

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340101

研究課題名(和文)波動解析から読み解く爆発的連続噴火のマグマ破碎過程～噴火推移への役割解明～

研究課題名(英文)Decoding seismic and infrasonic waves associated with Plinian-type eruptions for understanding magma fragmentation and transition of the eruptive activity.

研究代表者

市原 美恵 (ICHIHARA, Mie)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：00376625

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：大量のマグマを長時間にわたって噴出する噴火様式について、その発生と推移のメカニズムを明らかにすることを目的とした。良質の観測データがそろっている霧島火山新燃岳2011年噴火を研究対象とし、地震・空振の波動場解析の新しい手法を編み出した。噴出物の物質科学分析、映像解析、室内実験と併せ、以下の結論を得た。3回の爆発的連続噴火(準プリニー式噴火)のうち、1回目3回目は水蒸気噴出や固まったマグマの栓の破裂による急減圧という浅部駆動型の噴火、2回目は、深部から泡を多く含んだマグマが押し上げて成長した深部駆動型の噴火であった。

研究成果の概要(英文)：A Plinian eruption emits a large amount of magma fragments into the atmosphere for a long duration and is the most energetic and hazardous type of a volcanic eruption. This study aims at clarifying the mechanism of start-up and transition of such an eruption. The three sub-Plinian eruptions during the Shinmoe-dake 2011 eruption were chosen as the test case, because multi-disciplinary high-quality data are available. We performed combined analyses of seismic and infrasonic signals and compared the results with the material study for the eruption products, image analyses, and model experiments in the laboratory. It is confirmed that the first and the third sub-Plinian eruptions were triggered by rapid decompression due to shallow process, while the second event grew internally driven by highly vesicular magma from below.

研究分野：火山物理学

キーワード：火山現象 噴火 地震 空振

1. 研究開始当初の背景

爆発的噴火における火道プロセスについて、衝撃波管モデルと定常流モデルの二つがある。前者は、火山内部に閉じ込められていた発泡マグマが、急に栓が開くことにより粉々に破碎されて噴出するというもので、強い爆発に始まり、すぐに減衰、終息する単発的小爆発(ブルカノ式噴火)をよく表現している。一方、後者は、マグマの上昇-膨張-破碎-噴出、という一連の流れが継続的に発生しているもので、大規模な噴煙放出が長時間続く爆発的連続噴火(プリニー式噴火)に適用される。定常性の強い爆発的連続噴火に伴う波動の研究は、衝撃波管型の噴火に伴う地震や空振の研究に比べ、あまり進んでいない。噴煙放出時の地震は「噴火微動」と呼ばれるが、発振機構の解析研究は少ない。観測技術の進歩により、遠方観測点で連続噴火に伴う空振を捉えた例が増えてきたが、乱流ジェットノイズとの類推による解釈^{①②}しかされておらず、マグマの破碎・放出といった、爆発的噴火活動の本質的な過程に結びつける視点が欠けている。

霧島火山新燃岳では、2011年1月26日に噴火活動が活発化し、翌27日の夕方までに3回の準プリニー式噴火が発生した。研究代表者らは、火口から700mの定常観測点において空振観測を行っており、この一連の噴火活動に伴う空振を捉えることに成功した。そして、噴煙高度や噴出口の変化に対応して、地震・空振相関関係やそれぞれの波動特性が大きく変化していることが確認された。また、それに対応する変動が、地殻変動や噴出物の堆積構造にも見られている。新燃岳2011年噴火は、準プリニー式噴火の推移を支配する要因を波動解析から読み解く、最良のデータセットを提示している。

2. 研究の目的

長時間に渡って大規模な噴煙放出の続くタイプの爆発的噴火における火道内マグマ破碎プロセスを、地震・空振の観測記録から読み取る手法を開発する。その際、マグマの破碎を連鎖的な爆発現象と見なし、波動場の理解が進んでいるブルカノ式噴火の観測記録や知見を組み込む工夫をする。この視点で、霧島火山新燃岳2011年噴火初期に発生した準プリニー式噴火の地震・空振記録の波動解析を行い、その結果と噴出物分析や映像解析を合わせて噴火の推移とマグマ破碎プロセスの推移の関係を明らかにする。この解析を通して、準プリニー式噴火とブルカノ式噴火の本質的な違いの有無や、噴火の様式や推移を決める要因を考察し、頻度の高い小爆発の研究を大規模噴火の理解につなげる可能性を検討する。

3. 研究の方法

(1) 新燃岳2011年噴火の波動解析

噴火に伴って発生する地震・空振の振動源を決めるため、以下の方法で解析を行った。

噴火中に地震計で観測される連続振動は、地震波だけでなく、空振が地震計近くの地面をたたくことによる振動の寄与も大きい。この影響を評価するため、噴火開始前後に空振計が併設された地震観測点について、約40km離れた桜島のブルカノ式爆発空振を利用して、空振に対する応答関数を求めた。その応答関数を用いて、新燃岳2011年噴火における準プリニー式噴火、および、ブルカノ式噴火に伴う空振と地震を解析した。

(2) 新燃岳2011年噴火の物質科学分析

準プリニー式噴火(1月26日午後~27日午後)、および、ブルカノ式噴火(1月28日12:47)で放出された軽石の解析を行った。サンプルは、噴火直後に研究分担者らにより採取されたものに加え、2012年に本研究独自の火口近傍調査を行い採取した。先行研究^③に従い、最初の2つの準プリニー式噴火(SP1、SP2)の堆積物をLayer2-4の3層に分け、3番目の準プリニー式噴火(SP3)の噴火堆積物をLayer5とした。さらに各層を上下2つに分割した。

各層の噴出物から、比較的サイズの大きい新鮮なマグマ片を選び出し、質量と見かけ体積を測定して見かけ密度を算出した。見かけ密度は、気泡含有量に依存し、気泡が多くなると相対的に軽くなる。体積の測定には、3次元レーザースキャナー(ローランドDG社製、LPX-1200)を用いた。

(3) 室内実験

① 波動場生成実験

地震と空振の相関が、流体の流れの状態によってどのように変化するかを調べた。降伏応力を持つジェル状流体によってマグマを模擬し、下部からガスを注入し、ガス注入管内部の振動(地震)や液面上の音波(空振)を計測した。また、ガス注入部に流体励起振動を発生する機構を取り付け、それによって発生する振動の大気中への放射特性と、流体中のガス輸送様式の関係性を調べた。

② 噴火模擬実験

本研究の波動解析と、物質科学分析の結果から得られた、準プリニー式噴火の推移を再現するモデル実験を行った。容器(マグマだまり)と細長い垂直管(火道)からなる装置に、クエン酸入り水あめを満たした。底部から、重層入りの水あめを注入し、混合による化学反応で発泡を起こした。その後の噴出の様子をビデオカメラで撮影し、容器内の圧力変動(地震・地殻変動)と、噴出口から大気に放出される音波(空振)を計測した。

4. 研究成果

(1) 新燃岳の準プリニー式噴火とブルカノ式噴火における波動エネルギー

新燃岳周辺の観測点の、空振に対する地面の応答が、周波数の関数として得られた。このような応答関数が定量的に示されたのは、初めてのことである。活発に爆発を繰り返す桜島火山が適当な距離にあるという地理的条件を利用して実現した成果である。その応答関数を用いて、新燃岳 2011 年噴火における連続噴出に伴う空振と地震を解析した。

波動場からマグマ噴出率を推定する要請は大きく、いくつかの提案がなされている。しかし、異なるモデルが乱立しており、観測や理論からの裏付けが不足していた。本研究により、以下のことが明らかになった。

(a) ブルカノ式の後の弱い噴出に伴う地震動においては、空振による揺れのみが見えている (図 1)。一方、準プリニー式噴火においては、空振の寄与を有意に超える連続振動が発生している (図 2a)。

(b) 地震と空振のエネルギーの間には、大局として、正の相関がある。しかし、様々な波動放出メカニズムが存在し、一定の噴出率でも、メカニズムが変化すれば振動のエネルギーが大きく変化する (図 2ab)。

(c) 2 回目の準プリニー式噴火 (SP2) 成長期には、空振、地震ともに振動エネルギーが噴出率^④に比例して、2 桁にわたって増大した (図 2ef)。その比例関係は、空振の発生が、現在考えられているような大気中のジェットノイズではなく、火道内の連鎖的な小爆発が発生している可能性を支持している。

(2) 波動・画像表示ツール (wave_vs_image)

表面現象と波動データ (地震・空振・地殻変動) を効率よく比較するための、MATLAB ベースの表示ツールを開発した (図 3)。このツールは、本研究の解析に役立った他、新燃岳 2011 年噴火に関する多くの研究において、使用された^{③⑤⑥}。

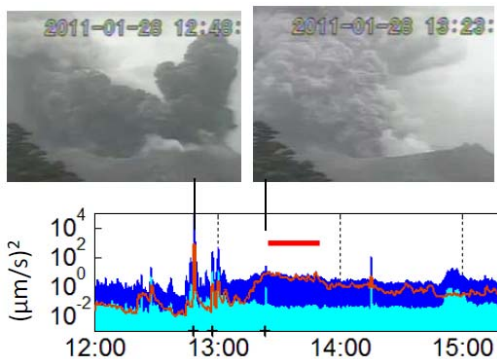


図 1. 2011 年 1 月 28 日の新燃岳ブルカノ式噴火。火口から 700 m の観測点における地震 (青) と空振計測値から計算した空振による地面の揺れ (オレンジ) の 2 乗振幅。水色は火口から 3km の縦穴地震計。

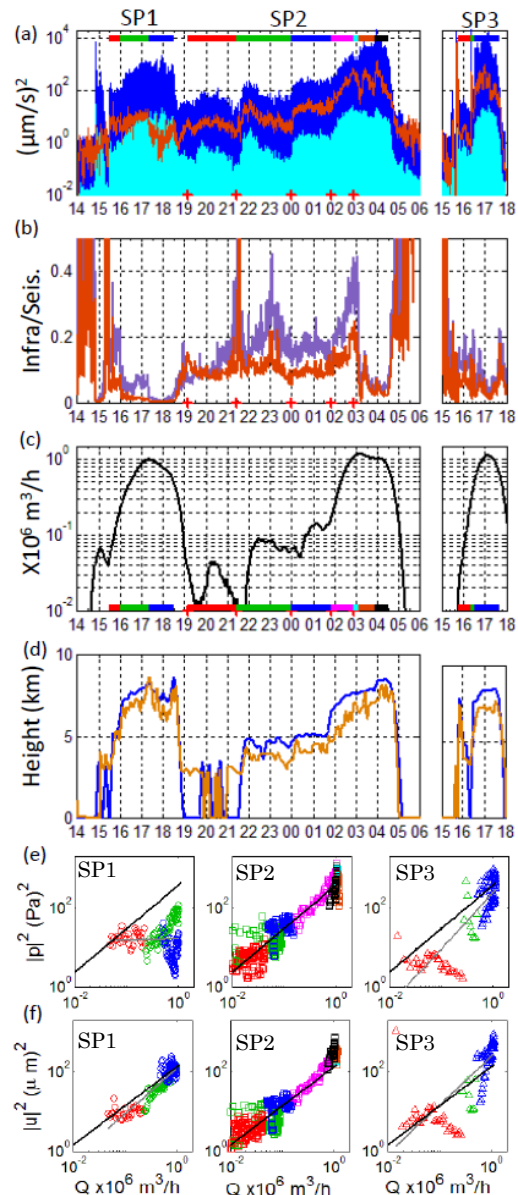


図 2. 2011 年 1 月 26・27 日の新燃岳準プリニー式噴火。(a) 図 1 と同じ形式。(b) 地震計測振幅に対する空振の寄与。(c) 地殻変動からみた噴出率^④。(d) 噴煙高度^⑦。(e)(f) 噴出率と波動エネルギーの比較。

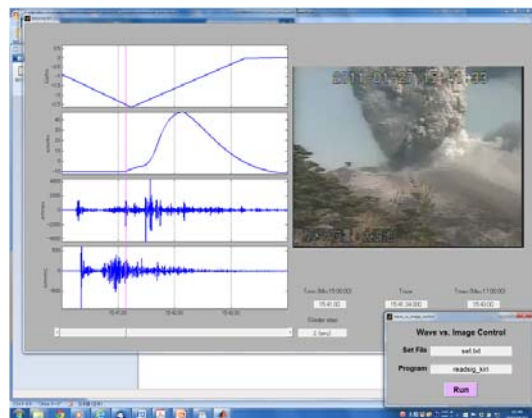


図 3. 波動・画像表示ツール。

(3) 物質科学分析

図4aに、サンプルを採取した路頭の様子を示す。Layer 2-4は、SP1とSP2の堆積物であり、その境界は識別されていない。Layer 5は、SP3の堆積物である。Layer 2から3にかけては、上に行くほど粒子サイズが大きくなっている。一般に、このような構造は、噴煙高度が次第に高くなる噴火の成長期に形成されると考えられている。一方、Layer 4は反対の傾向がある。

見かけ密度は、マグマ片の気泡体積分率の指標である。Layer 2-5、および、1月28日に発生したブルカノ式噴火堆積物に含まれる新鮮なマグマ片の見かけ密度を図4bに示す。Layer 2から3-lowまでは、ほぼ一定の密度であるが、3-upで、見かけ密度の頻度分布が大きい方へ連続的に広がる。Layer 4では、見かけ密度が急減し、Layer 2よりもさらに小さいものも含まれる。Layer 5では、見かけ密度の分布が大きく散らばり、それまでに見られなかった重いものも含まれている。そして、1月28日のブルカノ式の噴出物の見かけ密度頻度分布に非常によく似ている。

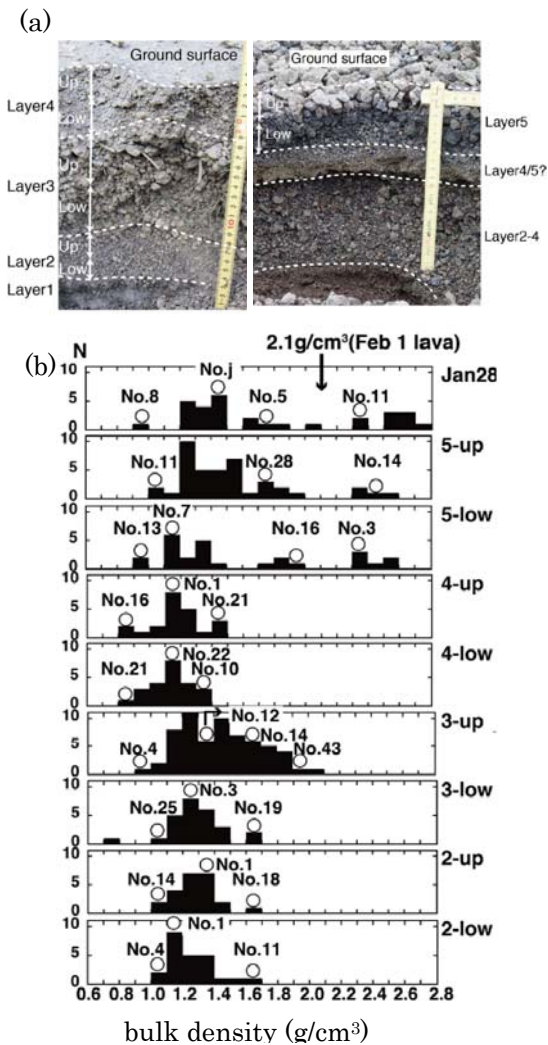


図4. 新燃岳準プリニー式噴火の噴出物堆積構造(a)とマグマ片の見かけ密度(b)。

(4) 新燃岳 2011年噴火における爆発的連続噴火の推移メカニズム

波動解析、物質科学分析、映像データ、その他の文献資料を統合し、新燃岳の準プリニー式噴火推移について、図5のようなモデルを提案する。

- (a) マグマが上昇し、火山浅部の増圧と微動が観測される。
- (b) 水蒸気噴出に伴う急減圧が観測される。
- (c) 衝撃波管実験で見られるような遅延破碎の発生。破碎面の伝播による急減圧で、比較の見かけ密度の小さいマグマ片 (Layer 2&3-low) が生成される。
- (d) 破碎面が深くまで進行すると、既存の気泡が少なくなり、進行が停止する。マグマは脱ガスしながら上昇。浅部の膨張とマグマだまりのゆっくりとした収縮が観測されている。
- (e) マグマだまりの減圧により、マグマだまり内部でも発泡が生じる。弱い噴火は継続しており、破碎面位置の安定した、定常火道流に近い状態が実現している。
- (f) マグマだまりから発泡度の高いマグマが流出し、上の重いマグマを押し上げて加速する。重いマグマが噴出すると、減圧が促進されるため、ますます加速が進む。Layer 3-up がこのとき形成される。
- (g) 発泡度の高いマグマが噴出し始める。圧力低下とともに急膨張するため、火口ではチョーキングが生じ、過剰圧によって火口拡大が発生する。噴出に対して発泡が追い付かず、噴火は一時休止。
- (h) マグマ表面が固まり、プラグが形成される。これが栓となり、内部が増圧する。
- (i) プルカノ式噴火でプラグが破壊し、急減圧が発生する。これが、破碎面を再度形成し、また、減圧によるマグマだまりからの流出も再開する。

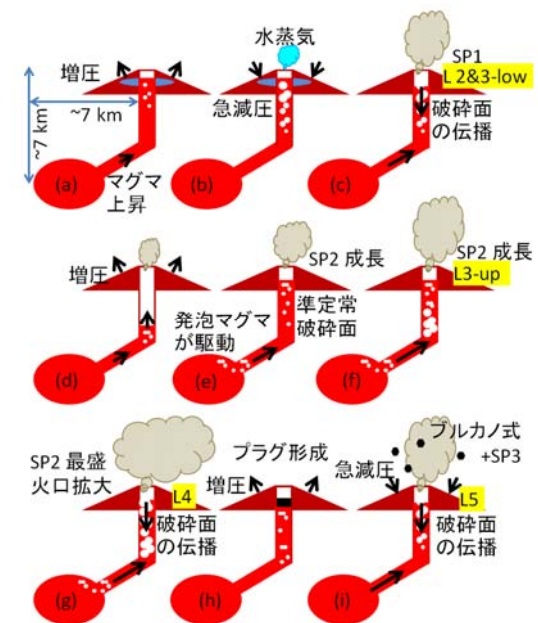


図5. 新燃岳準プリニー式噴火の推移。

これまで、見かけ密度の大きい（発泡度の低い）マグマが出て来るときには、マグマ上昇速度は低下し、噴火は弱まっていると考えられていた。しかし、新燃岳 2011 年噴火の SP2 では、噴火の成長期に高密度のマグマが噴出していることが分かった。改めて考えてみると、これは当然のこととして理解できる。マグマだまりから火口までの距離は、新燃岳の場合 10 km 以上ある。地下のマグマの平均移動速度を数 m/s と、速めの値を仮定しても、移動には 1 時間かかる。ある瞬間に火道の中で流れを駆動しているマグマと、その時に噴出しているマグマは、同一ではないのである。非定常流れ場における時空間的な変化の視点が、これまでの連続噴火モデルには欠けていた。

(5) 波動場形成実験

火道中の流れが励起する振動と、大気中の空振の関係を調べた実験の装置と結果を図 6 に示す。流動場が安定せず、気泡の破裂が間欠的に起こっているような場合には、火道内の圧力変動(PS1)と空振(MC1)は、振幅変化もスペクトルも大きく異なる(図 6 bc)。しかし、気体の通り道が確立され、流動様式が定常的になると、火道内と大気中で共通の波動が計測されるようになる(図 6 d)。

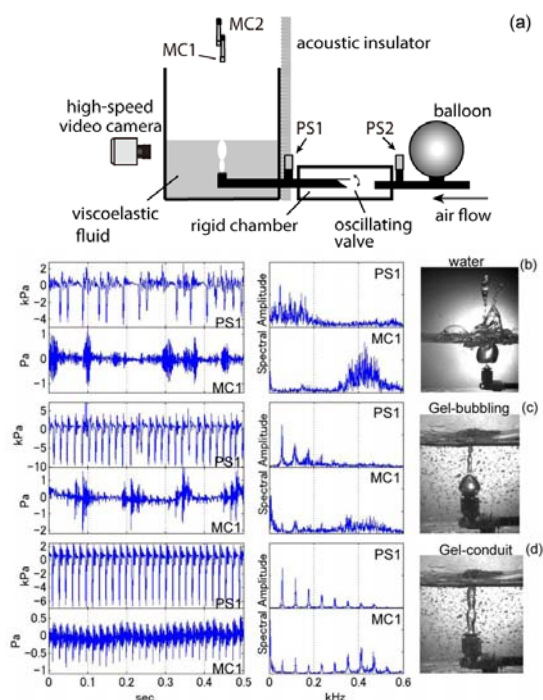


図 6. 波動場形成実験。

(6) 噴火模擬実験

管（火道）と容器（マグマだまり）に未発泡の流体が詰まった状態で、組成の異なる流体を容器に注入し、化学反応により発泡させた。気泡の膨張により、管内の重い流体は押し上げられ、噴出する。噴出が進むにつれ、管の中には泡が増え、噴出速度も増加する。

そして、イベントの後期に、発泡度の高い流体が、激しい振動を伴って噴出する様子が見られた。この実験結果から、新燃岳 2011 年噴火 SP2 の噴火推移と噴出物の特長を結び付けるモデル(図 6 e-g)に思い至った。

<引用文献>

- ①Matoza, R. S., Fee, D., et al., *Geophys. Res. Lett.* 36, 08303 (2009).
- ②Vergnolle, S., and Caplan-Auerbach, J., *Bull. Volcanol.* 68, 611-630 (2006).
- ③Nakada, S., Nagai, M., et al., *Earth Planets Space*, 65, 475-488 (2013).
- ④Ueda, H., Kozono, T., et al., *Earth Planets Space*, 65, 517-525 (2013).
- ⑤Maeno, F., Nakada, S., et al., *Earth Planets Space*, 65, 609-621 (2013).
- ⑥Takeo, M., Maehara, Y., et al.,
- ⑦新堀敏基・桜井利幸・他, *験震時報*, 77, 139-214 (2013).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ①市原美恵, 泡の「ぶくぶく」音と火山の空振, *ながれ*, 査読無, Vol. 33, 2014, pp. 407-412, <http://www.nagare.or.jp/download/noauth.html?d=33-5tokushu2.pdf&dir=36>

- ②Ichihara, M., Lyons, J. J., Yokoo, A., Switching from seismic to seismo-acoustic harmonic tremor at a transition of eruptive activity during the Shinmoe-dake 2011 eruption, *Earth Planets Space*, 査読有, Vol. 65, 2013, pp. 633-643, doi:10.5047/eps.2013.05.003.

- ③Suzuki, Y., Nagai, M., Maeno, F., Yasuda, A., Hokanishi, N., Shimano, T., Ichihara, M., Kaneko, T., Nakada, S., Precursory activity and evolution of the 2011 eruption of Shinmoe-dake in Kirishima volcano -insights from ash samples-, *Earth Planets Space*, 査読有, Vol. 65, 2013, pp. 591-607, doi: 10.5047/eps.2013.02.004.

- ④Kameda, M., Ichihara, M., Shimanuki, S., Okabe, W., Shida, T., Delayed brittle-like fragmentation of vesicular magma analogue by decompression, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 査読有, Vol. 258, 2013, pp. 113-125, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2013.04.008.

- ⑤Takeo, M., Maehar, Y., Ichihara, M., Ohminato, T., Kamata, R., Oikawa, J., Ground deformation cycles in a magma-effusive stage, sub-Plinian and vulcanian eruptions at Kirishima volcanoes, Japan, J. Geophys. Res., 査読有, Vol.118, 2013, pp.4758-4773, doi:10.1002/jgrb.50278.

[学会発表] (計5件)

- ①菅野洋・市原美恵, 模擬火山噴火実験における周期的噴出モードと噴出推移, 日本火山学会 2014 年度秋季大会 (2014-11-3, 福岡大学, 福岡).
- ②Ichihara, M., A linear relation between powers of seismic and infrasonic eruption tremor and magma discharge rates—a case study of subplinian events in the 2011 Shinmoe-dake eruption-, COV8 (2014-9-10, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia).
- ③鈴木由希・市原美恵・前野 深・長井雅史・中田節也, 新燃岳 2011 年噴火最盛期における本質物の見かけ密度変化, 地球惑星科学連合 2014 年大会 (2014-4-28, 横浜市・パシフィコ横浜).
- ④Ichihara, M., Takeo, M., Maehara, Y., Oikawa, J., Ohminato, T., Shallow and deep triggering of Plinian-type eruptions inferred from acoustic and seismic eruption tremors, IAVCEI 2013, (2013-7-23, 鹿児島市・かごしま県民交流センター), 招待講演.
- ⑤Suzuki, Y., Maeno, F., Nagai, M., Nakada, S., Ichihara, M., Evolution of conduit flow during the 2011 eruption of Shinmoe-dake, Japan—insights into cyclic sub-Plinian activity and shifting eruption style of andesite magma, IAVCEI 2013 (2013-7-24., 鹿児島市・かごしま県民交流センター).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

市原 美恵 (ICHIHARA, Mie)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号 : 00376625

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

鈴木 由希 (SUZUKI, Yuki)
早稲田大学・教育・総合科学学術院・専任講師
研究者番号 : 00374918

横尾 亮彦 (YOKOO, Akihiko)
京都大学・理学系研究科・助教
研究者番号 : 70420403