

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：22701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03786

研究課題名(和文)地殻構造のランダム不均質性による地震波の振幅の揺らぎに関する研究

研究課題名(英文)Study on the fluctuation of seismic wave amplitude due to random heterogeneity of crustal structure

研究代表者

吉本 和生 (Yoshimoto, Kazuo)

横浜市立大学・理学部・教授

研究者番号：10281966

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：地殻構造の短波長ランダム不均質性に起因する地震波の振幅と走時の揺らぎ(ばらつき)の特徴を主に地震動シミュレーションに基づいて探究した。その結果、P波振幅とS波振幅のばらつきは、震源付近では距離とともに増大し、高周波数ほどその特性が顕著であることを確認した。本研究で使用したパラメータの範囲では、短波長ランダム不均質性の相関距離と揺らぎの大きさが大きいほど、振幅のばらつきが大きくなる特徴がみられた。また、走時揺らぎについても震源距離とともに大きくなる特徴がみられた。P波走時の揺らぎ(標準偏差)はマルコフ近似理論の予測と整合することが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

S波の振幅のばらつきの特徴の把握は、地震工学における地震動予測の高度化(予測誤差の評価)の観点からも重要視されている。本研究では、地殻構造が短波長ランダム不均質性を有する場合、地震波伝播の物理特性から、地震動予測に一定レベルの不確実性が発生することを示した。今後、地殻構造の短波長ランダム不均質性を正確に把握することで、物理モデルに基づく予測誤差を反映させた地震動予測が可能になるものと期待される。

研究成果の概要(英文)：We investigated the characteristics of the fluctuations of seismic-wave amplitudes and travel times due to short-wavelength random heterogeneity of crustal structure on the basis of numerical simulation of seismic wave propagation. We confirmed that the fluctuations of P-wave and S-wave amplitudes increase with distance near the hypocenter, and the characteristics are more noticeable at higher frequencies. Within the range of parameters used in this study, the larger the correlation distance and the magnitude of the fluctuations of the short-wavelength random heterogeneity, the larger the amplitude fluctuations are demonstrated. In addition, we found that the travel-time fluctuation also increases with the hypocentral distance. It was confirmed that the travel-time fluctuations (standard deviation) of P-waves are modeled by the predictions of Markov approximation theory.

研究分野：固体地球科学

キーワード：地震波 振幅の揺らぎ ばらつき 地殻構造 ランダム不均質性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 地震波の伝播特性については、振幅の距離減衰などの平均的な統計量に関する研究は数多くみられるものの、振幅のばらつきに相当する分散的な統計量に関する研究は少なかった。不均質媒質中を伝播する波動の振幅のばらつきに関する研究は、通信工学の分野の大気中を伝播する電磁波(レーザー光を含む)などについては大きく進展しているものの、地震学の分野においては人工的な信号源の利用が容易でないことなどから遅れていた。

(2) 高周波数(≥ 1 Hz)の地震波の振幅は、地殻構造のランダム不均質性による散乱作用で大きくばらつく(以下、「ばらつき」と呼ぶ)。このばらつきの発現については、同現象の特徴の把握やその発生要因である地殻構造の短波長ランダム不均質性の推定といった地球科学的な意義だけでなく、強震動予測における予測精度と密接に関係することから、近年になって周波数・距離依存性についての研究の重要性が認識されるようになった。

2. 研究の目的

(1) 波動伝播における物理現象として、地震波の振幅のばらつきとその要因としての地殻構造の短波長ランダム不均質性に関する理解を深める。具体的には、近地地震を対象として、P波およびS波の振幅のばらつきの周波数・距離依存性を定量的に把握する。また、ダブルカップル型点震源を対象として、P波とS波の振幅のばらつきの周波数・距離依存性の方位角による変化について明らかにする。加えて、P波を研究対象として、地殻構造の短波長不均質性と走時揺らぎおよび振幅揺らぎの関係を定量的に評価する。

(2) S波の振幅のばらつきの特性の把握は、地震工学における地震動予測の高度化(予測誤差の評価)の観点からも重要視されていることから、本研究では理学的にその要請に応えることを目標とする。特に、震源付近(< 20 km)におけるS波の振幅のばらつきの震源距離依存性を、地震動シミュレーションに基づいて明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 地震動シミュレーション

地震動シミュレーションは、 $204.8 \times 204.8 \times 204.8$ km³の計算領域を0.05 km毎に離散化し、タイムステップを2.5 msとして、3次元差分法に基づいて実施した。背景的な地震波速度構造($V_p = 6.0$ km/s, $V_s = 3.5$ km/s)に空間一様なランダム不均質性を重畳した構造モデルを作成し、その中央部に横ずれ断層を模擬したダブルカップル型点震源を配置した。観測点はその周囲の同じ深さに2 km間隔でグリッド状に分布させた。ランダム不均質性の表現には指数関数型モデルを採用し、Birch則を仮定した。相関距離は、1, 3, および5 km、揺らぎの大きさは、0.01, 0.02, 0.03, 0.04, および0.05に設定した。ランダム不均質モデルのシード数は5とした。

(2) 解析方法

振幅の測定では、計算速度波形をバンドパスフィルタ処理(周波数1-2, 2-4, および4-8 Hz)した後、P波とS波の3成分合成最大振幅を計測した。それぞれの測定には初動から1 sと5 sの時間窓を使用した。本研究の地震動シミュレーションの震源・観測点配置では、P波とS波の震源輻射係数は観測点の方位角に対して4象限型の対称性を示す。このことから、方位角 90° 毎に測定値を重合して解析した。また、 9 (方位角: 0-10, 10-20, ..., 80-90 $^\circ$) $\times 9$ (震源距離: 10-15, 15-20, ..., 50-55 km) $\times 3$ (周波数: 1-2, 2-4, および4-8 Hz)の243区分を設定し、測定値の方位角変化・震源距離変化・周波数変化を調べた。なお、本解析では、地震波の散乱による振幅のばらつきに着目するため、幾何減衰・散乱減衰の補正を行った。具体的には、各震源距離区分において、震源輻射係数0.8以上に対応する観測点の測定値の平均値を1にするような係数を求めて、その係数をすべての測定値にかけた後で、さらに観測点毎の震源輻射係数で除することにより測定値を規格化し、規格化された測定値の対数をP波振幅およびS波振幅とした。

走時の測定では、震源距離60 km以内の観測点の計算波形を対象として、P波の初動走時を自動処理により読み取った。

4. 研究成果

(1) P波振幅とS波振幅のばらつきは、震源距離とともに増大し、高周波数ほどその特性が顕著であることを確認した(図1)。測定された振幅は、震源輻射係数から期待される値(以下、「振幅の期待値」、図中の破線と同じ)をほぼ中心にしてばらつく。ばらつきの大きさの絶対値は振幅の期待値に概ね比例する。この特徴は、S波振幅とS波の震源輻射係数の比の自然対数の方位角変化を示した図(図のC)において、ばらつきの標準偏差が震源輻射係数0の方位でやや大き

くなるものの、方位角によらずほぼ一定であることから確認できる。ダブルカップル型の見掛け放射パターンは、2-4 Hz 程度以上の周波数帯になると、特にS波において、ランダム不均質性による散乱作用のため比較的小さい震源距離（15 km 程度）から不明瞭になる。ランダム不均質性とばらつきの大さきとの関係については、本研究で解析したパラメータの範囲内では、相関距離と揺らぎの大きさが大きいほど、ばらつきの大さきが大きくなる関係がみられた。

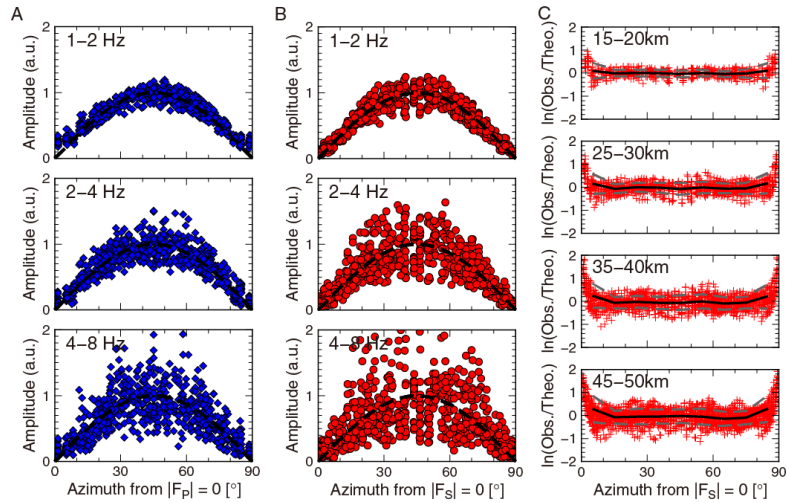


図1 A. P波振幅のばらつきの方角変化。震源距離 15-20 km で1秒間のタイムウィンドーを使用して測定。破線はP波の震源放射係数の方角変化。B. S波振幅のばらつきの方角変化。震源距離 15-20 km で5秒間のタイムウィンドーを使用して測定。破線はS波の震源放射係数の方角変化。C. 1-2 HzのS波振幅(Obs.)とS波の震源放射係数(Theo.)の比の自然対数の方角変化。震源距離 15-20, 25-30, 35-40, および 45-50 km での評価。実線と破線はそれぞれ方位角 10° 毎の平均値と標準偏差。

(2) 震源から一定の距離（不均質媒質の相関距離と揺らぎの大きさ、および地震波の周波数によって変化）までは、P波振幅とS波振幅のばらつきは距離とともに大きくなるのが確認された。ばらつきの大さきは、P波振幅に比べてS波振幅のほうが大きい。P波振幅とS波振幅のばらつきには、震源放射係数がゼロに近い方位角を除けば、明瞭な方位角依存性はみられなかった。本解析では、先行研究のスカラー波の物理モデルの予測と整合するように、P波振幅とS波振幅のばらつきの大さきの標準偏差は、ランダム不均質性の強さ（揺らぎの大きさ）に比例することが示された（図2）。また、本研究の地震動シミュレーションの条件では、P波振幅とS波振幅のばらつきの大さきの標準偏差が、地震波の周波数にも概ね比例することが確認された。

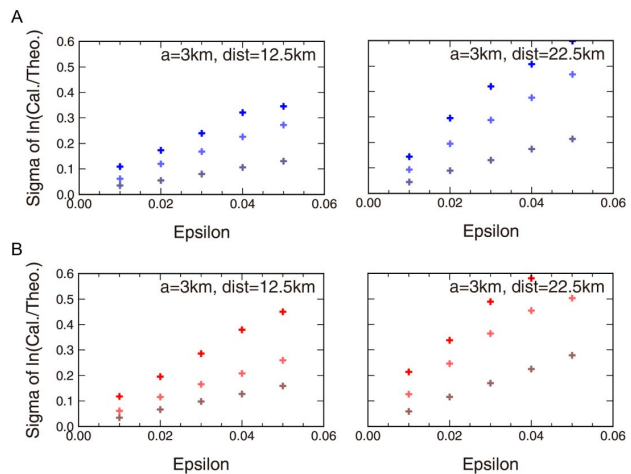


図2 振幅のばらつきのランダム不均質媒質の揺らぎの大きさによる変化。A. P波振幅のばらつき、B. S波振幅のばらつき。記号+の発色の淡濃の順に周波数 1-2, 2-4, 4-8 Hz。震源距離 10-15, 20-25 km。方位角 40-50°。ランダム不均質媒質の相関距離 3 km。

(3) 走時揺らぎは震源距離とともに大きくなる特徴が確認された。走時揺らぎの標準偏差は、震源距離 50 km の場合、西南日本の地殻のランダム不均質モデル（相関距離 1 km, 揺らぎの大きさ 0.03）では 0.04 s 程度であった。また、一定の震源距離における走時には、その平均値のまわりにほぼ対称的に分布する特徴がみられた。走時揺らぎの標準偏差を震源距離 r の $1/2$ 乗に対してプロットするとグラフ上で直線的に変化することが確認された。走時揺らぎとランダム媒質の関係には、走時揺らぎと a および ε との間には正の相関関係があることが確認された。すなわち、一定の震源距離における走時揺らぎは、相関距離や揺らぎの大きさが大きいランダム媒質ほど大きくなる。また、走時揺らぎの標準偏差については、 a の $1/2$ 乗および ε に比例して増大する特徴がみられた。以上の解析結果は、本研究の3次元地震波伝播シミュレーションから求めたP波走時の揺らぎ（標準偏差）がマルコフ近似理論の予測 $t_w \propto a^{1/2} \varepsilon r^{1/2}$ に整合することを示すものであった。この結果は、これまで波形エンベロープの研究において注目されてきた特徴的時間 t_w が、地震波走時を解析対象とする地震学の他の研究分野においても有用であることを示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takemura Shunsuke, Yoshimoto Kazuo, Shiomi Katsuhiko	4. 巻 73
2. 論文標題 Long-period ground motion simulation using centroid moment tensor inversion solutions based on the regional three-dimensional model in the Kanto region, Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 15: 1-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-020-01348-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 吉本和生、南浜功輔、武村俊介、汐見勝彦
2. 発表標題 長周期地震動シミュレーションのための3次元地震波速度構造モデルを用いた中規模地震のCMTカタログの構築 - 関東地方 -
3. 学会等名 日本地球惑星科学関連学会2021年合同大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takemura S., K. Yoshimoto, and K. Shiomi
2. 発表標題 Long-period ground motions simulation using local 3D CMT inversion solutions in the Kanto region, Japan
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 武村俊介、吉本和生、汐見勝彦
2. 発表標題 3次元CMT解を用いた関東地方における長周期地震動シミュレーションの試み
3. 学会等名 日本地震学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉本和生、武村俊介
2. 発表標題 指数関数型スペクトルを持つランダム媒質におけるP波走時の揺らぎ 3次元地震波伝播シミュレーションによる評価
3. 学会等名 日本地震学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuo Yoshimoto and Shunsuke Takemura
2. 発表標題 A numerical study on P-wave travel time fluctuation and amplitude fluctuation in the short-wavelength inhomogeneous crustal structure
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉本和生、武村俊介
2. 発表標題 高周波数帯の地震波振幅のばらつきと地殻構造の不均質性 - 3次元地震動シミュレーションによる数値実験 -
3. 学会等名 日本地球惑星科学関連学会2019年合同大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuo Yoshimoto and Shunsuke Takemura
2. 発表標題 Amplitude fluctuation of high-frequency seismic waves propagating in the heterogeneous crust
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society 16th Annual Meeting (AOGS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉本和生、武村俊介
2. 発表標題 地殻構造のランダム不均質の揺らぎの大きさと地震波振幅のばらつき 地震動シミュレーションによる評価
3. 学会等名 日本地震学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉本和生、武村俊介
2. 発表標題 非等方輻射震源の地震波振幅のばらつきの方位角変化 - 地震動シミュレーションによる評価 -
3. 学会等名 日本地震学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	武村 俊介 (Takemura Shunsuke) (10750200)	東京大学・地震研究所・助教 (12601)	
研究 分担者	中原 恒 (Nakahara Hisashi) (20302078)	東北大学・理学研究科・准教授 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------