

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800255

研究課題名(和文) 南海トラフ周辺のS波減衰構造の解明～地震発生帯における媒質の特徴抽出に向けて～

研究課題名(英文) Studies on S-wave attenuation structure in Nankai subduction zone for feature extractions of medium properties

研究代表者

高橋 努 (Takahashi, Tsutomu)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地震津波海域観測研究開発センター・主任研究員

研究者番号：90435842

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：西南日本と南海トラフ周辺で、数Hz以上の地震波に対して散乱による見かけ減衰を考慮しS波減衰構造を推定した。別府島原地溝帯は他の火山地域とランダム速度不均質の深さ変化が異なるが、減衰構造に大きな違いは見られなかった。その結果に基づき、地溝帯下は島弧火山と同様の温度条件が予想されるが、火成岩形成に関連する貫入構造などが少ないという解釈を提案した。また沈み込むフィリピン海プレート上面付近のやや強い減衰域を明らかにした。南海トラフ全体では減衰と深部低周波微動発生域と一致する領域が幾つか存在し、ランダム不均質や減衰と微動のトリガー現象を定量的に関連づける枠組みを示した。

研究成果の概要(英文)：This study estimated the S-wave attenuation structure in Nankai subduction zone with correction terms for apparent attenuation due to multiple wave scattering. Beppu-Shimabara rift zone shows high attenuation as with other volcanic areas, but this area has a unique vertical variation of random inhomogeneity. This result suggests that temperature beneath this rift zone would be similar with other volcanic areas, but inclusions of magma or volcanic rocks would be poorer than other volcanic areas. Near the top of the subducting Philippine Sea plate, moderately high attenuation zones were imaged over the Nankai subduction zone. Some of them are coincident with non-volcanic tremor zones. We discussed possible relations among random inhomogeneity, attenuation and tremor triggering in terms of fluid oscillation, and pointed out some conditions for dynamic triggering of tremors.

研究分野：地震学

キーワード：地震波散乱 内部減衰 南海トラフ マルコフ連鎖モンテカルロ法

1. 研究開始当初の背景

数 Hz 以上の地震波は、地球内部を伝播する際に媒質の不均質性による多重散乱の影響を受けて徐々に波形が崩れるとともに、媒質の非弾性的性質による減衰の影響でエネルギーを失う (図 1). 本課題の研究代表者らはランダム媒質中における波動伝播の理論的研究に基づいて、ランダム速度不均質と減衰を分離してそれぞれの三次元構造を推定する手法群を初めて提案した[1, 2]. それらの手法を用いた構造研究を東北日本などで実施し、第四紀火山下などでランダム不均質や減衰が強いことを明らかにし、またランダム速度不均質と減衰は互いに異なる空間分布をもつことを示した. 減衰構造の解釈では温度や流体の寄与が議論されることが多いが、これまでの減衰構造研究の多くは散乱の影響を考慮していなかった. しかし地震波散乱の原因となるランダム速度不均質の成因として、マグマ貫入によって形成される小さなスケールの構造や断層活動などによる破碎構造やその内部の流体分布などが考えられる. 従って、地下構造の解釈を進める上で地震波の散乱と減衰を分離した研究が重要であり、様々な地域での解析から地質構造や地震・火山活動との関連を明らかにすることが重要となっていた.

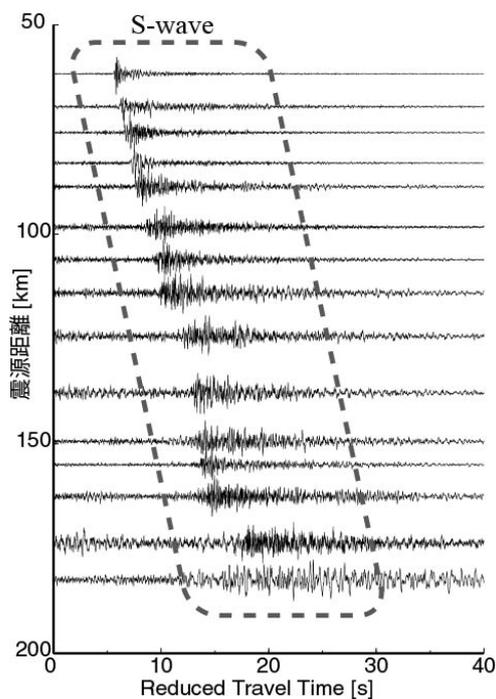


図 1. 高周波数帯域(2-32Hz)における地震波の例.

2. 研究の目的

本課題は、散乱の影響を除去した S 波減衰構造を西南日本と南海トラフ域において推定し、他の構造パラメータとの関係を考慮した解釈を進め、媒質の物性や流体の分布に関

する情報を抽出することを目的として実施した. 主に着目した点は別府島原地溝帯付近の火山地域と沈み込む海洋プレートと陸側プレートの境界付近の 2 点である.

別府島原地溝帯には多くの第四紀火山が分布するが、ランダム速度不均質構造の深さ変化が東北日本の火山地域とは異なることが明らかにされている[3]. この地域での減衰構造を解明することで、島弧や地溝帯における火山下の構造と火山形成過程、テクトニクスとの関連を解明することを目標の一つとした.

また沈み込むフィリピン海プレートの周辺には、南海地震などの巨大地震発生域が分布するほか、低周波地震やスロースリップといったスロー地震現象が活発な領域が南海トラフ全域にわたって分布する. これらの地震活動を研究する上で、プレート境界上の流体の分布は重要な役割を果たすと考えられている. 地震波の減衰構造は流体分布を知る上で重要なパラメータの一つであることから、詳細な減衰構造に基づいて地震発生との関連を解明することをもう一つの目標とした.

3. 研究の方法

解析に用いたデータは、海域と陸域の定常地震観測点および海域の臨時観測点 (図 2) で得られた地震波形記録である. 陸域の定常観測点は国立研究開発法人防災科学技術研究所の地震観測網 Hi-net および F-net を使用し、海域は国立研究開発法人海洋研究開発機構が構築した海底地震観測網 DONET を用いた. 海域の臨時観測点は海洋研究開発機構がこれまで設置・回収した自己浮上型の海底地震計で、主に文部科学省からの受託研究「東海・東南海・南海地震の連動性評価のための調査観測・研究」の一環で実施した自然地震観測を対象とした. これらの観測で得られた速度波形記録の水平動二成分を用いて 4-8Hz, 8-16Hz, 16-32Hz における地震波エンベロープを合成し、その S 波最大振幅を解析に用いた.

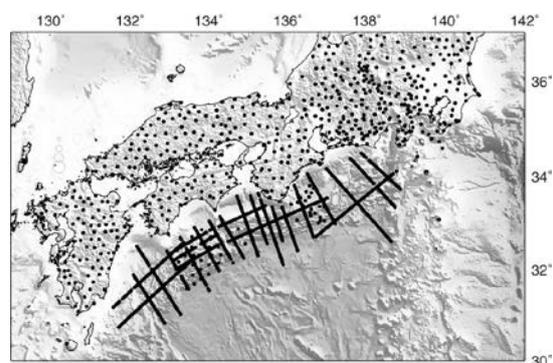


図 2. 解析に用いた観測点分布 (黒点). 南海トラフ域の黒線は探査測線を表し、線上に 5km 間隔で地震計が分布する.

本研究で用いる減衰構造の推定法では散乱の影響を適切に評価するため、減衰構造推定と同じデータセットの解析からランダム速度不均質構造を事前に推定し、その結果に基づいて散乱による見かけの減衰を数値シミュレーションにより評価する。この散乱による見かけ減衰と、地震波が球面波として伝播することによる幾何学的減衰を考慮し、震源でのエネルギー輻射量・観測点近傍の増幅特性とともに減衰構造を推定する。

構造推定にはレプリカ交換モンテカルロ法[4]を用いた。これはモデルパラメータ空間全体の広域なサンプリングと最適解近傍の密なサンプリングを同時に実施し、局所解が多数存在するような問題でも安定して最適解を推定することができる手法である。これにより効率的に最適解を探索するとともに、得られた解の分散に対応する条件下でのサンプリング履歴から誤差を評価した。なお、このレプリカ交換モンテカルロ法を用いた解析では、事前に研究者自身が試行錯誤的に空間を離散化する必要がある、得られた結果の空間分解能の検証が難しいという問題があることが事前に分かっていた。そこでデータに対して適切な空間分解能での構造イメージングが可能と期待される **Reversible Jump MCMC**[5]を用いた手法の検討も実施した。

4. 研究成果

はじめに、課題開始時点でランダム速度不均質構造の推定が終わっていた西南日本西部での研究を実施した。この地域には、別府島原地溝帯や四国西部のスロー地震現象が活発な地域が含まれる。これまでの研究から、別府島原地溝帯では浅部ほど強いランダム速度不均質を示し、桜島など九州南部では深さによらず様に不均質が強いという特徴が見られていた[3]。一方、本研究で推定した減衰構造(図3)は、地溝帯と九州南部ともに地殻に比べ最上部マントルの減衰が強くなるという傾向を示した。東北日本の火山下では深さの増加に対して減衰が増加もしくはほぼ一定という特徴を示し、ランダム速度不均質は地殻内よりも最上部マントル内が強い傾向が見られる。従って、この地溝帯ではランダム速度不均質の深さ変化に顕著な特異性が見られ、減衰構造は島弧火山と類似していることが分かった。この違いについて、火山地域周辺の強いランダム速度不均質は火成岩の分布と良い相関を示していることを考慮し、地溝帯下は島弧火山と同様の温度条件が予想されるが、最上部マントルにおいて火成岩形成に関連する貫入構造などが少ないという解釈を提案した。

四国付近ではプレート境界付近に周囲に比べ減衰の強い領域が分布する傾向が確認され、誤差を考慮してもほとんどの場所で有意であった。深さ方向の分解能が20 kmと大きいと詳細な議論は難しくしたが、地震波

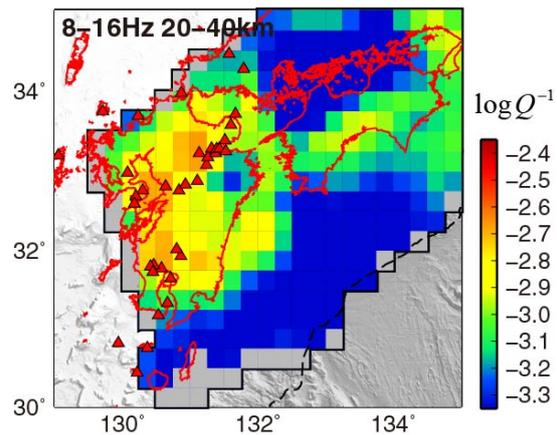


図 3. 西南日本西部における減衰構造 (8-16Hz, 深さ 20-40km). 三角は第四紀火山を表す。

の通過に伴い媒質中の流体が間隙間で振動する可能性について議論した。論文中では、推定されたランダム不均質と減衰のパラメータから表面波の通過によって流体の振動が起きる条件を議論した。この議論は、プレート境界付近で発生する深部低周波微動のトリガー現象と流体の関連を検討するために実施した。媒質の透水性など不確定性の大きいパラメータがあるため流体振動が発生する条件を特定することはできないが、今後微動のトリガー現象の観測事例を蓄積することで、ランダム不均質の特徴的スケールを推定できる可能性や、減衰構造がトリガーの発生メカニズムの解明に資する可能性を指摘した。

上記の成果を得た後、西南日本全体の減衰構造の推定にはランダム速度不均質構造の空間分解能の向上も必要と考え、**Reversible Jump MCMC**法を導入した研究を実施した。これは本課題内の実施項目ではないが、この手法を導入したことで従来の分解能は水平 $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ 、鉛直 20km だったが地殻最上部で水平 $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ 、鉛直 10km、それ以深で水平 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 、鉛直 10km で安定してランダム速度不均質構造を推定することが可能となった。この結果に基づいて散乱による見かけの振幅減衰を評価し、減衰構造の推定を実施した。

西南日本全体の減衰構造の推定は、まず従来と同じ手法により減衰構造のパラメータを空間上にあらかじめ配置して推定した。このときの分解能は水平 $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ 、鉛直 20km である。その結果、火山地域に高減衰域が分布することや、沈み込むフィリピン海プレートの上面付近にやや減衰の強い領域が広域に存在する可能性を明らかにした。プレート上面付近のやや強い減衰域は深さ 0-20km の範囲では南海トラフ全体に分布し、特に四国沖で減衰が強い傾向が見られた。また

20-40km のプレート境界付近には幾つかのやや減衰の強い領域がイメージされ、深部低周波微動発生域の幾つかが減衰の強い領域に対応する傾向が見られた。この特徴を系統的に説明する解釈やモデルの提案まではできなかったが、誤差を考慮した議論と論文投稿の準備を進めている。

また、西南日本全体における減衰構造の高分解能化のため、ランダム不均質の推定に用いた **Reversible Jump MCMC** 法の導入を試みた。しかし、パラメータ空間の次元を変えながらのサンプリングの効率が悪く、従来の手法よりも残差が大きい結果しか得られなかった。これは **MCMC** 法の中の設計に改善すべき点があることを示唆しているが、本課題中ではその解決までは達成できなかった。この手法は今後の構造研究に重要な手法の一つと考えられることから、今後も改善に取り組んでいく計画である。

従来の地下構造の精度検証はデータの量だけを考慮した人工データによる検証が主であるが、本研究で行った誤差評価は観測データの量と質に基づいたものであり、誤差を考慮した詳細な議論が可能となった。この誤差評価を用いて、北部伊豆小笠原弧での減衰構造について結果をまとめ論文として発表した。北部小笠原弧での減衰構造推定は本課題実施前に行っていたが、誤差分布が不明であったため議論や解釈が十分にできていなかった。しかし誤差評価の結果、火山列付近に見られる複数の高減衰域が妥当であることを示し、また南側の高減衰域 (図 4 中(a)) のやや北側にもう一つの高減衰が存在する可能性を指摘した。そしてランダム速度不均質構造との比較から北部伊豆小笠原弧の火山下の構造の非一様性を指摘し、その原因として火山下の高周波領域の時間変化の可能性を指摘した。

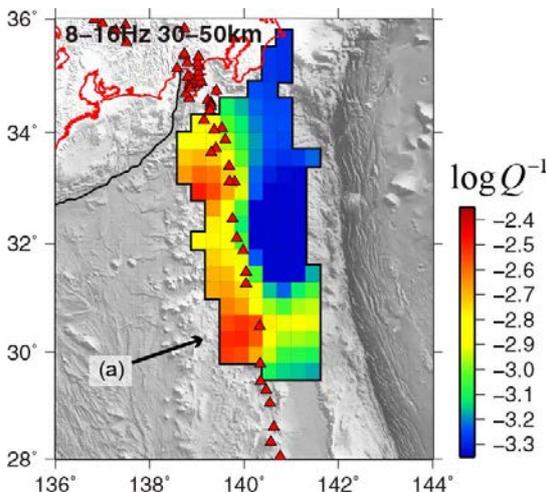


図 4. 北部伊豆小笠原弧の減衰構造 (8-16Hz, 深さ 30-50km). 三角は第四紀火山を表す。

参考文献

[1] Takahashi et al. 2009, Geophys. J. Int.
 [2] Takahashi, 2012. J. Geophys. Res.
 [3] Takahashi et al. 2013. J. Geophys. Res.
 [4] Hukushima & Nemoto, 1996, J. Phys. Soc. Japan.
 [5] Green, 1995, Biometrika

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

① Takahashi, T., K. Obana, and S. Kodaira (2016), S-wave attenuation structure beneath the northern Izu-Bonin arc, Earth, Planets and Space, 68(1), 1-13, doi:10.1186/s40623-016-0431-3. (査読有・招待論文)

② Takahashi T., K. Obana, Y. Yamamoto, A. Nakanishi, S. Kodaira, and Y. Kaneda (2014), S-wave attenuation structure on the western side of the Nankai subduction zone: implications for fluid distribution and dynamics, J. Geophys. Res., 119, 7805-7822, doi:10.1002/2014JB011103. (査読有)

[学会発表] (計 7 件)

① Takahashi T., K. Obana, Y. Yamamoto, Y. Kaiho, A. Nakanishi, S. Kodaira, Y. Kaneda, Trans-Dimensional Imaging of Random Inhomogeneities in Nankai Subduction Zone with the Reversible Jump MCMC, AOGS 12th Annual Meeting, 2015/8/5, Suntec Convention & Exhibition Centre (Singapore), (口頭)

② 高橋 努・尾鼻 浩一郎・山本 揚二郎・海宝 由佳・仲西 理子・小平 秀一・金田 義行, 西南日本および南海トラフ周辺の S 波減衰構造, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 2015/5/26, 幕張メッセ (千葉県千葉市) (ポスター)

③ Takahashi T., K. Obana, Y. Yamamoto, Y. Kaiho, A. Nakanishi, S. Kodaira, and Y. Kaneda, Transdimensional imaging of random velocity inhomogeneities in Nankai subduction zone, 2014 AGU Fall Meeting, 2014/12/19, Moscone Center (San Francisco, USA), (ポスター)

④ 高橋 努・尾鼻 浩一郎・山本 揚二郎・海宝 由佳・仲西 理子・小平 秀一・金田 義行, Reversible Jump MCMC により推定した南海トラフ周辺のランダム速度不均質構造, 日本地震学会 2014 年度秋季大会, 2014/11/26, 朱

鷺メッセ（新潟県新潟市）（口頭）

⑤ Takahashi T., K. Obana, Y. Yamamoto, A. Nakanishi, S. Kodaira, Y. Kaneda, S-wave attenuation on the western side of Nankai subduction zone: implications for geofluid distribution and dynamics, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 2014/5/1, パシフィコ横浜（神奈川県横浜市）（口頭）

⑥ Takahashi T., K. Obana, Y. Yamamoto, A. Nakanishi, S. Kodaira, Y. Kaneda, S-wave attenuation structure on the western side of Nankai subduction zone: implications for geofluid distribution and dynamics, Geofluid 3, 2014/02/28 東工大（東京都），（口頭）

⑦ 高橋 努・尾鼻 浩一郎・山本 揚二郎・仲西 理子・小平 秀一・金田 義行, S-wave attenuation structure around the western part of Nankai subduction zone, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013/5/22, 幕張メッセ（千葉県千葉市），（ポスター）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 努 (Takahashi Tsutomu)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地震津波海域観測研究開発センター・主任研究員

研究者番号：90435842