

京都大学防災研究所 正 員 澤田純男  
 京都大学工学部 ○学生員 片岡慶太

1.はじめに

地震動の伝播経路における振幅・位相特性の物理的背景について検討した。伝播経路における地震波の多重散乱のモデル化を行ない、振幅については $1/Q$ スペクトル、位相については分散群遅延時間スペクトルを用いて観測記録との比較を行なう。なお、本研究では等方・異方多重散乱モデルを考慮し、内部減衰を導入する。

2.等方多重散乱モデル

図-1は、Hoshiba<sup>1)</sup>による地震波の $n$ 次散乱を表わすモデルである。図に示すように震源 $R_0$ から放出されたエネルギー粒子は、 $R_i$ の各ポイントで散乱して観測点 $R_n$ に到達する。 $R_i$ は乱数によって決定され、方位角 $\theta$ 及び鉛直角 $\phi$ については、ある角度 $\theta_0$ 、 $\phi_0$ をとる確率がそれぞれ $1/2\pi$ 、 $1/2 \cdot \sin(\phi_0)$ となるようにした。すなわちここでは等方散乱を仮定している。また、自由行程 $s$ については平均自由行程の逆数を $g$ として、ある $s_0$ をとる確率が $g \cdot \exp(-gs_0)$ となるようにしている。本研究ではエネルギー理論と波線理論の両方を用いて多重散乱の振幅インパルス列を得る。エネルギー理論では観測点を設定せずに、震源を中心とした半径 $r$ の球を考えエネルギー密度を求める。具体的には、半径 $r$ の球の表面上にある時間 $t$ に $n$ 次散乱しながら通過するエネルギー粒子の数をカウントする。カウントしたものを球の表面積で割り、さらに総粒子数で割ることによって正規化を行ないエネルギー密度 $E(r, t, n)$ を求める。図-2に震源距離40kmにおける10次散乱のエネルギー密度を示す。一方、波線理論では観測点を設定し、エネルギー粒子ではなく波線として考える。震源において単位振幅を持つ波線は各散乱点において $1/2$ の確率で位相が反転し、観測点に到達するまでに総伝播距離に反比例した距離減衰を受けると仮定した。各波線について重ね合わせを行なうことによって振幅インパルス列を得る。また、振幅インパルス列は総波線数で割ることによって正規化を行なっている。図-3に震源距離40kmにおける10次散乱の振幅インパルス列を示す。このようにして得られた各散乱次数の振幅インパルス列の持つエネルギーが、エネルギー理論を満たすように重ね合わせを行ない、多重散乱の振幅インパルス列を求める。本研究では、振幅インパルス列の2乗和がエネルギー密度 $E(r, t, n)$ の時間積分と等しくなるようにスケールを行なった後、各散乱次数の振幅インパルス列を重ね合わせた。図-4に伝播経路において等方多重散乱を仮定して求めた多重散乱の振幅インパルス列を示す。震源距離は40km、地震波の伝播速度は3.5km/s、平均自由行程は10kmとした。また、図-5に振幅インパルス列の群遅延時間スペクトル、平均・分散群遅延時間スペクトルを示す。澤田ら<sup>2)</sup>は、分散群遅延時間スペクトルと震源距離の2乗とが比例関係にあるとしている。そこでこの比例係数を各周波数における分散群遅延時間の距離増加係数として図-6に示した。図-7に等方多重散乱モデルから求めた分散群遅延時間スペクトルの距離増加係数を示す

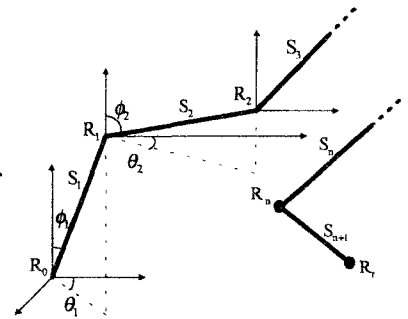


図-1 n次散乱のモデル

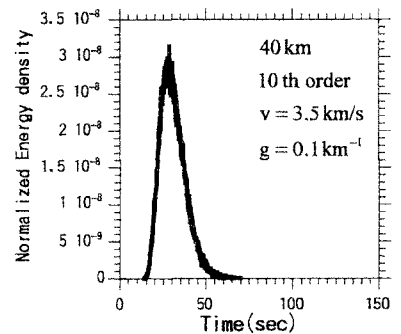


図-2 エネルギー密度

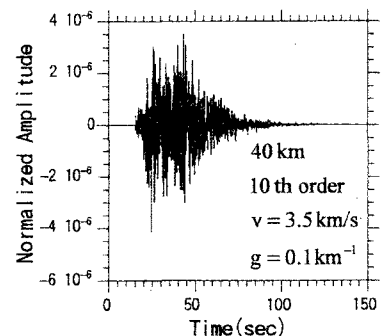


図-3 振幅インパルス列

す。また伝播経路における減衰を表わす1/Q値を図-8に示す。

### 3. 異方多重散乱モデルと内部減衰の導入

Hoshiba<sup>3)</sup>は、等方散乱は特別な場合であるとして異方散乱の導入を試みている。異方散乱モデルでは散乱前の粒子の進行方向と散乱後の粒子の進行方向との間の角度を $\psi$ とし、 $\psi$ に角度依存性を与えている。図-9に本研究で用いた $\psi$ の角度依存性を示す。図はある角度 $\psi_0$ をとる確率の比を表わす。図のように、本研究では前方散乱の強い異方散乱モデルを導入した。また、波線理論において内部減衰を考慮し同様のシミュレーションを行なった。図-10に内部減衰を考慮しない異方多重散乱モデル及び内部減衰を考慮した異方多重散乱から求めた分散群遅延時間の距離増加係数を示す。図-11に内部減衰を考慮しない異方多重散乱モデル及び内部減衰を考慮した異方多重散乱モデルから求めた1/Q値を示す。

### 4. 結論

分散群遅延時間スペクトルの距離増加係数は、前方散乱を導入すれば小さくなり、内部減衰を導入すれば短周期領域において減少する傾向が見られた。1/Q値の大きさは前方散乱を導入しても変化はないが、内部減衰を導入することによって短周期領域に向かうにつれての減衰の減少割合が小さくなった。今後、観測記録と一致するような各種パラメータの特定等を行なう必要がある。

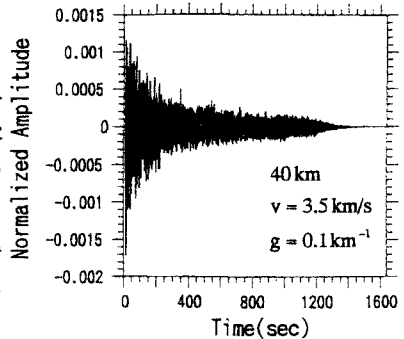


図-4 等方多重散乱モデルによる振幅インパルス列

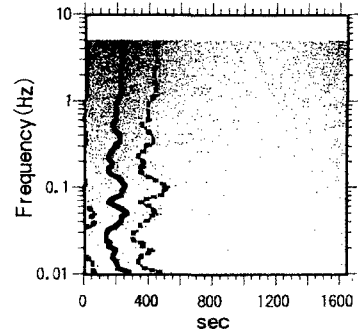


図-5 群遅延時間及び平均・分散群遅延時間

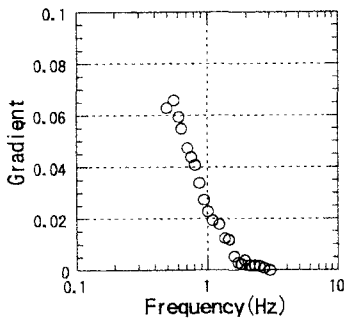


図-6 観測記録による分散群遅延時間の距離増加係数

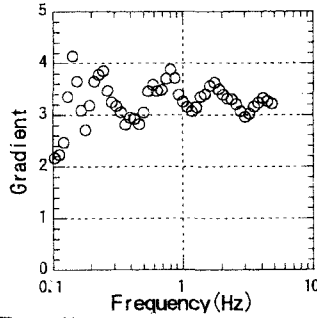


図-7 等方多重散乱モデルによる分散群遅延時間の距離増加係数

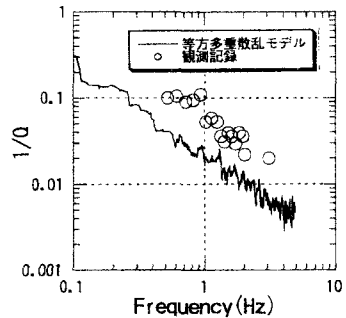


図-8 等方多重散乱モデルと観測記録による1/Q値

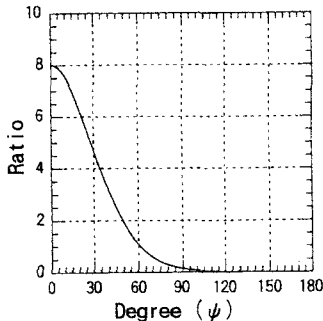


図-9  $\psi$ の角度依存性

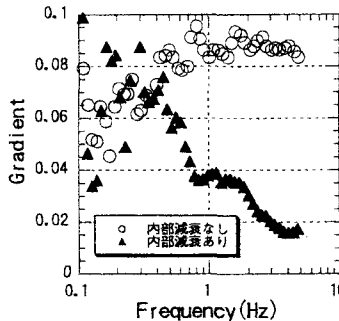


図-10 異方多重散乱モデルによる分散群遅延時間の距離増加係数

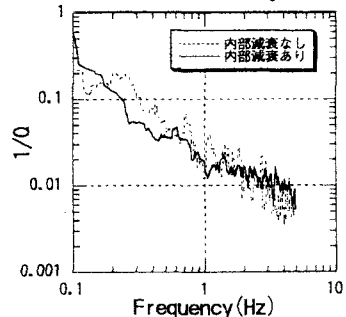


図-11 異方多重散乱モデルによる1/Q値

参考文献: 1)Hosiba, M.: Simulation of multiple-scattered coda wave excitation based on the energy conservation law, Phys. Earth Planet. Interiors, Vol.67, pp.123-136, 1991. 2)澤田・盛川・土岐・横山: 地震動の位相スペクトルにおける伝播経路特性とサイト特性の分離, 第10回日本地盤工学シンポジウム論文集, 第1分冊, pp.915-920, 1998. 3)Hoshiba, M.: Estimation of nonisotropic scattering in western Japan using coda wave envelopes: Application of a multiple nonisotropic scattering model, J. Geophys. Res., Vol.100, B1, pp.645-657, 1995.