

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25247074

研究課題名(和文) 海底圧力計アレー観測による海洋/固体地球システム現象の解明

研究課題名(英文) Ocean bottom pressure gauge array for studying phenomena involving the ocean and solid Earth as a system

研究代表者

深尾 良夫 (FUKAO, Yoshio)

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・特任上席研究員

研究者番号：10022708

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,900,000円

研究成果の概要(和文)：水深7000mの水圧をナノ分解能で測定する水晶式圧力センサーを組み込んだ海底圧力計10台を製作し、これらをアレーとして2014年5月から1年間青ヶ島東方沖の海底に、ついで場所を移し2015年5月から1年間鳥島はるか東方沖の海底に設置した。また、新規に開発された水晶式加速度センサーを組み込んだ海底3成分加速度計を宮城県沖海底に設置して試験観測を実施した(2013年5月から10か月間)。得られたデータを解析して、「日本海溝斜面を駆け上るポア」、「火山性津波地震で励起された津波」、「東青ヶ島海丘斜面を波源とする内部潮汐波」、「北小笠原海溝沿いの超低周波逆断層地震」など多くの新奇海底現象を検出した。

研究成果の概要(英文)：We constructed 10 sets of ocean bottom pressure gauges using quartz crystal resonator sensors which measure the ocean bottom pressure with a nano-resolution at a water depth of 7000m. We deployed these pressure gauges as an array at the ocean bottom east off Aogashima for 1 year period from May 2014, and then far east off Torishima for the next 1 year from May 2015. We also deployed the ocean bottom 3-component accelerometer off Miyagi, northern Honshu for 10 months from May 2013. This accelerometer was newly developed using a quartz resonator technique. We analyzed the retrieved data to detect hitherto unreported phenomena such as "Oceanic bores upsloping the Japan Trench slope", "Tsunamis generated by a volcanic tsunami earthquake", "Ocean internal tidal waves originating from the eastern slope of the East Aogashima knoll" and "A group of ultra-low-frequency thrust earthquakes occurring along the northern Bonin trench".

研究分野：地震学

キーワード：海底地震 津波 津波地震 海底圧力計 海底加速度計 海洋内部潮汐 海洋重力波 常時自由振動

1. 研究開始当初の背景

海底は、海洋変動と固体地球変動並びに両者のカップリング現象が起こる場であるが、従来の海底固体地球観測においては海洋変動はノイズ源でしかなく、また従来の海洋観測において固体地球変動現象は殆ど無視されてきた。しかし、海洋潮汐と海底地形のカップリングによる海洋内部潮汐波の励起、長周期海洋重力波と海底地形のカップリングによる常時地球自由振動の励起、海洋波浪による水中音波励起と海底での地震波への変換(脈動)、海溝近傍プレート境界滑りに対する海洋+固体地球システムの応答(水中音波+地震波+海洋重力波(津波)の発生)など、海底の上と下を同時に見て初めて全体像が見えて来る現象は数多いが、こうした視点を前面に出した海底観測研究の例は未だない。本研究はこの視点に立った最初の研究例と位置づけられる。

2. 研究の目的

周期数秒から1日程度にわたる広い帯域で海洋変動と海底下固体地球変動を海底から同時に見る 高分解能水圧計+流速計アレー観測システムを製作し以下の観測を実施した。
 (1)我々が内部潮汐波発生源であると同定した小笠原海嶺の東側山腹にアレーを展開し、潮汐スペクトルのアレー解析を行って内部潮汐波をモード分離して抽出する。
 (2)低角逆断層地震活動の稀な小笠原海域において、北緯31度付近海溝ごく近傍にこうした地震がよく起こる特異な場所がある。ここにアレーを展開し地震より長い時定数のプレート境界滑りを検出する。
 (3)上記2地域で得られたアレー記録から、常時地球自由振動の励起源である 長周期海洋重力波の相関解析を行いその発生源を特定する。

3. 研究の方法

海底から上(海洋)と下(固体地球)とを同時に見る視点に立った機動観測システムを製作しその特性を生かした以下の事例研究を行いその有用性を示す。

(1)内部潮汐波の発生域海底に観測アレーを展開し地震学が得意とする水平波数/方位解析を潮汐帯域の記録に適用することにより、発生源近傍における内部潮汐波のスペクトル・モード構造を明らかにする。

(2)小笠原海域では非地震性定常滑りによるプレート沈み込みが支配的と考えられているが、北緯31度の海溝付近には地震性滑りが顕著に定常滑りと混在する場所がある。ここに観測アレーを展開し、記録から地震に伴わない(あるいは地震に伴い異常に励起された)海洋レーリー波エアリー相を探索し、発生イベントのリストを作成する。特定イベントの更なる解析により地震より長い時定数(10秒以上)の滑りの存在について制約を与える。

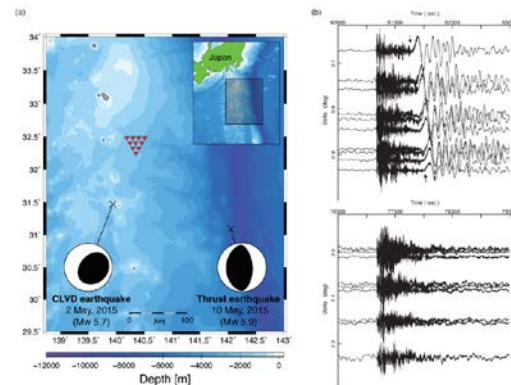
(3)2つのアレーを用いて長周期重力波の発生源を特定し、長周期重力波が太平洋深海域で生まれるか、海溝内側で生まれるのであればどのような場所かについての解答を得る。

4. 研究成果

(1)ParoScientific社の水深7000m用水晶式ナノレゾリューション水圧計 8B7000-I-005 と塩原肇連携研究者開発のロガーとからなる高感度海底水圧計を10組製作した。このシステムに東大地震研のチタン製耐圧容器に

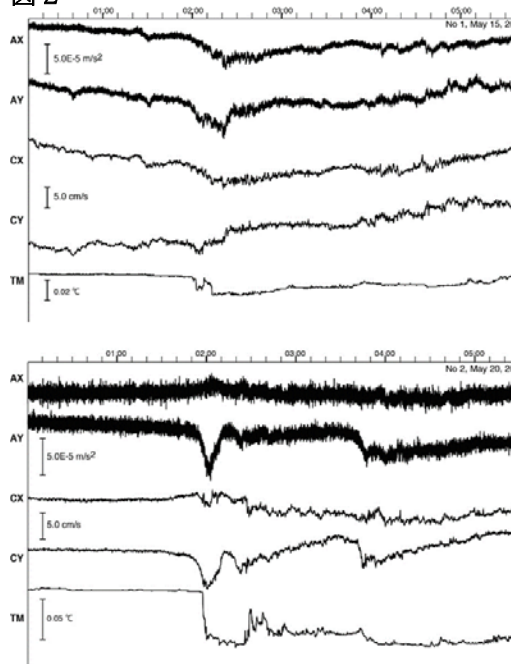
組み合わせ2014年5月から2015年6月まで青ヶ島沖海底に設置(図1a)、引き続き2015年6月から2016年6月まで鳥島はるか沖海底に設置し(図3a)、何れも無事にデータを回収した。圧力計のサンプリング速度は4Hz、カットオフ周波数は0.7Hzに設定した。アレーは観測点間隔を10kmとし、10点で正三角形を構成するように観測点を配置した。

図1 (a) (b)



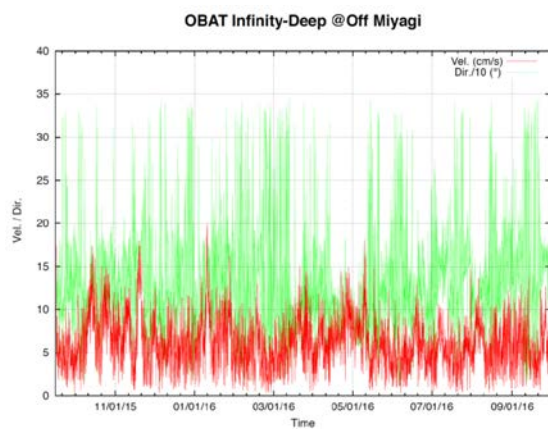
(2)ParoScientific社が新規に開発した水晶式3成分加速度計を借り受け、宮城県沖海底において2013年5月から10か月間の試験観測を行った。加速度計には3成分の直交性からのわずかなズレを補正するためのAlignment Matrixが工場側から提供されており、これが測器の傾斜イベントを高信頼度で検出するのにきわめて有用であることを示した。この加速度計観測から特徴的な時間変化を示す傾斜イベントを約40件検出した。これらが海底流による測器の傾斜現象であり、海底は傾斜していないことを、併設していた超深度(7000m)流速計(海水温度計付き)記録を用いて明らかにした(図2)。更にこれらイベントが海溝斜面を駆け上る海洋内部波の「ボア」と呼ばれる不安定現象に由来することを明らかにし、JGR-Oceans (Fukao et al., 2016)に発表した。

図2



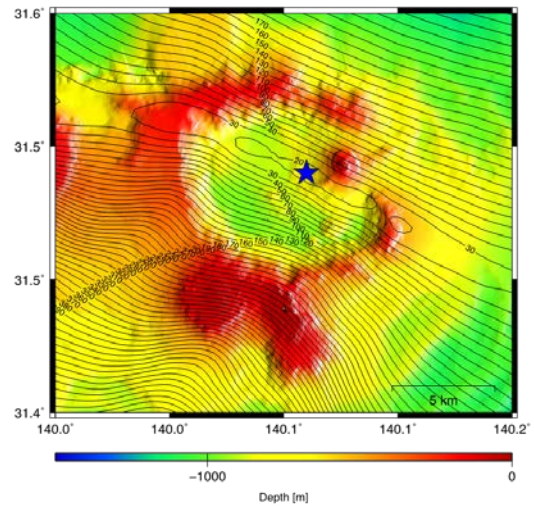
(3) 上記により、長期海底傾斜観測に流速計（海水温度計付き）の併設が必須であることが明らかになったので、既仕様のままでは2週間しかもたない流速計を独自に1年間仕様へと改造した。更に、この改造流速計（温度計付き）に水晶式圧力計を併設して、宮城県沖で2015年9月から1年間の海底観測を実施し全ての機器とデータを無事回収した。予想通り、ボア現象が数多く記録されており（図3）、今後本格的な解析を実施する。なおこの観測では、海底傾斜イベントの観測手法の開発を目指して、広帯域海底地震計の速度出力以外に傾斜2成分、パロ社の水晶式加速度計3成分、パロ社新規開発の水晶式傾斜計2成分の比較測定を行った。記録は解析中であるが、海底傾斜変動イベントの検出と併せて現在の計測技術の問題点が明らかになりつつある。

図3.



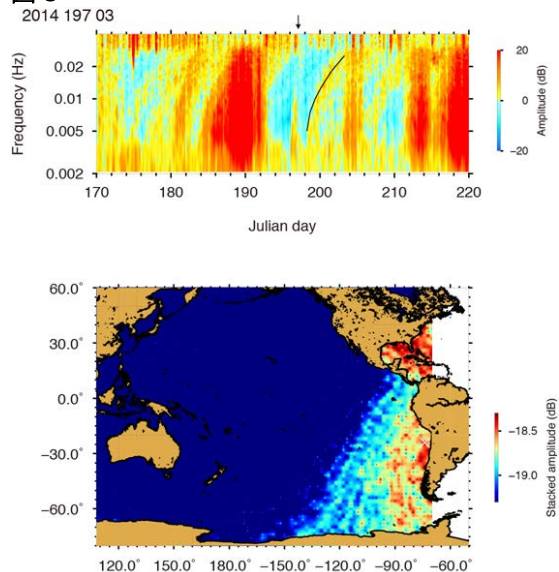
(4) 青ヶ島沖海底圧力計アレーを回収する直前（2015年5月2日）に鳥島近海地震が発生した。Mw5.7という地震規模と比較して八丈島で波高50cmという大きな津波が観測され、いわゆる津波地震として注目された。青ヶ島沖アレーは震央からわずか100km北北東に位置し、全ての観測点で分散性の津波をきれいに記録した。この地震に比較的近い海溝付近に発生したMw5.9のスラスト地震には津波が全く記録されておらず（図1b）、鳥島近海地震が津波地震であることが明瞭に示された。更に津波記録をアレー解析し、津波到達時刻と入射方向を同時に満足する波源位置を求め、それが鳥島近海のスミス海底カルデラ内に決まることを明らかにした（図4）。これは地震波を用いて決めた震央位置よりもはるかに精度が高い。また波源位置まで観測振幅を戻して波源での海面波高を見積もると、地震学的に決められたメカニズム（CLVD）から推定される波源波高よりも5倍ほど大きな値が得られる。これは、震源に地震波は励起しないが津波は効率よく発生するメカニズムが働いたことを意味する。我々は、基本的地震波源である Shear fault, tensile fault, isotropic volume change の中で、ごく浅部の Vertical opening of horizontal tensile crack だけがこのような特性を持ち、これが火山性津波地震の本質であることを明らかにした。これらの結果を2篇の論文として PAGEOPH (Sandanbata et al.) 及び Science Advances (Fukao et al.) に投稿した。

図4



(5) 周期100秒付近にピークを持つ海底ノイズは海洋長周期重力波（Infra Gravity Wave 以下 IG 波）によるものである。青ヶ島沖アレーに入射してくる IG 波の group slowness vector を波形干渉法により周波数の関数として求めた。図5上図は抽出した IG 波のスペクトログラムである（北半球の夏50日間）。特に強い（赤色）信号は日本付近を通過する台風によるものであるが、それ以外に黒線のような顕著な分散性を示す IG 波が5件ほど検出された。これらの IG 波の波源を探索するため、太平洋の海底地形を IG 波の周波数毎の位相速度分布に置き換え、太平洋を渡って青ヶ島沖アレーへ入射する波線を計算した。更に、IG 波ピークは波線に沿って群速度で伝播するとして、観測ピークの振幅をアレーから太平洋側に逆伝播させた。その結果、波はチリ近海域でほぼ収束しここが IR 波の波源であると推測できた（図5下図）。この IR 波は冬季に東進する南極洋の強い勢力の波浪が南米海岸に斜めから衝突して生まれたと考えられる。

図5



(6) 青ヶ島沖の海底圧力記録から Slant stacking 法により常時励起されている M2 内部潮汐波（最低次モード）を検出し、西から東に 1m/s の速度でアレーを通過することを明らかにした。そのパワースペクトル密度 (PSD) は外部 M2 潮汐 PSD の約 0.03% で、両者 PSD の間に著しい正の相関が見られることから、内部潮汐波は外部潮汐と East Aogashima Knoll の斜面の相互作用によって生れたと考えられる。一方、最新の海洋循環モデル (JCOPE-T) は海洋潮汐と海底との相互作用も取り込んだシミュレーションを行っている。そこで JCOPE-T グループと共同で実際の観測と同じ期間、同じ位置での海底圧力を計算し、同じ slant stacking 解析を行った。観測に基づく解析結果と計算に基づく解析結果とを比較したのが図 6 である。図の各点は slowness vector の大きさと方向を表し、色は信号の強度を表す。観測と simulation の一致は著しい。この一致は、実際の内部潮汐波の波源域にまで計算結果を使って迫ることが可能であることを示す。

図 6

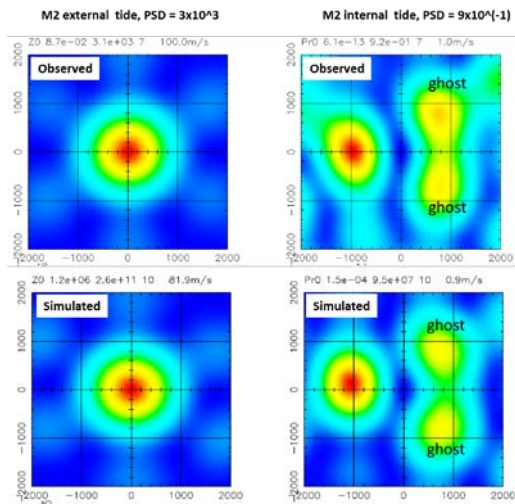
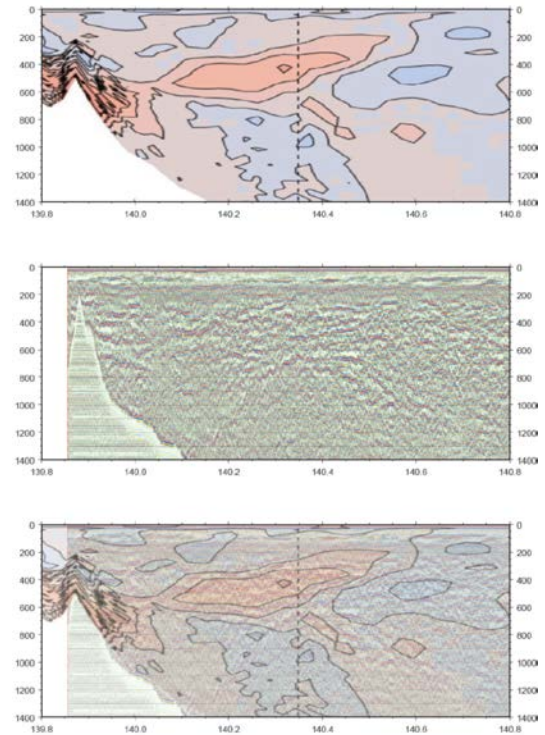


図 7 上は海洋循環モデルに潮汐帯域のフィルターをかけて内部潮汐による温度擾乱場（アレーを通過する東西断面）を抽出したものである。内部潮汐の最低次モードに対応する大きなセル構造と、外部潮汐と East Aogashima Knoll 斜面とが相互作用し内部潮汐波が生じている波源域がイメージされている。2008 年には全く同じ測線で大規模な MCS (Multi-channel-seismic) 調査が行われている。我々はこの legacy data を再解析し、海洋内の音波反射構造を求めた (図 7 中)。反射層が多数見られるが、これら (鉛直波長約 30m) は高モード内部波により形成された音波インピーダンスコントラストの高い面を表す。温度擾乱場のパターンと音波反射層の分布のパターンには著しい相関が見られる。この相関を強調するために、両者を重ね合わせてみたのが図 7 下である。この高い相関は、内部波が低モードから高モードへと変

換される非線形プロセスのあることを示唆する。

図 7.



(7) 鳥島はるか沖海底の海底圧力計記録の解析を開始した。手始めにアレー (図 8 a) のすぐ近くで 2015 年 9 月に発生した伊豆小笠原海溝沿いのプレート境界地震 (赤い星印) の記録を解析する。図 8b は本震 (Mj6.1) 及び余震の 1 つ (Mj4.3) のスペクトルで、低周波領域 (0.02Hz から 0.04Hz の範囲) では余震の方が振幅が大きい。これは余震がいわゆる超低周波地震であることを示唆する。こうした余震が多数発生しており、これらの地震の解析から今後は巨大地震が起こらない小笠原海溝におけるプレート沈み込みのメカニズムに迫る。

図 8a.

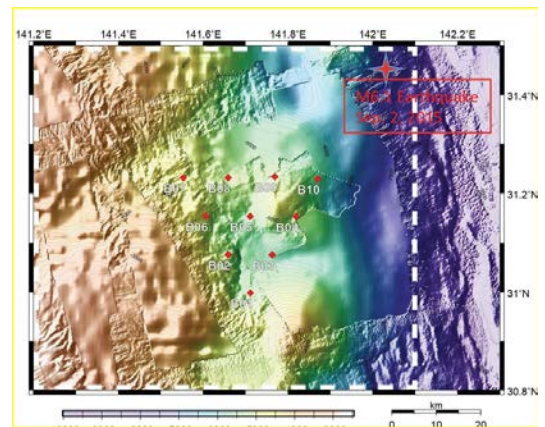
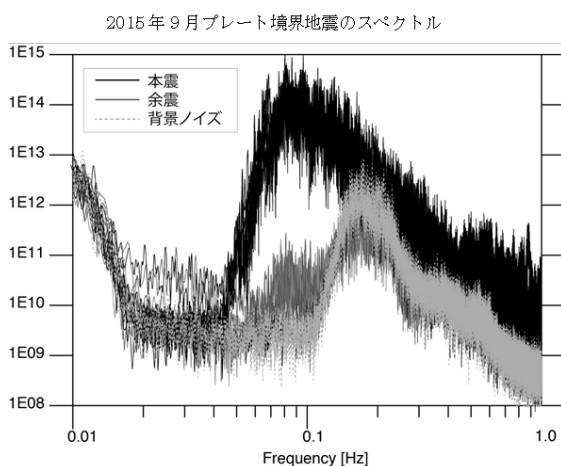


図 8b.



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 15 件)

- ①Sato, T., S. Hasegawa, A. Kono, H. Shiobara, T. Yagi, T. Yamada, M. Shinohara, and N. Usui, Detection of vertical motion during a Boso slow-slip event by ocean-bottom pressure gauges, *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 2710-2715, doi:10.1002/2017GL072838, 2017. 査読有
- ②Ito, A., H. Sugioka, K. Obana, R. Hino, D. Suetsugu, K. Nakahigashi, M. Shinohara, M. Nakano, Y. Yamamoto, Upper boundaries of the Pacific and Philippine Sea plates near the triple junction off the Boso Peninsula deduced from ocean-bottom seismic observations, *Earth Planets Space* **69**: 30, doi:10.1186/s40623-017-0608-4, 2017. 査読有
- ③Yamashita, M., N. Takahashi, Y. Tamura, S. Miura and S. Kodaira, Seismic Imaging for an oceanic drilling site survey and its verification in the Izu rear arc, *Exploration Geophysics*, doi:10.1071/EG16142, 2017. 査読有
- ④Fukao, Y., H. Sugioka, A. Ito, H. Shiobara, J. Paros, and R. Furue, Sensing of upslope passages of frontal bores across the trench slope break of the Japan Trench, *J. Geophys. Res.-Oceans*, **121**, 3422-3434, 2016. 査読有
- ⑤Schnepf, N. R., C. Manoj. C. An, H. Sugioka, H. Toh, Time-frequency characteristics of tsunami magnetic signals from four Pacific Ocean events, *Pure Appl. Geophys.* **173**, 1-19, doi:10.1007/s00024-016-1345-5, 2016. 査読有
- ⑥Maeda, T., Nishida, K., R. Takagi, and K. Obara, Reconstruction of a 2D seismic wavefield by seismic gradiometry, *Prog. Earth Planet. Sci.*, **3**, 31, doi:10.1186/s40645-016-0107-4, 2016. 査読有
- ⑦Nishida, K., and R. Takagi, Teleseismic S wave microseisms, *Science*, 2016, Vol. **353**, 919-921, 2016. 査読有
- ⑧Nishida, K., and M. Ichihara, Real-time infrasonic monitoring of the eruption at a remote island volcano using seismoacoustic crosscorrelation, *Geophys. J. Int.*, **204** (2): 748-752, 2016. 査読有
- ⑨Tonegawa, T., Y. Fukao, T. Takahashi, K. Obana, S. Kodaira, and Y. Kaneda, Ambient seafloor noise excited by earthquakes in the Nankai subduction zone, *Nature Com.*, doi:10.1186/1880-5981-66-99, 2015. 査読有
- ⑩To, A., K. Obana, H. Sugioka, E. Araki, N. Takahashi, and Y. Fukao, Small size very low frequency earthquakes in the Nankai accretionary prism, following the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Phys. Earth. Planet. Inter.*, **245**, 40-51, 2015. 査読有
- ⑪Tono, Y., K. Nishida, Y. Fukao, A. To and N. Takahashi, Source characteristics of ocean infragravity waves in the Philippine Sea: analysis of 3-year continuous network records of seafloor motion and pressure, *Earth Planets Space*, **66**, doi:10.1186/1880-5981-66-99., 2014. 査読有
- ⑫Sugioka, H., Y. Hamano, K. Baba, T. Kasaya, N. Tada, D. Suetsugu, Tsunami: Ocean dynamo generator, *Scientific Reports*, **4**, doi:10.1038/srep03596, highlighted, 2014. 査読有
- ⑬Suetsugu, D., and H. Shiobara, Broadband Ocean Bottom Seismology, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **42**, 27-43, doi:10.1146/annurev-earth-060313-054818, 2014. 査読有
- ⑭Nishida, K., Source spectra of seismic hum, *Geophys. J. Int.*, **199**, 1, 416-429, doi:10.1093/gji/ggu272, 2014. 査読有

⑮塩原 肇, 篠原雅尚, 中東和夫, 観測帯域拡大への高精度圧力計付き広帯域海底地震計の開発, 海洋調査技術, **26**, 2, 1-17, 2014. 査読有

[学会発表] (代表者発表のみ 計 6 件)

①Fukao, Y., Miyama, T., Y. Tono, H. Sugioka, A. Ito, H. Shiobara, M. Yamashita, S. Varlamov, and Y. Miyazawa, Near-source detection of lowest and very high modes of internal tide: Comparison with the JCOPE-T ocean circulation model, 2017 JpGU Meeting, 23 May 2017, A-OS29, 幕張メッセ、千葉県千葉市.

②Fukao, Y., O. Sandanbata, H. Sugioka, A. Ito, H. Shiobara, S. Watada, and K. Satake, Mechanism of the 2015 volcanic tsunami earthquake, South of Japan, 2016 AGU Fall Meeting, 15 December 2016, NH43B-1853, San Francisco, USA.

③Fukao, Y., H. Sugioka, A. Ito, H. Shiobara, O. Sandanbata, S. Watada, K. Satake, 2015 volcanic tsunami earthquake near Torishima Island: Array analysis of ocean bottom pressure gauge records, 2016 SSJ Meeting, 07 October 2016, S17-10, 名古屋国際会議場、愛知県名古屋市.

④Fukao, Y., H. Sugioka, A. Ito, H. Shiobara, O. Sandanbata, S. Watada, K. Satake, 2015 Torishima tsunami earthquake: Observation of tsunamis at short distances using an ocean bottom array of water pressure gauges, 2016 JpGU Meeting, 25 May 2016, H-DS19-22, 幕張メッセ、千葉県千葉市.

⑤Fukao, Y., H. Sugioka, A. Ito, and H. Shiobara, Long-term observation of seafloor disturbances by array of pressure gauges, AGU Fall Meeting, 17 December, 2015, T43G-06, San Francisco, USA.

⑥Fukao, Y., H. Sugioka, A. Ito, H. Shiobara and J. Paros, Observation of repeated seafloor tilt events atop the inner wall of the Japan Trench by new high-resolution accelerometers, AGU Fall Meeting, 15 December, 2014, S12B-01, San Francisco, USA.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

深尾 良夫 (FUKAO, Yoshio)

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・特任上席研究員

研究者番号 : 10022708

(2) 研究分担者

杉岡 裕子 (SUGIOKA, Hiroko)

神戸大学・理学研究科・准教授

研究者番号 : 00359184

(3) 連携研究者

西田 究 (NISHIDA, Kiwamu)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号 : 10345176

伊藤 亜妃 (ITO, Aki)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球

深部ダイナミクス研究分野・技術研究員

研究者番号 : 90371723

山下 幹也 (YAMASHITA, Mikiya)

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・研究員

研究者番号 : 00415978

利根川 貴志 (TONEGAWA, Takashi)

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・研究員

研究者番号 : 60610855

塩原 肇 (SHIOBARA, Hajime)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号 : 60211950

日比谷 紀之 (HIBIYA, Toshiyuki)

東京大学・大学院理学研究科 (理学部)・

教授

研究者番号 : 80192714