

精密水準測量で検出された霧島・硫黄山周辺の地盤上下変動 (2012年~2016年)

Precise Leveling survey around mount Io, Kirishima Volcano (2012 - 2016)

*松島 健¹、内田 和也¹、宮町 凜太郎¹、藤田 詩織¹、中元 真美¹、森 濟²、村瀬 雅之³、大倉 敬宏⁴、井上 寛之⁴

*Takeshi Matsushima¹, Kazunari Uchida¹, Rintaro Miyamachi¹, Shiori Fujita¹, Manami Nakamoto¹, Hitoshi Y. Mori², Masayuki Murase³, Takahiro Ohkura⁴, Hiroyuki Inoue⁴

1.九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、2.北海道大学大学院理学研究科 附属地震火山研究観測センター、3.日本大学文理学部 地球システム科学科、4.京都大学大学院理学研究科 附属地球熱学研究施設

1.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 2.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University, 3.Department of Geosystem Sciences, College of Humanities and Sciences, Nihon University, 4.Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

はじめに

2011年の九州南部にある霧島・新燃岳のマグマ噴火以来、霧島連山の火山活動は静穏な状況が続いていたが、2013年12月以降新燃岳から北西に約5km離れたえびの高原(硫黄山)周辺で火山性地震の発生が多くなり、2014年8月には硫黄山付近を震源とする火山性微動が発生し、同時に傾斜変動も観測された。さらに2015年12月からは硫黄山山頂部に地熱地帯が出現し、火山性ガスの噴出も始まった。

硫黄山は16~17世紀にえびの高原東部に噴出したデイサイト質の溶岩からなる溶岩流の噴出孔で、山頂部では1962年まで硫黄の採掘も行われていたが、近年は急速にその火山活動が衰えていた。

霧島火山地域においては、1968年に水準路線が東京大学地震研究所により設置され、その後何度か測定が行われてきており、硫黄山の収縮沈降現象が観測されている(小山他, 1991, 火山学会B06)。小澤他(2003, 火山第48巻)は干渉SARを用いて、硫黄山の局所的な沈降を報告している。

我々は2013年末からのえびの高原付近の火山活動の活発化は新たなマグマ活動であると考え、このマグマ貫入に伴う地殻変動を詳細に把握するために、えびの高原付近の水準測量を実施した。

データと方法

2011年の新燃岳の噴火直後から、北海道大学を中心として、えびの市~えびの高原~霧島新湯温泉の約25kmの区間で3回の水準測量が実施され、2012年3月に最後の測定が行われていた(森他, 2012, JpGU SVC50 P31)。

我々は2015年6月にこの路線に含まれるえびの高原付近~霧島新湯三叉路間の約8km区間の再測定を実施するとともに、硫黄山方向に約2.5kmの路線を新設した。また、地表の噴気活動が確認された直後の2015年12月19~22日にもえびの高原付近の上下変動の再測量を実施した。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。2015年6月の測量における1km当たりの平均自乗誤差は $\pm 0.38\text{mm/km}$ であり、2015年12月の測量では $\pm 0.41\text{mm/km}$ と高精度であった。

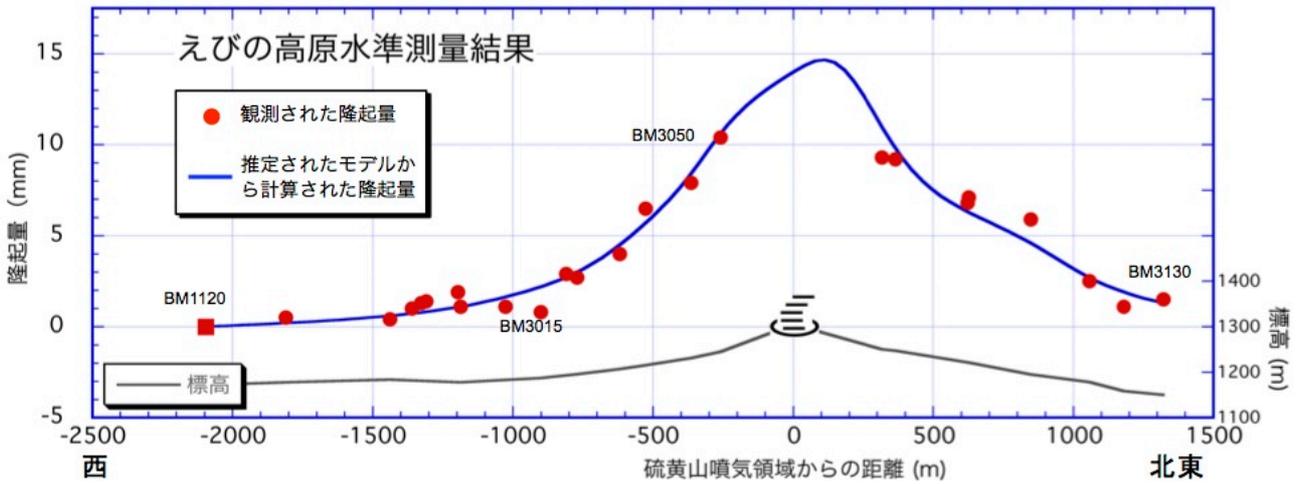
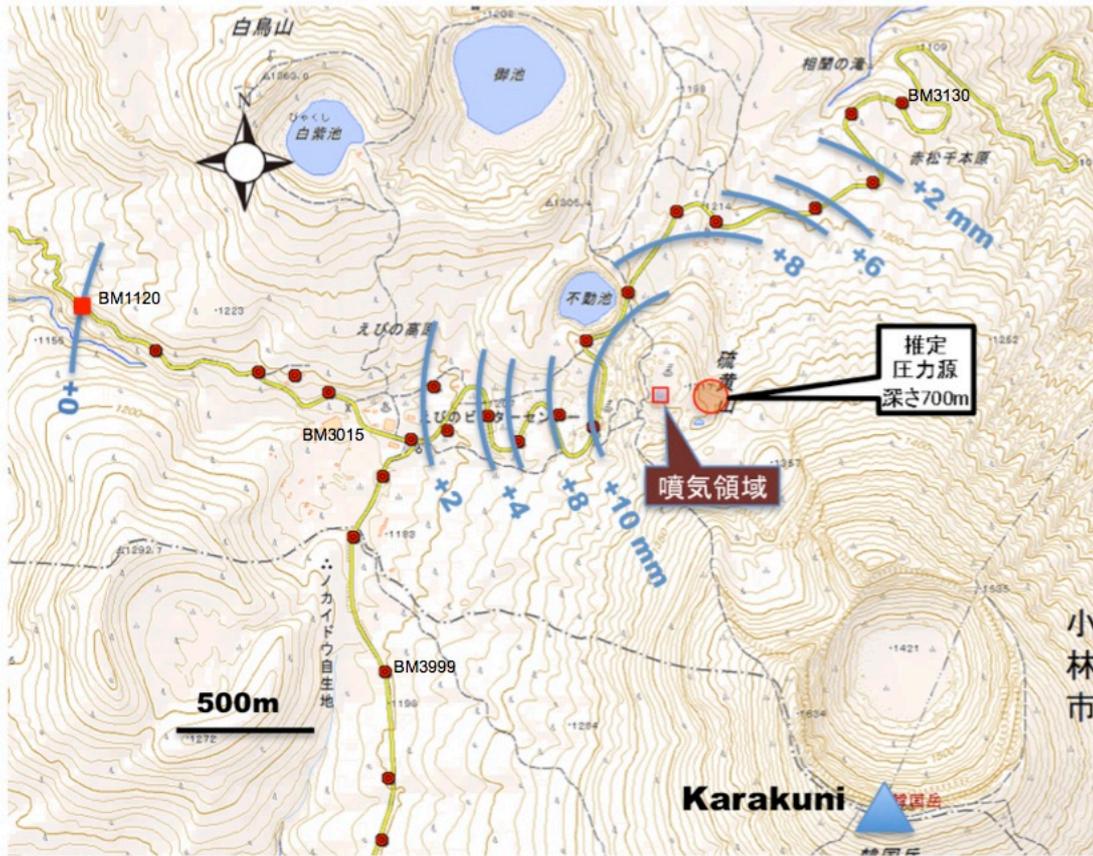
測量結果

水準路線西縁の水準点BM1120を基準とし、各水準点における2015年6月測定値と12月測定値の差を図に示す。隆起量は、えびの三叉路(BM3015)から硫黄山に近づくにつれて大きくなり、硫黄山西登山口(BM3050)で最大10.4mmの隆起が記録されたあと、峠を越えると隆起量が徐々に小さくなり、路線北東端のBM3130でほぼ0mmに戻っている。

MaGCAP-V(気象研究所)を使用し、標高補正した茂木モデルをグリッドサーチにより求めた。その結果、 $3.1 \times 10^4 \text{m}^3$ の増圧源が硫黄山噴気領域の東150m、標高600mの地点に推定された。このモデルから計算される上下変動量は、防災科学技術研究所が干渉SAR解析により求めた地殻変動量と調和的である。また圧力源の深さは、Aizawa *et al.* (2013)が推定している低比抵抗層(難透水層)の下面に相当する。

キーワード：霧島火山、硫黄山、えびの高原、精密水準測量、火山性地殻変動

Keywords: Kirishima Volcano, Mount Io, Ebino Plateau, Precise Leveling Survey, Volcanic Ground Deformation



先行する地盤膨張に基づく桜島昭和火口爆発の発生時刻及び規模の確率的予測

Probabilistic Prediction of Vulcanian Eruptions at the Showa Crater of Sakurajima Based on Ground Inflation

*井口 正人¹*Masato Iguchi¹

1. 京都大学防災研究所火山活動研究センター

1. Sakurajima Volcano Research Center, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

1. はじめに 桜島の昭和火口では 2009 年以降、ブルカノ式噴火が多発している。ブルカノ式噴火に先行して、有村観測坑道（火口から 2.1 km）においては、傾斜計の火口側隆起の変化は顕著ではないが、伸縮計の火口と直交方向において伸張、火口方向において収縮のひずみ変化が検出される。これは、火口直下 1.5 km 以浅の力源の膨張によるものである。2009 年から 2014 年までに 4953 回のブルカノ式噴火が発生したが、地盤変動を検出できたのは 4422 回であり、89%の爆発について、その前兆的な変動を検出できている。本研究では、先行する膨張時間と規模の頻度分布を調べた。

2. 先行膨張時間 爆発に先行する伸縮計の変化の継続時間は 2 分から最長 1874 分（約 29 時間）の範囲にある。最長の継続時間を示したのは、2009 年 4 月 9 日 15 時 29 分の昭和火口の爆発、次いで、2012 年 7 月 24 日 19 時 15 分の南岳の爆発に先行する 1313 分（約 21 時間）である。12 時間を超える膨張を継続した後、爆発した例は 14 回ある。先行膨張時間の 10 分毎の頻度分布を調べたところ、最も頻度が高いのは 20 分～30 分であり、598 回の爆発が発生した。膨張時間が長くなると頻度はゆるやかに減少する。頻度分布の右裾が広がる典型的な対数正規分布を示す。膨張開始から 30 分以内に爆発が発生するのは 31%であり、50 分以内では 51%、さらに 150 分以内では 90%となる。膨張開始直後では 100 分以内に爆発が発生する確率は 78%であるが、膨張開始から 50 分が経過した時点では、その後 100 分以内に発生する確率は 83%と高まる。対数正規分布を確率関数として、発生時刻を確率的に予測することが可能である。

3. 先行膨張量 火口と直交方向の伸縮計により観測されたひずみ変化量の頻度分布は 5～10 ナノストレインの量のもものが最も多い。変化量が大きくなるに従って減少し、対数正規分布を示す。最も大きかったのは 2009 年 4 月 9 日の昭和火口の爆発に先行する膨張イベントであり、96 ナノストレインに達した。

4. 平均膨張率 膨張時間が長いほど、膨張量は大きくなる正の相関が認められる。先行時間で割った平均膨張率には上限があり、0.7 ナノストレイン/分と見積もられる。平均膨張率も対数正規分布を示し、対数平均は 0.17 ナノストレイン/分である。

5. 爆発に先行する膨張変動量と爆発に伴う収縮変動量の関係 膨張量と収縮量の比の対数 (Z) は平均値を -0.1 とする対数正規分布を示す。 Z が $-0.3 \sim 0.3$ となるものが 68%を占め、この範囲にあるものは 0.5 倍から 2 倍の誤差で、先行膨張量から爆発に伴う収縮量を予測することが可能である。

キーワード：ブルカノ式噴火、先行膨張、確率的予測

Keywords: vulcanian eruption, precursory inflation, Probabilistic forecasting

桜島火山における2015年1~6月と2015年8月15日の地盤変動イベント比較

Comparison between ground deformation events at Sakurajima from January to June 2015 and on August 15, 2015

*堀田 耕平^{1,2}、井口 正人²、大倉 敬宏¹、山本 圭吾²、為栗 健²

*Kohei Hotta^{1,2}, Masato Iguchi², Takahiro Ohkura¹, Keigo Yamamoto², Takeshi Tameguri²

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 Science, Kyoto University, 2.DPRI, Kyoto University

We applied some source models to the ground deformations in different stages of volcanic activity of Sakurajima to make clear style and process of magma intrusion.

One is slow ground inflation with highly eruptive activity at the Showa crater during the period from January to June 2015 (first-half 2015 event). This event is similar to that during the period from October 2011 to March 2012 (2011 event). A pressure source analysis based on Mogi model (Mogi, 1958, BERI) during the 2011 event revealed inflation sources to be located at a depth of 9.6 km below sea level beneath the Aira caldera and 3.3 km below sea level beneath Kita-dake, and a deflation source is located at a depth of 0.7 km below sea level beneath Minami-dake (Hotta et al., 2016, JVGR). The characteristics of ground deformation during the first-half 2015 event is similar to that of the 2011 event, and inflation sources beneath Aira caldera and Kita-dake and a deflation source beneath Minami-dake are considered.

The other is much rapider and larger ground deformation on August 15, 2015, when eruptive activity was decreasing from July 2015 (August 2015 event). The pattern of horizontal displacement during the period from August 14 to 16, 2015 shows a WNW-ESE extension, which suggests a tensile fault. A nearly vertical dike with a strike of NNE-SSW is obtained at a depth of 1.0 km below sea level beneath Minami-dake. The length and width are 2.3 km and 0.6 km, respectively. The opening 1.97 m yields its volume increase +2.7 million cubic meters (Hotta et al., under revision, EPS).

Associated with the August 2015 event, 887 volcano-tectonic (VT) earthquakes occurred beside the dike, differently from the first-half 2015 event while only 63 VT earthquakes occurred for the 6 months. Half of the total amount of deformation of the August 2015 event was concentrated from 10:27 to 11:54. It is estimated that the intrusion rate of magma was 1 million cubic meters per hour during the period. This rate is 200 times larger than that of magma intrusion rate beneath Minami-dake prior to the vulcanian eruption on July 24, 2012 (5 thousand cubic meters per hour; Iguchi, 2013, Study on volcanic eruption process by multi-parameter observation at Sakurajima). The quite rapid intrusion rate caused extremely high-rate accumulation of strain in surrounding rocks, and this forced significant increase in seismicity. The first-half 2015 event is considered to be a process of magma accumulation and migration among the pre-existing spherical reservoirs, similarly to the previous activities such as the 2011 event. Conversely, the August 2015 event is dike-creating event at a different place from the pre-existing reservoir beneath the Showa crater, and magma stopped at a shallow depth of 1.0 km. The direction of the opening of the dike coincides with the T-axes of the VT earthquakes at the SW flank and is influenced by tectonic stress around the Sakurajima volcano. The VT earthquakes at the SW flank during the periods of 1976-1978 and 2003-2004 are inferred to be the magma pass from southwestern part of Sakurajima (Kamo, 1989, Proceedings of Kagoshima International Conference on Volcanoes) and vertical tensile crack that across Sakurajima from NE to SW (Hidayati et al., 2007, BVSJ), respectively. The first-half 2015 event was accompanied by the VT earthquakes at the SW flank during the period from March 31 to early April, 2015, similarly to 1976-1978 and 2003-2004. Magma might migrate beneath the dike intruded on the August 2015 event along the magma pass from southwestern part of Sakurajima or

along vertical tensile crack that across Sakurajima from NE to SW accompany with the swarm of VT earthquakes at the southwestern part of Sakurajima in the first-half 2015 event.

キーワード：桜島火山、地盤変動、測地データ、火山構造的な地震

Keywords: Sakurajima volcano, ground deformation, geodetic data, VT earthquake

桜島有村における相対重力連続観測：ダイク貫入イベント時の傾斜・重力変化

Continuous relative gravity observation at Sakurajima Volcano: Tilt and gravity changes during the dike intrusion event

*風間 卓仁¹、山本 圭吾²、井口 正人²

*Takahito Kazama¹, Keigo Yamamoto², Masato Iguchi²

1.京都大学理学研究科、2.京都大学防災研究所

1.Kyoto University, 2.DPRI, Kyoto University

桜島火山では2015年8月15日に山頂直下を震源とする火山性地震が多発し、山体膨張を示す急激な地殻変動が観測された(気象庁, 2015)。また、測地学的な観測によると、この地殻変動は南北方向に走向を持つ矩形ダイクの開口によって説明できることが分かっている(国土地理院, 2015)。このような変動をもたらす要因には、地下深部から供給を受けた火山性流体の上昇が考えられる。しかしながら、地震観測や地殻変動観測では火山性流体の密度を特定できないので、ダイク中に満たされた物質の組成については十分理解されていない。

そこで本研究は、有村(昭和火口の南南東2.1 km)で観測された相対重力および傾斜の連続観測データを用い、2015年8月15日のダイク貫入イベント時における質量移動機構について議論する。本研究で使用するデータは、Scintrex CG-3M型相対重力計によって有村観測坑道局舎で観測された1分間隔の相対重力値および傾斜値(2成分)である。なお、生データには複数の擾乱が含まれていたが、適切な方法によって補正済みである(詳細は「重力・ジオイド」セッションにて講演予定)。

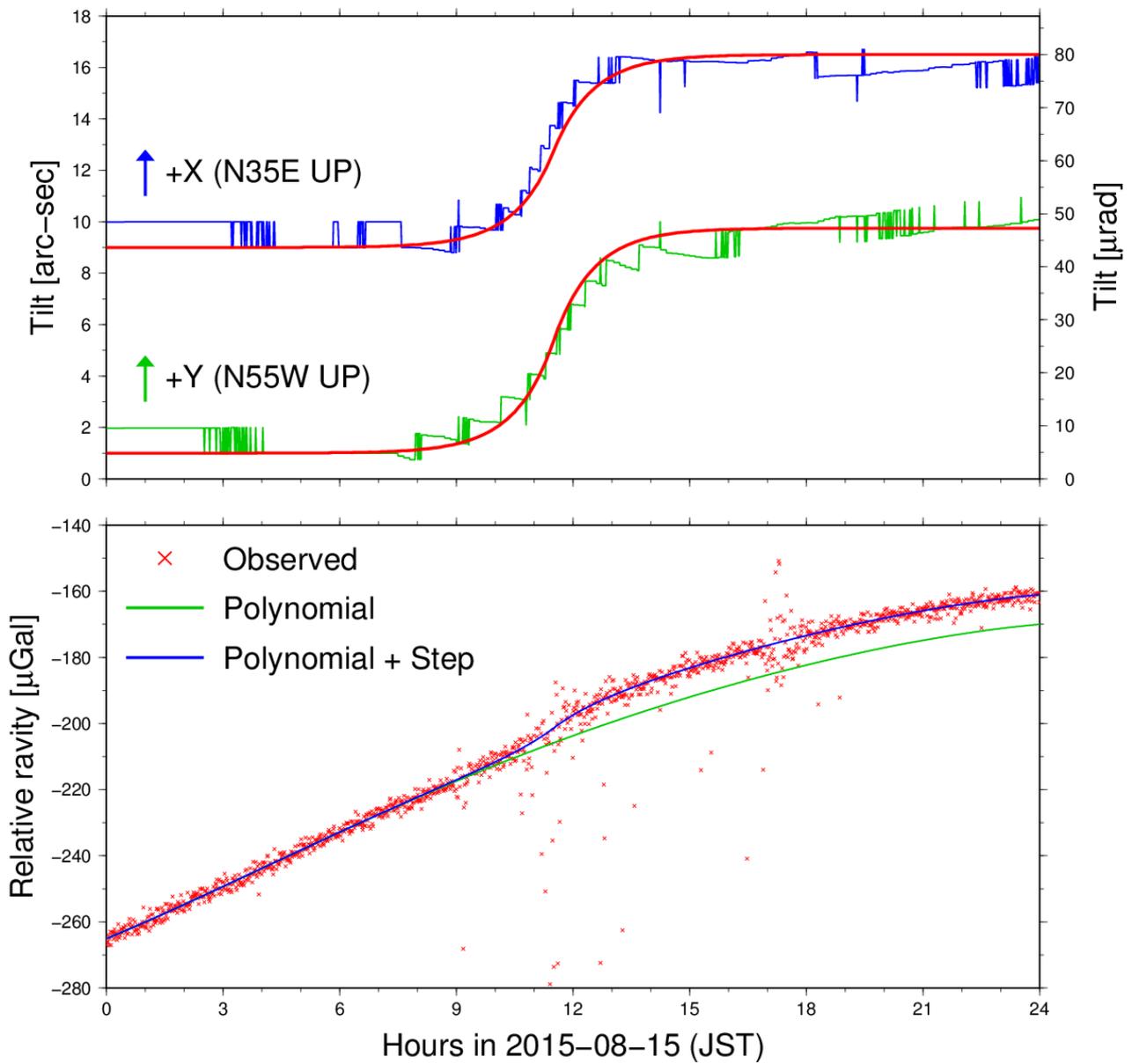
【傾斜変化】添付図上側の青線および緑線は、CG-3M重力計で観測された2015年8月15日の傾斜変化(それぞれN35E方向およびN55W方向)である。両者の値とも昼ごろに急激に上昇していることから、有村から見て北方向(すなわち火口方向)が隆起したことが分かる。これらの傾斜変化を $\exp(x)$ [$x < 0$]および $2 - \exp(-x)$ [$x \geq 0$]の形状を持つ関数で回帰すると、傾斜変化の振幅は+36 micro-rad (N35E方向)および+42 micro-rad (N55W方向)、時定数は1.0 hour、傾斜変化速度が最大となる時刻は日本時間の11時30分であった。また、この傾斜変化のベクトル和は56 micro-radであり、有村観測坑道内の水管傾斜計で観測された傾斜変化(気象庁, 2015)の65%に相当することが分かった。

【相対重力変化】添付図下側の赤線はCG-3M重力計で観測された2015年8月15日の相対重力変化である。活発な地震活動に伴って重力データが大きくばらつく時間帯があるものの、数日周期の器械ドリフトの中にステップ的な重力変化が確認できる。そこで、器械ドリフトを多項式で、およびステップ的な重力上昇を上述の指数関数で再現すると、重力上昇量はpeak-to-peakで+9 micro-Galと計算された。一方、同じく有村観測坑道局舎で観測された絶対重力変化は-5 micro-Galであり(大久保ほか, 2015)、本研究の結果とは符号も絶対振幅値も異なっている。この原因の1つとして考えられるのは、「本研究で得られた重力変化に、器械傾斜に伴う重力の見かけ変化が含まれている」という可能性である。そこで本研究では、今後CG-3M重力計の器械傾斜に伴う見かけ重力変化を定量的に調査し、ダイク貫入イベント時の重力変化量を再検討する。その上で、講演では相対重力と傾斜の時間変化から火山内部の質量移動プロセスを議論する予定である。

キーワード：相対重力、重力変化、傾斜変化、桜島火山、ダイク、マグマ

Keywords: relative gravity, gravity change, tilt change, Sakurajima Volcano, dike, magma

Scintrex CG-3M Gravimeter at Arimura



桜島火山における重力変動と歪・傾斜変動の対比-2015年8月貫入イベントと2016年2月の爆発再開まで

Gravity vs Strain/Tilt Changes at Sakurajima Volcano from the Dyke Intrusion Event in August 2015 through Resumption of Frequent Explosions in February 2016

*大久保 修平¹、山本 圭吾²、井口 正人²、田中 愛幸¹、高木 悠¹

*Shuhei Okubo¹, Keigo Yamamoto², Masato Iguchi², Yoshiyuki Tanaka¹, Yu Takagi¹

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、昭和火口からの活発な噴火活動が継続し、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。しかし爆発・噴火活動は、同年9月下旬以降、逆に長期間（4ヶ月超）にわたり停止し、2016年2月初旬になってやっと再開するという異様な展開を見せている。

本講演では、上記期間内（2015年7月末～2016年2月）に実施した絶対重力連続観測について、桜島の地殻変動観測と対比し、火道の開口・閉塞状態との関係を議論する。

[2] 結果

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(Kazama and Okubo, 2009)や、不圧地下水の潮汐等(Okubo et al 2014)、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して得た重力シグナルと、桜島島内2か所（ハルタ山、有村）の歪・傾斜記録に見られる、特に顕著な山体膨張・収縮イベントとを対比した。その結果、以下に述べる二つの重要な点が明らかになった。

(1) 2015年8月15日のダイク貫入時と、同年8月25日以降とでは、地殻変動に対する重力変動の振幅比（応答係数）が100倍も違う

(2) 8月15日には重力変動と地殻変動の間のTime lagがないのに、8月25日以降では1～3日のTime lagが生じている。

[3] 物理的解釈

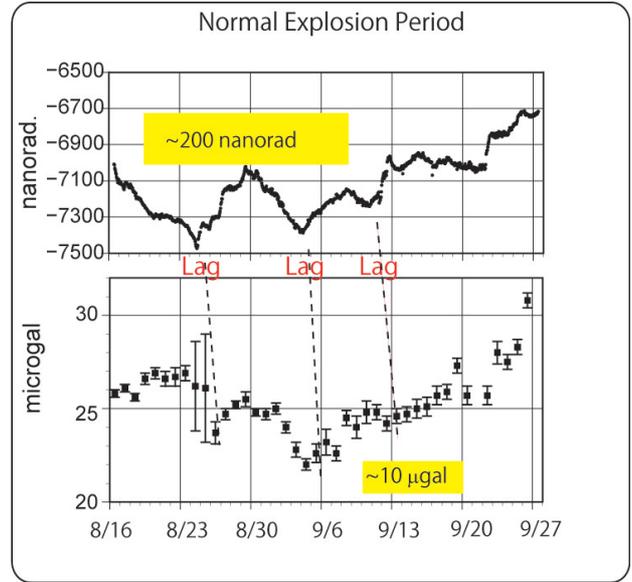
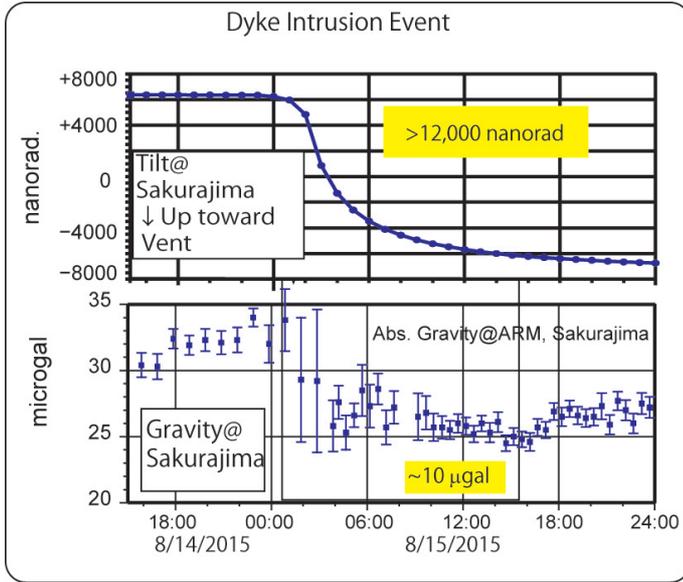
上記の二つの特徴は、火道の「開口・閉塞」状態のスイッチングを強く示唆するものである。定性的ではあるが、次のシナリオが経験則に説明を与える。

a) 閉塞系に比して開口系では、格段に小さな地殻変動しか生じない(1/100程度)。一方、重力変化の相当部分が質量移動に起因するから、重力シグナルのオーダーは、火道が閉塞状態であれ、開口状態であれ、同程度の重力変化が生じる（たかだか数倍程度の差）。地殻変動に対する重力変動の振幅「比」（応答係数）は、開口状態では非常に大きくなる。両者の差は100倍程度になりうる。

d) 閉塞状態では、効果的に弾性変形が起こるので、歪・傾斜の変動と重力変動の間にTime lagはない。一方、開口状態では、マグマが火道を上昇するのに一定の時間がかかるため、重力変動にはTime lagが生じる。2016年2月初旬以降の爆発活動再開期についても、現在解析をすすめており、結果を報告する予定である。

キーワード：重力、桜島、マグマ頭位、地殻変動、開口火道、ブルカノ式噴火

Keywords: Gravity, Sakurajima, Magma Head, Crustal Deformation, Open Conduit, Vulcanian Eruption



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15日のダイク貫入に伴う地盤上下変動
Vertical deformation associated with the 15 August 2015 dike intrusion at Sakurajima
volcano measured by leveling survey

*山本 圭吾¹、吉川 慎²、松島 健³、大倉 敬宏²、横尾 亮彦²、井上 寛之²、内田 和也³、園田 忠臣¹、中元 真美³、山下 裕亮¹、味喜 大介¹、松本 聡³、相澤 広記³、市原 美恵⁴

*Keigo Yamamoto¹, Shin Yoshikawa², Takeshi Matsushima³, Takahiro Ohkura², Akihiko Yokoo², Hiroyuki Inoue², Kazunari Uchida³, Tadaomi Sonoda¹, Manami Nakamoto³, Yusuke Yamashita¹, Daisuke Miki¹, Satoshi Matsumoto³, Koki Aizawa³, Mie Ichihara⁴

1.京都大学防災研究所、2.京都大学大学院理学研究科、3.九州大学大学院理学研究院、4.東京大学地震研究所
1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.Graduate School of Science, Kyoto University, 3.Faculty of Sciences, Kyushu University, 4.Earthquake Research Institute, University of Tokyo

2015年8月15日、桜島火山において火山性地震の群発活動を伴った急激な地盤変動イベントが発生した。気象庁は、同日噴火警戒レベルを3（入山規制）から4（避難準備）に引き上げ、桜島内の一部の住民が避難を行った。我々は、このイベントに伴って生じた地盤上下変動を測定するため、翌日の8月16日から、これまで水準測量の繰返し観測を行ってきた路線において緊急の一等水準測量を実施した。本講演では、この測量の概要および結果について報告する。

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、西部山腹のハルタ山登山路線、北部山腹の北岳路線、東部の黒神路線および桜島外の鹿児島湾西岸路線であり、総延長は約69 kmである。これらの路線を、2015年8月16日～9月24日の期間および12月18日において測量に当たった。桜島一周道路路線、ハルタ山登山路線、北岳路線については、2014年11月の前回測量時に測量を行っているが、鹿児島湾西岸路線については2013年11月の測量から約1年9カ月ぶり、黒神路線については2009年11月の測量から約6年ぶりの実施であった。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、黒神路線、鹿児島湾西岸路線においてそれぞれ ± 0.33 , ± 0.27 , ± 0.17 , ± 0.30 , ± 0.24 mm/km、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）、-2.3 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。

桜島内の路線について、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、2014年11月に行われた測量結果（山本・他、2015）と比較することで、2014年11月から2015年8月・9月の期間における地盤上下変動量を計算した。また、鹿児島湾西岸路線については、その南端にある水準点BM.2469を不動点（基準）とし、2013年11月に行われた測量結果（山本・他、2014）と比較することで、2013年11月から2015年8月の期間における地盤上下変動量を計算した。

桜島内の路線における水準測量結果から、桜島北部付近、ハルタ山登山路線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15.8 mm）が生じていることが確認された。また、桜島南部の有村付近および東部の黒神付近においても、それぞれ最大で16.8 mm, 7.7 mmの顕著な地盤の隆起が確認された。8月15日の急激な地盤変動については、干渉SARやGNSS、傾斜計・伸縮計の観測データを用いた圧力源のモデル解析により、昭和火口の直下にダイクが貫入したことが推定されている（国土地理院、2015；堀田・他、2016）。水準測量によって測定された有村付近や黒神付近の地盤隆起は、これらのダイク貫入モデルから期待される地盤上下変動と調和的である。一方で、桜島北部付近や北岳路線の地盤隆起については、このダイク貫入モデルによって変動量を十分に説明することはできない。鹿児島湾西岸路線における水準測量結果においても、始良カルデラ中央部に近い水準点BM.2474に向かった地盤隆起が観測されており、桜島北部あるいは始良カルデラ中央部の地下に増圧源の存在が示唆される。この増圧源による変動については、傾斜計・伸縮計の観測データ（堀田・他、2016）を参考にすると8月15日のイベント時のものではないと考えられる。講演では、これらの圧力源解析の結果についても報告する。

キーワード：桜島火山、ダイク貫入、精密水準測量、地盤上下変動

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

2015年8月15日桜島火山で発生した群発地震活動

Earthquake Swarm Activity at Sakurajima Volcano on August 15, 2015

*為栗 健¹、堀田 耕平¹、井口 正人¹*Takeshi Tameguri¹, Kohei Hotta¹, Masato Iguchi¹

1. 京都大学防災研究所附属火山活動研究センター

1. Sakurajima Volcano Research Center, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

桜島火山では1955年以降、南岳山頂火口でブルカノ式の爆発的噴火を繰り返している。また、2006年に東側山腹にある昭和火口で58年ぶりに噴火が再開し、2009年以降、活発な噴火活動を行ってきた。2015年は1月から山体膨張を示す地盤変動が観測され始め、6月まで毎月100回前後の爆発的噴火が発生するなど特に活発な活動を続けていたが、6月以降、地盤変動は山体収縮に転じ、噴火活動も低調になった。そのような状況の中、8月15日午前8時頃から有感地震を含む群発地震活動と急激な地盤変動が観測された。群発地震のほとんどは火山構造性地震（VT地震）であった。桜島ではVT地震の発生頻度はさほど高くなく、多いときでも40回/月程度である。だが、8月15日イベントでは887回ものVT地震が発生した。また群発地震と合わせて急激な山体膨張を示す地盤変動が観測された。その変動量は桜島南部の有村観測坑道に設置された水管傾斜計で30 μ radを超えるもので、これまで観測例のない大きな変動であった。本発表では、8月15日の地震活動の時間変化、震源位置、メカニズムおよび地盤変動との関係について報告する。

桜島では火山活動研究センターの他、気象庁、国土交通省も含めて合計17点の地震観測点がある。8月15日イベントについて、P波初動が12点、S波が6点以上で読み取り可能な地震について震源決定を行った。その際、P波速度2.5km/s、Vp/Vs比1.73の半無限均質構造を仮定して震源決定を行っている。得られた震源は南岳～昭和火口下の深さ1.5km～3.5kmに位置している。震源メカニズムは2kmより浅部で発生した地震は正断層型、2kmより深部で発生した地震は横ずれ型が多い。震源位置、震源メカニズムともにこれまで桜島で発生しているVT地震（Hidayati et al., 2007）のものと変わりはない。

観測された地盤変動データからダイクモデルを仮定した変動源が推定されており、昭和火口近傍の深さ1.0kmを上端とするほぼ鉛直の北北東-南南西に走行を持つ長さ2.3km、幅0.6kmのダイクが約2m開口することで説明される（Hotta et al., 投稿中）。規模の大きなVT地震の震源と推定されたダイクは隣接しているが、多くはダイクの位置より山頂火口寄り（南岳～昭和火口下）、ダイクの下端より深い場所で発生していた。

最初にトリガーレベル（南岳火口から1.7kmにある地震観測点で10 μ m/s）を超えるVT地震が発生したのは07時05分であった。その後、地震活動は活発化し、09時03分にM1.5、M1.7の地震が発生した。09時台後半から一時的に地震活動は低調になるが、10時47分にM2.3（最大地震）が発生した後、M1以上の地震が多発し、12時前まで地震活動は高いレベルで続いた。12時以降も規模は小さいながらも地震は多発し、14時台後半と16時台にM1後半～M2前半の地震が発生した。一方、地盤変動は8時頃から顕著になり、9時頃から膨張レートが増加した。9時台後半には膨張が一時的に停止したように見える。しかし、10時27分頃から膨張が再開し、11時54分頃まで膨張レートは増加し続けた。観測された変動の約半分がこの1時間半で進行している。11時54分以降、膨張レートは減少しながらも終日膨張が継続した。地震活動と地盤変動の時間変化を比較すると、09時03分、10時47分の地震にやや先行して地盤変動の膨張が急伸し始めている。また、11時54分に膨張レートが低下し始める前の11時32分と11時43分にVT地震とは異なる大振幅の低周波地震が発生している。この低周波地震はダイクに貫入するマグマの量を減少させるなんらかの原因になったのかもしれない。低周波地震の初動部分は全観測点において押し波で観測されており、初動部分の波形インバージョン解析を行った結果、南岳火口直下1.0kmで等方膨張によって生じている解が得られた。低周波地震の発生場所や初動部分のメカニズムは爆発的噴火に伴う爆発地震と類似しているが、地震発生時に噴火は発生していない。

キーワード：桜島火山、群発地震

Keywords: Sakurajima Volcano, Earthquake Swarm

桜島における地震計アレイ観測でとらえた2015/8/15噴火未遂

Failed eruption observed by seismic arrays during the Sakujirama volcano activity on Aug. 15, 2015.

*藤田 英輔¹、上田 英樹¹、小澤 拓¹、宮城 洋介¹、三輪 学央¹、川口 亮平¹

*Eisuke Fujita¹, Hideki Ueda¹, Taku Ozawa¹, Yosuke Miyagi¹, Takahiro Miwa¹, Ryohei Kawaguchi¹

1.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

1.National research Institute for Earth science and Disaster prevention, Volcanic research department

(研) 防災科学技術研究所では、桜島の2か所（北岳北側・黒神）において、それぞれ1Hz上下動地震計9台による地震計アレイおよび空振計1台を2015年3月より設置し、200Hzサンプリングで現地収録を行っている。これらのデータから、2015年8月15日のマグマ貫入に伴う地震波形の解析を行った。観測された波形の特徴として下記の点が挙げられる。1)活動が顕著になった8/15 7時台の地震活動は北岳北側アレイでのP波到達が黒神アレイよりも0.2秒程度早い。6時台は北岳北側で顕著だが黒神アレイではきわめて小さい。2)およその震央は南岳～中岳の東方。3)北岳北側アレイは全点でコヒーレントな波形となっているのに対し、黒神アレイは鍋山東側(SKE2-4)とそれ以外(SKE5-9)の観測点で波形が異なる(SKE1は欠測)。4) 8/15 7時台と12時台の波形を比較すると後者では低周波が卓越している。5)火山性地震(VT)では、初動付近は低周波がやや卓越する。その後高周波が冗長するイベント、あるいは冗長しないイベントがある。6)低周波地震(LP)では、初動前に高周波の微小な振動が先駆する。

また、観測された波形の相関係数の時間変化を求めたところ、下記のこと分かった。地震波形の相関は3つの時間帯、すなわち、A:6時頃～10時半頃、B:10時半～12時過ぎ、C:12時過ぎ～24時に分類され、A,B,Cの3つの期間にまたがる相似地震はない。Aの期間では多数の相似地震が発生しているが、Bの期間ではほぼ相似地震が発生していない。また、Cの期間では、時間が大きく離れているイベント同士でも相似のものがある。このことからAの期間ではマグマ貫入の初期フェーズにおける破壊が同様のスリップを繰り返しながら進行していること、Bの期間ではランダムな破壊が起こっていること、Cの期間では貫入したマグマの周辺部のいろいろな場所でそれぞれ同様なスリップを繰り返しているものと推測される。

キーワード：桜島、マグマ貫入、火山性地震

Keywords: Sakurajima, magma intrusion, VT earthquakes

桜島反復地震探査における測線外発破記録に見られる後続相

Unknown later arrivals in cross-line shooting seismograms of the repeating seismic experiments in Sakurajima Volcano

*筒井 智樹¹、為栗 健²、井口 正人²、中道 治久²、大島 弘光³、青山 裕³、植木 貞人⁴、山本 希⁴、野上 健治⁵、武尾 実⁶、大湊 隆雄⁶、市原 美恵⁶、及川 純⁶、小山 崇夫⁶、前田 裕太⁷、大倉 敬宏²、清水 洋⁸、松島 健⁸、宮町 宏樹⁹、小林 励司⁹、八木原 寛⁹

*Tomoki Tsutsui¹, Takeshi Tameguri², Masato Iguchi², Haruhisa Nakamichi², hiromitsu oshima³, Hiroshi Aoyama³, Sadato Ueki⁴, Mare Yamamoto⁴, Kenji Nogami⁵, Minoru Takeo⁶, Takao Ohminato⁶, Mie Ichihara⁶, Jun Oikawa⁶, Takao Koyama⁶, Yuta Maeda⁷, Takahiro Ohkura², Hiroshi Shimizu⁸, Takeshi Matsushima⁸, Hiroki Miyamachi⁹, Reiji Kobayashi⁹, Hiroshi Yakiwara⁹

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

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

桜島火山で行われてきた反復探査記録の再検討を行った結果、これまで知られていなかった明瞭な地震波反射面を北岳東斜面の下に見いだした。

桜島火山では2009年以降2014年までのほぼ毎年12月に反復地震探査が実施されてきた（筒井・他、2010;2011;2012;2013;2014）。反復地震探査は桜島北部と東部にあわせて2本の測線が設定され、14から15箇所の発破による地震記録を取得した。この反復地震探査では、桜島北部の測線中央部の海面下5.8kmに火山活動の進展に伴って地震波反射強度が変化する場所のあることが明らかになった（反射面 α : Tsutsui et al. JVGR in press）。しかしながら、これは測線の直下の地震反射強度の変化を指摘したにすぎない。

一方、これまでに実施された反復地震探査の観測では、発破作業時間帯全域にわたる記録が得られているため、測線内発破ばかりでなくもう一方の測線上の発破による地震波形の記録も行われている（測線外発破記録）。これらの記録には測線内発破の記録とは別に複数の明瞭な後続相が認められた。

桜島北部の発破を桜島東部の観測点で傍受する組み合わせとその逆の組み合わせでは、震源距離4.0から4.8kmの範囲で走時2.9から3秒付近に明瞭な後続相が現れる。この後続相は波線が北岳の東北東約2kmを通過する観測記録だけに認められる。この後続相は高い見かけ速度を示し、震源と観測点を入れ替えた組み合わせでも現れることからPP反射波であると解釈され、Tsutsui et al. (2013)の速度構造を参照すると海面下4.7~4.8kmの反射面で走時の説明ができる。この後続相の示す反射面は反復探査測線直下の変化する反射面 α より南の、より浅いところに位置することが注目される。

また、桜島東部の発破を桜島北部の観測点で傍受する組み合わせでは、震源距離4.5から5.5kmの5.2秒付近の走時に明瞭な後続相が現れる。この後続相は逆の組み合わせでは観測されないことと、走時が遅い割には大きな振幅を示すことが注目される。この後続相は逆観測で確認できないこと、走時の割に振幅が比較的大きいことからPS変換であると解釈される。さらに先述の速度構造モデルで V_p/V_s 比=1.73を仮定すると、北岳山頂北東の海面下5.8kmの変換面モデルでその走時を説明することができる。この変換面は前者よりもやや北に推定され、Tsutsui in press の変化する反射面 α のすぐ南に位置する。また、その深度は反射面 α と一致する。さらにこの後続相は年によって消長があり、Tsutsui et al. in pressでは変化が見られなかった2011-2012の貫入期の観測記録で明瞭に現れていたことが注目される。

このほかに桜島東部の発破を桜島北西斜面で観測した記録に認められる後続相は2014年の観測記録だけで著しく現れるものがある。この後続相をPP反射と解釈すると北岳東斜面直下で前2者よりも火口に近い場所の海面下2.4kmの反射面モデルがその走時をよく説明する。この後続相は反射面モデルの位置と出現時期の点で、2015年8月の浅所貫入イベントとの関連が注目される。

本講演ではこれらの測線外発破から観測される後続相について紹介し、その消長と2015年8月の浅所貫入イベントとの関連について考察する。

キーワード：火山、桜島火山、火山内部構造、地震学

Keywords: Volcanology, Sakurajima Volcano, Volcanic structure, Seismology

メルト包有物から推定する桜島火山のマグマ溜まり深度

Depth of pre-eruptive magma reservoir of Sakurajima Volcano estimated from melt inclusions

*新谷 直己¹、中村 美千彦¹、奥村 聡¹、安田 敦²、味喜 大介³、井口 正人³*Naoki Araya¹, Michihiko Nakamura¹, Satoshi Okumura¹, Atsushi Yasuda², Daisuke Miki³, Masato Iguchi³

1.東北大学大学院理学研究科地学専攻、2.東京大学地震研究所、3.京都大学防災研究所火山活動研究センター
1.Department of Earth Science, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3.Sakurajima Volcano Research Center, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

To interpret magmatic processes of the ongoing Vulcanian explosions and to forecast possible future activity in Sakurajima Volcano, determining pre-eruptive magmatic conditions of the historic eruptions, especially depths of the magma reservoirs, is crucial. We therefore analyzed volatile contents and major element compositions of melt inclusions (MIs) and their host phenocrysts in the three historic Plinian eruptions (1471 A.D., 1779 A.D., and 1914 A.D.) and recent Vulcanian eruptions (1955–present).

The water contents of 110 MIs were analyzed with a FT-IR micro-reflectance spectroscopy (Yasuda, 2014). Most of the pyroxene-hosted melt inclusions (MIs) were dacitic to rhyolitic ($\text{SiO}_2 = 65\text{--}72$ wt.%) and gradually shifted to mafic compositions with time as observed for bulk rock compositions after the 1471 eruption (Uto et al., 2005; Nakagawa et al., 2011). The water contents of the MIs in the three historic Plinian eruptions have similar frequency distributions ranging from 1.2 to 3.5 wt.%. More than 95% of the data were within 1.2–2.9 wt.%. By contrast, those of melt inclusions in the recent Vulcanian ejecta were less than 2.3 wt.%. The lower maximum water content of the erupted materials of the Vulcanian explosions compared to those of the Plinian eruptions are interpreted as a result of degassing before quenching upon eruption. The MIs containing up to 40 ppm CO_2 were rarely found (Sato et al., 2012, JpGU), but most of the MIs did not contain detectable CO_2 content. The saturation pressure for the water content of 1.2–2.9 wt.% was calculated at 15–73 MPa, which corresponds to the depth of 0.6–3.1 km assuming that density of the upper crust is 2400 kg/m^3 . The depth of the shallowest magma reservoir estimated from the geodetic observations on the present Vulcanian explosions are located at a depth of 4 km beneath the Minamidake summit (Iguchi et al., 2013), which is deeper than the depth ranges for most of the MIs (0.6–3.1 km) and in accordance with the maximum depth (4.1 km, corresponding to 3.5 wt% H_2O). Considering the erupted volumes of these Plinian eruptions (0.3–0.8 km^3 for the Plinian eruptions and 0.8–2.0 km^3 including lava flows in DRE, Kobayashi et al., 2013), the obtained depth range (2.5 km) may be largely explained by the difference in the position of the magma reservoir.

キーワード：桜島火山、マグマ溜まり、メルト包有物、含水量

Keywords: Sakurajima Volcano, magma reservoir, melt inclusion, water content

桜島火山の火山ガス組成

Volcanic gas composition of Sakurajima volcano, Japan

*篠原 宏志¹、風早 竜之介¹、角皆 潤²、大湊 隆雄³、金子 隆之³*Hiroshi Shinohara¹, Ryunosuke KAZAHAYA¹, Urumu Tsunogai², Takao Ohminato³, Takayuki Kaneko³

1.産業技術総合研究所活断層・火山研究部門、2.名古屋大学大学院環境学研究科、3.東京大学地震研究所

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

3.Earthquake Research Institute, University of Tokyo

桜島では活発な噴煙活動と小規模なブルカノ式噴火が最近数十年にわたり続いている。大量な火山ガスの起源や放出機構、ブルカノ式噴火の発生機構を明らかにするためには、火山ガスの量および組成の把握が必要である。特に、ブルカノ式噴火は火道浅部での噴火直前のガスの蓄積が原因であるというモデルが考えられており、火山ガスデータはその検証や定量的な評価に必要である。紫外遠隔測定によりSO₂放出率の変化はある程度把握されているが、山頂への接近が困難である桜島では火山ガス組成のデータは、火山灰の水溶性成分の分析やFT-IR等による断片的なものに限られていた。我々は、噴煙の測定により火山ガス組成を推定する

Multi-GASとアルカリフィルター法を桜島の噴煙測定に適用し火山ガス組成の推定を実施してきた。本講演では今までに得られた、桜島の火山ガスの組成の特徴の把握とその時間変化を報告する。

桜島では人間が山頂域に接近することは困難であるため、火山噴煙観測の実現のために1) 有人セスナ、2) 無人ヘリコプター、3) 山麓での火山ガス検知起動型の自動観測、を実施してきた。Multi-GAS観測は大気と混合後の火山ガス成分を測定するため、大気組成の変動により測定精度が影響する。特に大気中に高濃度存在する成分(H₂O, CO₂, H₂等)の火山ガス起源の濃度変化を定量するためには高濃度の火山噴煙を測定することが望ましいが、得られる最大火山ガス濃度は測定時の条件(距離、風向風速、火山活動)により異なり、それに応じて定量可能な成分や精度は異なる。セスナ観測と無人ヘリ観測は上空での観測であり、連続観測は山麓に流下してきた噴煙を測定しているが、手法による結果の差は特に見いだされていない。

2012年測定開始後、2015年前半までは桜島のSO₂放出率は1000t/日以上の高い状態が継続し、昭和火口での爆発も頻発していたが、2015年夏以降はSO₂放出率は100t/日程度に低下し、爆発の頻度も極端に低下した。SO₂放出率が高かった時期の火山ガス組成の平均値は、CO₂/SO₂=0.5、H₂O/SO₂=110、SO₂/H₂S=8、H₂/SO₂=0.15、SO₂/Cl=10と推定された。この組成は日本の高温火山ガス組成として平均的な組成に近いが、H₂O/SO₂がやや高い(浅間、三宅島、阿蘇では40前後)。ただしH₂Oは大気中濃度変動が大きいため測定火山ガス濃度が低い桜島での推定値の誤差が大きいことが、差異の原因である可能性もある。CO₂/SO₂比は0.5-1.4の幅を持ち比較的一定ではあるが、最大測定SO₂濃度が高い観測では系統的に低いCO₂/SO₂比が得られている。同様の傾向は浅間山でも観測されており、観測対象である主火口起源の火山ガスとそれ以外のCO₂に富むガス(浅間山の場合は低温噴気)の混合が原因と解釈されている。桜島の場合は低温噴気の分布が顕著ではなく、この傾向の原因が不明である。SO₂/Cl比は5-20の間で変動しているが、この変動幅は森(2014)により報告されている2009-2013年にFT-IRで測定された昭和火口噴煙のSO₂/HCl比=6-10と整合的である。SO₂/H₂S比は概ね10前後であるが、400と非常に大きな比が2014年12月と2015年1月に得られている。いずれの場合もH₂/SO₂比が通常の0.15前後に対して0.03前後と低い値が得られている。

2015年後半以降の低放出率の時期には、SO₂/H₂S=0.6-2.5、CO₂/SO₂=20-150と、高放出率時期とは大きく異なる組成が推定されている。しかし、この時期の測定では最大測定SO₂濃度が0.1-0.5ppmと低いため、特にCO₂/SO₂比の推定誤差が大きく、また他の組成は推定不可能であった。CO₂/SO₂=150の観測時に採取された噴煙試料の同位体分析に基づき、この大きな比をもたらしたCO₂の炭素のδ¹³Cは-25‰と推定されており、通常の火山ガスの同位体組成とは一致しないため、火山ガス以外の起源であると推定された。SO₂/H₂S比は明らかに低いが、その原因としては、1) 地下水との反応によるSO₂の除去、2) 出口温度低下による化学平衡の移行、3) 脱ガス圧力増加による化学平衡の移行、などが一般的には考えられる。しかし、桜島の状況を考慮した場合には3) 以外は考えにくい。SO₂/H₂S比は脱ガス圧力に反比例するため、脱ガス圧力が10倍に増加することにより、高放出率時期のSO₂/H₂S=10から、低放出率時期の1への低下は説明可能である。

キーワード：火山ガス、火山噴煙、桜島

Keywords: Volcanic gas, volcanic plume, Sakurajima

2015年7月に検出された鹿児島湾湾奥部若尊海底火山における二酸化炭素フラックスの急増
Detection of abrupt increase in CO₂ flux from a submarine volcano, Wakamiko, in the innermost part of Kagoshima Bay in July 2015

*山中 寿朗¹、金銅 和菜¹、小林 真理¹、野口 拓郎²、岡村 慶³、山本 智子⁴、角皆 潤⁵、石橋 純一郎⁶

*Toshiro Yamanaka¹, Kazuna Kondo¹, Mari Kobayashi¹, Takuro Noguchi², Kei Okamura³, Tomoko Yamamoto⁴, Urumu Tsunogai⁵, Jun-ichiro Ishibashi⁶

1.岡山大学大学院自然科学研究科、2.高知大学教育研究部総合科学系、3.高知大学海洋コア総合研究センター、4.鹿児島大学水産学部、5.名古屋大学大学院環境学研究科、6.九州大学大学院理学研究院
1.Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, 2.Multidisciplinary Science Cluster, Research and Education Faculty, Kochi University, 3.Center for Advanced Marine Core Research, Kochi University, 4.Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 5.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 6.Graduate School of Science, Kyushu University

鹿児島湾湾奥部の海底火山「若尊」の二酸化炭素フラックスを2007年以降観測している。この間、二酸化炭素フラックスは平均160~360トン/日で推移していたが、2015年7月の観測では500トン/日に達する急増が見られた。この翌月の2015年8月には桜島火山の直下で火山性微動が観測され大規模噴火の可能性が高まった。この火山性微動は2週間程度で収まり、12月の観測では若尊の二酸化炭素フラックスも2014年以前のレベルに戻っていた。若尊火山のある始良カルデラの下には若尊に揮発性火山物質を供給しているマグマ溜まりがあると考えられており、このマグマ溜まりと桜島直下にあるマグマ溜まりは繋がっているとされている。火山性微動は桜島直下のマグマ溜まりからのマグマの上昇に起因すると考えられたが、若尊の二酸化炭素フラックスの急な増加もこのマグマ活動と関連していたのかも知れない。

キーワード：若尊海底火山、二酸化炭素フラックス、桜島火山活動

Keywords: Wakamiko submarine volcano, CO₂ flux, Volcanic activity of Sakurajima Volcano

西之島火山周辺海域でのハイドロフォン観測

Hydrophone observations of volcanic activity from the sea area surrounding the Nishinoshima volcano

*浜野 洋三¹、杉岡 裕子²、伊藤 亜妃¹、市原 美恵³、篠原 雅尚³、西田 究³、武尾 実³

*Yozo Hamano¹, Hiroko Sugioka², Aki Ito¹, Mie Ichihara³, Masanao Shinohara³, Kiwamu Nishida³, Minoru Takeo³

1.海洋研究開発機構地球深部ダイナミクス研究分野、2.神戸大学理学研究科惑星科学専攻、3.東京大学地震研究所

1.Department of Deep Earth Structure and Dynamics Research, JAMSTEC, 2.Department of Planetology, Kobe University, 3.Earthquake Research Institute, University of Tokyo

我々は離島火山の活動を連続的にモニターし、その実態を解明するために、離島火山モニタリングシステムの開発を進めている。このシステムでは無人で自律的に海面を運航できる海洋プラットフォームとしてウェブグライダーを用い、画像撮影、震動観測、空振観測、及び山体崩壊を監視するための波浪観測を実施する計画である(杉岡他,2016)。このため、海洋調査船「かいらい」によるKR15-03航海では、活発に噴火を続ける西之島の周辺海域で、上記の各観測に必要な空振計やハイドロフォン等のセンサー群の試験観測を行った。また、この航海では、西之島とその周辺の地震活動を長期的にモニターするために、海底地震計(OBS)5台が設置された。本講演ではハイドロフォンの観測によって得られた成果を中心に報告する。

ハイドロフォン観測は、西之島東方約7km水深1318mの場所で、海面下深度10mで行なった。同時に船上での映像撮影、空振観測、及び西之島から14km離れたNI11点(水深2177m)でOBS観測が行なわれた。観測期間は2015年2月27日13時20分~14時40分の1時間20分という短時間であったが、この同時観測によって各観測項目の役割が明らかになり、離島火山監視システムを構築する上で、大きな進展が得られた。

観測期間中の西之島の噴火は活発で、継続時間20秒~30秒の噴火が10分間で15個程度の頻度で起こっている。この噴火活動と空振計及びOBSの観測記録との相関は極めて高く、それぞれに記録された波が、噴火に密接に関係した火山体浅部活動によって発生したことを示している(市原他、2016)。NI11点近傍でのCTD測定の結果から、西之島周辺の音波速度構造が、1000m深度で速度が極小となる典型的な海洋音響チャンネルを持つことが分かった。以上の結果は、OBSに記録された波が、噴火に伴う爆発地震として火山体浅部で発生後、水中音波(T-Phase波)としてこのチャンネルを伝播してきたことを示唆する。

一方、ハイドロフォン記録は、噴火映像、OBS及び空振計記録とは、ほとんど相関が見られない。ハイドロフォン記録で顕著なのは、13時40分から14時迄のおよそ20分続くハーモニック微動(基本周波数4Hz,最大振幅8 Pa)である。このハイドロフォンで観測している微動は、OBS、空振計で観測される火山の浅部活動と無相関であることから、より深部の活動によるものであろう。OBSとハイドロフォンで観測される水中音波の波源が異なることは、水中の音波速度構造に原因があると考えられる。西之島周辺で前日に測定された音波速度構造は、海面から深度200 mまでが1518 m/sでほぼ一定、より深部では速度は急激に減少し、深さ1000 mで極小値1480m/sをとり、それ以深は速度がゆっくりと増加し、2000mの深さでは1490m/sとなっている。この構造に見られる低速度層の存在により、波源の深さに依存して、表面にシャドウゾーンが生じることが示唆される。ハイドロフォンの観測点がこのシャドウゾーン内にあるためには、OBSに記録された爆発地震の波源は、200mよりは深い、その近傍の浅部にあると考えられる。一方、ハーモニック微動が海面に近いハイドロフォンで観測されるためには、波が音響チャンネルに高角度で入射する必要があり、ハイドロフォン観測点直下の水深1300mの海底付近に波源があると推定される。OBSでこの火山性微動が観測されない原因は分からないが、おそらく音響チャンネルを通ってくる水中音波の振幅が大きいため、深部からの地震波が隠されているのであろう。以上述べて来たハイドロフォン観測の成果は、離島火山監視システムの観測計画を作る際に極めて重要となる。

キーワード：西之島、火山活動、ハイドロフォン観測

Keywords: Nishinoshima, Volcanic activity, Hydrophone observation

西之島火山の活動把握を目指した多項目観測

Multi-parametric observation for assessing activity of Nishinoshima volcano

*市原 美恵¹、篠原 雅尚¹、西田 究¹、酒井 慎一¹、山田 知朗¹、武尾 実¹、杉岡 裕子⁵、浜野 洋三²、長岡 優³、高木 朗充³、森下 泰成⁴、西澤 あずさ⁴

*Mie Ichihara¹, Masanao Shinohara¹, Kiwamu Nishida¹, Shin'ichi Sakai¹, Tomoaki Yamada¹, Minoru Takeo¹, Hiroko Sugioka⁵, Yozo Hamano², Yutaka Nagaoka³, Akimichi Takagi³, Taisei Morishita⁴, Azusa Nishizawa⁴

1.東京大学地震研究所、2.海洋開発研究機構、3.気象庁気象研究所、4.海上保安庁海洋情報部、5.神戸大学
1.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2.JAMSTEC, 3.JMA, Meteorological Research Institute, 4.Japan Coast Guard, 5.Kobe University

小笠原諸島・西之島は、2013年11月に噴火活動を開始して新しい島が形成され、溶岩流出によって急速に成長した。このような離島での噴火活動を把握するための観測情報は、非常に限られている。本研究では、西之島火山の噴火活動の推移を把握することと、離島における火山活動のモニタリング手法を開発することを目的として、遠方の陸地での空振観測、西之島周辺での海底地震観測、および、海洋調査船上からの臨時観測を行った。本発表では、その概要を報告し、得られたデータを統合して推定された2015年2月27日以降の西之島火山の活動について議論する。

○観測

空振観測は、西之島東方に約130 km の距離にある父島で行っている。2014年4月26日からアレイ観測を開始し、2014年10月5日にオンラインの観測点を追加した。オンラインの観測点と気象庁の父島地震観測点のデータを用いて、1日1回自動解析により空振検出を行う。また、回収されたアレイデータと、父島気象観測所のラジオゾンデによる大気構造計測値を用い、大気構造による伝播経路の変化を考慮した空振振幅評価を行う。

海底地震計5台は、2015年2月27～28日にかけて海洋研究開発機構の海洋調査船かいらいKR15-03航海によって西之島設置され、2015年10月3～4日に、気象庁啓風丸KS15-07航海によって回収された。この海底地震計は、固有周波数1 Hz速度型3成分地震計を搭載している。西之島東南約13 km の地点に最初の海底地震計(NI11)を設置した。2月27日午後には、西之島東方約6 kmの地点で停船し、船上より可視映像および空振データを取得した。その後、4台の海底地震計(NI21-NI51)を、約7 km の距離で西之島を囲むように設置した。

○結果

2月27日午後には、高頻度で小爆発を繰り返すストロンボリ式の活動をしていた。映像と、船上で計測した空振データ、および、NI11観測点の海底地震計データを比較した。空振は、6 km の距離を340 m/s で伝播することを考え、17.7秒ずらせた。地震は、伝播速度がよく分からないが、7秒程度ずらせると空振の振幅変化と対応がよい。空振データは、1-7 Hzで、海底地震計データは、4-8 Hz の帯域で見ると、噴火に対応した信号が明瞭になった。映像観測によると、小爆発がクラスター状に連続して発生して黒い噴煙を上げ小休止する、というのが繰り返されていた。個々の小爆発に対応してパルス状の空振が見られ、小爆発クラスターに対応してひと固まりの紡錘状の波群が地震計で捉えられた。

2015年2月28日から10月3日までの海底地震計5台のデータを用い、紡錘状の波群の解析を行った。まず、2月28日17時頃に発生した15個のイベントについて、走時差に基づく暫定的な震源決定を行ったところ、震央は西之島付近と推定された。また、STA/LTA法により、イベントの自動検出を行った結果、期間中に363,367個のイベントが検出された。イベントの発生状況は7月中旬から変化し、1日あたりの個数が単調減少を始めた。それに伴い、1個のイベントの継続時間が単調に長くなっていった。一方、1時間毎の最大振幅は、3月が小さく、4月以降、徐々に増加し、5月頃に大きくなる。その後、減少するが、1日あたりの個数が減少を始める7月中旬以降は、再び徐々に大きくなるように見える。

船上観測を行った時期には、西之島の空振が父島に伝播しやすい大気構造にあり、父島でもほぼ同じ波形が捉えられていた。空振伝播計算によると、2015年4月初めまでは伝播しやすいが、その後は状況が悪くなり、6月以降はほとんど伝播できなくなった。したがって、海底地震計で検出されたイベントの発生状況が変化する7月中旬については、残念ながら計測不可能な状況であった。一方、伝播可能な時期について空振の振幅変化を調

べたところ、2015年1月から3月初めにかけて強度が増加しその後減少に転じている。そして、2015年5月後半は、伝播可能な状況であるにもかかわらず、空振が検出されていない。伝播状況の変化を差し引いても、父島で観測される空振振幅の変化と海底地震計で得られたイベントの最大振幅の変化とはむしろ逆の傾向があるようである。

以上のように、遠方での空振観測は、伝播の影響を補正するための大気構造のデータがあれば、火山活動把握の助けになる。しかし、それだけでは不十分で時期も限られる。火山近傍に海底地震観測からは、重要な情報が得られる。今回のようなイベント解析の結果だけでもリアルタイムで伝送することができれば、有効なモニタリング手法となるだろう。

キーワード：火山、モニタリング、空振、海底地震計

Keywords: Volcano, Monitoring, Infrasound, OBS

海底地震計およびリモートセンシングによる西之島の火山活動

Volcanic activity of the Nishinoshima volcano detected by ocean bottom seismometers and remote sensing observations

*高木 朗充¹、長岡 優¹、西澤 あずさ²、小野 智三²、中田 健嗣³、木村 一洋³、福井 敬一¹、安藤 忍³、土山 博昭⁴

*Akimichi Takagi¹, Yutaka Nagaoka¹, Azusa Nishizawa², Tomozo Ono², Kenji Nakata³, Kazuhiro Kimura³, Keiichi Fukui¹, Shinobu Ando³, Hiroaki Tsuchiyama⁴

1.気象研究所火山研究部、2.海上保安庁海洋情報部、3.気象研究所地震津波研究部、4.気象庁地震火山部
1.Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute, 2.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 3.Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research Institute, 4.Seismology and Volcanology Department, Japan Meteorological Agency

気象研究所は、活発な噴火活動を継続する西之島の地震活動を捉えるため、自己浮上式海底地震観測を実施した。地震活動の概要を他のリモートセンシング観測結果等を参照しながら報告する。

西之島の中心から約4~5kmの周辺5点に自己浮上式の海底地震計（3成分）とハイドロフォンを設置し、2015年6月21日から10月2日まで観測を行った。その結果、西之島を震源とする微小地震の活動が活発であることがわかった。マグニチュードが-1.0~0.0程度の規模の地震が頻発した。震動継続時間はやや長く30秒前後であり、P、Sとも初動が不明瞭な紡錘状の形であった。波動のはじめは高周波が卓越し、そのあとに低周波が卓越した波が続く。地震回数は、期間を通じて1時間あたり50~100回程度であった。観測開始直後の6月には1時間あたり100回前後であったが、8月頃に減少し始め、観測終了の10月頃には1時間あたり約40回となった。また、この期間地震の振幅は段階的に増大した。

地震回数の漸減傾向は、気象衛星ひまわりによる西之島付近の輝度温度が低下し始める変化傾向（気象庁、2016）と一致している。また、2015年5月と10月に実施した紫外線差分吸収分光計（DOAS）による二酸化硫黄放出量の測定では、900トン/日から400トン/日と減少していた。また、人工衛星の光学センサーを用いた噴煙の放熱率や、合成開口レーダー（SAR）を用いた非干渉陸域面積も減少傾向であった。このように地震回数の漸減傾向は、熱や火山ガスの放出活動等の低下傾向と同期している可能性が高い。

気象研究所の海底地震観測の期間中には、2015年6月25日から7月6日まで海上保安庁も海底地震観測を実施している。このうち西之島の南約8kmの地震計St5では、単色地震の群発的な発生が記録された。この単色地震は9~10Hzに卓越周波数をもち減衰が遅い。地震動の振動方向はいずれも同一方向であり、また地震の規模の頻度分布から推定されるb値は1.3であった。この観測点は海底火山である西之島南海丘に近い。ここではこれまで変色水や温度異常も確認されており、西之島本島とは別の、西之島南海丘独自の火山活動を記録している可能性が高い。

謝辞

海底地震計の設置・回収には、気象庁地球環境・海洋部の海洋気象観測船「啓風丸」を使用しました。

キーワード：西之島、海底地震計、単色地震、リモートセンシング

Keywords: Nishinoshima, ocean bottom seismometer, monochromatic earthquake, remote sensing

離島火山活動モニタリングシステムの開発

Development of a monitoring system of remote island volcanoes using an autonomous vehicle of the Wave Glider

*杉岡 裕子¹、浜野 洋三²、市原 美恵³、西田 究³、武尾 実³

*Hiroko Sugioka¹, Yozo Hamano², Mie Ichihara³, Kiwamu Nishida³, Minoru Takeo³

1.神戸大学理学研究科、2.海洋研究開発機構、3.東京大学地震研究所

1.Kobe University, 2.JAMSTEC, 3.Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Nishinoshima is a remote island volcano 1000 km south of Tokyo. On November 20, 2013, a brand new island was born nearby the older Nishinoshima. Over the past two years with continued volcanic activity, it has grown up to 12 times the size of the original island, which is offering us a rare opportunity to study how volcanic island forms and grows.

We develop a remote island volcanic activity monitoring system using an unmanned vehicle of the Wave Glider (WG), manufactured by Liquid Robotics Inc. of California, USA. The WG is designed to go forward using the wave and solar energy without any fuel and is equipped with a satellite communication modem to transmit data message to the land station in real-time. It has led the way to make ocean data collection and communications easier and safer, lower risk and cost, and real-time. In order to investigate the feasibility of the WG for station-keeping operation, we made a long-term deployment in the sea off Miyagi. Based on the detailed analyzing of 5 months navigation data from September to May in 2014, the potential utility of the WG as a sea surface gateway has been confirmed to identify the operating parameters.

In the remote island volcano monitoring system the WG plays roles not only in a satellite relay device but also in a multi-parametric observatory platform with microphones for detecting infrasound waves associated with volcanic eruptions, with hydrophones for detecting acoustic and seismic waves associated with deep volcanic activities, with wave gauges for detecting heave displacements associated with volcano collapse, and with video cameras. We investigated the performance of these sensors except for the wave gauge close to the Nishinoshima volcano during the KR15-03 cruise of R/V KAIREI in February 2015 (Hamano et al., 2016; Ichihara et al. 2016) and obtained extremely important results to establish the remote island volcano monitoring system.

キーワード：離島火山活動、西之島、リモートモニタリング

Keywords: island volcanic activity, Nishinoshima, remote monitoring

2015年6月の臨時観測によるストロンボリ火山の噴火地震の相対震源決定

Relative hypocenter determination of eruption earthquakes at Stromboli volcano based on a temporal observation in June 2015

*杉村 俊輔¹、西村 太志¹、青山 裕²、山田 大志²、川口 亮平³、三輪 学央³、藤田 英輔³、Ripepe Maurizio⁴、Genco Riccardo⁴

*Shunsuke Sugimura¹, Takeshi Nishimura¹, Hiroshi Aoyama², Taishi Yamada², Ryohei Kawaguchi³, Takahiro Miwa³, Eisuke Fujita³, Maurizio Ripepe⁴, Riccardo Genco⁴

1.東北大学大学院理学研究科、2.北海道大学大学院理学院、3.防災科学技術研究所、4.フィレンツェ大学
1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Graduate School of Science, Hokkaido University, 3.NIED, 4.University of Florence

Earthquakes associated with eruptions of magma or gases are repeatedly observed with intervals of several or tens of minutes or hours on Strombolian explosions. The source of these earthquakes is likely the source of magma explosions associated with the rapid change of pressure in a conduit. Hypocenter determination of these eruption earthquakes enables us to understand the shape or location of the conduit. However, they generally have obscure onsets of P or S phases, which disable us to use general hypocenter determination methods using arrival times of these phases. In our previous study, we developed a new relative hypocenter determination method using deconvolution and master event method (Sugimura et al., 2015, JpGU, VSJ). Deconvolution filter enables us to automatically obtain higher resolution of the arrival time difference between a master event and a slave event and to separate the arrivals of two or three explosion events occurring in a very short time. In June 2015, we developed a temporal seismic network at Stromboli volcano. In this study, we determine relative hypocenter locations of eruption earthquakes using our method and the temporal observation data.

In the observation, we deployed five short-period seismometers at 200 m-1 km from the crater at Stromboli volcano. To obtain higher accuracy of source locations, we deployed them at west of the crater or the lower altitude than the expected source. The signals were recorded with a sampling frequency of 250Hz (Kinkei System, EDR-X7000) or 200 Hz (Hakusan Kougyou, LS-8800). Observation period was about two days in the beginning of June 2015.

In addition to our data, we analyze the signals obtained by the two permanent broadband seismic stations of Department of Earth Sciences of the University of Florence. In our analysis, we use band pass filter for the signals at 0.2-0.4 Hz. We choose a master event and use deconvolution filter to obtain arrival time differences between the master event and the slave events. We further calculate time differences of the arrival time differences between two stations using cross correlation of the deconvoluted waveforms. This enables us to eliminate origin time differences and to express these time differences as linear functions of the relative source locations from the master event.

We assume ~200 m beneath SW crater for the master event and the wave velocity of 1000 m/s. The result shows that the relative source locations are distributed in the range of ~200m in depth and sub-vertically. In future, we will consider a more possible source location of a master event and compare the source of short-period signals to understand the mechanism of magma explosions in a conduit at Stromboli.

キーワード：震源決定、噴火地震、デコンボリューション、ストロンボリ火山

Keywords: hypocenter determination, eruption earthquake, deconvolution, Stromboli volcano

火山性地震の定量的評価のための地震活動度モデルの検証

Seismicity model of volcanic earthquakes for a quantitative assessment of volcanic activity

*森田 裕一¹*Yuichi Morita¹

1.東京大学 地震研究所

1.Earthquake Research Institute, University of Tokyo

火山性地震の活動はこれまでの事例から、最も信頼性の高い火山活動評価や火山噴火前兆現象とされている。2000年有珠山、2014年御嶽山噴火など多くの火山噴火の前に地震活動の増加が観測され、噴火活動の前兆として有用であることは良く知られている。火山周辺で発生する地震は、1986年伊豆大島噴火の割れ目噴火前後や2000年三宅島噴火後三宅-神津の活動などのようにマグマ貫入による応力変化、2015年4月末から活発になった箱根火山の群発地震活動のように地下の水蒸気が増加したことにより既存の断層面での有効法線応力の低下、現在の伊豆大島の地震活動のようにマグマ溜まりの増圧による応力変化など、色々な場合に発生する。地震活動度の変化の原因を判別し、有効法線応力の低下を評価できれば、水蒸気噴火の可能性を検討できるなど、研究上も防災上も大変有用であろう。火山性地震の活動度を、火山活動の定量的な把握のための道具として利用するためには、地震活動に対する定量的なモデルをつくり、その有効性を観測から検証する必要がある。地震活動度の定量的なモデルとして、速度-状態依存則(RSF則: Dietrich, 1994)がある。これは応力変化と地震活動度を結び付けるモデルで、観測された地盤変動に比べ地震活動度が高いときには、揮発性成分の上昇による有効法線応力の低下が考えられ、火山噴火予測の指標に利用できると考えられる。これまで、この方法を伊豆大島火山における地震活動度に適用し、その有効性を示してきた。RSF則が他の火山における地震活動にも適用できるかを検討することは、火山活動の定量的な評価には不可欠である。そこで、2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震で誘発された火山周辺で発生した地震に焦点を当て、巨大地震による応力変化で地震活動度の時間変化を説明できるかを検討するとともに、地震活動度評価に不可欠な応力変化と地震活動度の関係性を結びつけるパラメータが、各火山でどれ位異なるかについて調べた。全国の約20火山で、巨大地震による誘発地震活動が観測された。そのうち、気象庁一元化震源により群発地震活動が明瞭に観測されている日光白根山、箱根火山、焼岳の3火山周辺で発生する群発地震活動に注目して解析した。GEONETによる火山周辺での変位データから応力変化を推定し、それをを用いて巨大地震発生前、発生直後、発生後の地震活動度をRSF則で説明できるかを調べた。この結果、これら3火山では、地震活動の時間変化をRSF則でよく説明できることが明らかになった。また、これらの火山では、箱根火山、焼岳、日光白根火山の順に地震活動度が低下して行ったが、その差は巨大地震の余効変動によるところが大きいことがわかった。更に、地震活動度を決める応力変化と地震活動度の関係性を示すパラメータは、日光白根では約2KPa程度以上と見積もられるのに対して、箱根火山、焼岳では0.5KPa程度以上であると見積もられた。この見積もりは、巨大地震による応力変化が最も効果的に地震活動度を変化させる発震機構解の地震に対しての値であり、色々な発震機構解の地震が群発しているとすると、その値は数倍程度大きくなる。今回解析した群発地震は、遠方の巨大地震により誘発したものであるから、火山周辺で応力変化に敏感な場所での地震活動である。深部でのマグマ蓄積などを原因とする応力変化に対しても同様に敏感に反応し、その際には今回と同じ活動となると考えられる。もし、地震活動度が地盤変動量とRSF則を用いて推定されるものに比べて高ければ、有効法線応力の低下の影響が大きいことを示し、火山が活発になる前兆を示していると考えられる。ここでは、3火山の解析を示すが、他の火山で適切な活動があれば、手法の評価ができる。今後、さらに解析を進めたい。謝辞: 地震活動度の解析には、気象庁地震カタログを利用した。また、地殻変動観測には国土地理院GEONETデータを利用した。記して謝意を表します。

キーワード: 火山性地震、地震活動、応力応答、速度状態依存則

Keywords: volcanic earthquake, seismicity, stress response, rate and state dependence friction law

クラック振動の解析式を用いたLPイベントの周波数解析に基づく流体特性の推定

Fluid properties estimated from frequencies of LP events using the analytical formula for crack resonance frequencies

*田口 貴美子¹、熊谷 博之¹、前田 裕太¹

*Kimiko Taguchi¹, Hiroyuki Kumagai¹, Yuta Maeda¹

1.名古屋大学大学院環境学研究科

1.Nagoya University Environmental Studies

火山活動の活発化に伴い観測される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解釈されている。先行研究ではLPイベントの振動体としてクラックモデル(Chouet, JGR, 1986)を考え、数値計算を用いてこのモデルの固有周波数と観測されたLPイベントのピーク周波数を比較することで、その震源にある流体の種類や振動体のサイズの推定を行った。しかしクラックモデルの数値計算ではこの比較を系統的に行い、観測ピーク周波数の振動モードを同定するにはかなりの労力を要したため、このモデルの流体や振動体サイズに関するパラメータ全てを推定するのは難しかった。最近Maeda and Kumagai (GRL, 2013)により提案されたクラックモデルの固有周波数の解析式により、この比較を系統的かつ容易に行うことが可能となった。そこで本研究ではまずこの解析式を用いて観測されたLPイベントのピーク周波数が説明できるかを調べ、その結果からクラックモデルのパラメータを推定できるかを検討する。解析は以下の手順に従う。①まず解析式の周波数の比をとる。この比の分母は低次のものから順にとっていく。このとき解析式の周波数比は、解析式の分子振動モード m 、クラックの短軸方向と長軸方向の長さの比 W/L 、crack stiffness C の3つのパラメータで表される。なお、 $C = 3(a/\alpha)^2(\rho_f/\rho_s)(L/d)$ であり、 a はクラック中の流体音速、 α はクラック外の固体中 P 波速度、 ρ_f は流体密度、 ρ_s は固体密度、 d はクラックの厚さである。さらに、観測された複数のピーク周波数に関しては、最も周波数が小さいピーク周波数に対する比をとる。解析式の分母振動モードと W/L を系統的に変え、解析式の周波数比と観測ピーク周波数の比を比較し、低次から連続して最も多くの観測ピーク周波数を説明できる W/L 、 C を推定する。②クラックモデルの振動波形の Q 値は α/a に強く依存することが知られている(Kumagai and Chouet, JGR, 2000)。よってクラックモデルの数値計算で合成波形と観測波形の Q 値を比較することで、 α/a を推定する。本研究では以上の手順①②に従い、群馬県の草津白根山で1992年8月11日、および同年11月2日に観測されたLPイベントを解析した。8月11日のイベントをイベント1、11月2日のイベントをイベント2と呼ぶ。まずイベント1について、解析式の周波数比と観測ピーク周波数比を比較した結果、解析式の周波数比の分母振動モードの波長が $2L/3$ 、 $W/L = 0.75$ 、 $C = 1.3$ のとき、最も多くの4つの観測ピーク周波数を低次から連続して説明することができた。また、合成波形と観測波形の比較の結果、 $\alpha/a = 30$ のとき観測波形の Q 値を説明できた。草津白根山で発生するLPイベントの震源深さは約200 m (Nakano et al., JVGR, 2003)と推定されており、この深さにおいて $\alpha = 2500$ m/s、 $\rho_s = 2200$ kg/m³を仮定すると、 $a = 83$ m/sと推定された。流体として熱水流体を考えると、このような小さい a の値をとるものはミス状ガスのみであり、震源深さでの飽和条件下でこの a の値に対し $\rho_f = 430$ kg/m³と理論的に推定できる。これらの推定値と C の式、クラックモデルの固有周波数の解析式から、 $L = 18$ m、 $W = 13$ m、 $d = 0.0090$ mと推定され、すべてのクラックモデルのパラメータの値を求めることができた。イベント2についても同様の解析を行ったところ、クラック内の流体はミス状ガスであり、 $L = 180$ m、 $W = 120$ m、 $d = 0.090$ mと、クラックサイズはイベント1に比べ1桁大きいことがわかった。これらの結果から、草津白根山ではマグマからの脱ガスにより帯水層中の割れ目に水蒸気ガスが供給され、それが飽和条件温度まで冷やされることで、クラック内はミス状ガスで満たされたと推測される。また、イベント1、2のクラックサイズの違いはこの水蒸気ガスの供給量の違いに起因するものと考えられる。先行研究(Kumagai et al., JGR, 2002)では観測ピーク周波数とクラックモデルの固有周波数の系統的比較が難しかったため、クラック形状のパラメータ(W/L 、 L/d)と振動モードを仮定し解析を行っていた。しかしクラックモデルの固有周波数の解析式を用いた本研究の手法により、複数の観測ピーク周波数の振動モードの同定を系統的かつ容易に行うことが可能となり、その結果クラックモデルの全てのパラメータを制約できることを示した。

ブルカノ式噴火に付随して発生する連続噴煙に伴う長周期振動

Acoustic VLP signals accompanying the continuous ash emission following Vulcanian eruptions

*山田 大志¹、青山 裕¹、西村 太志²、井口 正人³、Muhamad Hendrasto⁴*Taishi Yamada¹, Hiroshi Aoyama¹, Takeshi Nishimura², Masato Iguchi³, Muhamad Hendrasto⁴

1.北海道大学大学院理学院、2.東北大学大学院理学研究科、3.京都大学防災研究所、4.火山地質災害軽減センター

1.Graduate School of Science, Hokkaido University, 2.Graduate School of Science, Tohoku University, 3.DPRI, Kyoto University, 4.CVGHM

火山噴火に伴う空気振動（空振）の観測は多くの火山で行われており、爆発のメカニズムに関する理解が数多くの先行研究によって得られている。しかしブルカノ式噴火などの火山爆発に伴い火山近傍で観測される空振シグナルのうち、周期が10秒以上の帯域（VLP）に関する観測研究の事例は少ない。

我々は2012年から2013年にかけての約一年間に、インドネシアのスラウェシ島北部に位置するロコン火山近傍において広帯域地震、空振観測を行った。臨時観測に用いた機器は、地震計(Trillium 40, Nanometrics Inc.)は0.025-50 Hzに、空振計(SI 102, Hakusan Co.)は0.05-1500 Hzの帯域にそれぞれフラットな応答性能を有している。観測期間中にロコン火山ではブルカノ式噴火が約50回ほど発生したが、全体のうち8割ほどのイベントは最初の爆発の発生から数十秒から数百秒の間隔の後に連続噴煙の発生を伴っている。地震波形と空振波形の生波形では、爆発に伴っては立ち上がりの鋭いインパルス的なシグナルが、連続噴煙に伴っては振幅が紡錘状に変化する微動がそれぞれ認められる。最初の爆発に伴い放出される地震波と空振は、どちらも周期が10秒より短い帯域に主要な強度を持ち、VLP帯のシグナルの最大振幅は生波形に比べるとおよそ1/100程度でしかない。一方で、連続噴煙に伴う地震、空振波形には、規模の大きなイベントにおいて微動の開始付近にVLP帯に卓越する有意なパルスが認められる。各観測点におけるこの位相の到来時間は火口付近から音波速度で伝播する見かけ速度で説明できることから、VLPパルスは連続噴煙に伴う長周期の空振によって励起されていることが示唆される。またバンドパスフィルター（0.03-0.1 Hz）を適用した上下動変位波形におけるVLPパルスには、空振計の感度帯域よりも長周期のシグナルが卓越していることから、後で述べる解析では上下動地震波形を用いている。

同様の連続噴煙に伴う長周期振動は、2011年の霧島山新燃岳で発生したブルカノ式噴火においても認めることができる。防災科学研究所が運用している基盤的火山観測網のうち、新燃岳近傍の万膳 (n.krmv)、夷守台 (n.krhv) 観測点での広帯域地震波形(Trillium 240, Nanometrics, Inc., 0.004-200 Hz)には、2011年1月27日に発生したブルカノ式噴火と後続する連続微動が記録されている。また気象庁が運用する高千穂河原 (v.kitk)、湯之野 (v.kiam) 観測点における空振計も同様に爆発と付随する微動を記録している。万膳、夷守台における上下動地震波形にバンドパスフィルター（0.01-0.05 Hz）を適用すると、微動部分に音波速度で火口から伝播する位相を確認することができる。また両観測点における微気圧計 (AP270, Koshin Co.) のデータに同様のバンドパスフィルターを適用すると、バンドパス地震波形で確認された位相と相似な圧力変動が認められる。

上で述べた二つの火山では地震観測点が火口から数キロの距離に位置し、VLPパルスのバンドパス上下動速度波形の最大振幅はどちらの火山でも 10^{-7} m/sのオーダーである。大気中の圧力変化とそれに伴い生じる地動の関係はBen-Menahem and Singh (1981)によって定式化されており、地表付近の地殻の弾性波速度と密度を仮に2700 m/s, 2500 kg/m³とすると、VLPパルスを励起した観測点直上での圧力変化はおよそ 10^1 Paのオーダーと推定される。解析対象としている波の波長が 10^3 m程度であることから、VLPパルスが線形音波として火口から伝播し、ポイントソースによって励起されていると仮定すると、励起源における大気質量の時間変化が推定できる (Lighthill, 2001)。両火山いずれの場合も、大気密度を加味すると連続噴煙の開始に伴うソースでの大気の体積変化率の最大値はおよそ 10^5 m³/sのオーダーと推定される。この推定は観測点特性、風速などによる誤差の影響を含むと思われるが、他の研究で報告されているブルカノ式噴火での物質の噴出率と概ね整合的である (例えば、小屋口, 2008)。VLPパルスが微動の開始部分に発生していることなどと合わせて考慮すると、こ

の長周期振動は連続噴煙に伴う噴煙柱形成時の大気変動によって説明が可能である。この推定量と噴煙の規模や降灰量との関連を調べることで、噴煙柱やブルカノ式噴火のダイナミクスの理解に寄与できる可能性がある。※霧島山新燃岳でのブルカノ式噴火に関しては、防災科学研究所、気象庁のデータを使用させて頂きました。

キーワード：噴煙、ブルカノ式噴火、インフラサウンド

Keywords: Ash column, Vulcanian eruptions, Infrasonic

蔵王山における人工地震構造探査

Active source seismic experiment in Zao Volcano, Japan

*山本 希¹、三浦 哲¹、市來 雅啓¹、青山 裕²、筒井 智樹³、江本 賢太郎¹、平原 聡¹、中山 貴史¹、鳥本 達矢¹、大湊 隆雄⁴、渡邊 篤志⁴、安藤 美和子⁴、前田 裕太⁵、松島 健⁶、中元 真美⁶、宮町 凜太郎⁶、大倉 敬宏⁷、吉川 慎⁷、宮町 宏樹⁸、柳澤 宏彰⁹、長門 信也⁹

*Mare Yamamoto¹, Satoshi Miura¹, Masahiro Ichiki¹, Hiroshi Aoyama², Tomoki Tsutsui³, Kentaro Emoto¹, Satoshi Hirahara¹, Takashi NAKAYAMA¹, Tatsuya Torimoto¹, Takao Ohminato⁴, Atsushi Watanabe⁴, Miwako Ando⁴, Yuta Maeda⁵, Takeshi Matsushima⁶, Manami Nakamoto⁶, Rintaro Miyamachi⁶, Takahiro Ohkura⁷, Shin Yoshikawa⁷, Hiroki Miyamachi⁸, Hiroaki Yanagisawa⁹, Shinya Nagato⁹

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

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

蔵王山は、東北日本弧中央部に位置し宮城県と山形県にまたがる第四紀火山であり、現在の蔵王山の火山活動の中心となる中央蔵王においては、火口湖・御釜周辺での火山泥流を伴う水蒸気噴火など多くの噴火記録が残されている。一方、蔵王山直下では、2011年東北地方太平洋沖地震以後、深部低周波地震の活発化や浅部における長周期地震や火山性微動の発生が認められ、今後の活動に注視が必要であると考えられる。そのため、地震波速度構造や減衰域分布といった将来の火山活動推移予測につながる基礎情報を得るために、「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の一環として、人工地震を用いた構造探査実験を実施した。

本人工地震探査は、全国の大学・気象庁あわせて9機関から21名が参加して2015年10月に行われ、2箇所のダイナマイト地中発破（薬量200kgおよび300kg）によって生じた地震波を132点の臨時観測点（2Hz地震計・500Hzサンプリング記録）および定常観測点において観測した。測線は、屈折法解析による火山体構造の基礎データの取得およびファン・シューティング法的解析による御釜周辺の地下熱水系の解明を目指し、配置設定を行った。また、地中発破に加え、砕石場における発破も活用し、表面波解析による浅部構造推定の精度向上も目指した。

得られた発破記録から、解析の第一段階として、初動到達時刻を手動検出して得られた走時曲線のtime term法解析を行った結果、P波速度5.2~5.5 km/sの基盤が地表下約0.5kmの浅部にまで存在することが明らかとなった。また、本人工地震探査時および2014年に予備観測として行った直線状アレイを用いた表面波の分散性解析の結果も、ごく浅部まで高速度の基盤が存在することを示し、これらの結果は調和的である。一方、ファン状に配置した観測点における発破記録の初動部および後続相のエネルギーを発破点からの方位角毎に求め、御釜・噴気地帯を通過する前後の振幅比から波線に沿った減衰を推定した結果、御釜やや北東の深さ約1km前後に減衰の大きな領域が存在することが示された。

中央蔵王においては、これまで主に地質学的手法により山体構造の議論が行われてきており、標高1100m以上の地点においても基盤露出が見られることなどから表層構造が薄い可能性が示唆されてきたが、本人工地震探査の結果はこの地質断面構造とも整合的である。一方で、得られた速度構造は、これまで蔵王山の火山性地震の震源決定に用いられてきた次元速度構造よりも有意に高速度であり、今後震源分布の再検討が必要である。また、御釜やや北東の噴気地帯直下の減衰域は、長周期地震の震源領域や全磁力繰り返し観測から推定される熱消磁域とほぼ一致し、破碎帯およびそこに介在する熱水等の流体の存在を示唆する。今後のさらなる解析により、震源推定の高精度化など、火山活動および地下流体系の理解向上が期待される。

キーワード：蔵王山、人工地震探査、火山地下構造

Keywords: Zao Volcano, Active seismic experiment, Volcanic structure

レシーバ関数のインバージョン解析による富士山下のS波低速度領域の推定

Estimation of the low velocity region beneath Mt. Fuji revealed by inversion of receiver functions

*木下 佐和子¹、西田 究¹、五十嵐 俊博¹、青木 陽介¹、武尾 実¹、上田 英樹²

*Sawako Kinoshita¹, Kiwamu Nishida¹, Toshihiro Igarashi¹, Yosuke Aoki¹, Minoru Takeo¹, Hideki Ueda²

1.東京大学地震研究所、2.防災科学技術研究所

1.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

富士山は日本の代表的な活火山であり、マグマの噴出量が高いことと、玄武岩質のマグマを噴出する、という2つの特徴を持っている。富士山がこのような性質を持つ理由のひとつとして、富士山は太平洋プレートの沈み込みによってできた伊豆ボニンマリアナ島弧(IBM)が衝突して沈み込む、非常に複雑な場所にあるため、マグマ供給系が通常の島弧火山とは異なる、ということが考えられている。先行研究では、富士山直下20km以深の詳細な地震波構造は求められておらず、本研究では、富士山周辺のIBM構造と富士山下にある低速度領域の分布を求めるために、レシーバ関数解析を実施した。

レシーバ関数のラディアル成分の振幅を、富士山を通る断面に投影すると、富士山下約40-60kmの深さに南北に沈み込む強い正の速度境界面があり、富士山直下でその境界面は不連続になっていることがわかった。また、富士山下で低周波地震が発生する領域の下、およそ25kmの深さに顕著な正の速度境界面があることがわかった。富士山周辺では、表層に地震波速度が遅い火山噴出物が堆積しており、さらに深さ20km付近には顕著な地震波速度低速度領域があると考えられるため、レシーバ関数の振幅断面からのみ、速度構造を議論することは難しい。そこで、インバージョン解析によって、地下のS波速度の絶対値を求めた。レシーバ関数の振幅は地下の速度コントラストに依存するため、先行研究による表面波分散曲線を一緒にインバージョンすることで、解を安定させた。インバージョンの結果、以下に挙げる3つの結果が得られた。1) 先行研究による沈み込む前のIBM島弧の速度構造と比較すると、伊豆半島では、IBM弧の地殻の厚さは約40kmの厚さまで成長している。2) 通常の海洋プレートが沈み込む場所では、先行研究のトモグラフィの結果と整合的な場所にS波低速度領域があり、これは沈み込む海洋性地殻を表している。3) 富士山の下には横方向に約40km、深さ方向に約20kmの大きさのS波低速度領域が存在する。

本研究の結果より、富士山のマグマ噴出率が高いのは、地下のマグマ溜まりが大きいからであり、また、富士山のマグマが玄武岩質なのは、マグマ溜まりの場所が深いからである、と解釈することができる。

キーワード：富士山、レシーバ関数解析、伊豆ボニンマリアナ島弧

Keywords: Mt. Fuji, Receiver functions, Izu-Bonin-Mariana arc

ノイズ相関解析に基づく火山における地震波速度変化の特徴—気象庁データの解析—

Characteristics of seismic velocity changes on volcanoes using noise correlation method:
Analyses of JMA seismic data*高野 智也¹、西村 太志¹、中原 恒¹*Tomoya Takano¹, Takeshi Nishimura¹, Hisashi Nakahara¹

1.東北大学理学研究科

1.Graduate School of Science, Tohoku University

地震波干渉法により、地震や火山活動に伴って0.1~数%の地震波速度変化が検出されている。特に火山体においては、マグマの貫入等による地震波速度変化が検出されている。噴火に先行する地震波速度変化を検知するためには、静穏期の速度変化の系統的な特徴を調べておくことが必要である。そこで本研究では、気象庁から配信されている日本の活火山における雑微動記録を用いて相関解析を行い、火山間で結果を比較することによって火山体における地震波速度変化の特徴を調べる。

気象庁で保守運用されている、短周期地震計の連続記録の上下動成分を利用して地震波速度変化を求めた。主に3点以上のGNSS観測点と2点以上の地震計が設置されている、北海道駒ヶ岳、雌阿寒岳、十勝岳、樽前山、磐梯山、安達太良山、那須岳、草津白根山、伊豆大島、三宅島、雲仙岳、桜島の12火山を解析した。観測期間はGNSSデータが公開されている2012年1月1日から2013年12月31日までの2年間とした。各火山において観測点ペア数は1ペアから45ペアまであり、観測点間距離は約1kmから5kmの範囲である。0.5-1Hz、1-2Hz、2-4Hzの周波数帯域でバンドパスフィルタを適用し、雑微動の相互相関関数(CCF)を計算した。全期間スタックしたCCFと、1日分スタックしたCCFから、1日ごとの地震波速度変化を求めた。地震波速度変化の推定にはMWCS法(Poupinet *et al.*, 1984)を用いた。

地震波速度は、数ヶ月から1年程度の周期で約1~3%変動しており、噴火や地震等がないような時期でも地震波速度は大きく変化していることがわかった。複数の観測点ペアの取れる火山において、各観測点ペア間で地震波速度変化同士の相関係数を求めたところ、例えば1-2Hz帯で相関係数が0.5以上の火山は伊豆大島、樽前山、三宅島、北海道駒ヶ岳のみであった。この結果から多くの火山では数kmの範囲内において、局所的に地震波速度変化が起きている可能性が推察された。更に、同一ペアの各周波数帯域間で地震波速度変化を比較したところ、速度変化の時系列に相関はあるものの振幅が異なる例だけでなく、トレンドや位相が大きく異なる火山が多数見られた。このような不規則な特徴が見られた要因は必ずしも明らかではないが、深さによる速度変化の要因の違いや雑微動の伝播特性の違い等を反映している可能性が考えられる。

火山性地殻変動による応力変化に伴って地震波速度が変化している例が報告されているので、各火山で得られた地震波速度変化と歪変化の相関性を調べた。歪変化は3点の気象庁のGNSS観測点から推定した。測定誤差を考慮して、面積歪が -2×10^{-6} 以下または 2×10^{-6} 以上の期間のみを解析に用いた。面積歪が最大せん断歪より卓越している期間のみを抽出して、速度変化と歪変化の相関性を調べた。相関解析に十分なサンプル数のある伊豆大島と樽前山では、相関係数が-0.6以下で、速度変化に明瞭な歪依存性が見られた。しかしながら、観測点ペア間や周波数間でばらつきの大きい十勝岳では十分なサンプル数があるものの、速度変化の歪依存性は得られなかった。

本研究では、噴火のない期間の火山において約1~3%の地震波速度変化を検出した。観測点の中には速度変化の明瞭な歪依存性を示す点もあり、面積歪が速度変化に影響を与える可能性が示唆された。

キーワード：地震波速度変化、地震波干渉法、火山性地殻変動

Keywords: Seismic velocity changes, Seismic interferometry, Volcano deformation

Shallow crustal velocity structures obtained from ambient noise study of dense broadband seismic array in the Tatun Volcano Group of Taiwan

*Yu-Chih Huang¹, Tsuneomi Kagiya¹, Cheng-Horng Lin^{2,3}

1.Aso Volcanological Laboratory, Institute of Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, Kumamoto, Japan, 2.Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taipei, Taiwan, 3.Taiwan Volcano Observatory at Tatun, Ministry of Science and Technology, Taipei, Taiwan

The Tatun Volcano Group (TVG) is located in the northern tip of Taiwan Island with a radius of 10 km. The TVG situates adjacent to the Taipei metropolis in the north and was predominantly active in the Quaternary period. Shanchiao Fault is an active normal fault transits the TVG in northeastern orientation. A sequence of normal faults and scarps inspected on the hanging wall of Shanchiao Fault and sub-parallel to its orientation in the extent of TVG. Since the major geothermal activities such as fumaroles, solfataras and hot springs also expose on the hanging wall of the Shanchiao Fault, it is thought to be the passage for volcanic-hydrothermal gas and fluid. Besides, Kanchiao Fault is a suspected active fault and known as the important geologic structures adjacent to the southeast of TVG.

The subjects about TVG is already extinct or still active are also under frequent discussion. Attribute to new technological advances and methodologies improvement, various types of observations and experiments were implemented to monitor the activities of TVG in recent years. Basing on the results of these recent researches, various evidence proved that TVG is not extinct, should be a potentially active volcano and cannot exclude the possibility of volcanic eruptions in the future. It is important to understand the magma chamber and detailed velocity structures below the TVG but are still not well resolved. The fundamental theory to obtain S-wave velocity structure from ambient seismic noise analysis has been already proofed and provided important constraints around the world in the past decade. We present the results of ambient seismic noise studies in the TVG with dense seismic monitoring network.

The seismic network in this research is composed with three sub-networks, totally there are 40 free-field seismic stations equipped with Guralp CMG-6TD broadband seismometers and GPS timing system. The interstation distances are between 0.6 km and 28 km, with an average of 8.5 km. The cross-correlation functions (CCFs) were calculated with the methodologies of one-bit cross-correlation and spectral whitening. We selected vertical component to obtain the CCFs in the period band 0.5-7 s for all station-pairs and derived with the selected daily recordings in 2014. The daily CCFs were stacked monthly and then the monthly CCFs were stacked again to further obtain TDEGFs and Rayleigh wave phase velocity dispersion curves. We stacked positive and negative lag times of TDEGF to enhance coherent signals and suppress the effect of uneven seismic noise sources distribution. The maximum period can be measured for each station-pair is related to the inter-station distance and phase velocity. For far-field approximation, the inter-station distance is required to be at least twice of propagating surface wave wavelengths in this study to assure surface wave can well develop between station-pair.

We focus on phase velocity maps in the period band 0.5-3 s in the TVG and the study region is parameterized by $0.02^\circ \times 0.02^\circ$ grid points. Phase velocity maps show high velocities are dominate between Shanchiao Fault and Kanchiao Fault at study periods, which maybe relate to the solidified andesite lava. Especially in the south parts of Jinshan area, which locates the earliest stage of volcanic activities in the TVG. At periods longer than 2.5 s, high velocities separate into two major regions beneath the ChiShingShan and south parts of Jinshan area. At periods shorter than 1 s, there are some localized low velocity areas correlate well with the surface geothermal

activities. The regions north (footwall) of Shanchiao Fault show low velocities at the study periods maybe relate to the Tertiary strata already covered by andesite lava flows with dozens of meters thickness. The detailed S-wave velocity structures in the shallow crust will be investigated and searching for possible candidates of magma passages and hydrothermal reservoirs beneath TVG.

Keywords: ambient seismic noise tomography, Tatun Volcano Group, shallow crust

応力場の時間変化に基づく御嶽火山のモニタリング

Monitoring eruption activity using temporal stress changes at Mount Ontake volcano

*寺川 寿子¹、加藤 愛太郎¹、前田 裕太¹、山中 佳子¹、堀川 信一郎¹、松廣 健二郎¹、奥田 隆¹

*Toshiko Terakawa¹, Aitaro Kato¹, Yuta Maeda¹, Yoshiko Yamanaka¹, Shinichiro Horikawa¹, Kenjiro Matsuhira¹, Takashi OKUDA¹

1.名古屋大学, 大学院環境学研究科, 附属地震火山研究センター

1. Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

On 27 September 2014, around 11:52 a.m. JST, Mt. Ontake volcano produced a hydrothermal eruption with a VEI value of 2. We examined temporal changes in the local stress field at Mt. Ontake over a period of 17 months (August 2014 to December 2015) with the 2014 eruption from focal mechanism solutions of 168 volcano-tectonic (VT) events (Terakawa et al., in press). In general, the local stress field around volcanoes represents the superposition of the regional stress field caused by plate motion and stress perturbation related to volcanic activity. The regional stress field does not change over periods of weeks to months, and so temporal stress changes over such time periods are attributed to volcanic activity.

We defined the angular difference between the observed slip vectors and theoretical slip vectors expected from the regional stress field as the misfit angle, based on the concept that seismic slip occurs in the direction of the resolved shear traction acting on a pre-existing fault. The misfit angles larger than the estimation errors of the regional stress field and focal mechanism solutions ($>65^\circ$) mean that the local stress field was deviated from the regional stress field due to enhanced volcanic activity. The average misfit angles remarkably exceeded the threshold value (65°) two weeks before the eruption, but immediately after the eruption the values showed a marked decrease. The pre-eruption seismicity was dominated by normal faulting with ENE-WSW tension, indicating that the volcanic activity caused strong tension for the pre-eruption period. On the other hand, many reverse faulting with ESE-WNW compression for the post-eruption period corresponded to shrinkage of the volcanic edifice, controlled by the regional stress field.

The stress perturbation for the pre-eruption period suggests existence of dyke-type volcanic system beneath Mt. Ontake in which inflation is driven by magmatic/hydrothermal fluids propagating upwards in a vertical crack. This is consistent with the distribution of hypocenters of volcanic earthquakes relocated by a DD method (Kato et al., 2015), the alignment of craters from the 2014 eruption (GSI, 2014), and source mechanisms of VLP events prior to the 2007 and 2014 eruptions (Nakamichi et al., 2009, Maeda et al., 2015).

The time history of average misfit angles showed slight enhancements in November 2014, January-February 2015, June-July 2015, and October-December 2015. Especially, the final stage of the enhancement in June-July 2015 was synchronized with an unusual tiltmeter signal indicating summit upheaval. These observations suggest that some re-pressurization/de-pressurization processes repeated after the 2014 eruption. Temporal stress changes revealed in this study were well associated with physical processes at the active volcano. This indicates that the method has potential to contribute to eruption monitoring.

キーワード：御嶽山、応力場、地震のメカニズム解

Keywords: Mount Ontake, stress fields, focal mechanism solutions

ALOS-2/PALSAR-2により検出された御嶽山2014年噴火後の収縮源推定

Deflation source after the September 2014 eruption of Ontake Volcano, Japan detected by ALOS2/PALSAR2 InSAR

*成田 翔平¹、村上 亮¹

*Shohei Narita¹, Makoto MURAKAMI¹

1.北海道大学地震火山研究観測センター

1.Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido Univ.

1. はじめに

岐阜 - 長野県境に位置する御嶽山（標高3067m）では2014年9月27日に35年ぶりに本格的な水蒸気噴火が発生した。この噴火の約3週間前から火山性地震が増加し、噴火の約10分前にはその震源が徐々に浅くなり始め、これにほぼ同期して傾斜変動が記録された。噴火は地獄谷に新たに形成された火口列から始まり、その活動度は日ごとに指数関数的に減衰し現在に至っている。

噴火前後に行われた観測では、噴火時のクラック形成を示唆する様々な変動が捉えられている。噴火直前に発生したVLPの解析では、新火口列直下300-1000mにほぼ東西に開口するクラックが推定されている（Maeda et al., 2015）。さらに、ALOS-2による噴火を挟むペアのInSAR解析では、変動は新火口列に沿う、深さ100mから1400mまで伸びるほぼ鉛直な開口性クラックの形成によるものであることが推定された（国土地理院, 2015）。一方、ALOS-2データにより、噴火後も山頂付近では大きな収縮性の地殻変動が続いていることが明らかになっている。本研究は、この衛星データを詳細に解析し、噴火後1年間の御嶽山の地殻変動源を推定し、先行研究で推定された変動源との位置関係や他の観測結果との関連を調べることを目的とする。

2. 解析結果

解析対象としたALOS-2データは、2014/10/03-2015/06/12、2014/10/03-2015/11/13、および2014/06/12-2015/11/13の3ペアである。いずれも、北行軌道・右向き観測・オフナディア角32.4°のデータである。これらは無積雪期に観測されたため、干渉性はシーン全体で良好である。干渉解析にはInSAR解析ソフト：RINC (version 0.36) を使用した。

干渉解析の結果、いずれのペアにおいても地獄谷周辺の2kmx1kmの領域で収縮性の変動が確認できた。視線方向距離(LOS)の変化は全て伸びのセンスで、その最大値は2014/10/03-2015/11/13 (13ヶ月間)で45cm程度、2014/10/03-2015/06/12 (8ヶ月間)で30cm程度、2014/06/12-2015/11/13 (5ヶ月間)で12cm程度であった。これらのInSARデータを、半無限等方均質媒質を仮定したMogiモデルを用いてインバージョンを行った。その結果、観測値はMogiモデルでかなり良好に説明され、変動源の深さはいずれも400m付近に落ち着いた。その体積減少量は、前述した13ヶ月間では 3.7×10^5 、8ヶ月間では 2.4×10^5 、6ヶ月間では 1.1×10^5 と推定された。

3. 考察と今後の課題

今回推定された収縮源の深さは一貫して400m付近であった。一方、2005年8月-2007年9月に山頂付近で行われたGNSS繰り返し観測では、地獄谷直下1km程度に圧力源が推定された。これは、深さは異なるが、水平位置は今回の変動域の南端に位置している。また、2007年-2010年のALOSデータの時系列解析結果によると、山頂付近を中心にしたLOS方向の短縮速度が1cm/yr程度である隆起センスの変動が示唆されている（第130回火山噴火予知連絡会資料）。これらの地殻変動間の関係を検討するためには、収縮源の位置やその時間変化を詳細に追跡する必要がある。ただし、変動域の斜度は約30°と急峻であり、地形効果が変位に及ぼす影響は無視できない可能性がある。そのため、今後は有限要素法を用いた詳細な解析を行い、変動源の推定をより高精度に行う。

謝辞：本研究では、小澤拓 博士が開発したInSAR解析用ソフトRINCおよび国土地理院の10m標高と電子地図を使用しました。また、InSAR解析に用いた衛星画像の原データの所有権はJAXAにあります。これらのデータは、火山噴火予知連絡会衛星解析グループを通じて提供されました。ここに記して、以上の方々に感謝を申し上げます。

キーワード：御嶽山、水蒸気噴火、地殻変動

Keywords: Ontake, phreatic eruption, volcano deformation

航空レーザ測量による2014年の御嶽山噴火前後の地形変化

Landform change detected from the airborne laser survey before and after the 2014 Eruption of Ontake Volcano, central Japan

*鈴木 毅彦¹、山岡 耕春²、千田 良道³、宇野女 草太³

*Takehiko Suzuki¹, Koshun Yamaoka², Yoshimichi Senda³, Souta Unome³

1.首都大学東京都市環境学部、2.名古屋大学環境学研究所附属地震火山研究センター、3.中日本航空株式会社
1.Faculty of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan University, 2.Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 3.Nakanihon Air Service

火山噴火の前後に生ずる地形変化には多様な要因があり、その広がり・変化量・速度も多様である。これらの幾つかは土石流、崩壊などを通じて周辺域に影響を及ぼす。このため噴火直後からの地形変化を把握することは周辺域への影響を予測する上で欠かせない。しかし多くの場合、噴火開始以降は火口周辺に近づくことが困難な場合が多く、十分に地形変化を把握することができない。2014年御嶽山噴火も同様であり、噴火直後の地形変化や広範囲における面的な地形変化の把握は限られている。この様な場合、航空レーザ測量を繰り返し実施すれば測量間の地形変化をレーザデータ差分として捉えることができる。本研究では同噴火前後の地形変化を2005年、2014年噴火直後、2015年9月5日の3時期に取得された航空レーザ測量データをもとに把握することを試みた。対象とした地形変化は、火山灰降下、噴石、火口地形変化、泥流流下に伴う侵食・堆積に関わるものである。

火山灰の堆積による地形変化 2014/2005間のレーザデータ差分によれば、一ノ池南部において+0.3~+0.6 m (正は高度増加)、剣ヶ峰西側の稜線で+0.3~+0.6 m、主火口列付近で+10 m前後の標高較差を示す地形変化が認められた。主火口列に近いほど正の較差量が大きいため火山灰降下によると思われる。火山噴火予知連絡会資料「2015年8月19-20日の御嶽山山頂調査の速報」によれば降灰量は「一ノ池北の二ノ池南西側斜面で8 cm、一ノ池西側で20-37 cm、剣ヶ峰西側の一ノ池南縁の鞍部で約70 cm」とされており、本研究の推定と整合する。剣ヶ峰西側稜線南側斜面(地獄谷上部)では+2~+6 mの地域が面的に認められ、主火口列近傍付近では+8~+10 mの地域がある。後者の領域は鹿の角状を示す複雑な形を呈し噴火前の谷地形に一致する。噴火前と噴火直後(2015年)の空中写真を比較すると地獄谷上部では起伏変化に富んだ急峻な谷地形が噴火後埋められたように滑らかな地形に変化しており、火山灰が埋谷したと思われる。谷地形に強く規制されることから火砕流による堆積の可能性がある。同地域は火口の極近傍で急斜面であることから現地での火山灰の層厚が得られていないが今回レーザデータ差分により具体的な層厚が得られた。ところでこの谷埋めを伴う堆積物は、2015/2014の差分によれば、一年間でほぼ消滅している。すなわち地獄谷上部では2015年9月までにはこれら火山灰が侵食・移動し消滅した。さらに2015/2005と比較すると、噴火後1年間での侵食量は噴火前のレベルに戻るだけでなく、-4~-6 m程度の侵食傾向を示す。降灰が結果的には長期的な侵食を促すことが伺える。

W1火口付近の地形変化 一ノ池の西側斜面付近においては、西北西-東南東方向に190 m x 35 m範囲の高度増加部が存在する。2014年噴火W1火口出現に伴い形成されたとみられる。詳細に観察すると直径約20 m、深度-6~-10 mのほぼ円形の火口地形が認められ、そこから西方に泥流が流出し、高度増加部の一部をなしているのが確認できる。差分によれば泥流の層厚は最大で2-1 mとみられる。火口形成や泥流流下は空中写真からも容易に判読できるが、その深度・層厚はレーザデータ差分により定量的に把握できる。ところで噴火直後に認められた190 m x 35 m範囲の高度増加部の東半分は2015年9月時点でほぼ消滅した。その理由の1つは東西に発達したガリーの形成による。

谷沿いにおける侵食・堆積 噴火後一年間の2015/2014差分データで全体的に最も目立つ地形変化は御岳山全域の谷沿いでみられる侵食・堆積作用である。山頂西側の尺ナンゾ谷上流部、白川上流部、赤川-地獄谷上流部、南俣川上流部、湯川上流部の各所で-1~-6 mの高度低下が確認でき、谷沿いで侵食活動が活発であることがうかがわれる。これらの箇所は火山土地条件図(国土地理院)で「谷及びガリー」と区分されている侵食地形に相当する。一方で白川や湯川沿いでは100-500 m程度の区間で10 m以下の高度上昇が認められ、ところにより堆積傾向が卓越する。こうした傾向は2015/2005の差分データでも認められる。このことは噴火後の一年間で噴火前

の河床レベルに戻るのではなく、元の河床においてさらに洗掘が進むか、あるいは谷の埋積が進行したことを示唆する。

噴石 本噴火により放出された噴石の分布把握を試みた。剣ヶ峰南南東斜面では数m×数m規模の高度増加を示す箇所が複数認められた。しかしこれらは噴火前から径1m以上の岩塊が存在する場所であり、2014年噴火放出物とは考えられない。噴火前のレーザーデータの精度が十分でないため、数m×数m規模の噴石を認定するのは困難であった。

まとめ 火山噴火の前後に生ずる地形変化を把握するうえで航空レーザー測量を用いることの有効性が確かめられた。一方でより詳細な変化を捉えるためには噴火前から高精度な航空レーザー測量データを整備することの必要性が浮かび上がった。本研究には特別研究促進費「2014年御嶽山火山噴火に関する総合調査」を使用した。

キーワード：航空レーザー測量、2014年御嶽山噴火、地形変化

Keywords: Airborne laser survey, 2014 Eruption of Ontake Volcano, Landform change

阿蘇火山中岳における2015年9月14日のマグマ水蒸気噴火とその噴出物

The September 14, 2015 phreatomagmatic eruption of Nakadake crater, Aso Volcano, Japan and its deposits

*宮縁 育夫¹、原 千穂子¹、飯塚 義之²、横尾 亮彦³

*Yasuo Miyabuchi¹, Chihoko Hara¹, Yoshiyuki Iizuka², Akihiko Yokoo³

1.熊本大学教育学部、2.中央研究院地球科学研究所、3.京都大学大学院理学研究科

1.Faculty of Education, Kumamoto University, 2.Institute of Earth Sciences, Academia Sinica,

3.Graduate School of Science, Kyoto University

阿蘇火山中岳では2014年11月～2015年5月頃に本格的なマグマ噴火が発生し、その後は湯だまり（火口湖）が再生されるなど比較的穏やかな状況であったが、2015年9月14日9時43分に大きな空振を伴う爆発的な噴火が発生した。筆者らは噴火発生直後から中岳第1火口周辺域での現地調査とともに、遠方域においても降灰調査を行い、多数の噴出物試料を採取した。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。

9月14日噴出物は、噴出形態から弾道堆積物、火砕密度流堆積物、降下火砕物の3つに分けられる。弾道放出された噴石は火口中心から500 m程度の範囲に散在していた。噴石の中で最大のものは長径1.6 mであったが、大部分は径10 cm以下のものであった。南西側火口縁の3.5 m²の範囲に堆積する全158個の噴石を採取して観察した結果、約半数は新鮮に見える玄武岩質安山岩で、残りは変質した噴石であった。火砕密度流堆積物は火口周辺の約2.3 km²の範囲に広がっていたが、最大層厚は10 cm以下と薄く、礫成分をほとんど含まない砂質のものであった。層厚分布から火砕密度流堆積物の量は5.2万トン程度と概算された。降下火砕物は砂～シルト質の淘汰の良い堆積物であり、現地では火口西方8 km付近まで明瞭に認められた。気象庁によると、降灰域は福岡県南部までの広範囲に及んでいたことがわかっている。降下火砕物の量は約2.7万トンであり、火砕密度流堆積物と合わせると、この噴火による総噴出量は7.9万トン程度になる。

現地で採取した火砕密度流堆積物と降下火砕物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、4～5割程度のさまざまな色調の岩片とともに、2～3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5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。今回の噴火はビデオ映像等に記録されている噴煙の状況、弾道放出や火砕密度流の発生、さらに噴出物中に新しいマグマに由来すると考えられる2～5割程度の物質の存在から、マグマ水蒸気噴火であったことは明らかである。中岳では1979年9月6日や1990年4月20日にも同様の噴火が発生しているが、噴出物量的に見ると、今回の噴火はそれらに比べて1桁程度規模が小さいものであった。

キーワード：マグマ水蒸気噴火、噴石、火砕密度流、阿蘇火山、中岳

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

阿蘇山2015年9月14日噴火後の細粒土砂の流出

Fine sediment discharge after Sep. 14, 2015 Eruption in Aso volcano

*阪上 雅之¹、國友 優¹、鈴木 大和¹*Masayuki Sakagami¹, Masaru Kunitomo¹, Yamato Suzuki¹

1.国土交通省 国土技術政策総合研究所 土砂災害研究部 土砂災害研究室

1.National Institute for Land and Infrastructure Management

1. はじめに

一般的に火山が噴火すると、堆積した火山噴出物により、斜面の浸透能が低下し、わずかな降雨でも火山泥流が発生することがあり（例えば、有珠山1977年噴火や雲仙1991年噴火など）、防災上注意が必要である。一方、噴火すれば必ず火山泥流が発生しやすくなるというわけでもない（例えば、厚井ほか（2013））。このため、火山泥流が発生しやすい環境場が形成されているか否かの判断指標の確立が求められている。藤田ほか（2012）は、破碎度が高くなる水蒸気噴火、マグマ水蒸気噴火時や降雨時など、細粒分を火口近傍の山腹斜面に降下・堆積させるようなメカニズムが働く場合に、火山泥流が発生しやすくなる可能性があることを指摘した。細粒分を火口周辺に降下・堆積させるメカニズムが働く現象としては、藤田ほか（2012）が指摘する現象のほか、火砕流（火砕サージ）を挙げることもできる。そこで筆者らは、2015年9月14日、1979年以来36年ぶりに比較的小規模ではあるもののマグマ水蒸気噴火及び火砕流の発生が確認された阿蘇中岳火口の周辺流域において、細粒土砂の流出の有無を確認すべく調査を行ったので、その結果を報告する。

2 調査内容及び結果

10月28日（10月期）、11月25-27日（11月期）、12月17-18日（12月期）の3時期に阿蘇中岳周辺の4流域（泉川、西岳川、仮川、倶利伽羅谷川）において現地調査を行い、流域内の土砂堆砂状況の確認などを行った。その他、泉川、西岳川、倶利伽羅谷川では流出土砂の採取を行い、粒度分析などを行った。現地調査の結果、泉川、西岳川では10月期時点で、仮川、倶利伽羅谷川では11月期時点で、細粒分に富む灰色の泥状堆積物（以下、細粒土砂）が、一般的に阿蘇山周辺の溪流に堆積している黒色火山砂を数mmから数cm程度の厚さで薄くコーティングするように覆っているのを確認した。細粒土砂の代表粒径（D50）は0.005~0.016mmとシルト分に富むものであった。泉川、西岳川では堆積物の粘性は高く、泥状であった。仮川及び倶利伽羅谷川では堆積物の一部は調査実施時点（12月18日）で既に固結し、スコップでは採取できないほどの硬さであった。流出してきた細粒土砂は、粘性が高く、乾燥すると固結する特徴を有していることがわかった。次に、細粒土砂の流出と降雨の関係を確認した。泉川、西岳川で細粒土砂の流出を確認した10月期の調査時点以前の最大時間雨量は26mm（10月1日22時：熊本県「草千里」雨量観測所）であった。したがって、これらの流域では26mm/h未満の降雨により細粒土砂が流出したものと考えられる。一方、仮川においては、11月18日正午頃に、前日から当日にかけての時間雨量最大25mm中（熊本県「倶利伽羅谷」雨量観測所）に砂防堰堤工事現場に多量の細粒土砂の流出があったこと、また近年このような細粒土砂の流出は経験したことがなかったことを、工事施工業者である翔栄建設㈱に対するヒアリングにより確認した。仮川流域では、9月14日の噴火以降、9月17日に最大時間雨量34mm（熊本県「倶利伽羅谷」雨量観測所）を観測していたが、その際は細粒土砂の流出はなかった。

3 考察

今回実施した調査により、火砕流（火砕サージ）の影響を受けた4流域全てにおいて細粒土砂の流出があり、またその土砂流出はこの地域としては年数回程度の降雨により発生していることを確認した。2014年から2015年9月までの代表的な3回の噴火での火山灰分布範囲（熊本大学、2015）を見ると、4流域いずれも降灰の影響を受けており、また2015年5月3日にはシルト以下の細粒成分に富む火山灰が降灰しているが、この期間中に本報告で紹介したような細粒土砂の流出は確認されていない（熊本県阿蘇地域振興局及び、翔栄建設㈱ヒアリング結果）。このことから、9月14日に火砕流（火砕サージ）が火口近傍に流下したことで火口周辺に細粒な火山灰が供給され、流域の環境場が変化し、細粒土砂が流下したことが推測される。このことは、今後細粒火山灰が火口近傍に堆積した際には、流域内の浸透能を下げる可能性を含んでおり、例え小中規模の噴火であってもマグマ水蒸気噴火及び火砕流（火砕サージ）が発生した後は、十分に気をつける必要があることを示唆している。

キーワード：阿蘇中岳、火山泥流、マグマ水蒸気噴火、火砕流

Keywords: Aso-Nakadake Volcano, Lahar, Phreatomagmatic eruption, Pyroclastic flow

箱根山の火山活動に伴う火山ガスの時間変化

Variation of fumarolic gas composition along the volcanic activity of Mt Hakone, Japan

*大場 武¹、谷口 無我¹、石田 賢¹、糸原 宗一郎¹、山岸 将大¹、代田 寧²*Takeshi Ohba¹, Muga Yaguchi¹, Ken Ishida¹, Soichiro Kumehara¹, Masahiro Yamagishi¹, Yasushi Daita²

1.東海大学理学部化学科、2.神奈川県温泉地学研究所

1.Department of chemistry, School of Science, Tokia University, 2.Hot Spring Res. Inst. Kanagawa Pref.

序

箱根山では数年毎に火山性地震が群発する。例えば2001年6月から10月にかけて発生した地震活動は活発で、中央火口丘の地下で体積膨張が観測され、山体に地殻変動をもたらした。この地殻変動は、深さ7kmの球状圧力源と、大涌谷および駒ヶ岳の浅部における潜在的な開口割れ目により説明された(代田ほか, 2009)。2001年7月には大涌谷に掘削されていたボーリング孔の蒸気放出圧力が異常に増大した(辻内ほか, 2003)。2015年4月末から群発地震が始まり、6月30日に小規模な水蒸気噴火が発生した。同年9月までに地震活動は急速に衰え、その後は平静な状態が継続している。

火山ガスの採取

大涌谷地熱地帯の自然噴気を2地点において2013年5月からほぼ毎月2016年2月まで繰り返し採取・分析した。採取地点のひとつは、駐車場の南東200mにある噴気で、ここでは定点と呼ぶ。二か所目は、駐車場の北方500mの山麓にある噴気で、近年になり出現した。この噴気を新噴気と呼ぶ。新噴気の周辺では、樹木が枯死している。両者とも、噴気の出口温度は96°C前後であり、水の沸点に近い。定点の噴気は、温泉水の湧出を伴うが、新噴気では、相対的に蒸気の放出が多い。

結果・考察

2015年の群発地震は4月26日に始まったが、我々はその2日前に噴気の採取をしていた。その際の噴気地帯の外観は通常と全く変わらなかった。通常と異なった事として、定点の噴気で空気の混入が大きく、噴気の採取中に、真空瓶の内圧が急速に上昇し、十分な量の噴気を導入することができなかった点が挙げられる。4月26日のCO₂/H₂S比は、定点と新噴気で、それぞれ、3.6, 20であった。群発地震開始後の5月8日にそれらは、それぞれ、4.4と31に増加していた。その後、CO₂/H₂S比は上昇を続け、小規模な水蒸気噴火が観測された6月30日に新噴気のは59に達した。興味深いことに、この59という値は、代田(2013)が群発地震の最中であった2013年2月26日に新噴気で観測した58という値とほぼ一致している。CO₂/H₂S比は7月以降、なだらかに低下し、2016年2月15日時点で、定点、新噴気がそれぞれ、3.9, 29まで低下した。CO₂/H₂S比の変動はCO₂/H₂O比の変動と平行しており、これらの比の変化の原因はCO₂濃度の変化と解釈できる。

定点の噴気に含まれるH₂Oの同位体比には群発地震の前兆とみなされる変動が観測された。2015年1月20日にdDは-51%であったが、その後急激に低下し、4月24日には-67%に達した。群発地震開始後の5月8日には-56%まで回復した。この同位体比の変化は、群発地震まえに噴気を形成している浅部熱水系で、マグマ起源のH₂Oの比率が低下し、地下水の寄与が大きくなったことを意味している。定点の噴気に関し、同位体比と類似した変化としてHe/N₂比を挙げるができる。2014年12月19日にHe/N₂比は3.3×10⁻⁴であったが、急速に低下し、4月24日には1.1×10⁻⁵まで低下した。群発地震開始後の5月8日には2.8×10⁻⁴まで回復した。同位体比とHe/N₂比の前兆的な変化は、浅部熱水系に対するマグマ起源のH₂Oの供給率が低下し、熱水系の圧力が低下し、空気の混入が起きたことを示唆する。マグマ起源のH₂Oの供給率の低下は以下のように解釈することができる。

2015年1月では、マグマから放出されるガスは浅部熱水系に供給され、その熱水系から地表に噴気が放出され、両者の流量は均衡していた。しかし、2015年2月からマグマを取り囲むシーリングゾーンが発達し、マグマから放出されるガスはシーリングゾーン内に蓄積し、マグマを圧迫した。ここでシーリングゾーンとは、R.O.Frunier(1999)が提案した概念で、マグマ性ガスの通路が二次鉱物(明礬石、黄鉄鉱、シリカ、硬石膏など)の沈積により自己閉塞する現象である。シーリングゾーンに阻まれ、2015年2月から4月にかけてマグマ性ガスに含まれる水蒸気の流量が減少し、天水起源地下水との混合の結果生じる噴気の6D減少を招いた。2015年4月下旬にシーリングゾーンは内部のガス圧増加により破壊し、マグマ性ガスが一気に浅部熱水系に

注入された。これが群発地震を引き起こし、小規模な水蒸気噴火の原因となった。

謝辞

本研究は文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の支援を受けました。

キーワード：火山ガス、箱根山、マグマ

Keywords: Volcanic gas, Mt Hakone, Magma

十勝岳における簡易型マルチガス観測（続報）

Multi-GAS measurements at Mt.Tokachidake

*岡本 理沙¹、橋本 武志¹*Risa Okamoto¹, Takeshi Hashimoto¹

1.北海道大学大学院理学院地震火山研究観測センター

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

はじめに： 火山ガスの組成や放出率とそれらの時間変化は、火山の地下で起こっている脱ガス過程や山体内部の構造を推定する手がかりとなる。いくつかのガス種について成分比を簡便に測定する方法として、マルチガスと呼ばれる装置が用いられている（例えば、Shinohara, 2005）。我々は、市販の携帯型ガス濃度計を組み合わせることで、簡易型のマルチガス装置としての利用を試み、十勝岳と樽前山で検証を行ってきた。これまでのところ、他機関の測定データと比較しても矛盾のない結果が得られている（岡本・他, 2015: JpGU）。十勝岳では、道総研地質研究所や気象庁のGNSS観測によって、2006年以降62-2火口近傍の膨張が捉えられていたが、2015年5月から8月にかけて地盤変動に局所的な加速がみられた。また、62-2火口の南側に位置する振子沢噴気孔群の拡大や、62-2火口底での湯沼の形成など、熱活動に変化が起こっている。我々は、火口ごとにガス組成に違いがみられるかどうかや、2014年9月の測定結果と比較して変化がみられるかどうかに着目して、2015年7月と9月に簡易型マルチガスによる再測定を行った。

測定方法： 本研究では3種類のガス濃度計（SO₂、H₂S、CO₂）を用いた。それぞれの濃度計の測定レンジはSO₂：0-100ppm、H₂S：0-100ppm、CO₂：0-9999ppmであり、分解能はそれぞれ、SO₂：1ppm、H₂S：0.1ppm、CO₂：1ppmである。時定数のもっとも長いCO₂濃度計に合わせるために、H₂SとSO₂の時系列に1分間の移動平均処理を施すことで装置ごとの応答性の違いに対応した。すべての濃度計の測定間隔を2秒に設定し、噴煙の中を、ガスマスクを付けて歩行することで測定を行なった。また、H₂S及びSO₂濃度計については感度校正を行い、相互干渉の補正を施した。なお、大正火口については、噴煙の大部分が地表付近を這うようにしてほぼ定常的に流れているため、噴煙断面の濃度分布をマッピングし風速を乗じることによって放出率も推定した。

測定結果と考察： 測定は、大正火口、62-2火口、振子沢噴気孔群の3箇所で行なった。濃度ピーク前後のデータを用いてガス種間の相関図を作成し、その傾きから成分比（モル比）を求めると、大正火口の成分比は、SO₂/H₂S：約6、CO₂/H₂S：約5、CO₂/SO₂：約1であった。一方、62-2火口ではCO₂/SO₂：約0.5、振子沢噴気孔群ではCO₂/SO₂：約0.4であった。なお、62-2火口と振子沢噴気孔群では、噴気にH₂Sはほとんど含まれていないことも判明した。各火口のガス成分比は2015年7月と9月でほぼ同様であり、2014年と比較しても有意な変化は認められない。そのため、この1年間で脱ガス機構に影響を与えるような変化は起こっていないと考えられる。一方、上記の方法で我々が2015年に測定した大正火口からのSO₂放出率は約6-7 t/dであった。気象庁のSO₂放出率観測（DOAS法）によれば、ほぼ同時期における火口域全体の放出率は100-200 t/dで、前年度と比べて約2倍になっていた。このことから、2015年におけるSO₂放出の大半は62-2火口、及び新たに拡大した振子沢噴気孔群からの寄与と考えられる。大正火口とそれ以外で組成比が有意に異なるという結果については、火口域地下浅部の熱水系の関与が疑われるが、現時点ではすべての測定結果を合理的に解釈できるモデルを得るに至っていない。

キーワード：十勝岳、火山ガス

Keywords: Mt.Tokachidake, volcanic gas

衛星赤外画像によるリアルタイム火山観測システムの改良とラング火山2015年噴火における検討
Improvement of the realtime volcano observation system based on the satellite infrared
imagery and its application to the case of the 2015 Mt Raung eruption

*金子 隆之¹、安田 敦¹、マーティン ウスター²、前野 深¹

*Takayuki Kaneko¹, ATSUSHI YASUDA¹, Martin J. Wooster², Fukashi Maeno¹

1.東京大学地震研究所、2.ロンドン大学キングスカレッジ

1.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2.King's College London

We are monitoring active volcanoes in east Asia using MODIS and MTSAT images. From 2015 through 2017, Japanese new optical satellites, Himawari-8/AHI and GCOM-C/SGLI start operation, which are next generation instruments of the ones we are currently using for monitoring. We plan to replace the MODIS-based realtime thermal monitoring system to a combination system consisting of Himawari-8/AHI and GCOM-C/SGLI. Further, for more precise non-realtime analysis, we also plan to use high-resolution images, in linkage with these two realtime datasets - combined analysis. The new type of Himawari, carrying the AHI sensor, can be used for thermal analysis, because of the improved resolution to be 2km. Also, its ultra-high frequency observation, every 10 minutes, will be particularly useful for thermal analysis of eruption sequences, which can change in a short period. We recently developed a prototype of realtime monitoring system based on Himawari-8/AHI. SGLI onboard GCOM-C is a moderate resolution sensor having resolution of 250m in the 1.6um and 11um channels. The satellite is being launched at the end of 2016 by JAXA. SGLI can be applied for more precise realtime monitoring than MODIS having resolution of 1 km, such as observing enlargement process of lava flows. Here, in non-realtime analysis, high-resolution images are used for specifying topographic change or type and distribution of erupted materials relating to the on-going eruptive process, which cannot be identified by the medium to coarse resolution images. In order to examine effectiveness of the combined analysis based on the three different datasets, we analyzed the 2015 eruption of Raung, as a test case.

Mt Raung, one of the most active volcanoes in Indonesia, is located in the easternmost of Java, Indonesia and has a large conical edifice with altitude of 3320 m. It has a summit caldera of 2km in diameter approximately 300 m in depth, of which topography is similar to the of Miyakejima formed in 2000. In June, 2015, the volcano erupted and lava continued to effuse in the summit caldera from the pyroclastic cone at the center of the floor. Analysis of high-resolution images (Landsat, SPOT, WV and GE) showed that the effused lava enlarged gradually and covered the entire areas of the caldera floor by the middle of July. At the same time, the accumulated lava bed increased in thickness. The total volume of effused lava and the average effusion rate were estimated to be $5.3 \times 10^7 \text{ m}^3$ and $1.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$, respectively. We also analyzed Himawari-8/AHI images between 1st of June to 31st of August. The time series variations of thermal anomaly (1.6 um, 2.3 um, 3.9 um) showed that there were two pulses in the activity - Pulse I and II, which were divided by a low activity period at the end of July. Through examining the short term variations, we found that the eruption started at 4:30 on 20th of June (UTC) and ceased on 7th of August. Reactivation of the activity, i.e., start of Pulse II, occurred at 21:10 on 1st of August. The activity level was nearly constant through the majority of the period, which can be considered as a characteristic of the effusive eruption involving Strombolian lava fountaining. Several hours ahead of the onset of Pulse II, a small thermal pulse was observed. This can be a precursor to reactivation of the activity. In substitution for SGLI images, NPOSS/VIIRS images (resolution 380m) were analyzed to observe enlargement process of the lava bed on the caldera floor. We could recognize increase in the size of high-temperature areas at the summit on the 11 um images of VIIRS in the period from

late June to early July. This is probably showing enlargement of the lava bed on the caldera floor. This result suggests that we can monitor detailed eruptive phenomena by using SGLI images in realtime. Also, the combined analysis proposed here is considered as a useful method for exploring eruption sequence.

キーワード：衛星リモートセンシング、赤外画像、インドネシア

Keywords: satellite remote sensing, indrared imagery, Indonesia

レーダーエコー頂高度からの噴出物総量の推定

Estimating the total mass of tephra from radar echo-top height of eruption column

*福井 敬一¹、佐藤 英一¹、新堀 敏基¹、石井 憲介¹*Keiichi Fukui¹, Eiichi Sato¹, Toshiki Shimbori¹, Kensuke Ishii¹

1.気象庁気象研究所

1.Meteorological Research Institute

火山灰などの火山噴出物総量を噴火発生後、速やかに把握することは火山災害の軽減にとって極めて重要な事項であり、火山噴出物の総重量は量的降灰予測の初期値として最も重要なパラメータの一つである。

噴出率（質量放出率、体積噴出率あるいは放熱率）と噴煙の高さ H との関係は、理論的な研究や、噴火事例を取りまとめて求めた経験式が種々提案されている。例えば、Morton *et al.* (1956) は放熱率が H の4乗に比例する式を、Settle (1978) は H が質量噴出率の0.22乗に比例する式を、Sparks *et al.* (1997) は H が体積噴出率の0.259乗に比例する式を、Mastin *et al.* (2009) は0.241乗に比例する式を提案しており、気象庁の降灰予報では、質量放出率が H の4乗に比例する式を用い、時刻 $t \sim t+T$ における火山噴出物質量 $M(t)$ を H と噴火の継続時間 T から $M(t) \propto H^4 T$ で与えている（新堀, 2008）。気象レーダーを使用して火山噴出物総量を求めようとする場合、このような関係式を用いて、エコー頂高度の時間変化から推定する方法、あるいは、真木・他 (2015) のようにレーダーエコー強度の積算値から降灰量を推定する方式が考えられる。また、佐藤・他 (2015a) は桜島においてXバンドMPレーダーと二次元ビデオディストロメータ等による観測を行い、火山灰と降水を識別し、降灰量推定を行うことを計画している。

霧島山新燃岳2011年噴火の際には、気象庁のレーダー観測網によって噴煙のエコー頂高度の詳細な時系列データが取得され（新堀・福井, 2012）、この値を用いることで降灰予測を大幅に改善することができた（新堀・他, 2014）。また、Kozono *et al.* (2014) は傾斜観測データから推定したマグマ供給率とこの高度が良い相関にあることを示した。これらのことから、レーダーエコー頂高度の時系列データが噴煙の高さの時間変化を良く表していると考えられている。しかし、御嶽山2014年噴火の際に気象庁レーダー観測網で観測されたエコー頂高度には過大な値が含まれていたことも分かっている（佐藤・他, 編集中）。

気象レーダーで観測される噴煙の高さの時間変化を利用して噴出物総量を推定する場合、噴煙の高さと噴出率との関係式の問題以外にも、噴煙エコーが真に噴煙を捉えたものであり、エコー頂高度を噴煙の高さと見なしで良いかどうか、佐藤・他 (2015b) で指摘しているエコー頂高度推定における各種誤差要因、レーダー走査パターンに起因する問題を含めた噴火継続時間推定における誤差もしくは不確定性などが問題となる。特に、噴出率は噴煙の高さの概ね4乗に比例するため、噴煙高度推定誤差は噴出物総量推定における大きな誤差要因となる。

本講演では、気象庁レーダー網で噴火噴煙が検知された事例についてエコー頂高度の時間推移から噴出物量を推定し、この量と現地調査によって求められている噴出物量との関係、およびレーダーデータによる噴出物総量推定における誤差について議論する。

参考文献

Kozono, T. *et al.* (2014) EPS, 66:139, doi:10.1186/s40623-014-0139-1.Mastin, L. G. *et al.* (2009) JVGR, 186, 10-21, doi:10.1016/j.jvolgeores.2009.01.008.Morton, B. R. *et al.* (1956) Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 234, 1-23, doi: 10.1098/rspa.1956.0011.

佐藤英一・他 (2015a) 日本気象学会2015年度春季大会講演予稿集, 296,

佐藤英一・他 (2015b) 日本火山学会予稿集, 174.

佐藤英一・他 (編集中) 気象庁技術報告第135号 (平成26年 (2014年) 御嶽山噴火調査報告)

真木雅之・他 (2015) 京大防災研年報, 58B, 76-85.

Settle, M. (1978) JVGR, 3, 309-324.

Sparks, R. S. J. *et al.* (1997) Volcanic Plumes. John Wiley & Sons, 574 pp.

新堀敏基 (2008) 数値予報課報告・別冊, 54, 気象庁予報部, 234-240.

新堀敏基・福井敬一 (2012) 火山噴火予知連絡会会報, 108, 189-196.

新堀敏基・他 (2014) 気象研究所研究報告, 65, 75-107, doi:10.2467/mripapers.65.75.

キーワード: 噴出物総量、気象レーダー、エコー頂高度、噴煙高度、噴出物量推定、火山灰雲

Keywords: total mass of tephra, weather radar, radar echo-top height, eruption column height, estimation of eruptive mass, volcanic ash cloud

深海底で噴出した珪長質溶岩流およびドームの地形と噴出速度：ニュージーランド・ケルマデック弧のHavre海底火山2012年噴火

The morphology and effusion rate of deep submarine silicic lava flows and domes emplaced during the Havre 2012 eruption, Kermadec Arc, New Zealand

*池上 郁彦¹、Carey Rebecca¹、McPhie Jocelyn¹、Soule Adam²、谷 健一郎³

*Fumihiko Ikegami¹, Rebecca J Carey¹, Jocelyn McPhie¹, Adam Soule², Kenichiro Tani³

1.タスマニア大学、2.ウッズホール海洋学研究所、3.国立科学博物館

1.University of Tasmania, 2.Woods Hole Oceanographic Institution, 3.National Museum of Nature and Science, Japan

1. Introduction

The eruption of Havre 2012 was the largest deep submarine silicic eruption in the modern history (Carey et al. 2014). The eruption was first detected by an airline passenger who saw extensive rafts of floating pumice on the ocean. The later investigation identified the onset of pumice dispersion on the 18th July 2012, which was accompanied by a subaerial plume and hotspot on the NASA MODIS satellite imagery. In addition, significant seismicity at the Havre caldera was measured during this time. Three months after the event, R/V Tangaroa of NIWA (National Institute of Water and Atmospheric Research, New Zealand) visited the Havre volcano and mapped the area using a EM120 multibeam system. This survey detected several new features along the caldera rim which did not exist in 2002. However, the resolution of the map did not permit the identification of the types of volcanic features present.

2. MESH Cruise

In 2014, the Mapping Exploration & Sampling at Havre (MESH) cruise was conducted to visit the seafloor and performed a geological field study of the 2012 eruption deposits. The R/V Roger Revelle (Scripps Institution for Oceanography, UCSD) and two unmanned vehicles, Sentry AUV (Autonomous Underwater Vehicle), and Jason ROV (Remotely Operated Vehicle) of WHOI (Woods Hole Oceanographic Institute) facilitated the voyage. The Sentry AUV mapped the full area of the 5-km wide Havre caldera with high-resolution bathymetry (1-m grid). The ROV Jason conducted traverses along the eruption products discovered by the Sentry high-resolution map, conducting sampling for the rocks and sediments at the seafloor.

3. Results and Discussions

The MESH cruise identified six lava flows (A-D,F,G), eight lava domes (H,I,K~P), two units of ash and lapilli deposits (AL,ABL), two debris avalanche deposit (MF1,2), and an extensively emplaced giant pumice deposit (GP) as the products of the 2012 eruption (Fig. 1). Most of the effusive products which this research focuses on have porphyritic textures with the phenocrysts of plagioclase, and pyroxene. Their whole rock composition ranges from 68~72% SiO₂ and inferred that the Havre 2012 magma was rhyodacitic.

The series of lava consists of both lava flows (length of 0.6~1.2 km) and lava domes (height of 70~250 m). Their vents were distributed along the fissures at the southern rim of the caldera which strongly infers structural control for magma ascent. The western part of the fissure is dominated by lava flows (A~G) which immediately descended the 30° slope of the caldera wall. They have clear levee structure with 70~150 m thickness, compression ridges for 10~30 m intervals, and talus with >20 degrees. The fissures from the middle to east formed small lava domes (H~P), although the easternmost one (O-P complex) is exceptionally large (1.1 x 0.8 km elliptical base with 250 m height). The total volume of these effusive products was 0.24 km³.

The chronology of the lava effusion has been investigated using the stratigraphical relationship to

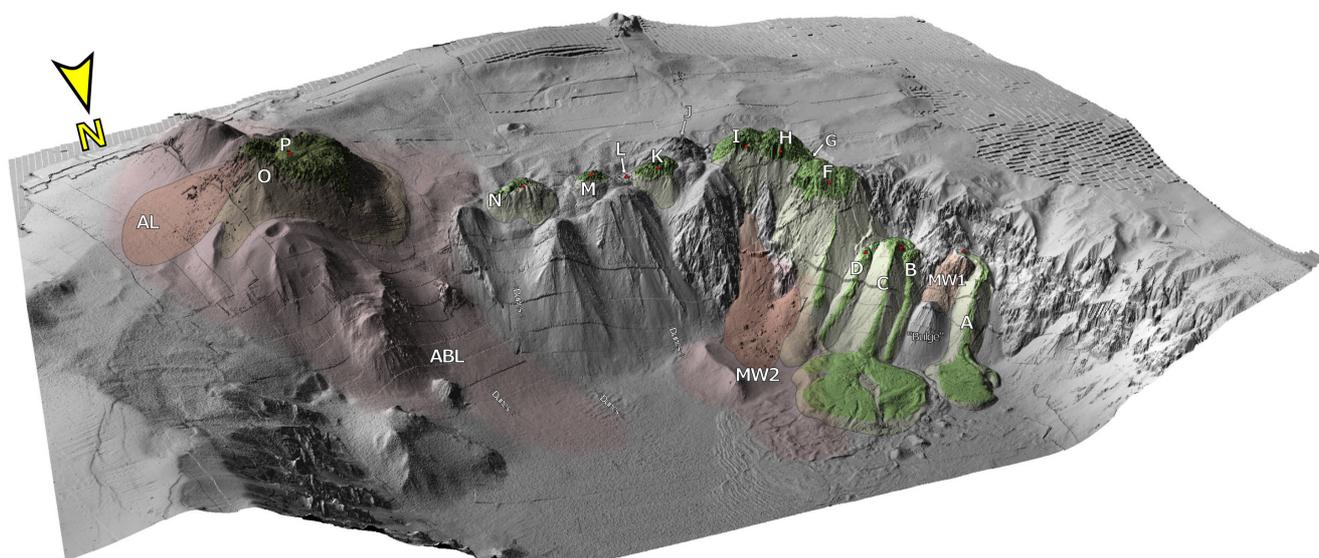
the GP unit, which was dispersed on 18th July. This enables constraints on the lava effusion rate between the 18th July to 19th August (NIWA voyage). The maximum volume of the lava post-dating GP (0.19 km^3 for A, F~P) draws the maximum effusion rate of $25 \text{ m}^3/\text{s}$ for 90-days average. This values comparable to other well-constrained subaerial silicic lavas, such as $50 \text{ m}^3/\text{s}$ for 20-days at Cordon-Caulle 2011 eruption (Bertin et al. 2015), or $66 \text{ m}^3/\text{s}$ for 14-days at Chaiten 2008 eruption (Pallister et al. 2013).

4. Conclusion

The Havre 2012 eruption produced 0.24 km^3 of rhyodacite lava flows and domes. The largest lava dome grew to the height of 250m and the longest lava flow advanced 1.2km from its vent despite the deep submarine environment. These investigations have calculated submarine silicic lava effusion rates ($25 \text{ m}^3/\text{s}$) for the first time.

キーワード：海底火山、海底カルデラ、溶岩流地形、噴出速度、流紋岩質マグマ

Keywords: Submarine volcano, Submarine caldera, Lava flow morphology, Effusion rate, Rhyolitic magma



石基マイクロライト組織から見た2011年新燃岳噴火最盛期におけるマグマ上昇過程の進化
 Evolution of magma ascent during the climactic phase of 2011 eruption of Shinmoe-dake,
 Japan, in view of groundmass microlite textures

*鈴木 由希¹、市原 美恵²、前野 深²、長井 雅史³、渋谷 瞳¹、清水 翔平¹、中田 節也²

*Yuki Suzuki¹, Mie Ichihara², Fukashi Maeno², Masashi NAGAI³, Hitomi Shibutani¹, Syouhei Shimizu¹, Setsuya Nakada²

1.早稲田大学, 教育・総合科学学術院, 地球科学専修、2.東大・地震研、3.防災科研

1.Department of Earth Sciences, Faculty of Education and Integrated Arts of Sciences, Waseda University, 2.ERI, Univ. of Tokyo, 3.NIED

The climactic phase of the Shinmoe-dake 2011 eruption is characterized by three sub-Plinian events (Jan 26PM, 27AM, 27PM) and a lava accumulation stage in the crater (Jan 27-29), both of which were accompanied by vulcanian events. This study aimed at reconstructing magma ascent in conduit for this phase by using groundmass microlite textures. We then related the changes of magma ascent conditions with those of eruption intensity and style.

The analyzed samples include pumiceous clasts (gray and brown) and denser lava-like juvenile clasts from sub-Plinian (Layer 2-5, each with lower and upper subunits) and Jan 28 vulcanian deposits, and a lava block ejected from the crater on the Feb 1 vulcanian event. These are from magmas of the same chemical and storage conditions just prior to ascent from the reservoir. Representative samples for the textural analyses were selected based on bulk density that reflects syneruptive ascent rate and resultant degree of degassing. Subunits of Layer 2 to Layer 4 resemble one another in bulk density distribution (0.8~1.7 g/cm³), except Layer3-up with extension to higher density (0.8~2.1 g/cm³). Also, subunits of Layer 5 to Jan 28 resemble one another (0.8~2.8 g/cm³) in having extension to much higher density than Layer3-up. The bulk density of Feb 1 lava (2.1g/cm³) corresponds to high value observed in Layer 5 to Jan 28. The textural analyses were carried out for samples with maximum and minimum bulk densities in representative units (Layer2-up, 3-up, 4-up, 5-low, 5-up, Jan28, Feb 1 Lava).

The crystal size distributions (CSD) of plagioclase microlites are almost the same for all samples over the larger size (40-100 micrometer length in 3D). CSDs over smaller size change depending on the bulk density; dense samples from Layer 5-low, Layer 5-up, Jan 28 and Feb1 lava have steeper CSD than low density samples. These lines of evidence show magma ascent conditions at deeper part of conduit were constant throughout the climactic phase, but condition at shallow part was changing. The higher crystal numbers in dense samples can be explained by either a) higher ascent rate (when undercooling is relatively small, as a whole) or b) lower ascent rate (when undercooling is relatively large). Model b) is more likely in the present case, if decreasing trend of eruption intensity is considered. The bulk density distribution and correlation between bulk density and ascent rate show that the decrease of magma ascent rate at shallow part occurred gradually. The ascent rate variation widened in the third sub-Plinian event (Layer 5), by a little appearance of slowly ascended magmas. Only slowly ascended magmas came to occupy the conduit in the lava accumulation stage.

Suzuki *et al.* (2014 JPGU meeting) proposed that Layer3-up corresponds to the start of the second sub-Plinian event, based on that the bulk density distribution of Layer3-up has an extension to higher density, and degassed magma could have been formed in conduit during the resting phase (Jan 26, 19:00 -Jan 27, 2:00; between the first and second sub-Plinian events) due to decreased eruption rate. The textural study this time newly revealed CSD of plagioclase microlites of high density sample (ca. 2.0 g/cm³) from Layer3-up resembles those of other pumiceous clasts from the first and

second sub-Plinian events, implying conduit residence time of the degassed magma was not extremely long. This interpretation is consistent with the infrasound data indicating quasi-steady state magma flow for the resting phase.

キーワード：新燃岳、見かけ密度、石基マイクロライト、マグマ上昇、脱ガス、空振

Keywords: Shinmoe-dake, Bulk density, Groundmass microlite, Magma ascent, Degassing, Infrasound

浅間火山1783年吾妻火砕流の本質ブロックの記載岩石学的研究

Petrographic study of juvenile blocks of the 1783 A.D. (Agatsuma) pyroclastic flow in Asama Volcano

*菅谷 さりな¹、中村 美千彦¹、安井 真也²

*Sarina Sugaya¹, Michihiko Nakamura¹, Maya Yasui²

1.東北大学大学院理学研究科地学専攻、2.日本大学文理学部地球システム科学科

1.Department of Earth Sciences, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Department of Geosystem Sciences, College of Humanities and Sciences, Nihon University

The Agatsuma pyroclastic flow (APF) in the 1783 A.D. (Tenmei) eruption of the Asama volcano, central Japan, is characterized by occurrence of abundant rounded juvenile blocks with poorly vesiculated inner core and small proportion of fine ash matrix. The blocks have been referred to as cabbage for their shape and size. APF is a typical example of the "intermediate type" pyroclastic flow defined by Aramaki (1957), which have intermediate characters between the nuée ardente (dome-collapse type) and the pumice flows (column-collapse type) in terms of their volume, density of juvenile blocks and proportion of fine ash matrix. Because these characters may represent the magma outgassing and fragmentation processes, the intermediate type pyroclastic flow may be important to understand key processes that determine the bifurcation between explosive and effusive eruptions. Based on the observation that APF was composed of many (> 50) flow units, Takahashi and Yasui (2013) proposed that APF was generated through fountain collapses following Vulcanian explosions. They also suggested that lava lakes were formed by fall-backs of pyroclasts from the fountains during the Vulcanian activity on the basis of welding structures of the juvenile blocks. However, formation processes of these blocks are unclear. In this presentation, we propose that the cabbage-shaped juvenile blocks were formed repeatedly in the volcanic crater prior to each explosion.

On the surfaces of juvenile blocks ejected at the last stage of the 1783 A.D. eruption, we found the crusts impregnated with very fine (1-10 μm) ash particles and interstitial opal. The presence of opal shows that the juvenile blocks had been emplaced in a hydrothermal system after their rounded shape was formed. Since there is no geothermal area at the sampling location and its upper flank of the Maekake volcano, it is highly possible that silica precipitation from circulated geothermal water followed the formation of characteristic round shape of the juvenile blocks before generation of the APF. The weakly welded ash particles existed between the opal-bearing crust and the inner core; the welding process thus should have occurred before the crust formation. The surfaces of the juvenile blocks without opal-bearing crusts, which were collected from weakly-welded APF deposits, were covered instead with welded ash particles, which may have been formed at the higher temperature condition in the crater. These features indicate that the juvenile blocks were rounded probably via coagulation and welding and coated with volcanic ashes, and filled the crater before their eruption.

キーワード：浅間火山、吾妻火砕流、中間型火砕流、オパール、溶結

Keywords: Asama Volcano, Agatsuma pyroclastic flow, intermediate type pyroclastic flow, opal, welding