

桜島における火山災害軽減に関する考察

井 口 正 人

1. はじめに

始良カルデラと呼ばれる鹿児島湾北部においては2万9千年前に巨大噴火が発生し、南九州一帯は火砕流に覆われた。桜島はこの巨大噴火後、今から2万6千年前にカルデラの南縁に誕生した後カルデラ火山である。現在の桜島は北岳と南岳の2つの火山から構成されるが、5千年前までは北岳を形成する噴火活動で、5千年前から噴火活動の中心が南に移り、南岳を形成した。現在は南岳の活動期にある。歴史時代には南岳の山頂付近における小規模な噴火活動とその山腹における大規模噴火活動が繰り返された。2万6千年前から直近の大規模噴火である1914年の「大正噴火」までに17回の大規模噴火が繰り返され（図1）、そのうち最大規模のものは1万3千年前に発生した「桜島薩摩」(P14)と呼ばれる噴火で、テフラの量にして大正噴火の20倍の規模である（小林・他、2013）。注目すべきは、最近550年間に文明（1471-76年）、安永（1779-82年）、大正の3回の大規模噴火が発生しており、桜島の活動期の中でも現在は活動的な状態にあることである。これらの大規模噴火では南岳山頂を挟んだ両山腹において新たな火口を形成してプリニー式と呼ばれる多量の軽石・火山灰を含む巨大な噴煙を形成する噴火活動により始まり、その後多量の溶岩を流出した。

このような大規模噴火による災害の要因は多様である。噴出するマグマは様々な形態をとり、噴出物による直接的な被害をもたらすものとして固体の噴出物である火山岩塊、レキ、火山灰、液体として溶岩流、気体として火山ガス、さらにレキ、火山灰と火山ガスの混合による粉体流の形態をとる火砕流がある。これらの噴出物が水と混じることにより、土石流、洪水、津波が発生する。また、地震、地形変化およびその発展

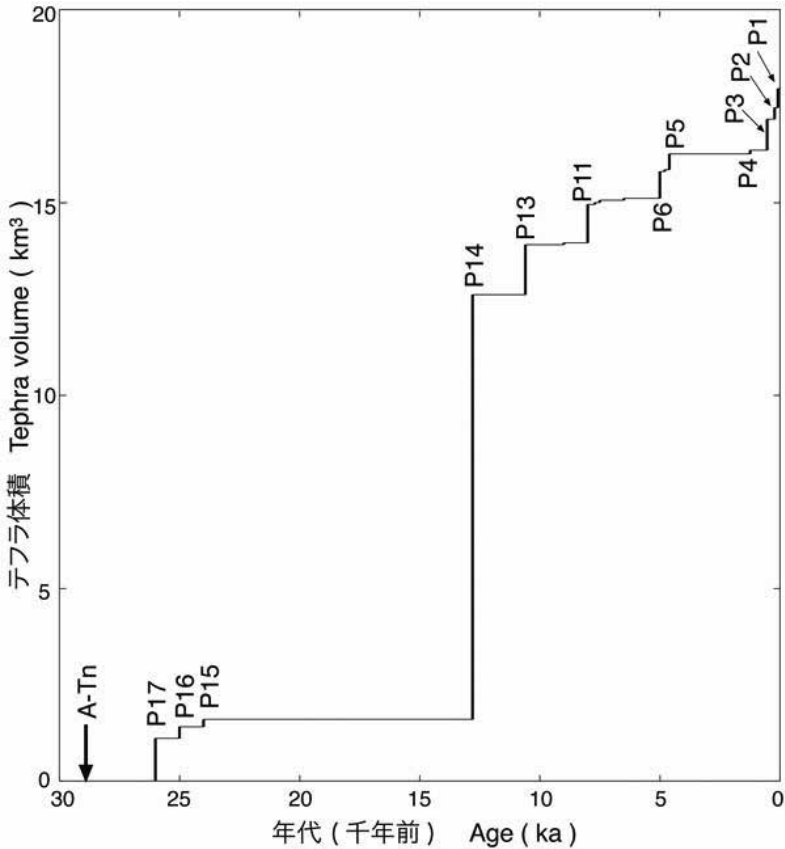


図1 桜島火山から噴出したプリニー式火砕物のテフラ噴出量-時間積算図 (小林・他、2013)

形である山体崩壊や空振も発生する。桜島の大規模噴火においてはこれらすべての災害要因を考慮する必要がある、そのうちのいくつかの要因からは避難して生命を守る必要がある。火山災害への基本的な対策は生命を守るための避難である。しかし、命を守るのは噴火があってもその後、生き続けていくためである。そのためには、生活を守るための対策が必要である。本稿では、命を守るための戦略と生活を守るための戦略の2つの視点から桜島における火山災害軽減対策を考えてみる。

2. 桜島の噴火活動と今後の予測

桜島では南岳山頂における小規模な噴火活動とその山腹における大規模噴火活動が繰り返されているが、現在は、南岳山頂噴火期にあり、主要な噴火様式はブルカノ式噴火と呼ばれる強い爆発音を伴って火山岩塊を最大3km付近まで飛散させ、キノコ上の噴煙を数kmの高さまで噴き上げる噴火である。山頂噴火活動は1955年10月13日に始まり、現在まで68年以上も続いている。ブルカノ式噴火をハルタ山（南岳火口から距離2.7km）における空振振幅10Pa以上の噴火と定義すれば、2023年末までに15,004回発生している。1955年以降の桜島の噴火活動は4つの期間に分けられる。図2に年間爆発回数と火山灰放出量を示す。火山灰放出量は、鹿児島県内62か所の観測点における単位面積当たりの降灰量から求めたものである。1971年の年間爆発回数は10回まで低下したので、噴火活動が始まった1955年から1971年までを南岳第1期の活動とする。1960年に爆発活動のピークがあり、この年は414回の爆発が発生した。1972年9月から再び噴火が頻発するようになり、10月2日の爆発では火山岩塊が古里町の海岸まで達した。1972年から爆発回数が10回まで低下

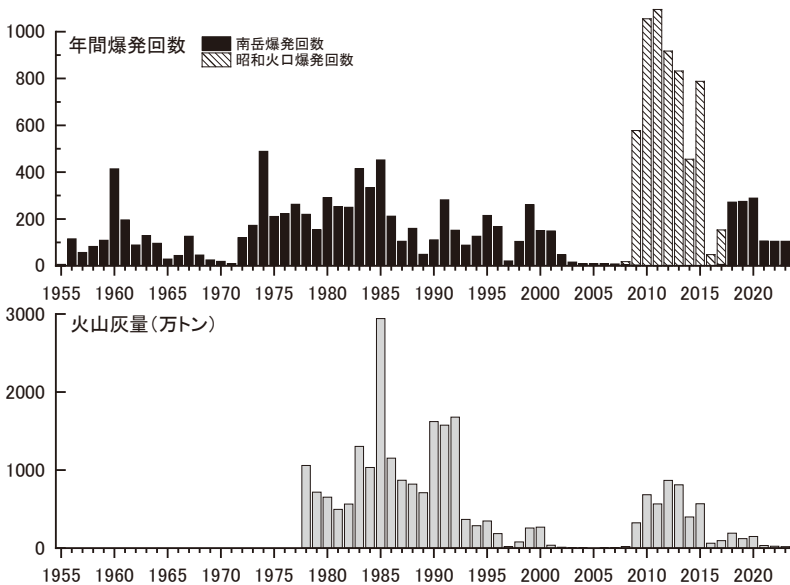


図2 桜島南岳活動期における年間爆発回数と火山灰放出量

した2005年までを南岳第2期の活動とする。この期間が最も活動的であり、特に、1983年から1985年には、それぞれ、415、334、452回の爆発が発生し、1985年には2960万トンの火山灰が噴出した。2004年と2005年の南岳の爆発回数はそれぞれ9回まで減少したものの2006年6月には昭和火口が58年ぶりに噴火活動を開始した。これ以降、2017年までを昭和火口噴火活動期とする。2007年5月にも同様の噴火活動があり、2009年の秋ごろから爆発回数が急増し、2011年には1095回の爆発が発生した。爆発回数は多いが、火山灰放出量は南岳第2期の活動よりも少なく、小規模な爆発の頻発により特徴づけられる。2017年10月まで昭和火口の噴火活動が繰り返されたが、11月以降南岳に噴火活動が回帰し、2023年現在でも南岳の噴火活動が続いている（南岳第3期の活動）。年間の爆発回数だけを見ると第1期、第2期の活動と遜色はないが、火山灰放出量は年間200万トン以下で、減少傾向にある。南岳を中心とする山頂噴火活動は1983年から1985年をピークとし、それ以降、長期の低下傾向にあるといえる。

このような桜島の噴火活動は桜島北部海域である始良カルデラ中央部に蓄積されたマグマにより制御されている。1914年の大正噴火後には南九州一円で地盤の沈降が観測されており、沈降の中心は始良カルデラ中央部にある（Omori, 1916）。この地盤変動を引き起こした圧力源は深さ10km付近に求められ、圧力源における体積減少量は約 1 km^3 と求められている（Yamashina, 2013）。大正噴火により噴出したマグマの量は約 1.5 km^3 と見積もられているので、概ね始良カルデラ下の体積減少量が噴出物量に対応することになる。一方、地盤沈降が観測されたのは、1915年まででそれ以降は隆起に転じている。図3にカルデラ西縁のBM2471を代表点として始良カルデラの地盤の上下変動を示す。この地点では大正噴火に伴い約80cm地盤は沈降したと推定されているが、1915年以降、2022年までに約73cm隆起したと測定されている。昭和噴火（1946年）や南岳第2活動期には停滞もしくは沈降がみられるが、100年以上の間、隆起が続いている。大正噴火に伴う沈降量約80cmに対し、隆起量は73cmであるので、大正噴火に関与したマグマ量のおよそ90%が始良カルデラの地下に新たに蓄積されたことになる。

最近の地震波を使った地下構造の調査により、始良カルデラの地下の

桜島における火山災害軽減に関する考察

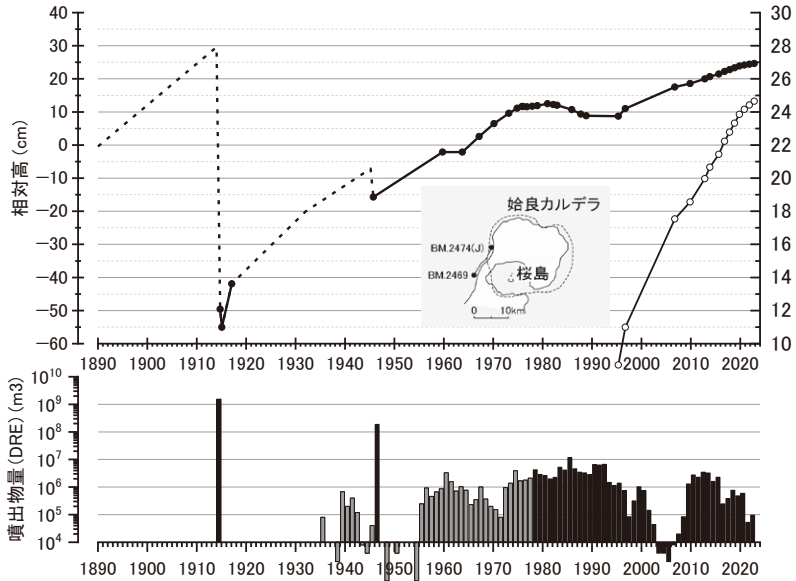


図3 始良カルデラの上下地盤変動。BM2474(J)のBM2469に対する相対的な変動。○は●を10倍拡大したもので、スケールを右側に示す。破線は大正噴火(1914年)と昭和噴火(1946年)における地盤沈下の推定値を含む(佐々、1956)。

深さ10km以深には約 20km^3 の溶融したマグマがあると推定されている(為栗・他、2022)。この量は、2万9千年前に発生した巨大噴火のマグマ量には遠く及ばないが、 1.5km^3 のマグマ量である大正噴火級の大規模噴火を起こすには十分な量である。したがって、今後、大正噴火級の大規模噴火が発生する可能性が高い。

3. 桜島大規模噴火で想定される災害

次に、大正噴火級の大規模噴火で引き起こされる災害について述べる。噴出物は多様である。大正噴火は、プリニー式と呼ばれる多量の軽石・火山灰を含む巨大な噴煙を形成する噴火活動により始まり(図4)、その後火砕流が発生し、多量の溶岩を流出して終息した。将来の大規模噴火も同様の推移を経るものと考えられる。

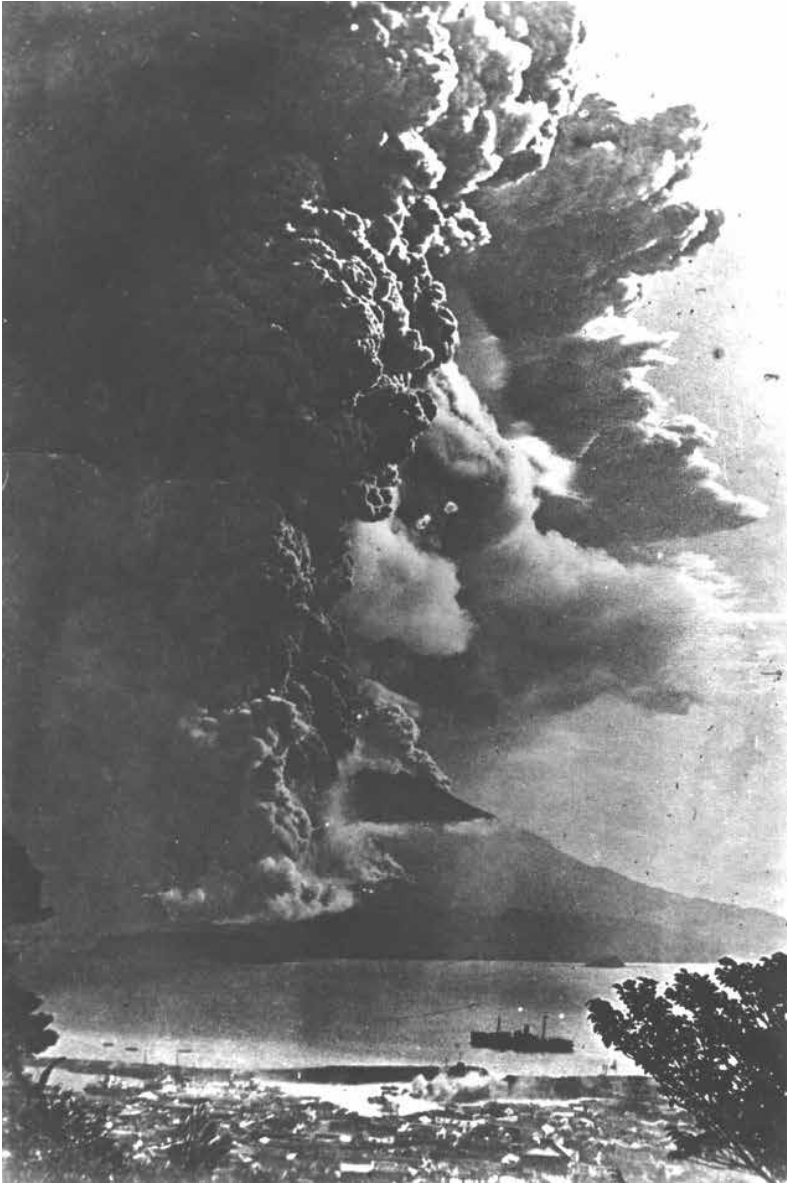


図4 桜島大正噴火（鹿児島県立博物館所蔵）。噴火開始から30分後。南岳山頂ではなく、山腹から噴煙が上がっていることが分かる。噴煙には多量の軽石が含まれる。

3.1. 多量の軽石・火山灰による被害

多量の軽石・火山灰の降下により、風下側は埋没する。埋没したのとして鍋山付近の火口からわずか2 km の距離にある黒神埋没烏居が最も有名であるが、黒神における軽石層の厚さは1.7m と推定される。また、埋没と言えるほどの厚い降灰にならなくても降灰域は広域に及ぶ。すでに国土交通省によって大規模噴火時の降灰分布予測がハザードマップとして提示されている（図5、九州地方整備局大隅河川国道事務所、2007）。これによれば、桜島南岳の風下の距離20～30km まで、降灰体積厚50cm 以上、距離50km でも厚さ30cm 程度に達すると予測されている。

軽石や火山灰による被害は①農業、林業、水産業などの一次産業への被害、②人体への影響（健康被害）、③社会インフラの破壊、機能停止・低下があげられる。

桜島大正噴火では野菜、果樹、茶などに壊滅的な被害があっただけでなく、多くの農地が埋没し、畜産業においては家畜の死傷が多数報告されている。さらに、噴火後、不漁となるなど漁業にも深刻な影響があった。このような第1次産業への被害は基本的には現在でも同様と考えられるが、農産物等においても高い品質を求められる現代では、軽微な降灰であっても商品価値が失われ、被害額は膨大になる。また、現在、鹿児島湾ではブリやカンパチの養殖が盛んであるが、多量の軽石の降下により養殖施設は埋められ、壊滅的な被害が予想される。このように一次産業への被害が大きい理由は、軽石の落下による埋没や損傷に加え、火山灰粒子には二酸化硫黄や塩化水素の水溶性の火山ガス成分が付着しており、酸性の水溶性成分により損傷するからである。

健康への影響も大きい。これは、火山灰にこのような酸性物質が付着していることに加え、PM2.5（2.5ミクロン以下の小さな粒子）も含まれていることによる。このような微小粒子は肺の奥深くまで入りやすく、呼吸器系への影響に加え、循環器系への影響が懸念される。PM2.5の環境基準は年平均値が $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下、1日平均値が $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下である。噴火の継続時間が短いために健康への影響はほとんどないが、最近の桜島南岳や昭和火口における噴火でも数分間は $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えることがある。大規模噴火になれば、高濃度のPM2.5を含んだ状態が長時間継続することとなる。また、降灰後の清掃においてもPM2.5が高濃度で浮遊



図5 大規模噴火時の降灰分布予測(九州地方整備局大隅河川国道事務所、2007)

することにも注意が必要である。

3.2. 多量の軽石・火山灰による社会インフラへの影響

高度化した現代社会においては社会インフラへの影響が最も深刻となる。この点が大正時代の噴火災害と決定的に異なる点である。影響が懸念される社会インフラは、交通、電気、通信、水道など多岐に及ぶ。こ

ここでは特に、人流・物流を担う交通インフラへの影響について述べる。火山噴火による交通インフラへの影響は、道路、鉄道、航空路、航路のすべての分野に及ぶ。

火山噴火による B747 型機の全エンジン停止（1982 年インドネシア・ガルンゲン火山の大規模噴火により被災した英国航空機、1989 年アラスカ・リダウト火山噴火により被災した KLM オランダ航空機）を経験している航空業界では、航空機に対する火山灰の危険性の認識が高く、現在は VAAC (Volcanic Ash Advisory Center) が発表する航空路火山灰情報に基づいて世界のどこでも噴煙に対して慎重に航空機が運航されている。逆に、噴火による航空機の運航への影響は広範囲に及ぶともいえる。2010 年 4 月にアイスランドのエイヤフィヤトルヨークトル火山で発生した噴火では火山灰拡散によってヨーロッパの空港と航空路の大規模な閉鎖が行われた（安田・他、2012）。桜島の安永噴火と大正噴火ではどちらも東北地方南部まで降灰が目視で認められていることから（津久井、2011；Omori, 1916）、将来の大規模噴火においても九州から東北地方南部までの広い空域で火山灰微粒子が浮遊することが推定されるので、航空機の飛行はできない。また、桜島に近い鹿児島空港及び宮崎空港は多量の軽石（厚さ 10cm 以上）が堆積するため使用できないが、滑走路は厚さ 0.2mm 以上の降灰でも火山灰を除去する必要があるため、羽田、成田、中部、関西など日本の主要空港を含む九州から関東・東北地方南部までの空港と航空路は閉鎖される。したがって、南九州だけでなく、日本の航空網は完全に麻痺するといつてよい。

最も身近にその影響を感じられるのは道路網への影響であろう。南岳の噴火活動期においてもレキの落下によるフロントガラスの破損やスリップ事故は頻繁に発生した。大規模噴火では降灰量が多く、物理的に自動車の走行が不可能となる場合に加え、道路管理者が交通規制する場合が想定される。準プリニー式噴火により軽石を噴出した 2011 年の霧島新燃岳噴火の場合、交通規制した割合は降灰量 $20\text{kg}/\text{m}^2$ （降灰厚 2 cm）では 40% になり、 $30\text{kg}/\text{m}^2$ （降灰厚 3 cm）ではすべての道路が規制される（玉置・多々納、2014、図 6）。また、桜島南岳の 2012 年 7 月 24 日の爆発でも厚さ 1 cm 程度の降灰で国道 224 号線の桜島港から桜島口において通行規制が行われた。降灰時は視界不良となるだけでなく、ワイパーも

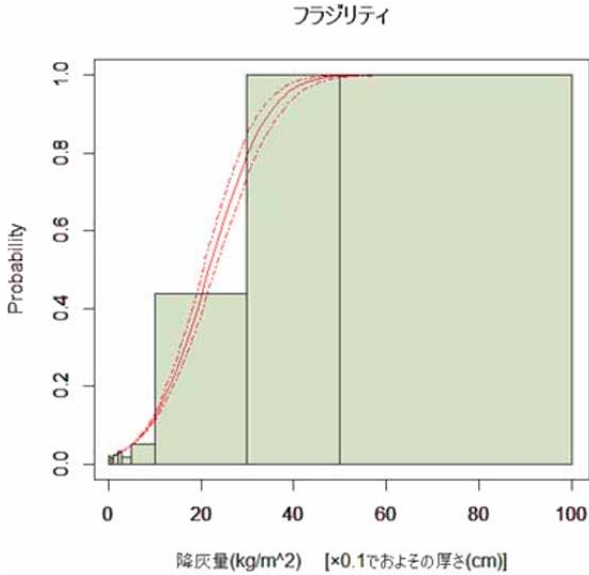


図6 降灰量による交通規制に関する機能的フラジリティ曲線（玉置・多々納、2014）。降灰量は主として2011年1月26日に始まる霧島新燃岳における準ブリーニ式噴火によるもの。概ね40kg/m²（厚さにして約4cm）以上の降灰時には一般道の道路管理者は通行規制を行うと考えてよい。

機能せず、ブレーキの制動距離はおよそ2倍となる。また、それ以上の厚さの軽石の堆積では、自動車の走行ができなくなることが多い。鹿児島市が行った軽石が堆積した道路の通行実験によると、4輪駆動車は軽石の上を走行することができるが、2輪駆動の場合は、後輪駆動車は走行することが全くできず、前輪駆動車でも走行が不安定となることが知られている。大規模噴火では広い範囲で走行ができなくなるだけでなく、可能だとしても通行規制や交通渋滞が発生すると考えられる。

システムとしての運行を考慮する必要がある鉄道はさらに影響を受けやすい。自動車と同様に、鉄道車両でもフロントガラスの被災、エンジン不調、車輪とレールの摩擦変化、脱線をも考慮する必要がある。線路においては埋没や分岐線の転換不能も起こりうる。信号、通信、電気系統の障害も深刻であり、踏切の障害や^がいし子のショートが考えられる。桜島の南岳噴火の最盛期である1980年代には踏切の障害や脱線が多い。2012年7月24日の南岳爆発では、降灰により列車運行システムに不具合

が生じ、鹿児島中央駅始発の列車の運休が相次いだ。これは、列車の運行システムが列車の位置情報を捕捉できなくなったためとされている。この時の鹿児島市街地における降灰量はわずか1～2mm程度なので、桜島の大規模噴火では同程度以上の降灰が予測される関東地方でも同じような障害が発生する。鉄道はネットワークであるので降灰がない地域も含めて、列島規模で大規模な運休が行われると思われる。

主要な物流を担う海上交通にも大きな影響が予想される。2021年8月に発生した小笠原諸島の福德岡ノ場火山の大規模噴火では、多量の軽石が噴出して太平洋を漂流し沖縄・奄美に漂着した。桜島の過去の大規模噴火の軽石、火山灰の分布からは総噴出量の約5%から30%が海域に降下することになるので、鹿児島湾は軽石によって埋め尽くされることになる。エンジンの冷却水の取り込み口が浅い位置にある小型船舶に故障が発生しやすいことが沖縄・奄美の漂着軽石の事例から知られている。この軽石・漂着時には大型船舶への影響は軽微であった。しかし、大規模噴火では噴火後の地盤沈下が著しいため、港湾施設に影響があるかもしれない。

以上のことから、鹿児島への人流と物流は途絶えてしまう可能性が高い。

3.3. 最も危険な火砕流と埋没させる溶岩流

想定する規模の噴火では、火砕流や溶岩流の被覆域は桜島とその周辺にとどまると予想されるが、それらは極めて破壊的であり、噴火発生前に避難しなければならない災害要因である。大正噴火では、1月13日20時14分に発生した大爆発による火砕流によって桜島西麓の集落が壊滅した。14日には溶岩の流下が確認されているが、桜島西麓の横山、赤水、南東麓の有村、脇、瀬戸の5つの集落は溶岩流に埋没した。将来発生する大規模噴火でも火砕流や溶岩流の被覆域において同様の壊滅的被害が予想される。火砕流と溶岩流は重力によって地形に沿って流下するので、その被災域の推定には火口の位置が必要であるが、現在の段階では火口の位置を予測することはできない。

3.4. 土石流

火山噴火に伴って土石流や泥流が発生することはよく知られているが、その発生には水が重要な役割を果たしており、火口湖の爆発、融雪、噴出物の河川・湖への突入、降雨、地下水など様々な水の存在を考慮する必要がある。噴火が長期にわたる場合は、噴火による直接災害と土砂災害が同時進行する（1970～80年代の桜島南岳の噴火、1990年代の雲仙普賢岳噴火）。桜島には河川・湖はなく、地下水水位は海面とほぼ同じ高さにしかないので、降雨を考えればよいであろう。大正噴火から1か月経過した2月に大隅半島の牛根、高隈、百引で大雨が降り軽石・火山灰が流出して、最初の土石流が発生した。結果、川床は上昇し河川は氾濫した。同様の土石流と河川の氾濫は翌年まで続いた。降雨量に比べて、それまでに堆積した噴出物の量の方が圧倒的に多いため、1回の降雨では、すべての噴出物を流出させることができないために、大雨のたびに土石流は繰り返されることになる（下川・地頭園、1991）。土石流は細粒火山灰の降下による地表面の浸透能力の低下により地表を水が流れやすくなるために発生すると考えている。大規模噴火の初期段階において発生するプリニー式噴火による軽石降下は可動性の高い噴出物を多量に堆積させるが、軽石は水の浸透性が高いので、むしろ、プリニー式噴火に続く溶岩流出に伴う細粒火山灰の連続的な噴出（ブルカノ式噴火）の長期化の方が土石流を発生させやすくするはずである。桜島周辺では西及び北西風が卓越するので、細粒火山灰の長期降下による土石流の可能性は大隅半島側において大正噴火時と同様に高い。土石流の氾濫は、周辺の家屋や施設の埋没・破壊や道路の寸断を引き起こし、最悪犠牲者を伴う。

3.5. 地震

大正噴火では噴火開始から8時間後（1月12日18時29分）にマグニチュード7.1の地震が桜島の南西海域において発生し（桜島地震）、現在の鹿児島市街地側における家屋の倒壊やがけ崩れによって29名が犠牲となった。地震の規模の割には犠牲者が少ないともいえるが、同日10時にはすでに桜島において大規模噴火は始まっていたため、噴火からの避難によって地震の犠牲者を少なくできた効果があったのかもしれない。鹿

桜島における火山災害軽減に関する考察

鹿児島県地震等災害被害予測調査（平成24年度）によれば、この地震を想定した鹿児島湾直下地震（マグニチュード7.1）によって鹿児島市の一部で震度6強、鹿児島市及び垂水市において震度6弱の強い揺れが予測されている（図7）。同報告書によればこの地震による被害は、建物の全壊9540棟、斜面崩壊250か所、犠牲者240名以上が想定されている。地震による社会インフラの被災は大正時代より深刻な事態を招く可能性が高い。大規模噴火発生時にマグニチュード7級に達する大地震が必ず発生するわけではないが、噴火の直前には有感を含む地震が頻発するので（最大マグニチュード5を想定）、これによって小規模な被害が起こることも考えられる。

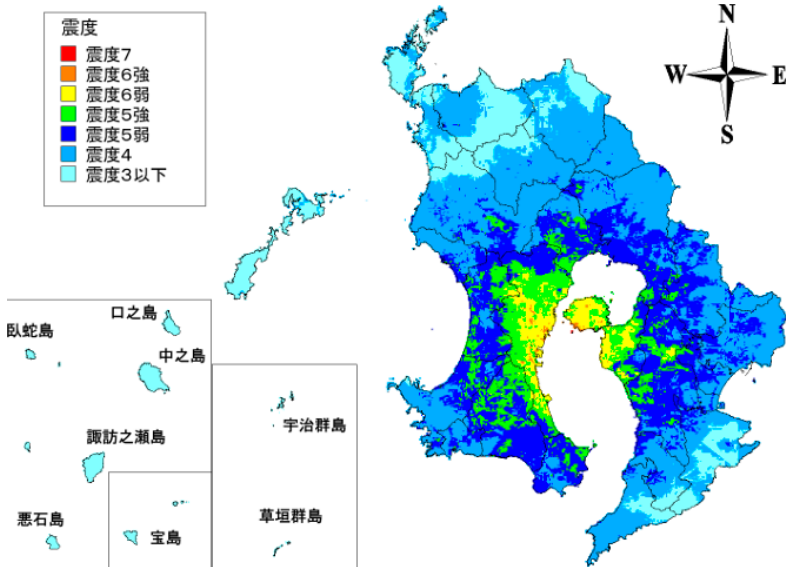


図7 鹿児島湾直下型地震による震度予測（鹿児島県地震等災害被害予測調査報告書、2012）。鹿児島市の一部で震度6強、鹿児島市と垂水市で震度6弱の強い揺れが予想されている。

3.6. 津波

この桜島地震によって津波が発生したとの記載もあるが、より深刻な津波は海底噴火によるものであろう。最近の事例では2022年1月15日に

トンガのフンガ・トンガフンガ・ハアパイで発生した海底噴火による津波は我が国にも到達しており、奄美大島では1mの津波が観測された。桜島の安永噴火は、1779年11月8日に桜島の南岳の南山腹と北東山腹からのプリニー式噴火により始まり、火砕流と溶岩流出が続いている。その後、桜島北東海域に新島が形成され始め、9島が形成された。現在は、最大の新島、猪ノ子島、硫黄島、中之島の4島が残っている。翌1780年には海底噴火により津波が発生するようになり、桜島の沿岸と対岸の福山や敷根に大波が達している。1781年4月11日に発生した海底噴火が最大規模と考えられており、桜島小池では12~14mの津波が到達し、死者・行方不明者は20名とされている（井村、1998；小林、2009）。過去の大規模噴火は南岳の山頂に近い陸域から大規模噴火が始まっているので、いきなり海底噴火から大規模噴火が始まるとは考えにくい。陸域から噴火が始まったとしても、山腹に形成された火口域は拡大の過程において海域まで拡大することを念頭に入れ、津波にも警戒する必要がある。鹿児島県地震等災害被害予測調査報告書（平成24年度）によれば、海底噴火によって鹿児島湾北部海域の沿岸において高さ10m以上の津波が到達することが予想されている。しかも、海底噴火の発生場所から沿岸は近いため、わずか数分程度で到達するし、湾内の津波は繰り返し到達する。

4. 桜島の大規模噴火災害対策とその弱点

4.1. 避難指示と噴火警報

火山噴火災害対策は災害要因からの避難をもって対策とするのが基本である。災害時には市町村長が住民への避難指示等の避難措置を実施するが、避難指示等の発令は噴火警報に基づいて意思決定される。気象業務法の改正により、2007年12月から気象庁は噴火警報を発表することとなった（山里・他、2013）。噴火警報は、噴火に伴って生命に危険を及ぼす火山現象の発生が予想される場合やその危険が及ぶ範囲の拡大が予想される場合に、「警戒が必要な範囲」（生命に危険を及ぼす範囲）を明示して発表される。ここでいう火山現象とは、火山岩塊、火砕流、溶岩流、融雪型火山泥流等であり、発生から短時間で火口周辺や居住地域に到達し、避難までの時間的猶予がほとんどない災害要因である。桜島の場合

桜島における火山災害軽減に関する考察

は火山岩塊、火砕流、溶岩流が想定される。警戒が必要な範囲は、噴火警戒レベルとともに発表される。噴火警戒レベル 2、3 は登山者向けの警報であり、居住地域に噴火の居住地域に被害を及ぼす噴火が発生、あるいはその発生が予想される場合は、レベル 4、5 の噴火警報（居住地域）が発表される。この警報は特別警報に位置づけられる。噴火警戒レベルは気象庁が火山監視に基づいて上げ下げを行う。噴火警戒レベルの判定基準は気象庁のホームページにおいて公開されている。

<https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/keikailevelkijunn.html>

判定基準は 2 つのカテゴリーからなる。1 つは噴火発生前に検知される通常の活動以上の変化が見られた時の判定である。判定に用いるデータは地震回数と振幅、火山性微動の発生、地盤変動、二酸化硫黄放出率、地熱活動・噴気活動などである。判定基準表には判定のための閾値が示されている。もう 1 つは、噴火の発生に対応した事後判定である。この場合、噴火によって飛散した火山岩塊の到達距離、火砕流、溶岩流の流下範囲を判定基準に照らし合わせ警戒レベルを決定することになる。

2007年12月に噴火警報が発表されるようになって以降、住民の避難が必要なレベル 4、5 の噴火警報は、口永良部島と桜島においてそれぞれ 1 回ずつ発表されている。桜島では 2015年 8 月 15 日の群発地震発生時にレベル 4 に、2022年 7 月 24 日の爆発では火山岩塊が南岳火口から 2.4km を超えて飛散したとしてレベル 5 に引き上げられた。桜島では通常、警戒を要する範囲を火口から 2 km とするレベル 3 の警報が発表され、しかも影響範囲が 2.4km を超えればレベル 4、5 となるので火山活動の活発化によってレベル 4、5 に引き上げられやすい。

ここで問題となるのは警戒を要する範囲である。レベル 2、3 は概ね警戒を要する範囲と 1 対 1 に対応するが、レベル 4、5 は一部であっても居住地域に被害を及ぼす危険性があれば発表されるので、警報の対象地域（警戒を要する範囲）がより重要である。警戒を要する範囲を火口から 3 km とするレベル 5 の噴火警報が発表された 2022年 7 月 24 日の爆発では、大正噴火級の大規模噴火も懸念され混乱もみられたが、レベル 5 を強調する警報発表と報道がなされたのがその原因である。すなわち、レベル 5 の警報と同時に発出されたエリアメールはレベル 5 のみで

警報の対象地域の記載がなかった。報道においては最高レベルの警報が出されたことが見出しに踊っている。気象警報においてはレベルの高さが警戒度と緊急性が高いが、噴火ではレベルは警戒を要する範囲の広さを示し、警戒を要する範囲内における警戒度はレベル2でも5でも変わらない(死に直結する)。気象庁の警報文をよく読めば警戒を要する範囲はわかるので(よく読まないとわからないことが問題であるが)、レベルではなく、警戒を要する範囲に注目して対応すべきである。

桜島の大規模噴火では、過去の大規模噴火と同様に桜島島内からの避難を要するので、レベル5の噴火発生前の警戒を要する範囲は桜島全島を含む南岳山頂から7kmの範囲となっている。これは、過去の噴火活動をまとめた噴火シナリオに基いて評価されたハザードを考慮したものであるが、将来の大規模噴火でも過去の場合と同様でよいという保証はない。一方、噴火の発生前に警戒を要する範囲を決めるのは相当難しい。しかし、監視観測の主たる項目が地震活動と地盤変動であっても、観測データには桜島に向かって上昇してくるマグマの量と噴出する場所、噴火の様式を予測するヒントが隠されているはずである。火山性地震の震源の移動はマグマの移動を示唆しているので(加茂、1978)、地表に近づく震源から火口の位置が推定できる可能性があるし、地盤変動量や火山性地震のエネルギーは上昇してくるマグマの量を推定するために重要な情報であり、マグマの貫入速度は噴火様式との関連が指摘されている(井口・他、2019)。マグマの貫入量と火山灰・軽石、火砕流、溶岩流への配分比が分かれば、それぞれの災害要因のハザード範囲をシミュレーションにより算出することが可能である。火山の観測によって得られた量からハザードを予測する努力が必要であるが、観測に基づく火山活動評価をハザードに直結させる研究が遅れている。また、範囲としてのハザードを予測できなくても、噴火に前駆する現象が過去の噴火よりも強い場合は、警戒を要する範囲を拡大する位は可能である。例えば、2014年8月に発生した口永良部島噴火後には警戒を要する範囲を火口から2kmとするレベル3の警報が発表されたが、その後も火山活動は活発化し、2015年5月の噴火発生前までには有感を含む規模の大きい火山性地震、地盤変動、火山ガス放出量の更なる増加や火映が観測され、2014年8月以前よりもはるかに強い現象が検知されていた。警戒を要する範

囲を2 km（レベル3）に据え置いたままで噴火が発生し、気象庁は噴火発生直後にレベル5の警報を発表したが、これらの観測事実をもって、警戒を要する範囲を2 kmからさらに拡大して事前にレベル5にすることはできたはずである。

4.2. 大量軽石・火山灰からの避難

大規模噴火では様々な形態の災害が発生するが、桜島の場合は避難指示に直結する噴火警報は火山岩塊、火砕流、溶岩流を災害要因の対象とする。大正噴火では、大隅半島側でも1 m以上の厚さで軽石が堆積しているため、南岳から7 kmの警戒を要する範囲の外側でも1 m以上の厚さで軽石が堆積することは十分想定できるが、軽石の堆積は噴火警報の対象外である。これは、軽石・火山灰の降下は死に直結することはないと考えられているためである。一方、多量の軽石・火山灰が降下した場所は、高濃度のPM2.5が浮遊し、二酸化硫黄ガスも高濃度となるため居住できる環境にはない。最も懸念されるのは社会インフラの障害である。道路の通行不可により物流が途絶える。現代の生活に不可欠な電気の供給が停止し、通信が途絶えることにより電話やスマホが使えなくなる。水の汚染、施設の被災により水道が使えなくなる。そのような場所は孤立するので適切なサービスが受けられない。かつては地域防災計画において火山災害対策は気象災害対策編に含まれていたように、火山災害対策を気象災害対策の延長として位置付けるのはやむを得ない面もあるが、短期の対応で機能し得る気象災害に対応する籠城作戦（自宅にとどまり自然現象をやり過ごす）は後詰が早期に来て初めて成り立つ戦術であり、物資等の供給にめどが立たない大規模噴火災害に機能できるかどうか疑問である。内閣府の大規模噴火時の広域降灰対策検討ワーキンググループによる「大規模噴火時の広域降灰対策について―首都圏における降灰の影響と対策―～富士山噴火をモデルケースに～（報告）」においては、噴火や風向・風速の状況に応じて、段階的な対応をとることを基本的な住民行動としつつ、先に述べたような長期的な社会的混乱を念頭に、「噴火前の地震等、火山活動活発時に、地域を離れることが可能な人は、降灰が想定される範囲外への避難」、「噴火期間中、降灰範囲に残っている人は備蓄を活用して自宅・職場等に留まり、必要に応じて、

利用可能な交通機関を使って降灰範囲外へ避難」することとしている。噴火発生前の避難は、桜島においては噴火警戒レベルの判定基準に記述されるように噴火前の地震等によって火山活動活発化は検知できるので、実現の可能性がある。事後あるいは噴火期間中の小康状態における避難はやむを得ない場合の次善の対応と位置付けられる。この場合、問題となるのは降灰範囲外への移動手段である。内閣府の検討は富士山から100km程度離れた首都圏を対象としており、大規模噴火によって30km以内に50cm以上の厚さの降灰を想定する桜島周辺においては現実的ではない。交通機関は利用できないと考えるべきで、事後避難は徒歩で軽石の上を移動することになる。健常者は移動可能と思われるが、要支援者は相当の困難を伴うか不可能である。したがって、多量の降灰が予想される地域には最低限、噴火発生前の高齢者等避難指示の対応が必要と考える。

桜島からの島外への避難は大正噴火時の実績がある。避難計画も策定され、50年以上にわたって毎年繰り返し避難訓練も行われて住民の避難の意識は定着している。一方、島外の降灰域からの噴火発生前の避難には依然として多くの課題がある。降灰域からの避難は長距離避難であり、市町村の境界を越えた広域避難となることを想定しておかなければならないが、避難する側と避難者を受入れる側の調整を含めた広域避難計画は策定されていない。特に鹿児島市街地からの避難者は最大38万人が想定されており、受入れ側の対応の限界を超える可能性があり、実効性のある広域避難計画の策定は必須である。受け入れ側との調整は事前、事後の避難に関わらず発生する問題でもある。避難手段として自家用車を使用した場合、交通渋滞も懸念されるので、交通整理の計画が必須である。輸送力の大きいバスや列車などを利用しての避難計画も望まれる。また、受入れ先も鹿児島県内にこだわることなく、県外も視野に入れる必要がある。広域避難計画が未策定であるので避難訓練も行われていないし、広域避難の意識はほぼない。気象警報の発表に伴い鹿児島市全域に避難指示が発令されたことがあるが、気象災害の場合、避難を必要とするのは急傾斜地と河川の近くの居住地域であり、多くの地域では避難を必要としない。軽石は、急傾斜地や河川のような地形とは無関係に降下するので、避難指示の対象地域ではすべての住民が避難する必

要がある。広域避難の意識を如何にして醸成していくかが最大の課題である。

自治体が避難指示等を発令するタイミングも難しい。発令のよりどころとなる噴火警報は降灰を対象としないため、自治体は噴火警報を準用するか、自らの判断で避難指示等を発令する必要がある。専門家のいない自治体では避難指示の判断に限界があるので、降灰予報を既に発表している気象庁は一步進んで降灰警報まで踏み込むべきである。それにあたっては、降灰域の範囲とその量の予測が必要である。降灰量は主に、風速場と噴出量で決まる。風速場の予測精度は高いが、時々刻々変化するもので、噴火そのものの発生時刻の予測と噴出量の予測が重要となる。降灰の確度が高くしかもその量が多いと予想される地域では噴火発生前に避難した方がよい。運よく降灰がなかった、あるいは少なかった場合は早期に帰宅が可能である。

5. 大規模噴火後の復旧・復興への遠い道のり

5.1. 復旧へのプロセス

火山噴火は、地下にあるマグマが地表に噴出する現象であり、可動性の高い物質が土砂として突然増加する。したがって、火山災害の本質は土砂災害であると言えるが、いわゆる土砂災害に比べて、土砂の量が桁違いに大きく、その移動形態も複雑である。したがって、火山噴火災害からの復旧・復興には想像以上に長い時間がかかると思われるが、現代社会における復旧に要する時間の見積もりさえできていない状況である。

まず、避難指示の発令から避難指示解除までの道筋を、2015年噴火で全島避難した口永良部島を例にみていく。噴火は2015年5月29日9時59分に発生し、火砕流が火口から3km離れた向江浜に達したため、10時07分には福岡管区气象台・鹿児島地方气象台はレベル5の噴火警報を発表した。气象台の発表には警戒を要する範囲を火砕流の恐れのある集落とただけでその範囲を明示しなかったが、10時20分には屋久島町は全島に対して避難指示を発令し、同日の夕方には全島民の屋久島への避難を完了した。6月18日には2回目の爆発が発生し、警戒が再び高まった。その後、噴火は発生せず、8月中旬ごろから火山性地震の活動が低下し

たので、10月21日の火山噴火予知連絡会において火山活動は低下して5月29日の噴火と同等規模の噴火の可能性は低下したとの評価を受け、気象台は警戒を要する範囲を火口から2.5kmとするレベル5の噴火警報を出しなおした（実質、警戒を要する範囲の縮小）。これにより、屋久島町職員等の入島が可能となり、インフラの復旧など住民が帰島する準備作業が始まった。12月24日には警戒を要する範囲外にある集落に対して避難指示が解除され、一部住民の帰島が実現した。さらに、翌年6月14日には噴火警戒レベルが3に引き下げられ、避難指示がすべて解除された。これらの帰島までの過程から、桜島大規模噴火からの避難でも①レベル5における警戒を要する範囲の縮小、②インフラ等の社会基盤の復旧、③一部地区の避難指示の解除、帰宅、④警戒を要する範囲をさらに段階的に縮小、復旧作業、避難指示の解除と帰宅のプロセスを繰り返すことにより、全面復旧をめざすものと思われる。

災害発生後にはこのプロセスを早期に実現したいが、噴火活動推移の複雑さゆえに、すぐには①すら実現できない。噴火活動が一時的に低下しても、これで噴火が終息するか、あるいはさらに噴火の規模が拡大するかの見極めが難しいためである。その結果、噴火警戒レベル5の状態では警戒を要する範囲が長期間維持される可能性がある。実際、有珠山、雲仙岳、三宅島などの噴火活動のように、火山活動の見通しが立つまでに数年を要することさえある。気象庁が定める噴火警戒レベルの判定基準では、レベル5からの引き下げにおいて「山腹噴火が発生した場合は、新たに形成された火口からの警戒が必要な範囲を定める必要がある。居住地域が溶岩流や火砕流に被災した場合は、当該現象が終息した後、関係機関等の対策を考慮しながら、必要に応じ、噴火警戒レベルの再設定を行う。」となっているが、警戒を要する範囲の縮小においても同様の考え方をするものと思われる。縮小の判断に当たっては火山活動の低下の把握が基本であるが、桜島におけるほとんどの観測点が使用できなくなる可能性があり（観測点の破壊、電力と通信の断絶）、観測体制の強靱化と観測インフラの早期復旧戦略を立てておく必要がある。また、警戒を要する範囲の縮小において気象庁は関係機関等の対策を考慮する必要があるが、逆に縮小されなければ関係機関は対策を講じることができない場合もあり（実際、噴火警報が発表されるようになって、ほとんどの機

関、民間等は警報対象地域への立ち入りに極めて慎重である)、桜島火山防災連絡会等での十分な調整が必要である。

仮に短時間で警戒を要する範囲が縮小されたとしても、②のプロセスに進む際に、災害要因によって考え方には大きな違いがある。大正噴火に伴う災害要因ごとの被災は、1) 溶岩流による埋没(横山、赤水、有村、脇、瀬戸)、2) 火砕流、噴石による集落の消失(桜島北西部の小池、赤生原、武、藤野、西道)、3) 厚さ0.3m以上の軽石・火山灰降下(それ以外の集落)に分けられる。溶岩流によって埋没した場合、復旧はあり得ない。可能なのは溶岩流の上に新たに活動拠点を作ることだが、噴出時の溶岩は1000℃以上の高温であるため、冷却するだけでも相当長い時間を要する。実際、大正噴火から110年が経過した現在でも広大な溶岩源の多くは手付かずで、一部が観光施設、住宅、グラウンド等に活用されているだけである。この場合、移住することによって復興を目指すことになる。実際、大正噴火では13000人が島外へ移住した。火砕流、噴石によって集落が消失した場合は家屋がないので、仮設住宅に居住しながら、移住先もしくはもとの集落において再建を目指すことになる。いずれにしてもインフラ等の社会基盤の整備や住宅の建設に長期の時間を要する。厚さ0.3m以上の軽石・火山灰が堆積した場合、比較的堆積量が少なければ、軽石・火山灰を除去し、インフラ等の社会基盤を整備することで復旧することが可能である。厚さが1mにも及ぶような場合、軽石・火山灰の除去は困難であり、除去せずにもとの集落において再建を目指すか、移住することになる。

5.2. 社会インフラの復旧

道路および海上交通、電気、通信、水道等の社会インフラの復旧なくして、住宅の再建はできない。現在の桜島の物流・人流は桜島フェリーによる鹿児島市街地との往来と大隅半島とつながる国道、および島内の集落を結ぶ南回りの国道224号線と北回りの県道26号線が支える。大規模噴火による地殻変動は大きく、港湾が使用不能となる可能性がある。大正噴火では始良カルデラ周辺の地盤沈下により鹿児島港は約0.5m沈降、桜島港付近の小池も約0.3m沈降した(Omori, 1916)。島内の道路の復旧は溶岩の流下によって決まる。軽石・火山灰の堆積は時間がか

かっても重機により除去できるが、溶岩流は高温であるために近づくことさえできず、冷却するまで寸断されることになる。桜島の各集落には避難港が整備されているので、改修して海上からの輸送を検討する必要がある。大隅半島側から桜島口を経由する配電線の敷設しかない桜島は現在でも停電が多い。配電線を維持できるかどうかはやはり溶岩の流下に強く依存する。仮に大正噴火と同様に桜島口が溶岩に覆われるとすれば、桜島への電力の供給は完全に断たれる。また、島内の配電線も溶岩流により寸断される。溶岩流は人命を失わせるほど早くはないが、復旧においては致命傷になる。通信、水道の復旧は、道路網の回復による資材運搬と電力の復旧が前提となる。

5.3. 都市域における大量軽石・火山灰除去

桜島の山腹や溶岩原への軽石・火山灰の堆積は、それ自体が自然現象であり、放置すべきである。一方、鹿児島市街地のようなコンクリートで塗り固められた都市域へ堆積した軽石・火山灰はすべて除去する必要があるが、その対処は複雑である。都市機能を支える交通、電気、通信、水道等の社会インフラの復旧を急ぐ必要があるが、交通については道路網の復旧が最も急がなければならない課題である。南岳の噴火活動期であれば、路面清掃車（降灰対応型スーパー）により3日程度で鹿児島市街地において除去できていた火山灰だが、大規模噴火では最大1mの厚さの軽石、火山灰を除去する必要があるが、バックホーなどの重機を稼働させる必要がある。早期の復旧を目指すには効率的な軽石・火山灰の除去が必要だが、そのためには降灰分布の早期の把握、降灰分布ごとに除去作業を行う道路の優先度を定める作戦シートの事前作成（場合によっては降灰除去順序の最適解を得るためのシステム開発）、関係機関の間の基本方針の策定と調整、重機の確保を行う。さらに、除去した火山灰・軽石の処分場が問題である。わが国では除去した火山灰は産業廃棄物として取扱われるので海洋投棄は避けるべきである。また、2022年には小笠原諸島の福德岡ノ場火山の大規模噴火で噴出した軽石の沖縄・奄美への漂着が問題となったばかりで、鹿児島湾を浮遊する軽石の処分も必ず顕在化するであろう。日常的に噴火する桜島南岳からの火山灰に対応する処分場では不足することは明白であり、処分場の確保も重要な

課題である。

都市域における火山灰・軽石の除去の複雑さは、すべての堆積物を除去しなければならぬことにある。主要道路からの末端までの道路の除去が完了したとしても、機械力によって除去できない火山灰は依然としてビルの屋上、家屋の屋根と庭、歩道、建物と建物の間に残り、最後は人力による除去作業がどうしても必要となる。これにはボランティアの皆さんの助けを借りるしかないように思う。

6. まとめ

桜島では過去に大正噴火と同等もしくはそれ以上の大規模噴火が17回発生している。桜島の主マグマたまりがある始良カルデラにおけるマグマの増加量は、大正噴火以降の110年間において大正噴火で噴出したマグマの量の90%に達しており、将来大規模噴火が発生することは避けられない。大規模噴火による災害は、火山岩塊、レキ（軽石）、火山灰の火山碎屑物と、火砕流、溶岩流により引き起こされる。また、噴火に伴って発生する地震、津波、土石流はさらに被害を拡大させる。噴火の発生前には、噴火警報が対象とする警戒を要する範囲に加え、インフラなどの社会基盤が機能不全に陥る地域からの避難が必要である。噴火活動の低下に合わせて、避難が行われた地域では早期の警戒区域の縮小、インフラなどの社会基盤の復旧、避難指示の解除、また、警戒を要する範囲外であっても被災地域では、早期にインフラを復旧にすることによって経済活動を再開させる必要がある。

引用文献

- 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、第64巻、pp.33-51.
- 井村隆介（1998）：史料からみた桜島火山安永噴火の推移、火山、第43巻、pp.373-383.
- 加茂幸介（1978）：桜島における噴火の前駆現象と予知、火山、第23巻、pp.53-64.
- 九州地方整備局大隅河川国道事務所（2007）：桜島火山広域防災マップ、http://www.qsr.mlit.go.jp/osumi/files/Content/234/pdf/150424_

bousai_map.pdf

- 小林哲夫 (1982): 桜島火山の地質: これまでの研究の成果と今後の課題、火山、第27巻、pp.272-292.
- 小林哲夫 (2009): 桜島火山, 安永噴火 (1779-1782年) で生じた新島 (安永諸島) の成因、火山、第54巻、pp.1-13.
- 小林哲夫・味喜大介・佐々木寿・井口正人・山元孝広・宇都浩三 (2013): 桜島火山地質図、産業技術総合研究所.
- 佐々憲三 (1956): 地震予知に関する 2、3 の問題 (II)、地殻変動について、京都大学防災研究所設立 5 周年記念論文集、pp.3-7.
- 下川悦郎・地頭園隆 (1991): 大正 3 年桜島大噴火が火山周辺域の侵食災害に及ぼした影響、自然災害研究西部地区部会報、第12号、pp.73-80.
- 玉置哲也・多々納裕一 (2014): 降下火山灰による道路機能障害評価とその復旧順序決定手法の提案、自然災害科学、Vol.33、特別号、PP.165-175.
- 為栗健・八木原寛・筒井智樹・井口正人 (2022): 高分解能な 3 次元地震波速度構造解析による始良カルデラ下のイメージング、火山、第67巻、pp.69-76.
- 津久井雅志 (2011): 史料にもとづく桜島火山1779年安永噴火の降灰分布、火山、第56巻、pp.89-94.
- 安田成夫・梶谷義雄・多々納裕一・小野寺三朗 (2011): アイスランドにおける火山噴火と航空関連の大混乱、京都大学防災研究所年報、第54号 A、pp.59-65.
- 山里平・舟崎淳・高木康信 (2013): 気象庁の火山防災業務、防災科学技術研究所研究資料、第380号、pp.9-15.

(京都大学防災研究所火山活動研究センター教授)