

2次元ランダム媒質における円筒波のエンベロープ拡大：マルコフ近似に基づく理論的導出と数値計算結果との比較

Envelope broadening of cylindrical waves in 2-D random media: the Markov approximation and a comparison with numerical simulation

佐藤 春夫 [1], Mike Fehler [2]

Haruo Sato [1], Mike Fehler [2]

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

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

<http://www.zisin.geophys.tohoku.ac.jp/~sato/>

波動方程式を放物近似した上で統計的に扱いエンベロープを直接的に導出するMarkov近似法に基づき、点震源から輻射された外向円筒波のエンベロープ形状を考察する。特にランダム媒質がガウス型の自己相関関数で表される場合のエンベロープは、初動の着信から少し遅れて最大振幅が現れ、立ち上がり比べてやや緩やかに振幅が減少していく形状を示す。5%のゆらぎと5 kmの相関距離の場合、震源から200kmにおけるエンベロープの時間変化を、差分法による波形計算の結果と比較した。着信から最大値、そして振幅が半分程度に落ちるあたりまで、差分法によるエンベロープと比較的良く一致することがわかった。

高周波数 (> 1 Hz) の地震波の伝播には、地下の不均質構造による散乱の影響が大きく現れる。震源距離が100 km よりも大きくなると、微小地震の直達波の波形は大きく崩れ、断層運動から予想されるような単純な波形とは全く異なる様相を示すことが知られている。このような波形エンベロープの崩れ方は、強い前方散乱、多重経路、あるいは回折の影響の効果として研究されてきた。なかでも、波動方程式を放物近似した上で統計的に扱いエンベロープを直接的に導出するMarkov近似法は、優れた方法として知られている。筆者らは、観測されたS波のエンベロープ形状をこの理論に基づいて解析し、テクトニクスとの関連においてその特徴を議論してきた。しかし、これまで用いてきたエンベロープ導出の理論は平面波が半無限不均質構造に入射するといった簡単なモデルであって、点震源からの輻射の場合に必要な幾何減衰を十分に考慮することが出来ていなかった。さらに詳しく地震波のエンベロープ形成を議論するには、点震源からの輻射についての理論的考察が必要とされる。本稿では、2次元不均質媒質中の波形エンベロープをMarkov 近似に基づいて理論的に導出すると共に、その理論の妥当性を波動場の数値計算の結果と比較して検討する。

2次元不均質媒質において、原点に置かれた点震源から輻射された外向円筒波を考察する。速度構造のゆらぎが十分に小さく、伝播距離は波長や相関距離よりも十分長い ($r \gg 1/k$, $r \gg a$) ものとする。波長が相関距離よりも十分短い場合 ($ka \gg 1$)、外向調和波の振幅は放物型波動方程式に従い、伝播距離 r に関して緩やかに変化する。波線に直交する面上で2周波数相互相関関数 (TMCF) を定義する。ランダム媒質が統計的に一様な場合、ほぼ単色の波の時には、Markov 近似を用いてTMCF に対する微分方程式を導くことができる。

特にランダム媒質がガウス型の自己相関関数で表される場合には、この微分方程式を解析的に解くことができる。波動の強度、則ちバンドパスフィルタを通した波形の自乗振幅 (MS) エンベロープは、TMCFのフーリエ変換の形で書かれる。この解のMSエンベロープは、初動の着信から少し遅れて最大振幅が現れ、立ち上がりよりはやや緩やかに振幅が減少する形状を示す。ガウス型の自己相関関数の場合、特徴的な時間スケールは周波数に依存しない。

5%のゆらぎと5kmの相関距離の場合、震源から200kmにおけるMSエンベロープの時間変化を、3種類の方法によって計算した。Markov近似法によるもの、差分法によるもののアンサンブル平均 (67のシミュレーション)、そしてLocal Rytov法と呼ばれるものである。Markov近似法によって直接的に導かれたエンベロープは、着信から最大ピーク、そして振幅が半分程度に落ちるあたりまで、差分法によるエンベロープと比較的良く一致した結果を示している。Local Rytov法によるエンベロープも、比較的精度良く差分法の結果に一致している。しかしそれ以降の時間では、差分法によるエンベロープの方が他の2つの方法によるエンベロープよりも大きい振幅を示す。これは、差分法のみが広角度の散乱を忠実に取り扱っていることによる。

今後、前方散乱のみを扱うMarkov近似の利点を取り入れながら、さらに広角度の散乱の効果を取り入れていく方法を開発することが望まれている。これは、Markov近似によるエンベロープ形成の理論と輻射伝達理論の融合の上でのみ、可能であろう。