

令和元年6月20日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04045

研究課題名(和文)沈み込み帯へのインプット：海底地震観測から探る海溝海側太平洋プレートの構造不均質

研究課題名(英文) Input into subduction zone: Structure heterogeneity of incoming Pacific plate investigated through the OBS data

研究代表者

尾鼻 浩一郎 (OBANA, Koichiro)

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：10359200

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：海溝軸からアウターライズ領域で得られた海底地震観測データを用いて、海洋地殻・マンツルの地震学的構造を解析し、海洋プレートに水がどのようにとりこまれ、沈み込み帯深部へと輸送されていくのかを明らかにすることを目指した。トモグラフィ解析からは、海溝海側の海洋性マンツル最上部の地震波速度は海溝軸に近づくにつれて全体的に低下しており、最大1-3%程度の水が取り込まれる一方で、地震活動と関連した不均質構造を持っていることを示した。また、スラブ内を伝播する地震波を使った解析からアウターライズ領域ではプレートの屈曲によって新たな亀裂が形成され、地震波速度異方性が発達していることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

固体地球表面の約6割を占める海洋プレートは、地球規模の物質循環に大きな役割を果たしているが、本研究の成果は海洋性マンツルの最上部少なくとも15km程度が含水化している可能性とともに、アウターライズにおけるプレート内地震活動と関連した不均質構造を持つことを示した。この結果は、アウターライズ地震に関連する可能性のある大規模なプレート内正断層の分布を地震波速度構造から推定できる可能性を示すとともに、沈み込んだスラブからの脱水を通じてマンツルに供給される水の量や、スラブ内の地震活動を考える上でも重要である。

研究成果の概要(英文)：We investigated oceanic plate hydration in the trench-outer rise region of the Japan Trench on the basis of the seismic velocity structure, as estimated by a tomographic analysis of data from ocean bottom seismograph arrays. This analysis demonstrates a seismic velocity reduction within the uppermost oceanic mantle of the incoming Pacific plate in the direction toward the trench axis. The observed V_p changes suggest that water content in the uppermost oceanic mantle increases by about 1 to 3 wt% at the maximum. Moreover, the V_p structure of the incoming plate shows spatial heterogeneity related to mantle seismicity. The seismic anisotropy estimated by using Po-to-s converted waves shows that fast polarization directions were oriented in trench-parallel directions near the trench and in the NNW-SSE directions in the seaward region. The pattern change of polarization direction would correspond to bending-related cracks and normal faults created in the outer-rise region.

研究分野：地震学

キーワード：アウターライズ 海洋プレート 日本海溝 地殻・マンツル構造 太平洋プレート

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 海洋プレートの含水化と水輸送

固体地球表面の約6割を占める海洋プレートは、海溝からの沈み込みによる地球内部への水輸送を通じて、地球規模の物質循環に大きな役割を果たしている(e.g., Faccenda, 2014, Tectonophysics, 図1)。特に海溝海側アウターライズ領域では、沈み込みに伴う海洋プレートの屈曲により海洋プレート浅部に伸張応力が生じ、多数の正断層によりホルスト・グラベン構造が形成されるとともに、アウターライズ地震と呼ばれる大規模のプレート内正断層地震が発生している。このような場においては、正断層を通じて海水が海洋プレート内に取り込まれ、海洋地殻およびマンテルが含水化され、最終的に海溝から地球内部へ沈みこんでいくと考えられている。

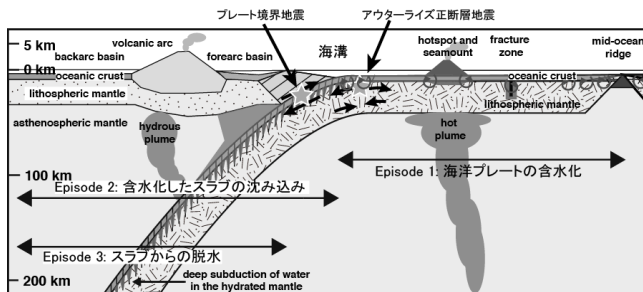


図1：海洋プレートによる水輸送の模式図。
Faccenda (2014, Tectonophysics)に加筆。

沈み込んだスラブからの脱水は、地震活動(Nakajima et al., 2011, GRL)やマグマ生成(Kimura and Nakajima, 2014, Geochim. Cosmochim. Acta)に影響していると考えられている。岩石学的知見に基づく推計では、海洋性地殻はほぼ完全に含水化しているが、マンテルの含水化は限定的であるとされている(Kimura and Nakajima, 2014)。また、含水化が空間的に一様か局在化しているかの違いは、沈み込んだスラブからの脱水を通じてマンテルに供給される水の量を大きく変える(Wada et al., 2012, EPSL)。海溝海側アウターライズにおいて、沈み込み帯へのインプットである海洋プレートがどのように(分布)、どの程度(量、深度)含水化しているかは、沈み込み帯の物質循環と地殻活動を理解する上で極めて重要である。

(2) 沈み込む海洋プレートはどのように含水化しているのか?

アウターライズ正断層地震の分布(Emry et al., 2014, JGR)や二重深発地震面の成因(Peacock, 2001, Geology)から、モホ面下数kmから30km程度の深さまで水が入り、マンテルが蛇紋岩化しているとされる。また、数値モデリングからも海洋プレートの屈曲に伴うマンテル深部の含水化の可能性が示されている(Faccenda et al., 2009, Nature Geo.)。一方、地震学および地球電磁気学的手法による地殻構造探査から、海洋プレートが海溝軸に近づくにつれ変質していく様子が、海溝軸に直交する2次元断面にそってイメージングされている(e.g., Fujie et al. 2013, GRL)。しかし、殆どの場合得られたイメージは海洋性地殻内部およびモホ面直下数kmに限られており、より深部のマンテルの含水化の状態は示されていない。また、海溝軸に平行な2次元構造探査からは、マンテルの蛇紋岩化が測線にそって不均質に起きていることが示されている(Van Avendonk et al., 2011, G-cubed)、P波速度のみによる評価であるうえ、3次元的な分布は明らかではない。つまり、海洋地殻マンテルを含む海洋プレートの含水化の実像は、観測からは未だ捉えられていないのが現状であった。

(3) 2011年東北沖地震以降の活発なアウターライズ地震活動

2011年の東北沖地震以降、新たに開発された超深海型海底地震計を始めとする多数の海底地震計を用いた地震観測が、日本海溝の海溝軸周辺からアウターライズで実施されてきた(Obana et al., 2012, GRL, 2013, EPSL, 2014, EPS, 図2)。通常、アウターライズの地震活動はあまり活発ではなく、また水深も深いため、海溝海側での観測は、それまで殆ど行われていなかった。しかし、2011年の東北沖地震以降、Lay et al. (2011, EPS)により指摘されているように、アウターライズ域では複数のM7クラスの地震を含めて地震活動が活発化しており、海底地震計による観測から海洋性マンテル内でも多くの地震が発生している事が明らかになっている。これらの記録を用いることにより、構造探査ではイメージングが困難な深部を含む海洋プレートの構造や、屈曲に伴う含水化の空間分布を明らかにすることができ、海溝から沈み込む直前の含水化した海洋プレートの実態解明につながる事が期待された。

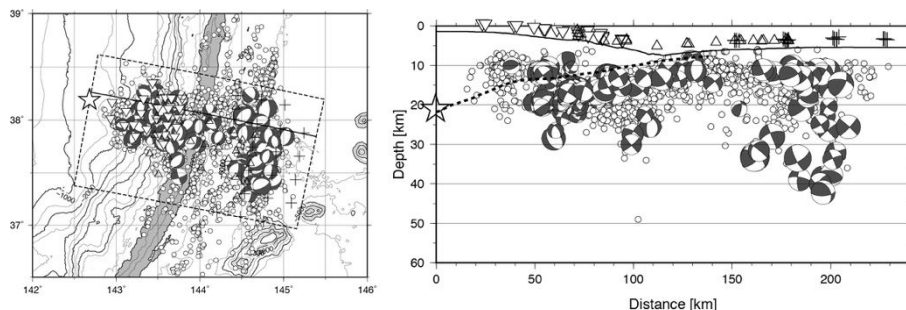


図2：東北沖地震以降のOBS観測による宮城沖日本海溝海溝軸周辺の地震活動(Obana et al., 2012, GRL, 2013, EPSL, 2014, EPS)。印は2011年東北沖地震の破壊開始点(Chu et al., 2011, EPSL)。

2. 研究の目的

本研究の目的は、日本海溝海溝軸周辺からアウターライズの太平洋プレートについて、構造的に幅広いスケールの3次元不均質構造を明らかにすることである。解析には、2011年の東北沖地震以降、多数の海底地震計によって宮城沖を中心とする日本海溝域で得られている走時・波形でデータを用いた。構造解析としては、地震波速度構造解析、散乱・減衰構造解析などの複数の解析手法を用いる事で、走時異常としては捉えきれない短波長の不均質構造を含めて、長波長(数kmから10kmスケール)から短波長(数10mからkmスケール)の構造不均質を、複数の地震学的構造パラメータ(V_p , V_p/V_s , 散乱・減衰強度、周波数依存性等)で3次的に把握する。これにより、従来の構造探査研究の多くが主にP波速度のみから海洋プレートの変質を推定していたものに比べ、より詳細に海洋プレートの構造変質の実態を理解し、日本海溝から沈み込む海洋プレートの地殻・マントルにおける含水化プロセスを、3次的に明らかにすることを目指した。

3. 研究の方法

本研究では、2011年の東北沖地震以降活発に海底地震観測が行われた宮城沖をはじめとする日本海溝の海溝軸周辺ならびに海側斜面で海底地震計によって得られた観測記録に対して、複数の解析手法を用いて海溝海側の海洋性地殻・マントルの構造解析を行った。

(1) トモグラフィによる海洋プレート地震波速度構造解析

2011年東北沖地震以降、宮城沖の日本海溝海溝軸周辺および海溝海側斜面で繰返し実施された海底地震計による地震観測データについて、まず検測作業を行い、解析の基礎となるべき地震カタログの作成を行う。その後、作成されたカタログデータを用いて、Double-Difference法(Zhang and Thurber, 2003, BSSA)を用いて3次元地震波速度構造トモグラフィを行い、比較的大きなスケールの構造不均質を明らかにするとともに、P波速度(V_p)、S波速度(V_s)の空間分布と V_p/V_s 比から、含水化をはじめとする海洋プレートのアウターライズでの変質過程の評価を行った。

(2) 散乱・減衰構造解析:

短波長(数10mからkmスケール)構造不均質に感度を持つ散乱・減衰構造解析は、岩石の性質やクラックの分布形態、流体の分布を反映していると考えられ、断層や第四紀火山に関連する構造不均質を理解する上で極めて有効なデータである。本研究では、これまでの研究でも使用されてきた手法(Takahashi et al., 2007, GJI)を解析に使用する計画であった。しかし、本研究で対象としている領域では、海底地震計直下の堆積層構造が一樣ではなく、堆積層構造の違いを考慮して、観測された波形をより正確にモデル化する必要がある。そこで、堆積層や海底地形の取扱いなどが波形のモデル化にどのように影響を与えるかシミュレーションを通じて検証し、解析手法を詳細に検討した上で、散乱及び減衰構造の解析を実施し、地下の短波長不均質構造の分布を明らかにすることを目指した。

(3) 海洋プレート浅部構造解析

本研究で使用する海底地震計記録は主に短周期のセンサーによって得られたものである。まずは短周期海底地震計記録に対して地震波干渉法解析を適用し、解析手法の適用可能性とその限界について検討を行った上で、堆積層を主とした海洋プレート浅部の速度構造の空間不均質を明らかにすることを目指した。しかし干渉法解析では、堆積層より深部の海洋性地殻の構造を明らかにすることが困難であった。また、トモグラフィ解析から、構造不均質を理解する上で異方性の影響を評価することが重要であると示唆された。そこで、沈み込んだ太平洋プレート内で発生した地震によって励起され海洋マントル中を伝播した地震波が海底地震計で記録された波形を用いて海洋プレート浅部の不均質構造と、海底堆積物とそれより深部の海洋性地殻のS波偏向異方性構造の推定を行った。

4. 研究成果

2011年の東北沖地震発生以降、2011年から2014年にかけて取得された海底地震観測(図3)のデータを使用して、宮城沖日本海溝の海溝軸海側における太平洋プレート最上部マントルの速度構造についてトモグラフィ解析を行い、P波ならびにS波速度構造について評価を行った。解析では、8000個以上の地震の検測データを使用した(Obana et al., 2019, GJI)。得られた速度構造は、海溝海側の海洋性マントル最上部(少なくとも

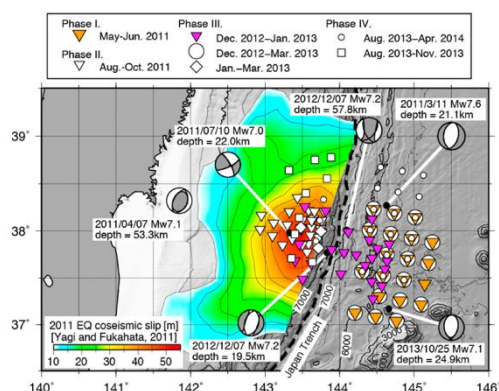


図3: 東北沖地震以降に宮城沖日本海溝海溝軸周辺で行われた海底地震観測(Obana et al., 2012, GRL, 2013, EPSL, 2014, EPS, 2019, GJI)。

水面下 15km まで) の地震波速度が、P 波、S 波ともに海溝軸に近づくにつれて全体的に低下していることを示している (図 4)。速度の低下量は、深度が深くなるにつれて小さくなっており、アウターライズ領域に発達している折れ曲り正断層を通じて、海洋性マントルに水が取り込まれた可能性を示唆している。P 波速度の低下が全て水の影響で生じているとすると、1-3%程度の水が海洋性マントルに取り込まれていることで説明可能である。ただし、Korenaga (2017, EPSL) が指摘するように、より少ない水の量でも説明は可能である。

マントル内の速度低下と水の量をより詳細に議論するためには、P 波速度構造だけでなく、S 波速度構造も合わせて考えることが必要である。一方、Tonegawa et al. (2018, EPS) は、沈み込んだ太平洋プレート内の地震で励起されて海洋マントル中を伝播する Po 波から、海洋性モホ面や基盤で Pos に変換する波を使用して海溝海側太平洋プレートの堆積層や海洋性地殻の異方性を推定した (図 5)。推定された異方性は、堆積層と海洋性地殻ともに海溝近傍で地震波速度の早い方向が海溝軸に平行な方向に変化することを示した。このことは、アウターライズ領域でプレートの屈曲によって新たな亀裂が形成され、それに伴って海洋性プレート内の地震波速度異方性が発達していることを意味している。トモグラフィ解析の P 波走時残差からも、地震波速度構造が海溝軸に平行な方向に早い向きとなる速度異方性を持つことが示されている (Obana et al., 2019, GJI)。一方で、S 波走時残差では異方性が不明瞭である。これは S 波スプリッティングの影響で、検出された S 波走時が系統的に早い S 波速度構造を反映している可能性が考えられる。異方性が海溝軸に近づくにつれて発達していくとすると、推定された Vp/Vs 構造には異方性の発達の影響も含まれている。トモグラフィ解析から推定された Vp/Vs 構造は、Vp、Vs に比べて顕著な変化を示していないが、より詳細な議論には、異方性を考慮した解析が重要である。

海洋性マントルの速度構造は海溝軸に近くなるにつれて全体的に低速度になっているが、その変化は必ずしも一様ではない。宮城沖の日本海溝海溝軸周辺では、震源が深さ 20km より深い地震は、浅部で発生する地震に比べて発生する領域が限られている。トモグラフィ解析の結果と比較すると、深部の地震活動の分布は、マントル内の P 波速度が周囲に比べてやや遅い場所に対応している (Obana et al., 2019, GJI)。同様の傾向は、アウターライズ地震である 1933 年昭和三陸地震 (Mw8.4) の震源域の北部日本海溝でも見られる (Obana et al., 2018, GJI)。アウターライズ領域における海洋性マントルの地震波速度の低下が、プレート折れ曲がりによって海洋プレート内部に発達する正断層にそって水が取り込まれることによって生じている

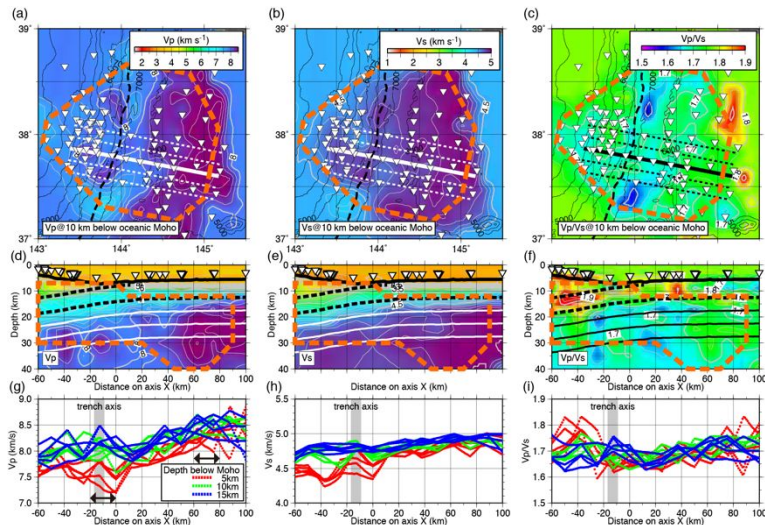


図 4: 宮城沖日本海溝に沈み込む太平洋プレートの海洋性マントルの地震波速度構造。(a, b, c) モホ面下 10km の Vp, Vs, Vp/Vs。(d, e, f) 海溝軸を横切る断面での Vp, Vs, Vp/Vs。(g, h, i) モホ面下 5km, 10km, 15km の海洋性マントルの Vp, Vs, Vp/Vs プロファイル。(Obana et al., 2019, GJI)

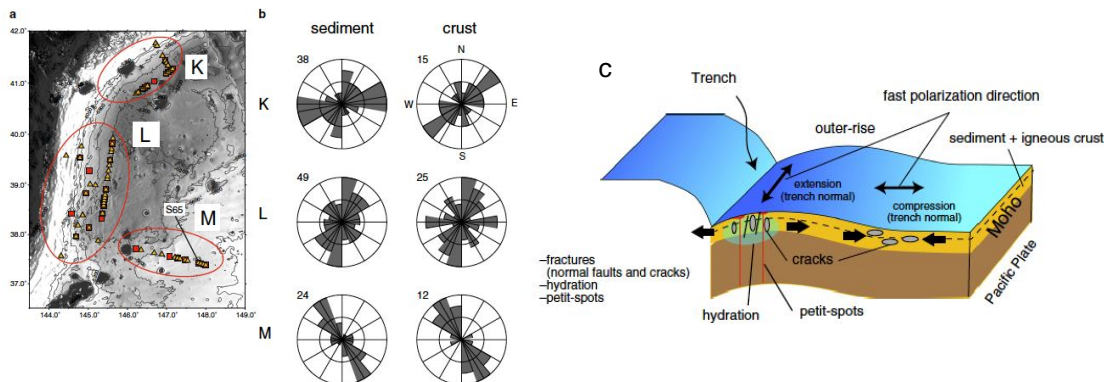


図 5: 東北沖地震以降の沈み込む太平洋プレート内で発生した地震から生じた地震波 (Po-to-s 変換波) から推定された海洋プレート浅部 (堆積層と海洋性地殻) の異方性の空間変化 (a, b) と、その原因の解釈図 (c)。(Tonegawa et al., 2018, EPS)

(Faccenda et al., 2009, Nature Geo.)とすると、海洋性マントルに達する大規模なプレート内正断層の分布を地震波速度構造から推定できる可能性が考えられる。また、海洋性マントルが不均質に含水化しているとする、沈み込んだスラブからの脱水を通じてマントルに供給される水の量や、スラブ内の地震活動にも影響を与えると考えられる。

なお、散乱・減衰構造解析では、宮城沖海溝周辺を対象として 4-8Hz、8-16Hz、16-32Hz の波形エンベロープを用いて構造推定を実施した。その結果、陸側プレートの海溝軸付近で散乱が最も強く、アウターライズ領域で発生した M7 クラスの 3 つの地震の震源域付近でも、やや散乱が強いことが明らかになった。震源域では 16-32Hz での散乱係数が低周波数帯域に比べて大きいという特異性が共通してみられ、大地震で形成された破碎構造と関連した構造の可能性が考えられる。ただし、本研究での解析を通じて、散乱と内部減衰を正確に分離するには尤度関数等の修正が必要であることが新たに分かり、それを解決するため手法の検証と改善を進めた。また、本研究で作成したカタログデータについても、広く研究に用いられるよう、データ公開に向けた作業を行った。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 5 件)

Koichiro Obana, Gou Fujie, Tsutomu Takahashi, Yojiro Yamamoto, Takashi Tonegawa, Seiichi Miura, Shuichi Kodaira, Seismic velocity structure and its implications for oceanic mantle hydration in the trench-outer rise of the Japan Trench, *Geophys. J. Int.*, 査読有, 2019, doi:10.1093/gji/ggz099

Takashi Tonegawa, Koichiro Obana, Gou Fujie, Shuichi Kodaira, Lateral variation of the uppermost oceanic plate in the outer-rise region of the Northwest Pacific Ocean inferred from Po-to-s converted waves, *Earth, Planets and Space*, 査読有, 2019, doi: 10.1186/s40623-018-0880-y

Koichiro Obana, Yasuyuki Nakamura, Gou Fujie, Shuichi Kodaira, Yuka Kaiho, Yojiro Yamamoto, Seiichi Miura, Seismicity in the source areas of the 1896 and 1933 Sanriku earthquakes and implications for large near-trench earthquake faults, *Geophys. J. Int.*, 査読有, 2018, 212, 2061-2072, doi:10.1093/gji/ggx532

尾鼻浩一郎、藤江剛、アウターライズ地震学 海溝海側太平洋プレートの地殻構造と地震活動、*地学雑誌*、査読有、126 巻、2017、113-123、doi:10.5026/jgeography.126.113
森下 知晃、黒田 潤一郎、小野 重明、藤江 剛、山野 誠、中西 正男、尾鼻 浩一郎、中村 恭之、斎藤 実篤、小平 秀一、木村 純一、古い海洋プレートの沈み込み直前での屈曲断層形成に伴う加水作用解明に向けた海洋掘削計画概要、*地学雑誌*、査読有、126 巻、2017、247-262、doi: 10.5026/jgeography.126.247

[学会発表](計 18 件)

Koichiro Obana, Yasuyuki Nakamura, Gou Fujie, Seiichi Miura, Shuichi Kodaira, Seismicity and seismic velocity structure around the trench axis and outer rise region along the Japan Trench, 2019 GeoPRISMS Synthesis Theoretical and Experimental Institute, 2019.

Koichiro Obana, Gou Fujie, Yasuyuki Nakamura, Tsutomu Takahashi, Yojiro Yamamoto, Yuka Kaiho, Seiichi Miura, Shuichi Kodaira, Masanao Shinohara, Intra-plate seismicity and structure heterogeneity of incoming/subducting Pacific plate along the Japan trench based on the ocean bottom seismograph observations, American Geophysical Union Fall meeting, 2018.

尾鼻浩一郎、藤江剛、山本揚二郎、高橋努、中村恭之、海宝由佳、三浦誠一、石原靖、小平秀一、篠原雅尚、海底地震観測による日本海溝海溝軸周辺からアウターライズ域の地震活動、日本地震学会 2018 年度秋季大会、2018

Koichiro Obana, Gou Fujie, Yasuyuki Nakamura, Tsutomu Takahashi, Takashi Tonegawa, Yojiro Yamamoto, Yuka Kaiho, Seiichi Miura, Shuichi Kodaira, Seismic Velocity Variations in the Uppermost Oceanic Mantle of the Incoming Pacific Plate along the Japan Trench, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 15th Annual Meeting, 2018.

尾鼻浩一郎、藤江剛、中村恭之、高橋努、山本揚二郎、海宝由佳、三浦誠一、石原靖、小平秀一、篠原雅尚、Distribution of Intra-plate seismicity in trench-outer rise region along the Japan Trench based on ocean bottom seismograph observations、日本地球惑星科学連合 2018 年大会、2018

高橋努、尾鼻浩一郎、小平秀一、Transdimensional imaging of scattering and intrinsic Q structures around the Japan Trench off Miyagi, northeastern Japan、日本地球惑星科学連合 2018 年大会、2018

Takashi Tonegawa, Koichiro Obana, Gou Fujie, Shuichi Kodaira, Lateral variation of seismic structure of the uppermost Pacific Plate in the Northwest Pacific Ocean, American Geophysical Union Fall meeting, 2017.

高橋努、尾鼻浩一郎、小平秀一、宮城沖日本海溝周辺における散乱および内部減衰の空間変化、日本地震学会 2017 年度秋季大会、2017

尾鼻浩一郎、中村恭之、藤江剛、小平秀一、海宝由佳、山本揚二郎、三浦誠一、海底地震観測による 1933 年昭和三陸地震震源域の地震活動、日本地震学会 2017 年度秋季大会、2017
Koichiro Obana, Gou Fujie, Tsutomu Takahashi, Takashi Tonegawa, Yojiro Yamamoto, Shuichi Kodaira, Masanao Shinohara, Structure of the incoming/subducting Pacific Plate in the central part of the Japan Trench: Results from repeated ocean bottom seismograph observations, IAG-IASPEI, 2017.

Koichiro Obana, Gou Fujie, Tsutomu Takahashi, Takashi Tonegawa, Yojiro Yamamoto, Shuichi Kodaira, Masanao Shinohara, Structure of the incoming Pacific Plate subducting into the central part of the Japan Trench: Results from the repeated ocean bottom seismograph observations after the 2011 Tohoku-Oki earthquake, JpGU-AGU Joint Meeting, 2017.

Koichiro Obana, Gou Fujie, Shuichi Kodaira, Masanao Shinohara, Seismicity and seismic velocity structure in trench-outer rise region revealed from the OBS observations in the Japan Trench, EGU General Assembly, 2017.

Koichiro Obana, Gou Fujie, Shuichi Kodaira, Tsutomu Takahashi, Yojiro Yamamoto, Seiichi Miura, Masanao Shinohara, Seismic velocity structure of the incoming Pacific Plate subducting into the central part of the Japan Trench revealed by traveltimes tomography using OBS data, American Geophysical Union Fall meeting, 2016.

尾鼻浩一郎、藤江剛、小平秀一、高橋努、山本揚二郎、三浦誠一、篠原雅尚、宮城沖日本海溝海溝軸周辺からアウターライズ域における太平洋プレートの地震波速度構造、日本地震学会 2016 年度秋季大会、2016

高橋 努、尾鼻 浩一郎、小平 秀一、次元可変なパラメータ空間でのコーダ波解析から推定した東北沖アウターライズ地域の散乱係数の空間変化、日本地震学会 2016 年度秋季大会、2016

Koichiro Obana, Gou Fujie, Shuichi Kodaira, Tsutomu Takahashi, Yojiro Yamamoto, Takeshi Sato, Mikiya Yamashita, Yuka Kaiho, Yasuyuki Nakamura, Seiichi Miura, Seismicity and its relation to the bending-related faults in the incoming Pacific Plate along the Japan Trench, Bend-Fault serpentinization (BFS+H-ODIN) workshop, 2016.

Koichiro Obana, Gou Fujie, Shuichi Kodaira, Seismicity Observations in Trench-outer Rise Region along the Japan Trench by Using Ultra-Deep Ocean Bottom Seismographs, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 13th Annual Meeting, 2016.

Koichiro Obana, Gou Fujie, Shuichi Kodaira, Tsutomu Takahashi, Yojiro Yamamoto, Takeshi Sato, Mikiya Yamashita, Yuka Kaiho, Yasuyuki Nakamura, Seiichi Miura, Seismicity and its relation to the bending-related faults in the incoming Pacific Plate along the Japan Trench, Japan Geoscience Union Meeting, 2016(招待講演)

〔その他〕

地殻構造探査データベースサイト（所属研究機関の海底地震計による地殻構造探査、海底地震観測データ(本研究で使用した地震観測データを含む)に関する web ページ)

http://www.jamstec.go.jp/obs/mcs_db/j/index.html

6 . 研究組織

(1)研究協力者

研究協力者氏名：高橋 努

ローマ字氏名：(TAKAHASHI, Tsutomu)

研究協力者氏名：山本 揚二郎

ローマ字氏名：(YAMAMOTO, Yojiro)

研究協力者氏名：利根川 貴志

ローマ字氏名：(TONEGAWA, Takashi)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。