

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(3)

#佐々木悠人・河原純(茨城大)・齊藤竜彦(防災科研)・江本賢太郎(東北大)

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、いずれも高周波地震波エネルギーの時空間変化を規定する要因である。散乱係数と内部減衰を分離して推定する方法として、Multiple Lapse-Time Window 法(Fehler et al., 1992; Hoshiya, 1993)がある。この手法では、各地点で観測された地震波エネルギー密度を複数の時間窓で積分し、その空間変化を輻射伝達理論で解釈する。これに対して齋藤ほか(2013, 日本地震学会秋季大会)では、各時刻での地震波エネルギー密度の空間分布を「空間窓」で積分した量(「見かけのエネルギー」)を求め、その時間変化を輻射伝達理論で解釈することにより、散乱係数と内部減衰を推定する手法を提案した。彼らはその手法を中国地方で発生した地震の記録に適用し、同地方の散乱係数と内部減衰を推定した(齋藤ほか, 2014, 日本地震学会秋季大会)。しかし、観測された見かけのエネルギーの時間変化の特徴を輻射伝達理論で十分に再現できなかった。本研究では、彼らの手法の改善を目的とし、観測値の輻射伝達理論解による再現を図る。また、中国地方における地震の解析事例を増やし、地震による散乱係数と内部減衰の推定値の違いについて検討する。

手法

散乱係数を g , 内部減衰を Q_i^{-1} とし、点震源からの等方的な S 波輻射を考える。震央距離 Δ の地点で経過時間 t に観測されるエネルギー密度を $E = E(\Delta, t)$ とし、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(齋藤ほか, 2013)。

$$E_T'(t) = \int_0^{\Delta_D(t)} 4\pi\Delta^2 E d\Delta, \quad E_1'(t) = \int_{\Delta_D(t)-\Delta_0}^{\Delta_D(t)} 4\pi\Delta^2 E d\Delta, \quad E_2'(t) = \int_0^{\Delta_0} 4\pi\Delta^2 E d\Delta, \quad (\Delta_0 = 50 \text{ km})$$

ここで $\Delta_D(t)$ は直達波面の震央距離を表す。 Δ_0 については後述する。 $E_1'(t)$ と $E_2'(t)$ はそれぞれ直達波付近と震源付近のエネルギーに対応する。 $E_T'(t)$ は全エネルギーに対応し、散乱過程によらず、 Q_i^{-1} のみに依存する。一方、 $E_T'(t)$, $E_1'(t)$, $E_2'(t)$ のうち二者の比をとると、 Q_i^{-1} の寄与が相殺し、 g のみに依存する。上式に基づいて、地震発生から 150 s までの 3 成分地震波形の 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 1)。これにモンテカルロシミュレーション(Yoshimoto, 2000)から得られる輻射伝達理論解を当てはめることで g と Q_i^{-1} を求める(齋藤ほか, 2013, 2014)。

今回、齋藤ほか(2013, 2014)の手法について次の 2 点を修正した。まず、彼らが単純な速度構造モデルを用いて輻射伝達理論解の計算を行ったのに対して、今回は Matsubara and Obara (2011) の 3 次元 S 波速度構造から導出した中国地方の平均的な 1 次元速度構造(図 2)を用いた。また、彼らが空間窓長 Δ_0 を $\Delta_0 = \Delta(t)/4$ と置いたのに対して、本研究では $\Delta_0 = 50 \text{ km}$ に固定してみた。これにより、観測された見かけのエネルギーの理論解による再現性が向上することが示された。

結果

2011年11月21日の広島県北部の地震 ($M_j=5.4$, 深さ 11.7km) について、震央距離 550km 以内の Hi-net 観測点で得られた記録 (1-2Hz) を使用する (図 3)。地震記録から得られた見かけのエネルギー、およびそれらの比と、これらの観測曲線と最も良く合うと目視で判断した理論曲線を併せて図 4 に示す。両者は概ねよく一致し、 $g=0.002$, $Q_i^{-1}=0.0085$ という値が得られた (佐々木ほか, 2015, JpGU)。さらに、2007~2011年に同じ地域で発生した他の4つの地震についても同様に解析を行った (表 1, 図 5)。それぞれの地震記録において得られた g, Q_i^{-1} は概ね調和的であり、結果として中国地方の散乱係数と内部減衰は $g=0.0015\sim 0.0025$, $Q_i^{-1}=0.0075\sim 0.0095$ と推定された。これは既往研究の結果と比較すると 2~1/2 倍の範囲内であり、調和的である (表 2)。

一方、 $E_T(t)$ 等には周波数依存性が見られ、より高周波 (>2Hz) の場合には理論値と観測値があまり適合しないという結果も得られた。その原因と適合度の改善方法については今後の検討課題である。また、観測値と理論値の残差に基づく客観的な g, Q_i^{-1} の評価を今後行う必要がある。

謝辞

防災科学技術研究所の Hi-net の地震記録、および同所が公開している Matsubara and Obara (2011, Earth Planets Space, 63, 663-667) の 3次元速度構造モデルのデータを使用しました。

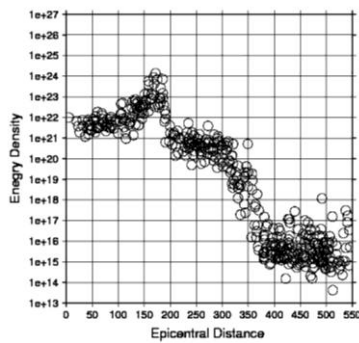


図 1: 経過時間 54 s のエネルギー密度の空間分布 (2011 年 11 月 21 日の地震)

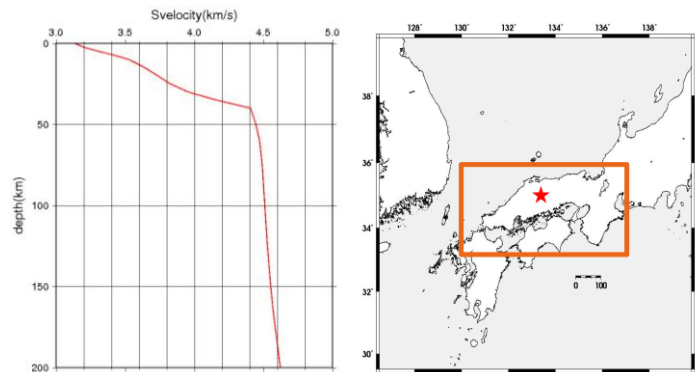


図 2: 輻射伝達理論解の計算に使用する 1次元速度構造 (左図) と、速度構造を導出する際に使用した領域 (右図) (★は 2011 年 11 月 21 日の地震の震央)

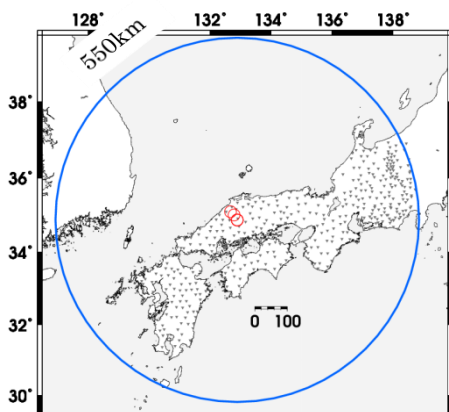


図 3: 解析対象の 5つの地震の震央 (赤丸) と解析に利用した Hi-net 観測点

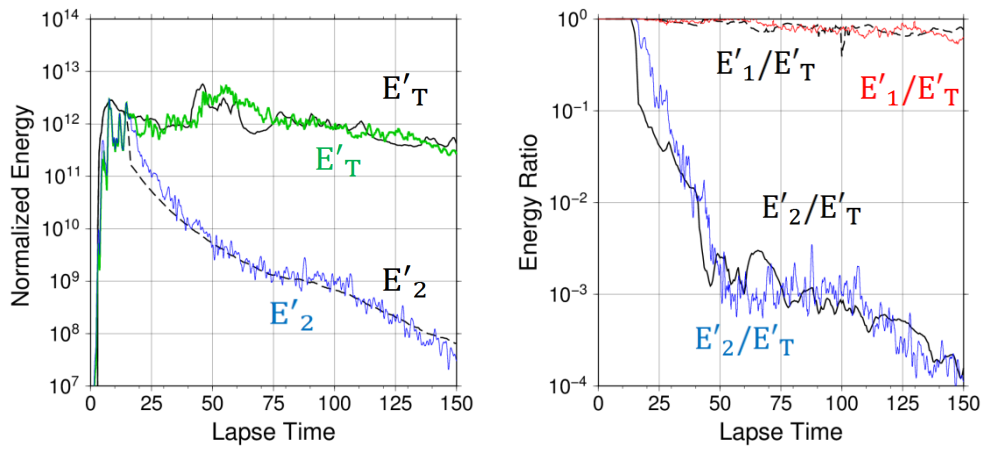


図 4: 2011 年 11 月 21 日の広島県北部の地震の観測記録から得られた見かけのエネルギー、およびそれらの比 (色線: 観測値、黒線: 理論値、 $g = 0.002$, $Q_i^{-1} = 0.0085$)

2007 年 5 月 13 日	深さ 9.5km	Mj 4.6
2011 年 6 月 4 日	深さ 10.5km	Mj 5.2
2011 年 11 月 25 日-1	深さ 12.5km	Mj 4.7
2011 年 11 月 25 日-2	深さ 12.6km	Mj 4.3

表 1: 本研究で新たに解析を行った中国地方で発生した地震

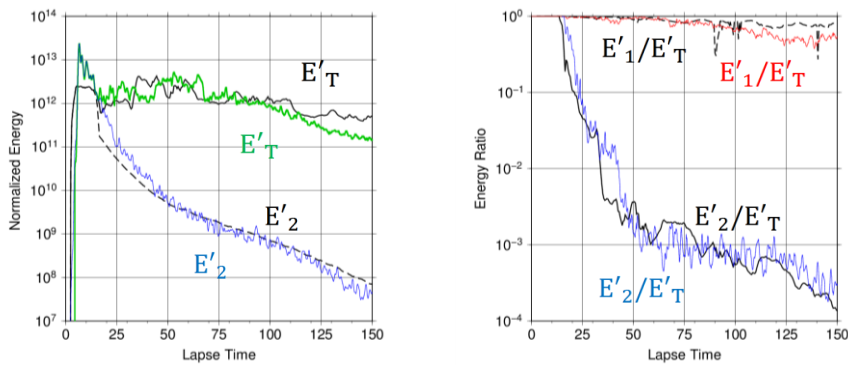


図 5-1: 2007 年 5 月 13 日に発生した地震の観測記録から得られた見かけのエネルギー、およびそれらの比 (色線: 観測値、黒線: 理論値、 $g = 0.002$, $Q_i^{-1} = 0.0085$)

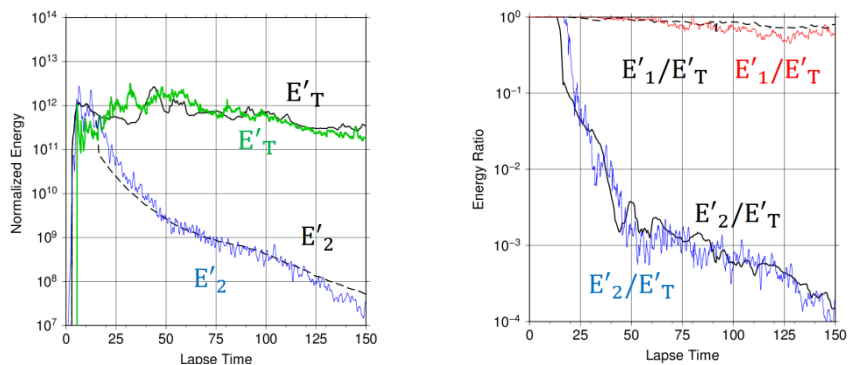


図 5-2: 2011 年 6 月 4 日に発生した地震の観測記録から得られた見かけのエネルギー、およびそれらの比 (色線: 観測値、黒線: 理論値、 $g = 0.002$, $Q_i^{-1} = 0.0075$)

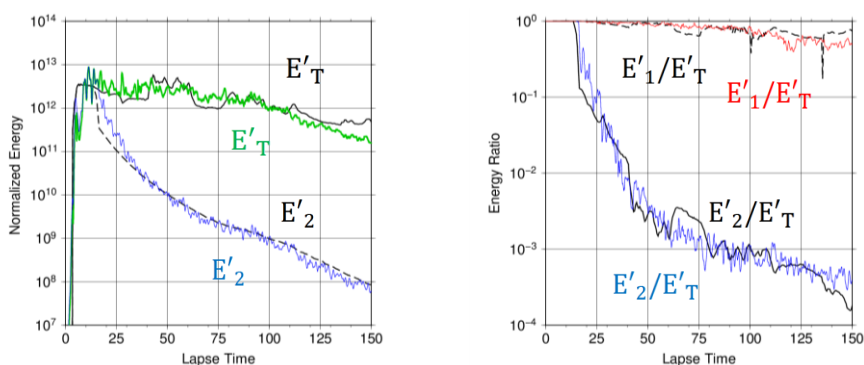


図 5-3: 2011 年 11 月 25 日に発生した 1 つ目の地震の観測記録から得られた見かけのエネルギー、およびそれらの比 (色線: 観測値、黒線: 理論値、 $g = 0.0025$, $Q_i^{-1} = 0.0095$)

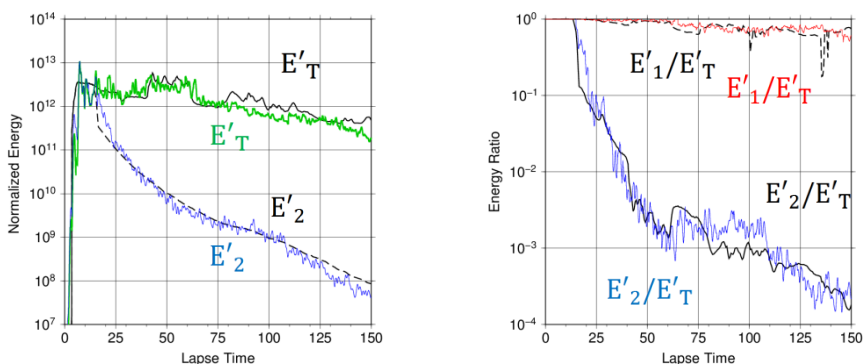


図 5-4: 2011 年 11 月 25 日に発生した 2 つ目の地震の観測記録から得られた見かけのエネルギー、およびそれらの比 (色線: 観測値、黒線: 理論値、 $g = 0.0025$, $Q_i^{-1} = 0.0095$)

	対象地域	散乱係数 [km^{-1}]	内部減衰
本研究	西南日本	0.002~0.0025	0.0075~0.0095
齋藤ほか (2014)	西南日本	0.002	0.0085
Fehler et al.(1992) (上下成分)	関東東海地方	0.004±0.005	0.0038
Hoshiba(1993)	中国地方	0.00448±0.00424	0.0032±0.0025
Calcoré and Sato(2010)	中国地方	0.0064~0.0141	0.00462~0.00565
浅野・齋藤(2011)	西南日本	0.0038±0.0012	0.0052 (全国平均)

表 2: 既往研究との比較