

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 6 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05646

研究課題名(和文) 新奇海底現象の探索

研究課題名(英文) Search for hitherto unreported seafloor phenomena

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・海域地震火山部門(地震発生帯研究センター)・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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：代表者らは別科研費で海底水圧計10台からアレーシステムを製作し、青ヶ島沖と鳥島はるか沖に各1年間設置した。本計画において得られたデータを解析し以下の結果を得た。1. 2015年5月の鳥島近海地震津波を解析し火山性津波地震のメカニズムを明らかにした(論文2篇)。また津波荷重による青ヶ島の変形を明らかにした(論文1篇)。2. アレーを通過する海洋長周期重力波の主要発生源が南米太平洋沿岸にあることを明らかにした(論文1篇)。3. アレーを設置した海底斜面が海洋内部潮汐波の発生源であることを明らかにした(論文1篇)。4. 2015年9月小笠原海溝近傍で時定数1時間程度の非地震性滑りが起きたことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本計画の目的は海底に圧力計アレーを設置し、上を見上げて海洋現象を追いかけて、下を覗き込んで固体地球現象を検出し、その延長として両者の絡んだ現象までを捉えることにあった。こうした当初目的は十分に果たされたことと自己評価する。本計画で得られたデータを解析した国際誌論文だけで既に5篇、投稿準備中のものが2篇という数字が成果の一端を物語る。特筆すべきは、これらの中にJGR-Oceansに発表された論文が2篇含まれることであり海洋物理学者との共同研究が実を結んだ良い例となった。

研究成果の概要(英文)：We constructed an array system of 10 ocean bottom pressure gauges by Kiban-A, Kakenhi, and installed the system off Aogashima and far off Torishima, each for one-year period. In this Kiban-C project, we analyzed the recovered data to obtain the following results. 1. We analyzed the records from the Torishima tsunami May 2015 to reveal the mechanism of volcanic tsunami earthquake (2 papers published). We also showed how the island deforms by tsunami loading (1 paper published). 2. We analyzed ocean infra-gravity waves incoming to the array to locate their origins at the Pacific coast of South America (1 paper published). 3. We detected ocean internal tidal waves generated along the slope where the array was deployed (1 paper published). 4. We detected aseismic slip events with characteristic times on the order of 1 hour which occurred near the Bonin Trench, September 2015.

研究分野：地震学

キーワード：海底観測 津波 非地震性滑り 内部潮汐波 水圧計

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

●これまで海底から下を覗き込む研究者にとって、海洋擾乱は測器を乱すノイズ源あるいは海底面を通して固体地球に働く力源でしかなく、その海洋物理学的意義を問うことは少なかった。研究代表者の基盤研究 A は、海底からの上下両睨みのアプローチを特に強調した研究計画であった。その最初の論文成果「海溝急斜面をかけたのぼる海洋ボア」(**Fukao et al. JGR-Oceans, 2016**) は、宮城県はるか沖海底 (水深 **3400m**) に設置した 3 軸水晶式加速度計が月に **4** 回ほどゆっくりとした傾斜運動を起こす現象を報告したものである。この現象が海底の傾斜運動によるものではなく、ボアと呼ばれる海洋擾乱により測器が傾く現象であることが判明したのは、加速度計に流速計・水温計を付設し海洋擾乱を同時観測していたからに他ならない。上下両睨みの観測が現象の解釈の非一義性を狭め、意外な発見に繋がった良い例である。一方でこの研究は今後の海底傾斜観測にあたっての改善点を示唆するものともなった。

●基盤研究 A において海底水圧計 **10** 台からなるアレーシステムを製作したが、これは、海底水圧計が海洋擾乱と固体地球擾乱の双方を感知し、適切なアレー配置によって多様な海底現象を分離抽出できることに着目したものである。成果の 1 例である「火山性津波地震の津波アレー観測」は、**2015** 年鳥島近海地震 (**M5.7**) の震央から約 **100km** に展開されていた水圧計アレーが、地震マグニチュードと比べて不相応に大きな津波振幅を示したことに着目している。これは、地震観測からは震源に関する一部の情報しか得られず、津波観測によってのみ得られる震源情報が存在する良い例となった。

●成果の別例である「発生源極近傍での内部潮汐波のアレー観測」は、水圧計アレーを用いて **M2** 内部波を検出し、その伝播方向から励起域を推測し、更に潮汐を取り込んだ海洋循環モデル (**JCOPE-T**) の助けを借りてピンポイントで励起源の位置を特定することを目的とした。海洋ボアの例やこの例に限らず、海洋物理学者との共同は、海底水圧アレー観測の実りを更に豊かにする今後の重要な方向と考えられる。

●海溝三重点より南の伊豆小笠原海溝沿いのプレート境界では、巨大地震の発生は記録がなく普段の地震活動も低調で、ここでは非地震性滑りが卓越していると考えられている。滑りの実態を明らかにする 1 つの手掛かりは、たまに起こる中規模 (**M6** 程度) の低角逆断層地震とその余震群であるが、地震が左程小さくなく且つ地震観測網が震源から遠くに位置するため、これらが通常の地震なのかプレート境界の非地震性滑りを反映した特異な地震なのかはわかっていない。海溝近傍での海底水圧計アレーはこの点を明らかにすることにも貢献すると期待される。

2. 研究の目的

(1) 基盤研究 A で得られた海底水圧計アレーデータの解析に基づく新奇海底現象の探索

●火山性津波地震の津波波源解析：**2015** 年鳥島近海地震は奇妙な地震である。5 年毎に同じ規模 (**M5.6-5.7**)、同じメカニズム (**CLVD**) で繰り返され、必ず異常に大きな津波が伴う。青ヶ島沖アレーはわずか **100km** の距離でこの稀有な地震の地震波と津波を同時に記録した。この記録を解析し、津波波源域で何が起きたのかを明らかにする。

●内部潮汐波発生場のイメージング：青ヶ島沖アレーのデータを潮汐帯域でスラントスタックすると常に真西から入射する内部潮汐波が抽出される。一方、最新の海洋循環モデル (**JCOPE-T**) に基づいて同一の解析を行うと、観測と整合的な内部潮汐波が抽出される。モデルに基づく入射波を逆追跡することにより内部潮汐波の発生源を特定した。本計画で

は、この結果と構造探査データから得られる海洋反射構造イメージとを結びつけ内部潮汐波発生場をモデル化する。

●**小笠原海溝プレート境界地震記録の解析**：鳥島はるか沖海底に設置したアレーは、伊豆小笠原海溝沿いに発生した**2015年9月**プレート境界低角逆断層地震の前震・本震（**M6.0**）・余震群の極近傍に位置する。本震記録には地震波以外に津波や地殻変動が見られる。この記録を解析し、震源で何が起きたかを明らかにする。

（2）海底加速度計観測の知見を活かした3軸水晶式傾斜計の陸上テスト観測

海底加速度計に関するこれまでの観測から、海底傾斜計には必ず海洋物理測器を付設して海洋擾乱をモニターすべきこと、傾斜運動であれば水平2軸で検知できる筈であるがこれを水平3軸として **redundancy** を確保し信頼度を高めるべきこと、海洋ポア現象よりも長い時定数でより微弱な傾斜変動を捉えるには現行の加速度計は感度不足であることが判明した。本計画ではこれらの条件をクリアした海底傾斜計の実現を目指し、水晶式傾斜計センサーを平面内固定3軸式に組み立て、その性能を名大犬山観測所でチェックする。

3．研究の方法

H29年度計画：

●**火山性津波地震の津波波源解**（東大地震研・三反畑氏らとの共同研究）：波線追跡法に基づき青ヶ島沖アレーの津波データと地震波データの双方に整合的な震源モデルを構築する。その結果に基づいて理論津波波形を計算し、観測津波波形と比較することにより、津波波源で何が起きたかを明らかにする。

●**内部潮汐波発生場のイメージング**（海洋研究開発機構・美山氏らとの共同研究）：青ヶ島東方沖アレーの水圧計データから抽出した内部潮汐波の発生源を、海洋循環モデル（**JCOPE-T**）の助けを借りて特定する。発生源近傍で起きているプロセスを観測（水圧計アレー観測＋海洋構造探査）と**JCOPE**シミュレーションとを併せてイメージングする。

●**小笠原海溝プレート境界地震記録の解析**（防災科研・久保田氏らとの共同研究）：鳥島はるか東方沖アレーの極近傍で**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の記録を解析する。記録は地震に伴って非地震性滑りが起きていた可能性を示唆するが、こうしたイベントを記録から抽出する手法を開発する。

●**水晶式多軸傾斜計の組み立てと陸上テスト観測**（海洋研究開発機構・石原氏らとの共同研究）：現在、**PARO**社では従来より1桁高感度の2軸傾斜計が試作されている。高感度化に伴って必須な信頼度チェックが可能な傾斜観測システムの組み立てを**Paro**社に特注する。完成したシステムを犬山観測所に設置し観測を開始する。

H30-31年度計画：

●小笠原海溝プレート境界地震の海底水圧計アレーによる近地観測については解析を継続し、特に小笠原海溝プレート境界の地震滑りの特徴抽出に重点を置いて結果を論文としてまとめる。

●これまでに得られている地震学的・海洋物理学的データに基づき、新奇海底現象の更なる探索を行う。

●海底加速度計観測の知見を活かした多軸水晶式傾斜計の陸上テスト観測を1年間継続し、特に微弱な信号の検出限界に重点を置いて結果を整理し、海底傾斜計としての有望性に関して一定の結論を出す。

4. 研究成果

●火山性津波地震の津波波源

2015年5月鳥島近海地震は地震の規模(M5.6)の割に津波が異常に大きないわゆる津波地震である。しかも多くの津波地震が海溝先端部に発生する低角逆断層型のメカニズムであるのに対し、これは海底火山を震源とするCLVDと呼ばれる特異なメカニズムの地震であった。青ヶ島沖アレーはこの稀有な地震の津波を波源から100kmという近距離で記録した。アレーへの入射時刻と入射角は津波の周波数によって系統的に異なり、この津波の分散効果を利用すると、津波波源の位置と大きさが精度よく決まることを示した。また観測津波波形の逆解析から得られる波源モデルが地震波形から推定されているCLVDメカニズムとその大きさでは全く説明できないことを明らかにした。更にこの矛盾はスミスカルデラの極浅部で水平クラックが鉛直方向に開口したと考えると説明できることを明らかにした。

●内部潮汐波発生場のイメージング

潮汐帯域でのスラスタック解析により青ヶ島東方沖アレーの水圧計データから海洋内部潮汐波を抽出した。またその1年間の変動が同一アレーに捉えられた海洋外部潮汐の変動とよく相関していることを明らかにし、前者が後者から生まれていること示唆した。また内部潮汐波には海洋島から沖合に向かって東向に進行する成分と逆に西向きに進行する成分があることを見つけた。この現象は海洋循環モデル(JCOPE-T)にも見られ、それとの比較から内部潮汐波の励起源の一部がアレーを展開した海底スロープにあることを明らかにした。

●小笠原海溝のプレート境界地震に伴う非地震性滑り

2015年9月に伊豆小笠原海溝付近でプレート境界地震(M6.0)本震直後と3.5日後の余震(M3.2)の際に、本震をはるかに上回る規模の非地震性海底変動が起きていることを明らかにした。この非地震性海底変動の時定数は何れも1時間の程度であり、地震の時定数(数分以下)よりは明らかに長く、GPS測距で観測されるスローリップの時定数(数日以上)よりは明らかに短い。この非地震性海底変動データを逆解析し、プレート境界面でどのようなスリップが発生したかを明らかにした。1時間程度の時定数を持つ非地震性滑りを検出したのは、今回が初めてであり、プレート境界滑りのメカニズム解明に大きく貢献すると期待される。

●津波襲来による海洋島の変形

2015年鳥島近海地震に伴って波源からほぼ100km北に位置する青ヶ島では、押し寄せた津波による海底荷重変動により、島が変形・傾動した。この運動を、青ヶ島水圧計アレーに記録された津波記録と、青ヶ島に設置されていた広帯域地震計(F-net)に記録された地動記録を解析することにより明らかにした。

●伊豆小笠原弧に入射する海洋長周期重力波の波源探索

青ヶ島水圧計アレー記録には周期100秒前後の海洋長周期重力波が目立つ。この記録を観測点間で相関解析し、太平洋の海底地形による重力波の分散効果を考慮して入射方向に逆伝播させると、南米沿岸域に行きつく。ここは海洋物理学的に周期10-20秒の海洋波浪が互いの非線形相互作用により周期100秒前後の海洋長周期重力波を生み出すと予測されている地域であり、本研究はこうした予測を実証するものとなった。

●水晶式多軸傾斜計の組み立てと陸上テスト観測

最初のテスト観測で特注した多軸傾斜計システムの一部に不具合があることが見出され、Paro社に検討を依頼した。Paro社においてシステムの改良がなされ、改良機器が搬入され

た。これを用いて名古屋大学犬山観測所で再テスト観測を実施する予定でいた所、コロナ自
粛で予定が半年先送りとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Sandanbata, O., S. Watada, K. Satake, Y. Fukao, H. Sugioka, A. Ito, H. Shiobara	4. 巻 175
2. 論文標題 Ray tracing for dispersive tsunamis and source amplitude estimated based on Green's law: Application to the 2015 volcanic tsunami earthquake near Torishima, south of Japan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Pure and Applied Geophysics	6. 最初と最後の頁 1371-1385
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00024-017-1746-0	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 Fukao, Y., O. Sandanbata, H. Sugioka, A. Ito, H. Shiobara, S. Watada, and K. Satake	4. 巻 4
2. 論文標題 Mechanism of the 2015 volcanic tsunami earthquake near Torishima, Japan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Science Advances	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） 10.1126/sciadv.aao0219	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 Nishida, K., T. Maeda and Y. Fukao	4. 巻 124
2. 論文標題 Seismic observation of tsunami at island broadband stations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 1910-1928
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2018JB016833	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 Wang, Z., Y. Fukao, A. Miyakawa, A. Hasegawa, and Y. Takei	4. 巻 124
2. 論文標題 Crustal extension and graben formation by fault slip-associated pore opening, Kyushu, Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 4879-4894
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） DOI: 10.1029/2018JB016649	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 Tonegawa, T., Y. Fukao, H. Shiobara, H. Sugioka, A. Ito, and M. Yamashita	4. 巻 122
2. 論文標題 Location and Seasonal Variation of Transoceanic Infragravity Waves Observed at an Absolute Pressure Gauge Array	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Oceans	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) DOI: 10.1002/2017JC013488	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 -

1. 著者名 Obayashi, M., Y. Fukao, and J. Yoshimitsu	4. 巻 459
2. 論文標題 Unusually deep Bonin earthquake of 30 May 2015: A precursory signal to slab penetration?	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 221-226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.11.019	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 -

1. 著者名 Fukao, Y., T. Miyama, Y. Tono, H. Sugioka, A. Ito, H. Shiobara, M. Yamashita, S. Varlamov, R. Furue, Y. Miyazawa	4. 巻 124
2. 論文標題 Detection of internal tide source oscillations of ocean internal tide on the slope of Aogashima Island, Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Geophys. Res. -Oceans	6. 最初と最後の頁 4918-4933
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JC014997	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7件 (うち招待講演 1件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Y. Fukao, O. Sandanbata, H. Sugioka, A. Ito, H. Shiobara, S. Watada, and K. Satake
2. 発表標題 Mechanism of volcanic tsunami earthquake Part 1. Overview
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y.Fukao, A.Ito, M.Yamashita, T.Tongawa, H.Sugioka, H.Shiobara and Y.Tono
2. 発表標題 Earthquake-accompanying submarine crustal deformation along the Bonin Trench
3. 学会等名 日本地震学会 2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y.Fukao, A.Ito, M.Yamashita, T.Tongawa, H.Sugioka and H.Shiobara
2. 発表標題 Seafloor detection of multiple seismic transients with an intervening seismic shock at the Izu-Bonin Trench
3. 学会等名 American Geophysical Union, Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 深尾良夫、美山 透、東野陽子、杉岡裕子、伊藤亜紀、塩原 肇、山下幹也、S. Varlamov, 宮沢泰
2. 発表標題 Near-source detection of lowest and very high modes of internal tide: Comparison with the
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会2017年大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Z. Wang, 深尾良夫、宮川歩夢、長谷川昭、武井康子、D. Chen
2. 発表標題 The 2016 Kumamoto earthquake, Japan: Crustal extension in the graben by opening of round pores
3. 学会等名 日本地震学会2017年度秋季会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 深尾良夫
2. 発表標題 海底から海洋を見上げ地球内部を覗き込む
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会2019年大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 深尾良夫・杉岡裕子・伊藤亜妃・山下幹也・利根川貴志・塩原 肇・久保田達矢・齊藤竜彦
2. 発表標題 2015年Mw6.0小笠原海溝地震の近地アレー観測：前震 本震 海底変動 津波発生 余効変動
3. 学会等名 日本地震学会2019年度秋季会
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