

2012～2020年間の海上保安庁における火山観測とその成果[†]

伊藤弘志^{*1}, 新村拓郎^{*2}

Observations of sea-area volcanoes by the Japan Coast Guard between 2012 and 2020 and the associated results[†]

Koji ITO^{*1} and Takuro SHINMURA^{*2}

Abstract

The Japan Coast Guard has been observing volcanoes in the adjacent seas of Japan for safety ship navigation, volcanic disaster prevention, and securing marine interests. The target volcanoes are volcanic islands and submarine volcanoes in the Izu-Ogasawara Islands and the Ryukyu Islands, and the observations are being made using aircraft and survey vessels. Observations by aircraft are visual observations, thermal observations, and geomagnetic observations, and observations by survey vessels are topographical surveys, geomagnetic and gravity observations, water sampling, sediment dredging, and crustal structure exploration. In the last decade, large-scale eruptions have occurred on Nishinoshima Volcano and Kuchinoerabujima Volcano, and eruptive activity has continued intermittently on Suwanosejima Volcano, Sakurajima Volcano, and Satsuma-Iojima Volcano. In addition, unusual geothermal and hydrothermal phenomena were observed in Myojinsho and Aogashima. The Japan Coast Guard has endeavored to prevent volcanic disasters by appropriately observing these volcanic activities and reporting the results to The Coordinating Committee for Prediction of Volcanic Eruptions. In addition, a comprehensive survey of volcanoes is conducted in advance during calm normal times of volcanic activity for the purpose of comparison with the time of eruption. The observation of marine volcanoes has many challenges that are different from those of land volcanoes, but it is necessary to promote the sophistication of those observations while incorporating new technologies such as observations from satellites and quantitative analysis of the color tone of the discolored water.

1 はじめに

海上保安庁は、船舶の航行安全という観点から海域火山（ここでは火山島と海底火山を併せてこう呼ぶ）の活動を監視してきた。これまで、海域火山の活動により周辺を航行する船舶が直接的な

被害を被った例は非常に少ないが、1952年の明神礁における活動に、調査行動中の海上保安庁所属第五海洋丸が巻き込まれて遭難、乗組員ら31名が殉職した事件はよく知られている（海上保安庁、1953）。また、大規模な火山活動は船舶のみ

[†] Received September 17, 2020; Accepted November 4, 2020

* 1 技術・国際課 海洋研究室 Ocean Research Laboratory, Technology Planning and International Affairs Division

* 2 技術・国際課 Technology Planning and International Affairs Division

ならず周辺の人間社会にも大きな被害を及ぼす可能性があり、1883年のインドネシア・クラカタウ火山の噴火で発生した津波により36,000人以上の周辺住民が犠牲になった例や、1785年の青ヶ島火山の噴火により逃げ場のない孤島に住む住民がほぼ全滅してしまった例（荒牧・他，1991）がある。

また、最近では海域火山の活動により新たな陸地ができることで生まれる、領土・領海・排他的経済水域といった海洋権益にも関心が集まっており、例えば1975-77年の南日吉海山の活動時には、新たな陸地は生成されなかったもののソ連の調査船や国籍不明船が周辺に展開するなど、海域火山の重要性を垣間見ることとなった（小坂，2004）。このような火山活動による新島の形成は、我が国においては他に南西諸島の昭和硫黄島（小林，1985）、当時日本領だった千島列島の武富島（水路部，1937）が知られている。

これらのような観点から海域火山調査は行われているが、海域火山、特に海底火山では、海水の存在により陸上火山に比べて観測機器の設置やリアルタイムでの監視が非常に困難である。陸上火山においては、2000年の三宅島火山や有珠火山である程度の直前噴火予知に成功したが、海底火山における噴火予知の成功事例はない。また、いったん活動が始まった場合、海域では周辺の水との反応が起きやすいため、火山活動の推移予測が難しいという性質がある。

第二次世界大戦後の我が国周辺における主な海域火山の噴火には、伊豆大島火山、三宅島火山、明神礁火山、福德岡ノ場火山、桜島火山、諏訪之瀬島火山等があげられるが、海上保安庁は主に航空機による観測を行い、写真や映像を記録してきた。また、プログラミング航行可能な小型艇による測深・採水や、マルチバンドカメラでの変色水観測など、観測技術の開発にも取り組んできた。

そして、得られた情報を一般に公開し、防災に役立てられるよう、観測成果は火山噴火予知連絡会に報告される他、学術論文としての公表や海域火山データベースの整備等がなされている。

本稿では、このような困難をかかえつつ実施してきた海域火山観測の概要について、ここ10年間のトピックとして取りまとめた。

2 観測対象の火山と観測頻度

海上保安庁が主な観測対象としているのは、伊豆半島から火山列島に至る南方諸島海域と、桜島から西表島に至る南西諸島海域である（Fig. 1）。この海域は共にプレートの沈み込みによって形成された火山フロントにあたり、大小さまざまな海域火山が分布している。これらの火山の中には、多くの人が住む有人島、海上から見ると単なる岩にしか過ぎない岩礁、海面からはまったく存在がわからず、マルチビーム測深機等による調査によってしかその存在を知ることができない海底火山など様々な形態があるが、海水を取り除いてみると、陸上の火山に負けず劣らぬ堂々たる山体を持つ火山であることが多い。また、火山噴火の源となるマグマの組成についても、島弧性ソレライトからアルカリ岩に至る玄武岩、量的にはあまり多くはないが安山岩、やや背弧側に位置し爆発的な噴火を起こす恐れのあるデイサイトから流紋岩まで非常に多様性に富んでいる。

観測頻度については、基本的には高ければ高いほどよく、さらにはリアルタイム観測を行うのが理想であるが、予算・人員の制約により、本庁に

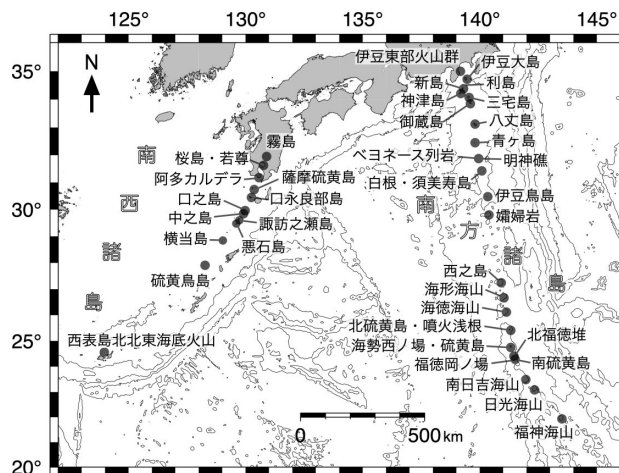


Fig. 1. Mainly observed volcanoes in the adjacent seas of Japan.

図1. 主な観測対象海域火山。

においては「火山噴火予知調査」として航空機による南方諸島の定期観測を年に2回、南西諸島の定期観測を年に1回行っている。また、第十管区海上保安本部は、南西諸島方面の定期火山観測を年に1～2回行っているほか、各管区本部では哨戒時等に海域火山の観測も同時に行っている。ひとたび火山活動が確認された場合には、必要に応じ、航空機を用いた臨時の観測が適宜行われる。その他、南方諸島南方の諸火山については、海上自衛隊から観測報告の提供を受けている。

火山活動には非常に様々な現象が含まれ、火山それぞれの活動様式の違いも大きいため、専門的な知識を持った観測者が長期間にわたって観測を行うのが望ましい。そのような観点から、本庁の行う南方諸島、南西諸島の観測には東京工業大学の野上健治教授が、第十管区海上保安本部の行う南西諸島の観測には鹿児島大学の小林哲夫教授（平成15～26年）、京都大学の井口正人教授（平成16年～）、中道治久准教授（平成26年～）が同乗し、指導・助言を行っている。

これらの、火山活動の現況を知るための主に航空機を用いた観測のほか、測量船を用いた「海域火山基礎情報調査」も行われている。これは、海域火山の基本的な性質、例えば地形、岩質、地磁気異常や重力異常の分布、地下構造などを明らかにしておき、火山活動の理解、予測に役立てるためのものである。原則として一年につき一火山で行っているが、大規模な火山の場合には複数年にまたがることもある。その他にも火山活動に応じて臨時的な調査を行うこともある（Table 1）。

3 観測使用機器及び手法

一般的に陸上の火山においては、地震計、空振計、傾斜計、温度計等様々な種類の観測機器を用いて行われるが、海域火山においては機器の設置、メンテナンス、データ回収等が困難なことが多く、これらとは異なる手法が用いられる。以下に、海上保安庁の火山観測で主に使われる観測手法と使用機器について記す。

Table 1. List of already observed volcanoes in the adjacent seas of Japan using survey vessels.

表 1. 測量船を用いて観測している海域火山

実施年度	使用船舶	場所
2020	昭洋	手石海丘機器テスト
2019		未実施
2018		未実施
2017	海洋	利島至三宅島
2017	海洋	若尊
2016	拓洋	伊豆大島
2016	昭洋	海徳海山
2016	昭洋	西之島
2015	昭洋	西之島
2014	拓洋	手石海丘機器テスト
2014	昭洋	手石海丘機器テスト
2013	昭洋	硫黄島
2012	昭洋	西之島新島（その3）
2011	昭洋	西之島新島（その2）
2010	昭洋	西之島新島（その1）

3.1 航空機による観測

航空機による観測は、目視観測が主となる。例えば噴気・噴煙の有無や新たな火口の出現、海面における軽石等の浮遊物というような事象を見るが、海域火山ならではの火山現象として変色水を中心に観測を行うことが多い。変色水とは、火山体から湧出する高温酸性の熱水が海水と反応し、含有する Si, Fe, Al といった元素の低結晶質物質が析出して海水に色が付く現象であり（小坂・他, 1977）、火山活動が静穏な時期には Si, Al に富んだ白色系の、活発な時期には Fe に富んだ茶褐色系の色を呈する傾向があることが知られている。そのため、変色水の量、色調を観測することで火山活動の消長を推し量ることができるだろうと考えられている（小坂・他, 1996）。変色水の他、火山島であれば噴気量、勢い、火山地形の変化などを画像、映像によって記録しておくことで、火山活動の消長を把握することができる。定期火山監視観測においては、航空機の胴体にあけ

た開口部から真下に向けて降ろしたカメラを用いて垂直写真を連続撮影し、帰投後にGIS上で張り合わせることで火山体全体をほぼ真上から撮影した写真を作成し、解析の基図として利用している（例えば海上保安庁，2013a）。また、ヘリコプターを使用する場合にはホバリングしながら観察することができるので、最適な位置から効率よく観測を行うことができる。

使用機器：デジタルカメラ，デジタルビデオカメラ

火山の噴火直前にはマグマが地下深部から上昇してきたり，火山ガスの量が増えたりするために地温が上昇すると考えられる。このような現象を観測するために赤外画像を取得し，同時に対象の温度も計測している。計測可能温度幅は $-40 \sim 2,000^{\circ}\text{C}$ （R500EX-Pro）であるが，雲がかかっていると赤外線が吸収されてしまうため撮影はできなくなる。また，航空機内部からガラス窓を通して撮影することも同様の理由により不可能である。

使用機器：テスト社製 TESTO-890-2（平成 26～28 年），日本アビオニクス社製 InfRec R500EX-Pro（平成 29 年～）

噴火前に上昇するマグマやそれに伴って昇温，増加する熱水は，その高熱により山体を構成する岩石の持つ残留磁気を弱める。この残留磁気の消失を捉えることで，高温物質の移動の様子を推定することができる。航空機はそれ自体が高磁性体であるので，その影響をなるべく少なくするように非磁性の特別な尾部に磁力計を取り付け（宮崎・他，2012），平成 30 年度までおおよそ 1 年に南方諸島，南西諸島それぞれ一か所ずつ計測を行った。静穏時の磁気異常の分布を収集しておけば，変化分をもって噴火に関わるマグマの動きを捉えることができると期待される。また，固結後移動していない苦鉄質の溶岩で火口が満たされている場合には，強い双極子磁場が発生する。これは隠れた火口の分布や，山体の岩質を推定するの

に役立つ。

使用機器：GEM システム社製 光ポンピングカリウム航空磁力計

観測高度：4,800 ft（1,460 m）

3.2 測量船による調査

3.2.1 静穏時の調査

測量船による調査は，主に火山活動が静穏な時期に行われる。なぜなら，海域火山の噴火の際には水が関与する大規模な爆発がしばしば発生し（例えば 1952 年明神礁，1989 年手石海丘），船舶に対する脅威となりうるからである。静穏時調査の目的は，火山の基本的な情報をあらかじめ収集しておき，噴火前の予兆を捉えたり噴火の推移を予測したりすることであり，調査項目は，地形，地磁気，重力，地殻構造，水質，火山体構成物質等である。使用する測量船は調査内容や海域によって異なるが，「昭洋」，「拓洋」，「海洋」が主に使用される。

地形調査はマルチビーム測深機を用いて行われ，水深にもよるが精密な地形図を描くことができる。そこから火山地形を読み取ることで，火山の噴火史，噴火様式，噴火規模，最新噴火の時期等を推定することができる。また，サイドスキャンソナーを用いることで，実際に海底を目で見たかのような画像を得ることができ，微地形の判読が可能となる。2000 年の三宅島噴火の際には，海中の噴火口や地割れを見出すことができた（海上保安庁，2002）。

使用機器：KONGSBERG 社製 EM122 及び EM710（昭洋，拓洋），KONGSBERG 社製 EM302（海洋）

航空機を用いて磁気測量を行うのと同様，船舶による観測においても磁気測量を行う。船体磁気の影響を避けるため，400 m 延ばしたケーブルの端にプロトン磁力計を取り付けて測定する。拓洋に搭載されている海上磁力計は，2012 年度に新機種への更新が行われた（藤岡・熊川，2014）。

使用機器：テラテクニカ社製 PM-217（昭洋），

国際電子工業社製海上磁力計 PMP-400 (拓洋)

重力異常は動揺を避けるため船体の重心部近くに取り付けた重力計を用いて計測する。特に火山体のブーゲー重力異常は地下の高密度物質、低密度物質の分布を示すので、埋没カルデラの有無やマグマ溜まり、熱水帯の位置等を見積もることができる。「昭洋」及び「拓洋」に搭載されている海上重力計は、2012年度に新機種への更新が行われた(藤岡・熊川, 2014)。

使用機器：Micro-g LaCoste 社製海上重力計 Air-Sea System II (昭洋, 拓洋)

地下深部の火山体の構造を知るためには、人工地震探査を行う。反射法地震探査は、船尾から曳航したハイドロホンで反射波を受振し、地層断面を実際に目で見たような記録が得られる。屈折法地震探査は、屈折波を海底に設置した海底地震計で捉えて地殻内部の地震波速度構造を推定することができる。ただし、一般的に火山体は多孔質の火砕物を多く含むため、地震波が減衰しやすく深い部分の記録は不鮮明になる。反射法地震探査では火山噴出物の空間分布がわかり、地形と組み合わせることで火山体の新旧、火山体の区分、マグマ溜まり位置の推定などが行える。屈折法地震探査では、地震波速度構造をもとに、マグマ溜まりや熱水溜まりのような高温部を識別することができる。

使用機器：反射法地震探査の受振部はシングルチャンネル、波源はエアガンを用いることが多い

火山体の構成物質を得るために、円筒形採泥器及びチェーンバック型採泥器を用いて表層の火砕物、溶岩片等を採取している。得られた岩片の化学組成を分析し、火山の地球化学的な位置づけや火山の分類に用いている。

使用機器：円筒形採泥器、チェーンバック型採泥器

3.2.2 活動時の調査

活動中の火山に近寄って調査を行うことができるように、無人の小型測量艇を運用している。測量船「昭洋」には「マンボウⅡ」を、測量船「拓洋」には「じんべい」、自立型高機能観測装置(ASV)を搭載している。噴火中あるいは噴火直後の火山において、母船は安全なところに待機したまま、あらかじめコースを指定した自動操縦または無線操縦でこれらの測量艇を調査海域に送り込むことができる。これらの測量艇にはマルチビーム測深機、採水装置を取り付けることができる。また、2015年の西之島調査時には、甲板にトレーを取り付け、噴出物の採取を実施した。

使用マルチビーム測深機：R2Sonic 社製 Sonic2022

3.3 最近新たに使用されるようになった観測装置および手法

前項ではこれまで主流であった観測装置・手法について記載したが、ここでは最近の技術発展に伴い使用されるようになり、また今後の使用発展が期待される観測装置・手法について記載する。

海域火山、特に海底火山はその多くが人界からかけ離れており、十分な観測が行われてこなかった。小規模で短時間の噴火がまったく人に知られず始まり、そのまま終息してしまうことも多くあったはずである。このような観測の空白時間を人工衛星による監視で埋めようという試みがなされてきた。海上保安庁は、宇宙航空研究開発機構(JAXA)と気象庁との「火山活動の評価及び噴火活動の把握に関する共同研究」に参加し、陸域観測技術衛星「だいち」や Landsat8, Terra 等の可視画像を用いることで海域火山の活動がある程度把握できることを示した(気象庁火山噴火予知連絡会衛星解析グループ, 2019)(Fig. 2)。

また、2013年の西之島噴火の際には、宇宙航空研究開発機構地球観測センターが公開しているMODISによる可視画像、熱画像を用いて、海面への噴火の影響がいつごろから始まっていたかを見積もっている(海上保安庁, 2013b)。衛星画像の火山観測への利用は価格面からの制約も大き

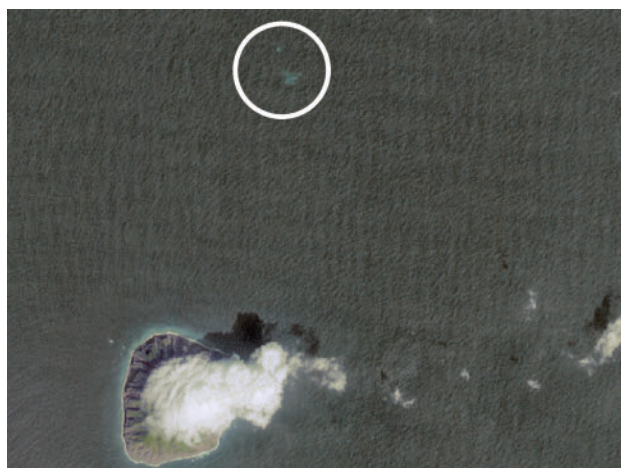


Fig. 2. Discolored water of the Fukutoku-Okanoba Volcano in the ASTER image (in the white circle). Citation: ASTER-VA image courtesy NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems, and U.S./Japan ASTER Science Team.

図2. ASTER画像に写った福徳岡ノ場火山の変色水(白丸の中)。Citation: ASTER-VA image courtesy NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems, and U.S./Japan ASTER Science Team.

いが、今後有効な手法になると期待される。

火山調査の第一歩はまず火山地形の解析であり、そこから火山の噴火様式や活動履歴などを読み取っていくことができる。海域火山ではマルチビーム測深機を用いた地形調査が行われてきたが、最近、自律型潜水調査機器(AUV)を用いた詳細微地形調査が可能になった(詳細は本特集号の南論文を参照)。例えば南西諸島海域では、火口、溶岩流等の微細な火山地形が発見されている。AUVは火山体の表面近くまで潜行して調査を行うので、調査範囲は狭まってしまうが非常に密度の高いデータが得られる。海面からの母船によって得られた地形を基に、AUVで詳細微地形を取得すべき場所を選定する、という運用が効率的な調査手法となるであろう。そのほか陸上部、浅海部においては、航空機からのレーザー光線で標高や水深を調べる航空レーザー測量により詳細な地形を得ることもできる。

海上保安庁の航空機には、遭難者捜索などのためのカメラが搭載されている。可視映像と赤外映像を得ることができ、任意の方向の画像を得るこ

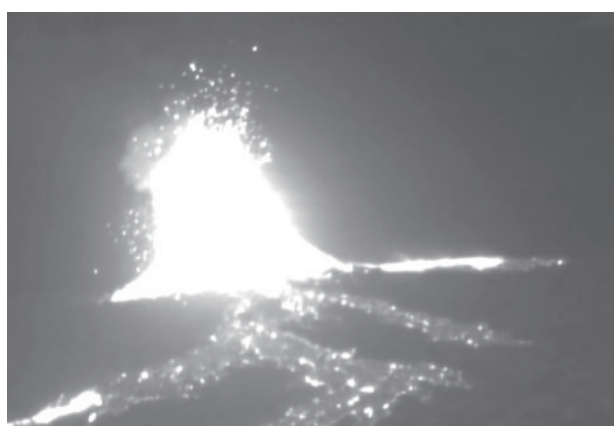


Fig. 3. (Upper) Visible image of strombolian eruption with mainly volcanic gas ejection. (Lower) Infrared image of same type eruption.

図3. (上) ガスの噴出を主とするストロンボリ式噴火の可視画像。(下) 同タイプの噴火の赤外画像。

とができる。周辺に霧がかかっていたりガスの放出が主体の噴火だったりする場合には肉眼での観測は困難であるが、赤外線を用いることによって活動の様子をはっきりと把握することができる(Fig. 3)。

4 観測の成果

海域火山観測の結果は、適宜広報によって社会へ発信するとともに、火山噴火予知連絡会に提出して火山防災のための資料となるよう努めている。また、特異事象などがあれば、個別に学术论文、技術報告として取りまとめている。本項目では、最近10年間に観測された主要な事項を取りまとめる。

4.1 南方諸島

南方諸島は伊豆一小笠原弧に属し、活動的な火山を多く含んでいる。Fig. 1 に示すように、伊豆東部単成火山群からマリアナ弧北部の日光海山までの火山において観測実績がある。これらの火山の多くには変色水がみられるが、定常的にみられるものであり、それらが即噴火活動と結び付けられるわけではない。また、伊豆鳥島や硫黄島など一部の火山ではしばしば噴気がみられる。特に2000年に噴火し、その後長く大量の火山ガスを放出し続けた三宅島火山では、山頂の火口からの噴気が定常的にみられる。その他、西之島火山では2013年に噴火が始まり、2015年にいったん静穏化したものの、再び活動は活発になり、現在まで続いている。

4.1.1 伊豆諸島北部

伊豆諸島では伊豆大島から青ヶ島まで多数の火山島が知られているが、数多くの海底火山も存在している（例えば、葉室・他、1983）。この海域は水深が浅く、首都圏からも近いため、いったん大規模な噴火が発生すれば大きな被害が発生する可能性がある。そのため、海底火山の分布を明らかにするため、海底地形調査を行った。対象海域は伊豆大島の西部から南部にかけての海域（2016年）と、利島―新島―神津島―三宅島周辺の海域（2017年）である。両海域共に、側火山やカルデラなどの火山体が多数見つかった（海上保安庁、2020）。また、手石海丘の地形調査を行った結果、1989年から地形が浸食により変化していること、噴火直後に湧出していた気泡が見られないこと、岩脈の貫入に関連すると考えられるグラーベンの存在が明らかになった（海上保安庁、2015a；南・岩淵、2015）。

4.1.2 三宅島

三宅島火山は2000年の噴火以来2016年ごろまで山頂より大量の火山ガスを放出し続けてきた。海上保安庁は噴火前から三宅島火山の航空磁気測量を行っており、2013年に最新の測量を行った。

結果としては、2000年噴火で形成された山頂カルデラには逆ダイポール型の重力異常が存在し、噴火後も大きな変化は発生していないことが明らかになった（海上保安庁、2013d）。

4.1.3 青ヶ島

青ヶ島火山では、海岸沿いに変色水がしばしば見られることが知られていたが、2013年には、島北部の黒崎付近に変色水が見られるとともに、海岸沿いの崖部に噴気が発見された（7月1日）。この噴気域は60℃近い高温を示したが（7月8日）（Fig. 4）、その後噴気は見られなくなり、温度も低下していった（海上保安庁、2013c）。また、この噴気活動が見られた期間は海岸沿いで変

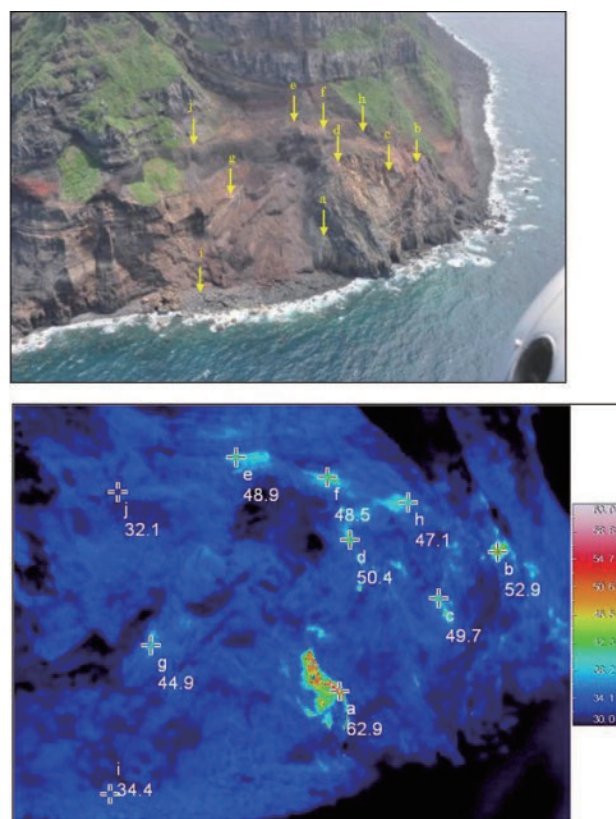


Fig. 4. Geothermal zone discovered near Kurosaki in the northern part of Aogashima Volcano. (Upper) Visible image. The arrow parts are the high temperature areas. (Lower) Infrared image. The numbers show temperature (degree C).

図4. 青ヶ島火山北部黒崎付近で発見された地熱地帯。(上) 可視画像。矢印部分が高温域。(下) 赤外画像。数字は温度(℃)。

色水が見られたほか、約1年先立つ2012年8月26日にはこれまで変色水の見られたことのない島の南端から約1,300 mの付近に変色水が見られた(海上保安庁, 2012)。

4.1.4 明神礁

明神礁では、1952年の噴火以来1970年まで何度か噴火活動が発生したが、1970年以降は時折変色水が見られる程度の比較的静穏な状態を保っていた。その後、2017年には1988年以来的変色水が観測され、航空機による集中的な観測が行われた。変色水が最初に観測されたのは3月14日であり、その後4月20日には気泡が湧き上がっているとともに、気泡周辺が低温であることが赤外線観測で明らかになった(海上保安庁, 2017)。変色水が見られると、その付近の海水温は同時に上昇してきた深部の海水により低温になることが知られており(土出・他, 1987)、同様の現象であると考えられる。その後、5月頃に変色水と気泡が同時に現れるなど活動はピークを迎えたようであるが(Fig. 5)、軽石等の噴火の痕跡は認められぬまま11月を最後に変色水は見られなくなった(海上保安庁, 2018)。

4.1.5 西之島

西之島火山では、2013年11月に海上自衛隊の



Fig. 5. Bubbles and discolored water seen at adjacent Myojinsho Volcano (2013/5/2).

図5. 明神礁付近で見られた気泡発生海域と変色水(2013/5/2)。

航空機により、噴火によって新たな火山島が形成されているのが発見された。この新島は活動様式をマグマ水蒸気噴火からストロンボリ式噴火へと変えながらその後急速に成長した。もともと存在していた西之島新島を飲み込み、2015年11月にいったん噴火は小康状態に入ったが2017年4月に活動が再開し(小野・他, 2015; 小野・他, 2018b)、休止期間をはさみながら本稿執筆時点においても噴火活動は継続している(Fig. 6)。

海上保安庁は航空機による観測回数を増やし、この海底火山による新島形成というまれなイベント



Fig. 6. Eruption of Nishinoshima Volcano. (Upper) Phreatomagmatic eruptions are repeated on an island that appears on the sea surface (2013/11/21). (Lower) The lava and pyroclastic ejecta completely covered Nishinoshima-Shinto by the Strombolian eruptions (2020/9/5).

図6. 西之島火山噴火の様子。(上)海面に現れマグマ水蒸気爆発を繰り返している(2013/11/21)。(下)ストロンボリ式噴火により、西之島新島は溶岩流と火砕流に完全に覆われた(2020/9/5)。

トを観測し続けてきた。また、前述したように、過去の衛星写真の解析から噴火が海面上に影響を与え始めた時期を見積もるなど、新たな手法が実際に役立つ最初の事例にもなった。2015年には測量船「昭洋」及びその特殊搭載艇「マンボウⅡ」を用いた観測を試み（森下・他，2018）、マルチビーム測深機による地形調査、目視観測、採水（東京工業大学と共同実施）（佐藤・他，2018）、自然地震観測及び人工地震探査（気象研究所及び東京大学地震研究所と共同観測）（岡田・他，2018）、火山灰採取（産業技術総合研究所の委託）（斎藤・他，2016）、火山ガス濃度分析を行った。また、翌2016年にも測量船「昭洋」及び「拓洋」での地形調査、採水を行い、10～11月にかけての調査ではGNSS測量のため、上陸調査も行った（福山・他，2018）。沿岸域においては特殊搭載艇「マンボウⅡ」及び航空レーザー測深機 Teledyne Optech 社「CZMIL」（河合，2015）を用いた地形調査を行い、海陸シームレスな地形データを取得することができた（小野・他，2018a）。

今回の西之島火山の噴火では、現在海域火山に適用できるすべての手法を総動員して調査・観測を行い、その経過のおおよそを知ることができたが、噴火の予知、活動の推移予測等を行うことは困難であった。また、航空機の限られた滞在時間（1～2時間）、限られた観測日程（約1か月ごと）では、活動の詳細な推移を捉えることは難しかった。今後は長期間継続的にリアルタイム観測が可能なシステムの構築が望まれる。

4.1.6 海徳海山

2016年に測量船「昭洋」によるマルチビーム測深及び磁気測量を行った。それによると、海徳海山は東海徳場、西海徳場、名称のない北側の火山体の3つからなる複合火山であり、西海徳場及び北側の火山体は頂部が平坦で最近の噴火活動の痕跡は見られない。東海徳場は火山地形がはっきり残っており、幾重にも重なるカルデラ、火口や中央火口丘、流れ出した溶岩流等が認められる（小

原・他，2019）。航空機による観測では、この10年間に特異な事象は観測されていない。

4.2 南西諸島

南西諸島は琉球弧に属し、南方諸島同様に活動的な火山を多く含む。霧島火山から西表島北東海底火山までの火山において観測実績がある。やはり定常的に変色水や噴気がみられる火山が多く、特に薩摩硫黄島では大量の変色水が島の周囲から湧出している。南西諸島では桜島火山、諏訪之瀬島火山が頻繁に噴火しており、霧島火山、口永良部島火山でも噴火が発生した。第十管区海上保安本部は福岡管区气象台と「離島火山防災に係る連携強化」に関する協定を締結し、観測データの提供、気象庁職員の航空機への同乗といった協力を行っている（海上保安庁，2009）。

4.2.1 若尊カルデラ

2017年に測量船「海洋」を用いた海底地形及び水質の調査を実施した（海上保安庁内部資料）。若尊カルデラは始良カルデラ（錦江湾）の奥に位置し、始良カルデラの活動の後、19,000年前に活動したと考えられている（Aramaki, 1984；小林，1986；奥野，2002）。カルデラ内からは気泡が大量に湧出し、たぎりと呼ばれている。今回は測量船からの地形、水質調査のほか、浅海用 AUV である「ごんどう S1」及び「ごんどう S2」による海底面付近からの詳細微地形調査も行う予定であったが、たぎりの気泡が原因と思われる緊急エラー発生により断念された。

4.2.2 薩摩硫黄島

薩摩硫黄島は島の周辺に常に大量の変色水が湧出しており、また硫黄岳の火口から白色の噴煙が立ち上ったり、火映現象もしばしばみられたりするなど活動度の高い火山である。ここ10年の間にも数回の噴火が発生している。2013年6月、2019年11月の噴火時には、第十管区海上保安本部は気象庁との協定に基づき气象台職員を同乗させ、航空機による観測を行った。

4.2.3 口永良部島

2014年8月の噴火に引き続き、2015年5月29日および6月18日に、口永良部島新岳が噴火した。たまたま付近海域で業務に当たっていた測量船「拓洋」は島民の救出支援業務にあたり（海上保安庁、2016）、第十管区海上保安本部の航空機は噴火の目視観測を行った（海上保安庁、2015b）。その際には、気象台職員が航空機に同乗している。その後、2018年（10月21日～12月28日）、2019年（1月17日～2月3日）、2020年（1月11日～5月14日）にわたって噴火が発生しており、変色水を採取し分析する等の調査を行っている（海上保安庁、2019）。

4.2.4 沖縄トラフの海底火山

測量船を用いたマルチビーム測深は海域火山の調査に際して非常に強力な手段であるが、水深が大きい場合には得られるデータの密度が小さくなってしまい、また誤差も大きくなる。海上保安庁はAUVを導入し、海底面直上からの非常に精密な地形データが得られるようになった。南西諸島には多くの海底火山があることが知られているが、そのほとんどは詳細な調査が行われていない状態であったため、AUVを用いて地形調査を行った。対象とした火山は宝島北方の海底火山（Minami et al., 2014）、第一奄美海丘（Minami and Ohara, 2016）、奄美カルデラ群（南・小原, 2016）、第三久米海丘（Minami and Ohara, 2017）、中泊海稜（Minami et al., 2020）第三宮古海丘（Minami and Ohara, 2018）である。これらの海底火山では、さまざまな大きさの火口、カルデラ、火砕丘、溶岩流などの火山地形が発見され、その中のいくつかでは気泡、熱水の湧出が認められるなど、活動性を保った火山であるという証拠が得られた。また、金属鉱床形成の可能性も見出されており、今後の開発の基礎資料にもなると期待される。

5 今後の海域火山観測

海域火山はアプローチや観測機器の設置が困難

であるため、西之島火山のように社会の注目を集め頻繁に観測が行われるような場合であっても、その詳細な経過を把握することは難しい。そのような困難さを克服するためには長期間モニタリングできる観測機器の使用が効果的であるため、1990年代にはVENUS計画に参加し、水中ハイドロホンで海底火山の爆発音を感知しようと試みたが（渡辺, 1996）、システムの故障により実現しなかった。現在の航空機による観測と連続モニタリングの間を埋めるものとして期待されるのが、人工衛星による観測である。第3章3節で述べたとおり、変色水については、ある程度規模の大きな変色水であれば十分捉えることができるという結論が得られている。今後の変色水を対象とした観測に大きく貢献する可能性がある。

これまで述べてきたように、海域火山の活動を監視する際には、変色水に着目してその位置、形状、範囲、色調の記載がなされてきた。しかしながら、色調については人間の主観が大きく入り込み、また白色、緑白色、薄褐色、赤茶色など大雑把な言葉による記録とならざるを得ないため、火山活動度の客観的な読み取りが困難であった。この点を解決するため、デジタルカメラやマルチバンドカメラによって得られた変色水のRGB値を火山活動度と関連付けようとする試みがなされてきた（大谷・他, 1983；大谷・他, 2006；渡辺・大谷, 2014；渡辺, 2015；伊藤・吉田, 2017）。環境等による色の変化の補正方法に未解決の部分が残っているが、観測成果の解析にとって不可欠な手法であるといえる。

火山における噴火様式、規模、活動史などを読み解くには、まず火山地形を解析することが第一歩であり、そのためには詳細な地形データが必要となる。ある程度水深がある海域では、測量船からのマルチビーム測深が有効な手段となるが、沿岸等の浅海域ではスワ幅が狭まり時間がかかることや、暗礁等により測量船の運用が困難になるため、航空機からのレーザー測深が有効になる。また、活動中の火山における陸上での地形変化を追跡することも可能である。海上保安庁は航空

レーザー測深機を「CZMIL」に代替し、海図作成のための水深測量を行っている。今後浅海域での地形調査に威力を発揮することが期待される。逆に、水深が大きくなると測量船からのマルチビーム測深ではスワ幅が広がりデータ密度が下がるため、AUVを用いて詳細な地形を調べる必要も出てくる。このように目的に応じた測深手法の選択が、今後の主流となるであろう。

謝 辞

本稿をまとめるにあたり、沿岸調査課海洋防災調査室新庄健之官、第十管区海上保安本部及び第十一管区海上保安本部の海洋情報部職員の皆様には過去の観測資料等を提供いただいた。また、匿名の査読者には原稿を改善するうえで有益な助言をいただいたので、ここに感謝します。

文 献

Aramaki, S. (1984) Formation of the Aira caldera, southern Kyushu, ~22,000 years ago, *Journal of Geophysical Research*, 89, 8485-8501.

荒牧重雄・白尾元理・長岡正利 (1991) 空から見る日本の火山, 219pp., 丸善, 東京.

藤岡ゆかり・熊川浩一 (2014) 新たに導入した海上磁力計及び海上重力計の紹介, *海洋情報部研究報告*, 51, 113-115.

福山一郎・白根宏道・小野智三・森下泰成・吉岡眞一・中村圭佑・山川 峻・小川 遥・高橋日登美・佐藤 泉・濱崎翔五 (2018) 西之島における水路測量について, *海洋情報部研究報告*, 55, 66-76.

葉室和親・荒牧重雄・藤岡換太郎・石井輝秋・田中武男・宇都浩三 (1983) 東伊豆沖海底火山群—その2—および伊豆諸島近海海底火山, *地震研究所彙報*, 58, 527-557.

伊藤弘志・吉田友範 (2017) 海域火山における変色水の色調を定量化する試み (講演要旨), *日本火山学会講演予稿集*, 2017, 111.

海上保安庁 (1953) 第五海洋丸遭難調査報告書, 112pp., 東京.

海上保安庁 (2002) 海上保安庁による三宅島西方海域の調査, *火山噴火予知連絡会会報*, 78, 69-71.

海上保安庁 (2009) 海上保安レポート 2009, 137pp., 東京.

海上保安庁 (2012) 海域火山の最近の活動について, *火山噴火予知連絡会会報*, 113, 236-241.

海上保安庁 (2013a) 西之島の空中写真測量について, *火山噴火予知連絡会会報*, 116, 134.

海上保安庁 (2013b) 西之島周辺海域における噴火の概況, *火山噴火予知連絡会会報*, 117, 117-123.

海上保安庁 (2013c) 海域火山の最近の活動について, *火山噴火予知連絡会会報*, 116, 289-297.

海上保安庁 (2013d) 三宅島火山の航空磁気測量, *火山噴火予知連絡会会報*, 116, 131-132.

海上保安庁 (2015a) 手石海丘の海底地形調査について, *火山噴火予知連絡会会報*, 120, 98-100.

海上保安庁 (2015b) 海域火山の最近の活動について, *火山噴火予知連絡会会報*, 121, 367-377.

海上保安庁 (2016) 海上保安レポート 2016, 137pp., 東京.

海上保安庁 (2017) 明神礁における火山活動概況, *火山噴火予知連絡会会報*, 127, 212-214.

海上保安庁 (2018) 海域火山の最近の活動について, *火山噴火予知連絡会会報*, 129, 410-416.

海上保安庁 (2019) 口永良部島, *火山噴火予知連絡会資料 (その2) 口永良部島, 諏訪之瀬島, 阿蘇山*, 143, 54-59, www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/143/143_02.pdf.

海上保安庁 (2020) 海域火山データベース, www1.kaiho.mlit.go.jp/GIJUTSUKOKUSAI/kaiikiDB/list-2.htm (accessed 9.4.20).

- 河合晃司 (2015) 新たに導入した航空レーザー測深機「CZMIL」の紹介, 海洋情報部研究報告, 52, 27-32.
- 気象庁火山噴火予知連絡会衛星解析グループ (2019) 陸域観測技術衛星2号観測データ等の利活用に関する平成30年度成果報告書, 54pp.
- 小林哲夫 (1985) トカラ列島の火山, 火山, 30, 45-47.
- 小林哲夫 (1986) 桜島火山の形成史と火砕流, 文部省科研費自然災害特別研究, 計画研究「火山噴火に伴う乾燥粉体流(火災流等)の特質と災害」(代表者 荒牧重雄) 報告書, 137-163.
- 南 宏樹・岩淵 洋 (2015) 手石海丘における北西—南東方向に伸びるグラベン構造と火口列 (講演要旨), 日本地球惑星科学連合2015年大会予稿, 2015, SVC46-P14.
- Minami, H., R. Nagasawa, and Y. Ohara (2020) Detailed volcanic and tectonic morphology of Nakadomari Hill in the southern Okinawa Trough, *Marine Geology*, 421.
- 南 宏樹・小原泰彦 (2016) AUVを用いた奄美カルデラ群における海底地形調査と熱水活動の兆候 (講演要旨), 日本地球惑星科学連合2016年大会予稿, SCG59-P09.
- Minami, H. and Y. Ohara (2016) Detailed morphology and bubble plumes of Daiichi-Amami Knoll in the central Ryukyu Arc, *Marine Geology*, 373, 55-63.
- Minami, H. and Y. Ohara (2017) The Gondou hydrothermal field in the Ryukyu Arc: A huge hydrothermal system on the flank of a caldera volcano, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18, 3489-3516.
- Minami, H. and Y. Ohara (2018) Detailed volcanic morphology of Daisan-Miyako Knoll in the southern Ryukyu Arc, *Marine Geology*, 404, 97-110.
- Minami, H., M. Oikawa, and K. Ito (2014) Newly discovered submarine volcano near the Tokara Islands, Report of Hydrographic and Oceanographic Researches, 51, 145-151.
- 宮寄 進・緒方克司・小山 薫・熊川浩一・加藤正治・斉藤昭則 (2012) 航空磁力計の更新, 海洋情報部研究報告, 48, 101-107.
- 森下泰成・小野智三・濱崎翔五・高橋日登美 (2018) 噴火活動中の西之島火山の2015年の海洋調査, 海洋情報部研究報告, 55, 55-65.
- 小原泰彦・藤原琢磨・新庄健之・小野智三・高橋日登美・佐藤 泉 (2019) 詳細海底地形から探る海徳海山の火山活動史 (講演要旨), 日本地質学会学術大会講演要旨, 126, 161-162.
- 岡田千明・及川光弘・西澤あずさ (2018) 西之島における浅部地殻の地震学的構造, 海洋情報部研究報告, 55, 85-100.
- 奥野 充 (2002) 南九州に分布する最近約3万年間のテフラの年代学的研究, 第四紀研究, 41, 225-236.
- 小野智三・濱崎翔五・矢島広樹・伊藤弘志・野上健治 (2015) 西之島火山の2013-2014年噴火活動, 海洋情報部研究報告, 52, 56-78.
- 小野智三・佐藤 泉・福山一郎・吉岡眞一・中村圭佑・山野寛之・白根宏道・小川 遥・山川峻・野上健治 (2018a) 2013-2015年噴火活動による西之島火山の地形変化, 海洋情報部研究報告, 55, 77-84.
- 小野智三・佐藤 泉・森下泰成・濱崎翔五・野上健治 (2018b) 2013-2015年の西之島火山の火山活動, 海洋情報部研究報告, 55, 20-54.
- 小坂丈予 (2004) 海底火山調査にまつわる話 (7) ~南方海域における海底火山の活動と新島生成への期待について~, 水路, 33, 28-34.
- 小坂丈予・平林順一・野上健治・土出昌一・足立紀佳 (1996) 福徳岡ノ場海底火山活動に伴う変色海水—海底火山活動の指標としての変色海水—, 火山, 41, 107-113.
- 小坂丈予・大平洋子・平林順一・森 彰 (1977) 海中で生成したシリカーアルミナ含水低結晶

- 物質と沈殿アロフェンとの比較, 鉱物学雑誌, 13, 178-186.
- 大谷康夫・加藤 茂・佐藤寛和・小坂丈予・平林順一 (1983) 航空機および人工衛星による海底火山の監視, 最近の海底調査シンポジウム資料, 3, 7-15.
- 大谷康夫・笹原 昇・矢吹哲一朗・服部敏一・宮 嵩 進・及川光弘・野上健治 (2006) 2005年「福徳岡ノ場」の海底火山噴火, 海洋情報部研究報告, 42, 31-37.
- 斎藤元治・石塚 治・中野 俊・下司信夫・田村芳彦・森下泰成・野上健治 (2016) 西之島火山噴火マグマの岩石学的特徴と揮発性成分濃度 (講演要旨), 日本火山学会講演予稿集, 2016, 127.
- 佐藤 泉・小野智三・森下泰成・濱崎翔五・高橋日登美・野上健治 (2018) 西之島周辺海域における火山活動に伴う海水組成変化, 海洋情報部研究報告, 55, 101-109.
- 水路部 (1937) 樺太南部沿岸千島列島水路誌, 309pp., 東京.
- 土出昌一・柴田信行・背戸義郎・桑野木文章・佐藤寛和・小坂丈予・信国正勝・當重 弘・福島秀生 (1987) 伊豆大島沿岸に見られた変色水の分布, 水路部研究報告, 23, 15-128.
- 渡辺一樹 (1996) VENUS 計画におけるハイドロホン観測, 月刊地球, 28, 237-241.
- 渡辺一樹 (2015) 海域火山周辺における変色水の色の RGB 値と化学組成の比較, 海洋情報部研究報告, 52, 49-55.
- 渡辺一樹・大谷康夫 (2014) 海域火山周辺における変色水の色の RGB 値, 海洋情報部研究報告, 51, 59-68.
- 測, 地磁気観測であり, 測量船での観測は地形調査, 地磁気・重力観測, 採水, 堆積物採取, 地殻構造探査等である. この十年間で, 主なイベントとして西之島火山, 口永良部島火山で大規模な噴火が発生し, 諏訪之瀬島火山, 桜島火山, 薩摩硫黄島火山等では断続的に噴火活動が続いている. また, 明神礁や青ヶ島では普段と異なる地熱現象, 熱水現象が見られた. 海上保安庁はこれらの火山活動に対し, 適切に観測を行い, 火山噴火予知連絡会に結果を報告するなど火山防災に努めてきた. また, 噴火時との比較の目的で火山活動の静穏な平常時にあらかじめ火山の総合的な調査も行っている. 海域火山の観測には陸上火山とは異なる困難さも多いが, 人工衛星からの観測, 変色水の色調の定量的解析など新しい技術を取り入れつつ, 観測の高度化を推進していく必要がある.

要 旨

海上保安庁は, 船舶の航行安全, 火山防災, 海洋権益の確保などのために海域火山の観測を行ってきた. 対象火山は南方諸島海域と南西諸島海域の海域火山で, 航空機や測量船を用いた観測を行っている. 航空機での観測は目視観測, 熱観