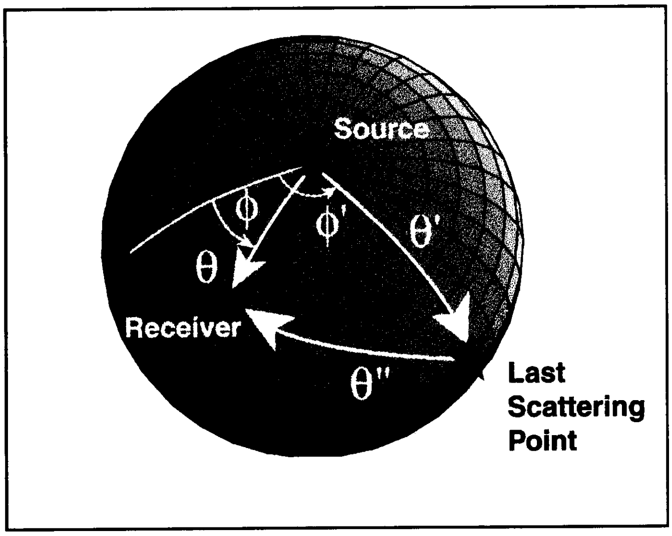
球面上の多重等方散乱モデルに基づくレーリー波エンベロープの理論合成

佐藤春夫 ・西野真希子
東北大学大学院・理・地球物理

大きな地震の長周期の上下動成分波形記録には，地球を周回するレーリー波が現れる．複数の直達波の着信の間には複雑な様相を示す波群を見いだすことができ，そのエンベロープは凹型の形状を示す．著者らは，地球表面近くの不規則な地形や弾性的不均質構造が表面波を散乱すると考え，球面上の一次散乱モデルによってその形状を説明してきた[Sato and Nohechi, 2001]．本講演では，球面上での表面波エネルギーの多重散乱過程の定式化を報告する．



一般に，波長が不均質の空間的スケールよりも大きい場合，散乱は等方的と考えてよい．散乱断面積 σ_0 の等方散乱体が数密度 n で分布するとき，球面上の単位表面積あたりの散乱の強さは全散乱係数 $g_0=\sigma_0 n$ によって与えられる．全エネルギー W で輻射パターン $\Phi(\phi)$ を持つ非等方輻射震源を北極に置く（ただし，$\oint\Phi(\phi)d\phi=2\pi$）．輻射伝達理論では，多重散乱過程を表面波のエネルギー密度 E に対する積分方程式で記述する．

$$
\begin{aligned}
E(\theta,\phi;t) &= G(\theta,\phi;0,0;t)W\Phi(\phi) \\
&\quad + g_0 V\int_{-\infty}^{\infty}\oint G(\theta,\phi;\theta',\phi';t-t')E(\theta',\phi';t')R^2\sin\theta' d\theta' d\phi' dt' \quad .
\end{aligned} \tag{1}
$$

ここで角度 θ' と ϕ' および時間 t' は，最終散乱点の値である．コヒーレント成分の伝播は，球面上の幾何減衰と因果律および減衰項を用いて，次式で表される．

$$
\begin{aligned}
G(\theta,\phi;\theta',\phi';t) &= \frac{1}{2\pi R^2\left|\sin\theta''\right|}\left[\delta_{2\pi}\left(\frac{Vt}{R}-\theta''\right)+\delta_{2\pi}\left(\frac{Vt}{R}+\theta''\right)\right]e^{-(g_0+g_i)Vt} \quad \text{for } t\ge 0 \\
&= 0 \quad \text{for } t<0.
\end{aligned} \tag{2}
$$

球面三角法により $\cos\theta''=\cos\theta\cos\theta''+\sin\theta\sin\theta'\cos(\phi-\phi')$ であることに注意する．関数 $\delta_{2\pi}$ は周期 2π のデルタ関数であり，(2)式の第一項は震源と観測点を結ぶ大円の劣弧に沿って，第２項は優弧に沿って速度 V で伝播する表面波エネルギーを表す．指数関数項のうち g_0 は散乱減衰を，g_i は内部減衰の効果を現す．時間に関するラプラス変換と球面上の角度に関する球面調和関数 $Y_{lm}(\theta,\phi)$ による展開を用いて，上記の輻射伝達方程式を解く．時空間での解を求める際の逆ラプラス変換は，解析的に解くことが可能である．特に鉛直断層面を持つ横ずれ断層震源の場合，$\Phi(\phi)=2\sin^2 2\phi=1-e^{i4\phi}/2-e^{-i4\phi}/2$ と書ける．空間分解能をそれほど高く求めなければ，球関数展開の次数 l に関する和を有限でうち切ってよい．

1999年トルコ・コジャエリ地震の長周期上下動記録の自乗振幅平均エンベロープは，この多重散乱モデルで良く説明することができる．12ヶ所のIRIS観測点での記録の解析から，$g_0 = 2\times10^{-6}\mathrm{km}^{-1}$ という値で，R_1 と R_2 相の間のエンベロープを定量的に説明することができる．下図は，IRISのAFI観測点における観測(細線)と理論（太線）とを比較したものである．

しかし，多重散乱を考慮したにも関わらず，基本モードだけを考えたこのモデルでは，時間がたつにつれて理論エンベロープは観測エンベロープよりもやや強く減衰している．これは，内部減衰がもっと小さい高次モードのレーリー波が観測エンベロープに寄与していることを示唆している．十分長い経過時間のエンベロープを説明するには，基本モードのみならず高次モードをも考慮した散乱モデルを構築していくことが必要であると考えられる．