

地震波エネルギーの空間分布からの散乱係数と内部減衰の推定(2)

齋藤清志郎[†]・[#]河原純(茨城大)・齋藤竜彦(防災科研)・江本賢太郎(東北大)

[†]現所属:(株)エス・エス・ビー

はじめに

地下のランダムな不均質構造による散乱と、非弾性による内部減衰は、いずれも短周期地震波エネルギーの時空間変化を規定する要因である。観測された地震波エネルギー密度の時空間分布を輻射伝達理論の解と比較することにより、散乱係数と内部減衰を推定することが原理的に可能となる。そのような推定手法として、Multiple Lapse-Time Window 法(Fehler *et al.*, 1992, *GJI*; Hoshiya, 1993, *JGR*; Carcolé and Sato, 2010, *GJI*)や浅野・齋藤(2011, 地震学会秋季大会)の方法などが、これまで提案されてきた。著者らは前回(齋藤ほか, 2013, 地震学会秋季大会), 地震波エネルギー密度の空間分布を複数の「空間窓」で積分することにより、散乱係数と内部減衰を推定する新手法を提案し、単純な地下構造の場合について手法の妥当性を確認した。今回は、実際の地震記録にこの手法を適用し、散乱係数と内部減衰の推定を試みる。

手法

最初に、一様な S 波速度 v , 散乱係数 g , 内部減衰 Q_i^{-1} を持つ半無限媒質内部の点震源からの S 波輻射を考える。震央距離 Δ , 経過時間 t におけるエネルギー密度を $E(r, t)$ として、次式により「見かけのエネルギー」 $E_T'(t)$, $E_1'(t)$, $E_2'(t)$ を定義する。

$$E_T'(t) = \int_0^{\Delta_D(t)} 4\pi\Delta^2 E(\Delta, t) d\Delta, \quad E_1'(t) = \int_{3\Delta_D(t)/4}^{\Delta_D(t)} 4\pi\Delta^2 E(\Delta, t) d\Delta, \quad E_2'(t) = \int_0^{\Delta_D(t)/4} 4\pi\Delta^2 E(\Delta, t) d\Delta \quad (1)$$

ここで $\Delta_D(t)$ は直達波面の震央距離を表す。 $E_1'(t)$ と $E_2'(t)$ はそれぞれ直達波付近と震源域付近のエネルギーに対応し、 $E_T'(t)$ は全エネルギーに対応する。とくに震源が地表にある場合、 $E_T'(t)$ は真の全エネルギーのちょうど 2 倍(自由表面による増幅)に一致する。 $E_T'(t)$ の関数形は散乱過程に依らず、 Q_i^{-1} にのみ依存する。一方、 $E_T'(t)$, $E_1'(t)$, $E_2'(t)$ の中から二者を選んで比をとると、 Q_i^{-1} の寄与は相殺し、 g にのみ依存する。よって、これらの観測量から g と Q_i^{-1} を独立に推定することが可能である。

以上の議論は、S 波速度が非一様の場合にも成り立つ。その場合、 g と Q_i^{-1} の推定に必要な輻射伝達理論解を数値的に求める必要がある。ここでは Yoshimoto (2000, *JGR*) のモンテカルロシミュレーション法を用いて理論解を求める。

観測記録への応用

2011 年 11 月 21 日の中国地方の地震 (M_J 5.4, 震源深さ 11.7 km) に対して、震央距離 550 km 以内の 418 の Hi-net 観測点(防災科研)で得られた記録を使用する(図 1)。地震発生から 150 s までの 3 成分速度波形(1~2 Hz)の 2 乗振幅の和に密度をかけてエネルギー密度を求める(図 2)。比較のための理論解の計算には、浅野・齋藤(2011)を参考に、図 3 に示す 1 次元 S 波速度構造を用いる。

この速度構造に基づくシミュレーションから求めた S 波の初動とピークの理論走時を図 4 に示す。

同図では、観測から得られたエネルギー密度のピークの観測走時(各時刻でエネルギー密度が最大となる観測点の震央距離)も示したが、これはピークの理論走時とよく一致する。一方、経過時間が 40 s 程度を超えると、Sn 波の出現により、初動の理論走時曲線はピークの走時曲線から分岐する。現実の S 波初動は P コーダ波などと混在するため、データから S 波初動を正確に判定することは難しい。そこで以下では、(1)式中の $\Delta_D(t)$ を S 波ピークの震央距離で代用する。

観測によるエネルギー密度を空間積分する際は、観測点の震央距離に応じた不等間隔の台形則を適用する。震央におけるエネルギー密度には、最寄りの観測点 KTWH での値を内挿する。また、得られた見かけのエネルギーに対し、経過時間 250 s 付近のコーダ波の記録を用いて規格化を行うことで、震源特性とサイト特性の影響を除去する。

結果と考察

観測から得られた見かけのエネルギー $E_T(t)$, $E'_1(t)$, $E'_2(t)$, およびそれらの比 $E'_1(t)/E_T(t)$, $E'_2(t)/E_T(t)$, $E'_1(t)/E'_2(t)$ を図 5, 6 に示す。また、これらの観測曲線と最もよく合うと目視で判断した理論曲線 ($g = 0.002 \text{ km}^{-1}$, $Q_i^{-1} = 0.0075$) を重ねて示した。両者は全体として調和的であるが、それぞれの曲線は固有の形状(時間変動)を示しており、形状同士を合わせることはできなかった。とくに目を引くのは、 $E_T(t)$ と $E'_1(t)$ の理論曲線に見られる明瞭な周期的ピークであるが、これは速度構造に起因する波線の集中によるものと解釈できる。 $E_T(t)$ と $E'_1(t)$ の観測曲線にも同様な周期的変動が認められるが、ピークの位置と形状は異なっており、今回用いた速度構造モデルと実際の地下構造との差異を反映すると考えられる。今後、速度構造モデルを修正することによって、観測曲線と理論曲線の適合度を改善できる可能性がある。

計算によれば、 g と Q_i^{-1} がそれぞれ $0.001 \sim 0.003 \text{ km}^{-1}$, $0.0065 \sim 0.0075$ の範囲であれば、観測曲線と理論曲線が互いの変動範囲内で重なり合う。この範囲を推定誤差と見なすと、今回の解析の結果は、 $g = (0.002 \pm 0.001) \text{ km}^{-1}$, $Q_i^{-1} = 0.0075 \pm 0.001$ (西南日本, 1~2 Hz), と表せる。これは本稿の序論で挙げた既往研究による推定値(日本国内, 1~2 Hz)と 2~1/2 倍の範囲で調和的である。以上より、本研究の解析手法は概ね妥当であると考えられる。

謝辞: 防災科学技術研究所の Hi-net の地震波形記録を使用しました。記して感謝いたします。また SAC (Goldstein *et al.*, 2001) と GMT (Wessel and Smith, 1998) を使用しました。

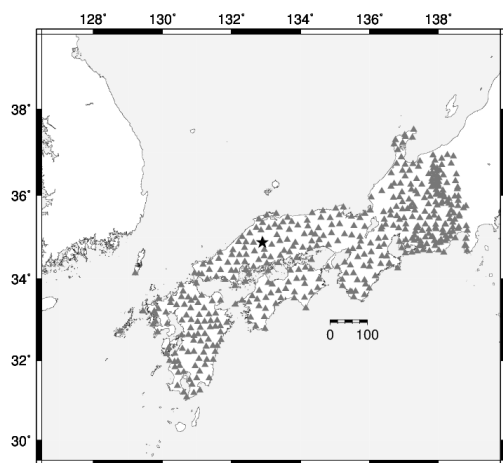


図 1. 解析対象の地震の震央(★)と解析に利用した Hi-net 観測点(▲)。

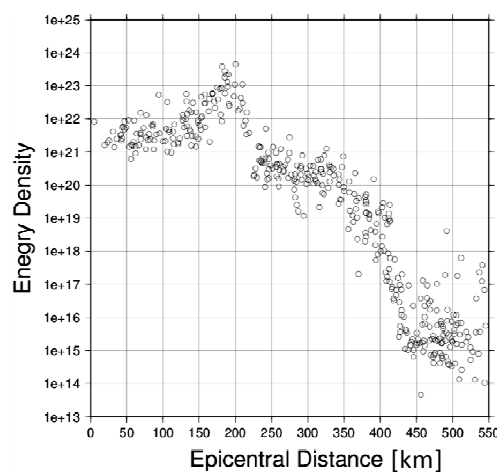


図 2. 経過時間 60s のエネルギー密度の空間分布。

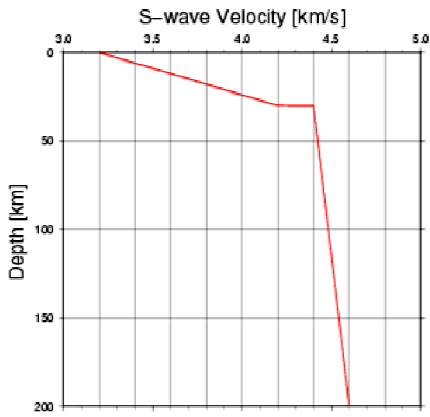


図 3. 仮定した1次元S波速度構造モデル。

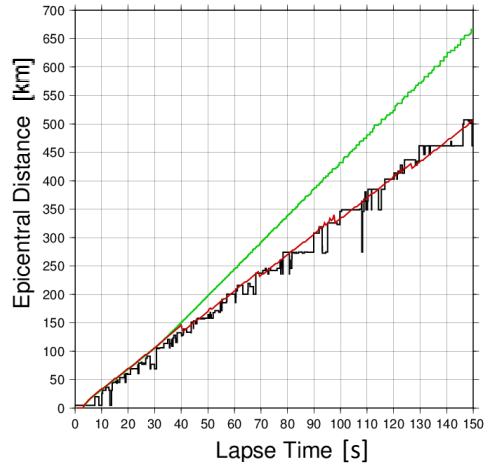


図 4. S波初動の理論走時(緑), およびS波ピークの理論走時(赤)と観測走時(黒)

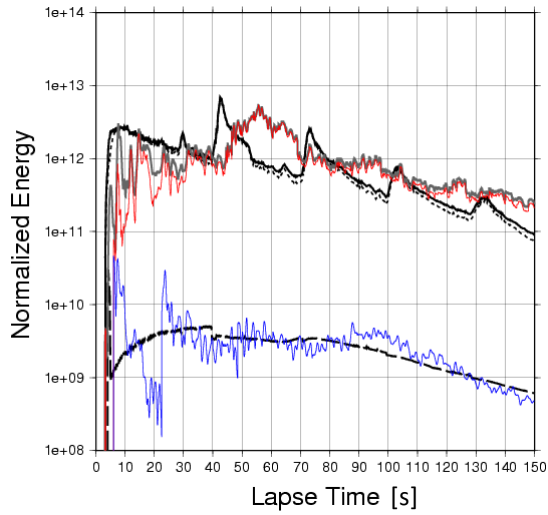


図 5. 見かけのエネルギー。灰色, 赤, 青の線はそれぞれ観測から得られた $E'_T(t)$, $E'_1(t)$, $E'_2(t)$. 黒線は理論値 ($g = 0.002 \text{ km}^{-1}$, $Q_i^{-1} = 0.0075$). 実線: $E'_T(t)$, 点線: $E'_1(t)$, 破線: $E'_2(t)$.

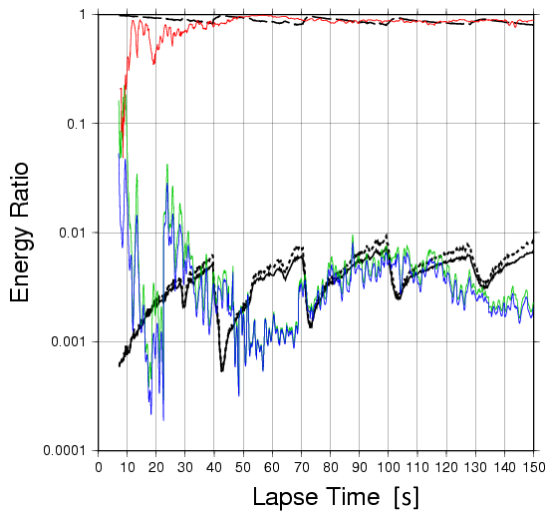


図 6. エネルギー比。赤, 緑, 青の線はそれぞれ観測から得られた $E'_1(t)/E'_T(t)$, $E'_1(t)/E'_2(t)$, $E'_2(t)/E'_T(t)$. 黒線は理論値 ($g = 0.002 \text{ km}^{-1}$, $Q_i^{-1} = 0.0075$). 破線: $E'_1(t)/E'_T(t)$, 点線: $E'_1(t)/E'_2(t)$, 実線: $E'_2(t)/E'_T(t)$.