

I-665 多重散乱を考慮した地震波放射特性シミュレーションの試み

財団法人大阪土質試験所 正会員 香川 敬生
京都大学工学部 正会員 澤田 純男

1. はじめに

Hoshiba(1991)は不均質媒質内での散乱波動場をエネルギー粒子のランダムな伝播としてモデル化し、エネルギー保存則に基づくMonte Carloシミュレーションにより伝播経路内の散乱波動場を検討して成功を収めているが、散乱エネルギーの概念に立脚した時間領域でのシミュレーションであるため、周波数領域での解釈が困難である。

本論では、Hoshiba(1991)のエネルギー粒子が辿る軌跡を波線で追跡し、周波数領域での伝達関数を介して特定地点の散乱波形を計算する方法を提案する。さらに、本手法で計算した散乱波動場と既存の理論式 [Sato(1977)など] との比較を実施し、多重散乱による地震波放射特性の周波数依存性について検討する。

2. 計算方法

図-1に示すように、震源から出た1本の波線は、乱数により生成した点で散乱を繰り返して観測点に到達するものとする。現在の散乱点を基準とした球座標の方位角 θ 、鉛直角 ϕ （真上が0°）、自由行程 s に関して、

$$P(0 \leq \theta \leq \theta_0, 0 \leq \phi \leq \phi_0, 0 \leq s \leq s_0) = \frac{\theta_0}{2\pi} \frac{1}{2} (1 - \cos \phi_0) [1 - \exp(-gs_0)]$$

の確率 [Hoshiba(1991)] で次の散乱点が生じられ、最後の散乱点に達した波線は観測点に向かうものとする。このときHoshiba(1991)の考え方に基いて、観測点近傍の単位表面積を通過して観測点までに新たな散乱を生じない確率を乗じてその波線による複素振幅を計算する。観測点では各次数の散乱による伝達関数を周波数領域で重ね合わせてゆく。震源から十分多くの波線を乱数で設定した方向に射出して広範囲の散乱波動場を構築する。ただし、P波-S波間の変換波を考えず、散乱点では位相、振幅とも変化せず、散乱は等方散乱を仮定する。

3. 既往理論式との比較

本計算方法の妥当性を示すために、既往の理論式との比較 [Sato(1977), Hoshiba(1991)など] をおこなう。震源から継続時間5秒で半波正弦波型の時間関数でエネルギーが放射された時の波形を考える。震源距離35kmの地点における各散乱次数での波形を図-2に示す。計算パラメータは、媒質速度3.5 km/s、平均自由行程10km、波線数は10,000本である。5次散乱より高次では計算波線数の不足からか波形がやや乱れているが、高次散乱で継続時間が伸び、最大値を示す時間が波形の後部に移動する傾向が良く示されている。

震源距離を r 、時間を t とし、計算した n 次散乱波形を $e_n(r, t)$ と置く。これを震源から放射された総エネルギーで正規化してエネルギー密度 $E_n(r, t)$ を算出し、

$$W_n(t) = \int_0^t E_n(r, t) 4\pi r^2 dr$$

を実行して各次数での全散乱エネルギーを求める。これは、理論的な [Sato(1977) など] 散乱エネルギー、

$$\overline{W_n(t)} = \frac{1}{n!} (gvt)^n \exp(-gvt)$$

と一致することが期待される。上式中、 v は媒質速度、 g は平均自由行程の逆数であり（この計算では 0.1km^{-1} ）、 gvt が無次元量になっている。媒質速度3.5km/s、平均自由行程10km、10,000波線とした時の3, 5, 7次散乱の

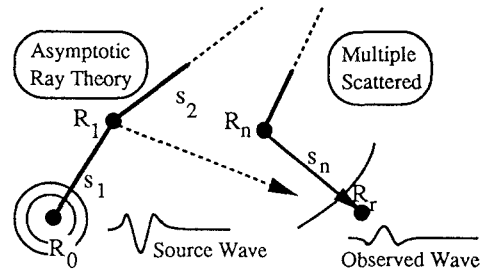


図-1 計算方法の概念

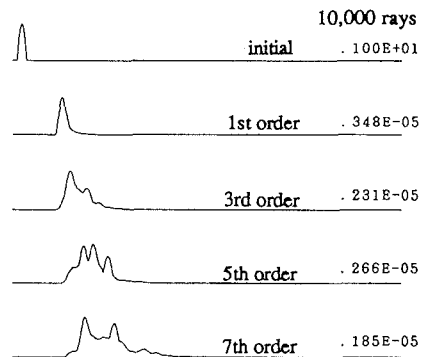


図-2 各散乱次数での計算波形

全散乱エネルギーと理論式の比較を図-3に示す。何れの散乱次数においても理論式と極めて良い一致が見られている。

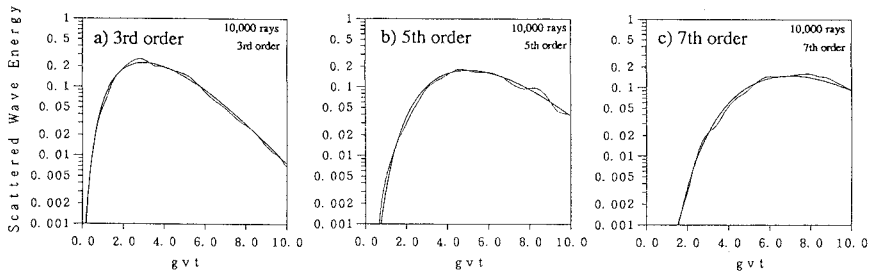


図-3 各散乱次数で計算した総エネルギーと理論式との比較

4. 散乱が地震波放射特性に及ぼす影響

観測波形に見られる地震波放射特性 (radiation pattern) は、必ずしも理論から導かれるように明瞭なものでは無く [例えば, Wald et al.(1988)など], その原因として一般には地盤構造の影響とともに散乱の影響が考えられている。そこで、本手法を用いて地震波放射特性に及ぼす散乱の影響について検討する。3次元空間内で、乱数で設定した方向に震源から放射される波線の初期振幅にその方向に対する地震波放射特性を乗じて散乱波動場を計算し、震源を含む水平面内等震源距離での周波数応答を求める。

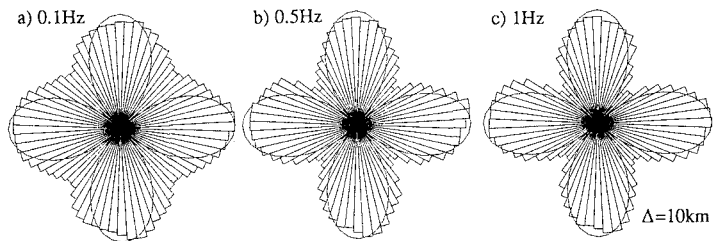


図-4 平均自由行程を固定した場合の各周波数での地震波放射特性

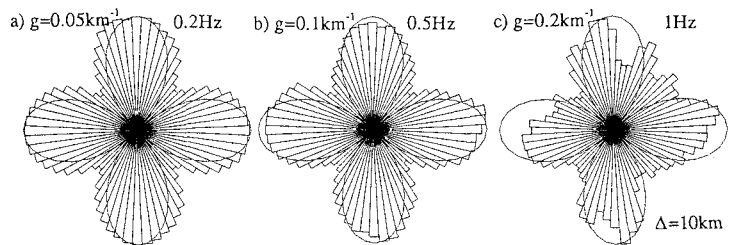


図-5 周波数に依存する平均自由行程を仮定した場合の各周波数での地震波放射特性

水平横ずれによるSH波の放射特性を仮定した場合の、各周波数における計算振幅と理論振幅の比較例を図-4に示す。図中の細線は理論的な放射特性を、rose diagramが各放射方向に対して計算された振幅を表している。平均自由行程 (10km) と同じ震源距離における計算例では、高周波数になるほど地震波放射特性が理論値に近くなっている。放射特性を鈍くする高次散乱波が高周波になるほど減衰するため、見かけ上そのような傾向が見られたものと思われる。そこで、平均自由行程が高周波になるほど短くなるとの仮定を置いた計算を実施し、その結果を図-5に示す。この仮定によると、同一震源距離において特に平均自由行程の短い高周波数で地震波放射特性が散乱の影響により等方的になる傾向が見られる。

5. おわりに

震源から放射されたエネルギーの周波数領域での多重散乱シミュレーション手法を開発し、既存の理論式との比較をおこなったうえで、震源放射特性について検討を実施した。その結果、周波数に依存しない平均自由行程を仮定すると同一震源距離で散乱が地震波放射特性に及ぼす影響は低周波数ほど顕著であることが示され、平均自由行程が高周波になるほど短いとの仮定をすると同一震源距離で散乱が地震波放射特性に及ぼす影響は高周波数ほど大きくなる可能性が示された。今後、種々のケースを尽くした検討を実施したい。

参考文献

- Benites, Aki and Yomogida, *PAGEOPH*, 138, 353-390, 1992. Frankel and Wennerberg, *B.S.S.A.*, 77, 1223-1251, 1987. Hoshiba, *P.E.P.I.*, 67, 123-136, 1991. Sato, *J.P.E.*, 25, 27-41, 1977. Wald, Burdick and Somerville, *Proc. E.E.S.D. II Conf.*, ASCE, 430-444, 1988.