

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02236

研究課題名（和文）南海トラフ近傍での歪蓄積過程のリアルタイム精密モニタリング

研究課題名（英文）Real-time precise monitoring of strain accumulation process around Nankai Trough

研究代表者

有吉 慶介 (Ariyoshi, Keisuke)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(地震津波予測研究開発センター)・グループリーダー

研究者番号：20436075

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：南海トラフにおける海底地殻変動に伴う歪の蓄積・解放過程を捉えるため、1944年東南海地震の震源域にあたる海底下に長期孔内観測と呼ばれる海底ケーブル式ネットワークに接続された水圧計と真上にある海底水圧計を組み合わせることで、海底地殻変動による体積歪変化を検出してきた。本研究では、海洋擾乱を効果的に除去する手法を開発し、ナノスケール=10<sup>-9</sup>の精度で体積歪変化を検出できる手法を開発した。更に、黒潮大蛇行による誤検知を防ぐため、JCOPEと呼ばれる海洋モデルに基づく海底圧力変化の定量評価も行った。その結果、黒潮蛇行とスロースリップと呼ばれる断層すべり運動の終息時期に相関があることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

南海トラフにおける体積歪変化をナノスケール(10<sup>-9</sup>)で捉える手法を開発した。これにより、断層すべりが1cm生じただけでもリアルタイムで検知できるようになった。その結果、熊野灘でこれまで繰り返し発生したスロースリップイベントについて、2020年3月の時には検知まで5日ほど要したが、2023年3月では発生の翌日に検知し、気象庁に報告するまでの時間を大幅に短縮することが出来た。更に、海洋モデルJCOPEによる海洋擾乱の定量評価の機能も実装し、黒潮蛇行などによる誤検知を防ぐ環境も整えた。これらは地震学・地盤工学・海洋物理学・気象学の融合研究による独自の成果として社会貢献を果たすことが出来た。

研究成果の概要（英文）：To detect crustal deformation along the Nankai Trough, we have monitored pore pressure connected to seafloor cabled network by using hydraulic pressure gauges in the borehole and on the seafloor. In this study, we succeeded in developing analytical method to extract volumetric strain change due to crustal deformation component from the observed pore pressure in nano-scale.

In addition, we have also developed ocean modeling JCOPE to evaluate the oceanic variation, which suggests that there is significant relationship between the Kuroshio meander and the termination of slow slip events.

研究分野：地盤工学

キーワード：海底地殻変動 スロースリップ 間隙圧 黒潮蛇行

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

研究代表者らが所属する海洋研究開発機構では、近い将来に発生確率が高いとされる南海トラフ沿いの熊野灘において、海底下に長期孔内観測システムを設置した。熊野灘は、1944年の東南海地震の震源域とその浅部延長上にあるスロースリップ発生域と重なっている。このうち、長期孔内観測点は、浅部スロースリップの真上に位置し、これを直接検知できる数少ないデータとなっている。一方で、長期孔内観測点は、海底下にあるため、気象・海象の擾乱を受ける。

これらの背景から、スロースリップの見逃し・誤検知などの問題や、スロースリップでは説明のつかない間隙圧の変化があり、発生要因・過程の解明が求められていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、孔内で観測される間隙圧変化から外部擾乱を軽減させ、海底地殻変動成分を高精度で抽出する方法を開発することを目的とする。これにより、地震調査委員会や気象庁検討会などを通じて南海トラフ沿いの地震活動を評価する上で、客観的な情報を提供する。

### 3. 研究の方法

本研究では、(1)孔内観測点の周辺にある DONET 海底水圧計を用いた海洋擾乱の軽減手法の開発、(2)水圧計の機器ドリフト検証のための環境実験と実データ解析、(3)海洋モデル JCOPE を用いた気象・海象擾乱の海底圧力に及ぼす定量評価、(4)スロースリップの開始・終了時刻の高精度推定、の4つを実施した。

(1)の具体的な手順として、DONET 海底圧力計と孔内水圧計の相互相関関数を用いて潮汐応答時間差を推定し、その時間差を用いて、両者の応答比例振幅係数を求めた。これらの情報から、海象擾乱を効率的に軽減させた場合の検証を行った。

(2)は、海底水温・水圧の環境実験を行い、機器ドリフト特性の比例・指数の係数を推定した。このうち、比例係数に関しては、時間変化が生じていないのか、妥当性の検証も行った。

(3)は、JCOPE の最新版である、JCOPE-T DA を熊野灘周辺で適用し、海面高度から海底まで海水密度を鉛直積分したものに大気圧を加えたものを海洋擾乱による海底圧力変化として、実際に観測された海底圧力データとの比較検証を行った。

(4)は、(1)で得られたデータから、スロースリップの可能性のある時間帯を選び出し、(2)の機器特性ドリフト、(3)の気象・海象擾乱のいずれでもない場合、スロースリップが発生した可能性が高いとして、線形回帰分析を評価関数  $L1$  ノルムとして適用することにより、スロースリップの開始・終了時刻を推定した。

### 4. 研究成果

研究成果として、以下の4点が挙げられる。

(1) DONET 海底水圧計は孔内観測点から水平方向に 10 km 以上離れているため(図 1a)、潮汐応答の時間差を考慮する必要があることが分かった。これを適用することにより、C0006 観測点では、ナノスケールレベルでの体積歪変化を抽出することに成功した (Ariyoshi et al., 2021b)。また、 $t$  検定を用いることにより、気象海象擾乱と地殻変動成分の分離およびその信頼度を定量的に評価する手法の開発に成功した (Ariyoshi et al., 2021a)。

(2) 初期ドリフトが解消されるのは3か月程度であることが、環境実験から確かめられた。また、長期経過後であっても、線形トレンドに揺らぎが生じていることも観測データから確認した (Matsumoto and Araki, 2021)。また、機器特性ドリフトを補正する現場校正観測手法を開発・実施した (Machida et al., 2020)。過去(2017年)に観測された海底圧力データを解析した結果、黒潮大蛇行に伴う海底圧力擾乱が生じていることを確かめた (Nagano et al., 2021)。

(3) 海面高度変化に起因する海水自重変化のうち、海底圧力に及ぼすのはアイソスタシー効果によって 20%程度に軽減されることを見出した (Hasegawa et al., 2021)。海洋観測を補完するために、海洋モデル JCOPE に従来に比べてよりリアルタイムのデータを同化する新たなモデル (JCOPE-T DA) を開発した (Miyazawa et al., 2021)。JCOPE-T DA から得られた気象・海象擾乱に起因する海底圧力変化によって、スロースリップの終息を誘発する可能性があることを見出し、プレスリリース発表を行った。この関係性は、ヒ克蘭ギでも日米共同研究から突き止めている (Gomberg et al., 2020)。また、日米共同研究をさらに発展させ、DONET 海底水温計と広帯域地震計を用いて、遠地地震に伴って乱泥流が発生したことも発見した (Gomberg, Ariyoshi et al., 2021)。

(4) (1)の手法を 2020 年 3 月のスロースリップイベントに適用し、断層モデルを推定した。その結果は、海底地質調査によるデコルマおよび超低周波地震のメカニズム解と整合するものとなった(図 1b)。また、(1)のリアルタイム処理を実装し、(3)の週次ルーチン計算を実装した。その結果、(4)の成果として、2023 年 3 月に発生したスロースリップイベントを翌日に検知する

ことに成功した。これらの研究で開発された解析手法は2024年1月に紀伊水道沖に新たに設置された孔内観測データにも適用することが可能なため、初期ドリフトが解消される次年度以降に実装する予定である。

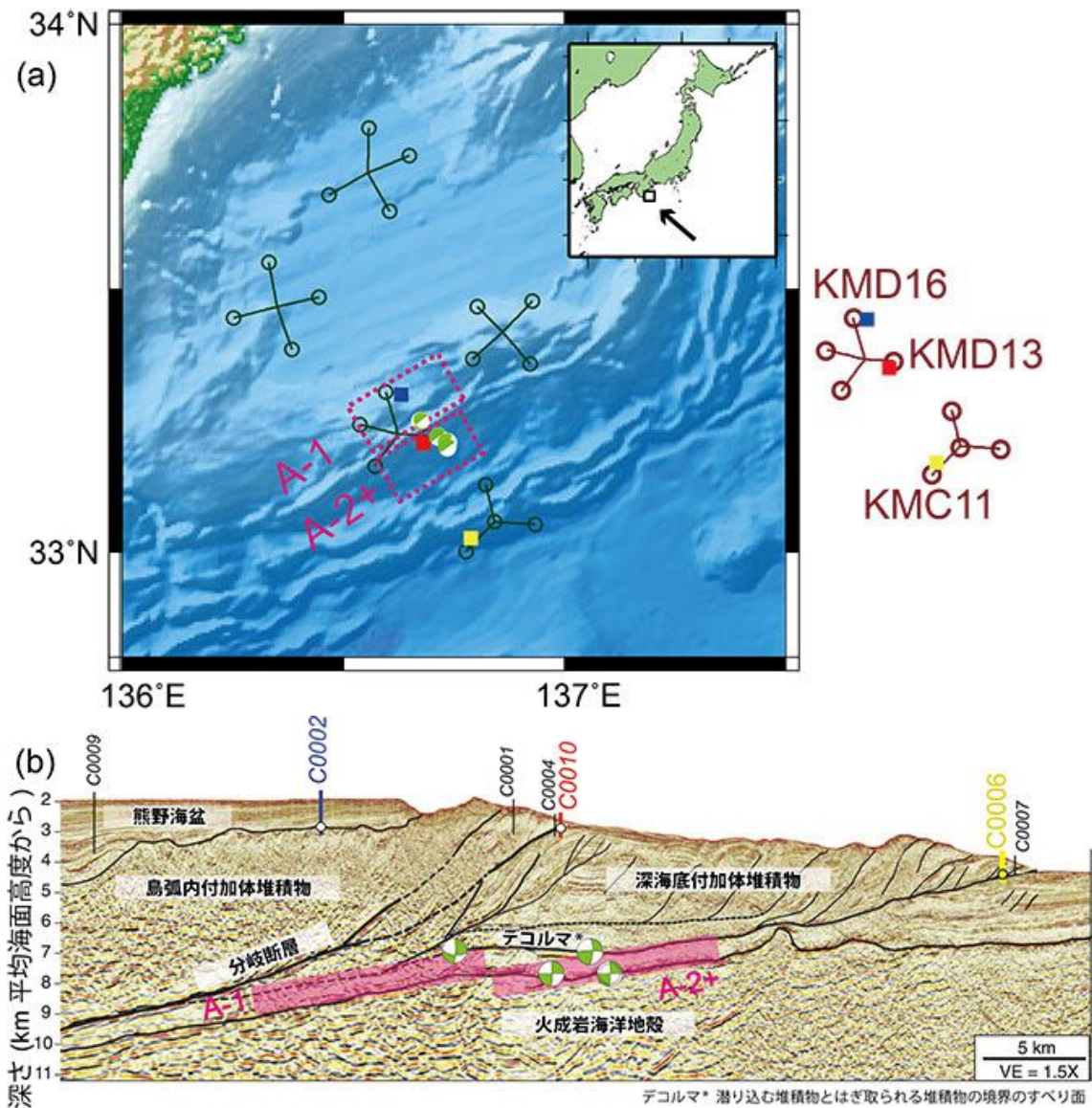


図1 (a) (b) 2020年3月に発生したスロースリップイベントの発生域をピンク色(A-1、A-2+)で示す。(青:C0002、赤:C0010、黄:C0006)は、長期孔内観測装置の設置・観測点、緑色のビーチボールは超低周波地震の断層メカニズム解を示す。

参考資料：プレスリリース(2021年8月27日発表)

長期孔内観測装置とDONETを活用した間隙水圧の超高感度解析手法を開発  
 ~南海トラフのゆっくり地震は黒潮蛇行の影響を受けている可能性~

[https://www.jamstec.go.jp/j/about/press\\_release/20210827/](https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20210827/)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 11件）

1. 著者名 Hasegawa Takuya, Nagano Akira, Ariyoshi Keisuke, Miyama Toru, Matsumoto Hiroyuki, Iwase Ryoichi, Wakita Masahide	4. 巻 9
2. 論文標題 Effect of Ocean Fluid Changes on Pressure on the Seafloor: Ocean Assimilation Data Analysis on Warm-Core Rings off the Southeastern Coast of Hokkaido, Japan on an Interannual Timescale	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Earth Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/feart.2021.600930	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 Miyazawa Yasumasa, Varlamov Sergey M., Miyama Toru, Kurihara Yukio, Murakami Hiroshi, Kachi Misako	4. 巻 13
2. 論文標題 A Nowcast/Forecast System for Japan's Coasts Using Daily Assimilation of Remote Sensing and In Situ Data	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/rs13132431	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 Ariyoshi Keisuke, Kimura Toshinori, Miyazawa Yasumasa, Varlamov Sergey, Inuma Takeshi, Nagano Akira, Gomberg Joan, Araki Eiichiro, Miyama Toru, Sueki Kentaro, Yada Shuichiro, Hori Takane, Takahashi Narumi, Kodaira Shuichi	4. 巻 9
2. 論文標題 Precise Monitoring of Pore Pressure at Boreholes Around Nankai Trough Toward Early Detecting Crustal Deformation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Earth Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/feart.2021.717696	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 該当する

1. 著者名 Nagano Akira, Hasegawa Takuya, Ariyoshi Keisuke, Matsumoto Hiroyuki	4. 巻 7
2. 論文標題 Interannual Bottom-Intensified Current Thickening Observed on the Continental Slope Off the Southeastern Coast of Hokkaido, Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Fluids	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/fluids7020084	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 MATSUMOTO Hiroyuki, NAGANO Akira, ARIYOSHI Keisuke, ARAKI Eiichiro, MACHIDA Yuya, NISHIDA Shuhei, KIMURA Toshinori	4. 巻 77
2. 論文標題 EFFECT OF OCEAN CURRENT ON LONG-TERM IN-SITU PRESSURE OBSERVATION IN SAGAMI BAY	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_901 ~ I_906
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.77.2_I_901	査読の有無 無
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 Nagano Akira, Yamashita Yusuke, Ariyoshi Keisuke, Hasegawa Takuya, Matsumoto Hiroyuki, Shinohara Masanao	4. 巻 8
2. 論文標題 Seafloor Pressure Change Excited at the Northwest Corner of the Shikoku Basin by the Formation of the Kuroshio Large-Meander in September 2017	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Earth Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/feart.2020.583481	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 Miyazawa Yasumasa, Yaremchuk Max, Varlamov Sergey M., Miyama Toru, Aoki Kunihiro	4. 巻 70
2. 論文標題 Applying the adjoint-free 4dVar assimilation to modeling the Kuroshio south of Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Ocean Dynamics	6. 最初と最後の頁 1129 ~ 1149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10236-020-01372-6	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 該当する

1. 著者名 Machida Yuya, Nishida Shuhei, Kimura Toshinori, Araki Eiichiro	4. 巻 125
2. 論文標題 Mobile Pressure Calibrator for the Development of Submarine Geodetic Monitoring Systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JB020284	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 Matsumoto Hiroyuki, Araki Eiichiro	4. 巻 8
2. 論文標題 Drift Characteristics of DONET Pressure Sensors Determined From In-Situ and Experimental Measurements	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Earth Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/feart.2020.600966	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 Ariyoshi Keisuke, Inuma Takeshi, Nakano Masaru, Kimura Toshinori, Araki Eiichiro, Machida Yuya, Sueki Kentaro, Yada Shuichiro, Nishiyama Takehiro, Suzuki Kensuke, Hori Takane, Takahashi Narumi, Kodaira Shuichi	4. 巻 8
2. 論文標題 Characteristics of Slow Slip Event in March 2020 Revealed From Borehole and DONET Observatories	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Earth Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/feart.2020.600793	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 Gomberg J., Baxter P., Smith E., Ariyoshi K., Chiswell S. M.	4. 巻 47
2. 論文標題 The Ocean's Impact on Slow Slip Events	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020GL087273	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 該当する

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Takuya Hasegawa, Akira Nagano, Keisuke Ariyoshi, Toru Miyama, Hiroyuki Matsumoto, Ryoichi Iwase, Masahide Wakita
2. 発表標題 Effect of ocean fluid changes on pressure on the seafloor: JCOPE2M ocean assimilation data analysis on warm-core rings off the southeastern coast of Hokkaido, Japan on an interannual timescale
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2021年大会, (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akira Nagano, Takuya Hasegawa, Keisuke Ariyoshi, Hiroyuki Matsumoto
2. 発表標題 Bottom-intensified current observed by a bottom-mounted ADCP off the southeastern coast of Hokkaido, Japan
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2021年大会,
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 有吉 慶介・飯沼 卓史・中野 優・木村 俊則・荒木 英一郎・町田 祐弥・末木 健太郎・矢田 修一郎・西山 岳洋・鈴木 健介・堀 高峰・高橋 成実・小平 秀一
2. 発表標題 孔内観測とDONETから明らかになった2020年3月のスロースリップイベントの特徴
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keisuke Ariyoshi, Toshinori Kimura, Yasumasa Miyazawa, Varlamov Sergey, Takeshi Iinuma, Akira Nagano, Joan Gomberg, Eiichiro Araki, Toru Miyama, Kentaro Sueki, Shuichiro Yada, Takane Hori, Narumi Takahashi, Shuichi Kodaira
2. 発表標題 Impact of Kuroshio meander on the slow slip event in March 2020 detected by borehole and DONET observatories
3. 学会等名 日本地質学会第128回秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 有吉 慶介・永野 憲・松本 浩幸・長谷川 拓也・伊東 優治
2. 発表標題 海底圧力に及ぼす力学の多様性とその相互関係の理解
3. 学会等名 2021年日本海洋学会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 有吉 慶介, 木村 俊則, 宮澤 泰正, Varlamov Sergey, 飯沼 卓史, 永野 憲, Joan Gomberg, 荒木 英一郎, 美山 透, 末木 健太郎, 矢田 修一郎, 堀 高峰, 高橋 成実, 小平 秀一
2. 発表標題 黒潮大蛇行がスロースリップイベントに及ぼす影響：孔内とDONETの観測データの統合解析
3. 学会等名 日本地震学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 有吉 慶介, 木村 俊則, 宮澤 泰正, Varlamov Sergey, 飯沼 卓史, 永野 憲, Joan Gomberg, 荒木 英一郎, 美山 透, 末木 健太郎, 矢田 修一郎, 堀 高峰, 高橋 成実, 小平 秀一
2. 発表標題 黒潮大蛇行がスロースリップイベントに及ぼす影響：孔内とDONETの観測データの統合解析
3. 学会等名 海洋理工学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本 浩幸・永野 憲・有吉 慶介・荒木 英一郎・町田 裕弥・西田 周平・木村 敏則
2. 発表標題 相模湾における長期圧力観測への海洋変動の影響
3. 学会等名 第68回海岸工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keisuke ARIYOSHI, Roland BURGMANN, Jean-Paul AMPUERO
2. 発表標題 Extension of aseismic slip propagation theory to slow earthquake migration
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Keisuke Ariyoshi, Akira Nagano, Takuya Hasegawa, Hiroyuki Matsumoto
2. 発表標題 Relationship between Kuroshio meander and crustal deformation around Nankai Trough
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 Keisuke Ariyoshi, Roland Burgmann, Jean-Paul Ampuero
2. 発表標題 Understanding of temporal change in slow earthquake migration speed
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 有吉 慶介・飯沼 卓史・中野 優・木村 俊則・荒木 英一郎・町田 祐弥・末木 健太郎・矢田 修一郎・西山 岳洋・鈴木 健介・堀 高峰・高橋 成実・小平 秀一
2. 発表標題 孔内観測およびDONETから捉えられた 2020年3月のスロースリップイベントの特徴
3. 学会等名 日本地震学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 有吉 慶介・飯沼 卓史・中野 優・木村 俊則・荒木 英一郎・町田 祐弥・末木 健太郎・矢田 修一郎・西山 岳洋・鈴木 健介・堀 高峰・高橋 成実・小平 秀一
2. 発表標題 孔内観測およびDONETから捉えられた 2020年3月のスロースリップイベントの特徴
3. 学会等名 海洋理工学会 令和2年度 秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Keisuke Ariyoshi, Jean-Paul Ampuero, Roland Burgmann
2. 発表標題 Quantitative relationship between aseismic slip propagation speed and frictional properties
3. 学会等名 AGU fall meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020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	町田 祐弥 (Machida Yuya)  (10770670)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(地震津波予測研究開発センター)・研究員  (82706)	
研究分担者	永野 憲 (Nagano Akira)  (40421888)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(大気海洋相互作用研究センター)・主任研究員  (82706)	
研究分担者	松本 浩幸 (Hiroyuki Matsumoto)  (80360759)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(地震津波予測研究開発センター)・主任研究員  (82706)	
研究分担者	宮澤 泰正 (Miyazawa Yasumasa)  (90399577)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門(アプリケーションラボ)・ラボ所長代理  (82706)	
研究分担者	木村 俊則 (Toshinori Kimura)  (30520845)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(地震津波予測研究開発センター)・副主任研究員  (82706)	削除：2021年11月12日

6. 研究組織（つづき）

	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	Varlamov Sergey  (Varlamov Sergey)  (00304840)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門 (アプリケーションラボ)・主任研究員(シニア)  (82706)	追加：2021年11月12日

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		
米国	米国地質調査所	ワシントン大学	