

計算波形を用いた相関距離とゆらぎの強さ推定の検討

江本賢太郎（東北大）

はじめに

Hi-net 高感度地震観測網は、およそ 20km 間隔で日本全国に観測点を持つため、短周期の地震波であっても、エネルギーに着目することで、波動場が伝播する様子を時空間的に捉えることが可能である。江本・他（昨年度研究集会）は、周期 2 秒から 16 秒における観測されたエネルギー場の時空間的特徴を 3 次元差分法でモデル化することにより、西南日本における速度ゆらぎのパワースペクトルを推定した。この際、コーダと全空間のエネルギー比を指標として相関距離 (a) とゆらぎの RMS 値 (ε) を変えたグリッドサーチを行った。エネルギー比はパワースペクトルの値で特徴づけられることが分かったが、 a と ε の間にはトレードオフが存在した。本研究では、3 次元差分法で計算した波形を用いて、観測点間の波形相関を計算する。波形相関に与える a と ε の影響を調べることで、エネルギー比から推定される a と ε の組み合わせと比較することで、 a と ε が分離可能かどうかを検討する。

波形計算

地球シミュレータを用いた 3 次元差分法シミュレーションを行う。震源は、エネルギー比の解析で用いた 2011 年 11 月 21 日に広島県北部で発生した Mw5.2、深さ 12km（気象庁一元化）を仮定する。震央から ± 200 km の領域に 2km 間隔で仮定の観測点を設定する。つまり、 $201 \times 201 = 40,401$ 個の観測点での波形を計算する。差分法は空間 4 次・時間 2 次精度で、空間刻み 1km、時間刻み 0.02 秒で行う。地球シミュレータを用いると 200 秒まで計算するのに、16 ノードで約 1 時間である。速度構造は F-net で用いられている 1 次元構造の地殻部分に、ランダムなゆらぎを与えたものとする。

相関係数の計算手法

まず、震央距離 50km にある観測点を 1 つ基準とし、その周辺の観測点との相互相関係数を計算する。波形は上下成分を経過時間 0-100 秒切り出し、周期 8-16 秒、4-8 秒、2-4 秒のバンドパスフィルタを適用したものを使用する。震央距離が 50km のすべての観測点に対して同様の計算を行い、基準観測点との距離により結果をスタックする。同様に、基準観測点が震央距離 80km、110km、140km における相互相関係数も計算する。

エネルギー比との違い

江本・他（昨年度研究集会）の解析では、(i) $a = 2.5$ km, $\varepsilon = 0.06$, (ii) $a = 10$ km, $\varepsilon = 0.06$, (iii) $a = 20$ km, $\varepsilon = 0.07$ の組み合わせの場合には、観測されたエネルギー比を同様によく説明できた。図 1 に、この 3 つの組み合わせのときの相関係数を示す。相関係数は観測点距離とともに減少し、その形状は指数関数よりもガウス関数に近いものであることがわかる。周期 8-16 秒では 3 つの場合ではほぼ等しい相関係数を示しているが、短周期になるにつれ異なる形状を示す。つまり、エネルギー比を説明する組み合わせと、相関係数を説明する組み合わせは異なることを示しており、両者を比較することで、 a と ε を分離できる可能性があることが示唆される。

 a と ε 依存性

相関係数の違いを定量的に調べるために、以下の式で相関係数をモデル化する。

$$\text{相関係数} = (1 - c)e^{-x^2/d^2} + c \quad (1)$$

ここで、 x は観測点間距離、 d は相関係数の幅、 c は遠方での相関係数の値を規定するパラメータである。図 2 に、 a と ε を変えた時の d と c の分布を示す。 a が大きく、 ε が小さくなるほど d や c の値は大きくなることからわかる。つまり、ゆらぎの相関距離が大きく、弱い場合には、より遠くの観測点まで相関をもつという直感とよく合う結果である。パワースペクトルは、波数の大きさによって ε^2/a や ε^2/a^3 に比例するため、これとは異なるトレードオフをしてしていることがわかる。また、波形をエンベロープにした後で相関係数を計算した場合には、 d の値が図 2 に比べて 1.5 倍程度大きくなった。このことから、生波形を用いるよりもエンベロープを用いた方が粗い観測点間隔でも解析可能と言える。しかし、この場合でも d の値は 10km 程度であるため、これよりも小さい観測点間距離の観測網が必要である。

相関係数を計算する基準観測点の震央距離が大きくなると、 d の値は大きくなった。また、 a と ε の組み合わせにより、 d が小さい場合には震央距離依存性は小さく、 d が大きい場合には震央距離依存性も大きくなった。

相関係数のばらつきを調べるために、ランダム媒質を作成する際のシードを変えて、異なるランダムのパターンにした場合や、走向を 45° 回転させた場合の計算も行った。これらの場合では、全基準点をスタックした平均値に大きな変化は現れないが、個々の基準点での相関係数は方位により異なり、Radiation Pattern の影響を大きく受けることが分かった。したがって、実データを解析し、安定した相関係数を得るためには、震源を取り囲む十分な数の観測点が必要である。

結論

仮想観測点における計算波形を用いて、観測点間の波形相関を調べた。相関係数は観測点間距離とともにガウス関数に従って減少することがわかった。 a が大きく ε が小さいほど遠くの観測点まで相関を持つが、同様な相関係数が得られる a と ε の組み合わせは、エネルギー比を説明するトレードオフと異なるため、両者を比較すると a と ε が分離できる可能性があることがわかった。ただし、それには非常に密な観測点が必要である。

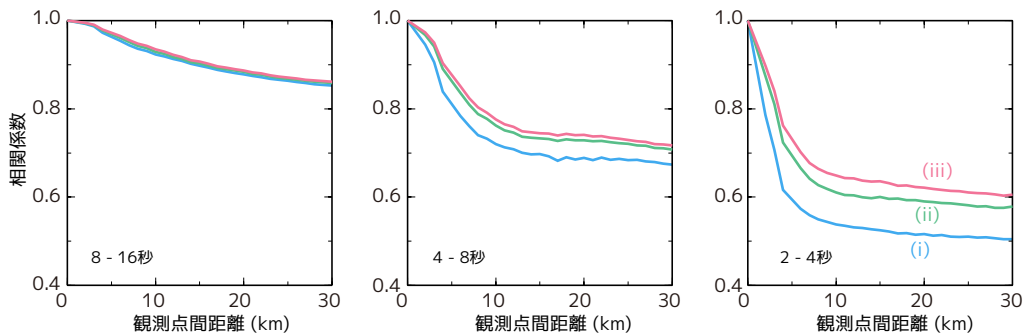


図 1 3つの a と ε の組み合わせ（本文中参照）の場合の、相関係数の観測点間距離依存性。基準観測点の震央距離が 80km の場合。

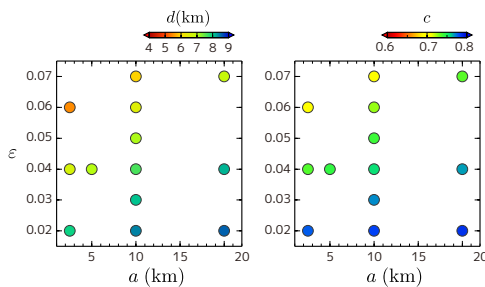


図 2 不均質パラメータ a と ε を変えたときの相関係数の形状を規定するパラメータの分布。震央距離 80km。周期 4-8 秒。

謝辞

理論波形計算には海洋開発研究機構の地球シミュレータと東大地震研の古村孝志教授による差分法コードを使用させて頂きました。