

マルコフ近似法と輻射伝達理論によるランダム媒質中の波形エンベロープのモデリング

Simulating the whole envelope of scalar-waves in 2-D random media having power-law spectra of velocity perturbation

齊藤 竜彦[1], 佐藤 春夫[1], Mike Fehler[2], 大竹 政和[1]

Tatsuhiko Saito[1], Haruo Sato[2], Mike Fehler[3], Masakazu Ohtake[4]

[1] 東北大・理・地球物理, [2] Los Alamos National Laboratory

[1] Geophysics, Science, Tohoku University, [2] Geophysics, Science, Tohoku University, [3] Los Alamos National Laboratory,

[4] Dept. of Geophysics, Tohoku Univ

<http://zisin.geophys.tohoku.ac.jp/~saito/index-j.html>

マルコフ近似法と輻射伝達理論は波形エンベロープを合成する優れた手法として知られている。マルコフ近似法は、前方散乱近似に基づき主要動近傍の波形エンベロープを精度よくかつ高速度で合成することができる。一方、輻射伝達理論は波動エネルギーの多重散乱過程を記述し、特にコーダ部分の波形エンベロープの解析に用いられてきた。しかしながら、マルコフ近似法は前方散乱近似であって広角度の散乱を無視しており、また輻射伝達理論とランダム媒質中の波動伝播との関連は必ずしも明らかにはなっていない。本研究では2次元ランダム媒質中のスカラー波伝播について、有限差分法により数値計算した波動場から合成したエンベロープを基準とし、マルコフ近似法および輻射伝達理論に基づく多重等方散乱モデルにより合成したエンベロープとの比較を行う。これによりマルコフ近似法と多重等方散乱モデルの特徴および適用限界を調べる。さらに、マルコフ近似法と多重等方散乱モデルを相補的に用いることにより、初動からコーダ波にいたる全波形エンベロープを高精度で合成する手法を提案する。

波の伝播速度がランダムにゆらいでいる媒質中を、中心周波数 2Hz のリッカー波が伝播する場合を考える。ここでは平均速度 4km/s, RMS 速度ゆらぎ 5%, 特徴的な空間スケール 5km の2次元 von Karman 型ランダム媒質を用いる。このとき速度ゆらぎのパワースペクトルは短波長域でべき乗型となり、パラメタ k によりそのべきが規定され、 k が小さいほど不均質構造の短波長成分が多くなる。例えば、地下数 km 以浅の検層記録では k が 0.1 程度となり、地震波エンベロープから推定される地下のスペクトル構造の場合には 0.5 近くとなる場合が多い。本研究では $k = 1.0, 0.5, 0.1$ の各々の媒質に対して 50 個のランダム媒質のアンサンブルを作成し、それぞれの媒質での波動伝播を有限差分法により数値計算する。これにより得られる 50 波形の 2 乗振幅トレースのアンサンブル平均を基準の MS (2 乗振幅) エンベロープとする。

前方散乱近似を用いた場合には、波動方程式を放物近似して統計的処理 (マルコフ近似) を行うことで、MS エンベロープを理論的に予測することができる。短波長成分が少ない媒質 ($k = 1.0$) のとき、マルコフ近似法によるエンベロープは差分法によるものとよく一致した結果が得られる。これは構造の長波長成分による波の多重前方散乱に対してマルコフ近似法が有効であることを示す。しかし、短波長成分が多いランダム媒質の場合 ($k = 0.1$) には、マルコフ近似法によるコーダ波エンベロープは励起量が少ない。これは媒質の短波長成分による広角度散乱をマルコフ近似法では取り込んでいないことに起因する。

短波長成分が多い $k = 0.1$ のランダム媒質中におけるコーダエンベロープを再現するために、輻射伝達理論を用いる。本研究の波動伝播シミュレーションから合成したエンベロープのコーダ波エンベロープは、パラメタ k によらず時間の逆数で減少していく特徴をもつ。このコーダ波エンベロープは輻射伝達理論にもとづく多重等方散乱モデルによって良好に再現することができる。 $k = 0.1$ の場合には、そのコーダ波の励起量を説明する有効的な等方散乱係数は Born 近似を用いて評価した momentum transfer 散乱係数 [Morse and Feshbach, 1953] となる。

エンベロープ主要動部は多重前方散乱による散乱波から構成され、コーダ波部分は広角度散乱によって励起されたと考えることができるので、エンベロープ主要動部をマルコフ近似法により、広角度散乱により励起されるコーダ波を輻射伝達理論により合成する全エンベロープ合成方法を提案する。ただし、全空間エネルギーが経過時間によらず保存されるように主要動の散乱減衰は調整する。マルコフ近似法や多重等方散乱モデルをそれぞれ単独で用いた場合には再現することが困難であった $k = 0.1$ の場合のエンベロープが、この手法により直達波からコーダ波まで忠実に再現できる。しかしながら、前方散乱が非常に強い $k = 0.5$ の場合には momentum transfer 散乱係数は有効散乱係数に比べ有意に大きくコーダ波励起を過大評価してしまう。この場合にはコーダ波励起量から推定した散乱係数を momentum transfer 散乱係数のかわりに用いることで、全エンベロープ形状を定量的に説明することができる。