

## 溶岩流に対する実効性のあるハード対策の検証

(一財) 砂防・地すべり技術センター ○小尾 亮, 池田暁彦, 吉田真也, 田中利昌, 藤平 大

### 1. はじめに

火山砂防計画策定指針(案)(建設省河川局砂防部, 平成4年4月)では, 計画で対象とする現象として土石流, 火山泥流, 溶岩流, 火砕流等を挙げている. このうち, 土石流と火山泥流については, 火山砂防事業や火山噴火緊急減災対策事業として, これまでに各地の火山においてハード対策の検討が進められてきた. しかし, 溶岩流については, 影響範囲が人間の生活圏まで届かないことも多く, またその対策の難しさから, ソフト対策が主で, 具体的なハード対策の検討までは行われていないことが多い(権田ら, 2020).

溶岩流については, 近年, 2018年キラウエア火山の噴火(Neal *et al.*, 2019)や2021年アイスランド-フアグラダルスフィヤル火山の噴火のような流出事例が相次ぎ, 日本においても溶岩流の対策の必要性が目ざされつつある(藤井, 2019; 厚井・権田, 2021等). 日本ではこれら海外の事例のように, 流動性が高く広く広がる玄武岩質溶岩流を流出する火山は少ないものの, 伊豆大島, 三宅島, 富士山といった火山では, 流動性の高い溶岩流が知られており(守屋, 1981), 今後も溶岩流出に備えた対応策を考慮しておく必要がある.

そこで本研究では, 溶岩流に対するハード対策の国内外事例を参考に, 溶岩流に対する堰堤, 掘削等のハード対策の適性を調査した. そして, 溶岩流に対して効果的なハード対策の種類や形状を検証するため, 数値シミュレーションを実施し, 対策施設を通過した後の溶岩流の到達時間の比較を行った.

### 2. 溶岩流ハード対策の種類

溶岩流は流出頻度が少ないために, 平常時からのハード対策はほとんど行われず, 主に緊急的, 応急的なハード対策が行われてきた. 平常時からの対策はハワイのマウナロア観測所, 伊豆大島の大宮沢溶岩導流堤の例があり(栗原ら2012), 緊急対策はアイスランド, アメリカ(ハワイ), イタリア(エトナ火山), 日本(三宅島, 伊豆大島)において実績がある(河村ら, 1989; 厚井・権田, 2021等). 特にイタリア(エトナ火山)では, ブロックの投入や, 溶岩堤防の爆破による人工流路への誘導, 土堤の施工など, 緊急対策として大規模な溶岩流制御作戦が実施されてきた(脇田ら, 1992; Barberi *et al.*, 2003).

これら国内外実績を踏まえると, 各対策手法の溶岩流への適性は表-1の通りとなる. 日本国内においては, 現実的に, 堤防等の構造物や掘削による地形改変の適性が高いと考えられる. また, これらの対策においても, 溶岩流を全て捕捉することは困難であり, 住民の避難時間確保のために溶岩流の到達時間を遅らせることが主目的となる.

表-1 溶岩流へのハード対策手法と適性

対策手法	溶岩流への適性
注水(冷却)	多量の水の確保に課題があり, 実績として溶岩流の制御効果も低いため, 溶岩流対策として不適である. ただし, 住宅の延焼防止等の対策に使用することは可能である.
爆破による流路変更	国内では実績が無く, 実現困難と考えられるため不適である.
堤防	適用可能である. ただし, 溶岩の全量を捕捉することは困難であり, 到達時間を遅らせ, 住民避難までの時間稼ぎとして活用することが前提となる. 導流堤とする場合には, 導流先の被災するはずのなかった地域に被害が発生することとなるため, 溶岩流の流路を変更することに対し, 土地所有者等との交渉に課題がある.
掘削	適用可能である. 場所によっては, 岩盤(過去の溶岩流)掘削による工期の長期化が考えられるため, 緊急対策の場合は, 砂防施設堆砂敷の除石が最適と考えられる.

### 3. 数値シミュレーションによる対策効果の検証

溶岩流に対するハード対策の施設効果の検証としては, 実験室で溶岩流を再現した流路実験等(Lev *et al.*, 2012等)が有効であるが, 実験ではコストや安全管理の制約が多く, 地形や対策の種類を変えた上での繰り返し検証に限界がある. よって本研究では, 溶岩流の流下実態を再現した数値シミュレーションにより, 対策施設の効果を検証した. シミュレーションでは, 施設の種類(堤防がいいか, 掘削がいいか), 形状(広さが効くか, 深さが効くか)を変えた6ケースを再現し, 溶岩流の下流への到達時間の変化を比較した.

#### 3.1. シミュレーションモデル

溶岩流の数値シミュレーションは, 山下ら(1990)の剪断降伏応力と塑性粘度を持つビンガム流体のモデルを使用した. ここでは, 溶岩温度が下がることで剪断抵抗力が増加し, 流れが停止する. 流動中の溶岩の温度変化は, 石原ら(1988)やMiyamoto and Sasaki(1998)の研究成果を適用し, 大気中への熱放射を仮定した熱収支則より計算している. シミュレーションプログラムは(一財)砂防・地すべり技術センターが開

発し、上記モデルを採用した J-SAS 溶岩流プログラムを用いた。当プログラムは、近年では富士山ハザードマップ（改定版）検討委員会報告書（富士山火山防災対策協議会，2021）においても使用されている。

### 3.2. パラメータ

本シミュレーションでは溶岩流の到達時間が重要な指標となるため、到達時間の観測実績がある2001年エトナ山噴火時の溶岩流 (Proietti *et al.*, 2009) を対象に、再現計算を行い最適なパラメータを設定した (表-2, 図-1の①)。

表-2 パラメータ

パラメータ	数値	単位	設定根拠
地形	JAXAのALOS World 3Dを20mメッシュに変換		
噴出量	1,530万	m <sup>3</sup>	Proietti <i>et al.</i> (2009)
噴出レート	10~31(7/18~7/26観測値)	m <sup>3</sup> /s	Proietti <i>et al.</i> (2009)
温度	1,100	°C	Proietti <i>et al.</i> (2009)
粘性係数	$\log_{10} \eta = 24.61 - 0.0181T$	poise	石原ら(1988)
降伏剪断応力	$\log_{10} \tau = 13.67 - 0.0089T$	dyn/cm <sup>2</sup>	石原ら(1988)
冷却効率	0.15	-	再現計算により設定

### 3.3. 対策施設の想定

想定する対策施設は、緊急ハード対策を前提として、横断道路上へ緊急的に設置するコンクリートブロックや土堤、道路沿いの掘削等を想定した。よってシミュレーション上では流下方向に垂直な直線配置とし、①の当初地形に対し、堤防と掘削、その両者の組合せを考慮して、②5mの堤防③5mの掘削④長さを倍にした掘削⑤深さを倍にした掘削⑥堤防と掘削の組合せ、の各ケースを想定した (図-1)。

### 3.4. シミュレーション結果

施設位置から約300m下流の地点Aへの到達時間を比較した結果、対策を行った②~⑥の全ケースで溶岩流の遅延効果がみられた (図-1, 表-3)。②5m堤防と③5m掘削では効果に明瞭な差は無いが、堤防の場合は溶岩流の回り込みにより流下範囲がやや広がる。掘削は容量が同じでも深さがあるケースでより効果がみられた (④および⑤)。また、堤防と掘削を合わせた⑥が最も効果があった。④のように貯留空間を広げるだけでは効果が薄く、⑤や⑥のように越流させる段差を高くした場合の遅延効果が高かったことがわかる。

なお、これらの遅延効果は施設到達から数時間後までしか及ばず、どのケースにおいてもその1日後には到達地点がほぼ一致し、溶岩流が最終的に停止する末端位置にも変化はなかった。

表-3 対策ケースと溶岩流の遅延効果

ケース	地点Aへの到達時間	①との時間差
①当初地形	11時間3分	±0
②5m堤防	13時間3分	+2時間
③5m掘削	12時間58分	+1時間55分
④長さ倍の掘削	12時間42分	+1時間39分
⑤深さ倍の掘削	14時間7分	+3時間4分
⑥堤防&掘削	14時間24分	+3時間21分

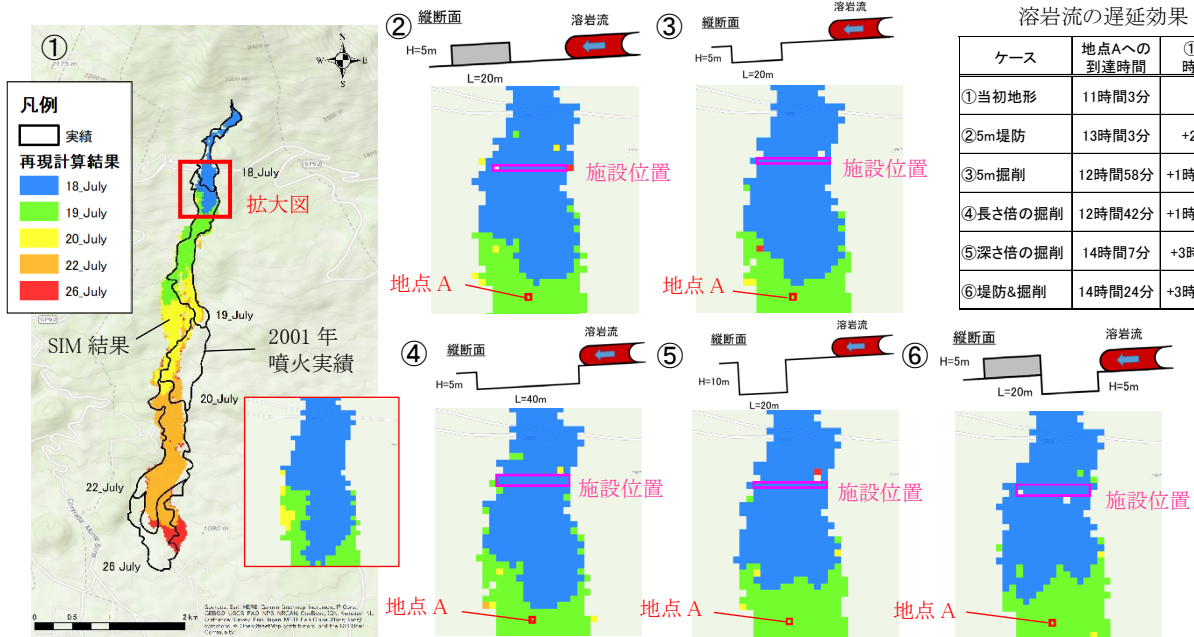


図-1 対策ケース別のシミュレーション結果

## 4. まとめと今後の課題

- ▶ 溶岩流に対しては、堤防の設置や掘削により下流への到達時間を遅らせる対策が主となる。
- ▶ 溶岩流対策では、広さよりも深さ（壁の高さ）を重視した形状が適している可能性がある。

今後の課題として、溶岩流の熱や浮力が対策施設に与える影響について調査を行う必要がある。そのためには、海外の実物の溶岩流を用いたフィールド試験や、実験室で溶岩流を再現した流路実験が有効である。

その他にも、溶岩流の固化による地形変化、河川や湖水による溶岩流の冷却、溶岩トンネルの形成といった溶岩流の特異な性質を考慮し、想定される様々なケースに対応した検証を行っていくことが重要である。

<引用文献> 榎村ら(2020)2020年度砂防学会研究発表会概要集 621-622. Neal *et al.* (2019) Science, 363. 藤井 (2019) 自然災害科学, 38-3. 守屋(1981)月刊地質, 26-6. 栗原ら(2012)平成24年度砂防学会研究発表会概要集 380-383. 河村ら(1989)平成元年度砂防学会研究発表会概要集 39-42. 厚井・榎村(2021)砂防学会誌, vol. 73, No. 6. 脇田ら(1992)科学, Vol. 62, No. 9. Barberi *et al.* (2003) J. Volcanology Geothermal Res, 123. Lev *et al.* (2012) J. Volcanology Geothermal Res, 247-248, 62-73. 山下ら(1990)水工学論文集, 34. 石原ら(1988)火山第2集, 33. Miyamoto and Sasaki(1998) Jour. of Geophysical Res, vol. 103, No. 11. 富士山火山防災対策協議会(2021)富士山ハザードマップ(改定版)検討委員会報告書. Proietti *et al.* (2009) Geochemistry Geophysics Geosystems, 10.