

地表・地中地震計アレー記録による複素スペクトル比の推定法と数値実験 Estimation of Complex Spectral Ratio of Surface and Borehole Seismometry and Numerical Tests

吉田 邦一^{1*}

Kunikazu Yoshida^{1*}

¹(財)地域地盤環境研究所

¹Geo-Research Institute

地表・地中記録のスペクトル比の計算法について、最小二乗法を元に誤差の取り扱いを変えたいいくつかのスペクトル比の推定法をあげ、スタッキング法と平滑化の影響を考慮した簡単な数値実験を行った。観測点付近の表層の構造が地震動に与える影響を評価するため、鉛直アレーの地震動記録のスペクトル比から求めた伝達関数をもとに表層付近の地盤の速度・減衰構造の同定がしばしば行われている。ところが、同定の対象となるスペクトル比の推定においてノイズの考慮が不十分なため、不適切な減衰が求められている可能性がある。

N個のイベントで記録が得られているとき、イベント*i*での地表と地中の記録のフーリエ変換をそれぞれ $y_i(f)$, $x_i(f)$ とする。鉛直アレーに限らずスペクトル比のスタッキングは、幾何平均 H_G あるいは幾何平均と等価な対数平均 H_L により行われることがある。ところが、幾何平均ではノイズを必ずしも正しく評価できないことが知られている上、複素スペクトル比を推定できない。複素数でノイズを考慮したスタッキング法としては、最小二乗法として直線のあてはめを行う手法がある。 $y_i(f)$ にノイズ n が含まれる場合は $y_i(f)=H_1 x_i(f)+n_i(f)$ と書ける。この式の H_1 に関する最小自乗法の解は $H_1=C_{xy}(f)/S_{xx}(f)$ である。ここで、 $C_{xy}(f)$, $S_{xx}(f)$ はそれぞれ $x(f)$ と $y(f)$ のクロススペクトルと $x(f)$ のパワースペクトルの平均である。一方、 $x_i(f)$ にノイズ $e_i(f)$ が含まれる場合の最小二乗解を求めると $H_2=S_{yy}(f)/C_{yx}(f)$ となる。ここで、 $S_{yy}(f)$ は $y(f)$ のパワースペクトルである。位相差スペクトルは、 H_1 , H_2 共に C_{xy} の位相成分で求められる。ノイズを考慮したときに、 C_{xy} の期待値にはノイズの項が残らないことから、位相差スペクトルはノイズの影響を受けにくいことが予想される。 H_1 や H_2 は誤差の仮定に非対称性を持つので、石田(1992)に準じ、これらの幾何平均 H_3 を計算する場合も検討した。

鉛直アレー記録への適用を念頭に、これらのスペクトル比の推定法を数値実験で比較した。数値実験では入射波の振幅は周波数によらず一定とし(すなわち時間領域での地表波形はデルタ関数)、周波数領域において半無限均質媒質中に鉛直入射する平面波による鉛直アレーでの地表と地中の擬似観測記録を作成した。この擬似観測記録に一樣乱数を加え、20通りのノイズを含む擬似観測記録を作成した。

スタック方法の違いによる推定値の差を求めるため、ノイズの含まれる20通りのスペクトルの組から、上記4通りの推定方法によりスペクトル比を推定した。 H_1 では、スペクトル比は低周波数側や谷の部分でほぼ1を示し、ノイズにもかかわらずよく推定されているが、スペクトル比の山の部分は頭打ちとなり、ピーク周波数付近では逆に谷となっている。 H_2 では、スペクトル比のピーク形状が最も明瞭に求められているが、谷の部分で1にならず過大評価になっている。 H_3 では、 H_1 と H_2 の中間の値を示し、滑らかな結果を示すが、スペクトル比のピーク形状は H_2 によるものほど明瞭ではない。 H_G は、この計算では H_1 に近く、スペクトル比の谷は1に近づくがピークでは大きな凸凹が見られノイズの影響を強く受けている。 H_1 と H_2 のスペクトル比のピーク周辺の形状は、これらの周波数では地中記録のS/N比が非常に悪い条件下での処理となるため、地中ノイズの取り扱いの差が大きく影響し、 H_2 で明瞭なピークが見られるのに対し、 H_1 で大きく形が歪む。一方で、スペクトル比の谷の部分では、地表のノイズが結果に影響し、 H_2 が過大評価となる。位相差スペクトルは安定して求められた。

スペクトルの平滑化が結果に与える影響について考察する。ノイズの含まれない擬似観測記録のスペクトルから S_{xx} , S_{yy} , C_{xy} を計算し、これらをParzenウィンドウにより平滑化した。求めた S_{xx} , S_{yy} , C_{xy} を用いて H_1 , H_2 , H_3 を求めた。 H_G はフーリエスペクトルを平滑化して求めた。ノイズの含まれないデータであるが、スタック処理によるものと同様の傾向が見られた。すなわち H_1 ではスペクトル比のピーク周波数で谷が見られる一方、 H_2 によるピークは平滑化にもかかわらず非常に明瞭に見られる。スタッキングと平滑化を同時に適用した結果は、スタッキングのみで求めたスペクトル比と比べ、滑らかなスペクトル比となった。計算手法による傾向の違いはスタッキングのみや平滑化のみで求めたものと同様であった。

以上の検討から、全体のスペクトル比を俯瞰する場合は H_3 あるいは H_G が適し、ピークが重要な時は H_2 を、谷が重要な時は H_1 が有用である。また、位相差スペクトルの推定値は安定している。

キーワード: 地震計鉛直アレー, 複素スペクトル比, 伝達関数

Keywords: seismic vertical array, complex spectral ratio, transfer function