

2 (4) 桜島大規模火山噴火

「桜島大規模火山噴火」グループリーダー 井口正人
(京都大学防災研究所)

活発な噴火活動を60年以上続け、今後大規模噴火の発生が予想される桜島を対象に、各研究項目間で緊密な連携と成果の共有を図り、住民避難を視野に入れた総合的研究を推進する。観測研究を通じて、マグマの動きとマグマ供給系への理解を深め火山活動推移モデルを高度化することで、噴火発生予測研究を進展させる。噴火発生前の規模の予測と、噴火発生直後の噴出物の把握を即時的に行うことで災害予測研究を進める。災害予測に基づき、住民への情報伝達などの火山災害情報に関する研究と、避難や交通網の復旧などの対策に資する研究を行う。他の火山における類似研究と連携し、都市、中山間地域、離島などの地理的、社会的環境による対策の違いなど幅広い研究を目指す。本総合研究グループの研究項目と各課題担当は図1に示す通りであり、異なる部会に属する27の研究課題が参画している。令和2年度は、11月に対面とオンラインによるハイブリッド研究集会を開催した。本報告では、研究集会とグループに参画している課題の成果から大規模噴火研究に資する知見を取りまとめた。

マグマの動きとマグマ供給系への理解

桜島では1955年10月以降、南岳あるいはその東山腹の昭和火口において噴火活動が続いており、最近の火山活動においてもマグマ供給系に関する知見が蓄積されつつある。2015年8月15日に1000回近い群発地震を伴った開口性のマグマ貫入イベントが発生した。割れ目は広域応力場に整合的な東南東-西北西方向に開口したが、北北東-南南西方向に延びる割れ目の走向に沿って、開口の前半では浅部で、後半ではやや深部において地震が発生した(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI07])。また、解析例が一例と少ないものの、規模の大きい南岳の爆発に伴う地盤変動は、南岳直下の浅部とより深部に位置する2つの収縮力源により説明され、深部の収縮力源は北岳からさらに北東方向に伸びる割れ目の収縮による可能性があることが示された(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI07])。これまで、桜島の地盤変動を励起する圧力源として球状圧力源がしばしば適用されてきたが、よりマグマの移動しやすい開口性の割れ目がマグマの貫入の初期段階では支配的である可能性がある。

1914年噴火後の地盤変動測定により、桜島の北部は北へ、南部は南へそれぞれ数メートル変位したことが知られており、橋本・多田(1988)は開口量20mの東西方向の割れ目を考えたが、東西方向の割れ目は先に述べた北北東-南南西方向の割れ目(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI07])に共役的である。2015年8月15日に発生した群発地震活動の後半に発生したやや深部の地震活動は、共役的に発展しようとした断層の初期段階を見ているのかもしれない。したがって、広域応力場に整合的な断層の動きだけでなく、共役的な地震活動にも注目する必要がある。

災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画(第2次)において、火山活動推移モデルの構築は重点課題とされており、桜島の大規模噴火の発生予測においても最も

重要な観点に位置付けられる。昨年度の報告で述べたように、大規模噴火に至る前駆過程として、始良カルデラ下のマグマ溜まりの膨張による地殻内応力集中による桜島から離れた場所での地震発生（1913年6月）、桜島島内での二酸化炭素濃度の増加（7月）、桜島島内の弾性変形を伴う非地震性地盤変動（7月～12月）、噴火の30時間前から始まった群発地震と急速な地盤変動というプロセスを推定した。このうち、注目すべきは地中からの二酸化炭素の発散量の増加であり、本総合研究グループでも小型センサーで二酸化炭素濃度の上昇を測定するためのパラメータの検討が進められた（東京工業大学〔課題番号：TIT_02〕）。

桜島の多様な噴火活動において、マグマの貫入速度が大きい場合は爆発的な噴火（explosive）、小さい場合は溶岩の噴出のような穏やかな噴火（effusive）になることを昨年度の報告で述べた。今年度はマグマの貫入速度が小さく、effusiveな噴火となったインドネシアのシナブン火山とメラピ火山において水蒸気噴火から溶岩ドーム形成に至るプロセスを明らかにし（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI06〕）、マグマの貫入速度とその後の噴火規模・様式に明瞭な対応があるという主張を強化した。

大規模噴火発生時の噴火活動推移把握のための観測技術

大規模噴火が始まるとその噴火活動の推移が最も注目される。1914年桜島噴火は、プリニー式噴火で始まり、火砕流発生を経て溶岩流出で終息した。このような大規模噴火発生時には観測インフラが破壊されるため観測の維持は容易ではないが、近年はこのような状況においても観測の継続を可能にする様々な観測技術の発展が進んでいる。衛星画像によるリアルタイム火山観測（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_07〕）や干渉SARによる地盤変動の把握（気象庁〔課題番号：JMA_03〕）は、火山周辺の観測インフラに依存しない。また、ドローンを用いた観測技術（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_07〕）は火山活動下においても安全性の高い観測が可能であるし、920 MHz帯を用いた地震波形伝送（東北大学〔課題番号：THK_13〕）は、応急的な観測網の復旧に有望である。古典的ではあるが、カメラによる遠望観測の強化（気象庁〔課題番号：JMA_12〕）は必須である。火山ガスについては、簡易トラバース装置を用いた二酸化硫黄放出率の測定（東京大学理学系研究科〔課題番号：UTS_06〕）が機動的である。

ハザード予測

大規模噴火では、降下火山灰・軽石、火砕流、溶岩流、地震、津波、土石流など様々な現象がハザード要因となる。このうち、降下火山灰・軽石の拡散と降下域に関して、桜島の1914年噴火では、初期フェーズであるプリニー式噴火によって多量の火山・軽石が桜島の南東方向に降下したことはよく知られているが、桜島の西方についても、その方向に位置する祇園之洲砲台跡や鹿児島紡績所跡（鹿児島市）など、近世末の遺跡の遺構の発掘からこれらを被覆する降下火山灰層が発見されている（奈良文化財研究所埋蔵文化財センター〔課題番号：NAB_01〕）。これらの火山灰は、プリニー式噴火後の溶岩噴出に伴うブルカノ式噴火により放出されたものであり、気象条件によってハザードは常に変わりうることを示している。大規模噴火では噴火活動は長期間継続することが多いので、風速場の変化も予測する必要がある。次世代火山研究推進事業のうち「リアルタイムの

火山灰ハザード評価手法の開発」では噴火発生に伴う諸現象を即時的に解析して火山灰の拡散範囲をシミュレーションにより予測するだけでなく、噴火前の地盤の膨張量から噴出マグマ量を予測し、火山近傍の高分解能の風速データをもとに噴火発生前の拡散予測も行われているが、噴出率と風速場の時間発展を考慮した、より実践的なシステムへ発展させる必要がある。

1914年桜島噴火でも噴火開始から1日後に火砕流の発生が見られる（小林，1982）。2009年以降の昭和火口噴火による火砕流発生事例の解析から、火砕流は半年から1年に及ぶ一連の噴火活動期のうち後半部分にあたる、新鮮なマグマが放出し終わり脱ガスが進んだマグマが噴火により放出される地盤変動の収縮期に発生しやすいことがわかった（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI11〕）。このことは、大規模噴火においても噴火活動がある程度進行した後に火砕流が発生することと整合的である。

1914年噴火後には多量の軽石・火山灰が降下した大隅半島側で、降雨がトリガーとなる土石流あるいは洪水が頻発した。降灰によるクラストが斜面表面を覆った条件に対する降雨流出・土砂流出に関する室内実験により、クラストの存在が表面流量を増加させることが分かった（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI12〕）。

防災リテラシーの向上

桜島の大規模噴火を想定した防災リテラシーの向上においては、現在の火山活動状態と今後中期的に起こりうる噴火への認識、噴火前後の危機的状況における避難等の行動、避難時の災害イメージの醸成、復旧・復興への行動イメージなどを考慮する必要がある。桜島では2020年6月4日の爆発によって火山岩塊が火口から南西3.3 kmの居住地域まで達した。本来、噴火警戒レベルが5に引き上げられる重大な事象であったことから、桜島に居住する住民へのアンケート調査をおこなった。その結果、気象庁の発表する噴火警戒レベルとその対応については認知度が高いものの、警戒を要する範囲については認知が不十分であることがわかった（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI13〕）。一方、大規模噴火によって鹿児島市街地側への大量降灰災害に対して、大幅に被災影響を軽減できると考えられる市街地側住民の事前避難を実現を目指し、火山の予知・予測情報が適切な避難へと結びつくような情報の作成と、ワークショップにおける専門家と住民との対話を通じて共創する研究に着手した（拠点間連携共同研究〔課題番号：CT0C16〕）。

これまでの課題と今後の展望

火山災害では避難をもってその対策とするので、避難対応が最も重要である。桜島から全島避難には時間を要するので、噴火警戒レベル4、5の発表、さらに、避難の意思決定のタイミングが避難対策の成否を決定づける。現在は、噴火警戒レベルの判定基準が公表されているので、火山活動が基準を満たしさえすれば、避難行動を開始できる。判定基準は1914年噴火の事例を参考に決定されているが、次の大規模噴火でも同様の規模の地震活動が発現する保証はない。さらに、鹿児島市は鹿児島市街地域からの避難を地域防災計画に組み込んだが、避難対象人口が10万～20万人と見積られる避難の実施は桜島島内からの避難よりもさらに多くの時間を要する。鹿児島市街地側の避難における課題は以下の通りである。①避難のための時間を稼ぐため、2～3日前における噴火の前

兆現象の検知と噴火発生の切迫度評価の高度化、②プリニー式噴火継続中の時間帯を通しての風速場の高精度の予測、③プリニー式噴火の後も溶岩流出を伴いながら火山灰の放出は長期間続くので、長期継続降灰への対応。④鹿児島市側において避難という対応があることを周知させること（桜島では、過去の噴火の経験と50年に及ぶ避難訓練により十分なリテラシーがあるのに対し、鹿児島市においては不十分）、⑤大規模噴火を踏まえた降灰強度のレベル化。

火山活動が噴火警戒レベルの判定基準を満たしてくれればよいが、より複雑な現象を示すことも十分あり得るので、むしろ、過去に住民の避難が行われた火山における避難の意思決定に至るまでの事例プロセスを調査すべきと考える。

令和3年度においても12月に総合研究グループの研究成果、課題間連携を確認する研究集会を行い、総合的な研究を推進する。

成果リスト

- Brown, J. R., R. N. Taylor, and M. Iguchi, 2020, Using high-resolution Pb isotopes to unravel the petrogenesis of Sakurajima volcano, Japan, *Bull. Volcanol.* 82, 36, doi:10.1007/s00445-020-1371-0.
- Nomura, Y., M. Nemoto, N. Hayashi, S. Hanaoka, M. Murata, T. Yoshikawa, Y. Masutani, E. Maeda, O. Abe, and H. K. M. Tanaka, 2020, Pilot study of eruption forecasting with muography using convolutional neural network, *Scientific Reports* volume 10, 5272. doi.org/10.1038/s41598-020-62342-y.
- 平野舟一郎・八木原寛・仲谷幸浩・後藤和彦, 2020, 2017年の臨時地震観測による鹿児島湾・喜入沖の震源分布と発震機構—鹿児島地溝形成に伴う断層に沿った顕著な地震活動—, *鹿児島大学理学部紀要*, 53, 32-44, <http://hdl.handle.net/10232/00031553>.
- Hotta, K. and M. Iguchi, 2021, Tilt and strain change during the explosion at Minamidake, Sakurajima, on November 13, 2017, *Earth Planet. Space* 73, 70, doi:10.1186/s40623-021-01392-6.
- Iguchi, M., H. Nakamichi, and T. Tameguri, 2020, Integrated study on forecasting volcanic hazards of Sakurajima volcano, Japan, *J. Disaster Res.*, 15, 174-186, doi:10.20965/jdr.2020.p0174.
- Iguchi, M., 2020, Chapter 3 Resilience to Volcano- and Landslide-Related Hazards, in “Disaster Risk Reduction and Resilience”, ed. by M. Yokomatsu and S. Hochrainer-Stigler, *Disaster and Risk Research: GADRI Book Series*, Springer, 25-44, doi:10.1007/978-981-15-4320-3_3.
- Iguchi, M., 2021, Chapter 18 Volcano emergency planning at Sakurajima volcano, in “Forecasting and Planning for Volcanic Hazards, Risks, and Disasters Volume 2”, ed. by P. Papale, *Hazards and Disasters Series*, Elsevier, 635-668, doi:10.1016/B978-0-12-818082-2.00018-4.
- Ishii, K., A. Yokoo, M. Iguchi, and E. Fujita, 2020, Utilizing the solution of sound

diffraction by a thin screen to evaluate infrasound waves attenuated around volcano topography, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 402, 106983, doi:10.1016/j.jvolgeores.2020.106983.

風間卓仁・山本圭吾・大柳諒・岡田和見・大島弘光・井口正人, 2020, 桜島火山における繰り返し相対重力測定(2019年5月~2020年3月), 京都大学防災研究所年報, 63B, 108-117, <http://hdl.handle.net/2433/260813>.

Koike, M. and H. Nakamichi, 2021, Dike inflation process beneath Sakurajima volcano, Japan, during the earthquake swarm of August 15, 2015, *Front. Earth Sci.* 8, 600223, doi:10.3389/feart.2020.600223.

Le, H.V., T. Murata, and M. Iguchi, 2020, Can Eruptions Be Predicted? Short-Term Prediction of Volcanic Eruptions via Attention-Based Long Short-Term Memory, *AAAI-20/IAAI-20 Technical Tracks*, 08, 34, 13320-13325, doi:10.1609/aaai.v34i08.7043.

Maher, S. P., R. S. Matoza, C. D. de Groot-Hedlin, K. L. Gee, D. Fee, and A. Yokoo, 2020, Investigating spectral distortion of local volcano infrasound by nonlinear propagation at Sakurajima Volcano, Japan, *J. Geophys. Res. Solid Earth* 125, e2019JB018284, doi:10.1029/2019JB018284.

村田泰輔, 2020, 災害痕跡データベースの構築ー災害の軽減に向けた考古学の新たな挑戦ー, 佐藤禎一(編)「學士會会報」, 一般社団法人学士会, 942, 57-70.

村田泰輔, 2021, 論説 災害痕跡データベースの構築・公開に向けて~考古学の新たな挑戦, 西藤公司(編)「地域防災」, 一般財団法人日本防火・防災協会, 36, 4-9.

中道治久・他, 2020, 2019年桜島火山人工地震探査の概要と過去の探査との比較, 京都大学防災研究所年報, 63B, 100-107, <http://hdl.handle.net/2433/260812>.

Shinohara, H., R. Kazahaya, T. Ohminato, T. Kaneko, U. Tsunogai, and M. Morita, 2020, Variation of volcanic gas composition at a poorly accessible volcano: Sakurajima, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 407, 107098, doi:10.1016/j.jvolgeores.2020.107098.

Yamasaki, T., F. Sigmundsson, and M. Iguchi, 2020, Viscoelastic crustal response to magma supply and discharge in the upper crust: Implications for the uplift of the Aira caldera before and after the 1914 eruption of the Sakurajima volcano, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 531, 115981, doi:10.1016/j.epsl.2019.115981.

研究項目と各課題担当

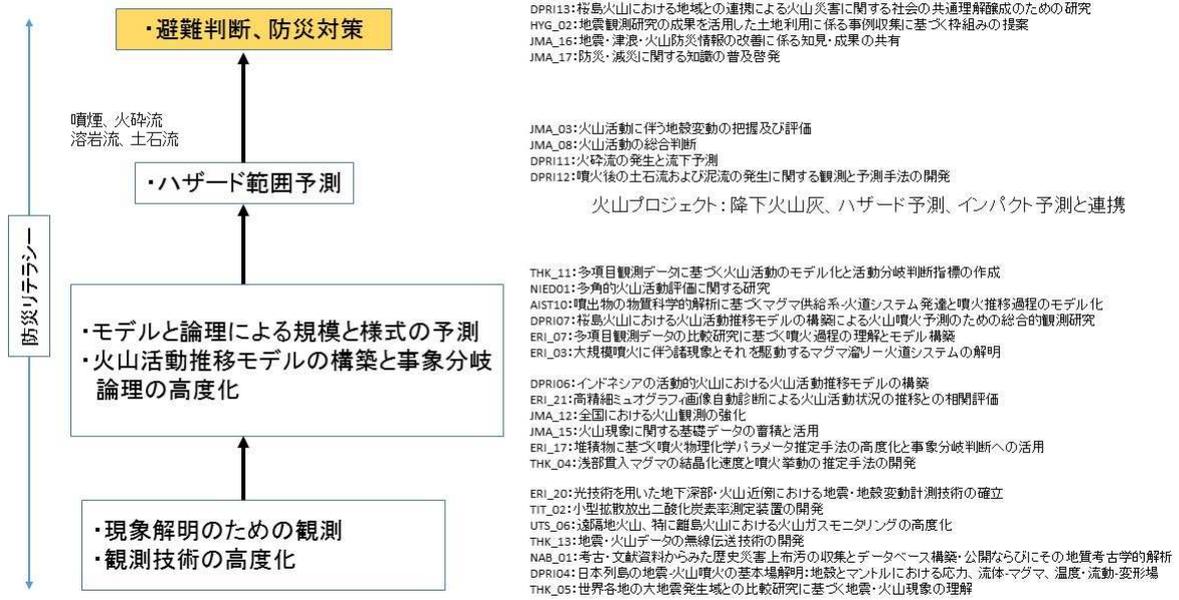


図 1. 桜島総合研究グループの研究項目と各課題