

2（4）桜島大規模火山噴火

「桜島大規模噴火」総合研究グループリーダー 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には異なる部会に属する27の研究課題が参画している。研究は年次的に研究集会をハイブリッド開催することで進めた。大規模噴火研究を総合的に進めるためには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）の研究課題だけでは不足なので、文部科学省の委託研究である次世代火山研究推進事業のうち課題D「火山災害対策技術の開発」と京都大学防災研究所に設置された火山防災連携研究ユニットが研究集会に参加している。

5年間の成果

1914年に桜島で発生した大規模噴火は、20世紀以降我が国における最大規模の噴火である。火山灰軽石などの堆積量は0.6立方キロメートルで、VEI（火山爆発強度指数）4とされるが、溶岩の流出が多く、1.5立方キロメートルのマグマが噴出した。また、噴火開始から8時間後にM7の地震が鹿児島湾において発生した。

本総合研究グループにおける研究発表は以下の4つに分けられる。1）現象解明のための観測、過去の噴火履歴・火山の基本場、モデル化など現象の理解、2）火山活動推移モデルの構築を目指した火山噴火発生予測の研究、3）ハザード予測の高度化、4）防災リテラシーの向上と対策研究である。

1）現象解明のための観測、過去の噴火履歴・火山の基本場、モデル化など現象の理解

この大規模噴火に前駆して様々な異常現象が観測されたが、大規模噴火に至るまでの過程は、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時間前からの群発地震と急速な地盤変動、の4段階に整理される。前駆過程において重要なのは「マグマ貫入に伴う火山体の弾性変形と応力集中→応力が岩石の破壊強度を超えることによって発生する火山構造成地震→噴火の発生」というプロセスをとることであり、このプロセスは世界の多くの火山においてみられる。

南岳山頂噴火の最盛期（1970年代から1990年代前半まで）には、地盤沈降から予測さ

れる以上に重力値が増大し桜島直下のマグマの質量の増加があった。このことから、マグマからの揮発性成分の分離が進行し、脱ガスした重いマグマの蓄積が進行したことが推定される。最近の南岳の噴火活動においても二酸化硫黄放出量が多い状態が続いており、脱ガスが進行している。今後、多量のマグマが貫入するとき最初に噴出するのは脱ガスした重いマグマに相当する溶岩と考えられ、過去の大規模噴火のようなプリニー式噴火から始まるシナリオとはならない可能性が高い。したがって、噴火シナリオの多様化が望まれる。実際、セントビンセント島のLa Soufriere火山噴火は2020年12月に溶岩流出で始まり、翌年4月にプリニー式噴火に移行・拡大した。

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、20 m開口した東西方向の割れ目によりモデル化されている。このことから噴火発生前のマグマのダイク貫入が重要であることが指摘できる。東西方向の割れ目は、広域応力場に整合的に東南東－西北西に開口した2015年8月15日の群発地震を伴った開口性のマグマ貫入イベントの割れ目の北北東－南南西方向の走向に共役的である。この群発地震活動における火山構造成地震の震源分布とメカニズム解（Koike and Nakamichi, 2021）を詳細にみると、後半に発生したやや深部の地震活動は、主断層の開口に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。大規模噴火に伴うマグマ貫入には、ダイクの発展過程にしたがって、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。

2) 火山活動推移モデルの構築を目指した火山噴火発生予測の研究

大正噴火、昭和噴火と様々な噴火様式（ブルカノ式、ストロンボリ式、火山灰連続放出）をもつ南岳・昭和火口山頂噴火活動について、地盤変動などから見積もられるマグマの貫入速度と噴火規模・様式との関係を整理した。この手法はインドネシアのメラピ火山にも適用することが可能であり、水蒸気噴火ではマグマの貫入速度は検出限界以下であるが、プリニー式噴火では著しく大きい。マグマの貫入速度は、噴火の規模と様式を予測する指標となりうる。

地盤変動はマグマ性噴火発生前に確実に検知できる段階となったが、そのデータの初期段階から噴火の発生時刻と規模を予測することは依然として難しい。そこで、確率的発生予測の考え方を導入し、確率的な発生時刻と規模の予測を行った。南岳と昭和火口における山頂噴火発生前の地盤変動に関するビッグデータを取り扱うことにより、統計的な処理を進め、確率的発生予測手法を提案した。

3) ハザード予測の高度化

ハザードごとの予測においては噴火の規模を予測することが最も重要である。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の予測については、次世代火山研究推進事業のサブテーマ「リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発」によって、噴火発生に伴う地震動と地盤変動の線形結合により噴出率を即時的に解析し、その時点の風速場に基づいて火山灰の拡散範囲をシミュレーションすることにより予測する手法を開発した。さらに、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っている。

火砕流についても同様にシミュレーションにより予測可能である。しかし、噴出するマグマのうちどれぐらいが火砕流として流下するか、その配分予測に依然として問題が存在する。また、火砕流は常に発生するわけではないので、その発生そのものの発生予測も重要なテーマである。これまで昭和火口の噴火活動からの解析から、地盤変動量が大きい場合や、数か月程度の地盤の収縮期において火砕流が発生しやすいことが知られている。2009年以降の桜島の噴火活動においては、一連の噴火活動は爆発を頻発させながら地盤が膨張する期間と、火山灰を多量に噴出しながら地盤が収縮する期間からなる。膨張期は揮発性成分を多量に含んだマグマの貫入に対応し、収縮期は脱ガスしたマグマの火山灰噴出に対応することがマグマの見かけ密度の推移から知られているので、火砕流はマグマの見かけ密度が大きくなった時に発生しやすいといえる。

降雨がトリガーとなる桜島の土石流の予測については、土石流発生ポテンシャルの把握と、1回の土石流の流出土砂量を規定する雨の降り方の把握が重要であることから、焼岳等における知見を桜島にも活用できるかどうかを評価するために観測を進めた。また、土石流発生ポテンシャルは降下火山灰量に依存するので、降下火山灰の評価が重要である。土石流発生予測には降雨量と降灰量の観測が重要であるが、山頂近傍では直接観測をすることができない。それを可能にする手法が気象レーダ観測である。気象レーダにより流溪ごとの降雨量が把握でき、土砂流出量の予測が可能となっただけでなく、レーダの反射強度の空間分布を降灰量の評価にも活用する手法が開発された。

4) 防災リテラシーの向上と対策研究

桜島の大規模噴火を想定した防災リテラシーについては、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。現在の活動状態と警報は気象庁の発表する噴火警戒レベルにより情報が提供されるが、桜島周辺ではその認知度は高い。一方、2022年7月24日の桜島南岳の爆発では、火山岩塊が2.4 kmを超えて飛散したとして気象庁は噴火警戒レベルを5（避難）に引き上げ、桜島の一部住民の避難が行われた。この事例においては、火山岩塊の飛散距離推定値に疑問はあるものの、警報とその後の避難指示等の防災対策に関わる情報に関して大きな問題が顕在化した。レベル5は噴火の影響が居住地域に及ぶことを表しているだけであり、警戒を要する範囲の情報が十分に反映されていない。レベルよりも警戒を要する範囲を前面にだした警報発表が望まれる。

大規模噴火においては、風向きによっては鹿児島市街地側への大量降灰災害が予想される。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の実現を目指し、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を、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。これまでに9回のワークショップを開催し、住民の大量降灰からの避難に関する意識を高めた。

令和5年度の成果

マグマのダイク貫入が大規模噴火においても重要であることが提起された。南岳活動

期においてもダイク貫入イベントは発生しているが、大規模噴火の前駆過程においてもダイクの発達過程が重要である。桜島南岳噴火に関連するビッグデータを取り扱うことにより、より詳細な圧力源モデルが提示され、統計的な処理と確率的発生予測の考え方が進んだ。火山灰ハザード予測について多くの知見が得られるとともに、火山岩塊、火砕流、土石流についても研究が進んだ。大規模噴火とそれからの避難について様々な取り組みが行われた。噴火発生前の警戒を要する範囲（ハザード予測）の設定は依然として重大な問題であり、広域避難周知の長期的な視野の取り組みが必要である。

これまでの課題と今後の展望

これまでの研究において欠けている課題として、大規模噴火に対してレジリエントな災害対応戦略、情報伝達（特に警戒を要する範囲の重要性）、ハザード予測の高度化があげられる。特に噴火切迫時においては、モニタリングデータからリアルタイムでハザードを評価していく必要があり、そのためにはハザード要因に対応する噴火様式とそれぞれのハザード要因ごとの噴出物量が重要である。噴火発生前の警戒を要する範囲（ハザード予測）は、火山防災協議会において避難計画の基礎データとして決められているが、過去と同様の噴火規模と噴火様式が繰り返される保証はないので、警戒を要する範囲の設定は依然として重大な問題であるし、モニタリングによってしっかり答えを出せる研究が必要である。

大規模噴火による多量の軽石降下からの避難の意識は依然として低いままである。避難は必然的に広域避難にならざるを得ないし、その周知に向けて長期的な取り組みが必要であろう。さらに、桜島の大規模噴火では火山灰が東北地方南部まで達すると予想されるため、航空機、鉄道、道路などの全国的な交通網に影響が発生すると考えられる。このための対策研究も加速する必要がある。

本建議は元々は観測研究計画から発展してきている。そもそも、大規模噴火に向けての観測は何を目指すかの議論が不足しており、現在進行中の火山活動を追いつけることに注視しすぎている。先に起こるであろう活動を予測した上での観測研究戦略が必要である。

成果リスト

- 井口正人・為栗健・平林順一・中道治久, 2019, マグマ貫入速度による桜島火山における噴火事象分岐論理, 火山, 64, 2, 33-51.
- Iguchi, M., Nakamichi, H., Takishita, K., Poulidis, A. P., 2022, Continuously operable simulator and forecasting the deposition of volcanic ash from prolonged eruptions at Sakurajima Volcano, Japan, Jour. Disast. Res., 17, 805-817.
- Iguchi, M., Yamada, T., Tameguri, T., 2022, Sequence of volcanic activity of Sakurajima volcano, Japan, as revealed by non-eruptive deflation, Frontiers in Earth Science, 10, 727909, <https://doi.org/10.3389/feart.2022.727909>.
- Kobori, T., Maki, M., Fujiyoshi, Y., Iguchi, M., Fukushima, S., 2022, Estimating volcanic eruption column height and growth rate using X-band marine radar at the Sakurajima Volcano, Scientific Online Letters on the Atmosphere, 18, 231-235, doi:

10.2151/sola.2022-037.

Koike, M., Nakamichi, H., 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.

真木雅之・鈴木郁子・井口正人・Shakti P.C., 2019, 気象レーダによる降灰量推定－2013年8月18日桜島噴火のZ-RA関係式－, *火山*, 64, 219-241.

Rahadiano, H., Tatano, H., Iguchi, M., 2024, Uncertainty analysis of the prediction of massive ash fallout from a large explosive eruption at Sakurajima volcano, *Earth and Space Science*, 11, e2023EA003174. <https://doi.org/10.1029/2023EA003174>.

Takebayashi, M., Ohnishi, M., Iguchi, M., 2021, Large volcanic eruptions and their influence on air transport: the case of Japan, *Journal of Air Transport Management*, 97, 102136, doi.org/10.1016/j.jairtraman.2021.102136.

Takishita, K., Poulidis, A. P., Iguchi, M., 2024, Tephra segregation profiles based on disdrometer observations and tephra dispersal modeling - Vulcanian eruptions of Sakurajima volcano, Japan, *Earth, Planets and Space*, 76, 29.