

## 2016年11月24日に発生した阿寒湖周辺の傾斜・体積ひずみ変動 Tilt and Volumetric Strain change observed around Lake Akan at November 24, 2016

\*奥山 哲<sup>1</sup>、高橋 浩晃<sup>2</sup>、宮城 洋介<sup>3</sup>、青山 裕<sup>2</sup>、大園 真子<sup>2</sup>、岡崎 紀俊<sup>4</sup>、秋田 藤夫<sup>4</sup>、宮本 聖史<sup>5</sup>、田利 信二郎<sup>5</sup>

\*Okuyama Satoshi<sup>1</sup>, Hiroaki Takahashi<sup>2</sup>, Yosuke Miyagi<sup>3</sup>, Hiroshi Aoyama<sup>2</sup>, Mako Ohzono<sup>2</sup>, Noritoshi Okazaki<sup>4</sup>, Fujio Akita<sup>4</sup>, Masashi Miyamoto<sup>5</sup>, Shinjiro Tari<sup>5</sup>

1. 気象研究所、2. 北海道大学、3. 防災科学技術研究所、4. 道総研地質研究所、5. 札幌管区気象台

1. Meteorological Research Institute, 2. Hokkaido Univ., 3. NIED, 4. GSH, HRO, 5. Sapporo Regional Headquarters, JMA

気象庁一元化震源によると、2016年11月に雄阿寒岳周辺を震源とする地震がやや増加した。2016年11月24日には低周波成分を含む地震が連続して発生し、その後釧路市阿寒町阿寒湖温泉で震度1を観測する地震が発生した。この低周波成分を含む地震の際、気象庁の設置する雌阿寒岳の傾斜計において傾斜変動が観測された。傾斜の変化量は飽別川上流で $4.5 \times 10^{-8}$ rad、阿寒富士北で $7.3 \times 10^{-8}$ radであり、センスは共に北東（阿寒湖・雄阿寒岳方向）下がりであった。

この傾斜変動と同期して、阿寒湖温泉の水位計（AK3：地質研・北大）、弟子屈町屈斜路のサックス型体積ひずみ計（KUT：北大）、Hi-net阿寒北の高感度加速度計（ANNH：防災科研）においても地殻変動によると考えられる変化が見られた。KUTの体積ひずみ変化は $6 \times 10^{-9}$ strの圧縮であり、ANNHの傾斜変化は、南東方向に $18.5 \times 10^{-8}$ radであった。Takahashi et al. (2012)は阿寒湖温泉の水位計が体積ひずみ計として働くことを報告しており、それに従ってAK3の水位変化を体積ひずみ変化に変換した所、 $3.4 \sim 4.5 \times 10^{-8}$ strの圧縮となった。

これらの観測値からポイントソースを仮定して減圧源を推定した所、雄阿寒岳南約3kmの深さ15km、体積変化 $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ で誤差最小となった。利用した観測点が主に北東-南西方向に分布しているため、北西-南東方向の減圧源水平位置の決定精度が悪い。また、深さが15kmと深く推定されるのはKUTで観測された体積ひずみが圧縮のセンスであることからの要請である。ポイントソースを仮定した減圧源では、水平距離が深さの約1.4倍を超えると圧縮場から伸長場にセンスが変わるため、深さ10kmの減圧源では約20km離れたKUTでの圧縮を説明できない。

キーワード：阿寒、傾斜変動、地殻変動

Keywords: Akan, tilt change, crustal deformation

## ASL法を利用した十勝岳地震活動モニタリングの検討

## An application of the ASL method to seismic activity at Tokachi-dake

\*仲辻 周次郎<sup>1</sup>、青山 裕<sup>1</sup>

\*Nakatsuji Shujiro<sup>1</sup>, Hiroshi Aoyama<sup>1</sup>

1. 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山観測センター

1. Institute of Seismology and Volcanology Hokkaido University

火山近傍における地震活動の時空間的な分布は、火山の活動度を判断する上で重要な指標の一つである。特に火山体の浅い領域では、P波やS波の立ち上がりが不明確な低周波地震 (LP地震) や連続的な微動も頻繁に発生する。これらは火山性の流体现象と密接な関係が疑われる重要な信号であるにもかかわらず、地震波の着信時情報を使った一般的な震源決定が難しいため、現在でもルーチン的な解析処理が実現できていない。

北海道十勝岳では、火山活動の高まりに伴いLP地震や微動が発生している。本研究では、これらの地震の詳細な震源位置を推定するために、Battaglia and Aki (2003) で提唱された震源推定方法(ASL法)を利用した地震活動モニタリングの検討を進めている。ASL法は地震波の距離減衰特性及び高周波地震動帯の放射散乱特性に基づき、観測点間の地震波振幅の比をデータとする震源推定方法である。そのため、着信時刻を精度よく読み取る必要がなく、LP地震や連続的な微動の震源決定に有効であるとされている。

ASL法による震源決定では等方放射の仮定を導入するため、一般的に5Hz以上の高周波帯の信号に注目するが、高周波成分は浅部の地盤増幅率の影響を強く受けることが知られている。そのため、まず本研究では十勝岳を対象としてコーダ規格化法 (例えば、Phillips and Aki, 1986) によって各観測点直下の地盤増幅率を推定した。解析には2013年から2016年までに北海道周辺で発生した10個の地震を使用し、北海道大学の観測点3カ所を含む十勝岳の8つの観測点を対象とした。解析周波数帯である5-10Hzでは、大正火口及び62-2火口に近づくほど増幅率が大きくなることが確認された。推定した増幅率を用い、2016年8月に十勝岳で発生した火山性地震についてASL法によって震源位置の推定を試みた。まず予備的な解析として、震源が山体のごく浅い部分にある仮定して、山体表面を仮想震源として2次元的な探索を行った。その結果、多くの地震について62-2火口周辺に震源位置が推定された。そして、この結果は気象庁により報告された火山性地震の震源位置の分布にほぼ一致していた。今後は、推定結果の誤差の空間分布について評価していくとともに、より詳細な震源位置を推定するために深さ方向を考慮した解析を行っていく。

キーワード：ASL法、十勝岳、火山性地震

Keywords: ASL method, Tokachi-dake, volcanic earthquake

## 伊豆大島の地殻変動とその周辺の地震活動の比較

### Comparison between crustal movement and seismicity in Izu Ohshima Island

\*高山 博之<sup>1</sup>、山本 哲也<sup>1</sup>、鬼澤 真也<sup>1</sup>

\*Hiroyuki Takayama<sup>1</sup>, Tetsuya Yamamoto<sup>1</sup>, Shin'ya Onizawa<sup>1</sup>

1. 気象庁気象研究所火山研究部第1研究室

1. Volcanological Division 1st laboratory, Meteorological Research Institute

伊豆大島では、GNSS観測による島をまたぐ基線長に、島の長期的な膨張に重畳して周期1年程度の膨張収縮が観測されている。一方、伊豆大島周辺では、微小地震が発生しており、時折群発活動も起きている。そこで、周期1年程度の地殻変動と、群発地震の発生がどんな関係にあるか調べてみた。

データは、気象庁による伊豆大島の震源カタログを用いた。期間は、2002年4月から2017年1月までで、決定している地震の数は9969個である。震源決定能力が一定でない可能性があるため、マグニチュード別の積算分布及び個数分布を描き、マグニチュード1.0以上の地震について解析を行うこととした。基線長については、島を横断する国土地理院の二つの観測点96054と96055の間のもを解析に用いた。基線長を、1か月単位で平均して比較に用いた。地震も、一か月単位で数を数えた。

1か月単位で地震の数を数えると、所々で数が多くなっており、群発が起きている。1か月に100個以上起きている期間を調べると、7か月あった。この月がどのような期間に起きているか調べた。調べ方は、次のような4つの期間に分けて、どの機関で群発が起きているか調べた。期間の分け方は、収縮の底から中間までの期間をA、中間から膨張のピークまでの期間をB、膨張のピークから中間までの期間をC、中間から収縮の底までの期間をDとした。群発地震が起きた月のうち4か月はBの期間で3か月はCの期間となった。つまり、膨張期に群発地震が起きることがわかった。

キーワード：伊豆大島火山、地殻変動、地震活動

Keywords: Izu Ohshima volcano, crustal movement, seismic activity

## 伊豆大島の多成分ひずみ計による観測の中長期的特性 — GNSSから推定されるひずみとの比較 —

### Characteristics of multi-component strainmeter in Izu-Oshima for medium to long term variation -- strain data comparison with GNSS observation --

\*山本 哲也<sup>1</sup>、高山 博之<sup>1</sup>、鬼澤 真也<sup>1</sup>、高木 朗充<sup>1</sup>

\*Tetsuya Yamamoto<sup>1</sup>, Hiroyuki Takayama<sup>1</sup>, Shin'ya Onizawa<sup>1</sup>, Akimichi Takagi<sup>1</sup>

1. 気象庁気象研究所

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

伊豆大島火山の地殻変動の観測研究のために、伊豆大島南西部千波崎（SNB）においてボアホール型多成分ひずみ計による観測を2013年から実施している。ひずみセンサーの設置深度はおよそ地表から75m、海面下25mであり、水平面内で互いに45度ずつ異なる4方位（N34.2E, N10.8W, N55.8W, N100.8W）の線ひずみを観測している。これまでに、このひずみ計について、潮汐に対する応答、気圧に対する応答、波浪や地震に対応したシグナルなど、比較的短周期のひずみ変化に関する特性の調査を行ってきたが、観測データの蓄積に伴い1年程度の中期的特性、数年にわたる長期的な特性についても検討が可能となってきたことから、ここではGNSS観測や球状圧力源モデルから推定された中長期的ひずみ変化との比較調査を行った。ボアホール型ひずみ計の観測では、センサーのケーシング、ボアホールのセメント、周辺の地盤がどのようにカップリングしているかを直接的に知ることは出来ないため、設置した状況において地殻ひずみにどのように応答するかを知っておくことが重要である。GNSSや球状圧力源モデルによるひずみ推定値との比較はその有力な手段となる。

SNBの多成分ひずみ計は、水平4方位の線ひずみをCH0~CH3として測定しており、1秒値を連続観測データとして収録している。比較調査では、この1秒値から1時間値を作成して用いた。観測値に時折みられる異常な急変化（ステップ）は、他の3方位の成分との比較によって補正し、また潮汐、気圧の影響も補正した。この観測値との比較には、2種類のひずみ推定値を用いた。ひとつはGNSSによる推定値である。すなわち、SNBの近隣約4km以内にあるGNSS観測点3点の1日ごとの相対変位を用いて、この領域の平均的なひずみとして、水平方向の独立な3成分 $e_{xx}$ ,  $e_{yy}$ ,  $e_{xy}$ を推定した。また、その値を座標変換して多成分ひずみ計のCH0~CH3の方位に対応する線ひずみを求めた。もうひとつは、球状圧力源モデルによる推定値である。伊豆大島における中長期的な地殻変動は、近似的に球状圧力源モデルで説明できることが知られている。球状圧力源の位置、深さ、体積変化量が与えられれば、理論値として任意の点のひずみを求めることができる。全島のGNSS観測から球状圧力源の位置や体積変化量の時系列が推定されており（気象研究所、2017）、それらに基いてSNBにおけるひずみ推定値を求めた。2つの推定値を相互に比べると、2012年から2016年にかけて、CH1およびCH2については長期的トレンドの大きさや周期1年程度の変化がよく類似していることがわかった。これらについては、良好な推定値が得られていると考えられる。

このCH1とCH2について、多成分ひずみ計の観測値と推定値の比較調査を行った。CH2の観測値には、2つのひずみ推定値と同様に、長期的な伸びと周期1年~1年半程度の伸び縮みを見ることができ、ひずみが極大、極小となる時期も観測値と推定値で概ね一致していた。2014年から2015年にかけての変化は、多成分ひずみ計で約 $6\mu\text{strain}$ 、GNSSで約 $4\mu\text{strain}$ 、球状圧力源モデルで約 $8\mu\text{strain}$ の大きさとなっており、相互に対比しうる地殻変動データであること判断された。一方、CH1については、長期的トレンドはともかく、周期1年~1年半程度の伸び縮みに明瞭な対応はみられなかった。このような近隣のGNSS観測および球状圧力源モデルからのひずみ推定値との比較調査から、SNBの4成分のうちCH2については、中長期的な地殻変動の把握にも活用が可能であるとの見込みが得られた。

キーワード：伊豆大島火山、ひずみ計、GNSS

Keywords: Izu-Oshima Volcano, strainmeter, GNSS

# マグマ溜り内の気泡上昇による地殻変動－伊豆大島の周期的地殻変動への適用－

## Volcanic deformation caused by gas bubbles rising in the magma chamber: Application to periodic deformation at Izu-Oshima volcano

\*川口 亮平<sup>1</sup>

\*Ryohei Kawaguchi<sup>1</sup>

1. 気象研究所

1. Meteorological Research Institute

火山活動に伴う山体の隆起・沈降といった地殻変動を多点・高時間分解能で捉えることが近年できるようになってきており、これらのデータから地下のマグマの挙動を明らかにする研究が行われてきた。マグマの活動に伴う地殻変動現象ではマグマに含まれる揮発性成分の挙動が重要な役割を果たしている。マグマの内部で水や二酸化炭素などの揮発性成分の発泡による気泡が上昇すると、気泡周囲のマグマ圧力が低下することで気泡は膨張する。気泡体積の膨張によってマグマ溜りの増圧・膨張が起こると考えられる。本研究では、マグマ溜り内の増圧の要因として気泡上昇とそれに伴う体積膨張を考え、気泡の上昇に伴う地表の地殻変動の時間変化を求めた。さらに、その結果を伊豆大島で観測されている周期的な膨張・収縮の地殻変動と比較して考察する。

マグマ溜り内の気泡の上昇過程とそれに伴うマグマ溜りの増圧、体積膨張を次のようにモデル化する。マグマ内を気泡が浮力によって上昇すると、気泡の周囲のマグマの圧力は小さくなるため気泡は膨張する。気泡の膨張により、マグマ溜り内の気泡とメルトの総体積は増加する。マグマ溜り全体の膨張量と圧力増加量は液体メルトの圧縮率と周囲の地殻弾性体の剛性率との比によって決まる。これらの関係式をまとめると、気泡上昇に伴うマグマ溜りの体積増加量は気泡の上昇量とマグマ溜り内の気泡の初期半径や数密度によって決まることが分かった。地殻変動量の時間変化と比較するため、マグマ溜り内部に気泡が一様に分布した状態を初期条件とし、マグマ内の気泡はストークス即に従って気泡半径の二乗に比例した速度で上昇して、気泡の上昇に伴うマグマ溜りの体積増加量の時間変化を求めた。その結果、気泡の上昇開始直後は気泡の上昇に伴い、マグマ溜りの体積はほぼ一定の増加率で増えるものの、時間の経過とともに増加率は小さくなることがわかった。

伊豆大島において、GNSSなどで観測されている周期が一年程度の島の膨張・収縮を示す地殻変動と比較を行った。この周期的な地殻変動の圧力源は海拔下4-5 km付近の深さにあり、膨張・収縮のサイクルにおける圧力源の体積変化量は約 $10^6 \text{ m}^3$ の大きさであると推定されている（気象研究所技術報告, 2013）。気泡の初期半径を $4 \times 10^{-4} \text{ m}$ 、数密度を $10^8 \text{ m}^{-3}$ とした場合、約1年の地殻変動の時間スケールと $10^6 \text{ m}^3$ の体積変化量を説明できることが分かった。

キーワード：地殻変動、伊豆大島、気泡

Keywords: volcanic deformation, Izu-Oshima, gas bubble

## 三宅島の間欠的微動、2015年4月-2016年3月

### Intermittent volcanic tremor activity at Miyakejima volcano during April 2015 –March 2016

\*萩原 弘子<sup>1</sup>、渡辺 秀文<sup>1</sup>

\*Hiroko Hagiwara<sup>1</sup>, Hidefumi Watanabe<sup>1</sup>

1. 東京都庁

1. Tokyo Metropolitan Government

三宅島で2015年4月頃から間欠的で周期的な連続微動が発生しはじめ、11月に最も規則的かつ盛んになり、12月の末には急速に減少した。最終的には2016年3月9日を最後に終息した。三宅島では、静穏期でも時々連続微動が発生することはあったが、ランダムに起きることが多く、このような規則的かつ周期的な微動はめずらしい。ここでは都庁で収集している伊豆諸島火山観測システムのデータを用い、この微動の時系列解析や、震源決定、スペクトル解析を行い、微動の特徴を捉えた。最も活発な時の微動の継続時間は約5分、発生間隔は約15～17分であった。微動の発生源は火口の南縁で約1.5kmの深さにあり、ここでは低周波地震や、やや低周波地震も発生している。この発表では、これらの微動の特徴を火山ガス、雨量、潮位などの他のデータと比較し、間欠泉との類似を考慮して、間欠的微動のメカニズムを説明するような概念的なモデルを提案する。

キーワード：間欠的微動、三宅島、間欠泉

Keywords: intermittent volcanic tremor , Miyakejima, geyser

# 三宅島の最近の活動評価と2016年5月ガス噴出イベント

## Evaluation of Recent Activity at Miyakejima and Increase of Volcanic Gas Discharge in May 2016

\*長門 信也<sup>1</sup>、宇平 幸一<sup>1</sup>、加藤 幸司<sup>1</sup>、関口 悠子<sup>1</sup>

\*Shinya Nagato<sup>1</sup>, Kouichi Uhira<sup>1</sup>, Kouji Kato<sup>1</sup>, Yuuko Sekiguchi<sup>1</sup>

1. 気象庁

1. Japan Meteorological Agency

三宅島では2000年噴火以降、活動は徐々に低下し、2013年1月22日を最後に噴火は発生していない。また一時期は1万トンを超えていた火山ガス（二酸化硫黄）の放出量は年々減少し、最近では検出限界近くの値となっている。火口内においては、主火孔付近の熱活動は近年低下の傾向を示しており熱異常域は2016年9月以降より狭まる傾向が観測されている。

一方で火山性地震や地殻変動について、火山性地震は山頂浅部において少ないながら定常的に発生し、火山性微動も時々発生している。またGNSS観測によると比較的長い基線では2006年頃から伸びの傾向がみられており、これは深部へのマグマ蓄積が継続していることによるものと考えられる。短い基線においても2000年以降からの縮みの変動が2013年頃からの停滞を経て、2016年初め頃には基線が伸びる傾向に転じている。

そのような活動のなか、2016年2月と5月に地殻変動を伴う火山性微動が発生し、微動発生後には二酸化硫黄放出量の一時的な増加が観測された。特に5月のイベントは2月のイベントに比べて顕著であり、火山性微動発生とともに傾斜計では南東から南方向が沈降する変動が観測され、直近の観測では1日あたり100トン程度だった火山ガスの放出量が、微動発生後には一時的に1,200トンまで増加した。火山性微動と傾斜変動は時系列で2つに分けて考えることが可能で、傾斜変動について茂木モデルを仮定して圧力源を推定したところ、はじめはやや深い位置の収縮源が支配的で、その後は火口直下の膨張源が増大する2つの圧力源の変化により説明できた。また火山性微動の振幅は火口直下の膨張源が増大した時間帯で前の時間帯に比べて大きくなっていた。振幅比を用いて推定した微動源（Ogiso, 2015）の位置は、傾斜変動より求めた浅部の膨張源の位置と調和的であった。体積変化量の時間経過と火山性微動後の火山ガス放出量の増加から、2016年5月に見られた一連の変動はマグマから分離した火山ガスの移動によって生じたやや深い場所での体積変化が火口直下浅部に伝播したのと考えられる。

キーワード：三宅島、地殻変動、火山ガス

Keywords: Miyakejima, volcano deformation, volcanic gas

## 2013年～2015年活動の西之島火山周辺の海底地形変化

### Topographic change of the sea floor after the 2013-2015 eruption of Nishinoshima

\*小野 智三<sup>1</sup>、野上 健治<sup>2</sup>、佐藤 泉<sup>1</sup>、森下 泰成<sup>1</sup>、福山 一郎<sup>1</sup>、吉岡 眞一<sup>1</sup>、中村 圭佑<sup>1</sup>、山野 寛之<sup>1</sup>

\*tomozo Ono<sup>1</sup>, Kenji Nogami<sup>2</sup>, Izumi Sato<sup>1</sup>, Taisei Morishita<sup>1</sup>, Ichiro Fukuyama<sup>1</sup>, Shinichi Yosioka<sup>1</sup>, Keisuke Nakamura<sup>1</sup>, Hiroyuki Yamano<sup>1</sup>

1. 海上保安庁海洋情報部、2. 東京工業大学

1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Tokyo Institute of Technology

小笠原諸島の西之島は伊豆-小笠原弧の火山フロントに位置する玄武岩から安山岩からなる火山である。1973年に有史以来初めての噴火によって西之島新島を形成した。40年後の2013年11月20日には、西之島南東の海上で噴火活動を再開し、その後激しいマグマ水蒸気爆発からストロンボリ式噴火（マグマ噴火）に移行して、2015年11月17日のブルカノ式噴火を最後に噴火活動は約2年で終息した。今回の活動は溶岩流出による島の面積拡大が特徴的で、2013年12月26日には西之島と接続し、2014年8月～12月にかけて西之島を埋没させ、2015年8月まで面積の拡大が継続した。その結果、西之島全体の面積は活動前の約0.22km<sup>2</sup>から約2.68km<sup>2</sup>となった。

海上保安庁では、噴火開始が確認されて以来、東京工業大学と協力して航空機を用いた監視観測を定期的実施したほか、海面下の水深変化等を把握する目的で測量船を用いたマルチビーム音響測深機による水深測量を3度実施した。まず噴火活動が活発であった2015年6～7月には、噴火警報に基づく警戒区域（火口から半径4,000m以内）の外側を測量船「昭洋」（3000トン）により、また、警戒区域内の海岸線から距離約200m～約1,200mの範囲を無人調査航行が可能な特殊搭載艇「マンボウII」を用いて水深測量を実施した。

また、噴火活動の静穏化により2016年2月に警戒区域が火口から約1,500mに縮小されたことを受け、それまで制限されて水深測量ができなかった範囲を2016年5月に測量船「昭洋」により水深測量を行った。

さらに、2016年8月に警戒範囲が火口から約500mに縮小され海上警報が解除になったことから、2016年10月～11月に上陸調査を含む測量を実施した。この期間には測量船搭載艇による島近傍の測深に合わせ、航空機による航空レーザー測深機を用いた海岸～浅海区域の水深測量をも実施した。

これらの水深測量の結果、西之島の海岸から周辺海底までの地形データをシームレスに取得することができた。海上保安庁による噴火前の水深調査時（1992年）に確認された旧火口跡、旧火口縁とみられる海底地形は全て今回の噴火の溶岩流により埋積されていることが確認された。西之島の極近傍の海底には、海岸から連続して約100m～250mの幅の斜面が形成されており、島の北部～西部に発達する水深20～50mのほぼ平坦な島棚地形に比較的明瞭な境界をもって接続している。平坦面の存在しない東部～南部においては、そのまま山体の急斜面に漸移し深海へ続いている。この海岸近傍の斜面は概ね平滑な表面を呈していることから、海に突入した熔岩流の水冷破砕物及び熔岩の波蝕による碎屑物が堆積したものと推定される。噴火前後の地形データの変化からは、今回の噴火による熔岩に由来する噴出物の分布は東部～南部を除いて島の極近傍に限られることが判った。

キーワード：西之島火山、水深測量、噴火

Keywords: Nishinoshima volcano, Bathymetric survey, eruption

## 西之島火山の活動に伴う周辺海域の海水組成変化

### Temporal change of sea water composition around Nishinoshima Island accompanying the volcanic activity of Nishinoshima

\*佐藤 泉<sup>1</sup>、小野 智三<sup>1</sup>、森下 泰成<sup>1</sup>、濱崎 翔五<sup>1</sup>、高橋 日登美<sup>1</sup>、野上 健治<sup>2</sup>

\*Izumi Sato<sup>1</sup>, Tomozo Ono<sup>1</sup>, Taisei Morishita<sup>1</sup>, Shogo Hamasaki<sup>1</sup>, Hitomi Takahashi<sup>1</sup>, Kenji Nogami<sup>2</sup>

1. 海上保安庁海洋情報部、2. 東京工業大学火山流体研究センター

1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

小笠原諸島の西之島は、2013年11月に有史2度目のマグマ噴火を開始し、溶岩の流出を伴う活発な噴火活動が約2年間継続した。2015年11月を最後に噴火は確認されておらず、現在は静穏な状態が継続している。

海上保安庁では、2015年6月24日から7月7日までの期間に測量船「昭洋」と無人測量艇「マンボウII」により、2016年5月4日から6日までの期間に測量船「昭洋」により西之島周辺海域の調査を行った。2015年調査では無人測量艇「マンボウII」により、西之島の火口から方位角約30度毎、海岸線から200~875mの距離にある計21点で採水を行った。2016年5月の調査では測量船「昭洋」により採水バケツを用いて、西之島の火口から半径0.9海里、方位角45度毎の8地点で表層海水を採取した。また、参照点として、西之島から離れた各1点で海水を採取した。採水後直ちに船上でpH及び溶存炭酸ガスの計測を行い、調査後、東京工業大学火山流体研究センター草津白根火山観測所でF、Cl、SO<sub>4</sub>の分析を行った。F濃度はTsuchiya et al.(1985)によるトリメチルシリル化蒸留法でフッ素を単離した後、イオン選択性電極を用いて定量し、Cl、SO<sub>4</sub>濃度は希釈後、イオンクロマトグラフを用いて定量した。

2015年調査時は、ストロンボリ式噴火、溶岩流の流出といった噴火活動がみられ、西之島の火山活動が活発な時期であった。一方、2016年調査時は、山頂火口付近に噴気が認められるのみで、噴火活動は縮退傾向にあった。

2015年、2016年ともに、採取試料のpHや成分について、方位による著しい偏りはみられなかった。2015年調査時、南東、東側海岸に於いて溶岩が海に流れ込んでいたが、島全体から放出される熱水が大量に存在し、海水組成を変化させていたことが示唆される。また、火山性熱水と海水の反応により生じる変色水の分布を見ると、海岸線付近が濃く、海岸線から離れるにしたがって薄くなるため、海岸線付近で熱水が湧出して変色水が生成され風や潮流により広がることが示唆される。だが、西之島周辺海域で採取された海水組成について海岸線からの距離による変化は見られず、海岸線から200m以上離れた領域では熱水と海水の混合による濃度変化は現れないことがわかった。

2015年試料のpHは概ね8前後で、参照点の海水より酸性にシフトしていたが、2016年試料では全測点でpHは参照点の海水と同程度であった。pHの測定結果から、2015年には西之島周辺の広範囲に酸性の熱水の影響があったが、2016年は2015年に比べて熱水の影響が小さくなったことが示唆される。海上保安庁が継続的に行った航空機による目視観測では、2015年は黄緑色の変色水が分布していたのに対して2016年は青白色の変色水が分布していた。この色の変化からも西之島周辺海域における熱水活動は低下傾向にあるものと考えられる。

2015年試料のF濃度は参照点の海水と同程度であったが、2016年は参照点の海水よりも僅かに高かった。Cl濃度は、2015年には参照点と比べて低かったが、2016年は参照点とほぼ等しかった。一方、SO<sub>4</sub>

濃度は、2015年は参照点よりも高かったが、2016年は参照点とほぼ等しかった。2015年試料は、参照点の海水と比べてF/Clモル比が高いのに対して、Cl/SO<sub>4</sub>モル比は明らかに低い。これに対して、2016年試料のF/Clモル比は参照点の海水の値よりも高いが、Cl/SO<sub>4</sub>モル比はほぼ等しくなっている。この結果から、2015年に西之島から放出されていた熱水は、海水と比べてClに対してFとSO<sub>4</sub>に非常に富んでいたと考えられ、高温の火山ガスの影響を強く受けていたものが大量に放出されていた事がうかがわれる。2016年になると放出される熱水は高温の火山ガスの影響を強くうけておらず、その放出量は著しく減少したものと推察される。

キーワード：海域火山、西之島、変色水

Keywords: Volcanic islands and submarine volcanoes, Nishinoshima volcano, Discolored water

# 相互相関解析に基づく2015年箱根水蒸気噴火に伴う空振の検出

## Cross-correlation analysis of infrasound and seismic signal during the phreatic eruption at Hakone in 2015

\*行竹 洋平<sup>1</sup>、市原 美恵<sup>2</sup>、本多 亮<sup>1</sup>

\*Yohei Yukutake<sup>1</sup>, Mie Ichihara<sup>2</sup>, Ryou Honda<sup>1</sup>

1. 神奈川県温泉地学研究所、2. 東京大学地震研究所

1. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

### はじめに

箱根火山では2015年4月末よりカルデラ内で地震活動が活発化し、同年6月29日から7月1日にかけて大涌谷で小規模な水蒸気噴火が観測された(萬年ほか・2015、火山学会)。大涌谷周辺に設置されたボアホール型傾斜計及び広帯域地震計により、6月29日7時33分ごろから約2分間、最大 $10\mu\text{rad}$ の短期的な傾斜変動(以下、傾斜イベント)が観測された(図1d)。この傾斜イベントは大涌谷直下の標高600m付近に上端をもつ北西-南東走向のクラックの開口により説明でき、この際約 $10\text{万m}^3$ の熱水が貫入したと考えられている(本多ほか・2015、火山学会)。

水蒸気噴火の開始時刻については萬年ほか(2015)により6月29日11時頃に火口近傍における熱泥流の発生及び12時頃に降灰が報告されているが、当日の大涌谷周辺の視界が不良であったため、正確な時系列は明らかになっていない。本研究では、空振波形記録から一連の噴火活動の詳細な時系列を明らかにすることを目的とし、噴火口から約500m離れた大涌谷観測点における地震計とそこに臨時に設置された空振計の波形記録との相互相関処理を行った。

### 手法

本研究ではIchihara et al. (2012, GRL)の手法に従い、地震と空振波形との相互相関処理を行った。空振波が地表面へ入射する際に励起される地震動は、理論的には空振波の位相に対して $1/4$ 波長遅れるため、地震・空振波形の相互相関処理により空振波が遅れ時間0秒を節とし正の時間遅れの領域にプラスの相関ピーク、負の時間遅れの領域にマイナスの相関ピークを示すパターン(以下、相関パターン)として検出される。この手法により、風ノイズの影響を低減させ、効果的に空振波を検出することが可能になる。本研究では、大涌谷観測点の空振計および地震計上下成分の波形記録に3-12Hzのバンドパスフィルターを施し、ウィンドウ幅5秒間における両波形の相互相関関数を逐次計算し、その時間推移を調べた。空振計が設置された2015年5月22日から2016年7月3日までの期間を解析対象とした。

### 結果

傾斜イベントが発生したほぼ同時期の6月29日7時32分から10時30分頃までの約3時間、上記の特徴をもつ相関パターンが主に3-12Hzの周波数帯域で断続的に表れることが確認できた。この結果は、6月29日7時32分の時点で火山ガスや火山性流体等の噴出現象が起こり、それにより励起された空振波によって大涌谷観測点近傍の地面が振動させられていたことを意味する。より詳細には、7時32分30秒頃に最初に地震による地動速度の振幅増加が始まり(図1ac)、その約20秒後の7時32分50秒頃に収縮のセンスを示す傾斜変動が大涌谷から離れた観測点で観測され(図1d上段)、同時に相関パターンが出現し(図1e)、その約30秒後に膨張のセンスを示す傾斜変動(図1d)が観測された。また、道家ほか(2015、火山学会)では地上設置型SARにより傾斜イベントが発生したのとほぼ同時期から、噴火口近傍の半径約100mの範囲で局所的な隆起が始まったことを明らかにした。これらの結果から、最初に地震が活発化し、その後空振とともに噴出現象及び火山深部での収縮が生じ、更にその後より浅部でのクラックの開口及び噴火口ごく浅部の熱水溜りの膨張に至ったことが示唆される。

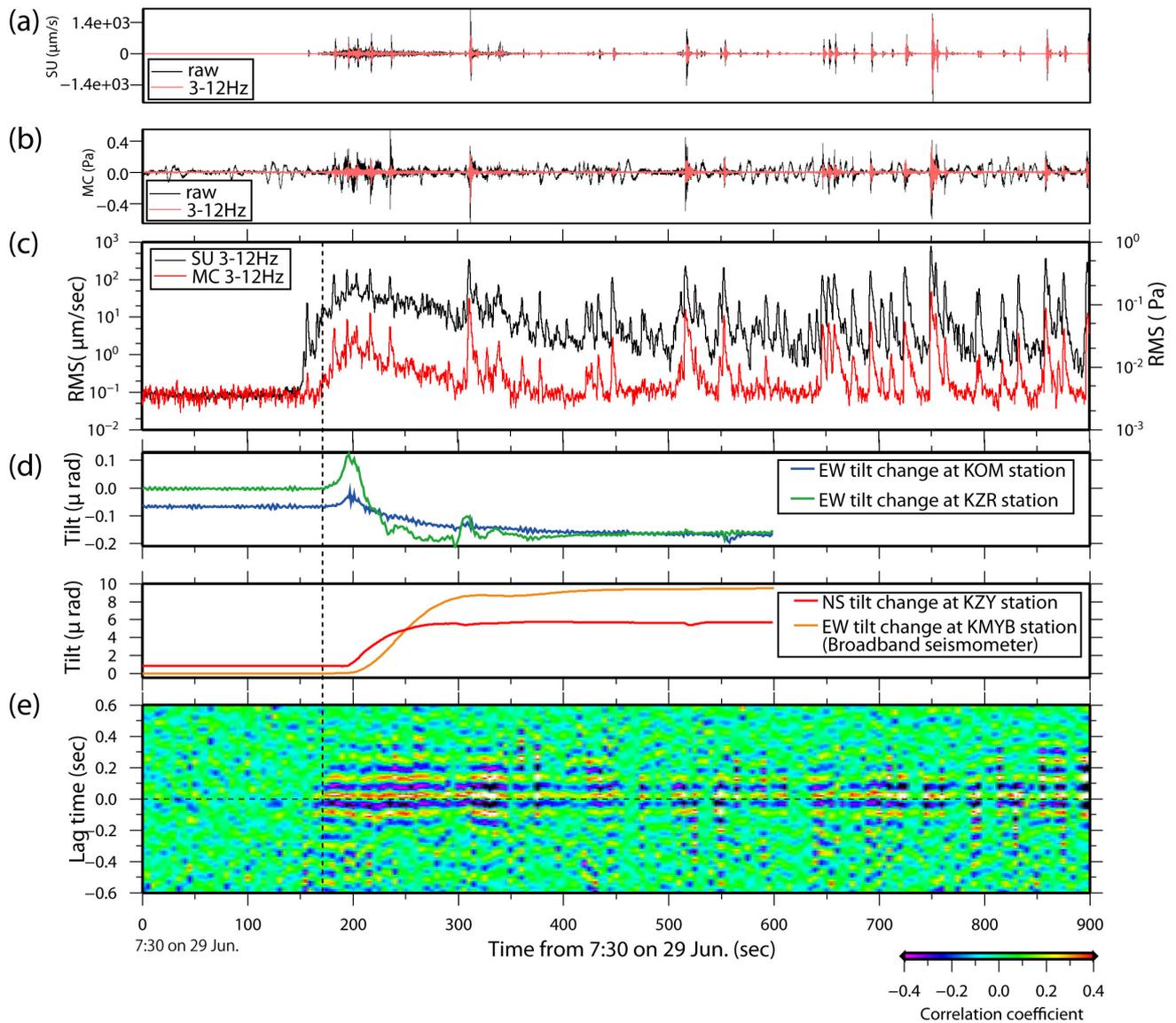
謝辞

本研究では気象庁により取得された空振記録を使用させて頂きました。記して感謝いたします。

図1 傾斜イベント発生時の地震及び空振波形記録。(a)地震計上下成分(SU)の生データ及びフィルター波形、(b)空振計(MC)の生データ及びフィルター波形、(c)フィルター波形のRMS値、(d)傾斜計記録、(e)地震と空振波形との相関関数。点線は傾斜変動開始時刻。

キーワード：水蒸気噴火、空振

Keywords: phreatic eruption, infrasonic wave



# 箱根山周辺の河川床堆積物化学組成にみられる火山活動の影響

## Influence of volcanic activity in river floor sediment chemical composition around Hakone volcano

\*沼波 望<sup>1</sup>、宮崎 遼<sup>1</sup>、大場 武<sup>1</sup>

\*Nozomi Numanami<sup>1</sup>, Ryo Miyazaki<sup>1</sup>, Takeshi Ohba<sup>1</sup>

1. 東海大学理学部化学科

1. Department of Chemistry, School of Science, Tokai University

【諸言】日本列島には、100以上の活火山が分布している。活火山の定義の一つは、過去1万年前以降の噴火履歴である。有史の噴火履歴が無く、現在、噴気活動がない活火山も存在する。そのような活火山であっても将来、噴火の可能性はある。火山防災を考える上で、現在静穏な活火山が、今後、どのような活動をするか予測することは重要である。将来発生する火山活動は、過去に発生した火山活動に類似する可能性は高い。現在、噴気活動が見られない火山であっても、過去の噴気活動の場所を特定することは、将来の火山活動を予測する上で有用である。河川床堆積物は上流地域の地殻表層の元素濃度を代表しており、地球化学図の作製に用いられてきた。活火山において、過去に存在した噴気活動の影響の痕跡が、河床堆積物に残されているかも知れない。本研究では、現在、噴気活動が存在する箱根山を取り上げ、周辺を流れる早川本流および支流の河川床堆積物に、どのような影響が見られるか調べる。

【実験・操作方法】箱根山周辺を流れる早川の本流および支流の、19ヶ所で試料を採取した。河川床堆積物を約1kgシャベルなどで採取し、乾燥させた後、篩分けし、細粒(0.30~0.85mm)および粗粒(0.85~1.7mm)の粒子を得た。次に磁石を用い、篩分けた試料から、磁鉄鉱など磁性を持つ物質を取り除いた後、純水で超音波洗浄をした。これを瑪瑙の乳鉢で粉碎し、6M HClO<sub>4</sub>溶液 0.15mL, 25M HF溶液 0.30mLを用いて溶解した。更にこの溶液を120℃で6時間、170℃で6時間放置し、200℃でドライアップするまで加熱し、放冷した。これに10M HCl 溶液0.20mLを加え、再度120℃でドライアップするまで加熱し、放冷した。最後に0.5M HNO<sub>3</sub>溶液 5.00mLで試料を溶解させ全容を25mLまで0.5M HNO<sub>3</sub>溶液を加え、試料原液とした。この原液を適宜希釈し、ICP-MS (ThermoScience, iCAPQ) で分析した。

### 【結果・考察】

早川本流の試料については、日本列島における若い地殻上部化学組成 (Togashi et al.,2000) と比較して Sc, Vの濃度が高く、これは火山灰が卓越する地域 (主に東日本) の特徴と一致した。箱根山の山麓を流れる河川と早川が合流する地点では、高濃度のAsが検出された。箱根山の中央火口丘で湧出する温泉にはAs濃度が高いことが報告されている (神奈川県温泉地学研究所HP)。今回発見された河川床堆積物の高濃度Asは箱根山の火山活動の影響と考えられる。

### 【参考文献】

Togashi,S.,Imai,N.,Okuyama-Kusunose,Y.,Tanaka,T.,Okai,T.,Koma,T.,Murata,Y. (2000): Young upper crustal chemical composition of the orogenic Japan Arc,

Geochemistry,Geophysics,Geosystems.,1, 2000GC000083.,p.18-19.

粟屋徹,大山正雄,石坂信之,板寺一洋(2002):箱根・湯河原地域における河川水と温泉のヒ素負荷量, 49-70,33,p.56-58.

キーワード：箱根火山、地球化学図、元素組成

Keywords: Hakone volcano, Geochemical map, Elemental composition

# 新潟焼山の2015-16年活動の推移-地震・地殻変動・噴煙データ- 2015-16 year' s active of Niigata-Yakeyama volcano -seismic activity, volcanic deformation and plume data-

\*越田 弘一<sup>1</sup>、川口 亮平<sup>2</sup>、木村 一洋<sup>1</sup>、宇都宮 真吾<sup>1</sup>、坂東 あいこ<sup>1</sup>、加藤 幸司<sup>1</sup>

\*Hirokazu Koshida<sup>1</sup>, Ryohei Kawaguchi<sup>2</sup>, Kazuhiro Kimura<sup>1</sup>, Shingo Utsunomiya<sup>1</sup>, Aiko Banbo<sup>1</sup>, Koji Kato<sup>1</sup>

1. 気象庁、2. 気象研究所

1. Japan Meteorological Agency, 2. Meteorological Research Institute

はじめに

新潟焼山は新潟県西部に位置し、標高2000m前後の山地を基盤とする比高約400mのドーム状の小型成層火山である。マグマ噴火は1773年の活動以降起こっていないが、その後もたびたび水蒸気噴火が起こっており、2016年5月頃にも火山灰の噴出を伴うごく小規模な噴火が発生したと推定された。本稿では、2015年から2016年にかけての一連の活動において気象庁が行った新潟焼山の噴煙・地震・傾斜変動の観測結果について報告する。

噴気など表面現象および地震活動の状況

2015年夏頃から山頂部東側斜面の噴煙の量が増加し、2015年12月下旬からはさらに増加した。

2016年4月と5月に実施した上空からの観測では、山頂付近にごく小規模な噴火によるものとみられる降灰を確認した（及川ほか、2017）。また、その後も7月にかけて、噴気孔からの泥水の流出や火山灰の痕跡が確認されるなど（及川ほか、2017）、熱活動は活発な状態であった。

plume-rise法により放熱量を推定した結果は、ごく小規模な噴火が確認された2016年5月頃に高くなっていた。

地震活動は2015年からわずかに高まり、2015年12月下旬からは低周波成分を含む地震もみられるなかで、2016年5月1日から4日にかけて一時的に高周波地震が増加した。その後5月中旬以降は地震活動が少ない状態で経過している。

地殻変動の状況

GNSSによる地殻変動観測では2016年1月頃から8月にかけて、新潟焼山を南北に挟む宇棚一丸山尻基線（基線長：約16km）で約3cm程度の伸びの変化が見られた。ALOS-2/PALSAR-2でも、同時期に山頂付近で膨張性の変動が観測されており、鎌田・他（2016）によると、これらの変動は新潟焼山山頂付近の深さ5km～6km、体積変化量 $4.6\sim 5.7\times 10^6\text{m}^3$ で説明することが可能である。

また、4月30日頃から5月1日頃にかけて、山頂の北約4kmに設置しているカラサワ観測点の傾斜計で、地震の増加に先行して約 $0.3\times 10^{-6}$ radian程度の山頂方向上がり（南上がり）の変化が見られた。

議論

以上の観測結果から、新潟焼山では2016年1月頃から、山頂直下深さ5km付近にマグマが貫入し、それによる地震活動の活発化や浅部の熱水活動の高まりと、噴煙量の増加やごく小規模噴火がみられたと考えることができる。また、2016年夏以降は、地殻変動も停滞し、地震、噴煙活動も徐々に低下してきていることから、それ以上のマグマの上昇は起こらなかったとも考えられる。しかし、数百万 $\text{m}^3$ のマグマが蓄積されている可能性があることや、他の火山の事例に照らせば、このような活動を繰り返した場合は、中長期的には本格的な噴火活動に移行する可能性も考えられる。

これらの活動を踏まえ、気象庁は、監視カメラを2点、GNSS観測点を1点、増設した。また、御嶽山の災害を踏まえた観測点整備で山頂から約2kmの地点に広帯域地震計も設置した。これらのデータと現地調査、また

新潟焼山は自然環境が厳しく、観測点の設置や維持が難しいが、必要に応じて観測体制を強化するなどして火山活動を監視していきたい。

キーワード：新潟焼山、地震、地殻変動、噴煙

Keywords: Niigata-Yakeyama, seismic activity, volcanic deformation, plume

# 新潟焼山の昭和初期の噴気活動および1949年の噴火記録の再検討 On the fumarolic activities of Niigata-Yakeyama in early Showa era, and the review of 1949 eruption.

干場 三寛<sup>1</sup>、\*重野 伸昭<sup>2</sup>、小林 修<sup>1</sup>、高橋 博<sup>1</sup>、舟崎 淳<sup>1</sup>、及川 輝樹<sup>2</sup>、早津 賢二<sup>3</sup>

Mitsuhiro HOSHIBA<sup>1</sup>、\*Nobuaki Shigeno<sup>2</sup>、Osamu KOBAYASHI<sup>1</sup>、Hiroshi TAKAHASHI<sup>1</sup>、Jun FUNASAKI<sup>1</sup>、Teruki Oikawa<sup>2</sup>、Kenji HAYATSU<sup>3</sup>

1. 新潟地方気象台、2. 気象庁火山課、3. 妙高火山研究所

1. NIIGATA LMO,JMA, 2. JMA, 3. Myoko Volcano Research Laboratory

## 〇はじめに

新潟焼山は新潟県南西部にある活火山で、過去の火山活動は早津（2008）に詳しくまとめられている。これによると、1773年にはマグマ噴火が発生し、火砕流を伴った。また、20世紀以降も小規模な水蒸気爆発が発生しており、1949年と1974年の噴火では降灰や泥流による被害が生じ、その後は、1983年、1997～1998年に小規模な噴火が発生した。

現在も、山頂付近には噴気地帯があり、山麓からも噴気がみられる。2010年以降は、気象庁が噴気活動を24時間体制で常時監視している。それによると、2015年夏頃から噴気活動が高まり、2016年4月、5月、7月にはごく小規模の噴火が発生した。

国井（1950）によると、明治時代以降の噴気活動は、1894年頃や1917～1919年に活発であった。その後、1927年に新しい噴気孔が生成した。朝比奈（1937）によると、大正末から昭和初期に噴気があったとされているが、詳細はわかっていない。1930年頃以降、1949年の噴火発生までの噴気活動ははっきりしていない。

気象庁は明治時代以降、火山噴火に関する事実を収集・観測し、その結果を公表してきた。しかし、地方の気象官署が県の所属だった期間（高田測候所は、1921年（大正10年）～1939年（昭和14年）の間、新潟県庁に所属）などは、火山観測記録の詳細は、気象庁の刊行物に記載されていないものがある。この期間に該当する火山観測記録や、1949年の噴火調査報告が新潟地方気象台に保存されており、今回、その内容をあらためて見直した。

本発表では、今回見直した観測記録による1930年頃の新潟焼山の噴気活動と、1949年の噴火について報告する。また、最新の火山の状況を報告し、今後の活動推移と火山活動監視の留意点を考察する。

## 〇昭和初期の新潟焼山の噴気活動

新潟地方気象台の資料によると、昭和初期に旧上早川村役場（山頂から約10km）が、新潟焼山の噴気を観測している。それによると、1932年3月に新しい噴気が見え、その後、同年5月には山頂付近で間欠泉が発生し、温水が東斜面を流下しているように見えた。このような温水等が流下する現象は、1974年7月の噴火でも発生し、1949年2月の噴火でも発生した可能性がある。また、2016年5月、7月に、泥水の流下が数回観測されている。

1932年7月には、上早川村で、噴気の声（自動車が通るような音）が聞かれ、同年11月には、火山ガスによ

るとみられる臭気を感じたことが報告されている。

### ○1949年と1974年の噴火との比較

明治時代以降の新潟焼山の噴火で、1949年2月と1974年7月の噴火はもっとも顕著な噴火である。新潟地方気象台の資料には、1949年2月噴火時の爆発音の状況、降灰の深さ等が記録されている。これをもとに、1949年の噴火時の現象（爆発音等）をまとめ、降灰量を推定し、1974年の噴火との比較を試みた。

その結果、1949年2月の噴火では、山頂から約16kmの地点まで音響が聞こえ、地響きや「障子」の振動があった。これに対し、1974年の噴火では、山頂から4～6kmにある山小屋で、爆発音や鳴動が聞かれたが、それより遠方では、爆発音等は聞かれなかった。噴火（爆発）の強さは、1949年の噴火が1974年の噴火を上回っていたと考えられる。ただし、1949年の噴火口は、山頂の北東斜面に分布しており、糸魚川市や妙高市方面に爆発音等が伝わりやすいが、1974年の主な噴火口は、山頂の西側斜面にあり、爆発音等が糸魚川市等の居住地域に伝わりにくい。このため、住民には聞こえなかった可能性がある。

1949年2月の噴火による降灰の厚さは、関温泉、燕温泉（山頂の東約9～10km）などで約30mm、信越線の妙高高原～関山駅間（山頂の東約16km）で、最大21mmであった。また、飯山線桑名川～飯山駅間で降灰があり、最大は信濃平駅付近（山頂の東約30km）で、11mmであった。この資料をもとに、降灰量を推定すると約200万m<sup>3</sup>（見かけ体積）となる。1974年噴火の降灰量は約65万トン（茅原，1975）であるので、両者はほぼ同規模の噴火である。

今後、活動が活発化した場合には、山麓で、噴気の音響や、臭気を感じることもありうると思われる。今後とも地震、地殻変動といった観測機器による監視とともに、山麓で人が感じる現象も含め、火山活動を注意深く監視する必要がある。

### ○参考文献

- 朝比奈，1937：焼山火山調査（第2報）．気象集誌，2篇，15,502-525
- 国井，1950：焼山の爆発について，妙高戸隠の自然，国立公園資料，第5輯，13-15
- 茅原，1975：新潟焼山火山の1974年活動に関する緊急調査，研究報告，42
- 早津，2008：妙高火山群－多世代火山のライフヒストリー，実業広報社，156-158

キーワード：新潟焼山、1949年噴火

Keywords: Niigata-Yakeyama, 1949 eruption

## 浅間山における周波数遷移を伴う高周波微動

## High-frequency tremor with frequency transition at Mt. Asama, Japan

戸谷 千鶴<sup>1</sup>、\*三井 雄太<sup>2</sup>Chizuru Totani<sup>1</sup>, \*Yuta Mitsui<sup>2</sup>

1. 元・静岡大学理学部地球科学科、2. 静岡大学理学部地球科学教室

1. formerly at Faculty of Science, Shizuoka University, 2. Department of Geosciences, Shizuoka University

10 Hz以上の高周波帯域での火山性微動を研究した事例は非常に少ない。一例として、Hotovec et al. (2013)は、リダウト火山の2009年の噴火中に、低周波から高周波（20 Hz以上）への遷移を伴う火山性微動を報告している。本研究では、防災科学技術研究所のV-net観測網の短周期地震計データに基づき、浅間山（主に高峰観測点）で、継続時間数分～数十分、周波数領域20～30 Hz程度で低周波側から高周波側に遷移する火山性微動を報告する。このような火山性微動は、2011年1月1日～2016年7月15日の期間で、高峰観測点において合計161回、鬼押出観測点において36回見られた。鉛直成分の波形の時間-周波数スペクトログラムについて関数フィッティングを行ったところ、微動の周波数遷移は対数関数でよくフィッティングできた。微動発生の日・時間毎の分布を調べたところ、11月～4月の朝6時～8時に多く発生していることがわかった。浅間山の積雪との関係が示唆される。

キーワード：火山性微動、高周波微動、浅間山、積雪

Keywords: Volcanic tremor, High-frequency tremor, Mt. Asama, Snow coverage

## Relation between long-period seismic signals and SO<sub>2</sub> emission at Asama volcano from October 2003 to January 2017

\*武尾 実<sup>1</sup>、前田 裕太<sup>2</sup>、風早 竜之介<sup>3</sup>

\*Minoru Takeo<sup>1</sup>, Yuta Maeda<sup>2</sup>, Ryunosuke KAZAHAYA<sup>3</sup>

1. 東京大学地震研究所、2. 名古屋大学、3. 産業技術総合研究所地質調査総合センター

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Nagoya University, 3. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Vulcanian eruptions had started on September 1<sup>st</sup> 2004, lasting until December 2004 at Mt. Asama. After that, several small and minor eruptions occurred in August 2008, from February to May 2009, and in June 2015. We compile long-period seismic data and SO<sub>2</sub> data from October 2003 to January 2017, and consider the relation between long-period seismic signals and volcanic gas emission. We categorize long-period seismic signals into three group; the first category is a very long-period pulse (VLP) excited by a sudden gas emission from northern part of the conduit [Takeo et al., 2016]. The second category is a long-period rebound waveform (LP earthquake), and the third category is long-period tremor characterized by pointed tips and sawtooth waveform. We propose a mathematical model succeeding in simulating the oscillations resembling with these second and third categories signals. Before June 2004, VLP activity was synchronized with the seismicity, but it had gradually decreased toward the eruption in spite of increment of the seismicity. At this turning point, LP earthquakes and nonlinear tremors occurred in cluster. Based on the mathematical model, LP earthquake and the nonlinear tremor could be actualized by a blockage of the conduit, resulting the decline of VLP activity due to shielding of gas emission and the increment of seismicity due to stress accumulation in and around the conduit [Takeo et al., 2016]. The minor eruptions in 2008 and 2015 were preceded by rapid activation of VLP activity and/or increment of SO<sub>2</sub> emission, and large VLPs preceded these minor eruptions by two to four minutes. Based on the VLP activity and SO<sub>2</sub> emission data, the minor eruptions in 2008 and 2015 were interpreted as large-scale gas emission events. SO<sub>2</sub> emissions had been kept in high level from November 2008 to February 2009 in spite of low VLP activity, but this relation had turned over from April to August 2009. After the 2015 eruption, SO<sub>2</sub> emission level often had been kept more than 1000 ton/day by the end of November 2015. After that, low SO<sub>2</sub> emission had been continued until December 2016 in spite of relative high level of VLP activity compared with that before the 2015 minor eruption. In this period, VLP activity seems to increase gradually, followed by a rapid increment of SO<sub>2</sub> emission in January 2017. The variability of correlation between SO<sub>2</sub> emission and VLP activity suggests an existence of multi outgassing pathways in the shallow part of the conduit.

キーワード：浅間山、長周期地震、火山ガス

Keywords: Asama volcano, Long-period earthquake, Volcanic gas

# 阿蘇火山ストロンボリ式噴火の発生機構：スラグ上昇・破裂モデル Mechanism of Strombolian eruption at Aso volcano in terms of a model of slug ascending and bursting

\*石井 杏佳<sup>1</sup>、横尾 亮彦<sup>1</sup>、鍵山 恒臣<sup>1</sup>、大倉 敬宏<sup>1</sup>、吉川 慎<sup>1</sup>、井上 寛之<sup>1</sup>

\*Kyoka Ishii<sup>1</sup>, Akihiko Yokoo<sup>1</sup>, Tsuneomi Kagiya<sup>1</sup>, Takahiro Ohkura<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

2014年11月から始まった阿蘇火山の噴火活動の特徴の一つは、活発なストロンボリ式噴火が連日繰り返されたことである。阿蘇火山においては、古くからストロンボリ式噴火が観測されてきたが、噴火に伴う地震空振シグナルの発生メカニズムや噴火過程の物理的モデルの検討は未だなされていない。本研究では、京都大学火山研究センターの地震空振観測記録を用いて、ストロンボリ式噴火発生のプロセスを検討した。2015年4月24日19-24時における噴火回数は1時間あたり20-30回であり、噴火発生時には低周波地震、高周波地震、空気振動が観測される。観測される低周波地震の周期は12 sほどであり、静穏期に発生する長周期微動の周期15 sと比べるとやや短い。しかし、振動軌跡から示唆される震源領域は火口の下1-2 kmほどであり、長周期微動のものと同程度変わらないため、低周波地震の発生源もクラック状の火道 (Yamamoto et al., 1999) であると考えられる。ストロンボリ式噴火に伴って低周波地震が観測される多くの火山では、地震発生にスラグ上昇が関係していると考えられることが多い (例えば Aster et al., 2003)。阿蘇火山では、クラックの上端部 (300 mあたり) で急激に経路が狭くなると考えられている (Yamamoto et al., 2008)。そのため、クラックの天井部でfoam collapseによってスラグが形成され (Jaupart & Vergnolle, 1988)、このスラグが狭窄部を通過した後、火道内を火口まで上昇する。この狭窄部通過時に、下部空間 (クラック) の振動が励起され、低周波地震として観測されると考えられる。高周波地震と空振シグナルの到着時間差から見積もられた噴火発生深度 (マグマ-大気境界面) は火口底から約200 mの深さである。低周波地震の発生から噴火発生までの時間差を考慮すると、火道内のスラグの上昇速度は40 m/s程度と推定され、ストロンボリ火山におけるスラグ上昇速度10-70 m/s (Harris & Ripepe, 2007) と同程度であった。また、ストロンボリ式噴火発生にともなう空振シグナルの卓越周波数は0.5 Hzである。この周波数帯の圧力変動は噴火発生時以外でも定常的に観測されている。室内実験では、マグマ-大気界面で気泡が破裂すると、界面より上部の空間スケールに規定される固有振動が発生することが確認されている (Kobayashi et al., 2010)。火道内空間音速が400m/sの場合、片側が開口端である長さ200 mの気柱の固有振動周波数は0.5 Hz程度であり、観測された特徴と一致する。したがって、0.5 Hzシグナルの発生主要因は火道上端における気柱共鳴の1次モードであり、スラグ破裂による内部圧力の解放によって、気柱の固有振動が強められたものであると考えられる。噴火発生時の空振シグナルには継続時間4 sほどの高周波成分 (10 Hz以上) も含まれ、これは0.5 Hz帯の振幅増大開始から約0.3 s遅れて発現する。高周波シグナルは、スラグ周囲のマグマを引きちぎるような強いガス放出が継続することで発生しているが、スラグの破膜開始からガス放出までに一定程度の時間を要する理由についてはできていない。

キーワード：阿蘇火山、ストロンボリ式噴火

Keywords: Aso volcano, Strombolian eruption

## 阿蘇山長周期微動の振動特性時間変動に関する考察

### A study of the temporal change in oscillatory characteristics of Long-period tremor at Aso Volcano, Japan

\*山本 希<sup>1</sup>、大倉 敬宏<sup>2</sup>、金嶋 聰<sup>3</sup>、川勝 均<sup>4</sup>

\*Mare Yamamoto<sup>1</sup>, Takahiro Ohkura<sup>2</sup>, Satoshi Kaneshima<sup>3</sup>, Hitoshi Kawakatsu<sup>4</sup>

1. 東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター、2. 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センター、3. 九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門、4. 東京大学地震研究所

1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Aso Volcanological Laboratory, Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, 3. Department of Earth and Planetary Sciences, Kyusyu University, 4. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

活火山周辺で観測される低周波地震・長周期地震は、熱水・火山ガスやマグマといった火山性流体の運動と密接な関係があると考えられており、その発生メカニズム・時間変動を解明することは、火山現象の理解・噴火予知の両面において重要である。阿蘇火山では、古くから多様な火山性微動の存在が知られているが、表面的な活動に関わらず断続的に発生している長周期微動(周期15秒)が一つの特徴的な現象である。この長周期微動は、減衰の早い孤立的な波形をしており、そのスペクトルは複数のピークを呈するものであるが、その振動特性から、長周期微動は火口直下浅部にほぼ鉛直に存在する亀裂状火道の共鳴振動によって生じていることがこれまでの研究による提唱されてきた。一方、このような流体を含む亀裂状火道の共鳴は、固液の相境界を伝播する境界波の伝播特性に依存するため、流体の物性時間変化・亀裂状火道の形状を強く反映する。そこで、本研究では、1994年の広帯域地震観測開始以来の長周期微動の振動特性時間変動を調べ、浅部火道系の状態変化について検討を行った。

本研究では、まず火口近傍に設置された広帯域地震波形の連続記録を用いて、1994年から現在までの長周期地震の基本モード(周期約15秒)・二次モード(周期約7秒)の時間変動の精査を行った。この結果、2003~2005年と2014~2015年の二つの時期において、これらの卓越周期に明瞭な時間変動が見られることが明らかとなった。これらの二つの期間は、それぞれ小規模水蒸気噴火及び水蒸気噴火・マグマ水蒸気噴火が発生していた時期に対応する。2003~2005年の期間については、池田(2005)や山本(2013)で報告がされているとおり、基本モード・二次モードともに相関をもって変動をしており、亀裂状火道内流体のガス・火山灰量比の変動又は温度変化で解釈が可能である。一方、2014~2015年の期間については、二次モードの卓越周期には大きな変動は見られず約8秒で推移するのに対し、基本モードの卓越周期は16秒から12秒程度と相対的に大きな変動幅を示した。この変動の傾向、特にモード間の周期比は、固液境界波の分散性を考慮すると、平板状の亀裂内の流体物性・温度の変動のみでは説明がやや困難である。

そこで本研究では、厚みが線形に変化する有限長亀裂の振動特性の検討を行った。この結果、厚みが一定の亀裂の場合と比較して境界波の逆分散性が弱まり、二次モードに比べて基本モードの周期が相対的に大きく変化し、モード間の周期比も一定厚さの亀裂の場合より小さな値となることが明らかとなった。これは、固液の弾性カップリングによって生じる境界波において、波長によって実効的な亀裂の厚さが異なるやめであると解釈できる。この結果を踏まえると、2014~2015年に観測された長周期微動の卓越周期の変動は、火道深部側へのマグマの上昇や増圧により、亀裂状火道の厚さに深度依存性が生じたことを示唆する。これらの結果は、地震学的手法により、火山性流体の物性変動・火道状態の時間変動を連続的に捉えられる可能性を示す。

キーワード：火山性地震、熱水系、境界波

Keywords: Volcanic earthquake, Hydrothermal system, Boundary wave



# 2016年10月の阿蘇火山の爆発的噴火に先行した長周期パルス Long period pulse preceding the explosive eruption of Aso volcano, October, 2016

\*谷 協至<sup>1</sup>、大倉 敬宏<sup>4</sup>、山本 希<sup>2</sup>、久家 慶子<sup>3</sup>

\*kyoji tani<sup>1</sup>, Takahiro Ohkura<sup>4</sup>, Mare Yamamoto<sup>2</sup>, Keiko Kuge<sup>3</sup>

1. 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻、2. 東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター、3. 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻地球物理学教室、4. 京都大学大学院理学研究科 火山研究センター

1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 3. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University, 4. Aso Volcanological Lab., Graduate School of Science, Kyoto University

2016年10月8日の午前01時46分に、阿蘇火山中岳第一火口で爆発的な噴火が発生した。噴出物中にガラス質の粒子が見られたことから、噴火様式はマグマ水蒸気爆発と考えられている(気象庁 2016)。二つの長周期パルス(LPP)がそれぞれ爆発的噴火の6分前と2分前に観測された(今後、これらをLPP1、LPP2とする)。LPPの発生機構には爆発的噴火の準備過程などの情報が含まれると考えられるため、本研究では、広帯域地震記録を分析し、LPPの震源過程を明らかにすることを目的とする。

使用したデータは、中岳第一火口周辺の8観測点(火口からの距離は約0.3km~2.3km)の広帯域地震記録である。

各観測点での粒子軌跡をもとに、waveform semblance method(Kawakatsu et al.2000)でLPPの震源位置を推定した。LPP1の震源は火口から270m南西(32.8829N、131.0837E)、海拔0m、LPP2の震源は火口から300m南南西(32.8824N、131.0842E)、海拔120mの位置に求まった。この位置は、Kawakatsu et al.(2000)で推定されたLPP震源位置と約100mしか離れていない。さらにこの結果をYamamoto et al.(1999)で推定された火口下のクラック状火道の位置と比較すると、二つの震源はクラック上あるいはクラックのごく近傍に存在することが判った。また、地震記録に周期10~30秒帯域のバンドパスフィルターをかけ、60秒の時間幅でRMS振幅を求めたところ、Yamamoto et al.(1999)で見られた長周期微動(LPT)の振幅分布とよく似たパターンが見られた。したがって、同様のクラック状火道の挙動でLPPが説明できると推測できる。なお、イベント間で震源が浅部へ移動しているという結果が出ているが、有意な移動であるか否かは検討中である。

次にLPPの周期を調べるため150秒の時間幅でフーリエスペクトルを求めた。LPP1のスペクトルピークは12~20秒(不明瞭)、7.5秒、5秒、LPP2は17秒、10秒、6秒であった。LPP2はLPP1と比べて長周期化していることがわかる。LPPは火道の共鳴として解釈され(Kawakatsu et al. 2000)、その周期は火道の長さや火道内の流体を伝わる音速に依存すると考えられている。どのような変化があったかは今のところ不明であるが、噴火のわずか2分前に、4分間空けて発生した二つのイベント間に火道の状態の変化が生じた可能性が高い。

キーワード：阿蘇火山、爆発的噴火、長周期パルス

Keywords: Aso volcano, explosive eruption, long period pulse

# 阿蘇・草千里ヶ浜軽石の鉱物・メルトの化学組成 - Aso-4との比較 - Chemical composition of minerals and melt inclusions in Kusasenrigahama pumices from Aso volcano, Kyushu, Japan -Comparison with Aso-4-

\*永石 良太<sup>1</sup>、長谷中 利昭<sup>1</sup>、安田 敦<sup>2</sup>、外西 奈津美<sup>2</sup>、森 康<sup>3</sup>

\*ryota nagaishi<sup>1</sup>, Toshiaki Hasenaka<sup>1</sup>, ATSUSHI YASUDA<sup>2</sup>, Natsumi Hokanishi<sup>2</sup>, Yasushi Mori<sup>3</sup>

1. 熊本大学大学院自然科学研究科、2. 東京大学地震研究所、3. 北九州市立自然史・歴史博物館

1. Graduate of Science and Technology, Kumamoto University, 2. Earthquake Reserach Institute, The University of Tokyo, 3. Kitakyushu Museum of Natural History and Human History

本研究は、阿蘇地方の草千里ヶ浜軽石について、全岩化学組成、鉱物・メルト包有物組成、メルト包有物の含水量を求め、Aso-4の火山噴出物との比較を行った。草千里ヶ浜軽石は、阿蘇中央火口丘西部に位置する草千里ヶ浜火山の約3万年前の火山活動で噴出した。本研究で扱う軽石は、草千里ヶ浜火山西部～南西部の露頭で採集し、4つの火山砂層中に確認される。4層は軽石のサイズや火山砂の色で下位よりA, B, C, Dと区別した。斜長石、単斜輝石、斜方輝石、不透明鉱物が軽石中に鉱物として含まれる。

分析結果から、草千里ヶ浜火山の活動は鉱物組成が一様で、活動の規模が含水量に依存すること、Aso-4と比べると含水量が低く、マグマだまり温度が高いことが分かった。以下の分析結果はそのことを支持する。

(a) 草千里ヶ浜軽石の上位、下位は近い鉱物化学組成を示す(斜長石: An# = 64 ~ 68, 単斜輝石: Mg# = 75 ~ 77, 斜方輝石: Mg# = 72 ~ 74)。単斜輝石、斜方輝石は草千里ヶ浜軽石とAso-4でほとんど同じ組成である。一方で、草千里ヶ浜軽石の斜長石と同じ組成を示すAso-4の斜長石は存在しない。

(b) 鉱物のメルト包有物の含水量は、上位ほど減少する傾向がある(1 ~ 5 wt.%)。Aso-4の含水量(4.1 ~ 5.7 wt.%)と比べると、低い。

(c) 単斜輝石とメルト包有物の温度・圧力計によって、温度・圧力が  $897 \pm 45$  °C、1.8 kbar と推定される。また、斜長石とメルト包有物の温度計に、1.8 kbar を仮定すると、温度が  $888 \pm 37$  °C と推定された。Aso-4の温度(810 ~ 850 °C)と比べると温度が高い。

キーワード：阿蘇火山、メルト包有物、草千里ヶ浜軽石

Keywords: Aso volcano, Melt inclusion, Kusasenrigahama pumice

## メルト包有物分析による阿蘇火山中岳2014, 1989, 1979年噴火マグマの揮発性成分濃度

Volatile content of magmas of the 2014, 1989, and 1979 eruptions of Naka-dake, Aso volcano based on melt inclusion analyses.

\*齋藤 元治<sup>1</sup>、石塚 治<sup>1</sup>、石塚 吉浩<sup>1</sup>、星住 英夫<sup>1</sup>

\*Genji Saito<sup>1</sup>, Osamu Ishizuka<sup>1</sup>, Yoshihiro Ishizuka<sup>1</sup>, Hideo Hoshizumi<sup>1</sup>

1. 独立行政法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター

1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Volatile content of magma is one of important controlling factors for magma ascent and volcanic eruption. Melt-inclusion analysis is a powerful method for estimating volatile content of melt in magma before eruption. At Naka-dake, Aso volcano, volcanic activity increased September 2013, and minor eruptions occurred January 2014. Since then, eruptions had intermittently occurred up to October 2016, together with intense volcanic gas emission. In this study, we carried out petrological observation and chemical analyses of melt inclusions of the scoria of the 2014, 1989 and 1979 eruptions of Naka-dake to know the eruption and degassing processes.

Whole-rock composition of the scoria was determined by a wave-dispersive X-ray fluorescence analysis (XRF). Observation of the cross sections, chemical analyses of the minerals, determination of major elements and sulfur contents of melt inclusions and groundmass were carried out by electron probe micro analyzer (EPMA). Water and CO<sub>2</sub> contents of the melt inclusions and matrix glass were determined by secondary ion mass spectrometry (SIMS). Analytical errors of the volatile analyses were ±0.2 wt.% for H<sub>2</sub>O, ±0.0028 wt.% for CO<sub>2</sub>, ±0.007 wt.% for S (Saito et al., 2010).

Five scoria of the 26-27 November 2014 eruptions have andesite composition (SiO<sub>2</sub>=54 wt.% and K<sub>2</sub>O=2.0 wt.%) and are identical to those of scoria of the November 1979 eruptions (Ono and Watanabe, 1985). The scoria contained 22-31 vol % plagioclase phenocrysts, 5-13 vol % clinopyroxene phenocrysts, a few vol % of olivine and FeTi-oxide phenocrysts. The plagioclase phenocrysts have core of An<sub>62-91</sub> and rim of An<sub>60-79</sub>. The clinopyroxene phenocrysts have core of Wo<sub>36-41</sub>En<sub>43-47</sub>Fs<sub>15-20</sub> and rim of Wo<sub>36-40</sub>En<sub>42-46</sub>Fs<sub>17-19</sub>. The olivine phenocrysts have core of Fo<sub>65-68</sub> and rim of Fo<sub>59-68</sub>. Two-pyroxene thermometry (Lindsley, 1983) applied to an orthopyroxene inclusion contained by a clinopyroxene phenocryst gave magma temperature of 1113±51°C. Melt inclusions in plagioclases, clinopyroxenes and olivines have andesite composition (SiO<sub>2</sub>=58-62 wt.%, K<sub>2</sub>O=3.1-4.7 wt.%), that is similar to chemical composition of the groundmass. The melt inclusions have volatile content of 0.6-0.8 wt.% H<sub>2</sub>O, 0.003-0.017wt.% CO<sub>2</sub> and 0.008-0.036 wt.% S. The variation in CO<sub>2</sub> and S contents of the melt inclusions is not related to the K<sub>2</sub>O content, suggesting magma degassing with pressure decrease. Gas saturation pressure estimated from the H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> contents and solubility model (Papale et al., 2006) is 22-78 MPa, corresponding to 1-3km depths. Combining the melt-inclusion analysis with observation of volcanic gas, we can estimate degassed-magma volume. The amount of degassed magma (1-3 km<sup>3</sup>) was estimated, based on the sulfur contents of the melt inclusions and SO<sub>2</sub> flux during a period of January 2014 to December 2016 (1000-3000 t/d; JMA, 2016), assuming that only SO<sub>2</sub> existing as sulfur component in the volcanic gas and magma density of 2700 kg/m<sup>3</sup>.

Melt inclusions in plagioclases, clinopyroxenes and olivines from the 1979 and 1989 eruptions have andesite composition (SiO<sub>2</sub>=57-62 wt.% and K<sub>2</sub>O=2.3-3.8 wt.% for 1979 eruptions, SiO<sub>2</sub>=57-63 wt.% and K<sub>2</sub>O=3.2-5.4wt.% for 1989 eruptions). The melt inclusions of the 1979 eruptions have volatile content of 0.3-1.6 wt.% H<sub>2</sub>O, 0.007-0.034wt.% CO<sub>2</sub> and 0.010-0.035wt.% S. The melt inclusions of the 1989

eruptions have 0.3-0.6 wt.% H<sub>2</sub>O, 0.003-0.009wt.% CO<sub>2</sub> and 0.008-0.031wt.% S. Major elements and volatile contents of melt inclusions of the 2014 eruptions are similar to those of the 1979 and 1989 eruptions. The similarity of chemical composition of whole-rocks and melt inclusions among these eruptions suggest petrologic characteristics and volatile content of the magma in the magma chamber had not changed from 1979 to 2014.

キーワード：阿蘇火山、中岳、マグマ、メルト包有物、揮発性成分、脱ガス

Keywords: Aso volcano, Naka-dake, magma, melt inclusion, volatile, degassing

# 阿蘇における浅部マグマ溜りへの高硫黄濃度玄武岩質マグマの注入

## The injection of high-sulfur basaltic magma into shallower reservoir beneath Aso

\*川口 允孝<sup>1</sup>、長谷中 利昭<sup>1</sup>、安田 敦<sup>2</sup>、外西 奈津美<sup>2</sup>、森 康<sup>3</sup>

\*Masataka Kawaguchi<sup>1</sup>, Toshiaki Hasenaka<sup>1</sup>, ATSUSHI YASUDA<sup>2</sup>, Natsumi Hokanishi<sup>2</sup>, Yasushi Mori<sup>3</sup>

1. 熊本大学大学院 自然科学研究科、2. 東京大学地震研究所、3. 北九州市立自然史・歴史博物館

1. Graduate school of science and technology, Kumamoto University, 2. Earthquake Reserch Institute, the University of Tokyo, 3. Kitakyushu Museum of Natural History and Human History

阿蘇中央火口丘群北西部において完新世に活動した玄武岩質マグマを対象に、それぞれのマグマ溜りの情報を得る目的で、全岩化学組成、鉍物および鉍物中に捕獲されたメルト包有物 (MI) の化学組成 (主成分元素, Cl, S), 含水量を測定した。

分析試料は完新世に活動した火山である往生岳, 上米塚のスコリアを用いた。全岩化学組成分析には北九州市立自然史・歴史博物館の蛍光X線分析装置を使用し、分析手順はMori & Mashima (2005) に従った。石基や鉍物の微小領域の分析には熊本大学のSEM-EDSおよび東京大学地震研究所のEPMAを使用した。含水量の測定には同研究所の真空型顕微赤外FT-IR分光光度計システムを使用し反射分光法で行った (安田, 2011; Yasuda, 2014)。

分析の結果、往生岳, 上米塚の斑晶鉍物はMIの組成をもとにMafic group: かんらん石 (Ol), Felsic group: 斜長石 (Pl), 単斜輝石 (Cpx), 斜方輝石 (Opx) の大きく2つに分けられる。往生岳, 上米塚のMIの組成はMafic groupでSiO<sub>2</sub> 46.7~57.5 wt.%, Felsic groupでSiO<sub>2</sub> 52.3~59.8 wt.%であった。メルトの組成は一部重複する。石基ガラスはそれらの中間組成にプロットされる。また揮発性成分含有量にも違いが見られ、Felsic groupのMIがSに乏しい (S ~1000 ppm) のに対し、Mafic groupのMIは高いS含有量をもつ (S ~4000 ppm)。S含有量はホストOlのMg#が大きいかほど高い傾向がある。含水量についてFelsic groupでは往生岳スコリアが最も高く (最大3 wt.%), 上米塚スコリアでは低含水量 (1 wt.%未満) という違いがある。Mafic groupの含水量は検出限界未満がほとんどだった (最大0.8 wt.%)。

また上米塚, 往生岳スコリアの鉍物化学組成について、Felsic groupのPl, Cpxには逆累帯しているものが存在する。Pl斑晶のコアは、パイモダルな組成を示す (An<sub>60</sub>-An<sub>65</sub>, An<sub>85</sub>-An<sub>87</sub>)。Opx斑晶はCpxやOlの反応縁をもつ。

OlのMIがもつ高いVolatile/K<sub>2</sub>O値は、初生的に高い揮発性成分濃度を有していたことを示している。中部・東北日本では斑晶メルト包有物の研究から火山フロント直下に供給される高S濃度のマフィックマグマが発見されており (山口ほか, 2003; 山口, 2010), 初生的に揮発性成分に富むことがわかってきている (Zellmer et al., 2015)。一般的にSが高濃度でメルトに溶け込むためには酸化的環境 (FMQ+1以上) が求められることが知られている (Wallace, 2005; Jugo et al., 2005; Jugo, 2010)。またメルト中のS含有量とFe含有量, 酸素フガシティ, 温度の間には相関がある (Wallace & Carmichael, 1992)。MaficグループとFelsicグループのS濃度の違いは両者の酸化還元度, 組成, 温度の違い, つまり分化度の違いを見ている可能性がある。

以上をまとめて、Felsic groupに比べてMafic groupの方が低SiO<sub>2</sub>, 高Mg#, 高VolatilesのMIをもつこと、Felsic groupの斑晶には反応縁をもつものや逆累帯するものが存在することから、Mafic groupが深部由来、Felsic groupが浅部由来であると考えられる。また観察事実Felsic groupを晶出した浅部マグマ溜りへの、Olを斑晶にもつ深部起源高硫黄玄武岩質マグマの注入によって説明できる。

キーワード: 阿蘇, EPMA, FT-IR, メルト包有物, 硫黄, 含水量

Keywords: Aso, EPMA, FT-IR, melt inclusion, sulfur, water content

# 脈動記録を用いた霧島山の表面波速度構造の推定

## Estimation of subsurface velocity structure beneath Kirishima volcanoes inferred from ambient seismic noise tomography

\*長岡 優<sup>1</sup>、西田 究<sup>2</sup>、青木 陽介<sup>2</sup>、武尾 実<sup>2</sup>、大倉 敬宏<sup>3</sup>、吉川 慎<sup>3</sup>

\*Yutaka Nagaoka<sup>1</sup>, Kiwamu Nishida<sup>2</sup>, Yosuke Aoki<sup>2</sup>, Minoru Takeo<sup>2</sup>, Takahiro Ohkura<sup>3</sup>, Shin Yoshikawa<sup>3</sup>

1. 気象研究所火山研究部、2. 東京大学地震研究所、3. 京都大学火山研究センター

1. Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Aso Volcanological Laboratory, Kyoto University

2011年1月の霧島山新燃岳の噴火に際し、地殻変動の圧力源が新燃岳の北西5km、深さ約8kmの位置に検出され、噴火に関わるマグマだまりであると考えられている (Nakao et al., 2013)。しかし、このマグマだまりを地震学的手法によってイメージングした研究例はまだない。複数の手法によりマグマだまりの位置を推定できれば、その存在がより確からしくなる。また、詳細な地震波速度構造を求めることにより、霧島山のマグマ供給系の解明が期待される。

本研究では、地震波干渉法により霧島山周辺の観測点間を伝播する表面波を抽出し、表面波位相速度トモグラフィーによって上部地殻の位相速度構造を推定することで、マグマだまりのイメージングを試みた。地震波干渉法は脈動などのランダムな波動場から観測点間の地震波伝播を抽出する手法であり、局所的な構造の推定に適している。

解析には、霧島山周辺の38観測点 (東大地震研、京大火山研究センター、防災科研、気象庁) の3成分で記録された2011年4月~2013年12月の脈動記録を用いた。まず脈動記録の相互相関関数を計算することにより、Z-Z成分とR-R成分から観測点間を伝播するRayleigh波を、T-T成分からLove波を抽出した。次に、SPAC法によりそれぞれの波の分散を測定し、解析領域全体の平均構造に対応する分散曲線とした。Rayleigh波については4つの周波数帯 (0.1-0.2Hz、0.2-0.4Hz、0.3-0.6Hz、0.4-0.8Hz) において、Love波については2つの周波数帯 (0.3-0.6Hz、0.4-0.8Hz) において、パスごとに平均構造に対する走時異常を測定し、表面波位相速度トモグラフィーにより速度構造を推定した。

周波数帯によらず、霧島山の山体近傍は周囲に比べて低速度という大局的な傾向がみられた。0.1-0.2Hz (深さ5-10km付近に対応) のRayleigh波位相速度構造には、特に2つの顕著な低速度領域が見られた。一つは地殻変動圧力源と対応し、もう一方は新燃岳から大幡池にかかる領域に対応する。これら2つの低速度領域の境界は比較的高速度であった。同じ傾向が0.2-0.4Hz (深さ3km付近に対応) と0.3-0.6Hz (深さ2km付近に対応) のRayleigh波位相速度構造と、0.3-0.6HzのLove波位相速度構造でも確認できた。0.4-0.8Hz (深さ1km付近に対応) では、Rayleigh波、Love波位相速度構造ともに、韓国岳や新燃岳、高千穂等を含む山の直下が全体的に低速度となった。今後、推定された位相速度マップから、3次元S波速度構造を推定する予定である。

キーワード：霧島山、表面波速度構造、脈動記録

Keywords: Kirishima volcanoes, surface wave velocity structure, ambient seismic noise

## 霧島硫黄山周辺の1次元比抵抗構造と震源再決定

### One-dimensional resistivity structure and the relocated hypocenter distribution of Iwo-yama, Kirishima Volcanoes

\*塚本 果織<sup>1</sup>、相澤 広記<sup>2</sup>、神田 径<sup>3</sup>、上嶋 誠<sup>4</sup>、関 香織<sup>5</sup>、木下 貴裕<sup>5</sup>、宇津木 充<sup>6</sup>、小山 崇夫<sup>4</sup>

\*Kaori Tsukamoto<sup>1</sup>, Koki Aizawa<sup>2</sup>, Wataru Kanda<sup>3</sup>, Makoto Uyeshima<sup>4</sup>, Kaori Seki<sup>5</sup>, Takahiro Kishita<sup>5</sup>, Mitsuru Utsugi<sup>6</sup>, Takao Koyama<sup>4</sup>

1. 九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻、2. 九州大学大学院理学研究所所属・地震火山観測研究センター、3. 東京工業大学理学院火山流体研究センター、4. 東京大学地震研究所、5. 東京工業大学理学院地球惑星科学系、6. 京都大学大学院理学研究科付属地球熱学研究施設火山研究センター

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 3. Volcanic Fluid Research Center, School of Science, Tokyo Institute of Technology, 4. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 5. Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 6. Aso Volcanological Laboratory, Institute of Geothermal Sciences, Graduate School of Sciences, Kyoto University

Iwo-yama is the youngest volcano in the Kirishima volcanic group. Around Iwo-yama and Karakuni-dake, shallow (depth < 2km) tectonic earthquakes have increased since December 2013, and volcanic tremors have occasionally occurred since July 2015 (Japan Meteorological Agency, volcanic activity commentary document). Furthermore, the fumarolic gases appeared in December 2015 for the first time in 12 years. The leveling survey detected the ground uplift during June to December 2015, and its pressure source was estimated at a depth of 700 m, 150 m east of the crater (Matsushima et al., 2015). Therefore, it is reasonable to be concerned about the occurrence of hydrothermal eruptions.

In order to investigate the mechanism of these volcanic activities and possibility of future eruptions, we conducted broadband (0.005 to 3000s) magnetotelluric (MT) measurements around the Iwo-yama in April 2016. We recorded two components of electric fields at 20 observation sites and five components of electric and magnetic fields at 7 observation sites. One-dimensional inversion revealed that the shallow earthquakes occur beneath a shallow electric conductive layer, which is interpreted as a hydrothermal altered clay dominant zone. The pressure source by the leveling survey corresponds to the bottom of the conductive layer. These spatial relationships suggest that the supply of high temperature fluids has increased beneath Iwo-yama, and causes the increase in pore pressure beneath clay layer, resulting in the increase of earthquakes and ground inflation. In this presentation, we will further estimate the precise depth of earthquakes, and will investigate its relation to the shallow conductive layer.

## 精密水準測量で検出された霧島・硫黄山の上下変動(2012年3月～2016年11月)

### Vertical ground deformation of Ioyama, Kirishima volcanoes measured by precise leveling survey (during Mar. 2012 - Nov. 2016)

\*森田 花織<sup>1</sup>、松島 健<sup>1</sup>、内田 和也<sup>1</sup>、宮町 凜太郎<sup>1</sup>、手操 佳子<sup>1</sup>、藤田 詩織<sup>1</sup>、中元 真美<sup>1</sup>、清水 洋<sup>1</sup>、森 濟<sup>2</sup>、村瀬 雅之<sup>3</sup>、大倉 敬宏<sup>4</sup>、井上 寛之<sup>4</sup>、横尾 亮彦<sup>4</sup>

\*Kaori Morita<sup>1</sup>, Takeshi Matsushima<sup>1</sup>, Kazunari Uchida<sup>1</sup>, Rintaro Miyamachi<sup>1</sup>, Yoshiko Teguri<sup>1</sup>, Shiori Fujita<sup>1</sup>, Manami Nakamoto<sup>1</sup>, Hiroshi Shimizu<sup>1</sup>, Hitoshi, Y. Mori<sup>2</sup>, Masayuki Murase<sup>3</sup>, Takahiro Ohkura<sup>4</sup>, Hiroyuki Inoue<sup>4</sup>, Akihiko Yokoo<sup>4</sup>

1. 九州大学、2. 北海道大学、3. 日本大学、4. 京都大学

1. Kyushu University, 2. Hokkaido University, 3. Nihon University, 4. Kyoto University

Ioyama is an active volcano located in Ebino kogen volcanic area, Kirishima Volcanoes, southern Kyusyu, is activated from December 2015. We conducted the precise leveling survey in the Ebinokogen volcanic area from March 2012 to November 2016. The purpose of the survey is to reveal the vertical deformation and pressure source. We measured in December 2015, February, March, June, November 2016. Inflation of the Ioyama was detected from we initiated this observation to March 2016. Subsequently, the ground subsidence from around June 2016. However, uplift is detected around the Ioyama again in November 2016.

From the surveyed leveling data in November 2016, the vertical displacements indicate the ground uplift at all bench marks. In this study, the reference bench mark is BM1120 at the western flank of Ioyama. The amount of maximum uplift is about 17.2 mm near the summit referred to BM1120 in November 2016. We estimated pressure source models based on the vertical deformation. We supposed the presence of an inflation spherical source as Mogi's model, the depth has been inferred about 700 m. The lower limit of low resistivity layer assumed to be the clay layer is estimated in this depth (Aizawa et al., 2013). Accordingly, the inflation source by using precise leveling survey is located under the impermeable clay layer. In addition, the increase of pressure source volume since June 2015 is detected  $4.8 \times 10^4 \text{ m}^3$  in November 2016.

キーワード：硫黄山、精密水準測量、上下変動

Keywords: Ioyama, precise leveling survey, vertical deformation

# 霧島火山群，新燃岳2011年噴火に伴う火砕流の分布と産状

## Distribution and occurrence of the pyroclastic flow deposit of the 2011 eruption of Shinmoedake, Kirishima volcano group, Southern Kyushu, Japan

\*筒井 正明<sup>1</sup>、小林 哲夫<sup>2</sup>

\*Masaaki Tsutsui<sup>1</sup>, Tetsuo Kobayashi<sup>2</sup>

1. 株式会社ダイヤコンサルタント、2. 元鹿児島大学  
1. DIA Consultant Co., Ltd., 2. Kagoshima University

霧島火山群，新燃岳の2011年噴火は準プリニー式噴火であり，その最中にごく小規模な火砕流が発生した (Nakada *et al.*, 2013)．降下テフラの分布や特性については，噴火直後から多くの研究者や行政機関等によって調査が進められ，各種防災対策にも活用された．一方で，火砕流堆積物は到達距離も短く立入規制範囲内の山体斜面にとどまったため，迅速な現地調査は実施されなかった．著者らは，2016年8月に，火砕流堆積物の現地調査を実施する機会を得た．本報告では，その結果得られた火砕流堆積物の分布及び産状について予察的に報告する．

新燃岳2011年噴火の火砕流堆積物は，新燃岳南西側斜面の標高約1190 m～1120 m，幅約20～40 mのごく狭い範囲に分布する．堆積物の先端は，火口縁（標高約1380～1390 m）から直線距離で約800 m，比高差約260～270 mほどで，山体斜面勾配が10～11°程度の位置にまで達した．

火砕流堆積物が分布する直上の斜面（標高約1280 m～1180 m付近）では，火砕流が流下した両側に，比高0.5～1 m程度の堤防状の微地形が認められる．火砕流は流路沿いに自然堤防を残しつつ，本体は流下してしまったものと推定される．1280 mより上流側は火口に近く，テフラの降下や火山岩塊の着弾の影響もあるため，火砕流堆積物を確認するのは困難である．なお，火砕流が発生した方向へ追跡すると，火口縁の西南西～南西部付近に到達するが，この部分は新燃岳火口縁の最も低まった部分ではない．

火砕流堆積物の層厚は，周辺地形との比高から推定すると1～2 m（末端や周縁の一部はさらに薄く0.5～0.3 m）程度，ローブが重なっている箇所では2～4 m程度である．ただし，堆積域の旧地形は最大2 m程度の浅い谷地形を呈することが推定され，実際の層厚は最大で4～6 m程度となる可能性がある．なお，火砕流堆積物の周辺には，火砕サージの痕跡は認められない．

火砕流堆積物の流路中央部には立木はなく，倒木や小枝が多く散乱しているのは先端～下流部分である．また火砕流堆積物上の倒木は基底部分のみが炭化し，表面に散乱する倒木の樹幹や小枝はほとんど焦げていない．それゆえ，まず火砕流堆積物に取り巻かれた樹木の根元部分だけが炭化し，その後の火砕流の力によって炭化部で折れるように倒れたと推定される．その他，火砕流堆積物の下流側縁辺部では，立木を倒さずに取り込んでいる現象，火砕流に取り込まれた倒木や枝などが周辺の立木にダムアップして停止している現象，ダムアップした脇から一部が溢れるように下流側へと流下している現象が確認できる．

このような分布と産状から，火砕流は南西側の火口縁上に生じた噴煙柱の部分崩壊で形成され，山体斜面を低速で800 mほど流下しただけで停止・堆積したものと判断される．また，火砕流堆積物の分布（長さ300 m，幅30 m，平均層厚2 m）から，体積は約20,000 m<sup>3</sup>程度と推定される．

キーワード：霧島火山群、新燃岳、2011年噴火、火砕流、準プリニー式噴火

Keywords: Kirishima volcano group, Shinmoedake, 2011 eruption, pyroclastic flow, sub-plinian

## 空振アレイ観測によって捉えた桜島火山の空振活動推移：2015年 1月～12月

### Infrasonic activity of Sakurajima volcano in 2015, inferred from an infrasound array analysis.

\*菅野 洋<sup>1</sup>、市原 美恵<sup>1</sup>、リペペ マウリチオ<sup>2</sup>、ラカンナ ジョルジオ<sup>2</sup>、井口 正人<sup>3</sup>

\*Yo Kanno<sup>1</sup>, Mie Ichihara<sup>1</sup>, Maurizio Ripepe<sup>2</sup>, Giorgio Lacanna<sup>2</sup>, Masato Iguchi<sup>3</sup>

1. 東京大学地震研究所、2. フィレンツェ大学地球物理学科、3. 京都大学防災研究所火山活動研究センター

1. The Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. The Department of Earth Sciences, University of Florence, 3. Sakurajima Volcano Research Center, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

桜島では2009年以降、年間1000回近くの頻度で爆発的噴火が発生し、空振計、地震計、傾斜計、伸縮計、GNSSなどの地球物理学的連続観測によって火山活動の把握が行われてきた (Iguchi et al., 2013). 2015年8月15日には、それまでと異なるマグマ貫入イベントが発生し、その時期を挟んで噴火の頻度が低下するなど、活動状態の変化が報告されている。本稿では、空振計アレイによって捉えた2015年1月から12月の空振活動について報告する。

2014年10月に、高峠高原の鹿児島大学演習林内 (桜島昭和火口から南東に11 km, 高度540m)に空振アレイ (TKT)を設置した。アレイは4要素からなり、1辺が約200 mの三角形の各頂点と中央に配置した。このうち、3点は差圧計とデジタイザのみを設置して太陽光パネルにより電源供給を行い、1点は商用電源を引いて、差圧計・デジタイザと併に、全観測点のデータ収録とデータ送信のための中心観測点とした。各観測点からのデータは、サンプリングレート50 Hzで光ファイバーケーブルによって中心観測点に送られる。光ファイバーケーブルは、動物による影響をさけるために保護管に通し地下20-30 cmに埋設した。しかしながら、厚い腐葉土に覆われた起伏の激しい観測点付近では、降雨による地表面の流出や、それに伴うケーブルの露出、動物の影響を避けきれず、設置後約1年半で通信不能となってしまった。今回は、断続的に電源不良等による欠測のあるものの、連続的にデータを取得することができた2015年1月から12月までのデータを解析した。

得られた空振データに対して、メディアンフィルター処理、トレンド除去を行った後、0.3-5 Hzのバンドパスフィルターを施した。まず、気象庁による桜島噴火観測表を基に、爆発記録時間から前後15分のTKTにおける記録を切り出し、解析長10秒にて時間を5秒ずつ変化させながら、連続的にセンブル解析を行い、イベント検出と到来方向を推定した。

その後、各観測点に関して、遅延時間が昭和火口から到来した場合のものと仮定したときの相互相関関数を1秒毎に計算し、5分間の移動平均を施し、2015年1月から12月の空振活動を推定した。

気象庁によって報告されている2015年爆発記録737回のうち、636回の爆発がTKTの稼働中に発生し、その全てについて空振が観測されていた。気象庁瀬戸観測点での空振記録が最も小さかったもの(1.3 Pa)でも、桜島方向(300°N)から有意にシグナルが到来していることを確認した。また、振幅の大きい爆発の場合、Yokoo et al. (2014) で指摘されているように、観測周辺の地形からの反射波が到来していることも確かめられた。反射波は主に180°Nから130°Nから到来しており、これらは高峠南・南東の横岳・高隈山からの反射波と考えられる。また、80°N方向からの反射波は比較的弱く、これらは串良川方向で、周囲より標高が低くなっているためだと考えられる。次に、相互相関関数を用いて、桜島からの空振エネルギーを連続的に解析した。桜島から到来する微弱な空振活動と、観測点付近のノイズを区別するために、先述の反射波の弱い串良川方向 (80°N)から到来することを想定したエネルギーを参考値とした。この結果、爆発・噴火記録の合間にも、微弱な空振活動が間欠的または連続的に記録されている時期があることがわかった。このような微弱な空振活動は2015年6月ごろまで、噴火間に活発に発生するが、7月以降はほとんど見られなくなる。今後は、桜島近傍の観測点のデータや、昭和火口内撮影

動画などと組み合わせて、TKTで記録された噴火間の微弱な空振活動時にどのような表面現象が対応しているのかを明らかにし、さらに噴火周期や規模にどの程度影響しているのかを検討していきたい。

キーワード：火山噴火、桜島昭和火口、空振アレイ観測

Keywords: Volcanic eruption, Sakurajima Showa Crater, Infrasound array analysis

## 可視映像解析による桜島昭和火口におけるブルカノ式噴火の衝撃波及び噴煙の時間関係

### Time variations between shock wave and a subsequent formation of bright cloud at Vulcanian eruptions of Showa crater, Sakurajima volcano, Japan

\*村松 弾<sup>1</sup>、相澤 広記<sup>1</sup>、横尾 亮彦<sup>2</sup>

\*Dan Muramatsu<sup>1</sup>, Koki Aizawa<sup>1</sup>, Akihiko Yokoo<sup>2</sup>

1. 九州大学、2. 京都大学

1. Kyushu University, 2. Kyoto University

To investigate mechanism of Vulcanian eruption, we analyzed eruption movies (30 frame/s) of Showa crater, Sakurajima volcano, Japan. 88 eruptions during December 2011 to May 2015, which accompanied variable infrasound wave, were selected for an analysis. First, we investigated the relationship between an intensity of infrasound and a speed of volcanic plume at the crater. Maximum amplitude of infrasound data observed at Seto and Arimura stations (JMA) shows positive correlations with the ejection speeds of volcanic plume. This result thought to be consistent with preceding vulcanian eruption models (Turcotte et al., 1990; Woods, 1995; Alatorre-Ibargüengoitia et al., 2010) which shows ejection speeds increase if overpressure in the conduit increase. Second, we investigated the time lag between an onset of visible shock wave and a subsequent formation of bright (white) cloud close to the crater. The obtained time lag varies from 0.2 to 1.1 s with maximum frequency 0.6s, and may be related with the variation of size and/or the location of "gas pocket" (e.g., Ishihara, 1985; Iguchi et al., 2008) formed under the crater just before the explosion at Sakurajima.

# 桜島火山で観測されている相対重力連続データのリアルタイム解析 Real-time analyses of continuous relative gravity data collected at Sakurajima Volcano

\*風間 卓仁<sup>1</sup>、山本 圭吾<sup>2</sup>、井口 正人<sup>2</sup>、福田 洋一<sup>1</sup>

\*Takahito Kazama<sup>1</sup>, Keigo Yamamoto<sup>2</sup>, Masato Iguchi<sup>2</sup>, Yoichi Fukuda<sup>1</sup>

1. 京都大学理学研究科、2. 京都大学防災研究所

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

重力連続観測は火山内部の質量移動をモニターするのに有効な手法の1つである。これまで日本の火山地域では絶対重力計FG5を用いた重力連続観測が行われ、火山活動に伴う振幅数マイクロガルの重力変化が検出されてきた (e.g., Kazama et al., JGR, 2015)。ただし、これまで検出されてきた重力変化は時定数数日以上のもものが多く、FG5の観測頻度の関係上、時定数1日未満の重力変化を精度良く検出することは困難であった。その一方で、他の測地データによると多くの火山で短い時定数の火山現象も確認されているため (e.g., Iguchi et al., JVGR, 2008)、重力観測でこのような短い時定数の火山現象が検出できれば火山内部の質量移動をより詳細に議論できると期待されている。

風間ほか (火山, 2016) はこの点に注目し、桜島火山南部の有村地域に可搬型バネ式相対重力計CG-3Mを設置し、2010年9月から1分間隔の重力連続観測を開始した。その結果、2015年8月15日の桜島膨張イベントに際し、時定数1時間、振幅-5.86マイクロガルの重力減少を捉えることに成功した。また、この重力変化は既存のダイク膨張モデルと整合的であり、このときのダイク内物質の密度が水程度に小さいことが指摘された。このように、相対重力連続観測では従来想定されていた観測精度 (~10マイクロガル) よりも小さい振幅で火山内部の質量移動を監視できる可能性がある。しかも、この連続観測データをリアルタイムで解析すれば、現在の火山活動状況を質量分布の関連から把握できると期待される。

そこで本研究は、風間ほか (火山, 2016) のデータ解析手法を応用し、桜島有村で収録されている相対重力連続データをリアルタイムに解析するシステムを構築した。このデータ解析システムでは、以下の一連の作業が1時間おきに自動で実行されている。(1) ノートパソコンで収録された相対重力および気圧の連続データをサーバーにアップロードする。(2) 京都大学に設置されたコンピューターに上記の連続データをダウンロードする。(3) 相対重力データに含まれている「潮汐重力変化」「気圧変化に伴う重力変化」「器械傾斜に伴う見かけ重力変化」を補正する。(4) 補正後の重力データを過去7日分だけ連結し、直線回帰によって器械ドリフトを補正する。(5) 収録・解析された連続データを描画し、ウェブサーバーにアップロードする。

2017年1月16日12時に本システムで描画された結果を示す。気圧値・重力生データ・補正済み重力値・器械ドリフト速度などが示されており、過去7日間の観測データを視覚的に把握できるようになっている。もしも火山内部で質量移動を伴うような火山活動が発生した場合には、補正済み重力値にステップ的变化が生じたり、器械ドリフト速度が変化したりする可能性がある。あるいは、2015年8月15日の膨張イベントと同様に、重力計付属の傾斜計で火山活動に伴う傾斜変化が観測される可能性もある。今後はこのデータ解析システムを継続的に維持することで、桜島火山の重力変化の監視に努めたい。

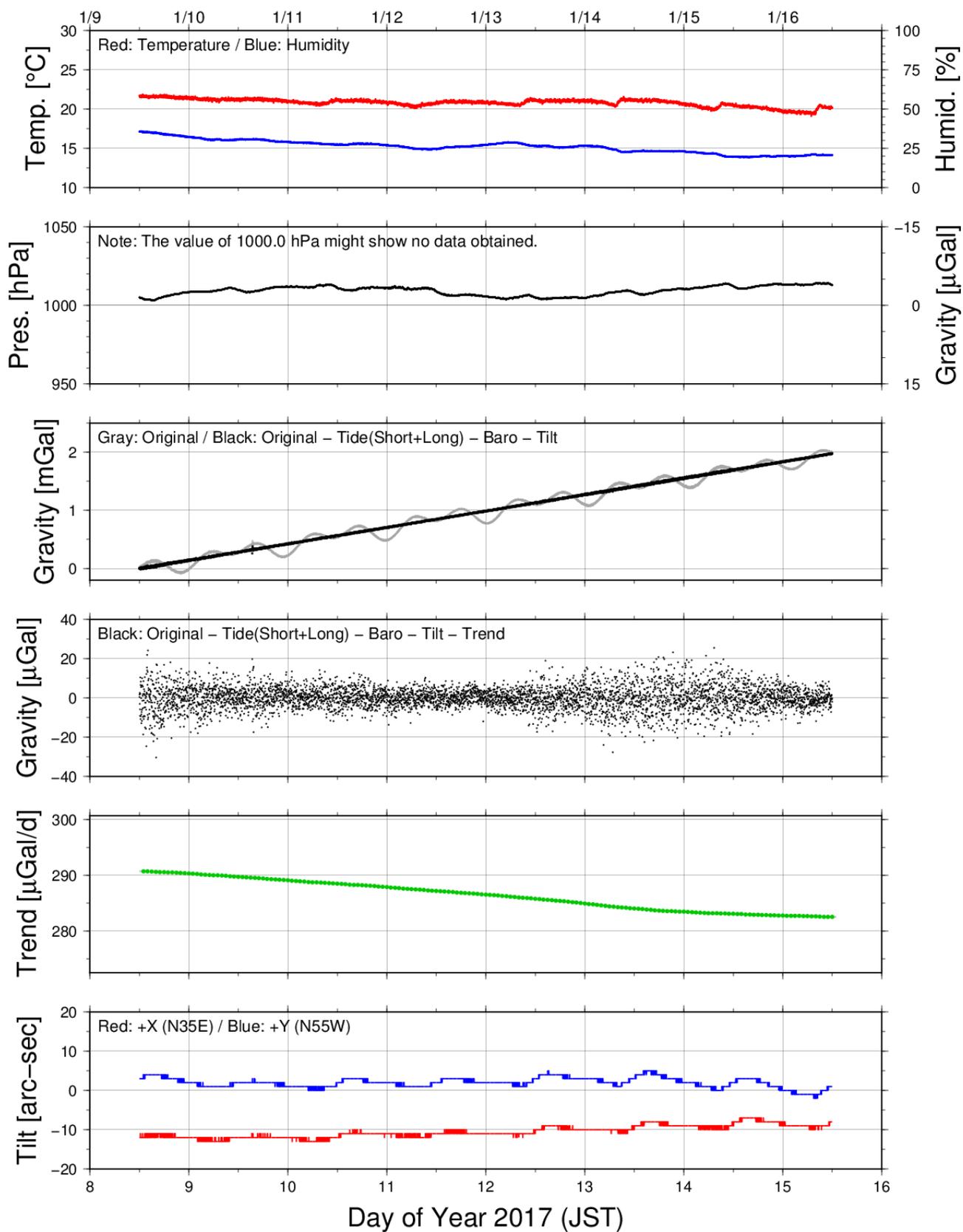
キーワード：桜島火山、火山活動、重力変化、相対重力計、質量分布

Keywords: Sakurajima Volcano, volcanism, gravity change, relative gravimeter, mass distribution

# CG-3M #9403248 at Arimura

Updated: 170116-1207

Last Data: 17011611.txt



## Structural state of plagioclases within volcanic ash from Sakurajima volcano: Preliminary investigation of monitoring volcanic activity by constituent mineral

\*松井 智彰<sup>1</sup>、丸本 啓介<sup>1</sup>、中村 美勇<sup>1</sup>

\*Tomoaki Matsui<sup>1</sup>, Keisuke Marumoto<sup>1</sup>, Miyu Nakamura<sup>1</sup>

1. 鹿児島大学教育学部地学教室

1. Department of Geology, Faculty of Education, Kagoshima University

Sakurajima volcano, one of the most active volcanoes in Japan, has seen an increase in the magnitude and frequency of activity over the past decade. This activity has been studied by many geophysicists, with most focusing on seismic waves and crustal movement that occurred nearby. Many geochemists have approached igneous activity from the viewpoint of whole-rock chemical analysis and mineral composition analysis of direct products, such as volcanic ash and lapilli, but few studies have applied crystallography in analysis. The goals of this study are to obtain basic data for understanding magmatism just under the Sakurajima volcano and to construct a new and efficient method for investigating and monitoring volcanic activity, focusing on the crystal structure of constituent minerals within the volcanic ash. Toward this second goal, the structural state of plagioclases within volcanic ash erupted from Sakurajima volcano was preliminarily investigated. Samples were collected for about 27 months starting in May 2013 at Higashi-Sakurajima Junior High School, which is located about 4 km southwest of Minami-dake crater. It is known that  $B(2\theta_{(1-11)} - 2\theta_{(-201)})$  versus  $\Gamma(2\theta_{(131)} + 2\theta_{(220)} - 4\theta_{(1-31)})$  for plagioclases, as determined from X-ray powder diffraction data, distinguishes among structural states and gives a rough estimate of plagioclase composition. The  $B/\Gamma$  plot measured for the plagioclases in the volcanic ash suggests a gradual change in degree of order in the crystal structure during this period. Further results from long-term analysis of volcanic ash are expected to clarify aspects of the volcanic activity of Sakurajima volcano.

キーワード : Sakurajima、 volcanic ash、 plagioclase、 X-ray powder diffraction、 structural state  
Keywords: Sakurajima, volcanic ash, plagioclase, X-ray powder diffraction, structural state

## 自動降灰観測装置の開発（その2）—距離計による降灰観測— Development of Unmanned Ash-fall Detection System, Part2

\*古川 竜太<sup>1</sup>、及川 輝樹<sup>1</sup>

\*Ryuta FURUKAWA<sup>1</sup>, Teruki Oikawa<sup>1</sup>

1. 産業技術総合研究所地質調査総合センター

1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

降灰量の即時観測は、刻々と変化する火山噴火の推移を把握するのに必要な観測であるが、それを効率よく行うには自動化が必要である。我々は噴火による降灰堆積量の準リアルタイム把握手法を開発し、噴火の進行状況を把握することによって噴火推移予測および過去の噴火堆積物からの噴火推移復元を高精度化することを目指して、自動降灰観測装置の開発を行っている。2011～2015年には霧島山新燃岳および桜島火山での観測を行い、噴火を検出することに成功した（古川・及川、2015連合大会）。2015～2016年には改良型の観測機器を投入して稼働実績を積んだので、その成果を報告する。

改良型の降灰観測装置「降ってる灰（かい）」は重量計、カメラ、距離計からなるセンサ部、バッテリーと太陽光発電パネルからなる給電部、それらを制御するコントロール部とデータを現地収容するロガー部、携帯電話回線を使うデータ通信部で構成した。新たに導入した距離計は超音波の反射により距離を測定するもので、地面との距離を測ることで降灰厚を測定することを試みた。旧型機に比べて、各部分の軽量化、小型化、省電力化を進め、太陽光パネルが機能しなくても1分に1回の測定を1週間程度観測を続けられることと、人力で機器を運搬設置できることを要求仕様とした。観測データは携帯電話のデータ通信機能を使ってつくば市のFTPサーバに送信・蓄積した。初期型では電子部品が火山ガスによって作動不良となる現象があったため、防滴構造を強化した。

2015年1月から2016年3月まで、桜島昭和火口から約2km南東の有村観測坑道前で観測を実施し、重量、堆積厚、およびカメラ映像を蓄積した。重量計は感度域が広く、消費電力の少ないものを導入したが、日周変化が大きく、温度依存性が強いことがわかった。距離計による堆積厚の測定は、短期間に1cm以上降灰するような噴火が発生せず、高時間分解能の堆積層厚変化は観測できなかった。また規則性のない外れ値（実測値より数倍以上ないし測定レンジ外）が散見されたが、この原因は不明である。1年間を通しては、約2cmの短縮（地表面のかさ上げ）が観測され、現地での実測値とよく一致する結果となった。現在は機器を撤収して、厚い降灰が予想される火山に持ち込める体制を準備している。

キーワード：無人観測、噴火、降灰、超音波、桜島

Keywords: monitoring, eruption, ash fall, ultrasonic, Sakurajima

## 口永良部島2015年噴火に伴う火砕流堆積物の特徴

### Pyroclastic flow deposit of the 2015 Kuchinoerabujima Volcano

\*下司 信夫<sup>1</sup>、伊藤 順一<sup>1</sup>

\*Nobuo Geshi<sup>1</sup>, Jun'ichi Itoh<sup>1</sup>

1. 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門

1. Geological Survey of Japan, The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

口永良部島火山新岳火口では2015年5月29日に強い爆発を伴うマグマ水蒸気噴火が発生した。この噴火では火口から全方向に火砕流が発生し、北西および南西方向に流下した火砕流はそれぞれ2km以上離れた海岸線まで到達し、一部はさらに海面を流走した。この火砕流の特徴として、厚いブロックアンドアッシュフロー堆積物は火口周辺のごく限られた領域にのみ分布し、流域のほとんどの場所では薄い堆積物のみがもたらされたことがあげられる。その一方、北西の向江浜方面に向かった流れでは、薄い堆積物のみが残されている場所でもほとんどの樹木が倒伏するほど強い流れが発生したことが直後の観察から推測された。火砕流流域ではほとんど森林火災が発生せず、また樹木の焼損も認められなかったことなどから、火砕流堆積物の温度はマグマ性の火砕流のそれに比べると低かったと推測されたが、火砕流で覆われた地域の樹木はほぼ枯死し、また縁辺部で巻き込まれた人が火傷を負う程度の温度があったことが推測された。

今回、火砕流の流下地域において、堆積物の分布、樹木の損傷状況、熱的影響の痕跡などを調査した。その結果、火砕流末端部では樹木の焼損などは認められなかったが、火砕流の流下地域において樹木の梢部分はほぼ完全に枯死しており、火砕流に直接さらされた部分では熱的な影響が強かったことが示唆された。樹木へのダメージは火砕流の流域に限られ、火砕流から舞い上がった噴煙からの降灰に覆われた地域にはそうした影響は認められなかった。また、火砕流に覆われた地域では、ナイロンロープなど低融点の物品に融けて変形しているものがみられた。火砕流末端部での堆積物は火口から約2kmの向江浜地区では層厚5cm未満の礫混じり火山砂層として残存している。堆積物には多量の樹枝や樹皮、葉の破片が取り込まれており、流路の樹林を破壊しながら火砕流が流下・定置したことを示している。向江浜地区での堆積物は基本的に上方に向かって細粒化し、基底部には最大粒径1.5cmの礫が含まれている。このような特徴は、高速で短時間の流れによって堆積物が運搬・定置したことを示しており、監視カメラ等の映像から推測された火砕流の挙動と整合的である。

キーワード：火山、噴火、火砕流、口永良部島火山、マグマ水蒸気噴火

Keywords: volcano, eruption, pyroclastic flow, Kuchinoerabujima Volcano, phreatomagmatic eruption

## 火口付近を中心とした気象庁の火山観測体制の強化

### Enhancement of volcanic observation system of JMA near the volcanic crater

\*中橋 正樹<sup>1</sup>

\*Masaki Nakahashi<sup>1</sup>

1. 気象庁地震火山部

1. Seismology and Volcanology Department, Japan Meteorological Agency

#### 1. はじめに

2014年9月27日に発生した御嶽山の噴火を受け、火山噴火予知連絡会「火山観測体制等に関する検討会」において活火山の観測体制強化のあり方が検討され、2014年11月に緊急提言が、2015年3月26日には最終報告が出された。それらを受け、気象庁では、火口付近での観測施設の整備や常時観測火山を追加するための観測施設の整備を行うとともに、水蒸気噴火の兆候をより早期に把握できる手法の開発に取り組むこととした。本発表では、気象庁が行った整備の概要やこれまで得られた観測データの一部について紹介する。

#### 2. 火口付近の観測施設の整備

水蒸気噴火の場合、一般的に噴火に先行する火山現象の規模が小さく、現象が見られる場所も火口付近に限られることが多い。気象庁では、全国48火山の火口付近において、(1)火口付近の熱や噴気の状態変化を捉えるための監視カメラ、(2)火山体内の火山ガスや熱水の流動等により発生する低周波地震・微動や地殻変動を捉えるための広帯域地震計・傾斜計を設置することとした。これらの火口付近の観測施設は、設置場所の標高が高く、強風や積雪等過酷な環境にさらされるものが多い。そのため、これらの施設について遠隔操作性・省電力性・耐雷性・耐風速性を高める工夫を行い、過酷な環境の中でも安定した運用が可能となるように努めている。

#### 3. 水蒸気噴火の兆候をより早期に把握できる手法の開発

過去の水蒸気噴火において、噴火に先行して、火山ガス成分の変化や地磁気の変化が捉えられたことを踏まえ、火山ガスや地磁気の観測装置を整備(火山ガスは4火山、地磁気は計画も含め6火山)についても観測を行い、データを蓄積し、水蒸気噴火の兆候を早期に把握する手法の開発に着手することとした。特に、火山ガスについては、気象庁が連続観測を実施するのは初めてであり、気象研究所、産業技術総合研究所の協力も得つつ、観測装置の整備にあたった。

#### 4. 得られた観測データの一例

これまでの観測により、御嶽山で2016年9月27日に火山性微動に伴う長周期振動およびわずかな傾斜変動が捉えられた。また、2016年10月8日の阿蘇山の噴火においては、熱映像監視カメラで噴火の瞬間を捉えることができた。今後、新たに設置した観測施設を活用しながら、よりの確な火山活動評価ができるよう、解析技術などの高度化にも取り組んでいく必要がある。また、得られた観測データについては、今後、研究機関に対してもデータ公開を行うこととしており、様々な研究に活用されるとともに、その成果が気象庁の火山活動評価にフィードバックされることを期待する。

キーワード：水蒸気噴火、傾斜計、広帯域地震計、可視・赤外カメラ

Keywords: phreatic eruption, tiltmeter, broadband seismometer, infrared and visible light cameras

# ALOS-2/PALSAR-2差分干渉解析による国内の活火山周辺における地殻変動（2014年度～2016年度）

## Ground Deformation around Domestic Active Volcanoes detected by D-InSAR of ALOS-2/PALSAR-2 (2014 -2016)

\*鎌田 林太郎<sup>1</sup>、安藤 忍<sup>2</sup>、奥山 哲<sup>3</sup>、兒玉 篤郎<sup>1</sup>、木村 一洋<sup>1</sup>

\*Rintaro Kamata<sup>1</sup>, Shinobu Ando<sup>2</sup>, Satoshi Okuyama<sup>3</sup>, Tokuro Kodama<sup>1</sup>, Kazuhiro Kimura<sup>1</sup>

1. 気象庁地震火山部、2. 気象研究所地震津波研究部、3. 気象研究所火山研究部

1. Seismological and Volcanological Department, Japan Meteorological Agency, 2. Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research Institute, 3. Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute

地殻変動による火山活動の監視は噴火の予兆を捉える有用な手段の一つである。気象庁では、活火山周辺に傾斜計や光波測距、GNSS等の観測機器を設置し、地殻変動による火山活動の監視を行い、地下でのマグマや熱水の移動や蓄積等の把握に努めている。しかし、これらの地上設置型の観測手法のみを用いる場合、捉えることが可能な地殻変動は観測点での傾斜変動や観測点間の相対位置など点の情報に限定される。また、人里離れた山奥の火山で交通や電源、通信等のインフラが十分に整っていない火山や豪雪地帯の火山では観測機器の設置や維持管理が難しく、十分な観測体制がとられていないケースも存在する。さらに火山活動が活発化した場合には監視を強化する必要があるが、火山周辺に立ち入ることができない場合には観測機器も設置できない。このような状況で火山活動の監視を強化する手段の一つとして、面的な地殻変動の把握が可能なSAR（Synthetic Aperture Radar, 合成開口レーダー）の活用が有効である。

陸域観測技術衛星「だいち2号（ALOS-2）」に搭載された合成開口レーダー（PALSAR-2）は、先代の「だいち1号（ALOS）」同様、地表面の状態把握に優れたLバンド波長帯を有しており、干渉性が高く面的な地殻変動観測に有効である。また、ALOS/PALSARよりも空間分解能が高く、回帰日数も14日と格段に短くなり、左右観測も可能となったことなどから、より多くの情報量を高頻度で得ることが可能になった。気象庁及び気象研究所では、国内の活火山周辺のALOS-2/PALSAR-2データを用いた干渉解析や強度画像比較を行い、それらの解析結果を火山活動評価に利用されるとともに、噴火警報発表時の判断材料の一つとしても活用され、重要な役割を果たしている（火山噴火予知連絡会衛星解析グループ、2016）。本発表では、気象庁及び気象研究所で実施した国内全ての活火山周辺におけるALOS-2/PALSAR-2差分干渉解析の長期ペア（2014年～2016年）の結果について紹介する。本発表には、霧島山えびの高原（硫黄山）、御嶽山、九重山等で火山活動に伴う地殻変動、2016年10月阿蘇山噴火に伴う降灰によると考えられる非干渉領域を検出した結果等が含まれる。これらの結果は、2014年～2015年の結果（安藤・他、2016）と同様に、火山噴火予知連絡会に報告され、国内の火山活動の評価に大きく貢献している。

本解析で用いたPALSAR-2データは、火山噴火予知連絡会が中心となって進めている防災利用実証実験（衛星解析グループ）に基づいて、宇宙航空開発機構（JAXA）にて観測・提供されたものである。また、一部のデータはPIXELで共有しているものであり、JAXAと東京大学地震研究所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。PALSAR-2の解析ソフトウェアは、防災科学技術研究所の小澤拓氏により開発されたRINCを使用した。また、処理の過程や結果の描画においては、SRTM 90m Ver4.1の数値地図を元にしたDEHM及び国土地理院の数値地図10mメッシュ（標高）を元にしたDEHMを使用し、地図の描画にはGMTを使用した。ここに記して御礼申し上げます。

キーワード：ALOS-2/PALSAR-2、干渉SAR、国内活火山

Keywords: ALOS-2/PALSAR-2, InSAR, Domestic Active Volcano

# 干渉SAR解析によって検出される水蒸気噴火発生場の局所的地殻変動

## Locally distributed crustal deformation in potential areas of phreatic eruptions detected by InSAR analyses

\*小林 知勝<sup>1</sup>

\*Tomokazu Kobayashi<sup>1</sup>

1. 国土交通省国土地理院

1. GSI of Japan

水蒸気噴火はマグマからの加熱に伴う浅部熱水系の過渡的な圧力増加が関連すると考えられる。このことは、地殻変動が地下の圧力増加に伴い進行し、噴火の前兆シグナルとなり得ることを意味する。このとき観測において最も困難な点の1つは、噴火規模が小さくなるにつれ、その前兆シグナルも局所的になり得るということであり、標準的な地上観測から空間スケールの小さな異常を検出することは非常に難しくなる。それゆえ、水蒸気噴火に対する効果的な観測方法が望まれるが、その短所を克服するツールの1つがSARによる観測である。本発表では、最近もしくは歴史的に水蒸気噴火を起こしたことのある火山の地熱地帯で検出された局所的な膨張性地殻変動のSAR観測結果を振り返り、その特徴をまとめ議論する。

箱根山・大涌谷：2015年4月下旬頃からの火山活動の活発化に伴い、SAR干渉解析により大涌谷内の直径200m程度の狭い範囲で膨張性的変動が捉えられた。ほぼ同心円状の分布を示していた地殻変動は、6月末の小規模噴火まで変動域の空間サイズに大きな変化はなかったが、その変位のピークは初期の変動域の南西側に移り、噴火はそのピーク周辺で発生した。このイベントで重要な点は、噴火に前駆して進行する局所的な地殻変動を検出できたこと、そしてまさにその場所で噴火が開始したことである。箱根山では、過去にも火山活動の活発化が見られてきたが、そのときの大涌谷の地殻変動を知ることは、噴火と地殻変動の関連を考察する上でも重要である。過去の活動のうち、2008年後半の活動はALOS（LバンドSAR）による干渉SAR解析が可能である。干渉SAR時系列解析を適用した結果、この時の活動期間中、有意な地殻変動は検出されなかった。大涌谷では2001年、2015年に噴気活動に異常が見られたが、それ以外では特段認められていない。2008年の活動では、地下深部からの熱供給に伴う浅部の圧力増加が進行しなかったことを示唆していると思われる。発表では、海外のSAR衛星（Cバンド）を用いて、他の過去の活動における地殻変動解析の結果についても報告する予定である。

立山・弥陀ヶ原（地獄谷）：地獄谷は噴気活動が定期的に活発な場所であるが、2010年に鍛冶屋地獄の硫黄が燃焼・流出し、以降、地表での熱・噴気活動が活発化している。2007年から2010年までのALOSデータを用いた干渉SAR時系列解析の結果、地熱活動の活発な地獄谷の領域で、有意な膨張性地殻変動が検出された。地殻変動は、現在活発な噴気・熱水活動が地表で見られる領域とほぼ一致しており、その値は最大約4cm/yrに達していた。大きな変動が見られる場所は、地表での噴気活動が最も活発な領域（鍛冶屋地獄より東側）に認められ、地表面象と地殻変動の空間的一致が大変良い。これに加えて、ALOS-2による干渉SARを実施したところ、2014年から2016年に至っては、ノイズレベルを超える有意な変動は観測されなかった。現在も地表での熱・噴気活動は活発化した状態のままであるが、加速度的な変化は特段認められておらず、地下浅部の圧力等に大きな変化がなかったことが地殻変動の観測結果に現れているかもしれない。

地表で観測される噴気や熱活動の異常は、地下浅部の熱水系システムの状態変化を直接的に反映していると考えられる。これらの活動変化とSARによる局所的な地殻変動の時空間的な関係は良く対応しているように見える。こうした変動データは、地下の圧力状態等を把握する重要な指標となり、水蒸気噴火に関与する物理パラメータを抽出できることが期待される。発表では、上記以外の火山（霧島山（えびの高原 硫黄山）等）の解析事例も紹介し比較検討を試みる。

謝辞：これらのデータは、だいち2号に関する国土地理院とJAXAの間の協定及び火山噴火予知連絡会衛星解析グループ（火山WG）を通じて、（国研）宇宙航空研究開発機構（JAXA）から提供を受けました。ここで使用しただいち2号の原初データの所有権は、JAXAにあります。本研究はJSPS科研費 JP16K17797 and JP25350494の助成を受けたものです。

キーワード：水蒸気噴火、InSAR、局所的地殻変動

Keywords: phreatic eruption, InSAR, local crustal deformation

## 溶岩流地形を用いたマグマ噴出時の粘性率の推定

### Estimation of viscosity of erupting magma from lava flow morphology

\*岡崎 健人<sup>1</sup>、鍵山 恒臣<sup>1</sup>

\*Taketo Okazaki<sup>1</sup>, Tsuneomi Kagiya<sup>1</sup>

1. 京都大学大学院理学研究科

1. Graduate School of Science, Kyoto University

火山の噴火形式はマグマの粘性率に大きく左右されている。例えば揮発性が大きいマグマの場合、粘性率が高いとプリニー式の噴火が発生しやすく、逆に粘性率が低いと溶岩噴泉を形成するハワイ式の噴火が発生しやすい。そのため、火山の噴火活動を研究する上で噴出したマグマの粘性率を調べることは有意義なことである。

溶岩流の粘性率は温度(Minakami et al., 1951)や岩石組成(Shaw, 1972)等、様々な要因によって変化するが、本研究では火山噴火によって形成された溶岩流地形の地形学的特徴に焦点を当て、そこから噴出時の粘性率を推定する手法を確立し様々な火山で噴出時の粘性率を復元することを目的としている。溶岩流地形から求める手法におけるメリットは、噴出速度や噴出時の温度といった噴出時に直接観測しないと得られないデータを用いることなく計算できるため過去に噴出した数多くの溶岩流に対して適用できるという点にある。

厚さや幅といった溶岩流地形の物理学的パラメータから粘性率を求める手法はStevenson et al. (1994)によって提示されている。本研究では最初にこの手法の有用性を調べるために、地震研究所が公開している溶岩流シミュレーション(安田他, 2013)を利用した。このシミュレーションはIshihara et al. (1990)によって提示されている手法を用いている。このシミュレーションの結果から地形パラメータを読み取り、Stevensonの式から粘性率を計算し、噴出時に設定した温度からMinakamiの式によって計算される本来の値と比較した。その結果、Stevensonの手法によって得られる値は本来の値よりずれた分布を示し、また設定した粘性が高すぎると計算途中でエラーが発生して上手く計算できないことも判明した。

次にこの手法の問題点を解決するべく、新しい手法で粘性率の推定を試みた。今回用いたのは溶岩流の厚さを溶岩流の面積の平方根で割ることで得られるアスペクト比である。先程と同じシミュレーション結果からアスペクト比を計算し、噴出時の温度による粘性率および地面の傾斜との関係式を導いた。またこの関係式を実際の溶岩流地形にも適用し、その有用性を確かめた。検証がまだ不十分なところがあるものの、アスペクト比を用いる手法は地面の傾斜および溶岩流の性質によらず安定して有意な結果を得られるため、今後様々な場所で適用して粘性率を計算することが期待できる。

キーワード：溶岩流、マグマ、粘性率、アスペクト比

Keywords: lava flow, magma, viscosity, aspect ratio

## 連成解析による爆発地震初動の数値的検討

### Numerical study on the onset of explosion earthquakes

\*山田 大志<sup>1</sup>、青山 裕<sup>2</sup>

\*Taishi Yamada<sup>1</sup>, Hiroshi Aoyama<sup>2</sup>

1. 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、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

1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University

ブルカノ式噴火に伴い発生する噴火地震は、爆発地震とも呼ばれる。爆発地震の波形解析によって、噴火機構を理解する上で重要な知見が多く得られている。多くの火山では、爆発地震の初動極性は全観測点において押しの極性を示すという特徴が報告されている(例えば、Minakami, 1960)。震源の深さは、火口から深さ数キロの領域に推定される場合が多い(例えば、今井, 1980)。発震機構に着目すると、体積変化で観測波形を説明している研究(例えば、Tameguri et al., 2002)もあれば、鉛直方向のシングルフォースで観測波形を説明している研究もある(例えば、Ohminato et al., 2006)。しかし、地震波解析で推定されるメカニズムが反映するのは、あくまで震源域の巨視的な力系までであり、地震波を励起する火道内の物理過程を一意に推定することは容易ではない。

ブルカノ式噴火に伴うマグマの破碎現象は、衝撃波管問題を応用したモデル化がなされている(例えば、Woods, 1998)。そこで、爆発地震の波形的特徴に関連する知見を得る目的で、我々は衝撃波管問題を弾性媒質内で解き、管内衝撃波の生成と同時に励起される周辺変位場の数値計算を行った。計算には、数値流体計算ツールであるOpenFOAMを用いた。圧縮性流体と弾性体の連成解析が行えるよう、公開されているソルバーに独自の改変を加えた。基礎的な知見を得るという目的から、管内の流体は非粘性の理想気体に限定している。計算には、半径20 m、地表から深さ4 kmまで伸びる鉛直な円柱管を仮定し、その周囲およそ4 kmの領域で弾性変位場を計算した。初期状態での管内のdiaphragm(圧力不連続面)の位置は、爆発地震の震源の深さを参考に地表面下の1 km付近に設定した。diaphragmでの圧力差は、ブルカノ式噴火の爆発圧力を参考に数MPaの範囲に設定し、下部に高压流体が封入されている初期状態を仮定した。

計算では、管内圧力が初期値より増加した領域の深さ(diaphragmよりも上部)において、押しの変位が励起されている。反対に、管内圧力が初期値よりも減少する領域の深さ(diaphragmよりも下部)では、引きの変位が励起される。計算開始と同時に、diaphragm近傍の流体-弾性体境界から弾性波が伝搬する。弾性波には、水平面から見て上向きに約30°の方向に初動極性の節面が形成される。節面よりも上側には押しの初動極性、節面よりも下側では引きの初動極性を示す波動場がそれぞれ伝搬する。この初動極性の節面構造を反映して、弾性管に近い領域の地表面では、押しの初動極性を示す変位波形が得られる。一方、弾性管から遠い領域では、変位波形の初動極性は引きの性質を示す。管内では、diaphragmよりも上側での増圧量と下側での減圧量の振幅比は、およそ1:2程度となる。初動極性の節面の角度は、管内の圧力変動の増圧/減圧比を反映しているのかもしれない。

Lokon-Empung火山での爆発地震(Yamada et al., 2016)を例に、観測波形と計算結果の特徴を比較する。爆発地震の初期位相の震源は、火口から約1 kmの深さに推定されている。爆発地震の初動極性は、火口から1.7-6.9 km離れた範囲に設置した全観測点において押しの極性を示す。計算では、地表から深さ1 kmの領域にdiaphragmを仮定した場合には、火道を模した弾性管から1.5 km程度までの範囲の地表面では、観測波形に特有の押しの初動極性が再現された。一方で、より遠くの地点では、初動極性の節面が地表と交差するため、地表での変位波形に押しの初動極性は見られない。実際の噴火では、我々の単純な数値計算では表現されていない過程が存在しているのかもしれない。また、実際のブルカノ式噴火においては、長くても数十秒程度しか噴

出が継続しないが、本計算では管内の流体を理想気体と仮定していることから、噴火の終了を再現できない。この噴火を止める機構を計算に取り入れることで、初動極性だけではなく、後続相に対しても計算結果と観測波形との比較検討ができる可能性がある。

キーワード：ブルカノ式噴火、衝撃波管問題、OpenFOAM

Keywords: Vulcanian eruption, shock tube, OpenFOAM

# 流体で満たされたクラックの共鳴周波数の一般化解析式

## A generalized equation for the resonance frequencies of a fluid-filled crack

\*前田 裕太<sup>1</sup>、熊谷 博之<sup>1</sup>

\*Yuta Maeda<sup>1</sup>, Hiroyuki Kumagai<sup>1</sup>

1. 名古屋大学

1. Nagoya University

火山で発生するLPイベントのモデルとして流体で満たされた矩形クラックの共鳴振動(クラックモデル; Chouet, 1986, JGR)が広く用いられてきたが、その解析解は知られていない。我々は過去の研究においてクラックモデルの周波数が以下の式でよく近似できることを経験的に見出した(Maeda and Kumagai, 2013, GRL)。

$$f_m = (m-1)a / \{2L_x [1 + 2\varepsilon_m C_x]^{1/2}\} \quad (1)$$

ここで $a$ は流体の音速、 $L_x$ は波の伝播方向のクラック長、 $m$ は波長 $2L_x/m$ によって決まるモード次数、 $C_x$ はクラック形状と流体・弾性体の物性によって決まるcrack stiffnessと呼ばれる無次元数、 $\varepsilon_m$ はクラックのアスペクト比 $\chi$ とモード次数 $m$ に依存する経験定数である。(1)式を用いれば共鳴周波数を簡便に計算できると期待されるが、そのためにはクラックのアスペクト比とモード次数ごとに $\varepsilon_m$ の値を数値的に推定しなければならず、この困難ゆえに(1)式がLPイベントの解釈に広く用いられるには至っていない。

本研究では(1)式の理論的背景を検討した。クラックの壁の変位と流体圧力との比がクラック端近傍で端からの距離の平方根に比例すると仮定することにより、共鳴周波数が

$$f_m = (m-1)a / (2L_x l_m) \quad (2)$$

$$l_m = (1 - 4\gamma/5m)J_m(g_{m0}C_x) + (16\gamma/15m)[1/K_m(g_{m0}C_x) + 1/K_m(g_{m0}C_x)^2] \quad (3)$$

と書けること、(1)式はその良い近似(ずれ $\leq 2\%$ )になっていることが理論的に示された。ここで $J_m(\xi) = (1 + 2\xi)^{1/2}$ ,  $K_m(\xi) = J_m(\xi) + 1$ ,  $\gamma = 0.22$ であり、 $\chi > 4\gamma/m$ のとき

$$g_{m0} = (1 - 4\gamma/3m\chi) / (3m - 4\gamma) \quad (4)$$

$\chi < 4\gamma/m$ のとき

$$g_{m0} = (2/3)(m\chi/4\gamma)^{1/2} / (3m - 4\gamma) \quad (5)$$

である。(4)(5)式の定数 $g_{m0}$ と(1)式の $\varepsilon_m$ の間には $\varepsilon_m = g_{m0}(3m - 4\gamma)/(3m)$ の関係が成り立つ。

(2)-(5)式はクラックモデルのパラメータとモード次数のみを用いた閉じた関係式になっており、経験的に求めなければならない定数を含んでいない。したがってこの式を用いれば任意の矩形クラックについて共鳴周波数を解析的に求めることができる。様々なパラメータでクラックモデルの数値計算を行い(2)-(5)式の値と比較したところ周波数の差は5%以内であった。これらの式を用いればクラックモデルの共鳴周波数を極めて容易に計算できるため、LPイベントの観測周波数との比較を通してソースプロセスの定量的理解の進展につながると期待される。

キーワード：LPイベント、共鳴振動、クラック

Keywords: LP event, Resonance, Crack

## 泡の膜の振動の音の解析

### Analysis of sound generated by the vibration of a bubble film

\*山河 和也<sup>1</sup>、市原 美恵<sup>1</sup>

\*Kazuya Yamakawa<sup>1</sup>, Mie Ichihara<sup>1</sup>

1. 東京大学地震研究所

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

#### 前書き

火山における脱ガスの形式には、浸透流などによるPassive degassingや気泡形態などを介するActive degassingが提案されている。Active degassingは計測可能な空振を伴い、泡の空振からガス流量を決める研究が行われている(Vergnolle and Brandeis, 1996; Johnson et al., 2008; Bouche et al., 2010)。泡は様々なメカニズムで音を出す、ガス流量推定では、ある特定のメカニズムが仮定されている。このため、観測データから特定のメカニズムの信号を抜き出す必要があるが、メカニズムと波動の特徴を対応づけるための理解は十分ではない。本研究では、泡の音からどのような火山活動情報が得られるのかを詳しく知るため、室内実験の泡音をカメラ映像と比較し、また泡音のモデル計算を行うことで、泡の音の特徴と発生メカニズムを調べた。

#### 実験概要と観察結果

泡の音の発生メカニズムや特徴は、流体のレオロジーによって異なることが知られている。本研究では先行研究(Lyons et al., 2013)で使用された非ニュートン性流体を用いる。流体の下から一定流量で空気を送り込み、発生した泡の挙動をハイスピードカメラで撮影し、発生する音を流体の直上に設置したマイクを用いて記録した。

カメラ映像と音波データを比較した結果を記す。主要な音波発生過程は、(1)泡がノズルから離れるとき、(2)泡が液内から液表面へ上昇するとき、の2つだった。本実験では泡が破裂するときの音は信号として観測されなかった。(2)の信号には明瞭な特徴が見られた。これに注目してどのような情報が読み取られるのかを考えた。その特徴を以下にまとめる。

周波数の特徴：周波数が時間とともに高くなる。

振幅の特徴：単純なイベントでは紡錘形の振幅変化が起こり、泡の全体積の半分から2/3程度が表面に出ている時に最大振幅になることが多い。最大振幅は必ずしも泡の半径に比例しない。最大振幅の後には振幅の急減衰があり、液膜にものが触れた時にも対応する振幅の急減衰があった。泡が割れると振幅の減衰が早まった。割れた状態で液表面を上昇する泡の音の振幅はかなり小さい。泡の合体などの液内で振動が励起されるイベントが発生した泡が表面に出た時に大きな音を出した。

#### モデル計算

泡の膜が振動することによって発生している(2)の音について、典型的なイベントを数値モデルで再現することを試みた。同じメカニズムを議論した先行研究(Vergnolle and Brandeis, 1996)を参考に球殻の振動方程式を組み立て、さらに泡膨張に伴う励起項を取り入れた。観測点が遠地であると仮定して、Blackstock(2000)を参考に球殻の微小変位から観測圧力へ変換した。

泡の表面に出ている部分をhead、液内に残っている部分をtailと呼ぶことにする。解析によって、泡の音の変化を時系列順に(A)headの上昇、(B)tailの吸収、(C)形状安定、という3つの過程に分けると、(2)の音の典型例が再現できることが分かった。泡の振動は基本的に減衰振動であるが、(A)、(B)でheadの半径が成長している時に限り振動が成長した。観測圧力はheadの体積と微小変位の加速度に比例するため、head成長時には増大、成長終了時には減衰する紡錘形の振幅変化となった。泡の上昇や形状変化をモデルに取り入れることで外部励起がなくても振動が起こることが確認された。初期に振動を発生する条件を与えた場合では、振幅変化の特徴は同じだが振幅の絶対値が大きくなる波形が出力された。

以下がモデルから示唆された。液内にいる時に振動が励起されていることが、十分な振幅の音を発生する重要な条件である。周波数の変化は(A)ではheadとtailの体積分率が支配的、(B)ではheadの体積が支配的、(C)では泡

の膜厚変化が支配的である。

#### 考察と今後の課題

液体表面での泡の振動音の特徴から、泡の体積を推定することができるかどうか考察する。振幅は、泡が表面に顔を出した時の状態によって大きく異なる。従って、音の強度をそのまま体積に直すことはできない。周波数の変化は、次第に高くなることがこのメカニズムによる音の特徴である。振動初期の周波数変化はheadの半径の変化によるものと考えられるので、それから泡の体積に関する情報を得ることができるかもしれない。今後、検討していきたい。

キーワード：泡、音、火山

Keywords: bubble, sound, volcano