様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

# 科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　３ 年　 ６ 月　 ２ 日現在

機関番号：１２６０１
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2017～2020
課題番号：１７Ｋ０５６２５

研究課題名（和文）地震・重力・ミューオグラフィ観測による有珠山昭和新山潜在溶岩丘の内部構造の解明

研究課題名（英文）Investigation of the internal structure of the lava dome in Showa Shinzan, Usu volcano, japan, from seismic, gravimetric, and muographic observations

研究代表者
青木　陽介（AOKI, Yosuke）

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：９０３７６６２４

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、溶岩ドーム生成のメカニズムを明らかにするために有珠山昭和新山において臨時地震観測を行い、雑微動を用いた地震波鑑賞法により地震波速度構造を求めた。その結果、溶岩ドーム下では顕著な高速度領域が地表付近まで広がっている部分があることが明らかになった。このことは、溶岩ドーム形成の際に地下のマグマが地表付近にまで上ってきていることを示している。また、地震観測中に、貫入した溶岩ドームの冷却過程を示すと考えられる微小な火山性地震も検出された。この地震の詳細は今後明らかにされる予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義
本研究計画では、高粘性マグマが関わる噴火の際に多く見られる溶岩ドームの地震波速度構造を明らかにすることを通して、溶岩ドームの生成メカニズムに新しい知見を加えることができた。溶岩ドーム噴火は、溶岩ドームの崩壊により火砕流を引き起こし、これまでに多くの被害をもたらしてきたことから、今後の研究の発展により、溶岩ドーム噴火による被害の予測およびその軽減がなされると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The goal of this study is to understand the mechanics of the emergence of a lava dome. To achieve the goal, we conducted a seismic experiment in Showa-shinzan, a lava dome emerged during the 1943-1945 eruption of Usu Volcano, northern Japan. We imaged the seismic velocity structure beneath the lava dome by seismic interferometry using ambient seismic noise. Our results image a high-velocity body beneath the lava dome, indicating that the lava dome is mainly composed of actively intruded magma, rather than passive uplift of the surface. Also, we fortuitously found previously unidentified volcanic earthquakes that may result from thermal cooling of the intruded lava. Details of these earthquakes will be investigated later.

研究分野：火山物理学

キーワード：地震波速度構造　火山性地震　地震波干渉法

※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、研究者個人に帰属します。

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９（共通）

## １．研究開始当初の背景

有珠山は北海道に位置する島孤火山の一つで，粘性の高いマグマを噴出する火山として知られている．1663 年に有史以来初めての噴火を以来，2000 年の噴火まで 9 回の噴火イベントがあり，いずれも粘性の高いマグマが溶岩ドームを生成するものであった．このような溶岩ドームは，崩壊すると火砕流が発生し甚大な被害を生み出す可能性があることから，溶岩ドームの生成メカニズムを理解することは，火山噴火のメカニズムの一部を理解するという意味で科学的に興味深いだけでなく，火砕流の被害を軽減するという実用的な側面からも大きな意義がある．

溶岩ドーム噴火のメカニズムを理解するために，生成された溶岩ドームの構造を理解することが重要であるということはこの数十年間認識されてきた．しかし，2000 年代に入っても溶岩ドームの構造は理解されておらず，貫入したマグマの溶岩ドーム内での形状は明らかにされていなかった．これは，溶岩ドームのサイズが多くは 100—数 100 メートルほどで小さいことや地形が急峻なことから，重力観測以外の観測がほとんど行われてこなかったことによる．

2000 年中盤になり，ミュオンラジオグラフィにより溶岩ドーム内部の密度構造が計測されるようになった．例えば，Tanaka et al. (2007, doi:10.1029/2007GL031389)は，ミュオンラジオグラフィにより有珠山 1943—1945 年噴火にともない生成した昭和新山の密度構造を明らかにし，溶岩ドームの浅部の多くの部分は貫入したマグマによって満たされていることを示した．その後，Nishiyama et al. (2014, doi:10.1029/2013JB010234; 2017, doi:10.1007/s00024-016-1430-9)は，ミュオンラジオグラフィと同じく密度に感度があるものの異なる感度を持つ重力観測とミュオンラジオグラフィとを組み合わせることにより，溶岩ドーム内部の密度構造の推定をより高精度化した．このように溶岩ドーム内部の密度構造推定が高精度化したため，地震速度構造を高精度に求める必要が生じた．ある地点の密度と P 波・S 波地震波速度が求まれば，そこから弾性定数が求められ，溶岩ドームを構成する岩石の物性に強い拘束が与えられるからである．

地震波を用いた地下構造のイメージング研究は，雑微動を用いた手法が 2000 年代前半に登場して格段に進展した．地表は海洋の運動や人間活動を起源とする雑微動によって常に揺らされていて，2 点の観測点の記録の相互相関をとることによって，あたかも 2 点の片方に震源がありもう片方に観測点があるかのような波動場を抽出することができる．この性質を用いて，地震が発生しなくても観測点周辺の地下構造を高い空間分解能で求めることができるようになった．なお，この手法によって抽出できる波動場は主に表面波であり，一般的には観測点間距離の 1/10 程度の深さ以浅の速度構造を求めることができる．

## ２．研究の目的

このような背景を踏まえた本研究計画の目的は，有珠山昭和新山で臨時地震観測を行い，観測された雑微動を用いて昭和新山溶岩ドームの地震波速度構造を求め，これまでに求められている密度構造と合わせて昭和新山の地下の岩石の弾性定数を推定することである．さらに，求められた地下構造から，高粘性マグマの貫入による溶岩ドーム生成メカニズムの理解を深めることを目標とする．

## ３．研究の方法

研究の目的を達成するために，昭和新山およびその周辺の半径 1 km の範囲に約 20 点の地震観測点を設置して約 1 ヶ月間臨時観測を実施した．用いた地震計は固有周波数が 1 Hz のものであるので約 0.2 Hz 以上の波を観測することができ，本研究計画の目的としては十分である．

まず，得られた波形の相互相関をとり，観測点間を伝搬する波動場を抽出した．抽出された波動場は主に表面波であるため，周波数により伝搬速度が異なる分散性を持つ．本研究計画では，まず表面波の位相速度の空間分布を周波数の関数として求める．さらに，そのような位相速度を与える S 波速度構造を求める．なお，表面波の位相速度は S 波速度だけではなく P 波速度や密度の関数でもあるが，P 波速度や密度を独立に求めることはここでは不可能であるため，S 波速度と P 波速度や密度の関係の経験則を用いる．

## ４．研究成果

### (1) 昭和新山溶岩ドームの地震波速度構造

本研究計画の当初は，上に述べた方法で昭和新山およびその周辺の地震波速度構造をもとめ

ることを考えていたが，想定していたよりも地下構造の 3 次元的な不均質性が強く，また昭和新山の急峻な地形による影響が想定していたよりも強かったので、昭和新山山頂部・中腹部・周辺部の 3 つの地域に分けて，それぞれについて 1 次元速度構造を求めた．得られた速度構造は，中腹部・山頂部について浅部の地震波速度が周辺部よりも有意に高く，山頂部地下の地震波速度は中腹部よりも速い．このことから，昭和新山は 1943—1945 年噴火の際にマグマが地下浅部にまで貫入することによって生成されたことが分かった．このことはミュオンラジオグラフィによって得られた結果と整合的である．

しかしながら，3 次元的な速度構造は現時点ではまだ得られていない．その原因は上にも述べたように，昭和新山の地形の影響が解析に与える影響が想定よりも大きかったことにある．地表が平面であると仮定した場合よりも，実際の地形を想定した場合の方が計算量が増大しデータが複雑になるが，それでも実際の地形を考慮した解析が必要である．さらに，現時点では地震動の上下成分しか用いておらず，観測点間を伝搬するレイリー波しか抽出していない．地震動の水平成分を用いることによって観測点間を伝搬するラブ波を抽出することが可能で，これにより，岩石の層構造を反映する地震波の鉛直異法性を求めることができる．これらのことは今後の課題である．

(2) 昭和新山溶岩ドーム内で発生する地震活動

臨時地震観測によって観測された地震波形を精査したところ，溶岩ドーム内で発生した微小な地震が多数発見された．これらの地震は定常観測点ではほとんど観測されておらず，臨時観測を行わなければ発見されなかったものである．また，本研究計画での臨時地震観測は溶岩ドーム内で発生する地震を観測するためのものではなく，このような地震の発見は予期していなかったものである．

観測された地震の震源は地表から数 100 メートル以内に分布し，面状に分布しているようにも見えるが，現在のところは明確でない．テンプレートマッチングなどの手法を用いてより多くの地震を抽出して震源分布の性質を明らかにすることが今後の課題である．発生している地震は後述するような溶岩ドームの冷却による熱収縮に起因するのではないかと定性的には解釈されるが，発生した地震の発震機構を正確に求めることで，地震活動の原因をより明確に理解することができるだろう．さらに，この地震活動はマグニチュード 0 を上回るものがないと思われるごく小さなものなので，溶岩ドーム内で空間的に密な観測をすることによって得られる情報が格段に上がると考えられる．その観点から，最近急速に普及している分散音響センシング（Distributed Acoustic Sensing）による観測も有力なものとなるだろう．

(3) 昭和新山溶岩ドームの長期的地殻変動

当初の研究計画には含まれていなかったが，溶岩ドームの生成メカニズムを理解するために重要であろうという観点から，本研究計画では合成開口レーダー干渉解析（Interferometric Synthetic Aperture Radar; InSAR）による有珠山の地殻変動の研究も行った．本研究では，JERS-1, ALOS, ALOS-2 各衛星により 1992 年から 2017 年までの地殻変動を InSAR 時系列解析により求めた．

有珠山における過去 25 年間の地殻変動は，昭和新山やより最近の噴火によって生成した溶岩ドーム周辺に局在化していることが明らかになった．これらの地殻変動はいずれも沈降であるが，昭和新山における沈降が 25 年間ほぼ安定しているのに対して，より最近の噴火によって生成された溶岩ドームの沈降は時間と共に減衰していることが分かった．

次に，観測された沈降は噴火にともない貫入したマグマの熱収縮によるものであると仮定して，マグマの熱弾性パラメータを拘束することを試みた．本研究による結果は，昭和新山を構成する岩石の熱拡散係数は実験室で得られた値とほぼ同じであるが，より最近の噴火により生成した溶岩ドームを構成する岩石の見かけの熱拡散係数は，実験室で得られた値よりも 1 桁大きい値が得られた．有珠山は洞爺湖に隣接していて地下水が豊富であることを考えると，溶岩ドーム生成直後の時期には，地下水が溶岩ドームの熱を効率的に逃していることが見かけの熱拡散係数が高い原因である定性的には理解できる．しかし，溶岩ドームおよびその周辺の熱輸送と地殻変動の関係を定量的に理解するためには数値シミュレーションによる研究が必要であり，今後の課題である．

一連の研究は Wang & Aoki (2019, doi:10.1029/2018JB016729)にまとめられた．

５．主な発表論文等

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

| | |
|---|---|
| １．著者名<br>Wang, X. and Aoki, Y. | ４．巻<br>124 |
| ２．論文標題<br>Posteruptive thermoelastic deflation of intruded magma in Usu Volcano, Japan, 1992-2017 | ５．発行年<br>2019年 |
| ３．雑誌名<br>Journal of Geophysical Research | ６．最初と最後の頁<br>335-357 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1029/2018JB016729. | 査読の有無<br>有 |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する |

〔学会発表〕　計2件（うち招待講演　0件／うち国際学会　0件）

| |
|---|
| １．発表者名<br>竹尾明子，西田究，青木陽介，青山裕，石瀬素子，前田拓人，水谷雄太，甲斐建，中島悠貴，長原翔伍，栗原亮，YE Lingling，WANG Xiaowen，悪原岳 |
| ２．発表標題<br>昭和新山地下構造推定のための稠密地震観測と初期解析結果 |
| ３．学会等名<br>日本地震学会秋季大会 |
| ４．発表年<br>2019年 |

| |
|---|
| １．発表者名<br>竹尾 明子、石瀬 素子、西田 究、青山 裕、青木 陽介 |
| ２．発表標題<br>稠密観測によって捉えた昭和新山内部における極微小低周波地震の可能性 |
| ３．学会等名<br>JpGU-AGU joint meeting 2020 |
| ４．発表年<br>2020年 |

〔図書〕　計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

―

６．研究組織

| | 氏名<br>（ローマ字氏名）<br>（研究者番号） | 所属研究機関・部局・職<br>（機関番号） | 備考 |
|---|---|---|---|
| 研究分担者 | 西田　究<br>(Nishida Kiwamu)<br>(10345176) | 東京大学・地震研究所・准教授<br>(12601) | |

6．研究組織（つづき）

| | 氏名<br>（ローマ字氏名）<br>（研究者番号） | 所属研究機関・部局・職<br>（機関番号） | 備考 |
|---|---|---|---|
| 研究分担者 | 青山　裕<br>(Aoyama Hiroshi)<br>(30333595) | 北海道大学・理学研究院・教授<br>(10101) | |

| | 氏名<br>（ローマ字氏名）<br>（研究者番号） | 所属研究機関・部局・職<br>（機関番号） | 備考 |
|---|---|---|---|
| 研究協力者 | 竹尾　明子<br>(Takeo Akiko) | 東京大学・地震研究所・助教<br>(12601) | |
| 研究協力者 | 石瀬　素子<br>(Ishise Motoko) | 東京大学・地震研究所・特任研究員<br>(12601) | |
| 研究協力者 | 前田　拓人<br>(Maeda Takuto) | 弘前大学・理工学研究科・准教授<br>(11101) | |

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 |
|---|---|