

論文内容要旨

(NO. 1)

氏名	江本 賢太郎	提出年	平成 23 年
学位論文の 題名	ランダム不均質層構造における短周期地震波主要動の エンベロープ合成法 —ScS 波を用いたマントルの不均質構造推定への適用—		

論文目次

謝辞	i
概要	iii
第1章 序論	1
1.1 短周期地震波の特徴	1
1.2 短周期地震波に対する従来のエンベロープ合成の理論的研究	2
1.3 マルコフ近似を用いた従来の研究	4
1.4 地球内部における速度不均質構造	6
1.4.1 地殻・リソスフェアにおける速度不均質	6
1.4.2 マントルにおける速度不均質	7
1.4.3 非等方ランダム媒質	9
1.5 本研究の目的	9
第2章 速度不連続が存在するランダム媒質におけるエンベロープ合成	19
2.1 マルコフ近似の基礎理論	19
2.1.1 一様ランダム媒質におけるエンベロープ合成	19
2.1.2 角度スペクトル	25
2.2 速度不連続が存在する場合のエンベロープ合成	26
2.2.1 平面波パルス入射の場合	26
2.2.2 円筒波パルス入射の場合	30
2.2.3 差分法との比較	33
2.2.4 3次元の場合	35
2.3 マルコフ近似の適用範囲	38
2.4 議論	41
2.4.1 伝播距離依存性	41
2.4.2 数値計算の精度	42
2.5 まとめ	43
第3章 地球内部におけるランダム不均質構造の推定	72

(NO. 2)

3.1	データ	72
3.1.1	S 波・ScS 波の特徴	73
3.1.2	エンベロープ幅の空間分布	73
3.1.3	走時ゆらぎ	74
3.1.4	多観測点を用いた平均エンベロープ	74
3.2	日本列島下におけるランダム不均質構造の推定	75
3.2.1	(I) 1 層モデル	76
3.2.2	(II) 2 層モデル(震源上下)	77
3.2.3	(III) 2 層モデル(深さ100km)	78
3.2.4	(IV) 3 層モデル(深さ100 km, 660km)	78
3.3	議論	79
3.3.1	読み取り誤差の影響	79
3.3.2	スタックの手法	79
3.3.3	減衰による分散	80
3.3.4	震源時間関数の影響	81
3.3.5	ピーク遅延時間を用いた解析	81
3.3.6	速度不連続がない従来のモデル	82
3.3.7	適用範囲	83
3.4	まとめ	83
第4章 議論		118
4.1	マルコフ近似によるベクトル波エンベロープの改良	118
4.1.1	3次元平面P波入射の場合	118
4.1.2	2次元平面P波入射の場合	119
4.1.3	角度スペクトルの解釈	120
4.2	従来の研究との比較	120
4.3	今後の課題	122
4.3.1	マルコフ近似理論の発展	122
4.3.2	ランダム不均質構造の推定	123
第5章 結論		131
参考文献		133

概要

1s より短い周期の地震波は、数 km 規模の速度不均質の影響を強く受けるため、非常に複雑な形状を示す。このような複雑な地震波を解析するためには、ランダムな速度不均質構造を考え、波動場を統計的に解釈し、地震波散乱理論に基づく統計的手法を用いるのが有効である。特に、卓越波長が媒質の相関距離より短い場合には、前方散乱が卓越するため、波動伝播は放物型方程式によって近似することが可能である。放物型方程式は媒質を薄い層にわけて位相の発展を記述することで解くことができる。この手法を波動場の二次モーメントのアンサンブル平均に拡張し、その導出過程において後方散乱を無視したものが

マルコフ近似理論と呼ばれる。マルコフ近似理論は、地震波形のエンベロープの立ち上がりからピーク付近までの形状を精度よく導出できる強力な手法であり、屈折率のゆらぐ媒質を伝播する光や音波に用いられてきた。近年、地震学の解析にマルコフ近似が用いられるように

(NO. 3)

なり、ベクトル波への拡張が行われた。さらに、相関距離やゆらぎの強さといった統計的不均質パラメータが不連続に変化する媒質におけるエンベロープ導出へと拡張されてきた。これにより、不均質パラメータの空間分布が微小地震の波形エンベロープの形状からインバージョンによって推定されるようになった。しかし、地球内部にはモホ面のような速度不連続境界が多数存在するものの、速度ゆらぎの平均速度に不連続が存在するランダム媒質は考慮されてこなかった。そこで、本研究では、平均速度構造に不連続を取り入れたランダム成層構造の自由表面でのマルコフ近似理論を用いたエンベロープ導出の理論構築に取り組んだ。本研究ではさらに、この手法を震源直上で観測されたS波とScS波に適用することにより、これまで解析例があまり多くない下部マントルにおけるランダム不均質構造の推定を試みた。

第1章では、短周期地震波の特徴と、そのような地震波を取り扱うためにこれまで提案されている理論モデルをまとめた。特にマルコフ近似理論のモデルの発展を詳しく記述した。また、地殻やリソスフェア、下部マントルにおける不均質構造の推定例をまとめ、従来の研究において解決しなければならない問題点を簡潔に記し、本研究の目的と構成を示した。

第2章では、マルコフ近似理論に基づくエンベロープ導出法の高度化を行った。まず、一様ランダム媒質における従来のマルコフ近似理論の数理的導出過程を詳細に記した。平均二乗(MS)エンベロープを導出するために、その周波数領域での表現であり、地震波の大局的な進行方向に直交する面内の異なる2点と異なる周波数における相関である二周波数相互相関関数の伝播に関する支配方程式を解く。速度不連続境界を導入するために、エンベロープを構成する散乱波強度の角度分布を表す角度スペクトルに着目した。角度スペクトルは二周波数相互相関関数の進行方向に直交する面内における波数領域の表現である。地震波が下から鉛直にランダム媒質を伝播する状況を考え、速度境界直下における角度スペクトルに平均速度を用いた平面波の透過係数を掛けることにより、速度境界直上における角度スペクトルを計算した。これを二周波数相互相関関数の表現に書き換えたものを初期条件として上層での支配方程式を解くことにより、ランダム不均質層構造における透過波エンベロープの導出が可能となった。同様に、自由表面において角度スペクトルに各成分の増幅係数を掛けることによって、自由表面の増幅の効果を取り入れたエンベロープの導出法を構築した。各層内の伝播過程はPS変換散乱を無視したマルコフ近似理論に基づいているが、速度不連続境界においては、変換係数を角度スペクトルに掛けることにより速度不連続によるPS変換波のエンベロープの導出にも成功した。また、角度スペクトルに反射係数を掛け、同じ層を逆方向に伝播させることにより、反射波のエンベロープも導出が可能となった。2次元2層ガウス型ランダム媒質に、平面P波が鉛直に入射する場合、弾性波の運動方程式の差分シミュレーションと比較することにより、上記の手法で透過波、変換波、反射波エンベロープが精度よく合成できていることが確かめられた。自由表面においては、透過P波に着目すると、鉛直成分の増幅率はほぼ経過時間によらず4倍となるが、水平成分の増幅率は時間依存し、ピーク値では4倍以上に増幅され、増幅率は経過時間とともに減少していく様子が明らかになった。これは、地表におけるベクトル波の解析には自由表面の影響を考慮する必要があることを強く示唆している。円筒波入射の場合には、速度境界における波面の曲率半径を修正することにより平面波の場合と同様に速度不連続境界を取り扱うことが可能であることを、差分法との比較により示した。新たに構築した手法は2次元と3次元媒質どちらの場合にも適用可能である。ただし、3次元S波

入射の場合には、角度スペクトルを SH 波と SV 波を分け、それぞれに対応する透過係数や反射係数を掛
(NO. 4)

けて速度境界での接続を行う必要がある。また、観測からその存在が示唆されている非等方なランダム不均質媒質において、マルコフ近似理論と差分法によるエンベロープを様々な相関距離の組み合わせにおいて比較した。これにより、マルコフ近似理論が成り立つための波長と相関距離の関係やゆらぎの強さの制限を求めた。 x 方向、 z 方向の相関距離が a_x , a_z , ゆらぎの RMS 値が ε で表される 2 次元ガウス型非等方ランダム媒質に、卓越波数が k_c のデルタ関数型強度を持つ平面 P 波パルスが z 方向に入射する場合を考えると、 $a_z k_c \geq 4.0$ かつ $a_x k_c \geq 8.1$ で、さらに $\varepsilon^2 a_z z / (a_x^2) \leq 0.05$ の場合に、11% の誤差でマルコフ近似が成り立つことを示した。

第 3 章では、新たに提案したマルコフ近似に基づくエンベロープ導出法を用いて、地球内部のランダム不均質構造の推定を試みた。地表から核・マントル境界までのランダム不均質を求めるために、中部地方下で発生したマグニチュード 5.2 の深発地震について、震央距離が 150 km 以内にある防災科学技術研究所の高感度地震観測網 Hi-net によって観測された S 波と ScS 波の特徴をまとめた。S 波と ScS 波の走時の読み取りが可能であり、S/N 比が 1.5 以上の観測データを用いることとし、中心周波数 1 Hz の水平動 2 成分和の二乗振幅を観測点で平均化して MS エンベロープを導出した。その結果、MS エンベロープが立ち上がりからピークの半分の値に減衰するまでの時間は、S 波と ScS 波それぞれ 2.29 s と 2.84 s と求めた。深さ 100 km に不均質パラメータの不連続境界、深さ 660 km に速度の不連続境界を持つ指数関数型ランダム媒質を仮定し、第 2 章で構築したマルコフ近似による理論エンベロープと比較した。震源の破壊時間を 2 s とし、観測された MS エンベロープを最もよく説明するようにグリッドサーチによって不均質パラメータを推定した結果、100 km の上下においてそれぞれ、ゆらぎの RMS 値 ε と相関距離 a の比から構成される不均質パラメータは、 $\varepsilon^{2.41} / a = 6 \times 10^{-5}$, $7 \times 10^{-9} \text{ km}^{-1}$ と見積もられた。

第 4 章では、マルコフ近似理論に基づくベクトル波エンベロープの改良点と、推定したランダム不均質の従来の報告例との比較を議論するとともに、マルコフ近似理論の今後の課題や研究の方向性について議論した。ベクトル波エンベロープの改良点として、P 波入射の場合の z 成分のエンベロープを導出する過程において、従来無視していた二周波数相互相関関数のトランスバース座標による 4 階微分の項を取り入れた。このことにより、初動到達からの経過時間が大きくなると MS エンベロープが負になる現象を避けることができることを示した。また、第 3 章で推定したリソスフェアとマントルにおける不均質パラメータを従来の遠地 P 波のエンベロープ幅の拡大現象を解析する研究によって推定された値と比較した。本研究によるマントルにおける不均質パラメータの推定値が従来の研究による推定値より小さいことは、P 波と S 波の速度ゆらぎの強さが異なる可能性と、マントルに水平方向に長い非等方性が存在する可能性を示している。

本研究では、背景速度に不連続が存在するランダム媒質において、マルコフ近似理論に基づいたエンベロープ合成の理論を構築することに初めて成功した。この手法を用いることによって、地球内部のランダム不均質構造の深さ分布を推定することが可能となった。その一例として、震源直上で観測される S 波と ScS 波の解析から、下部マントルにおけるランダム不均質を推定することができた。この手法は浅い地震に対しても適用することができ、地殻やリソスフェア内のランダム不均質の深さ分布を推定することが可能となる。統計的に推定されるランダム不均質構造は、トモグラフィーによる決定論的構造と相補的に、地球内部の不均質構造の豊かな描像を与えるものである。