

時間-周波数解析を用いた微動の位相速度の推定法に関する研究

東京工業大学大学院 学生会員 ○ 宇田川鎮生
東京工業大学大学院 正会員 盛川 仁

1. はじめに 筆者らは、時間-周波数解析手法のひとつである Hilbert-Huang Transform (HHT) を用いて位相速度を直接推定する手法を提案し、その妥当性を簡単な数値計算によって確認している¹⁾。しかし、実際の記録への適用は行なわれておらず、その具体的手順や実観測記録における評価については示されていない。そこで、本研究では、微動の実記録への適用を行ない、見かけの位相速度の推定を試みるとともに、本手法を応用することで、2点同時観測のみで短周期領域の位相速度の推定への実現可能性を示す。

2. 計算方法 距離 d だけ離れた 2 地点で定常な 2 つの波形が観測されたとき、HHT²⁾ における EMD によりそれぞれ複数の IMF に分解される。 k 番目の IMF から求められる位相角及び瞬時周波数をそれぞれ $\phi_{\ell k}(t)$, $\omega_{\ell k}(t)$ とする。ただし、 ℓ は観測点の番号で $\ell = 1, 2$ である。このとき、2 点間の見かけの位相速度 $C(\omega)$ は、

$$C(\omega) = \frac{d}{2} \cdot \frac{\omega_{1k}(t) + \omega_{2k}(t)}{|\phi_{1k}(t) - \phi_{2k}(t)|} \quad (1)$$

によって求められる。非定常波形を対象とした場合は、定常な区間を抽出したのち、その区間毎に (1) 式を適用する。定常な区間のは、各観測点での時間-周波数分布であるヒルベルトスペクトル $U_{\ell}(t, \omega)$ ($\ell = 1, 2$) の比が 1 に近い、すなわち、 $U_2(t, \omega)/U_1(t, \omega) \approx 1$ を満足する空間 $S = \{(t, \omega) \in \mathbb{R}^2; U_2(t, \omega)/U_1(t, \omega) \approx 1\}$ 上の時間-周波数分布とした。数値計算を安定して実行する為には空間 S は $U_2(t, \omega)/U_1(t, \omega)$ の値に対して 1 のまわりにある程度の幅をもって決定される必要がある。以下の数値計算例では、便宜上、 $0.5 < U_2(t, \omega)/U_1(t, \omega) < 2$ とした。

微動などの実記録は、観測条件等に起因する様々な雑音が含まれる。このため、これらの雑音が、算出されるべき位相速度に影響を与える可能性が考えられる。そこで、実際の観測記録に適用する場合は、以下のような雑音低減の過程をとり入れる。まず、対象とする波形に対して狭帯域のバンドパスフィルターをかけ、上述した方法により位相速度を推定する。次に、それぞれのバンド毎に推定された位相速度に対し、クラスタリング手法により、ばらつきを整理する。さらに、物理的拘束として正の分散性の仮定を採り入れ、これを満足しないプロットは破棄する。

3. 微動の実記録への適用

3.1 観測手法の提案 位相速度を直接推定可能であるという本手法の特徴を生かして、2点同時観測のみで位相速度を推定する方法を提案する。まず、微動の伝播方向が時間とともに変化すると考えられる短周期領域では、ある程度長い時間の観測により 2 つの観測点間を結ぶ方向に伝播する微動を捕らえることができる、という仮定をおく。つまり、任意の瞬間における 2 点間の見掛けの位相速度を求め、そのなかでもっとも遅いものが真の位相速度であるとするのである。

3.2 2点同時観測 地下構造が既知であるサイトにおいて、3.1 の方法にしたがい位相速度の推定を試みた。観測は、2004 年 12 月 17 日の昼間に行ない、場所は KiK-net の設置場所に近い横浜動物園ズーラシアの第 2 駐車場及びその周辺である。

使用した計測機器は、換振器として固有周期 2 秒の動コイル型速度計、ローパスフィルター付きの増幅器、記録器として 16bit デジタルレコーダを用い、2 地点の記録の同期をとれるよう GPS 時計が出力するスローコードを記録するシステムとした。2 観測点での記録の同時性に関する誤差はサンプリング周波数以下である。観測では、上下動成分を 2 点で同時に測ることとし、2 点間の距離は KiK-net の地盤データを参考にして、5, 10, 20, 30, 50, 100, 200, 400 [m] とした。推定された位相速度と KiK-net の地盤データより求めた Rayleigh 波の基本モードの理論分散曲線とともに図-1 に示す。1 [Hz] より高い周波数帯域では、推定された位相速度の最も遅いものが、理論分散曲線とよく対応していることが分かる。1 [Hz] より低い周波数帯域においても、若干のばらつきがあるものの、理論分散曲線との対応がみられる。これよ

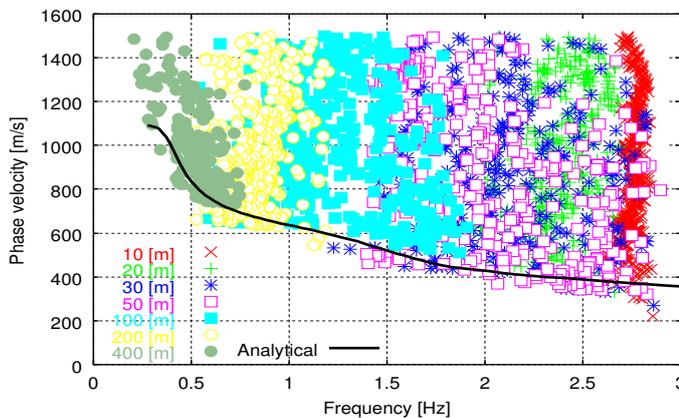


図 1: 推定された位相速度

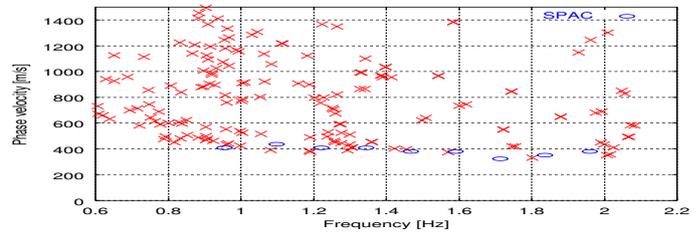


図 2: Site1 と 3 により推定された位相速度

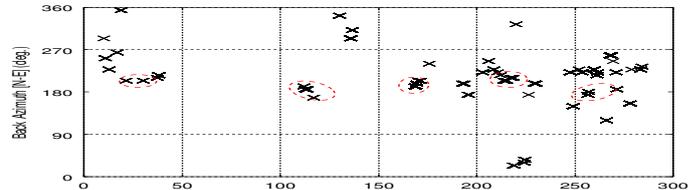


図 3: Site 1 と 3 ; 中心周波数 1 [Hz]

り、短周期領域においては、提案した手法により、簡便に位相速度の推定が可能であることがわかる。なお、本手法は観測により全ての到来方向が含まれていると仮定しているが、異なる記録時間からの結果との比較や、それぞれの距離により推定された位相速度の周波数帯域が互いに重複していることよりこの仮定は満足されているものと考えている。

3.3 アレイ観測への適用 提案した観測手法では、推定された見掛けの位相速度の最も遅いものが2点間を結ぶ直線上を伝播していると仮定している。そこで、アレイ観測記録に本手法を適用し、もっとも遅い位相速度をもつ波群の到来方向をセンブランス解析によって調べた。なお、アレイ記録として広島市における微動観測記録を使用した³⁾。

観測は、2001年12月8日の深夜から翌朝にかけて行なわれ、上述したシステムと同様で、換振器のみ固有周期10秒のものを使用しており、4点で同時に行なわれている。

Site3と1、Site3と2、Site3と4の3方向の記録に対し本手法より位相速度を推定した。このアレイに対しては、周波数1~2 [Hz] が位相速度を推定可能な範囲であるとした。1例として、Site3と1における記録より推定された位相速度を空間自己相関 (SPAC) 法による結果とともに図-2に示す。2点のみの観測より得られた位相速度であるにもかかわらず、SPAC法によって得られた位相速度と同等な精度で推定されていることがわかる。また、その他のデータセットについても同様な結果を得た。

次に、対象とする波群の到達時刻を検索し、その時刻におけるセンブランス解析から求められた波群の到来方向と観測点を結ぶ直線方向とを比較した。1例として、Site3と1の記録に対する1 [Hz] の波を対象とした場合にセンブランス解析より得られた到来方向の結果を図-3に示す。特に、破線で囲まれた部分は、センブランス値が一様に高く、その時の到来方向は3, 183 [deg.] 周辺であり、Site3と1を結ぶ測線方向と一致していた。また、センブランス解析により推定された位相速度も本手法により推定された位相速度、及びSPAC法によるそれとよく対応しており、その他のデータセットについても同様な結果となった。これより、推定された位相速度を与える波群の一部は、側線方向と一致しているといえる。また、全ての値がセンブランス解析の結果と一致しないのは、クラスタリングの段階で周辺値を合成しているため、実際には推定された位相速度に対応する波群とは異なる時刻のものも含んでいるためであると考えられる。

4. まとめ 本研究では、時間-周波数解析の一つであるHHTを用いて位相速度を推定する手法について検討した。微動の実観測記録への適用に関しては、2点間のみの簡便な観測手法を提案し、これより短周期領域において、従来の手法と同等な精度で位相速度が推定できることを示した。また、センブランス解析により、本研究で推定された位相速度の到来方向は観測点の測線方向と一致することがわかり、本手法の妥当性を認識することができた。

しかしながら、雑音低減の過程において、クラスタリングの基準など一意的に決めることができないパラメータが存在することや、観測に際しては従来の方法に比べて2点間の距離を細かく設定しなくてはならないという傾向がみられるなど、今後も観測条件の設定や解析方法についてより詳細な検討が必要であると考えている。

参考文献

- 1) 宇田川鎮生・盛川仁：時間-周波数解析を用いた微動の位相速度の推定のための基礎的研究，土木学会年次講演会，pp.1565-1566，2004。
- 2) Huang et al. :Proc.Royal Society of London, Series A, Vol.454, pp.903-995, 1998.
- 3) 西村敬一・盛川仁：重力及び脈動を用いた広島市の基盤構造の推定，第11回地震工学シンポジウム，pp.241-246，2003。