

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K13626

研究課題名（和文）沈み込み帯前弧域における短波長不均質構造モデルの構築と水輸送過程の解明

研究課題名（英文）A study of short wave-length heterogeneity and fluid transportation in the forearc region of a subduction zone

研究代表者

椎名 高裕（Shiina, Takahiro）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・研究員

研究者番号：70796151

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、東北日本沈み込み帯で発生したスラブ内地震で観測された高周波帯域の後続波（P波やS波以外の波群）の伝播経路の推定や波形特徴を再現するシミュレーションを通して、流体に関連した微細構造の検出を試みた。その結果、この後続波に励起や伝播に、沈み込み帯前弧域における散乱体の分布が大きく寄与していることがわかった。加えて、S波減衰構造にも敏感な波群であることが示唆された。その知見を基に同沈み込み帯の減衰特性を調べたところ、高周波帯域のS波減衰が前弧域と背弧域で大きく異なることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

沈み込み帯における地震活動やマグマ活動を理解する上で、スラブの沈み込みに伴い運び込まれる流体の分布や形態、移動経路を明らかにすることは非常に重要である。本研究で得られた高周波後続波と不均質構造の関係に関する知見は、今後この後続波の詳しい解析が、今後沈み込み帯の微細構造の解明や地震の発生メカニズムやマグマダイナミクスを解明の進展に対して重要な情報源となり得ることを示す。

研究成果の概要（英文）：In this study, we studied a high-frequency later phase (HFLP) for intra-slab earthquakes in NE Japan. By investigations of propagation processes of the HFLP, we revealed that the HFLP related to scattering structure in the forearc region of this subduction zone. Additionally, it was sensitive to attenuation structure. The observations of the HFLP suggested the strong attenuation contrast in the mantle wedge beneath the forearc and backarc regions of NE Japan subduction zone.

研究分野：固体地球惑星物理学

キーワード：沈み込み帯 スラブ内地震 地震後続波 地震波減衰構造 地震波散乱構造

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

東北日本などに代表される沈み込み帯では、海洋プレート(スラブ)の沈み込みに伴い、含水鉱物などとして、多量の水が地球内部へ運び込まれている[e.g., Hacker et al., 2003]. スラブの沈み込みに伴い温度と圧力が上昇することで、これらの含水鉱物は無水鉱物相へ順次相転移する. この含水鉱物やその脱水相転移を起源とする流体の一部が沈み込み帯浅部へ移動することで、内陸地震活動やプレート境界におけるスロー地震の発生など、沈み込み帯の多様な地震現象の発生に寄与していると考えられている[e.g., Ide, 2012].

西南日本など、若く、温かいプレートの沈み込み帯では、プレート境界型地震の発生域直上で地震を観測することができる. そのような観測データに基づく、海溝軸から火山フロントに至るまで連続的に地下構造のイメージングにより、特に沈み込み帯前弧域(火山フロントから海溝側)下における流体の輸送過程が詳しく検討されてきた. その結果、スラブ起源流体がマンテルウェッジの蛇紋岩化[e.g., Bostock et al., 2002; Abe et al., 2013]やプレート境界の間隙流体圧の上昇[e.g., Audet et al., 2009]に密接に関係することが明らかになった.

東北日本など、古く、冷たい沈み込み帯では、おおよそ深さ 100 km における含水鉱物の脱水相転移の進行[e.g., Hacker et al., 2003; Shiina et al., 2013]や浅部域への滞留可能性[e.g., Hasegawa et al., 2011]が議論されている. しかしながら、冷たい沈み込み帯前弧域におけるスラブ起源流体の浅部流動の有無や経路はよくわかっていない. このため、沈み込み帯、特に前弧域における流体の分布を明らかにすることは、冷たい沈み込み帯における水循環過程や地震の発生メカニズムに対する理解を深める上で重要な知見の獲得につながることを期待される.

2. 研究の目的

本研究では、東北日本沈み込み帯を対象とし、特に沈み込み帯前弧域における水輸送過程の解明を目指し、流体の移動経路として期待される数 km 程度の構造、いわゆる短波長不均質構造の検出を行う. 具体的には、スラブ内地震で観測される高周波帯域で観測される後続波(高周波後続波(図1))の解析を通して、沈み込み帯前弧域を中心とした領域の地震波散乱構造および減衰構造の制約を試みる.

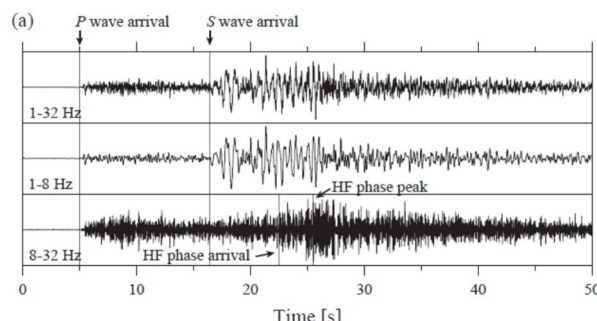


図1 高周波後続波の観測波形例
[Shiina et al., 2021 を加筆・修正].

3. 研究の方法

本研究では、東北日本沈み込み帯でしばしば観測される高周波後続波(直達P波や直達S波以外の波群で、高周波帯域で明瞭に観測される後続波)に注目した解析を行った. まず、(1)東北日本および北海道地域において高周波後続波の探索を行い、高周波後続波の空間的な観測状況と波形特徴をまとめた. 次に、(2)高周波後続波の伝播経路を推定する. 伝播経路推定には、バックプロジェクション法の一つである Source-Scanning Algorithm (SSA) [Kao and Shan, 2004]を用いた. 伝播経路推定の過程で、対象とした高周波後続波が(研究当初の予想とは異なり)地震波減衰構造の影響を強く受けていることがわかってきた. そこで、(3)スペクトルインバージョン法に基づく減衰トモグラフィ[Nakamura et al., 2009]やコーデ規格化法[e.g., Aki, 1980; Yoshimoto et al., 1993]を用い、沈み込み帯前弧域と背弧域におけるS波減衰特性を調べた. 最後に、(4)既存あるいは本研究課題で制約を加えた地震波速度と地震波減衰構造を与えた数値シミュレーションを実施した. 有限差分法やモンテカルロ法[Yoshimoto, 2000]を用いた数値シミュレーションにより、東北日本沈み込み帯における高周波帯域の地震波伝播過程やその背景に存在する地震波散乱構造ならびに減衰構造の特徴を検討した.

4. 研究成果

(1) 高周波後続波の探索

東北日本沈み込み帯では、深さ 80-250 km で発生したスラブ内地震で高周波後続波がしばしば観測されることを確認した. 特に東北日本地域で重点的な探索を行い、同地域で発生する深さ 80 km 以深のスラブ内地震ではある程度普遍的に高周波後続波が観測されることがわかった.

本研究で注目した高周波後続波は 8-32 Hz の周波数帯域で明瞭に観測され、長い継続時間を持つ. 加えて、しばしば最大振幅を記録する. また、大きな遅延時間を持つことが特徴の一つであり、背弧域に分布する観測点ほど遅延時間が大きくなる傾向が認められ、最大で 50 s 程度の遅延時間を計測した. このような特徴は Hasemi and Horiuchi [2010]が報告した後続波の特徴と類似する. すなわち、高周波後続波は散乱波的な伝播過程を経験した後続波であると解釈できる. 加えて、本研究により、これまで前弧域のスラブ内地震での報告[Hasemi and Horiuchi, 2010]のみだった高周波帯域に卓越する後続波が背弧域で発生するスラブ内地震でも観測され得ること

とが明らかになった。

北海道地域でも、同様の特徴を持つ高周波後続波の観測を確認した。ただし、明瞭な観測は北海道南部や東部に限られ、中軸部では明瞭な観測が認められなかった。

(2) 高周波後続波の伝播経路の検討

本研究では高周波後続波を単散乱波と仮定し、その伝播経路を SSA 解析で推定した。単散乱波の仮定は、高周波後続波がある 1 つの散乱体での散乱した波群であると単純化すること意味する。したがって本解析で得られた結果は後続波の最大振幅の到達タイミングを説明する散乱体の位置を示す。

東北日本地域では広範囲のスラブ内地震で高周波後続波が観測された。そこで、島弧直交方向に 5 つの測線を設定し、その断面上での伝播経路を検討した。解析結果は、高周波後続波が東北日本前弧域下の深さ 30-80 km 程度に存在する散乱体を経由した波群であることを示した(図 2)。このような散乱体位置は、解析を行った 5 つの測線すべてで確認された。また、深さ範囲は、高周波後続波が下部地殻からスラブ最上部付近に存在する不均質構造によって励起された波群であることを示唆する。なお、本解析で使用した地震と観測点の配置では推定された散乱点深さに大きな不確定性が残る。一方で、高周波後続波の長い継続時間は散乱体が広がりを持った分布であることを暗に示している。したがって、今後、本解析で推定された散乱体の深さの広がりが実際の不均質構造を示すかどうかを精査する必要があるだろう。

特に背弧域で発生したスラブ地震の高周波後続波に対しては、震源から前弧域に向かって放出された地震波が、前弧域の深さ 30-80 km 付近で散乱により、背弧域に向かって大きく伝播方向を変える、という伝播経路が考えられる。この伝播経路は、高周波後続波が背弧域のマントルウェッジに存在する高減衰領域[e.g., Tsumura et al., 2000; Nakajima et al., 2013]を迂回するような伝播経路を持つ波群であることを意味する。すなわち、高周波後続波は、本質的には沈み込み帯前弧域に散乱体が存在することで励起した波群であるものの、その観測には沈み込み帯に存在する減衰構造も同様に寄与していることが示唆された。

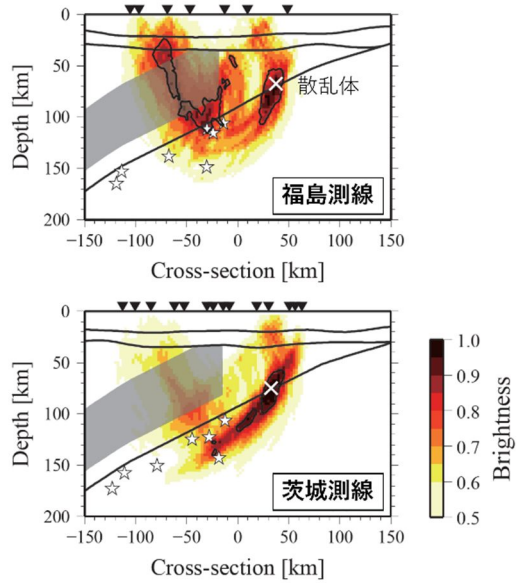


図 2 散乱体位置の推定結果の一例 [Shiina et al., 2021 を加筆・修正]。

(3) マントルウェッジにおける S 波減衰特性の推定

コーダ規格化法を用いて東北日本沈み込み帯のマントルウェッジにおける S 波減衰特性を調べた結果、前弧域に比べて、背弧域の S 波減衰は 2-4 倍程度強いことが明らかになった(図 3)。例えば、高周波後続波が明瞭に観測された 8-16 Hz では、前弧域では $Q_s^{-1} \sim 0.0008$ 、背弧域では $Q_s^{-1} \sim 0.002$ が得られた (Q_s^{-1} の値が大きいほど、S 波減衰が強いことを意味する)。これらの値は直達 S 波の伝播経路に沿った平均的な特徴となる。しかしながら、直達 S 波の伝播経路長を考慮すると、マントルウェッジの減衰特性を代表すると考えられる。なお、低周波帯域 (<4 Hz) で直達 S 波が検知できていれば、直達 S 波の振幅がノイズレベルに埋もれた場合もコーダ規格化法の解析に適用した。これは地震波エネルギーが観測点に到達しないことそのものが伝播経路上に高減衰領域が存在することを示すという考えに基づく。これらの波形記録は減衰を過小評価するため、特に高周波帯域において、現実のマントルウェッジの減衰コントラストはより大きい可能性がある。

また、北海道地域においてスペクトルインバージョン法を適用した 3 次元 S 波減衰構造モデルの推定を行った。信頼性が担保される領域の端にはなるものの、火山直下を中心にマントルウェッジの S 波減衰が大きくなることを明らかにした。

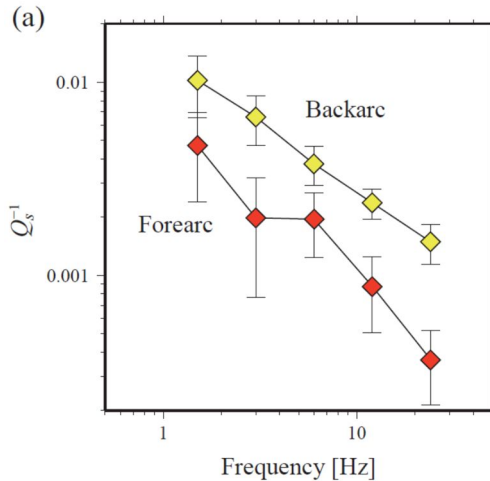


図 3 東北日本沈み込み帯(赤)前弧域と(黄)背弧域の S 波減衰特性 [Shiina et al., 2021 を加筆・修正]。

(4) 高周波地震波伝播の数値シミュレーション

モンテカルロ法を用いた数値的地震波エンベロープ合成法[Yoshimoto et al., 2000]を用いて、高周波帯域における地震波伝播のシミュレーションを行い、高周波後続波の観測と地震波散乱構造ならびに減衰構造との関係を検討した。S波速度構造として、一様モデルおよび沈み込み帯の代表的な層構造を仮定したモデル(V_{3D} モデル)の2通りを仮定した。また、S波減衰構造として、減衰の無い弾性体モデルと一様モデル、沈み込み帯の層構造モデル(Q_{3D} モデル)、 Q_{3D} モデルに対して背弧マントルウェッジに高減衰領域を仮定した Q_{MW} モデルの4通りを仮定した。なお、沈み込み帯の代表的な層構造モデルには、上部地殻と下部地殻、マントルウェッジ、沈み込む太平洋スラブを仮定した。

地震波散乱を考慮しない場合、合成されたエンベロープ波形には直達波および既知の速度不連続面(モホ面やプレート境界面など)において励起した反射面のみが認められ、高周波後続波に対応する波群は現れなかった。この結果から、高周波後続波の観測には散乱構造が寄与していることが実験的に確かめられた。

地震波散乱を考慮した上で、沈み込み帯の代表的な減衰構造(Q_{3D} モデル)を与えると、高周波帯域における後続波をエンベロープ波形として合成された。特に、背弧マントルウェッジに高減衰領域を与えることで、観測された高周波後続波と類似した特徴を再現できることがわかった。また、長い継続時間はS波速度構造も共に与えたモデル($V_{3D} \times Q_{MW}$ モデル)において再現された。

高周波後続波の特徴を高精度で再現するシミュレーション条件の探索には至っていないが、現時点において、特に背弧域で発生したスラブ内地震の高周波後続波と地震波散乱構造・減衰構造の関係について以下の制約が与えられると考えている：

- ・ 高周波後続波は前弧域に存在する散乱体が関連した後続波である。
- ・ 背弧マントルウェッジの高減衰領域の存在が直達S波振幅を小さくする。その結果、高周波後続波の振幅が相対的に大きくなり、その観測が強調される。
- ・ 散乱体分布の広がり示唆するとともに、島弧地殻内部に散乱波が滞留することで高周波後続波の継続時間を伸ばしていると考えられる。

以上の解析から、本研究で対象とした高周波後続波は、本質的には沈み込み帯前弧域に分布する散乱体が寄与した後続波であると考えられる。しかしながら、東北日本沈み込み帯で広く、かつ比較的明瞭な観測には、背弧域における高減衰領域の分布が密接に関わると考えられる。東北日本弧と千島弧が衝突に関連して火山フロント下の地震波減衰が弱い北海道中軸部で明瞭な観測が認められなかったことから、高周波後続波の観測に対する減衰構造の影響の強さがうかがえる。

対象とした高周波後続波が地震波散乱構造だけでなく、減衰構造にも敏感な波群であることが明らかになった。このため、本課題で当初目的としていた沈み込み帯前弧域の短波長不均質構造の制約に対する研究成果は、東北日本沈み込み帯の前弧域において散乱体が分布するおおよその範囲を示すにとどまる。一方、高周波後続波が減衰構造にも敏感であるという事実は、これまであまり進んでいない沈み込み帯のS波減衰構造の研究において高周波後続波が重要なツールとなり得ることを示し、その活用により、今後沈み込み帯のダイナミクスに対する理解が進展することが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Shiina Takahiro, Katsumata Kei, Yomogida Kiyoshi, Kato Aitaro	4. 巻 73
2. 論文標題 Attenuation contrast in mantle wedge across the volcanic front of northeastern Japan that controls propagations of high-frequency S-wave later phases	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 33
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-021-01361-z	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 -

1. 著者名 Nakamura Ryoichi, Shiina Takahiro	4. 巻 71
2. 論文標題 Three-dimensional S-wave attenuation structure in and around source area of the 2018 Hokkaido Eastern Iburu Earthquake, Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 114
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-019-1095-6	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7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 椎名高裕, 勝俣啓, 蓬田清, 加藤愛太郎
2. 発表標題 Attenuation contrast in mantle wedge across the volcanic front of NE Japan that controls propagations of high-frequency S-wave later phases
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 蓬田清, 益田英勝, 椎名高裕, 勝俣啓
2. 発表標題 北海道火山フロント周辺における地震波の散乱・減衰構造の局所的変動
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 城戸口和希, 河原純, 椎名高裕
2. 発表標題 沈み込む海洋性地殻内部を伝播するガイド波の数値シミュレーション
3. 学会等名 日本地震学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 椎名高裕・勝俣敬, 蓬田清, 加藤愛太郎
2. 発表標題 スラブ内地震で観測される高周波後続波と東北日本下のS波減衰構造
3. 学会等名 日本地震学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shiina, T., K. Katsumata, K. Yomogida, and A. Kato,
2. 発表標題 Attenuation structure in northeastern Japan inferred from characteristic high-frequency wave records of intraslab earthquakes
3. 学会等名 AGU 2019 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shiina, T., K. Katsumata, K. Yomogida, and A. Kato
2. 発表標題 Strong S-wave attenuation in the mantle wedge beneath the NE Japan: Possibly control high-frequency wave propagations of intraslab earthquakes
3. 学会等名 JpGU Meeting 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村亮一, 椎名高裕
2. 発表標題 北海道における3次元S波減衰構造
3. 学会等名 JpGU Meeting 2019
4. 発表年 2019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

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