



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 A Method of Estimating Earthquake Ground Motion Using Nearby K-net Records

王 宏沢¹, 原田隆典², 齋藤将司³

Hongze WANG¹, Takanori HARADA² and Shouji SAITOU³

¹株式会社 地震工学研究開発センター, Earthquake Engineering Research Center Co. Ltd.

²宮崎大学工学部土木環境工学科, 教授 工博, Dept. of Civil and Environmental Eng., University of Miyazaki.

³宮崎大学大学院学生, Graduate Student of University of Miyazaki.

SUMMARY: A method of estimating earthquake ground motion using microtremor horizontal to vertical (H/V) Fourier spectral ratio is presented. In this formulation, an earthquake ground motion is estimated from the ground motion recorded in the nearby observation site by using the correction factors which consist of the microtremor H/V spectral ratio of the both sites (the reference site and estimation site), the path and local site effect factor of waves β , and the site factor of vertical ground motions γ . By using the observed microtremor records and earthquake ground motions in the Miyazaki Prefecture, the presented method is examined. It is found from this examination that the path and local site effect factor of waves β and the site factor of vertical ground motions γ can be assumed approximately to be 1.0. Also the error of estimation of Fourier spectral amplitude of earthquake horizontal ground motion is discussed.

1 はじめに

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。

このような地震動推定法の1つとして、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[1]によって提案されている。この論文では、K-net 宇都宮と東金の2つの地震記録から数 km 離れた JH 観測点の地震動を推定し、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[2]は、宮崎県内の 20 地点の K-net 観測点と 32 地点の FDMA (消防庁) 観測点の微動記録と地震動記録から、丸山ら[1]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、基準点の選定や上下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。

本論文では、微動 H/V スペクトル比と近傍の地震動記録のみを用いて地震動を推定する既往の研究[1,2,3]の適用性や精度並びに、基準点の選定や上下動の増幅特性の問題について、地震動推定法の定式化からの検討を行うとともに、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微動記録による検討を行った結果を記述する。

2 微動 H/V スペクトル比による地震動推定手法の定式化

ここでは、微動と近傍の地震動記録のみを用いた、地震動推定法の定式化を整理しておく。

まず、近傍にある 2 つの観測点を A, B と仮定する。 $n=A, B$ 観測点における地震動の水平成分と上下成分のフーリエ

スペクトル振幅 $H_n^E(\omega)$ と $V_n^E(\omega)$ は、次式のように震源のスペクトル特性 S と震源から観測点までの地震波伝播のスペクトル特性 P と観測点近傍のローカルサイトに関するスペクトル特性 L の積として与えることができる(例えば[4])。

$$\begin{aligned} H_n^E(\omega) &= S^E(\omega) P_{Hn}^E(\omega, r) L_{Hn}^E(\omega) \\ V_n^E(\omega) &= S^E(\omega) P_{Vn}^E(\omega, r) L_{Vn}^E(\omega) \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 $n=A, B$ は観測点を意味する。また、震源のスペクトル特性 S と震源から観測点までの地震波伝播のスペクトル特性 P と観測点近傍のローカルサイトに関するスペクトル特性 L は、振動数 ω と震源から観測点までの距離 r の関数として表現している。また、下添字 H と V はそれぞれの観測点における水平成分と上下成分を表し、上添字 E は地震による物理量であることを表す。

ここで、A と B 点の地震動 H/V スペクトル比を計算すると、次式のように震源の影響が除かれる。

$$\frac{H_n^E(\omega)}{V_n^E(\omega)} = \frac{P_{Hn}^E(\omega, r) L_{Hn}^E(\omega)}{P_{Vn}^E(\omega, r) L_{Vn}^E(\omega)} \quad (2)$$

同じように、A と B 点における微動の水平と上下成分のフーリエスペクトル振幅は、次式のように与えられる。

$$\begin{aligned} H_n^M(\omega) &= S_n^M(\omega) P_{Hn}^M(\omega) L_{Hn}^M(\omega) \\ V_n^M(\omega) &= S_n^M(\omega) P_{Vn}^M(\omega) L_{Vn}^M(\omega) \end{aligned} \quad (3a)$$

ここに、上添字 M は、微動による物理量であることを示す。また、微動の場合、複数の震動源からの影響の和として観測点の微動特性が決まると考えられるので、震動源のスペクトル特性と波動伝播スペクトル特性は、次式のように表される。

$$S_n^M(\omega) = \sum_j S_{nj}^M(\omega)$$

$$P_{Hn}^M(\omega) = \sum_j P_{Hj}^M(\omega, r_{nj}), P_{Vn}^M(\omega) = \sum_j P_{Vj}^M(\omega, r_{nj}) \quad (3b)$$

また、地震動の場合と同様に A と B 点の微動 H/V スペクトル比を計算すると、次式のように震動源の影響が除かれる。

$$\frac{H_n^M(\omega)}{V_n^M(\omega)} = \frac{P_{Hn}^M(\omega)}{P_{Vn}^M(\omega)} \frac{L_{Hn}^M(\omega)}{L_{Vn}^M(\omega)} \quad (4)$$

ここで、式(2)と式(4)の A, B 点の H/V スペクトル比の比を取って比較すると、地震動の H/V スペクトル比と微動の H/V スペクトル比には、次式のような関係のあることがわかる。

$$\frac{\left(\frac{H_A^E(\omega)}{V_A^E(\omega)}\right)}{\left(\frac{H_B^E(\omega)}{V_B^E(\omega)}\right)} = \frac{\left(\frac{\beta_{PA}^E}{\beta_{PA}^M}\right)\left(\frac{\beta_{LA}^E}{\beta_{LA}^M}\right)\left(\frac{H_A^M(\omega)}{V_A^M(\omega)}\right)}{\left(\frac{\beta_{PB}^E}{\beta_{PB}^M}\right)\left(\frac{\beta_{LB}^E}{\beta_{LB}^M}\right)\left(\frac{H_B^M(\omega)}{V_B^M(\omega)}\right)} \quad (5a)$$

ここに、

$$\beta_{Pn}^E = P_{Hn}^E(\omega, r)/P_{Vn}^E(\omega, r), \beta_{Pn}^M = P_{Hn}^M(\omega)/P_{Vn}^M(\omega)$$

$$\beta_{Ln}^E = L_{Hn}^E(\omega, r)/L_{Vn}^E(\omega, r), \beta_{Ln}^M = L_{Hn}^M(\omega)/L_{Vn}^M(\omega) \quad (5b)$$

ここで、式(5)に地震動の上下成分スペクトルを掛けると、A, B 点の地震動水平成分のスペクトルが次式のように表される。

$$\frac{H_A^E(\omega)}{H_B^E(\omega)} = \beta\gamma \left[\frac{H_A^M(\omega)}{V_A^M(\omega)} \right] / \left[\frac{H_B^M(\omega)}{V_B^M(\omega)} \right] \quad (6a)$$

ここに、

$$\beta = \left(\frac{\beta_{PA}^E}{\beta_{PA}^M} \right) \left(\frac{\beta_{LA}^E}{\beta_{LA}^M} \right) / \left(\frac{\beta_{PB}^E}{\beta_{PB}^M} \right) \left(\frac{\beta_{LB}^E}{\beta_{LB}^M} \right), \gamma = V_A^E(\omega)/V_B^E(\omega) \quad (6b)$$

したがって、式(6)から、A 点の地震動水平成分スペクトルは、次式のように B 点の地震動水平成分スペクトルに、両点の微動 H/V スペクトル比を補正することにより求められることになる。

$$H_A^E(\omega) = \alpha \left[\frac{H_A^M(\omega)}{V_A^M(\omega)} \right] / \left[\frac{H_B^M(\omega)}{V_B^M(\omega)} \right] H_B^E(\omega) \quad (7)$$

ここに、 $\alpha = \beta\gamma$ 。

ここで、式(7)の震源からの伝播特性とローカルサイト特性の積に関する補正係数 β について考察する。もしも、震源からの距離に比べて A, B 観測点間の距離が十分に短い場合、震源から両地点までの伝播特性は同じであると仮定できるので、 $\beta_{PA}^E \approx \beta_{PB}^E$ となる。既往の研究[1,2,3]や本論文の3.2節での検討から地震動 H/V スペクトル比と微動 H/V スペクトル比 (特に、H/V スペクトル比のピーク値とそのときの周期) がほぼ一致することを考慮すると、間接的に補正係数 β 1 とおくことができる。なお、 β に含まれる地震動と微動のローカルサイト特性比 $\beta_{Ln}^E/\beta_{Ln}^M$ や微動の伝播特性比 β_{Pn}^M に関しては不明であるが、今後、これらの係数の物理意味に基づく理論的方法による波動場の解釈から明らかにされるものと思われる (3.2節で検証)。

次に、A と B 点の地震動上下成分の比 γ (式(6b)) に関する考察をする。中村[5]や丸山ら[1]は、S 波と P 波の実体波の鉛直入射を仮定した表層地盤の振動数伝達関数の考察から、S 波伝達関数のピーク付近で P 波伝達関数は 1 に近いことを確認しており、これより両地点の地震動上下成分はほぼ等しいとしている。この場合、 γ 1 となる (観測記録を用いて 3.2 節で検討する)。

式(7)は地震動推定法の一般形であり、既往の丸山ら[1]や大熊ら[2]の研究では、式(7)で、 β 1, γ 1 とし α 1 を仮定した地震動推定法を用いている。

以下の章では、2 地点間の距離が震央距離に比べて十分に短い 3~6km の観測記録を用いて、式(7)の補正係数 α と γ 並びに、式(7)の推定精度について調べる。

3 微動観測と地震動記録による地震動の推定

3.1 推定に用いた地震動記録と微動観測点

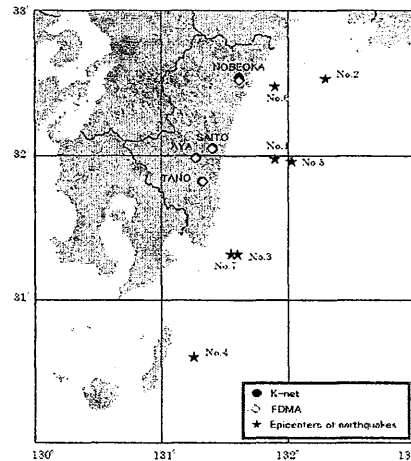


Fig. 1 Location of seismic stations and epicenters of earthquakes used in this study

Table 1 Earthquakes used in this study

No.	Period of Earthquake	Location of Hypocenter			Magnitude
		Latitude (°)	Longitude (°)	Depth (km)	
1	1998.09.04	31.896	131.881	32	M4.5
2	1998.09.15	32.586	132.265	37	M4.2
3	1998.12.16	31.287	131.598	32	M5.5
4	1999.01.24	30.587	131.248	49	M6.2
5	1999.12.22	31.981	132.000	39	M4.8
6	2002.11.04	32.400	131.900	35	M5.7
7	2005.05.31	31.305	131.545	29	M5.8

Fig. 1 に示す宮崎県内 4 箇所の K-net 観測点 (●) と近傍 (3~6km 内) の FDMA 観測点 (◇) における 1998 年~2005 年に M4.2 以上の 7 地震 (Table 1) の記録を用いる。Fig. 1 には、7 地震の震央位置も示している。Fig. 1 から、本検証で用いた 2 地点の記録は、震央距離に比べて 2 地点間距離が十分に短い 3~6km の記録を用いていることがわかる。

各観測点の地震動記録から、加速度フーリエスペクトル振幅を計算し、1.0HzのParzen Windowを施し、スペクトルの平滑化を行った。既往の研究[1,2]と同じ方法で、周期0.05秒~2.0秒の地震動のH/Vスペクトル比を計算した。また、Fig.1に示す4箇所のFDMA観測点とK-net観測点における微動記録は、大熊らの研究[2]のデータを使用し、H/Vスペクトル比を計算した。

3.2 微動と地震動記録のH/Vスペクトル比の比較

宮崎県内4箇所のK-net観測点を式(7)のB点と考え、これを基準波形とし、FDMA観測点のA点の地震動波形を推定することとする。7つの地震による4観測点の α 値と両観測点の地震動上下成分比 γ を求めた。

Fig.2は、綾(2a)、延岡(2b)、西都(2c)、田野(2d)の4箇所におけるK-netとFDMA観測点の地震動と微動の平均H/Vスペクトル比および α 値と γ 値を示している。各図の左上図と左下図では、K-netとFDMA観測点の地震動平均H/Vスペクトル比(細黒線)と微動平均H/Vスペクトル比(粗灰線)を比較している。右上図と右下図には、両記録から求めた平均 α 値と地震動平均上下動スペクトル比 γ を示している。また、(●)と(◇)はそれぞれK-netとFDMA観測点の卓越周期(地震動平均H/Vスペクトル比のピークを与える周期)を示す。この平均 α 値は、両観測点間の地震動水平成分のスペクトル比と微動H/Vスペクトル比の比率の関係を示す無次元量である。

平均 α 値が1であれば、式(7)より、基準地点の地震動波形のフーリエスペクトル振幅に両地点の微動H/Vスペクトル比の補正のみをすることで、推定地点(A点)の地震動波形のフーリエスペクトル振幅を推定することができる。このことより、この平均 α 値は、両地点の微動H/Vスペクトル比の補正のみによる地震動推定の誤差を表すとも解釈できる。

Fig.2の各地点の地震動平均H/Vスペクトル比(細黒線)と微動平均H/Vスペクトル比(粗灰線)を比較すると、両者はよく一致しており、特に卓越周期の一致度の良さがわかる。このことは、式(7)で、 $\beta=1$ を仮定できることを示している。

また、Fig.2の各地点の平均 α 値($\alpha=\beta\gamma$)と γ 値を比較すると、周期による平均 α 値と γ 値が比較的似ていることから、 $\beta=1$ の仮定が成り立つものと考えられる。

平均 α 値に注目すると、Fig.2より、延岡(2b)を除いて、K-netとFDMA観測点の卓越周期付近では、平均 α 値は0.5~2の間に分布し、周期0.06秒から2秒の範囲でも、0.4~4の範囲であることがわかる。したがって、この誤差の範囲を許容するならば、式(7)で、 $\alpha=1$ を仮定し、両地点の微動H/Vスペクトル比の補正のみによって、地震動の推定ができることになる。

なお、延岡(2b)に関しては、 α 値の変動が大きい。その原因は、両地点の地震動上下成分比 γ にあると考えられる($\alpha=\beta\gamma$, 式(7)参考)。事実、Fig.2より、延岡(2c)では、平均 γ 値は卓越周期近傍で、0.15~1.0と大きくばらついている。現時点で、両観測点の地盤構造は不明であるが、中村[3]や丸山ら[1]のS波とP波の実体波の鉛直入射を仮定した表層地盤の振動数伝達関数の考察による、S波伝達関数のピーク付近でP波伝達関数は1に近いことを含めて考えると、延岡(2b)でのK-netとFDMA観測点の近い2地点

間においてさえも、基盤や表層地盤構造が大きくかわっていること(不整形性)に原因があるように思われる。

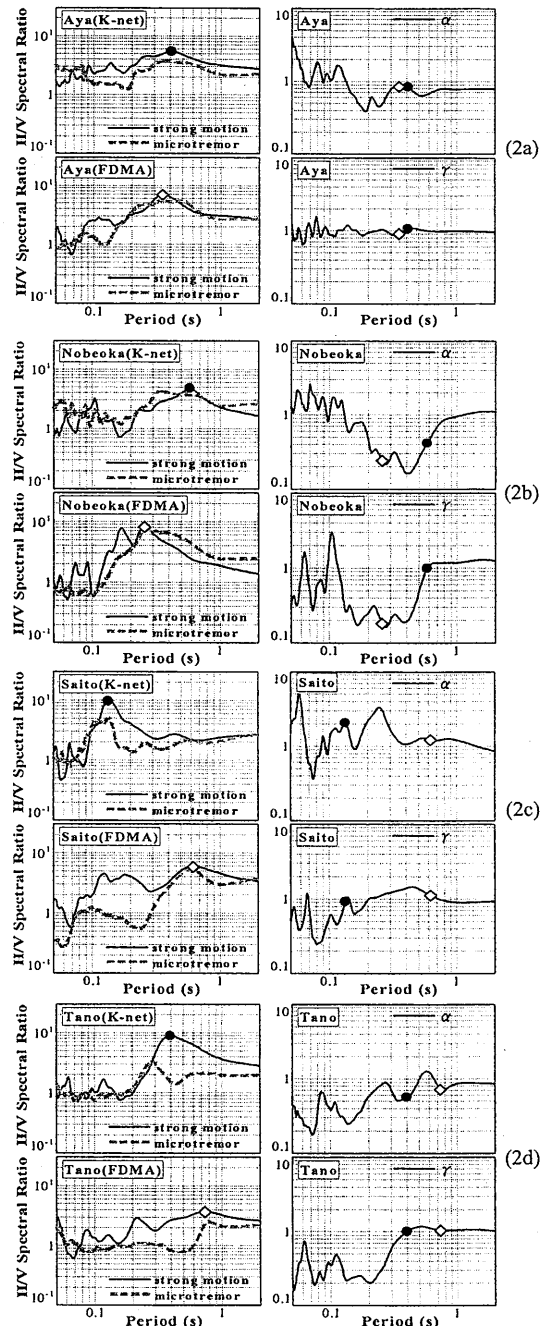


Fig. 2 Comparison of the H/V spectral ratios for strong motion and microtremor and α , γ Value

3.3 地震動推定法の検証例

Fig.3に4観測点における2つの地震(1998.09.04の地震, 2005.05.31の地震)による3つの波形(K-netの基準波形(細い黒点線), 推定FDMA波形(太灰実線)とFDMAの観測波形(細い黒実線))のEW成分とNS成分のフーリエスペクトルを示す。

K-netとFDMA観測点の卓越周期付近では、延岡を除いて、EW成分とNS成分ともに、波形の推定精度のよいことが確認できる(Fig.3の細線の矢印は、推定波形の振幅

がターゲット波形に顕著に近づく方向を示す)。

また, Fig.4,5 には, この3つの波形 (K-netの基準波形, 推定 FDMA 波形と FDMA の観測波形) のEW成分とNS成分の加速度応答スペクトル (5%減衰) と加速度波形を示す。推定波形の加速度応答スペクトルと加速度波形は, 観測波形に近いものとなっている。

これらの推定波形やその特性と観測波形の比較結果を平均的に見ると, 式(7)の $\alpha \approx 1$ を仮定し, 両地点の微動H/V スペクトル比の補正のみから地震動の推定が可能であることがわかる。一方, 推定誤差が大きいと判断された延岡に関しては, 近似度が低いものとなっている。

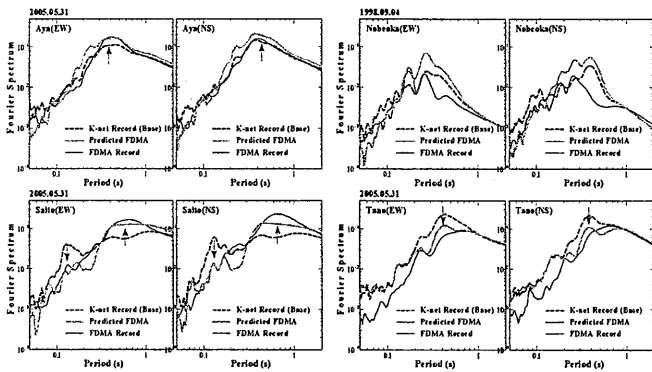


Fig. 3 Comparison of the horizontal Fourier spectra of the predicted ground motions with those of the recorded ground motions at K-net and FDMA Stations

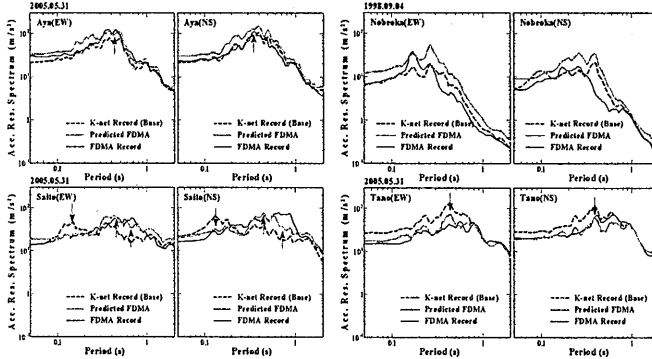


Fig. 4 Comparison of the predicted acceleration response spectra (5% damping) with those of the records at K-net and FDMA Stations

4 まとめと課題

微動記録と近傍の地震動記録のみを用いた, 地震動推定法の定式化を示し, 2地点間距離が3~6kmと短い宮崎県内のK-netとFDMA観測点の地震動記録と微動記録を使って, 地震動推定法の検証を行った。その結果をまとめると, 以下ようになる。

- 1) 地震動と微動の伝播特性とローカルサイト特性に関する係数比 β と地震動の上下成分比 γ の積で表される補正係数 $\alpha (= \beta\gamma)$ および微動H/V スペクトル比による補正係数を用いる地震動スペクトル振幅の推定方法の定式化を示した。
- 2) 宮崎県内の4観測点のうち, 延岡の観測点を除くと, $\gamma \approx 1$ と仮定できることを示した。
- 3) 補正係数 α を1とし, 微動H/V スペクトル比の補正だけから地震動スペクトル振幅を推定する場合, 周期

0.06秒から2秒の範囲での推定地震動スペクトル振幅は, 実地震動スペクトル振幅の0.4~4倍の範囲であることを示した。地盤の卓越周期近傍では, 誤差は約半分になり, 推定地震動スペクトル振幅は, 実地震動スペクトル振幅の0.5~2倍の範囲であることを示した。

今後の課題としては, 延岡観測点のような地盤構造の不整形性と補正係数 γ の関心の調査や, さらに観測点数を増やし, 本論文の補正係数や推定誤差の分析を通し, 推定法の検証をしてゆく必要がある。

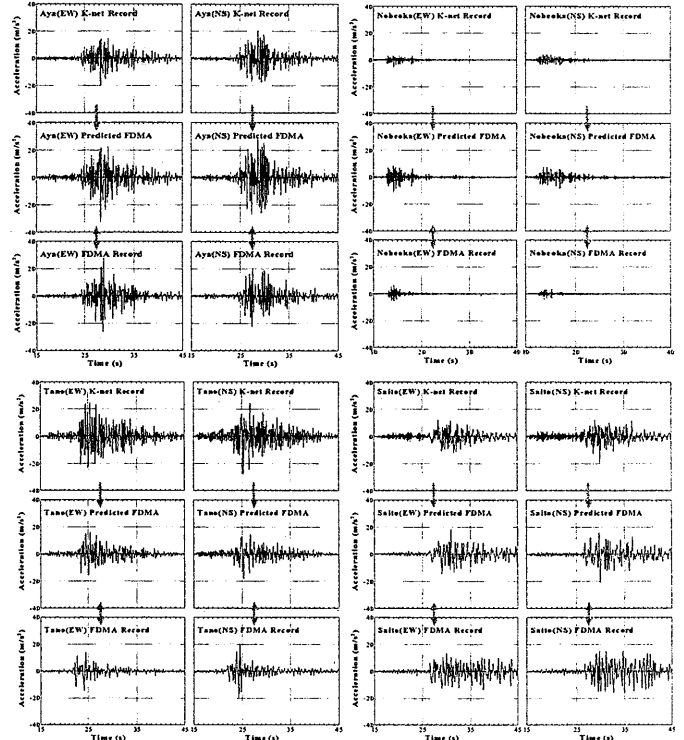


Fig. 5 Comparison of the predicted acceleration time history with the records at K-net and FDMA Stations

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Bath, M.: Spectral analysis in geophysics, Elsevier Scientific Publishing Company, p.272, 1974.
- [5] 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.