

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04122

研究課題名(和文) 広帯域海底地震計観測に基づく北海道襟裳沖スロー地震とプレート境界構造の時空間変動

研究課題名(英文) Space time study in slow earthquake activity and surrounding seismic structure southern off Hokkaido using broad-band ocean bottom seismograms

研究代表者

東 龍介 (Azuma, Ryosuke)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：70620540

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では海底地震観測に基づき千島・日本海溝沿いで著しく活発な北海道襟裳沖スロー地震の実態に迫った。広帯域地震観測に基づき広帯域スロー地震や沈み込んだ海山麓の微動・微小地震活動を初めて発見した。新旧観測網に基づき微動活動間隔の長期化を明らかにし、その原因に2003年十勝沖地震の余効すべり推移の影響を唱えた。スロー地震活動に伴い期待される流体移動起因の構造変化は、発生場の深さや活動の継続時間に依って観測されない可能性を指摘した。S-netで観測された常時微動の相互相関解析に基づく表面波トモグラフィにより、巨大地震に対応する高速度領域およびスロー地震分布に対応する低速度領域がイメージされた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では巨大地震の発生が浅部スロー地震の活動に密接に関わることを明らかにした。さらに、そうした陸からはるか沖合の海底下における地震活動の実態把握のためには活動域直上での観測が必要不可欠であることを改めて主張した。北海道襟裳沖は2011年東北沖地震と千島海溝巨大地震の震源域の境界に位置することから、本研究の成果はスロー地震と巨大地震の関わり の 解 明 の み ならず、巨大地震発生域間のプレート相互作用の理解に向け重要な意義を持つ。千島海溝巨大地震の発生は今後30年間に非常に高い確率で切迫し、地震津波の減災の観点からもこの海域における研究の重要性は高い。観測の継続によって一層意義深い研究となり得る。

研究成果の概要(英文)：This study clarified the state of the slow earthquake activity off Erimo, Hokkaido, through several OBS observations since 2003. A broadband OBS discovered the presence of broadband slow earthquakes and the new activity of tectonic tremors and burst-type repeating earthquakes at the downdip rim of the subducted seamount. Tremor activities since 2003 remain in their spatial distribution but elongate the recurrent interval influenced by the decaying afterslip of the 2003 Tokachi-oki earthquake. While slow earthquakes are thought to relate to interplate fluid migration, we indicated that an appearance of fluid-move-related structural change would depend on the depth and duration of activities. Surface wave tomography based on cross-correlation analysis of ambient noise observed at S-net stations imaged high- and low-velocity regions corresponding to huge earthquakes and slow earthquakes, respectively.

研究分野：海底地震学

キーワード：日本・千島海溝会合部のスロー地震活動 微動活動の時空間発展 沈み込んだ海山麓のバースト微小地震活動 巨大地震発生がスロー地震活動に及ぼす影響 地震活動に伴う海底下構造の時空間変化 スロー地震発生場のプレート境界構造

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

2003年十勝沖地震と2011年東北地方太平洋沖地震で未破壊の北海道襟裳沖は、スロー地震の一種である超低周波地震(VLFE)や浅部テクトニック微動の活動度が日本・千島海溝沿いで際立って高い領域で、大地震の破壊域との間に空間的相補性がある。そうした諸々の地震活動の空間分布は沈み込んだ海山のような複雑なプレート境界構造に規定される可能性がある。さらに、巨大地震の破壊の広がりにはスロー地震活動によっても制約されると考えられるため、襟裳沖でのプレート境界すべり特性の理解は、今後30年間に発生が切迫する千島海溝巨大地震の主破壊域(十勝・根室沖)の広がりの議論につながる。

襟裳沖では日本海溝海底地震津波観測網 S-net で微動が、陸上広帯域地震観測網 F-net で VLFE がそれぞれ観測されたが、活動域直上での VLFE 観測の実施例がなく活動の詳細を把握できていない。そのため両者のデータ特性の違いと直上観測の有無による震源の決定精度の問題で、スロー地震同士的位置関係や海山などプレート境界構造との直接的比較が困難であった。加えて、VLFE の分布が東北沖地震前後で変化しないことが明らかとなっていることから微動の分布も現在と同じ場所で活動していたと予想されるが、東北沖地震前の微動活動の実態は未把握のままである。一方、スロー地震の発生には陸側地殻の破碎に伴う固着強度の低下や、海洋プレート上の海山や堆積物が運び込んだ流体によるプレート境界の高間隙圧化の影響が考えられる。こうしたスロー地震発生条件を持つ襟裳沖では、スロー地震は震源の移動を伴い活動が時空間的に変化することから、プレート境界流体の分布時空間変化が対応すると予想される。プレート境界流体の分布は地震学的構造の変化として観測される可能性があるが、南海トラフやニュージーランド沖でのいくつかの事例報告にとどまり、スロー地震活動とプレート境界構造がどのような時空間的対応関係を持つのか真相解明に至っていない。

2. 研究の目的

本研究はスロー地震がプレート境界の活動であることを確かめ、それらの移動発生に同期してプレート境界面の速度構造が時空間的に変化する様子を捉えることによって、微動の移動がプレート間流体移動によって生じることを検証する。また、スロー地震域とその周辺の広域で海底下構造を明らかにすることによって、地震活動の空間相補性がどのようなプレート境界構造に規定されるのかを明らかにする。

3. 研究の方法

スロー地震の震源や発震機構を精度良く推定する必要があり、活動域直上の観測データが不可欠である。そこで、(1) S-net 観測網の空白域となっている襟裳沖のスロー地震活動域の真上で、広帯域海底地震計(OBS)による VLFE 観測を実施し、S-net との併合解析による高精度の震源推定によって、スロー地震および通常地震の時空間分布を把握する。さらに、スロー地震域直上で東北沖地震前に実施された古い長期稠密 OBS 観測の (2) エンベロープ相関解析により過去の微動活動の実態を把握、および (3) 常時微動の自己相関解析により微動や通常地震の活動に伴う海底下浅部構造の時空間変化を調べる。(4) S-net で観測される常時微動の相互相関解析に基づく表面波トモグラフィーによって、スロー地震活動域を含む前弧海域下の3次元 S 波構造を推定する。

4. 研究成果

(1) 襟裳沖に2019年7月に展開した広帯域 OBS を2020年10月に回収し、VLFE 地震波形の周波数解析() および、OBS と S-net を個別にエンベロープ相関解析による微動・通常地震の検出と併合処理による通常地震の震源再決定() を行なった。

F-net 解析により作成された VLFE カタログ(海洋研究開発機構・馬場氏私信)と照合して OBS による VLFE シグナルの観測状況を調べるところ、脈動の長周期側(>10秒)だけでなく短周期側(0.8-2 Hz)にも高いパワースペクトル密度を持つ広帯域スロー地震を複数個検出した。広帯域スロー地震は南海トラフでその存在が指摘されているが、千島・日本海溝沿いでは初めての観測事例である。帯域スロー地震の震源がどれも OBS のごく近傍にあり、遠方の F-net では短周期側の特徴が失われていることから、広帯域特性の把握には活動域直上での観測が重要であることを示した。一方、本研究では OBS による VLFE 震源の推定が課題として残って

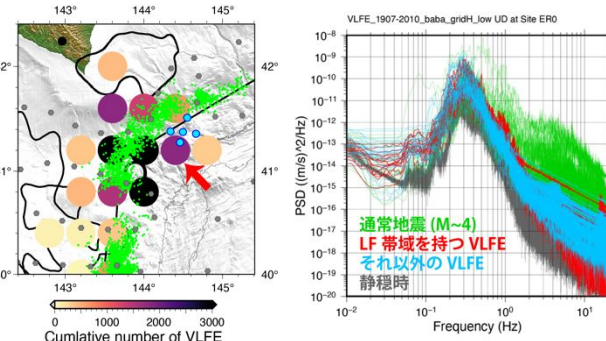


図1-1. 左) スロー地震の分布。青丸：広帯域 OBS 観測点。大円の色付け：2003年以降の VLFE 積算発生数 (after Baba+2020)。緑点：微動分布 (Nishikawa+2019)。右) 広帯域 OBS で観測された VLFE (左図中赤矢印を震源) と通常地震のパワースペクトル密度の比較。

重要であることを示した。一方、本研究では OBS による VLFE 震源の推定が課題として残って

おり、広帯域スロー地震が持つ短周期側の波形を利用することでより高精度の震源を得られる可能性がある。

OBS 観測期間中、2019 年 7 月（活動 ）と 2020 年 2 月（活動 ）に震源移動を伴う微動の活発化、2020 年 6 月末から 9 月にかけて微小地震の群発を 2 度観測した。OBS で検出した微動

は S-net で検出した帯状の微動発生帯の海溝側かつプレート境界周辺に分布、群発地震はその両脇に相補的に分布し、沈み込んだ海山上での活動はみとめられなかった。活動 では震源移動が微動帯沿いだけでなく海溝方向にもみとめられ、流体拡散モデルで説明可能な移動速度であることから、この活動推移は流体が海溝沿いとプレート境界浅部方向に拡散した可能性を示唆する。一方、群発地震の実態はイベント間で高い波形相似性を示す複数の相似地震系列がバースト的に繰り返し発生した活動であることがわかった。他の海域では沈み込んだ海山の麓ではスローリップイベント (SSE) に伴う繰り返し地震のバースト発生の観測事例があり、襟裳沖におけるプレート境界浅部でのバースト発生から背景にこの領域では未だ見つかっていない SSE の活動があった可能性が示唆される。

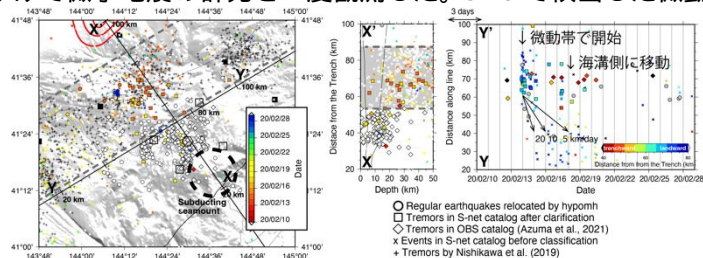


図 1-2. 左) 微動・通常地震の震央分布。本研究で検出した微動を四角と菱形で示す。色付けは 2020 年 2 月に発生した微動活動期間中の日にち。中央 X-X' 測線の鉛直断面に投影した震源分布。色付けは左図に同じ。灰色の領域は Nishikawa+ (2019) による微動帯。右) Y-Y' 測線投影の地震の時空間発展。色付けは海溝軸からの距離。

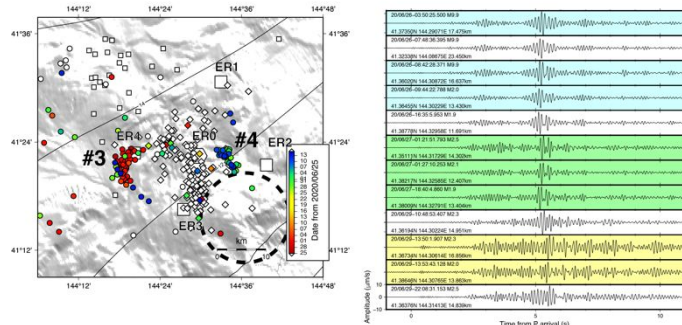


図 1-3. 左) 2020 年 6 月～9 月に発生したバースト微小地震 (期間中の日にちで色付け) の震央分布。シンボルは図 1-2 に同じ。右) バースト微小地震の波形例。相似性グループごとに色分けした。

(2) 三陸沖北部から十勝沖にかけて実施された 2006 年 10 月から 2007 年 6 月の長期稠密観測および 2003 年十勝沖地震直後の余震観測データから検出した微動分布は、S-net で検出されている微動帯と全く一致し、活動範囲が十数年の長期間で普遍であることを明らかにした (図 2-1)。一方で、微動帯の活動様式には、日本海溝側では震源移動を伴う大規模活動、千島海溝側ではバースト的な発生を 2 日程度の間隔で繰り返した後に収束する、といった異なる特徴が存在することが明らかとなった。さらに、十勝沖地震の発生から時間の経過とともに、活動の活発化する間隔が長期化 (図 2-2)、バースト期間が短期化 (図 2-3) していることがわかった。襟裳沖の微動帯では十勝沖地震に伴う余効すべり速度が特に大きく、定常時よりも速い速度のプレート間すべりが活動を促進させたと推察する。したがって、巨大地震直後の微動活動は活動様態が大きく変わり、長い時間をかけて元の定常的な活動に遷移していく可能性が示唆される。

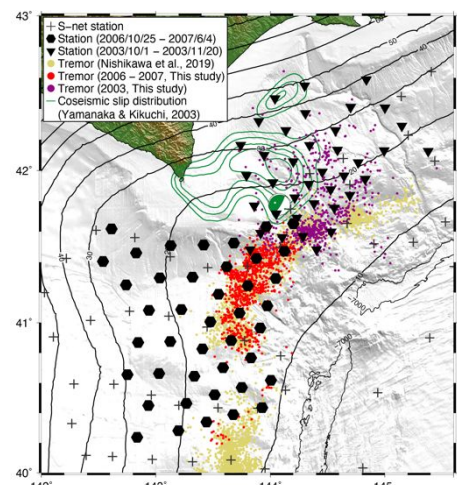


図 2-1. OBS 観測点配置 (六角形: 2006 年 10 月～2007 年 6 月, 逆三角: 2003 年 10～11 月)。赤と紫は本研究で検出した微動。黄色は S-net で検出した微動 (Nishikawa+, 2019)。

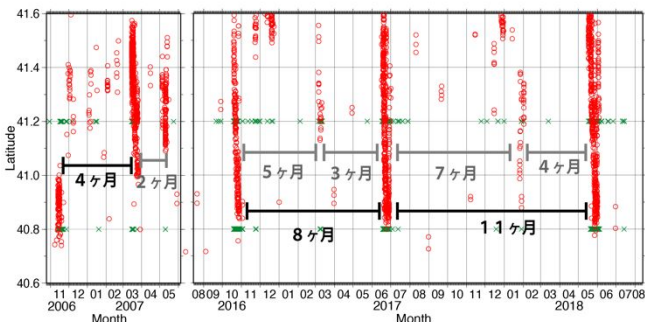


図 2-2. 2006 年 10 月 18～2007 年 6 月 (左) と 2016 年 10 月以降の微動活動。黒で大規模活動間隔、灰色で中規模活動も含めた活動間隔を示す。

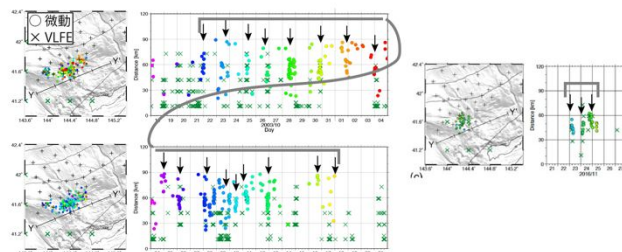


図 2-3. 2003 年 10 月 18～11 月 21 日 (左) と 2016 年 11 月 23～25 日の微動活動。矢印が微動のバースト発生。

(3) 2006–2007 年の長期稠密観測中には、(2) で検出した 3 回の微動活動、観測網近傍での中規模地震、千島海溝中部の巨大地震が 2 度発生した。連続記録の自己相関解析により得られた地震波

速度時系列、日々の自己相関関数間の相関係数時系列にそれぞれの地震活動を対応させたところ、近地地震発生時に地震波速度低下（図3上段）遠地巨大地震発生時には相関係数の有意な低下（図3下段）が認められた。近地地震に伴う速度低下量は震源距離と逆相関にある（図3右上）。地震波形が振り切れたために最大振幅に基づく定量評価が困難であるが、定性的には陸上観測の事例と同様に地震動地盤の損傷による構造の変化と解釈可能である。遠地巨大地震に伴う相関の低下量は海溝側の観測点で際立って大きい（図3右下）。そうした特徴的な分布は前弧先端部に存在するプリズム状堆積物の分布に整合すると思われる、広域構造不均質が関与している可能性が指摘される。一般に相関の時間変化は波動場の時間変化を反映すると考えられており、遠地地震とその余震活動による波動擾乱が特定の構造で生じている可能性がある。一方、微動活動に伴う有意な構造変化はみとめられず、この解析手法によるスロー地震と流体移動の関連性にかかわる根拠は得られなかった。その要因には、スロー地震に伴う構造変化の検出例のある南海トラフやニュージーランド沖に比べて、微動の発生場が深く、活動の継続期間も短いために海底下浅部構造への影響が及ばなかった可能性が考えられる。

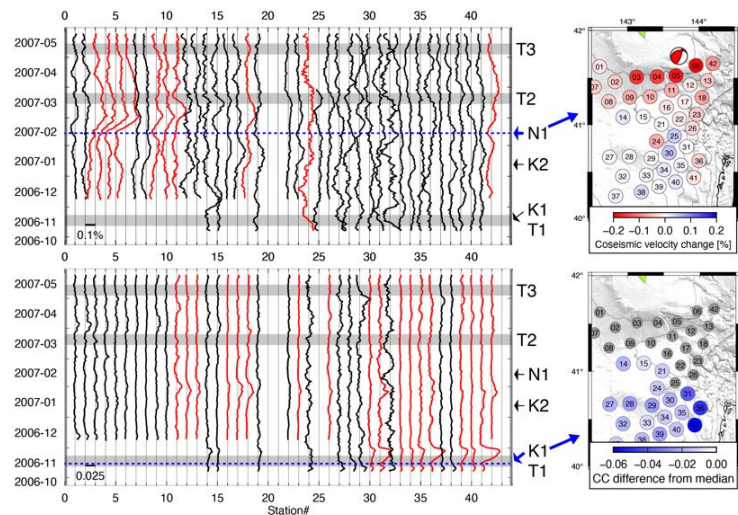


図3. 観測点ごとの地震波速度変化（左上）および日々のACF間最大相関係数（左下）の時系列。T1, T2, T3: 主な微動活動。K1, K2: それぞれ千島列島沖のプレート境界地震（2006年11月15日, Mw8.3）とアウターライズ地震（2007年1月13日, Mw8.1）。N1: 2007年2月17日の近地地震。右上) N1の地震発生に伴う地震波速度変化の空間分布。右下) K1の地震発生に伴う最大相関係数変化の空間分布。

(4) S-netで観測された2016年8月から2019年8月までの3年分の連続記録を使用し、常時微動の相互相関解析に基づく表面波トモグラフィーによって、スロー地震活動域を含む前弧海域下の表面波位相速度マップおよび3次元S波速度構造を推定した。周期14秒のラブ波基本モードの位相速度マップを見ると、2011年東北沖地震および北海道根室沖において巨大地震発生が想定されている微小地震空白域は高速度異常域に位置しているのに対し、スロー地震発生域は低速度領域に位置することがわかった。このことは、上盤内およびプレート境界周辺の構造不均質がプレート境界周辺における地震・スロー地震活動を規定する可能性を示唆している。今後、3次元S波速度構造と地震活動・スロー地震活動との詳細な比較により、構造不均質とプレート境界すべりに関するより詳細な議論を行うことができると期待される。

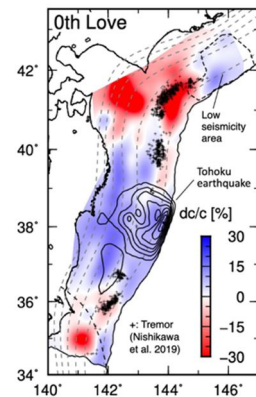


図4. 周期14秒のラブ波基本モードの位相速度マップ。2011年東北沖地震すべり域はIinuma et al. (2012)、根室沖の微小地震空白域はTakahashi and Kasahara (2007)、微動はNishikawa et al. (2019)による。

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 1件）

1. 著者名 Takagi Ryota, Toyokuni Genti, Chikasada Naotaka	4. 巻 224
2. 論文標題 Ambient noise correlation analysis of S-net records: extracting surface wave signals below instrument noise levels	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 1640 ~ 1657
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggaa548	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 Takagi Ryota, Nishida Kiwamu	4. 巻 231
2. 論文標題 Multimode dispersion measurement of surface waves extracted by multicomponent ambient noise cross-correlation functions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 1196 ~ 1220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggac225	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 東 龍介・川久保 晋・高橋 秀暢・太田 雄策・高木 涼太・鈴木 秀市・佐藤 真樹子・日野 亮太・田中 伸一・篠原 雅尚
2. 発表標題 広帯域海底地震計とS-netで捉えられた日本・千島海溝会合部に沈み込む海山近傍の地震活動
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 川久保 晋・東 龍介・日野 亮太・高橋 秀暢・太田 和晃・篠原 雅尚
2. 発表標題 海底余震観測記録の再解析による2003年十勝沖地震 (M8.0) 直後の低周波微動活動
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	R. Azuma, S. Kawakubo, H. Takahashi, R. Hino, Y. Ohta, R. Takagi, S. Suzuki, M. Sato, S. Tanaka and M. Shinohara
2. 発表標題	Seismicity around the subducted seamount in the trench-trench junction, southern off Hokkaido, by a broadband OBS array
3. 学会等名	JpGU Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Takagi R. and K. Nishida
2. 発表標題	Ambient noise tomography in the offshore forearc region along the Japan trench using S-net data
3. 学会等名	JpGU Meeting 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Susumu Kawakubo, Ryosuke Azuma, Ryota Hino, Hidenobu Takahashi, Kazuaki Ohta, Masanao Shinohara
2. 発表標題	Activity of low-frequency tremors and regular earthquakes off Erimo, Hokkaido from 2006 to 2007 by a tremor investigation based on waveform information
3. 学会等名	JpGU Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	川久保晋・東龍介・日野亮太・高橋秀暢・太田和晃・篠原雅尚
2. 発表標題	自己浮上式海底地震形で捉えた2006-2007年の北海道襟裳沖浅部低周波微動活動
3. 学会等名	JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名 Susumu Kawakubo, Ryosuke Azuma, Ryota Hino, Hidenobu Takahashi, Kazuaki Ohta, Masanao Shinohara
2. 発表標題 Shallow low-frequency tremor activity off Erimo, Hokkaido from 2006 to 2007 revealed from pop-up type ocean bottom seismometers
3. 学会等名 Slow Earthquake Workshop 2020 Virtua (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 東龍介・高木涼太・馬場慧・日野亮太・篠原雅尚
2. 発表標題 広帯域地震計とF-netによる北海道襟裳沖の浅部VLFE観測
3. 学会等名 日本地震学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤豪大・東龍介・高木涼太・日野亮太・篠原雅尚
2. 発表標題 稠密OBSアレイ観測から検出された日本海溝 - 千島海溝会合部における地震波速度の時間変化
3. 学会等名 日本地震学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryosuke Azuma, Ryota Takagi, Satoru Baba, Ryota Hino, Masanao Shinohara
2. 発表標題 Shallow VLFE activity at the Japan-Kuril trench junction region revealed from a broadband OBS array and F-net observation
3. 学会等名 International Joint workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takehiro Sato, Ryosuke Azuma, Ryota Takagi, Ryota Hino, Masanao Shinohara
2. 発表標題 Spatio-temporal seismic velocity variation near the Japan-Kuril trenches junction revealed from long-term dense-OBS network observation
3. 学会等名 International Joint workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takehiro Sato, Ryosuke Azuma, Ryota Takagi, Ryota Hino, Masanao Shinohara
2. 発表標題 Attempt of seismic velocity change detection by seismic interferometry using OBSs in the Japan-Kuril trenches junction
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takehiro Sato, Ryosuke Azuma, Ryota Takagi, Ryota Hino, Masanao Shinohara
2. 発表標題 Spatio-temporal seismic velocity variation near the Japan-Kuril trenches junction revealed from long-term dense-OBS network
3. 学会等名 AGU 2022 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤豪大・東龍介・高木涼太・日野亮太・篠原雅尚
2. 発表標題 稠密OBS観測から検出された日本海溝 - 千島海溝会合部における地震学的構造の時間変化と地震活動の関係
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会 (国際学会)
4. 発表年 2023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
研究 分担 者	高木 涼太 (Takagi Ryota) (10735963)	東北大学・理学研究科・助教 (11301)	

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
---------	---------