

## 2 (4) 桜島火山噴火総合研究

「桜島火山噴火」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)

桜島噴火総合研究グループは、桜島火山におけるマグマ活動発展過程の研究を中核として、ミュオグラフィーなどの新手法を適用しつつ、火山現象を解明し、低頻度大規模現象の再考も含めた事象分岐論理の構築と火山灰拡散予測研究を行うことにより最終的に火山災害軽減研究を推進する。

### 5年間の成果

#### 1. 地震・火山現象の解明のための研究

##### (2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

桜島大正噴火の前駆地震の震度から、マグニチュードおよびエネルギーを算出し、前駆地震全体のエネルギーを $1.3 \times 10^{14}$ Jと推定した。また、噴火開始後ではあるが、最大地震の桜島地震の震源位置を鹿児島測候所から南南東方向約6kmの鹿児島市街地沖の極浅部に推定した。さらに、この地震のメカニズムを検討し、桜島の南西沖5kmの深さ10kmの正断層のメカニズムが最も観測波形と適合することを示した。

##### (5) 火山現象のモデル化

###### 近年の桜島の活動を以下にまとめる。

昭和火口における噴火は2006年6月4日に58年ぶりに発生した。まず、桜島昭和火口噴火の前兆現象について述べる。1955年から繰り返されていた南岳におけるブルカノ式噴火活動は2001年以降低下したが、2003年からA型地震が南西部の深さ6-9kmや若尊火山周辺で発生するようになり、地震活動が高まった。また、2004年10月～2005年2月にかけて、GNSS観測によって基線長の顕著な伸長が観測された。2006年に入り、昭和火口周辺の噴気活動が高まるとともに、地表面の温度上昇と熱異常域の拡大が検出された。

次に、噴火活動の推移について述べる。2006年6月4日に始まった昭和火口における噴火は約2週間続いて終息した。2007年も5月から約3週間同様な噴火が発生した。2006年と2007年の噴火はマグマ水蒸気噴火であった。

2008年2月3日と2月6日に火砕流を伴う噴火が発生し、2008年は7月28日まで噴火が間欠的に発生した。2008年2月の噴火の前には、昭和火口周辺の噴気活動が活発化し、白煙は約1kmの高度に達した。

2009年から昭和火口におけるブルカノ式噴火活動が活発化し、噴火活動期は2015年6月頃まで続いた。この間に噴火活動の消長が見られるが、噴火活動活発化とほぼ期を同じくして顕著な地盤の膨張が検出されるという特徴がある(2009年10月～2010年5月, 2011年11月～2012年2月, 2015年1月～6月)。マグマ貫入と同時に噴火活動が活発化するの、開口型火道へのマグマ貫入の特徴といえよう。

2015年8月15日には急速な地盤変動と火山性地震の群発現象が発生したが、噴火活動に直接的に結び付かなかった。先に述べた開口型火道へのマグマ貫入では、等方的な膨張が

見られるのに対し、2015年8月15日の地盤変動では、北西-南東方向への伸長が卓越することから、北東-南西方向に走向をもつ開口割れ目へのマグマの貫入モデルが提示された。

その後、昭和火口における噴火活動は著しく低下した。2017年4月以降に、噴火発生回数は持ち直したが、2017年11月以降は、南岳において噴火活動が発生するようになり、昭和火口の活動は停止した状態にある。

このような活動の下でデータの蓄積が進んだ結果、以下の知見が得られた。

[1]昭和火口において発生する個々の噴火の約90%について前駆する山体膨張と噴火に伴う収縮が観測された。噴火発生に先行する伸長時間、伸長量、伸長量と収縮量の比について統計解析を行ったところ、先行伸長継続時間の頻度、伸長量および伸長速度の頻度、伸長量と収縮量の比の頻度は対数正規分布を示す。これらのことは、爆発に先行する伸長継続時間から発生時刻を、また、膨張量から爆発の規模を確率的に予測することが可能であることを意味する。さらに、噴火発生に先行する伸長ひずみは時間の経過とともに減速、停滞することが多い。この時、BH型地震（卓越周波数5Hz）が加速度的に多発する場合があるので、この場合は、噴火発生時刻の予測が可能となる。

[2]GNSS、水準、傾斜・ひずみの複合的地盤変動観測から、昭和火口噴火活動期の地盤変動は、始良カルデラ下深さ10kmと北岳下4kmの2つの増圧源および南岳下1kmの減圧源によりモデル化された。始良カルデラおよび北岳にはマグマは供給され体積が増加したが、噴火口に近い南岳下では活発な噴火活動を反映して供給量を放出量が上回りマグマの体積が減少した。

[3]2009年～2016年に、反射法探査を毎年繰り返すことにより、始良カルデラから桜島へのマグマの供給路があるとされる桜島北東部において、2009年10月以降の高温で新鮮なマグマ貫入によるマグマ溜まりの速度低下と解釈できる地下構造の時間変化を検出した。人工地震探査に加え、地震波干渉法による地下構造の変化の抽出を試み、波形の相関係数の変化が捉えられつつある。

[4]2009年のマグマ貫入期に先行して同年4月～5月には昭和火口の東4kmにある黒神観測井の温泉ガス中の二酸化炭素および水素の濃度が急激に増加した。これは、2009年のマグマ貫入期に先行する唯一の現象である。また、2009年10月～2010年5月、2015年1月～6月のマグマ貫入期には、噴出物のガラス中の二酸化ケイ素の組成は低下し、玄武岩マグマの関与が指摘されている。火山灰に付着する塩素イオンと硫酸イオンの比は2009年10月以降のマグマ貫入期に対応して増加した。

## 2. 地震・火山噴火の予測のための研究

### (4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

先に述べた昭和火口の噴火活動期において得られた知見に、1914年大正噴火、1946年昭和噴火、1955年～2005年の南岳山頂噴火に関する考察を加えることにより、桜島火山へのマグマの貫入速度を分岐条件とする経験的な噴火事象分岐論理を構築した(図1)。南岳を中心とする既存火道系へマグマが貫入する場合は、ブルカノ式噴火( $1-8 \times 10^5 \text{m}^3/\text{日}$ ) > 連続火山灰放出( $\sim 1 \times 10^5 \text{m}^3/\text{日}$ ) > ストロンボリ式( $0.2-2 \times 10^5 \text{m}^3/\text{日}$ )噴火の順にマグマの貫入速度が大きい。昭和火口のブルカノ式噴火はこれらよりもさらに小さく $10^4 \text{m}^3/\text{日}$ のオ

オーダーに過ぎない。ただし、溶岩噴泉のような噴火に至る前は、 $10^5\text{m}^3/\text{日}$ のオーダーに達し、さらに昭和噴火のような2億  $\text{m}^3$  級溶岩流出では、 $10^6\text{m}^3/\text{日}$ のオーダーと推定される。一方、新規火道を形成する場合、 $10^6\text{m}^3/\text{日}$ 級のマグマ貫入では、噴火は発生していない(2015年8月15日マグマ貫入イベント)が、プリニー式噴火から始まる山腹噴火である大正噴火では、マグマの貫入速度が $2\times 10^8\text{m}^3/\text{日}$ と推定された。地盤変動がほとんど検出できていない場合(2006年、2007年昭和火口噴火)は、温度上昇、噴気量の増加などが指標として考えられる。この場合の噴火様式は、水蒸気噴火もしくはマグマ水蒸気噴火である。

### 3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

#### (4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

降下火山灰の即時予測手法として以下の成果が得られた。[1] 桜島の火口を取り巻くように設置された13台のディストロメータによって降下火山灰量及び密度がリアルタイムで把握できるようになった。[2] XバンドMPレーダーによって、霧島新燃岳、桜島、口永良部島、諏訪之瀬島の噴火に伴う噴煙の高度等の外形情報、噴煙柱形成、移流・拡散過程が把握できた。特に、冠雲によって噴煙が目視できない時でも、レーダーにより噴煙を可視化できるので、悪天候時における有効性が示されたといえる。光を使用するライダー観測は極めて希薄な噴煙も捕捉できるところに特徴がある。静穏時でも微小な火山灰粒子を含む白煙が放出されていることが確認され、偏光解消度から粒子の形状が推測可能であることが示された。火山噴火の噴煙をGNSS衛星からの電波が通過する際に、搬送位相遅延量とSNRに顕著な変化があることが桜島、阿蘇山の噴火で検出され、衛星と受信機を結ぶ異常伝搬経路の交線から噴煙高度が推定された。[3] XバンドMPレーダーによって観測された桜島噴火の噴煙の反射強度の空間分布を地上降灰量分布と対比することにより、レーダー反射強度から地上降灰量を求める経験式が得られた。[4] PUFFモデルを用いたシミュレーションによって得られる降下火山灰予測量と観測データを対比して、良好な結果が得られた。[5] 噴火に伴う地震動振幅と地盤変動の線形結合から火山灰放出率と噴煙高度を決定し、それを入力条件とする火山灰拡散予測シミュレーションを実装した(図2)。

#### (5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

噴火活動が激化している桜島において、火山噴火予知研究成果をレビューするセミナーを開催するとともに、噴火事象系統図にリストアップされる桜島の噴火の規模と様式について、前駆活動及び火山噴火推移の事象の発現に沿った避難計画策定の可能性について検討した。前兆事象と噴火規模・様式との対応は上記2.(4)に述べたとおりである。これまでの観測研究から、始良カルデラにおけるマグマの蓄積量は、最近10年間で1914年の大正噴火のマグマ量に匹敵する量に達していることが明らかとなっている。したがって、防災対策を要する噴火規模としては、まず、大正噴火級を想定した。大正3年の噴火に前駆する活動では火山性地震のエネルギー積算量が $10^{14}\text{J}$ に達するなど、顕著な違いが見られるので、地震エネルギー積算量は前兆事象と噴火規模・様式との対応において判断条件となる。大正噴火前の住民の証言から噴火に至る前駆過程を考察し、それに基づいたシナリオに沿って自治体の机上防災訓練が行われた。

本研究課題においては、現在の避難計画でも1914年大正噴火級で避難が必須とされる桜

島島内よりもさらに広域における大量降灰からの避難について5年間かけて検討した。まず、対象区域において広域避難を実施する場合の対象人口及び避難に要する時間を算出した。その後、住民の避難意向アンケートを実施し、避難する住民の人口を限定したうえで、シミュレーションを行い。長距離避難の意向を持つ20%の住民が避難するのに要する時間は約5時間という結果を得た。一方、大量降灰を想定した避難の場合、影響を受ける区域とその人口は気象条件に大きく依存する。最近の長期間の気象条件を考慮したシミュレーションを行い、夏季において対象人口が大きく増加する結果を得た。

さらに、噴火災害時における早期復旧計画についても検討した。2011年霧島新燃岳噴火について、降灰量と道路の通行規制の有無の関係を機能的フラジリティ曲線で近似し、降灰量に対する通行規制の確率分布を求めた。これを用いて、噴火による交通量の初期低下率を把握することが可能となる。さらに、道路の清掃時間、交通量、交通量の低下率の積をすべての道路について足し合わせたものを目的関数として、最適な交通ネットワークの復旧分析を行った。ここで得られた機能的フラジリティ曲線は他の火山にも応用可能であり、噴火発生前のハザード評価に活用できる。

### 平成30年度の成果

今年度の成果として特筆すべきものとして以下の事項があげられる。①火砕流の発生は、地盤変動の収縮期（マグマからの脱ガスが進行した一連の活動期の後半）に多いことが指摘できた。②2015年8月15日の開口割れ目へのマグマ貫入に伴う火山性地震について、震源域の深部への延伸と開口割れ目の開口方向に整合的なメカニズム解が得られた。③XバンドMPレーダーによる観測により、口永良部島などの噴煙観測事例が充実してきた。④大規模噴火を想定した際の要避難人口の既設依存性が指摘できた。

### これまでの課題と今後の展望

始良カルデラでの地盤の隆起は依然として続いており、今後10～20年で、1914年噴火時に沈降した地盤は噴火直前の状態に回復すると予想される。噴火ポテンシャルとしてはすでにVEI5級の噴火の発生が指摘できるので、大規模噴火の直前の変化を捉えることが最も重要である。1914年噴火の前には、南九州における地震活動が活発化したとされており、噴火が近づくとつれ、異常現象が把握される範囲が局在化し、強度を増した。始良カルデラから50km程度の範囲の下部地殻・上部マントルの深さまでの地震活動の推移の検討や、桜島北東部および南西部における詳細な地盤変動の観測が必要である。

平成26年から30年までの計画においては、桜島で発生している昭和火口の噴火を念頭に、降下火山灰の影響の即時予測を行ってきた。今後、発生する噴火の規模をVEI4または5級に設定するのであれば、多様な災害形態を考慮しておく必要がある。代表的なものに火砕流と溶岩流があげられる。火砕流の発生予測についても現計画でも研究を行っているが、ハザードとしては、火砕流の流下範囲の予測に広げていく必要がある。また、噴火が終息しても土石流の発生は続くので、土石流の発生予測の研究も必要である。特に、大規模噴火を想定すれば、土石流の発生域は桜島から周辺30km程度の距離まで広がると思われるので、これまで土石流の発生が想定されていない地域においても土石流ハザードの評価が必要である。実際、1914年噴火後には大隅半島の広い範囲で土石流や洪水が頻発している。

広域避難については、現計画においても取り扱っているが、避難の方法などより高度化した避難に関する研究が必要である。重要なことはインフラの復旧方法など、レジリエンスに関する研究である。すでに降灰後の道路啓開など、火山灰除去に関する問題は行政も注目しており、効率的な火山灰除去順序などを提案していく必要がある。特に、交通網においては、道路だけでなく、鉄路、航空機、海上交通など多岐にわたり、その特性を考慮した研究が必要である。航空路が影響を受けやすい広域火山灰の拡散については、日本全土に及ぶ可能性も十分あり、火山災害を特定の地域の問題として片づけるわけにはいかないであろう。

大規模噴火の発生は決して桜島だけの問題ではない。ここでは、住民の避難を必要とする規模の噴火と定義しなおしてよい。火山噴火予知計画が開始された1974年以降でも住民の避難が実施された火山は、十勝岳、有珠山、伊豆大島、三宅島、雲仙岳、桜島、口永良部があり、決して特殊事例とは言えない。桜島の大規模噴火では火山と都市域の問題があげられるが、完全な離島である伊豆大島、三宅島、口永良部島では状況が異なる。最近、中山間地での避難の例はないが、今後その必要が生じることは、十分考えられる。地理的、社会的環境による対策の違いなど幅広い研究をめざす必要がある。

## 成果リスト

- Araya, N., M. Nakamura, A. Yasuda, S. Okumura, T. Sato, M. Iguchi, D. Miki, N. Geshi, 2019, Shallow magma pre-charge during repeated Plinian eruptions at the Sakurajima volcano, *Scientific Reports*, doi:10.1038/s41598-019-38494-x.
- 堀田耕平・井口正人, 2018, 2017年の南岳爆発に前後する傾斜ひずみ変化, *京都大学防災研究所年報*, 61B, 324-329.
- 井口正人・中道治久・為栗 健・堀田耕平・園田忠臣, 2018, 2017年8月桜島溶岩噴泉活動に伴う地震活動及び地盤変動, *京都大学防災研究所年報*, 61B, 318-323.
- Iguchi, M., 2018, Volcanic Activity of Sakurajima Monitored Using Global Navigation Satellite System, *Journal of Disaster Research*, 13, 3, 518-525, doi:10.20965/jdr.2018.p0518.
- 風間卓仁・山本圭吾・平良真純・大島弘光・前川徳光・岡田和見・園田忠臣・井口正人, 2018, 桜島火山における繰り返し相対重力測定(2017年5月~2018年2月), *京都大学防災研究所年報*, 61B, 330-336.
- Muramatsu, D., K. Aizawa, A. Yokoo, M. Iguchi, T. Tameguri, 2018, Estimation of Vent Radii From Video Recordings and Infrasound Data Analysis: Implications for Vulcanian Eruptions From Sakurajima Volcano, Japan, *Geophysical Research Letters*, 45, 12829-12836, doi:10.1029/2018GL079898.
- Murata, T., M. Iguchi, 2019, Deep Modular Multimodal Fusion on Multiple Sensors for Volcano Activity Recognition, *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases*, doi:10.1007/978-3-030-10997-4 37.
- 中道治久・井口正人・下村 誠・竹中悠亮, 2018, 南九州の火山における小型Xバンド偏波

- レーダーの展開と噴火観測事例, 京都大学防災研究所年報, 61B, 337-343.
- Poulidis, P, A., T. Takemi, A. Shimizu, M. Iguchi, S. Jenkins, 2018, Statistical analysis of dispersal and deposition patterns of volcanic emissions from Mt. Sakurajima, Japan, Atmospheric Environment, 179, 305-320, doi:10.1016/j.atmosenv.2018.02.021.
- Shimura, T., M. Inoue, H. Tsujimoto, K. Sasaki, M. Iguchi, 2018, Estimation of wind vector profile using a hexa-rotor unmanned aerial vehicle and its application to meteorological observation up to 1000 m above Surface, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 35, 8, 1621-1631, doi:0.1175/JTECH-D-17-0186.1.
- Syarifuddin, M., S. Oishi, H. Nakamichi, M. Iguchi, 2018, Spatiotemporal distribution of rainfall in mount Sakurajima based on weather radar, Annual journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 63, I 187-192.
- 為栗 健・井口正人, 2018, 桜島火山昭和火口で発生する火砕流の特徴, 京都大学防災研究所年報, 61B, 312-317.
- Tameguri, T., M. Iguchi, 2019, Characteristics of micro-earthquake swarms preceding eruptions at Showa crater of Sakurajima volcano, Japan, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 372, 24-33, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2019.01.016.
- Tanaka, L, H., M. Iguchi, 2019, Numerical Simulations of Volcanic Ash Plume Dispersal for Sakura-Jima Using Real-Time Emission Rate Estimation, Journal of Disaster Research, 14, 1, 160-172, doi: 10.20965/jdr.2019.p0160.

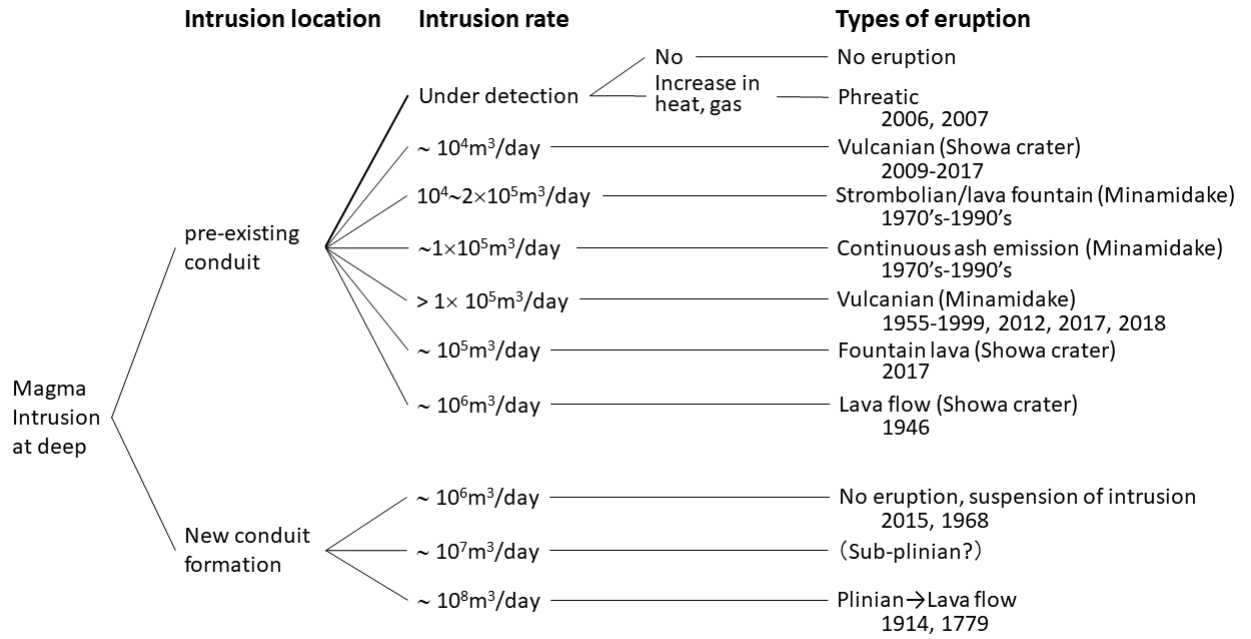


図1. マグマ貫入速度と噴火様式、規模との関係 (京都大学防災研究所 [課題番号: 1908])

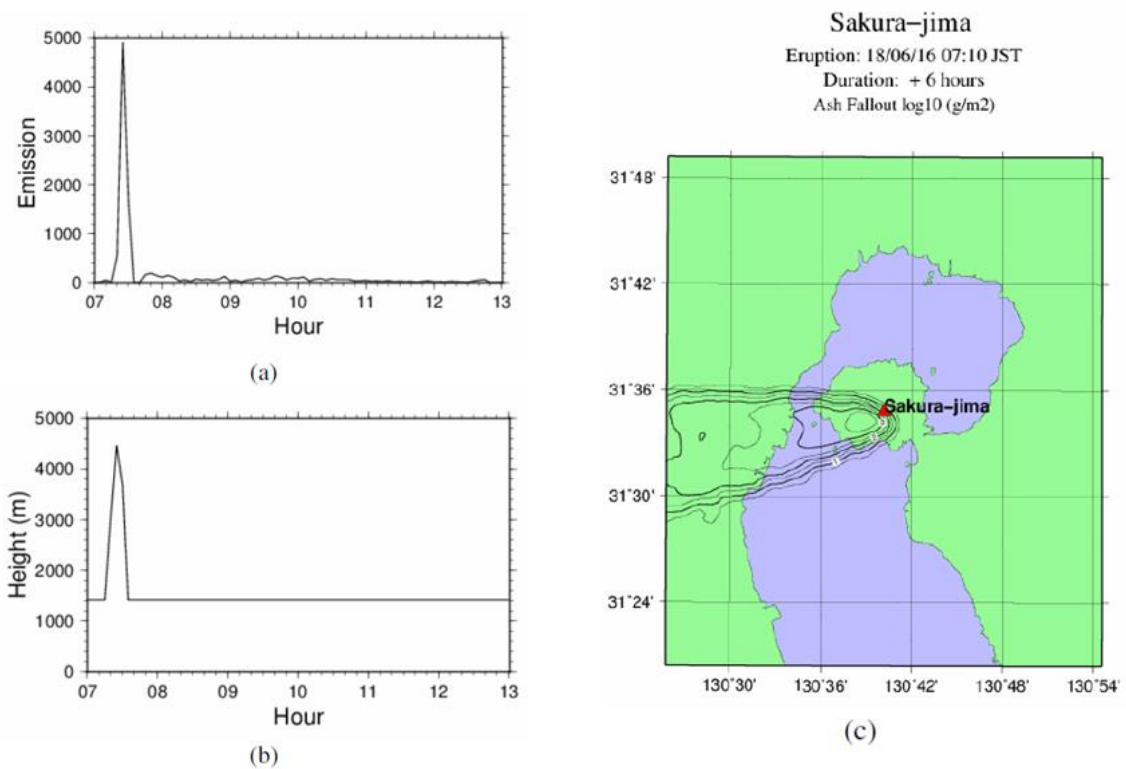


図2. 桜島南岳において発生した爆発により放出された火山灰の拡散シミュレーション。a: 地震動と空気振動から算出された噴出率, b: 経験式を用いて噴出率から算出された噴煙高度, c: 降下火山灰量。等高線は、単位面積当たりの降灰量  $\text{g}/\text{m}^2$  の対数を示す (京都大学防災研究所 [課題番号: 1913])。