成層構造モデルの仮定に基づかない不整形構造の波動場を正確に反映できる数値シミュレーションモデルの構築)は重要な課題である。

(4) 本研究では微動 H/V スペクトルにおける不整形地盤構造の微動波動場を数値実験により再現し、不整形性の度合いによる既往の 1 次元速度構造モデルに基づく推定手法の精度の検証を行う。

3. 研究の方法

(1) 既に提案されている 3 次元大阪堆積盆地構造モデル(産業技術総合研究所、2003、大阪府、2005)(図 1 の下段)を対象に、周期 1 秒程度以上の微動のシミュレーションを行った。シミュレーション波形を用いて、3 次元構造の影響を考慮した H/V スペクトルの分析を行った。これら分析結果から 1 次元構造モデルに基づいて推定した構造と実際の構造(3 次元モデルの各評価地点直下)の比較を行い、地下構造の推定誤差と構造の不整形性度合いとの比較検討を行った。

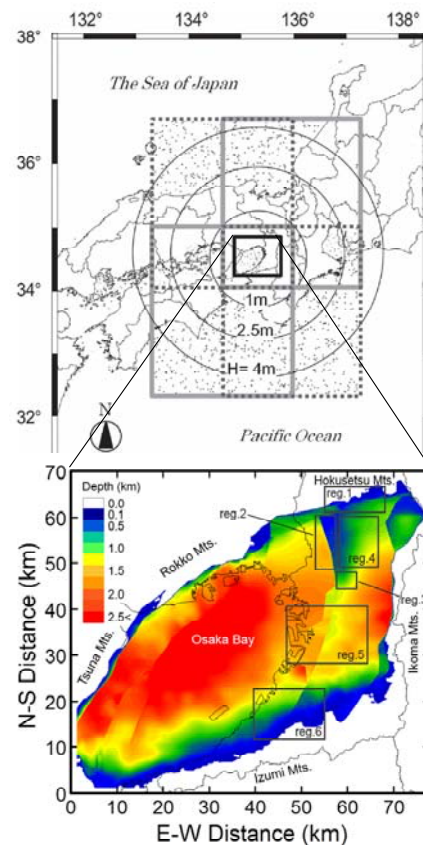


図 1 微動の点震源分布(上段)と大阪堆積盆地モデルの基盤面深度(下段)

(2) 微動のシミュレーション波形の震源は海洋波浪による海底面の圧力変動を模擬した点震源を海域相当位置に分布させた (図 1 の上段)。

(3) 3次元地下構造の影響を考慮した H/V スペクトルは、図 1 のモデルを用いた波動場を差分法により求めた。大阪堆積盆地モデル上の多地点の模擬波形から求めた H/V スペクトル $[(H/V)_{3D}]$ と各点直下の 1次元構造から理論的に求めた同スペクトル $[(H/V)_{1D}]$ における残差率をピーク周波数 (f_p)、ピーク値 (A_p)、0.2~1.0Hz 帯域のスペクトル値 (H/V) の 3つの指標に対して求め (式 1~3)、各点周辺の基盤面形状の不整形度合いとの関係について調べた。式(3)の I は H/V スペクトルのデータ数である。

$$R_f = \left| f_{P,3D} - f_{P,1D} \right| / f_{P,3D} \quad (1)$$

$$R_A = \left| A_{P,3D} - A_{P,1D} \right| / A_{P,3D} \quad (2)$$

$$R_{HV} = I^{-1} \sum_{i=1}^I \left| (H/V)_{3Di} - (H/V)_{1Di} \right| / (H/V)_{3Di} \quad (3)$$

4. 研究成果

(1) H/V スペクトルの残差率の分布と基盤構造の関係

H/V スペクトルの残差率 (図 2~4) と図 1 との比較から、基盤深度が急変する地域や盆地端部の基盤面深度が浅く傾斜している地域では、いずれの残差率も 0.4~0.6 程度以上の大きな値となっている。一方、それ以外の地域では、大阪湾の中央部から西側にかけての地域を除いて、いずれの残差率も 0.2~0.3 程度以下の小さな値となっている。このことは、基盤深度が急変する地域や盆地端部の地域では、地下構造の不整形性が H/V スペクトルに与える影響の大きいことを示唆している。なお、大阪湾の中央部から西側にかけて

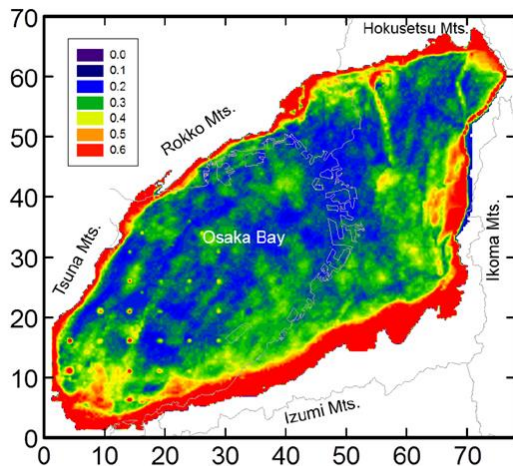


図 2 H/V スペクトル値残差率(R_{HV})

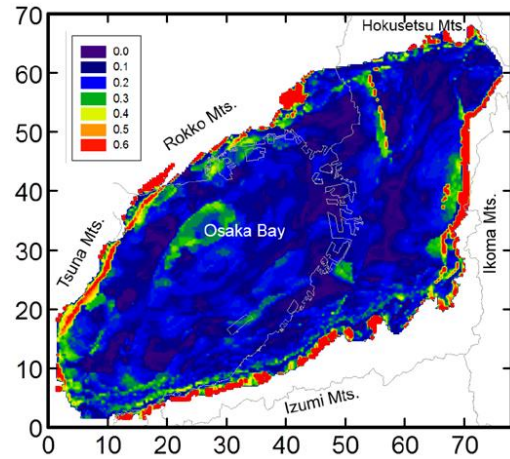


図 3 H/V スペクトルピーク周波数残差率(R_f)

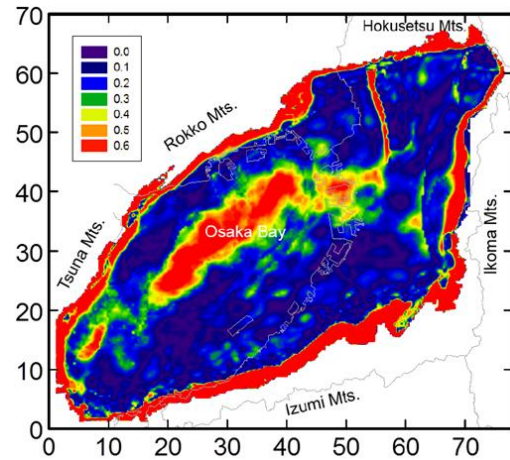


図 4 H/V スペクトルピーク値残差率(R_A)

の地域では、残差率 R_{HV} 、 R_f は 0.2~0.3 程度以下の小さな値であるが、 R_A は 0.4~0.6 程度以上の大きな値となっている。この原因として、当該地域の南西側、淡路島の東側に位置する大阪湾断層の影響の可能性が考えられる。

(2) $(H/V)_{3D}$ と $(H/V)_{1D}$ のピークの対応と基盤構造の関係

図 1 に長方形で示す 6 領域 (regions 1-6) について、3次元解析と 1次元解析の H/V スペクトルのピーク周波数 f_p およびピーク値 A_p の対応を図 5、6 に示す。同図から、地下構造の不整形性が弱い regs.3-5 (基盤構造が比較的平坦な領域) では、 f_p 、 A_p とも、3次元解析と 1次元解析の値に大きな差異は見られない。一方、地下構造の不整形性が強い regs.1、2、6 では、周波数 0.2 ないし 0.4Hz から 0.8Hz の範囲で、3次元解析の f_p の値が 1次元解析のそれより高くなる傾向が認められる (図 5)。また、1次元解析の A_p の変動範囲に比べて 3次元解析のそれが大きくなる傾向が認められる (図 6)。すなわち、地下構造の不整形性が H/V スペクトルのピーク周波数とピーク値に強く影響することが再確認される。ただし、その影響度合いは、領域や周波数によって異なってお

り、断層や盆地端部からの距離、基盤の深さ・傾斜などに依存すると推察される。

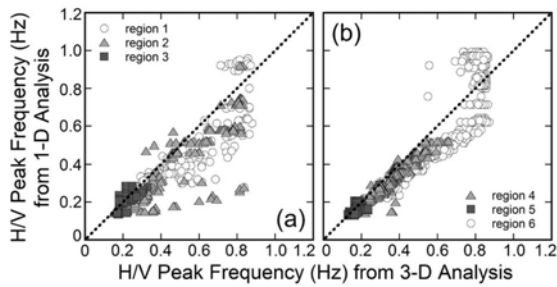


図5 3次元解析と1次元解析によるH/Vスペクトルピーク周波数の関係

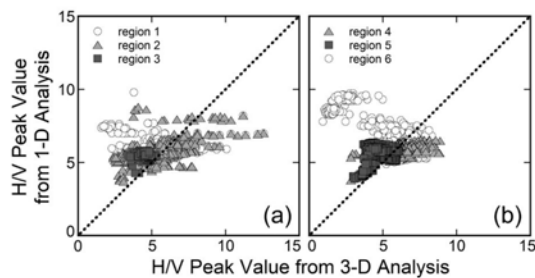


図6 3次元解析と1次元解析によるH/Vスペクトルピーク値の関係

(3) (H/V)_{3D}の異方性

H/V スペクトルの水平成分の方位依存性と地下構造の不整形性との関係について、ピーク値を図7、ピーク周波数を図8に示す。ピーク値において、不整形性が強い **regs.1~3** (図7左側) は二つの直交する方位間の差異が大きい。一方、不整形性が弱い **regs.4~6** (図7右側) は差異が小さい。ピーク周波数において、ピーク値に比べ方位間による差は領域に関係なく顕著には見られない。これらは、不整形性の度合いが H/V スペクトルのピーク値 (振幅) に対して感度が高いが、ピーク周波数に対してはピーク値に比べて感度が低いことを意味している。

(4) H/V スペクトルを用いた不整形地下構造の推定に関して

微動 H/V スペクトルを用いた地下構造の推定において、不整形性が強い領域では1次元速度構造モデルに基づく推定結果に大きな誤差が生じる可能性があることが分かった。従って、不整形性が強い領域では、差分法などの3次元地下構造の影響を考慮した微動の模擬波を用いた推定手法が必要となると思われる。また、観測の微動 H/V スペクトルから不整形性の影響の度合いの推定に対して、H/V スペクトルピーク値の方位依存性がある可能性がある。

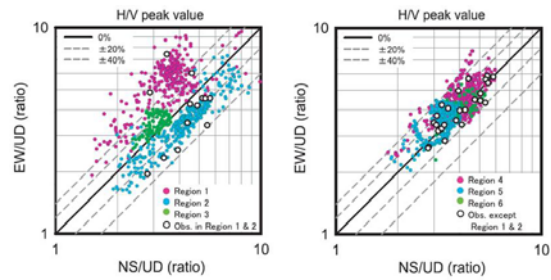


図7 H/V スペクトルピーク値の方位依存性

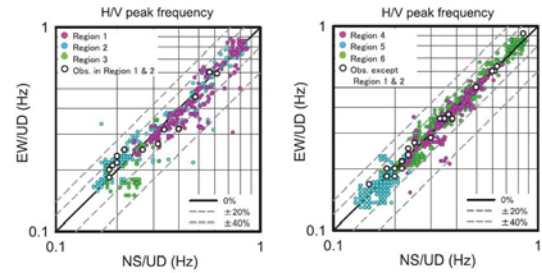


図8 H/V スペクトルピーク周波数の方位依存性

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

- [雑誌論文] (計5件)
- ① 染井一寛, 上林宏敏, 西村利光, 宮腰研, 羽田浩二, 鈴木恭平, 大阪堆積盆地での脈動シミュレーションを用いた地震波干渉法による地下構造推定の適用性の検討, 第14回日本地震工学シンポジウム論文集、査読無、OS3, 2014, 973-981.
 - ② 天藤潤一, 永野正行, 上林宏敏, 大阪湾沿岸部における長周期地震動の地盤増幅特性と地震波入射方向、上町断層帯の地盤構造の影響、第14回日本地震工学シンポジウム論文集、査読無、G014, 2014, 1885-1893.
 - ③ Hirotohi Uebayashi, Hidenori Kawabe and Katsuhiko Kamae, Reproduction of microseism H/V spectral features using a three-dimensional complex topographical model of the sediment-bedrock interface in the Osaka sedimentary basin, Geophysical Journal International, 査読有、Volume 189, Issue 2, 2012, 1060-1074., doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05408.x
 - ④ 吉村智昭, 永野正行, 久田嘉章, 青井真, 早川崇, Seckin Ozgur Citak, 松島信一, 川辺秀憲, 上林宏敏, 強震動予測手法に関するベンチマークテスト (その2)、日本建築学会技術報告集、査読有、18巻、2012、95-100.
 - ⑤ Hirotohi Uebayashi, Hidenori Kawabe, Katsuhiko Kamae, Temporal Variation and

Reproduction of Microseism H/V Spectral Features in the Osaka Sedimentary Basin with an Irregular-Shaped Interface, Proc. 15th. World Conference of Earthquake Engineering, 査読無、No. 2291 on DVD, 2012, Lisbon Congress Centre, Portugal.

〔学会発表〕(計7件)

- ① 新井洋、上林宏敏、大阪堆積盆地の不規則地下構造に起因する脈動 H/V スペクトルの変化に関する一検討、日本建築学会、2014年09月12日、神戸大学(神戸市)
- ② 新井洋、上林宏敏、大阪堆積盆地において地下構造の不規則性が脈動 H/V スペクトルに与える影響、地盤工学会、2014年07月15日、北九州国際会議場(福岡県北九州市)
- ③ 新井洋、上林宏敏、大阪堆積盆地における1次元速度構造を仮定した H/V スペクトルの逆解析、地盤工学会、2013年07月23日、富山国際会議場(富山市)
- ④ 新井洋、上林宏敏、大阪堆積盆地における水平成層構造を仮定した H/V スペクトルの逆解析、日本地震工学会、2012年11月08日、東京・国立オリンピック記念青少年総合センター
- ⑤ 上林宏敏、新井洋、大阪堆積盆地における脈動 H/V スペクトルの差分法による再現その2、日本地震学会、2012年10月18日、函館市民会館
- ⑥ 上林宏敏、川辺秀憲、釜江克宏、大阪堆積盆地における脈動 H/V スペクトルの差分法による再現、日本地震学会、2011年10月1日、静岡県コンベンションアーツセンターグランシップ(静岡市)
- ⑦ 上林宏敏、川辺秀憲、釜江克宏、上町断層帯及び北摂地溝帯周辺部における微動振幅の方位依存性、日本建築学会、2011年8月24日、東京都早稲田大学

〔図書〕(計1件)

- ① 上林宏敏(分担執筆)、新井洋(分担執筆)、東日本大震災合同調査報告書編集委員会(幹事学会：日本地震工学会)、東日本大震災合同調査報告 共通編1 地震・地震動、2014、総ページ数223.

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上林 宏敏 (UEBAYASHI Hirotoshi)
京都大学・原子炉実験所・准教授
研究者番号：30300312

(2) 研究分担者

新井 洋 (ARAI Hirotoshi)
国土技術政策総合研究所・建築研究部・
主任研究官
研究者番号：40302947

(3) 連携研究者

()

研究者番号：