

## ネバドデルルイス火山（コロンビア）の監視強化と地震波形解析から推定されるマグマシステム

### Enhancing monitoring capabilities at Nevado del Ruiz volcano, Colombia, and its magma system inferred from seismic waveform analyses

\*熊谷 博之<sup>1</sup>、前田 裕太<sup>1</sup>、ロンドニョ マカリオ<sup>2</sup>、ロペス クリスチャン<sup>2</sup>

\*Hiroyuki Kumagai<sup>1</sup>, Yuta Maeda<sup>1</sup>, Makario Londono<sup>2</sup>, Cristian Lopez<sup>2</sup>

1. 名古屋大学大学院環境学研究科、2. コロンビア地質調査所

1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Colombian Geological Survey

コロンビアのアンデスに位置するネバドデルルイス火山は活発な噴火活動を続けている。この火山の監視強化を目的に、地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）のコロンビアプロジェクトでは、広帯域地震計等の機材を新規に設置するとともに、リアルタイム地震監視システムの導入を行っている。さらに走時トモグラフィー法や波形インバージョン法を用いた地震波形の解析技術の導入も進めている。高周波地震波振幅を用いた震源決定（ASL）システムが2016年3月から稼働しており、volcano-tectonic（VT）地震、very-long-period（VLP）イベントおよび微動の系統的な震源決定が行われている。本発表ではネバドデルルイス火山の地震観測網および地震監視システムの概要を述べるとともに、ASLによる震源決定、走時トモグラフィーによる地震波速度の3次元分布、波形インバージョンによるVLPイベントのメカニズム等の結果に基づき、本火山のマグマシステムについての議論を行う。

ネバドデルルイス火山には12点の広帯域地震計および3点の短周期地震計観測点が設置されており、seedlinkによりリアルタイムで波形データが取得されている。低周波数（0.3-1 Hz）の地震波形振幅に基づいて自動的にトリガーされたイベントおよび微動について、5-10 Hzの高周波振幅を用いたASLシステムにより震源位置が自動的に推定される。推定された震源位置や震源振幅に基づいた地震マグチニユードの推定値などの情報はウェブにより閲覧でき、閲覧画面からは手動による再解析ができる。波形インバージョンでは地形を考慮したグリーン関数を用いて、シングルフォースとモーメントテンソルを仮定したメカニズム推定が可能である。走時トモグラフィーは、差分法による波線追跡および走時計算に基づいて3次元のP波およびS波速度構造のインバージョンが行える。

ASL法による震源推定をする上で必要となる火山の非弾性構造を表すQ値と各観測点のサイト増幅係数は、VT地震の初動走時から推定した震源位置とASL法による震源位置の差が最小になる値として推定した。これらの値を用いたASL法による結果は、VT地震が火口を挟んで北側と南側で発生しており、微動およびVLPイベントの震源は火口から北西の深部に向かって伸びる分布を示している。いくつかの微動では、この分布に沿って深部から火口へ向かって移動する震源が推定された。VLPイベントの波形インバージョンの結果は、北西に傾斜したクラックの体積変化を示すメカニズムを示した。微動およびVLPイベントが発生している震源領域は、高い $V_p/V_s$ であることが走時トモグラフィーから推定され、この領域での流体の存在を示唆している。これらの結果は、この震源領域が板状の割れ目を通してマグマが上昇する火道であり、噴火に至る破碎過程に伴って微動およびVLPイベントが発生していると解釈できる。

# LPイベントの振動体サイズおよび流体特性の時間変動：草津白根山とガレラス山の比較

## Temporal variations in the resonator size and fluid properties of LP events at Kusatsu-Shirane and Galeras volcanoes

\*田口 貴美子<sup>1</sup>、熊谷 博之<sup>1</sup>、前田 裕太<sup>1</sup>、Torres Roberto<sup>2</sup>

\*Kimiko Taguchi<sup>1</sup>, Hiroyuki Kumagai<sup>1</sup>, Yuta Maeda<sup>1</sup>, Roberto Torres<sup>2</sup>

1. 名古屋大学大学院環境学研究科、2. コロンビア地質調査所

1. Nagoya University Environmental Studies, 2. Colombian Geological Survey

火山活動の活発化に伴い観測される地震のうち、long-period (LP)イベントは熱水割れ目といった振動体中の流体の振動により発生すると考えられている。この振動体としてクラックモデル(Chouet, JGR, 1986)を仮定し、その固有周波数と観測されたLPイベントのスペクトルピーク周波数を比較することで、振動体中の流体特性やサイズが推定されてきた。最近Maeda and Kumagai (GRL, 2013; GJI, 2017)によりクラックモデルの固有周波数の解析式が提案されたことで、この比較を系統的かつ容易に行うことが可能になった。Taguchi et al. (AGU meeting, 2016)では、この解析式を用いた手法により群馬県の草津白根山およびコロンビアのガレラス山で発生したLPイベントの解析を行った。その結果、この解析手法により複数の観測ピーク周波数を説明でき、そこからすべてのクラックモデルのパラメータを推定できることが示された。本研究では草津白根山およびガレラス山で発生したLPイベントの解析数を増やし、クラックのサイズおよび流体特性の時間変動について調べた。

草津白根山については1992年8月から1993年1月、ガレラス山については1993年1月6日から10日にかけて発生したLPイベントを解析に用いた。クラック内の流体として草津白根山についてはミスト状ガス(Kumagai et al., JGR, 2002)、ガレラス山についてはダスト状ガス(Gil Cruz and Chouet, JVGR, 1997)を仮定し、クラックモデルのパラメータを推定した結果、両火山に共通して以下の2つの特徴が見られた。(1)クラックの体積が大きいとき、クラックの長軸方向の長さ(L)とクラックの厚さ(d)の比 $L/d$ は小さい。ここで開口クラックの弾性変形を考えるとクラック内の圧力と $L/d$ が反比例することから、 $L/d$ が小さいことは、クラック内の圧力が大きいことを示している。(2)クラックの体積が大きい時、クラック中の流体のガス質量分率も大きい。したがって、クラックに供給される流体のガス質量分率が大きいほどクラック内の圧力も大きくなり、クラックが押し広げられてその体積も大きくなることを示している。さらにそれぞれの火山について、以下のような特徴が見られた。(3)草津白根山では、1992年8月から11月の間にクラックの体積は $10^{-1} \text{ m}^3$ から $10^3 \text{ m}^3$ まで増加し、その後1993年1月にかけて $10^{-1} \text{ m}^3$ 程度まで減少した。さらに、クラック中の流体のガス質量分率については、8月から11月の間に $10^{-2}$ から約1まで増加し、11月から1月にかけて $10^{-2}$ まで減少した。(4)ガレラス山のイベントに関しては、1993年1月7日から10日にかけて、クラックの体積は $10^3 \text{ m}^3$ から $10^{-1} \text{ m}^3$ 、クラック内の流体のガス質量分率は $10^{-1}$ から $10^{-3}$ まで減少した。

草津白根山とガレラス山のLPイベントはそれぞれ熱水活動とマグマ噴火活動という異なる活動に伴い発生すると考えられているが、(1)と(2)の特徴はLPイベントの発生過程が2つの火山で類似していることを示唆している。草津白根山において(3)で述べたようなクラック中の流体のガス質量分率が増加するという傾向は、先行研究によって指摘されている。しかしながらクラックの体積を一定と仮定した先行研究と異なり、本研究はこの期間にクラックの体積に顕著な増加が見られることを示した。ガレラス山については(4)で述べたように、先行研究では示されていなかったクラックの体積やガス質量分率の時間変動を明らかにした。さらにガレラス山において解析した最後のイベントの数日後に噴火が観測されており、このことはクラックの体積やガス質量分率の時間変動がマグマ噴火の前兆的な過程により生じている可能性を示している。以上のように、推定されたクラックモデルのパラメータの時間変動を調べることで、LPイベントの発生過程に関し制約を与え、火山の地下における流体の状態変化を推定することが可能となる。



## ストロンボリ火山の山腹噴火前のキツツキ地震活動について

## Woodpecker seismicity before the flank effusive eruption at Stromboli

\*近藤 弦<sup>1</sup>、青山 裕<sup>1</sup>、西村 太志<sup>2</sup>、川口 亮平<sup>3</sup>、山田 大志<sup>1</sup>、三輪 学央<sup>4</sup>、藤田 英輔<sup>5</sup>、リペペ マウリ ツィオ<sup>6</sup>、ジェンコ リカルド<sup>6</sup>

\*Kondo Gen<sup>1</sup>, Hiroshi Aoyama<sup>1</sup>, Takeshi Nishimura<sup>2</sup>, Ryohei Kawaguchi<sup>3</sup>, Taishi Yamada<sup>1</sup>, Takahiro Miwa<sup>4</sup>, Eisuke Fujita<sup>5</sup>, Maurizio Ripepe<sup>6</sup>, Riccardo Genco<sup>6</sup>

1. 北海道大学大学院理学研究院 附属地震火山研究観測センター、2. 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻、3. 気象研究所、4. 防災科学技術研究所、5. 防災科学技術研究所観測・予測研究領域 地震・火山防災研究ユニット、6. フィレンツェ大学

1. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University, 2. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, 3. Meteorological Research Institute, 4. National research institute for earth science and disaster prevention, 5. National research Institute for Earth science and Disaster prevention, Volcanic research department, 6. Firenze University

イタリアのストロンボリ火山は、2014年8月7日に山腹からの溶岩流出活動に移行した。我々は、2014年5月末から翌年2015年6月まで、ストロンボリ火山の火口周辺で広帯域地震計と傾斜計による臨時観測を行い、溶岩流出活動を挟む時期のデータを取得することができた。本発表では、溶岩流出の直前にあたる7月22日(15日前)から山腹噴火までに見られた特異な地震群の波形特性について報告する。

特異な地震は、7月22日から8月6日12:00まで見られ、通常の活動期に見られる背景的な火山性微動に重なる形で、出現と消失を繰り返している。その波形は、いくつものパルスで構成されており、数分から十数分間継続した後、大振幅のパルスを起こして消失する。小休止の時間を挟みながら、パルス状の振動が繰り返し現れることから、この特異な地震群をキツツキ地震活動(woodpecker seismicity)と名付ける。キツツキ地震に対してスペクトル解析を行ったところ、卓越する周波数は見出せなかったが、およそ4Hz-12Hzの信号で構成されていることがわかった。キツツキ地震を構成する個々のパルスは波形が非常によく似ており、同一イベントの繰り返しである可能性が高いと考えられた。相似性を調べるため、一つのパルスを含む2秒間(201サンプル)の地震波形をテンプレートとして、連続波形に対して1サンプルずつずらしながら、相関係数の計算を行った。その結果、どの期間のキツツキ地震でも相関係数が0.7以上と、高くなることがわかった。テンプレートに選ぶパルス波形を変えても同様の結果が得られた。

キツツキ地震活動は溶岩流出に先行する時期に特徴的に見られることから、山腹噴火へ向けたダイク貫入に関する情報を持っている可能性が高いと考えた。そこで、キツツキ地震パルスの震源位置の時間変化を調べるために、二観測点(RFR,PZZ)で観測された地震波形に対して、同一時刻のテンプレートを使用し、相関係数がピークとなる時間の相対変化を検討した。その結果、相関係数のピークが立つ時刻には相対変化が見られないことが確認された。このことから、キツツキ地震の個々のパルスは同一の発生メカニズムと震源位置を持っていると考えられる。

キツツキ地震は、震源メカニズムや震源位置が変化しないことから、山腹へ向けたダイクの伸長を反映した活動とは考えづらい。とは言え、その活動期間を考えると、山腹噴火への分岐過程における何らかの変化を反映している可能性は依然として高い。今後はキツツキ地震と、その裏で定常的に発生している超長周期地震(VLP)との関係性についても検討を行っていく予定である。

キーワード：ストロンボリ火山、キツツキ地震活動、噴火遷移過程

Keywords: Stromboli volcano, woodpecker seismicity, transition process of volcanic eruption



# Harmonic Tremors at Shinmoedake

\*Yuki Natsume<sup>1</sup>, Minoru Takeo<sup>1</sup>, Mie Ichihara<sup>1</sup>

1. University of Tokyo Earthquake Research Institute

## Background

During the 2011 eruptions, both seismic harmonic tremors (ground oscillations) and acoustic harmonic tremors (air oscillations) were observed at Shinmoedake. Here we report the behavior of the time evolution of the frequency spectrum as well as the phase portraits of the harmonic tremors, providing evidence for a non-linear plumbing system at Shinmoedake.

## Data

We utilized seismographs from 4 broadband seismometers located within a radius of about 3 km around Shinmoedake. Spectrograms and power spectral density methods were used to track the changes in the peak frequencies over time. Additionally, phase portraits of displacement with respect to velocity were obtained to further illustrate the change in properties of the non-linear mechanism of the harmonic tremors.

The first seismic harmonic tremor was observed shortly after 17:00 on 2011/01/30, and similar seismic harmonic tremors occurred sporadically until 2011/01/31. The seismic harmonic tremors during this time frame had obvious but indistinct harmonic frequency peaks which fluctuated and drifted over time. The fundamental peaks were noted to fluctuate about the values of 0.9 Hz, 1.05 Hz or 1.3 Hz. The first seismic and acoustic harmonic tremor occurred at 21:49 on 2011/01/31 with a clear and distinct fundamental peak at 1.5 Hz and higher overtones starting from 3 Hz and so forth. The phase portrait of particle displacement and velocity during this time frame shows a single loop.

On 2011/02/02, the longest seismic and acoustic harmonic tremor occurred over a time frame of 40 minutes from 20:43 to 21:23. The fundamental peak was located at around 0.9 Hz with clear higher overtones at 1.8 Hz, 2.7 Hz and so forth. The phase portrait of particle displacement and velocity during this time frame shows a double nested loop.

On 2011/02/03, a series of sporadic, short seismic and acoustic harmonic tremors occurred over a time frame of 35 minutes from 13:24 to 13:59. The fundamental peak was located at around 1.7 Hz with higher overtones starting from 3.4 Hz and so forth. The phase portrait of particle displacement and velocity during this time frame shows a single loop.

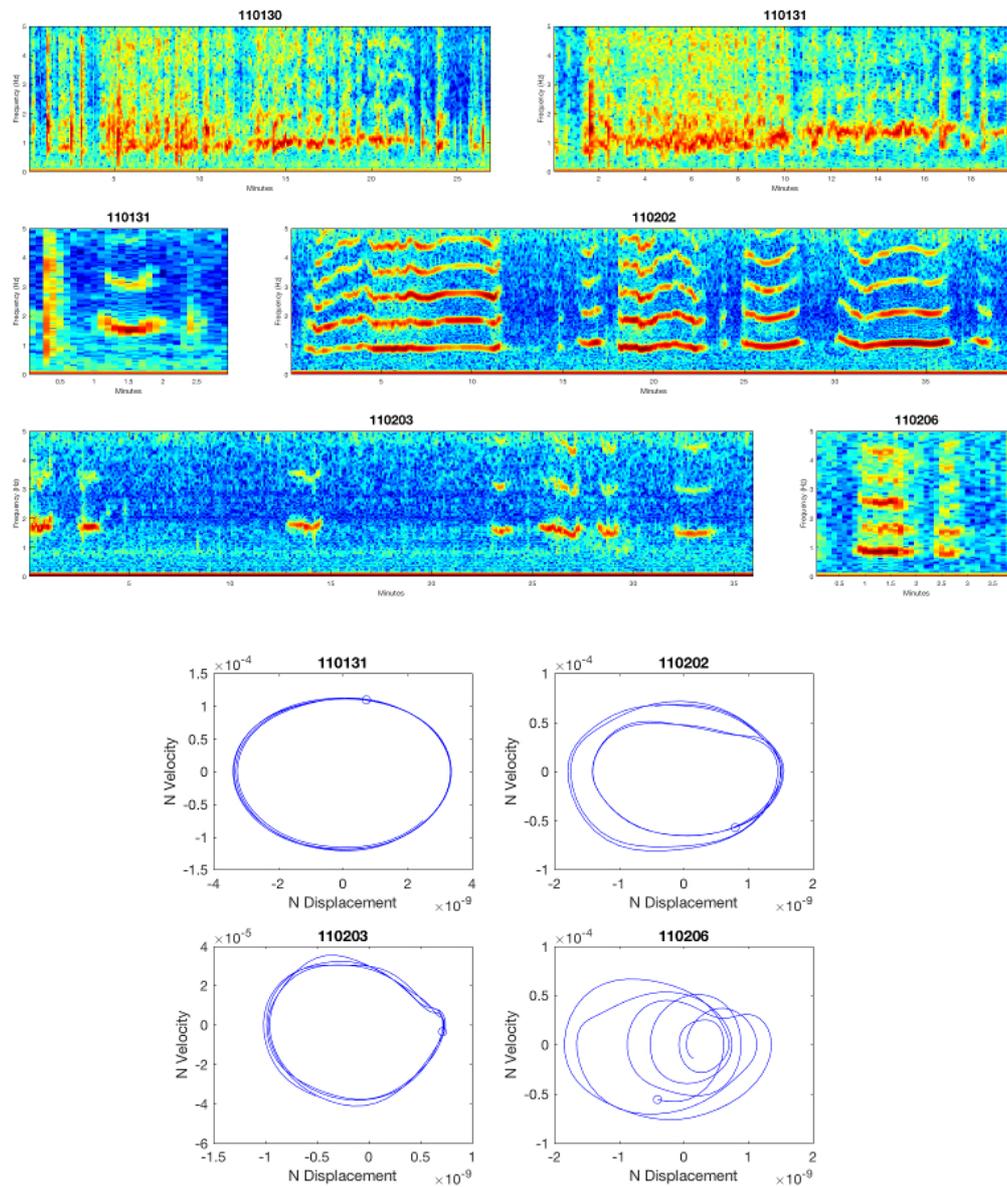
On 2011/02/06, a short seismic and acoustic harmonic tremor occurred over a time frame of just 2 minutes from 12:00. The fundamental peak was located at 0.9 Hz with clear higher overtones at 1.8 Hz, 2.7 Hz and so forth. Together with the returning of the fundamental mode to 0.9 Hz, the phase portrait of particle displacement and velocity during this time frame also shows a double nested loop.

## Discussion

We interpret the jumps in frequency of the fundamental peak of the seismic acoustic harmonic tremor from 1.5 Hz to 0.9 Hz, to 1.7 Hz and back to 0.9 Hz as period doubling of a non-linear system rather than a change in physical dimensions of a resonant cavity. This period doubling is due to parameter change in the non-linear system describing the volcanic conduit, resulting in a bifurcation of the non-linear system.

We note that this observational result is supported theoretically by a lumped parameter model of non-linear excitation by fluid flow through a channel (B. R. Julian, 1994). Therefore, we treat this as evidence that the harmonic tremors at Shinmoedake are a result of non-linear fluid flow through the volcanic conduit rather than a resonance effect.

Keywords: Harmonic Tremors, Shinmoedake



## 連続微動から推定される阿蘇火山における小規模噴火に向けた火道開口過程：2011年5月と2014年1月のごく小規模な噴火

### Conduit opening process toward ash eruptions estimated from continuous tremor at Aso volcano: ash eruptions in May 2011 and in January 2014

\*市村 美沙<sup>1</sup>、横尾 亮彦<sup>1</sup>、鍵山 恒臣<sup>1</sup>、吉川 慎<sup>1</sup>、井上 寛之<sup>1</sup>

\*Misa Ichimura<sup>1</sup>, Akihiko Yokoo<sup>1</sup>, Tsuneomi Kagiya<sup>1</sup>, Shin Yoshikawa<sup>1</sup>, Hiroyuki Inoue<sup>1</sup>

1. 京都大学大学院理学研究科

1. Graduate School of Science, Kyoto University

阿蘇火山では、数種類の火山性微動が常時発生し、古くから数多くの観測研究が行われてきた（例えば Sassa, 1935）。そのうちのひとつである連続微動は、火山活動の活発化にともなって振幅が大きくなることが知られている。また、静穏期と活動期で連続微動の震源位置が変化していたことも明らかにされた（Takagi et al., 2009）。しかし、連続微動の震源移動経路やタイミング、個別の噴火発生との具体的な関係性については未だ明らかにされていない。

阿蘇火山では、2011年5月と2014年1月に火山灰放出をとまなうごく小規模な噴火が発生した（気象庁 2011, 気象庁2014）。どちらの噴火イベントも、噴火に先行して湯だまり量の減少と火口底中央部における火孔の開口（2011年5月10日・2014年1月2日）が観測された。火孔開口前には連続微動の振幅増大が認められ、開口後には振幅急減がみられた。火孔開口後、2011年のイベントでは、5月15日の噴火に至るまで顕著な振幅変化が認められなかった。一方、2014年のイベントでは、振幅が緩やかに増加し、1月13日に新たな火孔開口と噴火が同時に発生した。

本研究では、上記2つの噴火イベントに着目し、連続微動の震源位置を推定し、2011年と2014年における火孔開口前および噴火前に火山体内部で進行した現象について検討した。使用したデータは、2011年3月から6月と2013年12月から翌年1月の二期間において、火口周辺に設置された常設5地震観測点（京都大学火山研究センター所有）で記録された鉛直成分である。連続微動の発生位置は、観測された微動振幅の空間分布を用いた震源推定法（Battaglia & Aki, 2003 ; Kumagai et al. 2010）を採用し、グリッドサーチにより推定した。このとき、一次元速度構造（Sudo & Kong, 2001 ; 筒井・他, 2003）を仮定し、Q値は阿蘇火山浅部におけるインバージョン法による推定（De Gori et al., 2005）の結果から40を使用した。

その結果、2011年と2014年のどちらのイベント期間においても、連続微動の震源位置は深さ400mから火口底表面までをつなぐほぼ鉛直の円柱状領域に分布することが明らかになった。推定した連続微動の震源分布は、阿蘇火山の火口列下に存在するクラック状火道（Yamamoto et al., 1999）と火口底とを結ぶ、火道システム最浅部の円柱状の流体経路を表していると考えられる。

また、活動の推移とともに震源の深さが変化すると解釈しうる結果も得られた。2011年と2014年の振幅増大前の震源は深さ200 mでほぼ一定であった。火孔開口前において、どちらのイベントにおいても連続微動の振幅が顕著に増加し、2011年では深さ100 m、2014年では深さ200 mと、イベントによって得られた震源の深さが異なった。これは、経路の確立過程を表しており、この過程は火孔の開口によって終息することが示唆される。震源の深さの違いは、その時期に確立させる経路の領域が異なっていたことが考えられる。また、噴火前には、2011年は深さ200 mから0 m、2014年は深さ400 mから200 mと、10日弱かけて震源が200 m程度浅くなり、噴火時に火口底表面付近に震源が得られる傾向がどちらのイベントでも認められた。これは、小

規模噴火に至る過程を表していると考えられる。この過程においては、連続微動の振幅は顕著に変化しなかった。

これらのことから、2011年と2014年のイベントにおいて、以下のような一連の現象が流体経路で進行していたと考えられる。2011年3月からガス供給量が増加し、流体経路内が増圧することで連続微動の振幅が増大しはじめた。この増圧により、深さ100 m以浅の流体経路を押し上げる過程が発生し、顕著な振幅増大が観測された。2011年5月10日の火孔開口によって経路内圧力が減少し、振幅が急減した。この時期から、深さ200 mから振動領域が上昇し、火口底に達した5月15日にごく小規模な噴火が発生した。その後、降雨により湯だまりが復活し、活動は一旦終息する。2013年12月から再びガス供給量の増加と経路拡大過程が発生した。このとき、深さ200 m付近の経路が押し広げられた。2014年1月2日の火孔開口により振幅の急減後、小規模な経路拡大と、噴火に至る深さ400 mから深さ200 mまでの振動領域の移動とが進行する。震源の深さが200 mまで達すると、それ以浅の経路はこれまでに確立されているので、震源が火口底付近までジャンプし、2014年1月13日に新たに開口した火孔においてごく小規模な噴火が発生した。

キーワード：阿蘇火山、火山性微動、噴火、火道システム

Keywords: Aso volcano, volcanic tremor, ash eruption, conduit system

## 火山性地震の応力応答—潮汐による応答（2）

### Stress response of volcano-tectonic seismicity - tidal response (2)

\*森田 裕一<sup>1</sup>、鶴岡 弘<sup>1</sup>

\*Yuichi Morita<sup>1</sup>, Hiroshi Tsuruoka<sup>1</sup>

1. 東京大学 地震研究所

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

世界で最初の科学的な噴火予測と言われる1910年有珠山噴火以来、火山構造性地震の活動度は、火山噴火予測のためには重要な観測量のひとつとして、多くの火山活動のモニタリングに使われている。一方で、噴火前に地震数が増えるパターンは多様であり、地震活動の時間推移と火山内部での状態変化の関係については十分に理解されていない。1つ1つの地震の発生は地震が断層破壊現象である故にある種偶然に支配される要素もあるが、一定時間内に発生する地震の数は統計量であり、その値は火山内部状態の情報を堅牢に保持していると考えられる。地震活動度は、応力場の時間変化に依存している（速度状態依存

（RSF）則：Dieterich,1994）との仮説に基づき、これまで山体膨張と同期する地震活動度の変化、東北地方太平洋沖地震直後で発生した火山性地震の解析などからその妥当性を検証してきた。更に、昨秋の火山学会では、伊豆大島カルデラ内浅部で発生する極めて小さな地震では、この地震活動が潮汐に相関が見られる可能性を指摘した。今回は解析を進め、統計学的検定の手法を導入して、潮汐との相関がどれくらい確からしいか、潮汐との相関が現れたのはいつ頃であるか、それは何を意味しているかなどについて発表する。

地震活動と潮汐との相関の有無を統計学的に検定する手法として、Schuster(1897)による検定が広く使われている。これは震源域での潮汐応力値の直近の局所最大と局所最小の時刻をそれぞれ位相0（360）度、180度として、地震の発生時刻の潮汐位相を求め、地震の発生が特定の潮汐位相値に集中していないかを2次元酔歩の考え方で検定するものである。中緯度では半日潮と全日潮が重なり、位相が潮汐値の大小と必ずしも一致していない。そのため、潮汐値の大小によって地震活動度の潮汐依存性を評価する方法も行った。この場合は、震源域での潮汐応力を出現時間が一定となるように区切り、それぞれの応力区間での地震回数を比較する。もし地震がランダムに発生したとすると、地震数はポアソン分布となるので、実際の分布がポアソン分布からどれくらい離れているかを検定する方法を導入した。

2004～2016年までの地震活動と潮汐の関係を解析した結果、両検定方法とも、2013年初頭を境にして結果が大きく異なる。2013年以降解析終了時点（2016年12月）まで伊豆大島カルデラ内浅部で発生する地震は、「ランダムに発生している」という帰無仮説を有意水準1%以下で棄却されることが明らかになった。潮汐成分のうちどの成分が影響を及ぼしているかを検討するため、この地域で発生する地震の発震機構解を参考に色々な断層パラメータで解析したが、断層面に働く法線応力の変化による影響が非常に大きいため、考えるどのような断層面を仮定しても、上記の結果は変わらない。そこで、断層面にかかる間隙圧と等価な潮汐の体積応力成分に注目し、どの位相の時に地震が多発しているかを調べた。その結果、体積応力の張力が最大となる時に地震が多く発生していることが明らかになった。地震発生をクーロン応力の大小によって起こると考えると、断層面にかかる法線応力が最小となる時に地震が多く発生している。

以前は潮汐と相関がなかった地震活動が、約3年前から潮汐と相関する原因について考察した。RSF則によると断層面にかかる実効法線応力が小さくなると、地震活動度は実効法線応力の変化に極めて敏感に反応することが知られている。例えば、海洋底が拡大し、活発な火山活動をしている西太平洋沖海嶺の海底火山周辺で発生する地震活動は、潮汐応力が最大張力になる時に顕著に増加したが知られている（Stroup et al,2007）。伊豆大島の地震はこれほど顕著でないが、同様の性質を持っている。実効法線応力は、テクトニック応力から間隙圧を引いたものである。伊豆大島周辺のGNSS観測データから、テクトニック応力が最近3年間に大きく変化していないことから、間隙圧が高くなったと考えられる。マグマ蓄積による応力変化と地震活動度の対応でも、同様に2011～12年頃から応力変化量に比べて地震活動度が高く、これも間隙圧の上昇で説明できる。この震源は、マグマ蓄積を示す圧力源の直上にあり、マグマ溜まりから岩盤の亀裂をマグマの揮発性成分が上昇し、地震断層面に入り込み、間隙圧を上昇していることが考えられる。

以上のことから、2013年頃から伊豆大島カルデラ浅部で発生する地震活動は潮汐との相関が高くなった。この時期よりマグマ溜まりから揮発性成分の上昇が増加した可能性を示唆している。

キーワード：火山構造性地震、地震活動度、潮汐応答、活火山、揮発性成分

Keywords: volcano-tectonic earthquakes , seismicity, tidal response, active volcano, volatile component

## Brief overview of landing survey and seismic observation at Nishinoshima

\*武尾 実<sup>1</sup>、大湊 隆雄<sup>1</sup>、市原 美恵<sup>1</sup>、前野 深<sup>1</sup>、金子 隆之<sup>1</sup>、篠原 雅尚<sup>1</sup>、馬場 聖至<sup>1</sup>、西田 究<sup>1</sup>、安田 敦<sup>1</sup>、渡邊 篤志<sup>1</sup>、杉岡 裕子<sup>8</sup>、浜野 洋三<sup>2</sup>、多田 訓子<sup>2</sup>、中野 俊<sup>3</sup>、吉本 充宏<sup>4</sup>、川上 和人<sup>5</sup>、千田 智基<sup>6</sup>、高木 朗充<sup>7</sup>、長岡 優<sup>7</sup>

\*Minoru Takeo<sup>1</sup>, Takao Ohminato<sup>1</sup>, Mie Ichihara<sup>1</sup>, Fukashi Maeno<sup>1</sup>, Takayuki Kaneko<sup>1</sup>, Masanao Shinohara<sup>1</sup>, Kiyoshi Baba<sup>1</sup>, Kiwamu Nishida<sup>1</sup>, ATSUSHI YASUDA<sup>1</sup>, Atsushi Watanabe<sup>1</sup>, Hiroko Sugioka<sup>8</sup>, Yozo Hamano<sup>2</sup>, Noriko Tada<sup>2</sup>, Shun Nakano<sup>3</sup>, Mitsuhiro Yoshimoto<sup>4</sup>, Kazuto Kawakami<sup>5</sup>, Tomoki Chida<sup>6</sup>, Akimichi Takagi<sup>7</sup>, Yutaka Nagaoka<sup>7</sup>

1. 東京大学地震研究所、2. 海洋研究開発機構、3. 産業技術総合研究所地質調査総合センター、4. 山梨県富士山科学研究所、5. 森林総合研究所、6. 環境省関東地方環境事務所、7. 気象研究所、8. 神戸大学

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. JAMSTEC, 3. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 4. Mount Fuji Research Institute, Yamanashi Prefectural Government, 5. Forestry and Forest Products Research Institute, 6. Ministry of the Environment, Kanto Regional Environment Office, 7. Meteorological Research Institute, 8. Kobe University

A new volcanic islet had been growing up with lava effusion and Strombolian activities at Nishinoshima, Izu-Bonin arc from November 2013 to November 2015. The morphological evolution of Nishinoshima had been revealed based on airborne observations and satellite images. The eruption activity has been monitored continuously using ocean bottom seismograph observation; the number of eruptions had registered a decline gradually, the eruption having stopped by the end of November 2015. After the volcanic activity falling to a low level, we had promoted a research survey of volcanology and bionomy at Nishinoshima from October 16<sup>th</sup> to 25<sup>th</sup>, 2016, using an academic investigation ship "Shinsei-maru" managed by AORI, University of Tokyo. The investigation items of the landing team were geological survey, installation of seismic station, and survey on nidification of seabirds. OBSs and OBEMs had been installed around Nishinoshima, pre-installed OBSs having recovered. A monitoring system of remote volcanic island using WaveGlider was operated around Nishinoshima on a trial basis. An analysis of whole rock chemical composition of volcanic products in 2013-2015 eruption reveals that all samples are composed of andesite with SiO<sub>2</sub> content of 59.5-59.9wt%, falling on middle content between the eruption products in 1973-1974 eruption and the laval of the old islet. The telemetric seismic monitoring system in Nishinoshima is on course to operate; the seismic data occasionally include long-lasting high-frequency tremors which seem to be related with some sort of Nishinoshima activity. We will make clear the growing process of volcanic islet together with geological and geophysical knowledges based on further analyses of volcanic products and those of OBS and OBEM data which will be recovered on June 2017.

キーワード：西之島、火山島、噴火

Keywords: Nishinoshima, volcanic islet, eruption

# 上陸調査で明らかとなった新たな西之島の地質および噴火プロセス Geology and eruptive process of new Nishinoshima, Ogasawara, Japan, revealed from first landing and survey of eruptive products

\*前野 深<sup>1</sup>、中野 俊<sup>2</sup>、吉本 充宏<sup>3</sup>、大湊 隆雄<sup>1</sup>、渡邊 篤志<sup>1</sup>、安田 敦<sup>1</sup>、金子 隆之<sup>1</sup>、中田 節也<sup>1</sup>、武尾 実<sup>1</sup>

\*Fukashi Maeno<sup>1</sup>, Shun Nakano<sup>2</sup>, Mitsuhiro Yoshimoto<sup>3</sup>, Takao Ohminato<sup>1</sup>, Atsushi Watanabe<sup>1</sup>,  
ATSUSHI YASUDA<sup>1</sup>, Takayuki Kaneko<sup>1</sup>, Setsuya Nakada<sup>1</sup>, Minoru Takeo<sup>1</sup>

1. 東京大学地震研究所、2. 産業技術総合研究所地質調査総合センター、3. 山梨県富士山科学研究所

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Mount Fuji Research Institute, Yamanashi Prefectural Government

小笠原諸島西之島で2013年11月にはじまった噴火は、浅海での活動により新しい火山島をつくり出し、およそ2年の活動を経てようやく終息した。2016年10月、西之島周辺海域における新青丸の研究航海(KS-16-16)において、著者らからなる研究チームは今回の噴火開始以来初となる上陸調査を実施した。本発表では、上陸調査で明らかとなった新西之島の地質および噴出物の特徴について述べ、噴火プロセスについて考察する。上陸チームは西之島西岸にゴムボートで接近、泳いで上陸し、新島および旧島の地質調査を行った。西岸は、旧島台地まで砂礫で構成された低地が続く、さらに旧島をとり囲むように10 m超の厚く険しい溶岩流が海岸まで迫っている。新溶岩は黒-暗灰色ガラス質で部分的に赤色酸化しており、その表層は鋭利でブロック状に破砕したクリンカーで構成されている。旧島台地を覆う新溶岩は、先端部分で厚さ3-5 m程度である。衛星・空中写真の判読結果をもとに、旧島および海岸沿いに調査を行い、溶岩流や噴石など異なる時期の噴出物を採取した。旧島台地の地表面は、層厚10 cm程度のスコリア混じりの灰色火山灰層で覆われている。この火山灰層は、2年に及ぶストロンボリ式噴火の積算による堆積物と考えられる。また、旧島台地上および付近の海岸には長径数10 cmに達する火山弾が散在している。これらの火山弾は、活動末期の2015年11月頃に発生していたブルカノ式噴火によるものと考えられる。西岸の北部には、亀裂が特徴的に発達した溶岩が存在する。溶岩に生じた亀裂の表面5 cm程度がガラス質となっており、さらに亀裂表面と垂直方向に細かい亀裂が発達するという特徴をもつ。こうした構造は、水中火山岩にみられる特徴とよく似ており、溶岩ローブ先端が高温状態で水と接触することにより生じた水冷破砕の痕跡と解釈できる。内陸部の溶岩流表面の踏査は行っていないが、船上や航空機からは溶岩ローブの表面に深い亀裂(cleft)が生じている様子を観察することができる。とくにスコリア丘西~南西麓にかけてはその発達が顕著で、緻密な溶岩内部を露出している様子が捉えられた。このような亀裂は、その形態や分布の特徴から溶岩膨張割目と考えられ、噴火継続中に上空から観察されたほか、人工衛星による定点観測によりその発達の様子が捉えられた(Maeno et al., 2016)。今回の西之島噴火における噴出物(KS-16-16上陸調査で採取された噴出物、海上保安庁により採取された南岸の溶岩、無人ヘリによる調査で採取されたスコリア丘西麓の礫)について、岩石薄片観察やXRFによる全岩化学組成分析を行った。その結果、(1)全ての試料についてSiO<sub>2</sub>含有量 59.5-59.9 wt.%の安山岩組成(斑晶鉱物: pl, cpx, opx, Fe-Ti oxide, <10 vol.%)であり、1973-74年噴出物(同 58.6-59.1 wt.%)と旧島溶岩(1702年以前, 同 60.1-60.8 wt.%)との中間的な組成的特徴を有すること、(2)2013-2015年噴火の溶岩は化学組成が狭い範囲に集中する一方で、時間経過とともにSiO<sub>2</sub>(MgO)含有量がやや低下(増加)していた可能性があることがわかった。ただし、一部の降下火砕物のSiO<sub>2</sub>含有量はやや高くなるという特徴も見えている。噴出物の化学組成の時間変化とその原因についてはさらなる検討が必要であるが、今回の上陸調査で得られた新たな地質学的データは西之島噴火のプロセスに対して重要な制約になると考えられる。

キーワード：西之島、溶岩、溶岩ローブ、降下堆積物

Keywords: Nishinoshima, lava, lava lobe, fallout deposit



## 西之島周辺における長期海底地震観測

### Long-term seismic monitoring around Nishinoshima, Izu-Ogasawara by using ocean bottom seismometers

\*篠原 雅尚<sup>1</sup>、市原 美恵<sup>1</sup>、酒井 慎一<sup>1</sup>、山田 知朗<sup>1</sup>、武尾 実<sup>1</sup>、杉岡 裕子<sup>2</sup>、長岡 優<sup>3</sup>、高木 朗充<sup>3</sup>、森下 泰成<sup>4</sup>、小野 智三<sup>4</sup>、西澤 あずさ<sup>4</sup>

\*Masanao Shinohara<sup>1</sup>, Mie Ichihara<sup>1</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>1</sup>, Tomoaki Yamada<sup>1</sup>, Minoru Takeo<sup>1</sup>, Hiroko Sugioka<sup>2</sup>, Yutaka Nagaoka<sup>3</sup>, Akimichi Takagi<sup>3</sup>, Taisei Morishita<sup>4</sup>, tomozo Ono<sup>4</sup>, Azusa Nishizawa<sup>4</sup>

1. 東京大学地震研究所、2. 神戸大学理学部、3. 気象庁気象研究所、4. 海上保安庁海洋情報部

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Faculty of Science, Kobe University, 3. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 4. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard

伊豆小笠原に位置する西之島は、1973年に噴火し新島が生成されて以来、2013年11月に噴火活動が観測された。その後、噴火活動が続き、島の面積が拡大した。このような遠方の無人島では、火山活動の推移を把握することが難しい。そこで、我々は、噴火活動が続いていた2015年2月に、長期観測型海底地震計

(LT-OBS)を用いた観測を開始した。使用したLT-OBSは、固有周波数1Hz速度型3成分地震計を搭載し、1年程度連続記録を得ることができる。設置には、海洋研究開発機構「かいいい」を用い、西之島中央火口丘から約8kmの水深1,400mほどの4地点、約13km地点の計5台のLT-OBSを設置した。設置したLT-OBSは、2015年10月に、気象庁「啓風丸」によって、回収すると共に、観測継続のために、5台のLT-OBSを再度設置した。この設置では、噴火口から約5kmの円周上に5台を設置した。設置点の水深1,000mほどである。2015年10月に設置したLT-OBSは、2016年5月に海上保安庁海洋情報部「昭洋」により、回収された。また、この航海で、5台のLT-OBSをさらに島に近い点に設置した。2016年10月には、海洋研究開発機構「新青丸」により、5台のLT-OBSを回収すると共に、3台のLT-OBSを観測継続のために、再設置した。ここでは、これまでに取得されているLT-OBSの記録を用いて、得られた西之島の地震活動の推移について報告する。

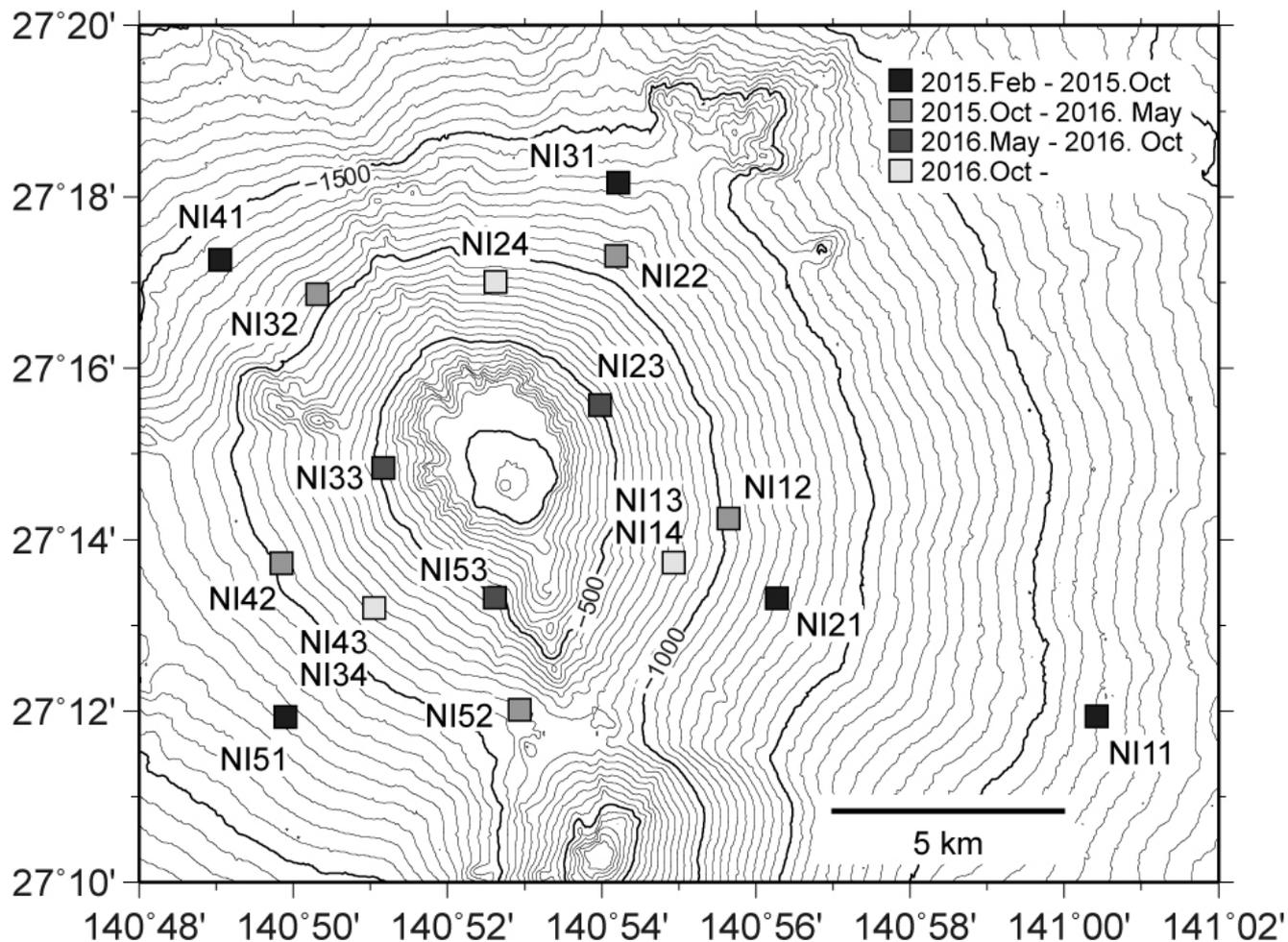
LT-OBSには、2015年2月の観測開始から、数Hzの短周期の波に始まり、数十秒後に1Hz以下の大振幅の波が到着する特徴的な波群が多数記録されていた。この波群では、4-8Hzの帯域が最もS/N比が良く、この帯域での波群の継続時間は、20-30秒であり、長くても1分以下である。5つの観測点の波形を4-8 Hzの帯域で比較すると、西之島から約8kmのほぼ等距離に配置した4観測点では、到達時間も振幅もほぼ同じであるが、約13 km離れた1観測点では、走時が顕著な遅れが見られ、振幅も小さくなる。また、これらの波群の走時を用いた暫定的な震源決定結果では、震央は西之島付近と推定された。2015年2月にLT-OBSを設置した際、観測船「かいいい」船上において、空振と可視画像データを取得し、西之島中央火口丘より黒い噴煙が放出されると同時に、空振が発生することがわかった。画像と、空振データ(1-7 Hz)、および、映像観測時に設置されていたLT-OBSの記録(上下動、4-8 Hz)を比較すると4-8Hzの波群は、噴煙の放出と同期しているように見える。従ってLT-OBSの記録に見られる波群は、一連の噴煙放出に対応していると考えられる。

海底地震計が3台以上設置されている期間を解析対象期間として、STA/LTA法により、噴煙の放出と同期していると考えられる波群の発生を求めた。解析にあたって、4-8 Hzの帯域のデータを用い、STAウィンドウ長を2秒、LTAウィンドウ長を40秒、STA/LTA閾値を1.5、1トリガーあたりONとなる長さを3秒、一度トリガーがOFFとなって再トリガーまでのホールド時間を4秒とした。3観測点以上で同時にトリガーされていることが、イベントとしてカウントする判定条件とした。トリガーが連続してONとなっているひと続きを1イベントとする。2月28日10時から10月3日13時の間の第一期観測期間中に363,367個のイベントが検出された。第二期観測期間の2015年10月4日1時から、2016年5月5日8時の間には、27,554のイベントが検出された。ただし、観測網が変更されたことを考慮して、STA/LTA閾値を2.0とした。その結果、観測を開始した2015年2月から6月までは、1日あたりの検出イベント数が1,800程度で推移するが、7/15頃から、1日あたりの個数は急速減少し、1個のイベントの継続時間が長くなる。10月下旬には、1日あたり300個以下になり、

11月に入ると一次数が増えるが、11月の下旬には、検出イベント数は、数十個以下となった。これは、2015年7月下旬から表面活動が減少し、2015年11月中旬にほぼ終了したことを示していると考えられる。

キーワード：西之島火山、長期観測型海底地震計、西之島火山活動の時間変化

Keywords: Nishinoshima volcano, Long-term ocean bottom seismometer, Temporal variation of activity of Nishinoshima volcano



## 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 First operation of the remote-island volcano monitoring system around Nishinoshima

\*浜野 洋三<sup>1</sup>、杉岡 裕子<sup>3</sup>、市原 美恵<sup>2</sup>、西田 究<sup>2</sup>、馬場 聖至<sup>2</sup>、多田 訓子<sup>1</sup>

\*Yozo Hamano<sup>1</sup>, Hiroko Sugioka<sup>3</sup>, Mie Ichihara<sup>2</sup>, Kiwamu Nisjida<sup>2</sup>, Kiyoshi Baba<sup>2</sup>, Noriko Tada<sup>1</sup>

1. 海洋研究開発機構地球深部ダイナミクス研究分野、2. 東京大学地震研究所、3. 神戸大学理学研究科惑星学専攻  
1. Department of Deep Earth Structure and Dynamics Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and  
Technology, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3. Department of Planetology, Kobe University

我々はウェーブライダー（WG）を用いた離島火山モニタリングシステムを開発・製作している。このシステムは、陸地から遠く離れた離島火山の周辺を航走しながら、火山の活動を監視し、その情報を衛星通信により連続的に陸地に伝送する機能を持っている。2016年10月に実施された新青丸によるKS-16-16航海では、西之島周辺海域で、新たに開発・製作された離島火山モニタリングシステムの短期間の運用を行った。このシステムでは、火山活動の常時監視に向けて、1) 西之島火山の映像を撮影するための4台のタイムラプスカメラ、2) 噴火に伴う空振を観測するため、ウェーブライダーのフロートの前後に設置した2台の低周波マイクロフォン、3) 地震動観測のために、海面下6mの水中ライダーの尾部に設置したハイドロフォン、及び4) 山体崩壊等に伴う津波の発生を検知するため、GPSドップラー速度測定を用いて上下動（ヒーブ）と速度3成分を観測する波浪計、を装備している。マイクロフォン、ハイドロフォンによる音波記録及び波浪計による記録は、それぞれ衛星通信によってリアルタイムに陸上まで伝送する。また、WGのナビゲーション・コントロールには、データ通信とは独立した衛星通信システムを用い、WGの位置、速度、流速、流向等のナビゲーションデータと、気温、気圧、風向、風速等の気象データが常時収集され、陸上に伝送される。

本離島火山モニタリングシステムは、2016年10月20日9時35分に、西之島西方の海岸から約1km離れた場所で、新青丸から海面に投入された。投入後は自律的に運航を開始し、西之島の中心から半径約5 kmの円周軌道上を時計周りに航走し、ほぼ1周した後、島の北西方向の軌道上で、2016年10月21日13時45分に、新青丸上に揚収された。WGの航走の原動力である波浪は、波浪計の記録から、波浪振幅は平均50cm程度で卓越周期は10秒程度であった。運航中のWGの対水速度は、1.2ノット～0.9ノットの範囲にあり、ほぼWGの理論通りの性能を発揮している。一方、波浪計のGPS速度計測によって高精度で測定される対地速度は、平均値が0.5ノット程度で、投入から回収までの約30 kmの距離を航走するのに、30時間以上を要している。

GPS波浪計は、10Hzサンプリングでヒーブ、速度3成分を測定・記録する。陸上へのThuraya衛星経由のデータ伝送は、通常時は1 Hzデータ（約600 byte）を毎分毎にまとめて伝送する。緊急時には10 Hzデータ（約4900 byte）を毎分送信する。また、両モードの切り替えは陸上よりの指令により行なう。今回の実験では、通常時の伝送は、ほとんどエラーなく行われ、緊急モード、通常モードの切り替えも正常に動作することが確認できた。

ヒーブ及び速度についても、ほぼ仕様通りの精度（ヒーブ5cm、速度0.05m/s）で測定されている。波浪計で測定記録されたヒーブの波形スペクトルは周期10秒程度を中心とする典型的な沿岸地域での風波のスペクトルを持っている。

本システムの航走中のマイクロフォン及びハイドロフォンによる空中及び水中音波測定の記録は、200 Hzのサンプリング速度でデータロガーに記録されている。マイクロフォンの音波波形は、波浪計によるヒーブ記録波形と極めて相関が高く、時間軸でもヒーブ記録と高い相関を示す。この結果は、マイクロフォンがフロートの上下変動による圧力変化を忠実に記録していることを示している。また2台のマイクロフォンの相関も極めて高い。この観測の時期には西之島は噴火していないため、マイクロフォンには空振に対応する2 Hz以上の高周波シグナルは見られなかった。

海面下6 mで測定したハイドロフォンについては、数Hzより高周波側では、多くのラインスペクトルが見られる。西之島が活発に噴火していた時期に行われた2015年2月のKR15-07航海の際には、西之島から7 km

離れた場所で、水深10 mにハイドロフォンを船からつり下げ、音波記録がとられ、10Hz付近より高周波側で多くのラインスペクトルが観測されている。この記録との比較から、現在西之島は表面の噴火はなく、噴火に伴う空振は観測されていないが、深部の地震動の活動はまだ存在していると思われる。

キーワード：西之島、離島火山、火山活動監視

Keywords: Nishinoshima, Remote island, Volcanic activity monitoring

## 阿蘇火山中岳における2016年10月7日～8日噴火とその噴出物

### The October 7-8, 2016 eruptions of Nakadake crater, Aso Volcano, Japan and their deposits

\*宮縁 育夫<sup>1</sup>、前野 深<sup>2</sup>、中田 節也<sup>2</sup>、長井 雅史<sup>3</sup>、飯塚 義之<sup>4</sup>、星住 英夫<sup>5</sup>、田中 明子<sup>5</sup>、伊藤 順一<sup>5</sup>、川辺 禎久<sup>5</sup>、大石 雅之<sup>6</sup>、横尾 亮彦<sup>7</sup>、大倉 敬宏<sup>7</sup>

\*Yasuo Miyabuchi<sup>1</sup>, Fukashi Maeno<sup>2</sup>, Setsuya Nakada<sup>2</sup>, Masashi Nagai<sup>3</sup>, Yoshiyuki Iizuka<sup>4</sup>, Hideo Hoshizumi<sup>5</sup>, Akiko Tanaka<sup>5</sup>, Jun'ichi Itoh<sup>5</sup>, Yoshihisa Kawanabe<sup>5</sup>, Masayuki Oishi<sup>6</sup>, Akihiko Yokoo<sup>7</sup>, Takahiro Ohkura<sup>7</sup>

1. 熊本大学教育学部、2. 東京大学地震研究所、3. 防災科学技術研究所、4. 中央研究院地球科学研究所、5. 産業技術総合研究所、6. 立正大学地球環境科学部、7. 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設

1. Faculty of Education, Kumamoto University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 4. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, 5. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 6. Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University, 7. Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Sciences, Kyoto University

阿蘇火山中岳では2016年10月7日21時52分に噴火が発生し、その後8日01時46分に爆発的噴火が起こった。後者の噴火では、噴煙が高度1.1万mにまで達し、熊本県・大分県・愛媛県・香川県の広範囲で降灰が確認された。筆者らはこの噴火発生の直後から阿蘇カルデラ内およびその東方域において降灰調査を行うとともに、火口周辺域においても噴出物の観察を実施した。本発表では噴出物の分布や特徴、顕微鏡観察や化学分析結果について報告する。

10月7日～8日噴火によって中岳第1火口近傍域においては多量の噴出物が堆積しており、第1火口南西側縁で掘削を行って確認できた堆積物の全層厚は約1 mであった。しかし、火口縁の退避壕等の埋没状況からは堆積物の厚さは最大1.5～2 m程度に達するものと推定され、どの地点においても火山灰から火山礫までを含む淘汰の悪い堆積物であった。また、堆積物上には径数10 cmの噴石が散在しており、最大のもは3×2.2×1.5 mの大きさであった。さらに、第1火口南西側の谷沿いなどには、比高0.5～1 m程度、幅数 mのローブ状の堆積地形も認められることから、火口近傍域に分布する堆積物の大部分は火砕物密度流によるものと考えられる。上空からの観察結果などから火口近傍域の堆積物量は $4.5 \times 10^5$ トン程度と推定される。

阿蘇カルデラから大分県にかけての地域で降灰調査を行った結果、10月8日噴火に伴う降下火砕物は中岳火口から北東～東北東方向に主軸をもって分布しており、 $500 \text{ g/m}^2$ 以上の降灰域はほぼ阿蘇カルデラ内に限られるが、 $100 \text{ g/m}^2$ の降灰域は大分市南東部付近にまで達する非常に広い範囲に及ぶことがわかった。また、10月8日噴火では火口から東北東30 km付近の地域にまで火山礫サイズの火砕物の飛散が認められ、火山礫の最大粒径の分布主軸は、堆積量分布の主軸よりも東向きであった。降下火砕物の量は約 $1.8 \times 10^5$ トンであり、火砕物密度流堆積物と合わせると、10月7日～8日噴火による総噴出量は $6 \sim 6.5 \times 10^5$ トン程度と概算された。

阿蘇カルデラ内で採取した降下火山灰の試料をふるい分けし、0.125～0.25 mmの粒子を用いて薄片を作製して偏光顕微鏡下で観察した。その結果、6割程度のさまざまな色調の岩片とともに、2割程度の新鮮なガラス片も含まれることがわかった。ガラス片の大部分はほとんど変質が認められない低結晶度の淡褐色ガラスと高結晶度の黒色～暗褐色ガラスであった。また、EPMAによってガラス片の化学分析を行ったところ、その化学組成は1979年や1989～1990年、2014年11月～2015年9月の中岳火山灰中のガラスとほとんど変わらないものであった。

今回の噴火は弾道放出や火砕物密度流の発生だけでなく、火口から30 km付近にまで火山礫サイズの火砕物が飛散するなど非常に爆発的なものであった。噴出物量的に見て2016年10月7日～8日噴火は、1979年9月6日や1990年4月20日の噴火と同程度の規模であったと考えられる。

キーワード：阿蘇火山、中岳、マグマ水蒸気噴火、噴石、火砕物密度流

Keywords: Aso Volcano, Nakadake crater, phreatomagmatic eruption, ballistic clast, pyroclastic density current

## 新潟焼山の2015-16年活動の推移 -噴火と火口溢流型ラハールの発生- 2015-16 years activity of Niigata-Yakeyama volcano; ash emission eruptions and syneruptive-spouted type lahar generated in 2016 year eruption.

\*及川 輝樹<sup>1</sup>、池田 啓二<sup>1</sup>、柳澤 宏彰<sup>1</sup>、石原 昂典<sup>1</sup>、小森 次郎<sup>2</sup>、奈良間 千之<sup>3</sup>

\*Teruki Oikawa<sup>1</sup>, Keiji Ikeda<sup>1</sup>, Hiroaki Yanagisawa<sup>1</sup>, Takanori Ishihara<sup>1</sup>, Jiro Komori<sup>2</sup>, Chiyuki Narama<sup>3</sup>

1. 気象庁火山課、2. 帝京平成大、3. 新潟大学自然環境学科

1. Volcanology Division, Japan Meteorological Agency, 2. Teikyo Heisei University, 3. Department of Environmental Science, Niigata University

### はじめに

新潟県西部に位置する新潟焼山火山は、約3,000年前以降に活動を開始した若い活火山である。山体は、デイサイトの溶岩・溶岩ドームと火砕流堆積物で構成される。20世紀以降、噴火を含めて様々な種類の活動の活発化が認められている。それらは、1949、1962、1974年に山麓まで降灰が認められる規模の水蒸気噴火、1983、1987、1989、1997-98年の極小規模な水蒸気噴火、1984、1991-93、2000-01年の噴気活動の活発化、1931年の山頂部からの温泉の湧出などである。マグマ噴火は近年発生していない。なお、1949、1974年の噴火はVEI：2クラスであり、1974年は噴火発生と同時に山体から水が溢れ出し（火口溢流型ラハール）山麓まで達する土石流が発生した。

この新潟焼山火山は、2015年夏頃から噴気が目立ち始め、2016年には極小規模な噴火と火口溢流型ラハールの発生を繰り返した。本講演は、気象庁の機動観測による観察や火山灰の分析などを主として、2015-16年の活動推移について報告する。

### 2015-16年の活動の推移

平常時には50m程度であった噴気高度が2015年夏頃より高くなり、2015年8月26日には火口上200mまで上がっているのが観測された。2015年12月下旬頃からはさらに噴気高度が高くなり、2016年8月3日には1200mの高度を記録した。その8月をピークに噴気高度は下がる傾向となり、特に2017年1月以降は低調になったが、2017年2月上旬でも2015年夏以前の状態にもどっていない。なお、本活動を通して一番活発に活動しているのは、山頂東側斜面上部の噴気孔である。降灰や火口溢流型ラハールの発生は、この噴気孔（ないしその近辺）で発生している。

噴気高度の高くなった2016年初頭以降、小規模な噴火が8回確認された。噴火の認定は、上空や近隣からの観察に基づき、新たに降灰による積雪面の汚れや噴気孔周辺の変色が認められた時を降灰日と認定した。その結果、2016年4月15日以前の積雪期中に6回、その後5月1日にも降灰があったと考えられる。その後7月21日には山頂東側1.5kmに微量の降灰があったことを妙高火山観測所が確認している。これらの降灰に伴って、投出火山岩塊及び融雪や草木が燃えるような高温物質の放出は観察されていない。また、噴気孔近傍からの水（温水）の流出、火口溢流型ラハールの発生が5月1-8日、20日、6月3-4日、26日、7月2日、19日に確認された。

5月1日の降灰は、5月15日に、火口から北北東1.7km付近において3g/m<sup>2</sup>の量の降灰が確認された。この火山灰は、シルトサイズ以下の粒子が90wt%しめる灰色の細粒火山灰であり、少量（10wt%以下）の砂サイズ

の粒子が含まれる。砂サイズの粒子は、円磨された白色変質岩片（黄鉄鉱が付着するものもある）など顕著に変質した粒子の他、新鮮な結晶片（主に斜長石や輝石）、相対的に新鮮ではあるが円磨された形状をなす岩片などの粒子で構成されている。ほとんど変質していない粒子も数割程度含まれるが、発泡した未変質の軽石片や発泡ガラス片などの新鮮なマグマ物質は認められない。なお、黄鉄鉱は風化しておらず新鮮である。降灰分布と降灰量から噴出物量を求めると、 $10^{4-5}$ kg程度となる。他の噴火も火山灰の降灰域の広がりから、ほぼ同規模と推定される。そのため、2016年の一連の噴火の総降灰量は、最大でも $10^6$ kg、おそらく $10^5$ kgオーダーであると考えられる。

今回の一連の噴火の発生は、噴気活動の活発化にともなって降灰が発生したこと、今回の噴気活動活発化後の比較的初期に発生していること、噴出物中に新鮮なマグマ物質が認められないこと、降灰量も少ないことなどの特徴がある。これら特徴から、2016年の一連の噴火は、噴気の活発化に伴って、噴気の通過域の細粒物が吹き飛ばされて発生した水蒸気噴火である可能性が高い。また、今回の活動では、噴気活動活発化に伴い、山体内からの水（温水）が流れ出したこと（火口溢流(湧出)型ラハール）が特徴的である。1974年の水蒸気噴火時には、多量の水が溢れ出した結果、山麓に達する規模の土石流が発生した。そのため、噴気活動の活発化や水蒸気噴火の発生の際には、火口溢流(湧出)型ラハールが発生する可能性は高いといえよう。下流の河川沿いにおいては、噴気活動が活発化した際には、噴火に至らずも、急な増水や土砂災害の警戒が必要である。

キーワード：活火山、新潟県、噴火、テフラ、火山灰、火口溢流型ラハール

Keywords: active volcano, Niigata Prefecture, eruption, tephra, volcanic ash, syneruptive-spouted type lahar

## 霧島火山，えびの高原周辺の硫黄山火口の噴気活動

### Fumarole activity at the southwest rim of loyama crater in the Ebinokogen

\*田島 靖久<sup>1</sup>、前野 深<sup>2</sup>、中田 節也<sup>2</sup>、霧島ネイチャーガイドクラブ 調査班<sup>3</sup>

\*Yasuhisa Tajima<sup>1</sup>, Fukashi Maeno<sup>2</sup>, Setsuya Nakada<sup>2</sup>, Observation members Kirisima nature guide club<sup>3</sup>

1. 日本工営株式会社、2. 東京大学地震研究所、3. 霧島ネイチャーガイドクラブ

1. NIPPON KOEI CO.,LTD., 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Kirisima nature guide club

えびの高原の硫黄山火口周辺では、2015年12月14日に新たな噴気が確認され、2016年1～2月に噴気域（硫黄山噴気帯）が急速に拡大した。また、2016年2月28日に地震の増加とともに火口周辺警報が発表された（気象庁ホームページ<sup>1</sup>）。3月には警報は解除されたが、その後も4月、8月にかけて高温域が緩やかに広がっていることを確認した。8月20日時点では高温域が2200m<sup>2</sup>となり、簡易的な測量では計測が困難になる程に拡大したため、2016年12月にドローンによる調査を実施した。

ドローン調査に先立ち、11月20日、22日、25日、27日に霧島ネイチャーガイドクラブのメンバーによって地温測定を実施し、50℃の範囲を測定した。また、調査前日（12月9日）には、50℃地点の修正と紙皿（直径18cm）にペイントしたマーカーを設置し、観測の準備を行った。これらのマーカー位置を把握するために、12月10日～11日にドローン（Phantom 3）による空撮を行った。空撮映像をオルソ図に変換し、空撮から得られた高温地点をオルソ図にプロットした。ドローン撮影によって得られた2016年12月10日の高温域は約3500 m<sup>2</sup>であり、8月20日の簡易測量の約2200 m<sup>2</sup>から拡大した。

拡大時期は特定できないが、硫黄山周辺では、県道1号線沿いで10月中頃から12月にかけて極めて高濃度の硫化水素（H<sub>2</sub>S）ガスが観測された（宮崎県危機管理課ホームページ<sup>2</sup>）。10月29日にはネイチャーガイドクラブによって硫黄山から流れ出る川に白濁が確認されるなど、表面現象の変化が確認されている。高温域の拡大も、この頃進行した可能性が考えられる。なお、12月11日の観測翌日に地震が多発し、12月12日に噴火警報が発表され、噴火警戒レベルが2に引き上げられた（噴火警戒レベルは12月6日から運用開始、気象庁ホームページ<sup>1</sup>）。ドローンによる調査では、地震多発前に噴気域が拡大していたことが確認できたと言える。2016年2月28日の地震多発の前にも高温域が急速に拡大しており、高温域の急速な拡大は火山活動の活発化を示唆するデータとなる可能性がある。水蒸気噴火では前兆となる地震増加、傾斜変動が短時間に進行することもあるため、硫黄山で見られるような高温域の拡大が意味する点を理解する必要がある。なお、2月現在硫黄山火口周辺の高温域の拡大が続いている。

1 <http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/volcano.html>

2 <http://www.pref.miyazaki.lg.jp/kiki-kikikanri/kurashi/bosai/iouyamagasu20160226.html>

霧島ネイチャーガイドクラブ：古園俊男，原口憲太郎，永友武治，東多佳路，吉永英昭，馬場みどり，高田昌志，松村幸和

キーワード：霧島火山、硫黄山、噴気

Keywords: Kirishima volcanoes, loyama, Fumarole

## 箱根山火山ガスの時間変化とその解釈

### Time variation in the volcanic gas at Hakone volcano with the interpretation

\*大場 武<sup>1</sup>、谷口 無我<sup>2</sup>、代田 寧<sup>3</sup>、角皆 潤<sup>4</sup>、鋤柄 千穂<sup>4</sup>

\*Takeshi Ohba<sup>1</sup>, Muga Yaguchi<sup>2</sup>, Yasushi Daita<sup>3</sup>, Urumu Tsunogai<sup>4</sup>, Chiho Sukigara<sup>4</sup>

1. 東海大学理学部化学科、2. 気象庁気象研究所、3. 神奈川県温泉地学研究所、4. 名古屋大学大学院環境学研究科  
1. Dep. Chem. School Sci. Tokai Univ., 2. Meteorol. Res. Inst. JMA, 3. Hot Springs Res. Inst. Kanagawa Pref., 4. Grad. School Environ. Studies Nagoya Univ.

#### 【序】

箱根山では2001年6月から10月にかけて、群発地震が発生し、大涌谷に掘削された蒸気井の蒸気圧力が上昇した。同様に、2015年4月末から群発地震が始まり、蒸気井の蒸気圧力が上昇し、2015年6月30日に小規模な水蒸気噴火が発生した。箱根山では、群発地震とそれに伴う蒸気井の蒸気圧力上昇が再発する可能性がある。火山ガスの化学組成、安定同位体比は、火山活動に対応し変化している。火山ガスの観測により群発地震の予知や、終息時期の推定が可能となれば、火山防災に大きく貢献する。本研究では、2013年5月から現在までの火山ガスの化学組成および同位体比の変動について解釈を試みる。

#### 【火山ガスの採取】

箱根カルデラの中央火口丘神山の北山麓に分布する大涌谷地熱地帯と上湯場地熱地帯の2箇所で、自然噴気を、2013年5月から毎月1回の頻度で繰り返し、採取・分析した。上湯場の噴気は大涌谷の噴気から北方へ約500m離れている。上湯場地熱地帯は2001年の火山活動以降に出現した地熱地帯で、既存の樹木が枯死している。両者の噴気の出口温度は96℃前後であり、水の沸点に近い。

#### 【結果・考察】

観測を行った二つの噴気では、2015年4月末から始まった群発地震に伴い、CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O比に顕著な上昇が観測された。この変化は、群発地震に伴いマグマ成分のCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O比が上昇したことを意味している。この原因として、シーリングゾーンの形成と破壊が考えられる。シーリングゾーンは脱ガスするマグマを取り囲む地下の領域であり、その実態は、目詰まりした（シーリング）マグマ性流体の通路だと考えられる。マグマ性流体から沈殿して生じた二次鉱物がシーリングを起こすと考えられる。シーリングゾーン内の圧力は徐々に上昇し、マグマ性ガスのCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O比は上昇する。やがてシーリングゾーンは破壊され、CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O比の高いマグマ性流体が浅部熱水系に侵入する。これが群発地震と蒸気井の蒸気圧力上昇をもたらしたのだろう。群発地震に伴い上昇したCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O比は2015年9月には低い値に落ち着いた。気象庁の発する噴火警戒レベルは9月11日に3から2に引き下げられた。その後、噴気のCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O比は、若干の変動を伴いながら、現在まで、低い値を保っている。噴気のCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O比は、群発地震と同時に変化しており、予知のための指標として用いることは難しいと思われるが、火山活動の推移判断に利用できると思われる。

2015年2月から大涌谷の噴気でN<sub>2</sub>/He比が一様に上昇を開始し、2015年4月24日には89000に達した。変化が起きる前のN<sub>2</sub>/He比は、5000程度であったので、18倍増加したことになる。4月26日から群発地震が発生し、5月6日に観測したところ、3600に低下していた。このようなN<sub>2</sub>/He比の上昇は、大涌谷の噴気で2013年10月にも観測されており、それに対応するように、2013年11月に小規模な群発地震が発生している。N<sub>2</sub>/He比の変化は、群発地震の予知に利用できる可能性がある。これらの変化は、大涌谷の噴気に観測されたが、上湯場の噴気には全く観測されなかった。N<sub>2</sub>/He比の上昇は、マグマのシーリングにより説明できる。群発地震に先立ち、シーリングが進行し、マグマから浅部熱水系に供給されるマグマ性流体の流量は低下していた。そのため、浅部熱水系の内部圧力が低下し、地表から空気の侵入を招いた。地下に侵入した空気が噴気に混入しN<sub>2</sub>/He比を上昇させたと考えられる。

噴気に含まれるH<sub>2</sub>OとH<sub>2</sub>の水素同位体比（D/H）の差を用いて、見かけ平衡温度を計算することができると考えられる。二つの噴気について、計算された平衡温度は、2014年8月頃まで、100℃前後で安定していた。

が、2014年10月から12月にかけて、70°C程度まで低下した。その後、温度は100°C程度に復帰し、2015年4月以降の群発地震に伴い、平均すると130°C程度まで上昇した。2015年10月以降は、温度は安定し、110°C程度で推移している。2014年10月に起きた顕著な温度低下は二つの噴気で共通して観測されており、神山北山麓に発達する浅部熱水系全体に起きた変化であったと考えられる。この現象は2015年4月下旬から始まった群発地震の前兆であった可能性があり、今後、観測を続ける必要がある。

【謝辞】

本研究は東京大学地震研究所による「地震火山災害軽減公募研究」に基づき実施されました。ここに記して深く感謝いたします。

キーワード：火山ガス、箱根山、噴火

Keywords: Volcanic gas, Mt Hakone, Eruption

## 草津白根火山・白根火砕丘周辺の熱活動

### Thermal activities around Shirane pyroclastic cone, Kusatsu-Shirane volcano

\*寺田 暁彦<sup>1</sup>

\*Akihiko Terada<sup>1</sup>

1. 東京工業大学火山流体研究センター

1. Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

草津白根山は、過去130年間にわたり水蒸気爆発が繰り返し発生してきた活動的な火山である。山頂部に形成された白根火砕丘は pH が1前後の湯釜火口湖を有するほか、白根火砕丘の北側斜面の約 1 km にわたり優勢な噴気地が存在するなど、活発な熱活動が認められる。比抵抗構造調査によれば、白根火砕丘の地下浅部には低比抵抗層が存在する。微小地震や長周期地震、地殻変動、磁場変動等は、いずれもこの低比抵抗層やその下面付近で発生していること等から、この低比抵抗層は難透水性の粘土層に対応し、その下部には湯釜火口湖への流体供給を担う熱水だまりが存在すると考えられる。このような熱水だまりは水蒸気爆発の発生場に相当し、その内部状態をモニタリングを行うことは水蒸気噴火発生予測に貢献する。しかし、この熱水だまりは難透水性層で覆われているため、その熱、化学的状態の変化を直接的に測定することは難しい。

白根火砕丘周辺に認められる活発な熱活動には、時間的に顕著な変化が起きることが知られている。これは、熱水だまりから外部への流体漏出を反映したものである。そこで本研究では、白根火砕丘浅部の流体流動モデルの構築を目標として、白根火砕丘の熱活動および時間変動を定量的に評価した。併せて、白根火砕丘の南東斜面に存在する温泉湧出に注目し、その化学的特徴を検討する。さらに、流体観測を目的とした観測井を2016年に掘削した。この領域に注目したのは、1927年から1943年にかけて水蒸気噴火が繰り返し発生した場所であること、1960年代前半まで温度 148 °C 前後の噴気活動が認められ、その成分にはマグマ起源の高温火山ガスの関与を示唆する HCl や SO<sub>2</sub> が多く含まれていたこと、現在も本領域付近の地中温度が高い、等の理由に基づく。

#### ・夜間空中赤外線観測

2014年10月、2015年11月および2016年11月に夜間空中赤外線観測を実施した。一般に、日中は日射のために地表面温度が上昇する。その影響を低減させて地熱活動を定量評価するために、赤外線観測は日没後の18-19時に実施した。2014年については地表においても同時温度測定を行ない、空中観測で得られた温度の妥当性を確認した。このほか、近年で日中に行われた同様の空中観測として2012年および2014年がある。得られた垂直赤外面像の空間分解能は地表面付近において約 0.81 m<sup>2</sup>/pixelであり、1画像につき概ね数 100 m 程度の範囲が収録される。調査時に GPS-IMU を用いて取得した機体位置および姿勢情報に基づき、赤外面像から数値標高モデルを作成し、さらにオルソモザイク赤外面像を得ることで、地表面温度に対する面積分布を求めた。

これらの結果に基づき、白根火砕丘周辺の熱活動の推移について、噴気地面積および放熱量として定量化した。北側の噴気地については、2012年と2014年の比較では明らかな変化は認められない一方で、2015年、2016年と、高温領域が徐々に拡大していた。この変化は、2014年に観測された深部流体供給の増加が原因と考えられる微小地震や地殻変動に対応する変化と思われる。

#### ・湯釜東河川の調査

夜間空中赤外線観測によれば、白根火砕丘南東の地表面において有意な温度異常領域は検出されなかった。一方で、本領域には、合流する河川が存在しないにもかかわらず、流下とともに流量が増加し、水温が不連続に上昇する河川（湯釜東河川と呼ぶ）が存在する。この特徴は、川床での温泉湧出を示唆するものであり、夜間

空中赤外線観測の結果からも、川床に複数の高温領域が認められる。その下流には、草津白根火山としては Cl や  $\text{SO}_4^{2-}$  を最も高濃度で含む香草・常布温泉が存在する。

この湧出温水の起源として、湯釜火口湖からの漏水や、香草温泉へ Cl<sup>-</sup> に富む熱水を供給している二次熱水、あるいは高温火山ガスが考えられる。そこで2016年10月に河川流量測定を複数箇所で行ない、優勢な2ヶ所の湧出領域については、その湧出量と湧出温度を推定した。また、河川に沿って10数か所で採水を行うことで、川床から湧出する温水の pH、陰イオン濃度のほか、水の水素・酸素安定同位体比、および  $\text{SO}_4^{2-}$  の硫黄安定同位体比を計算から見積もった。

#### ・井戸掘削

東京工業大学は、平成28年度に草津白根山山頂周辺の観測設備の整備改修事業を実施した。その一環として、湯釜火口中心から東へ 800 m の地点に、浅部地下水のモニタリングを目的とした深度 50 m の観測井を掘削した。その結果、地表から深度 19 m 付近において地下水上面に達し、さらに孔底付近に対応する深度 50 m においては温度 31 °C、pH が4前後の温泉水を得た。そこで深度 50 m 付近にストレーナを設け、そこから水試料を任意に採取できる仕組みを構築とした。孔内には水温や水位、pH、電気伝導度などのセンサの設置が可能であり、水温については2016年11月からテレメータを開始している。

キーワード：草津白根火山、熱水系、噴気、観測井、赤外線カメラ

Keywords: Kusatsu-Shirane Volcano, Hydrothermal system, Fumaroles, Monitoring well, Infrared thermography

## 地下比抵抗構造から推定される草津白根火山のマグマ熱水系 Magmatic hydrothermal system inferred from the resistivity structure of Kusatsu-Shirane Volcano

松永康生<sup>1</sup>、\*神田 径<sup>1</sup>、高倉 伸一<sup>2</sup>、小山 崇夫<sup>3</sup>、齋藤 全史郎<sup>1</sup>、小川 康雄<sup>1</sup>、関 香織<sup>1</sup>、鈴木 惇史<sup>1,4</sup>、木下 雄介<sup>1</sup>、木下 貴裕<sup>1</sup>  
Yasuo Matsunaga<sup>1</sup>, \*Wataru Kanda<sup>1</sup>, Shinichi Takakura<sup>2</sup>, Takao Koyama<sup>3</sup>, Zenshiro Saito<sup>1</sup>, Yasuo Ogawa<sup>1</sup>, Kaori Seki<sup>1</sup>, Atsushi Suzuki<sup>1,4</sup>, Yusuke Kinoshita<sup>1</sup>, Takahiro Kishita<sup>1</sup>

1. 東京工業大学理学院、2. 産業技術総合研究所、3. 東京大学地震研究所、4. 現：伊藤忠テクノソリューションズ

1. School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 4. Now at: ITOCHU Techno-Solutions Co.

草津白根山は群馬県と長野県の県境に位置する標高2000mを越える活火山であり、その山頂部は2つの主要な火砕丘で構成されている。そのうち、北部に位置する白根山では、火口湖である湯釜を中心に活発な活動が観測されていることから、これまで地球化学的研究を中心に様々な研究が行われてきた。一方で、白根山の2kmほど南に位置する本白根山では、歴史時代に火山活動が観測されていないこともあり、幾つかの地質学的な研究を除いてほとんど研究されておらず、地下構造や火山熱水系については不明な点が多い。たとえば、本白根山の山麓には草津温泉、万代鉱温泉、万座温泉など湧出量が豊富な温泉が分布し、それらの放熱量は湯釜周辺からのものを大きく上回ることが知られているが、熱の供給源の位置については未だに不明である。また、本白根山は1500年前にマグマ噴火が起こったことが最近の地質学的研究で明らかにされたものの、マグマ溜まりの状態・位置についてはほとんど分かっていない。本白根山における噴火の発生可能性を議論する上でも、本白根山周辺のマグマ熱水系を解明することは重要である。そこで本研究では、白根山南麓を含む本白根山周辺の23点において広帯域MT観測を行い、地下比抵抗構造の推定を試みた。MT法は電磁気探査手法の一つであり、地下のメルトや熱水など高導電物質に敏感であるため、マグマ溜まりや熱水系の観測に適している。

MT法データの3次元解析によって得られた最終モデルから、白根山から本白根山の地下1-3kmにかけて低比抵抗体が広がっていることがわかった。この上部に火山性地震の震源が分布することから、この低比抵抗体は流体に富んだ領域であり、ここから流体が浅部へと上昇し、地震を引き起こしていると考えられる。先行研究において、山麓温泉（草津温泉、万代鉱温泉、万座温泉）は、高温火山ガスと天水が混合してできた初生的な温泉水が、分別過程を経ずに湧出したものであると解釈されていること、この低比抵抗体の他に目立った火山性流体の存在領域が見られなかったことから、本研究ではこれを山麓温泉の流体供給源と考え、以下のようなモデルを提案する。(1)低比抵抗体の下深くには何らかの熱源が存在し、上部に熱と流体を供給する。(2)熱の供給を受けた低比抵抗体内の流体は山頂下へと上昇し、火山性地震を発生させる。(3)流体の一部は断層に沿って本白根山の東斜面へと上昇し、表層に変質領域を形成する。(4)この流体と天水が混同してできた温泉水は東斜面の溶岩中を流れ下り、万代鉱温泉、草津温泉として湧出する。

一方、本白根山の直下では、マグマの存在を示すような特徴的な低比抵抗体は解析されなかった。しかし、現状では深部構造を詳細に議論できるほど測定・解析精度が十分ではないので、今回の解析結果からは火山直下にマグマ溜まりが存在しないと結論づけることはできない。今後、マグマ熱水系の推定精度を向上させるため、追加の観測やシミュレーションを実施していきたい。

キーワード：草津白根山、本白根山、比抵抗構造、熱水系、マグマ溜り

Keywords: Kusatsu-Shirane volcano, Mt. Motoshirane, resistivity structure, hydrothermal system, magma reservoir

# AMT観測による茶臼岳溶岩ドームにおける3次元比抵抗構造の推定

## Three-dimensional resistivity structure around the lava dome of Chausu-dake volcano inferred from the AMT measurements

\*木下 貴裕<sup>1</sup>、神田 径<sup>2</sup>、高倉 伸一<sup>3</sup>、関 香織<sup>1</sup>、松永 康生<sup>1</sup>、木下 雄介<sup>1</sup>、相澤 広記<sup>4</sup>

\*Takahiro Kishita<sup>1</sup>, Wataru Kanda<sup>2</sup>, Shinichi Takakura<sup>3</sup>, Kaori Seki<sup>1</sup>, Yasuo Matsunaga<sup>1</sup>, Yusuke Kinoshita<sup>1</sup>, Koki Aizawa<sup>4</sup>

1. 東京工業大学理学院地球惑星科学系、2. 東京工業大学火山流体研究センター、3. 国立研究開発法人産業技術総合研究所地質調査総合センター、4. 九州大学大学院理学研究院附属・地震火山観測研究センター

1. Department of Earth Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2. Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology, 3. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 4. Volcano Research Center, Earthquake Research Institute, University of Tokyo

栃木県北部に位置する那須火山群の茶臼岳は、約16000年前に活動を始めた安山岩質の成層火山である（山元, 1997；藤田, 1988）。これまでにマグマ噴出を伴う6回の大きな活動期と多数の水蒸気爆発が報告されている。1408~1410年の最後の活動期では、山頂部に現在の溶岩ドームを形成した（山元・伴, 1997）。その後は水蒸気爆発が繰り返され、1881年7月1日の水蒸気爆発では、溶岩ドームの北西側と西側に爆裂火口を形成した。以降の水蒸気爆発（1953年、1960年、1963年）は、いずれもこれらの火口内で発生し（気象庁, 2013）、現在では噴気地帯となっている。気象庁（2015）の観測によると、1963年の水蒸気爆発以降、噴気温度は徐々に低下し、現在は約100°Cまで下がっている。また、火山性地震も少なく、噴煙高度も減少傾向にあり、火山活動は低下している。火山活動が低下過程にある火山の内部構造を調べることは、将来活動が活発化した際の基礎データとなるばかりか、現在噴火の準備過程にある火山との対比を行う上でも重要である。このような背景から、本研究では茶臼岳における比抵抗構造調査を行った。

茶臼岳周辺では、Aizawa et al.(2009)によって既にAMT観測が行われており、2次元比抵抗構造が推定されている。この解析によると、表層に高比抵抗の薄い層、その下に低比抵抗の厚い層が存在することが示された。また、この低比抵抗帯は上層の粘土に富む不透水性の変質層と、下層の熱水流体の2層にわかれ、この不透水性の層が表層の天水の流れの底と深部からの熱水流体のキャップの役割をしていると解釈されている。しかし、この観測では山麓から登山道に沿った測線でしかデータが取得されていないため、溶岩ドーム直下の詳細な比抵抗構造は得られていない。また、Aizawa et al.(2009)は当該火山の比抵抗構造は3次元性が高いと判断されているが、TMモードのデータだけをを用いた2次元解析であることから、解析結果の信頼性は必ずしも高くない。

本研究では、茶臼岳溶岩ドーム下のより詳細な地下構造を明らかにするために、2016年に溶岩ドーム全体でAMT観測を行った。発表では、本研究で観測されたデータとAizawa et al.(2009)の観測データを一部用いて、地形を考慮した3次元比抵抗構造解析の結果について報告する予定である。

キーワード：那須火山群、茶臼岳、AMT、溶岩ドーム、比抵抗構造

Keywords: Nasu volcano group, Chausu-dake volcano, AMT, lava dome, resistivity structure

## 焼岳での電磁気観測 -広帯域MT観測および磁気探査-

## Goelectromagnetic investigations of Yake-dake volcano - wideband magnetotelluric measurements and magnetic survey -

\*吉村 令慧<sup>1</sup>、橋本 武志<sup>2</sup>、宮崎 真大<sup>1</sup>、中川 潤<sup>1</sup>、加茂 正人<sup>1</sup>、菅野 倅大朗<sup>3</sup>、高田 将仁<sup>4</sup>、三浦 勉<sup>1</sup>、中本 幹大<sup>1</sup>、荒上 夏奈<sup>1</sup>、山崎 健一<sup>1</sup>、大見 士朗<sup>1</sup>、井口 正人<sup>1</sup>

\*Ryokei Yoshimura<sup>1</sup>, Takeshi Hashimoto<sup>2</sup>, Masahiro Miyazaki<sup>1</sup>, Jun Nakagawa<sup>1</sup>, Masato Kamo<sup>1</sup>, Kotaro Sugano<sup>3</sup>, Masahito Takata<sup>4</sup>, Tsutomu Miura<sup>1</sup>, Mikihiro Nakamoto<sup>1</sup>, Kana Araue<sup>1</sup>, Ken'ichi Yamazaki<sup>1</sup>, Shiro Ohmi<sup>1</sup>, Masato Iguchi<sup>1</sup>

1. 京都大学防災研究所、2. 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター、3. 北海道大学大学院理学研究院、4. 北海道大学理学部

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University, 3. Graduate School of Science, Hokkaido University, 4. School of Science, Hokkaido University

岐阜・長野県境に位置する焼岳火山は、重点的な観測研究の対象となったが、その火山活動を監視・モニタリングするためには、地下の構造情報は必要不可欠である。しかしながら、山頂付近における物理探査による構造推定の試みは非常に少ない。そこで我々は、広帯域MT観測による比抵抗構造探査を計画・実施した。通常のMT観測では、磁場3成分・電場2成分の電磁場データの収録を行うが、焼岳では器材の運搬が制限されるため、山麓の3箇所でのみ磁場3成分を収録し、その他の観測点では電場2成分測定の調査形態をとった。

観測は2016年8月31日より開始し、計12点で順次器材の設置を行い、各観測点で少なくとも5日間の電磁場データを収録した（12点中1点で欠測）。器材は、ドイツMetronix社製ADU07/07eならびに、NTシステムデザイン社製ELOG1Kを使用し、32Hzサンプリングの連続収録および1024Hzサンプリングの夜間4時間/1日の限定収録を行っている。

MT応答の推定には、地熱技術開発（株）が山形県において運用している連続磁場観測データを参照信号とするリモートリファレンス処理を施した。電場のみの観測となった8点の応答推定には、焼岳北麓のYKD002地点の磁場を用いている。噴気地帯近傍の2観測点を除き、32Hz～700secの帯域で比較的良好な応答が求められた。推定された応答のうちTMモードのみを使用し、Ogawa and Uchida (1996)のコードを用いた南北断面での2次元インバージョンを行った。予察的な結果として、頂上のやや北方を中心とするキャップ状の低抵抗領域が検出された。この特徴的構造の中央部は、直近の水蒸気噴火を発生させた中尾峠爆裂火口の直下に相当する。

広帯域MT観測に加え、カナダGEM Systems社製GSM-19オーバーハウザー磁力計を使用した地上磁気探査も2016年11月1日に実施した。中尾登山口から頂上および焼岳小屋周辺を經由し中ノ湯登山口に至る測線である。得られた磁気異常データを説明するために、MT探査により検出された低比抵抗位置に低磁化領域の存在が必要であることがわかった。

キーワード：焼岳、地磁気地電流法、地上磁気探査

Keywords: Yake-dake volcano, magnetotellurics, ground magnetic survey

## 水準測量によって測定された桜島火山における2015年8月ダイク貫入イベント以降の地盤上下変動

### Vertical ground deformation after the August 2015 dike intrusion event at Sakurajima volcano measured by leveling survey

\*山本 圭吾<sup>1</sup>、松島 健<sup>2</sup>、吉川 慎<sup>3</sup>、内田 和也<sup>2</sup>、井上 寛之<sup>3</sup>、大倉 敬宏<sup>3</sup>、園田 忠臣<sup>1</sup>、竹中 悠亮<sup>1</sup>、中本 幹大<sup>1</sup>、荒上 夏奈<sup>1</sup>、手操 佳子<sup>2</sup>、森田 花織<sup>2</sup>、末次 秀規<sup>4</sup>、満永 大輔<sup>4</sup>、長山 泰淳<sup>4</sup>

\*Keigo Yamamoto<sup>1</sup>, Takeshi Matsushima<sup>2</sup>, Shin Yoshikawa<sup>3</sup>, Kazunari Uchida<sup>2</sup>, Hiroyuki Inoue<sup>3</sup>, Takahiro Ohkura<sup>3</sup>, Tadaomi Sonoda<sup>1</sup>, Yuusuke Takenaka<sup>1</sup>, Mikihiro Nakamoto<sup>1</sup>, Kana Araue<sup>1</sup>, Yoshiko Teguri<sup>2</sup>, Kaori Morita<sup>2</sup>, Hideki Suenami<sup>4</sup>, Daisuke Mitsunaga<sup>4</sup>, Hiroaki Nagayama<sup>4</sup>

1. 京都大学防災研究所、2. 九州大学大学院理学研究院、3. 京都大学大学院理学研究科、4. 気象庁

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Faculty of Sciences, Kyushu University, 3. Graduate School of Science, Kyoto University, 4. Japan Meteorological Agency

桜島火山においては、2015年8月15日に発生したダイク貫入イベント以降、噴火活動としては比較的に静穏な状態が続いている。このダイク貫入イベント以降の地盤上下変動を明らかにすることを主な目的として、2016年11月に桜島火山において一等水準測量の繰返し観測を実施した。本講演では、この測量の結果について報告し、得られた地盤上下変動について議論する。

水準測量を実施した路線は、海岸線に沿って桜島を一周する桜島一周道路路線、桜島西部山腹のハルタ山登山路線、北部山腹の北岳路線であり、総延長は約56 kmである。これらの路線を、2016年11月1日～24日の期間において測量に当たった。測量方法は、各水準点間の往復測量で、その往復差は一等水準測量の許容誤差を満たすようにした。実際の測量における誤差は、1 km当りの平均自乗誤差が桜島一周道路路線、ハルタ山登山路線、北岳路線においてそれぞれ $\pm 0.26$ 、 $\pm 0.16$ 、 $\pm 0.14$ 、水準環閉塞誤差は桜島一周道路路線およびハルタ山登山路線において時計回りにそれぞれ1.1 mm（許容誤差12.1 mm）、2.4 mm（許容誤差7.6 mm）であり高精度の一等水準測量であった。

桜島西岸の水準点BM.S.17を不動点（基準）とし、各水準点における比高値を、前回の2015年8月・9月に行われた測量結果（山本・他、2016）と比較することで、2015年8月・9月から2016年11月の期間における地盤上下変動量を計算した。

計算された地盤上下変動量から、桜島北部付近および北岳路線の水準点において、顕著な地盤隆起（最大で20.5 mm）が生じていることが確認された。1年あたりの隆起速度に換算しても17.6 mm/yearと、1991年以降の始良カルデラ膨張期間において最も大きい部類に属する。一方で、桜島南部の有村付近においては地盤沈降（最大で-6.8 mm）が認められた。有村付近は、経年的な局所沈降が生じている領域である。局所沈降量については、2007年～2014年の水準測量期間ごとに測定値から茂木モデルによる理論値を差し引き、それらから1年あたりの平均上下変動量を計算することで平均的な局所沈降量が求められているが（山本・他、2016）、それらを考慮してなお有村付近で最大で5 mm程度の地盤沈降が生じていると考えられる。

茂木モデルに基づき、上下変動量データから圧力源の位置を求めたところ、桜島北部の地下に増圧源が、また昭和火口の東側地下に減圧源が推定された。桜島北部地下の増圧源については、2015年8月15日のダイク貫入イベント以降、表面的な噴火活動が低調なことを反映し、地下においてマグマの貯留が進行していることを示していると考えられる。一方で、昭和火口の東側地下の減圧源については、貫入したダイクに関係したなんらかの減圧状態を反映しているのではないかと考えられる。講演では、これらの圧力源解析結果の詳細についても議論する。

キーワード：桜島火山、精密水準測量、地盤上下変動

Keywords: Sakurajima volcano, precise leveling survey, vertical ground deformation

## 地殻変動観測による桜島2015年8月のマグマ貫入イベント及びその前後の活動の粘弾性応答的解釈

### The viscoelastic responsive interpretation by ground deformation observations of magma intrusion event into Sakurajima volcano on August, 2015 that contained pre- and after- activities.

\*長山 泰淳<sup>1</sup>、井口 正人<sup>2</sup>

\*Hiroaki Nagayama<sup>1</sup>, Masato Iguchi<sup>2</sup>

1. 京都大学大学院理学研究科、2. 京都大学防災研究所

1. Graduate School of Faculty of Science, Kyoto Univ. , 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ.

#### 背景

2015年8月に桜島で噴火未遂ともいえるマグマ貫入イベントが発生した。15日の7時頃から微小なVT地震が発生し、8時頃から伸縮計・傾斜計で地殻変動が記録されるようになった。その後、地震活動が活発化し、10時27分頃からは地殻変動レートも増大した。その後11時32分及び43分に振幅の大きな低周波地震が発生し、この頃から地震活動の低下や地殻変動レートの減少が認められるようになった。17日頃まで余効的な地殻変動が続いたが、これ以降は変動極性が反転した(以後、反転までを貫入過程と呼ぶ)。複合的な地殻変動観測から、総観的にはヘッドの深さが海拔下約1kmのWNW-ESE走向クラックが数 $10^6\text{m}^3$ 開口したものと理解される(Hotta et al., 2016やMorishita et al., 2016など)。反転後は貫入地点付近(例えば有村観測坑道)で指数関数的に変化する粘弾性緩和的な変動が支配的であり、一方離れた点(例えばハルタ山)では貫入マグマの移動を思わせる変動が重畳している(以後、緩和過程と呼ぶ)。力源の変化と山体の粘弾性応答の重畳による複雑な時空間変化が認められ、より詳しく解析をしていく必要がある。本調査では、貫入過程及び緩和過程の時空間変動パターンを調査した。

#### データと手法

桜島島内の京都大学桜島観測所及び気象庁の伸縮計・傾斜計の1分値データを用いた。

貫入過程において、地震活動が間欠的である点、傾斜・伸縮の極性が反転している成分がある点、有村観測坑道で主歪方向が時計回りしている点(内田 2015)などから、貫入が複数のクラックの複合であると仮想し、貫入過程を4つのステージに分け、緩和ステージは1つのステージと見なした。(A: 08:00-10:27 B: 10:27-11:15 C: 11:15-11:45 D: 11:45-17日18:00 E: 17日18:00-)

それぞれのステージにおいて、岡田(1992)の断層モデルでソースを推定した。最適モデルによる各観測点位置における理論変動の方向への観測データの射影を正規化し、時間依存応答特性を調査した。

#### 結果

有村観測坑道の傾斜データに対し、各ステージの始めにステップを与え、偽弾性応答(ケルビン-フォークトモデル)の重ね合わせを仮定した最適値フィッティングにより変動をモデル化した。ステージA~Cでは遅延時間は約50分だが、ステージDでは約360分とより遅延が大きくなった。ステージEの緩和時間は約90日( $1.3 \times 10^5$ 分)でおおよそ4割が戻った。

貫入過程において、有村観測坑道の傾斜と各点の傾斜のインパルス応答から、島内の各点での遅延時間と貫入ソースからの距離との相関関係が認められた。また、クラックの開口方向の観測点は応答が速く伝播し、走向方向は遅く伝播する傾向が認められた。開口方向の観測点では、15日8時の変動開始から相対遅延が増加し、15日11:45を境に遅延が解消していく特徴が認められた。緩和過程においても、貫入ソースからの距離と緩和時間に相関が認められた。これは、貫入の変動に対する戻り量が、ソースに近いほど大きいことを意味する。

#### 当日の議論

ステージC,D間の遅延時間の変化は、A~Cにおける局所的なクラック開口による応力集中に対する周辺場の緩

和作用と考えられる。当日は、VT地震活動と遅延の伝播速度の関連についても議論する予定である。

また、ステージEの有村近傍の変動については、マグマの下降による遅延応答、あるいは貫入マグマの応力(圧力)緩和が考えられる。対して周辺観測点では、2015年10月頃まで指数関数的な変動をしておらず、別の効果の重畳が認められる。この効果を抽出し、9月、10月に時差を持って発生した周辺部のVT地震との関連を議論する。

相対重力観測によると、貫入時のクラック内部の密度は $0.98 \pm 0.37 \text{g/cm}^3$ と見積もられており(Kazama et al., 2016)、マグマと考えた場合にはかなり発泡が進んでいる。ガスの上方向・側方拡散を考慮にいれ、上記の特徴が説明できるか検討する。

キーワード：桜島、マグマ貫入、粘弾性応答

Keywords: Sakurajima volcano, magma intrusion, viscoelastic response

# 重力変動から桜島の火山活動（2009年～2016年）を読み解く

## Absolute gravity signals at the Sakurajima volcano since 2009 through 2016

\*大久保 修平<sup>1</sup>、山本 圭吾<sup>2</sup>、井口 正人<sup>2</sup>、田中 愛幸<sup>1</sup>、今西 祐一<sup>1</sup>、渡邊 篤志<sup>1</sup>

\*Shuhei Okubo<sup>1</sup>, Keigo Yamamoto<sup>2</sup>, Masato Iguchi<sup>2</sup>, Yoshiyuki Tanaka<sup>1</sup>, Yuichi Imanishi<sup>1</sup>, Atsushi Watanabe<sup>1</sup>

1. 東京大学地震研究所、2. 京都大学防災研究所

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

### [1] はじめに

桜島火山では2009年以降2016年7月までは、昭和火口から噴火活動が継続し、爆発回数は年間数百回から千回に達していた。ことに2015年8月15日にはダイク貫入イベントが発生し、多数の火山性地震および10cmを超える地殻変動が観測され、噴火警戒レベルが4まで上げられるなど緊迫した事態も生じた。しかし、このイベント直後に爆発・噴火活動はかえって低下し、2016年7月以降2017年2月現在にわたって噴火が認められなくなるという予想外の展開となった。仮に、噴火活動の収まった2016年8月以降を休止状態もしくはそれに準ずる状態とするなら、2009年の火山活動の活発化から2016年7月の活動の休止（準休止）までを一連のサイクルとみなすことができる。本講演ではこの火山活動サイクルのなかで観察された重力変動を紹介し、火山体内の物理現象について考察を進めたい。

### [2] 重力変動の特徴とその解釈

重力観測データには、降雨等に伴う陸水変動による重力擾乱や、不圧地下水の潮汐等、火山活動とは独立な要因で変化する成分が含まれている。これらの擾乱を除去する手法については、Kazama and Okubo (2009)や、Okubo et al (2014)で開発してきた。これらの擾乱を取り除いた後の重力シグナルを調べたところ、火山活動イベントごとに、それぞれ特徴的な変動を示していることがわかった。主なものを以下(1)~(3)に記す。

#### (1) 数十万トン規模のブルカノ式噴火（2012年7月24日南岳A火口）

噴火の7時間前から3時間前にかけて、一旦、10 microgalの重力増加が生じた後、3時間前～噴火直前までにほぼ、同量の重力減少が見られた。

#### (2) 溶岩ドーム形成（2015年1月～2月昭和火口）

100 nanoradian程度の傾斜変動と、数microgal程度の重力変動の増減とがよい相関を見せた。両者の間には、タイムラグ1～2日が存在する。

#### (3) ダイク貫入イベント（2015年8月15日）

6 microgalの重力減少が、10 microradian程度の地殻変動と同期して（タイムラグなし）で生じた。両者の変動のタイムスケール12時間前後で完結している。定量的にも重力も地殻変動も通常のディスクロケーションモデルで良く説明できた。

上記のさまざまな特徴は、火道の「開口・閉塞」状態のスイッチングを反映している。すなわち(1)(2)では、火道が開口状態にあって、周囲に生じる弾性変形が小さく、重力変動の大部分が火道内のマグマ頭位変化＝線質量の長さ変化ととらえることができる。一方、(3)では火道が閉塞したために、貫入マグマは弾性変形を周囲の媒質に生じさせざるをえず、その結果、重力変動には、貫入マグマの引力項に加えて、地殻の弾性変形に伴う密度場変化の影響が含まれていると考えられる。

キーワード：重力、桜島火山、火道

Keywords: Gravity, Sakurajima volcano, conduit

## アクロスで捉えた2015年8月15日桜島マグマ貫入イベントに伴う地震波伝播特性の変化

### Temporal change in transfer function using ACROSS associated with magma intrusive event in 2015 in Sakurajima volcano, Japan

\*山岡 耕春<sup>1</sup>、渡辺 将史<sup>1</sup>、渡辺 俊樹<sup>1</sup>、前田 裕太<sup>1</sup>、國友 孝洋<sup>1</sup>、宮町 宏樹<sup>2</sup>、八木原 寛<sup>2</sup>、為栗 健<sup>3</sup>、生田 領野<sup>4</sup>、井口 正人<sup>3</sup>

\*Koshun Yamaoka<sup>1</sup>, Masashi Watanabe<sup>1</sup>, Toshiki Watanabe<sup>1</sup>, Yuta Maeda<sup>1</sup>, Takahiro Kunitomo<sup>1</sup>, Hiroki Miyamachi<sup>2</sup>, Hiroshi Yakiwara<sup>2</sup>, Takeshi Tameguri<sup>3</sup>, Ryoya Ikuta<sup>4</sup>, Masato Iguchi<sup>3</sup>

1. 名古屋大学環境学研究科、2. 鹿児島大学理工学研究科、3. 京都大学防災研究所、4. 静岡大学理学部

1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. Faculty of Science, Shizuoka University

われわれは2012年9月よりアクロス(精密制御定常信号システム)震源を九州南部に位置する桜島火山の北西山麓に設置し、連続観測を行っている(Yamaoka et al.2014)。その桜島火山で2015年8月15日9:00頃から急激な火山性地震の増加と山体の膨張が確認された。この活動は、だいち2号によるSAR干渉解析結果(Morishita et al. 2016)やGNSS・傾斜変動などの解析(Hotta et al.,2016)から岩脈状のマグマが昭和火口直下に貫入したことによって引き起こされたものであることが明らかになった。本研究では桜島に設置してあるアクロスの記録を解析し、8月15日に発生したマグマ貫入イベントに伴う伝達関数の変化を明らかにした。

アクロス震源は偏心おもりの回転によって振動を発生させる装置である。回転は2時間ごとに反転し、信号の線形結合によって任意の方向の直線加振を表現できる。震源から発せられた地震波を周囲の地震観測点で捉え、観測波形を震源波形でデコンボリューションすることにより震源・観測点間の伝達関数(グリーン関数)が得られる。桜島火山におけるアクロスの運転は、2012年9月12日から2015年の8月19日まで、マグマ貫入イベントを含んで連続的に実施された。この一連のデータについて伝達関数の解析を行うことで岩脈貫入イベントに伴う地震波伝播特性の変化を明らかにした。

観測点の波形データをスタッピングし、一日毎の伝達関数の計算に加え、2時間毎の伝達関数の計算も行った。その結果、多くの観測点で2015年8月15日の9時から11時の間に伝達関数に大きな変化が見られることがわかった。この時間帯に降雨がなかったことから、この変動はマグマ貫入によるものであると結論できる。

より詳細な伝達関数の時間変化を調べるために非イベント時の波形を基準として、2時間スタックされた波形との相関を計算すると、地殻変動の開始とほぼ同時に相関が悪くなっていく結果を得た。また伝達関数の空間変化を調べるために、イベント前と後でスタックされた波形の初動から1秒間の相関係数の観測点分布をプロットしたところ、特に桜島山頂西側の大正噴火口列近傍の観測点で相関が悪くなることが分かった。さらに伝達関数の位相変化を計算したところ、火口列近傍では地震波速度が1%程早まり、火口列から離れた地点では変化が小さいことが分かった。これらの変化は貫入イベントに伴う応力増加に起因するものと考えられるとともに、大正噴火口列周辺では地震波速度変化の応力感度が高いことが分かった。

キーワード：地震波速度変化、地震波散乱、応力感度

Keywords: Temporal variation of seismic velocity, Scattering of Seismic wave, Stress Sensitivity

## 桜島火山における反復地震探査（最終回）

### The final round of the repeating seismic experiment in Sakurajima Volcano, Japan. The experiment 2016.

\*筒井 智樹<sup>1</sup>、井口 正人<sup>2</sup>、中道 治久<sup>2</sup>、為栗 健<sup>2</sup>、大島 弘光<sup>3</sup>、青山 裕<sup>3</sup>、山本 希<sup>4</sup>、野上 健治<sup>5</sup>、大湊 隆雄<sup>6</sup>、前田 裕太<sup>7</sup>、大倉 敬宏<sup>2</sup>、清水 洋<sup>8</sup>、松島 健<sup>8</sup>、八木原 寛<sup>9</sup>、宮町 宏樹<sup>9</sup>、小林 励司<sup>9</sup>、平原 聡<sup>4</sup>、辻 浩<sup>6</sup>、渡邊 篤志<sup>6</sup>、堀川 信一郎<sup>7</sup>、園田 忠臣<sup>2</sup>、吉川 慎<sup>2</sup>、竹中 悠亮<sup>2</sup>、平野 舟一郎<sup>9</sup>、柳澤 宏彰<sup>10</sup>、菅井 明<sup>10</sup>、井手 和彦<sup>10</sup>、長山 泰淳<sup>10</sup>、満永 大輔<sup>10</sup>、小窪 則夫<sup>10</sup>、重信 有三<sup>10</sup>、渡辺 茂<sup>10</sup>、畠山 康憲<sup>10</sup>

\*Tomoki Tsutsui<sup>1</sup>, Masato Iguchi<sup>2</sup>, Haruhisa Nakamichi<sup>2</sup>, Takeshi Tameguri<sup>2</sup>, Hiromitsu Oshima<sup>3</sup>, Hiroshi Aoyama<sup>3</sup>, Mare Yamamoto<sup>4</sup>, Kenji Nogami<sup>5</sup>, Takao Ohminato<sup>6</sup>, Yuta Maeda<sup>7</sup>, Takahiro Ohkura<sup>2</sup>, Hiroshi Shimizu<sup>8</sup>, Takeshi Matsushima<sup>8</sup>, Hiroshi Yakiwara<sup>9</sup>, Hiroki Miyamachi<sup>9</sup>, Reiji Kobayashi<sup>9</sup>, Satoshi Hirahara<sup>4</sup>, Hiroshi Tsuji<sup>6</sup>, Atsushi Watanabe<sup>6</sup>, Shinichiro Horikawa<sup>7</sup>, Tadaomi Sonoda<sup>2</sup>, Shin Yoshikawa<sup>2</sup>, Yusuke Takenaka<sup>2</sup>, Shuichiro Hirano<sup>9</sup>, Hiroaki Yanagisawa<sup>10</sup>, Akira Sugai<sup>10</sup>, Kazuhiko Ide<sup>10</sup>, Hiroaki Nagayama<sup>10</sup>, Daisuke Mitsunaga<sup>10</sup>, Norio Kokubo<sup>10</sup>, Yuzo Shigenobu<sup>10</sup>, Shigeru Watanabe<sup>10</sup>, Yasunori Hatakeyama<sup>10</sup>

1. 秋田大学、2. 京都大学、3. 北海道大学、4. 東北大学、5. 東京工業大学、6. 東京大学、7. 名古屋大学、8. 九州大学、9. 鹿児島大学、10. 気象庁

1. Akita University, 2. Kyoto University, 3. Hokkaido University, 4. Tohoku University, 5. Tokyo Institute of Technology, 6. University of Tokyo, 7. Nagoya University, 8. Kyushu University, 9. Kagoshima University, 10. Japan Meteorological Agency

本発表では2016年12月に行われた桜島火山における反復地震探査について報告し、これまでの探査で得られた地震学的応答の変化についてまとめる。

反復地震探査は桜島火山の活動に伴う地下構造変化を地震学的応答変化として捉える目的で、「災害の軽減に貢献する地震・火山観測研究計画」の一環として実施されてきた。

2016年12月に行われた本探査は2009年12月に始められた反復探査の7回目として、2014年の探査から2年ぶりに実施されたものである。2016年12月の探査は2015年8月の噴火未遂のあとで行われた初めての探査であった。今回の探査では従来からの地震反射断面上の変化検出を目的とした桜島北部から東部にかけて交差する2本の測線に加えて、2015年に貫入したとされるマグマの影響の検出目的として桜島東部から南部に至る1本の測線を設定し、14箇所が発破点と約250箇所の臨時観測点を展開した。

反復探査の2014年までの成果は、桜島北東部の海面下5.8kmに強度の変化する地震波反射面 $\alpha$ を見いだしたことである (Tsutsui et al., 2016, JVGR誌)。反射面 $\alpha$ は Iguchi et al. (2013) の指摘する桜島島内の地盤変動源のやや北に位置する。反射面 $\alpha$ は2009年に最大の強度となった後、それ以降は強度が減少していた。すなわち反射面 $\alpha$ は2009-2010年のマグマ貫入に関連した変化は見せたものの、それ以降に発生した2011-2012年のマグマ貫入に対応する変化を示さなかった。

その後、筒井・他(2016,合同学会)はこれまで得られたデータをさらに検討した。測線外発破の観測記録には Tsutsui et al. (2016)の地震反射断面の位置よりも活動火口寄りの経路を通過してきた地震波が含まれている。筒井・他(2016)は測線外発破の観測記録に以下の3つの顕著な後続相が表れることを指摘した。

- 1) 海面下5.8kmからのPS変換波
- 2) 海面下4.7kmからのPP反射波
- 3) 海面下2.4kmからのPP変換波

これらはいずれも反射面 $\alpha$ の南2 kmにその発生源が推定され、その場所は Iguchi et al. (2013) が指摘する北岳北東斜面の圧力変動源の位置に一致する。特徴的なことは、1)は2012年の観測記録に著しく明瞭に現れ、3)は2014年の記録に明瞭に現れることであり、いずれも時間変化が認められることである。1)は先述の $\alpha$

の近傍でしかも深度が一致することから、 $\alpha$ の延長であると解釈される。

2016年探査の観測記録は予稿投稿時点で解析が進行中であるが、生の波形記録から以下のことが伺われる。

- a) 海面下5.8km ( $\alpha$ ) からのPP反射波は2014年より弱い。
- b) 海面下5.8kmからのPS変換波はみとめられない
- c) 海面下4.7kmからのPP反射波は強くなっている
- d) 海面下2.4kmからのPP反射波も強くなっている

先述のように2016年探査は2015年8月の噴火未遂イベントの後に行われており、これらの変化は2015年の噴火未遂イベントの結果の構造変化を反映していると考えられる。本発表では観測開始以降の火山活動の推移と共に反射強度変化の推移をコンパイルし、2009年～2016年の期間の桜島のマグマの動きを考察する。

なお本研究は「災害の軽減に貢献する地震・火山観測研究計画」経費と気象庁経費、京都大学防災研究所経費で行われた。観測に用いた臨時観測点資材一式は東京大学地震研究所より借用した。ここに記して謝意を表します。

キーワード：桜島火山、構造探査、マグマ

Keywords: Sakurajima Volcano, Reflection seismology, Magma

## Shallow crustal velocity structures obtained from ambient seismic noise study in the Aso caldera

\*Yu-Chih Huang<sup>1</sup>, Takahiro Ohkura<sup>1</sup>, Tsuneomi Kagiya<sup>1</sup>, Shin Yoshikawa<sup>1</sup>, Hiroyuki Inoue<sup>1</sup>

1. Aso Volcanological Laboratory, Institute of Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

The Aso volcano is situated approximately in the central of Kyushu and is one of the most active volcanoes in Japan. There were four gigantic eruptions occurred and present caldera was formed about 89 ka known as Aso-4 eruption, with around 18 km in E-W and 25 km in N-S direction. Recently, the major volcanic activities focus on the post-caldera central cones, especially the first crater of the Mt. Nakadake. The conceptual volcanism and magma plumbing system of the Aso volcano were investigated with various geophysical and geodesic observations. The magma chamber is approximately spherical, located 3–4 km southwest of Mt. Nakadake (around Mt. Eboshidake) at depths of 6–10 km. Fumaroles and surface geothermal activities also expose in the southwest flanks of Mt. Eboshidake.

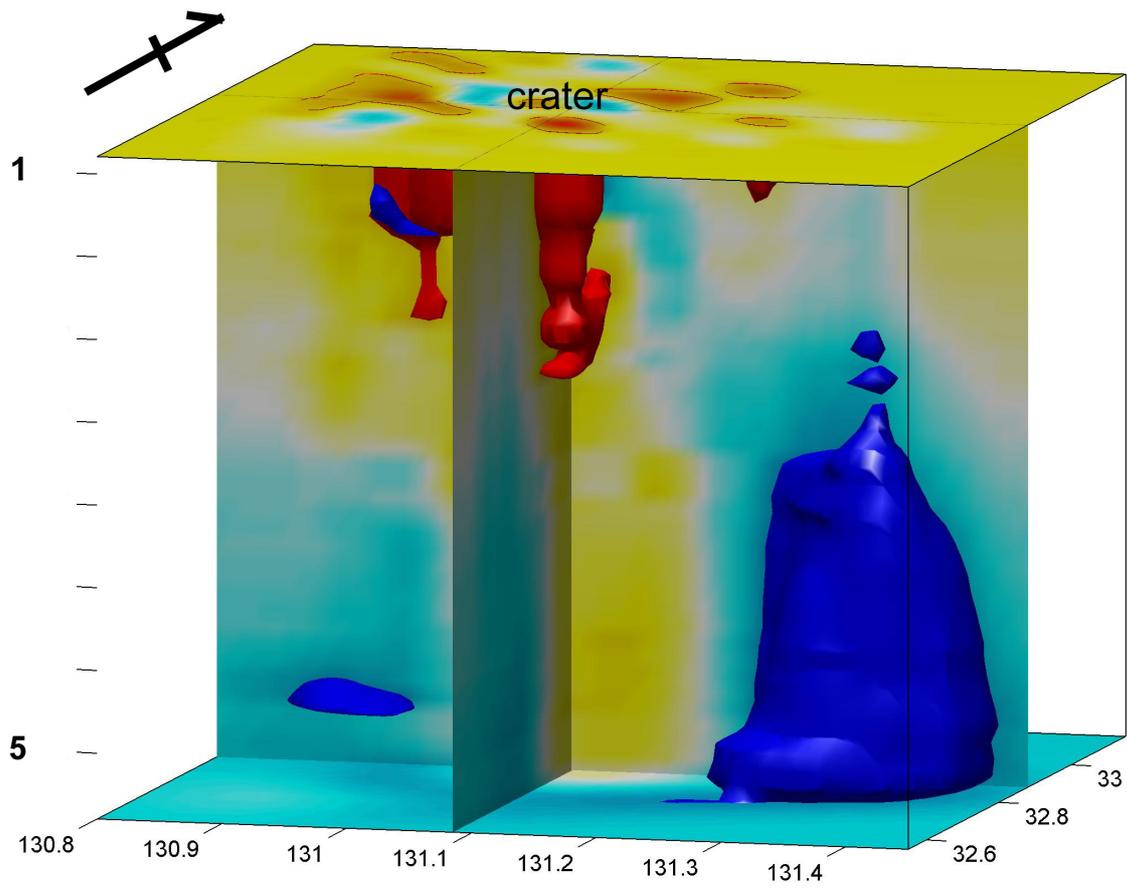
Analyzing ambient seismic noise signals has been routinely used to investigate the subsurface shear-wave velocity structure around the world in the past decade. Some studies also demonstrated it is possible to monitor the magma and hydrothermal fluid movement, or seismic velocity variations beneath active volcanos from the temporary changes of cross-correlation functions (CCFs). The seismic activities of Aso volcano have been monitored with around 20 broadband and short-period seismometers operated by Aso Volcanological Laboratory (AVL). The seismic dataset also included five permanent broadband stations operated by Japan Meteorological Agency (JMA) or National Research Institute for Earth Science and Disaster (NIED), which are located inside and surrounding the Aso caldera.

The interstation distances are much shorter (1–2 km) near craters on the Mt. Nakadake comparing with station-pairs surround the Aso caldera (10–20 km). Seismic data is daily vertical component between November 2009 and September 2013, i.e., before recent eruptions started on 25 November, 2014. Raw data were firstly transferred from WIN to SAC format and downsampled to 20 Hz. After primarily checking data quality, the daily CCFs were obtained in the 1–10 s period band for broadband station-pairs and 0.2–5 s for short-period station-pairs. Daily CCFs were stacked monthly, and then monthly CCFs were stacked again to further obtain Rayleigh wave phase velocity dispersion curves. The 2D and 3D phase velocity maps were mainly constructed in the 1–5 s period band and to determine the predominant velocity distributions.

Generally speaking, Rayleigh waves are sensitive at depths approximating one-third of wavelengths and vary with periods. Therefore, the sensitive depths of S-wave velocity structures ranged from approximately 0.7–5 km in this research. At most of periods, low velocities are dominant underneath the post-caldera central cones and the western portions of the Aso caldera, which might be corresponding to magma conduits and geothermal activities. High velocities are observed in the east of Mt. Nakadake and also the regions surround the Aso caldera, which might be related with much earlier volcanic activities that stopped recently.

The obtained velocity structures in this study can be as a reference, which were obtained with seismic data before latest eruptions. More recent seismic data should be easier to observe temporary variations of daily CCFs, which might be related to the movement of magma or hydrothermal fluid that cause temporary velocity structural variations in the shallow crust. More dense seismic stations might be required to image more detail 3D velocity structures and temporary variations.

Keywords: ambient seismic noise tomography, Aso caldera, shallow crust



# 1995～2014年のGPS繰り返し観測から明らかにした口永良部島火山における地盤変動源モデル

## Ground deformation source model at Kuchinoerabu-jima volcano during 1995–2014 as revealed by repeated GPS observation

\*堀田 耕平<sup>1</sup>、井口 正人<sup>1</sup>

\*Kohei Hotta<sup>1</sup>, Masato Iguchi<sup>1</sup>

1. 京都大学防災研究所

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

We analyzed repeated GPS observation data in Kuchinoerabu-jima during August 1995–April 2014. Most stations located around the Shin-dake crater showed crater-centered radial horizontal displacements. There was a tendency that observed horizontal displacements at western rim of the Shin-dake crater were larger (16.6–20.6 cm) compared to those at eastern rim (7.8–11.6 cm). In addition, station KUC14 which locates approximately 500 m south of the Shin-dake crater showed westward horizontal displacement rather than crater-centered radial (southward) one. On the other hand, small displacements (less than 2 cm) were detected at the stations located at the foot of Kuchinoerabu-jima. We modeled the observed displacements. In order to take topographic effects into account, we applied a finite element method (FEM) using the software Flex PDE Professional version 6.40. We set entire FE domain as 100×100×50 cubic kilometers (129.7011–130.7351°E, 29.9911–30.8994°N, 0–50 km bsl). We set top of the domain as a free surface, and sides and bottom of the domain as fixed boundaries. Since we used stations inside Kuchinoerabu-jima in the present study, topography was introduced in the area within Kuchinoerabu-jima using DEM data provided by Kagoshima prefecture, and elevation of the outside area was assumed to be sea level (zero). We assumed a homogeneous elastic rheology with a shear modulus of 30 GPa and Poisson's ratio of 0.25. We applied a vertical spheroid source model and searched optimal values of horizontal location, depth, equatorial and polar radiuses, and internal pressure change of the source which minimize the RMS between observed and calculated displacements using the forward modeling method. A spherical source with 100 m radius (i.e., both equatorial and polar radiuses are 100 m) was obtained beneath the Shin-dake crater (130.2157°E, 30.4462°N) at a depth of 310 m asl (i.e., the uppermost part of the spherical source is approximately 100 m below the crater bottom). The pressure increase of 831 MPa yields volume increase of 90 thousand cubic meters. Taking topographic effects into account allowed the reproduction of large horizontal displacements at western rim of the Shin-dake crater and westward horizontal displacement at KUC14. The location of the obtained spherical source coincide with the demagnetized ellipsoid estimated by Kanda et al. (2010, JVGR). They interpreted that piezomagnetic variation was produced by the pressurized rocks around the aquifer due to the continuous supply of high-temperature volcanic gases in addition to the thermal effect. The obtained spherical source may be corresponding to the pressurized aquifer.

キーワード：口永良部島火山、地盤変動、GPS、有限要素法

Keywords: Kuchinoerabu-jima volcano, ground deformation, GPS, finite element method

# 御嶽山2014年噴火後の浅部収縮に対して与えられる測地的制約

## Geodetic Constraints on Post-eruptive deformation of 2014 eruption on Ontake Volcano

\*成田 翔平<sup>1</sup>、村上 亮<sup>1</sup>

\*Shohei Narita<sup>1</sup>, Makoto Murakami<sup>1</sup>

1. 国立大学法人北海道大学大学院理学院自然史科学専攻地震学火山学講座

1. Hokkaido University

御嶽山では2014年水蒸気噴火以降、火口列を有する地獄谷を中心に、火山浅部由来と考えられる数kmスケールの局所的な山体収縮が継続していることがPALSAR-2データのInSAR解析により明らかになっている（成田・村上, JpGU 2016）。この変動を捉えたPALSAR-2データは、2014年8月（噴火の1ヶ月前）から2016年11月までの2年以上に渡って蓄積している。非噴火時における火山浅部では、膨張性地殻変動や消磁など熱水系の活発化を示唆する多様な現象が発生することが報告されている（橋本・田中, 火山学会2016）。御嶽山においても、2014年噴火後から浅部で収縮が始まったことから、噴火前には流体蓄積が進行し、またそれに伴う膨張が進行していたと考えられる。こうした背景を受けて、本研究では、噴火後に得られたPALSAR-2データの詳細なInSAR解析により、現在進行している浅部収縮のメカニズムおよび噴火前の浅部熱水系の状態に対して何らかの制約を与えることを目的としている。

InSAR解析に用いたデータは、噴火の約1ヶ月前にあたる2014年8月18日から2016年11月11日までの約2年間のPALSAR-2データである。これらのInSAR解析により得られた干渉画像には、衛星の視線方向が東・西向きのペアが多数ある。観測方向によらず、噴火後同士のペアでは、収縮性地殻変動を示唆するような、衛星視線方向から遠ざかるセンスの位相変化が見られる。また、その空間パターンには2年間で大きな変化は見られないため、同一の収縮源が収縮を続けていると考えられる。変動速度に関しては、観測方向によってはやや減衰しているようにも見えるが、おおむね一定に見える。半無限弾性体中の球状圧力源を仮定したインバージョンにより、この収縮源の力源深さと2年間における積算の体積変化量を求めると、それぞれ400–700m、 $6-7 \times 10^5 \text{m}^3$ であった。さらに、有限要素法を用いて、地形を考慮し、かつ圧力源形状もクラック状～球状～楕円体状などの様々な形状を仮定してモデルフィッティングを行ったが、半無限インバージョンで得られた深さや体積変化量とは大きな解離は見られなかった。この際、変動の空間パターンを良く説明できるモデルは見つからなかったが、これはソース形状の複雑性や岩石物性の不均質など様々な要因によると考えられる。

噴火後に継続する火口からの噴気放水量は、噴火後2ヶ月間で100万トンのオーダーである（平成27年1月予知連資料）。一方、同期間における浅部収縮源の体積変化量から期待される放水量は1-10万トンのオーダーである。よって、噴火直後2ヶ月間に限っては、浅部収縮源から流体を放出するだけでは、観測値を全く説明できないため、この期間ではより深部からの供給がメインであったと考えられる。噴火2ヶ月後以降の放水量データはないため、これ以降の収縮・放水メカニズムを検討するためには、plume rise法などを用いて噴気放水量を見積もり、地殻変動量との定量的な比較をすることが必要である。

また、現時点では浅部収縮源に最低でも $10^5 \text{m}^3$ の後半の体積が必要であるため、これだけの流体が過去に蓄積する必要がある。2014年噴火後の収縮に伴う地殻変動は、御嶽山を挟む落合-田原GNSS基線により捉えられている。よって、過去のいずれかの期間にこの流体蓄積が進行したなら、このGNSS基線長に膨張性の変化として捉えられているはずである。流体蓄積の開始をトリガーした可能性のある直近のイベントとして、2007年ダイク貫入イベントを考えると、2007-2014年の7年間で前述したGNSS基線に3cmの伸張が観測されるはずだが、そのような変化は見られない。よって、2014年噴火後に検出された浅部収縮源には、2007年以前にすでに流体蓄積がほぼ完了していたと考えられる。

キーワード：御嶽山、水蒸気噴火、干渉SAR、地殻変動

Keywords: Ontake Volcano, Phreatic Eruption, InSAR, Ground Deformation

# JERS-1、ALOS及びALOS-2の干渉SARによってとらえられた屈斜路カルデラ内アトサヌプリ火山群の火山性地殻変動（1993-2016）

## Volcanic deformation of Atosanupuri volcanic complex in the Kussharo caldera, Japan, from 1993 to 2016 revealed by JERS-1, ALOS and ALOS-2 radar interferometry

\*藤原 智<sup>1</sup>、村上 亮<sup>2</sup>、西村 卓也<sup>3</sup>、飛田 幹男<sup>4</sup>、矢来 博司<sup>1</sup>、小林 知勝<sup>1</sup>

\*Satoshi Fujiwara<sup>1</sup>, Makoto Murakami<sup>2</sup>, Takuya Nishimura<sup>3</sup>, Mikio Tobita<sup>4</sup>, Hiroshi Yarai<sup>1</sup>, Tomokazu Kobayashi<sup>1</sup>

1. 国土地理院、2. 北海道大学、3. 京都大学、4. 宇宙航空研究開発機構

1. GSI of Japan, 2. Hokkaido Univ., 3. Kyoto Univ., 4. JAXA

### 1. はじめに

北海道東部の屈斜路カルデラ内には、アトサヌプリ火山群と呼ばれる1.5万年前以降に形成された溶岩ドーム群が存在し、アトサヌプリ（溶岩ドーム：別名 硫黄山）周辺では活発な噴気活動が続いている。

筆者らは、1994年に発生したアトサヌプリ直下の群発地震（最大M=3.2）と同期するように同地域において直径十数kmほどの範囲が最大約25cm隆起し、その後徐々に元に戻る現象が人工衛星（JERS-1）を利用した干渉合成開口レーダー（干渉SAR）によって見いだされたことを報告している。本報告では、その後JAXAによって打ち上げられたALOS及びALOS-2のデータを新たに解析するとともに、当初のJERS-1の解析データも含めて総合的に見直し、1993年から2016年に至る屈斜路カルデラ内アトサヌプリ火山群の火山性地殻変動の推移を明らかにする。

### 2. データと解析手法

下記の3種類のLバンドSARペアを用いてSAR干渉処理を行った。

- (1) 1993年5月～1998年7月に取得されたJERS-1（ふよう1号：NASDA [現JAXA] 打ち上げ）14組
- (2) 2007年9月～2010年11月に取得されたALOS（だいち）2組
- (3) 2014年8月～2016年8月に取得されたALOS-2（だいち2号）3組

これらの3種類の相互間では原理的に干渉せず、それぞれの期間内の相対的変動しか得られないため、継続的な総変位量は求めることはできない。

得られたSAR干渉画像からは、以前の報告にある直径十数kmほどの範囲が隆起したものが徐々に収縮していくもののほかに、小スケール（～1km）かつ小変位量（～1cm/年）ながらも一定スピードで継続的な変位も見つかった。ここで、小スケール・小変位量の継続的な変位を定量化するため、ハイパスフィルターをかけた上で、それらの平均を作成した。また、上記3種類のSAR観測は観測方向や入射角が異なるものの、SAR干渉画像上の空間変位のパターンが似通っているために、水平変位量が十分に小さいと仮定し、鉛直方向の変位量の変化を求め、さらに上記の小スケール・小変位量の変位の平均値を差し引いて全体の膨張-収縮の時間変化を求めた（Fig. 1：上図）。

### 3. 膨張と引き続き収縮

これまでの報告では、屈斜路湖東岸でアトサヌプリの西南西3km付近を中心とする同心円状の地域で1993年8月から1995年4月の間に最大25cm程度の隆起があり、その後沈降に転じ、1998年までに最大隆起量の半分ほどが元に戻っている。モデルシミュレーションでは、地下にシルを仮定した場合、最大隆起時に、深さ6kmで大きさ8km×2km、シルの開口1.4mが求められており、引き続き収縮も同じシルの収縮で説明できる。

興味深いのは、10年後の（2）のALOSにおいてもこの収縮が捉えられたことである。（1）の時期からの

変位量がわからないので推定に過ぎないが、(2)での収縮のスピードが(1)に引き続く収縮過程の延長とするよりは大きい。さらにその後の(3)では期間が短いものの明瞭な収縮は捉えられていない。これらのことから、(1)の後に一定の時定数で自然に収縮が緩和していったとは考えにくく、再度膨張があったか、もしくは収縮のスピードが波を打つような過程をもつ可能性が考えられる。実際、(1)の収縮期間の最後に小さな膨張が捉えられており、膨張-収縮が複数回あったことを示唆するものである。

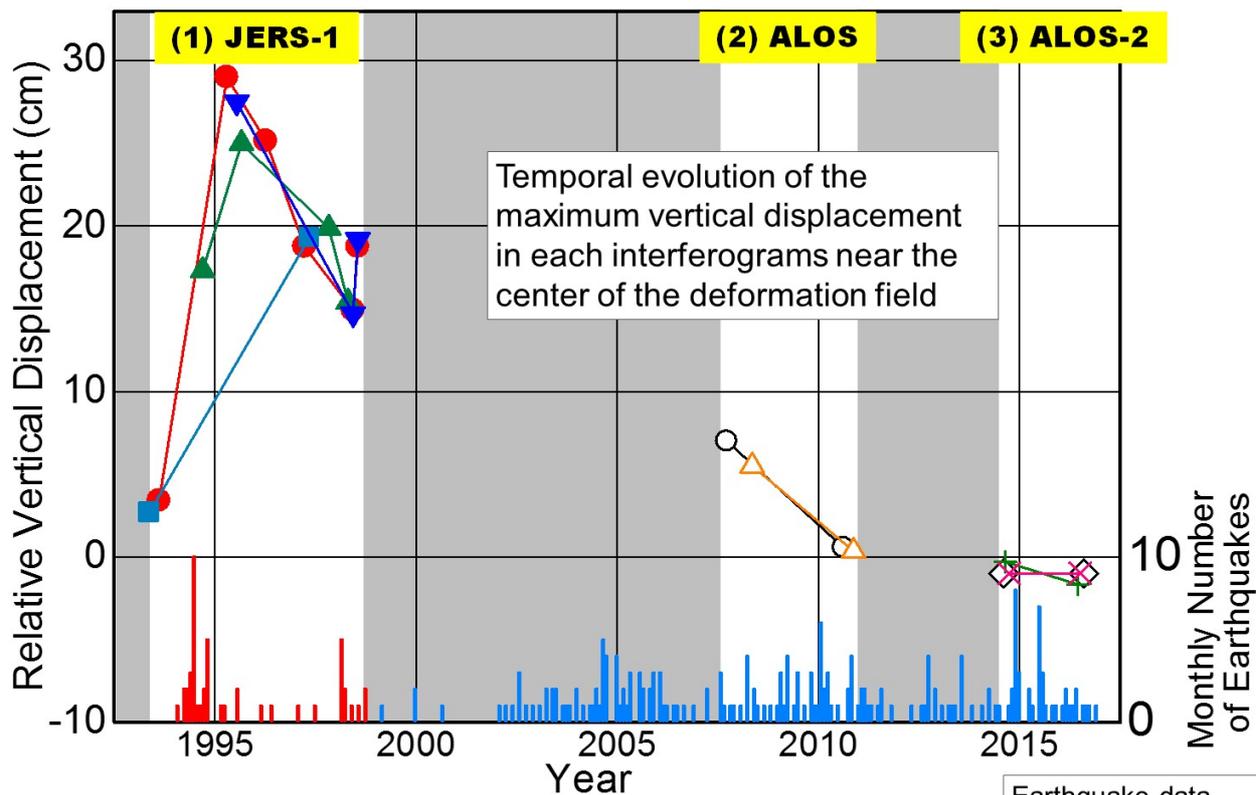
#### 4. 継続的な小スケールの変位

今回の新たな解析で求めた、小スケール・小変位量の変位の平均値を(1)、(2)及び(3)のそれぞれについてFig.2(下図)に示す。全体で20年もの期間があるが、小スケール・小変位量の変位について、(1)、(2)、(3)のいずれにおいてもほぼ同じ形状・変位スピードのものが存在する。特にアトサヌプリの南西側のリシリ(溶岩ドーム)の収縮とその北側の谷での膨張は極めて一定量で継続していることがわかり、それぞれ地下に力源があるとすると1 kmより浅いと推定される。

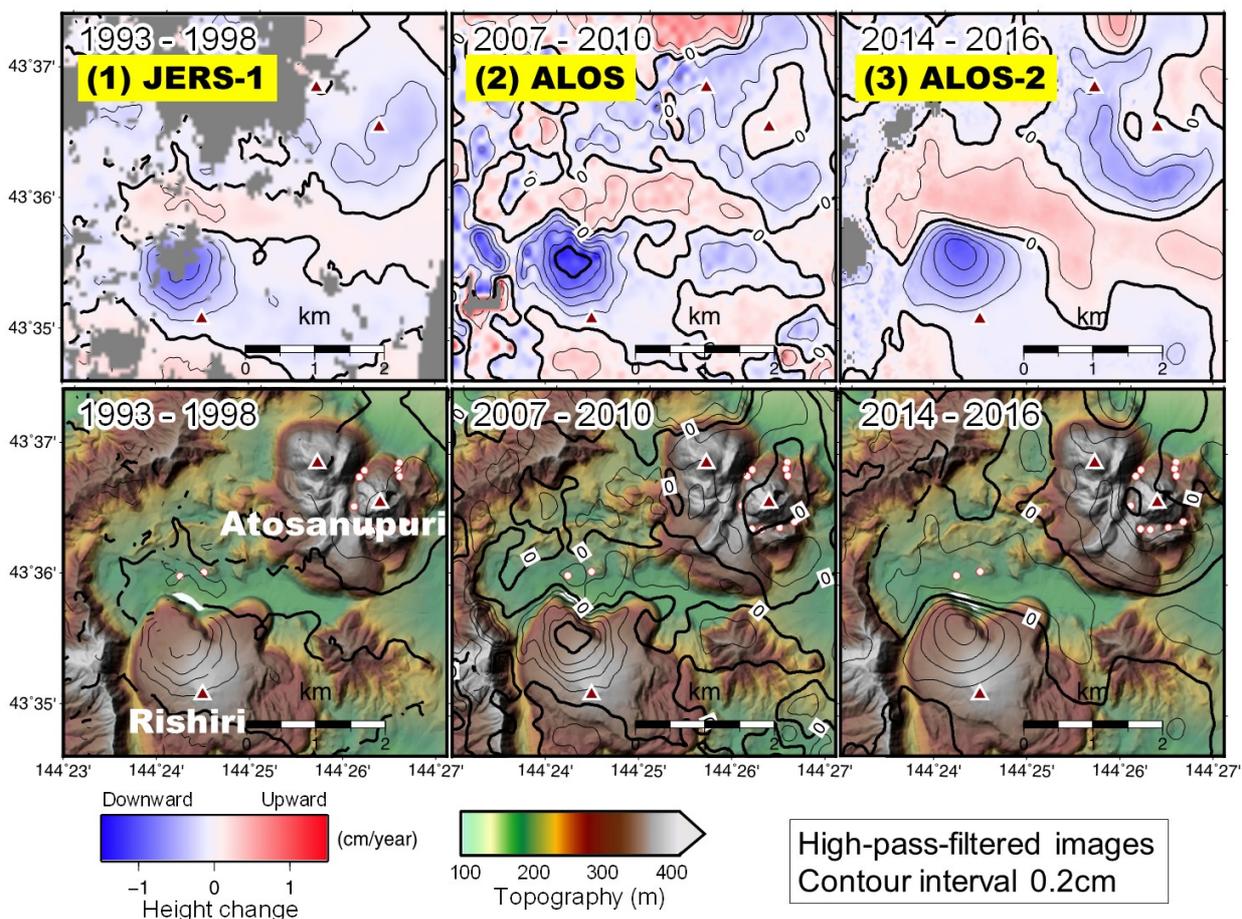
リシリは5,500年程前に形成されたとされているが、形成以降の活動は明確ではなく、現時点では噴気などの活動は認められていない。今回の解析により、収縮とはいえ、ごく浅いところに力源をもつと考えられる活動が継続していることが判明したことより、今後の活動を予測するためにも、アトサヌプリ火山群での継続した監視が必要である。

キーワード：屈斜路カルデラ、アトサヌプリ、火山性地殻変動、干渉SAR、JERS-1、ALOS、ALOS-2

Keywords: Kussharo caldera, Atosanupuri volcanic complex, Volcanic deformation, InSAR, JERS-1, ALOS, ALOS-2



**Fig. 1 Series of inflation and deflation**



**Fig. 2 Average images of small scale deformation**



# ALOS-2/PALSAR-2干渉解析によるCampi Flegrei火山（イタリア）の地殻変動

## Ground Deformation at Campi Flegrei caldera, Italy, revealed by InSAR analysis of ALOS-2/PALSAR-2

\*安藤 忍<sup>1</sup>

\*Shinobu Ando<sup>1</sup>

1. 気象研究所 地震津波研究部

1. Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research Institute

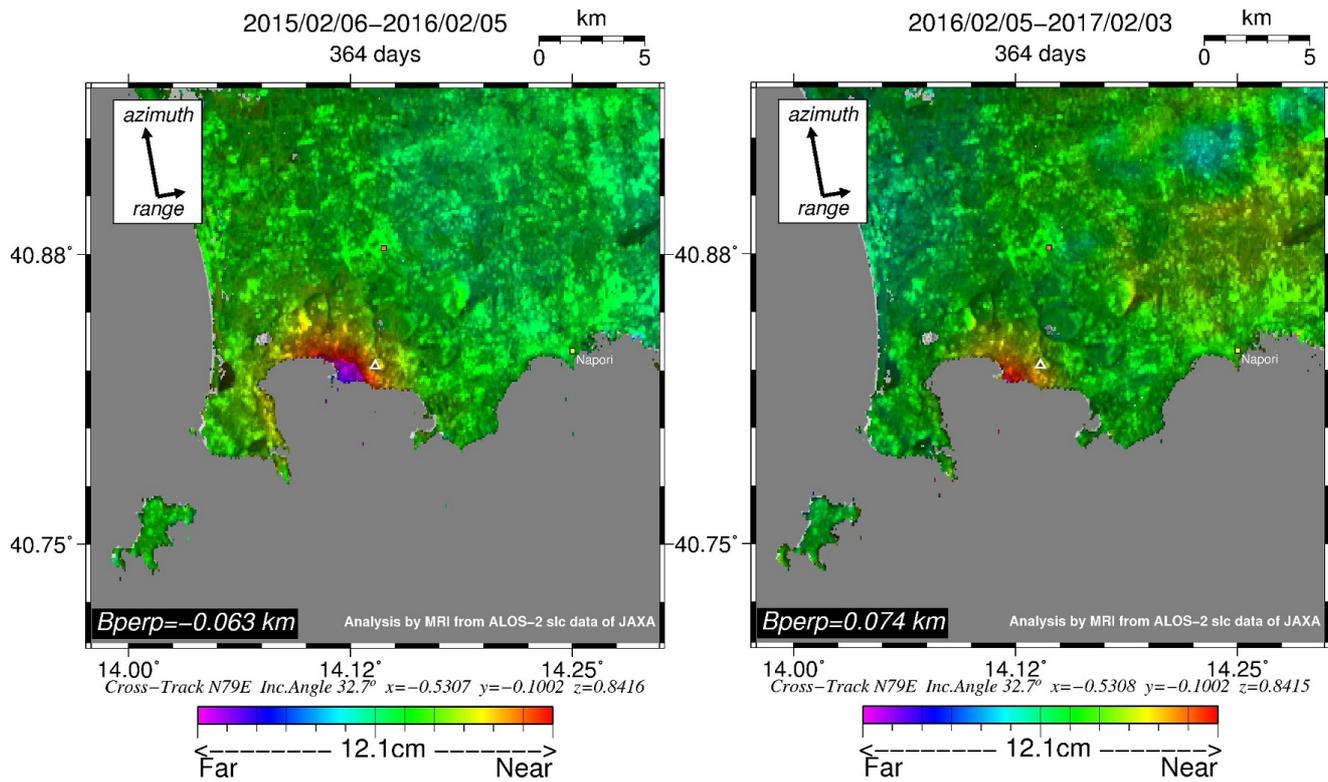
イタリアのCampi Flegreiカルデラ火山は、世界で最も高い火山リスクを有する地域のひとつである。直近の噴火は、モンテヌオーボ山を形成した1538年で8日間噴火活動が続いた（VEI=3）。それ以降、約500年にわたり噴火は発生していないが、GNSS解析やSAR衛星を用いた干渉解析により、たびたび膨張や収縮性の地殻変動が報告されている（例えば、Lundgren et al. (2001) やTroise et al. (2007)など）。最近でもポッツオリ湾周辺において膨張性の地殻変動を示す各種データがいくつか報告されており、依然、活発な火山活動が継続していることを示唆している（Martino et al. (2013) やD' Auria et al. (2015)など）。また、最近の報告では、地下のマグマが火山ガスを放出する臨界圧力に達している可能性があることを指摘している（Chiodini et al. (2016)）。

2014年5月24日に打ち上げられた陸域観測技術衛星「だいち2号（ALOS-2）」は、高分解能なLバンドSAR衛星であり、全球的に常時観測を行っている。我々は、2014年以降に撮像されたSARデータを使った干渉処理を行い、カンピフレグレイカルデラ火山の地殻変動を検出し、地下の圧力源推定を試みた。その結果、2015年から2016年の両軌道からの差分干渉解析により約10cm程度の地盤隆起が検出され、海拔下約3.8kmに約 $4.6 \times 10^6 \text{m}^3$ の球状圧力源を仮定することで、地盤変動が説明できることがわかった。さらに、2016年から2017年の差分干渉解析でも約6cm程度の衛星視線方向短縮の位相変化が検出され、地盤隆起が継続していることを示唆する結果が得られた。

本解析で用いたPALSAR-2データはPIXELで共有しているものであり、宇宙航空研究開発機構(JAXA)と東京大学地震研究所との共同研究契約によりJAXAから提供されたものである。PALSAR-2に関する原初データの所有権はJAXAにある。なお解析には、防災科学技術研究所の小澤拓氏により開発されたRINCを使用させていただいた。なお、干渉画像の処理過程においては、SRTM4.1を元にしたDEHMを使用し、地図の描画にはGMTを用いた。関係者各位におかれては、ここに記してお礼申し上げます。

キーワード：ALOS-2/PALSAR-2、干渉SAR、Campi Flegrei caldera、地殻変動

Keywords: ALOS-2/PALSAR-2, InSAR, Campi Flegrei caldera, Ground deformation



## だいち2号を利用した宇宙からの火山活動の監視 Monitoring volcanic activity from space by ALOS-2 (Daichi-2) / PALSAR-2 data

\*本田 昌樹<sup>1</sup>、三浦 優司<sup>1</sup>、攪上 泰亮<sup>1</sup>、上芝 晴香<sup>1</sup>、仲井 博之<sup>1</sup>、宮原 伐折羅<sup>1</sup>、森下 遊<sup>1</sup>、小林 知勝<sup>1</sup>、  
矢来 博司<sup>1</sup>、藤原 智<sup>1</sup>

\*Masaki HONDA<sup>1</sup>, Yuji Miura<sup>1</sup>, Yasuaki Kakiage<sup>1</sup>, Haruka Ueshiba<sup>1</sup>, Hiroyuki Nakai<sup>1</sup>, Basara Miyahara<sup>1</sup>, Yu Morishita<sup>1</sup>, Tomokazu Kobayashi<sup>1</sup>, Hiroshi Yurai<sup>1</sup>, Satoshi Fujiwara<sup>1</sup>

1. 国土交通省国土地理院

1. GSI of Japan

国土地理院では、だいち2号に搭載された合成開口レーダー（SAR）のデータを使用したSAR干渉解析により、日本全国を定期的かつ網羅的に地震・火山・地盤沈下・斜面の変動監視している。

だいち2号は、JAXAの基本観測シナリオに従って、日本の全域を定期的に昇降軌道でそれぞれ年3～4回の観測している。新しい観測データが取得されるたびに、国土地理院では、基本的に同じパス、同じ観測モードである前の観測データとの間でSAR干渉解析を行っている。解析では、気象庁の数値気象モデルを用いた対流圏の誤差を低減する処理と、GNSS連続観測システム（GEONET）の測位解を用いた長波長誤差低減を行うGNSS補正を施している。

SAR干渉解析で得られた画像（以下、「SAR干渉画像」という。）は、タイルデータの形式に変換され、国土地理院のウェブ地図である「地理院地図」で閲覧することができる。地理院地図では、地図・空中写真・火山土地条件図等の国土地理院が提供する地理空間情報にSAR干渉画像を重ね合わせることができる。これにより、SAR干渉画像を地形・地質等の他の情報と容易に比較でき、検出した変動についてより確実に解釈することができる。

火山の監視については、北方領土を含めた国内の陸域の97の火山を対象としており、その結果を政府の火山噴火予知連絡会の定例会議に報告している。また、噴火等の火山活動の著しい活発化があった場合は、地球観測衛星を用いた防災利用実証実験の火山WG（事務局気象庁）がだいち2号の緊急観測を要請する。この要請に基づき観測が行われると、国土地理院では臨時に解析を行い、得られたSAR干渉画像を火山噴火予知連絡会へ情報提供し、必要に応じて公表している。

本発表では、国土地理院が取り組んでいるだいち2号データを用いたSAR干渉解析による地表面の変動監視、特に火山の監視について報告する。

キーワード：干渉SAR、だいち2号、地表変動監視、火山活動

Keywords: InSAR, ALOS-2, monitoring ground surface deformation, volcanic activity

## MODVOLC - monitoring Earth's sub-aerially active volcanoes from space since 2000

\*Robert Wright<sup>1</sup>

1. University of Hawaii at Manoa

The MODVOLC system (<http://modis.higp.hawaii.edu>) uses the two MODIS sensors carried onboard NASA's Terra and Aqua satellites to monitor the Earth's volcanoes for evidence of thermal unrest. Primarily sensitive to the presence of active lava, the system has detected, monitored, and recorded the thermal emittance from eruptions at 107 volcanoes since the system became active in February 2000. This presentation will cover, 1. How the algorithm works and the re-designed webpage that allows anyone to access and interrogate the global 17 year archive; 2. Some interesting results that have been obtained from analysis of the data including evidence for periodicity in eruptions at some volcanoes, and general differences in magnitude and intensity of thermal emission from lava domes, flows, lakes and fountains.

Keywords: Remote sensing, volcanology, MODIS

## Integrated offshore investigations in the vicinity of Kikai Caldera, southwestern Japan —towards a comprehensive understanding of destructive caldera eruptions—

\*市原 寛<sup>1,2</sup>、橋本 順歩<sup>1</sup>、高橋 大和<sup>1</sup>、清水 賢<sup>1</sup>、佐野 守<sup>1</sup>、松野 哲男<sup>1</sup>、島 伸和<sup>1</sup>、山本 揚二郎<sup>2</sup>、井和丸 光<sup>1</sup>、中東 和夫<sup>1,3</sup>、若林 伸和<sup>1</sup>、小平 秀一<sup>2</sup>、巽 好幸<sup>1</sup>

\*Hiroshi Ichihara<sup>1,2</sup>, Jumbo Hashimoto<sup>1</sup>, Yamato Takahashi<sup>1</sup>, Satoshi Shimizu<sup>1</sup>, Mamoru Sano<sup>1</sup>, Tetsuo Matsuno<sup>1</sup>, Nobukazu Seama<sup>1</sup>, Yojiro Yamamoto<sup>2</sup>, Hikaru Iwamaru<sup>1</sup>, Kazuo Nakahigashi<sup>1,3</sup>, Nobukazu Wakabayashi<sup>1</sup>, Shuichi Kodaira<sup>2</sup>, Yoshiyuki Tatsumi<sup>1</sup>

1. 神戸大学、2. 海洋研究開発機構、3. 東京海洋大学

1. Kobe University, 2. Japan Agency for Marine-earth Science and Technology (JAMSTEC), 3. Tokyo University of Marine Science and Technology

Integrated offshore geophysical and geological investigations have been started to understand the mechanism of catastrophic caldera-forming eruption (CCFE) of the Kikai Caldera, SW Japan, which caused the latest CCFE on the Earth at 7.3ka. This caldera has been focused as it is a submarine caldera allowing to conduct dense seismic structural survey that is required for imaging and monitoring a large magma reservoir beneath this caldera. In the Oct. 2016, Kobe University and JAMSTEC conducted bathymetric survey with multi narrow beam echo sounder (MNB), geomagnetic survey with a proton magnetometer, multi-channel reflective seismic survey (MCS), and deployments of ocean bottom seismometer (OBS) and electro-magnetometer (OBEM) in “the 1st KOBEC exploration cruise” by the training vessel “Fukae-maru” belonging to Kobe University. The MNB survey revealed detailed bathymetry in the vicinity of the caldera. The bathymetric change from data obtained in the past bathymetric survey by Japan Coast Guard (2008) will be discussed in the presentation. In addition, acoustic pressure anomalies within the seawater rooting to the seafloor observed at the several areas in the margin and inside of the caldera. They are interpreted as hydrothermal anomalies relating to volcanic activities. The MCS surveys were conducted beneath 4 survey lines across the caldera. The reflection profiles show dense layered subsurfaces outside of the caldera while reflective planes are hard to be recognized inside of the caldera. Faults and disconformities are recognized in the several locations. Preliminary geological interpretation will be also discussed in the presentation. The OBSs and OBEMs will be retrieved in the 2nd exploration cruise in March 2017 by “Fukae-maru”. In the 2nd cruise, we also plan to conduct direct seafloor observation by a remotely operated vehicle (ROV) named “Shindai-2K”. In addition, we will deploy 4 OBEMs which equip absolute pressure gauge to detect vertical geodetic displacements and to image electrical resistivity structure which may reveal magma reservoir beneath the caldera (e.g. Hill et al., 2009).

# 蔵王火山の希ガス同位体比の変遷－最新期の火山とその周辺－

## K-Ar age connected with initial Ar isotopes and anomalous noble gas isotope ratio, observed in eruption

\*佐藤 佳子<sup>1,4,5</sup>、武部 義宜<sup>2</sup>、山崎 誠子<sup>3</sup>、熊谷 英憲<sup>4</sup>、岩田 尚能<sup>2</sup>、伴 雅雄<sup>2</sup>

\*Keiko Sato<sup>1,4,5</sup>, Yoshinori Takebe<sup>2</sup>, Seiko Yamasaki<sup>3</sup>, Hidenori Kumagai<sup>4</sup>, Naoyoshi Iwata<sup>2</sup>, Masao Ban<sup>2</sup>

1. 福島工業高等専門学校、2. 山形大学、3. 産業技術総合研究所、4. 海洋研究開発機構、5. 岡山理科大学  
1. Fukushima College, 2. Yamagata University, 3. AIST, 4. JAMSTEC, 5. Okayama University of Science

蔵王火山は東北地方中部に位置する成層火山で、約100万年前から活動を始め、現在まで活動を継続している。最新期は約3.5万年前から始まった。この時期の噴出物は火砕岩主体である。それらは熊野岳火砕岩類、駒草平火砕岩類、刈田岳火砕岩類、馬の背アグルチネート、五色岳火砕岩類に分けられている。最新期噴出物は、中間カリウム・カルク アルカリ系列の玄武岩質安山岩～安山岩であり、多くの場合、苦鉄質、珪長質 2端成分のマグマ混合によって形成されたと考えられている (e.g. Takebe et al., 2015など)。

K-Ar法及びAr/Ar法においては、スパイクを用いないK-Ar年代測定(感度法)と、全希ガス同位体比も同時に測定を行うことが可能である。熔岩が固結するときには、Ar同位体組成が大気と平衡に達することが前提となっているため、初生Ar同位体比は重要である。固結の際の非平衡動的過程などで、同位体分別が生じ、初生Ar同位体比が現代大気と異なる場合、スパイクを用いないK-Ar年代測定(感度法)では同位体分別の補正を行い、年代決定を行う。Kaneoka (1980)によれば、火成岩の組成や噴出形態により火成岩に含まれる希ガス組成が異なることが示唆されているが、実際に確かめられた例は少ないため、希ガスの同位体比や存在度を確かめる必要がある。

蔵王火山最新期噴出物については、武部ほか(2009)により、駒草平火砕岩、刈田岳火砕岩、馬の背アグルチネートについては各々約30~54ka(1試料については約100ka)、約13ka、約5kaの年代がK-Ar年代が報告されている。また、蔵王火山最新期噴出物の、歴史時代溶岩(五色岳火砕岩)と駒草平火砕岩、また温泉水について、希ガスの同位体比と元素存在度を測定した。噴出物試料は各層準から、発泡度が高いものと低いものを新たに加え、初生比を含め比較検討を行う。希ガス同位体測定は、海洋研究開発機構に設置されているGV Instruments製GVI-5400Heを用いて行った。試料の大気混入率を下げるため、通常K-Ar年代測定で使用する粒状(60-80メッシュ)試料を測定に用いた。He同位体比については、1983年のかみのやま温泉ガスをリファレンスとし(e.g. Hanyu and Kaneoka 1997, Kumagai 1999, Tamura et al, 2005)、火山岩のワーキングスタンダードとして、地質年代標準試料である蔵王火山産YZ-1(227ka; e.g. 高岡、1989; Nagao et al., 1991)に加え、南蔵王火山産MZ-94(326ka; 岩田ほか、2009)を用い、20万年より古い時代のAr、Kr、Xe同位体比のリファレンスとした。

測定の結果、Arよりも重い希ガスであるKr・Xeに関しては、同位体比は大気とほぼ同じであったが、存在度は低発泡度・高発泡度試料、YZおよびMZ94いずれでも、大気中の希ガス存在度の10~100倍濃集していることが明らかになった。Kr、Xe同位体比に関し、大気同位体組成に対して、有意な異常が認められた。また、He同位体比を用いて、温泉水などへのマグマからの寄与の判定を行った。そこでマグマ起源希ガスの寄与の有無も含め、最新期火山の活動状況を希ガス同位体比を用いて検討する。

キーワード：蔵王、火山、K-Ar年代、同位体比、ヘリウム

Keywords: Zao, volcano, K-Ar dating, isotope ratio, Helium

# 神鍋火山のアルカリ玄武岩マグマ含水量の推定

## Eastimate of alkalie basalt magma H<sub>2</sub>O content in Kannabe volcano

\*高橋 峻<sup>1</sup>、柵山 徹也<sup>1</sup>、木村 純一<sup>2</sup>

\*Ryo Takahashi<sup>1</sup>, Tetsuya Sakuyama<sup>1</sup>, Jun-Ichi Kimura<sup>2</sup>

1. 大阪市立大学理学部地球学科 地球物質学Ⅱ研究室、2. 海洋開発機構・地球内部物質循環研究分野

1. Earth Science, Science, Osaka City University, 2. Department of Solid Earth Geochemistry, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

### 1. はじめに

中国地方では、古第三紀から第四紀にかけて広範囲に火山活動があり、アルカリ玄武岩の活動が顕著な特徴がある (Kimura *et al.*, 2003)。同地域の火山岩に対する全岩主要・微量化学組成及び同位体組成分析は多数行われてきた一方で、詳細な岩石学的検討に基づいたマグマ分化過程の検討はあまり行われていない。そこで本研究では、第四紀に噴出した神鍋火山に対して詳細な薄片観察及び全岩・鉱物化学組成分析を行い、結晶分別過程を明らかにした。その結果見積もられたマグマ含水量はこれまでの見積もり (Zellmer *et al.*, 2014) より少なくなることが分かった。

### 2. 神鍋火山：日高溶岩，荒川溶岩，十戸溶岩，シワガ野溶岩

神鍋火山は兵庫県豊岡市日高町に噴出源を有する第四紀アルカリ玄武岩火山である。火山活動は、始良Tn火山灰層と鬼界火山灰層に挟まれていることから、2万5千年前～7300年前に噴出したとされる (古山ほか, 1993; 火山灰の年代の論文付ける)。神鍋溶岩は複数の噴出源が確認されており、噴出順に日高溶岩，荒川溶岩，十戸溶岩，シワガ野溶岩の4枚の溶岩流に分類される (古山, 1973)。全岩化学組成は、日高溶岩がSiO<sub>2</sub> = 48.8-49.1wt%，MgO = 6.8-7.1wt%，荒川溶岩がSiO<sub>2</sub> = 48.9-50.0wt%，MgO = 6.5-6.9wt%，十戸溶岩がSiO<sub>2</sub> = 49.3-50.1wt%，MgO = 6.5-6.6wt%，シワガ野溶岩がSiO<sub>2</sub> = 48.8-50.0wt%，MgO = 6.5-7.2wt%で日高溶岩，荒川溶岩，十戸溶岩の順にMgOが乏しくなる全岩化学トレンドを示す。4つの溶岩全体の全岩化学組成幅は比較的小さいが、最上位のシワガ野溶岩は組成幅が広く、下位3枚の溶岩の有する組成幅をカバーする。4つの溶岩が示す全岩化学組成のトレンドは、かんらん石，単斜輝石，斜長石，チタン磁鉄鉱の結晶分別で再現可能である。

4枚の溶岩は共通して斑晶量が少なく (<10vol%)，大部分の斑晶がかんらん石からなり、かんらん石と斜長石の集斑状組織も確認された。キンクバンドを有するかんらん石は確認できなかった。電子線マイクロアナライザー (EPMA) による分析及び反射電子像観察から、全ての斑晶が正累帯構造を示した。斑晶のかんらん石と斜長石のコアはそれぞれFo# [=100Mg/(Mg+Fe)<sub>mol</sub>] = 70~86とAn# [=100Ca/(Ca+Na)<sub>mol</sub>] = 60~78を示し、斑晶斜長石のコアはAn#頻度分布図でAn# = 78と66に2つのピークを有する。An# = 66の斑晶斜長石は清純で自形を呈する一方、An# = 78のものは半自形から他形を呈し、内部に汚濁部を有する。一方、集斑状組織のかんらん石と斜長石はそれぞれFo# = 76~78とAn# = 64~68を示した。これらからAn# = 78の斜長石は同一のマグマから晶出した斑晶ではないことが示唆される。

### 3. 考察：日高溶岩のマグマ含水量の推定

最もMgO含有量に富み、斜長石の斑晶量が少ない (<1vol%) 日高溶岩を対象として、全岩化学組成と斜長石-メルト含水量計 (Lange *et al.*, 2009) 及びかんらん石飽和メルトの地質温度計 (Sugawara, 2000; Medard and Grove, 2008) を組み合わせてマグマ含水量を推定した。マグマ含水量は圧力を0.5GPaと1.0GPaを仮定した場合、それぞれ1.3wt%，1.6wt%となりZellmer *et al.* (2014) による見積もり (10kbarにおいてH<sub>2</sub>O = 3.0wt%) に較べて少なくなった。これはZellmer *et al.* (2014) では、斑晶でないAn# = 82を示す斜長石を用いて含水量を求めていることに原因があると思われる。

キーワード：マグマ含水量、中国地方、アルカリ玄武岩

Keywords: magma water content, the Chugoku area, alkalie basalt



# 最新の山頂噴火産物（湯船第二スコリア）から見た富士火山のマグマ供給系

## Magma plumbing system of Fuji volcano inferred from product of latest summit eruption (Yufune-2 scoria)

\*鈴木 由希<sup>1</sup>

\*Yuki Suzuki<sup>1</sup>

1. 早稲田大学, 教育・総合科学学術院, 地球科学専修

1. Department of Earth Sciences, Faculty of Education and Integrated Arts of Sciences, Waseda University

富士火山では近代的な手法で噴火が観測されたことがない。そこで物質科学的に、マグマ溜りの深度や構造を明らかにする必要がある。この考えから、山頂火口から起きた最新の噴火（約2200年前）の事例研究を行った。この噴火は終始爆発的で、湯船第二スコリア（Yu-2）を生成した。Yu-2の分布は東に主軸があり（宮地, 1988）、山頂から東へ約10kmの地点でサンプルを採取した。スコリアのサイズや発泡の様子から、堆積物をa（層厚10cm）、b（90cm）、c（5cm）、d（15cm）、e（60cm）に分類した。スコリアのサイズは、aからbに向け増加し、その後減少する。噴火の途中で、風向や風速が変化しなかったとすると、サイズの変化は、噴火強度・噴煙高度が変化したことに対応すると考えられる。スコリアの全岩組成（50.5-51.2 wt. % SiO<sub>2</sub>）は、噴火ユニットにより系統的に変化しない。噴火の各時期のマグマの特徴が把握されるよう、各ユニットについて4-6個のスコリアの薄片を観察・分析した。

ユニットaのスコリアに玄武岩溶岩の捕獲岩が含まれる(Suzuki and Fujii, 2010 JVGR)ことを除くと、一見、スコリアは噴火時期によらず均質に見える。かんらん石と斜長石の斑晶(2mm以下)を有し、それらは自形で反応縁がない。斑晶コア組成は、噴火全体で、かんらん石がFo 73-80、斜長石がAn 65-92の範囲にあるが、範囲にはユニット毎に特徴がある。ユニットbとcでは、Fo76以下、An85以下が大半を占める。これに対し、ユニットdの半数のサンプルとユニットeでは、斜長石組成がAn85以上で占められるが、かんらん石の組成分布はサンプルにより多様で、Fo76以上に限られるものの他、Fo73-76が共存するものもある。一方、ユニットaやユニットdの残り半数のサンプルでは、Fo 73-80、An 65-92といったブロードな組成分布を有している。なお噴火全体として斑晶のリム組成は、コア組成の分布と相関を持つ。

個々の斑晶をみると、かんらん石はFo76以上の高Foタイプと、Fo73-76の低Foタイプに、明確に分かれるが、両者に極端なサイズの差はない。コアがAn85以上の斜長石（高Anタイプ）は全体が均質で、結晶サイズが500μm長以下と小さい。一方コアが主にAn85以下の部位からなるタイプ（低Anタイプ）は、コアの中の中心に近い部位にAn85以上の均質な部分が見られることがあり、An85以上の部位は前述の高Anタイプのサイズに似ている。主に高Foタイプと高Anタイプの斑晶からなるユニットdのスコリアと、低Foタイプと低Anタイプの斑晶からなるユニットbとcのスコリアを斑晶量で比較した。3vol.%と18~19vol.%の明瞭な差があり、斜長石斑晶量の差が大きい（2vol.%と16vol.%）。

以上から湯船-2の噴火直前には、1) マグマ全体の組成は同じだが結晶化の程度の異なる2端成分マグマが存在し、2) それぞれが単独、もしくは互いに混合し噴出した。斑晶に反応縁がないのは、2端成分マグマのメルト組成に大差がないためである。ユニットaでは混合物が、噴火のクライマックス(b-c)では結晶化の進んだ部位のみが、噴火終期(d-e)には結晶化の進んでいないマグマが（混合マグマを伴いつつ）噴出した。斑晶コア組成の分布にギャップが存在しないことと、低Anタイプの斜長石のコアの中心部に高Anタイプの斜長石と似た部位が確認できるので、結晶化の進んだマグマは、結晶化の進んでないマグマから形成されたと推定される。結晶化の進んだマグマの斜長石に結晶化の進んでいなかった時期の晶出部が確認されるのに対し、かんらん石で確認できないのは、斜長石でのCa-Al-NaSi拡散とかんらん石でのMg-Fe拡散の速度差によるものである。他の元素を含めた拡散プロファイルの検討により、結晶化の進んだマグマ生成後の時間スケールの検討も行う。マグマ供給系や噴火誘発過程を議論する上で、結晶化程度の違うマグマが、1) 同じ深度に存在したか、2) 異なる深度に存在したか（結晶化の進んだものが浅部）区別することは重要であり、メルト包有物の

含水量分析 (Yasuda, 2014) により検証する予定である。石基組成のメルトが、かんらん石、斜長石斑晶と平衡にあったことを制約条件とすると、噴火直前のマグマは、酸素分圧QFMの場合、1110-1120C、2.5kbar以下、含水量約1.5wt. %の条件にあったと大まかに見積もられる。

キーワード：富士火山、湯船第二スコリア、マグマ供給系、斑晶サイズ、斑晶量、マグマ混合

Keywords: Fuji volcano, Yufune-2 scoria, Magma plumbing system, Phenocryst size, Phenocryst abundance, Magma mixing