

機関番号：12601

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008 ~ 2010

課題番号：20540405

研究課題名 (和文) 地殻・マントル不均質性の定量化と、広帯域強震動シミュレーションモデルの構築

研究課題名 (英文) Quantification of the crust and mantle heterogeneity and construction of a simulation model for broadband strong ground motions

研究代表者 古村 孝志 (FURUMURA TAKASHI)

東京大学・大学院情報学環・教授

研究者番号：80241404

研究成果の概要 (和文)：地殻・マントル不均質性の定量化と、広帯域強震動シミュレーションモデルの構築に向け、地下構造におけるスケール数 km 以下の短波長不均質構造の分布特性を、1)P 波の放射特性の崩れの周波数依存性・距離依存性、2)P 波の Transverse 成分への振幅の漏れ強度、の二つの観点から、Hi-net 高密度地震観測データによる近地の地震波形解析と、コンピュータシミュレーションにより評価した。広帯域地震動シミュレーションモデルの高精度化と、地球シミュレータを用いた大規模を行った。

研究成果の概要 (英文) : In this study we quantified the crust and mantle heterogeneity, and constructed a broadband strong ground motion simulation model. The distribution characteristic of the small-scale heterogeneities of the scale several kilometers or less in the subsurface structure is evaluated based the analysis of regional seismograms obtained by the Hi-net high-density seismic network from two points: 1) frequency dependency and the distance dependence of collapse of the apparent S-wave radiation pattern and 2) relative strength of the P-wave amplitude in the Transverse component. We developed a high-performance broadband simulation model and large scale simulation was conducted using the Earth Simulator supercomputer.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 20 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
平成 21 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
平成 22 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球物理学

キーワード：地震災害・予測、地震、シミュレーション、地殻、不均質構造

1. 研究開始当初の背景

大地震の強震動の予測には、地震波の波長程度以下のスケールの不均質地下構造を正しく知ることが不可欠である。本研究では、地下構造探査から推定可能な「決定論的地下

構造」と、推定が困難な微細構造の「統計的揺らぎ構造」を区別し、不均質地下構造を2つのモデルの重ね合わせで表現することを考えた。そして、後者のモデルを高密度の地震観測データと地震波伝播のコンピュータ

シミュレーションの相互比較から定量的に推定することを試みた。このような、マクロ+ミクロ的アプローチは、地震波形を用いた堆積構造のインバージョン研究や、坑間トモグラフィ探査の分野で1990年後半から議論が進められてきた。これら事前研究を進展させ、(1)高密度強震観測データを用いた広帯域地震波伝播特性の理解、(2)波動論・散乱理論に基づく地震波散乱と不均質構造との対応の明確化、2つを柱とする研究が、高精度不均質地下構造モデルの構築と、広帯域地震動シミュレーションの実現に向けて急務の課題であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高密度地震観測 (Hi-net, K-NET, KiK-net)により蓄積されている、過去10年間以上の地震データの蓄積を活用して、地殻内を水平に伝わる地震波の解析 (S波の放射特性の保存性など)と、地殻・マントルを鉛直に通過して地表に到達した地震波の解析 (振動方向解析など)の二つから、地殻内の不均質構造の統計的分布 (相関距離、標準偏差、分布の特性)を定量化する。日本列島を地質学的に複数のブロックに分け、不均質構造の地域性についても調査を進める。通常の地下構造探査では推定できない「統計的揺らぎ構造」を推定する。

先行研究から、地殻では相関距離は水平方向に5~10km、深さ方向に1~0.5km程度のサイズを持つ、非等方なフォン・カルマン型の分布特性を持ち、ゆらぎの標準偏差は3~5%程度であることがわかっている。このような空間スケールを持つ不均質構造は、周波数1~2Hz以上の短周期地震動の伝播に強く影響するいっぽう、波長の長い長周期の地震動には全く影響しない。この結果、散乱が強く起きる遷移周波数を境にして、地震波の距離減衰や波群の長さが大きく異なるなど、地震波伝播が全く異なる挙動を示すことが期待される。

このような短周期地震動の性質を明らかにするには、1)高密度の地震観測 (K-NET, KiK-net, Hi-net) データ解析から定量的に示し、次に、2)不均質な地下構造を高分解能でモデル化した大規模地震動シミュレーションを実施して、シミュレーション結果と観測データの比較から不均質地下構造モデルの確からしさを検証する、観測とシミュレーション融合の研究を進める。

そして、求められた不均質地下構造モデルを用いて、周波数1~2Hz以上の短周期地震動 (広帯域地震動)シミュレーションを、地球シミュレータ等の高速スパコンを用いて行い、観測された地震動の再現によるモデルの検証と、将来の大地震の揺れの予測に向けた大規模シミュレーションモデルを構築す

る。

3. 研究の方法

研究は、以下の手順で行った。

(1) トモグラフィ研究のスペクトル特性
近年の地震波速度トモグラフィ研究により得られている、高分解能P波およびS波速度モデルをスペクトル解析し、地震波速度の揺らぎのパラメータ (相関距離、標準偏差、スペクトルの傾き)化を行う。そして、揺らぎの地域性、深さ分布、地質構造 (平野、火山地帯、山地など)との関連、について分類評価する。日本列島規模のトモグラフィマップとして、Hi-net 微小地震走時データを用いた実体波速度インバージョン結果と、Hi-netの脈動の相互相関解析に基づく表面波速度分布の2つを用いた解析を進める。

(2) 深発地震の3成分地震動のエネルギー分布、S波最大震幅遅延

太平洋プレート内で発生した、深さ200km以深の深発地震の3成分地震波形のうち、P波初動の震動特性に着目した不均質構造の把握を行なう。具体的には、伝播経路の構造不均質性により2次的に生成する、P波のTransverse成分の強さを、1)伝播距離、2)方位性による変動から調査する。これに関しては既に散乱研究の分野での理論的検討の蓄積があるため、これに基づく評価を進めるほか、異方性を不均質性をモデル化したシミュレーションとの比較から明らかにする。

(3) Radiation Patternの調査

一般に、周波数1~2Hz前後でS波の放射特性が断層モデルとは異なる4象限型を示さなくなることが、強震観測が始まった1980年代頃から知られているが、この原因が、(a)震源の断層破壊の不均質性、(b)伝播経路の不均質性による散乱、(c)観測点の直下の表層地盤の不均質性のいずれの効果が大きいのか、それとも等分であるのかは依然不明である。日本の内陸で発生した浅発地震を用いて、震源直上の震源近傍から100km以上にわたる近地強震動を、KiK-netの地表と地中観測データを用いた調査により、3つの効果を分離し、それぞれが放射パターンの崩壊に与える寄与を定量化する。

(4) 大規模シミュレーションコードの開発

地殻内の不均質性のスケールは0.5km程度以下であると考えられるため、波長あたり十分な格子間隔で離散化すること、そして表層付近の低速度 ($V_s=0.5\text{km}$ 程度)を組み込むために、0.05km程度の細かなモデルで離散化した大規模な差分法計算モデルを開発する。求められた不均質構造をモデル化し、周期0.2秒~10秒以上の広帯域地震動を評価する広

帯域強震動シミュレーションを実施する。

4. 研究成果

地殻・マントルに普遍的に存在する数十～数 km のスケールを持つ短波長不均質構造は、およそ周期 1 秒以下の短周期地震動の伝播や散乱に強く寄与する。そこで、短周期地震動の波形記録から逆に短波長不均質構造の分布の推定が有効である。

第 2 の方法は、P 波のエネルギーの一部が散乱により Transverse 成分に漏れることを用いて、不均質性の強度を求める方法である。二つの研究では、Hi-net や K-net, KiK-net で記録された近地の地震の 3 成分地震波形の解析から周波数依存性や距離依存性を調査し、次に不均質構造をモデル化したコンピュータシミュレーションの比較を行って地殻・マントルの短波長不均質構造の分布をフォワードモデリング的に推定するものである。

(1) S 波放射パターン崩れに基づく推定

第 1 の方法は、S 波の 4 象限型の放射パターンの形が、高周波数になると次第に崩れて、等方的な分布性状を持つ現象を用いた波形解析である。図 1 は、2000 年 10 月 6 日に発生した、鳥取県西部地震 (M7.3 ; 深さ 11km) において、K-NET/KiK-net 観測網で記録された Transverse (T) 成分の最大加速度分布 (PGA) である。横ずれ断層の地震のため、震源から SH 波が強く放射され、地震断層の走行方向とその直交方向の 4 方位に向かって PGA 分布の等値線が広がっていることが確認できる。

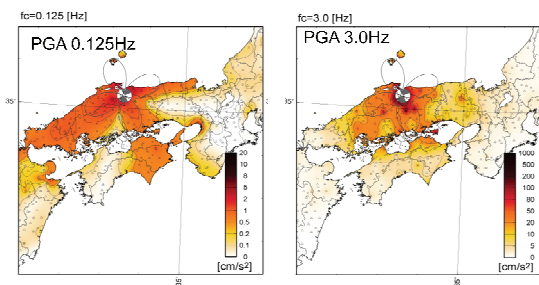


図 1 鳥取県西部地震の最大加速度分布 (周波数 0.125 Hz と 3 Hz)。

このような、SH 波の 4 象限型の放射パターンは低周波数地震動 ($f=0.125\text{Hz}$) で顕著に認められるが、高周波数 ($f=3\text{Hz}$) になると放射パターンは崩れ、方位によらず等方的な PGA 分布となることがわかる。

SH 波の見かけ放射パターンの崩れを定量化するために、観測と SH 波の理論放射パターンの一致度を相関係数から評価することにした。鳥取県西部地震の 29 個の余震を選び、152 本の観測波形から T 成分における SH

波の最大振幅を読み取り、その方位分布を、半無限媒質における SH 波振幅の理論放射パターンと比べて相関係数を計算した。相関係数の平均値とその標準偏差は、ブートストラップ法により評価した (図 2)。

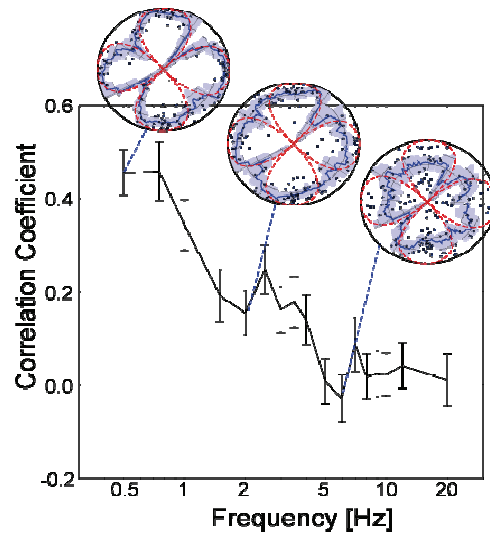


図 2 SH 波の放射パターンの崩れの周波数変化。

その結果、周波数 $f=1\text{Hz}$ よりも周波数が高まるにつれ SH 波の 4 象限型の放射パターンが急激に崩れ始め、 $f=5\text{Hz}$ を越えるとほぼ等方化することがわかり、観測と理論放射パターンが無相関 (相関係数 = 0.013) になる。見かけ放射パターンの崩れは、KiK-net の地表地震計と地中地震計の両方に見られたことから、放射パターンの崩れは震源近傍や観測点近傍における地震波散乱の影響だけでなく、伝播経路における地震波散乱の影響を強く受けていると判断できる。

次に、不均質な地下構造モデルを用いて地震波伝播シミュレーションを行ない、前述の観測の再現を試みた。計算に用いた短波長不均質構造として、物性値がフォン・カルマン型の不均質分布特性を持つランダム媒質を作成した。地震波伝播の計算は、16 次精度のスタガード格子 2 次元差分法 (FDM) を用いて行なった。モデルの中心に横ずれ型の点震源を置き、最大周波数 $f=7\text{Hz}$ の地震波を放射させ、P 波と S 波の伝播特性を調べた (図 3)。不均質媒質を伝わる地震波が強い散乱により、伝播とともに P 波と S 波の放射パターンが大きく崩れるようすがわかる。

計算波形から T 成分の S 波振幅を求め、SH 波の理論放射パターンの相関係数を計算して、その周波数変化を調べた。媒質の不均質性の強度を変化させて計算を繰り返し行い、最終的に不均質性の揺らぎの強度が 7% のモデルが、観測を良く説明できることを確認した。

次に、強度を 7% に固定して、不均質構造の相関距離を $a = 1\sim 20\text{ km}$ に変えてシミュレーションを行い、観測と計算を比較した。この結果、 $a = 5\text{ km}$ の場合の結果がもっとも観

測を説明することがわかった。

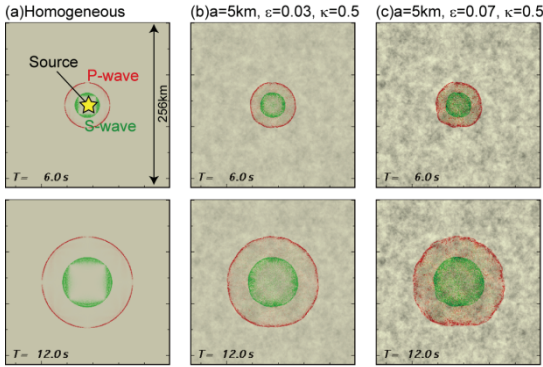


図3 (a)均質媒質、(b)-(c)不均質媒質における地震波伝播のスナップショット。

(2) P波エネルギーのT成分への漏れ

次に、P波初動が散乱により Transverse (T) 成分に漏れる現象を用いて、地下の不均質性の強度を推定した。用いたデータは、Hi-net 高感度地震観測網で記録した、深さ 35km 以下で発生した M2.5-5.0 の規模の地殻内地震である。

観測された地震波形に5つのバンドパスフィルタ(周波数 $f=1-2, 2-4, 4-8, 8-16, 16-32\text{Hz}$)をかけて、各周期帯におけるP波のT成分の相対強度を求めた。その結果、T成分は周波数が高いほど大きくなること、震源距離 150 km 以下では値 (0.1-0.2) が保たれ、震源距離が 150 km を超えると値が徐々に増大することが確認できた。

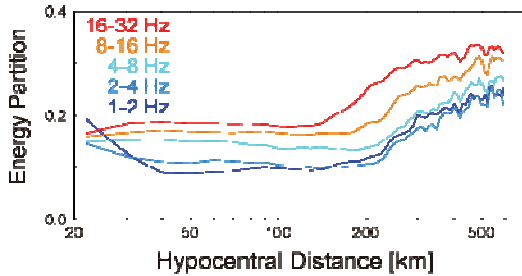


図4 求められたP波振幅のT成分の相対強度変化。周波数および震源距離との関係。

地殻内地震から放射される地震波は、震源距離が小さいうちは直達P波が卓越するが、震源距離が 150 km を超えたところでマントルP屈折波(Pn波)が初動となる。上述の距離変化は、直達P波が伝播する地殻内と、Pn波が伝播する最上部マントルの不均質構造が異なっていることを意味している。

観測されたP波のT成分の特徴を、3次元差分法による地震波伝播シミュレーションから確認した。震源には、P波の等方(爆発型)震源を用い、最大周波数 $f=6\text{Hz}$ までの地震波を放射させた。地殻とマントルの成層構造とP波/S波速度は、標準地球モデルにより与え、地殻内には相関距離が $a=5\text{ km}$ 、揺らぎの標準偏差が $e=7\%$ 、スペクトルの傾きが

$k=0.5$ の大きさを持つフォン・カルマン型のランダム構造を、そして最上部マントルには $a=10\text{ km}$ 、 $e=4\%$ 、 $k=0.5$ の不均質パラメータを上述の(1)の研究結果を用いて与えた。計算された3成分地震波形に対して、前述の観測データ解析同様の処理を行い、P波のT成分の強度を震央距離と周波数の関係から評価した。計算は周波数 $f<6\text{Hz}$ までの地震動に限られるが、T成分が周波数とともに大きくなる現象と距離変化をおおよそ再現することができた。

しかしながら、計算値は全周波数帯において観測値の $1/1.5\sim 1/2$ 程度にしかならなかった。この理由として、伝播経路における地震波散乱に加えて、複雑な震源破壊過程による効果や観測点直下の浅部地盤や地形による散乱など、シミュレーションモデルに組み込まれていない効果が観測値を大きくしている可能性がある。

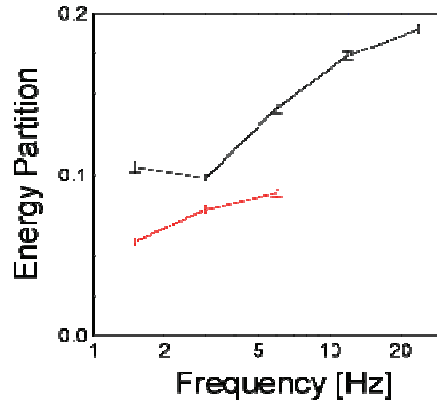


図5 計算から求められたP波振幅のT成分の相対強度の周波数変化(赤線)と、観測データ(黒線)の比較。

震源距離が 150 km を超えると、P波振幅のT成分比が徐々に大きくなる傾向もシミュレーションから再現できた。また、地殻と最上部マントルの不均質構造が同じモデルでは再現できなかったことから、観測された距離変化の原因は、地殻と最上部マントルの不均質構造の違いによる可能性が高い。

(3) 広帯域地震動シミュレーション

求められた地下の短波長不均質構造をモデル化して、長周期～短周期地震動を含む広帯域地震動シミュレーションを行った。

ここでは、成層構造モデル、地震波トモグラフィから求められた(長波長の)不均質モデル、そしてトモグラフィモデルに本研究で求めた短波長不均質構造を付加したモデルの3つを作成した。地震動シミュレーションの範囲は、中国から四国にかけての $250\text{ km}\times 128\text{ km}$ の2次元断面とした。2007年5月13日に島根・広島県境で発生した深さ 15 km の地殻内地震を対象に地震動シミュレーションを行った(図6)。

3つの地下構造モデルを用いた計算から得られた地震波形と、震源距離の等しいF-net 玉川 (TGW) 観測点の広帯域速度計記録のNS成分について、バンドパスフィルタを施し、低周波数と高周波数の地震波形を比較した (図7)。

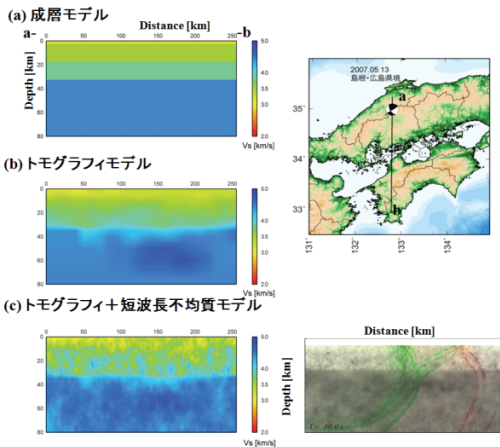


図6 広帯域地震動シミュレーションに用いた地下構造モデルと、計算の対象とした地震の位置。

図7 不均質地下構造モデルを用いて計算した地震波形 (F-net 玉川観測点地点)。(A)低周波数地震動 ($f=0.125\text{--}0.25\text{Hz}$) と (B)高周波数地震動 ($0.125\text{--}2\text{Hz}$)。

低周波数 ($f < 0.25\text{Hz}$) 地震動について見ると、水平成層モデルではよく再現できなかった表面波やP波・S波の後続相が、トモグラフィモデルでは現れ、観測波形に見られる複雑な波形に変化することが確認できた (図7 (A))。ただし、トモグラフィモデルに対して短波長不均質構造を付加しても、これ以上地震波形の改善は見られなかった。

高周波数 ($f < 2\text{Hz}$) 地震動では、短波長不均質構造の効果が顕著に現れ、観測波形の特徴であるP波とS波の長い後続相が計算波形で良く再現された (図7 (B))。成層モデルやトモグラフィモデルは、周波数 0.25Hz 以下の低周波数地震動の評価では十分だが、高周波数地震動に見られる継続時間の長い後続相を再現するためには、短波長不均質構造が重要であることが再確認できた (図7 (B))。

後続相の波形の時間変化をより詳しく見るために、観測波形とシミュレーション波形に対して周波数 $f=0.5\text{--}1, 1\text{--}2, 2\text{--}4\text{Hz}$ のバンドパスフィルタを施し、それぞれの包絡線 (エンベロープ) を求めて比較した。成層モデル計算のエンベロープは時間とともに大きく変動し、観測波形に見られるようなスムーズな減衰とは大きく異なったものになった。この問題は、トモグラフィモデルによりいくらか改善され、さらに短波長不均質モデルにおいてスムーズな時間減衰特性が再現できることも確認した。今後、観測波形と計算波形のコーダ波エンベロープの一致度を

高めるように、不均質構造のモデルパラメータの調整を進めることにより、地殻・マントルの短波長不均質構造の分布特性の定量化と地域性の理解が進み、かつ広帯域地震動の波形を良く説明する地下構造モデルの構築が進むと期待できる。

(4) 大規模FDMシミュレーションの実用化
広帯域地震動シミュレーションでは、数十～数百メートル以下の細かいスケールを持つ短波長不均質構造を計算モデルに組み込んだ、大規模なFDM計算が必要になる。

近年のスカラ型計算機では、CPUとメモリとのアクセス速度が遅いために、これがボトルネックとなって、FDM計算の演算性能が高くない問題があった。この問題に対処するために、CPUとメモリの間にキャッシュメモリと呼ばれる高速なメモリがあり、メインメモリから読み出したデータを一時格納することにより、CPUにデータを高速を供給する仕組みが用意されている。

したがって、近年のスカラ型計算機を用いた大規模FDM計算の実現に向け、キャッシュメモリを効率的に利用できるよう、プログラムの調整 (性能チューニング) が必要である。たとえば、3次元FDM計算で有効な手段として、大型の3次元配列を小さく分割して、個々を順番にキャッシュに取り込んで演算を進めるタイリングやブロッキングと呼ばれる技法や、同一の変数に対して行う演算をひとまとめに行い、メモリからのデータ読み出しの回数を減らす工夫がある。

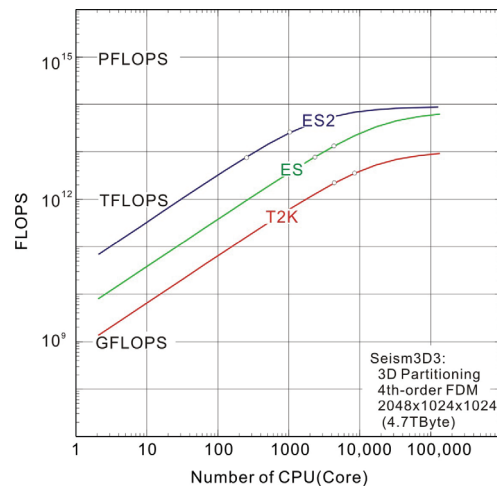


図9 3次元地震波伝播計算における並列計算性能の比較。横軸はCPU (コア) 数、縦軸は実測した演算速度 (FLOPS)。地球シミュレータ (ES)、新型地球シミュレータ (ES2) およびT2Kスパコン (東大) での比較。

本研究では、広帯域地震動シミュレーションコードを、地球シミュレータ (ES)、新型地球シミュレータ (ES2; 2009年4月更新)、およびT2Kオープンスパコン (東大) に委嘱

し、性能チューニングを行った。そして、1700億格子モデルの地震波伝播シミュレーションを行い、その演算速度 (FLOPS 値) 測定した。CPU 数の増大とともに演算速度が直線的に増加するが、やがて速度は飽和することがわかる。これは、CPU あたりの計算量が減ることにより、並列計算できない部分や、並列計算のオーバーヘッドの影響が相対的に大きくなるためである。

本研究により ES2 では最大 5,000CPU 以上まで高い並列化効率が達成することが確認できた (図 9)。T2K においても、同様の並列 FDM 計算の効率が得られた。並列 FDM 計算の演算性能を比べると、ES では理論性能 (8 GFLOPS/PE) の 49%、ES2 では 31% の高い実効性能が得られたのに対して、T2K (理論性能 9.2 GFLOPS/core) では理論性能のわずか 8% に過ぎなかった。すなわち、T2K では ES あるいは ES2 と同等の演算性能を得るために 5 ~ 30 倍以上の CPU 数が必要になる。

(5) まとめと今後の課題

広帯域地震動シミュレーションの実用化は、短周期地震波伝播に強く寄与する短波長不均質モデルの構築と、これを取り込んだ大規模地震波伝播シミュレーションの高度化の 2 つにかかっている。周期 1 秒より短い短周期波動場では、地殻・マントルに存在する、スケール数十 m ~ 数百 m 未満の短波長不均質構造による散乱の影響が突然現れる。短周期地震動シミュレーションの実現に向けて、不均質場での波動伝播の物理を理解し、高密度地震観測データ解析により、地殻・マントルの短波長不均質構造の把握が急務である。

本研究では、日本に高密度に展開された K-NET, KiK-net 強震観測網、および Hi-net 高密度地震観測データを用いて、P 波の T 成分への漏れや、S 波の見かけ放射パターンの変化に着目した、地殻・マントル不均質構造の推定を行ない、推定された不均質モデルの確からしさをコンピュータシミュレーション結果と観測データとの比較から検証した。今後、地震波の後続相 (コーダ波) の利用など、地震波形全体を使い、より詳細な地震波散乱現象を捉えて、観測、理論、シミュレーションを道具に短周期地震動の挙動を詳しく検討することが必要である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Furumura, T. and B.L.N. Kennett, A scattering waveguide in the heterogeneous subducting plate, *Advances in Geophysics, Scattering of Short-Period Seismic Waves in Earth Heterogeneity*, Eds. H Sato and M.

Fehler, Elsevier, 50, Chap.7, 195-217, 2009.

- ② 古村孝志, 差分法による 3 次元不均質場での地震波伝播の大規模計算, *地震* 2, 61, S83-S92, 2009.

- ③ Furumura, T., Hayakawa, M. Nakamura, K. Koketsu and T. Baba, Development of long-period ground motions from the Nankai Trough, Japan, earthquakes: Observations and computer simulation of the 1944 Tonankai (Mw8.1) and the 2004 SE Off-Kii Peninsula (Mw7.4) Earthquakes, *Pure Appl. Geophys.*, 165, 585-607, 2008.

- ④ Takemura, S., T. Furumura and T. Saito, Distortion of the apparent S-wave radiation pattern in the high-frequency wavefield: Tottori-ken Seibu, Japan, earthquake of 2000. *Geophys. J. Int.*, 178, 950-961, 2009.

[学会発表] (計 1 件)

- ① 武村俊介・古村孝志、齊藤竜彦、中国・四国地域で見られる P 波 Energy Partition の特徴、2009 年日本地球惑星科学連合大会講演予稿、2009。

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)

- 取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古村 孝志 (FURUMURA TAKASHI)
東京大学・大学院情報学環・教授
研究者番号：80241404

(2) 研究分担者

西村 太志 (NISHIMURA TAKESHI)
東北大学・理学系研究科・准教授
研究者番号：40222187

(3) 連携研究者

西田 究 (NISHIDA KIWAMU)
東京大学・地震研究所・助教
研究者番号：10345176