

# 砂防堰堤が溶岩流の流動特性に与える 影響についての実験的研究

## EXPERIMENTAL STUDY ON THE INFLUENCE OF SABO DAM TYPES ON THE CHARACTERISTICS OF LAVA FLOW

茂木 陽平<sup>1</sup>・永野 博之<sup>2</sup>・池本 敦哉<sup>3</sup>・柳原 駿太<sup>4</sup>・西尾 陽介<sup>5</sup>・佐藤 敏明<sup>5</sup>

Yohei MOGI, Hiroyuki NAGANO, Atsuya IKEMOTO,  
Hayata YANAGIHARA, Yosuke NISHIO and Toshiaki SATO

<sup>1</sup>群馬工業高等専門学校専攻科 (〒371-8530 前橋市鳥羽町 580 番地)

<sup>2</sup>群馬工業高等専門学校環境都市工学科 (〒371-8530 前橋市鳥羽町 580 番地)

E-mail: hr-nagano@gunma-ct.ac.jp

<sup>3</sup>東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

E-mail: ikemoto.atsuya.s1@dc.tohoku.ac.jp

<sup>4</sup>東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

E-mail: yanagihara.hayata.r1@dc.tohoku.ac.jp

<sup>5</sup>八千代エンジニヤリング株式会社 (〒111-8648 台東区浅草橋 5-20-8)

**Key Words:** lava flow, flow experiment, sabo dam, viscosity, gradient of deposition

### 1. はじめに

溶岩流災害は、土地利用、資産や交通網などに甚大な被害を与えるため、対策計画の構築が急務となっている<sup>1)</sup>。溶岩流災害のハード対策として、土砂災害に対する既存の砂防施設の活用が考えられる。しかし、災害発生頻度の低さから基礎的な知見が不足しており、溶岩流に対して効果的な構造形状や配置形態はいまだ明らかではない。小尾ら<sup>2)</sup>は数値シミュレーションを通し、池田ら<sup>3)</sup>はヒアリング調査から、溶岩流に対して効果的な対策施設についての検討を行っている。しかしながら、高温流体を用いた実験は一般に困難であるため<sup>4)</sup>、実験的手法から溶岩流の特性を明らかにしたものは少ない。

これらの課題に対し、著者ら<sup>5)6)</sup>は、構造物まわりの溶岩流に関する情報を収集するために、不透過型砂防堰堤や透過型砂防堰堤を模擬した構造物を設置した流動実験を実施し、不透過型砂防堰堤や透過型砂防堰堤に捕捉される溶岩流の堆積特性について議

論を行ってきた。しかし、それらの実験の一部のケースでは、流路勾配が単一なものにとどまっていたことに加え、溶岩流の温度についての検討には至っていない。

このような背景を踏まえ、本研究では、既に公表済みである著者らの研究に、新たに追加実施した実験ケースを加えた上で再整理するとともに、赤外線サーモグラフィや熱電対により計測した溶岩流の表面温度に関する情報を全ての実験ケースで新規に追加した検討を行った。また、溶岩流の流動に関する基本特性を議論するとともに、砂防堰堤が溶岩流の流動・堆積に与える影響について検討し、今後の溶岩流災害対策に資することを目的としている。本研究では、溶岩流が流下する流路について、横断構造物が設定されていない状況(無施設の状況)、不透過型砂防堰堤が設置された状況、透過型砂防堰堤が設置された状況を想定した流動実験結果を踏まえ、それらの状況について統一的な評価を図る。

## 2. 実験概要

本研究の実験ケースを表-1に示す。新たに追加した実験ケースはCASE1-3である。構造物を設置しない条件での実験や不透過型砂防堰堤を模擬した実験であるCASE1-1, 1-2, 2-1, 2-2は永野ら<sup>5)</sup>の実験であり、CASE2-3は茂木ら<sup>6)</sup>の実験である。溶岩は、融点降下剤を加えた川砂を加熱して生成した。加熱前の各重量は、既往文献<sup>7)</sup>を参考に、川砂 540g, 重曹 270g, ホウ砂 540gとした。実験流路の模式図を図-1に示す。全ての実験は矩形断面流路で実施され、流路勾配は $10^\circ$  または  $15^\circ$  である。流路は、打設したモルタルブロックを用いて形成した。流路の諸元は、流路高 5cm, 流路幅 5cm, 流路延長 160cm である。砂防堰堤を模擬した構造物の模式図を図-2に示す。図中のアルファベットは、溶岩流の温度を計測するための熱電対の测温接点である。不透過型砂防堰堤を模擬した構造物は、モルタルを打設して作製し、高さ 3cm, 幅 5cm, 奥行き 3cm とした。また、構造物捕捉面と上面に各 2 ヶ所ずつ K 型熱電対(福電製)を設置した。一方で、透過型砂防堰堤を模擬した構造物は、透過部に直径 0.5cm, 高さ 3cm の丸棒を横ビームとして 4 本配置し、高さ 4.5cm, 幅 1cm, 奥行き 1cm で打設したセメントペーストによって形成された不透過部で透過部をはさみこんだ構造である。透過型砂防堰堤を模擬した構造物も捕捉された溶岩の温度を計測するために、K 型熱電対を测温接点として横ビームの上流側中央部に 3 ヶ所設置した。

構造物の捕捉面の位置は、供給地点から 20.5cm 地点である。溶岩流の初期温度は、流路上方から赤外線サーモグラフィ(FLIR 製 CPA T-440, 放射率 0.9)を用いて計測した。溶岩流は、矩形断面流路の上流端から 30cm 地点に、加熱容器(ステンレスビーカー)を手動で傾けることで供給した。流路の上流端に設置した支持台が加熱容器を支えるように加熱容器を傾けることで、実験条件の統一を図っている。溶岩の流下状況は、ビデオカメラと赤外線サーモグラフィにより撮影した。実験終了後、固結した溶岩の体積、到達距離、堆積厚・堆積幅を計測した。堆積厚・堆積幅は、供給地点から流下方向に 1cm ピッチで計測した。

## 3. 実験結果

### (1) 流動中の溶岩について

流路勾配  $10^\circ$  のケースにおける、赤外線サーモ

表-1 実験ケース

CASE	流路勾配 [ $^\circ$ ]	構造物	供給量 [mL]	初期温度 [ $^\circ\text{C}$ ]
1-1	10	無施設	350	897
1-2		不透過型	330	843
1-3		透過型	320	966
2-1	15	無施設	290	928
2-2		不透過型	280	852
2-3		透過型	330	1036

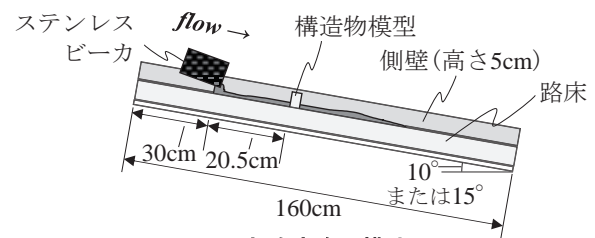
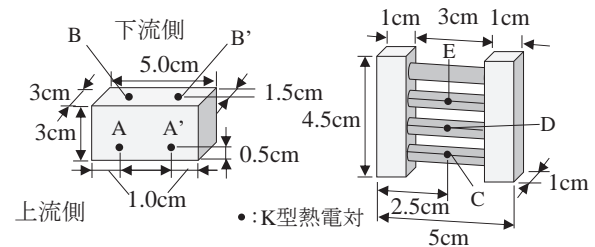


図-1 実験流路の模式図



(a) 不透過型砂防堰堤 (b) 透過型砂防堰堤

図-2 砂防堰堤を模擬した構造物の模式図

ラフィで撮影した溶岩流の様子を図-3に示す。図-3は左から順に、供給開始から 1 秒後, 2 秒後, 3 秒後, 4 秒後となっている。ただし、CASE1-3では赤外線サーモグラフィが実験中に自動校正を行ったため、供給開始時刻の 1.1 秒後から 3.0 秒後までデータが欠測している。いずれのケースにおいても気泡を発生しながら流下し、溶岩流フロント部(以下、フロント部という)から冷却が進んでいることが分かる。CASE1-1においては、流下速度が他の 2 ケースよりも早いことがわかる。

図-4に、全 6 ケースにおける流下距離の時系列変化を示す。各ケースにおける供給から停止までの時刻は、CASE1-1で約 8 秒, CASE1-2で約 6.5 秒, CASE1-3で約 1.5 秒, CASE2-1で約 4 秒, CASE2-2で約 12 秒, CASE2-3で約 9 秒であった。CASE1-2, CASE1-3, CASE2-2およびCASE2-3における供給から構造物による捕捉までの時刻はそれぞれ、約 0.5 秒, 約 0.9 秒, 約 1.1 秒, 約 0.9 秒であった。

### (2) 堆積した溶岩について

表-2に、各ケースの到達距離  $L$ , 最大堆積厚  $D$  と最大堆積幅  $W$  を示す。計測値から算出した平均堆積厚  $\bar{d}$  と平均堆積幅  $\bar{w}$  も併せて示す。

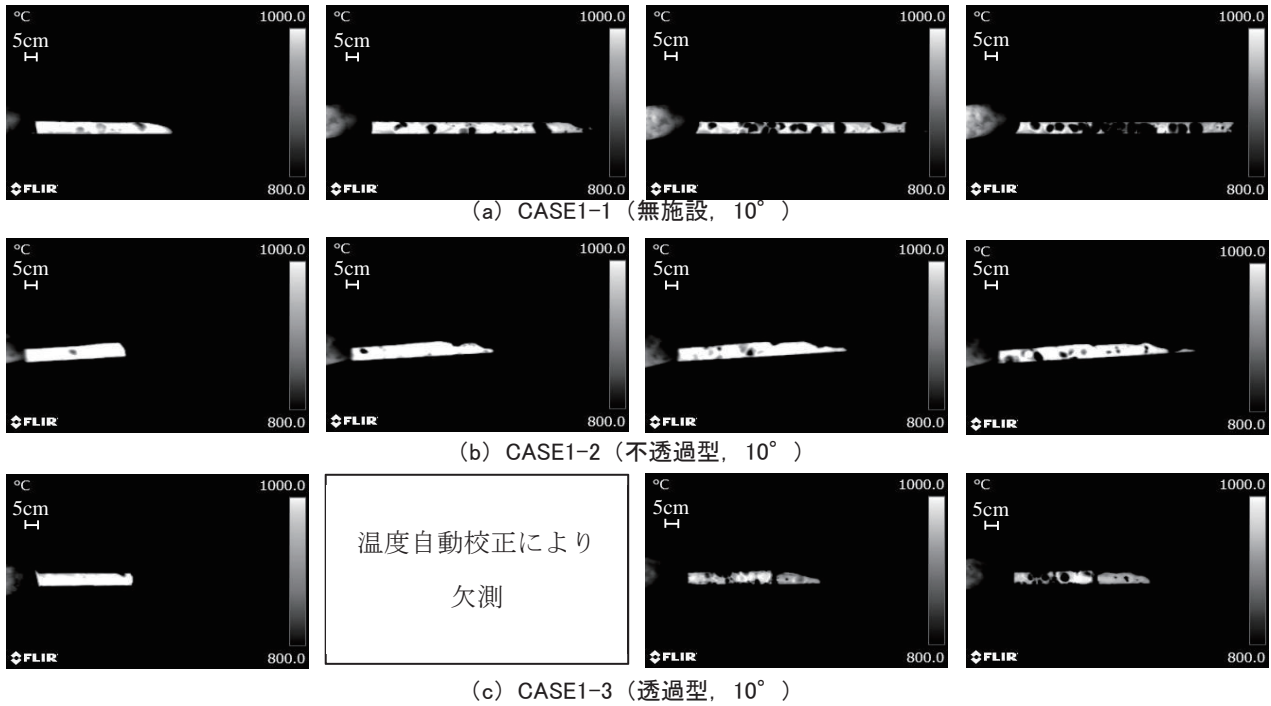


図-3 流下距離の時系列変化（左から流下開始より1秒後、2秒後、3秒後、4秒後  
ただし、CASE1-3においては、流下開始より1秒後、3.1秒後、4秒後、  
図中のスケールは著者らによる加筆）

#### 4. 考察

##### (1) 流動中の溶岩について

溶岩流の流動状況を規定する重要なパラメータである粘性係数と降伏応力は温度の関数であることから、溶岩流の温度と粘性係数の関係について議論する必要がある。フロント部温度は、赤外線サーモグラフィにより撮影した温度データ付き動画を、FLIR Tools+（熱解析ソフトウェア）を用いて解析することにより求めた。フロント部を5×5画素で抽出し、抽出範囲における最大温度をフロント部温度とした。本研究で発生させた溶岩流は小規模であるため、プラグ層は発達していないと考えられる。プラグ層の発達していない溶岩流の平均流速 $v$ と粘性係数 $\mu$ の関係は式(1)のように示されている<sup>8)</sup>。

$$v = \frac{\rho g h^2 \sin \theta}{3\mu} \quad (1)$$

ここに、 $v$ ：流下速度、 $\rho$ ：溶岩の密度、 $\theta$ ：流路勾配、 $h$ ：流動深、 $\mu$ ：粘性係数である。流下速度は、流下距離の時系列変化から算出した。本研究では、流動深の計測が困難であったため、流動深の代わりに平均堆積厚を用いて粘性係数を算出した。Soldati et al.<sup>9)</sup>は、溶岩の流動実験を実施し、組成が異なる溶岩の粘性を推定することで、溶岩流の流動に対する気泡の影響について整理している。本研究では、Soldati et al.<sup>9)</sup>を参考に粘性係数と温度の関係を整理した。

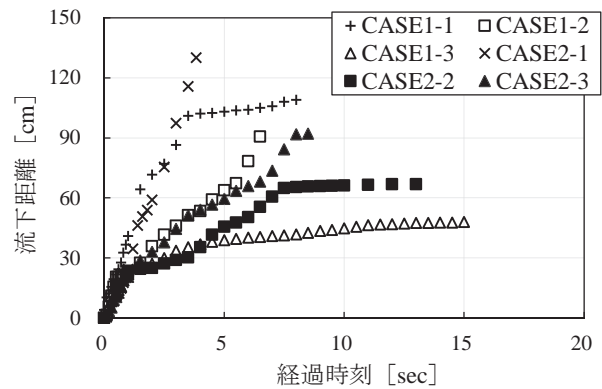


図-4 流下距離の時系列変化

表-2 堆積結果

CASE	到達距離 [cm]	堆積幅 [cm]	堆積厚 [cm]
1-1	83.9	最大 $W$ : 5.0 平均 $\bar{w}$ : 4.7	最大 $D$ : 1.0 平均 $\bar{d}$ : 0.6
1-2	69.3	最大 $W$ : 5.0 平均 $\bar{w}$ : 4.1	最大 $D$ : 4.3 平均 $\bar{d}$ : 1.2
1-3	53.8	最大 $W$ : 5.0 平均 $\bar{w}$ : 4.7	最大 $D$ : 3.0 平均 $\bar{d}$ : 1.4
2-1	70.4	最大 $W$ : 5.0 平均 $\bar{w}$ : 4.6	最大 $D$ : 1.1 平均 $\bar{d}$ : 0.8
2-2	63.8	最大 $W$ : 5.0 平均 $\bar{w}$ : 4.3	最大 $D$ : 3.7 平均 $\bar{d}$ : 1.1
2-3	74.6	最大 $W$ : 5.0 平均 $\bar{w}$ : 4.0	最大 $D$ : 3.5 平均 $\bar{d}$ : 0.8

各ケースのフロント部温度と粘性係数 $\mu$ の関係を図-5に示す。図-5には、参考に Soldati et al.<sup>9)</sup>および池本ら<sup>10)</sup>の研究結果も併せて示した。図-5から、本研究で生成した溶岩の粘性係数は、Soldati et al.の研究結果と比較すると小さい値となっていることが分かる。この原因として、溶岩生成に融点降下剤を用いたことで、流動性が高くなった可能性が考えられる。本研究では、融点降下剤として重曹とホウ砂を試料に加えて溶岩を生成しており、融点降下剤が流動性に与える影響を評価する必要がある。また、本研究の粘性係数は、池本ら<sup>10)</sup>の実験結果と比較しても小さい値をとることが分かる。本研究における溶岩流は一貫して、池本ら<sup>10)</sup>らと同一の手法を用いているため、本研究で発生させた溶岩流は池本ら<sup>10)</sup>らの研究結果と類似した物性をもつと考えられる。図-5に示した粘性係数は、流下距離と経過時間から算定した流速や流動深といった実験結果に基づいて推定した“見かけ上の粘性係数”である。したがって、それらの物理量に影響を及ぼし、かつ、池本ら<sup>10)</sup>らと本研究との間で異なる実験条件を考えると、路床の材料や側壁の有無すなわち、流路の粗度が溶岩流の流動に対して影響を及ぼしたと考えられる。

実験的手法による溶岩流の温度特性についての知見が乏しいことから、CASE1-2, 1-3, 2-2, 2-3を対象に砂防堰堤に捕捉された溶岩流の温度変化について議論をしていく。本研究では、図-2に示した砂防堰堤を模擬した構造物にK型熱電対を配置することで、溶岩流の内部の温度を計測した。不透過型砂防堰堤を模擬した構造物は、捕捉面と天端に2カ所ずつ熱電対を配置した。透過型砂防堰堤を模擬した構造物においては、熱電対を配置した横ビーム部材は、4本中下側の3本である。計測方法としては、構造物に設置した熱電対をEDX-13A(共和電業製)に接続することで、捕捉された溶岩の内部の温度を1.0秒ピッチで計測した。また、赤外線サーモグラフィにより、構造物捕捉面付近の溶岩の表面温度を供給開始から10秒までは1秒ピッチで計測し、供給開始から10秒以降は10秒ピッチで計測した。図-6と図-7にCASE1-2, CASE2-2の温度の時系列変化を示し、図-8と図-9にCASE1-3, CASE2-3の温度の時系列変化を示す。CASE1-3, CASE2-3の両ケースとも時間の経過とともに、表面温度、ビームE、ビームD、ビームC付近の順で温度が小さくなることが分かる。これより、溶岩表面からの熱放射が大きく、表面に近づくほど冷却が進行することが確認できる。最大温度を計測した時間に着目すると、ビームC付近の溶岩が他の3カ所付近の溶岩よりも最大温度

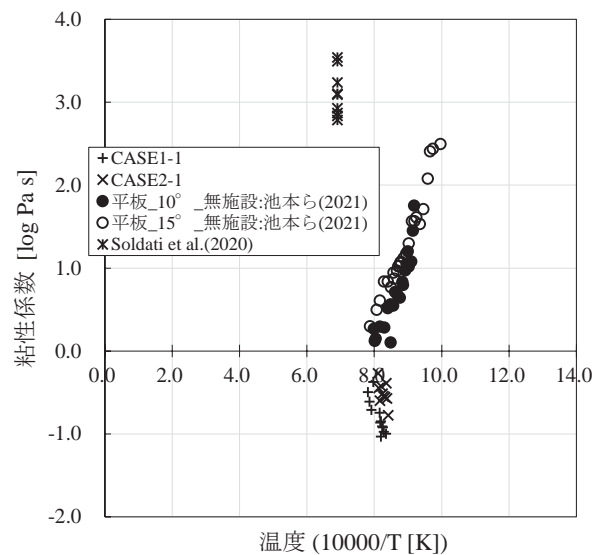


図-5 粘性係数

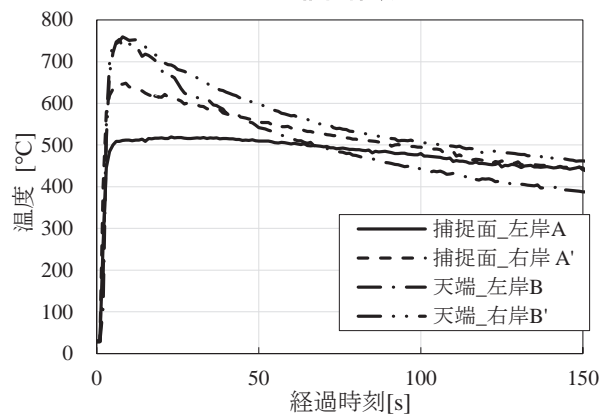


図-6 温度の時系列変化(CASE1-2)

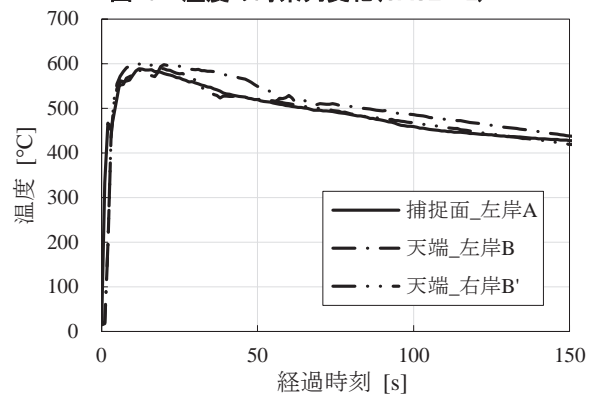


図-7 温度の時系列変化(CASE2-2)

を計測する時間が遅いことが分かる。これらのことから、横ビームを配置した透過型砂防堰堤に捕捉された溶岩は、横ビーム間の透過部を通過するのではなく、最下段にあるビームCの下側の透過部を通過し、構造物の下流に流下することが考えられる。また、図-8と図-9からCASE1-3の表面温度よりもCASE2-3の表面温度の方が温度の低下が大きいが読み取れる。この原因の詳細は現時点で不明であるが、CASE2-3において気泡の発生が顕著であることが影響していると考えられる。

## (2) 堆積形状について

表-2より、CASE2-3の到達距離は、CASE2-1の到達距離よりも大きい結果となることが分かる。これは、CASE2-3の供給量がCASE2-1の供給量よりも大きいためである。

図-10と図-11にCASE1-2とCASE1-3の固結後の溶岩の堆積状況写真を示す。どちらのケースにおいても構造物捕捉面にかけて堆積厚が増大しており、気泡が発生していることが分かる。

供給地点から構造物捕捉面までの堆積厚から、最小二乗法を用いて回帰直線を作成し、各ケースの堆積勾配を求めた。CASE1-1, CASE2-1の堆積勾配は、供給地点から20cm地点までの堆積厚を用いて算出した。図-12, 図-13に、流路勾配10°・15°のケースの堆積形状をそれぞれ示す。算出した堆積勾配は、流路勾配が10°のケースではそれぞれCASE1-1は10.2°, CASE1-2は3.3°, CASE1-3は5.2°であった。また、流路勾配が15°のケースではそれぞれCASE2-1では15.6°, CASE2-2では8.5°, CASE2-3では10.1°であった。著者ら<sup>5)</sup>は、流路勾配が15°のケースを対象に堆積勾配について議論しており、構造物を設置することで堆積勾配の緩勾配化を期待できるとしている。図-12からCASE1-2, CASE1-3の堆積勾配は、CASE1-1の堆積勾配よりも小さくなること分かる。このため、いずれの流路勾配においても、構造物の形状は問わず、構造物を設置することで、堆積勾配の緩勾配化を期待できると考えられる。堆積勾配が小さくなると、以降に到達する溶岩流の流下速度や到達距離の減少が期待される。

土石流対策施設の配置計画では、現溪床勾配に対して、平常時堆砂勾配が1/2、計画堆砂勾配が2/3とされている<sup>11)</sup>。このことを踏まえて、各ケースの堆積勾配について着目すると、不透過型砂防堰堤を模擬したケースではそれぞれの流路勾配に対して、CASE1-2では約1/3、CASE2-2では約1/2となる。両ケースの堆積勾配は、土石流対策計画での計画堆砂勾配よりも小さくなる。この結果から、溶岩流においても不透過型砂防堰堤における捕捉量が期待できると仮定すると、本実験で発生させた溶岩流に対する捕捉量は、土石流に対する捕捉量よりは小さくなる可能性がある。また、透過型砂防堰堤を模擬したケースでの堆積勾配はそれぞれの流路勾配に対して、CASE1-3では約1/2、CASE2-3では約2/3となる。土石流対策計画での計画堆砂勾配と比較すると、CASE1-3の堆積勾配は、計画堆砂勾配よりも小さくなり、CASE2-3の堆積勾配は計画堆砂勾配と同程度となる。すなわち、透過型砂防堰堤に捕捉される溶

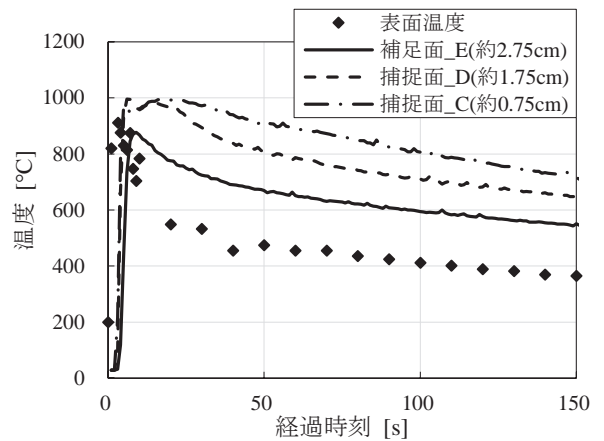


図-8 温度の時系列変化(CASE1-3)

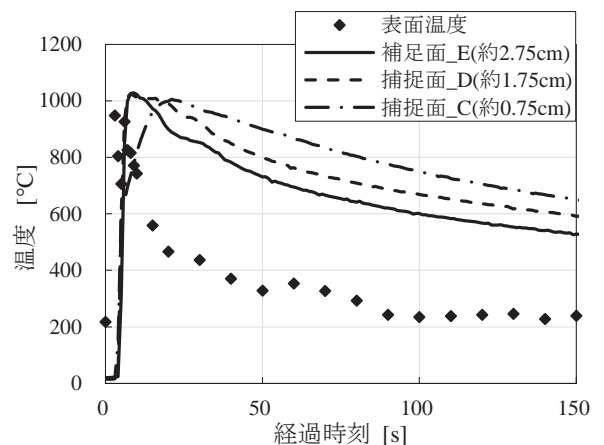


図-9 温度の時系列変化(CASE2-3)



図-10 固結後の堆積形状 (CASE1-2)

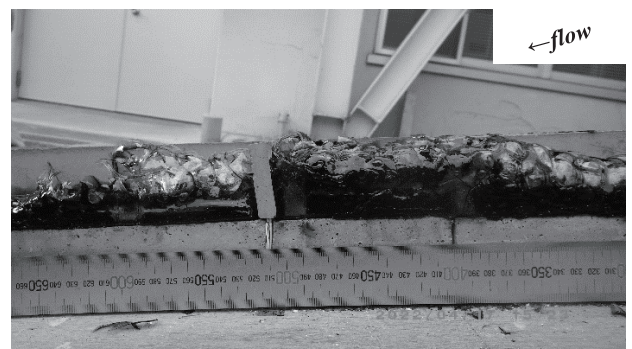


図-11 固結後の堆積形状 (CASE1-3)

岩の体積は、土砂の場合と同程度以下になると考えられ、流路勾配が小さいほど、土砂の場合よりも小さくなることが示唆される。

続いて流路勾配ごとのケースで比較すると、いずれの流路勾配においても構造物の型式が異なると、堆積勾配は異なる値を示す。このことから、土石流対策施設の配置計画では、構造物の型式は問わず現渓床勾配に対して計画堆砂勾配は 2/3 とされているが、溶岩流の場合では構造物の型式ごとで、計画を立てることが必要であると考えられる。

## 5. おわりに

本研究では、矩形断面流路を流下する溶岩流の流動特性を検討するとともに、砂防堰堤が溶岩流の流動・堆積に与える影響について、高温流体を用いた流動実験を通じて検討を行った。その結果、横ビームを配置した透過型砂防堰堤に捕捉された溶岩は、一様に横ビーム間の透過部を通過するのではなく、いったん構造物の上流側に貯留した溶岩であっても、流動可能なほど高温であれば、より下部に位置する透過部から通過し、構造物の下流に流下することがわかった。また、不透過型砂防堰堤による溶岩流の捕捉量は、土石流に比べ小さくなる可能性があることがわかった。透過型砂防堰堤に捕捉される溶岩の体積については、土砂の場合と同程度以下になると考えられる。今後は、供給量を増加させた流動実験を実施し、数値解析モデルを検証するための資料とするなど、より実用的な知見を集積することが必要と考える。

### 参考文献

- 1) 厚井高志, 権田豊: 溶岩流による火山災害とその対策の方向性, 砂防学会誌, Vol.73, No.6, pp.27-38, 2021.
- 2) 小尾亮, 池田暁彦, 吉田真也, 田中利昌, 藤平大: 溶岩流に対する実効性のあるハード対策の検証, 令和3年度砂防学会研究発表会概要集, pp.309-310, 2021.
- 3) 池田暁彦, 吉田真也, 小尾亮: コンクリートブロックを用いた溶岩流対策について, 令和4年度砂防学会研究発表会概要集, pp.353-354, 2022.
- 4) 水山高久, 栗原淳一, 河村和夫, 北原一平: 溶岩流のシミュレーションと対策手法, 新砂防, Vol.42, No.4, pp.12-17, 1989.
- 5) 永野博之, 茂木陽平, 池本敦哉, 柳原駿太, 西尾陽介, 佐藤敏明: 直方体構造物を越流する溶岩流の堆積特性に関する実験的研究, 令和4年度砂防学会研究発

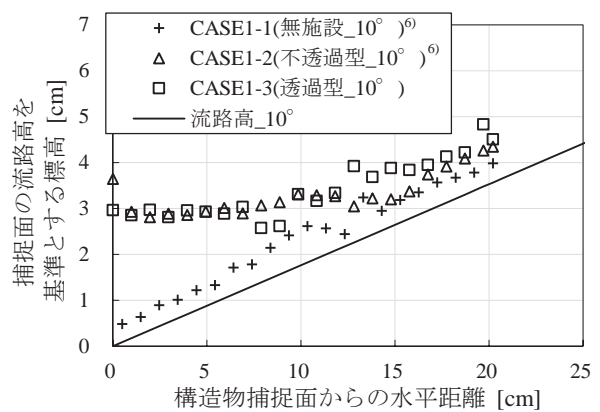


図-12 構造物より上流の堆積形状 (流路勾配 10°)

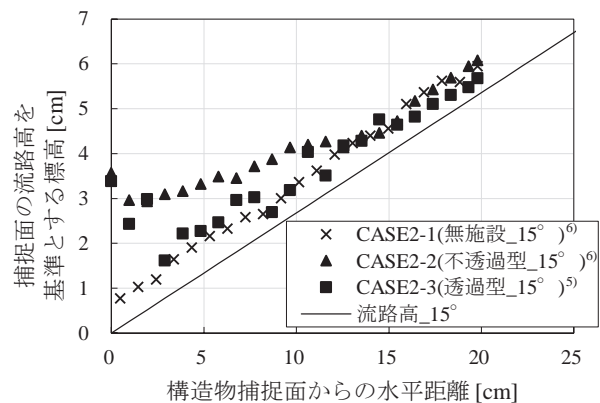


図-13 構造物より上流の堆積形状 (流路勾配 15°)

表会概要集, pp.121-122, 2022.

- 6) 茂木陽平, 永野博之, 池本敦哉, 西尾陽介, 佐藤敏明: 異なる型式の砂防堰堤に捕捉される溶岩流の堆積特性に関する研究, 第49回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要, II-11, 2022.
- 7) 中野英之, 江口はるみ: 学習事項を有機的につなぐ地学教材の有効的な活用方法を探る, 地学教育, 第68巻, 第3号, pp.129-143, 2016.
- 8) 砂防・地すべり技術センター: 砂防数値シミュレーションにおけるモデルの特性に関する研究, 研究報告, 第1号, pp.94-110, 2000.
- 9) Soldati, A., Farrell, J.A., Sant, C., Wysocki, R., Karson, J.A.: The effect of bubbles on the rheology of basaltic lava flows: Insights from large-scale two-phase experiments, Earth and Planetary Science Letters, Vol.548, 2020.
- 10) 池本敦哉, 永野博之, 柳原駿太, 西尾陽介, 佐藤敏明: 溶岩流の流下状況と堆積特性に関する実験的研究, 第48回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要, II-45, 2021.
- 11) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 土石流・流木処理計画, 砂防基本計画策定指針 (土石流・流木対策編) 解説, pp.40, 2016.

(2022. 5. 30 受付)