

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年9月22日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H01794

研究課題名(和文) 離島火山活動のリモートモニタリングの実現

研究課題名(英文) Remote monitoring of island volcanic activities using an autonomous vehicle

研究代表者

杉岡 裕子 (Sugioka, Hiroko)

神戸大学・理学研究科・准教授

研究者番号：00359184

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,600,000円

研究成果の概要(和文)：離島火山の監視を目的として、無人走行式の海上プラットフォームであるウェーブグライダーを用いた新しい機動的リアルタイム観測システムを開発し、西之島火山近海での観測を実施した。火山表層の噴火活動の監視には、空振計、ハイドロフォン、波浪計、可視カメラを用いた多角的観測項目の連続リアルタイムモニタリングを実施した。システムには音響通信モデムを装備し、海底観測装置との通信プラットフォームとしても機能する。2017年12月に実施した西之島近海での本観測では、海上保安庁が報告していない火口近傍での噴気活動の検出に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発した離島火山活動のリモートモニタリングシステムは、観測に成功した西之島火山表層の監視のみならず、噴火活動後の冷却に伴う山体内部の変動にも感度のあるセンサーを有し、活動水位を把握し、将来の活動予測につなげることを目的としたものである。2018年12月にクラカトア火山噴火のように環太平洋域では殆どが離島あるいは海底火山である。本計画の西之島の観測成功は、今後、一般的な離島火山に有効な監視システムとして気象庁の業務でも利用可能な実用化レベルにもっていくことを支持する結果と言える。

研究成果の概要(英文)：We have developed a monitoring system of remote island volcanic activities using an unmanned surface vehicle of the Wave Glider, which is designed to propel using only wave. In the system, it performs a multi-parametric observatory platform on which we mounted two microphones, hydrophone, wave-gauges, and four cameras. The data except for images can be sent to the land server via the Thuraya satellite. We had an observation of the Nishinoshima using the monitoring system in Dec., 2017. The system was launched near the Bonin island 130 km from the Nishinoshima on the 1st and reached there on the 4th. After five rounds traveling, it left on the 8th. The data were successfully obtained in real-time. On the 4th at the vicinity, steam emission from the volcano were surely recognized on images. The higher coherent waves between two microphones were observed in this active period. The system has been almost accomplished to promote a forward-looking observation of island volcanic activities.

研究分野：地震学

キーワード：離島火山 海底火山 リモートモニタリング 自律型海洋観測

1. 研究開始当初の背景

東京都の離島、西之島では、2013年11月20日に40年ぶりに火山が噴火し、新しい島が誕生した。新島は爆発的かつ継続的なマグマを噴出しながら拡大・成長を続け、積算噴出量、噴出率ともに高水準を維持し、国内における近年最大のマグマ噴火と認められつつあった（前野, 2014）。しかしながら、噴火直後から気象庁による入山規制が発令され、島への接近が許されず、ほぼ一ヶ月毎の航空機および衛星による映像撮影が唯一の観測手段となっており、限られた観測頻度では連続的な活動推移を把握することはできなかった。

研究分担者の市原らは、2011年霧島火山新燃岳噴火後に増設された空振観測点の記録を用い、約40 km 離れた桜島火山の爆発に伴う空振の伝播に関する研究を行ってきた。その目的のひとつに、近傍に観測点を置くことのできない離島火山活動の観測・監視手法の開発があった。その結果、空振伝播に対する地形と大気構造の変化の相乗作用を明らかにし、その効果を数値計算で予測できる見通しが立った(Lacanna, Ichihara et al., 2014)。同様に西之島火山に対しても、父島に空振アレー観測網を展開し2014年4月から連続観測を実施した。西之島からの明瞭なシグナルを多数検出したが、観測頻度の差から限度があり噴火の活動予測までは至っていない。それ以前に予測に不可欠な新島形成過程に伴う現象に関する知識を殆ど有していない。

一方、研究代表者らは、2011年東北沖地震以降、機動性の高い、新しいリアルタイム海底津波観測システムの開発に取り組んできた。このシステムは、高精度・高感度の津波計である海底ベクトル津波計（Sugioka, Hamano et al., 2014）と自律走行型海上通信プラットフォームであるウェーブグライダー（SV-2: Liquid Robotics Inc.）から構成され、着手からおよそ3年で完成した（2014年3月）。完成後に行った東北沖の実海域でのリアルタイム津波観測中には、2014年4月1日のチリ地震津波のリアルタイム観測に成功し、実用化への目処が立った。本研究計画は、この開発および観測実績の延長線上に位置付けられ、離島観測という必至の命題に対して完全自律で航走可能なウェーブグライダーを用い、リアルタイムでの火山活動のリモートモニタリングシステムを構築するものであった。

2. 研究の目的

本研究では、離島火山の監視を目的に、無人走行型の海上プラットフォームであるウェーブグライダーを用いた新しい機動的リアルタイム観測システムを開発し、西之島火山近海での観測を実施するものである（図1）。ここでは、噴火活動の監視には、空振計、ハイドロフォン、ガス計測器、可視カメラ、気圧計、水温計という陸上観測に対し遜色のない多角的観測項目の連続モニタリングにより、活動推移を把握し、将来の活動予測につなげていく。また、人的災害も危惧される津波に対しては、山体崩壊あるいはカルデラ陥没により発生する津波を想定し、海上のGPS/GNSS慣性航法装置（海面水位変化）と海底のベクトル津波計（海底水圧変動）とを組み合わせ、即時に高精度な津波伝播予測に供する常時観測を実現するものである。最終的には、一般的な離島火山に有効な監視手法を構築し、気象庁の監視業務でも利用可能な実用化レベルまで到達することが研究期間内の目標とした。

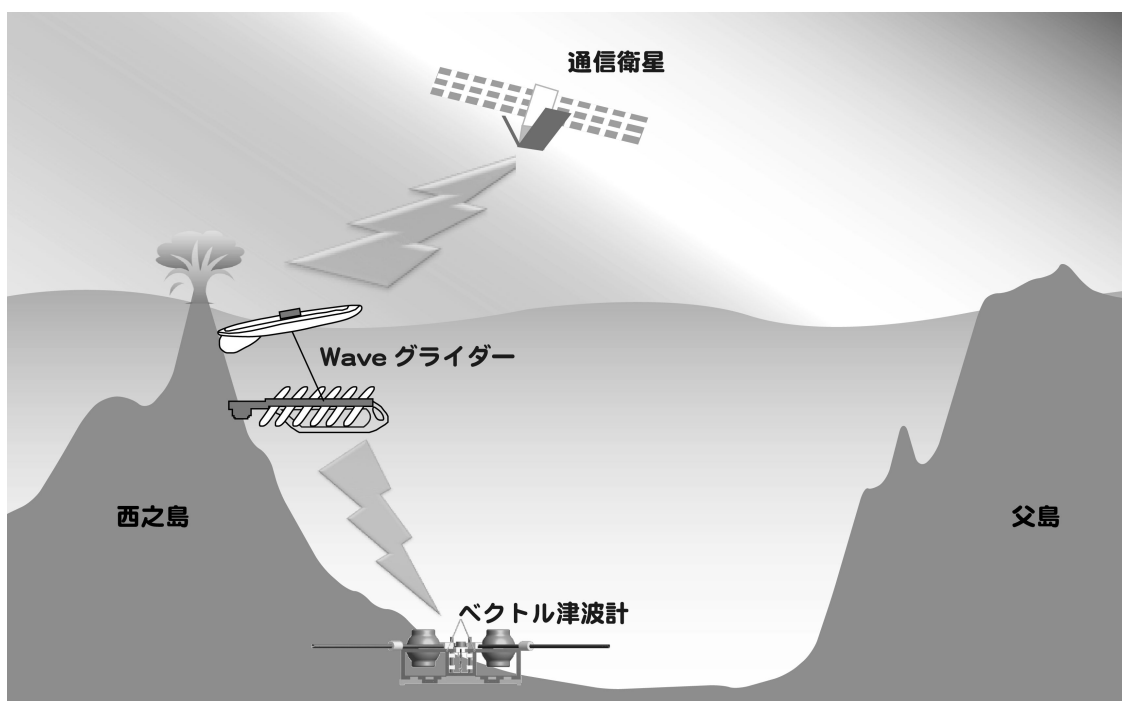


図1：本研究計画で構築した離島火山活動リモートモニタリングシステムの概念図

3. 研究の方法

ウェーブグライダーは、海洋波だけを動力源としているため、原理的には半永久的に自律航走可能であり、海洋観測にとってはまさに夢のようなヴィークルである。このウェーブグライダーのもつ長期安定性と機動性を活かした長期間の連続運用とリアルタイム津波観測の実績をもつのは、世界的に見ても研究代表者らのグループだけである。この独自の観測システムの開発・運用実績から得られた知見に基づき、ウェーブグライダーに次の二つの機能をもたせ、離島火山活動のリモートモニタリングシステムを開発した。

(1)海上の観測プラットフォームとしての機能

ウェーブグライダーを火山表層活動のリモートモニタリングのプラットフォームとして、火山噴火に伴う大気音波検出のための空振計（SI104：白山工業株式会社）、火道振動に伴う水中音波検出のためのハイドロフォン（HTI-92-WB：High Tech Inc.）、山体崩落に伴う海面変位検出のための波浪計としてのGPS/GNSS慣性航法装置（SPATIAL：Advanced Navigation社）、望遠観測のためのタイムラプスカメラ（BCC100：Brinno Inc.）を海上のフロート部分に搭載した（図2）。

空振計は2機をウェーブグライダーフロート部の前後の両端に配置し、両者の相互相関関数から風波によるノイズをキャンセル可能な仕様とした。また、タイムラプスカメラは視野角が140度であるため、全方位をカバーするよう90度おきの4方向に4機をセットした。

観測装置のうち、タイムラプスカメラの映像以外のデータは、Iridium衛星を介して、リアルタイムで陸上へと伝送されるよう設計した。空振計ならびにハイドロフォンの生波形記録は200 Hzサンプリングで収録されるが、データ伝送時には20 Hzにダウンサンプルする仕様とした。また、相互相関係数の計算も可能な仕様である。それぞれのセンサーのインターフェースは、空振計とハイドロフォンについては研究協力者の飯野（シモレックス社）が、波浪計としてのGPS/GNSS慣性航法装置は同じく大西（テラテクニカ社）が開発および製作までを行った。尚、空振計とハイドロフォンはウェーブグライダーから電力が供給されるが、GPS/GNSS慣性航法装置については、省電力化を図り、専用のリチウムイオン電池を有するウェーブグライダーとは完全に独立したシステムとして設計した。

(2)海底—海上間の通信プラットフォームとしての機能

西之島は、水深4000 mの海底から立ち昇る巨大な成層火山である。新島形成後、東側急斜面に溶岩流が供給され、活動の推移によっては、山体の急激な圧力変化による巨大な山体崩壊の発生も想定された。また、成層火山であれば必然的に生じるカルデラの陥没によっても津波は発生する。西之島の火山活動に伴い、津波が発生した場合、本土には影響が及ばずとも、父島や母島での人的災害を引き起こす可能性は否めない。東方130 kmに在る父島沿岸への津波の到達は20分以内と推定されており（前野，2014）、災害防止には、津波発生時の即時検知と活動推移の常時監視に基づいた事前の予測が必須である。

ここでは火山性津波検出に特化した観測手法を独自に考案した。即ち、山体崩壊やカルデラ陥没に伴う津波のトリガーイベントとしての海面変位をGPS/GNSS慣性航法装置で、津波の伝播経路上の海底に設置したベクトル津波計から津波（長波）の存否について判断し、津波発生の場合は、ベクトル計記録から、振幅と沿岸到着時刻を推定するという、津波到来予測の即時性と正確性を追求した。

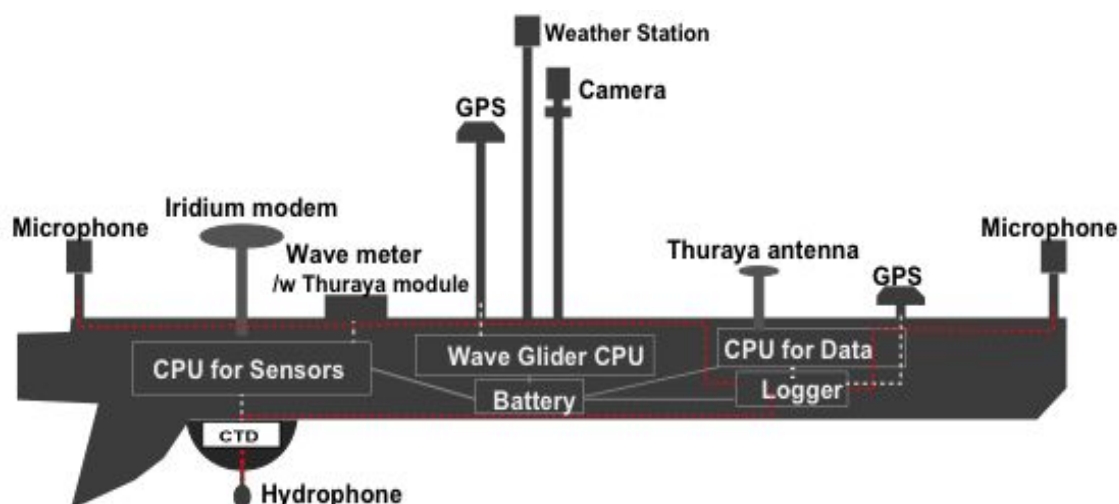


図2：ウェーブグライダーのフロート部の火山表層観測システムの概念図

4．研究成果

完成させた離島火山観測システムを用いて西之島近海における実海域観測を実施した。本観測に先駆けた試験観測は、火山活動の静穏期中であった2016年10月に実施し、装置の正常動作を確認した。その後の2017年12月に、最終目標である自律航走による本観測を実施した（図3）。

2017年12月1日の夕刻に、西之島から東方に130 km離れた父島の近海で備船（小笠原漁業協同組合所属の8.5 tonの漁船：神源丸）から本システムを海面上に設置した。本システムは予め定められたウェイポイントを辿りながら自律航走し、4日の早朝に西之島東方の近海に到達した。その後は火口を中心とする半径5 kmの円軌道上を時計回りに周回しながら、西之島火山の観測を続けた。島を5周した8日に観測海域を離脱し、父島へと向かわせた。10日には父島漁場外に指定したウェイポイントに到着したが、その後は「日の字」航走をしつつその場に待機させ、13日に設置と同じ漁船に揚収された。

12月1日から10日までの実質的な観測期間を通し、空振計・ハイドロフォンのIridium衛星経由でのデータ伝送は、ほぼ損失なく成功した。収録データも良好であり、空振計2機の波形記録を用いた相互相関解析から、4日の14時から20時頃まで、微弱ながらも高相関パターンが見られた。更に、高相関を呈した期間の波形記録に対し、4~20 Hzのバンドパスフィルターを施して解析を行ったところ、シグナルの振幅は14時から30分程度は比較的大振幅を呈するが、その後は徐々に振幅が減少しながら17時までには続いていることが分かった。尚、感度補正した音圧レベルは最大で ± 3 Paと見積もられた。一方、西之島周回軌道上にあった、4日早朝から8日午前中の中のタイムラプスカメラによる映像撮影については、カメラが可視光カメラであるため昼間に限られ、更に天候、海象にも大きく依るため、火口付近の活動をはっきりと捉えられるのは平均して一日10時間以下であった。この条件で撮影された観察映像のうち、4日の14時頃から火口近傍での噴気活動が見られた。この噴気活動は連続的ではなく、30分程度の激しい活動が断続して日没まで続いたことが確認された。この活動は空振計でシグナルが捉えられた期間に当に対応する。尚、噴気の活動中の高さについては、島の標高と比較して最大で500 m程度と眺望された。

本研究で構築した離島火山観測システムを用いた西之島近海観測によって確認された12月4日の噴気活動は、海上保安庁や自衛隊による定期的目視観察では火山活動報告がなかった時期であった。本研究で構築した離島火山活動のリモート観測システムは、これまで観測手段が無いため、未知であった海洋島形成過程に対し新たな知見が得られるばかりでなく、減災・防災に資する実用的装置として大いに貢献できるものと期待される。今後は、気象庁や海上保安庁などの関係省庁との連携をはかり、より実用性の高いシステムに昇華させることを目指す。更に、2018年12月22日のインドネシアのクラカトア島で発生した火山噴火あるいはそれに伴う火山性津波による被害など、環太平洋をとりまく国内外の海域火山への適用を見据え、本システムの早期実用化の実現が次なる課題である。



図3：西之島近海を周回観測中の離島火山活動リモートモニタリングシステム

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計35件) (全て査読有り)

Fukao, Y., O. Sandanbata, H. Sugioka, A. Ito, H. Shiobara, S. Watada, K. Satake, Mechanism of the 2015 volcanic tsunami earthquake near Torishima, Japan, Science Advances, doi:10.1126/sciadv.aao0219, 2018.

Poupardin, A, P. Heinrich, H. Hebert, F. Schindele, A. Jamelot, D. Reymond, H. Sugioka, Traveltime delay relative to the maximum energy of the wave train for dispersive tsunamis propagating across the Pacific Ocean: the case of 2010 and 2015 Chilean Tsunamis, Geophysical Journal of International, doi:10.1093/gji/ggy200, 2018.

Natsume, Y., M. Ichihara, M. Takeo, A non-linear time-series analysis of the harmonic tremor observed at Shinmoedake volcano, Japan, Geophysical Journal of International 216, 1768-1784, doi:10.1093/gji/ggy522, 2018.

Shinohara, M., M. Ichihara, S. Sakai, T. Yamada, M. Takeo, H. Sugioka, Y. Nagaoka, A. Takagi, T. Morishita, T. Ono, A. Nishizawa, Continuous seismic monitoring of Nishinoshima volcano, Izu-Ogasawara, by using long-term ocean bottom seismometers, Earth, Planets and Space, 69, doi: 10.1186/s40623-017-0747-7, 2017.

Ichihara, M., S. Matsumoto, Relative source locations of continuous tremor before and after the subplinian events at Shinmoe-dake, in 2011, Geophysical Research Letters, 44, doi:10.1002/2017GL075293, 2017.

Nishida, K., M. Ichihara, Real-time infrasonic monitoring of the eruption at a remote island volcano using seismoacoustic cross correlation, Geophysical Journal of International, 204, doi: 10.1093/gji/ggv478, 2016.

Ichihara, M., Seismic and infrasonic eruption tremors and their relation to magma discharge rate: A case study for sub-Plinian events in the 2011 eruption of Shinmoe-dake, Japan, Journal of Geophysical Research, 121, doi:10.1002/2016JB013246, 2016.

[学会発表] (計62件)

Sugioka, H., Y. Hamano, M. Ichihara, N. Tada, K. Nishida, M. Takeo, Remote monitoring of island volcanic activities using an autonomous vehicle of the Wave Glider, JpGU Meeting, 2018.

Ichihara, M., H. Sugioka, K. Nishida, N. Tada, M. Takeo, Y. Hamano, Acoustic monitoring of an island volcano using Wave Glider: A test operation at Nishinoshima, Japan, 2018 JpGU Meeting, 2018.

Takeo, M., T. Ominato, M. Ichihara, F. Maeno, T. Kaneko, M. Shinohara, K. Baba, K. Nishida, A. Yasuda, A. Watanabe, H. Sugioka, Y. Hamano, N. Tada, S. Nakano, M. Yoshimoto, K. Kawakami, T. Chida, A. Takagi, Y. Nagaoka, Brief overview of landing survey and seismic observation at Nishinoshima, 2017 JpGU-AGU Joint Meeting, 2017.

浜野洋三, 杉岡裕子, 市原美恵, 火山島活動の周辺の海からの観測の重要性について, 2017 JpGU-AGU Joint Meeting, 2017.

浜野洋三, 杉岡裕子, 市原美恵, 西田究, 馬場聖至, 多田訓子, 西之島周辺での離島火山モニタリングシステムの初めての運用, 2017 JpGU-AGU Joint Meeting, 2017.

Sugioka, H., Y. Hamano, Practical performance evaluation of the Wave Glider in geophysical observations, 2016 EGU Spring Meeting, 2016. (Invited)

Sugioka, H., Infragravity waves, Tsunami, and Ocean tides observed by a deep sea differential pressure gauge (DPG) - Development, calibrations and performance, 2015 IRIS OBS-IPSymposium, 2015. (Invited)

[その他]

ホームページ等

<http://www.jamstec.go.jp/iorgc/iomics/waveglider/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：市原美恵

ローマ字氏名：ICHIHARA, Mie

所属研究機関名：東京大学

部局名：地震研究所

職名：准教授

研究者番号(8桁)：00376625

研究分担者氏名：浜野洋三

ローマ字氏名：HAMANO, Yozo

所属研究機関名：東京大学

部局名：大学院理学系研究科

職名：名誉教授

研究者番号(8桁)：90011709

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：西田究

ローマ字氏名：NISHIDA, Kiwamu

研究協力者氏名：武尾実

ローマ字氏名：TAKEO, Minoru

研究協力者氏名：卜部卓

ローマ字氏名：URABE, Taku

研究協力者氏名：前野深

ローマ字氏名：MAENO, Fukashi

研究協力者氏名：飯野正寛

ローマ字氏名：IINO, Masahiro

研究協力者氏名：大西信人

ローマ字氏名：ONISHI, Nobuhito

研究協力者氏名：楠本仁麦

ローマ字氏名：KUSUMOTO, Yoshimu

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。