

フィルタ操作を用いた常時微動 H/V スペクトル比のピーク周波数の効率的な検出方法

山田雅行*・八木 悟*・長尾 毅**・野津 厚*³

要 旨

常時微動 H/V スペクトル比に対して、フィルタ操作によるスムージングを適用することで、ピーク周波数を効率的に読み取る方法を提案し、地盤の地震応答特性を考える上で重要となる、卓越周波数と考えられるピークを検出できることを示した。ウインドウ処理によるスムージングを用いた場合との比較を行い、低周波数帯域におけるピークの検出やピーク値の小さいものに対する対応において有利であることを示した。関東地方における既往の常時微動 H/V スペクトル比に対して提案法を適用し、目視による既往の読み取り値とよく一致することを示した。提案法は大量で高密度の微動観測結果に適用できる有効な方法であると考えられる。

キーワード：常時微動・常時微動 H/V スペクトル比・ピーク周波数・フィルタ操作

1. はじめに

波浪・風などの自然現象や、工場や車両の通行等の人間活動によって生じる発生源の特定できない微小な揺れ、“常時微動”を高感度の地震計(微動計)を用いて観測することによって、地盤の振動特性を検出することが、近年、数多く行われている。水平 2 成分、上下 1 成分の 3 成分の微動を観測し、上下動フーリエスペクトルに対する水平動のフーリエスペクトルの比(常時微動 H/V スペクトル比)を計算して地盤の振動特性を明らかにする方法は、中村(1988)により提唱され、観測も解析も簡便であるため、特に多くの適用がなされてきている。

また、以前は 3 成分のセンサ、3 成分のアンプを収録装置にケーブルで接続し、電源装置も別に準備して、観測を行っていた。電子技術の進歩とセンサの小型化などによって、近年では、ランドセルやビジネスカバン程度の大きさの筐体に 3 成分のセンサ、アンプ、収録装置、電源が一体化され、この筐体を地面にセットするだけで常時微動の観測が可能となってきた(例えば、先名ほか(2006))。

このように、常時微動による地盤調査の有効性が認め

られ、簡便な観測機器による効率的な観測が可能になったことから、近年では大量の常時微動観測データ(常時微動 H/V スペクトル比)が集まりつつある。

長尾ほか(2010)は、全国の港湾付近の強震観測地点のうち、サイト増幅特性が得られている 281 箇所を対象として、常時微動 H/V スペクトル比を算出し、サイト増幅特性との比較について報告している。先名ほか(2013)では、強震動評価のための千葉県・茨城県における浅部・深部統合地盤モデルの検討を目的として、約 1600 点の常時微動の単点観測が行われている。大石ほか(2014)は、高知平野の表層地盤構造のモデル化を目的として、約 1300 点の単点観測を行っている。湊ほか(2014)は、和歌山県串本町の地震動特性を明らかにするために、約 500 点の超高密度微動観測を行っている。

常時微動 H/V スペクトル比から得られる最も重要な情報の 1 つはピーク周波数(周期)であるが、上述の長尾ほか(2010)、湊ほか(2014)は目視による読み取りを行っており、大石ほか(2014)は表計算ソフトの組み込み関数を用いて周期 0.1~2 秒における最大値を読み取る方法を用いている。一方、先名ほか(2013)は、ピーク周波数を読み取るのではなく、理論 H/V スペクトル比との差を

2014 年 10 月 5 日原稿受付；2015 年 1 月 18 日受理

* 株式会社ニュージェック 技術開発グループ
〒531-0074 大阪市北区本庄東 2-3-20

** 神戸大学 都市安全研究センター
〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1

© 2015 SEGJ

*³ 独立行政法人港湾空港技術研究所 地震防災研究領域
〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1

計算することで地盤構造の推定を行っている。

常時微動 H/V スペクトル比のピーク周波数(周期)の読み取りにおいては、読み取る者によって結果が異なる場合があり、また、同じ者が読み取る場合でも、大量のデータを処理しているうちに読み取り値がズレる場合もある。特に小さなリプル(ギザギザ)をどのように取り扱うかによって結果が異なりやすい。このように、特に広範囲、高密度の微動観測結果のピーク周波数を整理、分析する場合など、ピーク周波数の読み取り値の信頼性確保が困難となる場合がある。一般には、ウインドウ処理によるスムージングを行い、小さなリプル(ギザギザ)を除去した後に、目視やデータ処理によってピーク周波数を読み取る方法が多く用いられている。例えば、長尾ほか(2010)では、サンプリング点数 16384 点(163.84 秒)の区間ごとに、水平、上下、それぞれのフーリエスペクトルに対してバンド幅 0.05Hz の Parzen ウィンドウを適用し、さらに 3 区間の平均化を行うことにより平滑化を行っている。湊ほか(2014)は、Parzen ウィンドウは長尾ほか(2010)と同様であるが、10 区間の平均を行っている。しかしながら、ウィンドウ幅の設定によって、スムージングの程度や有効な周波数範囲が限定されてしまうことがある。

そこで、本稿では、常時微動 H/V スペクトル比を一種の時系列データと考え、フーリエ変換によるフィルタ操作を用いて常時微動 H/V スペクトル比のスムージングを行うことを試みた。また、この結果を用いて、ピーク周波数を効率的に検出する方法を提案し、その適用性を例証した。

2. スムージングの方法とピーク周波数の検出方法

2.1 常時微動 H/V スペクトル比

常時微動 H/V スペクトル比は、常時微動の水平成分を鉛直成分で除したスペクトル比である。常時微動 H/V スペクトル比の例を Fig.1(黒線)に示す。常時微動 H/V スペクトル比は明瞭なピークを示す場合もあるが、Fig.1 の例のようにピークを判別しづらい場合も少なくない。

Fig.1(黒線)の常時微動 H/V スペクトル比は、サンプリング間隔 0.01 秒(サンプリング周波数 100Hz)の観測データに対して、サンプリング点数が 16384 点(163.84 秒)の区間を 3 区間抽出し、区間ごとに求めた常時微動 H/V スペクトル比を周波数ごとに平均したものである。Fig.1 の(a)は実数軸表記、(b)は対数軸表記である。なお、この例ではフーリエスペクトルを求めるにあたりバンド幅 0.05Hz の Parzen ウィンドウを適用している。

Fig.1(黒線)の常時微動 H/V スペクトル比のピークは、▼印で示すように、3.3Hz および 4.5Hz 付近と読み取ることができる。しかしながら、この例では小さなリプル(ギザギザ)がみられるため、読み取る者の判断によって

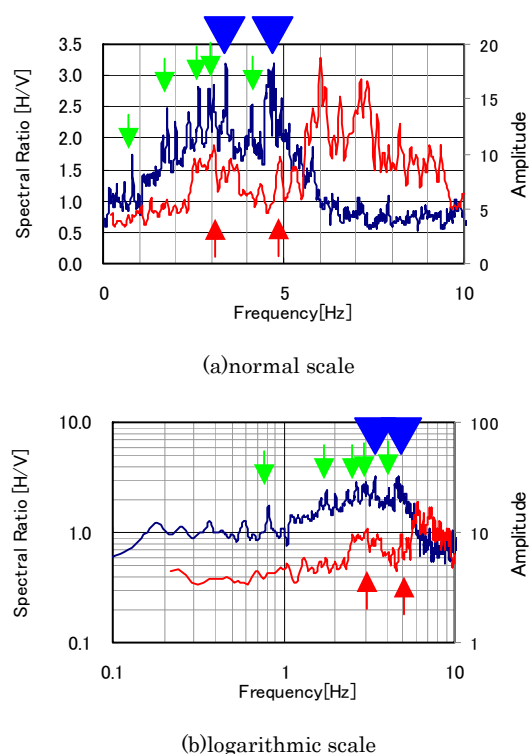


Fig.1. Example of microtremor H/V spectral ratio (black line) and the site amplification factor at the same site (Nozu et al, 2007) (gray line)

は、下向矢印↓の極大値もピークとして読み取る場合もあり得る。特に対数表記とした場合、ピーク値の差が明瞭ではなくなることもあり、揺れによる被害との関係などから1次のピークとして1Hz付近のピークを重要視すると、0.8Hzや1.8Hz付近を読み取る場合も考えられる。このような小さなリプル(ギザギザ)が無視すべきノイズであるか否かについては議論の余地が残るが、少なくとも常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数の解釈等において、常時微動に表面波が卓越していることを前提としている(例えば、時松・新井, 1998)ことを考慮すれば、常時微動 H/V スペクトルにおける小さなリプル(ギザギザ)を無視することにより地盤の卓越周波数などを判別できる可能性が高いと考えられる。

Fig.1 には、同地点において地震観測記録からスペクトルインバージョン(岩田・入倉, 1986)によって得られたサイト増幅特性(野津ほか, 2007)を併記した(灰色線)。常時微動 H/V スペクトル比に現れていないサイト増幅特性の6Hz以上のピークには着目せず、6Hz未満に着目すると地盤の卓越周波数と考えられるピークが3Hz付近と5Hz付近(上向矢印↑)に見られることがわかる。これらの値は、常時微動 H/V スペクトル比においてリプルを無視して読み取ったピーク周波数(▼印)に近い。

2.2 フィルタ操作によるスムージング方法(提案法)

離散フーリエ変換(FFT)と離散フーリエ逆変換(IFFT)

の表式を以下に示す(例えば, 大崎, 1976)。

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i e^{-j(2\pi k i / N)} \quad (1)$$

$$x_i = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{+j(2\pi k i / N)} \quad (2)$$

ここで, x_i は時系列データ, X_k は複素フーリエ係数, j は虚数単位, N はサンプリング点数である。式(2)のフーリエ逆変換を次のように変形する。

$$x_i = X_0 + \sum_{k=1}^{N-1} X_k e^{+j(2\pi k i / N)} \quad (3)$$

式(3)の右辺第1項($k=0$)のフーリエ係数(X_0)は, サンプル値の平均を表す定数項(直流成分)である。一方, それ以外の項は正弦波(交流成分)を表し, 交流成分の第2項($k=1$)は, サンプリング点数(N)を周期とする成分で基本波である。また, 第3項以降は, 基本波に対して周波数が整数倍(k 倍)となる(第 k 次)高調波を表している。

本研究では, 常時微動 H/V スペクトル比を一種の時系列データとみなして, 高速フーリエ変換 (FFT) によって, この時系列データを複素フーリエ係数(X_k)を用いて展開する。展開後の各項のうち第1次高調波から第 m 次高調波までを残して, 平均を表す定数項と第 $m+1$ 次高調波以降はゼロとする操作(フィルタ操作)を行った。フィルタ操作後のフーリエ係数(X_k)を高速フーリエ逆変換 (IFFT) することで, スペクトルの高周波成分に相当するリプル(ギザギザ)が取り除かれ, スムージングされた常時微動 H/V スペクトル比を算出することができる。以下では, この方法を提案法と称する。

2.3 ウィンドウ処理によるスムージング方法

常時微動 H/V スペクトルの計算においては, 一般にウィンドウ処理によるスムージングが行われる。ウィンドウ処理の表式を以下に示す。

$$\bar{x}(t) = \sum_{k=-b/2}^{b/2} w(k) \cdot x(t-k) \quad (4)$$

ここで, x は原波形, w はウィンドウ関数, b はバンド幅である。ウィンドウ処理は, ウィンドウ関数と原波形との畳込み(合積)を計算することを意味している。

ここでは, スペクトルのウィンドウ関数として一般的に適用される Parzen ウィンドウを採用した。Parzen ウィンドウの表式を以下に示す。

$$w(f) = \frac{3}{4} u \left(\frac{\sin \frac{\pi u f}{2}}{\frac{\pi u f}{2}} \right)^4, \quad b' = \frac{280}{151u} \quad (5)$$

ここに, f は周波数, b' はバンド幅, u は定数(打ち切

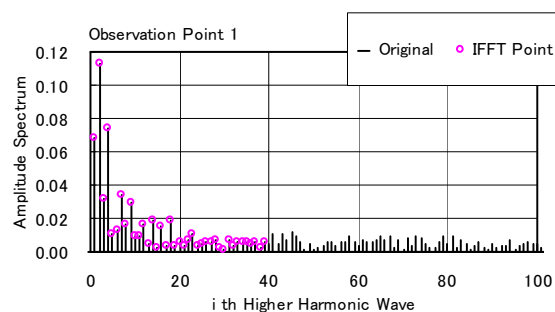


Fig.2. Example of complex Fourier coefficient

り幅)である。なお, バンド幅(b')は Parzen ウィンドウの分散を求め, それと等しい分散をもつ長方形パルスの幅として設定した。

一般に, ウィンドウ処理によってスムージングされたスペクトルをフーリエ逆変換する場合, 偏り, 漏れやバンド幅の設定が問題になる。本研究では, リプル(ギザギザ)を取り除いてピーク周波数(周期)を検出することを目的としているため, 特にバンド幅の影響が問題になると考えられる。バンド幅が狭過ぎるとスムージングしたスペクトルにリプル(ギザギザ)が残りピーク周波数の検出が困難になる。逆に, バンド幅が広過ぎるとスペクトルが滑らかになり過ぎてピークの位置がはっきりしなくなる。特に, バンド幅より低周波数のスペクトルの精度に疑問が残る。

なお, 紺野・大町(1995)では, 対数軸上でバンド幅が一定となるような対数型ウィンドウも提案されているが, 本研究では(5)式に示される通常の Parzen ウィンドウを用いることとした。

2.4 ピーク周波数の検出方法

提案法においては, 0.2Hz~10.0Hz の間でピーク値が 1.0 以上(直流成分を除去しているため)の極値(極大値)を抽出した。なお, 最大ピーク値の 1/2 未満の値は極値(極大値)と見なさないこととした。

一方, ウィンドウ処理によるスムージング方法を用いた場合は, 0.2Hz~10.0Hz の間でピーク値が 2.0 以上(直流成分を除去していないため)の極値(極大値)を抽出した。なお, 同様に最大ピーク値の 1/2 未満の値は極値(極大値)と見なさないこととした。

3. ピーク周波数の検出結果

3.1 提案法の結果

提案法のフィルタ操作において, 高速フーリエ変換 (FFT) において必要なサンプリング点数(2 のべき乗個)と分解能誤差を考慮して, FFT に用いるデータは, 0~25Hz までの 4096 点とした。すなわち, 常時微動 H/V スペクトル比のうち, 4096 点を一種の時系列データとみ

なした。高速フーリエ変換(FFT)によって展開された各項の複素フーリエ係数(第 0 次～第 100 次)を Fig.2(Original)に示す。この複素フーリエ係数のうち、第 1 次～第 39 次高調波に対応する係数を残して(Fig.2 の IFFT Point), 平均を表す定数項と第 40 次高調波以降に対応する係数をゼロとして、高速フーリエ逆変換(IFTT)を行った。本研究では、フーリエ係数が十分に小さくなる次数を Fig.2 により確認し、全複素フーリエ係数第 0 次～第 2048 次の約 1/50 にあたる第 39 次高調波までの係数を残すこととした。なお、IFFT 時のサンプリング点数は FFT 時と同じ 4096 点である。

Fig.3 に、フィルタ操作によるスムージング方法を用いた場合の元の常時微動 H/V スペクトル比(Original), スムージングされた常時微動 H/V スペクトル比(Smoothing)とピーク周波数の検出結果(Maximum)を示す。Fig.3 は、10Hz までの結果を示したものであり、スムージングされた常時微動 H/V スペクトル比が周波数領域全域で下にシフトしているのは、フーリエ係数の第 1 項(平均値)をゼロとしたためである。スムージングされた常時微動 H/V スペクトル比(Smoothing)をみると、フィルタ操作によってリップル(ギザギザ)が十分に取除かれていることがわかる。なお、ObservationPoint-1～10 は、Table1 に示すように、地形・地質的特徴やその規模、観測点の特徴、常時微動 H/V スペクトル比の特徴から、さまざまな特徴を有する観測データを選定した。

ObservationPoint-1 のスムージング後の常時微動 H/V スペクトル比(Smoothing)から検出されたピーク周波数(↑)は 3.2Hz および 4.7Hz である。これは Fig.1 に灰色線で示した実際の地震観測記録から検出された地盤の卓越周波数 (3Hz 付近および 5Hz 付近) とよく対応しており、フィルタ操作によるスムージングによってリップル(ギザギザ)を取り除くことにより、地盤の地震応答特性を考える上で重要となる、卓越周波数と考えられるピーク(以下、「地盤の卓越周波数と考えられるピーク」と略す)を検出できていることがわかる。

ObservationPoint-2 をみると、スムージング後(Smoothing)のピーク周波数(↑)はスムージング前(Original)(↓)と比べて、わずかに低周波数側にシフトしている。これは、スムージング前のピークがリップル(ギザギザ)によって生じているのに対して、スムージング後は、近傍のピークも加味して、1 次または高次の卓越周波数等に対応するピークを検出できたものと考えられる。

ObservationPoint-4 も、スムージング前のスペクトル比(Original)(↓)が近接した 2 つのピークを有するのに対して、スムージング後(Smoothing)は両者を加味して、地盤の卓越周波数と考えられるピーク(↑)を検出できたものと考えられる。ただし、どの程度近接したピークを 1 つのピークと見なすかなど、検討の余地は残されている。

ObservationPoint-6 では、スムージング後(Smoothing)(↑), スムージング前(Original)(↓)ともに 2 つのピークが検出されている。スムージング前はわずかに低周波数側のピークが大きい、スムージング後では高周波数側のピークの方が大きくなっている。スムージングによって、ピーク幅を加味したピーク周波数の検出が可能となっているものと考えられる。

3.2 ウィンドウ処理によるスムージング方法を用いた場合の結果

Fig.4, Fig.5 にウィンドウ処理によるスムージング方法を用いた場合の元の常時微動 H/V スペクトル比(Original), スムージングされた常時微動 H/V スペクトル比(Smoothing)とピーク周波数の検出結果(Maximum)を示す。Fig.4, Fig.5 は、10Hz までの結果を示したものであり、Fig.4 が Parzen ウィンドウのバンド幅 0.2Hz, Fig.5 が Parzen ウィンドウのバンド幅 0.5Hz の場合の結果である。

Parzen ウィンドウは、前節で示したように、バンド幅で示される周波数範囲におけるスペクトル値の平均化操作であるため、一般にバンド幅 0.2Hz の場合は 0.2Hz 未満の周波数、バンド幅 0.5Hz 場合は 0.5Hz 未満の周波数におけるスペクトル値を用いたピークの判別には適さないと考えられる。ここでは、ピーク周波数の検出を行う 0.2Hz～10.0Hz に対して、平均化操作の影響が少ないと考えられるバンド幅 0.2Hz と、フィルタ操作によるスムージング方法と同等のスムージング結果が得られるバンド幅 0.5Hz の 2 ケースの検討を行った。

Parzen ウィンドウのバンド幅 0.2Hz の場合(Fig.4), リップル(ギザギザ)が取りきれておらず、その極大値は数が多いことに加えて、リップル(ギザギザ)に大きく影響を受けたものとなっている。すなわち、地盤の卓越周波数と考えられるピークが合理的に検出されていない可能性が考えられる。特に、ObservationPoint-1 において、スムージング後の常時微動 H/V スペクトル比(Smoothing)から検出されたピーク周波数(○印)は、Fig.1 に灰色線で示した実際の地震観測記録から検出された地盤の卓越周波数 (3Hz 付近および 5Hz 付近) と対応していない。また、ObservationPoint-2～5 をみると、スムージング後(Smoothing)のピーク周波数が、最大値付近に複数得られている。地盤の卓越周波数と考えられるピークを検出するためには、これらのうちどちらを採用するかなど、さらに人為的な判断が必要になると考えられる。

一方、Parzen ウィンドウのバンド幅 0.5Hz の場合(Fig.5)では、フィルタ操作によるスムージング方法を用いた場合と同じ程度までリップル(ギザギザ)が取り除かれていることがわかる。

ObservationPoint-2～6 をみると、スムージング後(Smoothing)はリップル(ギザギザ)が十分に取除かれて

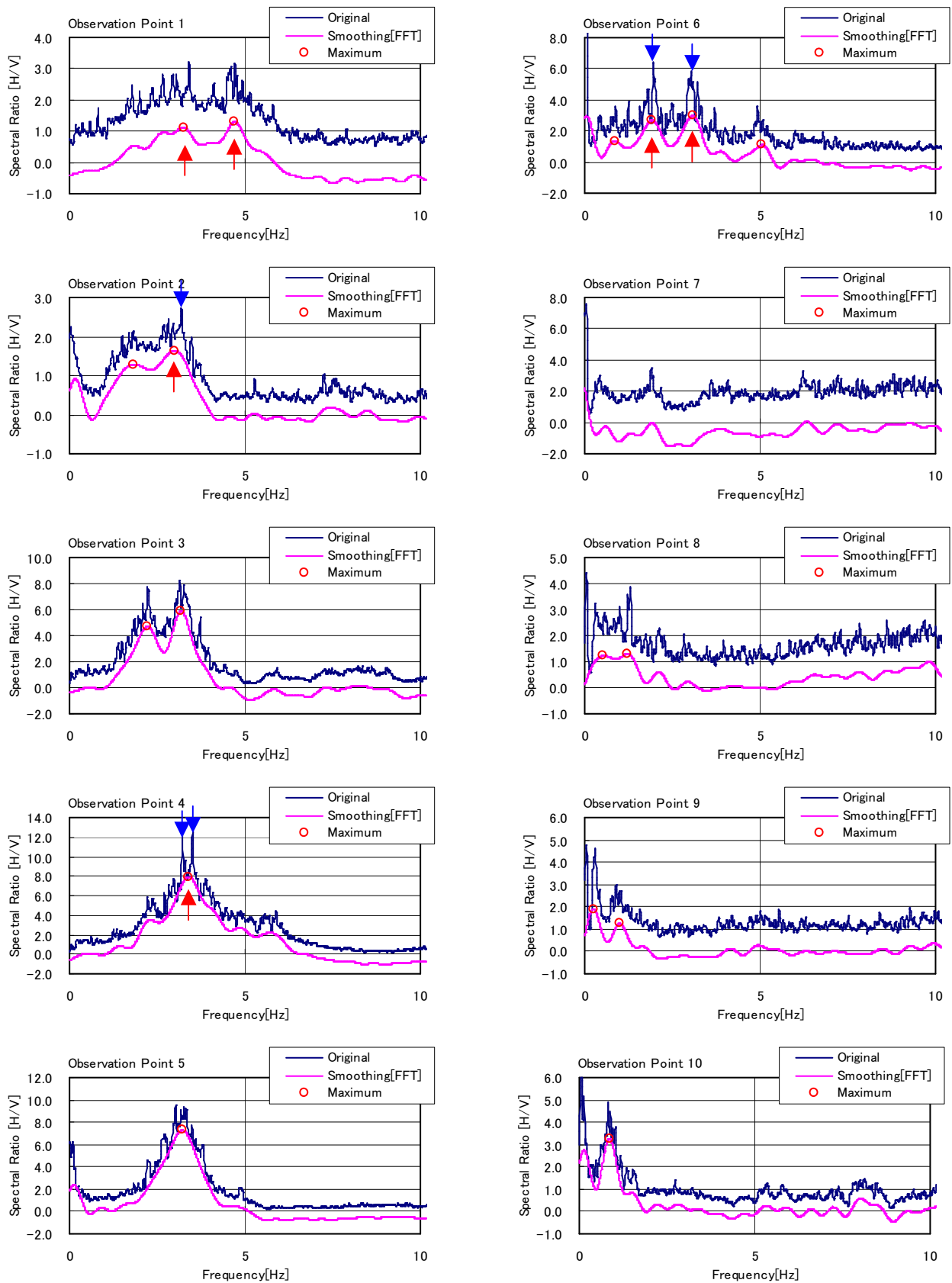


Fig. 3. Detection of the peak frequency of the microtremor H/V spectral ratio by smoothing the spectral ratio using a low-pass filter

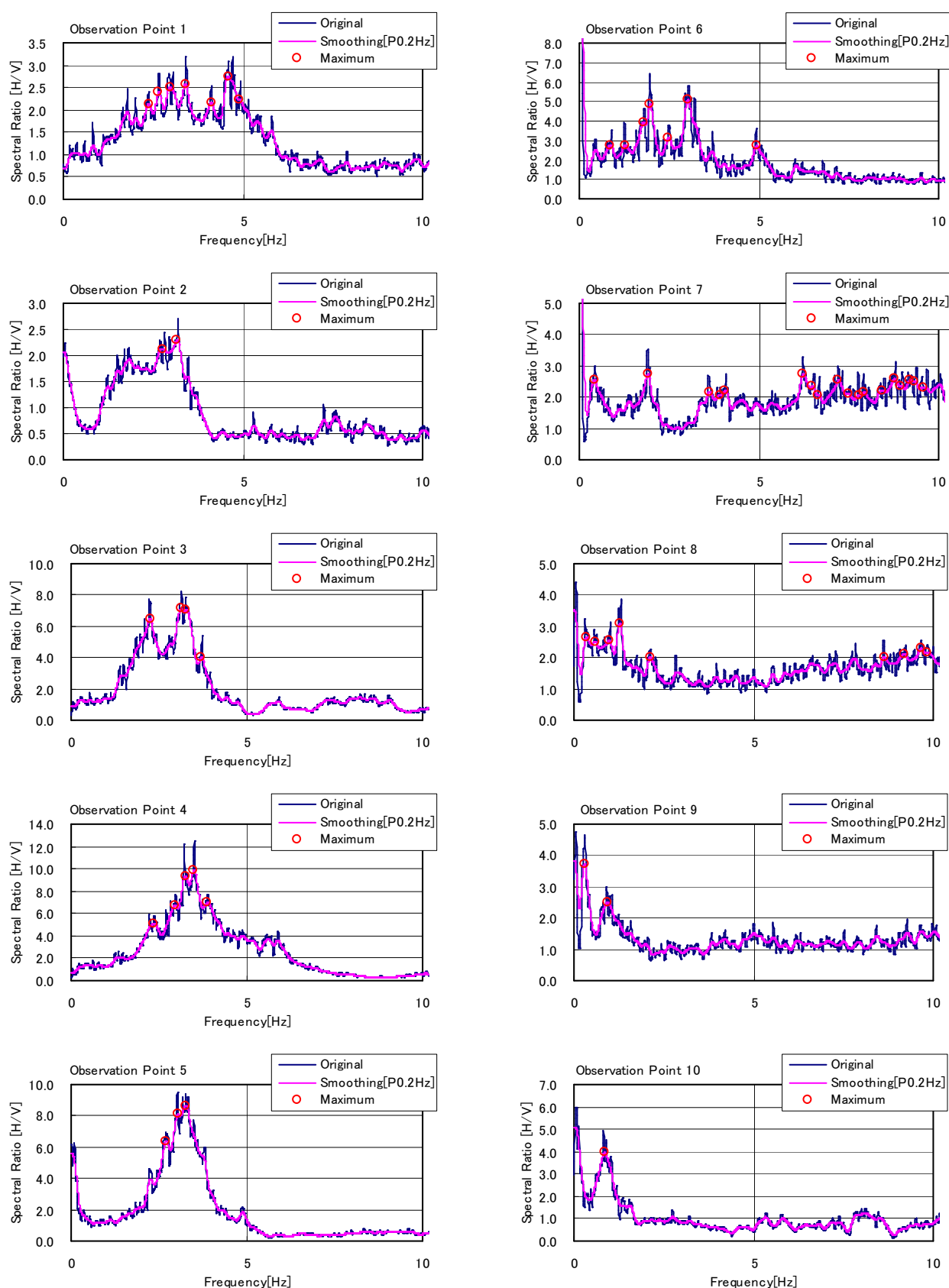


Fig. 4. Detection of the peak frequency of the microtremor H/V spectral ratio by the window processing with the frequency band width of 0.2Hz

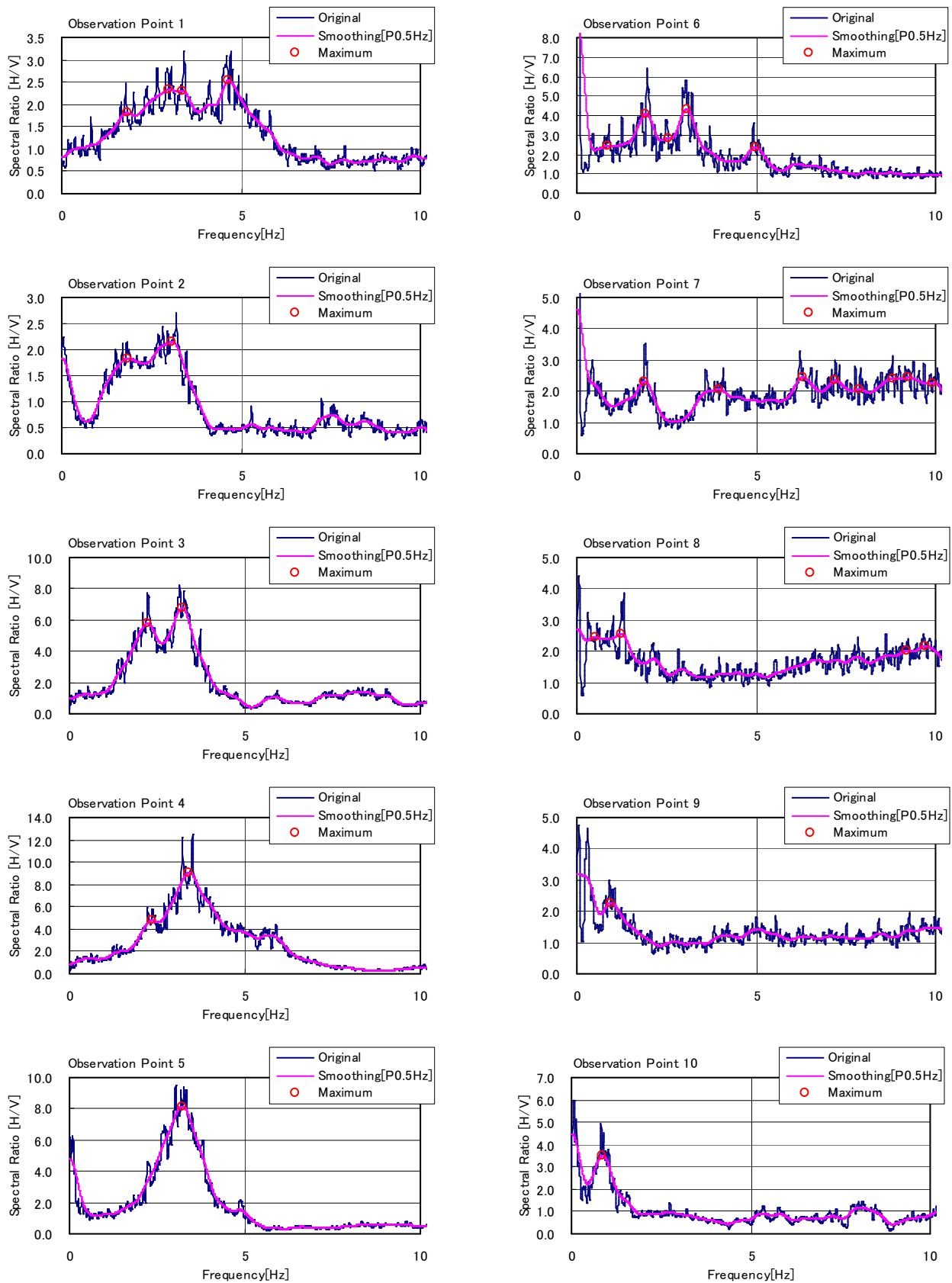


Fig. 5. Detection of the peak frequency of the microtremor H/V spectral ratio by the window processing with the frequency band width of 0.5Hz

Table 1. Characteristics of ObservationPoint

ObservationPoint	地形・地質的特徴(規模)	観測点の特徴(推定)	常時微動H/Vスペクトル比の特徴
1	海岸平野(小規模)	山地との境界付近、盛土あり	地盤と盛土に起因するピーク
2	海岸平野(小規模)	山地との境界付近、盛土なし	地盤に起因するピーク
3	海岸平野(小規模)	埋立地盤上、基盤傾斜あり	埋立地盤に起因するピークが基盤傾斜により2つ
4	海岸平野(小規模)	埋立地盤上、基盤傾斜小	埋立地盤に起因するピーク(ピークが分離)
5	海岸平野(小規模)	埋立地盤上、基盤傾斜小	埋立地盤に起因するピーク
6	堆積盆地(基盤深度1000m程度)	盆地端部付近	2~3Hz付近にピーク
7	堆積盆地(基盤深度1000m程度)	6と9の間、盆地端部寄り	6と9の間、盆地端部寄り
8	堆積盆地(基盤深度1000m程度)	6と9の間、盆地中央寄り	6と9の間、盆地中央寄り
9	堆積盆地(基盤深度1000m程度)	盆地中央付近	低周波数(0.25Hz付近)にピーク
10	海岸平野(大規模)	平野中央部、ほぼ水平成層	1Hz付近にピーク、低周波数にノイズ

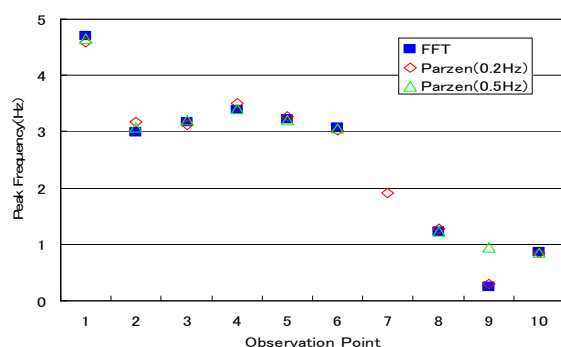


Fig.6. Comparison of detected peak frequencies by the proposed method and by the window processing

おり、地盤の卓越周波数と考えられるピークを検出することができているものと考えられる。

ObservationPoint-1 でも、スムージング後の常時微動 H/V スペクトル比(Smoothing)から検出されたピーク周波数(○印)は、バンド幅が 0.2Hz の場合に比べ、Fig.1 に灰色線で示した実際の地震観測記録から検出された地盤の卓越周波数 (3Hz 付近および 5Hz 付近) との対応は良い。しかし、提案法を使用した場合ほどの良好な対応は得られていない。

また、ObservationPoint-7 では、スムージング前 (Original)のスペクトルが高周波側で上方にシフトしているために、本来比高が小さく、明瞭なピークと見なされないピークがいくつも検出されている。

さらに、ObservationPoint-8 において、0.5Hz 付近の低周波数側のピークは検出されているのに対して、ObservationPoint-9 では、0.25Hz 付近の低周波数側のピークは検出されていない。これは、バンド幅未満の周波数帯域において、常時微動 H/V スペクトル比のピーク判別ができないことに対応している。

3.3 ピーク周波数の検出結果の比較

提案法とウィンドウ処理によるスムージング方法を用いた場合のピーク周波数の検出結果を比較した結果を Fig.6 に示す。両手法によって検出されたピーク周波数は概ね一致していることがわかる。

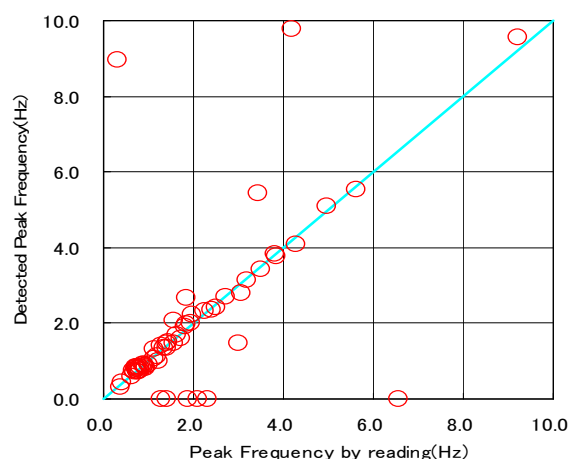


Fig.7. Comparison of detected peak frequencies by the proposed method and by reading in the Kanto area

提案法によるピーク周波数の検出方法は、前項で示した、ピーク値が小さく明瞭ではない ObservationPoint-7 のケースや低周波数帯域にピークが見られる ObservationPoint-9 のケースにおいて、有利であると考えられる。

4. 関東地方における常時微動 H/V スペクトル比に対する提案法の適用例

4.1 関東地方における常時微動 H/V スペクトル比

著者らは、これまでに全国の既往強震観測地点において 281 地点の常時微動観測を行っている(長尾ほか, 2010)。常時微動観測は周期 5 秒までフラットな特性を有するサーボ型速度計を用いて行い、常時微動 H/V スペクトル比は、長周期の波動成分の影響を考慮できるように各観測地点について擾乱の少ない 163.84 秒間のデータを 3 区間抽出し、その平均値として算出した。

長尾ほか(2010)では、これらの常時微動 H/V スペクトル比に対して、その包絡形状によるタイプ分けやピーク周波数およびピーク値の読み取りを行っている。その際、深層地盤構造等より想定される地盤の卓越周波数に関する情報をもとに、工学的判断により慎重にピーク周

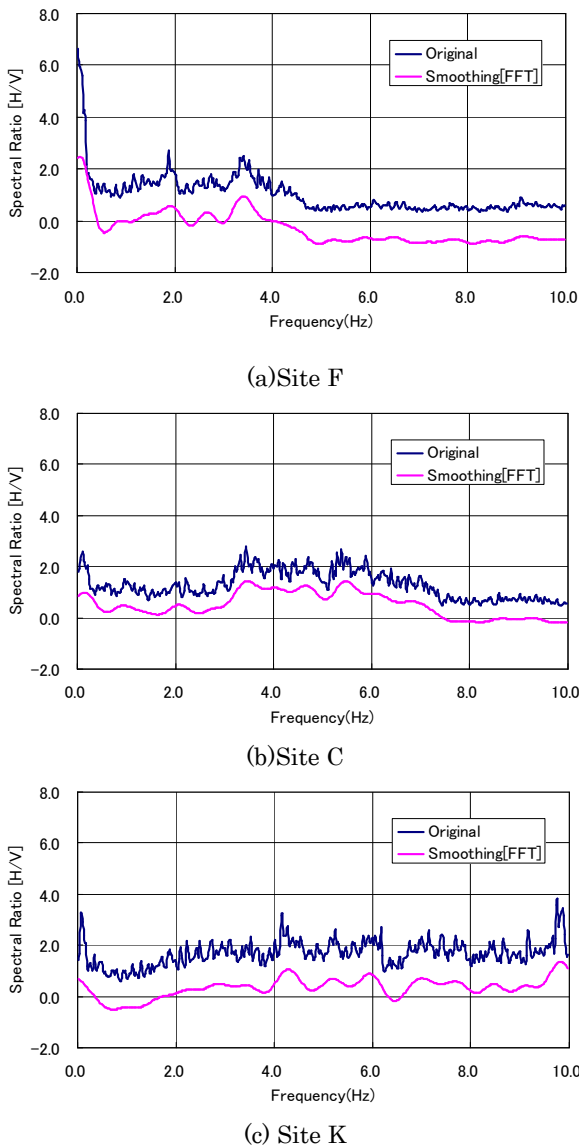


Fig.8. Example of disagreement of detected peak frequencies by the proposed method with by reading in the Kanto area

波数などを読み取っている。本研究では、上記 281 地点のうち、関東地方に位置する 61 地点の常時微動 H/V スペクトル比を対象とした。

4.2 関東地方における常時微動 H/V スペクトル比に対する提案法の適用例

関東地方における 61 地点の常時微動 H/V スペクトル比に対して、前章で述べたフィルタ操作によるスムージングを用いたピーク周波数の検出手法を適用した。ここでは、ピーク周波数として、スムージングを行った常時微動 H/V スペクトル比から、極値(極大値)となる周波数のうちで、振幅が最大のものを抽出することとした。その検出結果と長尾ほか(2010)において読み取られたピーク周波数の比較を行った。その結果を Fig.7 に示す。

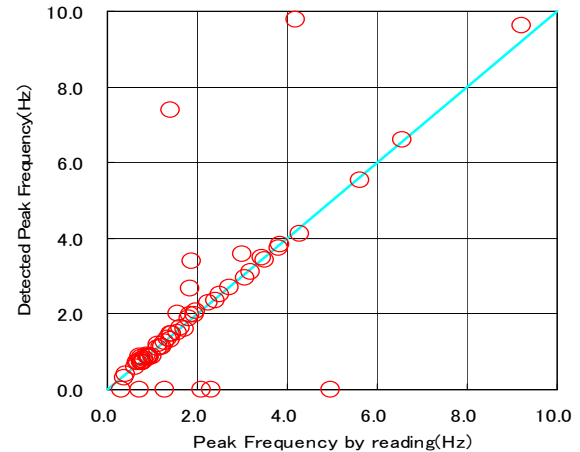


Fig.9. Comparison of detected peak frequencies by smoothing method (parzen window 0.5Hz) and by reading in the Kanto area

横軸の長尾ほか(2010)において読み取られたピーク周波数に対して、縦軸の提案法により検出されたピーク周波数はほとんどの地点においてよい対応を示していることがわかる。提案法においては上述のように地盤の卓越周波数などに関する情報等は考慮しておらず、画一的なルールによりピークの読み取り処理を行っているが、その結果が工学的判断を加味して慎重に読み取られた既往の研究の結果と一致するという事実は、提案法の有効性を示すものと考えられる。

ただし、Fig.7 において、提案法の結果が既往の研究による読み取りピーク周波数と一致しないものが 1 割程度見られた。読み取りによるピーク周波数と一致しない例を Fig.8 に示す。

読み取りによるピーク周波数と一致しないもののうち、提案法による検出値が 0 となったものの例が、Fig.8 の F 地点である。常時微動 H/V スペクトル比が全体的に上に持ち上がっているため、読み取りでは 1.9Hz(↓)をピーク周波数と判定したが、フーリエ係数の第 1 項(平均値)を 0 としてバイアス成分を補正する提案法ではピークと判定されなかったものである。一方、検出値が 0 以外で、読み取りによるピーク周波数と一致しない例を Fig.8 の C 地点および K 地点として示した。C 地点および K 地点の常時微動 H/V スペクトル比にはピークが複数見られることがわかる。この複数のピークに対して、読み取り(↓)と提案法(↑)において異なる方のピークを検出したため、両者の検出結果が一致しなかった。ピークが複数ある場合には、その“ピーク周波数”を最大値とするか、最も低周波数側とするか、また両者を採用するかなど、どのように定義するかによって、その検出結果は異なると考えられ、今後の検討課題と考えられる。

Fig.9 にバンド幅 0.5Hz の Parzen ウィンドウを用いてスムージングを行った場合の検出結果と長尾ほか

(2010)において読み取られたピーク周波数の比較を行った。Fig.7 の提案法の結果と同様に、ほとんどの地点においてよい対応を示していることがわかる。しかしながら、Parzen ウィンドウを用いてスムージングによる検出結果は、バンド幅以下程度の低周波数のピークに対して、検出できないものが見られた。

5. おわりに

常時微動 H/V スペクトル比に対して、フィルタ操作によるスムージング方法を用いて、ピーク周波数検出を行った。

その結果、以下の結果が得られた。

- ・提案法は、地盤の地震応答特性を考える上で本質的に重要となる、地質や地層構造の特徴に対応するピークを検出できることを示した。

- ・提案法は、ウィンドウ処理によるスムージング方法を用いた場合と概ね一致する結果を与えるものの、低周波数帯域におけるピークの検出やピーク値の小さいものに対する対応において有利であることを示した。

- ・関東地方における常時微動 H/V スペクトル比に対して、提案したピーク周波数検出方法を適用し、検出結果が既往の読み取りによるピーク周波数とよく一致することを示した。

このように、本手法は高密度、大量の微動観測結果に適用できる有効な方法であると考えられる。

一方、原波形とみなした常時微動 H/V スペクトル比の周波数間隔とフーリエ逆変換時に採用する高調波の次数の関係については、議論の余地が残る。ピーク値と判断する極値(極大値)の抽出方法(1.0 以上、最大ピークの 1/2 未満を除外)についても、議論の余地が残る。また、ピークが複数ある場合など、その“ピーク周波数”として、最大値を採用するか、最も低周波数側を採用するかなど、その定義によって検出結果が異なると考えられる。今後のさらなる検討を行い、フーリエ逆変換時に採用する高調波の次数やピーク値と判断する極値(極大値)の抽出方法についても提案を行う予定である。

謝 辞

本論文を執筆するにあたり、(株)ニュージェック 竹澤 請一郎氏より、多くの貴重なご意見を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 岩田知孝・入倉孝次郎(1986): 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, **39**, 579-593.
- 紺野克昭・大町達夫(1995): 常時微動の水平/上下スペクトル比を用いる増幅倍率の推定に適した平滑化とその適用例, 土木学会論文集, **525**, 247-259.
- 湊 文博・秦 吉弥・山田雅行・常田賢一・魚谷真基(2014): 常時微動 H/V スペクトルに基づく和歌山県串本町での地盤震動特性の評価, Kansai Geo-Symposium 2014 論文集, 95-100.
- 長尾 毅・山田雅行・野津 厚 (2010): 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, **56A**, 324-333.
- 中村 豊(1988): 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, **2(4)**, 18-27.
- 野津厚・長尾毅・山田雅行(2007): スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例, 日本地震工学会論文集, **7(2)**, 215-234.
- 大石佑輔・久保篤規・高橋宏和・山品匡史 (2014): 高密度常時微動観測から推定される高知平野の表層地盤構造, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会.
- 大崎順彦(1976): 地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会.
- 先名重樹・安達繁樹・安藤浩・荒木恒彦・飯澤清典・藤原広行 (2006): 微動探査観測システムの開発, 物理探査学会学術講演会講演論文集, **115**, 227-229.
- 先名重樹・前田宜浩・稲垣賢亮・鈴木晴彦・神 薫・宮本賢治・松山尚典・森川信之・河合伸一・藤原広行 (2013): 強震動評価のための千葉県・茨城県における浅部・深部統合地盤モデルの検討, 防災科学技術研究所 研究資料, **370**, 1-116.
- 時松孝次・新井 洋(1998): レイリー波とラブ波の振幅比が微動の水平鉛直スペクトル比に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, **511**, 69-75.

An efficient detection method of the peak frequency of microtremor H/V spectral ratio by using a low-pass filter

Masayuki Yamada ^{*}, Satoru Yagi ^{*}, Takashi Nagao ^{**} and Atsushi Nozu ^{*3}

ABSTRACT

We proposed an efficient detection method of the peak frequencies of microtremor H/V spectral ratio by using a low-pass filter. It was revealed that the proposed method can detect the peak frequencies that are essentially important for the earthquake response of the ground. It was also revealed that the proposed method was more advantageous than the window processing in cases where the peak frequencies were low or the peak values of the H/V spectral ratio were relatively small. Applicability of the proposed method was further investigated using the microtremor H/V spectral ratios in the Kanto region.

Keywords: microtremor, H/V spectral ratio, peak frequency, filter operation

Manuscript received October 5, 2014; Accepted January 18, 2015.

^{*} Technology Development Group, NEWJEC Inc.
3-20, Honjo-Higashi 2-chome, Kita-ku, Osaka 531-0074,
Japan

^{**} Research Center for Urban Safety and Security, Kobe
University
Japan1-1, Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe-city, 657-8501, Japan

© 2015 SEGJ

^{*3} Earthquake Disaster Prevention Engineering Division,
Port and Airport Research Institute
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826, Japan