

令和 2 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K01313

研究課題名(和文) インドネシア・シナブン火山と雲仙普賢岳噴火の比較研究

研究課題名(英文) Comparative study of lava dome eruptions at Sinabung and Unzen volcanoes

研究代表者

中田 節也 (Nakada, Setsuya)

東京大学・地震研究所・名誉教授

研究者番号：60128056

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：溶岩ドーム噴火は噴出率が数十m³/秒以下の低い場合に起こり、ドーム成長の際に崩壊型の火砕流が頻繁に伴うが、爆発的噴火が発生することもある。シナブン火山も雲仙普賢岳の溶岩ドーム噴火も噴出率が時間とともに指数関数的に減少する活動であったが、シナブン火山では活動後期になって爆発的噴火が頻繁に発生した。雲仙普賢岳では活動末期に溶岩尖塔が形成され、火口を厚い溶岩が蓋をしたが、シナブン火山では急峻な地形で崩壊が継続し溶岩尖塔が形成されなかった。低噴出率に至ってシナブン火山で爆発的噴火が頻発したことは、溶岩荷重が不十分のために火道上部で火山ガスを蓄積したマグマ圧が上回り爆発的噴火をもたらしたと提案された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

爆発的なブルカノ式噴火は、火道上部に蓄積する火山ガスに富むマグマ圧がそれを上から押さえる溶岩荷重を上回ることによって起こる。そのため、噴出率の低い溶岩ドーム噴火や水蒸気噴火であっても爆発的噴火は発生する。噴出率が比較的高い時期に、溶岩ドームの大崩壊による火道上部の急減圧によってブルカノ式噴火が誘発されることは知られているが、より低い噴出率であっても、溶岩荷重が不十分であればブルカノ式噴火が頻繁に発生することが本研究で示された。これは溶岩ドーム噴火のリスクを考える上で、活動末期であっても規模の比較的大きな爆発が起こりうるというハザード評価が必要であることを示した。

研究成果の概要(英文)：Lava dome eruptions occur when the eruption rate is less than several tens of m³/s, and collapsed-type pyroclastic flows are frequently associated with dome growth, but explosive eruptions may occur. The lava dome eruptions at both Sinabung and Unzen volcanoes had eruption rates that decreased exponentially with time, but at Sinabung volcano, explosive eruptions frequently occurred in the latter stage of the activity. At Unzen, a lava spire was formed at the end of the activity, and a thick lava covered the crater, but at Sinabung, the steep topography continued to collapse and the lava spine was not formed. It was suggested that the frequent occurrence of explosive eruptions at Sinabung at a low eruption rate was caused by volcanic gas-rich magma pressure in the upper conduit over the load of lava pile on the crater.

研究分野：火山地質学

キーワード：シナブン火山 雲仙普賢岳 溶岩ドーム噴火 ブルカノ式噴火 溶岩荷重 溶岩噴出率 マグマ過剰圧

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

溶岩ドーム噴火は噴出率が数十 m^3/s 以下で起こる溢流的な噴火であり、多くの溶岩ドーム噴火の噴出率は時間とともに減少する。インドネシアのシナブン火山は2013年9月に噴火を開始し、2013年末から溶岩ドームが山頂部で成長する活動に発展した。そこでは成長するドーム溶岩の崩壊によって火砕流が頻繁に発生し、溶岩噴出率は初期に高く、時間とともに減少するなど、その噴火様式は雲仙普賢岳と類似していた。しかし、シナブン火山では溶岩噴出率が低下した2015年夏頃からブルカノ式噴火を頻繁に繰り返すようになった。継続的なブルカノ式噴火は雲仙普賢岳では見られなかった現象であり、両者の違いが何によって生じるのかを明らかにすることが、溶岩ドーム噴火に伴うマグマの脱ガスプロセスを理解する上で重要であり、将来の火山防災上も分岐判断をする上で役に立つと考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、噴出率は時間とともに指数関数的に減少した雲仙普賢岳とシナブン火山の両溶岩ドーム噴火について、地質・岩石学的解析結果および観測結果を比較し、両者の噴火の違いを明らかにし、それらをもたらしした原因を明らかにすることを第一の目的とする。特に、溶岩噴出率が低下してから比較的穏やかな内生的成長をした雲仙普賢岳の溶岩ドーム噴火と連日のようにブルカノ式噴火を繰り返した溶岩ドーム噴火への分岐の理由について理解することを第2の目的とする。

3. 研究の方法

噴火中のシナブン火山の現地観測を定期的実施し、レーザー測距儀による地形変化の測量、堆積物の地質学的調査、イベントごとの火山灰・溶岩試料を採取する。また、採取資料の化学分析を実施し、マグマ組成や噴火の特徴の時間変化を明らかにする。さらに、噴火前・中の地形データを衛星画像から作成し、堆積物の正確な体積見積もりを行い、申請者がレーザー測距儀などで得ている測量結果と合わせて噴出率の時間変化を評価する。これらの結果を、雲仙普賢岳噴火についてこれまで蓄積されているデータと比較し、両溶岩ドーム噴火の類似点、相違点を明確にし、溶岩ドーム噴火の様式の相違点を左右した原因を抽出し、それを説明するモデルを提案する。

4. 研究成果

(1) シナブン噴火の推移と雲仙普賢岳との比較

シナブン火山では2013年末から成長開始した溶岩ドームが溶岩流となり、崩落による火砕流発生を繰り返した。溶岩噴出率は初期に $\sim 8 \text{m}^3/\text{s}$ と最大であり、時間とともに指数関数的に減少した(図1)。これはGNSSの山頂域を挟む側線の短縮の様子とも類似している。これらの変化は雲仙普賢岳の溶岩ドーム噴火で見られたこと酷似している。また、地震学的にも噴出率が $\sim 0.5 \text{m}^3/\text{s}$ 以下になると、シナブンではHembusanと呼ばれる普賢岳におけるMF~LF型と似た特徴の地震が発生し続けた(図2)。Hembusanはインドネシアでは脱ガスに伴うものと考えられており(Caudron et al., 2015)、いずれも5 Hz前後に卓越周波数を持つ。雲仙普賢岳ではこの地震は内生的成長の際に火道上部で発生した。シナブン火山においても、低噴出率において火道上部に蓄

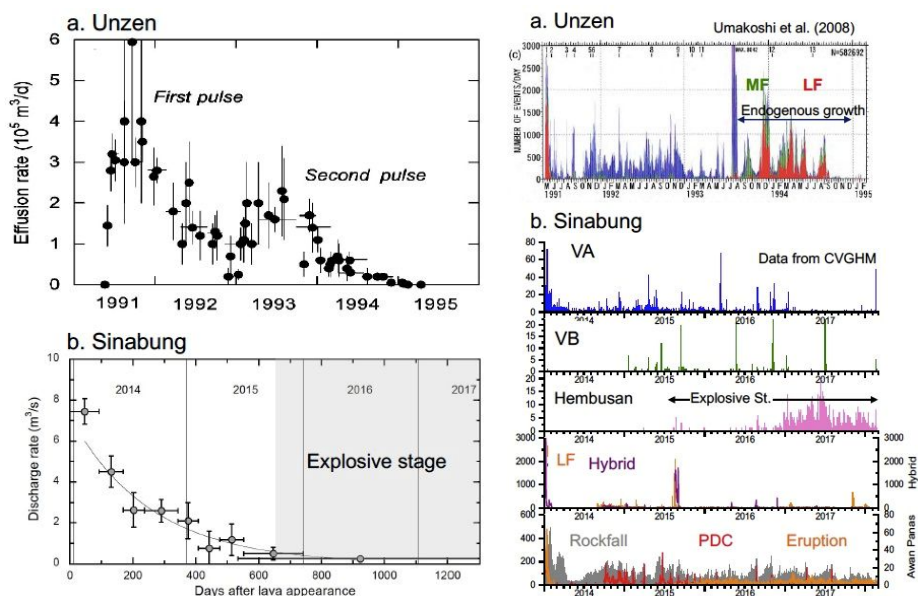


図1 (左) 雲仙普賢岳とシナブン火山の溶岩噴出率の時間変化。それぞれ、Nakada et al. (1999) と Nakada et al. (2019)による。 $6 \times 10^5 \text{m}^3/\text{d} = \sim 7 \text{m}^3/\text{s}$ 。

図2 (右) 雲仙普賢岳とシナブン火山で溶岩ドーム成長中に発生した火山性地震の日別回数。それぞれ Umakoshi et al. (2008)とインドネシア火山地質災害軽減センターによる。

積した火山ガスの移動に伴う振動が起きていたと考えられる。

シナブンでは、2015年夏から2018年1月まで、日に複数回の小規模のブルカノ式噴火が発生し続けた。やや規模の大きな爆発では噴煙柱+溶岩崩落による火砕流が発生した。2018年2月に発生したブルカノ式噴火はそれまでで最大規模のものであり、噴煙柱崩壊による火砕流が発生し軽石も伴われた。本質物質の発泡度は爆発期（2015年夏以降）に入ってから時間とともに上昇した。

両火山の溶岩ドーム噴火で異なる点は、シナブン火山で溶岩流にまで溶岩が流動化・流下したことで、シナブン火山で爆発期が噴火の後期にあったこと、そして、雲仙普賢岳では噴火の末期に溶岩尖塔が形成されたことである。流動化するかどうかはシナブンの溶岩が安山岩質であり、雲仙普賢岳の溶岩がデイサイト質であったため、物性が異なったことが原因としてあげられる。

(2) シナブンの爆発的噴火の考察

噴出物の全岩組成はSiO₂量が57~61wt%で、初期にややSiO₂に乏しい特徴はあるが、ブルカノ式噴火期前からはほぼ一定である。メルトは高シリカ流紋岩であるが、その変化の特徴は全岩組成と同様であり、マグマの組成が途中で変わったとは考えにくい。噴出物の発泡度が上昇したことや末期により爆発的になる傾向は、Hembusanの発生頻度が高くなることと対応しており(図2)、噴火を引き起こした火道上部マグマの過剰圧が時間とともに高まったことを示している。ここでいうマグマの過剰圧(ΔP)は火道上部マグマの圧力と溶岩柱の荷重(ρgh)との差を表している。マグマ圧と溶岩荷重がバランスしておれば爆発は起こらず、脱ガスしながらゆっくり成長を続けるか、脱ガスが進行して活動が終息すると考えられる。しかし、溶岩荷重が不十分な場合には爆発を起こし、下部からの溶岩供給が継続すれば爆発が繰り返すと考えられる。

両溶岩ドーム噴火における噴出率と火口上溶岩の厚みにはよく似た負の相関がある(図3)。このことは、基本的には荷重圧によって噴出率がコントロールされていることを物語っている。

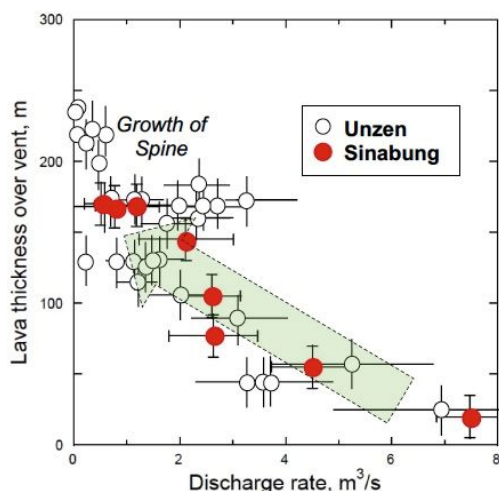


図3 溶岩噴出率と火口上溶岩の厚さの負の関係。矢印の方向に噴火が進行。Nakada et al. (2019)

しかし、雲仙普賢岳において噴出率が低くなって溶岩厚が大きくなったのは、火口の上に溶岩尖塔が形成されたためである。そのため、雲仙普賢岳では溶岩尖塔が形成されたために、火道上部のマグマ圧が溶岩尖塔の形成による荷重圧とバランスして噴火が終了したと理解できる。雲仙普賢岳とシナブン火山における噴出率と溶岩厚の異なる挙動は~0.5m³/s付近である。これはシナブン火山において、ちょうど爆発的噴火に移行した時の噴出率である。

シナブン火山においては、両側が切り立った急峻な山頂部に溶岩ドームが成長したため、溶岩が次から次に崩れ、火口上に、溶岩尖塔を作るほど溶岩がうず高く溜まらなかったと考えられる。そのため、溶岩荷重が火道上部のマグマ圧より小さく過剰圧が生じ、火口上の溶岩を吹き飛ばすブルカノ式噴火が起きたと考えられる。噴出率が低下して高粘性になった火道上部のマグマ中では、

火山ガスの移動速度が遅く、一様ではないガスポケット分布が上下に形成され、火口に近づいたガスポケットから、順次、爆発を繰り返された可能性が高い。

(3) 低噴出率時爆発の他のモデル

中米ガテマラのサンチアギート火山やインドネシアのスメル火山では、溶岩ドーム成長が低噴出率で何十年にもわたって続いており、そこではブルカノ式噴火が断続的に発生している。現象的にはシナブン火山噴火後半の爆発噴火期と類似している。例えば、サンチアギートにおいては、火道上部を上昇するマグマの縁部がシェアを受けて割れ目系が発達しているとし、割れ目系の高温ヒーリングにより閉塞が起こり、火山ガスがトラップされて過剰圧が高まって爆発が起こるとした(Holland et al., 2011)。そこでは、実験岩石学的なヒーリングの時間スケールとサンチアギートの爆発間隔が一致すると提案した。このモデルはシナブン火山の温度やメルト組成を適応すると、爆発の間隔をうまく説明できない。一方、サンチアギートもスメル火山も溶岩尖塔がない点では共通しているが、溶岩尖塔が形成されない理由ははっきりしない。

(5) むすび

本研究では、溶岩ドーム噴火の低い噴出率でもあっても、溶岩荷重と火道上部マグマの過剰圧とのバランスでブルカノ式噴火がおこることを提案した。低噴出率の溶岩ドーム成長で爆発が起こるかどうかの分岐判断としては、活動の末期に溶岩尖塔が形成されるかどうかである。すなわち、地形的に急峻な場所に形成された溶岩ドーム噴火においては、溶岩尖塔が成長する

ことができずに爆発的噴火に移行する可能性がある。低噴出率の溶岩ドーム成長に移行し、MF や LF (Hembusan) などの火山性地震が多く発生することが、火道上部で脱ガスが不十分になったシグナルであり、爆発的噴火が継続するか、内生的成長から溶岩尖塔形成を経て噴火終息に向かうかの分岐時期と考えることができるだろう。

< 引用文献 >

- Caudron, C., Syahbana, D.K., Lecocq, T., Hinsberg, V.V., McCausland, W., Triantafyllou, A., Camelbeeck, T., Bernard, A. and Surono (2015) Kawah Ijen volcanic activity: a review. *Bull Volcanol.*, **77**, 16 doi 10.1007/s00445-014-0885-8.
- Holland, P., Watson, I.W., Phillips, J.C., Caricchi, L and Dalton, M.P. (2011) Degassing processes during lava dome growth: Insights from Santiaguito lava dome, Guatemala. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **202**, 153-166, doi 10.1016/j.jvolgeores.2011.02.004.
- Nakada, S., Shimizu, H., and Ohta, K. (1999) Overview of the 1990-1995 eruption at Unzen Volcano. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **89**, 1-22, doi 10.1016/S0377-0273(98)00118-8.
- Nakada, S., Zaennudin, A., Yoshimoto, M., Maeno, F., Suzuki, Y., Hokanishi, H., Sasaki, H., Iguchi, M., Ohkura, T., Gunawan, H., and Triastuty, H. (2019) Growth process of the lava dome/flow complex at Sinabung Volcano during 2013–2016, *J. Volcanol. Geothermal. Res.*, **382**, 120-136, doi 10.1016/j.jvolgeores.2017.06.012, 2019.
- Umakoshi, K., Takamura, N., Shinzato, N., Uchida, K., Matsuwo, N., Shimizu, H. (2008) Seismicity associated with the 1991-1995 dome growth at Unzen Volcano, Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **175**, 91-99, doi 10.1016/j.jvolgeores.2008.03.030.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 7件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Nakada Setsuya, Maeno Fukashi, Yoshimoto Mitsuhiro, Hokanishi Natsumi, Shimano Taketo, Zaennudin Akhmad, Iguchi Masato	4. 巻 14
2. 論文標題 Eruption Scenarios of Active Volcanoes in Indonesia	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Disaster Research	6. 最初と最後の頁 40～50
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jdr.2019.p0040	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Maeno Fukashi, Nakada Setsuya, Yoshimoto Mitsuhiro, Shimano Taketo, Hokanishi Natsumi, Zaennudin Akhmad, Iguchi Masato	4. 巻 14
2. 論文標題 Eruption Pattern and a Long-Term Magma Discharge Rate over the Past 100 Years at Kelud Volcano, Indonesia	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Disaster Research	6. 最初と最後の頁 27～39
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jdr.2019.p0027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Wallace Paul A, Kendrick Jackie E, Miwa Takahiro, Ashworth James D, Coats Rebecca, Utley James E P, Henton De Angelis Sarah, Mariani Elisabetta, Biggin Andrew, Kendrick Rhodri, Nakada Setsuya, Matsushima Takeshi, Lavall?e Yan	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Petrological Architecture of a Magmatic Shear Zone: A Multidisciplinary Investigation of Strain Localisation During Magma Ascent at Unzen Volcano, Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Petrology	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/petrology/egz016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Pallister John, Papale Paolo, Eichelberger John, Newhall Chris, Mandeville Charles, Nakada Setsuya, Marzocchi Warner, Loughlin Susan, Jolly Gill, Ewert John, Selva Jacopo	4. 巻 8
2. 論文標題 Volcano observatory best practices (VOBP) workshops - a summary of findings and best-practice recommendations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Volcanology	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s13617-019-0082-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Nakada Setsuya, Zaennudin Akhmad, Yoshimoto Mitsuhiro, Maeno Fukashi, Suzuki Yuki, Hokanishi Natsumi, Sasaki Hisashi, Iguchi Masato, Ohkura Takahiro, Gunawan Hendra, Triastuty Hetty	4. 巻 382
2. 論文標題 Growth process of the lava dome/flow complex at Sinabung Volcano during 2013?2016	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Volcanology and Geothermal Research	6. 最初と最後の頁 120 ~ 136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jvolgeores.2017.06.012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Maeno Fukashi, Nakada Setsuya, Yoshimoto Mitsuhiro, Shimano Taketo, Hokanishi Natsumi, Zaennudin Akhmad, Iguchi Masato	4. 巻 382
2. 論文標題 A sequence of a plinian eruption preceded by dome destruction at Kelud volcano, Indonesia, on February 13, 2014, revealed from tephra fallout and pyroclastic density current deposits	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Volcanology and Geothermal Research	6. 最初と最後の頁 24 ~ 41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jvolgeores.2017.03.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sato, H., Holz, F., Botcharnikov, R.E., and Nakada, S.	4. 巻 172
2. 論文標題 Variations of mineral chemistry of mafic enclaves in the 1991-1995 dacite of Unzen volcano, Japan: Variable degrees of microlite re-equilibration in low temperature stagnant magma reservoir.	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Contribution to Mineralogy and Petrology	6. 最初と最後の頁 22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00410-017-133-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Nakada, S.
2. 発表標題 Causes and consequences of lava dome eruptions
3. 学会等名 27th General Assembly, International Union of Geodesy and Geophysics (Montreal) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nakada, S., Zaennudin, A., Yoshimoto, M., Maeno, F., Hokanishi, N., and Iguchi, M.
2. 発表標題 Comparative study of lava dome eruptions at Sinabung and Unzen
3. 学会等名 10th Cities on Volcanoes Conference (Naples) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Setsuya Nakada
2. 発表標題 Causes and consequences of lava dome eruptions
3. 学会等名 27th General Assembly, International Union of Geodesy and Geophysics (Montreal) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nakada, S.
2. 発表標題 Volcanic hazards: Improving the science and communication to the public
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society (Honolulu) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nakada, S., A. Zaenuudin, M. Yoshimoto, F. Maeno, Y. Suzuki, N. Hokanishi, H. Sasaki, and M. Iguchi
2. 発表標題 Growth process of the lava dome/flow complex during 2013-2016 at Sinabung Volcano, Indonesia.
3. 学会等名 Science Assembly of International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI) (Portland) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	前野 深 (Maeno Fukashi)		
研究協力者	外西 奈津美 (Hokanishi Natsumi)		
研究協力者	ザエヌディン アカマド (Zaennudin Akhamad)		