

## 霧島火山における2011年1月の噴火以降のGPS連続観測による地殻変動 Crustal deformation after the eruption on January, 2011 by continuous GPS observation in Kirishima Volcano

中尾 茂<sup>1\*</sup>, 森田 裕一<sup>2</sup>, 後藤 和彦<sup>1</sup>, 八木原 寛<sup>1</sup>, 平野 舟一郎<sup>1</sup>, 及川 純<sup>2</sup>, 上田 英樹<sup>3</sup>, 小園 誠史<sup>3</sup>, 平田 安廣<sup>2</sup>, 高橋 浩晃<sup>4</sup>, 一柳 昌義<sup>4</sup>, 太田 雄策<sup>5</sup>, 松島 健<sup>6</sup>, 井口 正人<sup>7</sup>  
NAKAO, Shigeru<sup>1\*</sup>, MORITA, Yuichi<sup>2</sup>, GOTO, Kazuhiko<sup>1</sup>, YAKIWARA, Hiroshi<sup>1</sup>, Shuichiro Hirano<sup>1</sup>, OIKAWA, Jun<sup>2</sup>, UEDA, Hideki<sup>3</sup>, KOZONO, Tomofumi<sup>3</sup>, Yasuhiro Hirata<sup>2</sup>, TAKAHASHI, Hiroaki<sup>4</sup>, ICHIYANAGI, Masayoshi<sup>4</sup>, OHTA, Yusaku<sup>5</sup>, MATSUSHIMA, Takeshi<sup>6</sup>, IGUCHI, Masato<sup>7</sup>

<sup>1</sup> 鹿児島大学大学院理工学研究科, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所, <sup>3</sup> 防災科学技術研究所, <sup>4</sup> 北海道大学地震火山研究観測センター, <sup>5</sup> 東北大学大地震・噴火予知研究観測センター, <sup>6</sup> 九州大学大学院地震火山観測研究センター, <sup>7</sup> 京都大学防災研究所火山活動研究センター

<sup>1</sup>GSSE, Kagoshima Univ., <sup>2</sup>ERI, Univ. of Tokyo, <sup>3</sup>NIED, <sup>4</sup>ISV, Hokkaido Univ., <sup>5</sup>RCPEV, Tohoku Univ., <sup>6</sup>SEVO, Kyushu Univ., <sup>7</sup>SVO, Kyoto Univ.

In January, 2011, sub-Pulnian eruption occurred in Shinmoedake. Before the eruption four continuous GPS sites are operated with one site of DPRI, Kyoto University, three GEONET and two NIED sites. Four continuous GPS sites were added to the existing GPS network after the eruption. Two other GPS sites were settled in April, 2011. The dense GPS network is consisted of 17 GPS sites.

The deflation source of the eruption is estimated about 7km westward from Shinmoedake with 9.3km depth. The amount of deflation is about 24 M cubic meters. This deep deflation source seems to be magma chamber in this activity.

Length changes are calculated on several baselines. Extension rate of baseline lengths after the eruption are almost same as that before the eruption. However, there are three period of rate change, May, August and November to December, 2011. In May, rate of baseline occurred, whose end point is located near the deep source. In August, rate of baselines decreases to almost zero, where baselines are across on the Shinmoedake. Rate of baselines also decreases to almost zero, where baselines are over the deep source. Length of these baselines became extended in August. It seems that magma supply into the deep chamber becomes lower.

## 歪観測記録からみた2011年1月霧島山新燃岳の噴火過程 Volcanic Process of the 2011 Shinmoedake Eruption inferred from Strain Data

寺石 眞弘<sup>1\*</sup>, 石原 和弘<sup>1</sup>, 山崎 健一<sup>1</sup>, 小松 信太郎<sup>1</sup>, 加藤 幸司<sup>2</sup>

TERAISHI, Masahiro<sup>1\*</sup>, ISHIHARA, Kazuhiro<sup>1</sup>, YAMAZAKI, Ken'ichi<sup>1</sup>, KOMATSU, Shintaro<sup>1</sup>, KATO, Koji<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所, <sup>2</sup> 福岡管区気象台

<sup>1</sup> Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, <sup>2</sup> Fukuoka District Meteorological Observatory

噴火活動を理解して推移を予測する上で、地殻変動を高い分解能で把握することは本質的に重要である。現在、地殻変動を最も高い分解能で捉える手段は横穴式歪観測である。地殻変動観測に用いる横穴は敷設が容易ではないため、横穴式観測はGPSやポアホール式歪計・傾斜計ほど多くは実施されていない。そのため、全ての火山について横穴式観測のデータが利用できるわけではない。しかし適切な場所で横穴式観測が実施されている場合には、そのデータを利用することでGPSやポアホールでは検出困難な $10^{-9}$  -  $10^{-10}$ の局所的な歪変動も捉える事ができると期待できる。

2011年1月に噴火した霧島山新燃岳の場合、火口から約18km離れた京都大学防災研究所伊佐(吉松)観測室において横穴式地殻変動連続観測が実施されている。観測用の横穴(坑道)は3方向に掘られており、スーパーインバール棒を用いた伸縮計によって各方向の伸縮変化が計測されている。新燃岳噴火時には、計器の電気的ノイズを考慮した計測精度は2つの方向について $2 \times 10^{-10}$ 程度、残り1つの方向について $2 \times 10^{-9}$ 程度であった。伊佐の観測記録は降水荷重による擾乱を受けやすいが、噴火時およびその直前に大量の降雨はなかった。したがって、2011年噴火に関連する高々数日程度の変化歪変化を調べる上では降水荷重の影響を無視できる。

新燃岳の噴火活動の推移についての情報を得るため、伸縮計記録の時系列に含まれる主な変化を目視により見つけた。そしてそれぞれについて、歪変化が半無限一様媒質媒質中の点膨張・収縮(茂木モデル)によるものと仮定して、変動源の位置および大きさの推定を行った。茂木モデルを仮定した場合、観測点が1点しかなくても、観測点から見た膨張・収縮源の方向が伸縮の比から決定される。さらに、観測点と変動源直上の水平距離を適当に仮定すれば、深さおよび体積が決定される。伊佐観測室から新燃岳火口までの距離(18km)は、想定されるマグマだまりの空間スケールと比べて十分大きいので、膨張・収縮源の詳細な幾何形状を考慮しなくても、膨張・収縮源の時間的・空間的推移についての描像が得られると期待できる。

最も顕著な歪変化は、1月26, 27日に計3回起こった準プリニー式噴火およびその後31日までの火口への溶岩蓄積の際に記録されている。歪変化の大きさは $1 \times 10^{-7}$ 程度である。これらの際の地殻変動は十分大きいので、GPSを用いた多点観測データの解析によって変動源と大きさが推定されている。それらと比較することで伊佐の伸縮計記録だけを用いた地殻変動源推定の精度を検証することができる。変動源までの水平距離を15kmと仮定して伊佐観測室での伸縮計記録のみから各過程に対する変動源の深さを推定したところ、3回の噴火および溶岩放出に対する推定値として7.2, 7.0, 7.6および8.3kmを得た。これらは、GPSデータから推定された変動源の深さと整合する。また、水平方位についても、伸縮計記録から推定されたものは、GPSデータから推定されているものと一致する。一方、体積減少量については、各過程に対する推定値として1.25, 1.59, 0.94および $5.25 \times 10^{-6} \text{m}^3$ を得た。これは、GPSデータの解析や噴出物から見積もられた値と比べてかなり小さい。この違いは、地殻の弾性率の不均質を無視したために生じたと考えられるが、補正は難しい。これらの結果から、伸縮計記録に基づく変動源推定において、方位推定は信頼しうると期待できる一方で体積推定にはある程度の誤差が含まれると考えられる。

伸縮計記録時系列の精査によって、噴火時だけではなく、各噴火に数時間先行する歪変動(先駆的歪変動)も含まれていることが確認された。歪変化の大きさは噴火時の約1/100程度( $1 \times 10^{-9}$ 程度)である。歪の時間変化は、地下においてまず膨張が、続いて収縮が起こったことにより生じたとして解釈できる形状である。変化量が小さく、かつ潮汐成分との分離も難しいために、変化量の正確な評価は難しい。そのため、膨張・収縮源の位置を正確に推定することは難しい。しかし、歪変化量の読み取り誤差を考慮した計算により、変動源への水平方位がほぼマグマだまりの方向に等しいことと、変動源がマグマだまりよりも浅い位置にある可能性が高いことが推定された。これは、噴火準備過程の最終段階において、マグマだまりから地表(火口)への物質移動が生じていたことを示唆する。先駆的歪変動の収縮期とあわせて噴煙の増加も確認されており、これも先駆的物質移動の仮説を支持している。

キーワード: 伸縮計, 横穴式地殻変動観測, 新燃岳, 噴火過程, 先駆的地殻変動

Keywords: extensometer, geodetic observation in vaults, Shinmoe-dake, volcanic process, crustal deformation prior to eruptions

## 各種リモートセンシング結果の比較による新燃岳2011年噴火火口内溶岩の形状変化 Surface topography change of 2011 eruption lava stored in the Shinmoedake crater depicted by remote sensing techniques

村上 亮<sup>1\*</sup>, 的場 敦史<sup>1</sup>

MURAKAMI, Makoto<sup>1\*</sup>, Atsushi MATOBA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学地震火山研究観測センター

<sup>1</sup> Inst. of Seismology and Volcanology, Hokkaido Univ.

宮崎・鹿児島県境に位置する霧島火山群に属する新燃岳は、およそ300年の休止期間を経て、2011年にマグマ噴火した。山体は25Kaから15Kaの間に形成されたとされ、数千年間にわたり静かな状態を保ったが、1716年-1717年にも準ブリーニエ式の本格的マグマ噴火を行っている。その後は、再び静穏期に入っていたが、最近では、1991, 2008, 2009, 2010に小規模な水蒸気噴火を繰り返して徐々に活動度の高まりを示しつつ、2011年1月の本格的なマグマ噴火に至った。この噴火以前は、火口はすり鉢状の形状をしており最深部には火口湖が形成されていた。噴火後は、噴出した溶岩によって火口内はほぼ完全に埋め尽くされ、火口縁にはほぼ近い高さまで溶岩が充填された状態となっている。この噴火では、溶岩の噴出は最初の短期間に終了し、その後は、噴出溶岩の表面において、小規模な爆発的噴火を繰り返すようになった。それらの活動も、最近では次第に落ち着いたものになってきている。

1990年代から国土地理院などによって実施されている霧島火山群周辺の広域的GPS連続観測結果は火山活動に呼応した興味深い変化を示している。噴火前約1年間は、山体の膨張が記録され、一方、噴火時には急激に収縮した。さらに、噴火直後から膨張が再開し、それはごく最近まで継続している。これらの地殻変動は、地下のマグマ活動の状況を直接反映したものと考えられている。GPS点の水平変動や上下変動データは、新燃岳の北西の地下のほぼ同じ位置で、膨張(噴火前および噴火後)や収縮(噴火時)が発生したと理解されている。噴火後の伸張は、2011年末になって、突然停滞し、その状態が現在まで続いている。しかし、膨張自体は、2011年噴火開始時直前のレベルにほぼ到達しており、2011年噴火直前と同程度のマグマがすでに蓄積されていると考えられる。このように、今後の活動の推移は、予断を許さない状況が続いている。

万一、噴火が発生した場合には、住民の避難などの防災対策が適切になされることが重要であるが、火山活動の規模や様式、またその推移については、可能性の幅が極めて広範であり、現時点において必要なすべての準備を事前実施しておくことは不可能である。したがって、噴火に至った場合には、活動の進展に合わせて、減災のため、可能な限りの最新の観測情報を収集して、活動の推移や規模を推定し、災害を惹起する可能性のある火山現象(たとえば、火砕流、火砕サージ、溶岩流、火山灰や噴石の飛散、泥石流など)を予測し、その予測に基づいた防災対策を適切に実施することが現実的である。次の噴火の様式を規定する重要な環境要素の一つは、地形であり、各種のシミュレーションなどを必要に応じて実施する場合にも、正確な数値的地形情報を把握しておくことが重要である。さらに、噴火開始後は、溶岩表面の上昇・下降や火口縁からの溢流の有無、火口縁の崩壊の有無等、活動の推移に応じて、形状の数値的な把握が準リアルタイムで必要となる。

2011年噴火以来、気象庁などが上空からの写真撮影を繰り返し実施した。それらの判読から、2011年噴火で噴出した溶岩の表面形状は、ほぼ平らで、従来のすり鉢状火口をほとんど埋め尽くし、最も標高の低い火口縁にかなり近いところまで達していることが確認されている。

噴火が再開すれば、地形を計測することが必要になるが、活動中の火山の形状やその変化を準リアルタイムで把握することはそれほど容易ではない。平穏な期間であれば、1) 航空機レーザー、2) 可視撮影による直上からの空中写真測量が標準の手法であるし、場合によっては3) 航空機SARや4) 衛星による観測も可能である。しかし、1) および2) は、活動的な火口の上空からの実施は困難であり、3) は実施費用が高額で高頻度の実施が難しく、4) は回帰周期の制約で高頻度の実施が難しい。そこで、報告者らは、補完的な手法として、5) 斜め写真による写真測量(可視) 並びに、噴煙掩蔽時や夜間にも観測が可能な6) 熱赤外面像の斜め写真測量を応用した手法の開発を進めている。

本講演では、我々自身の解析結果も含めて、各種の機関によってなされた地形計測結果を時系列的に比較して、噴火開始以降現在までの火口内溶岩形状の変化の有無を数値的に解析した結果を報告する。予備的な結果によれば、観測が可能となった2月初旬以降、大きな地形変化がなかったことが示唆される。さらに、地形形状の把握に用いられる各種のリモートセンシング手法を相互比較し、今後噴火が発生した場合への適応性について検討する。

なお、解析には、気象庁が撮影した新燃岳火口の写真、および国土地理院が実施した航空機SARの結果を使用した。謝意を表す。

キーワード: 新燃岳, リモートセンシング, 地形, 溶岩, 防災, 予測

Keywords: Shinmoedake, remote sensing, topography, lava, disaster mitigation, forecast

## 霧島火山新燃岳 2011年噴火後の重力変動 - 定点連続観測及び多点ハイブリッド観測の結果

### Gravity change around the Kirishima volcanoes after the 2011 eruption of Shinmodake

大久保 修平<sup>1\*</sup>, 植木 貞人<sup>2</sup>, 田中 愛幸<sup>1</sup>, 大島 弘光<sup>3</sup>, 前川徳光<sup>3</sup>, 今西 祐一<sup>1</sup>

OKUBO, Shuhei<sup>1\*</sup>, UEKI, Sadato<sup>2</sup>, TANAKA, Yoshiyuki<sup>1</sup>, OSHIMA, hiromitsu<sup>3</sup>, Maekawa Tokumitsu<sup>3</sup>, IMANISHI, Yuichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>3</sup> 北海道大学大学院理学研究院

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, <sup>2</sup>Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>3</sup>Graduate School of Sciences, Hokkaido University

#### [1] はじめに

霧島火山では、2011年1月26日、27日、新燃岳において準プリニー式噴火が発生し、約300年ぶりにマグマ噴火が始まった。新燃岳では引き続き火口内へ溶岩が流出するとともに、2月上旬まで、溶岩で満たされた山頂火口から爆発的噴火が繰り返して発生し、社会生活に大きな影響が及んだ。その後、噴火の規模や頻度は低下したものの、地殻浅部におけるマグマの蓄積を示すと考えられる地盤変動も継続している。われわれは、この噴火活動にともなうマグマの移動・蓄積過程を明らかにするために、2種類の重力観測を行った。すなわち(1)固定点における絶対重力の連続観測、および(2)霧島火山群周辺地域をカバーする23点でのハイブリッド重力測定である。前者は1点での観測なので空間的な情報は得られないけれども、時間分解能に優れている。それに対し、後者は時間分解能では劣るものの、重力変動の空間的な広がりを知ることができる。このように互いに相補的な2種類の観測を統合して得られる知見について述べる予定である。

#### [2] 絶対重力観測

2011年2月初旬から2012年3月中旬までの1年間、東大霧島火山観測所(想定される深部マグマだまりからの水平距離が1km程度という好条件の場所にある)において絶対重力観測を行った。2月には数度のブルカノ式噴火が発生しており、それに先立って絶対重力観測にも、特徴的なシグナルが見えている。また、長期的には1年の観測期間中に約30マイクロガルに及ぶ変動が観測されているが、そのすべてが火山活動に起因すると考えることは適切ではない。実際、(1)観測点に近接したAMEDAS点の雨量は年間5200mmを記録していることや、(2)6日間で700mmの降雨のあった2011年9月(台風15号)時には12マイクロガルの重力増があったり、10日間で1200mmの降雨のあった2011年6月中旬には、16マイクロガルの重力増が観測されたりしていることから、土壌水分・地下水効果を取り除くことが重要である。この問題はKazama and Okubo (JGR 2009)によって取り上げられ、土壌水分や不圧地下水層の頭位を数値シミュレーションで求めることにより、解決(軽減)することができると考えられる。あるいは、植木ほか(2011)によるタンクモデルによる補正も有効かもしれない。これらの手法による補正結果についても紹介する予定である。

#### [3] 繰返しハイブリッド観測

繰返し測定によって重力値の時空間変化を明らかにするために、GPS観測などから推定された地盤変動源の直上を中心に、霧島火山地域をカバーする23点から成る重力測定網を構築した。この中のKVO(霧島火山観測所)では、[2]で述べた絶対重力測定と組み合わせることによって、いわゆる「ハイブリッド測定」となり、全点で絶対重力値の時間変化を議論することが可能になる。測定は2011年3月、2011年8月にLCR社G型重力計4台(G31, G375, G682, G705)を用いて行われている。2012年3月に実施が計画されている観測結果も総合した解析結果を提示する予定である。

#### 謝辞

研究経費は科研費・研究特別促進費「2011年霧島火山(新燃岳)噴火に関する総合調査」(代表・中田節也)によってまかなわれた。関係各位に感謝申し上げます。

キーワード: 新燃岳 2011年噴火, 重力変動, マグマ蓄積過程, 地下水

Keywords: Eruption of Shinmoedake 2011, Gravity change, Magma accumulation process, groundwater

## 地震計アレイによる新燃岳に発生した微動の短期間時空間特性 (2) Characteristics of volcanic tremor in Kirishima volcano based on seismic array (2)

中元 真美<sup>1\*</sup>, 松本聡<sup>2</sup>, 山中佳子<sup>3</sup>, 清水洋<sup>2</sup>, 中道治久<sup>3</sup>

NAKAMOTO, Manami<sup>1\*</sup>, MATSUMOTO Satoshi<sup>2</sup>, YAMANAKA Yoshiko<sup>3</sup>, SHIMIZU Hiroshi<sup>2</sup>, NAKAMICHI Haruhisa<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 九大・理, <sup>2</sup> 九大・地震火山センター, <sup>3</sup> 名大・地震火山研究センター

<sup>1</sup> Grad. Sch. Sci., Kyushu University, <sup>2</sup> SEVO, Kyushu University, <sup>3</sup> EVRC, Nagoya University

2011年1月から活発な噴火活動を継続している霧島・新燃岳の火口から南西に約3km離れた新湯温泉近傍において、我々は1月29日から2Hz3成分地震計25台による地震計アレイ観測を行っている。また、火口から東方向に約4km離れたひなもり台において、16点3成分のアレイ観測も継続している。本研究では得られた記録のうち顕著な微動として観測されている震動について詳しく解析する。2011年2月2,3日には振幅の大きい微動が観測されている。これらは数分間の継続時間を持ち、比較的モノクロマティックな震動である。このうち2月2日20:43から約40分間継続した微動が最も長く、顕著なものであった。これらをMUSICスペクトラム解析を通して、震動の発生源の方向特定を試みた。微動の周波数成分は約1, 2, 3, 4Hzにピークをもつ震動である。このうち最も振幅の高かった1.5-2.5Hz帯に狭帯域フィルターをかけて解析した。解析では4秒間のウィンドウを2秒ずつ移動させながら適用し、スローネスの時間変化を求めた。従来まで、我々は新湯アレイデータのみを用いて解析してきたが、今回2つのアレイを用いて解析することで発生源の特定がより精度の高いものになることが期待される。解析を通じて、ほとんどの震動は新燃岳火口方向の浅部から到達していることが明瞭に検出された。その一方、見かけ速度が速く、火口より北西側から到達している震動も見出された。これは圧力源として地殻変動から見出されている深部マグマだまりと対応している可能性がある。

## 新燃岳 2011 年噴火における二酸化硫黄放出率の推移 II Sulfur dioxide flux of Shinmoedake 2011 eruption II

森 俊哉<sup>1\*</sup>, 鹿児島地方気象台<sup>2</sup>

MORI, Toshiya<sup>1\*</sup>, Kagoshima Local Meteorological Observatory<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東大院理, <sup>2</sup> 気象庁

<sup>1</sup>Grad. School of Sci., the Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>Meteorological Agency

霧島火山新燃岳は 2011 年 1 月 19 日に小規模な噴火をおこし、その後 1 月 26 日からは大規模な噴火活動へと発展していった。新燃岳 2011 年噴火では、1 月 26 日、27 日に発生した準プリニー式噴火を含め、3 月までに合計 13 回の爆発的噴火を引き起こした。より小規模な噴火の回数も三月までに減少し、9 月までは散発的に噴火を引き起こしていたが、9 月中旬以降噴火は起こっていない。

この噴火活動を受け、1 月 27 日より小型紫外分光計を用いた二酸化硫黄測定装置 (COMPUSS) を使用して新燃岳の二酸化硫黄放出率測定を開始した。二酸化硫黄放出率の観測はトラバース法で行った。放出率は、噴煙断面に二酸化硫黄量と噴煙移動速度を乗じて算出するが、その際使用する噴煙移動速度には、噴煙高度に対応する GPV の風速値を使用した。

新燃岳 2011 年噴火では、最初の 10 日は二酸化硫黄放出率が非常に高く、10000 トン/日を超える値が測定され、特に、火口内で溶岩ドームが急速に成長していたと考えられる 1 月 28 日の測定では、40000 トン/日を超える放出率が観測された。その後、放出率は 3 月下旬までにほぼ指数関数的に数百トン/日レベルまで減少した。4 月以降 2012 年 2 月現在まで数百トン/日のレベルで基本的に推移しているが、6 月 23 日や 8 月 31 日の噴火の直後には 1000 トン/日を超える高い放出率が観測された。発表では、新燃岳 2011 年噴火に伴うトータルガス放出率を推定する。また、2 月 3 日 12:18 に発生したブルカノ式噴火の直前に放出率の減衰が見られているが、この噴火に対して気象庁の新燃岳北東観測点の傾斜計や猪子石の遠望カメラ映像でも前兆的な変化がみられている。発表では、この噴火の前に見られた前兆的な変化について議論する。

キーワード: 霧島火山, 新燃岳, 二酸化硫黄, 火山ガス, 放出率

Keywords: Kirishima Volcano, Shinmoedake, sulfur dioxide, volcanic gas, flux

## 霧島新燃岳 2011年1月26-27日サブプリニー式噴火におけるテフラ拡散・堆積過程への制約

### Constraining tephra dispersion and deposition from cyclic subplinian explosions at Shinmoedake volcano, Japan, 2011

前野 深<sup>1\*</sup>, 長井 雅史<sup>2</sup>, 中田 節也<sup>1</sup>, BURDEN, Rose<sup>3</sup>, ENGWELL, Samantha<sup>3</sup>, 鈴木 由希<sup>1</sup>, 金子 隆之<sup>1</sup>  
MAENO, Fukashi<sup>1\*</sup>, NAGAI, Masashi<sup>2</sup>, NAKADA, Setsuya<sup>1</sup>, Rose BURDEN<sup>3</sup>, Samantha ENGWELL<sup>3</sup>, SUZUKI, Yuki<sup>1</sup>,  
KANEKO, Takayuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所, <sup>3</sup> ブリストル大学地球科学科

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention,

<sup>3</sup>Department of Earth Sciences, University of Bristol

Andesitic subplinian explosions were repeated at Shinmoedake, Kyushu, Japan, on 26-27 January 2011. Tephra produced from the explosions were transported by strong seasonal wind, and crossed over the Kyushu Island then reached Pacific Ocean. The fallout deposits were widely observed in the area of down-wind direction. We estimate tephra volume, plume height, and magma discharge rate of the explosions based on field data and theoretical and empirical approaches.

In general theoretical and empirical models or methods are used to study tephra dispersal and physical parameters, in which a plenty of tephra data (mass per unit area, thickness, and clast size with distance) is required to give improved constraints on modeling results and to reduce uncertainties in estimates of eruption parameters and hazard. Although large-scale volcanic eruptions have provided such opportunities to examine theoretical and empirical approaches, small-scale eruptions are often more difficult to constrain because smaller volumes of erupted tephra tends to give only a small number of outcrops due to poor preservation of deposits. Data typically need to be collected soon after an eruption. Thus model applications to relatively small-scale eruptions have not been well studied.

The subplinian eruption that occurred at Shinmoedake volcano provides an interesting tephra dataset and an excellent opportunity to examine theoretical and empirical approaches on tephra volume estimation, clast dispersal under wind effect, which are crucial to evaluate quantitatively tephra dispersal and resultant hazards. Tephra volume is estimated using a relationship between dispersal area and thickness of tephra, or a relationship between dispersal area and mass per unit area. Bi-cubic spline interpolation method is also examined. Results from different methods produced similar tephra volume (11-21 million m<sup>3</sup> for the 26 pm to 27 am explosions and 2-4 million m<sup>3</sup> for the 27 pm explosion). For plume height estimation, a classical clast dispersal model and a predictive numerical model both using maximum clast size are applied. For all subplinian explosions, estimated plume height and magma discharge rate lie on 8.5-9.5 km above sea level and  $7 \pm 3 * 10^5$  kg/s, respectively. The results are consistent with direct and geophysical observations, and also suggest that the explosions occurred every 12 hours with similar mass discharge rate but a decrease of erupted magma volume.

キーワード: テフラ, 噴煙高度, サブプリニー式噴火, 新燃岳, 霧島

Keywords: Tephra, plume height, subplinian, Shinmoedake, Kirishima

## 霧島山新燃岳 2011 年噴火の岩石学 3-低温端成分マグマの相平衡実験- Petrology of 2011 ejecta from Shinmoe-dake in Kirishima volcano 3-Phase equilibria experiment for low-T endmember magma-

鈴木 由希<sup>1\*</sup>, 安田 敦<sup>1</sup>, 外西 奈津美<sup>1</sup>, 金子 隆之<sup>1</sup>, 中田 節也<sup>1</sup>, 藤井 敏嗣<sup>1</sup>, 平林 順一<sup>2</sup>

SUZUKI, Yuki<sup>1\*</sup>, YASUDA, ATSUSHI<sup>1</sup>, HOKANISHI, Natsumi<sup>1</sup>, KANEKO, Takayuki<sup>1</sup>, NAKADA, Setsuya<sup>1</sup>, FUJII, Toshitsugu<sup>1</sup>, HIRABAYASHI, Jun-ichi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東大・地震研, <sup>2</sup> 東工大

<sup>1</sup> Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, <sup>2</sup> Tokyo Tech

マグマ溜まりの深度やその構造を明らかにすることは、火山活動に際し地下で観測される膨張・収縮源と、その時間変化を理解する上で重要である。2011年1月に活動の活発化した新燃岳のマグマについて、我々は次のことを明らかにしてきた(鈴木・他, 2011; 連合大会, 秋季大会)。1) 噴出物の大半は玄武岩質安山岩マグマとデイサイトマグマの混合物だが、極一部デイサイトそのものが噴出している(白色軽石)、2) デイサイトマグマ内に温度不均質があり(磁鉄鉱斑晶コアのMg/Mn多様性)、白色軽石はデイサイトマグマの中の低温エンドメンバーである、3) 高温マグマの結晶化は主に10-6km深で起きた(カンラン石斑晶メルト包有物の含水量)。結晶化深度に幅があり、さらにカンラン石が骸晶であることから、結晶化がマグマ上昇と共に起きた可能性が示唆された。

デイサイトの貯蔵深度はこれまで Rhyolite-MELTS により検討してきたが、より高い精度で制約を与えるため、今回、相平衡実験を試みた。2011年1月26日噴出の白色軽石(SiO<sub>2</sub> 63.3wt%)を対象とした。この軽石は、斜方輝石、単斜輝石、斜長石、Fe-Ti 酸化物の斑晶を合計 48.2wt% 有し、861-874°C, NNO+1.5 の条件下にあった。斜長石斑晶リムは An<sub>53.2-58.9</sub>mol%, 石基の SiO<sub>2</sub> 含有量は 76.6wt% である。

実験は地震研の内熱式ガス圧装置で行った。白色軽石の粉碎物と純水を 1200°C, 310MPa に保持することで、実験条件(875°C, 110-250MPa)にて水に飽和する含水ガラスを作成した。875°Cの実験では、3層のカプセル(外から Au-Pt-Ag<sub>75</sub>Pd<sub>25</sub>)を採用した。Au と Pt カプセルの間に Ni+NiO+H<sub>2</sub>O, AgPd 内に含水ガラスを封入した。AgPd はメルトからの Fe の吸収を最小限に抑え、Pt は AgPd-Ni 合金の生成やメルトの Ni による汚染を防ぐ。水素の透過性の小さい Au はバッファで生成した水素のカプセル外への散逸を最小限にする。実験時間は 4 日(250MPa)-6 日(110MPa)とした。実験期間の途中で一旦クエンチし、Ni バッファの詰め替えを行った。最終的に NNO から外れたケースでも NNO+2.3 までの範囲であったことを、実験産物の Fe-Ti 酸化物により確認した。これは、実際のマグマの条件に近く、またバッファなしのケース(HM 付近)に比べれば十分還元的である。

斜方輝石+単斜輝石+斜長石+Fe-Ti 酸化物の共存は 210MPa 以下で見られ、250MPa では斜方輝石を欠く。白色軽石の斑晶量、石基組成、斜長石リム組成は、110MPa で最も良く再現される。実験産物のガラスの SiO<sub>2</sub> 量は、250MPa-160MPa の範囲では 70wt% 前後で著しい変化はないが、110MPa では 74.1wt% となる。出発物質の K<sub>2</sub>O 量と実験産物のガラスの K<sub>2</sub>O 量から求めた実験産物の結晶度(wt%)は、22.8%(250MPa), 20.6%(210MPa), 29.3%(160MPa), 42.1%(110MPa)と、低圧であるほど高くなる。実験産物の各相の組成を用いてマスバランス計算で求めた結晶度は、圧力と共に増加する傾向を示すが、K<sub>2</sub>O 量から求めた値よりは高い(250MPa で 26.9%, 110MPa で 52.8%)。斜長石の An 成分(mol%)は、79-74(210MPa), 69-62(160MPa), 62-58(110MPa)と圧力減少と共に減少する。

100MPa は 4km 深に相当する。この深さは、Housh and Luhr(1991)の斜長石水量計から推定した混合マグマの貯蔵深度(4km 以浅)と似る。一方、高温マグマの結晶化深度(10-6km)に比べ浅い。ところで 2011 年噴火で噴出したマグマの大部分は、新燃岳の北西地下 10-6km 付近から供給されたと考えられている。それは、1) 2011 年 1 月の準プリニー式噴火後の地殻変動からは、その位置に収縮源が推定され(9.3km, 中尾・他, 2011; 6.5km, 国土地理院, 第 118 回予知連報告)、2) この際の体積減少量が噴出物総量と合致する(中田・他, 2011)、ためである。今回、実験的に見積もった深度が収縮源の深度よりも浅いことは、次のように説明されるかもしれない。白色軽石として、混合することなく噴出したマグマはデイサイトマグマの中の低温部相当であるので、マグマ溜まりの最浅部などに由来した可能性がある。

キーワード: 新燃岳 2011 年噴火, マグマ供給系, マグマ混合, 玄武岩質安山岩, デイサイト, 相平衡実験

Keywords: 2011 eruption of Shinmoe-dake, magma plumbing system, magma mixing, basaltic andesite, dacite, phase equilibria experiment



## 霧島火山新燃岳 2011 年噴火堆積物の層序と粒度特性 Stratigraphy and grain-size characteristics of the 2011 Shinmoedake eruption deposits, Kirishima Volcano, Japan

宮縁 育夫<sup>1\*</sup>, 花田 大輔<sup>1</sup>, 新美 洋<sup>2</sup>, 小林 哲夫<sup>3</sup>

MIYABUCHI, Yasuo<sup>1\*</sup>, Daisuke Hanada<sup>1</sup>, Hiroshi Niimi<sup>2</sup>, KOBAYASHI, Tetsuo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 熊本大学教育学部, <sup>2</sup> 九州沖縄農業研究センター, <sup>3</sup> 鹿児島大学理学部

<sup>1</sup>Faculty of Education, Kumamoto University, <sup>2</sup>National Agricultural Research Center for Kyushu Okinawa Region, <sup>3</sup>Faculty of Science, Kagoshima University

霧島火山新燃岳における 2011 年の噴火活動は 1 月 19 日の小規模噴火によって開始し, 1 月 26 日には本格的なマグマ噴火へと移行した。1 月 28 日には火口内に溶岩が出現し, その後はブルカノ式噴火が頻発したが, 2 月 9 日から噴火は断続的となり, 9 月 8 日以降, 噴火は発生していない。こうした一連の活動によって, 霧島火山の南東方を中心とした地域に噴出物が堆積している。筆者らは 1 月 27 日以降, 霧島火山周辺域において 2011 年噴出物の分布や量, 粒度組成, 構成物質に関する現地調査を行ったので, その結果を報告する。

新燃岳南東 2.5~3 km 地点(高千穂河原周辺)において, 2011 年噴出物は 6 つのユニット(下位よりユニット 1~6)に区分することができた。ユニット 1 は 1 月 19 日噴出物と考えられ, 層厚 0.5 cm 以下と薄く, 岩片を主体とする堆積物である。ユニット 2 は 1 月 26 日午後から 27 日朝にかけての準プリニー式噴火による降下軽石堆積物で, 高千穂河原周辺では 10~25 cm の層厚を有しており, 3 つの部分に細分することができ, 上位ほど粗粒で淘汰が悪いことが特徴である。また, ユニット 2 下部は岩片に富むが, 上部に行くにしたがって岩片の割合が減少して黄灰色軽石を主体とする堆積物へと漸移する。他のユニットと異なり, ユニット 2 は遠方まで追跡することが可能で, 新燃岳から 20 km 以上離れた宮崎県都城市でも明瞭に認められた。ユニット 3 は層厚 2 cm 以下の粗砂を主体とする淘汰のよい堆積物であり, 岩片の占める割合が高く, 27 日午前中に降下したものと考えられる。ユニット 4 は 27 日 15 時 41 分以降の爆発的噴火による降下軽石堆積物で, 粗粒で黄灰色軽石を主要構成物としている。ユニット 5 はシルト以下の粒子が 50% 以上を占める細粒な灰白色火山灰で, 新鮮な岩片と鉱物片で構成されている。層序や観察記録からみて, このユニットは 28 日~29 日頃にかけて堆積したものと推察される。ユニット 6 は 2 月以降に発生した複数回のブルカノ式噴火による堆積物であり, 筆者らが観察したものの大部分は 3 月 13 日噴出物(最大規模のブルカノ式噴火堆積物)と考えられる。この堆積物は中砂から粗砂を主体としており, 岩片が大部分を占め, スコリアも明瞭に含まれていることが特徴である。

噴出物の等層厚線図からユニットごとの噴出物量を計算した結果, ユニット 2 は 0.004 km<sup>3</sup>, ユニット 3 は 0.0003 km<sup>3</sup>, ユニット 4 は 0.0005 km<sup>3</sup>, ユニット 5 は 0.0003 km<sup>3</sup> となり, ユニット 2 の噴出物量は他のユニットに比べて 1 桁大きいことがわかった。しかしながら, 筆者らが見積もったユニット 2 の噴出物量はこれまで報告されているものよりも 1 桁小さい。これは筆者らが 2.5 km 以内の火口近傍域の堆積物量を考慮していないためと考えられる。

キーワード: 霧島火山, 新燃岳, 2011 年噴出物, 噴火推移

Keywords: Kirishima Volcano, Shinmoedake, 2011 eruption deposits, eruption sequence

## 白頭山火山の“噴火危機”と中国赤松原発への火山リスクについて

### On the recent volcanic crisis of Baitoushan volcano and the probable volcanic risk to the Chisong nuclear power plant

谷口 宏充<sup>1\*</sup>, 姫野 嘉昭<sup>2</sup>

TANIGUCHI, Hiromitsu<sup>1\*</sup>, HIMENO Yoshiaki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学, <sup>2</sup> 東京工業大学

<sup>1</sup>Tohoku Univ., <sup>2</sup>Tokyo Tech

中国と北朝鮮との国境に位置する白頭山は10世紀に大規模噴火を引き起こし、両国へ降下火砕物や火砕流をもたらしたばかりか、日本の東北地方や北海道まで火山灰を降らせたことでよく知られている。中国と北朝鮮において、大規模な火山災害を引き起こす可能性のある唯一のこの山に関し、近年になって両国は火山観測を始めた。中国は1985年から開始し、1999年には天池火山観測所を設立して測量、地震、傾斜計、GPSによる観測や温泉水の化学分析を行ってきた。北朝鮮は1985年から7ヶ所の観測所において地震、地磁気、ラドン、水温や地殻変動の観測を行ってきた。彼らの報告によると、2002年までは温泉温度の上昇やガスの噴出なども見られたが、それ以外、目立った地震活動や地殻変動などはなく穏やかに推移していた。しかし2002年ころから地震活動はその頻度を増し、測量の結果、白頭山山頂の隆起も確認されるようになった。中国および北朝鮮の地震局関係者によれば、このように活発な状況は2005年まで続き、止んだ。しかし昨年6月ごろから、今度は韓国において近い将来の噴火を巡る騒ぎが始まった。それは昨年の3.11東日本大震災の発生を受けてピークに達し、“噴火危機”騒動は大本の中国や北朝鮮にまで逆流していったように見える。

中国や北朝鮮の専門家の間では、今すぐの噴火の可能性については否定的である。しかし一方では、地震活動の活発化や山頂の隆起などが発生し、山体直下へのマグマの供給が推定されており、噴火の準備が進んでいることを推定させる。10世紀噴火の際には火砕物降下、火砕流やラハールの流下が大規模に発生したことはわかっているが、分布を含めてその詳細は不明な部分が多い。しかし、今、もし10世紀噴火と同様のことが起きるとするならば、中国や北朝鮮の東北部に壊滅的な災害が及ぶことは明らかである。

さらに1100年前とは異なった、新たなリスクも生まれようとしている。現在、中国は白頭山山頂から約100km離れた吉林省白山市に赤松原発(1000MWを5基)を建設しようとしている。この原発は白頭山から流れ下る松花江の源流をせき止めた靖宇白山湖を冷却用などの水源として用いる。もし噴火が発生するならば、地形的特徴からみて、山頂にふりつもった火砕物の西側半分はやがて降雪・降雨などと一体になって、原発設置地点をラハールとして襲うことになる。また、衛星画像解析などによれば、西側山体の大規模な崩壊の危険性も指摘できる。100km遠方ではこれもラハールの原因になりうる。白頭山の地質図(魏海泉、私信)によれば、事実、原発の設置予定地点にまで10世紀噴火によるラハールは到達している。赤松に設置される予定の原発AP1000は、取水できなくても3日間は耐えられ、その後、空冷によって安全に停止する第三世代の新しい設計になっている。この点ではラハールに対しては、ひとまず安心なのかも知れない。しかし、山頂と赤松原発との距離の半分ぐらいの地点にまで10世紀噴火による火砕流は流れ下っており、降灰を含めて十分な安全対策はとりうるのだろうか？

原発よりも下流の松花江やアムール川の流域には、中国とロシア併せて1500万人以上の住民が居住している。現地調査の徹底的な実施と安全対策の絶対的な確保が、さらに、北朝鮮を含めた東アジア関連各国による共同研究・対応の体制確立が望まれる。

キーワード: 白頭山, 火山危機, 火山リスク, 原子力発電所

Keywords: Baitoushan, volcanic crisis, volcanic risk, nuclear power plant

## 火星の Central Elysium Planitia に見られる特徴的なコーン地形の成因検討 Unique characteristics of cone in Central Elysium Planitia, Mars

野口 里奈<sup>1\*</sup>, 栗田 敬<sup>1</sup>

NOGUUCHI, Rina<sup>1\*</sup>, KURITA, Kei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

ここ数億年内における火星の火成活動は、近年の研究により存在が明らかになったばかりであり、詳細な活動スタイル等は未だ謎に包まれている。最近の火成活動では巨大楕状火山は形成されず、洪水状溶岩の活動や小型の楕状火山（直径30km未満）、火山性コーン地形（火砕丘・マール・ルートレスコーン）が広域分散的に形成が生じていたことが明らかになっている [e.g. Hauber et al., 2009]。本研究では最近の火星の火成活動を知るために火山性コーン地形に着目する。火山性コーン地形には、形状・分布から形成環境を知ることが出来る、比較的急な傾斜を持つため研究・発見しやすいという2つの利点がある。しかしながらコーンの形状を持つ地形というのは火山性だけに限ったものではないため、直接の調査が容易でない惑星科学において、同じ地形に対し異なる成因説が唱えられることがしばしばある。火星で最も新しい火成活動の存在が示唆されている地域として Central Elysium Planitia があるが、この地域には成因が議論されているコーン地形（直径：2, 3 - 130 m）が存在する。ここ 1000 万年に溶岩である可能性のある流動体が Cerberus Fossae と呼ばれる割れ目から噴出したことが明らかになっている [e.g. Vaucher et al., 2009] が、溶岩であると判定出来ていない。コーン地形の候補地形には火山性のルートレスコーンと周氷河性のピングが挙げられている [e.g. Jaeger et al., 2007, Page, 2008]。

本研究では、可視画像・高度データを用いて CEP のコーン地形の地形調査を行った。調査結果から成因を突き止め、CEP でここ 1000 万年に火成活動が存在したかどうかを明らかにすることを目標としている。これは、ここ数億年の火星の火成活動の特徴を明らかにするという大きな目標の第一段階である。

調査の結果、特異な地形的特徴を持つコーン地形を発見し、3種類（Single Cone Structure、Double Cone Structure、Lotus fruit Cone Structure）に分類した。

Single Cone Structure (SCS) は頂上に凹みを持ったコーン地形である。このタイプのコーン地形は火星で一般的に見られる。Double Cone Structure (DCS) は、コーン頂部の凹み内部にもう1つコーンを持つという二重構造を有する。Lotus fruit Cone Structure は、コーン頂部の凹み内部に複数のコーンを持つ。DCS や LCS は流出源である Cerberus Fossae 付近の特定の領域に分布し、流動体の流れ下る方向と平行に並んでいるものも見受けられる。

先行研究で CEP のコーン地形の候補に挙げられていた地球上のコーン地形と今回発見した CEP のコーン地形との比較を行った。ルートレスコーンでは、Iceland の Myvatn 湖において DCS、LCS と同様の構造を持つものが多数見られた。ピングでは DCS、LCS と似た構造を持つものは見られず、地球のピングで見られる特徴（山体頂部からの亀裂）を持つものは CEP のコーン地形には見られなかった。

調査結果と比較結果から、CEP のコーン地形は火成活動を起源に持つルートレスコーンであることが示された。これにより、CEP ではここ 1000 万年に火成活動が存在し、それは洪水状の溶岩の噴出と多数のルートレスコーンの形成を伴うものであったことが推測された。

キーワード: 火星, 火山, コーン, ルートレスコーン, 溶岩

Keywords: Mars, volcano, cone, rootless cone, lava-water interaction, Central Elysium Planitia

## カナリア諸島, エル・イエロ島の2011年火山活動に伴う地殻変動 Crustal Deformation During the 2011 Volcanic Crisis of El Hierro, Canary Islands, Revealed by Continuous GPS Observation

鷺谷 威<sup>1\*</sup>, MARTINEZ, Jose Barrancos<sup>2</sup>, CALVO, David<sup>2</sup>, PADRON, Eleazar<sup>2</sup>, HERNANDEZ, German, P.<sup>2</sup>, HERNANDEZ, Pedro, A.<sup>2</sup>, PEREZ, Nemesio Rodriguez<sup>2</sup>, SUAREZ, Juan Manuel Poveda<sup>3</sup>  
SAGIYA, Takeshi<sup>1\*</sup>, MARTINEZ, Jose Barrancos<sup>2</sup>, CALVO, David<sup>2</sup>, PADRON, Eleazar<sup>2</sup>, HERNANDEZ, German, P.<sup>2</sup>, HERNANDEZ, Pedro, A.<sup>2</sup>, PEREZ, Nemesio Rodriguez<sup>2</sup>, SUAREZ, Juan Manuel Poveda<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学減災連携研究センター, <sup>2</sup>Institute Volcanologico de Canarias (INVOLCAN), <sup>3</sup>Cartografica de Canarias (GRAF-CAN)

<sup>1</sup>Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, <sup>2</sup>Institute Volcanologico de Canarias (INVOLCAN), <sup>3</sup>Cartografica de Canarias (GRAF-CAN)

Seismo-volcanic activity of El Hierro started in the middle of July of 2011 and resulted in the active submarine eruption after October 12 south off La Restinga, the southern tip of the island. We have been operating one continuous GPS site on the island since 2004. Responding to the activity, we quickly installed 5 more GPS sites. Including another site operated by the Canary Islands Cartographical Service (GRAF-CAN) for a cartographic purpose, we have been monitoring 7 GPS sites equipped with dual-frequency receivers. We present the result of our crustal deformation monitoring and the magmatic activity inferred from the deformation data. In accordance with the deformation pattern, we divide the volcanic activity in 2011 into 4 stages. The first stage is from the middle of July to middle of September, during which steady magmatic inflation is estimated at the center of the island. The inflated volume of the first stage is estimated to be about  $1.3 \times 10^7 \text{ m}^3$  at the depth of about 5km. The second stage, which continued until the first submarine eruption on October 12, is characterized by the accelerated deformation due to the upward as well as southward migration of magma. Additional inflation of about  $2.1 \times 10^7 \text{ m}^3$  occurred in the depth range of 1-2km. The third stage continued for about 3 weeks after the first submarine eruption. During this stage, submarine eruption continues while no significant surface deformation is observed. It is considered magma supply from a deeper magma chamber continued during this 3 weeks period. Therefore, the total inflation volume during the first two stages gives the minimum estimate for the total magma volume. Since the beginning of November 2011, many GPS sites started subsiding. However, this deflation pattern is quite different from those in the shallow inflation stages. Horizontal deformation during this 4th stage is not significant, implying that deflation is occurring below the moho.

キーワード: カナリア諸島, エル・イエロ島, 噴火, 地殻変動, GPS

Keywords: Canary island, El Hierro, eruption, crustal deformation, GPS

## 日本の活火山の噴火過去 2000 年間履歴の時空解析 Space-time Analysis of the Eruptions in Japan for the Past 2,000 Years

伊藤 悠太郎<sup>2</sup>, 中村 洋一<sup>2\*</sup>  
Youtaro Ito<sup>2</sup>, NAKAMURA, Yoichi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> 伊藤 悠太郎, <sup>2</sup> 中村 洋一  
<sup>1</sup> Yutaro Ito, <sup>2</sup> Yoichi Nakamura

わが国における 110 活火山の噴火記録をもとに、火山ランク毎の噴火数や噴火規模 (VEI) などの時系列や分布数の解析から、わが国での噴火活動の頻度や地域性などを考察した。日本活火山総覧第 3 版 (気象庁)、Volcanoes of the world, 3rd ed (Smithsonian Inst.)、火山ハザードマップデータベース (防災科研) および各火山の論文や著書などを参照して、2011 年 12 月までの過去約 2000 年間の噴火記録を対象とした。なお、個々の噴火記載は文献間で差異があるため、できるだけ文献間で共通的な内容を採用した。

その結果、過去約 2000 年間のわが国での噴火総数は 1135 回で、そのうち噴火規模 (VEI) が見積もれたのは 998 噴火であった (文献で VEI が推定済みの噴火はその値を採用)。火山ランクごとの噴火総数と噴火頻度 (2011 年/噴火数) は、ランク A 火山では 615 回で 3.3 年、ランク B では 397 回で 5.0 年、ランク C では 63 回で 32 年であった。噴火規模 (VEI) 別での噴火数は、VEI7 と VEI6 が 0、VEI5 が 11、VEI4 が 41、VEI3 が 113、VEI2 が 551、VEI1 が 227、VEI0 が 56 であった。

噴火数と噴火規模 (VEI) との関係の時系列でみると、VEI5 と 4 の噴火の噴火頻度は過去約 2000 年間での時系列的変動は少なく、平均噴火間隔は VEI5 が 101 年、VEI4 が 49 年と見積もれた。しかし、VEI3 以下の噴火数は近年ほど増加傾向が認められ、VEI3 は最近 500 年間、VEI2 は最近 150 年間、VEI1 は最近 50 年間に限れば変動幅が小さくなっている。これは噴火が漏れなく記録として残る規模は VEI4 以上で、近年ほど VEI の小さい噴火記録の漏れがなくなったことを示す。これらを考慮して、火山ランクごとの噴火の VEI 別頻度を補正をした結果、ランク A の噴火頻度は VEI5 で約 140 年、VEI4 で約 70 年、VEI3 で約 15 年であった。ランク B では VEI4 で約 200 年、VEI3 で約 15 年であった。ランク C では VEI3 で約 50 年であった。VEI2 以下での噴火頻度は、ランク A で約 1 年、ランク B で約 2 年、ランク C で約 20 年と見積もられた。

わが国の地域を北海道、東北、関東・中部、伊豆・小笠原諸島、九州・沖縄として (この地域別ではランク A と B の総数がほぼ同一)、火山ランクの VEI 別の噴火数をみた。過去約 2000 年間での噴火数は、九州・沖縄が 399 と最も多く、次いで関東・中部の 261 で、以下はほぼ同数の 130 前後であった (伊豆・小笠原諸島はランク不明火山の噴火が多い)。九州・沖縄では阿蘇、桜島、霧島、諏訪之瀬島、関東・中部では浅間、富士、焼岳、伊豆・小笠原諸で伊豆大島、三宅島、北海道では樽前山、雌阿寒岳、十勝岳、東北では蔵王、岩木の噴火数が多い。これらの噴火規模は VEI で 2 ないし 1 が、次いで 3 が多い。VEI が 4 以上の噴火がやや多かったのは北海道であった。噴火数が最も少なかった地域はランク A の火山がない東北で、噴火規模も VEI2 以下が多かった。噴火規模で VEI3 以上の噴火が複数回あった火山は、伊豆大島、三宅島、および浅間山、桜島などで、後者 2 火山は前者 2 火山より噴火数としては少ないが、VEI が高い噴火がより多かった。

噴火履歴からの噴火頻度と噴火規模 (VEI) に着目することで、各地域での個々火山の活動推移の傾向がより定量的に読み取れた。

キーワード: 活火山, 噴火, 噴火規模

Keywords: Active volcanoes, Eruption, VEI

## 小笠原硫黄島の詳細な段丘編年と地殻変動観測による火山活動史の推定 Volcanic activity history of Ito Island in Ogasawara Archipelago estimated by terrace chronology and crustal deformation

中埜 貴元<sup>1\*</sup>, 今給黎 哲郎<sup>1</sup>, 小荒井 衛<sup>1</sup>, 乙井 康成<sup>1</sup>, 大井 信三<sup>1</sup>, 佐々木 圭一<sup>2</sup>

NAKANO, Takayuki<sup>1\*</sup>, IMAKIIRE, Tetsuro<sup>1</sup>, KOARAI, Mamoru<sup>1</sup>, Kosei Otoi<sup>1</sup>, Shinzo Ooi<sup>1</sup>, SASAKI, Keiichi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 国土地理院, <sup>2</sup> 金沢学院大学

<sup>1</sup>GSI of Japan, <sup>2</sup>Kanazawa Gakuin University

小笠原硫黄島の地学現象については、1985年に「地学雑誌」(Vol.94, No.6)に「特集 硫黄島の地学」としてまとめられて以降、各機関による各種観測以外の詳細な火山調査は十分に行われてこなかった。演者らは、科学研究費等補助金(研究課題番号:21510193)により、詳細な隆起活動史と火山編年と詳細な地殻変動観測を目的に、現地で地形・地質調査およびGPS地殻変動観測等を実施してきた。初期の成果については、大井・矢来(2007)や今給黎ほか(2010)で報告されているが、本発表では、その後の現地調査で採取した試料の年代測定および成分分析結果と、それらの結果から編み出される火山発達史について報告する。

1) 元山東海岸に発達するH面(段丘区分は貝塚, 1985による;以下略)上の段丘礫層中のサンゴおよび摺鉢山東岸の段丘礫層中のサンゴ礫の<sup>14</sup>C年代から、H面の発達時期が従来提唱されている350-500cal.BP頃であること、摺鉢山の旧期活動期が500-600cal.BPであることを裏付ける結果が得られた。元山最高位のW面のサンゴの<sup>14</sup>C年代とH面のサンゴの<sup>14</sup>C年代は350-500cal.BPと近く、摺鉢山旧期火山活動に伴って、元山側が隆起し続けたことを裏付ける。2) 堆積残留磁化(NRM)を測定した結果、釜岩海浜堆積層は金剛岩下最下位の海浜砂層(約2,700年前以前)と異なる磁化方位を示し、前者の方が新しい時代の堆積物と推定された(Nakano et al., 2011)。3) 全岩分析および火山ガラスの主成分分析の結果、沖縄の遺跡で見いだされたBLスコリアと呼ばれる漂着軽石(1,400年前以前に漂着;加藤, 2009)は、硫黄島および福岡ノ場1986年噴火の軽石の分析データと比較した結果、摺鉢山起源の特徴的な火山岩組成のグループに属することがわかり、約500-600年前と考えられる摺鉢山活動期より以前に、多量の軽石を噴出する大規模な火山活動が摺鉢山近辺であったことが推定された。4) 神山海岸で見られる戦中の段丘面であるR面より下位の段丘上に漂着している緑色軽石と、翁浜にある二ツ根の岩頭の火山ガラスの化学組成がほぼ一致することがわかった。戦後、翁浜を含む元山南海岸沖の海底で数回の水蒸気爆発があったことが知られており(鶴川, 2002)、これらの火山活動と関連している可能性がある。

以上の成果を加えることにより、硫黄島の過去3,000年間の火山活動史は次のとおりと推定される(1)約2,700年前に大規模な火山活動で大量の溶岩と火砕物(元山凝灰岩)が噴出し、それ以前から陸化していたと考えられる硫黄島を被覆(2)約1,600年前に監獄岩周辺の海底で火山活動が生じ、ペペライトを生成(3)約1,400年前に摺鉢山周辺で沖縄まで軽石を漂着させるような大規模な噴火が発生(4)約500-600年前に元山を急激に隆起させながら摺鉢山が噴火し、大量の軽石によって元山と接続し、現在の硫黄島の原型を形成(5)約400年前に摺鉢山で小規模な噴火があり、現在摺鉢山火口南縁に見られるスコリア丘を形成(6)戦後、元山南海岸沖の海底でマグマ噴出を伴う噴火が発生。

過去の硫黄島(元山)の隆起速度は一定ではなく間欠的で、約500-600年前の摺鉢山噴火時の隆起速度が最も大きい(約50cm/yr)ことが段丘編年から明らかになった。一方、基準点観測やGPS観測による過去100年間の平均隆起速度は、約15cm/yr(平岡ほか, 2009)で、この間の最大隆起速度は、1950~1960年代の約56cm/yr(辻ほか, 1969)、2006年後半~2010年の約40cm/yr(国土地理院, 2011)となっている。このように近年の激しい隆起は約500-600年前の摺鉢山噴火に伴う元山上位段丘の急激な隆起に匹敵するものであり、今後の火山活動との関連が示唆される。

キーワード: 小笠原硫黄島, 段丘編年, 地殻変動, 火山活動史

Keywords: Ito Island in Ogasawara Archipelago, terrace chronology, crustal deformation, volcanic activity history

## 噴火シナリオ分岐条件のための最近の桜島における観測に基づく大正噴火に至る現象の考察

### Phenomena prior to the 1914 eruption of Sakurajima volcano based on recent observation at the volcano for branching of e

井口 正人<sup>1\*</sup>

IGUCHI, Masato<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所

<sup>1</sup> DPRI, Kyoto Univ.

20世紀には桜島において3つの代表的な噴火活動が発生した。1914年の大正噴火は西東の両山腹におけるプリニー式噴火で始まり14億 $m^3$ の溶岩を流出した。1946年噴火は南岳の東山腹の火口から溶岩を流出した。噴出量は大正噴火の約1/10である。1955年に始まった南岳のブルカノ式噴火を主体とする活動は50年以上にわたり、1970年代後半から1992年までに2億トンの火山灰を放出した。21世紀における噴火活動でもそれらと類似した活動が繰り返されると予想される。すなわち、(1)2億 $m^3$ のマグマを短期間に噴出する活動、(2)2億 $m^3$ のマグマを南岳から長期間にわたって噴出する活動、(3)それよりも1桁多い20億 $m^3$ のマグマを両山腹から噴出する活動である。これら3つのシナリオに至る分岐はマグマの貫入率による可能性がある。手始めに大正噴火開始に先行する様々な現象から大正噴火に至るマグマの貫入過程を2006年以降の観測結果に基づいて考察してみた。発生した現象は、野添武志氏が当時の桜島の各集落での証言をまとめた「桜島爆発の日 恐怖……パニック……いまでも生きるその教訓」に基づいた。

桜島南部の有村では1913年7月に谷合で親子が遭難した事故が起きている。原因は二酸化炭素噴出に伴う酸欠と推定されている。黒神の温泉ガス中の二酸化炭素濃度は地盤の膨張に連動して増加する(井口・平林, 2011)。このことから大正噴火発生の半年前にはすでに桜島の地盤の膨張が始まっていたことが推定できる。桜島北部の高免では1913年12月頃から干潮時に井戸水が干上がることが報告されている。干潮時の湯水は全島においてみられた。水位低下は0.5m程度に及ぶと推測され、桜島全島が隆起したことによるものと推定される。南岳の噴火活動が活発化した1974年以前は桜島全体が浮上したことが水準測量と水位観測から明らかになっている(石原・江頭, 1978)。2009年以降の桜島の地盤変動の圧力源は北岳付近にあることがGPS観測や傾斜観測からわかっており(井口・他, 2011)、大正噴火発生の1か月前には桜島北部を中心に隆起していたことが推定できる。北岳の下6kmに圧力源を仮定し、高免において0.5m隆起したとすれば、 $1.4 \times 10^8 m^3$ の体積が増加したことになる。この量の体積増加があれば、有村観測坑道において128 $\mu$ radの傾斜変化、ハルタ山観測坑道において132 $\mu$ ストレインの膨張ひずみが予想される。桜島北部へのマグマの貫入・蓄積過程と考える。

有感地震を含む火山性地震が群発し始めたのは1914年1月11日の3時ごろからである。噴火当日12日の2時には湯之の海岸近くの過去には常に海面下であった瀬が0.6mも海面より上に浮上していたという報告がある。この時刻の潮位は翌13日の大潮の最低潮位よりは0.2m高いので、少なくとも0.8mは隆起したことが推定できる。この隆起は地震活動の活発化と同期したものと推定される。湯之において0.8m隆起したとすれば、地震開始からこの時点まで $1.7 \times 10^8 m^3$ の新たな体積増加があったと見積もられる。

12日の朝には有村で逆に井戸水が増水し、海岸から熱湯が噴出した。地震活動に注目すると、1月11日3時から始まった地震活動は発生回数が急激に増加したが、12日1~2時は一時的に減少し、3時ごろから再び激しい活動が始まっている。この火山性地震は減少期を挟んで異なる活動であると考えれば、11日3時から12日0時の活動は桜島北部から南岳下へのマグマの移動に対応し、12日3時以降の地震活動は南岳下から浅部へ、あるいは東西両山腹に向かってのマグマの移動に対応するものと推定され、浅部のマグマの移動が地下水を被圧した結果、井戸水が増水したと考えられる。

桜島北部の高免で干潮時に井戸水が枯れた1913年12月までの体積増加量は $1.4 \times 10^8 m^3$ であるが、この膨張が半年前から始まったとすれば貫入速度は $1 \times 10^6 m^3$ /日となる。湯之で瀬が浮上したさらなる隆起は $1.7 \times 10^8 m^3$ の体積増加を伴うが、この隆起が1月11日の3時から始まったとすれば貫入速度は $2 \times 10^8 m^3$ /日となり、それ以前と比べて2桁大きいことになる。南岳の爆発に伴う圧力源の体積変化は $10^5 m^3$ オーダーであり(Ishihara, 1990)、日率にして $10^6 m^3$ /日オーダーまでである。マグマの貫入速度がその後発生する噴火の規模に関係している可能性を指摘できる。

キーワード: 桜島, 大正噴火, 噴火シナリオ, 前兆現象

Keywords: Sakurajima, 1914 eruption, eruption scenario, precursor

## 桜島火山 最近50年間のマグマ供給系とその変遷 Evolution of magma plumbing system of Sakurajima volcano in the last 50 years

海老原 佳帆<sup>1\*</sup>, 中川 光弘<sup>1</sup>, 松本 亜希子<sup>1</sup>, 宮坂 瑞穂<sup>1</sup>, 井口 正人<sup>2</sup>

EBIHARA, Kaho<sup>1\*</sup>, NAKAGAWA, Mitsuhiro<sup>1</sup>, MATSUMOTO, Akiko<sup>1</sup>, AMMA-MIYASAKA, Mizuho<sup>1</sup>, IGUCHI, Masato<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北海道大学大学院理学院, <sup>2</sup>京都大学防災研究所火山活動研究センター

<sup>1</sup>Hokkaido University, <sup>2</sup>Kyoto University

桜島火山は九州南部の始良カルデラ南縁に位置する後カルデラ火山で、1471年以降3度のプリニー式噴火を繰り返し、1946年には溶岩を流出した。1955年以降は小～中規模のブルカノ式噴火が頻発しており、2000年頃に活動は一度減衰したが2006年からは再び噴火回数が増加し、今後の動向が注目されている。1471～1946年に噴出した溶岩流について岩石学的研究を行った Yanagi et al.(1991)では、全岩化学組成の直線トレンドや斜長石斑晶コアのバイモーダルな組成分布、正累帯・逆累帯構造を示す輝石斑晶の共存などを根拠に挙げ、時間とともに苦鉄質マグマの割合が増える2端成分マグマ混合(デイサイト質マグマ+玄武岩質マグマ)が起きていると述べた。しかし中川・他(2011)は1471年・1779年噴出物と1914年以降の噴出物は異なるトレンドを示すことを明らかにし、20世紀以降の噴火では、珪長質マグマ(S)に安山岩質マグマ(A)が混合してできたマグマに噴火直前に玄武岩質マグマ(B)が注入する、という3端成分マグマ混合が起きていたことを結論付けた。本研究では、これまで検討が不十分であった最近50年間のブルカノ式噴火の噴出物を対象に岩石学的研究を行い、マグマ供給系の構造や時間変化を考察することを目的とする。

最近50年間の噴出物はSiO<sub>2</sub>=58～64wt.%の安山岩質である。その組成トレンドは1914年・1946年噴出物のものとはほぼ一致し、1914年以降時間が経つにつれて苦鉄質な組成に変化する。斑晶鉱物組み合わせは斜長石・斜方輝石・単斜輝石・磁鉄鉱・かんらん石(一部試料)であり、時間と共に斑晶量は増加する。斜長石は溶融組織を呈するものが多く、コア組成はAn=60とAn=80にピークを持つバイモーダルな分布で、噴出年代によってはAn=90付近のピークも見られる。斜方輝石はMg#=65～75、単斜輝石はMg#=70～80の範囲でユニモーダルまたはバイモーダルな組成分布を示す。斜長石・輝石においては正累帯・逆累帯を示す斑晶の共存が認められた。かんらん石は、Fo=70で輝石の厚いリムを持ち集斑晶中にあるもの、Fo=80でマイクロライトに取り囲まれ単独で晶出するもの・反応縁の無いものがある。磁鉄鉱のコア組成はMg/Mn=8～12の間に分布するが、噴出年代によってはMgに富む組成を示す斑晶もある。

斜長石斑晶コアのバイモーダルな組成分布、正累帯・逆累帯を示す斑晶の共存、輝石と非平衡な組成のかんらん石の存在は、最近50年間のブルカノ式噴火においてもマグマ混合が起きていたことを示している。混合端成分マグマの斑晶鉱物組み合わせと組成は中川・他(2011)と類似しており、斜長石(An=46～64)、斜方輝石(Mg#=60～68)、単斜輝石(Mg#=66～72)、および磁鉄鉱からなるSマグマ、斜長石(An=64～86)、斜方輝石(Mg#=68～76)、単斜輝石(Mg#=72～79)、および磁鉄鉱からなるAマグマ、斜長石(An=86～94)、かんらん石(Fo=75～82)からなるBマグマの、3端成分マグマ混合が起きていたと推定される。斜長石斑晶コアの組成分布はバイモーダルであり、低An斑晶(An<64)はSマグマ由来で、高An斑晶(An>64)はAあるいはBマグマ由来と考えられる。これらの斜長石斑晶の比率と全岩SiO<sub>2</sub>量との関係に注目すると、全岩SiO<sub>2</sub>量の減少とともに、高An斜長石斑晶の比率が増加する傾向が認められる。20世紀以降噴出物の組成トレンドが、S+Aの混合マグマに対してBマグマが注入することにより形成された(中川・他,2011)ことを考慮すると、Bマグマの混合比率が増加することによって高An斑晶の比率が上昇し、全岩SiO<sub>2</sub>量が低下したと考えれば説明できる。また、噴出物の全岩SiO<sub>2</sub>量と爆発回数との関係を見ると、SiO<sub>2</sub>に乏しい噴出物は爆発の頻発する1970年代後半と1980年代後半に認められ、Bマグマの注入が噴火を誘発していると考えられる。しかしながら、前者と後者の噴出物には含有するかんらん石斑晶量に相違があり、全岩SiO<sub>2</sub>量との明瞭な相関も見られない。このことは、Bマグマのかんらん石斑晶量には多様性があることを示唆しており、1970年代後半はかんらん石の多いBマグマが、1980年代後半にはかんらん石をほとんど含まないBマグマが注入していた可能性が考えられる。

キーワード: 桜島火山, マグマ供給系, マグマ混合, ブルカノ式噴火

Keywords: Sakurajima volcano, magma plumbing system, magma mixing, vulcanian eruption



## 岩石学的特徴からみる、桜島火山、昭和火口 2006~2011年噴火の活動とその評価 Eruptive activity during AD 2006-2011 at Sakurajima volcano, inferred from Petrological features of eruptive materials

松本 亜希子<sup>1\*</sup>, 中川 光弘<sup>1</sup>, 宮坂 瑞穂<sup>1</sup>, 井口 正人<sup>2</sup>

MATSUMOTO, Akiko<sup>1\*</sup>, NAKAGAWA, Mitsuhiko<sup>1</sup>, AMMA-MIYASAKA, Mizuho<sup>1</sup>, IGUCHI, Masato<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学大学院理学研究院自然史科学部門, <sup>2</sup> 京都大学防災研究所火山活動研究センター

<sup>1</sup>Department of Natural History Sciences, Graduate school of Science, Hokkaido University, <sup>2</sup>Sakurajima Volcano Research Center, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

九州南部に位置する桜島火山は、1955年以降、山頂南岳火口でブルカノ式噴火を繰り返してきたが、21世紀になると活動が低下傾向にあった。しかし、2006年6月、昭和火口において噴火活動を再開し、現在(2012年2月)も火山爆発を繰り返している。最近我々は、2006年以降の昭和火口噴出物の構成物量比や本質物の石基ガラス組成の時間変化から、2010年9月までの活動を大きく4つの活動期(2006年6月~2009年8月; 2009年9月~2010年3月; 2010年4月~2010年5月; 2010年6月~2010年9月)に区分し、その活動期区分が実際の観測データの時間変化と調和的であることを示した(松本他, 2011, 連合大会)。今回は、2010年9月以降の試料も加え、噴出物の特徴と2006年以降の昭和火口の活動変遷との関連性を議論し、岩石学的にみた桜島火山の現状について言及する。

噴出物の大半は火山灰試料からなり、2009年11月・2010年4月・2010年6月・2010年12月にはラピリサイズの試料も認められる。火山灰試料の構成物としては、サイズに関わらず、本質物(その噴火で噴出したマグマ物質)・準本質物(2006年以降の活動で噴出したマグマ物質であるが、その噴火のマグマ由来とは判断できないもの)・強変質岩片・鉱物片からなる。ラピリサイズの試料は、本質物(軽石・スコリア・岩片)・準本質物(スコリア・岩片)・強変質岩片で構成される。2009年8月までの噴出物には強変質岩片が多く、本質物が認められなかったが、2009年9月以降は殆どの噴出物中に本質物が含まれる。ラピリサイズの本質物・準本質物の全岩化学組成は、20世紀噴出物の組成トレンドと調和的であり、かつ最も苦鉄質な組成を示す( $\text{SiO}_2 = 58.5-59.7 \text{ wt.}\%$ )。本質物の石基ガラス組成は、 $\text{SiO}_2 = 65.8-72.7 \text{ wt.}\%$ とデイサイト質で、全岩化学組成に比べて組成幅がある。それらの時間変化をみると、シリカに富む時期とシリカに乏しくなる時期が交互に繰り返されていることがわかる。

本質物・準本質物の全岩化学組成が20世紀噴出物の組成トレンドと調和的であることから、2006年以降の昭和火口の活動も20世紀の活動と同様のマグマシステムであり、マグマ混合が主なプロセスであると考えられる。本質物の石基ガラス組成をみると、2010年1月~4月初め、2010年11月~2011年2月・2011年8月下旬~9月においてシリカに乏しくなっており、これら3期は苦鉄質マグマの影響が増大した時期であると解釈される。石基ガラス組成の時間変化と他の観測データを比較すると、シリカに乏しいマグマ物質が噴出したこれらの時期には、火山活動が活発化しており噴出量も増加している。つまり、2006年以降の桜島火山の活動は、苦鉄質マグマの影響の大きい時期に活発化する傾向があるとみることができ。

これらの時期のうち、2010年1月~4月初めは、2009年9月から継続する、顕著な地殻変動や噴出量の増加、系統的な石基ガラス組成のシリカ量の低下などから、苦鉄質マグマの影響がより大きく、火道が確立した時期であると解釈される。一方、その後の2期については活動規模・噴出量ともに小さくなっており、特に2011年8月下旬~9月では苦鉄質マグマの影響の程度も小さい。これらの特徴から、桜島火山2006年以降の活動は、2009年9月~2010年4月初めに最盛期を迎えたが、その後は顕著な変化はみられず、規模をやや縮小させながら活動を継続している、と考えられる。

キーワード: 桜島火山, 昭和火口, 火山灰, 火山ガラス組成, 時間変化

Keywords: Sakurajima volcano, Showa crater, volcanic ash, glass chemistry, temporal variation

## 火山構造的な地震の応力トリガー：マグマ貫入時と東北地方太平洋沖誘発地震の地震の比較

### Stress triggering of volcano-tectonic earthquakes: stress changes in the case of magma intrusions and great earthquake

森田 裕一<sup>1\*</sup>

MORITA, Yuichi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> Earthquake Research Institute, University of Tokyo

火山周辺の地震活動は、マグマの上昇や移動などの指標として、火山活動のモニタリングに広く使われている。特に、山頂近傍の地下浅部で発生する長周期地震動は、マグマや火山ガスの移動を捉える情報として、多くの研究者により解析されている。一方、山麓や山頂から数～十数キロ離れた場所で発生する群発地震は、火山構造的な地震と呼ばれ、火山活動に伴う応力変化により発生するとされている。例えば、2011年1月末に噴火した霧島山では、2006年頃から周囲約20kmの範囲の地震活動が徐々に高まり、噴火まで活動が上昇し続けた。2009年末に明瞭な地殻変動が観測されて噴火の可能性が明瞭になる約3年前から地震活動は地下深部のマグマ移動に伴う応力変化を捉えていた可能性がある。このように、火山周辺の地震活動はマグマが深部にあり、浅部に移動していない場合でも、火山活動の高まりを検知する現象として知られているが、地殻変動のような定量的な指標としてではなく、単に火山活動の活発化の可能性を示す相対的な指標としてしか利用しない。この理由として、火山構造的な地震の発生機構と火山活動の関係を系統的かつ定量的に解析されてこなかったことや、マグマ移動以外の要因による応力変化によっても地震が発生すると考えられているためである。火山構造的な地震は、既存の断層に働く応力場の変化により発生すると考えるので、個々の断層の性質やパラメータを理解し、他の要因による応力変化を推定できれば、マグマ移動による応力場を推定できる可能性があり、その情報は火山防災に一層役立つものとなるであろう。

これまで我々は、伊豆大島では約3年間隔でカルデラ北部の地下約5kmの場所に間欠的にマグマが蓄積され、この蓄積時にカルデラ内と伊豆大島西部沿岸の数か所で地震活動が活発になることを明らかにしてきた。このうち、沿岸部の数か所のクラスターで発生する群発地震は、マグマ貫入期間のある時期の1日から1週間程度の期間にのみ集中して発生する。これまでの震源分布から明らかになった断層面の位置、走行や地殻変動観測から明らかになった火山直下のマグマ貫入量を用いて、群発地震発生時の断層面にどれくらいのクーロン応力の増加し、それによって地震活動が活発化するかを系統的に調べた。

伊豆大島沿岸部で発生する群発地震の震源は北方沖（岡田沖）、北西沖（元町沖）、南西沖（野増沖）とほぼ3か所に大別できる。精密な震源分布から、それぞれ走行方向の異なるほぼ鉛直の断層で、発生する地震の発震機構解から横ずれの卓越した断層であることが判った。これらの場所では繰り返し地震が発生するため、同じ断層が応力の蓄積により繰り返し滑っていると考えられる。マグマの貫入によるこれらの断層面に働くクーロン応力変化を計算すると、前回の活動からほぼ同程度のクーロン応力の増加があると新たな群発地震活動が開始する傾向があることが明らかになった。この時の応力増加値は、10-50KPaの範囲にあり、応力の絶対値としては極めて小さい。つまり、これらの群発地震は極めて小さい応力変化量を検知して活動する。平成23年東北地方太平洋沖地震の発生時から数時間後に、これらの断層の2つで群発地震活動が発生した。本震時の静的応力変化によるこれらの断層に加わるクーロン応力の変化量も上記の範囲にあり、極めて小さな応力変化で群発地震活動が開始することを、全く異なった応力源による応力変化によっても支持される。

上記のように、これらの群発地震活動は10-50KPa程度の応力変化を敏感に捉えて活動していることが明らかになった。また、これらの活動は、既存の断層面に応力が蓄積し、それがある量に達すると群発地震活動が開始し、地震発生により応力を開放し、再度蓄積量が増加するというサイクルを繰り返していると考えられる。つまり、サイクルの間隔が短い時には、応力変化量が大きく、マグマ貫入等の応力変化が大きいことを示している。このようなメカニズムはこれまで漠然と想像されていたが、本研究は、具体的な応力値を推定し、火山性群発地震の発生機構を定量的に解析した。今後も解析を継続し、これまでより一歩進めた火山構造的な地震の実体を解明したい。

キーワード: 火山構造的な地震, クーロン応力変化, マグマ貫入, 誘発地震, 火山活動評価

Keywords: volcano-tectonic earthquake, Coulomb stress change, magma intrusion, induced seismicity, evaluation of volcanic activity

## 島根県東部における準火山性深部低周波地震の震源メカニズム Focal Mechanisms of Semi-Volcanic Deep Low-Frequency Earthquakes in Eastern Shimane

麻生 尚文<sup>1\*</sup>, 太田 和晃<sup>1</sup>, 井出 哲<sup>1</sup>  
ASO, Naofumi<sup>1\*</sup>, OHTA, Kazuaki<sup>1</sup>, IDE, Satoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>The University of Tokyo

### 【背景】

深部低周波地震 (LFE) の中で、活火山からもプレート境界からも離れた島弧モホ面付近で孤立的に発生する LFE は、プレート境界で発生する Tectonic LFE とは異なり、活火山直下で発生する Volcanic LFE と非常によく似た活動様相を示し、流体の移動現象が示唆される [Aso *et al.*, 2011; 2012 (本学会)]。これらの LFE を Semi-Volcanic LFE と呼ぶこととする。Volcanic LFE や Semi-Volcanic LFE はその地理的位置から火山活動や内陸型巨大地震との関連が疑われるものの、震源メカニズム解に関する先行研究は、一部の地震について僅かな情報をもとに解析しているため、推定されている様々な解が実際の物理現象の多様性を反映したものが推定精度の低さによる虚像かは定かでない [e.g., Nishidomi and Takeo, 1996; Ohmi and Obara, 2002; Nakamichi *et al.*, 2003]。本研究では、波形全体を用いた解析を多数の LFE に対して行い、信頼できる震源メカニズム解を得るために、低ノイズの地域で比較的大規模の LFE が多く発生している島根県東部の Semi-Volcanic LFE に注目した。この LFE は内陸型巨大地震である鳥取県西部地震 (2000) の震源域に近いだけでなく、第四紀火山である横田単成火山群の直下に位置するため、それらの関係は非常に興味深い。

### 【データ・手法】

島根県東部の Semi-Volcanic LFE についてモーメントテンソルインバージョンにより、震源メカニズム解の推定を行った。データは震源近傍の Hi-net 五観測点におけるイベント波形を用いた。理論地震波形は水平成層を仮定し、Takeo [1985] に基づく離散波数積分法によって求めた。全 60 イベント ( $M < 1$ , 全観測点で気象庁が検出) について、グリッドサーチと線形インバージョンにより、モーメントテンソルの型と震源時間関数を求めた。時間ウィンドウは P 波到達時周辺の鉛直成分および S 波到達時周辺の水平成分について、それぞれ地震波到達時の 0.2 秒前から始まる 2.5 秒間をとった。なお、解の安定性も確認した。

### 【結果・考察】

震源時間関数 (モーメントレート関数) は、通常の地震と異なり正負に振動する。モーメントテンソルの型は、多くの LFE について等方成分と CLVD 成分が支配的であり、ダブルカップル成分は対称性の崩れから付随的に生じていると考えられる。等方成分と非等方成分との符号の組み合わせは開口クラックと整合的であるが、その比も考慮すると、より Linear Dipole に近いメカニズムであることが分かった。これは、S/P 振幅比から Ohmi and Obara [2002] が求めたシングルフォース解とその反作用との組み合わせと等価である。また、震源メカニズムの主対称軸は、Aso *et al.* [2012 (本学会)] による震源再決定で明らかとなった震源分布の方位だけでなく、鳥取県西部地震の主張力軸や西南日本における広域応力場の最小主軸とほぼ並行であり、スケール普遍の方位性が確認された。これらの信頼出来る震源メカニズム解によって、特徴的な方向に並んだクラック状の構造内での流体の移動現象が示唆される。

キーワード: 深部低周波地震, 準火山性 LFE, 島根県東部

Keywords: Low-Frequency Earthquake, Semi-Volcanic LFE, Eastern Shimane

## フィリピン・タール火山における低周波地震から示唆される浅部熱水系の活動 Shallow hydrothermal activity at Taal volcano, Philippines, inferred from long-period seismic events

前田 裕太<sup>1\*</sup>, 熊谷 博之<sup>1</sup>, Rudy Lacson<sup>2</sup>, Melquiades S. Figueroa II.<sup>2</sup>, 山品 匡史<sup>3</sup>  
MAEDA, Yuta<sup>1\*</sup>, KUMAGAI, Hiroyuki<sup>1</sup>, Rudy Lacson<sup>2</sup>, Melquiades S. Figueroa II.<sup>2</sup>, YAMASHINA, Tadashi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所, <sup>2</sup>PHIVOLCS, <sup>3</sup> 高知大学

<sup>1</sup>NIED, <sup>2</sup>PHIVOLCS, <sup>3</sup>Kochi University

タール火山はフィリピンの首都マニラの南 60km に位置する玄武岩質の活火山で、概ね 30 年以内の間隔で水蒸気爆発を繰り返してきた。1977 年に発生した最後の噴火から既に 30 年以上が経過していることから噴火が危惧されている。我々は JST-JICA プロジェクトの一環として 2010 年秋にタール火山に 5 点の広帯域地震計を含む多項目観測網 (図 1a) を整備し、以後観測を続けてきた。

この観測網によって捉えられた現象の 1 つに 0.8 Hz 付近の卓越周期を持つ低周波地震 (図 1b) がある。低周波地震は観測点 VTDK の上下動で最も明瞭である。この VTDK の上下動連続波形に振幅と波形相関の閾値 (それぞれ  $2 \times 10^{-6}$  m/s および 0.8) を設けて検出を行ったところ、観測開始後現在までに 46,687 個の低周波地震が検出された。その大部分は 2010 年 12 月から 2011 年 1 月にかけて発生したものである。イベント間の波形相関は極めて高く、相関係数が 0.95 を超えるイベントペアも珍しくない。振幅は大きなものでも  $5 \times 10^{-6}$  m/s 程度と小さく、その度数分布は  $3 \times 10^{-6}$  m/s を境に別々の指数分布で説明できる。イベント間隔の度数分布は Weibull 分布と log Weibull 分布の重ね合わせで説明できる。卓越周期の度数分布は 0.8 Hz 付近と 0.72 Hz 付近の bi-modal を示し、地震の多発した 2010 年 12 月から 2011 年 1 月にかけて低い卓越周期を持つ地震の割合が比較的高い。振幅とイベント間隔と卓越周期の間には明瞭な関係が見られない。

VTMC の上下動が利用できる 2011 年 3 月 6 日以降に発生した地震について、VTDK と VTMC の 2 点のデータを用いて Nakano and Kumagai (2005) の方法で波形インバージョンを行った。S/N を上げるため、スタックした波形をデータとして使用した。VTDK に加えて VTMC の波形相関も良いイベントのみをスタックの対象とした。グリーン関数計算にあたっては P 波速度  $V_p = 3000$  m/s の均質構造を仮定し、地形と火口湖・カルデラ湖を考慮に入れた差分計算 (Maeda and Kumagai, 2011) を行った。インバージョンの結果を図 1c に示す。最小残差は開口クラックを仮定した場合が 61.2 %、円筒ソースを仮定した場合が 61.9 % とほとんど差が無い。また  $V_p = 2000$  m/s での解析も行ったところ、 $V_p = 3000$  m/s の場合とは震源位置は近いが向きが大きく異なるクラックが得られた (図 1c)。これらの結果から震源位置については比較的良く制約できるものの、メカニズムについてはあまり制約できないことが分かる。

求めた震源位置は 1990 年代にダイクが貫入した場所に近く、最近でも噴気活動などが見られる一帯の中にある。深さは 300 ~ 500 m と、他の火山において熱水系に関連した活動と解釈された低周波地震 (例えば Nakano et al., 2003; Ohminato, 2006) の深さに近い。VTDK の上下動波形では低周波地震の振動の Q 値は 6 程度であり、この Q 値は Kumagai and Chouet (2000) のクラックモデルを用いると水蒸気を含んだクラック振動の基本モードで説明できる。このモードが観測された振動周波数 0.8 Hz に対応すると考えると、クラック長は  $L = 150$  m となり、現実的な大きさのクラックが推定される。タール火山では 2010 年 6 ~ 8 月と 2011 年 4 ~ 7 月に地震活動の活発化や山体膨張、水温上昇、ガスフラックスの増大等の異常が観測された。低周波地震の多発した時期はこれら 2 度の活発化に挟まれた時期にあたり、2 度の活動活発化のいずれかに関係するマグマの貫入によってタール火山浅部の熱水系に熱が供給されて低周波地震が発生したと解釈することができる。低周波地震は 2011 年 9 月を最後に発生していないが、タール火山の活動自体も 2011 年後半以降低調になっており、上述の解釈に立てばマグマの貫入等の活動が低調になっていると見なすことができる。

### 引用文献

- Kumagai H., and Chouet B.A., 2000, *J. Geophys. Res.*, 105, 25493-25512.  
Maeda Y., and Kumagai H., 2011, AGU Fall Meeting, S31B-2231.  
Nakano M., and Kumagai H., 2005, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L12302.  
Nakano M. et al., 2003, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 122, 149-164.  
Ohminato T., 2006, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 158, 467-490.

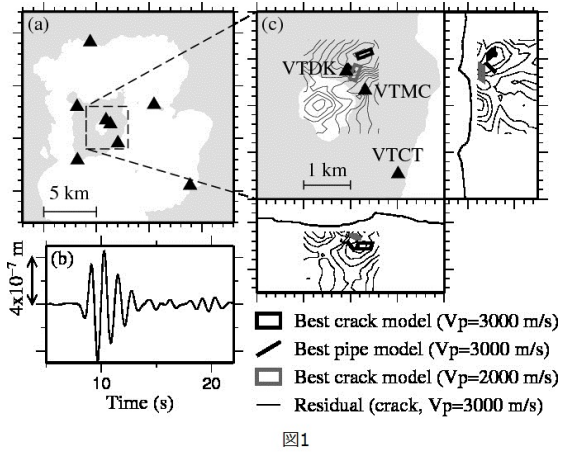
キーワード: タール火山, 低周波地震, 波形インバージョン

Keywords: Taal volcano, Long-period events, Waveform inversion

SVC50-20

会場:104

時間:5月24日 11:15-11:30



## 霧島山新燃岳噴火に関する総合調査の概要と噴火シナリオ

### Comprehensive study on the 2011 eruption at Shinmoedake (Kirishima Volcano) and the eruption scenario

中田 節也<sup>1\*</sup>, 森田 裕一<sup>1</sup>

NAKADA, Setsuya<sup>1\*</sup>, MORITA, Yuichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> Earthquake Research Institute, University of Tokyo

霧島山新燃岳では2011年1月末から300年ぶりに本格的なマグマ噴火が発生した。この噴火に関する緊急研究を、平成22-23年度科学研究補助金特別研究促進費「2011年霧島火山(新燃岳)噴火に関する総合調査」を使用して、全国の大学研究者が連携して実施した。そこでは、(1)火口近傍における観測による火口及び火道浅部構造・状況の調査、(2)広域地殻変動・地震観測・地球電磁気観測によるマグマ蓄積系の調査、(3)火山灰・火山ガス調査による噴出物成分調査、(4)降灰域での土石流危険度調査の4チームを構成し総合的調査を行った。

2011年の噴火に先立って、2006年から地下でマグマ蓄積が進行し山体膨張が進み、2008年からは水蒸気爆発がしばしば起こっていた。マグマの蓄積は新燃岳の火口北西7.8km地下約10kmにある溜まりで起こったものと考えられる。噴火は2011年1月19日の小噴火に続き、1月26、27日の3回の準プリニー式噴火と、それ引き続く火口内の溶岩蓄積、および、2月1日から数ヶ月にわたるブルカノ式噴火で特徴づけられる。1月末の噴火によって、噴火前まで膨張していた山体は収縮した。その収縮量は準プリニー式噴火と火口の溶岩蓄積によるマグマ噴出量(約2400万m<sup>3</sup>)とほぼ一致する。噴火に伴うマグマ蓄積や移動は地震、地殻変動、電磁気、重力変化などでも捉えられた。

2月のブルカノ式噴火の開始と同時に、山体膨張が再び開始し2011年11月まで噴火前と同様の率で継続した。そのため、マグマ蓄積が噴火後も継続し、ほぼ噴火前の状態に戻っている。

今回の噴火はいわゆる「噴火の輪廻」に従ったものであり、時間とともに爆発度を減じる比較的単純な推移であった。本研究では噴火開始直後から噴火事象分岐図(噴火シナリオ)を作成し改訂を重ねた。そこでは、新燃岳のマグマ噴火である約300年の噴火(井村・小林, 1991)や類似火山の噴火を参考にした。今回の噴火は約300年前とは規模、噴火間隔など異なる点も多い。今後、いつどのような形で噴火が再開するのかなどを、本研究結果を反映した噴火シナリオに基づいて予測することが火山学上だけでなく防災上も重要である。

キーワード: 新燃岳, 火山噴火, 総合調査, 噴火シナリオ, 霧島山

Keywords: Shinmoedake, volcanic eruption, comprehensive study, eruption scenario, Kirishima volcano

## 2011年新燃岳噴火の準プリニー式噴火, ブルカノ式噴火, 溶岩流出に伴う傾斜変動 Tilt motions associated with sub-Plinian, Vulcanian eruptions, and an effusive stage in the 2011 Shinmoe-dake eruption

前原 祐樹<sup>1</sup>, 武尾 実<sup>1\*</sup>, 大湊 隆雄<sup>1</sup>, 市原 美恵<sup>1</sup>, 及川 純<sup>1</sup>

MAEHARA, Yuki<sup>1</sup>, TAKEO, Minoru<sup>1\*</sup>, OHMINATO, Takao<sup>1</sup>, ICHIHARA, Mie<sup>1</sup>, OIKAWA, Jun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 地震研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Numerical simulations and experimental studies suggest that bubble formation and fragmentation in magma ascending through a conduit play an important role in an explosive eruption. These phenomena should cause some kind of ground deformations, and such observations have been reported in several volcanoes [e.g., Iguchi *et al.*, 2008]. In this paper, to reveal a behavior of magma associated with an eruption, we investigate tilt motions near a summit crater during the 2011 eruption of Shinmoe-dake, Kirishima volcano. As a broadband seismometer is capable of measuring a ground tilt motion [e.g., Graizer, 2006; Aoyama & Oshima, 2008], we obtained tilt motions from a broadband seismometer (SMN) installed at 1 km northward and a tilt-meter (KISH) at 1.5 km NEN-ward from the crater by elimination of tidal trends and daily noises. A comparison of tilt motions obtained from the broadband seismometer with those from tilt-meter reveals us that the broadband seismometer is available to measure tilt motions with a period up to a few thousand seconds.

Tilt motions indicating summit-up inclines about a few thousand seconds before eruptions preceded most of explosive eruptions, including sub-Plinian eruptions in 26<sup>th</sup> and 27<sup>th</sup> January and Vulcanian eruptions between 1<sup>st</sup> and 7<sup>th</sup> February. Any clear distinctions, such as in precursor times and in sizes of tilt motions, have been recognized between the tilt motions preceding the sub-Plinian eruptions and the Vulcanian eruptions up to this time. However, we found systematic changes of the tilt ratio between these two stations: the tilt ratio of the far station (KISH) to the near station (SMN) gradually increased from around 0.3 to 0.4 as the eruptions closed in, not only the sub-Plinian but also the Vulcanian eruptions. In the effusive stage, we observed periodic summit-up and summit-down tilt motions with a period of about 1 hour; some parts of these periodic motions correlated with volcanic tremors.

There are several speculative interpretations about the temporal change of the tilt ratio. If we assume the location of source in the conduit and fixed source mechanism, the ratio change could be explained by the change of source depth. On the other hand, assuming the fixed source depth in the conduit, it could be explained by the change of source mechanism. We don't have enough data to bring to an end, so hereafter we tentatively interpret these observations based on the assumption of fixed source mechanism. Employing an isotropic pressure source (Mogi model) as the source, the ratio change corresponds to the deepening of source from 420 m to 140 m above sea level. The absolute values of tilt change preceding the first sub-Plinian eruption on 26<sup>th</sup> January can be explained by pressure increase of around 10 MPa assuming the source volume of 10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>. This pressure decreased rapidly just after a small eruption which occurred about 30 min before the start of the sub-Plinian eruption. This depressurization in the conduit might have triggered the fragmentation of magma in the shallow part of the conduit.

キーワード: 火山噴火過程, 傾斜変動, 霧島山新燃岳

Keywords: volcanic eruption, tilt motion, Shinmoe-dake, Kirishima volcano

## MT連続観測による霧島硫黄山北の比抵抗変化 Temporal changes in electrical resistivity of Kirishima volcano from continuous magnetotelluric observations

相澤 広記<sup>1\*</sup>, 小山 崇夫<sup>1</sup>, 長谷 英彰<sup>1</sup>, 上嶋 誠<sup>1</sup>, 橋本 武志<sup>2</sup>, 宇津木 充<sup>3</sup>, 吉村 令慧<sup>3</sup>, 神田 径<sup>4</sup>, 小川 康雄<sup>4</sup>  
AIZAWA, Koki<sup>1\*</sup>, KOYAMA, Takao<sup>1</sup>, HASE, Hideaki<sup>1</sup>, UYESHIMA, Makoto<sup>1</sup>, HASHIMOTO, Takeshi<sup>2</sup>, UTSUGI, Mitsuru<sup>3</sup>, YOSHIMURA, Ryokei<sup>3</sup>, KANDA, Wataru<sup>4</sup>, OGAWA, Yasuo<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 北海道大学, <sup>3</sup> 京都大学, <sup>4</sup> 東京工業大学

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>Hokkaido Univ., <sup>3</sup>Kyoto Univ., <sup>4</sup>Tokyo Institute of Technology

比抵抗は流体に敏感な物理量であり、火山活動によってその構造が変化する可能性がある。現在、比抵抗構造を推定するのに最も用いられるのは自然の電磁場変動をソースとする MT 法である。人工的に電流を流す手法に対し、大掛かりな装置が必要なく、人工ノイズの小さい領域であれば深部まで比抵抗構造を推定できるという利点がある。ところが、これまで MT 法を火山のモニタリングとして適用した例は報告されておらず、その有効性は未知数であった。著者等は 2011 年 3 月から、比抵抗構造変化の検出を目指し、霧島硫黄山北に MT 連続観測点を設置した。なお稠密広帯域 MT 観測による霧島火山群の比抵抗構造は同セッションにて(小山他)発表予定である。

MT 連続観測は Metronix 社製 ADU07, MFS06 を用い 32Hz(00:00~23:50UT), 1024Hz (17:00~19:00UT) サンプルングで、地磁気 3 成分 - 地電位差 2 成分を測定した。FOMA 通信を用い、東京から遠隔で測定状況を把握しているが、通信速度の関係からデータ全てを東京に転送することはできない。そのため、1~2 ヶ月に 1 度の頻度で、メンテナンスを兼ねて現地でデータ回収を行っている。2011 年 11、12 月は電極の不調のため長周期のインピーダンスの決定精度が低下したが、それ以外は欠測もなく順調にデータを蓄積している。

解析は BIRRP (Chave and Thomson, 2004, GJI) を適用した。ローカルな人工ノイズの影響を小さくするため柿岡地磁気観測所の 1Hz データ、および桜島持木観測点の 32Hz, 1024Hz データを用いたリモートリファレンス処理を行い、 $200 \sim 0.001$ Hz のインピーダンスを 1 日ごとに推定した。2012 年 1 月までのところ異常値を除くとインピーダンスの時間変化は見掛け比抵抗で  $\pm 5\%$ 、位相で  $\pm 1^\circ$  程度である。しかしながら自然の磁場変動をソースとして用いているため SN 比が常に一定ではなく、異常値のほかに決定精度の低い日が多く存在する。そこでインピーダンスの非対角成分の平均値をエラーバーの逆数で重みづけし、2 週間の移動平均をかけインバージョンの入力値とした。比抵抗構造の推定には、1 次元成層構造を仮定した Occam inversion (Constable et al., 1987) を適用した。本発表ではこれまでの比抵抗構造変動の特徴を示し、そのメカニズムを議論したい。