

## 十勝岳周辺の温泉の成分・同位体変化と火山活動の関係

### Relationship between volcanic activity and chemical and isotopic compositions of thermal waters in Tokachidake, Japan

高橋 良<sup>1\*</sup>, 柴田 智郎<sup>1</sup>, 村山泰司<sup>1</sup>, 荻野 激<sup>1</sup>, 岡崎 紀俊<sup>2</sup>

Ryo Takahashi<sup>1\*</sup>, Tomo Shibata<sup>1</sup>, Yasuji Murayama<sup>1</sup>, Tagiru Ogino<sup>1</sup>, Noritoshi Okazaki<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北海道立総合研究機構 地質研究所, <sup>2</sup>北海道立総合研究機構

<sup>1</sup>Geological Survey of Hokkaido, HRO, <sup>2</sup>Hokkaido Research Organization

北海道中央部に位置する十勝岳は日本有数の活動的な火山であり、20世紀に入ってから1926年、1962年および1988-89年にマグマ噴火を起こしている。1988-89年噴火からは既に24年が経過しており、次のマグマ噴火が迫っていることが懸念されている。2012年に入り、6月～8月には大正火口において赤熱現象が観測され、また12月上旬には山腹の白金温泉地区や十勝岳温泉地区において震度1程度の揺れを感じる地震が起こるなど、火山活動が活発化している傾向が認められている。本発表では、十勝岳の山腹に位置する複数の温泉の成分と酸素・水素同位体分析を行い、火山活動との関係を検討した結果について報告する。

十勝岳の山頂火口群から約3km西麓には、ベンガラ温泉、白銀荘泉源、吹上温泉および翁温泉が位置している。地質研究所ではベンガラ温泉、吹上温泉および翁温泉については1986年から、白銀荘泉源については1992年から継続的に調査を行っている。各温泉の泉温は、ベンガラ温泉、白銀荘泉源および吹上温泉は48～56℃であるが、翁温泉は25℃程度である。pHは各温泉とも2.5～3.0程度の酸性を示す。

ベンガラ温泉と吹上温泉におけるCl/SO<sub>4</sub><sup>-</sup>（モル比）は1986年の時点では0.2前後であったが、その後急激に上昇し、1988-89年噴火時にはベンガラ温泉がCl/SO<sub>4</sub><sup>-</sup>=2.9、吹上温泉がCl/SO<sub>4</sub><sup>-</sup>=3.9となった。そして、1992年ごろまで上昇が続いたが、それ以降は2010年ごろまで減少傾向にあり、Cl/SO<sub>4</sub><sup>-</sup>=0.6程度まで減少した。白銀荘泉源のCl/SO<sub>4</sub><sup>-</sup>は、ベンガラ温泉や吹上温泉と同様の变化傾向を示し、2010年ごろまで減少していた。しかし、減少傾向にあったこれらの3つの温泉のCl/SO<sub>4</sub><sup>-</sup>は、2010年ごろから横ばい～わずかな上昇傾向を示すようになった。そして、2012年6月以降は明らかな上昇傾向を示し、Cl/SO<sub>4</sub><sup>-</sup>=1.0程度となった。一方、翁温泉のCl/SO<sub>4</sub><sup>-</sup>の時間変化は他の温泉とは異なり1988-89年噴火前の急激な上昇は認められず、1986年以降は概ね減少し続けている。すべての温泉において、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度に顕著な時間変化は認められないことから、Cl/SO<sub>4</sub><sup>-</sup>の変化はCl<sup>-</sup>濃度の時間変化に起因していると考えられる。

これらの温泉の成分分析のほかに、酸素と水素の同位体分析を2011年から行っている。2012年7月以前に採取したサンプルでは、すべての温泉水は天水とほぼ同じ同位体組成（<sup>18</sup>O=-13.6～-12.1‰）を示した。一方、2012年10月に採取したサンプルではベンガラ温泉（-9.8‰）が、2012年12月採取のサンプルではベンガラ温泉（-9.9‰）と白銀荘泉源（-10.9‰）がやや重い酸素同位体比を示した。吹上温泉や翁温泉に関しては、2012年12月の時点では同位体組成に変化は認められず、天水に近い値を示す。

以上のような、ベンガラ温泉、白銀荘泉源および吹上温泉でのCl/SO<sub>4</sub><sup>-</sup>の増加傾向や、ベンガラ温泉と白銀荘泉源が重い酸素同位体比を示すように変化したことは、温泉水への火山性ガスの付加量が増えたことを示している。これは、大正火口の赤熱現象や火山性地震の増加といった変化とも調和的であり、今後も注意深く推移を調査していく必要がある。

キーワード: 十勝岳, 温泉, 安定同位体, 化学成分

Keywords: Tokachidake volcano, thermal water, stable isotope, chemical composition

## 始良カルデラ周辺の比抵抗構造 Resistivity structure around the Aira caldera

神田 径<sup>1\*</sup>, 笠谷 貴史<sup>2</sup>, 八木原 寛<sup>3</sup>, 市原 寛<sup>2</sup>, 橋本 武志<sup>4</sup>, 小山 崇夫<sup>5</sup>, 宇津木 充<sup>6</sup>, 井上 寛之<sup>6</sup>, 園田 忠臣<sup>7</sup>, 小川 康雄<sup>1</sup>  
Wataru Kanda<sup>1\*</sup>, Takafumi Kasaya<sup>2</sup>, Hiroshi Yakiwara<sup>3</sup>, Hiroshi Ichihara<sup>2</sup>, Takeshi Hashimoto<sup>4</sup>, Takao Koyama<sup>5</sup>, Mitsuru Utsugi<sup>6</sup>, INOUE, Hiroyuki<sup>6</sup>, SONODA, Tadaomi<sup>7</sup>, Yasuo Ogawa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学火山流体研究センター, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構, <sup>3</sup> 鹿児島大学大学院理工学研究科, <sup>4</sup> 北海道大学大学院理学研究院, <sup>5</sup> 東京大学地震研究所, <sup>6</sup> 京都大学大学院理学研究科, <sup>7</sup> 京都大学防災研究所

<sup>1</sup>VFRC, Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>3</sup>Grad. Sch. Sci. & Eng., Kagoshima University, <sup>4</sup>Fac. Sci., Hokkaido University, <sup>5</sup>ERI, University of Tokyo, <sup>6</sup>Grad. Sch. Sci., Kyoto University, <sup>7</sup>DPRI, Kyoto University

南九州に位置する始良カルデラは、約 29000 年前の一連の破局的噴火によって現在の輪郭が形成されたと考えられている。桜島は、その始良噴火のおよそ 3000 年後から成長を始めた後カルデラ火山であり、最近 3 年間は、年間 800 回以上の爆発的噴火を繰り返すなど、活発な火山活動を行っている。1914 年の大正噴火の前後で、鹿児島湾周囲の地盤の沈降が観測された (Omori, 1916) ことから、桜島へのマグマ供給源は、始良カルデラの地下およそ 10 km の深さにあると考えられている (Mogi, 1958)。本研究の目的は、想定されるマグマ溜りおよび桜島火山への供給経路に対応する比抵抗構造を明らかにすることにある。

我々は、2009 年以降、主として始良カルデラを横断する西北西 - 東南東の 2 測線に沿って MT 法による電磁気観測を実施し、海底の 16 点を含む全 39 点において電磁場 5 成分データを取得した。海底観測では、数台の OBEM (海底電位磁力計) を用いて 8Hz サンプリングで 2~3 週間の観測を行い、周波数 0.1 ~ 0.0001 Hz のデータを取得した。陸上観測では、フェニックス社の MTU-5 システムにより、周波数 0.001 ~ 320 Hz の電磁場データを取得した。解析は、始良カルデラを横断する 2 測線に沿った 2 次元構造解析を行った。2 次元解析の構造走向は陸上データの GB 分解解析 (Groom and Bailey, 1989) により推定した。

TM モードデータに対する 2 次元インバージョン (Ogawa and Uchida, 1996) の結果、10 ohm-m 以下の低比抵抗領域が南側測線下、始良カルデラ東部の深さ 7-8km に見つかった。この低比抵抗領域は、上方に伸びているように見えるが、対応する OBEM データの高周波数部分がないためはっきりしない。低比抵抗領域の位置は、地盤変動データから推定されている収縮源の位置 (Eto and Nakamura, 1986) と大きくは違わない。このことから、推定された良導体は、マグマ供給源に関連した構造の可能性がある。

キーワード: マグマ溜り, 桜島火山, 比抵抗構造, 始良カルデラ, 海底電位磁力計

Keywords: magma reservoir, Sakurajima volcano, resistivity structure, Aira caldera, OBEM

## 桜島火山における反復地震探査 (第4回目)

### The fourth round of repetitive seismic experiment in Sakurajima Volcano

筒井 智樹<sup>1\*</sup>, 井口 正人<sup>2</sup>, 為栗 健<sup>2</sup>, 渡邊 幸弘<sup>3</sup>, 大島 弘光<sup>4</sup>, 植木 真人<sup>5</sup>, 山本 希<sup>5</sup>, 豊国 源知<sup>5</sup>, 野上 健治<sup>6</sup>, 大湊 隆雄<sup>7</sup>, 及川 純<sup>7</sup>, 市原 美恵<sup>7</sup>, 中道 治久<sup>8</sup>, 大倉 敬宏<sup>2</sup>, 清水 洋<sup>9</sup>, 宮町 宏樹<sup>10</sup>, 八木原 寛<sup>10</sup>, 園田 忠臣<sup>2</sup>, 高山 鐵朗<sup>2</sup>, 渡邊 篤志<sup>7</sup>, 堀川 信一郎<sup>8</sup>, 吉川 慎<sup>2</sup>, 平野 舟一郎<sup>10</sup>, 加藤 幸司<sup>3</sup>, 池田 啓二<sup>3</sup>, 松末 伸一<sup>3</sup>, 芥川 真由美<sup>3</sup>, 小窪 則夫<sup>3</sup>, 宇都宮 真吾<sup>3</sup>, 中橋 正樹<sup>3</sup>  
Tomoki Tsutsui<sup>1\*</sup>, Masato Iguchi<sup>2</sup>, Takeshi Tameguri<sup>2</sup>, Yukihiro Watanabe<sup>3</sup>, Hiromitsu Oshima<sup>4</sup>, Sadato Ueki<sup>5</sup>, Mare Yamamoto<sup>5</sup>, Genchi Toyokuni<sup>5</sup>, Kenji Nogami<sup>6</sup>, Takao Ohminato<sup>7</sup>, Jun Oikawa<sup>7</sup>, Mie Ichihara<sup>7</sup>, Haruhisa nakamichi<sup>8</sup>, Takahiro Ohkura<sup>2</sup>, Hiroshi Shimizu<sup>9</sup>, Hiroki Miyamachi<sup>10</sup>, Hiroshi Yakiwara<sup>10</sup>, Tadaomi Sonoda<sup>2</sup>, Tetsuro Takayama<sup>2</sup>, Atsushi Watanabe<sup>7</sup>, Shinichiro Horikawa<sup>8</sup>, Shin Yoshikawa<sup>2</sup>, Shuichiro Hirano<sup>10</sup>, Koji Kato<sup>3</sup>, Keiji Ikeda<sup>3</sup>, Shinichi Matsusue<sup>3</sup>, Mayumi Akutagawa<sup>3</sup>, Norio Kokubo<sup>3</sup>, Shingo Utsunomiya<sup>3</sup>, Masaki Nakahishi<sup>3</sup>

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

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

九州南部に位置する桜島火山における2008年11月以降の地震波反射構造の変化について2012年観測の結果とともに報告する。桜島火山では4回の反復地震探査が実施された。反復地震探査測線は桜島の北山腹と東麓にそれぞれ2本が設定され、合わせて14点の発破点と252点の臨時観測点で構成されている。2008年の先行観測と4回の反復地震探査は2006年6月の昭和火口の再開口に引き続いて2008年から観測された山体膨張期を含む時期に実施された。火山活動に伴う地震学的応答の変化は生記録のうち桜島北東部を通過する波線に対応するもので検出された。また最終解析結果である差分地震記録のマイグレーション断面では4km以深でマグマの貫入に関連すると思われるより詳細な変化のようすが明らかになった。桜島北東部の煙突状構造付近で2008~2009年の山体膨張期には4kmまで浅くなる負極性の地震波反射イベントが検出された。より深部では年ごとに負極性地震反射イベントの消長が見受けられる。これらの負極性イベントの動きは対応する期間の地盤変動観測データの傾向と調和的である。したがってこれらの地震波反射構造の変化は火口へのマグマ貫入を表していると考えられる。一方、昭和火口における頻繁な爆発の合間に観測が行われた2009年と2011年の断面では、正極性の地震反射イベントの出現が2km付近で散見される。正極性の地震反射イベントの変化が散見される深さはIguchi(1994)やTameguri(2004)が明らかにした爆発メカニズムの最深部のそれと一致する。したがって、散発的に出現する浅部の正極性地震波反射は火口における爆発によって引き起こされる質量欠損を反映しているのかもしれない。以上のことから、我々は地震探査による火山活動のモニタリングに関して重要な知見が得られた。地震探査による火山活動のモニタリングは現在進行中の現象に対する量的な見積もりに貢献できる可能性がある。本講演では我々の手法の詳細について述べる。

キーワード: 桜島火山, 地下構造, 地震探査, 構造の時間変化, マグマ

Keywords: Sakurajima Volcano, Subsurface structure, Seismic exploration, Dynamic structure, Magma

## 広帯域MT探査による霧島火山群の3次元比抵抗構造

### Three dimensional resistivity structure of Kirishima volcanoes inferred from anomalous magnetotelluric data

相澤 広記<sup>6\*</sup>, 小山 崇夫<sup>1</sup>, 長谷 英彰<sup>1</sup>, 上嶋 誠<sup>1</sup>, 神田 径<sup>2</sup>, 宇津木 充<sup>3</sup>, 吉村 令慧<sup>4</sup>, 山谷 祐介<sup>7</sup>, 橋本 武志<sup>5</sup>, 山崎 健一<sup>4</sup>, 小松 信太郎<sup>4</sup>, 渡邊 篤志<sup>1</sup>, 小川 康雄<sup>2</sup>

Koki Aizawa<sup>6\*</sup>, Takao Koyama<sup>1</sup>, Hideaki Hase<sup>1</sup>, Makoto Uyeshima<sup>1</sup>, Wataru Kanda<sup>2</sup>, Mitsuru Utsugi<sup>3</sup>, Ryokei Yoshimura<sup>4</sup>, Yusuke Yamaya<sup>7</sup>, Takeshi Hashimoto<sup>5</sup>, Ken'ichi Yamazaki<sup>4</sup>, Shintaro Komatsu<sup>4</sup>, Atsushi Watanabe<sup>1</sup>, Yasuo Ogawa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 東京工業大学火山流体研究センター, <sup>3</sup> 京都大学火山研究センター, <sup>4</sup> 京都大学防災研究所, <sup>5</sup> 北海道大学地震火山研究観測センター, <sup>6</sup> 九州大学地震火山観測研究センター, <sup>7</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2</sup>Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology, <sup>3</sup>Aso Volcanological Laboratory, Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto, <sup>4</sup>Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, <sup>5</sup>Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University, <sup>6</sup>Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, <sup>7</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Broad-band magnetotelluric (MT) measurements were conducted on 2010?2011 around Shinmoe-dake volcano in the Kirishima volcanic group, Japan, where sub-Plinian eruptions took place three times on 26?27 January 2011. Combining with the previous MT data, it is found that the anomalous phase in excess of 90 degree is commonly observed at the northern part of the Kirishima volcanic group. Because the anomalous phase is not explained by 1-D or 2-D structure with isotropic resistivity blocks, 3-D inversions were conducted. By applying the small error bars on anomalous phase, we successfully estimated a 3-D resistivity structure that explains not only the usual data but also the anomalous phase data. The final model shows a eastward inclined and clockwise twisted pillar-like conductor that connects a deep-seated conductive body (at a depth greater than 10 km) to a shallow conductive layer at the central part of Kirishima volcanoes. By using the geophysical and petrological studies of the 2011 sub-Plinian eruptions, we infer that the pillar-like conductor represent the zone of hydrothermal aqueous fluids over 400 C, in which a magma pathway (interconnected melt) is partly and occasionally formed before magmatic eruptions. To the north of the deep conductor, earthquake swarms occurred on 1968?69, suggesting that these earthquakes were caused by volcanic fluids.

## 宇宙線ミュオンによる雲仙溶岩ドームとストロンボリ火山火道浅部のイメージング

### Imaging of the inner structure of a lava dome in Unzen, Japan and a shallow conduit in Stromboli, Italy

清水 洋<sup>1</sup>, 松島 健<sup>1</sup>, DI MARCO, Natalia<sup>2</sup>, PUPILLI, Fabio<sup>2</sup>, 中村 光廣<sup>3</sup>, 長縄 直崇<sup>3</sup>, CONSIGLIO, Lucia<sup>4</sup>, DE LELLIS, Giovanni<sup>4</sup>, TIOUKOV, valeri<sup>4</sup>, STROLIN, Paolo<sup>4</sup>, BOZZA, Cristiano<sup>5</sup>, DE SIO, Chiara<sup>5</sup>, KOSE, Umut<sup>6</sup>, SIRIGNANO, Chiara<sup>6</sup>, 宮本 成悟<sup>7\*</sup>, 田中 宏幸<sup>7</sup>

SHIMIZU, Hiroshi<sup>1</sup>, MATSUSHIMA, Takeshi<sup>1</sup>, DI MARCO, Natalia<sup>2</sup>, PUPILLI, Fabio<sup>2</sup>, NAKMURA, Mitsuhiro<sup>3</sup>, NAGANAWA, Naokata<sup>3</sup>, CONSIGLIO, Lucia<sup>4</sup>, DE LELLIS, Giovanni<sup>4</sup>, TIOUKOV, valeri<sup>4</sup>, STROLIN, Paolo<sup>4</sup>, BOZZA, Cristiano<sup>5</sup>, DE SIO, Chiara<sup>5</sup>, KOSE, Umut<sup>6</sup>, SIRIGNANO, Chiara<sup>6</sup>, Seigo Miyamoto<sup>7\*</sup>, TANAKA, Hiroyuki<sup>7</sup>

<sup>1</sup>九州大学, <sup>2</sup>伊グランサッソ国立研究所, <sup>3</sup>名古屋大学, <sup>4</sup>ナポリ大学, <sup>5</sup>パドヴァ大学, <sup>6</sup>サレルノ大学, <sup>7</sup>東京大学

<sup>1</sup>Kyushu University, <sup>2</sup>INFN / LNGS, <sup>3</sup>Nagoya University, <sup>4</sup>INFN / Napoli, <sup>5</sup>INFN / Padva, <sup>6</sup>INFN / Salerno, <sup>7</sup>University of Tokyo

平成新山は1991年1月から1995年までの噴火活動で形成された。粘性の高いマグマによって作られる溶岩ドームの密度構造を調べることは、ドーム成長メカニズムの解明、将来の山体崩壊、地すべり予測のために重要である。溶岩ドーム密度構造の観測は溶岩ドーム山麓にある風穴に、高い位置分解能と0.8m<sup>2</sup>有効面積を持つ写真乾板を設置し、4ヶ月間宇宙線ミュオンを用いた溶岩ドームの密度構造の撮像を行った。

ストロンボリはイタリア・シチリア島の北に位置する火山島であり、非常に継続的な噴火活動が現在も続いている。ストロンボリ火道形状観測は、いわゆる「ストロンボリ式」噴火のモデリングにとっても重要な情報となる。1.0m<sup>2</sup>の写真乾板を火口から500mのサイトに設置し、5ヶ月間宇宙線ミュオンを用いた密度構造の撮像を行った。火道の直径は、10mと予測されているため、非常に高い空間分解能を持つ写真乾板での観測が最適である。

いずれも観測後に現像を行い、その後ミュオン飛跡読取装置を用いた解析が行われた。飛跡の位置と角度を測定することで、複数枚に渡って繋がるミュオンを検出し、ミュオン検出効率とランダムノイズ比推定のシステムティックな分析を行った。雲仙溶岩ドームとストロンボリの密度構造について、最初の結果を報告する。

キーワード: 火山, イメージング, ミュオンラジオグラフィ, ストロンボリ, 雲仙, 溶岩ドーム

Keywords: volcano, imaging, muon radiography, Stromboli, Unzen, lava dome

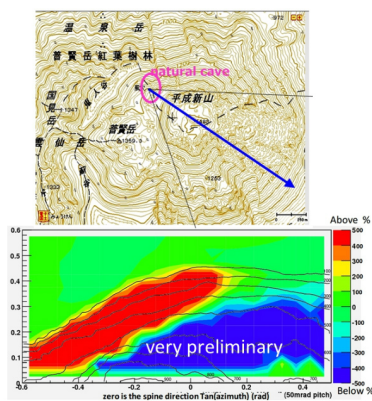


図1上: 検出器設置点, 方向と, 溶岩ドームの位置関係.  
図1下: 溶岩ドームを通過するミュオン数(暫定).

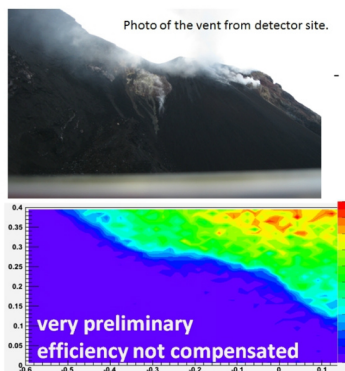


図2上: 検出器設置点から見たストロンボリ火口.  
図2下: ストロンボリ火道イメージング暫定結果.

## 多層型ミュオン検出器システムの開発-ミュオグラフィ-適用可能範囲の拡大を目指して-

### Development of a multifold segmented muon detection system to improve the maximum resolvable distance of muography

草茅 太郎<sup>1\*</sup>, 田中 宏幸<sup>1</sup>, 武多 昭道<sup>1</sup>, 大島 弘光<sup>2</sup>, 前川 徳光<sup>2</sup>, 横山 泉<sup>3</sup>

Taro Kusagaya<sup>1\*</sup>, Hiroyuki Tanaka<sup>1</sup>, Akimichi Taketa<sup>1</sup>, hiromitsu oshima<sup>2</sup>, Tokumitsu Maekawa<sup>2</sup>, Izumi Yokoyama<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター有珠火山観測所, <sup>3</sup> 日本学士院

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2</sup>Utsunomiya Volcano Observatory, Graduate School of Sciences, Hokkaido University, <sup>3</sup>The Japan Academy

In order to perform cosmic-ray muon radiography to image a volcano with a thickness of more than 1 km, a detector with a large active area is necessary to collect the sufficient number of muon events since the penetration flux of cosmic-ray muons is reduced steeply as a function of the thickness of the target of which the muon traverses. However, the size of the active area is not a unique factor to improve the measurement. The signal-to-noise (S/N) ratio also decreases seriously as the size of the target becomes larger, and thus the density distribution cannot be accurately measured. The background (BG) noise that reduces the S/N ratio mainly consists of the fake tracks that are generated by the accidental coincidence of the vertical electromagnetic (EM) shower particles. In order to solve this problem, we developed a novel muon detection system that consists of many layers of position sensitive detectors (PSDs) in conjunction with a new analysis method to effectively reduce the BG noise. In this method, the EM shower-originated fake tracks are rejected by requesting a linear trajectory for a muon event (linear cut method) since vertical EM showers randomly hit each PSD layer and make a non-linear trajectory in the detection system. The developed detection system was tested by imaging the internal density structure (the spatial distribution of the density) of Usu volcano, Hokkaido, Japan. In this measurement, we used a muon detection system that consists of 7 layers of PSDs. One PSD layer consists of  $x$ - and  $y$ - arrays of scintillator strips to make an active area of 1.21 m<sup>2</sup> with a segmented area of 10x10 cm<sup>2</sup>. The angular resolution is +/- 3 degrees. The measurement duration was 1977 hours (82 days and 9 hours). This measurement yielded the following results: (A) by analyzing the region that has a thickness of more than 1000 m, we confirmed that our detection system is sensitive to a density variation of 10% in 1300-m rock; and (B) we found that there are high- and low-density anomalies beneath between Oo-Usu and Usu-Shinzan, which is consistent with the magma intrusion and the resultant fault generation suggested by Yokoyama and Seino (2000) and Ogawa et al. (1998).

キーワード: 宇宙線, ミューオン, ラジオグラフィ- , 密度分布, ミューオグラフィ-

Keywords: cosmic ray, muon, radiography, spatial density distribution, muography

## 重力観測と宇宙線ミュオンラジオグラフィーの組み合わせによる火山内部密度構造の3次元イメージング 3D imaging of the internal density structures of volcanoes by a combination of gravity and muon radiography

西山 竜一<sup>1\*</sup>, 田中 愛幸<sup>1</sup>, 大久保 修平<sup>1</sup>, 大島 弘光<sup>2</sup>, 田中 宏幸<sup>1</sup>, 前川 徳光<sup>2</sup>

Ryuichi Nishiyama<sup>1\*</sup>, Yoshiyuki Tanaka<sup>1</sup>, Shuhei Okubo<sup>1</sup>, Hiromitsu Oshima<sup>2</sup>, Hiroyuki Tanaka<sup>1</sup>, Tokumitsu Maekawa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター有珠火山観測所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, <sup>2</sup>Utsunomiya Volcano Observatory, Graduate School of Science, Hokkaido University

We have developed an integrated processing of gravity anomaly and muon radiography (muography) data for determining the 3D density structures of volcanoes with high spatial resolutions (100 - 200 m). In this report, we describe the method and the case study at Showa-Shinzan Lava Dome at eastern foot of Usu volcano, Hokkaido, Japan. We focus on the resolution test using a checkerboard model to show that muography data is helpful in gravity data interpretation.

Muography is a recently developed inspection method and is based on measuring the absorption of cosmic-ray muons inside matter. From attenuation of muon flux, one can determine the amount of matter, which is given by density-length (density times length), present along muon trajectories. Forward modeling is made by supposing the region of our interest which is subdivided into several voxels with unknown density parameters. Then, both gravity anomaly and density-length data can be written as linear combinations of the unknown parameters. The observation equation is solved by using Tarantola's [1987] probabilistic approach, in which an initial guess density and a correlation length are given as a priori information.

To verify the performance of our method, we performed a resolution test using a checker-board density model superimposed on the shape of Showa-Shinzan. We compared the models reproduced from the following data sets: (a) gravity anomaly data only; (b) gravity anomaly data and muography data. The result of the case (b) is better than that of the case (a), which ensures that muography data constrains the solution well and is helpful in gravity interpretation. In the case (b), the horizontal and vertical resolutions are better than 200 m and 100 m, respectively.

Showa-Shinzan, a target volcano in our case study, was formed at eastern foot of Usu volcano in the 1943-45 Usu eruption. We applied our method to the gravity data at 30 stations on/around the dome and the muography data reported by Tanaka et al. [2007]. The results show that the western part, where the dome exists, has higher density ( $> 2.0$  g/cc) than the eastern part of the uplifted plateau ( $< 2.0$  g/cc). Inside the dome, we find significant density variation, characterized by two high density anomalies. One high density anomaly (2.4 - 2.8 g/cc) is located below the dome and is considered to be the lava stuck in the conduit. We conclude from this that the diameter of the conduit is about 200 m. The other dense anomaly (2.4 - 3.0 g/cc) is near the surface and is considered to be the solidified lava which was uplifted significantly at the last stage of the eruption.

キーワード: 昭和新山, 溶岩ドーム, 重力, 宇宙線ミュオンラジオグラフィー

Keywords: Showa-Shinzan, lava dome, gravity, muon radiography

## 過冷却によって結晶成長する斜長石マイクロライトのサイズ分布と化学組成の関係について

### Correlation between crystal size and chemical compositions; the effect of fluctuation of degree of supersaturation

吉瀬 毅<sup>1\*</sup>, 寅丸 敦志<sup>2</sup>

Tsuyoshi Kichise<sup>1\*</sup>, Atsushi Toramaru<sup>2</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻, <sup>2</sup>九州大学大学院理学研究院 地球惑星科学部門

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyushu University, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University

The plagioclase microlite sometimes show positive correlation between their size and chemical composition of core as shown by some studies (e.g. Noguchi et al., 2006, 2008). We analyze crystal size and An# (Ca / Ca + Na) of plagioclase microlites which were ejected by Shinmoe-dake 2011 eruption. Crystal size is positively correlated with An#. An# of microlites range in 0.65 - 0.57, for the smallest size (10  $\mu\text{m}$ ) and increase with size converging to 0.65 for the largest size. They are distributed within upper and lower bounds. This correlation can be explain the continuous nucleation and growth process including the evolution of melt composition, namely high and low An# evolution series.

In order to quantitatively interpret this correlation, we develop a simple model. We assume that growing surfaces of nucleated crystals are in local equilibrium with adjacent melt in their compositions, namely the effective partial coefficient is defined. We calculate An# with software package Rhyolite-MELTS (Gualda et al., 2012). We denote the rate of nucleation and crystal growth, as  $J$  [ $\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$ ] and  $G$  [ $\text{ms}^{-1}$ ] respectively. In the case that rate of crystallizing change  $P$  is constant, if we set  $J$  as constant,  $G$  is automatically calculated, because  $G$  depends on the total crystal surface area  $S$  and  $P = SG$ . In our calculation,  $G$  is decrease with time, because surface area is increasing. Crystals that nucleate at earlier stage grow by large  $G$ . We calculate final crystal size distribution and An# with as a varying parameter  $J$ .

The correlation between crystal size and An# become tight with increasing  $J$ , and round with decreasing  $J$ . When  $J$  is high, crystals mostly crystallize at early stage and later growth is few. When  $J$  is low, crystals grow later stage. High An# evolution series can be explain cooled at high  $J$ , and low An# evolution series can be explain cooled at low  $J$  condition. As a result of simulation, it is found that a relatively higher value of  $J$  and vice versa, corresponds to low An# evolution series in size vs. An# trends.



## 火山灰サンプルから見た, 霧島山新燃岳 2011年噴火の推移と2008年以降の先駆的活動

### Precursory activity and evolution of the 2011 eruption of Shinmoe-dake in Kirishima volcano-insights from ash samples

鈴木 由希<sup>1\*</sup>, 長井雅史<sup>2</sup>, 前野深<sup>1</sup>, 安田敦<sup>1</sup>, 外西奈津美<sup>1</sup>, 嶋野岳人<sup>3</sup>, 市原美恵<sup>1</sup>, 金子隆之<sup>1</sup>, 中田節也<sup>1</sup>  
Yuki Suzuki<sup>1\*</sup>, Masashi Nagai<sup>2</sup>, Fukashi Maeno<sup>1</sup>, Atsushi Yasuda<sup>1</sup>, Natsumi Hokanishi<sup>1</sup>, Taketo Shimano<sup>3</sup>, Mie Ichihara<sup>1</sup>, Takayuki Kaneko<sup>1</sup>, Setsuya Nakada<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東大・地震研, <sup>2</sup> 防災科研, <sup>3</sup> 富士常葉大学  
<sup>1</sup>ERI, Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>NIED, <sup>3</sup>Fuji Tokoha Univ.

After a precursory phreatic stage (2008 to 2010), the 2011 Shinmoe-dake eruption entered a phreatomagmatic stage on January 19, a sub-Plinian and lava accumulation stage at the end of January, a vulcanian stage in February-April, and a second phreatomagmatic stage in June-August. We examined ash samples from all the stages (Suzuki et al., in review for EPS, as of February, 2013). Component ratio, bulk composition, and particle size of the samples helped us define the eruptive stages. The juvenile particles were first found in the January 19 sample as pumice (8 vol%) and were consistently present as scoria and pumice particles thereafter (generally ~50 vol%, decreasing in weaker events). The January 19 pumice has water-quench texture. After the lava accumulation, particles of that lava origin came to account for 30-70 vol% of the ash. The second phreatomagmatic stage is proposed because of fine ash and long eruption period. The SiO<sub>2</sub> contents of bulk ash are lower in post-January 19, 2011 eruptions, reflecting lower average SiO<sub>2</sub> contents in 2011 ejecta than in past ejecta. The free-crystal assemblages were two pyroxenes + plagioclase + Fe-Ti oxides until 2010; olivine joined the assemblage in 2011, when juvenile ash was erupted. This change is consistent with the absence or smaller sizes of olivine phenocrysts in past ejecta forming the volcanic edifice.

Aside from these scientific results, we also emphasize the importance of continuous observation of ash samples, for monitoring ongoing eruptive activity and forecasting activity change. As far as we know, ash characterization was the only method which detected the change of eruptive activity before the sub-Plinian event in the 2011 eruption; first detection of juvenile material in the January 19 sample showed that magma was rising to shallow depth. The continuous ash sample observation starting from a period of low activity (August 2008-June 2010 in the Shinmoe-dake 2011 case) helps us detect appearance of juvenile material.

キーワード: 火山灰, 新燃岳, 火山灰バルク組成, 構成比, 粒径分布

Keywords: Volcanic ash, Shinmoe-dake, bulk ash composition, component ratio, particle size distribution

## 鳥海山 1800-1804 年噴火で発生したブルカノ式噴火の記録 Historic records of Vulcanian eruption during 1800-1804 activity of Chokai volcano

林 信太郎<sup>1\*</sup>, 伴 雅雄<sup>2</sup>, 大場 司<sup>3</sup>  
Shintaro Hayashi<sup>1\*</sup>, Masao Ban<sup>2</sup>, Tsukasa Ohba<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 秋田大学・教, <sup>2</sup> 山形大学・理, <sup>3</sup> 秋田大学・工 資

<sup>1</sup>Faculty of Edu. and Human Studies, Akita Univ., <sup>2</sup>Faculty of Sci., Yamagata Univ., <sup>3</sup>Faculty of Eng. and Res. Sci., Akita Univ.

鳥海山の 1800-1804 噴火の古文書を再検討した, その結果,

1) 1801 年 8 月 (享和元年七月) の噴火は, 間欠的な爆発の発生, 高温の火山弾の放出, 空振の発生, マグマ性の噴煙の発生などの特徴を持ち, ブルカノ式噴火であったと考えられる.

2) ブルカノ式噴火を含めたマグマの表面活動は 1801 年 8 月 (享和元年七月) の 2 週間ないし 3 週間継続した可能性が高い.

なお, ブルカノ式噴火にはしばしば火砕流が伴う. したがって, 今後防災対応については若干の見直しが必要であろう.

キーワード: ブルカノ式噴火, 鳥海火山, 古文書

Keywords: Vulcanian eruption, Chokai volcano, Historic record

## 有珠山の噴火シナリオの作成 Eruption scenario of Usu volcano, Japan

中田 節也<sup>1\*</sup>, 鍵山 恒臣<sup>2</sup>, 中川 光弘<sup>3</sup>, 大島 弘光<sup>3</sup>, 津久井 雅志<sup>4</sup>

Setsuya Nakada<sup>1\*</sup>, Tsuneomi Kagiya<sup>2</sup>, Mitsuhiro Nakagawa<sup>3</sup>, hiromitsu oshima<sup>3</sup>, TSUKUI, Masashi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 京都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>4</sup> 千葉大学大学院理学研究科

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, <sup>2</sup>Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>3</sup>Graduate School of Science, Hokkaido University, <sup>4</sup>Graduate School of Science, Chiba University

平成 25 年度まで実施中の地震及び火山噴火予知のための観測研究計画においては、社会への研究のアウトプットとして噴火シナリオの試作成を位置づけ、噴火中の火山の予測に試行してきた。これまで三宅島、桜島、新燃岳について噴火シナリオを試作し、桜島、新燃岳については、その活動推移予測に使用を試みた。平成 24 年度は有珠山について噴火シナリオを試作した。これまでの噴火履歴、岩石学的解析、古文書による噴火履歴解読、過去 4 回の地球物理観測とその解析などの研究成果に基づいた。

有珠山は 7? 8 千年前の山体崩壊の後に、1663 年から噴火活動を再開した。それ以降、山頂で 5 回、山腹で 3 回の噴火をした。前者はプリニー式噴火に始まり、後者は水蒸気からマグマ水蒸気爆発で開始した。これらの噴火は古文書に記録されており、20 世紀以降は地球物理学的な観測がなされている。噴火は統計上 30+/- 4 年おきに噴火している。小規模である山腹噴火を除いて、噴火の規模とその頻度には対数座標で良い逆相関がある。地震の前兆現象は噴火場所に限らず噴火前の数日間であることが多い。山頂噴火は地震活動が加速して起こり、山腹噴火は地震活動のボクを過ぎてから起こるといった特徴がある。噴火場所に限らず、1663 年を除いて、噴火はいつも溶岩ドームか潜在ドームを作って終わっている。山腹噴火を除いて、噴出量と噴火の継続時間には負の相関がある。噴火毎の噴出量は時間とともに減少して来ており、マグマの組成はより未分化になってきている (SiO<sub>2</sub> で 1663 年の 75% から 2000 年の 69%)。深部の苦鉄質マグマが浅所の成層マグマ溜まりに注入するというマグマ供給の 3 サイクルがこれまでにあったと提案されている。

今後、山体崩壊が起こる確率は約 1% であり、山頂噴火と山腹噴火の確率はそれぞれ 30 と 50% である。山頂噴火は約 70% の確率でプリニー式噴火で始まり、山腹噴火は 70% の確率で水蒸気爆発で始まる。しかし、これは主に最近 300 年間のデータによっているため、単なる目安でしかないかもしれない。三宅島では約 3000 年ぶりの山頂陥没噴火、普賢岳では約 5000 年ぶりの火砕流噴火が起きている。過去 2 回の噴火では山の北斜面の崩壊を暗示する断層系が動いているが観測された。過去の噴火記録だけでは頼らない新しい噴火シナリオの準備が必要であろう。

キーワード: 噴火シナリオ, 噴火事象分岐図, 有珠火山

Keywords: Eruption Scenario, Event tree, Usu Volcano

## 白頭山噴火による中国吉林省赤松原発への火山リスクについて

### On the volcanic risk to the Chisong nuclear power plant in China by probable eruption of the Baitoushan volcano

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

Hiromitsu Taniguchi<sup>1\*</sup>, Yoshiaki Himeno<sup>2</sup>

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

<sup>1</sup>Tohoku University, <sup>2</sup>Tokyo Institute of Technology

前回の講演では時間的制約により話しを省略した赤松(靖宇)原発への火山リスクについて、今回はこの点に焦点を絞って話しを行う。

2002年に始まった白頭山における地震の活発化や山頂の隆起は2005年には終息した。それから6年後の3月11日、東北地方太平洋沖地震が発生し、日本国内の火山と同様に白頭山においても噴火の心配がなされた。たとえば北朝鮮においては、2011年8月29日に「地震・火山被害防止及び救助法」が新たにつくられた。詳細な項目の規定と同時に諸外国との交流と協調の必要性が率直にうたわれ、それだけ現実味が感じられた。

一方、中国では白頭山から西側に約100km離れた靖宇県に原発の建設計画が進められていた。計画は東北地方太平洋沖地震によって中断したが、現在では再開し、建設が進められている。2016年には稼働予定とのことである。実際に白頭山で噴火が発生した場合、噴火そのものばかりでなく、原発の存在による新たなリスクが生じるのではないだろうか？福島原発の過酷事故に苦しむ我々としては、対策のための十分なリスクアセスメントが必要であると考え。本講演では赤松原発、可能性のある火山リスク、その回避策について話しを行う。

赤松原発は吉林省初の原発であり、1000MW級発電ユニット6基から構成されている。発電ユニットは第3+世代のAP1000(米国Westinghouse社製)であり、福島原発などに比べてより安全な新しい設計になっている。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水源として用いる。ユニットと白山湖との標高差は約100mである。もし噴火が発生するならば、地形的特徴からみて、白頭山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。岩屑雪崩れの直接的な到達は考えにくい、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。湖との標高差のためラハールが直接ユニットを破壊することは考えにくい。しかし冷却用の取水装置はダメージを被る可能性は高い。赤松に設置される予定の原発AP1000は、取水できなくても頂部の冷却水タンクからの給水によって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3+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、季節(夏期?)によっては、灰神楽に由来する降灰を含めて十分な安全対策をとる必要がある。講演ではその他、可能性のあるリスクについてリストアップし、それへの対応策を論ずる。

もし赤松原発に過酷事故が発生した場合、まず中朝、そして日本への放射性物質の拡散による健康被害が考えられる。北朝鮮で影響を受けうる東北地域の両江道など道や市の総人口は約630万人である。赤松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。そのため過酷事故の経緯によっては、より深刻な被害が中露両国の流域住民におよぶ可能性がある。現地における火山噴出物調査の徹底的な実施と安全対策の十分な検討が、さらに、北朝鮮を含めた東北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, 火山リスク, 原子力発電所, 噴火

Keywords: Baitoushan volcano, volcanic risk, nuclear power plant, eruption

## 十勝岳坑道に設置されている連続地殻変動観測装置の基本的特性 Basic Characteristics of Crustal Deformation Measurement in a Vault of the Tokachi - dake Volcano, Hokkaido, Japan

村上亮<sup>1\*</sup>, 橋本 武志<sup>1</sup>, 奥山 哲<sup>1</sup>, 森 済<sup>1</sup>, 青山 裕<sup>1</sup>, 鈴木敦生<sup>1</sup>, 山口照寛<sup>1</sup>, 岡山 宗夫<sup>1</sup>

Makoto Murakami<sup>1\*</sup>, Takeshi Hashimoto<sup>1</sup>, Satoshi Okuyama<sup>1</sup>, Hitoshi, Y. Mori<sup>1</sup>, Hiroshi Aoyama<sup>1</sup>, Atsuo Suzuki<sup>1</sup>, Teruhiro Yamaguchi<sup>1</sup>, Muneo Okayama<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>Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University

十勝岳火山は、北海道中部に位置し、道内でも有数の活動的火山である。その活動は、極めて活発で、最近の100年間に於いても、頻りに噴火しているが、1926年、1962年および1988年には、大規模なマグマ噴火が発生した。特に、1926年噴火においては、融雪型泥流が発生し、144名の犠牲者を出している。十勝岳の活動の特徴は、主要な噴火の数年前から、各種の火山活動が活発化した後に噴火を迎える場合が多いことである。また、最近ではほぼ30年毎に噴火を繰り返しており、噴火休止間隔が比較的短い。

1988年噴火からは、最近の噴火の繰り返し周期にほぼ相当する25年が経過しているうえ、最近では、全体としての火山活動の活発化の兆しと考えられる現象も散見されている。たとえば、2012年6月末の大正火口の火口壁の発光現象や、2013年2月2日のM2.8(JMA 暫定値)の地震を含む群発地震活動の散発的な増加は、次の噴火へ向けての火山活動の活発化が既に始まっていることの反映である可能性がある。また、2006年以来の象徴を繰り返しながら進行中である62-II火口周辺の局所的な膨張も、そのような一連の流れの一環として捉えなおすべき現象であるかもしれない。

十勝岳においては主要な噴火の前に、各種の前兆的な現象が出現する可能性があるため、十分な空間密度で監視網を構築してより確実に活発化の兆しを検知し、噴火予知の確実性を高めることが期待される。防災への貢献を目指すためには、リアルタイムデータ転送の実現も望ましい。

しかし、標高が高く寒冷な北海道内の立地のため、リアルタイム監視網の構築は容易ではない。特に、冬季中に厚く結氷する氷雪から保護するため、観測装置の設置には細心の注意が必要である。そのような危険を回避するためには、坑道観測が有利であり、十勝岳においては、1985年に火山から南西の斜面の溶岩を貫いて掘削した横穴坑道内で傾斜および伸縮観測が実施され、データはマイクロ波通信によるテレメトリで北大に転送されている。一般に、連続地殻変動観測は、降水など各種の擾乱要因によって誤差が生じることが多い。有効な火山監視を行うためには、火山活動が活発化する前に、誤差要因を洗い出し、観測の信頼性についての評価を確定しておくことが重要である。以上を目的として、最近数年間の傾斜および線形歪データを分析した。かなり規則的な年周成分と長周期のトレンドを除くと、データは、基本的に安定している。明らかに降雨との関連が認められる成分は認められなかった。一方、冬季に限り、特徴的なステップが発生していることが見出された。坑道の周囲に厚く積もった氷雪の大規模な運動によって荷重が変化し、地殻変動が発生している可能性があるが、特定にはさらに詳細な検討が必要である。講演では、理論潮汐との比較などこの坑道における地殻変動観測の安定性についてさらに詳細に議論する。

キーワード: 火山, 地殻変動, 連続観測, 傾斜計, 歪計, 十勝岳火山

Keywords: Volcano, Crustal Deformation, Monitoring, Tiltmeter, Strain Gauge, Tokachi-dake Volcano

## 箱根火山における群発地震活動と地殻歪

### Earthquake swarm activities and dilatational crustal deformation in Hakone volcano

原田 昌武<sup>1\*</sup>, 宮岡 一樹<sup>1</sup>, 行竹 洋平<sup>1</sup>, 小林 昭夫<sup>2</sup>, 本多 亮<sup>1</sup>, 板寺 一洋<sup>1</sup>, 伊東 博<sup>1</sup>, 明田川 保<sup>3</sup>, 吉田 明夫<sup>1</sup>

Masatake Harada<sup>1\*</sup>, Kazuki Miyaoka<sup>1</sup>, Yohei Yukutake<sup>1</sup>, Akio Kobayashi<sup>2</sup>, Ryou Honda<sup>1</sup>, Kazuhiro Itadera<sup>1</sup>, Hiroshi Ito<sup>1</sup>, Tamotsu Aketagawa<sup>3</sup>, Akio Yoshida<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 神奈川県温泉地学研究所, <sup>2</sup> 気象研究所, <sup>3</sup> 気象庁

<sup>1</sup>Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, <sup>2</sup>Meteorological Research Institute, JMA, <sup>3</sup>Japan Meteorological Agency

温泉地学研究所では1968年から、フィリピン海プレート北端部に位置する箱根火山において地震観測を実施している。1989年にテレメータ化を行って以後では最大級の群発地震活動が2001年6月頃から約半年にわたって観測された。その後、2006年、2008年から2009年にかけても規模の大きな群発地震が発生した。2011年東北地方太平洋沖地震の直後には、同地震の表面波による動的なトリガリングと断層運動に伴う静的なクーロン破壊関数の増大を受けて一時的に地震活動が活発化した。2001年以降に何度か見られた火山性の群発地震活動とは異なり、地震発生数はべき乗で減衰して2カ月程度で終息した(Yukutake et al., 2011; 原田他, 2012)。この群発地震の後、2012年12月までは、群発地震の起きていない通常の状態(ここではバックグラウンド活動と呼ぶことにする)と比べてもやや低調な地震活動であった。しかし、2013年1月早々から群発的な傾向の活動が始まり、温泉地学研究所の傾斜計や気象庁の体積歪計、また国土地理院によるGNSS観測でも火山性の地殻変動が捉えられている。2013年2月8日現在、傾斜変動量は2001年群発活動の時の1/5程度ではあるものの傾斜方向は概ね一致しており、地震活動の経過についても両者の間で類似性が見られる。なお、2013年1月以降の群発地震活動については行竹他(2013)が、傾斜計による観測結果及び変動源の推定については宮岡他(2013)が本大会で発表する。

2001年や2006年、2008年から2009年のこれまでの3回の箱根群発地震の際には、箱根火山周辺で顕著な膨張歪の生じたことがGPS観測データから推定されている(山体膨張)。興味深いのは地震活動をクラスター的な活動とバックグラウンド活動に分離したとき(デクラスタリング)、膨張歪がクラスター的な活動にやや先行する傾向が見られることである(原田他, 2011)。2013年1月に始まった群発地震活動についても、国土地理院によるGNSS観測データの一部には、群発地震が発生する以前の12月頃から、ごくわずかながら基線長の変化が見えている。

本発表では、2013年1月以降進行している群発地震活動を含めて、箱根火山でこれまでに発生した4回の火山性の群発地震活動と膨張歪の時間的推移を比較し、深部の膨張源と浅部で発生する群発地震の相互関係を考察する。

キーワード: 箱根火山, 群発地震, デクラスタリング, 地殻変動, 予測

Keywords: Hakone volcano, earthquake swarm, de-cluster, crustal deformation, forecasting

## 地震動および地盤変動データを用いた火山灰放出率評価のためのハイブリッド手法 Hybrid method to estimate discharge rate of volcanic ash by using seismic and ground deformation data

井口 正人<sup>1\*</sup>Masato Iguchi<sup>1\*</sup><sup>1</sup> 京大防災研<sup>1</sup> DPRI, Kyoto Univ.

火山噴火による火山灰の放出・拡散は航空機の運航等に重大な支障を与える場合がある。我が国では、空港や航空路が活火山に近接しており、その拡散域の早期把握は極めて重要な問題である。大気モデルに基づく火山灰の移流拡散モデルを用いれば、その拡散域を求めることができるので、入力パラメータとしての火山灰噴出率とそれに依存する噴煙到達高度をリアルタイムで把握することが必要となる。目視、人工衛星、レーダー等により火山灰の拡散を把握することができるが、最もリアルタイム性に優れるのは火山噴火に伴い発生する地震動と地盤変動の観測である。本稿では、地震動と地盤変動データを用いた火山灰放出率評価方法について述べる。

桜島の昭和火口の噴火活動は2006年6月に再開し、2008年から爆発的となった後、2009年秋ごろから爆発回数が急増している。爆発的噴火発生の前には火山体が膨張するひずみ変化、爆発が発生すると収縮するひずみ変化が観測される。この地盤変動を励起する圧力源は火口直下の1.5km以浅と浅い。個々の爆発に伴う圧力源の収縮体積変化量と火山灰放出量（大隅河川国道事務所資料）の間には正の相関があり、圧力源の体積変化量（ $m^3$ ）に対する火山灰放出量（トン）の間の比例係数はおよそ5である。

一方、1か月間の長期で見ると両者の間には相関はあるが、月によって大きく外れる場合がある。これは、火山灰の放出は爆発的噴火によってのみ起こるわけではなく、非爆発的噴火による火山灰放出の寄与が月によっては70%と大きいためである（田島・他、2012）。噴出率の大きい爆発的噴火は数分以内の短時間で終わることが多いが、非爆発的噴火は噴出率が小さくとも、数時間に及ぶことも多く、積算量としての火山灰量に大きく影響する。非爆発的噴火は顕著な地盤変動はほとんど伴わないが、火山性微動の発生を伴う。火山性微動の2-3Hzの周波数帯のエネルギーが最も火山灰放出量との相関関係が良く、火山性微動は火山灰放出量の見積りに利用することが可能である。一方、爆発的噴火に伴う爆発地震のエネルギーは瞬間的には大きいですが、振動エネルギー全体に占める割合は小さく、地震動エネルギーだけから火山灰放出量を見積もることは適当ではない。

観測される火山灰量は、爆発的噴火と非爆発的噴火によって放出されたものであり、両者を足し合わせる必要がある。2008年から2011年までの月毎の爆発回数（ $n$ ）および非爆発的噴火に伴う火山性微動エネルギー（ $A$ : 2-3Hz）と火山灰放出量（ $W$ ）の間には以下の関係を認めることができる。

$$W = aA + bn + c$$

$$a = 5 \times 10^4, b = 3 \times 10^3, c = -8 \times 10^4$$

ここで $c$ は脈動などの常時微動の影響を考慮したものである。また、係数 $b$ が $3 \times 10^3$ であることは爆発の平均火山灰放出量が3000トンであることを意味する。

さらに、月毎の爆発回数かわりに爆発に伴う地盤変動量の月毎の積算値（ $V$ ）を用いることにより火山灰放出量は以下のように求めることができる。

$$W = aA + bV + c$$

$$a = 5 \times 10^4, b = 3.3, c = -11.3 \times 10^4$$

キーワード: 桜島, 火山灰, 地震動, 地盤変動

Keywords: Sakurajima, Volcanic ash, volcanic tremor, ground deformation

## 水準測量によって測定された桜島火山周辺域の地盤上下変動 (2012年12月まで) Vertical ground deformation in and around Sakurajima volcano measured by precise leveling survey (until Dec. 2012)

山本 圭吾<sup>1\*</sup>, 園田 忠臣<sup>1</sup>, 高山 鐵朗<sup>1</sup>, 市川 信夫<sup>1</sup>, 大倉 敬宏<sup>2</sup>, 横尾 亮彦<sup>2</sup>, 吉川 慎<sup>2</sup>, 井上 寛之<sup>2</sup>, 諏訪 博之<sup>2</sup>, 松島 健<sup>3</sup>, 藤田 詩織<sup>3</sup>, 神園 めぐみ<sup>3</sup>

Keigo Yamamoto<sup>1\*</sup>, SONODA, Tadaomi<sup>1</sup>, TAKAYAMA, Tetsuro<sup>1</sup>, ICHIKAWA, Nobuo<sup>1</sup>, Takahiro Ohkura<sup>2</sup>, Akihiko Yokoo<sup>2</sup>, YOSHIKAWA, Shin<sup>2</sup>, INOUE, Hiroyuki<sup>2</sup>, SUWA, Hiroyuki<sup>2</sup>, Takeshi Matsushima<sup>3</sup>, FUJITA, Shiori<sup>3</sup>, KAMIZONO, Megumi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所, <sup>2</sup> 京都大学大学院理学研究科, <sup>3</sup> 九州大学大学院理学研究院

<sup>1</sup> Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, <sup>2</sup> Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>3</sup> Faculty of Sciences, Kyushu University

桜島火山においては、2006年6月から始まった昭和火口における噴火活動が近年激化している(井口・他, 2011)。平成21年度より開始された「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」における課題「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」の一環として、桜島火山周辺において水準測量を行ってきたが、これらに引き続き2012年11月及び12月に一等水準測量の繰返し観測を実施した。本講演では、この水準測量の結果について報告し、最新の桜島火山の地盤上下変動について議論する。

2012年11月・12月に水準測量を実施した路線は、桜島内では海岸線に沿って桜島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及び北部山腹の北岳路線、また桜島外ではBM.2469(旧鹿児島県庁)からBM.2474及びBM.J(大崎鼻)間の鹿児島湾西岸路線であり、総延長は約67kmである。これらの路線を、大学合同で3測量班を構成し2012年11月6日~16日及び12月3日~10日の日程で測量に当たった。測量方法は、各水準点間の往復測量で、その測量誤差は一等水準測量に従いその許容誤差以内となるように実施した。

桜島内の測量路線については、これまで行われてきた水準測量と同様に、桜島西岸の水準点S.17を不動点(基準)とし、各水準点の比高値を前回の2011年11月に行われた測量結果と比較することで2011年11月から2012年11月・12月の期間における地盤上下変動量を計算した。この結果から、桜島北部の地盤の隆起が確認された。この期間における最大の隆起量は、桜島北部の水準点S.28において測定された8.4mmであった。桜島北部の地盤においては、1993年以降の山頂噴火活動の静穏化に伴い、始良カルデラ地下のマグマ溜りにおける増圧を反映すると考えられる地盤隆起が継続して観測されてきた。一方で2009年以降、昭和火口における噴火活動が激化しそれに伴ってマグマの放出量も増加傾向にあるなか、2010年4月~2011年11月のごく最近の期間の水準測量データにおいては顕著な地盤隆起は見られていなかった(山本・他, 2012)。その後沈降に転ずるようなことはなく再び桜島北部における地盤隆起が進行したことになる。桜島北部付近の2012年11月・12月の時点における地盤隆起量は、1970年代および1980年代の活発な山頂噴火活動が開始した1973年頃の状態を回復し更に隆起が継続した状態となっている。

茂木モデルに基づき、桜島内における地盤上下変動量データから圧力源の位置を求めると、始良カルデラ中央部地下約9.6kmの深さに増圧源のあることが推定される。この1圧力源モデルによって、観測された上下変動量はよく説明されている。

桜島外の鹿児島湾西岸路線における水準測量は、2009年11月の測量から3年ぶりの実施であった。BM.2469を基準とし、始良カルデラ地下のマグマ溜りにより近いBM.2474の比高を計算し2009年の結果と比較した結果、この3年間に約14mm地盤の隆起が進行していることが確認された。

これらの結果は、昭和火口における噴火活動が激化している現在も、始良カルデラ地下のマグマ溜りにおけるマグマの貯留が進行していることを示している。

キーワード: 桜島火山, 始良カルデラ, 精密水準測量, 地盤上下変動

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



## 2009年11月以降の桜島昭和火口と南岳火口の火山ガスHCl/SO<sub>2</sub>比の推移 Temporal variation of HCl/SO<sub>2</sub> ratios in the volcanic plumes of Showa and Minamidake craters, Sakurajima volcano

森 俊哉<sup>1\*</sup>  
Toshiya Mori<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科  
<sup>1</sup> Graduate School of Sci., The Univ. of Tokyo

After the reactivation of Showa crater at Sakurajima volcano in June 2006, the volcano has been emitting volcanic gas from two craters, Minamidake and Showa craters. Due to the difficulty of volcanic gas sampling at this volcano, remote measurement is effective for monitoring volcanic gas composition. Notsu and Mori (2010) reported that HCl/SO<sub>2</sub> ratio of the volcanic plume of Minamidake crater was 0.24-0.48 between 1999 and 2001, This presentation will report the temporal variation of HCl/SO<sub>2</sub> ratios of volcanic plumes of the two craters observed using remote FT-IR measurements.

The observations were carried out using a FT-IR spectrometer of Air Monitoring System (MIDAC Inc.). This FT-IR spectrometer equipped with a liquid Nitrogen cooled InSb detector has spectral resolution of 0.5 cm<sup>-1</sup>. A movable mirror installed in front of the entrance window was adjusted to introduce the sunlight into the spectrometer. For the measurements, solar occultation method (Francis *et al.*, 1998) using the sun as an infrared light source was used due to the lack of infrared source on the flank of the volcano.

Since the plumes from the two craters mix as they flow, it is impossible to separately measure the HCl/SO<sub>2</sub> ratios for the respective craters by measuring the plume a few km away from the volcano. In order to separately measure the ratios, plume just above one of the craters was aimed using the sun going down behind the crater.

The FT-IR observations revealed that two craters have different HCl/SO<sub>2</sub> ratios. The HCl/SO<sub>2</sub> ratio of Showa crater is relatively stable ranging 0.1-0.18 for the last three years. In contrast, the ratio of Minamidake crater varied between 0.13 and >0.3 and is usually higher than that of Showa crater except for the end of 2010. There is no noticeable correlation between the ratios and the SO<sub>2</sub> flux of the volcano. In two of the observations, we were able to separately measure the ratios of two vents in Minamidake crater (A and B craters) and found that they also have different ratios (the ratio of A crater is higher than the ratio of B crater). Some part of the large variation of Minamidake's ratio may be explained by changes in relative degassing strength of the two vents.

キーワード: 火山ガス, 桜島, 遠隔測定  
Keywords: volcanic gas, Sakurajima, remote measurement

## 富士山周辺の浅部地殻におけるS波スプリッティング解析 Shear wave splitting measurements and shallow crustal structure of Mt. Fuji region

蘭 幸太郎<sup>1\*</sup>, サベジ マーサ<sup>2</sup>, 大湊 隆雄<sup>3</sup>, 青木 陽介<sup>3</sup>  
Kohtaro Araragi<sup>1\*</sup>, SAVAGE, Martha<sup>2</sup>, Takao Ohminato<sup>3</sup>, Yosuke Aoki<sup>3</sup>

<sup>1</sup> オレゴン大学地質科学科, <sup>2</sup> ウェリントン・ヴィクトリア大学地球物理学科, <sup>3</sup> 東京大学地震学研究所

<sup>1</sup>University of Oregon, Department of Geological Sciences, <sup>2</sup>Victoria University of Wellington, Institute of Geophysics, <sup>3</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

巨大地震以後、周辺地域の火山活動に変化があることはよく知られている。2011年以降、富士山周辺は東北地方太平洋沖地震に伴う応力変化の直接の影響を受けている可能性が高い。さらに、富士山周辺ではMj6.4の余震が発生しており、複雑な応力状態におかれていると考えられる。富士山は最後の大規模噴火から時間が経過しており、活動の活発化が見込まれていることから、今後は活動のより定量的な解析が必要と考えられる。

本研究では地震学的異方性を解析することで富士山周辺の地下構造及び応力状態を明らかにすることを旨とした。解析にはSavage et al. (2010)の手法を適用し、富士山周辺のS波スプリッティング解析を行った。波形データは東大地震研の観測点及び防災科研のHi-netから回収されたものを用い、解析期間は2009-2011年とした。

東北地方太平洋沖地震以前の富士山周辺の地震学的異方性を把握するため2009年のS波スプリッティングを測定したところ、地下0-20kmの地震について、北向きのS波の偏向方向を示す観測点が多く見られた。本地域の広域の応力場は北西-南東方向であるため、上部地殻の異方性は広域の応力場と隔たりがあることになる。さらに、2009年以降の富士山周辺のS波スプリッティングについて、イベント数が激増した2011年の東北地方太平洋沖地震及びM6.4の余震の直後を除き、地下0-20kmのS波の偏向方向のトレンドは、2009年から大きな変化は見られなかった。東北地方太平洋沖地震以降は検測されたイベント数が増加していた反面、明確なS波スプリッティングが観測された地震自体は、イベント数全体の増加に比べると僅かであった。富士山周辺では2006年以降の膨張歪の変化及び東北地方太平洋沖前後における応力変化の可能性が報告されている。本研究においてS波スプリッティングのS波の偏向方向及び到達時間差において時間変化が認められなかった事は、先行研究における物理量の変化が特に富士山周辺の地下0-20km程度の地殻の応力状態に与える影響が現段階では限定的であることを示唆する。また、深部(>20km)からの地震によるS波スプリッティングはイベント数がそれほど多く無いこともあり、明瞭なトレンドを得ることが難しかった。今後はメカニズム解及び地震波速度構造等と比較検討することで、富士山周辺の地震学的異方性と応力場の関係について明らかに出来ると考えられる。

キーワード: 富士山, S波スプリッティング, 火山観測

Keywords: Mt. Fuji, Shear wave splitting, Volcano monitoring

## ブルカノ式噴火に先行する火道浅部の描像

### A sketch in a shallow part of the conduit preceding a Vulcanian eruption

武尾 実<sup>1\*</sup>, 前原祐樹<sup>2</sup>, 市原美恵<sup>1</sup>, 大湊隆雄<sup>1</sup>, 鎌田林太郎<sup>1</sup>, 及川 純<sup>1</sup>

Minoru Takeo<sup>1\*</sup>, MAEHARA Yuki<sup>2</sup>, ICHIHARA Mie<sup>1</sup>, OHMINATO Takao<sup>1</sup>, KAMATA Rintaro<sup>1</sup>, OIKAWA Jun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> (株) シュランベルジュ

<sup>1</sup> Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2</sup> Schlumberger K.K.

The sub-Plinian and the Vulcanian eruptions at the Shinmoe-dake volcano were preceded by inflations at shallow depths near the summit. The inflation-deflation cycles were also recorded during the magma-effusive stage, with a typical period of one hour, synchronized with volcanic tremors or long-period events. Almost all Vulcanian eruptions were preceded by trapezoidal inflations, whose durations systematically lengthened as time progressed, and were followed by various time sequences of tilt motions, which became increasingly more complicated throughout the frequent Vulcanian eruptions. In spite of the complicated time sequences of the preceding inflations, we have found clear linearity with a constant gradient of 0.45 between the logarithm of the preceding durations versus elapsed time for each sub-stage.

During the magma-effusive stage, the conduit must have been filled up by magma, which was more degassed than in the sub-Plinian stage, including pores or porous structures. Therefore, it seems to be probable that certain parts of the conduit interior were occupied by poroelastic material, and that the strength of the conduit interior was heterogeneous. The preceding inflation should begin at this instant, gradually increasing in proportion with pressure buildup. When the pressure exceeded a yield value, the gas pocket area should be deformed plastically, causing a slight leakage of volcanic gas to the upper side in the conduit, and creating a volcanic glow and a slight deflation and/or a phreatomagmatic eruption. On the contrary, the lower side of the gas pocket area acted as a porous media, defusing the high-pressured gas to the deeper part in the conduit. This caused the deepening of the centroidal source depth approaching the eruption. During this time, the pressure confined in a closed strong magma frame must increase without any dynamic affect on the outside. Assuming that a Vulcanian eruption is induced by a catastrophic rupture of the closed magma frame in a conduit due to magma degassing overpressure, the clear linear relation could be interpreted that the degassing from the magma in the conduit declines exponentially with time. In conclusion, the observations can be consistently explained based on the assumption that a Vulcanian eruption is induced by a catastrophic rupture of the closed magma frame due to overpressure caused by magma degassing, and the degassing from magma declines exponentially with time. To sum up the above discussion, we propose a sketch in a shallow part of a conduit preceding a Vulcanian eruption.

キーワード: ブルカノ式噴火, 傾斜変動, 火道内部プロセス

Keywords: Vulcanian eruption, Tilt motion, Physical process in a conduit

## 2011年霧島新燃岳噴火の溶岩流出時における傾斜変動と微動活動 Tilt motion and volcanic tremor during lava-effusive stage in the 2011 Shinome-dake eruption

鎌田 林太郎<sup>1\*</sup>, 武尾 実<sup>1</sup>  
Rintaro Kamata<sup>1\*</sup>, Takeo Minoru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東大地震研

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

### はじめに

火山性微動や山体膨張収縮を伴う傾斜変動を観測することは、マグマの挙動を考える上で重要視されている。火口近傍で得られた傾斜変動は、火道内の圧力変動を示しており、火口近傍で得られた火山性微動は、火山性流体により励起されたと考えられている。これまでに、多くの火山で噴火に先行する傾斜変動がとらえられていて、また、火山性微動の周波数構造についても数多く研究されてきた。本研究では、2011年霧島新燃岳噴火の溶岩流出時の火山性微動・傾斜変動のデータを用い、その特徴を明らかにした。

### 新燃岳の活動と用いたデータ

2011年1月に噴火した新燃岳では、1月26日に最初の準プリニー式噴火が起こり、以降爆発的噴火が続いた。1月28日からは火口内に溶岩が流出し始め、2月に入るとブルカノ式噴火が複数回起こった。本研究では、この一連の流れの中の溶岩流出時に絞って議論を進めていく。溶岩流出時には、約1時間の周期を持つ傾斜変動が観測されている (Maehara 2012)。また、傾斜変動のサイクルと同期して、火山性微動が発生している。傾斜変動が閾値を下回るときに微動が発生することも判明している。この傾斜変動と微動の同期は、特にマグマ流出時の後半で顕著となっている。

### 火山性微動の周波数構造解析

収縮時と膨張時で、周波数構造の違いが見られた。2Hz以下の周波数領域においては、収縮時には2つの周波数(1Hzと1.5Hz)で振幅が卓越したのに対し、膨張時には1.2Hzで振幅が卓越した。2Hz以上の周波数領域においては、振幅を最大振幅で規格化したとき、膨張時には収縮時に比べ振幅が小さくなることが判明した。

### 傾斜変動比を用いた圧力源の推定

傾斜変動を引き起こす圧力源の深さによって、異なる2点の傾斜変動量の比は変化する。Maeda et al. 2011の有限差分法のコードを用い、震央を火口中心に、鉛直軸まわりの円筒型の圧力変化を表す点震源に等価な地震モーメントテンソルを仮定し、計算により傾斜変動比を求めた。計算結果と観測により得られた傾斜変動比を比較することにより、圧力源の深さを推定した。圧力源の中心を海拔600mの位置に仮定した場合、250mの広がりを持つ震源で、観測で得られた傾斜変動比を説明できることがわかった。また、推定された位置に圧力源が存在すると仮定して、観測値に匹敵する傾斜変動を起こす圧力変化  $P$  を推定した。圧力変化  $P$  が大きく見積もって数MPaで観測値に匹敵する傾斜変動を起こすことが判明した。

キーワード: 溶岩流出, 傾斜変動, 火山性微動

Keywords: lava effusion, tilt, tremor

## 地震計アレイによる霧島山新燃岳周辺で発生した火山性微動の発生源の時空間変化 Spatio-temporal variations of the volcanic tremors on Kirishima volcano estimated by dense seismic array

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>

Manami Nakamoto<sup>1\*</sup>, Satoshi Matsumoto<sup>2</sup>, Yoshiko Yamanaka<sup>3</sup>, Hiroshi Shimizu<sup>2</sup>, Haruhisa Nakamichi<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 Univ., <sup>2</sup>SEVO, Kyushu Univ., <sup>3</sup>EVRC, Nagoya Univ.

霧島山(新燃岳)は2011年1月から活発な噴火活動が始まった。九州大学では準プリニー式噴火直後の1月28日に、新燃岳火口から南西に約3km離れた新湯温泉周辺に25台の3成分地震計を設置しアレイ観測(九大アレイ)を開始した。また、名古屋大学は2月1日に火口から東方向に約5km離れた夷守台に16点の3成分地震計(名大アレイ)を設置し、同時に2つの地震計アレイでデータを収録した。複数の地震計アレイについて地震波の到来方向がわかれば、波源の位置を推定することができる。本研究では九大アレイと名大アレイのデータを用いて火山性微動の微動源を推定し、その時間変化を検出することで微動と火山活動との関連性を探ることを目的とする。

2011年2月2日, 3日には振幅の大きな微動が観測され, このうち2月2日20時43分から約40分間継続した微動が最も長く顕著であった。これらの震動にMUSICスペクトラム解析を適用し震動の発生源の推定を試みた。微動の周波数成分は約1,2,3,4Hzにピークをもち, このうち最も振幅の高かった1.5Hz-2.5Hz帯に狭帯域フィルターをかけ解析に用いた。4秒のウィンドウを2秒ずつ移動させながら微動の到来方向とスローネスを求め, 各ウィンドウに対して微動源の空間尤度分布を得た。九大アレイと名大アレイそれぞれのデータに対して微動源の空間尤度分布を求め, それらを組み合わせて微動源の位置を推定した。空間分布を求めるにあたっては地震波速度一定の均質媒質を仮定している。

微動の到来方向から微動の大部分は新燃岳火口方向から到来していたが, 到来方向やスローネスは微動が継続している間は一定ではなく変化していた。スローネスが大きい微動の発生源は新燃岳火口の浅部に推定され, 比較的長い継続時間を持っていた。また, 夷守台周辺に推定された微動源も存在したが, これは名大アレイにおいてスローネスが小さいことが影響しており, 微動源を求める時に均質媒質を仮定したことが原因と考えられる。さらに, 短い継続時間ではあるが火口から北西に約3km離れた大浪池北西部を発生源とする微動も確認した。これはMatsumoto et al. (in press)で指摘されている時間と一致している。しかし本研究で求めた微動源は地殻変動から推定されている圧力源よりも南東に位置していた。マグマ供給や噴火プロセスとの関連を調べるにはより精確な微動源の推定が必要であり, 今後より現実に近い地震波速度構造を用いて再検討する予定である。

キーワード: 新燃岳, 火山性微動

Keywords: Shinmoedake, volcanic tremor

## エンベロープ相関を利用した三宅島B型地震の震源決定

## Hypocenter determination of B-type earthquakes at Miyakejima volcano using the envelope correlation method

内田 東<sup>1\*</sup>, 西村 太志<sup>1</sup>, 中原 恒<sup>1</sup>, 山里 平<sup>2</sup>, 藤田 英輔<sup>3</sup>Higashi Uchida<sup>1\*</sup>, Takeshi Nishimura<sup>1</sup>, Hisashi Nakahara<sup>1</sup>, Hitoshi Yamasato<sup>2</sup>, Eisuke Fujita<sup>3</sup><sup>1</sup> 東北大院・理・地球物理, <sup>2</sup> 気象庁地震火山部, <sup>3</sup> 防災科学技術研究所<sup>1</sup> Geophys. Sci. Tohoku Univ., <sup>2</sup> Seismol. and Volcanol. Dep., JMA, <sup>3</sup> NIED

2000年噴火以降、活発な火山ガスの放出活動を続ける三宅島では、多数の微小地震が観測されている。これらのほとんどはP波・S波の立ち上がり不明瞭なB型地震で、目視での到達時刻読み取りによる震源決定が困難である。そこで、内田・他(2012)は2010年8月から2011年4月に気象庁によって観測された全1049のB型地震を解析し、その18%にあたる184の地震を、4つの相似地震グループのいずれかに分類した。そして、互いに相似な地震波形をスタックすることで信号対ノイズ比を向上させ、P波・S波読みとりによる震源決定を行った。その結果、いずれのグループも、山頂カルデラ内部南側の海面下1.5kmから0.5kmに震源が推定された。しかしながら、残り約80%のB型地震の震源は未だに求められていない。

そこで本研究では、エンベロープの相互相関から得られる観測点間の走時差を利用し、三宅島B型地震の震源を推定する。このエンベロープ相関法は、西南日本のプレート境界で発生する非火山性低周波微動の震源を推定するために、Obara(2002)で提案された。本研究では、まずB型地震の観測速度記録に4-8 Hzのバンドパスフィルターをかけ、1秒間の平滑化ウィンドウを用いて観測点毎に3成分合成RMSエンベロープを計算した。そして、あらゆる観測点の組み合わせで、エンベロープの相互相関が最大となる時刻差を計算し、この時間差をS波の到達時刻差とみなすことで震源を推定した。使用する観測点は山頂カルデラから半径4 km以内の9点、仮定するS波速度の大きさは1250 m/sで、いずれも内田・他(2012)と同じである。

この手法の火山性地震への適用可能性を検証するために、まず、内田・他(2012)で震源が既に推定された4つの相似地震グループL1, L2, H1, およびH2にこの手法を適用した。その結果、いずれのグループも震央は山頂カルデラ内部南側に推定された。これは、相似地震のスタック波形のP波・S波読みとりで推定した震源(以下、スタック震源と呼ぶ)の水平位置とほぼ一致し、その差は500m以内であった。一方、震源の深さに注目すると、グループL1ではスタック震源との差が概ね500m以内で良く一致したが、他のグループL2, H1 および H2 では一致しなかった。例えばグループL2では、スタック震源の深さが海面下800mなのに対し、エンベロープ相関法ではスタック震源から離れた海拔0m以上の狭い範囲に震源が推定された。また、グループH1とH2では、スタック震源からの差が深さ方向で2000m以内の範囲に分布した。この原因として、B型地震の波形は火山体の不均質な構造の影響を受けるため、S波コーダのエンベロープ形状が複雑になり、必ずしも観測点間のS波主要動の到達時間差を読みとっていないためだと考えられる。

期間内に観測された全1049のB型地震にエンベロープ相関法を適用した結果、B型地震全体の約97%は、山頂カルデラ南端を中心とする直径約1.5 kmの範囲に推定された。この中心付近には主火口が存在し、B型地震の発生が火山ガスの放出活動と強く関わっている可能性を示唆する。また、これらの震源の深さは地表面から海面下3 kmに分布する。相似地震グループによる検定結果から深さの精度は数kmと考えられるので、B型地震の発生位置は主火口付近の深さ数km以浅といえよう。今後さらに深さ方向の精度を高めるためには、火山体の不均質構造や、震源の深さの違いによるエンベロープ形状の変化を考慮する必要があると考えられる。

キーワード: 三宅島火山, B型地震, 震源決定, エンベロープ相関法

Keywords: Miyakejima volcano, B-type earthquake, hypocenter determination, envelope correlation method

## ロコン火山（インドネシア）のブルカノ式噴火に伴う爆発地震の波動特性と前兆傾斜変動

### Wave properties of explosion earthquake and precursory tilt change associated with vulcanian eruptions at Lokon volcano

青山 裕<sup>1\*</sup>, 山田大志<sup>1</sup>, 西村 太志<sup>2</sup>, 八木原 寛<sup>3</sup>, 中道 治久<sup>4</sup>, 及川 純<sup>5</sup>, 井口 正人<sup>6</sup>, ムハマド ヘンドラスト<sup>7</sup>, ヤサ スパルマン<sup>7</sup>

Hiroshi Aoyama<sup>1\*</sup>, YAMADA, Taishi<sup>1</sup>, Takeshi Nishimura<sup>2</sup>, Hiroshi Yakiwara<sup>3</sup>, Haruhisa Nakamichi<sup>4</sup>, Jun Oikawa<sup>5</sup>, Masato Iguchi<sup>6</sup>, HENDRASTO, Muhamad<sup>7</sup>, SUPARMAN, Yasa<sup>7</sup>

<sup>1</sup>北海道大学大学院理学研究院, <sup>2</sup>東北大学大学院理学研究科, <sup>3</sup>鹿児島大学大学院理工学研究科, <sup>4</sup>名古屋大学大学院環境学研究科, <sup>5</sup>東京大学地震研究所, <sup>6</sup>京都大学防災研究所, <sup>7</sup>インドネシア火山地質防災センター

<sup>1</sup>Faculty of Sci., Hokkaido Univ., <sup>2</sup>Graduate School of Sci., Tohoku Univ., <sup>3</sup>Faculty of Sci., Kagoshima Univ., <sup>4</sup>Graduate School of Env., Nagoya Univ., <sup>5</sup>ERI, Univ. of Tokyo, <sup>6</sup>DPRI, Kyoto Univ., <sup>7</sup>CVGHM, Indonesia

Lokon-Empung 火山はインドネシアで最も活動的な火山の1つで、スラウェシ島の北部に位置する。現在まで継続する Tompaluan 火口における噴火活動は、数 100 年の静穏期の後、1829 年に始まった。Lokon-Empung 火山における典型的な噴火はブルカノ式であり、その頻度が十分に高いことから、爆発とその準備過程に関する理解を深める目的で、広帯域地震計と傾斜計を用いた機動観測を 2012 年 9 月より開始した。本発表では、発震過程解析の前段階として、機動観測でとらえられた爆発地震の波形特性と前兆傾斜変動について報告する。

観測では、4 台の広帯域地震計 (Trillium 40) を Tompaluan 火口から 1.6 km ~ 6.8 km の範囲に設置した。このうち、火口に最も近い観測点 WAILAN には高感度の傾斜計 (Pinnacle Denali) を併設し、WAILAN と Tomohon 市の Kakaskasen 火山観測所を無線 LAN で結んだ。それぞれの地震計には計測技研のデータロガー HKS-9550 を接続し、A/D 分解能 24 bit, 100 Hz サンプリングで CF カードにデータを蓄積している。傾斜計のデータは 1 Hz サンプリングで傾斜計の中に蓄積され、1 日に 1 度の頻度で観測所の PC にデータを吸い上げている。また、WAILAN の地震データについては、現地の活動の状況を確認する目的でテレメータオプションを接続し、無線 LAN とインターネットを介して日本への伝送を試験的に行っている。

9 月 28 日に発生した爆発は、やや規模が小さいものの、4 観測点全てで波形が記録された。全観測点で P 波初動は押しである。この爆発について、火口の北東 2.6km にある TINOOR で観測された波形は、4 観測点の記録の中で最も振幅が大きく、他の観測点の記録と異なり単色的な様相を示す。TINOOR では近地のテクトニックな地震の波形も単色的であり、静穏時の背景雑微動のスペクトルも単色的な振動の周期に対応する 2 - 4 Hz に明瞭なピークを持つことから、これは TINOOR 特有の観測点特性と考えられる。10 月 5 日と 11 月 11 日の爆発は明瞭な初動を持ち、継続時間が 1 分以内と短い。解析したイベントの中では 10 月 5 日の爆発地震が最も大きく、WAILAN で 0.001m/s オーダーの振幅があった。この噴火は目視による噴煙高度が報告されており、火口から 1500 m まで上がったとされている。10 月 5 日の噴火前には、傾斜記録の中に火口域を中心とする小さな隆起変動が認められた。最終的な変動量はおよそ 80 nanoradian で、継続時間はおよそ 40 分であった。この継続時間は Semeru 火山で報告されている前兆変動 (3 ~ 30 分) と同程度である。10 月 5 日と 11 月 11 日の噴火は、9 月 28 日の噴火と同様に初動は圧縮相であった。速度記録の生波形を見ると 3 つのイベントの波形は異なって見えるが、1 Hz 以下の帯域に注目するとこれらの波形は極めて似ている。このことは異なる爆発地震の間に共通の物理過程が存在することを示唆している。ローパスフィルターを施した波形を精査すると、圧縮の P 波が到達した後に大きな膨張の波が現れ、その後 Rayleigh 波を表す retrograde motion が卓越する。このような振動特性は桜島、諏訪之瀬島のブルカノ式噴火に伴って観測される地震波の特徴と類似している。しかしながら、諏訪之瀬島や Semeru 火山で報告されているような、初動の数秒前に現れる小さな減圧を示唆する相は見いだせていない。

キーワード: ブルカノ式噴火, 爆発地震, 傾斜変動

Keywords: Vulcanian eruption, explosion earthquake, tilt change

## 高周波震源振幅を用いた火山性地震の規模指標

## Source amplitudes of volcano-seismic signals determined by the amplitude source location method

熊谷 博之<sup>1\*</sup>, Rudy Lacson<sup>2</sup>, 前田 裕太<sup>1</sup>, Melquiades Figueroa<sup>2</sup>, 山品 匡史<sup>3</sup>, Mario Ruiz<sup>4</sup>, Pablo Palacios<sup>4</sup>, Hugo Ortiz<sup>4</sup>, Hugo Yepes<sup>4</sup>

Hiroyuki Kumagai<sup>1\*</sup>, Rudy Lacson<sup>2</sup>, Yuta Maeda<sup>1</sup>, Melquiades Figueroa<sup>2</sup>, Tadashi Yamashina<sup>3</sup>, Mario Ruiz<sup>4</sup>, Pablo Palacios<sup>4</sup>, Hugo Ortiz<sup>4</sup>, Hugo Yepes<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 防災科研/名大・環境, <sup>2</sup> フィリピン火山地震研究所, <sup>3</sup> 高知大学, <sup>4</sup> エクアドル地球物理研究所

<sup>1</sup>NIED/Nagoya Univ., <sup>2</sup>PHIVOLCS, <sup>3</sup>Kochi Univ., <sup>4</sup>IG-EPN

はじめに: 高周波の地震波振幅を用いた震源決定 (Amplitude Source Location: ASL) 手法が様々な火山で火山性地震や微動の震源過程の研究に用いられている (例えば、Battaglia et al., 2005; Kumagai et al., 2011; Ogiso and Yomogida, 2012)。この手法では震源位置と同時に、S波の遠地・等方輻射を仮定した震源振幅を推定する。本研究ではこの震源振幅の特性を様々な火山の地震データを用いて調べた。その結果、この高周波の震源振幅が、イベントのタイプに依らない火山性地震の一般的な規模の指標として活用できる可能性が示されたので報告する。

手法: 本研究では、Kumagai et al. (2010) による S 波の等方輻射を仮定した震源決定手法を用いた。この手法では、高周波数帯におけるサイト増幅特性を補正した観測振幅を用いて、グリッドサーチにより理論振幅との最小残差点を見つけることにより震源決定を行う。高周波数帯では、地震波の散乱により輻射分布が崩れ、等方的な振幅分布になると解釈されている。まず、タール火山 (フィリピン) の火山構造性 (VT) 地震に本手法を適用し、震源振幅を推定するとともに、初動読み取りによる震源決定結果との比較を行った。さらに、エクアドルのトゥングラワ火山の爆発地震とコトパキシ火山の低周波地震に本手法を適用した。これら 3 火山の結果を用いて、高周波震源振幅と地震マグニチュードとの比較を行った。地震マグニチュードの推定は渡辺の式 (渡辺, 1971) を用いた。

結果: JST-JICA フィリピンプロジェクトにより設置されたタール火山の地震観測網のデータを用い、2012 年 7 月までにこの観測網で記録された最大の VT 地震について ASL 法による解析を行った。サイト増幅特性はコーダ規格化法により推定した。その結果、7-12 Hz、 $Q = 50$  において残差が最小となり、その震源位置は初動読み取りによる震源位置とほぼ同じ場所に決まった。この周波数帯と  $Q$  値を用いて、他の VT 地震についても震源位置・震源振幅・マグニチュードを系統的に推定した。ただし、震源振幅の推定は以下の手順に従った。まず上記の手順で求めた震源位置に固定し、同一の条件 (1-2 m の深さに埋設) で設置された広帯域地震観測点のデータのみを用い、サイト増幅特性の補正をしない 5-10 Hz の振幅を用いて振幅震源を決定した。同様に、トゥングラワ火山の爆発地震とコトパキシ火山の低周波地震についても、震源位置・震源振幅・マグニチュードを推定した。これらの火山ではタール火山と同一の条件で設置された広帯域地震観測点のデータを用い、上記手順に従い震源振幅を決定した。それらを比較した結果、イベントのタイプによらず、震源振幅の常用対数とマグニチュードが比例関係となるスケーリング則があることが分かった。

議論: 本研究の結果は、5-10 Hz の高周波数帯で推定した震源振幅が、イベントのタイプによらず火山性地震の規模指標として活用できる可能性を示している。これまで火山性地震の規模を表す一般的なパラメータは存在しなかった。地震マグニチュードに関しても、世界的に定義が統一されておらず、異なる火山で比較することは困難があった。高周波数の振幅震源は、その物理的な意味が比較的明確であり、統一的な指標として用いることができる。サイト効果が震源振幅に最も影響を与えられとされるが、本研究は同一条件で設置された地震計であれば、それらを抑えることができることを示している。1-2 m の深さに広帯域地震計を埋設するという設置方法は多くの火山で採用されており、本研究で提唱した手順で震源振幅を推定することは多くの火山で可能であると考えられる。高周波震源振幅を用いることにより、これまで困難であった異なる火山での火山性地震の規模の比較が可能となれば、それらの震源過程の研究や火山監視にも役立つことが期待される。

Battaglia, J., K. Aki, and V. Ferrazzini, . *Volcanol. Geotherm. Res.*, 147, 268-290, 2005.

Kumagai, H. et al., *J. Geophys. Res.*, 115, B08303, doi:10.1029/2009JB006889, 2010.

Kumagai, H. et al., *Geophys. Res. Lett.*, 38, L01306, doi:10.1029/2010GL045944, 2011.

Ogiso, M. and K. Yomogida, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 217-218, 8-20, 2012.

渡辺 晃, *地震* 2, 24, 189-200, 1971.