

差分法による長周期コーダの再現から見積もる微細不均質構造

江本賢太郎¹, 齊藤竜彦, 汐見勝彦²

(1: 東北大, 2: 防災科研)

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、周期 10 秒以上の地震波であれば、位相を含めて地表を伝播する様子を捉えることができる (Maeda et al., 2011). 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。我々は昨年度の研究集会で、周期 8-16 秒における観測されるエネルギー場にも微細不均質構造の影響が表れていることを示し、差分法によって観測されるコーダエネルギーの時空間的特徴再現することにより、西南日本におけるランダム微細不均質構造の推定を行った。ランダム微細不均質構造の解析は、輻射伝達理論に代表されるようなランダム不均質媒質中での統計的なエネルギー伝播を考える手法が一般に用いられる。このとき、周波数依存性や走時ゆらぎ効果など波動論的效果を取り入れるためには、散乱素過程に関する理論 (Born 近似など) を併用する必要がある (Sato, 1984; Prybilla & Korn, 2009). ランダム微細不均質構造中の波動論的現象を自然に再現する弾性波運動方程式の数値シミュレーションは、長周期の地震波伝播と短周期のエネルギー伝播をリンクする手法として期待されている。本発表では、地球シミュレータを使用し、周期 2 秒までのコーダエネルギーの再現から、ランダム微細不均質構造の推定を行う。その際、コーダエネルギーの絶対値を合わせるのではなく、直達・コーダのエネルギー比を用いることにより、内部減衰の影響を取り除いた手法を用いる。

データ

長周期を議論するのに十分な大きさ、また、直後に余震が発生しておらずコーダの議論ができるの地震として、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) を用いる。Hi-net での観測記録を Maeda et al. (2011) の手法を用いて広帯域地震計の特性に変換し、2 乗振幅の 3 成分和に密度をかけてエネルギー密度を求める。

手法

地球シミュレータで、空間 4 次・時間 2 次精度の差分法により弾性波伝播シミュレーションを行う。背景速度構造として、F-net でのメカニズム解推定に使用されている 1 次元構造 (Kubo et al., 2002) を仮定し、地殻部分に指数関数型自己相関関数で特徴づけられる 3 次元ランダム微細ゆらぎを導入する。領域は水平方向約 1500km、鉛直方向約 500km とする。自由表面以外の境界は Cerjan et al. (1985) の吸収境界を設定するが、微弱な反射波でもコーダエネルギーに影響を及ぼすため、震央距離が 350km 以内にある Hi-net 観測点における経過時間 200 秒以内の波形を用いる。

観測エネルギーと計算エネルギーの比較は、齋藤 (2014, 修士論文, 茨城大), 齋藤・他 (昨年度研究集会) に倣い、直達波エネルギー (E'_T) とコーダエネルギー (E'_C) の比を用いる。彼らは比を取ることで、内部減衰が打ち消され、散乱係数を推定することが可能であることを示した。 E'_T と E'_C はそれぞれ、

$$\begin{aligned} E'_T(t) &= \int_0^{\Delta_D(t)} 4\pi\Delta^2 E(\Delta, t) d\Delta \\ E'_C(t) &= \int_0^{\Delta_D(t)/4} 4\pi\Delta^2 E(\Delta, t) d\Delta \end{aligned} \quad (1)$$

と定義する。ここで、 Δ は震央距離、 Δ_D 直達波面の震央距離、 $E(\Delta, t)$ はエネルギーである。

周期 8-16 秒、4-8 秒の帯域において、指数関数型ランダム媒質の相関距離 (a) を 2.5, 5, 10, 20km、ゆらぎ

の $RMS(\varepsilon)$ を 0.02 から 0.07 まで 0.01 刻みで変え、グリッドサーチで観測されたエネルギー比を最もよく説明するモデルを探す。

ランダム微細不均質構造の推定

まず、エネルギー比から微細不均質パラメータが安定して求められるか確かめる。周波数一定の内部減衰を $Q = 300, 600, 1200, 2400$ と変えて差分計算を行った。 Q が小さいほど、 E'_T, E'_C は共に減衰が早くなる。しかし、 E'_C/E'_T の比を取ることで、 Q に依存しなくなる。これは、内部減衰によって全空間のエネルギーもコーダエネルギーも同様に減衰するからである。次に、震源の影響を確かめるため、モーメントマグニチュードを 2 倍にした場合、走向を 45 度回転させた場合を計算した。震源の放射エネルギーを変えても E'_T と E'_C にそれぞれ同様のオフセットが生じるだけであるため、比は変わらない。走向を変えた場合には、わずかな違いが見られた。これは、観測点分布が震源の周りを完全には取り囲んでいないため、ラディエーションパターンの影響が、全空間エネルギーとコーダに異なる影響を生じさせたためだと考えられる。

グリッドサーチの結果、観測をもっともよく説明するパラメータは、周期 8-16 秒が $a = 20 \text{ km}, \varepsilon = 0.07$ 、周期 4-8 秒が $a = 5 \text{ km}, \varepsilon = 0.06$ であった。この時の観測と計算のエネルギー比の比較を図 1 に示す。エネルギー比は経過時間 0 秒にピークを持つ。これは、経過時間が短いところでは E'_C に直達波のエネルギーも含まれているためである。その後エネルギー比は減少し、経過時間数十秒で最小値となり、増加に転じる。ランダム微細不均質による散乱により、直達波付近のエネルギーが減少しコーダ部分はエネルギーが停滞するためである。ほぼ観測を説明するパラメータから計算されるパワースペクトルの範囲を図 2 に示す。

結論

全空間のエネルギーとコーダエネルギーの比は、内部減衰や震源に依存せず、ランダム微細不均質構造を推定できることを確認した。1 次元速度構造の地殻部分に導入した 3 次元ランダム微細不均質によりコーダが励起され、周期 16 秒から 2 秒におけるエネルギー比を説明するゆらぎのパワースペクトル密度を推定し、その値はバルト楕状地で求められたものと同様であることを示した。

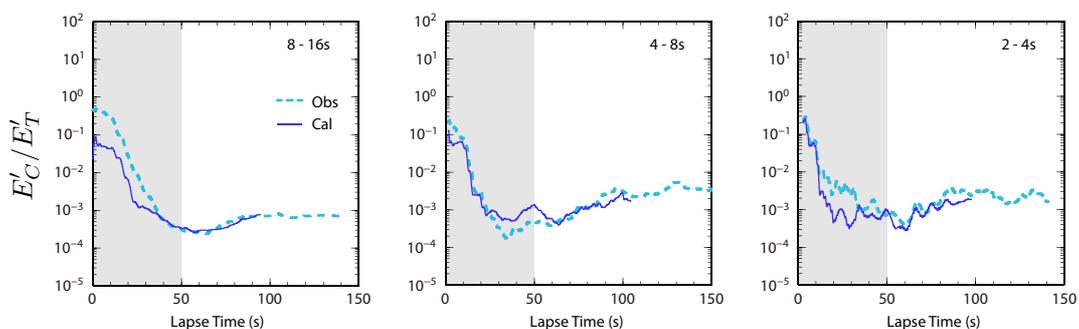


図 1 観測と計算エネルギー比の比較。経過時間 50 秒以降で最もよく合うパラメータ (8-16 秒: $a = 10 \text{ km}, \varepsilon = 0.05$, 4-8 秒: $a = 2.5 \text{ km}, \varepsilon = 0.05$)。周期 2-4 秒はフォワードモデリングの結果 ($a = 5 \text{ km}, \varepsilon = 0.05$)。

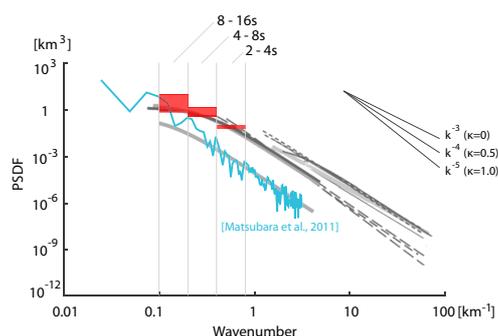


図 2 推定されたパワースペクトル密度。赤色の領域が本研究で推定した範囲。青色は西南日本における Matsubara et al. (2011) の速度構造から求めたパワースペクトル密度。黒色の線は過去の研究による推定結果を示す。[Sato et al. (2012) に加筆]