

( 1 ) 実施機関名：

東北大学

( 2 ) 研究課題(または観測項目)名：

地震波を用いた解析に基づく地殻構造と地震・火山活動の関係の解明

( 3 ) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

( 1 ) 日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象

ウ．広域の地殻構造と地殻流体の分布

( 4 ) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

( 1 ) 日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象

ア．列島及び周辺域のプレート運動，広域応力場

イ．上部マントルとマグマの発生場

( 2 ) 地震・火山噴火に至る準備過程

( 2-1 ) 地震準備過程

ウ．ひずみ集中帯の成因と内陸地震発生の準備過程

( 5 ) 本課題の 5 か年の到達目標：

地震発生や火山形成過程を理解する上で重要である日本列島下の地殻について、地震波形を用いた解析により、モホ面などの地震波速度不連続面の形状や上部・下部地殻の三次元地震波速度構造に加え、短波長不均質構造の詳細な空間分布を高精度で推定する。得られた結果を基に、地震活動や火山分布と地殻不均質構造の関連性、および火山性流体の分布を明らかにする。

( 6 ) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 21 年度は、ランダム媒質における短周期地震波動伝播の数理的基礎の構築、および東北日本・紀伊半島における地殻不均質構造の推定を行う。数理的基礎の構築では、1Hz 以上の高周波数地震波のエンベロープに着目し、自由表面を持つランダム媒質におけるベクトル弾性波のエンベロープの理論導出、PS 変換散乱を考慮した輻射伝達理論に基づく、強いランダム不均質媒質におけるエネルギー多重散乱モデルの構築、などを行う。また、日本列島の地殻内の三次元地震波速度構造を推定し、火山や地殻活動と地殻内不均質構造の関係を考察する。特に、和歌山県下の群発地震活動などの特異な地殻活動と不均質構造の関係を明らかにする。さらに、火山体における人工地震や自然地震の記録の収集および予備解析、地震波形記録の収集・処理などを行い次年度以降の解析のための手法およびデータセットを作成する。

平成 22 年度は、Hi-net データの解析に基づき、短周期 S 波の散乱と内部減衰の地域性を明らかにする。また、地震波形からモホ面での反射波や変換波を見出し、直達波と反射波/変換波との走時差を読み取る。

平成 23 年度は、冪乗型スペクトルを持つランダム弾性媒質における最大振幅遅延・最大振幅減衰を統計パラメータのみで記述し、S 波エンベロープの解析から日本列島における短波長不均質構造及び内部減衰構造の空間分布を推定するインバージョン手法を開発する。また、sP depth phase を用いたトモグラフィを行い、太平洋下の速度構造の空間分解能を向上させる。モホ面での反射波/変換波の走時差データをインバージョンし、モホ面の形状を推定する。

平成 24 年度は、前年度に開発した手法を実データへ適用し、日本列島における不均質構造及び内部減衰構造の空間分布を明らかにする。また、火山体における人工地震や自然地震の記録を解析し、輻射伝達理論に基づく散乱係数を推定する。さらに、後続波の走時データを用いて、速度トモグラフィにより地殻（特に下部地殻）の詳細な速度構造を推定する。

平成 25 年度は、これまでに得られた結果を総合的に解釈し、日本列島における第四紀火山の分布や地震活動と地殻・最上部マントルの不均質構造の関係および火山体における不均質構造と火山性流体の分布・挙動との関係を明らかにする。

( 7 ) 平成 22 年度成果の概要 :

1. ランダム不均質構造へパルス波が鉛直入射する場合、自由表面上では無限媒質の場合よりも振幅が増幅されるが、ベクトル成分それぞれの増幅特性については未知であった。ガウス型スペクトルを持つ厚さ 100km のランダム媒質の場合、新たに構築したマルコフ近似に基づいた統計的理論計算によると、自乗振幅エンベロープは上下動、水平動成分共に、無限媒質の場合と比べて約 4 倍となることがわかった (Emoto et al., 2010) .

2. 東北地方における 40km より浅い地震について、1-32Hz 帯の S 波自乗エンベロープの時間積分が全積分の 90%となるまで時間 T90 と、速度波形自乗エンベロープを確率密度関数とみなしてその 2 次モーメントから求める Trms の測定を行った (Tripathi et al., 2010) . その結果、震央距離 100km における主要動継続時間は、4Hz より低い周波数では前弧と背弧に大きな違いは無いが、4Hz より高い周波数では前弧に比べて背弧の方が短くなることがわかった ( 図 1 ) . これは内部減衰の違いを反映していると考えられる .

3. 火山における強い短波長不均質 (e.g., Yamamoto and Sato, 2010; 図 2) のさらなる理解を目的に、強い不均質場におけるモード変換・P/S エネルギー分配の遷移過程を差分法によりモデル化し、多重等方散乱の輻射伝達理論解との比較を行った。この結果、桜島人工地震探査において捉えられたエネルギー分配の時間変化が平均自由行程約 1km の短波長不均質による P-S 変換で定量的に解釈可能であることを明らかにした .

4. 北部伊豆小笠原弧において、地下の速度ゆらぎの空間分布を解明した結果、火山フロントの第四紀火山群下では、スペクトルの勾配が緩やかで短波長の速度ゆらぎが大きいことがわかった (Takahashi et al., 2011) . また古い島弧が存在すると考えられている火山フロント前弧側の Frontal Arc High 付近で、比較的長波長の速度ゆらぎが大きいことがわかった ( 図 3 ) .

5. 1995-2008 年に日本列島で発生した地殻内大地震の発生域における 3 次元地震波速度構造を詳細に検討し、本震の震源直下の地殻とマントル最上部において明瞭な地震波低速度・高ポアソン比が存在することを指摘した。さらに、1885-2008 年の期間に発生した 164 個の地殻内地震 (マグニチュード 5.7-8.0) の分布には、地殻・マントル最上部内の地震波低速度異常の分布との間に明らかな相関が認められる ( Zhao et al., 2010 ) .

6. 日本列島下の地震発生層の下限のマップを作成した。下限の深さは東北日本の太平洋沿岸や関東で深く、火山地域で浅いという特徴があり、前者は太平洋プレートの沈み込み、後者は火山活動に関係する高温域と関係があると考えられる .

==== 平成 23 年度の成果 =====

・遠地 P 波のトランスバース成分解析を HiNet データに適用し、日本列島の地殻およびマントル浅部の短波長不均質強度の空間分布を明らかにした。その結果、第 4 紀火山およびその周辺、平野域などで短波長不均質性が強いこと、活断層域では必ずしも短波長不均質性が強くないことなどが明らかとなった。

・日向灘及び西南日本において媒質のランダムな速度ゆらぎの空間分布を推定した結果，九州の第四紀火山下と日向灘南西域に速度ゆらぎの大きな領域が存在することが判った．日向灘南西域では速度ゆらぎの長波長成分が周囲に比べて大きく，東北や九州の第四紀火山下とは異なる空間スケール依存性を示すことが明らかになった．

・東北日本の内部減衰構造を推定し，本州弧の第四紀火山下の他，本州弧とクリル弧の衝突帯の西縁付近にも内部減衰の強い領域が存在することがわかった．衝突帯付近の高減衰域は，衝突に伴い沈み込んだ地殻物質と考えられている低速度異常域とよい相関を示す．

・不均質媒質中の短周期地震波の伝播特性のモデル化とモンテカルロシミュレーションに基づく考察を行った (Sawazaki et al., 2011)．特にダブルカップル型震源の輻射パターンの場合，観測される短周期地震波のエンベロープの輻射角依存性が周波数によってどのように変化するかを定量的に記述することが可能となった．

・不均質構造における多重散乱まで含めた波動を考察し，ノイズ相互相関からグリーン関数を抽出することは光学定理の成立と等価であることを証明した (Margerin and Sato, 2011)．これは，ノイズ相互相関法の理論的裏付けとなる．

・強い不均質場における波動伝播の数値モデリングを行い，自由表面におけるモード変換・実体波-表面波の変換散乱の様相を明らかにし，変換係数などの定量化を行った．また，桜島におけるモード変換の観測記録における自由表面の影響の分離・検討を行った．

・1995年兵庫県南部地震，2007年能登半島沖地震，2008年岩手・宮城内陸地震の震源域周辺の詳細な速度構造を推定したところ，いずれの地震についても震源域下の下部地殻に地震破堤速度域が存在することが明らかになった (Tong et al., 2001, Padhy et al., 2011, Huang et al., 2011)．

(8)平成22年度の成果に関連の深いもので、平成22年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

Emoto, K., H. Sato, and T. Nishimura, 2010, Synthesis of vector wave envelopes on the free surface of a random medium for the vertical incidence of a plane wavelet based on the Markov approximation, *J. Geophys. Res.*, 115, B08306, doi:10.1029/2009JB006955.

Lei, J., D. Zhao, F. Xie, J. Liu, 2011, An attempt to detect temporal variations of crustal structure in the source area of the 2006 Wen-An earthquake in North China. *J. Asian Earth Sci.* 40, 978-996.

Takahashi, T., K. Obana, S. Kodaira, D. Suetsugu, N. Takahashi, S. Kamiya, Y. Tamura, Random inhomogeneities in the northern Izu-Bonin arc estimated by tomographic inversion of peak delay times of S-wave seismograms, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2010JB007691, (in press).

Tripathi, J. N., H. Sato and M. Yamamoto, 2010, Envelope broadening characteristics of crustal earthquake in northeastern Honshu, Japan, *Geophys. J. Int.* 182, 988-1000, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04657.x

Wang, Z., D. Zhao, J. Wang, 2010, Deep structure and seismogenesis of the north-south seismic zone in Southwest China. *J. Geophys. Res.* 115, B12334.

Yamamoto, M. and Sato, H., 2010, Multiple scattering and mode conversion revealed by an active seismic experiment at Asama volcano, Japan, *J. Geophys. Res.*, 115, B07304, doi:10.1029/2009JB007109.

Sawazaki, S., H. Sato, and T. Nishimura, 2011, Envelope synthesis of short-period seismograms in 3-D random media for a point shear-dislocation source based on the forward scattering approximation: Application to small strike-slip earthquakes in southwestern Japan, *JGR* (in press)

Margerin, L., and H. Sato, 2011, Reconstruction of multiply-scattered arrivals from the cross-correlation of waves excited by random noise sources in a heterogeneous dissipative medium, *Wave Motion*, 58, 146-160.

Tong, P., D. Zhao, D. Yang, 2011, Tomography of the 1995 Kobe earthquake area: Comparison of finite-frequency and ray approaches. *Geophys. J. Int.* (in press).

Padhy, S., O.P. Mishra, D. Zhao, W. Wei, 2011, Crustal heterogeneity in the 2007 Noto-Hanto earthquake area and its geodynamical implications. *Tectonophysics* (in press).

Huang, Z., D. Zhao, L. Wang, 2011, Stress field in the 2008 Iwate-Miyagi earthquake (M 7.2) area. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 12, Q06006.

( 9 ) 平成 23 年度実施計画の概要 :

- ・ランダム不均質構造中のダブルカップル型震源による短周期地震波のエンベロープ形状に関するシミュレーション法の開発 .
- ・ランダム不均質構造における短周期地震波の伝播について , 特に速度境界の与える影響の定量的考察 .
- ・火山体浅部不均質場における地震波エネルギー伝播・エネルギー分配に対する自由表面・地下構造の影響の検討を行う .
- ・日向灘とその周辺域における速度ゆらぎ分布を推定し , 地溝帯や巨大地震発生域の地下構造の特徴を明らかにする .
- ・東北日本の内部減衰構造を推定し , 速度構造や速度ゆらぎ・内部減衰を統合した地下構造の解釈を進める .
- ・日高山脈下の詳細な地震波速度構造を推定し , 前弧スリバー運動と不均質構造の関係を議論する .

( 10 ) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

佐藤春夫・趙大鵬・西村太志・岡田知己・山本希・中島淳一・他  
他機関との共同研究の有無 : 有  
海洋研究開発機構 : 高橋努

( 11 ) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター  
電話 : 022-225-1950  
e-mail : zisin-yoti@aob.geophys.tohoku.ac.jp  
URL : <http://www.aob.geophys.tohoku.ac.jp/>

( 12 ) この研究課題 ( または観測項目 ) の連絡担当者

氏名 : 中島淳一  
所属 : 大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター  
電話 : 022-225-1950  
FAX : 022-264-3292  
e-mail : nakajima@aob.geophys.tohoku.ac.jp

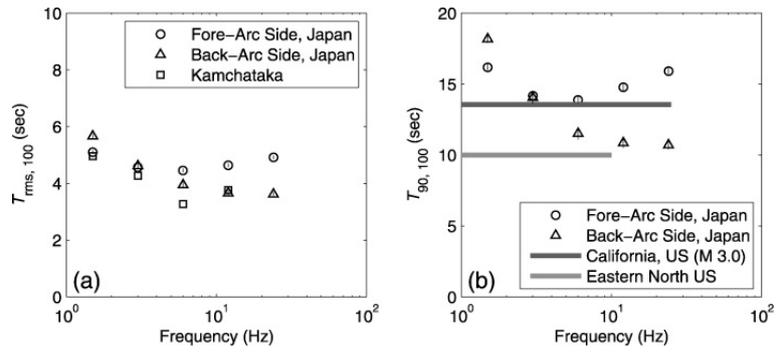


図 1 .  
東北地方における震央距離 100km における浅い地震の主要動継続時間  $T_{rms}$  および  $T_{90}$  の測定結果 .

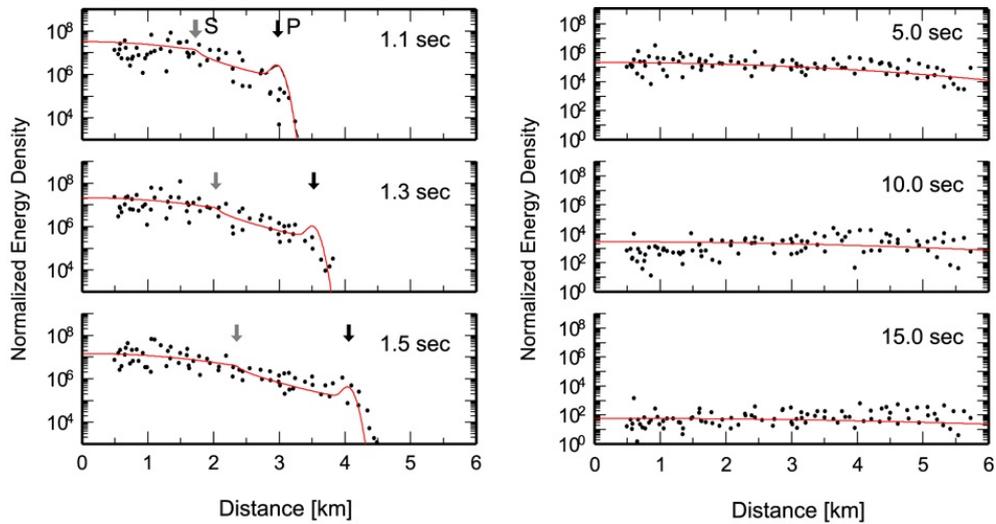


図 2 .  
火山人工地震探査において観測されたエネルギー密度空間分布のスナップショットと多重等方散乱モデルにより得られた空間分布の比較 . 震源からの P 波エネルギーが火山浅部の短波長不均質により S 波エネルギーに変換され多重散乱していることを示している .

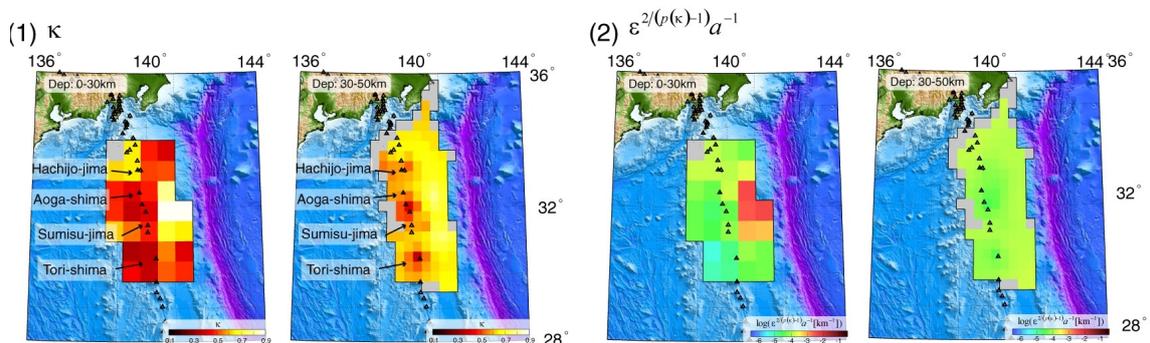


図 3  
北部伊豆小笠原弧における深さ 0-30km および深さ 30-50km における速度ゆらぎのパワースペクトル密度関数の空間分布 . (1) 短波長域におけるスペクトルの勾配を決めるパラメータ . (2) パワースペクトル密度関数の平均的な振幅を決めるパラメータ .