

強震観測点の記録と常時微動 H/V スペクトル比を利用した近傍の未観測点の強震動推定法

A Method of Estimation of Earthquake Ground Motion Using Nearby Records and Microtremors H/V Spectral Ratio

原田 隆典*・中村 真貴**・王 宏沢***・齊藤 将司****

Takanori Harada, Masaki Nakamura, Hongze Wang, and Shouji Saitoh

* 工博 宮崎大学教授 工学部土木環境工学科 (〒889 - 2192 宮崎市学園木花台西 1 - 1)

** 工修 宮崎大学大学院学生 資源環境科学専攻 (〒889 - 2192 宮崎市学園木花台西 1 - 1)

*** 博士(工) (株) 地震工学研究開発センター (〒889 - 2192 宮崎市学園木花台西 1 - 1, 宮崎大学産学連携センター)

**** 工修 宮崎大学大学院学生 システム工学専攻 (〒889 - 2192 宮崎市学園木花台西 1 - 1)

A method of estimation of earthquake ground motion using nearby earthquake ground motion record and microtremors horizontal to vertical (H/V) Fourier spectral ratio is presented. In this formulation, an earthquake ground motion is estimated from the earthquake ground motion recorded in the nearby observation site by using the correction factors which consist of the difference correction factor between the H/V spectral ratios of the strong motion record and the microtremors at the strong motion observation site β , the normalized microtremors H/V spectral ratio of the both sites by their peak values, and the site factor of vertical ground motions γ . By using the observed microtremors and earthquake ground motions in the Miyazaki and Fukuoka Prefectures, the presented estimation method is examined. This examination demonstrates a potential capability of the presented method in the frequency range from 0.5Hz to 10Hz, especially around the predominant frequency of the site.

Key Words: estimation of earthquake ground motions, microtremors, H/V spectral ratio, observation of strong ground motion,

1. まえがき

構造物の耐震設計や耐震診断などの工学問題では、短周期地震動を地点毎に精度よく推定することが必要とされ、またその推定法は簡便で安価である方が望ましい。常時微動の利用は 1950 年代から始まり、多くの理論的(演繹法的)または観測記録に基づく経験的(帰納法的)研究成果が蓄積されているが、現在でも微動と地震動の関係は解決されていない問題であり¹⁾、観測事実の整理に関する研究と波動論の法則でこれらの事実を統合する研究が、今後応用数理学分野に求められている。

このような常時微動を利用した地震動推定法の 1 つとして、常時微動記録と近傍の地震動記録のみを用いて、地盤情報には頼らない地震動推定法が、丸山ら²⁾によって提案されている。この論文では、2 つの地震記録から数 km 離れた地震動を推定し、0.1 秒から 1 秒の短周期地震動の実記録との整合性が確かめられている。大熊ら³⁾は、宮崎県内の 20 地点の K-NET 観測点と 32 地点の FDMA (消防庁) 観測点の常時微動記録と地震動記録から、

丸山ら²⁾の地震動推定法の整合性を数十 km 離れた 2 地点間の応答スペクトルによって検討し、手法の有効性を確認するとともに、基準点の選定や鉛直地震動の増幅特性に依存して推定精度が変わることを示している。また、王ら^{4),5)}は、震源特性・伝播特性・表層地盤特性の積として表される地震動のスペクトル特性の定式化により、これらの既往の研究^{2),3),6)}の適用性や推定精度並びに、基準点の選定・鉛直地震動の増幅特性の問題についての検討を行った。そして、2 地点間距離が 3~6km と短い宮崎県内の K-NET 観測点と FDMA 観測点の地震動記録と常時微動記録による検討から、推定法の誤差の定量化と誤差におよぼす 2 地点間での鉛直地震動成分の違いの重要性を示した。

本論文では、丸山ら²⁾の地震動推定法の基本的な仮定である「地震動と常時微動の H/V スペクトル比は等しく、かつ 2 地点の地表面鉛直地震動のスペクトル特性は等しい」というように 2 地点間の地震動や常時微動 H/V スペクトル特性を単純にモデル化するのではなく、「地震動と常時微動の H/V スペクトル比は完全に等しいものではなくほぼ等しい。そして 2 地点間距離

が近い場合でも地表面鉛直地震動のスペクトル特性は異なる」というような観測事実をできるだけ考慮した仮定に基づいた新しい定式化を提案する。そしてこの定式化に基づいて、2005年福岡県西方沖地震による福岡市内の観測記録や王ら^{4,5)}が用いた宮崎県内の観測データを再解釈し、定式化に現れる係数をモデル化することにより既往の研究²⁻⁶⁾における基準点の選定や鉛直地震動の増幅特性の問題が解決でき、かつ既往の推定法よりも高精度の推定ができることを示す。なお、上記研究²⁻⁶⁾並びにその改良推定法を提案した本研究は、常時微動の地震動推定法への新しい方法を提案するものであるが、観測記録に基づく帰納法的研究であるため、これらの解析手法に関する波動論に基づく数値シミュレーションを使った理論的研究からその方法の適用性を調べる研究が応用数理学分野の研究に求められる。

2. 強震観測点近傍の地震動推定法

常時微動のH/Vスペクトル比(水平動のフーリエ振幅スペクトル/鉛直動のフーリエ振幅スペクトル)と地震時地盤の震動特性に関する中村の研究⁹⁾以来、H/Vスペクトル比と地盤震動特性に関する多くの理論的研究と観測記録に基づく研究がなされてきているが、未だに不明な点も多い⁸⁻¹¹⁾。しかしこれらの既往の研究²⁻⁹⁾に共通することは、地震動と常時微動のH/Vスペクトル比の形状は良く似ており、両者のスペクトル比のピーク振動数(最大振幅を与える振動数)には高い相関が認められるが、振幅の最大値に関しては高い相関がないということである。すなわち、ある地点の常時微動H/Vスペクトル比のピーク振動数からその地点の地震時地盤の卓越振動数が推定できるが、地震時地盤の震動振幅を常時微動H/Vスペクトル比の最大値から推定するにはあまり有効でないということである。

このようなH/Vスペクトル比に関する既往の研究成果²⁻¹¹⁾を基に本論文では、以下の3つの仮定を設けて地震動の推定法を定式化する。なお、常時微動は、南北・東西方向の二乗平均を水平動成分として算定している。地震動は、水平2成分のそれぞれについてH/Vスペクトル比を算定している。

- (1) 強震観測点(基準点, Observation site と呼ぶ)では、地震動と常時微動のH/Vスペクトル比を完全に一致させるための補正係数 β (振動数の関数である)を次式のように導入する。

$$\beta = \frac{\left(\frac{H}{V}\right)_o^M}{\left(\frac{H}{V}\right)_E^E} \quad (1)$$

ここで、 $(H/V)_o^M$ と $(H/V)_E^E$ はそれぞれ強震観測点の常時微動(Microtremors)と地震動(Earthquake motion)のH/Vスペクトル比を表す。本定式化では、下添字が観測点を、上添字が地震動または常時微動を表すものとする。

- (2) 地震動を推定しようとする強震観測点近傍の未観測点

(推定点, Estimation site と呼ぶ)では、地震動と常時微動のH/Vスペクトル比は等しいと仮定する。すなわち、

$$\left(\frac{H}{V}\right)_E^E \simeq \left(\frac{H}{V}\right)_E^M \quad (2)$$

- (3) 強震観測点と未観測点の常時微動H/Vスペクトル比の振幅特性は使用しないために振幅を基準化するために最大値 $c_{O\max}, c_{E\max}$ を等しいとする。

$$\left(\frac{H}{V}\right)_{o\max}^M = \left(\frac{H}{V}\right)_{E\max}^M, \text{ 又は } c_{O\max} = c_{E\max} \quad (3)$$

上記(1)と(2)の仮定は、以下のような考えに基づく。地震動と常時微動のH/Vスペクトル比は完全に一致しないが、ほぼ等しい形状を示すという観測事実に基づいて、強震観測点では地震動と常時微動の両方の記録が得られるので、両方の記録を用いて両者のH/Vスペクトル比を完全に一致させるための補正係数を導入する(式(1))。しかし、地震動の未観測点では、常時微動の記録しか得ることができないため、両者の誤差を認めて地震動と常時微動のH/Vスペクトル比は等しいと仮定する(式(2))。

最後の仮定(3)は、既往の研究²⁻¹¹⁾から常時微動のH/Vスペクトル比の最大値を与えるピーク振動数は地盤の卓越振動数の推定に優れているが、H/Vスペクトル比の最大値と地震時の地盤増幅特性の関係は明確でないことを考慮し、H/Vスペクトル比の最大値の情報を使わずにピーク振動数の情報のみを使うために導入した仮定である。

上記の仮定による式(1)と式(2)を使うと、強震観測点と未観測点の常時微動H/Vスペクトル比の比は、次式のようにになる。

$$\frac{\left(\frac{H}{V}\right)_E^M}{\left(\frac{H}{V}\right)_o^M} = \frac{\left(\frac{H}{V}\right)_E^E}{\beta \left(\frac{H}{V}\right)_o^E} \quad (4)$$

式(4)より、未観測点の地震動水平成分のスペクトル H_E^E は次式のように求められる。

$$H_E^E = \beta \gamma_{E/O} \frac{1}{c_{E\max}} \left(\frac{H}{V}\right)_E^E H_O^E = \alpha \frac{\left(\frac{H}{V}\right)_E^E}{\left(\frac{H}{V}\right)_o^M} H_O^E \quad (5)$$

ここに

$$\alpha = \beta \gamma_{E/O} \frac{1}{\left(\frac{c_{E\max}}{c_{O\max}}\right)}, \quad \gamma_{E/O} = \frac{V_E^E}{V_o^E} \quad (6)$$

式(5)は強震観測点の水平地震動スペクトル H_o^E から未観測点の水平地震動スペクトル H_E^E を推定する式を表す。式(5)の右辺の補正係数 α が1の場合には、丸山ら²⁾の推定式となる。あるいは王ら^{4,5)}の解釈では、 α は2地点の常時微動H/Vスペクトル比のみの補正による未観測点の水平地震動スペクトル推定法(丸山ら²⁾の推定法)の誤差を表す。

本論文の定式化では、両地点の鉛直地震動のスペクトル比 $\gamma_{E/O}$ を除くと、補正係数 α は式(6)のように観測できる地震動と常時微動H/Vスペクトル比から求められる点が特徴である。

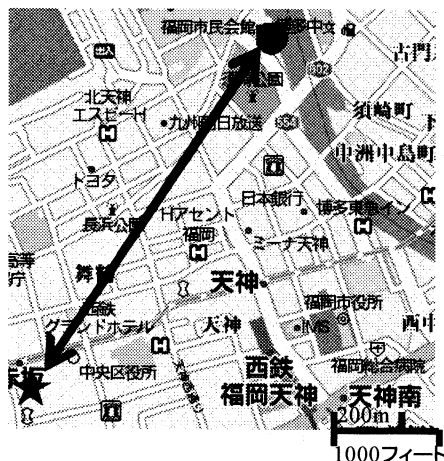
両地点の鉛直地震動のスペクトル比 $\gamma_{E/O}$ は両地点の地震動記録が無いと求めることができないが、本論文では3章で示すように観測記録の平均的特性をモデル化して与えるものとする。また、式(5)の右辺のように両地点の常時微動HVスペクトル比は最大値 c_{Omax}, c_{Emax} で基準化されており、地盤の卓越振動数(HVスペクトル比のピーク振動数)の情報のみを使った補正をしていることが特徴である。

3. 鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ の特性とモデル化

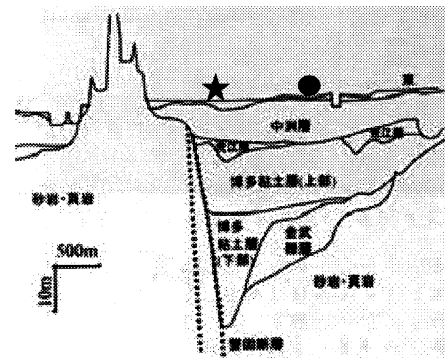
既往の推定法²⁻⁶⁾の研究では、2地点での地表面鉛直地震動のスペクトル特性の重要性を指摘しているにもかかわらず、2地点での鉛直地震動のスペクトル特性が同じである($\gamma_{E/O} = 1$)とする仮定を採用した推定式となっている。この点を改良するために、王ら^{4,5)}が示している鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ のデータと2005年福岡県西方沖地震による福岡市内の観測記録を見直すと、以下に示すように強震観測点の地盤が未観測点の地盤に比べて硬い場合とその逆の場合で、鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ の特性に系統的な違いのあることがわかった。そこでここではその内容を説明する。なお、本論文では地盤の振動論的硬さの指標として常時微動HVスペクトル比のピーク振動数(地盤の卓越振動数と解釈できる)が高いほど硬い地盤であると表現するものとする。

3.1 鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ の特性

まず、2005年福岡県西方沖地震による地震記録¹²⁾から始める。図-1は、ここで使用したK-NET観測点(FKO006)(地図上では●印)と(株)建設技術研究所福岡CTI福岡ビルの観測点(地図上では★印)の位置関係と地質断面を示す。両観測点は直線距離で約1km離れ、沖積地盤の厚さが異なり地盤の卓越周期が異なる地盤条件を持つ。この地盤条件が異なる両観測点の常時微動HVスペクトル比のピーク振動数(以後振動数の代わりに周期を用いる)から地盤の卓越周期を求めると、K-NET観測点(FKO006)の0.50秒に対して沖積地盤の厚い建設技研観測点では、0.75秒と長い地盤の卓越周期となっている。すなわち、両観測点の地盤の振動特性は異なり、建設技研観測点に比べるとK-NET観測点(FKO006)の方が振動論的には硬い地盤ということになる。



(a) 両強震観測点の位置



(b) 地質断面図

図-1 K-NET観測点(FKO006)(●)と(株)建設技術研究所福岡CTI福岡ビルの観測点(★)の位置と地質断面図¹³⁾

このような両観測点の地盤条件とともに、2005年福岡県西方沖地震による地震記録から鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ を計算し(0.4HzのParzen Windowによる平滑化を行い、振幅スペクトルの比を求めた)、プロットすると図-2のようになる。

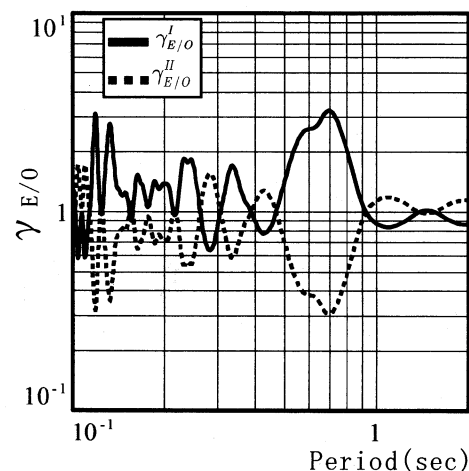


図-2 2005年福岡県西方沖地震による地震記録から得られた鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$

図-2の実線は、強震観測点としてK-NET観測点(FKO006)を採用し未観測点として建設技研観測点とした場合の鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ を表す。一方、図-2の破線は、その逆の場合の鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ である。実線の場合を $\gamma_{E/O}^I$ 、破線のものを $\gamma_{E/O}^{II}$ として表現すると両者のスペクトル比の間には、鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ の定義式(式(6))より、次式の関係がある。

$$\gamma_{E/O}^I \gamma_{E/O}^{II} = 1 \quad (7)$$

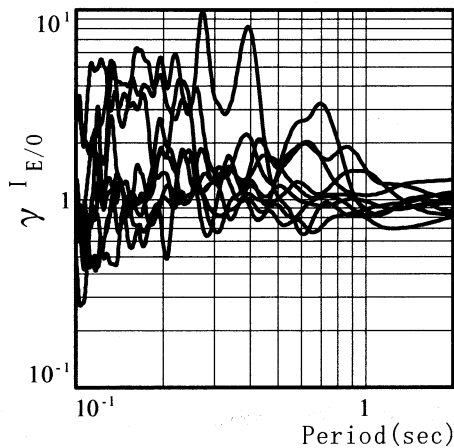
この図から両観測点の鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ は既往の研究²⁻⁶⁾で仮定しているように1ではなく、両観測点の地盤条件によって1より大きい値をとる周期特性を持つ場合と、その逆数の周期特性を持つ場合の2種類の特性になることがわかる。両観測点の地盤条件がまったく同じ場合の鉛直地震動スペクトル比は1の値をとると考えられるが、このような場合には、未観測点の地震動として強震観測点の地震動を使えばよい。また、実線で示す $\gamma_{E/O}^I$ は、強震観測点(基準点)の地盤の方が硬い場合で、破線で示す $\gamma_{E/O}^{II}$ は、強震観測点の地盤の方が軟らかい場合に相当する。

次に、王ら^{4,5)}の用いた宮崎県内のK-NET観測点とFDMA

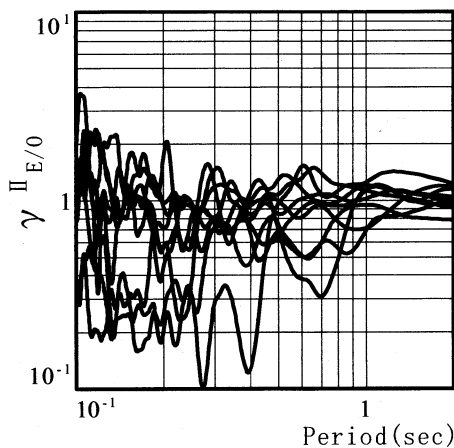
観測点の常時微動H/V スペクトル比のピーク周期から地盤の卓越周期を求め整理すると、表-1 のようになった。この表には、図-2 で用いた福岡市内の2つの観測点での地盤の卓越周期も記入している。この表の2つの観測点は2地点間距離が3~6kmと短く震源特性・地震波伝播特性が同じで表層地盤特性のみが異なると考えて使用した。

表-1 常時微動H/V スペクトル比のピーク周期から求めた観測点の地盤の卓越周期

	ピーク周期(sec)	
	K-NET	FDMA (建設技研)
福岡	0.50	(0.75)
綾	0.37	0.51
日南	0.63	0.75
西米良	0.25	0.40
西都	0.14	0.57
北川	0.20	0.17
延岡	0.34	0.25
椎葉	0.35	0.25
田野	0.33	0.20



(a) 観測点の地盤の方が硬い場合 $\gamma_{E/O}^I$



(b) 観測点の地盤の方が軟らかい場合 $\gamma_{E/O}^{II}$

図-3 表-1に示す福岡と宮崎県内の地震観測点の記録から得られた鉛直地震動スペクトル比

表-1 から、強震観測点の地盤の方が硬い場合(K-NET 福岡, K-NET 綾, K-NET 日南, K-NET 西米良, K-NET 西都, FDMA 北川, FDMA 延岡, FDMA 椎葉, FDMA 田野)とその逆で観測

点の地盤の方が軟らかい場合(建設技研, FDMA 綾, FDMA 日南, FDMA 西米良, FDMA 西都, K-NET 北川, K-NET 延岡, K-NET 椎葉, K-NET 田野)を区別して、地震動記録から鉛直地震動スペクトル比を計算し、 $\gamma_{E/O}^I$ と $\gamma_{E/O}^{II}$ をプロットすると、図-3 が得られた。図-3 から図-2 と同じように両観測点の地盤条件によって鉛直地震動スペクトル比が2種類に分類されることがわかる。

3.2 鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ のモデル化

このような鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}^I$ と $\gamma_{E/O}^{II}$ をモデル化する。図-3 に示す $\gamma_{E/O}^I$ と $\gamma_{E/O}^{II}$ のそれぞれの平均を求めると、図-4 のような周期特性が得られた。細実線と細破線はそれぞれ $\gamma_{E/O}^I$ と $\gamma_{E/O}^{II}$ の平均的周期特性を表す。この周期特性を簡単な関数式で近似し、この近似式の周期特性を図-4 の太実線と太破線で示す。

$$\gamma_{E/O}^I = \frac{1 + 20e^{-20T}}{1 + 4e^{-5T}}, \quad \gamma_{E/O}^{II} = \frac{1}{\gamma_{E/O}^I} \quad (8)$$

ここに、 T は周期(s)を意味する。この近似式は周期0.1秒から2秒程度の短周期に対する平均的な鉛直地震動スペクトル比を与えるものである。 $\gamma_{E/O}^I$ の特徴としては、0.1秒付近から周期が増加するにつれて1よりも大きくなり、周期0.25秒付近で約2の値でそれ以降は減少し、周期約1秒で1程度に一定値に収束している。

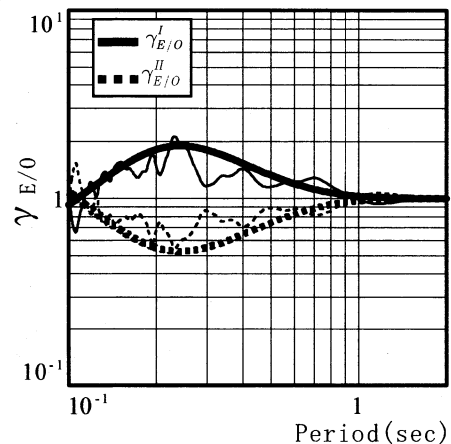


図-4 鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}^I$ と $\gamma_{E/O}^{II}$ のモデル化

4. 常時微動と地震動記録による地震動推定法の検証

ここでは、式(5)による地震動推定法(式(6)と式(8))を使い、補正係数 α を用いる新推定法を実地震動によって検証し、補正係数 $\alpha = 1$ を用いる旧推定法との精度の違いを示す。4.1 節には、フーリエ振幅スペクトルでの比較を、4.2 節には加速度波形での比較を示す。

4.1 地震動の振幅スペクトルの比較

図-5 は、2005年福岡県西方沖地震(M7.0)によるK-NET観測点(FKO006)の記録から新推定法と旧推定法によって建設技研観測点の水平地震動フーリエ振幅スペクトルを推定し、細実線で示す建設技研観測記録のものととの比較を示す。図-5には、細

破線により K-NET 観測点 (FKO006) の記録のフーリエ振幅スペクトルもプロットしているが、旧推定法に比べると新推定法の方がより観測記録に近い推定をしていることがわかる。推定すべき観測点の記録(建設技研観測記録)に対する新推定法と旧推定法により推定された地震動の振幅スペクトルの比(推定スペクトル/観測スペクトル)は、推定法の誤差を示すが、これをプロットすると図-6 のようになる。明らかに新推定法(実線)の方が 1 に近い値であり新推定法の誤差の方が旧推定法に比べ小さいことがわかる。特に、水平地震動スペクトルの大きい周期帯(ここでは便宜上、推定点の振幅スペクトルが最大振幅の 1/3 以上を常に上回っている周期範囲とし、図-6 に横線の矢印の範囲で示し、以後、主要周期帯と呼ぶ)では、新推定法(実線)の方が決定的に精度が高い推定をしていることがわかる。

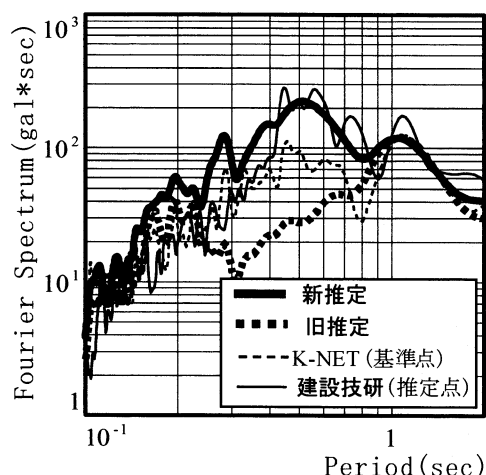


図-5 2005 年福岡県西方沖地震(M7.0)による建設技研記録の地震動スペクトルと K-NET 観測点(FKO006)の記録から推定した地震動スペクトル(新と旧推定)の比較(EW 成分)

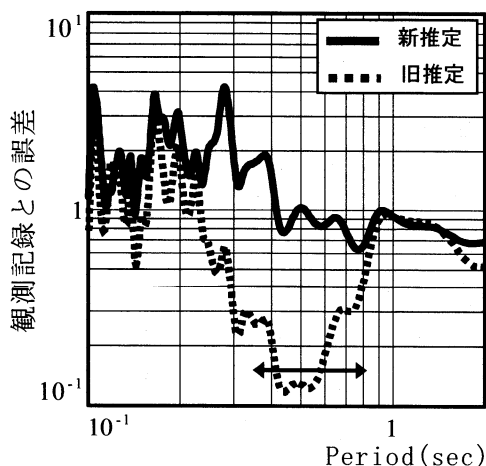


図-6 図-5 の新推定法と旧推定法による推定誤差の比較(推定スペクトル/観測スペクトル) (主要周期帯の範囲を横矢印で示す)

図-7 と図-8 は、図-5 と図-6 の場合とは逆に、建設技研観測点の記録から新推定法と旧推定法によって K-NET 観測点 (FKO006) の水平地震動フーリエ振幅スペクトルを推定した結果を示す。この逆の場合でも、図-8 に横線の矢印で示す主要周期帯においてやや推定誤差が大きいものの、旧推定法に比べ新推定法の方が高い推定精度となっていることがわかる。なお、

これらの地震記録の加加速度は 200gal を超えているので地盤の非線形の影響が含まれているので、今後この影響の程度を定量化しておく必要がある。

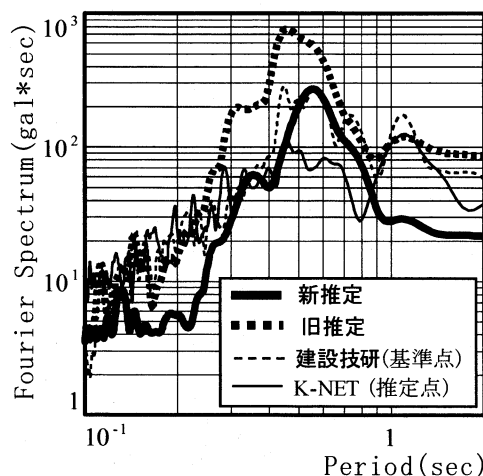


図-7 2005 年福岡県西方沖地震(M7.0)による K-NET 観測点 (FKO006) の地震動スペクトルと建設技研記録から推定した地震動スペクトル(新と旧推定)の比較(EW 成分)

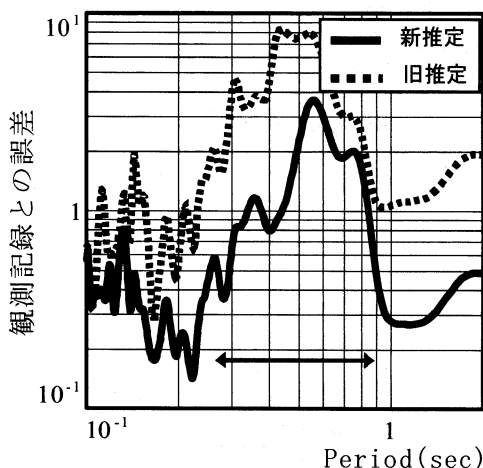


図-8 図-7 の新推定法と旧推定法による推定誤差の比較(推定スペクトル/観測スペクトル) (主要周期帯の範囲を横矢印で示す)

次に、王ら^{4,5)}の用いた宮崎県内の K-NET 観測点と FDMA 観測点の記録による検証結果を示す。ここでは、紙面の制約のため王ら^{4,5)}が使った 2005 年 5 月 31 日の日向灘地震 (M5.8) による K-NET (綾, 日南, 西米良, 椎葉, 西都, 田野) の地震動から同市西村の FDMA 観測点の地震動を推定した結果(EW 成分のみ)を示す。なお、北川町と延岡市の K-NET と FDMA 観測点の記録としては、共通記録が得られている 1999 年 12 月 22 日の日向灘地震(M4.8)の記録を用いる。図-9 は、表-1 に示した観測点の地盤の卓越周期を参照し、鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/0}^I$ または $\gamma_{E/0}^{II}$ を使って宮崎県内の 8 市町村での新推定法と旧推定法による推定地震動と観測記録のスペクトルの比較を示す。王ら^{3,4)}の結果では、旧推定法は北川と延岡の 2 つの観測点を除いて良好な推定であった。図-9 に示すように新推定法でも旧推定法でも北川と延岡の 2 つの観測点を除いてその違いは少ないことがわかる。北川と延岡の 2 つの観測点では、決定的な改善はみられないものの、旧推定法に比べると、新推定

法の方が観測記録のスペクトルに近いスペクトルを推定していることがわかる。

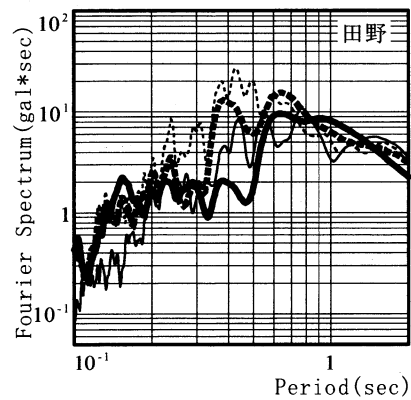
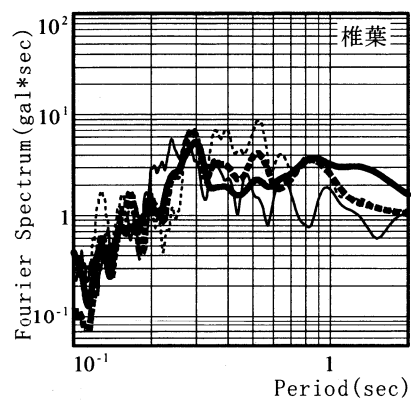
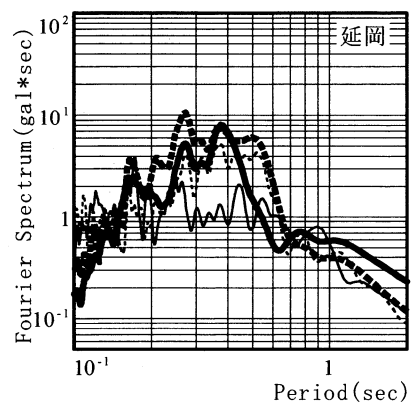
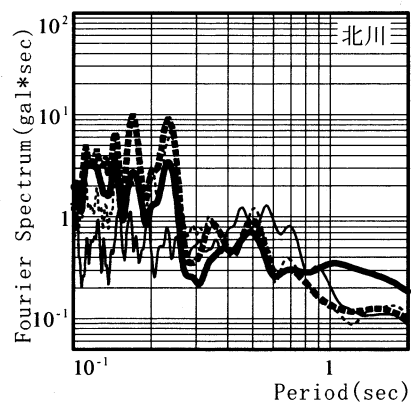
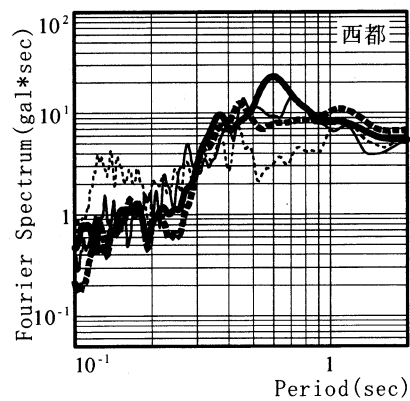
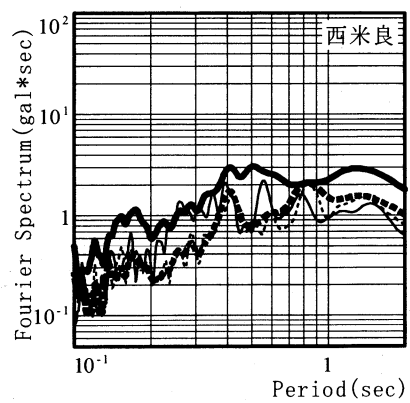
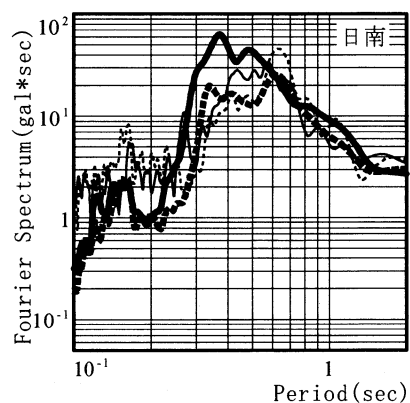
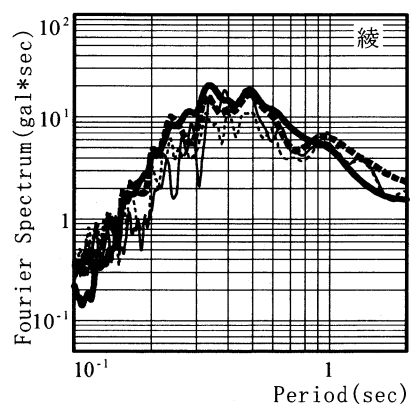


図9 王ら^{4,9}の用いた宮崎県内の8観測点の記録による新推定法と旧推定法の水平地震動スペクトルの比較(EW成分)

以上のような新推定法と旧推定法の比較を推定誤差で

比較すると図-10のようにになる。この図からも上述のことが読み取れるが、特に図-10に横線の矢印で示す主要周期帯において、新推定法と旧推定法は同程度の推定誤差であること、北川と延岡の2つの観測点では、新推定法の方の推定誤差が改善されていることがわかる。

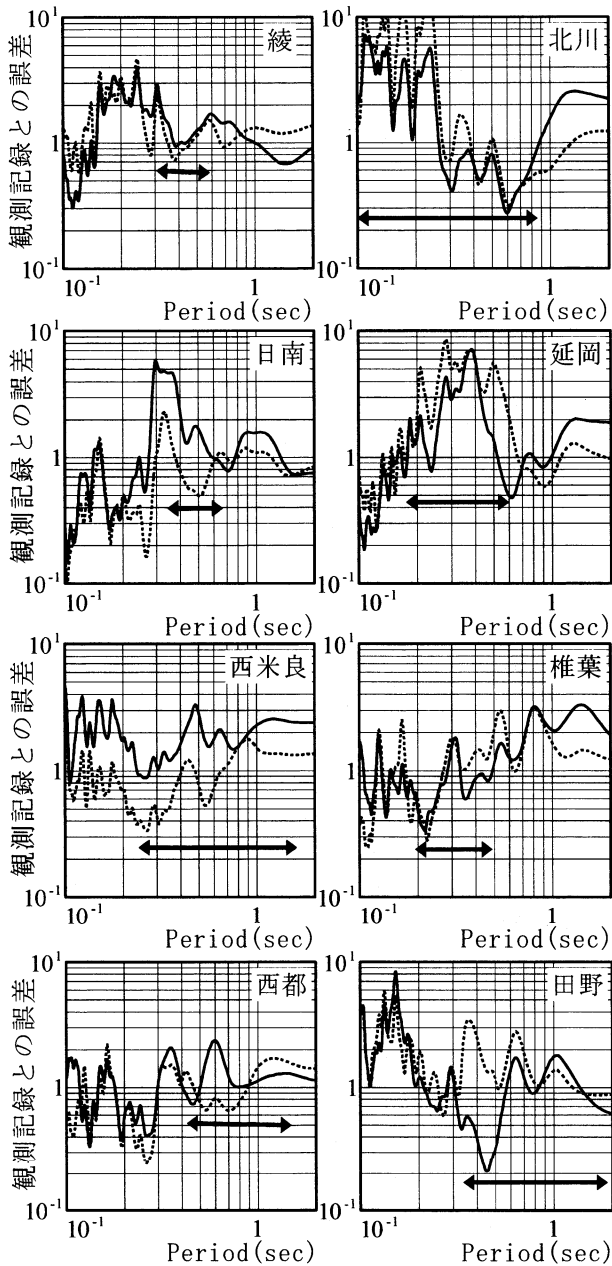


図-10 王ら^{4,9)}の用いた宮崎県内の8観測点の記録による新推定法と旧推定法の推定誤差の比較(推定スペクトル/観測スペクトル)(主要周期帯の範囲を横矢印で示す)

式(5)に現れる係数のうち、 $c_{0\max}/c_{E\max}$ の値は0.6~1.1で平均値は0.78程度の値となる。 β は観測記録から基準点毎に決まるが、この値の振動数特性は基準点毎に大きくことなり0.1~4.0程度の値を示すため、 β の影響は大きい。さらに、図-3と図-4に示したように $\gamma_{E/O}$ も基準点毎に大きくなるが平均値を使っているため最大で2倍程度の値となっている(図-4)。今後は $\gamma_{E/O}$ 基準点毎のモデル化をすることが必要となる。

4.2 地震動の加速度波形の比較

ここでは、地震動加速度波形による新推定法と旧推定法の比較並びに観測記録との比較を示す。

加速度波形の比較では、式(5)の推定式に対して次のような仮定をする。式(5)の推定式はフーリエ振幅スペクトルに対して導かれたものであるが、強震観測点の水平地震振幅スペクトル H_o^E のみに対して観測記録から求められる複素フーリエスペクトル(実数部と虚数部)を代入し未観測点の複素フーリエスペクトル H_E^E を求める。したがって、未観測点の推定地震動波形の振動数特性は地盤条件を反映したもの修正されているが、位相特性は強震観測点のものと同一であると仮定した推定波形となる。なお、ここでの地震動波形は、0.1秒以下の周期をカットした0.1秒以上の周期帯の波形での比較を示す。丸山ら²⁾により常時微動を用いた地震動推定法が、0.1秒から1秒の短周期地震動の実記録との整合性が確かめられている。そこで本論文においても、0.1秒以下の周期をカットしたものを用いた。

旧推定法と新推定法による誤差が大きかった2005年福岡県西方沖地震(M7.0)によるK-NET観測点(FKO006)の記録から建設技研観測点の水平地震動を推定した場合(図-11)と、1999年12月22日の日向灘地震(M4.8)によるK-NET北川とK-NET延岡の記録からFDMA観測点の北川と延岡の地震動を推定した場合(図-12と図-13)を示す。図-11から図-13において、左上の(a)に示す波形は地震動観測点として用いたK-NET観測点の地震動加速度波形を示す(基準点波形)。右上の(b)に示す波形は推定しようとする点(未観測点または推定点)で観測された地震動加速度波形を示す(推定点波形)。左下の(c)は推定点の波形を旧推定法によって推定した加速度波形を、右下の(d)は新推定法による推定点の加速度波形を新推定法によって推定したものを示す。したがって、各図の(b)と(c)と(d)に示す波形の比較から、新推定法と旧推定法の違いを見ることができる。

例えば、図-11に示す2005年福岡県西方沖地震(M7.0)の場合、基準点のK-NET福岡(FKO006)の最大加速度が239galに対し((a)参照)、推定点の建設技研観測点の最大加速度310galと大きくなっている((b)参照)。このような観測波形の特徴とは逆に、(c)に示す旧推定法による波形の最大加速度は138galと基準点の波形よりも小さく推定している。しかし、(d)に示す新推定法では430galと推定点の加速度波形が大きくなる特徴をよく表現している。図-12と図-13に示す1999年日向灘地震(M4.8)の場合、基準点((a)参照)の最大加速度よりも推定点((b)参照)の最大加速度は小さくなっている。このような両観測点の観測波形の特徴に対し、旧推定法では基準点のものより約2倍大きい最大加速度を推定しており観測波形の傾向とは逆の傾向である。新推定法でも推定点の観測波形よりやや大きめの波形となっているものの、旧推定法よりも観測波形の振幅に近い波形を推定していることがわかる。なお、北川では周期1秒から2秒の精度は旧推定法の方がよい。

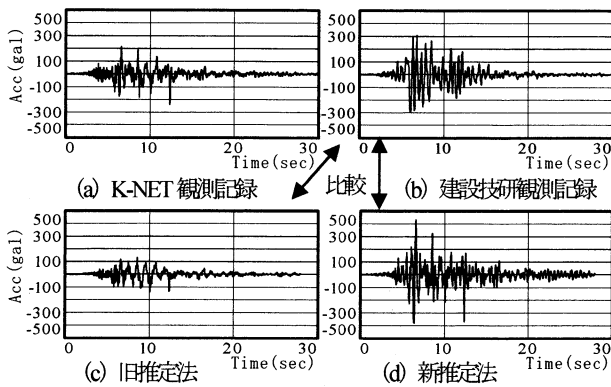


図-11 2005年福岡県西方沖地震によるK-NET観測点(FKO006)の記録から推定した建設計画観測点の水平地震動加速度波形の比較

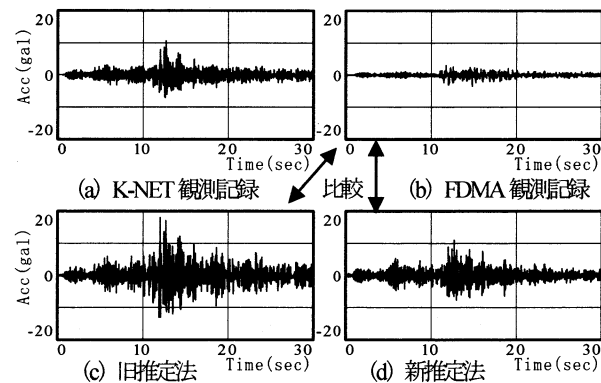


図-12 1999年12月22日の日向灘地震によるK-NET北川の記録から推定したFDMA観測点北川の水平地震動加速度波形の比較

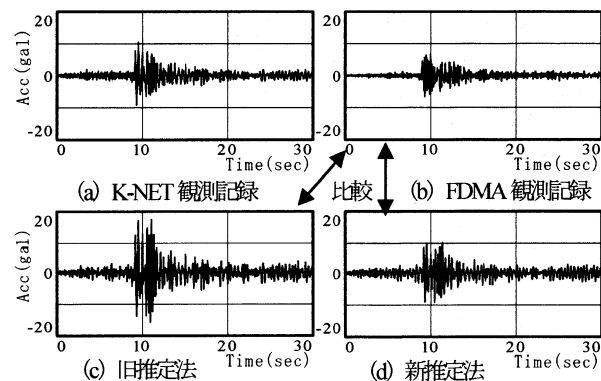


図-13 1999年12月22日の日向灘地震によるK-NET延岡の記録から推定したFDMA観測点延岡の水平地震動加速度波形の比較

5. まとめと課題

本論文では、常時微動記録と近傍の地震動記録のみを用いて、地盤情報には頼らない地震動推定法に関する従来の方法を改善することを目的に、「地震動と常時微動のH/Vスペクトル比は完全に等しいものではなくほぼ等しい。そして2地点間距離が近い場合でも地表面鉛直地震動のスペクトル特性は異なる」という観測事実をできるだけ考慮した仮定に基づく新しい定式化を提案し、地震動観測記録を用いてこの新推定法と従来の推定法(旧推定法)の検証を行った。この定式化と検証で用いた2005年福岡県西方沖地震による福岡市内の観測記録や王ら^{4),5)}が用

いた宮崎県内の観測データから、新推定法の方が精度が高いことを示すことができた。特に、福岡市内の2つの観測点と宮崎県内の北川と延岡の2つの観測点では、旧推定法の精度は極めて低いものであったが、新推定法の精度は高いことが確認できた。旧推定法と新推定法は、簡単な方法によって地震計が設置されていない未観測点の地震動を推定できる便利な方法である。今後は、本論文で用いた鉛直地震動スペクトル比に関して各観測点の平均値を使うのではなく、観測点毎の特性を反映したモデル比に改良し、精度の改善を行うとともに、検証例を蓄積し、波動論に基づく数値計算等の手法を使い、本地震動推定法の推定精度について検討してゆく必要がある。

参考文献

- 1) 堀家正則: 微動の研究について, 地震, 第2輯, 第46巻, pp.343-356, 2001.
- 2) 丸山喜久, 山崎文雄, 本村均, 浜田達也: 常時微動のH/Vスペクトル比を用いた地震動推定法の提案, 土木学会論文集, No.675/I-55, pp.261-272, 2001.
- 3) 大熊裕輝, 松岡昌志, 山崎文雄, 原田隆典: 宮崎県における常時微動H/Vスペクトル比を用いた地震動の推定, 土木学会論文集, No.696/I-58, pp.261-272, 2002.
- 4) 王宏沢, 原田隆典, 斉藤将司: K-NET観測点の記録を利用した近傍の未観測点の強震動推定法, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.12, CD-ROM, pp.434-437, 2006.
- 5) 王宏沢, 原田隆典, 斉藤将司: 常時微動H/Vスペクトル比による地震動推定法とその検証例, 土木学会地震工学論文集, CD-ROM, pp.123-131, 2007.
- 6) 斎田淳, 松岡昌志, Shabestari, K.T. 山崎文雄: 兵庫県内の強震観測点における地震記録と常時微動を用いた計測震度分布の推定, 土木学会論文集, No.731/I-63, pp.159-168, 2003.
- 7) Nakamura, Y.: Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its application, Proc. Of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM, 2000.
- 8) Lachet, C. and Bard, P.Y.: Numerical and Theoretical Investigations on the Possibilities and Limitations of Nakamura's Technique, Journal of Phys. and Earth, Vol.42, pp.377-397, 1994.
- 9) 佐藤智美, 川瀬博, 松島信一: 微動とS波, P波, codaから求められる地盤特性の違いとその理論的解釈, 地震, 第52巻, pp.291-318, 1998.
- 10) Fah, D., Kind, F. and Giardini, D.: A theoretical investigation of average H/V ratios, Geophys. Journal Int., Vol.145, pp.535-549, 2001.
- 11) 堀家正則: 微動の研究について, 地震, 第46巻, pp.343-350, 1993.
- 12) 土木学会西部支部: 2005年福岡県西方沖地震被害調査報告書, 2005年.
- 13) (社)地盤工学会, 福岡県西方沖地震地盤工学会調査団: 福岡県西方沖地震における被害調査報告, 2005.

(2008年4月14日 受付)