

一次等方散乱モデルに基づく長周期レイリー波の散乱波の形成

野辺地 真希子, 佐藤 春夫, 大竹 政和 (東北大学理学研究科固体地球物理学講座)

はじめに

地殻や上部マントル内の地震波速度不均質構造をより詳しく知るために, 短周期帯における P 波や S 波の散乱波に着目した研究が数多くなされてきた. また最近ではこのような短周期波の研究に加え, 沈み込むスラブやマントルプリュームによる長周期表面波の散乱波の存在が示唆されており (Lognonné and Clévéde, 1997; Capdeville, 2000), 長周期帯における散乱現象も重要視されるようになった.

本研究では主に長周期レイリー波に着目し, その散乱波の存在を明らかにすると共に, 等方一次散乱モデルを構築し, 観測された散乱波の平均二乗 (MS) エンベロープの振幅レベルを定量的に説明する.

長周期レイリー波の散乱波

図 1 は 1999 年 8 月 17 日にトルコ北西部で発生した Kocaeli 地震 ($M_w=7.4$) を, 東北大学地震学講座が宮城県津山町に設置した観測点 TYM と IRIS の 7 観測点で記録した上下動成分の MS エンベロープ波形である. この MS エンベロープは, 地震計の周波数特性を補正した後, 周期 80~180s のバンドパスフィルターを作用させ二乗振幅を計算し, 中心周期 $T=120$ s で平滑化した波形である. 観測点 TYM の MS エンベロープを例に挙げると, 2000s や 8000s などに現れるピークが長周期レイリー波の直達波 (基本モード) で $R_i (i=1,2,\dots)$ と表わされる. また $X_i (i=1,2,\dots)$ と表される相は, その群速度 ($v_x = 6.3$ km/s) とパーティクルモーションから長周期レイリー波の高次モードであることがわかっている. 直達波の間に着目すると, ノイズレベルよりも明らかに高い振幅レベルを持った波群が到達していることがわかる. また直達波の間に到達する波群は origin time からおよそ 40000s 経過してもノイズレベルに至っていない. このような波群は IRIS の観測点においても同様に記録され, その振幅レベルの違いは観測点間でファクター 3 以下となっており, ほぼ一定であることがわかった.

球幾何における一次等方散乱モデル

図 1 において, 直達波の間に見られる波群の起源は主に 2 つ考えられる. 1 つは表面波の特徴によるもので, 速度分散における波群の拡大と高次モードの存在である. もう 1 つは, 地球表面や上部マントル内の速度不均質構造による散乱波である. 本研究では後者に着目し, 球面上における一次等方散乱モデルを構築する.

球座標 (R, θ, ϕ) において, 震源は北極, 観測点は $(\theta = \Delta_0, \phi = \phi_0)$ に位置すると仮定すると, 角度 θ における直達波のエネルギー密度は,

$$E^0(\theta, \phi, t) = \frac{W\Phi(\phi)}{2\pi VR|\sin\theta|} \delta\left(t - \frac{R\theta}{V}\right) e^{-(g_0 + g_i)Vt}, \quad (1)$$

と表される. W は震源から輻射された全エネルギー, $\Phi(\phi)$ は輻射パターンである. V はある周期帯における群速度, 指数関数項は単位距離あたりの散乱減衰 g_0 と内部減衰 g_i , これは Q^{-1} 値と $Q^{-1} = (g_0 + g_i)V/\omega$ の関係をもつ.

散乱体 ($\theta = \theta', \phi = \phi'$) におけるエネルギー流量密度は $VE^0(\theta', \phi', t)$ なので、観測点におけるエネルギー密度は、

$$E^1(\Delta_0, \phi_0, t) = \frac{1}{V} \int_0^{2\pi} R d\phi' \int_0^\infty R |\sin \theta'| d\theta' \int_{-\infty}^\infty dt' \frac{e^{-(g_0+g_i)V(t-t')}}{2\pi R |\sin \theta'|} \cdot \delta\left(t - \frac{R\theta''}{V} - t'\right) \cdot g_0 \cdot VE^0(\theta', \phi', t') \quad (2)$$

$$= \frac{Wg_0}{4\pi^2 R} e^{-(g_0+g_i)Vt} \int_0^{2\pi} d\phi' \Phi(\phi') \int_0^\infty d\theta' \frac{\delta\left(\theta' + \theta'' - \frac{Vt}{R}\right)}{|\sin \theta'|}$$

となる。 θ'' は散乱体から観測点までの角距離である。ここで球面三角形の余弦定理 $\cos \theta'' = \cos \Delta_0 \cos \theta' + \sin \Delta_0 \sin \theta' \cos(\phi' - \phi_0)$ を用いると、

$$\theta' = \tan^{-1} \frac{\cos \Delta_0 - \cos \tau}{\sin \tau - \sin \Delta_0 \cos(\phi_0 - \phi')} \quad \tau = \theta' + \theta''(\theta') = Vt/R, \quad (3)$$

と表せる。このとき θ' は Δ_0 と τ によって複数の値を持つ。 θ' の個数は、

$$n_s(\Delta_0, \tau) = \begin{cases} 0 & 0 < \tau < \Delta_0 \\ 1 & \Delta_0 < \tau < 2\pi - \Delta_0 \\ 2 & 2\pi - \Delta_0 < \tau < 2\pi + \Delta_0 \\ 3 & 2\pi + \Delta_0 < \tau < 4\pi - \Delta_0 \\ \dots & \dots \end{cases}, \quad (4)$$

である。

(2)式において、 θ'' を球面三角形の余弦定理を用いて変形し θ' に関する積分を行い(4)式を代入すると、観測点におけるエネルギー密度は以下のような式で与えられる。

$$E^1(\Delta_0, \phi_0, t) = \frac{Wg_0}{4\pi^2 R} e^{-(g_0+g_i)Rt} \int_0^{2\pi} d\phi' \frac{\Phi(\phi') n_s(\Delta_0, \tau)}{\sqrt{(\sin \tau - \sin \Delta_0 \cos(\phi_0 - \phi'))^2 + (\cos \Delta_0 - \cos \tau)^2}}. \quad (5)$$

Kocaeli 地震の観測記録の解析

本研究では、球面上における一次等方散乱モデルを用いて Kocaeli 地震を解析した。解析に用いた観測点は観測点 TYM と IRIS の 32 観測点の計 33 点である。図 2 に観測点分布図を示す。各観測点において記録された上下動成分に対し、周期 80~180s および 50~100s のバンドパスフィルターを作用させ MS エンベロープを計算した。

理論曲線を計算するにあたり、初めに、観測された直達波の二乗振幅を用いて観測点毎に Q^{-1} 値の推定を行った。この際、周期 80~180s において中心周期 $T=120$ s, 平均群速度 $V=3.73$ km/s を用い、また、周期 50~100s においてはそれぞれ、 $T=70$ s, $V=3.94$ km/s を用いた。全観測点での Q^{-1} 値の平均はそれぞれ 8.5×10^{-3} , 8.9×10^{-3} と推定された。

次に、各観測点の R_1 または R_1 と R_2 の二乗振幅を用いて震源からの輻射エネルギー W と輻射パターン $\Phi(\phi)$ を推定した。各観測点における R_1 または R_1 と R_2 の二乗振幅を幾何減衰や Q^{-1} 値を補正し、観測データとした。理論輻射パターンとしては、 $\text{dip}90^\circ$ の横ずれ断層で directivity を持つ double-couple 型を仮定した。この場合 $\Phi(\phi)$ は、

$$\Phi(\phi) = \frac{2A \cos^2(\phi - 92^\circ)}{(1 - B \cos(\phi - 92^\circ))^2}, \quad \int_0^{2\pi} \Phi(\phi) d\phi = 2\pi. \quad (6)$$

と表せる。 ϕ は方位角、 A は W と規格化する際に現れる定数を掛け合わせた定数、 B は

断層の破壊伝播速度とレイリー波位相速度の比を表す。これら A と B を未知数とし、グリッドサーチにより観測データをもっとも良く説明する $\Phi(\phi)$ を求めた。推定した Q^{-1} 値と(6)式を(5)式に代入することで、理論曲線を描くことができる。

一次等方散乱モデルから推定した長周期表面波の全散乱係数

図3に理論曲線と観測MSエンベロープを示す。図3(a)は、周期80~100sにおける2観測点での結果で、全散乱係数 g_0 は $2 \sim 8 \times 10^{-6} \text{ km}^{-1}$ まで仮定した。また、速度分散の効果を考慮し、周期帯を5つに分割して、それぞれの中心周期における群速度を与え ($V = 3.58 \sim 3.80 \text{ km/s}$)、走時および直達波の励起を計算した。また、分割した5つの周期帯の振幅には、パワースペクトルの振幅比を基に重みをかけた。図3(a)から $g_0 = 4 \times 10^{-6} \text{ km}^{-1}$ を仮定したとき、散乱波のMSエンベロープ振幅を良く説明できることがわかる。

図3(b)は、周期50~100sにおける2観測点での結果で、全散乱係数 g_0 は $1.6 \sim 6.4 \times 10^{-5} \text{ km}^{-1}$ まで仮定した。直達波部分は、前周期帯と同様に速度分散を考慮し ($V = 3.74 \sim 3.97 \text{ km/s}$)、振幅にはパワースペクトルに基づき重みをかけた。この周期帯においては、 $g_0 = 3.2 \times 10^{-5} \text{ km}^{-1}$ をとした時散乱波のMSエンベロープ振幅をうまく説明できることがわかった。

議論と結論

本研究では観測された長周期レイリー波のMSエンベロープに対して一次等方散乱モデルを構築し、散乱波の振幅レベルを定量的に説明した。一次等方散乱モデルを用いて推定した全散乱係数 g_0 は、周期80~180sでは $4 \times 10^{-6} \text{ km}^{-1}$ 、周期50~100sにおいては $3.2 \times 10^{-5} \text{ km}^{-1}$ であった。過去に推定されている1~20HzのS波および1Hz付近の表面波の散乱係数は 10^{-2} km^{-1} なので (Aki and Chouet, 1975)、3~4桁小さい値となっている。また、全減衰係数に対する散乱減衰の割合は1~2パーセントであった。

推定された散乱係数による2つの周期帯の平均自由時間は、67000s (周期80~180s)、8000s (周期50~100s) であった。平均自由時間の数分の1時間以降の継続時間における散乱波の振幅レベルは、特に周期50~100sの場合理論曲線よりも大きくなっている。さらに長い継続時間での振幅レベルを説明するためには、多重散乱の効果を考慮する必要がある。

散乱体に関しては、過去の研究によりヒマラヤ山脈を通過した長周期表面波の位相ゆらぎが報告されており (Kanamori, 1970)、最近ではマントルプリュームや沈み込むスラブに伴う散乱波の生成が理論的に示唆されている (Lognonné and Clévéde, 1997; Capdeville, 2000)。本解析のみでは散乱体を推定することはできないが、アレイ解析を加えることにより散乱体を同定できると考えられる。また長周期表面波の散乱に関する地球全体の傾向を知るためには、多数の地震を解析する必要がある。しかし、50~180sという長周期帯において散乱係数を推定したのは本研究が初めてであり、今後の大規模な速度不均質構造の解明に役立つと考えられる。

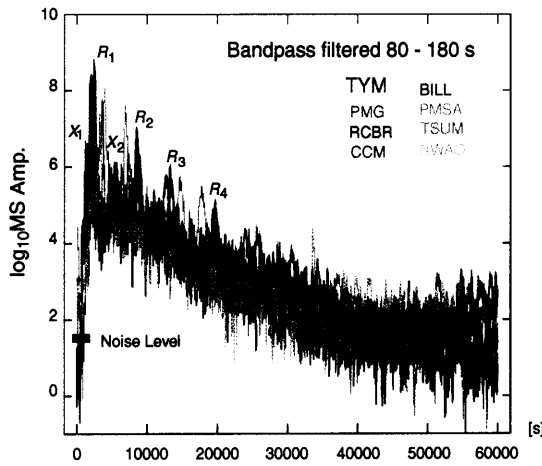


図 1. Kocaeli 地震の上下動成分の MS エンベロープトレース. $R_i (i=1,2,\dots)$ は、長周期レイリー波の直達波 (基本モード). $X_i (i=1,2,\dots)$ は、高次モード. 直達波の間に、インコヒーレントな波が到達していることがわかる.

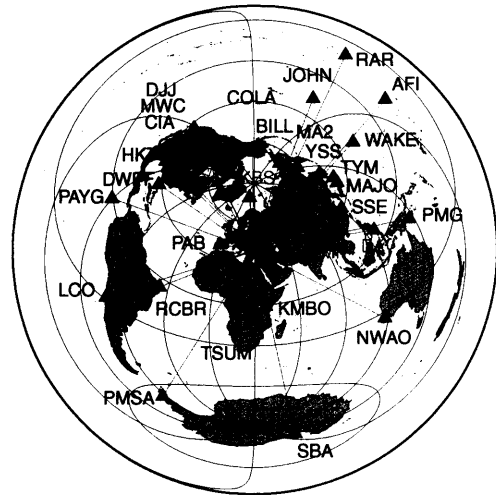


図 2. Kocaeli 地震の震央と観測点分布. ★: Kocaeli 地震の震央. ▲: 観測点.

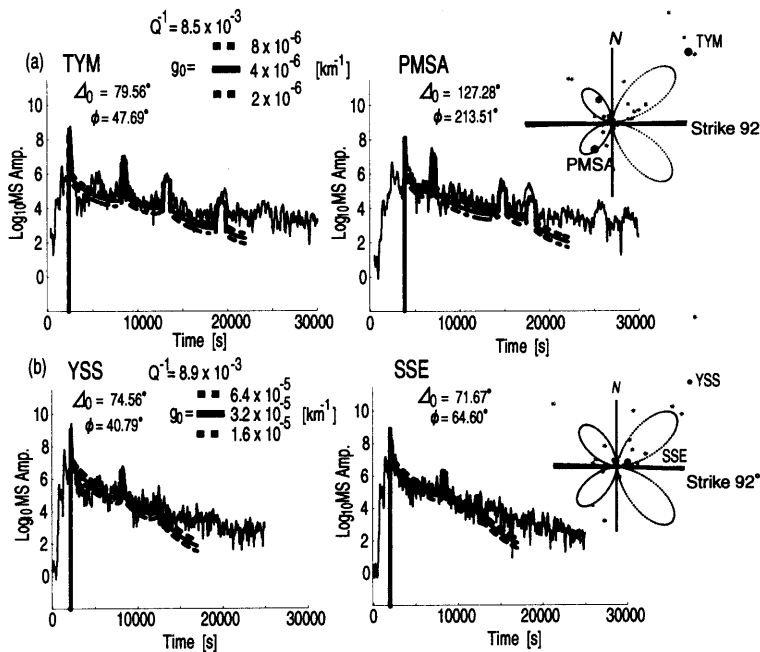


図 3. (a)周期 80~100s における観測エンベロープと理論曲線. 散乱係数 g_0 は $2 \sim 8 \times 10^{-6} \text{ km}^{-1}$ を過程した. (b)周期 50~100s における観測エンベロープと理論曲線. 散乱係数 g_0 は $1.6 \sim 6.4 \times 10^{-5} \text{ km}^{-1}$ を過程した. 図の右側には、各周波数帯において推定された輻射パターンと、観測点の方位を示した.

Reference

Aki, K., and B. Chouet, Origin of Coda Waves: Source, Attenuation and Scattering Effects, *J. Geophys. Res.*, **80**, 3,322-3,342, 1975.

Capdeville, Y., E. Stutzmann, and J. P. Montagner, Effect of a Plume on Long Period Surface Waves Computed with Normal Modes Coupling, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **119**, 57-74, 2000.

Kanamori, H., Synthesis of Long-Period Surface Waves and Its Application to Earthquake Source Studies: Kurie Islands Earthquake of October 13, 1963, *J. Geophys. Res.*, **75**, 5011-5027, 1970.

Lognonné, L., and E. Clévéde, Diffraction of Long Period Rayleigh Waves by a Slub: Effects of Mode Coupling, *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 1035-1038, 1997.