

統計的波線経路法に基づく 2次元ランダム弾性媒質におけるエンベロープの導出

Stochastic ray-path method for the synthesis of vector-wave envelopes in 2-D random elastic media

佐藤 春夫[1]

Haruo Sato[1]

[1] 東北大・理・地球物理

[1] Geophysics, Science, Tohoku University

www.zisin.geophys.tohoku.ac.jp/~sato

微小地震によって励起された短周期の地震波がリソスフェアの中を伝わる場合、ランダム不均質構造による散乱の効果によってその波形は崩れ、主要動の継続時間は増大する。このような場合、位相を無視してエンベロープを対象とするほうが、波形そのものに着目するよりも波動伝播の特徴をとらえやすい。マルコフ近似法は、波長が不均質構造の特征的尺度よりも短い場合に主要動附近のエンベロープを直接導出することができる優れた方法として知られているが、従来この方法はスカラー波のみにしか用いることができなかった。最近、我々は、角度スペクトルを用いたエネルギーの成分分配を用いて 2次元のランダム弾性媒質における波形エンベロープの導出に成功した[Korn and Sato, 2004]。今回、マルコフ近似法を波線屈折に関するモンテカルロ法として再構築し、ベクトル弾性波のエンベロープの数値計算を容易にすることができたので、これを報告する。

波長がゆらぎの尺度よりも十分小さく弾性係数の空間微分項を無視できる場合には、P波とS波のポテンシャル場はそれぞれ独立に放物型波動方程式に従う。後方散乱を無視し、統計的なアンサンブル平均操作を用いることによって、ポテンシャル場の2周波数相互相関関数は波の進行方向について1階の放物型微分方程式に従うことが示される(マルコフ近似法)。2周波数相互相関関数の角周波数の差に関するフーリエ変換は波の強度の時間変化(MSエンベロープ)を与える。波の進行方向に直行する座標に関する2周波数相互相関関数のフーリエ変換は、角度スペクトルを与える。P波の場合、この角度スペクトルに波線ベクトルの方向余弦の2乗をかけてフーリエ変換を行うことにより大局的な波の進行方向成分のエンベロープが、方向正弦の2乗をかけることにより直交成分のエンベロープが得られるはずである。我々は、ガウス型の自己相関関数で表される半無限ランダム弾性媒質にパルス波が入射する場合を考察し、この方法によって導いた理論エンベロープが差分計算によってシミュレーションされた波形のエンベロープを定量的に良く説明できることを示した[Korn and Sato, 2004]。

Williamson (1972)は、スカラー波の場合ではあるが、マルコフ近似法を波線理論によって再構築できることを示した(統計的波線経路法)。ランダム不均質媒質を多数の水平層に分割して波線を追跡すると、各層を通過するごとに波線は速度不均質によって屈折を受け、進行方向を変えることができる。マルコフ近似法を再解釈すると、波線は一つの層を通過するごとにランダム不均質のスペクトルから与えられる確率分布に従う統計的変動を受けると考えられる。速度ゆらぎがガウス型のスペクトルを持つ場合、この確率分布はやはりガウス型で与えられる。ベクトル波へ拡張するため、ここで新たに波線の方向余弦を用いたエネルギーの2成分分解を導入する。この確率過程をモンテカルロ法で数値シミュレーションすることによって、任意の伝播距離における2成分エンベロープを求めることが可能になる。実際、ガウス型の自己相関関数で表される半無限ランダム弾性媒質にパルス波が入射した場合について、このモンテカルロ法によって計算した2成分エンベロープがマルコフ近似法による理論エンベロープ解と一致することを定量的に確かめることができた。

この統計的波線経路法は、層分割を水平層から円筒殻に変更すれば点震源からの波動の輻射に対しても適用が可能である。さらに、モンテカルロ法は、任意の輻射パターンについても計算が可能という利点がある。2次元ではあるがダブルカップル型のS波震源輻射の場合について2成分エンベロープをシミュレーションしてみると、すべての方位で、最大振幅が初動より遅れて到着し、エンベロープの時間幅は伝播距離が長くなるに従って拡大していくことが示される。S波輻射の節面方位においても散乱波の励起が見られる。異なる方位角におけるエンベロープを比較すると、最大振幅の大きさは輻射パターンをよく反映するが、時間の経過と共に振幅の方位角依存性は消滅していくことが示される。これらは、観測される短周期地震波形の特徴を、定性的ではあるが良く説明しているといえよう。