

空間非一様なランダム媒質における球面波のエンベロープ拡大とピーク遅延時間の伝播距離依存性

Envelope broadening and travel distance dependence of peak delay time of spherical-waves in non-uniform random media

高橋 努 [1]; 佐藤 春夫 [1]; 西村 太志 [1]

Tsutomu Takahashi[1]; Haruo Sato[1]; Takeshi Nishimura[1]

[1] 東北大・理・地球物理

[1] Geophysics, Science, Tohoku University

高周波数帯域で観測される微小地震の波形記録は、媒質のランダムな不均質構造によって生じる散乱や回折の影響により、伝播距離の大きい観測点では波形が崩れ主要動継続時間が震源継続時間より有意に長くなる。このような波形の解釈には位相情報を無視しエンベロープに着目したアプローチが有効であり、これまでマルコフ近似に基づく確率統計的手法が用いられてきた。マルコフ近似法は、ランダムな速度ゆらぎの統計的パラメータを与えれば一意的にエンベロープを予測することができる。しかし、従来のモデルはすべて速度ゆらぎが空間一様に分布するという仮定のもとで構築されてきた。空間非一様にランダムな速度ゆらぎが存在する媒質におけるエンベロープを予測する方法として、波線理論に基づく統計的波線経路法と呼ばれる方法が存在する [Williamson (1972)]。この手法は、ランダム不均質媒質を波線経路に沿って多層に分割し、各層内での波線がその方向を変える過程を確率統計的に取り扱うものであり、波線の走時を組み合わせることとマルコフ近似法が等価となることが知られている。本研究では、パワースペクトル密度が短波長域でべき乗型スペクトルを持つ von Karman 型で記述されるランダム媒質を考え、その中で点震源から輻射された球面波のエンベロープが伝播距離の増加と共にどのように変化するかを考察する。

媒質のランダムな速度ゆらぎの相関距離が地震波の波長よりも十分に長く、平均速度からのゆらぎが十分に小さい場合、地震波の変換散乱は無視することができ、前方散乱が卓越する。放物型波動方程式のアンサンブル平均を取ることによって、波動場の相互相関関数に対する一階の微分方程式が得られる。空間を震源を中心とする多数の薄い球殻に分割した場合、微分方程式は速度ゆらぎに起因する各薄層内での波線方向の変化を確率過程として記述する。このとき、波線の散乱角の確率密度分布は速度ゆらぎのパワースペクトル密度を用いて表現できる。以上から、震源から多数の粒子を射出し、各薄層での波線の散乱角を確率過程とするモンテカルロシミュレーションを実行すると、震源距離に対応する球面上に到達した粒子の走時分布から波の速度成分の二乗振幅エンベロープを得ることができる。波線経路に沿ってランダム媒質のスペクトルが空間的に一様に分布する場合、得られたエンベロープは2周波数相互相関関数を解いて得られた理論解と非常に良い一致を示す。波線経路に沿ってランダム媒質のスペクトルが空間的に変化する場合、速度ゆらぎの短波長成分が富む媒質へ入射するとエンベロープ拡大が顕著になる。また初動到達から最大振幅到達までの時間遅れ（以下、ピーク遅延時間）は、距離依存性の傾きが速度ゆらぎの RMS 値などにも依存して変化する。

我々は、ピーク遅延時間の伝播距離に対する変化をパワースペクトル密度の統計的パラメータを用いて容易に説明できる方法を考案した。波線経路に沿って、ランダムな速度ゆらぎを、一様なランダム性を持つ多数の区間に分割する。区間境界において、次の区間と同じ特徴を持つ一様なランダム媒質中で同一のピーク遅延時間を与える等価距離を定義する。この置換を震源から観測点まで繰り返す。この手法により、速度ゆらぎの相関距離やゆらぎの大きさの RMS 値、短波長域のパワースペクトル密度の勾配を決めるパラメータが任意に変化した場合のピーク遅延時間を計算することが可能となる。この方法の妥当性は、上記のモンテカルロシミュレーションを用いて確かめられた。ピーク遅延時間は内部減衰の影響を受けにくい量であることから、この解析的表現は、波線経路ごとに異なるピーク遅延の観測値からランダムな速度ゆらぎのスペクトルパラメータの空間分布を求めるインバージョンを可能にするものである。