

FFT フィルタを用いた常時微動 H/V スペクトル比の ピーク周波数の効率的な検出方法の提案

(株) ニュージェック ○ 八 木 悟
(株) ニュージェック 山 田 雅 行
(株) ニュージェック 竹 澤 請 一 郎

論 文 要 旨

常時微動 H/V スペクトル比は、地震動のサイト増幅特性や、浅部から深部までの地盤構造と関係があるものと考えられ、ボーリング調査等の局所的な地質調査に比べて観測や解析も簡便であることから、面的に高密度の大量の常時微動観測データが集まりつつある。常時微動 H/V スペクトル比から得られる重要な情報の1つは、ピーク周波数であるが、一般的には工学的判断にもとづく人為的な目視による読み取りを行っており、大量のデータから、効率的かつ工学的に意味のあるピーク周波数を特定する手法の開発は、急ぎ求められている。そこで著者らは、常時微動 H/V スペクトル比の周波数軸を空間軸とした FFT フィルタを適用することで、大量のデータからピーク周波数を効率的に読み取る方法を提案した。提案法と目視による読み取りを行う際のウインドウ処理を比較し、低周波数帯域におけるピーク周波数の検出やピーク値の小さいものに対して有利であることが明らかとなった。さらに、全国 283 地点の常時微動 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が明らかとなった。提案法は、大量で高密度の常時微動観測の結果に適用できる有効な方法である。

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，FFT フィルタ，大量のデータ，高密度

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)¹⁾により提唱され，観測や解析も簡便であることから，大量の常時微動観測データが集まりつつある。

長尾ら(2010)²⁾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。先名ら(2013)³⁾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。大石ら(2014)⁴⁾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。湊ら(2014)⁵⁾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，ピーク周波数であるが，長尾ら，および湊らは目視による読み取りを行っており，大石ら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，先名らは，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，長尾らでは，ポイント数 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スムージングを行っている。湊らは、Parzen ウィンドウは長尾らと同様であるが、10 区間の平均化を行っている。しかしながら、バンド幅の設定によって、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、本研究では、ウィンドウ処理(バンド幅の設定)や離散的な区間平均、およびアンサンブル平均を必要としないスムージング方法として、常時微動 H/V スペクトル比の周波数軸を空間軸とした FFT(高速フーリエ変換)フィルタを試みた。FFT は多項式近似の一種であり、常時微動 H/V スペクトル比を空間軸のポイント数で級数展開し、基本波(空間幅)付近の複素フーリエ係数に着目した IFFT(高速フーリエ逆変換)を行うことで、リップルが取り除かれた地盤の本質的なピーク形状(例えば、単数や複数の凸型)を表現可能であると考えられた。さらに、複素フーリエ級数の定数項(平均値)を利用し、規則的なルールを付加することで、ピーク周波数の目視による読み取りといった人為的な作業を必要としない、大量のデータから効率的にピーク周波数を検出する方法を提案し、その適用性を例証する。

1. ピーク周波数の検出方法

(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図-1(青色線)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、図-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。

図-1(青色線)の常時微動 H/V スペクトル比のピークは、青色下向矢印(↓)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ップルがみられるため、読み取る者の判断によっては、緑色下向矢印(↓)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

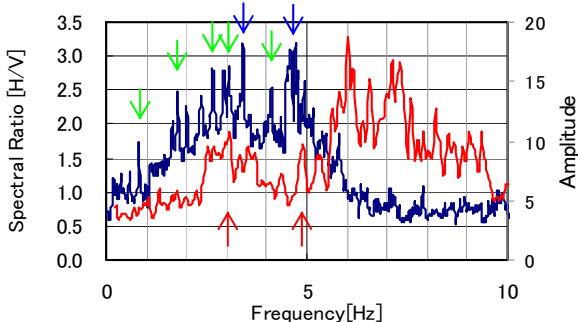


図-1 常時微動 H/V スペクトル比(青色線)とサイト増幅特性(赤色線)の比較

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ップル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)⁶⁾)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ップル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。

図-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)⁷⁾)によって得られたサイト増幅特性(野津ら(2007)⁸⁾)を併記した(赤色線)。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 付近の赤色上向矢印(↑)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ップルを無視して読み取ったピーク周波数の青色下向矢印(↓)に近い。

(2) FFT フィルタ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)⁹⁾)。

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

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

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 はポイント数である。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。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、ポイント数(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 スペクトル比の周波数軸を空間軸(一種の時系列データ)と見なし、FFT によって複素フーリエ係数(X_k)に展開する。展開した各係数項のうち基本波の第 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 $m+1$ 次高調波以降をゼロとする(FFT フィルタ)。そのフーリエ係数(X_k)について IFFT を行うことで、スペクトルの高周波成分に相当するリップルが取り除かれ、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、この方法を提案法と称する。

(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 スペクトルの計算では、式(4)のウィンドウ処理によるスムージングが一般的に行われる。

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

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み込み(合積)を計算することを意味している。

本研究では、スペクトルのウィンドウ関数として一般的に用いられる Parzen ウィンドウを採用する。Parzen ウィンドウの表式を式(5)に示す。

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

ここで、 f は周波数、 b' はバンド幅、 u は定数(打ち切り幅)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を行う場合、バンド幅の設定が問題になる。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ップが残るためピーク周波数の検出が困難になる。一方、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不明瞭になる。そのため、ウィンドウ処理では、異なるバンド幅での感度分析や目視による確認が必要になる。

(4) ピーク周波数の検出方針

ピーク周波数の検出範囲(周波数帯)は、常時微動計の分解能(例えば、下限値 0.1~0.2Hz)と構造物や地盤の振動特性において工学的に意味のある周波数(例えば、上限値 10Hz)を考慮し、周波数帯 0.2~10Hz(周期帯 0.1~5 秒)を対象とする。検出範囲でのピーク周波数の判定は、スムージングされた常時微動 H/V スペクトル比の極値(極大値)をピーク周波数(ピーク値)として、自動的に抽出する。

また、常時微動 H/V スペクトル比の卓越周波数が明瞭なものと不明瞭なものを区別するため、提案法の FFT フィルタでは、平均を表す定数項を取り除き、ピーク値 1.0 以上

を抽出する。ウィンドウ処理では、常時微動 H/V スペクトル比を表面波やサイト増幅特性と考えた場合の低周波数成分は 1.0 に漸化する傾向があり、提案法で取り除いた平均値は概ね 1.0 程度になるものとして、ピーク値 2.0 以上の極値(極大値)を抽出する。両手法ともに、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する。

2. ピーク周波数の検出例

表-1(観測点 1~10)は、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て示したものである。ここでは、表-1 に示した観測点の常時微動 H/V スペクトル比について、提案法とウィンドウ処理によって検出されたピーク周波数を整理し、比較する。

(1) 提案法とウィンドウ処理の設定条件

図-2 は、表-1(観測点 1)の常時微動 H/V スペクトル比を FFT によって級数展開した複素フーリエ係数(振幅スペクトル)を示したものである。図-2 より、常時微動 H/V スペクトル比を形作るスペクトル成分は、基本波(第 1 次)に集中していることがわかる。

今回適用する提案法では、常時微動 H/V スペクトル比の形状を形作る複素フーリエ係数が十分に小さくなる次数として、図-2 の桃色丸に示した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 次高調波までを残し、第 40 次高調波以降の係数と平均を表す定数項をゼロにして IFFT を行うものとした。

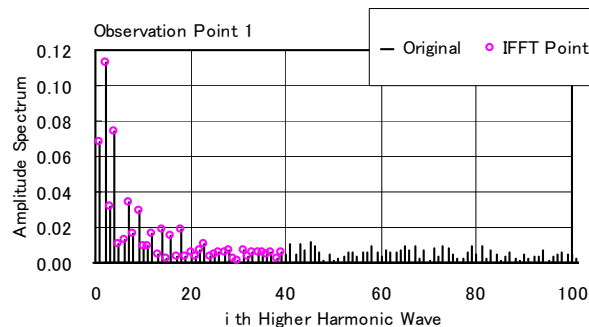


図-2 複素フーリエ係数の例

表-1 さまざまな特徴を有する観測点

観測点	地形・地質的特徴 (規模)	観測点の特徴 (規模)	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		山地との境界付近, 盛土なし	地盤に起因するピーク
3		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		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			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		6と9の間, 盆地端部寄り	6と9の間 (盆地端部寄り) にピーク
8		6と9の間, 盆地中央寄り	6と9の間 (盆地中央寄り) にピーク
9		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

ウィンドウ処理による方法では、ピーク周波数の検出を行う 0.2Hz~10Hz に対し、スムージングの影響が少ないと考えられるバンド幅 0.2Hz と、提案法の FFT フィルタと同等のスムージング結果が得られるものとして、バンド幅 0.5Hz を設定し、検討を行った。

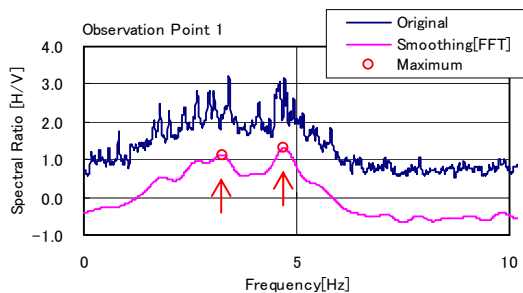
(2) 提案法とウィンドウ処理の比較

図-3~図-6 は、表-1 に示した観測点の常時微動 H/V スペクトル比について、提案法とウィンドウ処理によるスムージング結果とピーク周波数の検出結果を比較した、代表的な事例を示したものである。元の常時微動 H/V スペクトル比を青色線、提案法の FFT フィルタとウィンドウ処理のバンド幅 0.2Hz、およびバンド幅 0.5Hz でスムージングされたものを桃色線、ピーク周波数の検出結果を赤色丸で示し、10Hz までの結果を示している。提案法で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、複素フーリエ係数の定数項をゼロとしたためである。

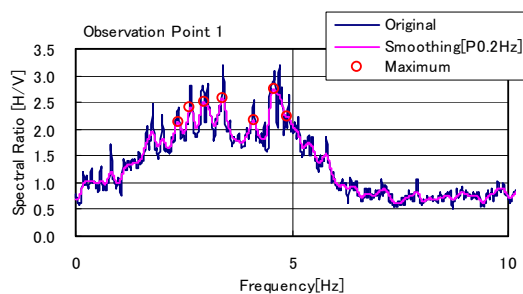
図-3 より、提案法から検出されたピーク周波数の赤色上向矢印(↑)は 3.2Hz および 4.7Hz である。これは図-1 に赤色線で示した実際の地震観測記録から検出された地盤の卓越周波数 (3Hz 付近および 5Hz 付近) とよく対応して

おり、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周波数を検出できていることがわかる。ウィンドウ処理のバンド幅 0.2Hz は、リップルが取りきれず、その極大値は数が多いことに加えて、リップルの影響を受けたものとなっている。特に、実際の地震観測記録から検出された地盤の卓越周波数と対応していない。ウィンドウ処理のバンド幅 0.5Hz は、リップルは取られているが、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。最大値が複数得られた場合は、地盤の卓越周波数と考えられるピーク周波数を検出するため、さらに人為的な判断が必要になると考えられる。

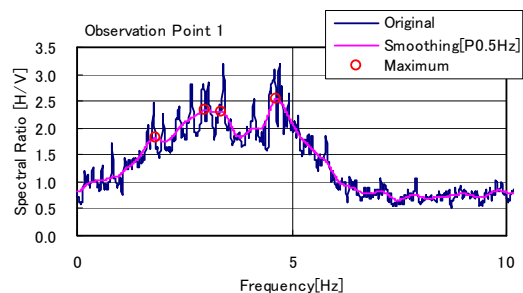
図-4 より、スムージング前の常時微動 H/V スペクトル比は青色下向矢印(↓)に示した近接する 2 つのピーク周波数を有するのに対して、提案法によるスムージング後は、両ピーク周波数を加味して、地盤の卓越周波数と考えられる赤色上向矢印(↑)を検出できたものと考えられる。ウィンドウ処理のバンド幅 0.2Hz は、スムージング前の 2 つのピーク周波数が残り、バンド幅 0.5Hz では、提案法と同じ傾向を示した。ただし、どの程度近接したピーク周波数を 1 つのピーク周波数と見なすかなど、検討の余地は残る。



(a) 提案法

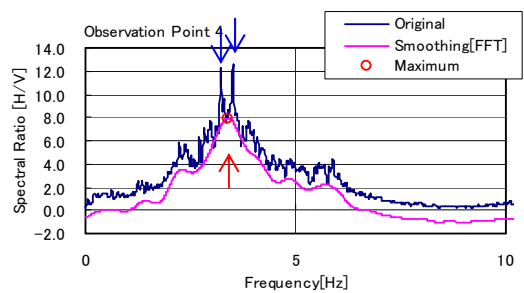


(b) ウィンドウ処理(バンド幅 0.2Hz)

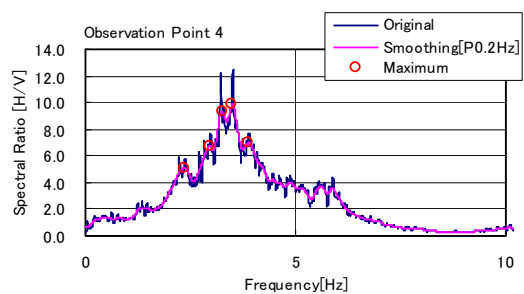


(c) ウィンドウ処理(バンド幅 0.5Hz)

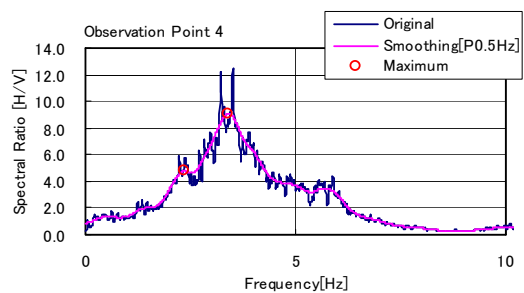
図-3 観測点 1 の比較



(a) 提案法

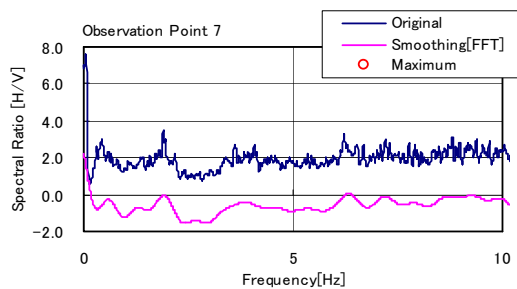


(b) ウィンドウ処理(バンド幅 0.2Hz)

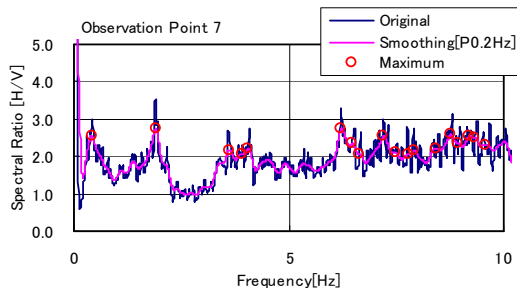


(c) ウィンドウ処理(バンド幅 0.5Hz)

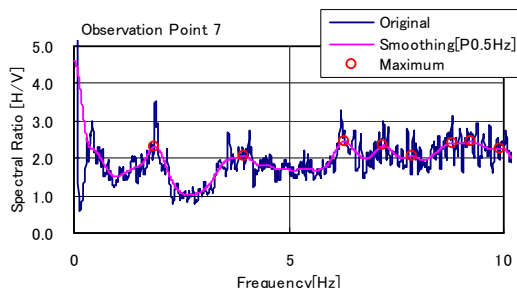
図-4 観測点 4 の比較



(a) 提案法



(b) ウィンドウ処理(バンド幅 0.2Hz)



(c) ウィンドウ処理(バンド幅 0.5Hz)

図-5 観測点7の比較

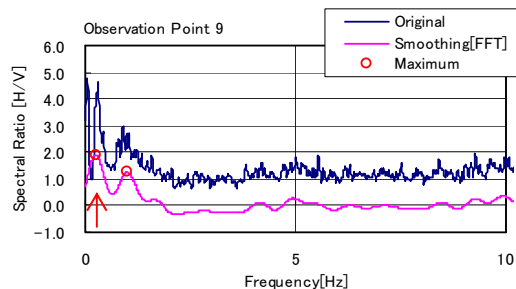
図-5より、提案法はピーク値が小さく明瞭ではないため、ピーク周波数は検出されていない。ウィンドウ処理のバンド幅 0.2Hz とバンド幅 0.5Hz は、スムージング前の常時微動 H/V スペクトルが高周波数側で上方にシフトしているために、本来比高が小さく、明瞭なピーク周波数と見なされないピーク周波数がいくつも検出されている。

図-6より、提案法とウィンドウ処理のバンド幅 0.2Hz では、赤色上向矢印(↑)に示した 0.25Hz 付近の低周波数側のピーク周波数が検出されているのに対し、バンド幅 0.5Hz では 0.25Hz 付近の低周波数側のピーク周波数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周波数が判別できないことに対応している。

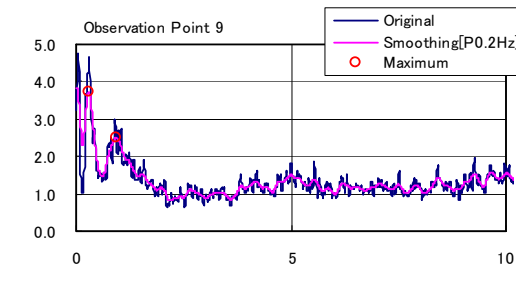
(3) 検出されたピーク周波数の比較

提案法とウィンドウ処理によるピーク周波数の検出結果を比較したものを図-7に示す。

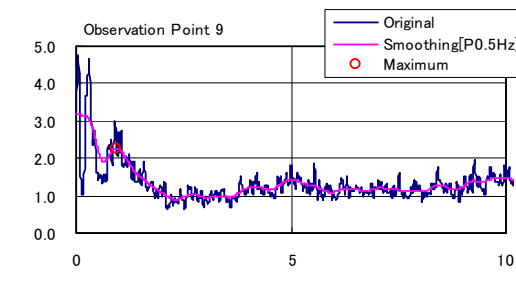
両手法によって検出されたピーク周波数は概ね一致していることがわかるが、提案法によるピーク周波数の検出方法は、前項で示した、ピーク値が小さく明瞭ではない図-5(観測点7)を区別することや、低周波数帯域にピーク周



(a) 提案法



(b) ウィンドウ処理(バンド幅 0.2Hz)



(c) ウィンドウ処理(バンド幅 0.5Hz)

図-6 観測点9の比較

波数が見られる図-6(観測点9)において、ピーク周波数を検出できるため、ウィンドウ処理よりも有利であると考えられる。

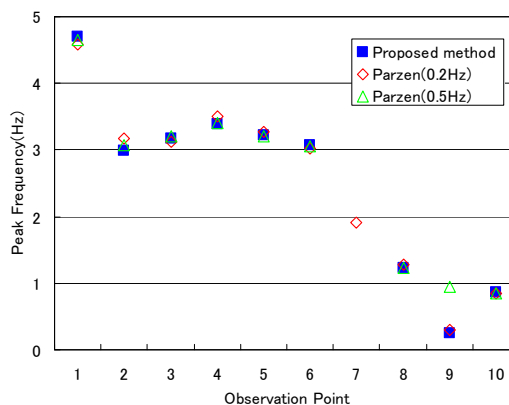


図-7 提案法とウィンドウ処理で検出されたピーク周波数の比較

3. 提案法の適用例(全国 283 地点)

(1) 全国の常時微動 H/V スペクトル比

著者らは、これまでに全国 283 地点の既往強震観測地点における常時微動観測を行い常時微動 H/V スペクトル

比を算出している(長尾ら)。これらの常時微動 H/V スペクトル比は、包絡形状によるタイプ分けのほか、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波数を読み取っている。

(2) 提案法の適用例

本研究では、上記 283 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 FFT フィルタによる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らにおいて読み取られたピーク周波数の比較を行った。その結果を図-8 に示す。

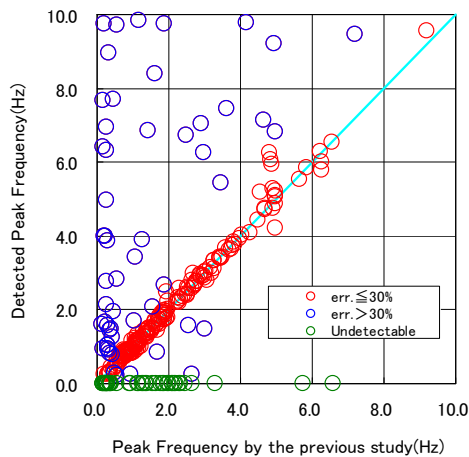


図-8 既往研究(読み取り)と提案法で検出したピーク周波数の比較

図-8 において、赤色丸は誤差 30%未満の場合を示し、青色丸は誤差 30%を超える場合を示し、緑色丸はピーク周波数が検出できない場合を示している。30%未満の誤差を示した地点の数は、検出不可能な地点を除く全ての観測地点の 77%であった。提案法においては、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、規則的にピーク周波数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。

4. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- ① 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周波数を検出できる。
- ② 提案法は、ウイ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周波数の検出やピーク値の小さいものに対して有利である。

- ③ 全国 283 地点の常時微動 H/V スペクトル比に対し、提案したピーク周波数の検出方法を適用した結果、既往の読み取りによるピーク周波数とよく一致する。
- ④ 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。

おわりに

今後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。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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
- 7) 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, 4, 579-593.
- 8) 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.
- 9) 大崎順彦(1976): 地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会.