

# 平板上に設置された構造物を迂回する 溶岩流の流動特性に関する実験的研究

## EXPERIMENTAL STUDY INTO THE CHARACTERISTICS OF LAVA FLOW CIRCUMVENTING THE STRUCTURE ON THE FLAT PLATE

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

Atsuya IKEMOTO, Hiroyuki NAGANO, Hayata YANAGIHARA, Yohei MOGI,

Yosuke NISHIO and Toshiaki SATO

<sup>1</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>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: yanagihara.hayata.r1@dc.tohoku.ac.jp

<sup>4</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>5</sup> 八千代エンジニアリング (〒111-8648 台東区浅草橋 5-20-8)

**Key Words:** lava flow, flow experiment, structural countermeasures, flat channel

### 1. はじめに

溶岩流災害におけるハード対策として、土砂災害対策施設の活用が期待されているが、効果的な対策施設の構造形状は明らかでない。栗原ら<sup>1)</sup>は、数値シミュレーションに加え、精密模型実験により対策施設の検討を進めているものの、このような事例は多くない。また、高温流体を用いた流動実験も多くはない。海外では、溶鉱炉で加熱生成した溶岩を用いた流動実験事例<sup>2)</sup>もあるが、高温流体を用いた実験が一般には困難なため<sup>3)</sup>、数値シミュレーションによる検討が多いと考えられる。このような背景から、溶岩流の流動・堆積特性に関する実験的な知見の不足を補うため、著者らは高温流体を用いた流動実験により溶岩流の流動特性について検討してきた<sup>4)~7)</sup>。それらの検討では、氾濫原を想定した平板流路に構造物を設置し、構造物の上流側に捕捉される溶岩流や、構造物の下流に流出する溶岩流の基本的な知見の集積を試みている<sup>5)~7)</sup>。しかしながら、構

造物の幅は単一の大きさに限られており、構造物に捕捉される溶岩流の挙動について、構造物の諸元を踏まえた検討を行うには至っていない。本研究は、溶岩流災害に対して効果的な横断構造物の施設配置を検討することを最終的な目的とした著者らの研究の延長上にある。既往研究とは幅の異なる直方体の構造物を設置した平板流路上の流動実験から、直方体の構造物に捕捉される溶岩流の流動状況について検討し、流動・堆積特性に関するさらなる知見の集積を試みた。これは、幅が狭い局所的な構造物から、堤防のような線状の構造物まで連続的に議論することを目指すものである。また、今後、実験スケールと実スケールの議論を結びつけるために、流動を規定するパラメータであり、温度との関係が強い粘性係数の議論が必要となる。このため、著者らの既往研究を含めて、表面温度の観点から、溶岩流の流動に関する基本的な特性を再整理し、本研究で実施した実験とあわせて統一的に検討することで、今後の溶岩流災害対策に資することを目指すものである。

## 2. 実験概要

本研究での実験ケースを表-1に示す。本研究では構造物の幅 10cm のケース (CASE1-3, CASE2-3) を実施した。それ以外は既往研究<sup>5)・7)</sup>の実験である。溶岩は、融点降下剤である重曹・ホウ砂を加えた川砂をいれたステンレスビーカーを、木炭を敷き詰めた溶鉱炉内で加熱して生成した。加熱前の各重量は、川砂 540g, 重曹 270g, ホウ砂 540g である。実験流路の模式図を図-1に示す。本研究では、平板流路を用い、流路勾配は 10° および 15° とした。流路は、流路延長 100cm, 流路幅 60cm であり、木製合板に粒径 2mm 未満の川砂を厚さ 5cm で敷設した。溶岩流は、溶鉱炉から取り出したステンレスビーカーを、流路の上流端から 20cm 地点において手作業で傾けて発生させた。安全性のため供給量は 350ml 程度とした。直方体構造物は高さ 3cm, 奥行き (縦断方向) 3cm, 幅 (横断方向) 10cm で打設したモルタルブロックを流路に設置した。直方体構造物の上流側の面 (以下、捕捉面と称す) の位置は、供給地点から 20cm 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。供給地点の溶岩初期温度の計測値を表-1にあわせて示した。本研究では、放射温度計 (AD-5634) により加熱中の試料温度を適宜確認しながら試料を手作業で攪拌し、川砂の融解終了を判断した段階で流路に供給したため、初期温度は表-1に記載した程度のばらつきが生じる。溶岩の流下状況は、流路上方、流路右岸側方に設置したビデオカメラにより撮影した。実験終了後、固結した溶岩の体積、到達距離、堆積厚と堆積幅を計測した。堆積厚・堆積幅は、供給地点から 1cm ピッチで計測した。

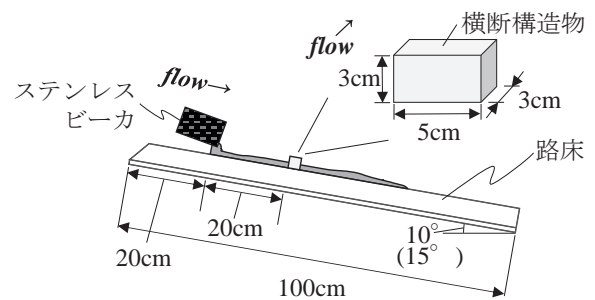


図-1 実験に用いた平板流路の模式図 (側面図)

表-1 実験条件

CASE	勾配 [°]	構造物の幅 [cm]	初期温度 [°C]	供給量 [mL]
1-1	10	-	952.7	340
1-2		5	858.6	330
1-3		10	933.8	360
2-1	15	-	947.2	350
2-2		5	980.0	350
2-3		10	878.6	360

CASE1-2 において、構造物の捕捉面から下流側の面の位置までを流下する溶岩流フロント部は、徐々に幅を広げながら流下した。下流側の面の位置を通過したのち、溶岩流フロント部は、流路の中心側に向かわずそのまま流下し、やがて停止した。

CASE1-3 では、到達距離が左岸と右岸で異なる。これは、手作業による溶岩供給時に、供給された溶岩が流路の中心よりも右岸に寄っていたためである。左岸について、流出した溶岩流フロント部は、捕捉面に到達後、流下方向を構造物の捕捉面に沿った横断方向へと向きを変えて流動した後、幅を広げながら流下してくる後続の溶岩流と合流して構造物の右岸および左岸から流下した。構造物の左岸に流出した溶岩流は、後続の溶岩流と合流したのち、横断方向に幅を広げて下流に流出した。下流に流出した溶岩流は、右岸、左岸ともに流路の中心に向かって流下し、構造物を迂回するように堆積した。

CASE2-2 の溶岩流は、溶岩流のフロント部付近に気泡が発生した。構造物に捕捉された後も、気泡を発生させながら流下した。構造物に捕捉された溶岩が下流に流出する前に、後続流が下流に流出した。下流に流出した溶岩流は、徐々に流路の中心に向かって流下し、構造物を迂回するように堆積した。

CASE2-3 において、構造物の下流に流出した溶岩流は、徐々に幅を広げて堆積した。構造物の下流に流出した溶岩流は、わずかに流路の中心に向かって流下し、構造物を迂回するように堆積した。いずれのケースも、構造物の右岸および左岸から流出した

## 3. 実験結果

### (1) 流動中の溶岩流の様子

構造物を設置したケースにおける、溶岩の流動状況の赤外線サーモグラフィ画像を図-2に示す。いずれのケースでも、ステンレスビーカーから溶岩が供給され、流路を流下する溶岩流の外縁は楕円形状を呈し、外縁を大きくしながら流下した。供給開始直後、CASE1-2 と CASE2-3 の溶岩は赤錆色、CASE1-3 と CASE2-2 の溶岩は明るい橙色であり、初期温度 (表-1) の違いによると考えられる。流下開始以降、溶岩流は外縁から色を濃くし、黒色になって停止した。また、図-2 中の CASE1-3 と CASE2-2 の黒い斑状の低温域は、気泡であるが発生原因は不明である。

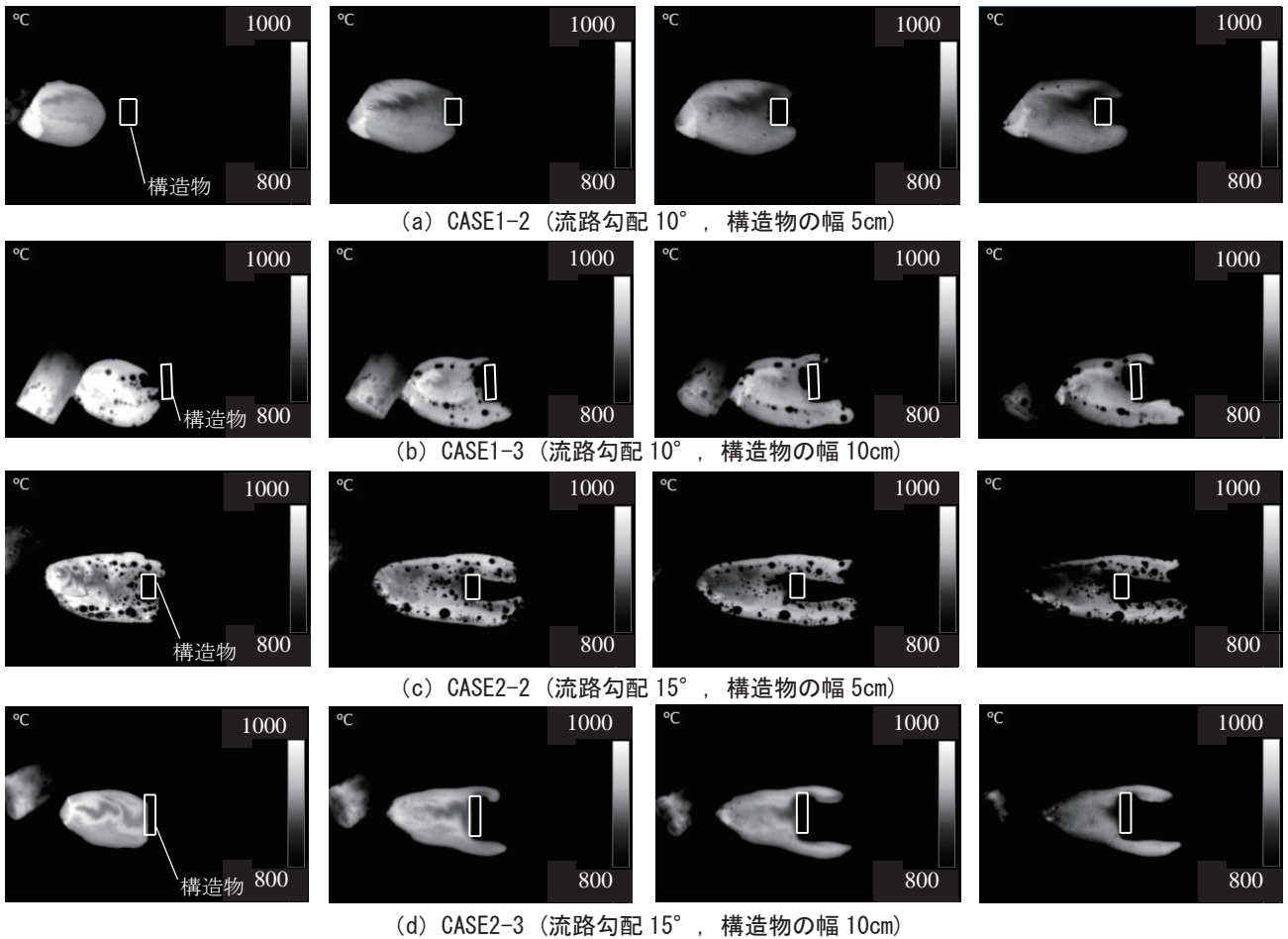
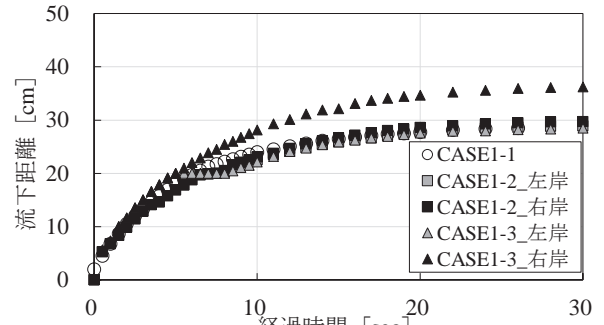


図-2 流動中の溶岩流の様子（左から流下開始より 5 秒後、10 秒後、15 秒後、20 秒後）

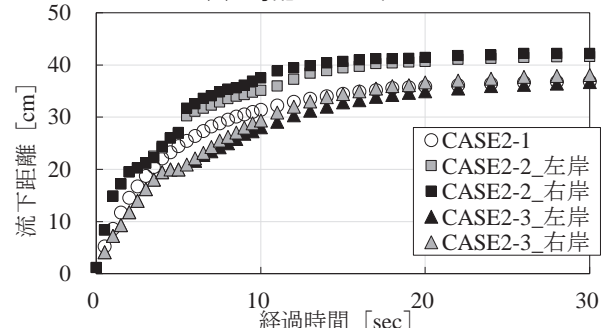
溶岩は、舌状を呈して流下した。また、いずれのケースでも、フロント部の停止後も、フロント部より上流の溶岩の流動深は変化を続けた。これは、フロント部より上流の溶岩が、フロント部停止後も流動を続け、徐々に下流に溶岩が流下していたためである。捕捉面以降の舌状部では、外縁部よりも内側の方が高温な傾向にある（図-2）。溶岩流は高温ほど粘性が小さく、流動性が高いことが知られており、冷却の進行に伴い流動性が低下する。内側の溶岩はフロント部の溶岩よりも冷却の進行が遅いため、フロント部停止後も、内側の溶岩の流動は続いた。初期温度は表-1 に示す程度のばらつきであるが、これらの挙動に与える影響については今後の課題である。

## (2) 流下距離の時系列変化

平板流路上面から撮影した動画から、各ケースの溶岩流の流下距離の時系列変化を取得した。流路勾配が  $10^\circ$  および  $15^\circ$  のケースの流下距離の時系列変化を図-3 に示す。CASE1-2 では左岸、右岸ともに 6.5 秒～8.0 秒、CASE1-3 の左岸では 4.5 秒～8.5 秒の間で流下距離が横ばいになっている。CASE2-2 では 2.0 秒～2.5 秒で、CASE2-3 では 4.0 秒～5.5 秒の間で



(a) 勾配  $10^\circ$  のケース



(b) 勾配  $15^\circ$  のケース

図-3 流下距離の時系列変化

流下距離が横ばいになっている。これは、溶岩流の流下フロント部が構造物に捕捉され、進行方向が縦断方向から横断方向に切り替わったためである。

CASE1-2, CASE2-2 よりも CASE1-3, CASE2-3 の方が、流下距離が変化しない時間が長い。これは、構造物の幅が広く、流下フロント部が横断方向へ進行する距離が長くなるためである。本研究で生成した溶岩が平板流路を流下する場合、流路に設置する幅が大きいほど、溶岩流が構造物に捕捉されてから下流に流出するまでの時間が長くなると考えられる。

### (3) 堆積結果

表-2 に堆積結果を示す。CASE1-1 と CASE1-2 の到達距離は同程度である一方で、CASE1-3 の右岸と左岸の到達距離は異なる結果となり、右岸の到達距離は CASE1-1 と CASE1-2 を上回る結果となった。このような結果となった原因として、初期温度の違いが影響を及ぼす可能性も考えられるが、いまだ不明瞭であり、今後の課題である。各ケースの堆積厚は、構造物捕捉面で最大となった。

## 4. 流動中の溶岩に関する考察

溶岩流の流動を規定するパラメータの1つである粘性係数は温度の関数であるため、溶岩流の温度と粘性係数についての議論は重要である。今後、実現象との比較や数値解析による検討を行う上でも、実験で用いた溶岩の粘性係数の評価は重要となる。本研究で生成した溶岩は、融点降下剤を加えて生成しており、一般的な溶岩とは特性が異なると考えられる。この粘性係数は、実験結果から逆算される見かけの粘性係数であり、温度変化や流速の減少が算出値に大きな影響を及ぼすと考えられる。本研究のように小規模な実験では、構造物捕捉後、左右に分かれた後のそれぞれの溶岩流のボリュームは小さくなるため、分かれる前と変わらず統一的な評価が可能であるか不明である。本研究では、著者らの実験における粘性係数を評価するため、スケールの異なる実験として 10,000cm<sup>3</sup> 程度までの規模の実験を行った Soldati et al.<sup>2)</sup>の結果と比較した。また、本実験スケールで統一的な評価の可否を把握するため、各ケースの粘性係数と温度との関係を整理した。

溶岩流の流速は、流下距離の時系列変化から求めるため、流下フロント部に着目する。流下フロント部温度は、赤外線サーモグラフィによる計測結果を、熱解析ソフトウェア (FLIR Tools+) で解析して求めた。流下フロント部の抽出範囲 (5×5 画素) に最大温度を流下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

表-2 堆積結果  
(a) 勾配 10° のケース

CASE	到達距離 [cm]	堆積幅 [cm]	堆積厚 [cm]
1-1	29.1	最大 W : 19.2 平均 $\bar{w}$ : 15.8	最大 D : 0.8 平均 $\bar{d}$ : 0.6
1-2	右岸 : 29.1 左岸 : 29.0	最大 W : 18.7 平均 $\bar{w}$ : 14.7	最大 D : 1.3 平均 $\bar{d}$ : 0.7
1-3	右岸 : 37.2 左岸 : 29.0	最大 W : 20.7 平均 $\bar{w}$ : 13.6	最大 D : 1.1 平均 $\bar{d}$ : 0.6

(b) 勾配 15° のケース

CASE	到達距離 [cm]	堆積幅 [cm]	堆積厚 [cm]
2-1	36.8	最大 W : 18.7 平均 $\bar{w}$ : 15.5	最大 D : 1.0 平均 $\bar{d}$ : 0.6
2-2	右岸 : 42.4 左岸 : 40.3	最大 W : 17.8 平均 $\bar{w}$ : 13.0	最大 D : 1.2 平均 $\bar{d}$ : 0.6
2-3	右岸 : 38.1 左岸 : 37.7	最大 W : 19.4 平均 $\bar{w}$ : 13.0	最大 D : 0.9 平均 $\bar{d}$ : 0.6

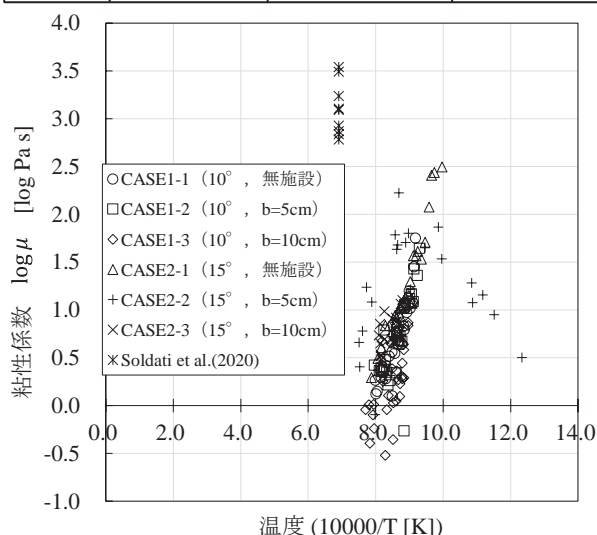


図-4 粘性係数と流下フロント部温度との関係

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>。

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

ここに、 $v$  : 流下速度、 $\rho$  : 溶岩の密度、 $g$  : 重力加速度、 $\theta$  : 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。流動深は、右岸側方から撮影した動画から判読した値を式 (1) に代入した。側方から撮影した動画から判読可能な流動深は、構造物の右岸に流出する溶岩流のみであるため、本研究では、構造物の右岸に流出した溶岩流フロント部の粘性係数を推定した。Soldati et al. は、彼らの実験で用いた溶岩の粘性係数について、流下フロント部温度  $T_f$  の逆数と対数をとった粘性係数  $\mu$  との関係で整理しており、本研究でも



彼らにならって整理した(図-4)。本実験で生成した溶岩の粘性係数は、Soldati et al.が実験で用いた溶岩の粘性係数と比較しても小さいことが分かるが、著者らの実験ケース間ではCASE2-2を除き、統一的な傾向を示すようである。一般に、溶岩流は冷却の進行に伴い流動性が低下することが知られており、著者らの溶岩についても、CASE2-2を除いて同様の傾向にある。CASE2-2は、気泡の発生が顕著であった。すなわち、気泡が顕著なケースでは、粘性係数の評価に注意が必要と考えられる。また、構造物の有無による傾向の変化は見られなかった。このため、本実験スケール程度であっても、構造物による左右への分離が流動に与える影響は小さいと考えられる。

## 5. 堆積結果に関する考察

### (1) 考察で用いる諸量について

本研究では、計測した堆積幅と堆積厚を用いて、平均断面法により区間体積を算出した。本研究における実験結果は、各ケースで到達距離、堆積幅および堆積厚等が異なる結果となり、単純比較ができない。このため、到達距離比、堆積幅比および堆積厚比の比を用いることで各CASEの実験結果を規格化し比較した。到達距離比、堆積幅比、堆積厚比はそれぞれ式(2)、(3)、(4)で表される。

$$N_L = l/L \quad (2)$$

$$N_W = w/\bar{w} \quad (3)$$

$$N_D = d/\bar{d} \quad (4)$$

ここに、 $l$ : 供給地点から計測地点までの距離、 $L$ : 到達距離、 $w$ : 供給地点から  $l$  離れた地点での堆積幅、 $\bar{w}$ : 平均堆積幅、 $d$ : 供給地点から  $l$  離れた地点での堆積厚、 $\bar{d}$ : 平均堆積厚、到達距離比 0.0 と 1.0 はそれぞれ、供給地点と溶岩フロント部を示す。

### (2) 横断構造物の上流に堆積した溶岩流

図-5および図-8に、区間体積の累加百分率と、到達距離比の関係を示す。また、到達距離比に対する堆積幅比を図-6と図-9に、到達距離比に対する堆積厚比を図-7と図-10にそれぞれ示す。

図-5に示すように、CASE1-1の区間体積の累加百分率は、到達距離の増加に伴い一定の割合で増加している。一方で、供給地点から構造物捕捉面までのCASE1-2およびCASE1-3の区間体積の累加百分率は、緩やかながらも増加傾向にある。CASE1-3においても、供給地点から構造物捕捉面までの区間で、堆積幅はCASE1-1と類似した傾向を示す(図-6)が、堆積厚は捕捉面にかけて増加し、CASE1-2と類似し

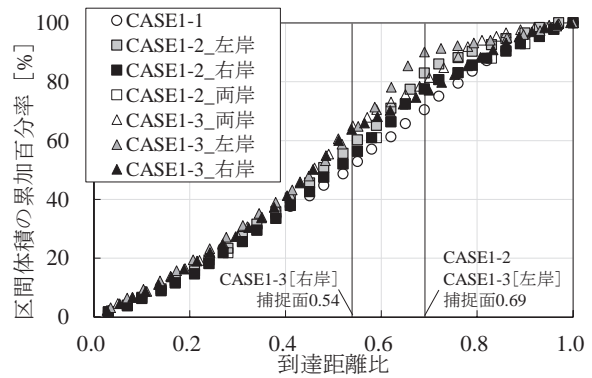


図-5 区間体積の累加百分率と到達距離比の関係

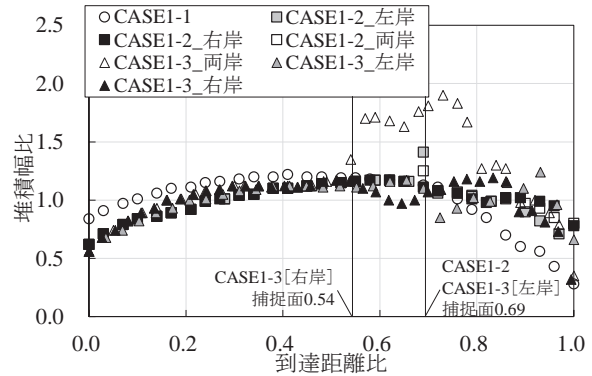


図-6 堆積幅比と到達距離比の関係

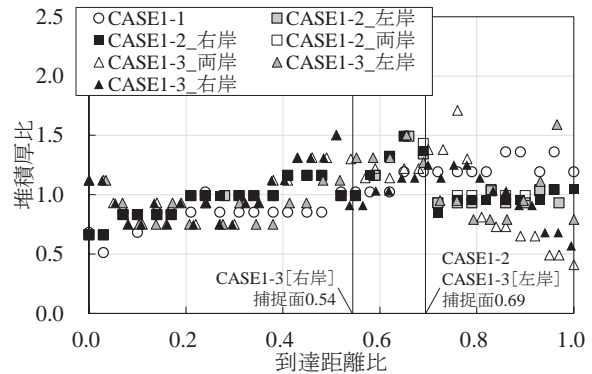


図-7 堆積厚比と到達距離比の関係

た傾向を示す(図-7)。このため、流路勾配が $10^\circ$ のケースでは、区間体積の累加百分率の増加傾向は、堆積幅あるいは堆積厚どちらか片方の傾向のみに左右されるわけではないことが分かる。

永野ら<sup>7)</sup>はCASE2-1、CASE2-2について堆積幅が体積に対して影響が大きいことを示唆した。これは、CASE2-1とCASE2-2の区間体積が一定の割合で増加する一方で、堆積厚比が異なる傾向を示すのに対し、堆積幅比が類似した傾向を示すためである。CASE2-3の区間体積の累加百分率は、到達距離の増加に伴い、一定の割合で増加している(図-8)。供給地点から構造物捕捉面までの区間において、CASE2-3の堆積幅はCASE2-1、CASE2-2と類似した傾向を示し(図-9)、堆積厚はCASE2-2と類似した傾向を示す(図-10)。このため、流路勾配が $15^\circ$ のケースでは、供給地点から構造物捕捉面までの区間では溶

岩の体積には堆積幅の影響が大きいと考えられる。

### (3) 横断構造物の下流に流出した溶岩流

図-5 に示すように、CASE1-2 と CASE1-3 における構造物捕捉面以降の区間体積は、一定の割合で増加している。永野ら<sup>7)</sup>は、CASE1-2 と CASE2-2 における構造物を迂回した溶岩の堆積幅、堆積厚は、それぞれ一定の値を取る区間が出現する傾向があることを示唆した。構造物捕捉面以降について、CASE1-3、CASE2-3 での堆積幅も同様であり(図-6、図-9)、これは、舌状に分かれた後の幅が一様に近いことを意味する。CASE1-3、CASE2-3 での堆積厚についても、分かれた後の厚さが一様な特徴を有することがわかる(図-7、図-10)。このため、構造物に捕捉された溶岩の堆積幅および堆積厚は、設置した構造物の幅、勾配によらず一定の値を示すと考えられる。

## 6. おわりに

本研究では、直方体の構造物を設置した平板流路を用いて溶岩流の流動実験を実施し、流動状況の観察、流動・堆積特性に関する考察を試みた。構造物に捕捉され下流に流出した場合、堆積幅、堆積厚ともに一定の値を取る区間が出現する傾向がみられ、舌状に分かれた特徴と考えられた。今後は、溶岩の供給量を増加させた流動実験や構造形状を変化させた構造物を用いた流動実験を行い、本研究で示した傾向と比較して、溶岩流の流動・堆積特性を整理する必要がある。また、数値解析により、初期温度の違いが結果に与える影響について検討した後、効果的な対策施設の配置形態を評価する必要がある。

### 参考文献

- 1) 栗原崇晃, 金澤大介, 佐藤厚慈, 荒井健一, 岸本博志, 野村和良, 白杵伸浩: 溶岩流対策施設の検討事例について ~伊豆大島を例として~, 平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.382-383, 2012.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 永野博之, 柳原駿太, 佐藤敏明, 西尾陽介: 小型流路を用いた溶岩流の流動特性評価に関する実験的研究, 令和元年度砂防学会研究発表会概要集, pp.67-68, 2019.

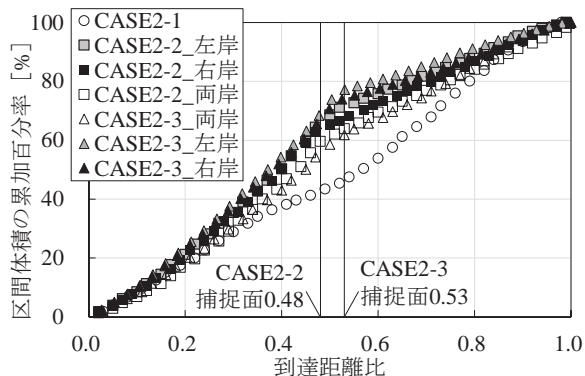


図-8 区間体積の累加百分率と到達距離比の関係

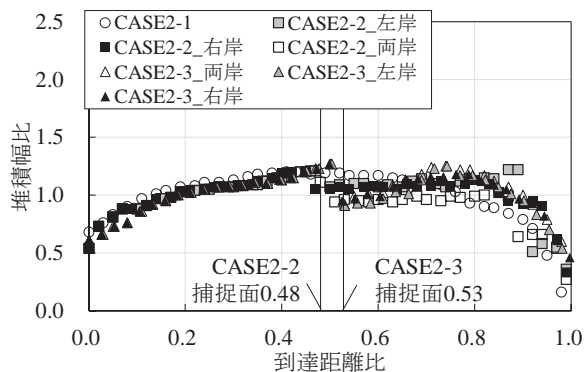


図-9 堆積幅比と到達距離比の関係

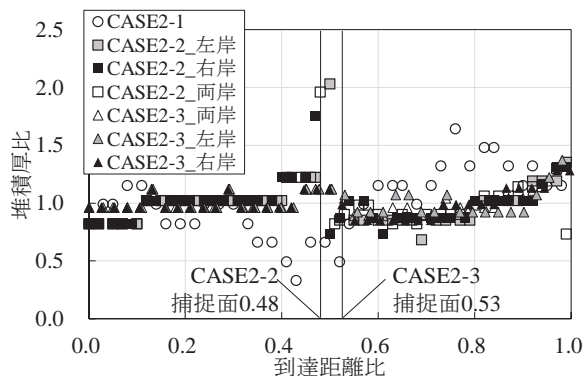


図-10 堆積厚比と到達距離比の関係

- 5) 永野博之, 池本敦哉, 柳原駿太, 西尾陽介, 佐藤敏明: 直方体構造物を迂回・越流する溶岩流の堆積形状に関する研究, 令和 3 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.69-70, 2021.
- 6) 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.
- 7) 永野博之, 池本敦哉, 柳原駿太, 西尾陽介, 佐藤敏明: 直方体構造物を迂回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表会概要集, pp.119-120, 2022.
- 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.

(2022. 5. 30 受付)