

# 河川砂防技術研究開発 【成果概要】

		氏名 (ふりがな)	所属		役職
①研究代表者		堤大三 (つつみ だいぞう)	京都大学 防災研究所		准教授
②研究テーマ	名称	岳における融雪型火山泥流の危険度評価法の確立			
	政策領域	[分野] 地域課題分野 (砂防) [公募課題]	融合技術	(リモートセンシング、非破壊検査、認知行動学 等)	
③研究経費 (単位: 万円)		平成26年度	平成27年度	平成28年度	総合計
※端数切り捨て。		188	174	134	496
④研究者氏名					
氏名		所属・役職 (※平成 年3月31日現在)			
藤田正治		京都大学防災研究所・教授			
宮田秀介		京都大学防災研究所・助教			
⑤研究の目的・目標					
<p>融雪による泥流発生機構の実態に則した泥流挙動をシミュレートすることで、より高精度な泥流到達危険度評価を実施し、工学的な根拠に基づいたハザードマップ作成のための情報を提案、土砂災害の軽減に貢献することを目的とする。</p> <p>熱土砂供給による融雪・浸透に関する鉛直一次元実験を実施することで、融雪・積雪層内の浸透を経て地盤に到達する融雪水量を把握することができる。また、実験結果をもとに、既に基本形を構築した融雪・浸透・流出に関する数値シミュレーションモデルの検証を実施することができる。泥流発生機構として、積雪層・土層の崩壊の可能性について検討するため、積雪層のせん断強度について、文献調査・現地試験を行い、崩壊発生の可能性について検討する。次に、鉛直一次元融雪水流出量モデルを基に三次元数値シミュレーションモデルを構築し、侵食や崩壊が泥流起源となる土砂流出モデルを構築する。このモデルを用い、焼岳における積雪新分布、噴火時の火山噴出物堆積分布等の条件を与え、泥流の発生・流下についてのシミュレーションを実施する。最終的に、積雪や噴出物の条件によって泥流挙動がどのように変化するかを検討し、時間情報も含んだハザードマップ作成に資する情報を提供する。</p>					

## ⑥研究成果

焼岳における積雪深分布, 噴火時の火山噴出物堆積分布等の条件によって泥流挙動がどのように変化するかを検討するために, 堤ら<sup>1)</sup>の融雪実験をもとに融雪・不飽和浸透過程を考察し, 不飽和浸透速度の時間変化を考慮したモデル<sup>2)</sup> (以降, 「修正モデル」とする) を実験により検証し, 足洗谷流域に修正モデルを組み込んだ融雪型火山泥流モデルを適用した。

### 1) 融雪実験による修正モデルの検証

堤らの実験<sup>1)</sup>では浸透水による飽和帯形成が始まってから飽和帯上昇が完了するまで変化が急速であり, 飽和帯の挙動についての修正モデルの検証がやや困難であった。そこで, 積雪層厚を大きくすることで飽和帯上昇時間を長くとり融雪実験を行い, より長時間での飽和帯の挙動について検討し, 修正モデルの妥当性を検討した。

堤ら<sup>1)</sup>の実験と同様に, 内径9.5cm耐熱ガラスカラムに雪を充填し積雪層を形成した。このとき, カラムの下端は木板に固定し隙間を浸透水が漏出しないようにした。この積雪層に熱した砂礫を供給し, 不飽和浸透過程と飽和帯の上昇をビデオカメラにより記録した(写真-1)。積雪層の表面に赤の染料(エオシン)を薄く散布し, 不飽和・飽和浸透水の挙動を可視化した。実験中のカラムの重量変化を計測することで, 蒸発により失われる水量を求めた。砂礫は, 七輪と煙突を組み合わせた装置により加熱した(写真-2)。熱電対により砂礫温度を計測し, 供給砂礫の温度とした。

実験条件を表-1に示す。飽和帯上昇時間を長くするためにRun 1, Run 2とも積雪層厚は60cmとした。実験時には降雪直後の雪を採取できなかったため, 積層密度は約400 kg/m<sup>3</sup>としまり雪の積雪密度(530 kg/m<sup>3</sup>)に近い値となった。Run 1では融雪速度を遅くし, 現象をよく観察できるように砂礫温度を320°とした。一方, Run 2は630°の砂礫を実験に供した。実験に使用した砂礫は焼岳北西山麓の足洗谷流域の火砕流堆積物を採取し, 平均粒径34mmであった(写真-3)。

Run 1, Run 2について, 修正モデルによる再現計算を実施した。融雪および融雪水の不飽和・飽和浸透シミュレーションに用いた諸定数は表-2の通りである。砂礫層および積雪層の空隙率, 蒸発率は各実験で得られた値を用いた。

Run 1の融雪, 浸透過程の様子を図-1に示す。融雪の初期には赤で示された融雪水の不飽和浸透が確認された(図-1中)。その後, 不飽和浸透水がカラム底面に到達すると飽和帯を形成した(図-1右)。両実験とも積雪層が全てとけず, 飽和帯の挙動をよく観察するこ



写真-1 融雪実験の様子



写真-2 砂礫加熱装置

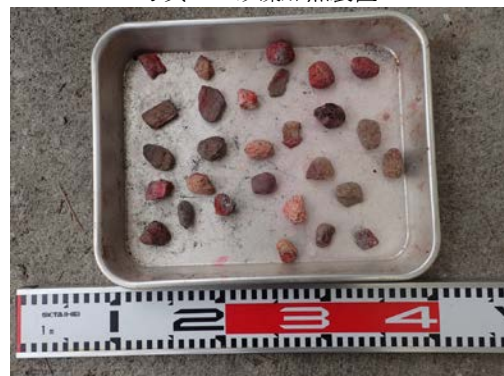


写真-3 実験に用いた礫

## ⑥研究成果 (つづき)

表-1 融雪実験の諸条件

	Run 1	Run 2
砂礫温度 [°C]	320	630
砂礫平均粒径 [mm]	34	34
積雪層厚 [m]	0.6	0.6
積雪密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	410	380

表-2 再現計算に用いた定数

	Run 1	Case2
砂礫の熱伝導率 [W/m/K]	3.3	3.3
砂礫空隙率	0.48	0.40
積雪空隙率	0.60	0.62
砂礫の比熱 [J/kg/K]	2330	2330
蒸発率	0.125	0.260

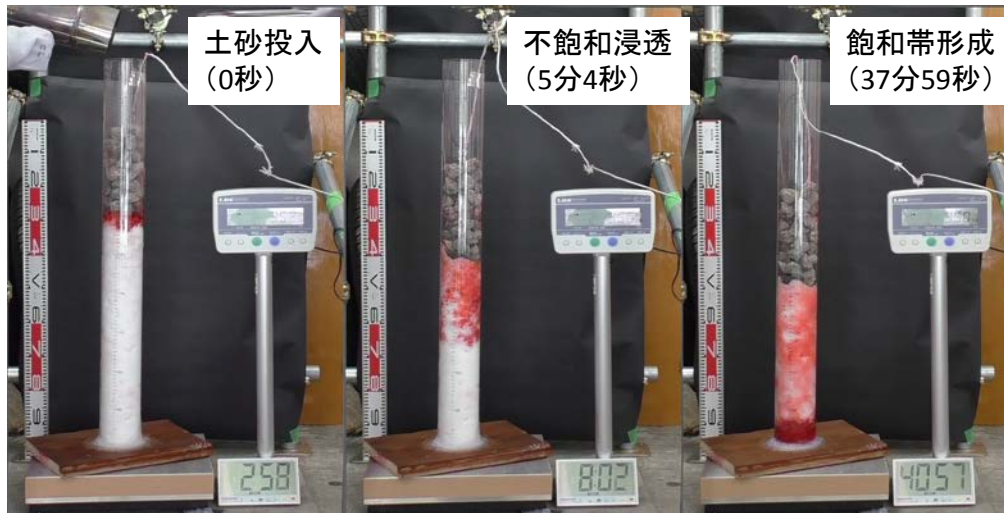


図-1 Run 1の様子

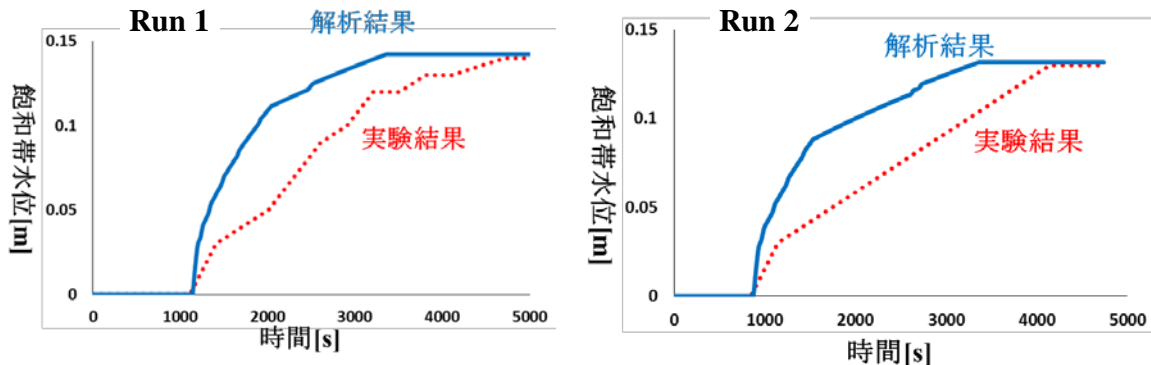


図-2 融雪実験における飽和帯水位の実験結果と解析結果

とができた。飽和帯水位の実験結果およびシミュレーション解析結果を図-2に示す。Run 1, Run 2とも解析結果の方がやや早く水位上昇したが、最終的な飽和帯水位は精度良く再現できた。水位上昇が実験よりも早く解析された理由は、融雪速度解析値が過大評価であったためと考えられる。実際の実験では、砂礫層がカラムの拘束を受け、融雪による積雪面の低下に追随せず空間が生じることがあった。そのため、実験では一部、砂礫層と積雪層の熱交換がスムーズにいかず、融雪速度の実験値と解析値が乖離したと考えられる。この点は、内径の大きいカラムを使用すれば解消すると期待される。このような解析結果による融雪速度の過大評価はあったものの、全体としては修正モデルにより融雪・浸透過程を良好に再現することができた。

### 2) 諸条件による泥流挙動の検討

前年度に提案した融雪型火山泥流モデル<sup>2)</sup>の融雪・不飽和鉛直浸透に修正モデルを組み込み、様々な積雪条件や噴火噴出物の条件での泥流の挙動を検討した。焼岳(2,455m)の泥流発生が危惧される、神通川水系蒲田川流域を計算領域とした。計算領域を、融雪型火山泥流の発生・発達域である上流域(斜面領域)と流下氾濫域である下流側(河道領域)に分割した。分割の境界

## ⑥研究成果 (つづき)

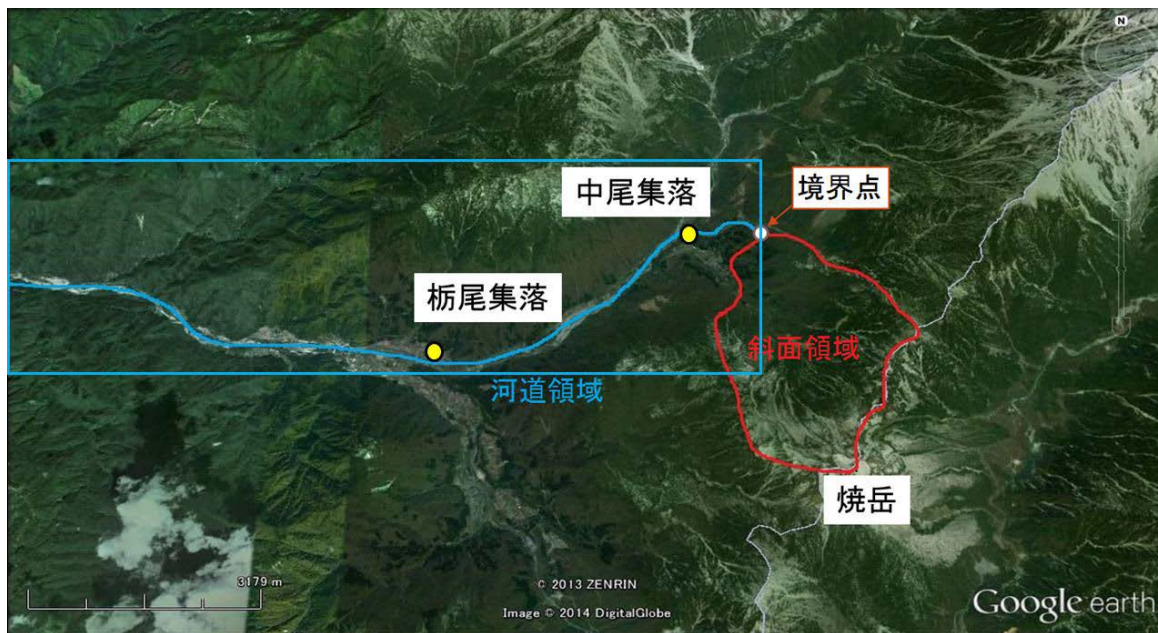


図-3 融雪型火山泥流モデルの計算対象領域

表-3 計算条件

	Case 0	Case 1-1	Case 1-2	Case 1-3	Case 1-4	Case 2-1	Case 2-2
積雪深 [m]	1.0	1.5	2	2.5	3	1.0	1.0
積雪密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	270	270	270	270	270	150	210
火砕流温度 [degreeC]	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
	Case 0	Case 2-3	Case 2-4	Case 3-1	Case 3-2	Case 3-3	
積雪深 [m]	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
積雪密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	270	330	390	270	270	270	
火砕流温度 [degreeC]	1000	1000	1000	300	600	1500	

点は、宮本ら<sup>3)</sup>を参考に決定した(図-3)。なお、斜面領域は焼岳北西山麓の足洗谷流域である。対象領域には居住区である中尾集落や栃尾集落がある(図-3)。斜面領域では斜面上の融雪・浸透過程および泥流の発達過程を計算し、河道領域は宮本らのモデル<sup>3)</sup>を用い、2次元浅水流方程式と流砂の連続式で泥流の流下氾濫を解析した。ここでは、基準の条件に対して、積雪層厚、積雪密度、火山噴出物の温度を変化させて、それぞれの影響を検討した。基準の条件は、焼岳火山噴火緊急減災対策砂防計画<sup>4)</sup>を参考に決定した。計算条件を表-3に示す。

### ①積層厚の影響

図-4に積雪深を変化させたとき(Case 1-1~1-4)の斜面領域からの発生泥流量(以下、発生泥流量とする)と栃尾集落での水位の変化を示す。ここで、水位は水深と地盤変動量を足し合わせたものである(図-5)。基準としたCase 0では、火山噴出物堆積の約20分後に斜面領域で発生した泥流がピークとなった。これに対し、積雪層が厚いほど、発生泥流のピーク流量は大きかったが、発生タイミングは遅くなった。積雪深が1.0m(Case 0)と1.5m(Case 1-1)では2回にピークが分かれた。1回目のピークは積雪層が完全に飽和したことで発生した表面流(積雪面上の表面流)で主に構成され、2回目のピークは全ての積雪層が融けたことによる表面流(地盤上の表面流)で主に構成されると考えられる。積雪深2.0m以上の条件では、積雪層がすべて融けるまで時間がかかり、2回目のピークが現れなかった。Case 1-4(積雪深3.0m)において泥流ピーク流量が約6000 m<sup>3</sup>/sと非常に大きくなったのは、多量の融雪水により斜面崩壊が多地点で発生したためであった。

栃尾集落での氾濫水位(=水深+地盤変動量)最大値は、基準であるCase 0の2.0mに対し、Case 1-1, -2, -3, -4ではそれぞれ1.7, 6.2, 4.8, 6.1mとなった。河川領域の入力ハイドログラフ(=発生泥流)ピーク量が大きいほど、栃尾での水深が高くなったが、同時に侵食が卓越する

## ⑥研究成果 (つづき)

ため、氾濫水位最大値は単純な傾向とならなかった。いずれにせよ、栃尾集落では大きな被害が想定され、泥流の到達は最も早く火山噴出物堆積から40分後 (Case 0)、遅くとも60分後 (Case 1-4) であった。

### ②積雪密度の影響

積雪密度を変化させると (Case 2-1~2-4)、発生泥流のピークのタイミングはやや変化するものの、ピーク流量の変化は大きくなく、800~1600 m<sup>3</sup>/s の範囲であった。栃尾集落への泥流到達は、いずれの Case でも約 40 分であった (図-6)。Case 2-1, 2-3 では堆積のタイミングと水深ピークが重なったため、氾濫水位最大値がそれぞれ 4.0, 4.5 m と Case 0 に比べて 2 m 以上高くなった。

### ③火山噴出物の温度の影響

火山噴出物の温度が 300°C の Case 3-1 では融雪が十分に進まず、発生泥流量はほぼ 0 であった。600°C の Case 3-2 でも発生泥流量のピークは 210 m<sup>3</sup>/s と 1000°C の Case 0 (800 m<sup>3</sup>/s) に比べ、約 1/4 となった。1500°C の Case 3-3 では、火山噴出物堆積直後から泥流が発生し、ピークは約 1100 m<sup>3</sup>/s であった。

図-7 に栃尾での氾濫水位変動を示す。Case 3-1 は発生泥流がほぼ 0 であり、栃尾への泥流の到達はなかった。Case 3-2 では、火山噴出物堆積 85 分後に泥流が到達し、最大水深が 1.1 m に対し、侵食が約 1 m であり、氾濫水位は約 0 m となった。Case 3-3 では、火山噴出物堆積 30 分後に泥流が到達し、最大氾濫水位は 3.4 m であった。

### ④栃尾での泥流挙動

栃尾集落は、河道領域の入力地点から直線距離で約 5 km であるが、火山噴出物の温度が低い Case 3-1 を除き、いずれの条件でも泥流が到達した。泥流の到達は噴出物堆積から 30~60 分後であった。泥流が到達すると堆積もしくは侵食を引き起こしており、いずれにしても被害が発生する。本研究で提案する融雪型泥流モデルは、泥流の発生から流下氾濫までシミュレーションを行うことができるので、従来のハザードマップには入っていない時間の情報について付加できると期待される。

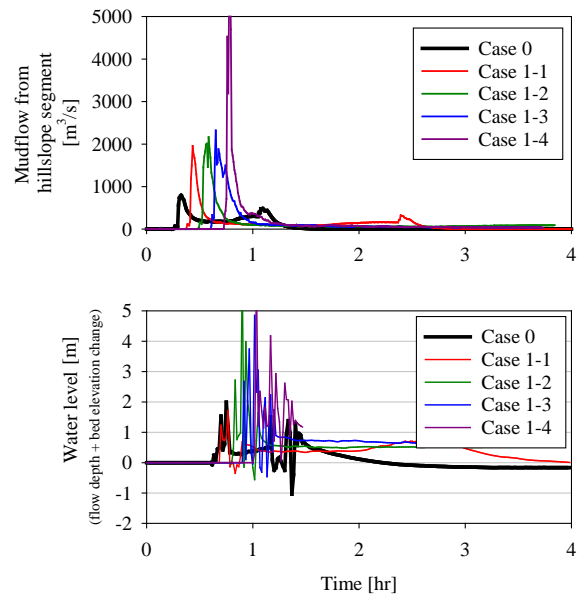


図-4 積雪深を変えた条件での (上) 発生泥流ハイドログラフ, (下) 栃尾での氾濫水位の変動

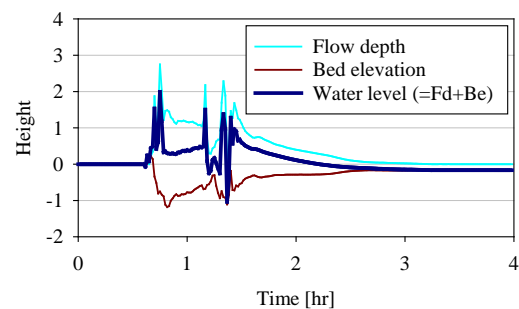


図-5 Case 0 における栃尾での水深, 地盤高さ

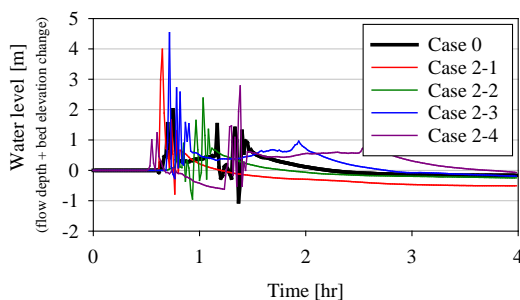


図-6 積雪密度を変えた条件での栃尾の氾濫水位の変動

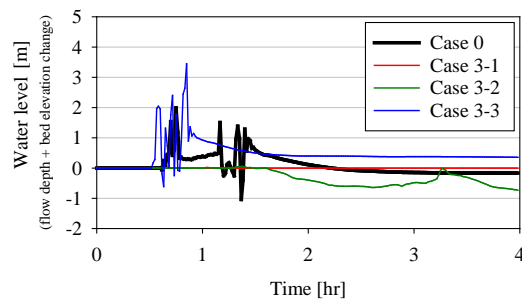


図-7 火山噴出物の温度を変えた条件での栃尾の氾濫水位の変動

## ⑦研究成果の発表状況

・国際会議、学会等における発表状況

Daizo Tsutsumi, Keiki Murashige, Masaharu Fujita, and Shusuke Miyata: Experimental study on the triggering mechanism of snowmelt type mudflow, 5<sup>th</sup> International Workshop for Multimodal Sediment Disasters, 4-6, October 2014

・これまでに発表した代表的な論文

村重慧輝, 堤大三, 宮田秀介, 藤田正治, 他火山泥流発生機構解明のための高温砂礫による融雪に関する実験的研究, 砂防学会誌, 67(6), pp. 3-10, 2015

・技術研究開発成果による受賞、表彰等)

砂防学会論文奨励賞

## ⑧研究成果の社会への情報発信

融雪型火山泥流の再現実験 (テレビ朝日取材, 2014年12月26日 16:50- 「スーパーJチャンネル」)

### ⑨表彰、受領歴

砂防学会論文奨励賞

### ⑩研究の今後の課題・展望等

本研究で得られた成果は、焼岳火山に限定されるものではなく、日本の積雪地帯にある火山の融雪型泥流による土砂災害の軽減に資するものであり、今後この成果を活用して行くことが課題であり、成果の有益な活用方法であると展望する。

### ⑪研究成果の河川砂防行政への反映

本研究で得られた成果によって、火山噴火の規模や噴出物の堆積状態、積雪層の状態の違い等を考慮した泥流の流下挙動を推定することが可能になると考えられ、焼岳火山のハザードマップの高精度化が可能になると期待される。