

噴火による融雪型火山泥流の発生機構に関する基礎的検討

堤大三・藤田正治・宮田秀介・志田正雄・長野快*

* 東京大学大学院工学研究科

要 旨

冬季に火山噴火が発生した場合、火山噴出物が積雪上に堆積して、急激に融雪が起こり、噴出物や斜面土層を巻き込んで泥流化する危険性がある。実際、この融雪型火山泥流による甚大な被害が発生した事例が数件報告されている。しかし、発生条件が特殊である事や、複雑なプロセスのためか、研究はあまり進んでおらず、発生機構はほとんど不明のままである。本研究では、積雪層に温泉水を噴射し、積雪層表面からの融雪と融雪水の浸透を観察する基礎的な実験を行った。実験の結果、限定的な条件の下ではあるが、以下の事項が明らかとなった。1) 積雪層の融解は、層の表面から進行した。2) 融雪水は積雪層を浸透し、水路底面に水面を形成した。3) 浸透においては、フィンガリングと呼ばれる選択流路を伴う不均一な浸透挙動を示した。4) 融雪が進行する速度よりも、融雪水の浸透速度の方が大きく、積雪層上には表面流は発生しなかった。

キーワード：融雪型火山泥流，火山噴火，浸透能，融雪速度，熱電対，TDR

1. はじめに

火山噴火によって火山噴出物が積雪上に堆積するなど、積雪期の火山活動により、積雪層が融けて融雪水と土砂が混合した泥流が発生する場合がある。これは融雪型火山泥流と呼ばれ、実際にコロンビアのネバド・デル・ルイス火山の噴火（1985）や北海道の十勝岳の噴火（1926）に伴って発生した火山泥流では、多数の被害者を出す大災害となった。このように、防災学上も重要な現象である融雪型火山泥流に対して、これまでいくつかの実験的検討（吉川ら，2010）やモデル化（宮本ら，1989；安養寺ら，2003）が行われてきているが、発生機構の解明につながるような研究はなされていない。この理由のひとつは、積雪のある火山である事と、積雪期間に火山噴火が起こる、という限定された発生条件があるためと考えられる。もうひとつの理由として、融雪型火山泥流は、火山噴出物と積雪間の熱伝導、積雪の融解、融雪水の浸透、積雪層・土層・堆積物層の不安定化、泥流発生、といったいくつもの物理プロセスが複雑に関連する現象であるためと考えられる。

本研究では、融雪型火山泥流の発生機構を構成する複数のプロセスの内、特に積雪層の融解と融雪水

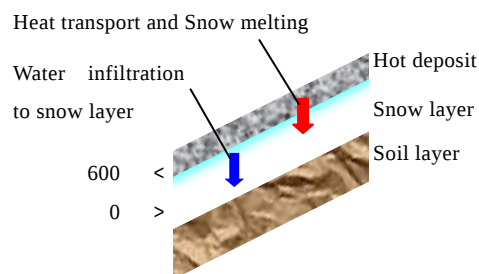


Fig. 1 Schematic drawing of mudflow occurrence processes due to volcanic eruption

の浸透プロセスに焦点を絞り、その発生機構を明らかにすることを目的として基礎的な実験を行った（Fig. 1参照）。実験は、実際に融雪型火山泥流が発生する可能性のある活火山焼岳（2,455 m）のふもとに位置する京都大学防災研究所附属流域災害研究センター 穂高砂防観測所（岐阜県高山市奥飛騨温泉郷）にて実施した。実験には自然雪を使用し、現地の気象条件の下で実施した。また、融雪のための熱源として与える熱水は、近傍に湧出している温泉の源泉を利用した。本稿では、その結果について報告

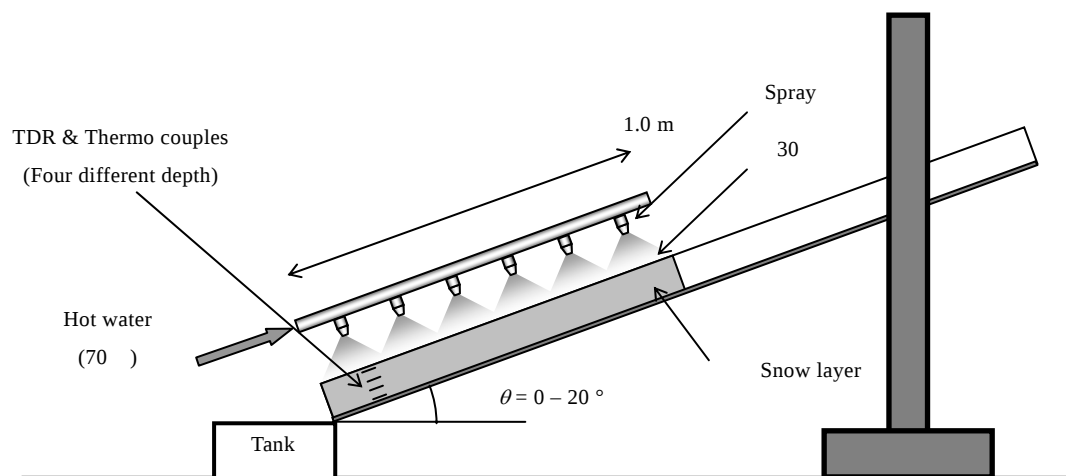


Fig. 2 Schimatic drawing of the experimental equipment

Table 1 Experimental conditions

Exp. No.	Snow density [kg/m ³]	Slope angle [dgree]	Spraying direction [dgree]	Ice layer from bottom [cm]
-	[kg/m ³]	[dgree]	[dgree]	[cm]
Case 1	137	0	0	-
Case 2	227	0	0	-
Case 3	343	0	0	-
Case 4	353	0	10 (right)	-
Case 5	373	0	10 (left)	-
Case 6	203	0	10 (left)	-
Case 7	243	20	10 (left)	-
Case 8	137	20	10 (left)	6
Case 9	303	20	10 (left)	-
Case 10	210	0	10 (left)	8

し、考えられる融雪型火山泥流の発生プロセスについて検討を行う。

2. 実験手法

実験は、2011年1月5 - 11日に京都大学防災研究所 附属流域災害研究センター 穂高砂防観測所(岐阜県高山市)にて実施した。実験は、長さ2.0 m、幅7.5 cm、高さ15 cmの透明アクリル製の水路に自然雪を充填し積雪層を準備、この積雪層に、約70 °の熱水を人工降雨装置によって噴射し、融雪挙動と融雪水の浸透挙動を水路側面から観察するものである。ただし、噴射した熱水は、積雪層表面に到達する時点では、約30から25 °まで温度が低下している。実験装置の概略をFig. 2に示す。積雪層の充填密度は、100 cm³金属円筒サンプラーで積雪を採取し、重量を計測して実験ごとに求めた。積雪層の表面には赤色の粉末

染料を散布し、融雪水の浸透挙動を可視化しやすいようにした。積雪層の融解、融雪水の積雪層への浸透する挙動は、水路左岸側の側面からデジタルビデオカメラにて記録した。また、積雪層内の底面から表面にかけての4深度(0 , 4 , 8 , 12 cm)に設置した熱電対とTDRセンサーを用いて、温度変化と見かけの含水率変化を計測した。積雪層の密度は、充填時の閉め固め具合によって調節し、3段階の異なる密度条件とした。また、異なる状態の積雪層が重なった場合を想定して、約半分の層厚に充填した積雪層に水を散布し湿潤な状態としたものを夜間に放置して氷の層を形成させ、その上に雪を充填した状態の積雪層を用いた実験も行った。水路の勾配は、水平(0 °)と20 °の2段階に設定し異なる条件での実験を行った。これは、融雪水が積雪層表面に溜まって表面流が発生した場合の挙動を観察する事を想定したものである。Table 1に、実施した実験についての条件(雪の充填密度、斜面角度、下向きからのスプレーの噴射角度、氷層を形成した場合の水路底面からの氷層の位置)を示す。Table 1に示す通り、実験は10回実施し、雪の充填密度は、およそ100 , 200 , 300 kg/m³の密度小、中、大の3段階に調整した。積雪層に傾斜を設けた実験はCase7から9の3回実施し、積雪層内に氷層を作成した実験は2回実施している。スプレーの噴射角度を変えているのは、積雪層表面に極力均等に熱水が噴射されるように調整したためであり、Case 5以降の噴射角度が最も均等に熱水が噴射されている条件である。ただし、今回実験に用いた熱水噴射装置では、完全に均等に熱水を噴射する事は出来ず、熱水がかかりやすい場所とそうでない場所で偏りができてしまった。

実験期間中の気温と積雪深の変化をFig. 3に示す。気温は常に氷点下で、最低気温は-14.8 °C、平均気温

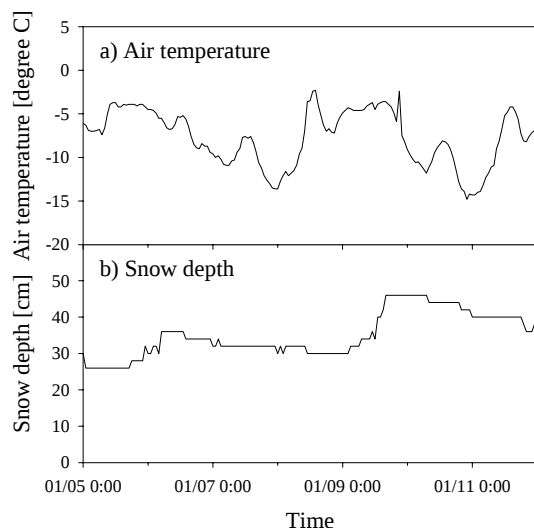


Fig. 3 Changes of air temperature and snow depth during the experiment at the experimental site; Hodaka sedimentation observatory.

は-7.7 °Cであり、積雪が気温上昇によって融解しない条件である。積雪深もほぼ30cm以上を保っており、実験に使用できる新雪が十分に調達できる条件であった。

3. 実験結果

3.1 積雪層の融解、浸透挙動の観察結果

実験水路の側面から観察した融雪と融雪水の浸透挙動を、実験を行った10Caseの内、代表的なCase 5, 6, 7, 8について、Fig. 4から7に示す。Fig. 4に示すCase 5の実験において、熱水散布開始後、1, 2分して表層から融雪水が積雪層内に浸透し始め、約5分後に底面まで到達し始めた事が観察された。その際、融雪水は一般にフィンガリングと呼ばれる不均一な浸透挙動を示した。その後、積雪層の融解が進み、約30分後にはほぼ全層が融解して消失した。その際、積雪層は熱水が直接散布される表層から融解しているように見えた。Fig. 5に示すCase 6の実験においても、Case 5とほぼ同様の結果を示したが、浸透水が水路底面に到達するのに要する時間、積雪層が融解する時間もCase 5よりも早く、浸透や融解挙動が雪の充填密度（Case 5: 373 kg/m^3 , Case 6: 203 kg/m^3 ）に依存している事が分かる。Fig. 6に示すCase 7の実験においては、斜面に傾斜があり底面に到達した浸透水が斜面下方に測方流として流れるため、地下水面が発達しないという違いがあるが、それ以外は雪の充填密度がほぼ同じであるCase 6の場合と同様の挙動を示している。Fig. 7に示すCase 8の実験においては、底面からおよそ半分の高さ（6 cm）に氷層が形成さ

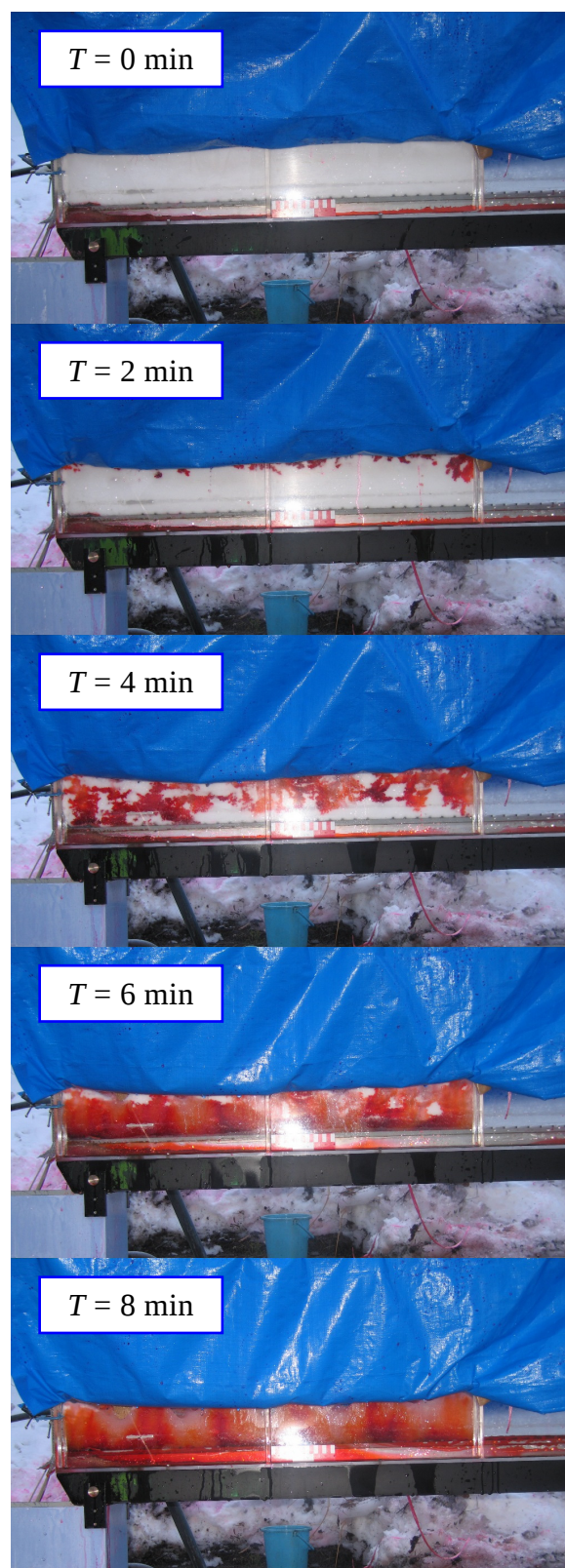


Fig. 4 Observed behavior of snow melting and water infiltration in the case 5

れており、実験開始から約2分後に到達した浸透水が、その位置で一旦ブロックされ、斜面測方に浸透する様子が確認された。ただし、その時間は短く、浸透水は氷層より下まですぐに浸透し底面まで達してい

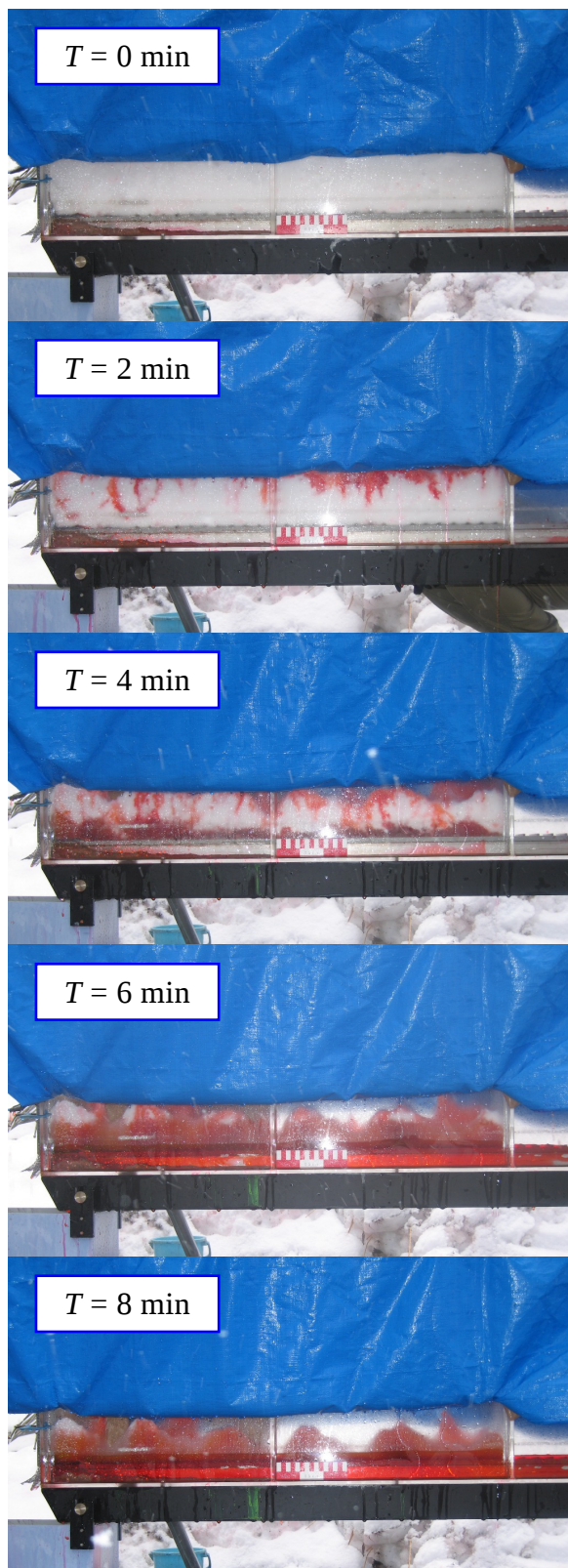


Fig. 5 Observed behavior of snow melting and water infiltration in the case 6

る。

全てのCaseに見られる特徴としては、やはり均一な鉛直浸透とは別に不均質な選択流挙動を示すフィ

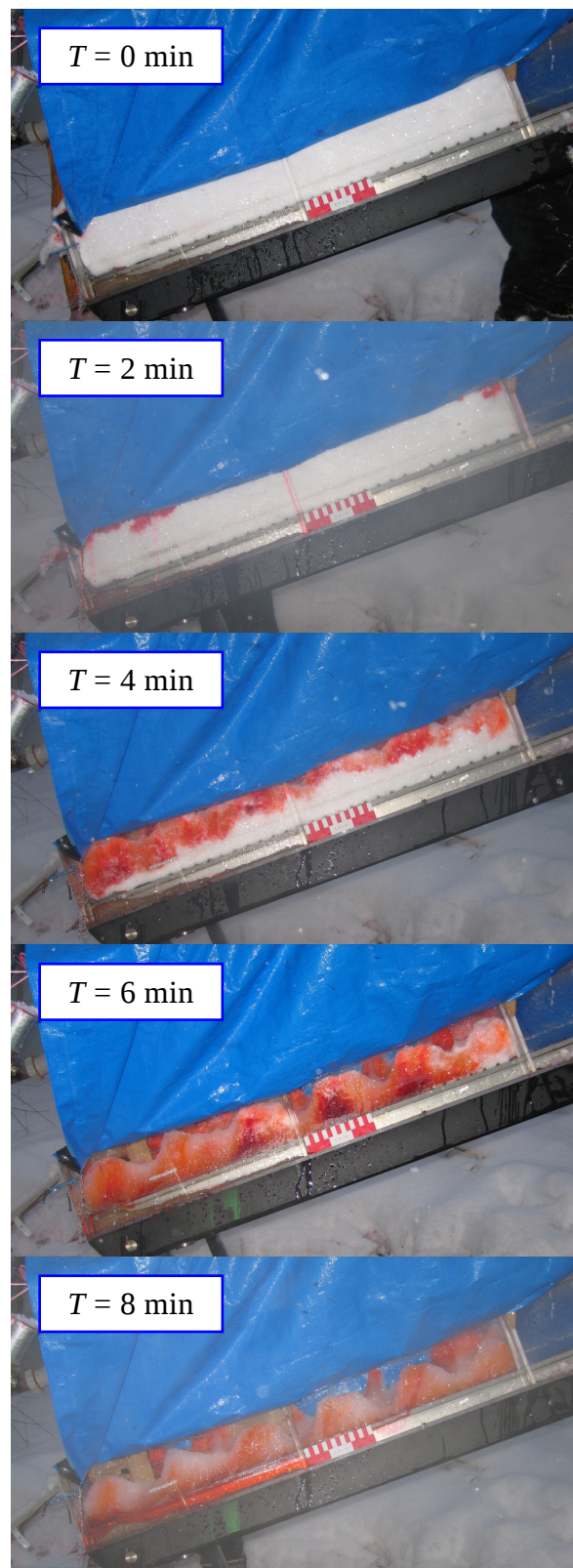


Fig. 6 Observed behavior of snow melting and water infiltration in the case 7

ンガリングと呼ばれる現象によって、速い浸透が底面にいち早く到達し、その後に均一な浸透が全体を流れる様子が見られることである。特に雪の充填密

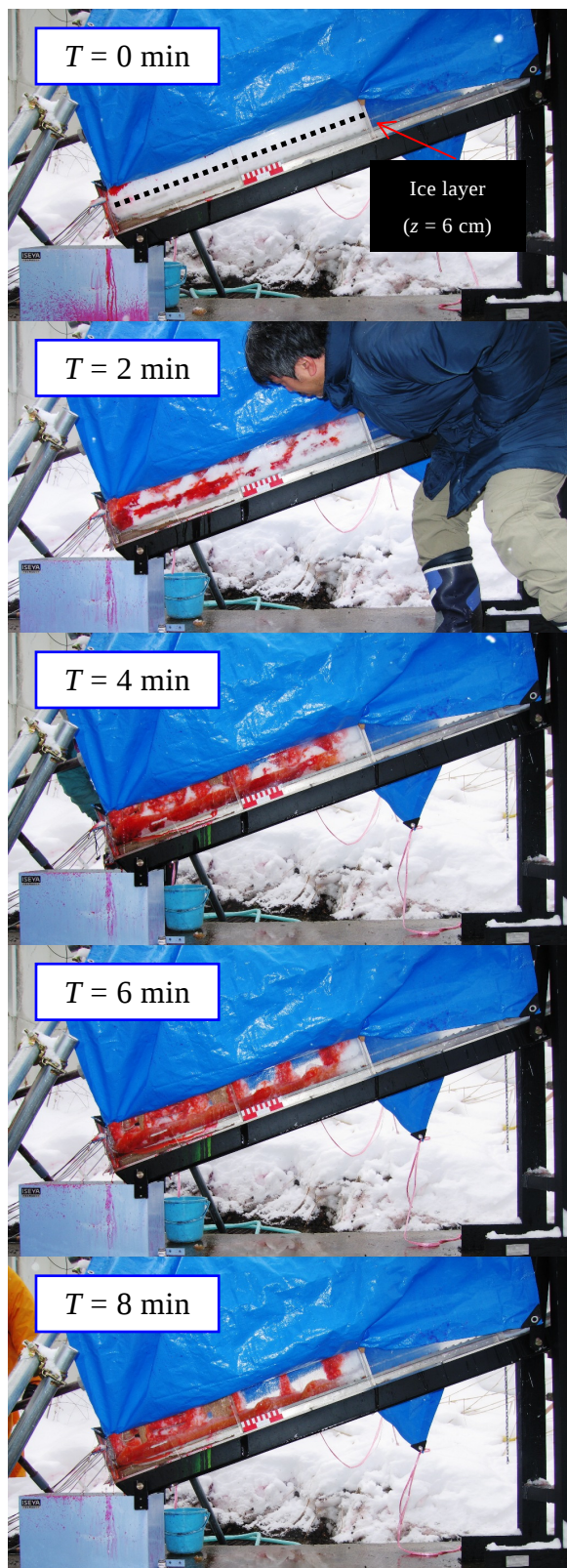


Fig. 7 Observed behavior of snow melting and water infiltration in the case 8

度の小さいCase 6でその傾向が顕著である。また、全てのCaseにおいて、融雪水はそのまま積雪層に浸透し、表面水が積雪層上に形成される事はなく、積雪

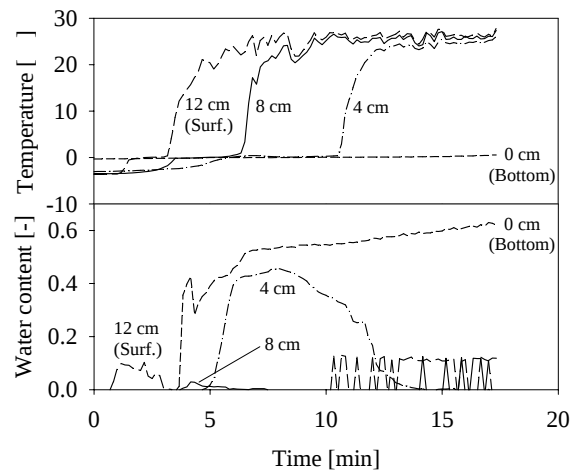


Fig. 8 Observed changes of temperature and apparent liquid water content in snow layer of the Case 5

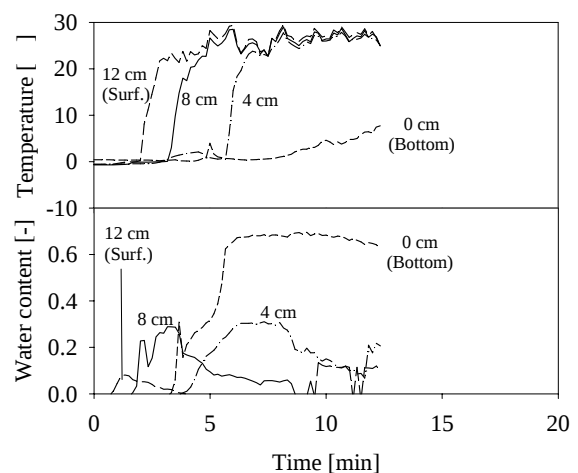


Fig. 9 Observed changes of temperature and apparent liquid water content in snow layer of the Case 6

層の融解する速度よりも積雪層への浸透能が上回っている事が示されている。

3.2 積雪層の温度、見掛けの含水率変化

実験Case 5から8において、計測された温度変化と見かけの含水率変化をFig. 8から11に示す。まず、Fig. 8におけるCase 5の温度変化を見ると、実験開始前から0 であった底面（0 cm）の温度を除き、4、8、12 cmの温度ははじめ氷点下であったが、実験開始後に表層に近いものから順に0 に上昇し、一旦0 で安定した後25 程度まで、やはり表層に近い順に上昇している。これは、表層から順に融雪水が浸透して行き、到達した地点が固液二相状態となりその温度が水の融点の0 に安定、更に表面から積雪層が融解して行き、熱電対が露出して熱水が直接散布されるようになると熱水の温度である25 程度まで上昇し

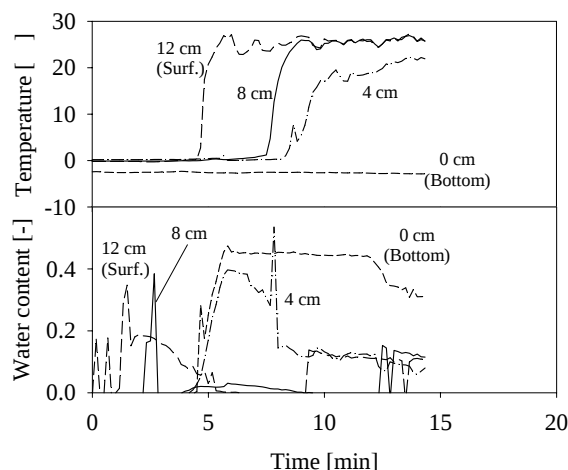


Fig. 10 Observed changes of temperature and apparent liquid water content in snow layer of the Case 7

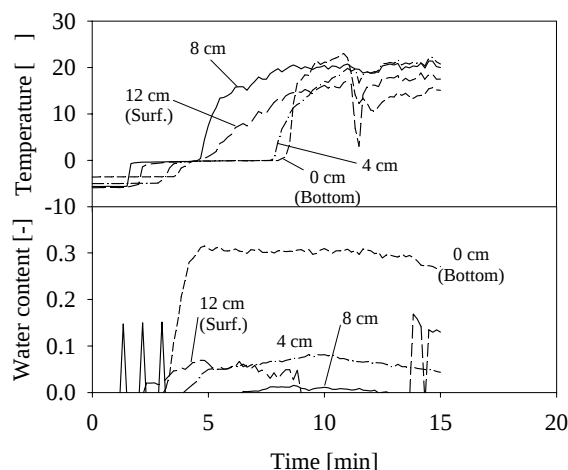


Fig. 11 Observed changes of temperature and apparent liquid water content in snow layer of the Case 8

ている事を示している。一方、TDRによる見かけの含水率の変化について見ると、底面(0 cm)を除き、やはり表面から順に上昇、ピークを経た後、低下している。これも浸透水が到達し含水率が上昇した後、積雪層の融解によってTDRが空气中に露出する事で含水率が低下していることを示している。これらの変化は温度変化や側面からの観察結果とも時間的に一致している。底面(0 cm)での含水率変化は、例外的な挙動を示し、表層(12 cm)での反応に次いで約3分後に上昇し始めている。これは、先に示したフィンガリングによる選択流路を通る浸透が、素早く底面に到達し、横方向に広がった事で底面のTDRが早く反応した事によるものと考えられる。

Fig. 9に示したCase 6の結果は、Case 5とほぼ同様の変化を示している。ただし、浸透、融解過程がCase

5よりも速く進む傾向を示しており、3.1節で示した観察結果とも一致する。これは、雪の充填密度がCase 5に比べ小さい事によるものである。

Fig. 10に示したCase 7の結果において、積雪層底面の温度の挙動が、他のCaseと異なり、氷点下で推移している。この結果は、3.1節で示した観察結果とも整合せず、何らかの原因で正しく底面の温度が測定されていなかったと考える事が妥当である。それ以外は、Case 5, 6とほぼ同等の挙動を示しており、積雪層が水平な状態と傾斜を持つ状態とでは、特に大きな違いは見られない。

Fig. 11に示したCase 8の結果において、温度が0安定から上昇するタイミングを見ると、8, 12 cmの上昇のタイミングと0, 4 cmの上昇のタイミングに開きがあり、6 cmの位置に存在する表層の融解に時間がかかったことが示されている。これは、3.1節で示した結果とも一致している。氷点下から0に上昇するタイミング、見掛けの含水率が反応するタイミングを見ると、8, 12 cmのタイミングと4, 0 cmのタイミングとの間が、Case 5と比べて少し開いているように見えることから、氷層の存在によって浸透がブロックされている事を示していると考えられる。

3.3 積雪層の浸透速度と融雪速度

Fig. 8から11に示した温度と見掛けの含水率変化から、積雪層内の浸透速度と融雪速度を算出する事が出来る。浸透速度は、各深度の温度変化曲線の氷点下から0に上昇する時刻の差で深度差を除いて求める。一方、融雪速度は、同じく各深度の温度変化曲線の0一定から上昇し始める時刻の差で深度差を除いて求める。このようにして求めた平均的な積雪層の浸透速度と融雪速度を縦軸に、雪の充填密度を横軸としてそれらの関係をそれぞれFig. 12, 13に示す。雪の充填密度が大きい場合ほど、浸透速度が小さく、融雪速度も遅い事が示されている。これは、雪の状態によって当然ながら浸透や融解の速さが異なり、現地の積雪条件の違いによって泥流発生のための融雪水の供給プロセスが異なる事を示している。また、浸透能と融雪の速度を比較すると、浸透能が融雪速度のおよそ2倍の大きさを持っており、融雪で発生する水を十分浸透させる能力を積雪層が持っており、積雪層上に表面水が発生しない事を示している。

4. 考察

実験の結果より、ここで採用した実験条件の下では、融雪速度と浸透速度の関係から、積雪層状には表面水が出現せず、全て積雪層を浸透して底面に地

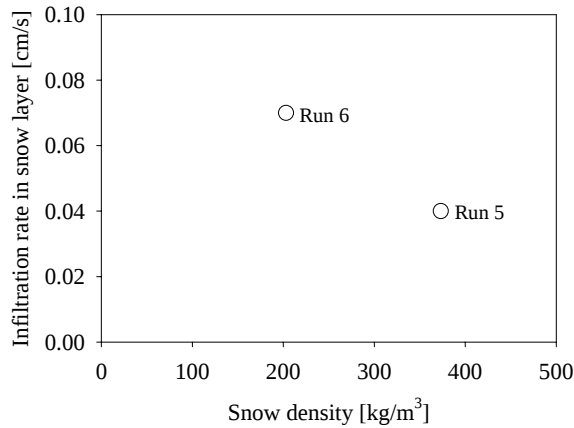


Fig. 12 Relationship between snow density and water infiltration rate in snow layer

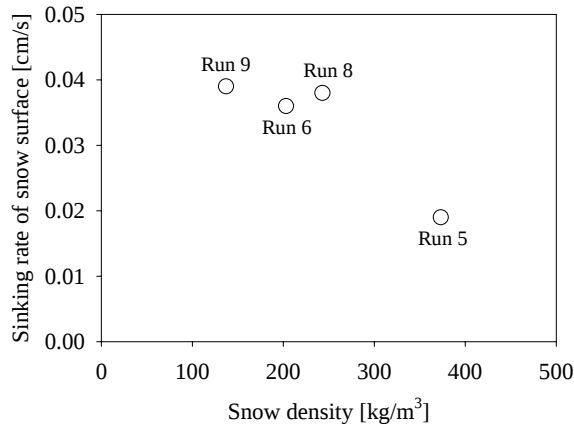


Fig. 13 Relationship between snow density and sinking rate of snow layer

下水面を形成する事が示された。この事実から、泥流発生につながる積雪層やその下の土層の不安定化について以下に考察する。

積雪層の融解速度を r_s [m/s]とすると、融雪による水の生成速度 q_w [m/s]は

$$q_w = \frac{\rho_s}{\rho_w} r_s \quad (1)$$

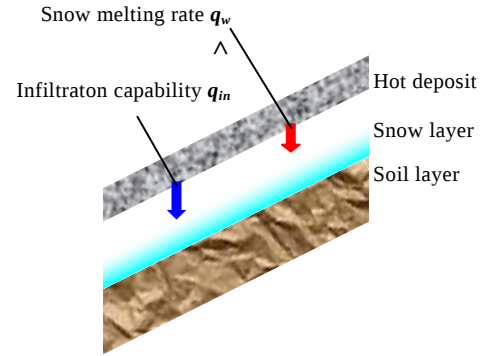
ここで、 ρ_s, ρ_w [kg/m³]はそれぞれ雪の充填密度と水の密度である。積雪層内の浸透速度を r_{in} [m/s]とし、フィンガリングによる速い浸透を無視した場合、多孔質媒体としての積雪層の表面における浸透能 q_{in} [m/s]は、飽和浸透を仮定して、

$$q_{in} = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_i}\right) r_{in} \quad (2)$$

と表される。

ρ_w と ρ_i をそれぞれ1000 kg/m³, 917 kg/m³とすると、Case 5では、 $q_w = 7.5 \times 10^{-5}$ m/s, $q_{in} = 2.4 \times 10^{-4}$ m/s,

a) Under the condition which $q_{in} > q_w$, water table develops at the bottom of snow layer or soil layer.



b) Under the condition which $q_{in} < q_w$, water table develops at the top of snow layer.

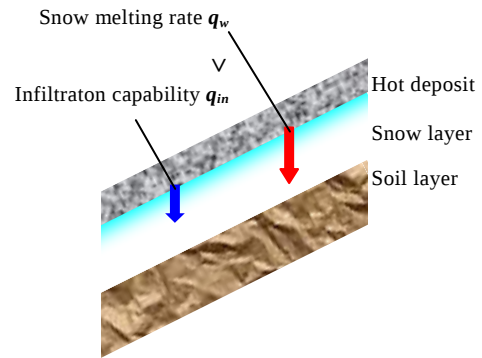


Fig. 14 Possible scenario of water table development and instability of the slope

Case 6では、 $q_w = 7.1 \times 10^{-5}$ m/s, $q_{in} = 5.5 \times 10^{-4}$ m/sとなり、どちらのCaseでも $q_w < q_{in}$ となり、融解により生成した水を積雪層表面から十分に吸収する事が出来る。本来なら、供給熱水の流量も q_w に加えて q_{in} と比較する必要があるが、その場合でも q_{in} が上回っている事が実験の観察結果から明らかである。ここで、Case 5と6では、積雪層の充填密度が異なるにも関わらず、水の生成速度 q_w がほぼ同じ値になっているが、これは、積雪を融解するための熱量供給が、熱水供給速度に依存するためであり、供給熱量が同じであれば、雪の充填密度に関わらず、同じ速さで水が生成されることを表している。また、 q_{in} が雪の充填密度に依存している事も明らかである。

本研究で行った実験の熱量供給条件であれば、積雪層の融解、浸透挙動は、Fig. 14aのようになり、積雪層を浸透した融雪水は積雪層底面もしくは、その下の土層に滞留し地下水位を形成すると考えられる。そのため、積雪層と土層境界付近が不安定化し、その境界を滑り面として流動化が発生するものと考えられる事ができる。逆に、本実験のように供給熱源が熱水ではなく、実際の火山噴出物のように高温物質で

ある場合は、はるかに熱供給速度が大きく、積雪層の融解、浸透挙動は、Fig. 14bのようになると考えられ、積雪層の浸透能を超えた融雪水が積雪層と堆積物層との間に滞留、飽和水帯が形成され、その位置が不安定化して流動化すると考えられる。

自然状態の積雪層には、いくつかの異なる密度や空隙を持った層が重なっていると考えられ、場合によっては、浸透能の非常に小さい氷の層が発達している事も十分考えられる。その様な場合は、浸透した融雪水が氷層上に滞留し飽和水帯を形成して、そこを滑り面として不安定化、泥流化することも考えられる。

上記の考察では、実験において見られたフィンガリングによる早い浸透を考えていない事や、温泉水供給自体による水供給を無視している事から、実際の水収支を正確に表現し出来ているとはいえない。しかし、このような検討手法によって、熱供給条件を仮定し、積雪層の浸透能を考えれば、どのような位置に飽和水帯が形成されるかを予測する事ができ、泥流発生機構を予測する事が可能である。

5. おわりに

本研究で実施した基礎的な実験によって、積雪層の融解とその後の融雪水の積雪層への浸透挙動について観察し、フィンガリングを伴った浸透挙動や積雪層表面からの融解過程が明らかとなった。さらに、積雪層の密度等の条件によっては、異なる浸透速度、融解速度を呈する事も示され、更には氷の層の存在によって浸透が遮られる様子も明らかとなった。現場の実際の積雪層の条件や熱供給源の状態によって

は、実験と異なる複雑な挙動を示す事も考えられるため、更なる検討が必要である。融雪型火山泥流の発生機構解明のため、今後は、高温物質から積雪層への熱伝導と融解の混合プロセスや、積雪層内の浸透プロセスを、実験手法や数値シミュレーションを用いて詳細に検討する計画である。

謝 辞

本研究の実験を遂行するにあたり、京都大学大学院農学研究科の水山高久教授に実験水路をお借りした。また、熱水として高山市奥飛騨温泉郷中尾地区の温泉水を提供して頂いた。さらに、熱水噴射装置の作成に当たっては、同地区の内野政光氏にご協力頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 安養寺信夫，嶋大尚（2003）：融雪型火山泥流の融雪水の発生条件とピーク流量について，平成15年砂防学会研究発表概要集，pp. 234-235
- 宮本邦明，鈴木宏，山下伸太郎，水山高久（1989）：十勝岳大正15年(1926年)泥流の再現計算，水工学論文集，第33巻，pp. 361-366
- 吉川直良，山田孝，丸谷知己（2010）：融雪型火山泥流の発生プロセスにおける熱水関与に関する実験的研究，平成22年砂防学会研究発表会概要集，pp.476-477

Fundamental Investigation on Mud Flow Occurrence due to Snow Melt Triggered by Volcanic Eruption

Daizo TSUTSUMI, Masaharu FUJITA, Syusuke MIYATA, Masao SHIDA and Kai NAGANO*

* Graduate School of Engineering, University of Tokyo

Synopsis

On hillsides of a volcanic mountain, mud flows sometimes occur due to snow melting by volcanic eruption, and cause severe damage to the down stream areas. Triggering mechanism of this type of mud flow is not revealed yet. In the present study, a fundamental experiment is conducted to understand the processes of snow melting and water infiltration to the snow layer using experimental flume and hot water splaying equipment. As the result of the experiment, it is revealed that 1) the snow layer melts from the surface, 2) the water infiltrates to the bottom of snow layer, 3) fingering infiltration behavior is a dominant water infiltration

in snow layer at an early stage, and 4) infiltration rate of water in snow layer is larger than snow melting rate, therefore saturated water table doesn't develop on the snow surface.

Keywords: volcanic mudflow due to snow melt ,volcanic eruption ,infiltration rate ,snow melting rate ,thermo couple , TDR