

溶岩流による火山災害とその対策の方向性 —キラウエア 2018 年噴火時の溶岩流出実態とその対応を踏まえて—*

Volcanic disasters due to lava flow and the direction of countermeasures :
based on risk management of lava flow during the 2018 Kīlauea Volcano eruption

厚井 高志*¹
Takashi KOI

権田 豊*²
Yutaka GONDA

Abstract

Lava flows from the 2018 Kīlauea eruption caused a volcanic disaster on the island of Hawaii. This study summarizes lava flow characteristics, and reviews past volcanic disasters and countermeasures. Based on an interview survey on the 2018 Kīlauea Volcano eruption, we discuss the direction of future countermeasures to be used against possible similar lava flows in Japan. Considering the high viscosity and low flow velocity, no significant damage to humans occurred or is expected, except for special cases. However, economic damage to buildings and other structures was significant. A large amount of basaltic lava erupted during the 2018 Kīlauea event, causing damage to homes, infrastructure, and farmland. The main eruptive activity began with the fissure eruption on the Lower East Rift Zone, followed by the summit explosion and collapse of the Halema'uma'u crater in the Kīlauea Caldera. Although no structural measures against lava flows such as flow direction control or cooling to reduce the flow velocity were taken, warning information was issued two days before the eruption and a lava-flow hazard map was updated almost every day. To provide effective lava-flow hazard maps, it is important to obtain updated data continuously, including the information on the volcano effusion rate and the latest topographical data during the eruption. These can be utilized in developing and maintaining a lava flow simulation model. The 2018 Kīlauea eruption was the largest in the Hawaiian Islands in the last 200 years. Similarly, in Japan the possibility for volcanic eruptions with lava flow exists, even though no event has occurred in hundreds of years. Due to the steep and narrow topography in Japan, it would be difficult to implement structural measures effectively. Furthermore, an eruption involving a large amount of lava may isolate areas, cutting them off by slope failure associated with strong volcanic earthquakes. Therefore, risk management for volcanic lava flow events also necessitates formulating an evacuation plan that considers the occurrence of multiple hazard chains.

Key words : lava flow, volcanic disaster, countermeasure, disaster mitigation, the 2018 Kīlauea Volcano eruption

1. はじめに

溶岩は地下で溶解状態となった岩石（マグマ）が地上に噴出したものであり、高温の溶岩が地表を流動する現象が溶岩流である。溶岩流の流動性は地形など境界条件が同じであればその粘性等によって決定されるが、いずれにしても一般的に流動速度は遅く、火砕流のように高温・高速で流動する現象と異なり、噴火に伴って発生する現象のなかでは人的被害を引き起こすことが少ない現象と言える。その一方で、噴出量が多くなると、大きな地形改変をもたらすとともに、流下範囲の家屋、山林、農地、インフラ等を焼失、埋没させるほか、輻射熱による周辺の延焼などが生じ、社会的・経済的な被害は甚大なものとなる。日本国内には気象庁が定めた活火山が111あり（2020年6月時点）、今後、わが国でも溶岩流により大きな被害が生じることも想定される。

噴火が発生しても必ずしも溶岩が流出するわけではなく、さらに溶岩が流出したとしても数時間で停止する場合もあり、その噴出量は様々である。宮崎県と鹿児島県の県境に位置する霧島火山群の一つ新燃岳で2011年に発生した噴火では6.7万m³程度の溶岩が流出したが、山頂火口内を埋め尽くす程度で火口外への流出はなかった（Miyagi *et al.*, 2014）。一方、噴出量が多くなると大きな地形改変を伴う影響が広範囲に及ぶ。例えば、鹿児島県の桜島で1914年に発生した噴火（大正噴火）では約13.4億m³の溶岩を噴出し（石原ら, 1981）、桜島が大隅半島と接合、陸続きになった。本州の南約1,000kmに位置する西之島（東京都）では2013年11月の海面上での噴火確認以降、安山岩質溶岩が流出し、2015年12月までの活動で噴出量は1億m³を超え、噴火前と比べると島の面積が10倍まで拡大した（前野ら, 2018）。そ

*本研究の一部は令和2年度砂防学会研究発表会において発表したものである。*1 正会員 北海道大学広域複合災害研究センター Member, Center for Natural Hazards Research, Hokkaido University (koi@cen.agr.hokudai.ac.jp) *2 正会員 新潟大学農学部 Member, Faculty of Agriculture, Niigata University

の後も断続的な噴火活動があり、2020年6月末時点でも火口から溶岩が南西岸方向に流下、海に流入し（海上保安庁、2020）、島は拡大を続けている。最近では2018年にハワイ島キラウエア（Kilauea, アメリカ合衆国）で発生した噴火に伴いおよそ3カ月で約8億m³もの溶岩が流出し（Neal *et al.*, 2019）、農地や家屋などに甚大な被害が生じた。

筆者らは、キラウエア2018年噴火時の溶岩流対応について2020年2月に現地調査を実施する機会を得た。調査では2018年噴火を中心とした溶岩流の流下状況を現地で確認するとともに、地元住民へのヒアリングのほか、その防災対応についてアメリカ合衆国ハワイ州およびハワイ郡政府、アメリカ地質調査所（USGS）のハワイ火山観測所（HVO）にヒアリングを実施した。本総説では、溶岩流の特性を概説したうえで、溶岩流によるものを中心とした国内外での火山災害発生実態、これまでに実施されてきた溶岩流対策事例を整理するとともに、キラウエア2018年噴火に関する調査およびヒアリング結果を踏まえ、わが国における溶岩流対策の方向性を検討した。

なお、溶岩流は最大厚さを流下距離で割った比（アスペクト比）で分類される（Walker, 1973）。溶岩流は流動性が低いと形成される地形のアスペクト比が小さくなるが、その比が小さい場合は溶岩ドームと呼び溶岩流と区別することもある（井田・谷口, 2009）。本総説では溶岩流のみを対象とし、より流動性の低い溶岩ドームについては取り扱わない。

2. 溶岩流の特性

2.1 溶岩の物性と地質学的特徴

溶岩の物性は、その溶岩の化学組成等によって異なる。流動にもっとも関与する粘性は、二酸化ケイ素（SiO₂）の含有率や温度に依存する。SiO₂含有率が低いほど粘性が小さく流動性が高くなる。逆に、SiO₂含有率が高い場合は粘性が大きく流動性は低くなり、爆発的噴火を起こしやすい。一般にマグマ中のSiO₂含有率が52%未満で塩基性マグマ、52%以上62%未満で中性マグマ、62%以上で酸性マグマと呼ばれる。地表に出たマグマが火口付近や溶岩流下範囲で表面が外気や地表に接触して冷却されることで、粘性が大きくなり、最終的に固結した岩石が火山岩である。日本列島などの沈み込み帯ではSiO₂含有率が低い順に玄武岩、安山岩、デイサイト、流紋岩と呼ばれる。地下のマグマが地上に噴出した際の溶岩の温度はその化学組成によって異なり、一般に玄武岩質溶岩が1,050℃～1,200℃程度と高温で、流紋岩質溶岩で700℃～900℃程度と比較的低温となる（Kilburn, 2000）。

プレート沈み込み帯に位置する日本では安山岩質溶岩を噴出する火山が多く、国内で安山岩質溶岩を流出する代表的な火山として桜島や浅間山、阿蘇山などが挙げら

れる。粘性がさらに大きいデイサイト質溶岩を噴出する有珠山や雲仙岳は溶岩ドームを形成する。一方、世界的に見れば粘性が比較的小さい玄武岩質溶岩を噴出する火山のほうが多く、海嶺や東アフリカの地溝帯、ホットスポットの火山のほか、日本では富士山や伊豆諸島の三宅島、伊豆大島などがある。

2.2 力学的特性

溶岩流は流動過程で冷却や固化の影響を受けるため、その物性が時間的に変化する流体であり、地表を三次元的に複雑に流動する現象である。物性が異なれば当然異なる挙動を示し、例えば玄武岩質溶岩のアア溶岩とパホイホイ溶岩のように岩石学的に同質であっても、境界条件に応じて物理的に異なった挙動が混在して流動する場合もある（Peterson and Tilling, 1980）。また、玄武岩質溶岩は噴出継続時間が長期間に及ぶと外気や地表と接触した表層部が冷却、固化して溶岩トンネル（lava tube）を形成する。一般に溶岩は熱伝導率が低いため、溶岩トンネル内部を流動する溶岩は温度が低下せず流動性を保ったまま長距離を流動する場合もあり、その距離は40km以上に及ぶこともある（Lockwood and Torgerson, 1980）。以上のように、溶岩流の挙動は多種多様であり、一つの流動モデルでその流動過程を表現することは難しい。

溶岩流の挙動を示す様々な二次元、三次元計算モデルが提唱されているが、冷却や固化の影響を考慮しない場合、流体力学的には溶岩流をビンガム流体として取り扱うことが多い（Robson, 1967；Hulme, 1974；水山ら, 1989）。ビンガム流体は、せん断応力がある閾値（降伏応力）を超えた場合に歪速度（変形速度）とせん断応力が比例関係となる流体である。歪速度とせん断応力が原点を通して比例関係となるニュートン流体とは区別され、非ニュートン流体の一つに分類される。その流動方程式は式(1)のように示される。

$$\tau - \tau_y = \mu \frac{du}{dy} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 τ せん断応力、 τ_y は降伏応力、 μ は粘性係数、 u は流速である。

溶岩流をビンガム流体として流動シミュレーションを行った場合、ニュートン流体として取り扱った場合と比べて先端勾配が急になり、また、溶岩流の粘性が高いほど厚く流れる（Dragoni *et al.*, 2005）。高温の粘性流体は温度低下とともに粘性が高くなるため流動性が低下し、溶岩流では流動深や流動形態に影響する（Stasiuk *et al.*, 1993）。降伏応力や粘性係数は温度の関数となることから、溶岩流温度の冷却モデルを組み込むことにより溶岩流の流動範囲を二次元的に計算することができる（石原ら, 1988；水山ら, 1989；山下ら, 1990）。

表－1 20 世紀以降に溶岩流が都市や集落に流入したことによって発生した主な火山災害事例
Table 1 Major volcanic disaster cases caused by lava flows flowing into cities and villages after the 20th century

噴火			溶岩流					主な被害		備考	
火山	開始年	形態	岩質	噴出時間	噴出量	流下面積	最大流動距離	流動深 (堆積厚)	溶岩流による被害		
桜島	1914	山腹噴火	安山岩質	1 年以上*1	1.34 km ³ *2	22.3 km ² *2	—	10–100 m*2 (海域を除く)	死者 201 人*3 (うち島内 30 人) 家屋被害等多数	噴石・溶岩流による死者 6 人*3 被害家屋約 1,600 戸 農地被害等	地震 (M 7.1) に伴い屋根・石塀倒壊 等により 13 人死亡*3 (うち斜面崩壊により 9 人死亡)
エトナ (イタリア)	1928	山腹噴火	玄武岩質	16 日間*4	0.053 km ³ *4	0.004 km ² *4	9.4 km*4	1–24 m*4	被害額 1.09 億ドル*4 (現在価値換算)	被害家屋 700 戸以上 家を失った人 4,300–5,000 人*4 農地・道路・施設被害	麓の街 Mascali が破壊したが、噴火後、 1.5 km 離れた箇所に街を再建
三宅島	1940	山腹噴火	玄武岩質	23 時間*5	0.0072 km ³ *6	—	—	3–15 m*6	死者 11 人負傷者 20 人*6 家屋焼失・埋没 67 戸	不明	居住地近くで噴火開始
桜島	1946	山腹噴火	安山岩質	2 ヶ月程度	0.18 km ³ *2	5.0 km ² *2	—	10–100 m*2 (海域を除く)	—	被害家屋 190 戸程度 農地、森林被害	溶岩流の流出開始日は 1946 年 3 月 10 日以降*7、活動停止は 5 月 19 日頃*8
ニイラゴンゴ (コンゴ民主共和国)	1977	山腹噴火	玄武岩質	<1 時間*9	0.007–0.014 km ³ *10	18 km ² *9	>10 km*9	0.4–3.0 m*10	—	死者 60–300 人*9	死者は溶岩流に巻き込まれたことによる *9
三宅島	1983	山腹噴火	玄武岩質	<15 時間*11	0.0047 km ³ *11	—	—	2.5 m*11	総被害額 255 億円*11	被害家屋 354 戸*11	地震 (M 6.2) 発生し、島内数か所で 斜面崩壊発生*12
ニイラゴンゴ (コンゴ民主共和国)	2002	山腹噴火	玄武岩質	<12 時間*13	0.01–0.03 km ³ *10	—	—	0.4–3.0 m*10	死者 170 人*13	死者の多くが溶岩流によってガソリン 家を失った人 ~120,000 人 被害家屋 716 戸 農地被害約 2800 万ドル*15 道路、水道等施設被害 2 億 3650 万ドル	スタンダードが爆発したことによる*13 最近 200 年間で最大規模の噴火活動 地震 (Mw 6.9) 発生*14
キラウエア (アメリカ合衆国)	2018	山腹噴火	玄武岩質	3 ヶ月半	0.8 km ³ *14	39.0 km ² *15	—	2–4 m 程度	—		

*1 安井ら (2007), *2 石原ら (1981), *3 中央防災会議 (2011), *4 Branca *et al.*, 2017, *5 津屋 (1940), *6 Tsuya (1941), *7 萩原ら (1948), *8 宇平 (1994), *9 Tazieff (1977), *10 Favalli *et al.*, 2009, *11 荒牧・中村 (1984), *12 荒牧・早川 (1984), *13 Tedesco *et al.*, 2007, *14 Neal *et al.*, (2019), *15 County of Hawaii (2019)

3. 溶岩流による火山災害

3.1 噴火に伴って発生する火山災害

噴火に伴って発生する現象には、溶岩流のほか、火砕流、噴石、降灰、泥流、津波、火山ガスなど種々存在する。西暦 1500 年以降、火山噴火に伴い 38 カ国 194 火山の噴火イベントにより約 21 万人が犠牲となっており、地域別に見ると東南アジア、東アジアの噴火イベントが 50% 程度を占める (Brown *et al.*, 2017)。現象ごとの犠牲者数を見ると、火砕流に起因するものが最も多く、一次泥流や津波がこれに続き、これら 3 つの現象で火山災害に伴う犠牲者全体の 60% 程度を占める (Tanguy *et al.*, 1998; Auker *et al.*, 2013)。1950 年以降で千人以上の犠牲者があった火山災害を見ると、パプアニューギニアのラミントン (Lamington) 1951 年噴火時の火砕流により約 3,000 人 (Tanguy *et al.*, 1998), メキシコのエル・チチョン (El Chichon) 1982 年噴火時の火砕流により 2,000 人以上 (Sigurdsson *et al.*, 1984), コロンビアのネバド・デル・ルイス (Nevado del Ruiz) 1985 年噴火時の泥流により 20,000 人以上 (Lowe *et al.*, 1986) がそれぞれ死亡している。

溶岩流による犠牲者は記録に残る資料では 660 人前後で火山災害による犠牲者全体の 1% 以下と極めて少ない (Witham, 2005; Brown *et al.*, 2017)。一方、20 世紀に発生した噴火によって家を失った人数を現象別に見ると、溶岩流は約 21,500 人で、最も人数が多かった降下火砕物の約 97,500 人の 5 分の 1 程度であるものの、犠牲者数が溶岩流と同程度の二次泥流や火山性地震のおよそ 11 倍から 15 倍程度と比較的多い人数となる (Witham, 2005)。つまり、溶岩流が関係した火山災害は人的被害が大きくなっても家屋の消失などに伴う経済被害が大きい現象といえる。

3.2 溶岩流が関係した近年の火山災害事例

ある程度正確な記録が残る 20 世紀以降で溶岩流が都市や集落に流入した事例は多く、海外ではベスビオ (Vesuvius), エトナ (以上、イタリア), マウナロア (Mauna Loa), キラウエア (以上、アメリカ合衆国), ニイラゴ

ンゴ (Nyiragongo, コンゴ民主共和国), ピトン・デ・ラ・フルネーズ (Piton de la Fournaise, 仏領レユニオン島) など (Harris *et al.*, 2016), 国内では桜島, 三宅島などがある。20 世紀以降に溶岩流が都市や集落に流入したことによって被害が発生した主な火山災害を表－1 に示す。20 世紀以降で見れば流動性の高い玄武岩質溶岩による災害事例が多い。ニイラゴンゴの噴火を除けば人的被害の発生は少ないが、家屋被害や農地・道路被害などが生じている。以下に溶岩流が都市や集落に流入した国内外の火山災害事例の一部を概説する。

3.2.1 桜島 1914 年, 1946 年噴火

桜島 (鹿児島県) は始良カルデラ内に位置する成層火山である。桜島 1914 年噴火 (大正噴火) では 1 月 12 日にプリニー式噴火と地震 (M 7.1) があり、翌 13 日には火砕流によって集落が全焼している。桜島東西斜面からの溶岩流の流出開始は 1 月 12 日または 13 日とされ、その後、集落を埋没させながら 15 日には海に到達し、東側山腹からの溶岩は瀬戸海峽を埋め立て 1 月末には大隅半島に接合した (安井ら, 2007)。島内死者 30 人のうち噴石または溶岩流による犠牲者は 6 人と推定されているほか、避難時の溺死者が 20 人に上った (中央防災会議, 2011)。また、溶岩流により 6 集落が埋没し、島内家屋の約半数にあたる 1,600 戸が被害を受けた。

桜島 1946 年噴火 (昭和噴火) では 1 月末頃から活動が活発となり、3 月に入ってから爆発を伴って噴煙を高く上げるようになった。溶岩流の流出開始は正確には確認されていないが 3 月 10 日頃と推定されている (萩原ら, 1948)。昭和火口から噴出した溶岩は東側斜面を下して黒神方面と有村方面に分流後、それぞれ海に達した。溶岩の流出は 5 月 19 日頃まで続き、流動が完全に停止したのは 10 月頃とされる (宇平, 1994)。この溶岩流の流下に伴う人的被害は報告されていないが、黒神集落 (総戸数 160 戸) の大部分と有村集落 (総戸数 55 戸) の半数が溶岩に埋没したほか農作地・森林も埋没した (萩原ら, 1948)。

3.2.2 エトナ山 1928 年噴火

エトナ (標高 3,326 m) はシチリア島にある火山で、

ヨーロッパでもっとも活発に活動する火山の一つである。1928年の山腹噴火では3箇所の火口列から噴出した溶岩流のうち最も下端の火口から流出した溶岩流が麓の街マスカーリ (Mascali) に到達し壊滅的な被害を与えた (Branca *et al.*, 2017)。マスカーリを襲った溶岩流は1928年11月4日夜に噴出を開始, 6日17時50分までにマスカーリの街に流入し, 7日までに街はほぼ壊滅した。マスカーリの住民は5日の時点で避難していたため人的被害はないが, 少なくとも700戸の家屋が破壊され, 4,300~5,000人が家を失ったほか, 森林や農地被害, 道路や鉄道も寸断された。また, 周辺の15村で電気水道が使用できなくなったそうである。マスカーリの街はその後元の場所から約1.5 km 移転して再建された。

3.2.3 三宅島1940年, 1983年噴火

三宅島は本州の南約180 km に位置する成層火山で, これまでの噴火では玄武岩質の溶岩を流出してきた。1940年の噴火では7月12日19時30分に噴火を開始し, 割れ目火口列から溶岩が流出した。割れ目火口からの噴火は翌日夜半には終了している。この噴火に伴い死者11人, 負傷者20人が出たが, どのような現象によって被災したかは不明であるものの, 噴火発生域に人々が居住していたことが原因とされている (宮崎, 1984)。1983年10月3日15時過ぎに山腹で発生した割れ目噴火では, 流れ出した溶岩が都道を横過し, 阿古地区で400棟以上の家屋を埋没・焼失させるなど甚大な被害を引き起こした (荒牧・早川, 1984)。なお, 地区住民は溶岩流到達前にバスで他地区に避難したため人的被害は発生していない。噴火の活動時間は15時間以内と短かったものの, 割れ目の長さは4.5 km に及んだ (荒牧・早川, 1984)。

3.2.4 ニイラゴンゴ1977年, 2002年噴火

ニイラゴンゴ (標高3,469 m) はビルンガ火山地域を構成する8火山の一つで, 円錐形の成層火山である。山頂火口に世界的にもめずらしい溶岩湖があり, 1928年頃から1977年2月10日の噴火まで活動していた (Tazieff, 1977)。1977年の噴火では山腹で割れ目噴火が発生し, 溶岩湖の溶岩が1時間以内に全て流出した。いくつかの方向に流下した非常に粘性の低い溶岩流のうちメインとなった南西方向への溶岩流は流出地点から10 km 以上流下し, その氾濫範囲は約18 km² に及んだ (Tazieff, 1977)。これによりいくつかの村が破壊され60~300人の人々が焼死し, 主要道路が10 km にわたって寸断された (Tazieff, 1977)。ニイラゴンゴでは1994年以降再び溶岩湖が形成され, 2002年の割れ目噴火時にも溶岩流が15 km 南に位置する町ゴマ (Goma) まで到達した。2002年噴火では高温の溶岩流により給油所が爆発し60~100人が亡くなったほか, 約470人が火傷を負い, およそ120,000人が家を失った (Tedesco *et al.*, 2007)。

地溝帯で発生したニイラゴンゴの噴火は, 有史以降, 溶岩流が直接的に人身被害をもたらした最悪の火山災害

と言えるが, 沈み込み帯に位置し, 比較的粘性の高いマグマが上昇してくる日本で同様の災害が発生する可能性は極めて低いと考えられる。

4. 溶岩流対策

4.1 ソフト対策

溶岩流に係るソフト対策としては噴火活動の監視観測と, ハザードエリアの想定やその周知, および火山防災情報の発表といった警戒避難体制の整備が挙げられる。監視観測や警戒避難体制の整備は溶岩流に特化したものではないが, 本節では溶岩流対策を包含するものとして日本の事例を中心として概説する。

火山の監視観測は, 24時間体制で常時監視を行う気象庁や, 周辺海域の海底火山・火山島の監視を行う海上保安庁, 地殻変動の連続監視を行う国土地理院のほか, 大学, その他の研究機関などが実施している (山里, 2005)。また, 気象庁は火山災害の軽減を図るため噴火警報や噴火予報などの火山防災情報の発表を行っている (山里ら, 2013)。火山噴火に対する近年の警戒避難体制の整備としては, 御嶽山 (長野県・岐阜県) の2014年噴火災害を契機として2015年に改正された「活動火山対策特別措置法」 (昭和48年法律第61号) が挙げられる。この法律に基づいて指定された全国の火山災害警戒地域について, 関係する都道府県と市町村が火山防災協議会を設置することが義務付けられた。また, 火山防災協議会では, 都道府県, 市町村のほか, 砂防部局や火山専門家等で構成されるコアグループによって噴火シナリオやハザードマップが作成され, 避難計画や火山防災マップなどに活用している (藤山ら, 2013)。

溶岩流のハザードマップ作成にあたっては, 噴出規模等の前提条件を想定して, これまで開発されてきた種々の流動モデルを用いて二次元的にハザードエリアとなる流動範囲を設定する。前提条件となる溶岩の噴出量 (≡ 噴出率×継続時間) は流下距離に影響を与えるが (Walker, 1973; Malin, 1980; Pinkerton and Wilson, 1994; Harris and Rowland, 2009), 時間的に一定ではない実際の噴出量を噴火前や噴火中に確実に予測することは難しい。したがって, 溶岩流のハザードエリアの想定にあたっては過去の噴火実績等から噴出規模を想定することが多い。一方, エトナ2011年噴火時には高頻度で撮影された衛星データから噴出率を推定し, ほぼリアルタイムで溶岩流の流動範囲を予測・提供して, 防災対応に効果的に活用された事例が報告されている (Vicari *et al.*, 2011)。わが国でも火口位置の設定や地形データ編集, 任意のパラメータ入力により, 状況変化に応じた数値シミュレーションを実施できるリアルタイムアナリシス型リアルタイムハザードマップシステムを国土交通省が整備中であり (城ヶ崎, 2019), 溶岩流についてもより精度の高いハザードエリアの想定により, 火山周辺住民や登山者への警戒避難に効果的に活用されることが期待される。

表－2 溶岩流ハード対策の実施事例
Table 2 Examples of lava flow countermeasures

対策目的	方法	対策実施噴火事例	効果等	出典
流向制御	土盛り堤、石塁	マウナロア 1881 年噴火 (アメリカ合衆国ハワイ島)	人為的な導流による経路変更の形跡なく、そのまま停止	Kauahikaua and Tilling (2014)
	爆破(空爆)	マウナロア 1935 年噴火 (アメリカ合衆国ハワイ島)	爆撃ではなく噴火終了に伴い流動停止?	Lockwood and Torgerson (1980)
	爆破(空爆)	マウナロア 1942 年噴火 (アメリカ合衆国ハワイ島)	一次的に分流もすぐに本流と合流	Lockwood and Torgerson (1980)
	土盛り堤	キラウエア 1955–1960 年噴火 (アメリカ合衆国ハワイ島)	下流の被害防止は達成できなかったが、到達を遅延させた可能性あり	Kauahikaua and Tilling (2014)
	土盛り堤、人工流路、爆破	エトナ 1983 年噴火 (イタリア)	導流に成功	Colombrita (1984)
	爆破、ブロック投下等	エトナ 1991–1992 年噴火 (イタリア)	導流に成功	Barberi <i>et al.</i> (1993)
	土盛り堤、放水併用	エトナ 2001 年噴火 (イタリア)	13 基の土盛り堤により導流に成功	Barberi <i>et al.</i> (2003)
流速低減・停止	冷却(注水)	キラウエア 1960 年噴火 (アメリカ合衆国ハワイ島)	近くの湖からポンプで汲み上げた水を放水。効果は不明	Kauahikaua and Tilling (2014)
	冷却(注水)	ヘイマエイ 1973 年噴火 (アイスランド)	溶岩流が冷却により固化したことで前進を防止	Williams (1997)
	冷却(注水)	三宅島 1983 年噴火 (日本)	流動性への効果は不明。輻射熱による周辺の発火は阻止	荒牧・中村 (1984)
	冷却(注水)	伊豆大島 1986 年噴火 (日本)	粘性増加に貢献した可能性はあるが流動性への効果は不明。	東京消防庁 (1987)
	捕捉(土盛り堤)	エトナ 1991–1992 年噴火 (イタリア)	4 基の土盛り堤(横工)を建設。上流側に捕捉し流下時間を稼ぐことに成功	Barberi <i>et al.</i> (1993)
	冷却(注水)	キラウエア 1989 年噴火 (アメリカ合衆国ハワイ島)	建物の発火をいくらか遅らせたが、防ぐことはできず	Kauahikaua and Tilling (2014)

4.2 ハード対策

溶岩流のハード対策の目的は溶岩流の流向を制御（分
流や導流）して居住地等保全対象から遠ざけること、冷
却によって溶岩流の流動速度を低減または停止させ避難
等の時間をかせぐことにある。溶岩流による被害軽減を
目的としてその流動を物理的に制御しようとする試みは
エトナ 1669 年噴火が最初となる（United Nations, 1985）。
その後、20 世紀に入りエトナやハワイ島を中心として
様々な方法で対策が実施されているが、これまでに対策
が実施された火山は 6 火山程度と限られている。溶岩流
の流向制御や冷却の実施事例と効果を表－2 に示す。

4.2.1 流向制御を目的とした対策事例

流向制御の方法として築堤による導流や空爆等による
爆破の方法が用いられてきた。導流については 1881 年
にマウナロアが噴火した際に初めて試みられたが、この
時は効果がなかったとされる（Kauahikaua and Tilling,
2014）。空爆（爆弾投下）による爆破はマウナロアで 1935
年、1942 年に実施された。溶岩トンネルを破壊するこ
とで流向を変えることを目指したが効果は限定的で明確
な流向制御効果は確認できなかった（Lockwood and
Torgerson, 1980）。エトナ 1983 年、1991–92 年噴火で
は主に築堤によって流行を制御するとともに、溶岩トン
ネルの外郭を爆破して割れ目から溶岩流を溢流・導流さ
せることに成功している（Colombrita, 1984；Barberi *et al.*, 1993）。

4.2.2 流速低減・停止を目的とした対策事例

溶岩流の流速低減・停止には主に注水による冷却が用
いられてきた。1960 年にキラウエア噴火で実施された
のが最初であるが、その効果は不明であった（Kauahikaua
and Tilling, 2014）。その後 1973 年にアイスランド・ヘ
イマエイ島（Heimaey）で発生した噴火では大規模な注
水が試みられ、溶岩の冷却固化に成功し、主要港への溶
岩流入が防がれた（Williams, 1997）。溶岩流への注水

は日本でも三宅島 1983 年噴火、伊豆大島 1986 年噴火時
にも実施されたがその効果は限定的といえる。ただし、
三宅島での 1983 年噴火時には溶岩流の温度低下に伴い、
輻射熱による木造住宅や森林の発火防止に効果があった
と報告されている（荒牧・中村, 1984）。なお、エトナ
1991–92 年噴火では前述の導流対策前に築堤による溶岩
流の捕捉が試みられ、その進行を 1 カ月程度停めている
（Barberi *et al.*, 1993）。

5. キラウエア 2018 年噴火と防災対応

5.1 2018 年噴火の概要

ハワイ島で 2018 年に発生した噴火活動では大量の玄
武岩質溶岩が流出し、一帯に大きな被害がでた。主な噴
火活動はキラウエア山頂カルデラ内のハレマウマウ
（Halema‘uma‘u）火口の爆発と陥没、イーストリフトゾ
ーン（ERZ）下端付近における割れ目噴火である（図－
1）。2018 年の噴火の推移やメカニズムは Neal *et al.*
(2019), USGS (2019) に詳しい。以下に概要をまとめる。

噴火前の 2018 年 4 月下旬から ERZ で群発地震が発生
し、同年 5 月 3 日に私有地レイラニエステート（Leilani
Estates）内（キラウエア山頂の東方約 40 km）で割れ目
噴火が発生した（図－1～3）。翌 4 日にはキラウエア山
南東側を震源とする M_w 6.9 の地震が発生した。5 月 3
日の噴火に伴い割れ目火口が 24 箇所出現した、その活
動は 9 日から 12 日にかけて一時的に休止した。一方、
キラウエア山頂カルデラ内のハレマウマウ火口内にあ
った溶岩湖の表面位が噴火前の 5 月 1 日から低下し始め、5
月 10 日には溶岩湖は消失した。その後 5 月 16 日にキラ
ウエア山頂カルデラで小規模な爆発があり、噴煙が風
に乗って南西方向に降灰をもたらしたほか、1 m より小
さな噴石が火口内 200～300 m 以内に飛散した。キラウ
エア山頂では 5 月 26 日までに降灰を伴う 12 回の爆発を
観測し、5 月 17 日の爆発では噴煙柱が地上から 8,100 m

の高度まで立ち上った。

5月25日になると最大規模の噴火割れ目火口である Fissure 8 で噴火が活発化し、大量の溶岩を噴出するよう

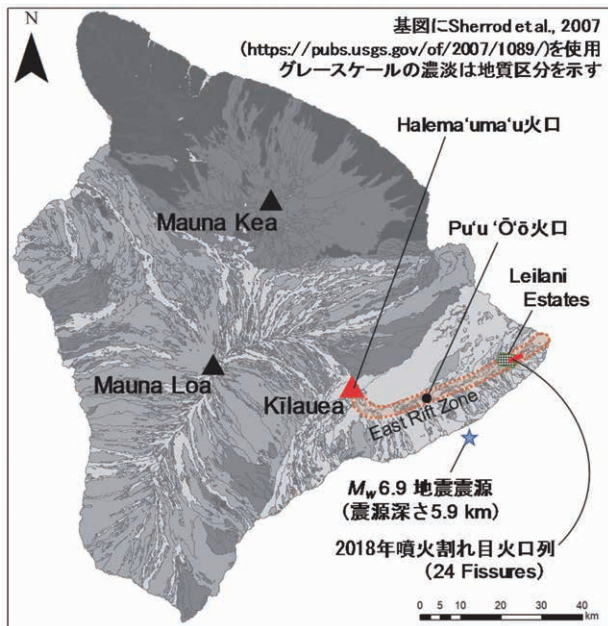


図-1 キラウエア 2018 年噴火割れ目火口列の位置
Fig. 1 Location of the 24 fissures of the Kilauea 2018 eruption



図-2 割れ目火口 Fissure 24 と溶岩上に堆積した火砕物
(2020 年 2 月 17 日撮影)
Fig. 2 Fissure 24 and pyroclasts on lava (taken on February 18, 2020)

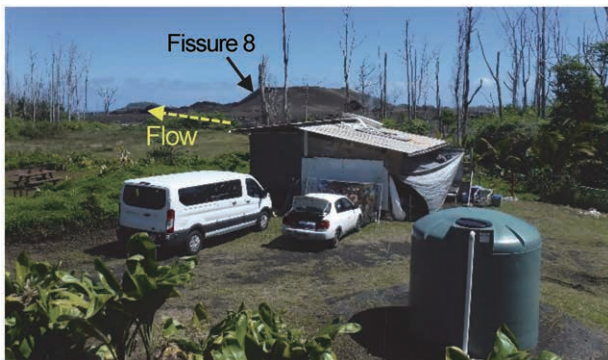


図-3 被災を免れた家屋から最大の割れ目火口 Fissure 8 を望む
(2020 年 2 月 17 日撮影)
Fig. 3 Looking at Fissure 8 from a house free from disaster (taken on February 17, 2020)

になった (図-4, 5)。一方、5月29日になると山頂カルデラ内の陥没が急激に進行し、これ以降8月上旬まで62回の陥没イベントが発生、陥没に伴う地震も頻発した。一連の地震活動によってカルデラ周回道路が被災したほか (図-6)、カルデラ辺縁に位置していたHVOの建物も大きな被害を受けた。Fissure 8 から噴出した溶岩流は6月3日に海に到達し、溶岩はその後もしばらく流出し続けた。8月2日に山頂カルデラ内で最後の陥没イベントが発生すると、8月4日には Fissure 8 が急激に活動低下し、山頂の陥没も停止、8月17日に噴火が停止した。

一連の噴火活動に伴ってハレマウマウ火口は噴火前と比較して 500 m 以上陥没し (図-7)、その容積と溶岩噴

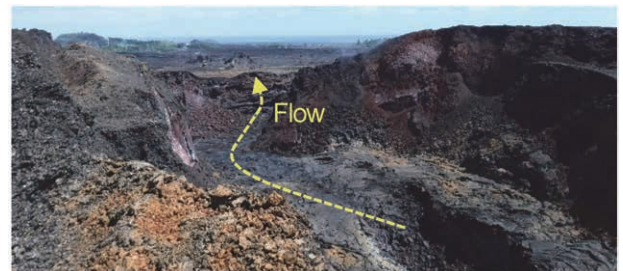


図-4 溶岩流が流出した Fissure 8 内部 (2020 年 2 月 17 日撮影)

Fig. 4 Traces of lava flow from the inside of Fissure 8 (taken on February 17, 2020)

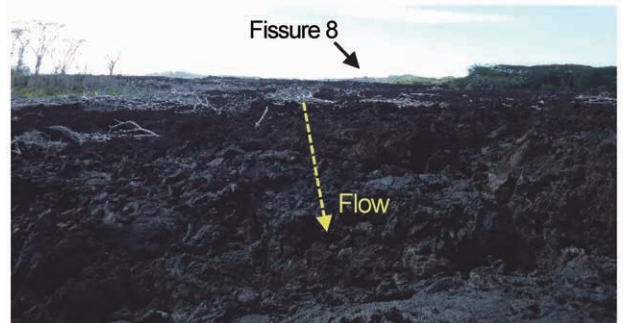


図-5 流下幅 100 m 程度に及ぶ海岸付近の溶岩流の流下痕跡
(2020 年 2 月 17 日撮影)

Fig. 5 Traces of lava flow near the coast with a width of about 100 m (taken on February 17, 2020)

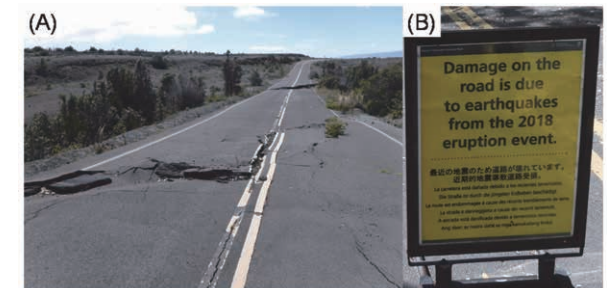
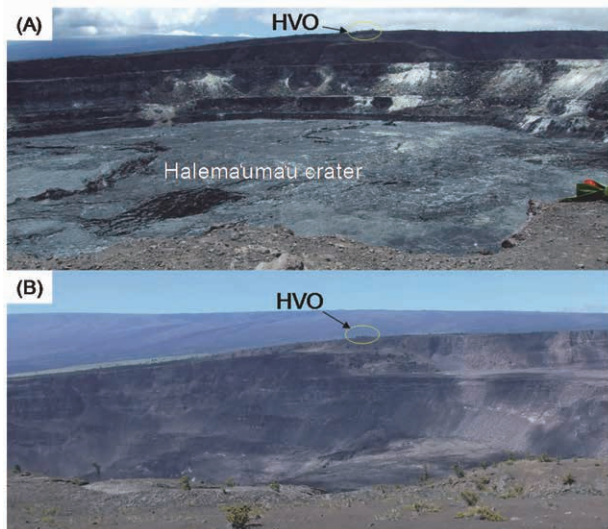


図-6 地震によって被災したカルデラ周回道路 (A) と被災を示す案内板 (B) (2020 年 2 月 18 日撮影)

Fig. 6 Crater Rim Drive damaged by the earthquake (A) and information boards showing the damage (B) (taken on February 18, 2020)



図ー7 キラウエア山頂カルデラ内ハレマウマウ火口の様子 (A) 2018 年噴火前 (2007 年 7 月 21 日撮影), (B) 2018 年噴火後 (2020 年 2 月 18 日撮影)

Fig. 7 Halema'uma'u crater inside the Kilauea caldera (A) before the 2018 eruption (taken on July 21, 2007), and (B) after the 2018 eruption (taken on February 18, 2020)

出量は概ね同程度で 8 億 m^3 と見積もられている (Neal *et al.*, 2019)。5 月 3 日の噴火開始から 3 カ月以上に及ぶ一連の噴火活動に伴い溶岩が断続的に流下した結果、13.7 平方マイル (約 35.5 km^2) の土地が溶岩に被覆され、海域への流入により 875 エーカー (約 3.5 km^2) の土地が新たに誕生した。一方、2018 年噴火により 716 棟の建造物が破壊され、人的被害は発生しなかったが 3,000 人が直接的な影響を受けた。また、溶岩流により公道 13.4 マイル (約 22 km) が埋没し、220 戸以上の家屋にアクセスできなくなった。農地被害額は 27.9 百万ドル (当時のレート換算で約 30 億円) となったほか、道路、水道、その他の施設被害額を合わせた被害額は 236.5 百万ドル (同約 260 億円) にのぼったと報告されている (以上, County of Hawaii, 2019)。さらに、ハワイ州政府危機管理局 (HI-EMA) へのヒアリングによるとハワイ島への観光客は噴火後 1 年間で噴火前より 10 ~ 15% 程度減少したとされ、噴火後も観光被害が発生している。

5.2 2018 年噴火の防災対応

5.2.1 アメリカ合衆国における火山防災体制

アメリカ合衆国において、国家レベルで火山防災に対応する組織としては、災害対策、災害対応全般を統括している連邦緊急事態管理庁 (FEMA) と、火山研究の実施と緊急時には警報を発表する USGS がある。

FEMA は、各省や研究機関からの情報のとりまとめや災害対策に関する調整を行っている (村上, 2006)。アメリカでは、自然災害などの非常事態の初動対応は、市町村や郡などで対応することが原則となっている。事態が郡では対処できない状態になった場合は州政府に、より事態が深刻になった場合は FEMA に支援を要請す

る。FEMA は、地方政府や各州への予算的な支援や、地方政府に設置されている緊急オペレーションセンター (EOC) ヘリエゾンを派遣し助言を行うなどの支援をする。避難指示等の具体的な判断に関与することはない。

USGS は、内務省所管の研究機関として、地震や火山噴火、地すべり等に関する地質調査やその評価、警報発表を担当している。災害時には、各種の警報を発表、FEMA に対して科学的な知見からの助言を行うとともに、大規模災害時には、大統領へ直接説明を行う。USGS には本部の他に 5 つの火山観測所が設置され、全米 169 火山を監視観測している。さらに活火山の中で特に危険度が高い火山を選定しハザードマップを作成している。火山に関する防災計画は、地方政府の関心が高い火山で策定するが、FEMA は策定には関与しない。

また、USGS はスタッフォード法 (Robert T. Stafford Disaster Relief and Emergency Assistance Act) により火山災害に対する効果的な警報を発する責任を連邦政府として負っており、4 段階の Volcano Alert Level ("WARNING" "WATCH" "ADVISORY" "NORMAL" の順に警戒レベルが高い) を発表する (Gardner and Guffanti, 2006)。なお、USGS は法律によって守られており、災害の警報が外れた場合でも責任は問われない。

5.2.2 ハワイにおける噴火対策と 2018 年噴火対応

HI-EMA の策定する State of Hawaii 2018 Hazard Mitigation Plan (HI-EMA, 2018) によると、ハワイ州における過去 200 年の火山活動はハワイ島のみである。ハワイ島陸域にはマウナロア、キラウエアなど 4 火山が存在し、全島の 66% が溶岩流のハザードエリアとされている。想定される火山災害のうち、溶岩流の流出、海岸線の崩壊、火山ガスの放出等が主に警戒されている。

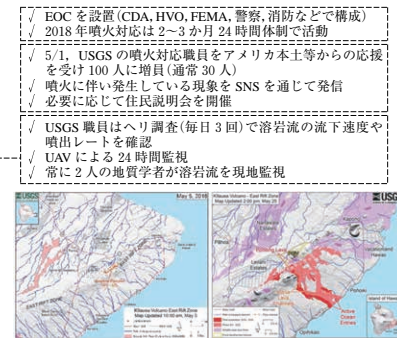
ハワイ島における火山噴火等の危機管理対応は、初動においてはハワイ郡が対応し、ハワイ郡政府市民防衛局 (CDA) が中心となって EOC を立ち上げ、警察、消防・救急等の関係機関と協働で対応にあたることになっていた。EOC には、HVO やその他の機関からの危機に関する情報が集約される。それらの情報をもとに EOC は、郡長に避難勧告や強制避難命令を発令するよう助言する。事態や規模が拡大した場合にハワイ州政府への支援を要請する。

CDA は、様々なメディアを活用し、住民に対する情報発信を行っている。ハワイ郡長 Kim 氏によれば、情報の錯綜を防ぐために、EOC にもっとも最新で正確な情報を集約し関係機関で共有すること、住民への情報提供にあたっては、噂で混乱が生じないように、できる限り早く、正確でわかりやすい情報を伝えることを心がけているとのことであった。郡では、EOC に併設されているラジオ放送施設を利用して、25 年以上にわたり、住民への定期的な情報提供を行っている。ハワイ郡ホームページ上では、避難情報、溶岩流の流下状況図、道路の封鎖状況等の防災情報が公開されている。

表-3 キラウエア 2018 年噴火の噴火活動とヒアリング調査結果を踏まえた防災対応および監視観測状況

Table 3 The Kīlauea 2018 eruption activity and disaster response and monitoring observation status based on hearing survey results

年	噴火活動	防災対応・監視観測等
2018	<p>4月 21日 ハレマウマウ火口内の溶岩湖表面位が上昇し溢流 下旬 ERZ で群発地震発生 30日 プウオオ火口(山頂東 30 km, 1983 年から活動)で崩壊発生、マグマの移動を観測</p> <p>5月 1日 ハレマウマウ火口内の溶岩湖表面位低下 3日 ERZ のレイラニエステートで噴火発生(24 個の噴火割れ目火口) 4日 キラウエア山南側で震度 M_s 6.9 の地震発生(噴火中最大)</p> <p>9日~12日 割れ目噴火の活動が一時的に休止 10日 ハレマウマウ火口内の溶岩湖が消失</p> <p>16日 キラウエア山頂で爆発開始(5月26日までに爆発が12回発生) 17日 噴煙柱高度が噴火期間最高の 8,100 m を記録 19日 溶岩流が海に到達(10日間継続) 25日 Fissure 8 からの噴火活発化</p> <p>29日 山頂カルデラ内の陥没が急激に進行(これ移動はほぼ毎日) 6月 3日 Fissure 8 からの溶岩流が海に到達 24日 これ以降山頂カルデラ内の陥没に伴う降灰はなくなる 8月 2日 山頂カルデラ内の最後の陥没発生(これ以降はほぼ停止) 4日 Fissure 8 の活動が急激に低下、山頂陥没が停止 17日 Fissure 8 の噴火が停止 21日 溶岩流の海への流入がほぼ停止</p> <p>9月 10月 2019 3月</p>	<p>1日 HVO が ERZ での噴火の可能性を住民に警告 3日 HVO が Volcano Alert Level を“WARNING”に引き上げ 5日 HVO が溶岩流の流下予測経路マップを初公開 9日 HVO が山頂噴火の可能性を警告 11日 ハワイ火山国立公園閉鎖 16日 HVO 事務所から避難</p> <p>27日 Fissure 8 からの溶岩流流下予測マップを作成(非公開) <div> <div> 5/5以降、経路マップを頻繁に更新して公開 </div> <div> 5/5以降、経路マップを頻繁に更新して公開 </div> </div> </p> <p>17日 HVO が Volcano Alert Level を“WATCH”に引き下げ 22日 ハワイ火山国立公園再開 5日 HVO が Volcano Alert Level を“ADVISORY”に引き下げ 26日 HVO が Volcano Alert Level を“NORMAL”に引き下げ</p>



※ USGS がホームページ(<https://www.usgs.gov/volcanoes/kilauea/maps>)で公開した流下予測経路マップ、(左)5/5 初公開版、(右)5/25 更新版。青線が予測経路、5/25 更新版の赤色範囲は前回公開版からの溶岩流拡大域、濃ピンク色範囲は前回更新版までの溶岩流流下範囲、淡紫色範囲は過去の溶岩流流下域を示す

Neal et al. (2019), USGS(2019)を一部参照して作成

キラウエア 2018 年噴火時のヒアリング結果を踏まえた防災対応および監視観測状況を表-3 に示す。2018 年噴火時には、上述の防災情報は毎日 1 回の頻度で更新された。また、CDA では SNS の写真共有コミュニティサイト Flickr を利用して最新の空撮動画や鮮明な画像を公開した。さらに HVO と連携し島内各地で、公共ミーティングを週 1 回の頻度で開催し、HVO からは現在の火口の位置、危険な場所、次に予測される現象、CDA からはそれらに対する政府の対応等を住民に情報提供した。このミーティングは政府と住民の信頼関係を築くのに効果的だったとのことである。

HVO はハワイ島、マウイ島をあわせて 6 火山の監視を担当している。100 箇所以上の野外観測点において、地震、地殻変動、火山ガス、電波探査、溶岩流の流動方向、地下のマグマ量および視認される噴火推移などの情報を収集・分析するとともに、地球観測衛星からの地殻変動、地表温度などの情報も収集・分析している。HVO の職員は観測データが示す変動の兆候に応じて、より詳細なデータ計測や現地調査を実施し、火山活動の大きな変化が予測される場合には公式な情報発信を行う。

2018 年の噴火の際は、1983 年以降活発な活動を続けていたプウオオ火口(Pu'u Ō'ō Crater, キラウエアの東方約 20 km)での陥没発生とマグマの移動を観測後、CDA と連携しながら準備を進め、ERZ で地震が頻発したことから噴火の 2 日前(5 月 1 日)に Volcano Alert Level を最上級の“WARNING”に引き上げ、住民避難のための情報提供を始めた。この時点では噴火位置をおおまかにしか予測できなかったため、溶岩流の流下範囲ではなく、数値標高モデル(DEM)を用いて勾配のみから溶岩流の流下する危険性があるおおよその経路(steepest descent paths)を予測し、結果の流下予測経路マップを 5 月 5 日から USGS ホームページ上に公開した(表-3)。その後は、ヘリコプター(毎日 3 回飛行)や UAV(24 時間体制)、衛星画像などを駆使した溶岩流の流速や噴出

率の観測、USGS 地質学者による溶岩流前線の目視による監視を実施し、最新の流動範囲を重ね合わせることで毎日マップを更新した(表-3)。

また、より精密な溶岩流モデル DOWNFLOW を用いた数値計算も最新の地形を随時反映して 5 月下旬から実施された(Neal et al., 2019)。DOWNFLOW は、溶岩流を単に重力流と考え地形情報のみから確率論的に二次元計算する手法であり、冷却過程を組み込んだ流動方程式を解く力学モデルとは異なり、噴出レートや溶岩流の温度、降伏応力といったパラメータ設定が必要なく、計算時間も短いという特徴がある(Favalli et al., 2005)。本手法による流動範囲は、流下予測経路マップよりもより詳細に予測されるが、条件の与え方に現実との相違があった場合、実態とは異なることもある。このようなモデルの特性が十分に理解されないまま結果を公開した場合、予測された流動範囲外は安全だと、住民が誤って解釈する危険性があったため、住民には公開せず、関係機関で共有するのみとした。

一方、USGS は観測と観測結果の速やかな分析・公開に加え、EOC への助言等の行政対応も行う必要があったため、他の部署からの応援を受け、通常 30 人のスタッフを、噴火の 2 日前には、米国本土からのリモート支援を含めて 100 人に増員して対応した。噴火活動に関する情報の発信は SNS を活用し、USGS の科学者 4 人が対応にあたった。さらに、2018 年噴火ではキラウエア山山頂での噴火によってハワイ島では稀な現象である降灰があった。居住地での不安の声をを受けて USGS は住民説明会を開催し、降灰現象について説明するとともに SNS で降灰厚を発信した。また、海外の研究者の助力を得て、噴火に関する誤った情報がインターネット上で拡散されるのを防いだ。そのほか、溶岩流が海に流入することで発生した有毒ガスが風に運ばれたため、居住が難しくなった地域があったほか、監視観測機器の設置に苦慮したそうである。

5.2.3 ハード対策

ハワイ郡の火山災害対策に関する基本方針には、①ハザードエリアの決定、②警報システムに加えて、③構造物による防護等が挙げられている。③に関しては過去に、建設重機による仮設の導流堤の建設、空爆、放水等により溶岩流の方向や速度をコントロールする試みが実施されてきた (Kauahikaua and Tilling, 2014)。しかしながら、溶岩流の流下遅延効果は認められた事例はあったものの、結果的には延焼や埋没に伴う家屋被害を防止することができなかったり、対策効果が不明であったりして、いずれも効果は少なかったと言える (表-2)。これらの経験から、溶岩流の流向の制御はコストの割に確実な効果が見込めず割に合わないものと認識されている。アメリカ海洋大気庁のマウナロア観測所を溶岩流から守る導流堤建設が検討され (Moore, 1982)、1986 年に完成した事例のように、非常に重要な保全対象を守る場合を除けば、溶岩流対策の合理的な選択肢とはなりえない。近年では、2014 年の噴火の際に、送電が停止するのを防ぐために、民間の電力会社が溶岩の流路にある木製電柱の根元に土を盛って、電柱の燃焼を防止した例は報告されてるが、2018 年の噴火の際を含めて、近年は公共機関によるハード対策は実施されていない。

なお、ハワイにおいてハード対策が実施されない理由には、ハワイ土着の信仰の存在も理由として挙げられる。ハワイには、キラウエア山のハレマウマウ火口には女神ペレが住んでおり、ペレの怒りが火山噴火を引き起こすという神話が存在する。このため、溶岩流の流下を阻害することは神の意志に逆らう悪いことであると考え、導流堤の建設に反対意見する人が少なくないようである。また、特定の対象物を守るために溶岩流の流向を変えた場合に、導流された側に被害が出ると行政訴訟につながる危険性があることも理由の一つとして挙げられる。

6. 日本における溶岩流対策の方向性

溶岩流による火山災害は、世界的には流動性の高い玄武岩質溶岩の被害が多い (表-1)。一方、桜島や西之島の事例から安山岩質溶岩でも流出量が多ければ広範囲に影響を及ぼし、建物などに大きな被害を与えた事例もある。したがって、溶岩が流出した場合には岩質に関係なく対策を検討する必要がある。ハワイ島 2018 年噴火はこの 200 年間で最大規模の噴火と言われている (Neal *et al.*, 2019)。新燃岳で発生した 2011 年噴火はおおよそ 300 年ぶりのマグマ噴火となり (福岡管区気象台・鹿児島地方気象台, 2013)、噴出量は多くなかったが溶岩が火口内に流出した。日本では 17 世紀から 19 世紀にかけて噴出量 3 億 m^3 を超えるような噴火が 100 年間に 4~6 回発生していたが、20 世紀は 2 回 (1914 年桜島, 1929 年北海道駒ケ岳) しか発生しておらず、21 世紀以降、大規模な噴火が発生することも懸念されている (藤井, 2009)。以上の事実から、桜島や三宅島のようにこの 100 年間で

複数回の溶岩流を噴出した火山だけではなく、今後数百年ぶりに噴火する火山が溶岩流を噴出する場合に備えた溶岩流対策を準備することの重要性が示唆される。

4 章で述べたように溶岩流対策には、周辺住民の警戒避難のためのソフト対策と溶岩流の導流などを目的としたハード対策がある。こうした溶岩流対策の実施を検討する上で、溶岩流のハザードエリアの想定はもっとも重要な情報の一つである。しかしながら、溶岩流の噴出地点や流出規模 (噴出時間、噴出率) を事前に想定することの困難さが対策実施を難しくする決定的な要因と言える。HVO へのヒアリングによると、キラウエア 2018 年噴火時には ERZ で群発地震が発生し噴火の可能性はわかったものの、事前に噴火地点を狭い範囲に絞り込むことができず、結果として広範囲に警報を出すことになった。また、CDA へのヒアリングによればハワイ郡では火山噴火時の避難所はあらかじめ決められていない。これらの事実から、噴火後に得られる溶岩流の噴出地点や規模に関する情報を迅速に把握・活用することで効果的な溶岩流対策が実施可能になると言える。

溶岩流ハザードエリアの設定にあたっては、種々の流動モデルを用いた数値シミュレーションの結果が活用される。溶岩流の噴出地点がわかれば各種パラメータを設定して既存の流動モデルを用いてハザードエリアを想定することができる。しかしながら、溶岩流が流動を開始したとしても 2 章で示したとおり流動方向は複雑に変化する。キラウエア 2018 年噴火時には USGS がこうした情報を現地監視観測や衛星データから高頻度で取得している。信頼性の高いハザードエリアを設定するためには、現在研究されているようなより再現性の高い流動モデルの開発や改良と並行して、溶岩流の噴出・流動状況に応じた流動速度や噴出率といった情報、流動に伴い時々刻々と変化する地形データをリアルタイムで精度よく取得する手法の開発と体制作りが不可欠である。

ハード対策については、世界的に見るとこれまでいくつかの試みが実施されてきた (表-2)。わが国で実施するとすれば築堤と注水が現実的な手段となるが、対策によって効果が発揮された事例は、比較的薄い流動形態を示す玄武岩質溶岩を噴出するエトナやヘイマエィに限られる。日本では、最近の噴火事例に限れば玄武岩質溶岩の流出が多いが、桜島など数十 m に及ぶ厚さで流動する安山岩質溶岩を噴出する火山もあり、さらに急峻で狭隘な地形を有するという点で施工条件が海外とは異なる。その上、前述のとおり噴出地点や流出規模を事前に想定することは一般に難しく、仮に実施したとしても費用対効果が見込めない場合がある。ハワイ島 2018 年噴火時には、そういった観点からハード対策が実施されていない。したがって、日本で噴火に伴う溶岩流が流下した際にハード対策を効果的に実施することは難しい。ただし、噴出地点が想定できる、対策可能な現場条件である、対策実施までリードタイムを確保できる、溶岩流の流動深

が比較的薄い、対策によって新たな被害が生じない、現場の対策従事者の安全がある程度確保できる、といった条件を全て満たす場合には、重要施設保全のために築堤によって溶岩流を導流・分流、捕捉したり、避難時間を確保するために注水したりすることは対策オプションの一つとなる可能性はある。火山災害警戒地域に係る全国49火山（2019年6月時点）を対象として砂防部局が策定を進める火山噴火緊急減災対策砂防計画では、溶岩流対策はソフト対策が主となっているが、例えば、富士山では溶岩流被害の軽減を目的とした既設堰堤の除石や仮設遊砂地（掘削）といった緊急ハード対策が計画されている（国土交通省中部地方整備局富士砂防事務所ら、2018）。

溶岩流による既往の火山災害や流動速度の遅い溶岩流の特性を踏まえると、特殊な事例を除けば国内外で甚大な人的被害は想定されない。一方、ハワイ島のほぼ中央に位置する火山マウナロアの溶岩流ハザードマップではリフトゾーンから放射状に複数のハザードエリアが想定されており、いくつかの溶岩流が同時に流下した場合には孤立地域が発生することが懸念されていた。わが国でも島嶼部の火山等で同様の事態が生じる可能性はある。また、溶岩流を噴出するような大規模な噴火では強震動を伴う火山性地震も併発し（表-1）、建物の倒壊のほか、斜面崩壊の発生、道路の被災が報告されている。1914年の桜島大正噴火時には地震によって連鎖発生した斜面崩壊により人的被害が発生した（中央防災会議、2011）。1983年三宅島噴火では地震に伴って斜面崩壊が発生し（荒牧・早川、1984；宮崎、1984）、2018年のキラウエア噴火では大規模地震により道路が被災して通行止めとなった（図-6）。交通網が遮断され避難経路が寸断される場合も想定されることから、溶岩流の流下に伴う集落の孤立に加え、噴火活動に伴い連鎖複合的に発生する地震や斜面災害といったハザードも考慮した避難計画や救援計画の事前検討も必要である。

7. おわりに

溶岩が多量に流出すれば広範囲が影響を受ける。キラウエア2018年噴火によって溶岩流に被覆された主要道のごく一部は開削され車両の一時通行が可能となっていたが（図-8）、大部分は溶岩流に覆われたままで復旧は進んでいない（2020年6月時点）。溶岩流に覆われた土地は、噴火から30年程度経過しても草本植生がようやく侵入・定着しているか（アメリカ合衆国ハワイ島ブラックサンドビーチ；図-9A）、植生の定着がほぼ確認できず裸地のままとまっている場合もある（伊豆大島長沢下流；図-9B）。桜島では溶岩被覆後50年程度で草本段階に遷移し、100年で低木段階、遷移が極相に達するのは700年以上かかると報告されており（Tagawa, 1964）、自然状態では土壌の回復にも相当の時間がかかる。したがって、将来の土地利用も考慮して溶岩流対策の必要性



図-8 キラウエア2018年噴火で流出した溶岩が開削され通行可能となった道路（2020年2月17日撮影）

Fig. 8 Roads buried in lava after the Kilauea 2018 eruption were opened and made accessible (taken on February 17, 2020)



図-9 流動固結後30年程度経過した溶岩の状況 (A) キラウエア1986年噴火（アメリカ合衆国ハワイ島ブラックサンドビーチ、2020年2月17日撮影）、(B) 伊豆大島1986年噴火（長沢下流、2015年1月28日撮影）

Fig. 9 State of lava about 30 years after flowing. (A) the Kilauea 1986 eruption (the Black Sands beach, Hawaii Island, USA, taken on February 17, 2020), (B) the Izu-oshima 1986 eruption (the Naga-sawa, taken on January 28, 2015)

やその実施内容を慎重に検討する必要がある。

また、アメリカ合衆国ではUSGSが火山活動に関する調査研究から各種ハザードエリアの想定、警戒情報の発表まで一元的に実施する。わが国の火山防災体制は様々な機関が役割を担っていることから、溶岩流を伴う大規模噴火に備えて円滑な防災対応がとれるよう火山防災協議会などを活用しながら関係機関間で定期的に役割分担を確認し、人材確保・育成も含めた継続的な体制維持および強化が望まれる。

謝 辞

ハワイ現地調査は、著者らが（公社）砂防学会から派遣された「米国ハワイ州溶岩流対策に関する実態調査」（国土交通省 丹羽俊一 団長）の一環として実施した。調査にご協力いただいたハワイ郡長 H. Kim 氏と郡政府市民防衛局関係各位、ハワイ州危機管理局の T. Magno 氏をはじめとする州政府関係各位、HVO の C. A. Neal

博士、現地への立ち入りを許可いただいたハワイ島地元住民の皆様、現地コーディネーターの T. Kobayashi 氏、(公社)砂防学会ならびに調査団員各位に謝意を表します。

引用文献

- 荒牧重雄・早川由紀夫 (1984) : 1983 年 10 月 3・4 日三宅島噴火の経過と噴火様式, 火山, 第 2 集, Vol. 29, 三宅島噴火特集号, p. S 24-S 35
- 荒牧重雄・中村一明 (1984) : 注水による溶岩流阻止の試み—三宅島 1983 年噴火の例—, 火山, 第 2 集, Vol. 29, 三宅島噴火特集号, p. S 343-S 349
- Auker, M. R., Sparks R. S. J., Siebert L., Croweller, H. S. and Ewert, J. (2013) : A statistical analysis of the global historical volcanic fatalities record, *Journal of Applied Volcanology*, Vol. 2 : 2
- Barberi, F., Brondi, F., Carapezza, M. L., Cavarra, L. and Murgia, C. (2003) : Earthen barriers to control lava flows in the 2001 eruption of Mt. Etna, *Journal of Volcanology and geothermal Research*, 123, p. 231-243
- Barberi, F., Carapezza, M. L., Valenza, M. and Villari, L. (1993) : The control of lava flow during the 1991-1992 eruption of Mt. Etna, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 56, p. 1-34
- Branca, S., Beni, E. D., Chester, D., Duncan, A. and Lotteri, A. (2017) : The 1928 eruption of Mount Etna (Italy) : Reconstructing lava flow evolution and the destruction and recovery of the town of Mascali, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 335, p. 54-70
- Brown, S. K., Jenkins, S. F., Sparks, R. S., Odbert, H. and Auker, M. R. (2017) : Volcanic fatalities database : analysis of volcanic threat with distance and victim classification, *Journal of Applied Volcanology*, Vol. 6, doi : 10.1186/s 13617-017-0067-4
- 中央防災会議災害教訓の継承に関する専門委員会 (2011) : 1914 桜島噴火報告書, 169 pp.
- Colombrita, R. (1984) : Methodology for the construction of earth barriers to divert lava flows : the Mt. Etna 1983 eruption, *Bulletin of Volcanology*, Vol. 47-4, p. 1009-1038
- County of Hawaii (2019) : Kilauea Eruption : Recovery Fact Sheet, <https://recovery.hawaiiicounty.gov/home/showdocument?id=4>, 参照 2020-06-07
- Dragonì, M., Borsari, I. and Tallarico, A. (2005) : A model for the shape of lava flow fronts, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, B 09203, doi : 10.1029/2004 JB 003523
- Favalli, M., Chirico, G. D., Papale, P., Pareschi M. T. and Boschi, E. (2009) : Lava flow hazard at Nyiragongo volcano, D. R. C., *Bulletin of Volcanology*, No. 71, p. 363-374
- Favalli, M., Pareschi, M. T., Neri, A. and Isola, I. (2005) : Forecasting lava flow paths by a stochastic approach, *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, L 03305, doi : 10.1029/2004 GL 021718
- 藤井敏嗣 (2009) : 火山噴火予知と防災, 平成 21 年度(財)砂防・地すべり技術センター講演会概要集, p. 23-31
- 藤山秀章・徳元真一・河内清高・新原俊樹 (2013) : 内閣府における火山防災の取組, 防災科学技術研究所研究資料, No. 380, p. 3-7
- 福岡管区気象台・鹿児島地方気象台 (2013) : 2011 年霧島山新燃岳の噴火活動, 駿震時報, Vol. 77, p. 65-96
- Gardner, C. A. and Guffanti, M. C. (2006) : U. S. Geological Survey's Alert Notification System for Volcanic Activity, U.S. Geological Survey Fact Sheet 2006-3139
- 萩原尊禮・表俊一郎・村内必典・明石和彦・山田重平 (1948) : 10. 昭和 21 年 3 月の櫻島噴火, 東京大學地震研究所彙報, No. 24, p. 143-159
- Harris, A., Groeve, T. D., Carn, S. and Garel F. (2016) : Risk evaluation, detection and simulation during effusive eruption disasters, *Geological Society, London, Special Publications*, 426, p. 1-22
- Harris, A. J. L. and Rowland, S. K. (2009) : Effusion rate controls on lava flow length and the role of heat loss : a review, In : Thordarson, T., Self, S., Larsen, G., Rowland, S. K., Á. Höskuldsson, Á. (Ed.), *Studies on Volcanology : The Legacy of George Walker*. Special Publications of IAVCEI, Geological Society, London, 2, p. 33-51
- HI-EMA (2018) : State of Hawaii 2018 Hazard Mitigation Plan, <https://dod.hawaii.gov/hiema/files/2018/11/State-of-Hawaii-2018-Mitigation-Plan.pdf>, 参照 2020-06-10
- Hulme, G. (1974) : The Interpretation of Lava Flow Morphology, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 39, p. 361-383
- 井田喜明・谷口宏充 (2009) : 火山爆発に迫る, 東京大学出版会, 225 pp.
- 石原和弘・井口正人・加茂幸介 (1988) : 数値計算による 1986 年伊豆大島溶岩流の再現, 火山, 第 2 集, Vol. 33, 伊豆噴火特別号, p. S 64-S 76
- 石原和弘・高山鉄朗・田中良和・平林順一 (1981) : 桜島火山の溶岩流 (I) - 有史時代の溶岩流の容積 -, 京大防災研究所年報, No. 24, B-1, p. 1-10
- 城ヶ崎正人 (2019) : 火山噴火リアルタイムハザードマップシステムについて, 砂防学会誌, Vol. 71, No. 6, p. 45-48
- 海上保安庁 (2020) : 西之島の噴火について (6 月 29 日観測), <https://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/r 2/k 200630/k 200630.pdf>, 参照 2020-07-04
- Kauahikaua, J. P. and Tilling, R. I. (2014) : Natural Hazards and Risk Reduction in Hawaii, *Characteristics of Hawaiian Volcanoes*, U. S. Geological Survey Professional Paper 1801, p. 397-427
- Kilburn, C. J. (2000) : Lava flows and flow fields. In : Sigurdsson, H. (Ed.), *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, New York, p. 291-305
- 国土交通省中部地方整備局富士砂防事務所・山梨県県土整備部砂防課・静岡県交通基盤部河川砂防局砂防課 (2018) : 富士山火山噴火緊急減災対策砂防計画, 120 pp.
- Lockwood, J. P. and Torgerson, F. A. (1980) : Diversion of lava flows by aerial bombing-Lesson from Mauna Loa Volcano, Hawaii, *Bulletin of Volcanology*, Vol. 42-3, p. 727-741
- Lowe, D. R., Williams, S. N., Leigh, H., Connort, C. B., Gemmell, J. B. and Stoiber, R. E. (1986) : Lahars initiated by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia. *Nature*, 324, p. 51-53
- 前野深・安田敦・中野俊・吉本充宏・大湊隆雄・渡邊篤志・金子隆之・中田節也・武尾実 (2018) : 噴出物から探る西之島の新火山島形成プロセス, 海洋理工学会誌, Vol. 24, No. 1, p. 35-44
- Malin, M. C. (1980) : Lengths of Hawaiian lava flows, *Geology*, Vol. 8, No. 7, p. 306-308
- Miyagi, Y., Ozawa, T., Kozono T. and Shimada, M. (2014) : Long-term lava extrusion after the 2011 Shinmoe-dake eruption detected by DInSAR observations, *Geophysical Research Letters*, doi : 10.1002/2014 GL 060829
- 宮崎務 (1984) : 歴史時代における三宅島噴火の特徴, 火山, 第 2 集, Vol. 29, 三宅島噴火特集号, p. S 1-S 15
- 水山高久・栗原淳一・河村和夫・北原一平 (1989) : 溶岩流シミュレーションと対策手法, 砂防学会誌(新砂防), Vol. 42,

- No. 4, p. 12–17
- Moore, H. J. (1982): A geologic evaluation of proposed lava diversion barriers for the NOAA Mauna Loa Observatory Mauna Loa Volcano, Hawaii, U. S. Geological Survey, Open-File Report 82-314, p. 1–15
- 村上芳夫 (2006): 米国・緊急事態管理庁の組織編制とその影響, 先端社会研究, No. 5, p. 101–152
- Neal, C. A., Bratley, S. R., Antolik, L., Babb, J. L., Burgess M., Calles K., Capps M., Chang J. C., Conway S., Desmither L., Dotray P., Elias T., Fukunaga P., Fuke S., Johanson I. A., Kamibayashi K., Kauahikaua J., Lee R. L., Pekalib S., Miklius A., Million W., Moniz C. J., Nadeau P. A., Okubo P., Parcheta C., Patrick M. R., Shiro B., Swanson, D. A., Tollett, W., Trusdell, F., Younger, E. F., Zoeller, M. H., Montgomery-Brown, E. K., Anderson, K. R., Poland, M. P., Ball, J. L., Bard, J., Coombs, M., Dietterich, H. R., Kern, C., Thelen, W. A., Cervelli, P. F., Orr, T., Houghton, B. F., Gansecki, C., Hazlett, R., Lundgren, P., Diefenbach, A. K., Lerner, A. H., Waite, G., Kelly, P., Clor, L., Werner, C., Mulliken, K., Fisher, G. and Damby, D. (2019): The 2018 rift eruption and summit collapse of Kilauea Volcano, *Science*, 363, p. 367–374
- Peterson, D. W. and Tilling, R. I. (1980): Transition of basaltic lava from Pahoehoe to Aa, Kilauea Volcano, Hawaii: Field observations and key factors, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 7, p. 271–293
- Pinkerton, H. and Wilson, L. (1994): Factors controlling the lengths of channel-fed lava flows, *Bulletin of Volcanology*, 56, p. 108–120
- Robson, G. R. (1967): Thickness of Etnean lavas, *Nature*, Vol. 216, p. 251–252
- Sigurdsson, H., Carey, S. N. and Espindola, J. M. (1984): The 1982 eruptions of El Chichón Volcano, Mexico: Stratigraphy of pyroclastic deposits, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 23, p. 11–37
- Sherrod, D. R., Sinton, J. M., Watkins, S. E. and Brunt, K. M., (2007): Geologic map of the State of Hawai'i: U. S. Geological Survey Open-File Report 2007-1089
- Stasiuk, M. V., Jaupart, C. and Sparks, R. S. J. (1993): Influence of cooling on lava-flow dynamics, *Geology*, Vol. 21, p. 335–338
- Tagawa, H. (1964): A study of volcanic vegetation in Sakurajima, south-west Japan. I. Dynamics of vegetation. *Memoirs of the Faculty of Science, Kyushu University, Series E (Biology)* 3, p. 165–228
- Tanguy, J. C., Ribière, Ch., Scarth, A. and Tjetjep, W. S. (1998): Victims from volcanic eruptions: a revised database, *Bulletin of Volcanology*, Vol. 60, p. 137–144
- Tazieff, H. (1977): An exceptional eruption: Mt. Niragongo, Jan. 10 th, 1977, *Bulletin of Volcanology*, Vol. 40–3, p. 189–200
- Tedesco, D., Vaselli, O., Papale, P., Carn, S. A., Vlotaggio, M., Sawyer, G. M., Durieux, J., Kasereka M. and Tassi, F. (2007): January 2002 volcano-tectonic eruption of Nyiragongo volcano, Democratic Republic of Congo, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, B 09202, doi: 10.1029/2006 JB 004762
- 東京消防庁 (1987): 溶岩流冷却作戦, 消防防災の科学, No. 8, p. 22–25
- 津屋弘達 (1940): 昭和 15 年 7 月三宅島噴火調査概報: 序言, 地震, No. 2, p. 435–442
- Tsuya, H. (1941): The eruption of Miyake-sima, one of the seven Izu Islands, in 1940. Geological observation of the Miyake-sima eruption of 1940 (II), *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 19, p. 492–522
- 宇平幸一 (1994): 大正噴火以後の桜島の活動史, 駿震時報, Vol. 58, p. 49–58
- United Nations (1985): Volcanic emergency management, 86 pp.
- United States Geological Survey (USGS) (2019): Overview of Kilauea Volcano's 2018 lower East Rift Zone eruption and summit collapse, https://volcanoes.usgs.gov/vsc/file_mgr/file-224/OVERVIEW_Kil_2018_LERZ-Summit_June%202019.pdf, 参照 2020-06-07
- Vicari, A., Ganci, G., Behncke, B., Cappello, A., Neri, M. and Negro, C. D. (2011): Near-real-time forecasting of lava flow hazards during the 12-13 January 2011 Etna eruption, *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, L 13317, doi: 10.1029/2011 GL 047545
- Walker, G. P. L. (1973): Lengths of lava flows, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.*, 274, p. 107–118
- Williams, R. S., (1997): Lava-cooling operations during the 1973 eruption of Eldfell Volcano, Heimaey, Vestmannaeyjar, Iceland, U.S. Geological Survey Open-file Report 97-724, 73 pp.
- Witham, C. S. (2005): Volcanic disasters and incidents: A new database, *Journal of Volcanology and Geothermal research*, Vol. 148, p. 191–233
- 山里平 (2005): 近代火山観測の歴史—気象庁の監視観測を中心に—, 火山, Vol. 50, 特別号, p. S 7–S 18
- 山里平・舟崎淳・高木康伸 (2013): 気象庁の火山防災業務, 防災科学技術研究所研究資料, No. 380, p. 9–15
- 山下伸太郎・宮本邦明・大原正則・緒統英章・水山高久 (1990) 溶岩流の数値シミュレーション, 水工学論文集, Vol. 34, p. 391–396
- 安井真也・高橋正樹・石原和弘・味喜大介 (2007): 桜島火山大正噴火の噴火様式とその時間変化, 火山, Vol. 52, No. 3, p. 161–186

(Received 23 July 2020 ; Accepted 20 November 2020)