

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

齋藤清志郎¹・河原純²・齋藤竜彦³

¹茨城大学大学院理工学研究科、²茨城大学理学部、³防災科学技術研究所

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。輻射伝達理論に基づく Multiple Lapse-Time Window (MLTW) 法は、地震波エネルギーへの散乱と内部減衰の相対的な寄与が経過時間とともに変化することを利用して、複数の時間ウィンドウにおけるエネルギー密度の積分を観測点ごとに求め、その空間変化から散乱係数と内部減衰を同時推定する (Fehler *et al.*, 1992, *GJI*; Hoshiya, 1993, *JGR*; Carolé and Sato, 2010, *GJI*)。一方、浅野・齋藤 (2011, 地震学会秋季大会) は、Hi-net の観測記録から地震波エネルギー密度の空間分布を求め、その時間発展から散乱係数と内部減衰を同時推定した。この方法は、エネルギーの時空間分布を「各時刻での空間分布」と見る点で、「各地点での時間変化」と見る MLTW 法とは逆の発想であり、Hi-net のような高密度な地震観測網の利用により初めて可能となる。本研究では、複数の空間ウィンドウにおけるエネルギー密度の積分を考えることにより、散乱係数と内部減衰を推定する手法を提案する。今回は手法の妥当性を検討する。

最初に、一様な S 波速度 v 、散乱係数 g 、内部減衰 Q_i^{-1} を持つ無限媒質中の点震源からの S 波の等方的輻射を考える。震源距離 r 、震源時からの経過時間 t におけるエネルギー密度を $E(r,t)$ とし、 $0 < r < vt/4$ (震源近傍、later coda の領域)、 $3vt/4 < r < vt$ (直達波と early coda の領域)、および $0 < r < vt$ (波動エネルギー分布領域全体) の 3 つの空間ウィンドウに関して、以下の積分を考える。

$$E_T(t) = \int_0^{vt} 4\pi r^2 E(r,t) dr, \quad E_1(t) = \int_{3vt/4}^{vt} 4\pi r^2 E(r,t) dr, \quad E_2(t) = \int_0^{vt/4} 4\pi r^2 E(r,t) dr \quad (1)$$

E_T は全エネルギーに当たるので、その時間変化は散乱過程に依らず、 Q_i^{-1} にのみ依存する。一方、 g は散乱波 (コーダ波) の励起効率を規定するため、 E_T 、 E_1 、 E_2 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。それゆえ観測された E_T から Q_i^{-1} を、エネルギー比のいずれかから g をそれぞれ独立に求められるはずである。以上の予想を、Paasschens (1997, *Phys. Rev.*) による輻射伝達理論の近似的解析解を用いて検証した (図 1)。具体的には、 v および全輻射エネルギーを 1、点震源からの輻射継続時間を 0.4 とし、 g と Q_i^{-1} を変化させた。得られたエネルギー量 E_T 、 E_1 、 E_2 を図 2(a)~(c) に、エネルギー比 E_2/E_1 、 E_1/E_T 、 E_2/E_T を図 2(d)~(f) にそれぞれ示す。図 2(a)~(c) の比較から E_T が Q_i^{-1} だけで決まり、図 2(d)~(f) の比較から 3 種の比のいずれも g だけで決まることが、それぞれ確認できる。

次に、非一様な (例えば 1 次元構造を持つ) 半無限媒質の内部に震源がある現実的な場合に関して、本手法の妥当性を議論する。この場合の地震波エネルギーの空間分布は、モンテカルロシミュレーション (Yoshimoto, 2000, *JGR*) でモデル化する。ただし一様構造の半無限媒質につい

では、Paasschens の解を 2 倍するだけでよい。実際には、地下の震源からの輻射を地表でのみ観測するため、全エネルギーの厳密な評価は不可能なので、(1)式の代わりに、震央距離 Δ を用いて

$$E'_T(t) = \int_0^{\Delta_D} 4\pi\Delta^2 E(\Delta, t) d\Delta, \quad E'_1(t) = \int_{3\Delta_D/4}^{\Delta_D} 4\pi\Delta^2 E(\Delta, t) d\Delta, \quad E'_2(t) = \int_0^{\Delta_D/4} 4\pi\Delta^2 E(\Delta, t) d\Delta \quad (2)$$

で定義される、見かけのエネルギー量を導入する ($\Delta_D(t)$ は直達波面の震央距離)。これらの量と、その相互の比についても上述と類似の議論が可能であり、例えば水平 2 層構造について各層の g と Q_i^{-1} を求めることができると考えられる。

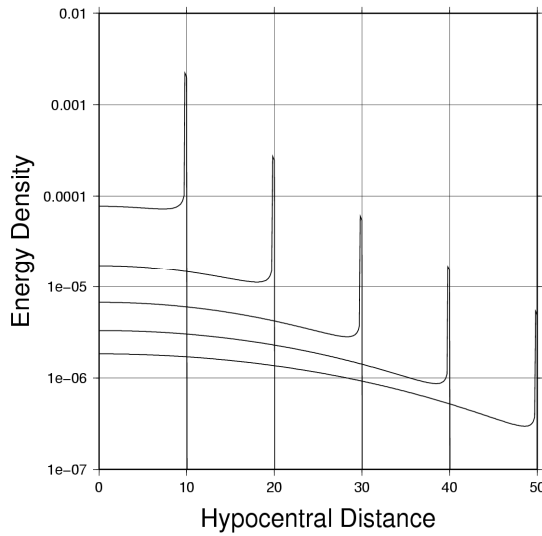


図 1 : エネルギー密度の空間分布の時間発展の例 ($\nu=1$, $g=0.05$, $Q_i^{-1}=0.02$, 全輻射エネルギー 1, 震源の輻射継続時間 0.4)。
Paasschens (1997) による。

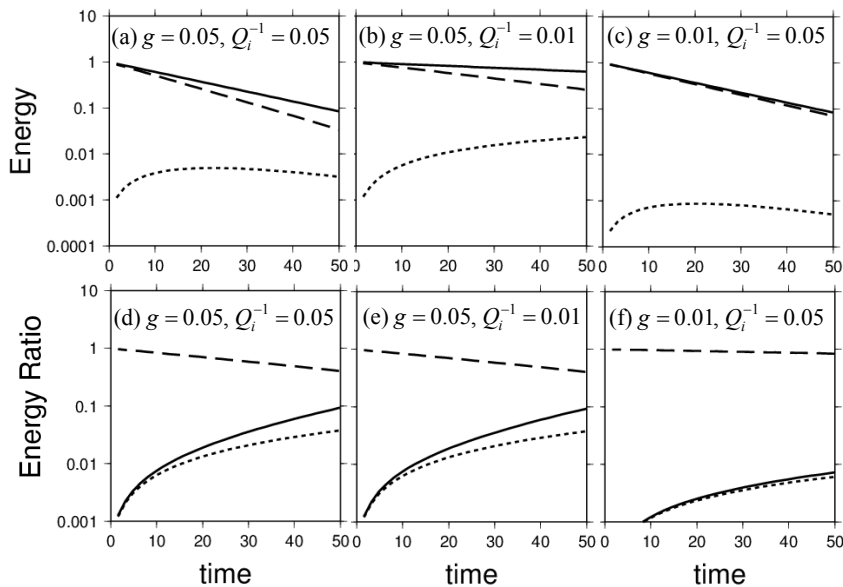


図 2 : 異なる g と Q_i^{-1} の値に対する、(a)~(c) E_T (実線)、 E_1 (破線)、 E_2 (点線)、および、(d)~(f) E_2/E_1 (実線)、 E_1/E_T (破線)、 E_2/E_T (点線)。