

1955年以降の桜島南岳活動期の火山災害

Volcanic Disaster during the Eruptive Period since 1955 at Sakurajima Volcano

井口正人・山田大志

Masato IGUCHI and Taishi YAMADA

Synopsis

Eruption with Vulcanian type continued at the summit craters Minamidake and Showa continued since 1955. Volcanic disaster during the eruptive period is summarized. Factors causing disasters are volcanic block, lapilli, ash, air-shock, and debris flow triggered by rain fall. No disaster was induced by pyroclastic flows. Volcanic blocks ejected by 20 explosions reached distances >2.5 km and destroy residential houses and hotels. Lapilli fall broke windows of cars, and such a disaster occurred up to a distance of 20 km (87 events). Air-shocks (>300 Pa) broke windows of houses and buildings (39 events). Debris flow triggered by rain fall frequently occurred after a large amount of volcanic ash deposition.

キーワード: 火山災害, 火山岩塊, 火山レキ, 火山灰, 火砕流, 土石流, 空振

Keywords: volcanic disaster, volcanic bomb, lapilli, volcanic ash, pyroclastic flow, debris flow, air-shock

1. はじめに

桜島の南岳の爆発的噴火活動は1955年10月13日に始まり、2020年12月までに約15,000回の爆発が発生している。桜島の爆発は「ブルカノ式噴火」と呼ばれる。強い空振を伴って火山岩塊（大きな噴石）を飛散させ、マッシュルーム型の噴煙を形成してその最頂部の高度は火口上5000mに達することもあり、瞬間的に多量の火山灰を放出することに特徴がある。また、稀に火砕流が発生する。ブルカノ式噴火以外には溶岩噴泉やストロンボリ式噴火が発生するが（石原・井口, 1989）、この時の火山灰放出量は多くない。火口底に溶岩ドームを形成することもあるが、火口から流出してはいない。また、噴煙高度は高くないものの火山灰を連続的に放出することもあり、多量の火山灰が山腹から山麓にかけて堆積する。

このような噴火活動による火山災害の要因は、火砕物（火山岩塊、レキ、火山灰）の降下、火砕流、空振、また、降雨時に発生する土石流である。このような災害要因によって桜島及びその周辺では、様々な

火山災害が発生した。本稿では、過去の文献や新聞記事を調査することにより、1955年以降の南岳の噴火活動による災害要因の影響範囲と発生した火山災害について取りまとめた上で、その特性について考察する。

2. 1955年以降の桜島南岳の噴火活動

桜島南岳では1955年10月13日15:30に突如として爆発的噴火が発生した。これがその後65年にわたり、2021年現在でも継続する南岳における山頂噴火活動の始まりである。南岳の山頂噴火活動は、強い空振を伴って、火山岩塊、レキ、火山灰を短時間に放出するブルカノ式噴火の発生により特徴づけられる。京都大学防災研究所は、1963年以降、ハルタ山（南岳A火口から2.7km, Fig.1）に設置したS-1000機械式地震計により観測された地震動振幅が 10μ 以上、志田式微気圧計により観測された空気振動振幅が10Pa以上の噴火を「爆発」として計測してきた。一方、鹿児島地方気象台は噴煙や火山岩塊の放出などの目視観測

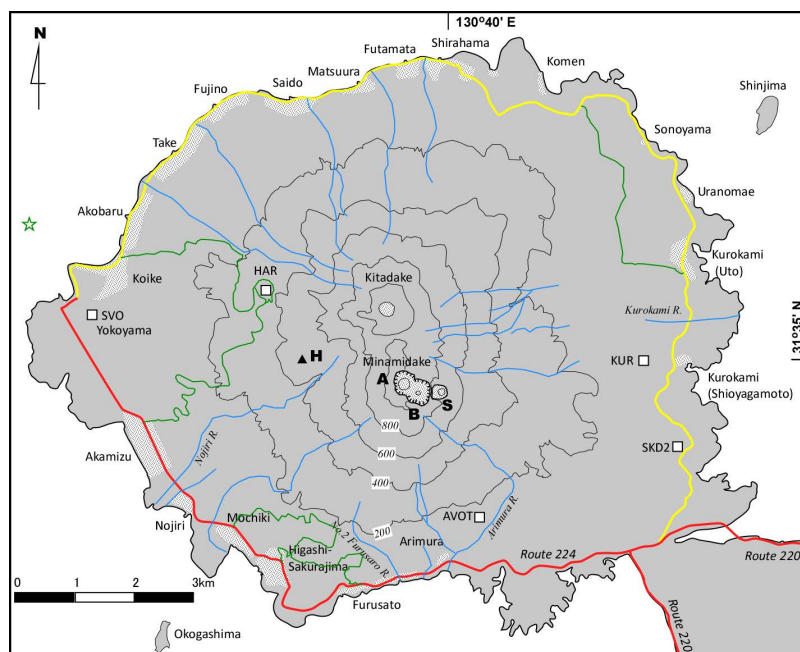


Fig. 1 Geographical and social information of Sakurajima volcano. Red line: national route, yellow: prefectural road, green: city road, blue: rivers. Hatched areas indicate villages. Squares show the main observation sites, SVO: Sakurajima Volcanological Observatory, HAR: Harutayama Observatory equipped with an underground tunnel, AVOT: Arimura underground tunnel site. Eruptive craters in the Minamidake summit area are indicated by “A” (A-vent of Minamidake), “B” (B-vent of Minamidake) and “S” (Showa crater). Hikinohira cone is indicated by “H”.

に計器観測を補足的に用いることにより「爆発」と「噴火（噴煙高度火口上1000m以上）」を認定している。京都大学防災研究所と鹿児島地方気象台による「爆発」判定は概ね同じであるが、若干の相違がある。そこで、京都大学防災研究所と鹿児島地方気象台の観測記録を統合し、ハルタ山を基準観測点として10Pa以上の空振が観測された、もしくは鹿児島地方気象台における空振記録から推定される噴火を「爆発」とすると、「爆発」は1955年10月から2020年12月までに14,681回発生していることになる。なお、昭和火口の噴火については有村観測坑道（昭和火口から2.1km, Fig.1のAVOT）を基準観測点とした。

Fig.2aに1955年から2020年までの月別爆発回数を示す。爆発回数の推移と火口の位置から1955年以降の噴火活動期は4つに分けられる。南岳第1活動期：1955年10月～1971年4月、南岳第2活動期：1972年3月～概ね2005年、昭和火口活動期：2006年6月～2017年10月、南岳第3活動期：2017年10月から2021年時点でも継続中。

2.1 南岳第1活動期

1955年10月13日に最初の爆発が発生し、10月31日まで噴火活動が続いた。その後、しばらく静穏であったが、1956年以降、爆発が頻発した。噴火活動のピ

ークは1960年であり、418回の爆発が発生した。1963年と1968年には一時的に爆発回数が増加したが、1961年以降、長期的に噴火活動は低下傾向にあり、爆発活動は1971年4月29日まで続いた。1955年10月に南岳が爆発活動を開始した時点では、南岳の明瞭な火口地形はA火口しかなかった。南岳南東縁の噴気地帯は、1960年代中頃からB火口として噴火活動を開始し、その後、A火口と同等の大きさを持つ火口へと成長した。1971年4月29日に発生した爆発以降、1972年3月2日まで約10か月爆発は発生しておらず、これをもって南岳第1活動期の終息とする。

噴火活動は低下したが第1活動期の後半は、1968年5月29日に有感地震を含む群発地震活動が発生し（吉川・西, 1969）、桜島北部を中心とした桜島全体の地盤の隆起が見られる（石原・江頭, 1978）など、地震活動と地盤変動はその後の噴火活動の活発化を予見させるものであった。

2.2 南岳第2活動期

1972年3月2日から再び爆発が発生するようになり、9月中旬以降、爆発活動が激しくなった。爆発回数が多いのは、1974年と1983年～1985年であり、1974年には411回の爆発が、1983年、1984年、1985年にはそれぞれ434回、342回、480回の爆発が発生

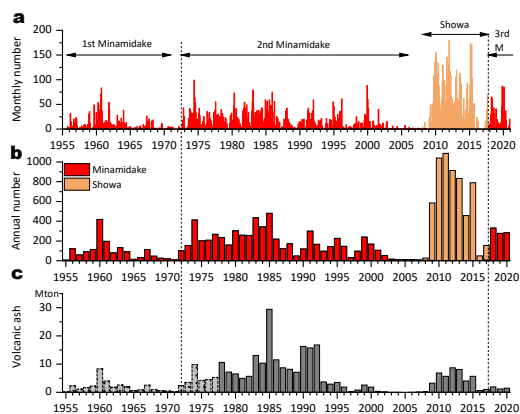


Fig.2 Eruptive activity of Sakurajima during the period from 1955 to 2020. a: Monthly number of explosions, b: annual number of explosions, c: volcanic ash discharged from the craters. Hatched bars indicate estimation from annual number of explosions.

した。南岳第2活動期の特徴として爆発回数が多いだけでなく、火山灰放出量が多いことが挙げられる。これらの年はその傾向が顕著であり、1000万トン/年を超えている。特に、1985年には2940万トンの火山灰が放出された (Fig.2)。桜島の南岳第2活動期にはブルカノ式だけでなく、ストロンボリ式噴火や火山灰連続放出が頻繁に発生している。BL型地震の群発を伴うストロンボリ式噴火は火山灰放出量が小さいが、火山灰連続放出は火山灰放出への寄与が大きい (井口・他, 2019)。1988年以降、爆発活動の低下傾向が表れ始めた。2003年以降は年間10回程度の爆発しか発生しておらず、火山灰放出量も1万トン未満と、著しく減少した。

南岳第2活動期は4回の活動期の中で最も激しく、本稿において取り扱う火山災害の多くはこの時期に発生した。

2.3 昭和火口活動期

昭和火口は、南岳山頂火口 (B火口) から約500m東にある火口で、1939年10月から噴火が発生するようになり、1946年3月には溶岩を流出した (昭和噴火)。南岳第1および第2活動期に、多量の火山灰の堆積により、火口は埋まっていたが、2006年6月4日に58年ぶりに活動を再開した。2006年6月と2007年5月の噴火活動は2~3週間続いた小規模なマグマ水蒸気爆発であったが、2008年2月に、マグマ性噴火に移行し、2009年後半から2015年前半まで年間1000回のペースで爆発が頻発した。昭和火口における爆発はその発生頻度が高いが火山灰放出量は年間数百万トンにとどまっており、南岳第1および第2活動期の爆発よりも小規模であるといえる (Iguchi et al., 2013)。

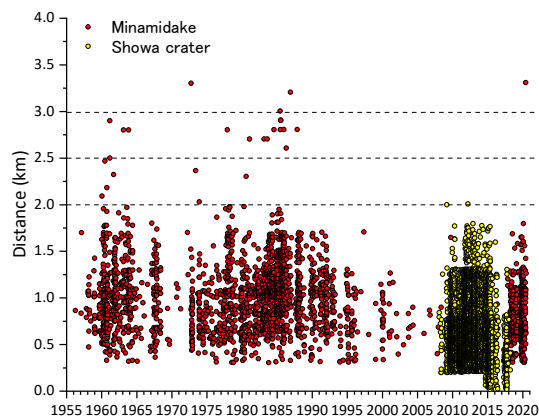


Fig.3 Flight distance of volcanic blocks ejected by explosions.

2.4 南岳第3活動期

昭和火口では2017年10月13日まで爆発が繰り返されたが、約2週間の静穏化を経て、10月30日から南岳において爆発が発生するようになった。2018年、2019年、2020年の爆発回数は330回、276回、283回であり、南岳第2活動期前半の爆発回数に匹敵するが、火山灰放出量は年間100万~200万トンと、昭和火口活動期よりもさらに低下している。

3. 火山岩塊

南岳の爆発は、火山岩塊を遠方まで飛散させる。最初に発生した1955年10月13日15時30分の爆発では、北岳において火山岩塊とレキに遭遇した登山者に死者・負傷者9名を出す災害が発生した。その後、桜島では南岳火口から2km以内への立入りは禁止となったが、火口周辺が完全に封鎖できたわけではなく、1964年2月3日14時20分の爆発では中岳において被災した重軽傷者8名が記録されている。現在では、火山体の浸食がすすみ、登山道そのものが崩壊しているので火口周辺域への立ち入りができないが、爆発によって火山岩塊が南岳火口から2km以上の距離まで飛散し、集落にその一部が落下したことがある。最近では2020年6月4日2時59分に発生した爆発により、火山岩塊が南岳の南西山麓の東桜島町の居住地域近くに落下した。飛散した距離は約3.3kmであった。

3.1 火山岩塊の到達距離

桜島の爆発による火山岩塊の飛散距離を検討するために、1955年以降の爆発について気象庁の火山報告の記載に基づいて火山岩塊の到達距離の時系列を Fig.3に示す。火山報告では落下地点を南岳の合目で表記してあるので、合目に対応する火口からの距離

Table 1 Flight distance (≥ 2.5 km) and launch velocity of volcanic blocks

No	Date	Δ (km)	A (Pa)	V_0 (m/s)	Remarks
1	1961/3/6 16:33	2.9	947	229	Mochiki
2	1961/3/6 17:50	2.5	384	210	Arimura
3	1963/2/12 0:19	2.8	324	224	Higashi-Sakurajima, Arimura
4	1963/11/6 19:03	2.8	552	224	Arimura, Furusato
5	1972/10/2 22:29	3.3	630	247	Furusato
6	1977/11/30 3:47	2.8	306	224	Arimura
7	1981/1/20 16:32	2.7	207	220	Arimura
8	1983/2/18 13:26	2.7	201	220	Arimura, agricultural hut burned
9	1983/8/2 14:45	2.7	306	220	Harutayama
10	1984/7/21 15:02	2.8	459	224	Arimura, PDC
11	1985/6/8 13:16	3.0	510	234	Higashi-Sakurajima
12	1985/6/16 11:47	2.8	486	224	Higashi-Sakurajima
13	1985/6/30 11:21	2.9	288	229	Higashi-Sakurajima
14	1985/7/6 17:20	2.9	306	229	Arimura, house damaged
15	1985/7/10 14:14	2.9	288	229	Arimura, house damaged
16	1985/12/19 18:01	2.8	333	224	Arimura
17	1986/4/16 5:37	2.6	459	215	Nojiri River
18	1986/11/23 16:02	3.2	768	243	Furusato, Hotel damaged
19	1987/11/17 20:56	2.8	432	224	Higashi-Sakurajima
20	2020/6/4 2:59	3.3	514	247	Higashi-Sakurajima

Δ : flight distance, A : amplitude of air-shock at station HAR, V_0 : launch velocity in vertical direction

範囲に対して乱数を与え、飛散距離とした。また、山麓に落下し、落下地点が確認されている火山岩塊については京都大学防災研究所の現地調査 (Iguchi, 1988) と新聞記事の記載を参考にして飛散距離を決定した。

飛散距離が推定または決定できた2550回の南岳における爆発のうち、99%に相当する2523回の爆発による火山岩塊の飛散距離は2.0km未満であり、災害対策基本法第63条により鹿児島市長が設定した警戒区域を火口から2kmの範囲とする妥当性が確認できた。また、2kmを超えた距離まで飛散した事例は27回あり、飛散距離の最大値は3.3kmであった。2020年6月4

日の爆発は最大級規模であり、3kmを超えたのは1986年11月23日16時02分の爆発から34年ぶりである。

気象庁は2007年12月から噴火警戒レベル1~5で表される噴火警報を発表しているが、火山岩塊の集落付近への落下はレベル5 (居住区域に影響があり、避難を要する。過去には2015年口永良部島噴火の事例がある。) に相当する。噴火警戒レベルの判定基準 (気象庁, 2017) によれば、火山岩塊が火口から2.5km以上の距離に飛散したときにレベル5に引き上げることになっている。火山岩塊が2.5km以上飛散した爆発は、20回発生している (Table 1, Table 1A)。これらの爆発について、火山岩塊の射出角を63度に仮定

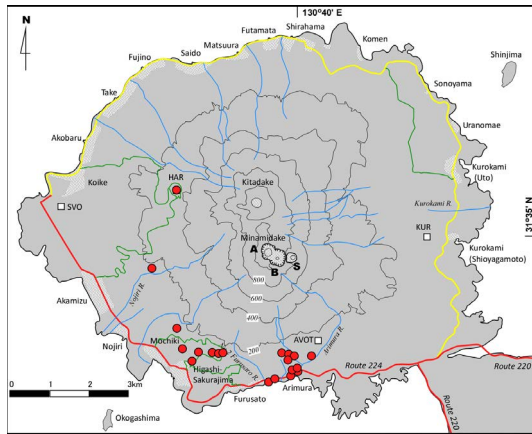


Fig.4 Locations of landing point of volcanic blocks ejected by explosions.

し、空気抵抗を考慮したMinakami (1942) の弾道方程式に基づいて初速度を推定した。火山岩塊の初速度は射出角に依存するので(井口・他, 1983), 鉛直方向に射出される岩塊の初速度に換算しTable 1に示した。爆発時の鉛直方向の初速度は210m/s~250m/sに達していると推定される。また、鉛直方向の初速度爆発に伴う空振の振幅は概ね300Pa以上に達している (Table 1)。

これらの爆発については火山岩塊の落下地点が確認されているので落下地点をFig.4に示す。ハルタ山と野尻川に落下した事例を除くと、南山麓の東桜島、古里、有村集落において落下が確認されている。これは、火山岩塊の射出特性に方位依存性があることを示すものではなく、人家に近いため落下が確認しやすい地域であることを示す。逆に言えば、東桜島、古里、有村集落は火山岩塊による災害の危険性が高いといえる。

3.2 火山岩塊による被害

火山岩塊は高温であるため、山火事が南岳第1および第2活動期によく発生した。また、木造建造物の場合は、焼失することもあり(1983年2月18日の事例)、発見が早かったためにぼやで済んだ事例も多い。アスファルトで舗装された道路等に落下した場合は、アスファルトは炎上する (1983年8月2日の爆発)。

火山岩塊は1トン程度に達することもあり、落下速度が200m/sを超えているために着地したときの衝撃が大きい。1986年11月23日16時02分の爆発では、古里温泉のホテル山下家を岩塊が直撃し、屋根と鉄筋コンクリートのフロント床を貫通して地下倉庫に達した事例がある。構造物でなければ、最大数メートルのインパクトクレータを形成する。1984年7月21日15時02分の爆発では、国道224号に並走する高圧送電線と電話線が火山岩塊により切断された。また、火

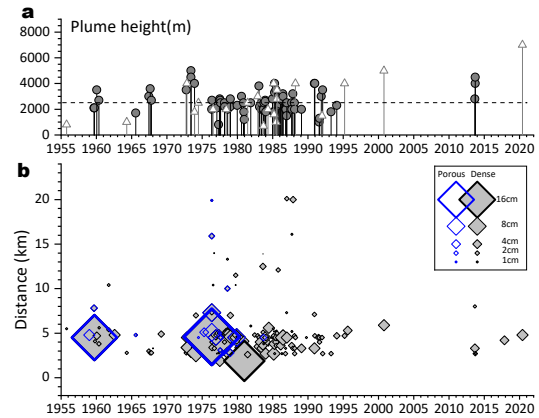


Fig.5 a: Plume height of explosions. b: Time series of flight distance of lapilli ejected by explosions.

山岩塊は着弾の衝撃で粉々に破砕されることが多く、その岩片は周囲に飛散して被害を拡大させる。2020年6月4日2時59分の爆発では、破砕された岩片が100m飛散して小屋の屋根を貫通した。

爆発回数が480回に達した1985年には6月8日から7月10日の約1か月と12月19日のあわせて6回このような爆発が発生しており、危険な状態であった。鹿児島市は単独事業として南岳火口に最も近い有村地区の希望する住民に対して鹿児島市街地への移転を行った。

一方、2017年まで続いた昭和火口における爆発では、火山岩塊の到達距離は最大で2.0kmであり、居住地域まで飛散した事例はない。昭和火口における爆発力は南岳に比べて小さいといえる。

4. 火山レキ

火山レキは大きさ2mmから64mmまでの小石であるが、本稿で取り扱う災害要因のうちでは、その落下による被害事例が最も多い。火山レキは爆発に伴う噴煙の上昇によって噴煙の中を上昇する。それぞれの大きさに対応する高度に達した後は、風によって風下に移流しながら落下する。

4.1 火山レキの到達距離

Fig.5に1955年以降の噴火活動において、火山レキの落下が確認された爆発について、火山レキの種別と大きさ、火口からの距離をTable 2Aにまとめた。Table 2Aは加茂・井口 (1984) にそれ以降の噴火事例を追記したものである。火山レキの落下が確認された地点の南岳火口からの距離の時系列をFig.5に示した。火山レキが火口から概ね3km以遠において確認された噴火は1955年以降、173例発生している。火山レキは発泡した軽石であることもあるが、多くは緻

密な溶岩片である。桜島島内に相当する距離6km以内で確認された事例が多いが、6kmを超えるものが18例あり、最大で距離20kmまで到達している。

噴煙高度が高いときにレキの落下が3km以遠において確認されていることが多い。173例の爆発のうち、噴煙高度が確認できたのは100例であるが、そのうち82例は2000m以上、31例は3000m以上に達している。全期間を通して噴煙高度が3000m以上に達した噴火はわずか8%なので、噴煙高度が高いときに火山レキが遠方まで達する傾向が認められる。

風が強く噴煙高度が高ければ、遠方まで到達する。

4.2 火山レキによる被害

レキの落下が3km以遠において確認された噴火のうち、被害の報告は87例ある。被害の対象を車両、建物、航空機、その他に分類してTable 2Aに示した。

(1) 車両の被害

走行中または停車中の車両のフロントまたはリアガラスが破損する事故が最も多く、69件を抽出することができた。レキの落下速度は10m/s～50m/sであり、走行中の車両であれば、相対的な衝突速度はさらに増加する。1987年11月17日20時56分の爆発では、火口から20km離れた鹿屋市輝北町で車のフロントガラスが破損している。また、多量のレキの堆積により車両のスリップ事故もよく発生している。

(2) 建物の被害

次いで建築物の一部が被害を受ける事例が多く、これまでに14件起っている。瓦、スレート材などの屋根材が被災することが多く、屋根の上に設置された太陽熱温水器が破損することもある。太陽光発電が普及してきた現代では建物の屋上や屋根の上に設置されたソーラーパネルが破損することを想定すべきであろう。

(3) 航空機のウィンドシールドの被害

航空機のウィンドシールドが火山レキとの衝突により割れるようなインシデントは深刻な問題である。南岳から25kmの距離にある鹿児島空港周辺ではこれまで11件のウィンドシールド破損の記録がある

(小野寺・他, 1997; Onodera and Kamo, 1992)。1979年11月18日7:42に発生した爆発では、鹿児島空港を発着する航空機(L1011)が相次いで被災し、ウィンドシールドがひび割れた。最初は鹿児島空港発羽田行きの日全空622便が離陸直後に、続いて、大阪空港から鹿児島空港に向かう日全空541便が、南岳から約50km離れた宮崎県都城市上空で被災した。この爆発から2点指摘できる。1つは桜島およびその上空が冠雲により噴煙を把握できていない場合は、噴煙を目視できず回避行動ができていないことである。11月18日の爆発では、桜島の7合目以上に雲がかかってい

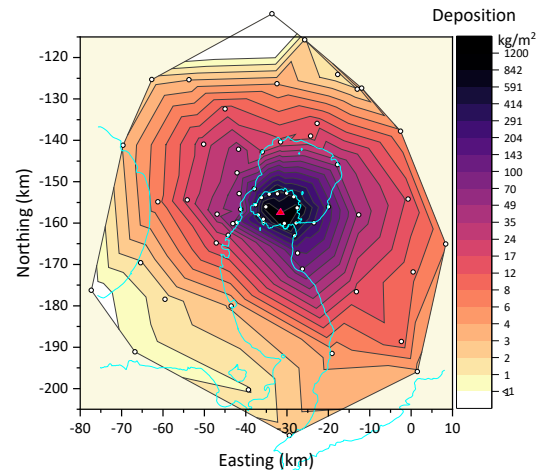


Fig.6 Deposition weight of volcanic ash during the period from August 1978 to December 2020. Circles show sampling sites, managed by Kagoshima Prefecture. The red triangle is the Minamidake crater.

た(気象庁, 1981)。もう1つは気象場を反映した火山灰拡散予測の必要性である。この噴火では下層と上層で風向が異なる。地上と900hPa指定気圧面の風向は320°であるが、700hPaおよび600hPa、500hPa指定気圧面では、風向はそれぞれ、285°、255°、227°であり、40m/sを超える強い風が西から南西方向から吹いていた。火口直上の北西風を受けて有村展望台から黒神には多量のレキ・軽石が落下している(気象庁, 1981)。高度4000m以上では、南西風となるので都城市上空に火山レキが達することが可能である。

5. 火山灰

5.1 降下火山灰分布と堆積量

粒径2mm未満の小粒子である火山灰は、1955年以降の南岳の爆発により恒常的に被害をもたらしてきた。鹿児島県は桜島からおよそ50kmの範囲にある県内58か所の観測点における降灰重量の計測を1978年に開始した。1978年から2020年までに2.4億トンの火山灰が放出され、噴火活動のピーク時の1985年には2940万トンの火山灰量の噴出が推定されている(Fig.2)。この43年間における積算降灰量の分布をFig.6に示す。桜島島内では南部の有村での降灰重量は1210kg/m²に達した。次いで、北西部の湯之平の1045kg/m²、東部の黒神の951kg/m²が多い。桜島島外では南東方向における降灰量が多く、垂水市海潟が391kg/m²、牛根麓が287kg/m²、27km離れた鹿屋市でも15kg/m²、43km離れた高山でも10kg/m²に達した。

個々の噴火については降灰量の計測が少ないので、

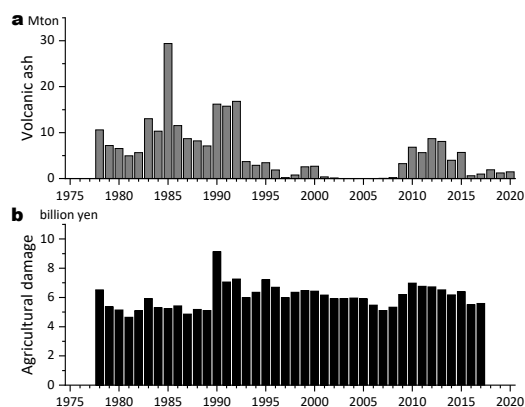


Fig.7 Changes in the agricultural damage (b), as compared with discharge of volcanic ash (a)

計測がある代表的な噴火について述べる。

1982年8月24日14時15分に始まった噴火は多量の火山灰を桜島西部から鹿児島市中心部に降下させた。降灰量はSVOで $10.8\text{kg}/\text{m}^2$ 、鹿児島県庁で県庁 $5.52\text{kg}/\text{m}^2$ 、鹿児島地台 $0.285\text{kg}/\text{m}^2$ に達した。降灰により視界不良となったため、桜島港から赤水の国道224号は通行不可能になり、桜島フェリーも1便が欠航した(気象庁, 1983)。SVOでは屋内の照明をつける必要があるほどであった。1987年11月17日20時56分の爆発では火山灰の噴出が約2時間続き、桜島の東部に多量の火山灰を降下させ、黒神では $11.6\text{kg}/\text{m}^2$ に達した。火山灰量は20万~40万トンと推定されている(石原・小林, 1988)。1995年8月23日から24日にかけて「爆発」を含む噴火が頻発した。観測されている噴煙高度は2000m以下と高くはないが、台風7号が先島諸島を通過しており、桜島上空では $10\text{m}/\text{s}$ ~ $14\text{m}/\text{s}$ の強風が吹いており、火山灰は九州北部に達した。火山灰量は40万トンと推定されている(石原・西, 1998)。これ以降、多量の降灰を伴う噴火は少ないが、2012年7月24日19時15分に発生した爆発は例外的に大きい。噴煙高度は8000mに達し、SVOでは $11\text{kg}/\text{m}^2$ の降灰が観測された(井口, 2013)。

5.2 降灰による被害

(1) 農業被害

火山灰の降下による被害では、農林水産業の被害が圧倒的に多い。火山灰には SO_4^{2-} や Cl^- などの酸性イオンが付着しており、硫酸イオンであれば $10,000\text{mg}/\text{kg}$ を超えることがある(小坂・小沢, 1975)。桜島島内では温州みかんなどの柑橘類やビワなどの果実への被害が深刻である。また、降灰量が増加した南岳第2活動期には肝付地区、曾於地区など桜島島外での農業被害額が著しく増加した(石村, 1985)。鹿児島県のまとめでは県内において毎年45億円から

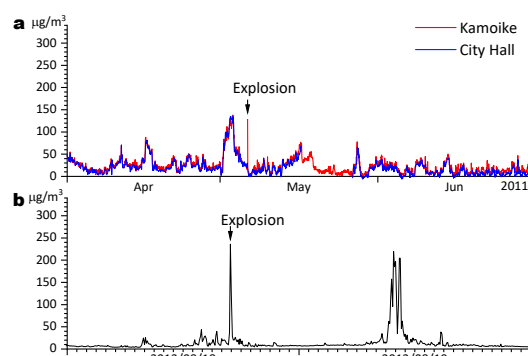


Fig.8 Temporal change of concentration of PM2.5 in the atmosphere. a: Comparison between Kamoike and City Hall sites. b: Increase in PM2.5 concentration at SVO caused by an explosion at 16:31 on August 18, 2013.

90億円の被害額が報告されており、1978年から2017年までの総被害額は2400億円に達している(Fig.7)。

(2) 交通への影響

道路、鉄道、航空機などの交通インフラに影響を与えることも多い。車のスリップ事故はよくあり、火山灰よりも定義上レキに分類される噴出物(2mm以上)が多い場合にスリップ事故が発生しやすい。例えば、1985年4月13日7時22分の爆発後では、レキを含む多量の火山灰が、有村町と古里町に降下したが、普通乗用車がスリップして対向車線のタンクローリーと正面衝突した。1995年8月23日から24日にかけて発生した噴火では九州自動車道が閉鎖された。また、2012年7月24日19時15分に発生した爆発では、国道224号線が桜島口から袴腰まで通行規制された。

鉄道については、鹿児島市の市電の脱線が多い(1983年9月19日、前日からの降灰による。1988年6月20日など)。市電車両23両のパンタグラフが破損したこともある。1985年6月から8月に、降灰が多かったときは、警報機や遮断機の誤作動が頻繁に発生しており、遮断機が下がったままの状態になったり、遮断機が下がらなかったことによる交通事故も発生している。2012年7月24日の爆発およびその後の噴火では降灰によってポイントの清掃に時間を要したことや列車運行システムで列車の動きを検知できなくなったことにより、運休や遅延が発生した。

エンジンへの火山灰吸引による全エンジン停止が最も深刻な航空機への影響として知られているが(Kueppers et al., 2014)、桜島周辺では、エンジン停止には至った事例はない。

(3) 健康への影響

健康被害も懸念される。脇坂・他(1987)は桜島町と南西に50km離れた大浦町の受療記録を調査して、

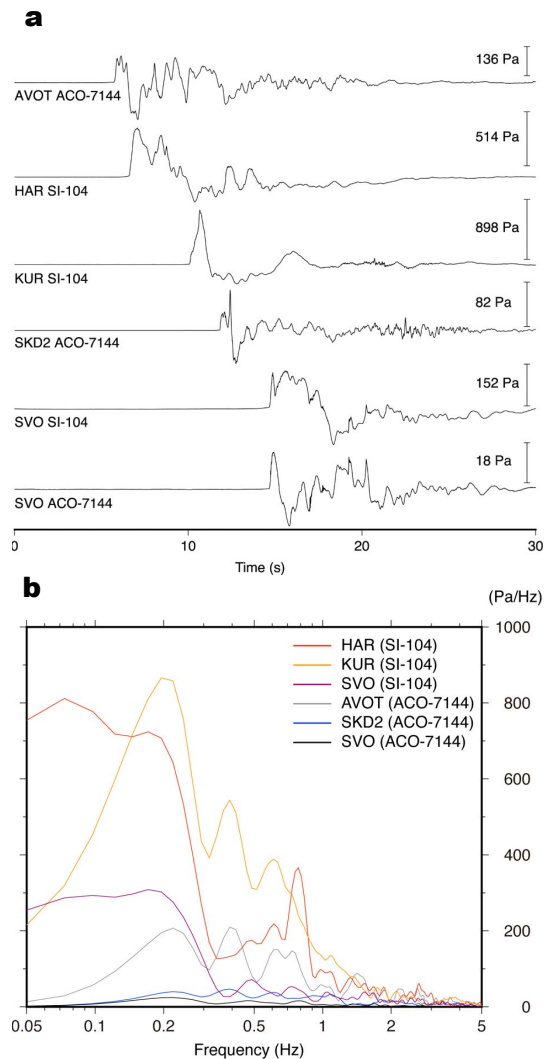


Fig.9 Infrasound generated by an explosion on June 4, 2020. a: Waveform. See Fig. 1 for the locations of stations. SI-104 and ACO-7144 are types of microphones. b: Spectra of infrasound waveform. ACO-7144 is less sensitive to long-period waves.

呼吸器系疾患のうち気管支炎，喘息様疾患，肺炎，また，結膜炎の有病率が桜島町の方が高いことを示した。

火山灰粒子のうち微小火山灰粒子状物質の濃度は呼吸器系疾患の発症に注目される。鹿児島県が鹿児島市街地において実施しているPM2.5の濃度測定でも，桜島の噴火による一時的な増加はみられるものの通常のエアロゾル濃度と同程度である (Fig.8a)。一方，SVOでは2013年8月18日の昭和火口の爆発（噴煙高度）で400g/m²の降灰を観測し，PM2.5の濃度は240μg/m³まで増加したが，分単位の増加で一時的なものであった (Fig.8b)。南岳第2活動期においては，長時間にわたり，火山灰連続放出が続くことが多く，高濃度のPM2.5の浮遊が長時間続いたものと思われ

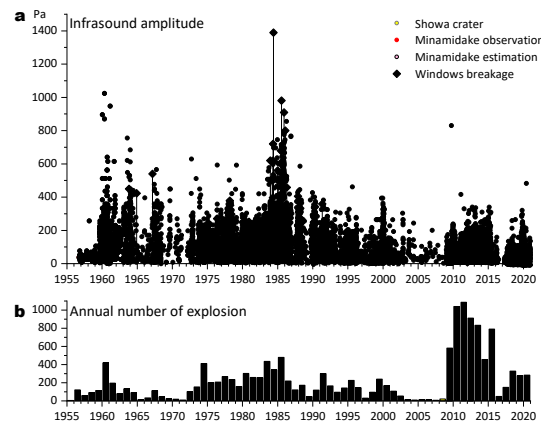


Fig.10 Temporal change of amplitudes of air-shocks generated by explosions. For explosions at Minamidake, the amplitudes are measured at station HAR and estimated from a microbarograph at Kagoshima Meteorological Office. The amplitude of air-shocks from Showa crater are measured at station AVOT.

る。南岳第2活動期のうち，降灰量の多い1992年以前では，PM2.5の影響が，昭和火口噴火活動期および第3南岳活動期よりも深刻であったことが想像できる。

6. 空気振動

6.1 爆発に伴う空気振動振幅と波形の特性

ブルカノ式噴火に伴い強い空気振動が発生する。空気振動は火口底の隆起に伴う微弱な信号から始まり (Yokoo et al., 2009)，急激な膨張に至り，その後，収縮と膨張を繰り返す。急激な膨張は火口直上では音速を超えており，衝撃波である (Ishihara, 1985)。最近の爆発において空気振動の大きかった2020年6月4日2時59分の爆発に伴う空気振動の波形とスペクトルをFig.9に示す。この爆発による空気振動はハルタ山において514Pa，黒神では898Paに達している。膨張相が急激に立ち上がる場合は，スペクトルにおいて0.2Hz以下の長周期成分が卓越して観測される (Fig.9b) ことが注目される。

1955年以降について空振振幅の時系列をFig.10に示す。空振は最大で1000Paを超える場合もあり，ブルカノ式噴火が頻発した1983年から1985年には，空振振幅が300Pa以上となる爆発が228回発生するなど，空気振動が増大していることがわかる。

6.2 空振による被害

爆発に伴う空振による被害としては建物の窓ガラ

Table 2 Breakage of windows due to air-shocks of explosions.

	Date	A (Pa)	Δ (km)	Damage situation
1	1963/11/6 15:17	450	3.2	Furusato
2	1963/11/9 13:51	360	3.2	Furusato
3	1964/12/6 5:58	423	3.2	Furusato
4	1967/3/8 19:43	540	3.2	Furusato
5	1976/5/17 13:42	270	7.4	Kaigata (100), Furusato (26), Ushine-Fumoto
6	1977/2/1 10:05	198	7.4	Kaigata (65)
7	1977/11/30 3:47	306	3.2	Furusato (76)
8	1978/1/19 10:20	288	6.9	Ushine-Fumoto
9	1978/1/20 17:15	324	3.2	Furusato
10	1978/3/4 17:35	378	3.2	Furusato
11	1978/3/28 14:49	351	3.2	Furusato (19)
12	1978/5/22 16:06	297	7.4	Kaigata (5)
13	1978/8/10 11:34	243	3.7	Higashi-Sakurajima
14	1980/11/28 21:21	252	3.2	Furusato (2)
15	1983/9/20 15:18	198	9.3	Shinmachi
16	1983/12/13 10:28	620	3.2	Furusato
17	1984/1/10 14:56	500	4.9	Kurokami (door)
18	1984/1/11 21:40	297	3.7	Higashi-Sakurajima (1), Furusato (2)
19	1984/4/12 9:41	510	9.3	Kurokami, Furusato, Izumi-cho
20	1984/4/29 18:00	396	9.8	Kamoike
21	1984/5/4 8:10	720	9.6	Yasui-cho
22	1984/5/8 13:52	620	4.2	Nojiri, Higashi-Sakurajima
23	1984/6/3 11:49	1390	5.6	SVO (1 injured), Saido, Koike
24	1984/12/31 21:32	560	3.2	Furusato
25	1985/1/29 7:13	500	3.2	Furusato
26	1985/6/22 10:29	680	3.2	Furusato
27	1985/7/21 5:20	980	10.2	Koraicho(4)
28	1985/12/3 1:03	910	8.8	22 locations in Kagoshima (180), 8 doors
29	1985/12/19 18:01	333	7.3	Ushine (85)
30	1986/1/1 11:58	279	13.4	Futagawa, Ushine-Sakai (85)
31	1986/2/6 1:28	800	10.5	Tarumizu (82), Sakurajima (3), Kagoshima
32	1986/4/16 5:37	459	5.1	Koike, Arimura, Furusato
33	1987/11/28 11:19	405	7.4	Tarumizu (8), Sakurajima (1)
34	1988/1/30 22:06	378	3.2	Furusato (37)
35	1988/2/3 12:52	324	3.2	Furusato (1)
36	1988/3/27 12:52	333	3.2	Furusato (2)
37	1990/5/1 13:35	342	8.8	Nojiri (7) , Kagoshima(14)
38	1991/5/10 12:06	360	5.7	Higashi-Sakurajima, Yokoyama
39	1991/12/5 12:46	180	5.7	Yokoyama, door

A : amplitude of air-shock at station HAR, Δ : δ : distance from the crater

スが割れる被害が多い。Table 2に示すように1955年以降、39件の被害が発生している。空振振幅が大きかった1983年～1986年に被害事例が多い。ハルタ山における空振振幅が200～300Paを超えると被災率が急激に高くなる。

1983年12月3日1時03分の爆発による空振の被害が最も大きかった。この爆発による空振は910Paであり、南岳の爆発では最大級であった。火口から8.8km西にある尚古集成館では70枚のガラスが割れた。また、鹿児島市役所、鹿児島県庁など鹿児島市街地の中心

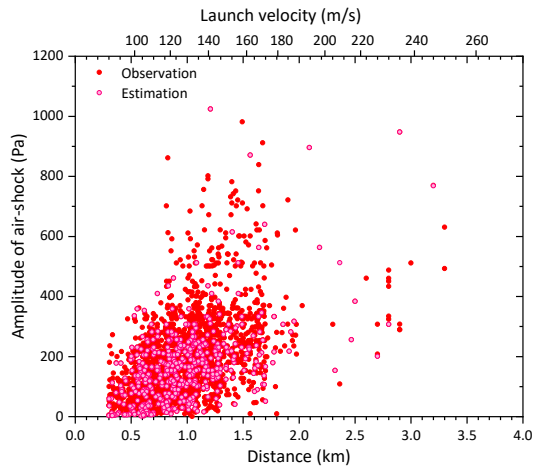


Fig.11 Relation between flight distances of volcanic blocks and amplitude of air-shocks.

部の20か所以上においてあわせて180枚の窓ガラスと8枚のガラス扉が破損した。また、鹿児島市役所では木製扉2枚のかんぬきが折れた。

6.3 火山岩塊の到達距離との関係

火山岩塊を飛散させる原因は、火道最上部に形成されるガス溜まりの破裂にあり (Yokoo et al., 2009), その圧力が高ければ、火山岩塊は遠方まで到達し、観測される空振も増大するはずである。Fig.11に火山岩塊の到達距離とハルタ山における空振振幅の関係を示す。両者の間には正の相関が認められ、到達距離が2.5km以上に達する場合、空振振幅は300Pa以上となる場合が多い。空振振幅が300Pa以上に達する爆発524回のうち30回(6%)で窓ガラスが被災しており、火山岩塊の2.5km以上の距離への飛散と空振による災害の両方に警戒が必要である。

7. 火砕流

桜島の山頂噴火活動期においても火砕流が発生することがある。南岳第1～第3活動期では流下距離が1km以上となる火砕流が9回発生している。

Table 3に流下距離が1km以上に達した火砕流を(加茂・石原, 1986)に加筆してまとめた。ここで噴煙高度は火山報告(気象庁)による。また、圧力源の体積変化量 V はハルタ山観測坑道における噴火発生後の地盤変動から微小球場圧力源(Mogi, 1958)を仮定して算出したものであり、噴出物量に比例する量と考えられる(Iguchi, 2016)。

火砕流を伴う南岳の爆発の特徴として、噴出物量が多いことが指摘できる。例えば、1967年8月22日16時2分に発生した爆発の噴煙高度は3600mに達して

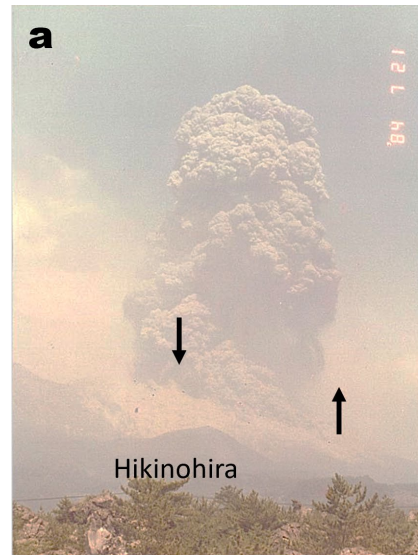


Photo 1 Pyroclastic flow from Minamidake crater. a: 15:02, July 21, 1984. B: 18:27, April 9, 1985. Photographs taken from SVO. Upward and downward arrows indicate front of pyroclastic flows and location of vent-A, respectively.

おり、レキ混じりの多量の火山灰が有村町を中心に降下した(気象庁, 1969)。また、1979年11月20日15時22分と36分に発生した爆発の噴煙高度は2700mおよび2000mであるが、多量のレキ混じりの火山灰が赤水から有村展望台にかけて降下し、東桜島町湯之では真っ暗になり車はライトをつけて徐行した(気象庁, 1981)ほどであるから、噴出物量はかなり多いことが推測される。1984年7月21日(Photo 1a)と1985年4月9日の爆発(Photo 1b)の噴煙高度はいずれも4000m以上であることから噴出物量が多いことが推定できる。このことは、噴火に伴う地盤変動量が大きいことから言える。降下火山灰量20万～40万トン(石原・小林, 1988)と推定される1987年11月17日20時56分の爆発では、47.6万 m^3 の圧力源の体積変化が観測された。また、2017年3月25日と噴煙高度が4700mに達した2018年6月18日の爆発でも圧力源の体積変化量は10万 m^3 を超えている。

火砕流シミュレーション(Itoh et al., 2000)により、

Table 3 Pyroclastic flows (flow distance $\geq 1\text{km}$) on Sakurajima volcano

Date	H (m)	C	Δ (km)	Dir	A (Pa)	V (10^3m^3)	Remarks
1967/8/22 16:01	3600	M	1.3 ¹⁾	W	9	—	Successive occurrence of eruptions at 15:44 (3800m), 15:45 (3800m), 15:47 (3400m). Heavy ash and lapilli fall on Arimura.
1974/7/7 10:03	x	x	1.0 ¹⁾	W	162	—	
1979/11/20 15:22	2700	x	1.2 ¹⁾	E	54	—	Successive occurrence of eruptions at 15:14, 15:22, 15:36. Heavy ash and lapilli fall on the S-SW flanks.
1979/11/20 15:36	2000	x	1.2 ¹⁾	E	27	—	
1984/7/21 15:02	>4000	x	1.4 ²⁾	SW	459	—	Many volcanic bombs on Arimura.
1985/4/9 18:27	4000	M	1.3 ²⁾	SW	144	—	PDC started 1 minute after the onset of vulcanian eruption.
1987/11/17 20:56	x	M	>1.0 ²⁾	W	432	476	One of the largest eruptions at Minamidake. Photograph was taken from SW flank (Nishiinoue, 2013)
2008/2/3 15:54	500	S	1.1 ³⁾	E	81	37	Initial stage of magmatic eruption at Showa crater. VAL was upgraded to 3. Similar pyroclastic flow may occur associated with an explosion at 10:17 on February 3.
2008/2/6 11:25	>1000	S	1.3 ³⁾	E	145	52	
2009/4/9 15:31	>4000	S	1.1 ²⁾	E	29	60	Inflationary ground deformation started 30 hours before the eruption
2013/8/18 16:31	5000	S	1.0 ⁴⁾	E	22	63	Largest eruption at Showa crater
2017/3/25 18:03	>500	M	1.1 ⁴⁾	E	10	123	After 8-months dormancy
2018/6/16 7:19	4700	M	1.3 ⁴⁾	SW	96	155	Inflationary ground deformation started 17 hours before the eruption

H : Plume height above the craters (Volcano Report, Japan Meteorological Agency). C: Crater. Δ : Flow distance of PDC. Dir: Flow direction of PDC. A : Amplitude of infrasound of the eruptions. V : Volume change of pressure source of the deflation ground deformation, estimated from tilt and strain records at Harutayama underground tunnel. x: Unknown, M: Minamidake crater, S: Showa crater, —: no measurement.

1)Kamo and Ishihara (1986). 2)Estimated from ground-based photographs. 3)Estimated from aerial photographs taken from a helicopter of Kagoshima Prefecture. 4) Kagoshima Meteorological Office.

野尻川に沿って1.3km流下した2018年6月18日の火砕流の初期体積は約4万 m^3 と見積もられる。火山灰放出量は野尻で2.0kgであり、地盤変動から見積もられる体積変化量15.5万 m^3 から火砕物の見かけ体積は約40万 m^3 と推定される。したがって、火砕物に占める火砕流の割合は10%となる。桜島の場合、火砕物に占める火砕流の割合は多くても10%であり、流下距離が1kmを超える噴火では多量の噴出物が必要であることがわかる。逆に言えば、小規模な噴火では流下距離が1kmを超えるような噴火は発生しない。

また、火砕流が発生するときは、噴火活動が高まっている状態である。火砕流が発生した1967年8月22日16時01分と1979年11月20日15時22分の爆発では、

その前に10分以内の間隔で爆発が頻発している。また、火砕流を伴った1984年7月21日と1985年4月9日の爆発を含む1984年と1985年は1955年以降で最も噴火活動が活発な時期である (Fig.2)。

昭和火口噴火活動期には地盤変動から推定される噴出物量が小さい場合でも火砕流が1km以上の距離まで流下している (Table 3)。1939年10月から11月まで繰り返された昭和火口の噴火活動でも火砕流がよく発生し(鹿児島測候所, 1940; 津屋・水上, 1940), 2008年から2017年の昭和火口活動期にも火砕流が50回発生している(鹿児島地方気象台, 2008など), 火砕流の発生しやすさは斜面に形成された火口の特徴かもしれない。

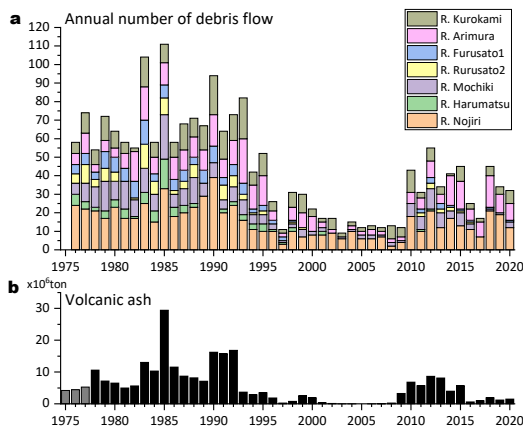


Fig.12 a: Annual numbers of debris flows along several rivers on Sakurajima volcano. See Fig. 1 for the locations of rivers. b: annual weight of volcanic ash discharged from the craters.

なお、火砕流の到達距離は最大で1.4kmにとどまっております、直接的な被害は発生していない。

8. 土石流

8.1 土石流の発生状況

桜島においては頻繁に降雨によって土石流が誘発されている。大隅河川国道事務所（2021）に基づいて、年間土石流発生回数を河川毎にFig.12aに示す。土石流の発生頻度が最も高いのは、野尻川であり、南岳南西斜面の集水域が広いことによるのであろう。大隅河川国道事務所（2007）によれば、野尻川を渡る国道224号の野尻橋での総流量は1万～46万 m^3 であり、流出速度は100～600 m^3/s である。次いで、有村川、黒神川での土石流が多い。有村川では、1984年8月25日に20万 m^3 、黒神川では1992年7月15日に58万 m^3 の土石流が流出した。年間の総土石流回数が最も多かったのは、1985年で111回に達した。次いで1983年、1990年が多い。土石流の発生は、南岳第2活動期のうち1990年代前半までが多い。1995年以降、減少し、年間10～20回まで低下したが、昭和火口活動期、南岳第3活動期には再び増加した。

このように土石流の発生は噴火活動と密接な関係があるように見える。大隅河川国道事務所によりまとめられた土石流の年間発生回数と火山灰放出量の推移を比較してFig.12に示す。福嶋・石原（2002）、田村・他（2010）に指摘されているように、土石流の発生回数は、爆発・噴火回数よりも火山灰放出量との相関が高い。火山灰は「爆発」だけで放出されるわけではなく、長時間継続する火山灰連続放出によって山麓に堆積する量の方が多い。例えば、1985年の

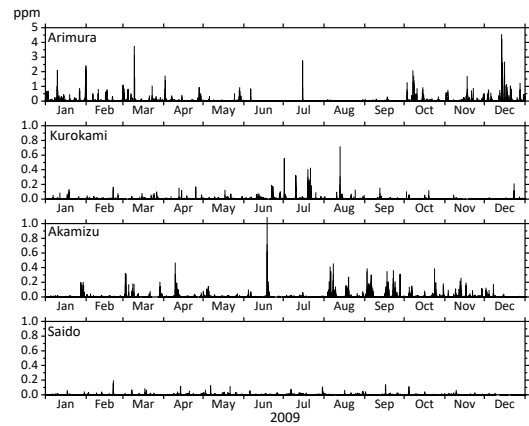


Fig.13 Hourly average of concentration of SO_2 gas. See Fig. 1 for the locations of monitoring sites.

例では、放出される火山灰量の約70%は火山灰連続放出によるものである（井口・他、2019）。また、爆発の規模は発生時期により異なり、昭和火口活動期および南岳第3活動期では爆発の規模が小さくなっている。また、噴火活動が低下、またはほぼ停止した状態であっても、土石流の発生は終息しないことが指摘できる。1992年までは1000万トン/年を超える火山灰放出量は1993年には300万トン/年まで急減したが、1993年の土石流発生回数はそれ以前とほぼ同様であり、その後、緩やかに減少した。2001年から2008年までの火山灰放出量は年間1万トン未満と噴火活動のピーク時に比べて4桁小さい状態であったが、土石流発生回数は年間10～20回程度を維持しており、土砂流出量が桁で低下したわけではない。

8.2 土石流による被害

土石流によって発生した被害を大隅河川国道事務所（2015）、気象庁（2013）に基づいてTable 4にまとめた。1974年には、河道内における砂防事業者8名の死亡が記録されているが、1980年代以降は河川の氾濫により、周辺集落に土砂が流出して被害が出た事例が多い。1983年2月2日には桜島南部の野尻川、持木川、第1・第2古里側の4河川で土石流発生した。第2古里川に近い古里温泉での被害が甚大で、1m級の巨岩を含む土砂500 m^3 が国道224号に流出し、ホテル、商店、民家にも浸入した。この地域では1984年4月19日も土石流が発生し、土砂1500 m^3 が国道224号に流出し、ホテル、民家7棟が被災した。さらに、同年8月25日には観測史上最大規模（約30万 m^3 ）の土石流が発生し、野尻川では5万 m^3 の土砂が氾濫した。野尻橋が破壊され、国道224号は不通となり、住民の避難が行われた。1990年代以降も土石流は発生し続けて

Table 4 Disaster caused by debris flow at Sakurajima

Date	Disaster
1964/7/19	One dead at a mouth of Arimura River
1968/6/30	The bridge girder was destroyed in the Nojiri River, and NR224 was flooded.
1974/6/17	Three sabo workers were killed by a debris flow in Nojiri River
1974/8/9	Five sabo workers were killed by a debris flow in No. 2 Furusato River. Two houses destroyed and one dead.
1975/4/17	Prefectural road closed
1975/9/17	Nojiri and Furusato River were flooded, bridge blocks were damaged, and cars were washed away. NR224 is closed.
1976/6/24	One dead and two houses destroyed due to flood of Nojiri River
1980/5/12	Damaged bridge guardrails and blocks on the Mochiki River.
1980/11/13	38 houses flooded
1982/7/24	Bridge on the Mochiki River was washed away. Debris flow over flowed on NR224.
1983/2/2	A debris flow flooded NR224 with 500 m ³ and infiltrated hotels, shops, and houses.
1983/3/2	Inundation of Kurokami and Arimura Rivers, NR224 closed.
1983/9/20	A debris flow occurred in the Nojiri River, NR224 closed.
1984/4/19	Hotels and 7 houses were damaged by debris flow in the No. 2 Furusato River. Debris with 1500 m ³ overflowed on NR224.
1984/6/8	Fire engine was swept away and rolled over by a debris flow in Kurokami River. NR224 closed, parapets, and water pipes were damaged.
1984/8/25	A large-scale debris flow on the Nojiri River, and 50,000 m ³ debris flooded and destroyed a bridge. NR224 closed. Evacuation of residents.
1987/7/17	Debris flow occurred in Mochiki River, revetment embankment was damaged, residents evacuated.
1988/8/22-23	Three debris flows closed NR224 and forced residents to evacuate. NR224 was flooded with 3,500 m ³ debris, and the sabo facilities were damaged.
1991/6/28	Sabo facilities damaged in Nojiri River

NR224: National route No. 224

いるが、被害は砂防施設にとどまっている。

9. その他の被害

桜島南岳からは火山ガスが常時放出されている。そのうち、噴火活動の活発であった南岳第2活動期においては常時、2000トン/日の二酸化硫黄が放出され、最大で4900トン/日に達している（森・他，2007）。1976年9月9～12日火山ガスで農作物に被害が発生した。桜島南西部の野尻では二酸化硫黄、フッ化水素による植物の被害が大きいと考えられている（古江・他，1987）。鹿児島県が観測している桜島島内の二酸化硫黄濃度の推移の例を2009年についてFig.13に示す。黒神、赤水、西道（桜島支所）については、ほとんど1ppmを超えていないが、有村では、12月14日に4.5ppmに達しており、許容濃度5ppm（平林，2014）

に近い値となった。Fig.2に示すように2009年12月には137回の爆発が発生するなど、10月ごろから昭和火口における噴火活動が活発化したことを反映している。2009年には1ppmを44時間、2ppmを18時間超えている。

桜島の爆発に伴いよく火山雷が発生するが、1955年以降については被害を伴うことはまれである。例外的に1983年5月22日12時37分の爆発は多量の火山灰を噴出した。火山雷が多数発生し、黒神地区に落雷し、家庭用のクーラーとテレビが損傷するなどの被害が発生した（加茂，1988）。

10. まとめ

1955年に始まり、2021年時点においても継続する桜島山頂噴火活動期の災害要因として、火山岩塊、

火山レキ、火山灰（火山ガス）、火砕流、土石流、空振があげられる。山頂噴火活動期は、南岳第1および第2活動期、昭和火口活動期、南岳第3活動期に分けられるが、多くの火山災害は、南岳第1活動期および第2活動期の1994年以前に発生している。

火山岩塊は到達距離が南岳から2.5kmを超えたものが20回あり、最長3.3kmに達している。このことは火山岩塊に対して火口から3.5km以内の地域では警戒を要することを意味する。火山岩塊の到達距離（初速度）は空気振動の振幅と相関がある。到達距離が2.5km以上では空気振動振幅はハルタ山において300Pa以上、3.0km以上では、500Pa以上に達する。火口から13kmの範囲において空振による窓ガラス等の破損は39回発生した。空気振動振幅がハルタ山で300Pa以上の爆発で破損した事例が多い。このことは、空気振動の振幅が大きい場合は、火山岩塊の集落近傍への落下とガラス等の飛散などの被害を前提として対応する必要があることを意味する。

大気中の風速場によりその運動が強く影響を受ける火山レキによる被害が最も多い。陸上において20km、大気中において50kmの範囲においてレキによる被害が80回報告されている。また、レキの到達距離は噴火の規模にも依存し、3000m以上の噴煙高度においてレキによる被害の確率が高まる。

流下距離が最大1.4kmにとどまる火砕流による災害は発生していないが、その危険度ゆえに災害要因として無視できないものである。火砕流は規模が大きい噴火に伴って発生しており、桜島の噴火では、噴出物量全体の10%程度が火砕流となる可能性を見込む必要がある。

火山灰による災害は、農林水産業被害、交通などのインフラへの影響、健康への影響等多岐にわたり、被害の発生様式も複雑である。発生回数が降灰量に強く依存する土石流は依然として発生し続けているが、最近では、噴火活動の低下と砂防対策に進展によって砂防施設以外の被害は起きていない。噴火活動の低下時においても土石流が発生し続けることは、土石流となる土砂生産は、降灰量の現況だけでなく、過去の降灰量も含めた土石流ポテンシャル（Iguchi, 2019）を考慮する必要がある。

桜島の山頂噴火活動期の噴火様式は、ブルカノ式噴火、ストロボリ式噴火、火山灰連続放出に大別される。ブルカノ式噴火は火山岩塊、火山レキ、火山灰、火砕流の噴出と空振の発生を伴うので、最も災害を引き起こしやすい。ストロボリ式噴火は穏やかな噴火で火山灰放出量も少ないので直接的な災害には結び付きにくい。ただし、ストロボリ式噴火により放出される火山灰に付着する塩素イオン、フッ素イオンが多いので（Nogami et al., 2006）、農業被害

を引き起こしやすい。火山灰連続放出は爆発的ではないものの、最も多量に火山灰を降下させる噴火様式であり、降灰による様々な形態の被害と降雨により誘発される土石流が主要な災害様式となる。

謝 辞

鹿児島地方気象台には火山遠望観測原簿および高層気象観測データを閲覧させていただき、必要な情報をいただきました。鹿児島県からは二酸化硫黄ガス濃度およびPM2.5濃度のデータをいただきました。

参考文献

- 井口正人・石原和弘・加茂幸介（1983）：火山弾の飛跡の解析，京都大学防災研究所年報，第26号B-1，pp. 9-21.
- 井口正人・加茂幸介（1984）：火山爆発により放出される火山岩塊・レキの到達距離，京都大学防災研究所年報，第27号B-1，pp. 15-27.
- 井口正人（2013）：桜島火山の噴火活動—2012年7月～2013年6月—，「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」平成24年度分報告書，pp. 1-8.
- 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.
- 石川秀雄・江頭庸夫・田中良和・植木貞人（1981）：噴出物調査，噴火災害の特質とHazard Mapの作成およびそれによる噴火災害の予測の研究（文部省科学研究費自然災害特別研究報告書），pp. 162-173.
- 石原和弘・江頭庸夫（1978）：桜島火山近傍の垂直地殻変動と山頂噴火活動の関係について，京都大学防災研究所年報，第21号B-1，pp. 153-162.
- 石原和弘・小林哲夫（1988）：桜島火山の最近の火山活動，火山，第33巻，pp. 269-271.
- 石原和弘・井口正人（1989）：火山体の変形，表面活動と火山性地震発生の関係（1），京都大学防災研究所年報，第32号B-1，pp. 1-11.
- 石原和弘・西潔（1998）：火山活動の経過—1994～1996年—，第9回桜島火山の集中総合観測，pp. 1-10.
- 石村満宏（1985）：桜島の降灰被害に伴う地域農業の変化，地学雑誌，第94巻，pp. 48-57.
- 大隅河川国道事務所（2021）：令和3年土石流調査情報（桜島地域）第3報，<http://www.qsr.mlit.go.jp/osumi/files/Content/1175/pdf/210312report.pdf>.
- 大隅河川国道事務所（2007）：土石流観測の結果，桜島火山砂防調査研究成果集，pp. 48-50.

- 大隅河川国道事務所 (2015) : 土石流災害の歴史,
<http://www.qsr.mlit.go.jp/osumi/contents/jigyo/sand/trouble.html>.
- 小坂丈予・小沢竹二郎 (1975) : 桜島火山噴出ガスの成分の観測と活動状況, 桜島火山の総合調査報告, pp. 62-66.
- 小野寺三郎・井口正人・石原和弘 (1997) : 火山噴火による航空機災害の防止と軽減, 京都大学防災研究所年報, 第40号B-1, pp. 73-81.
- 鹿児島測候所 (1940) : 昭和14年10月～11月櫻島噴火報告, 験震時報, 第11巻, pp. 99-119.
- 鹿児島地方気象台 (2008) : 2008年(平成20年)桜島爆発リスト, https://www.jma-net.go.jp/kagoshima/vol/data/skr_exp_list/skr_exp_2008.htmlなど
- 加茂幸介・井口正人 (1984) : 噴石の到達範囲の考察, 桜島地域学術調査協議会調査研究報告書, pp. 68-78.
- 加茂幸介・石原和弘 (1986) : 最近桜島で発生した小型火砕流, 火山噴火に伴う乾燥粉体流(火砕流等)の特質と災害(文部省科学研究費自然災害特別研究報告書), pp. 129-135.
- 加茂幸介 (1988) : 桜島火山活動の経過—1983年～1985年—, 第6回桜島火山の集中総合観測, pp. 1-5.
- 気象庁 (1969) : 8月22日16時01分の爆発に伴う熱雲, 火山レキの状況, 火山報告July～September 1967, Vol. 7, No.3, p.41.
- 気象庁 (1981) : 桜島, 火山報告October～December 1979, Vol. 19, No. 4, pp. 11-18.
- 気象庁 (1983) : 桜島, 火山報告April～June 1982, Vol. 22, No. 2, pp. 8-11.
- 気象庁 (2013) : 桜島, 日本活火山総覧, III 中国・九州・沖縄・北方領土編, pp. 1319-1967.
- 気象庁 (2017) : 桜島の噴火警戒レベル判定基準, https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/level_kijunn/506_level_kijunn.pdf.
- 田村圭司・山越隆雄・松岡 暁・安養寺信夫 (2010) : 火山噴火後に土石流が発生した事例, 土木技術資料, 第52巻-3, pp. 34-39.
- 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, 第61号B, pp. 312-317.
- 津屋 弘達・水上 武 (1940) : 昭和14年10月櫻島火山の小噴火, 地震研究所彙報, 第18巻, pp. 318-339.
- 西井上剛資 (2013) : 活火山桜島, 南方新社.
- 福嶋麻沙代・石原和弘 (2002) : 桜島火山の土石流発生と降雨および火山活動との関係, 京都大学防災研究所年報, 第49号B, pp. 355-361.
- 古江広治・上村幸廣・宇田川義夫 (1987) : 桜島火山ガス降下の実態, 鹿児島県農業試験場研究報告, 第15巻, pp. 23-34.
- 森俊哉・影澤博明・平林順一・山本圭吾・味喜大介・横尾亮彦・風早康平・森健彦・大和田道子・篠原宏志・斎藤元治・安原正 (2007) : 最近10年間の二酸化イオウ放出率の推移, 第10回桜島火山の集中総合観測, pp. 137-142.
- 吉川圭三・西潔 (1969) : 桜島深部の地震活動について, 京都大学防災研究所年報, 第12号A, pp. 57-65.
- 脇坂一郎・柳橋次雄・泊惇・安藤哲夫 (1987) : 桜島の火山活動が呼吸器系その他の疾病像に及ぼす影響, 大気汚染学会誌, 第22巻, pp. 251-259.
- Iguchi, M. (1988): Estimated range of the block and lapilli ejected by the summit eruptions at Sakurajima, In: Proceedings of Kagoshima International Conference on Volcanoes 1988, pp. 583-586.
- Iguchi, M., Tameguri, T., Ohta, Y., Ueki, S., Nakao, S. (2013): Characteristics of volcanic activity at Sakurajima volcano's Showa crater during the period 2006 to 2011, Bull. Volcanol. Soc. Japan, Vol. 58, pp. 115-135.
- Iguchi, M. (2016): Method for real-time evaluation of discharge rate of volcanic ash—case study on intermittent eruptions at the Sakurajima volcano, Japan—, Jour. Disast. Res., Vol. 11, pp. 4-14.
- Iguchi, M. (2019): Proposal of estimation method for debris flow potential considering eruptive activity, Jour. Disast. Res, Vol. 14, pp. 126-134.
- Ishihara, K. (1985): Dynamic analysis of volcanic explosion. Jour. Geodyn. Vol. 3, pp. 327-349.
- Itoh, H., Takahama, J., Takahashi, M., Miyamoto, K. (2000): Hazard estimation of possible pyroclastic flow disasters using numerical simulation related to the 1994 activity at Merapi Volcano, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol.100, pp. 503-516.
- Kueppers, U., Cimarelli, C., Hess, K-U., Taddeucci, J., Wadsworth, F. B., Dingwell, D. B. (2014): The thermal stability of Eyjafjallajökull ash versus turbine ingestion test sands, Journal of Applied Volcanology, Vol. 3:4, pp. 1-11.
- Minakami, T. (1942): On the distribution of volcanic ejecta. (Part 1.) The distribution of volcanic bombs ejected by the recent explosions of Asama, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, Vol. 20, pp. 65-92.
- Mogi, K. (1958): Relation between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surface around them, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, Vol. 36, pp. 99-134.

Nogami, K., Iguchi, M., Ishihara, K., Hirabayashi, J., Miki, D. (2006): Behavior of fluorine and chlorine in volcanic ash of Sakurajima volcano, Japan in the sequence of its eruptive activity, *Earth Planets Space*, 58, 595-600.

Onodera, S., Kamo, K. (1992): Aviation safety measures for ash clouds in Japan and the system of Japan Air Lines for monitoring eruptions at Sakurajima volcano, *Proceedings of the First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety*, U.S. Geological Survey Bulletin 2047, pp. 213-219.

Yokoo, A., Tameguri, T. and Iguchi, M. (2009):

Swelling of a lava plug associated with Vulcanian eruption at Sakurajima volcano, Japan, as revealed by infrasound record: Case study on eruption on January 2, 2007, *Bull. Volcanol.*, Vol. 71, pp. 619-630.

付 録

火山岩塊と火山レキによる被害については、それぞれTable 1AおよびTable 2Aに記述した。

(論文受理日：2021年8月31日)