

リソスフェア内の不均質構造と表層地形が地震波動場におよぼす影響 —高密度地震記録とシミュレーションの比較による検討—

武村俊介¹・古村孝志^{1,2}・前田拓人^{1,2}

¹東京大学地震研究所、²東京大学大学院情報学環総合防災情報研究センター

Characterization of seismic waves propagating through the heterogeneous subsurface structure with complex surface topography

Shunsuke Takemura¹, Takashi Furumura^{1,2} and Takuto Maeda^{1,2}

¹ERI, the Univ. Tokyo, ²CIDIR, the Univ. Tokyo

1. はじめに

1 Hz を超える高周波数地震動は、伝播経路中のスケールの小さな地震波速度のゆらぎ（以下、短波長不均質構造）や複雑な表層地形の影響を受け非常に複雑になることが知られている（例えば、Sato, 1984; Sato, 1989; Fu et al., 2002; Kumagai et al., 2011）。そのため、観測される地震波形は、地殻やマントル、プレートといった大きなスケールの速度不均質と短波長不均質構造に加え、表層地形による地震波散乱の影響が混在していると想定される。

本研究では、短波長不均質構造に加え、地形も考慮した地震波散乱の特性を数値シミュレーションにより定量的に明らかにする。また、大きなスケールの速度不均質構造、短波長不均質構造および表層地形を含むより現実的なモデルにおける地震動シミュレーションを行い、観測記録の再現性から現実の波動場でのそれぞれの不均質の寄与について議論する。

2. 表層地形と短波長不均質構造の散乱特性の違い

表層地形と短波長不均質構造の地震波散乱特性の違いを調べるために、差分法による地震動シミュレーションを実施した。地形モデルは中国地方と四国地方の一部を対象領域（図1参照）として、国土地理院の50 mメッシュの標高データよりモデル化を行った。短波長不均質構造は $V(\mathbf{x}) = V_0\{1 + \xi(\mathbf{x})\}$ と、平均速度 V_0 からの揺らぎと統計的な特徴とで表現されものとした。揺らぎ $\xi(\mathbf{x})$ は、指数関数型の ACF で特徴づけられるものとし、相関距離 $a = 5\text{km}$ 、揺らぎの強さ $\varepsilon = 0.05$ とした（Takemura et al., 2009）。速度構造については、上部地殻を参考に $\langle V_p \rangle = 5.8\text{ km/s}$ 、 $\langle V_s \rangle = 3.36\text{ km/s}$ とした。震源は領域の中心、深さ 5 km の地点に等方 P 波震源を仮定した。

図2に地震の発生から10秒後における、P波S波の伝播のスナップショットを示す。左側が地形のみを仮定したモデル（地形モデル）で、右側が短波長不均質構造のみを仮定したモデル（ランダム不均質モデル）である。どちらも、P波の波面の後ろに顕著な後続波があり、地震波散乱の影響が見られる。ただし、散乱波の生成の様子は大きく異なることが明らかとなった。地形モデルでは波面の乱れがほとんど見られないのに対して、ランダム不均質モデルでは速度揺らぎの影響で走時

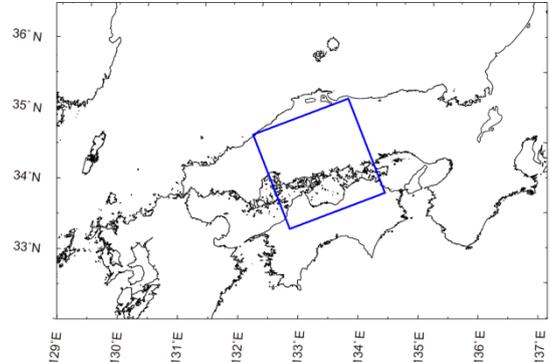


図1. シミュレーションで対象とした領域

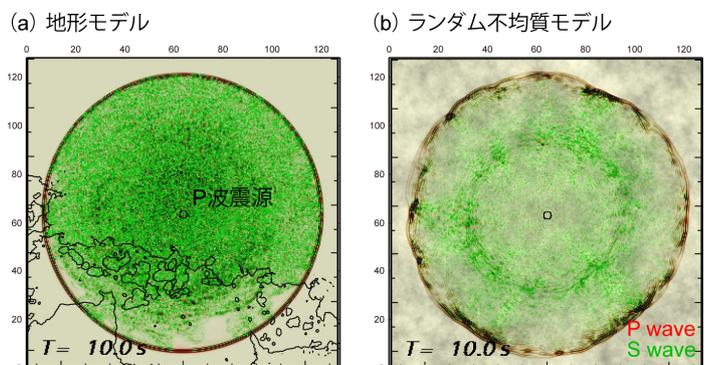


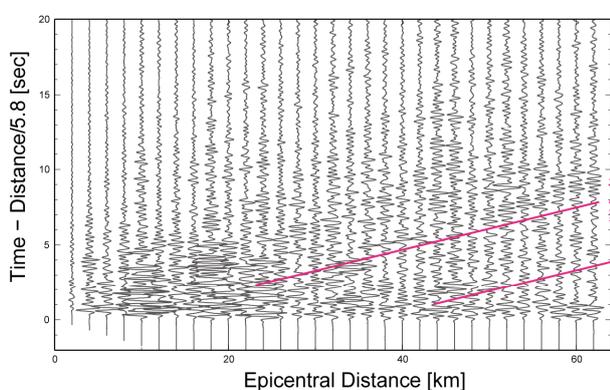
図2. 地形または短波長不均質構造を付与したモデルで計算された経過時間10秒の地表面のスナップショット。P波およびS波を、赤と緑で表現している。

がずれ、波面が大きく歪んでいる。また、地形モデルにおいて、瀬戸内海近傍で散乱波が顕著に小さい。これは、瀬戸内海付近の地形の変動が少ないために散乱波が励起されていないからであり、地形散乱の強さは観測点近傍の局所的な地形変動の強さに依存していることを示唆している。

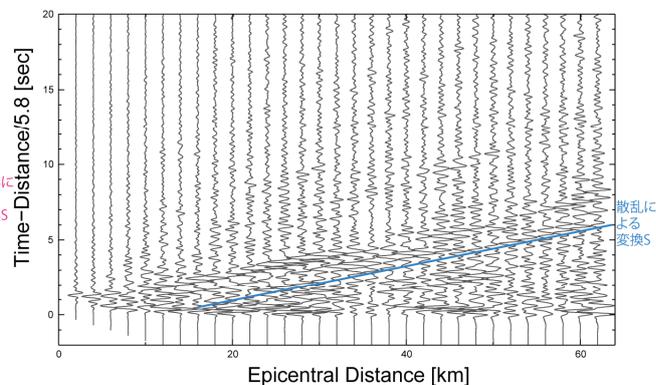
P波は伝播経路中の不均質構造により散乱および回折をし、transverse成分（以下、T成分）にも振幅を持ち、その振幅は不均質の強さの指標となることが知られている（例えば、Nishimura et al., 2002; Kubanza et al., 2006, 2007）。そこで、図2にそれぞれのモデルにおけるT成分の波形のペーストアップを示す。また、測線上の地形変動(b)に示す。地形モデル(a)では、初動付近で大きな振幅が現れ、標高変動の激しい個所（図3b▼）で強いコーダ波の励起やS波への変換（図中桃色線）が見られる。それに対して、ランダム不均質モデルでは、初動だけでなく後続にも強い散乱波が見られ、コーダ波の強さも一様に見える。また、震源近傍付近でPS変換散乱により励起されたと考えられる、S波の伝播も描かれているが、その他に特徴的な波相は見られない。

このように、表層地形も実体波および後続波に大きな寄与をもたらすが、その特徴は短波長不均質構造によるものと大きく異なり、観測点付近の局所的な地形変動の影響を強く受け、地震波散乱の強さもそれに依存することが明らかとなった。

(a) 地形モデル



(c) ランダム不均質モデル



(b) 地形モデルにおける測線上の標高変動

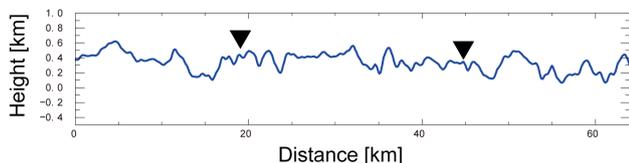


図3. 地形モデルとランダム不均質モデルにおける1-4 Hzのtransverse成分の計算波形のペーストアップと測線上の地形変動。振幅は震源距離をかけ、規格化。

3. より現実的な構造モデルを用いた地震動シミュレーション

これらの検討から、高周波数の地震波の正しいモデル化には短波長不均質構造だけでなく、地形の影響を正しく考慮する必要があることがわかった。ここではさらに、地震動の広帯域観測の記録をよりよく説明することをめざし、表層地形や短波長不均質構造に加えて地殻およびマントルやプレートといった現実的な地下構造モデルを考慮した地震動シミュレーションを行った。

対象領域は中国地方と四国地方の一部（図4の矩形領域）である。2007年5月13日に島根県と広島県の県境付近で発生したMw 4.2の地震を対象としてシミュレーションを行った。比較のため、単純なものからより現実的なものまで3種類のモデルを作成し、比較検討をおこなった。まず、上部地殻、下部地殻、マントルおよびフィリピン海プレートなどを

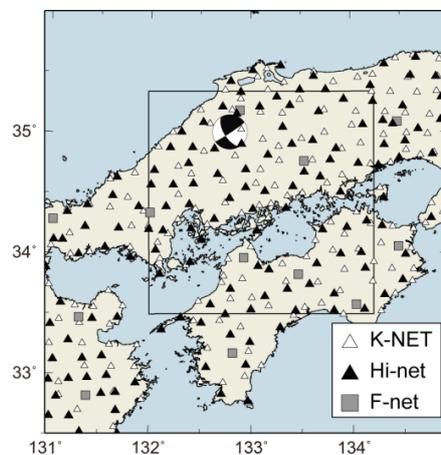


図4. 計算領域(図中の□で囲まれた領域)および観測点配置

仮定したものを (A) 層構造モデルとする。ただし、フラットな自由表面を仮定している。層構造モデルに地形を付与したものを (B) 地形付与モデルとした。地形を付与したモデルに、地殻内は $a = 5\text{ km}$ 、 $\varepsilon = 0.05$ 、マントル内は $a = 20\text{ km}$ 、 $\varepsilon = 0.02$ の指数関数型で特徴づけられる短波長不均質構造を付与したものを (C) 地形および短波長不均質構造付与モデルとし、それぞれのモデルに基づく数値シミュレーション結果の観測波形再現性について検討した。

計算波形と観測波形の比較の一例として、F-net の NRWF (成羽) 観測点における東西成分の波形比較を図 5 に示す。図 5 の波形は、0.01-4 Hz のバンドパスフィルターをかけてある。

層構造のみを仮定した場合は、波形全体に細かなスパイクが多数現れている。これらはモホ面などの層境界からの反射波であると考えられる。層構造モデルでは周波数の高い成分に影響をあたえる短波長の不均質性がないため、観測波形と比べてこれらの反射波が際立っている。一方、地形を付与することで地形による地震波散乱が発生し、紡錘形の S 波や後続の振幅が励起され、観測波形に近づいた。また、短波長不均質構造を加えることで、地表面だけではなく、媒質全体で地震波散乱が起きるために、P 波と S 波の振幅比についても改善が見られ、観測波形の再現性がよくなった。

波形だけでなく、計算領域全体の波動場の特徴の再現性確認のために、0.01-4 Hz の帯域での S 波最大振幅の空間分布を検討した (図 6)。今回対象とした地震は横ずれ成分を強く持つため、震源断層の走行方向とそれに直行した方向で振幅が大きい 4 象限型の振幅分布となることが予想される。実際、層構造モデルおよび地形付与モデルでは、断層の走行方向とそれに直行した方向で大きな振幅が観測され、45 度ずれた方向ではあまり振幅が大きくないという特徴が得られている。しかし、実際の観測記録から得られた S 波最大振幅分布は、4 象限型になっておらず、方位によらず一様に見える。地形および短波長不均質構造を付与したモデルでは、震源近傍では、4 象限型の振幅分布となっているが、震源から距離が遠くなるにつれ、徐々に分布がきれいな 4 象限型でなくなっていく。Takemura et al. (2009) により、短波長不均質構造による地震波散乱で、見かけの輻射特性は距離の増大に伴い崩れることが報告されており、そのような特徴を再現している。

このように、波形だけでなく、広域な波動場全体の特徴を再現するためには、短波長不均質構造と地形の両方を導入することがきわめて重要である。

4. まとめ

差分法による地震動シミュレーションにより、地形および短波長不均質構造による地震波散乱の特徴を比較した。地形による地震波散乱は地震波動場に大きな寄与をもたらすと同時に、短波長不均質構造によるものに比べ、観測点近傍の局所的な地形変動の影響を強く受ける。そのため、地形変動が複雑な場所において、コーダ波が卓越するなどの特徴が見られた (図 2 および 3 参照)。

観測波動場においても地形が重要な役割を果たしていることが、より現実的なモデルを導入した地震動シミュレーションと観測記録の比較から明らかとなった。地形を導入することで、後続層の励起や極性の変換が起こり、観測波形に似てくる (図 5 参照)。しかし、S 波最大振幅分布の比較 (図

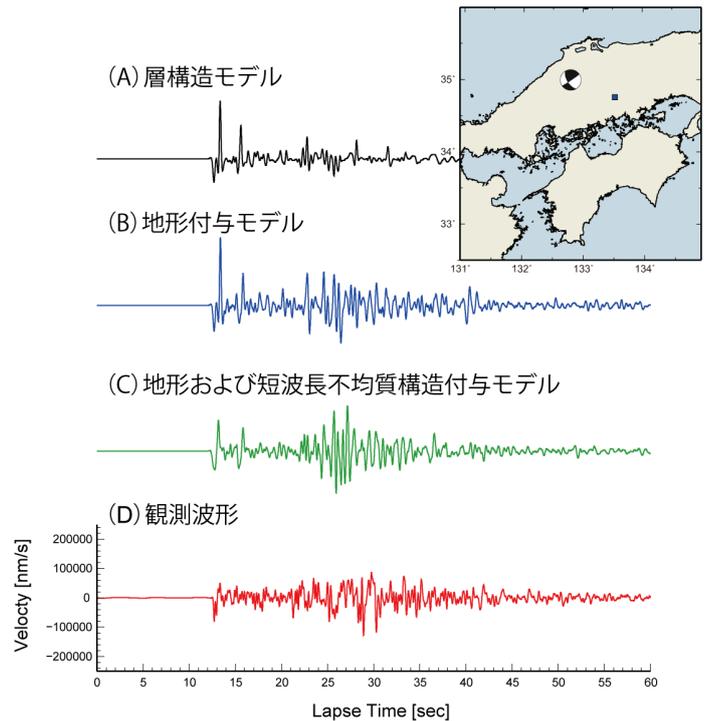


図5. F-net 成羽における東西成分の0.01-4 Hzの様々なモデルでの計算波形と観測波形の比較。

6 参照) に見られるように、広域な波動場全体の特徴を再現するためには短波長不均質構の導入が必要であり、現実の地震波動場を再現するためには、短波長不均質構造と地形の両方を導入することが重要である。

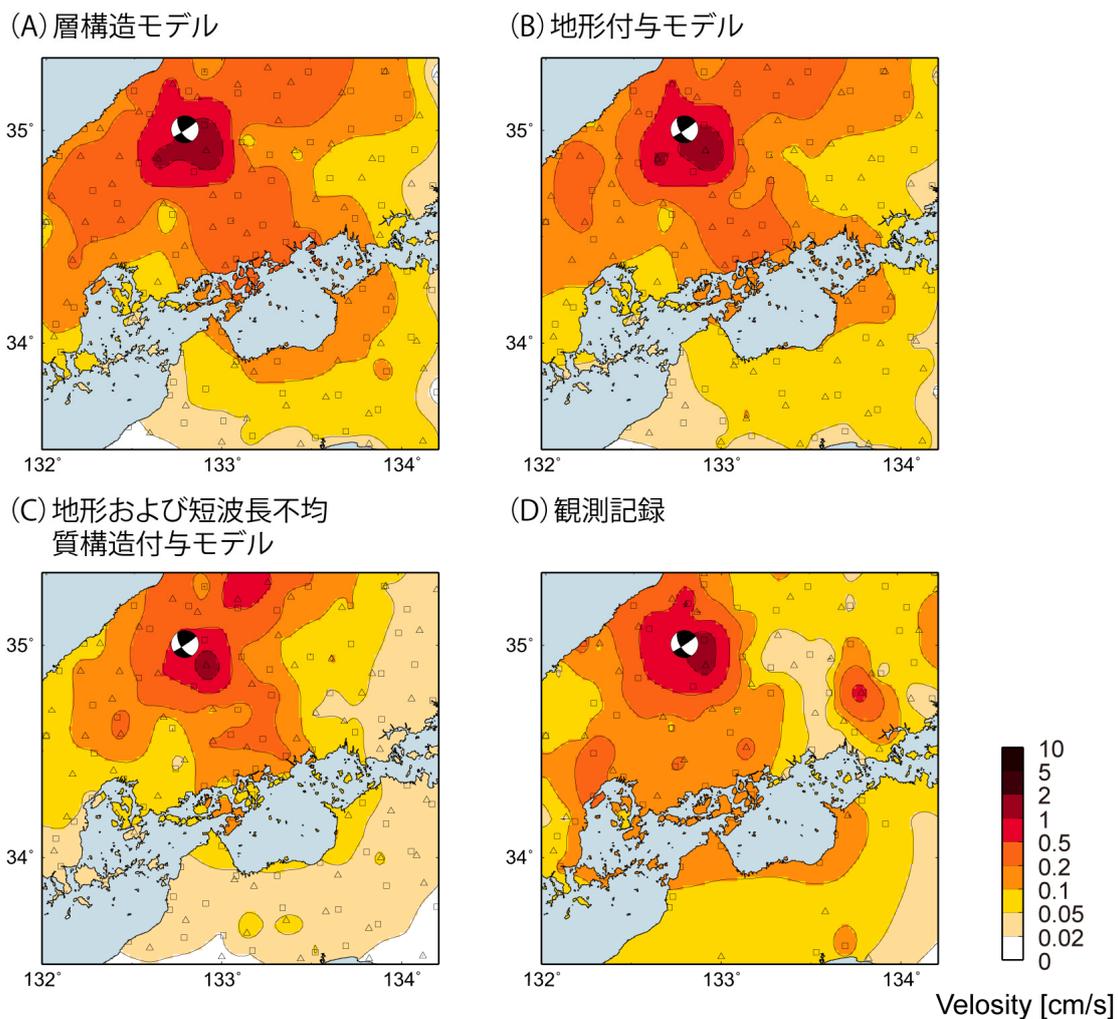


図6. それぞれモデルのS波最大振幅分布とK-NET/KiK-netの観測記録より得られたS波最大振幅分布の比較。

謝辞

防災科学技術研究所のK-NET, KiK-net および Hi-net の波形データとF-netのCMT解を使わせていただきました。また、海洋研究開発機構の地球シミュレータを使わせていただきました。記して感謝いたします。