

## 2.2 火山噴火に起因した土砂災害に対する緊急減災対策に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：土砂管理研究グループ（火山・土石流チーム）

研究担当者：石塚忠範、藤村直樹、清水武志、泉山寛明

### 【要旨】

平成 26 年度は、インドネシアのクルー火山 2014 年噴火による火砕流・土石流の実態調査、桜島における土石流観測と斜面侵食観測、1990 年代の雲仙普賢岳の火砕流や土石流発生状況のアーカイブ写真からの地形の復元、融雪火山泥流の規模に影響する融雪の挙動の基礎的な理論解析や観測、施設配置計画の検討に資する構造物の効果評価を行なうための 3 次元有限要素法による予備的考察を行なった。

キーワード: クルー火山 2014 噴火、桜島、土石流観測、斜面侵食観測、雲仙普賢岳、Structure from Motion (SfM)、融雪観測、有限要素法解析

### 1. はじめに

本研究課題では、火山噴火後の土石流、火砕流および融雪型火山泥流に対する被害範囲の推定手法の向上などが研究目的である。平成 26 年度は、噴火後の火砕流や土石流の実態調査としてインドネシアのクルー火山 2014 年噴火後に調査を実施した。火砕流堆積物の堆積状況や降灰と降雨・土石流発生の有無について定性的な知見と整理した。降灰後の降雨による土石流発生についてレーザ距離計を用いた流速算出の試みや、表面流観測結果を整理した。火砕流に対しては、発生頻度が必ずしも多くないことから 1990 年代の雲仙普賢岳当時の空中写真に最新の写真結合による地形生成技術である SfM を用いて土石流や火砕流発生後の地形復元を試みた。融雪泥流に対しては融雪の仕方が水の供給に大きく影響することから融雪速度と融解した水の浸透速度との関係を、理論的・観測的アプローチから考察した。最後に、施設配置計画の検討に資する構造物対策の効果評価手法の向上を目的として、次年度以降の予備検討として、砂防堰堤のコンクリートと地盤を単純なモデルでモデリングし、土石流を定常の流体力として作用させたときの応答を三次元有限要素法を用いて調査した。

## 2. クルー火山 2014 噴火における現地調査

### 2.1 はじめに

2014 年 2 月 13 日、インドネシア共和国ジャワ島東部にあるクルー火山が噴火し、その後、火山周辺の河川において土石流の発生が確認された。インドネシア国家防災庁によれば、クルー火山の最初の噴火は 2 月 13 日

の 22 時 50 分頃で、7 人が死亡し、87,629 人が避難した。この噴火によりコント川 (K.Konto) などでは土石流が発生し、バダック川 (K.Badak) に火砕流の大部分が流下した。

当チームでは、噴火によって生産された土砂による災害の知見を得る目的で、火砕流の堆積状況<sup>1)</sup>や土石流発生状況<sup>2)</sup>について、2014 年 9 月 7 日～13 日にかけて調査を行った。河川名などは後掲の図-2 を参照されたい。

### 2.2 火砕流堆積物調査

2014 年 9 月 12 にクルー火山山頂部からその下流および 5 km の地点にかけて火砕流堆積物の状況を調査した。火口からの距離に応じて特徴が異なっており、以降で各区間の状況を示す。

#### 2.2.1 火口外輪山～火口より 1km 下流区間

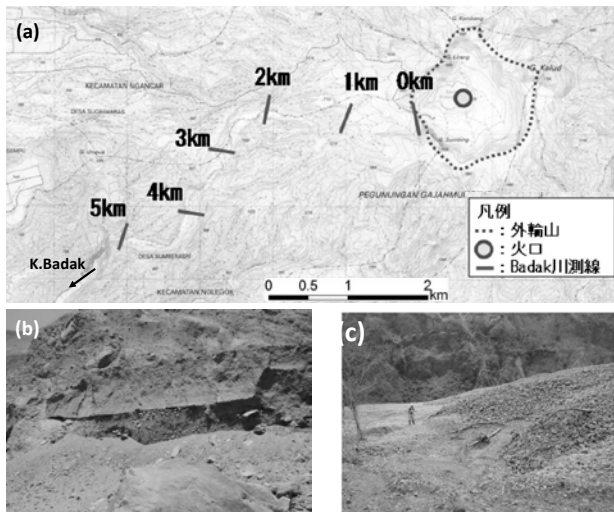
厚く堆積した降下火砕堆積物の上をガリが幅、深さともに 1～2 m 程度で放射状に複数発生した。これらは下流に下るにつれ、幅、深さともに拡大し、最終的に一つの谷へと集約された。流水は確認されなかった。

#### 2.2.2 火口より 1km～2km 下流区間

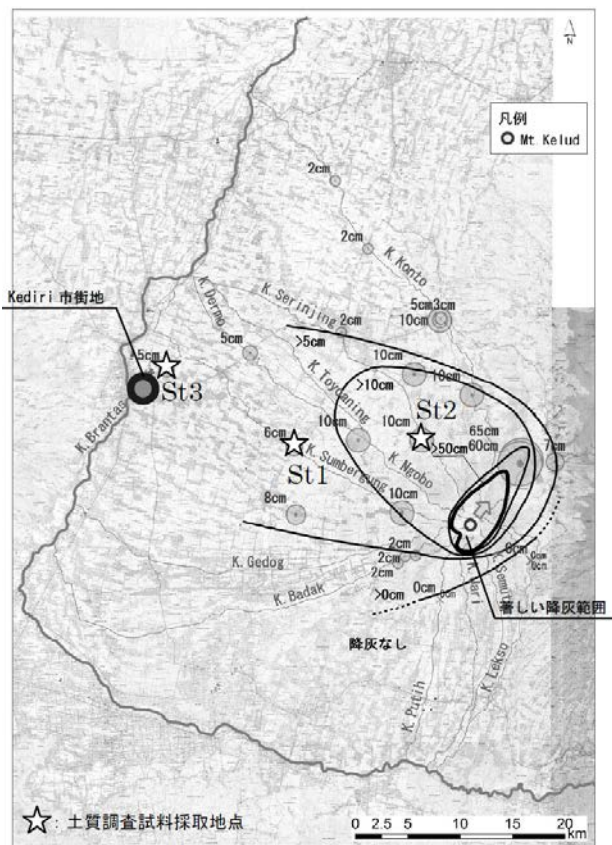
深く侵食された谷地形であった。侵食された堆積物の断面の観察から複数回の噴火により、複数の層が形成されたものと推定される (図-1b)。この区間では河床に流水が生じていた。

#### 2.2.3 火口より 2km～3km 下流区間

河幅が 10 m から 150 m 程度まで急拡大し、上流で侵食されたものを含む数 cm オーダの粒径の多量の砂礫が河幅一面に堆積した。河幅が拡大した地点の上流で流水は河床に伏流した。



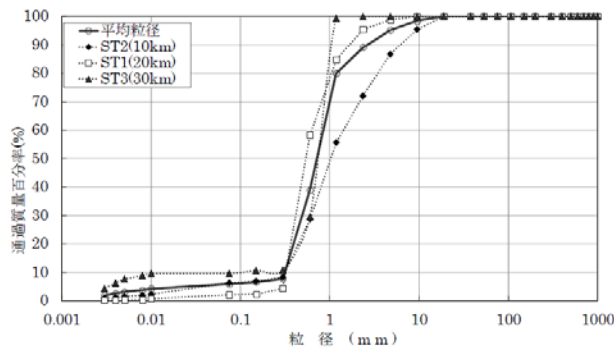
図一 バダック川を流下した火砕流調査



図二 降灰の推定等層厚線分布

2.2.4 火口より3km~4km 下流区間

火口外輪山から約2.6 km の地点から下流では、10~20 cm の礫で構成される6段にわたる火砕流ローブが確認された(図一c)。火砕流堆積物の厚みは不明であるものの、数回に分けて流下・堆積を繰り返したものと考えられる。火砕流ローブはローブ末端部河床勾配で1/4(約15°)、ローブ上部河床勾配で1/30(約2°)で、



図三 土質調査結果(採取位置は図一2)

表一 透水係数試験結果

調査地点	透水係数	河口からの距離
St2	0.027 cm/s	10 km
St1	0.031 cm/s	20 km
St3	0.025 cm/s	30 km

全てほぼ同一形状であった。流水は確認されなかった。

2.2.5 火口より4 km~5 km 下流区間

河幅が狭くなり始め、火口から約5 km 地点で溪床は河幅20 m 程度となり、ここで火砕流はほぼ停止したと推定された。再び流水が地表に生じ始めた。

2.3 降灰調査と土石流発生状況と土質試験

火山周辺の住民および河川の土砂採石作業員へのヒアリングを24地点で実施するとともに、噴火前後のGoogle Earthの衛星画像を用いて、等層厚線図を作成した(図二)。衛星画像で著しく降灰した範囲の堆積層厚は、面積と層厚の関係式から少なくとも1.2 m と推定した。土石流が発生した河川では河床勾配10°以上の範囲に著しい降灰が確認された。

2.4 降灰の土質試験

図二の☆印で示した火口から10 km 毎に3地点の火山灰に対して粒度分布試験と透水試験を実施した。粒度分布は砂分が卓越し(図三)、透水係数(表一)もそれに見合う数値を得た。

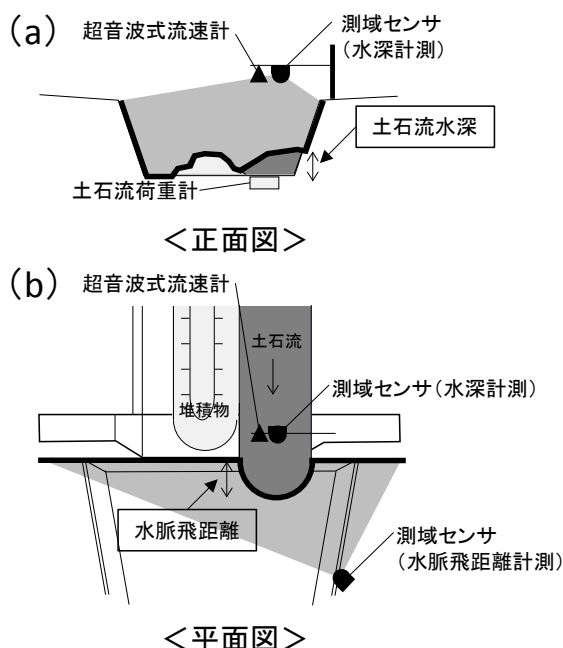
3. 桜島における観測

3.1 土石流観測

3.1.1 背景

桜島では活発な火山活動により斜面に火山灰等の火山堆積物が大量に供給され、降雨時にはしばしば土石流となり流出する。桜島南岳南東部に位置する有村川(流域面積1.38 km<sup>2</sup>)において平成24年度より国土交通省大隅河川国道事務所と共同で土石流の流下実態把握と氾濫被害想定のため観測を実施している(例えば<sup>3)</sup>

).



凡例 ■ レーザ光の通過域 — 計測ライン

図-4 土石流水深と水脈飛距離の計測方法

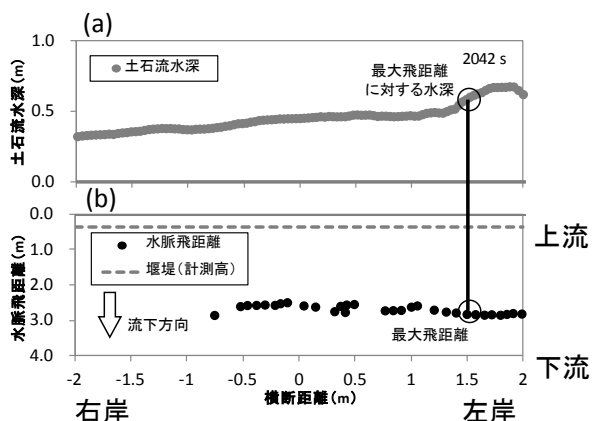


図-5 計測方法 (対象土石流ピーク時の計測結果)

土石流の流速計測では非接触型の流速計や映像判読などが用いられているが、測定位置や状況によって計測が困難になることがある。

本稿では物体の形状を走査・測定可能な測域センサを用いて、土石流の流下断面形状と水脈飛距離を測定することにより土石流流速を算出する手法を提案する。

### 3.1.2 観測方法と計測状況

土石流水深と水脈飛距離の計測には北陽電機株式会社製の測域センサ UXM-30LX-EW を用いた。測域センサは土石流の水面形状を線的に計測するため、濡筋が移動しても土石流の形状を計測することができる。また、提

案手法で算出した土石流流速と比較するため、水通し上

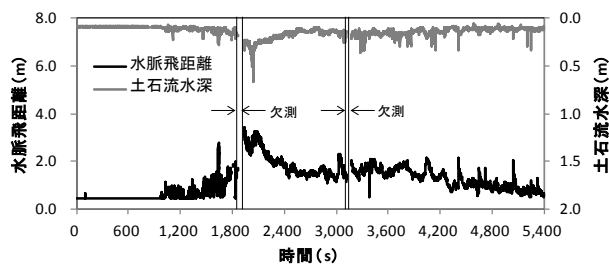


図-6 土石流水深と水脈飛距離の時刻歴

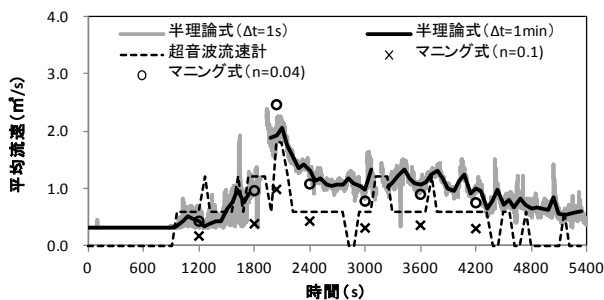


図-7 流速の算出結果

部に設置されている超音波流速計も併用した。

土石流水深は水通しの上部に設置した測域センサにより土石流表面の横断形状を計測し (図-4 (a))、水通しまでの距離との差分から算出、土石流の水脈飛距離は堰堤下流の左岸側壁護岸上に設置した測域センサにより水脈の形状を計測し (図-4 (b))、堰堤水通し下流端までの距離との差分から算出した。なお、本検討では水通しの左岸側に設置してある土石流荷重計 (以降、「荷重計」と称す) の範囲を検討の対象とした。

計測期間の平成 26 年 5 月から 10 月に 13 回の土石流が発生したが、測域センサのレーザ発射部のカバーに多量の火山灰が付着したことや、動作停止などによって欠測となることが多く、土石流水深と水脈飛距離の両方でデータを得られたのは 6 月 21 日の土石流 (以降、対象土石流と称す) のみであった。対象土石流はピーク流量  $4.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 、総流出量  $620 \text{ m}^3$  であり、有村川で観測される土石流の中では比較的小規模な土石流である。

対象土石流のピーク流量時における土石流水深と水脈飛距離の測域センサ測線上での分布を図-5 に示す。このグラフの横軸は横断距離であり、荷重計の中心を原点としている。図-5 (a) では偏流により右岸側の土石流水深が高くなっていることが確認できる。図-5 (b) では右岸側の水脈飛距離が欠落しているが、これは左岸から照射したレーザが土石流左岸側水脈に遮られ、影になっていることが原因と考えられる。本研究では最大飛距離を

「水脈飛距離」、その位置での水通し水深を「土石流水深」として定義した。対象土石流の水脈飛距離と土石流水深の時刻歴を図-6に示す。土石流水深の増減に応じて水脈飛距離も増減することがわかる。

### 3.1.3 土石流流速の算出

図-6の土石流水深と水脈飛距離を用いて、半理論式(1)式より流速( $v$ )を算出した。

$$L = \alpha v \sqrt{2(H+h)/g} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $L$ は水脈飛距離、 $\alpha$ は係数、 $H$ は比高(ここでは水通しと計測高の比高で1.85 m)、 $h$ は土石流水深、 $g$ は重力加速度である。係数 $\alpha$ は1.312を用いた<sup>4)</sup>。

図-7に算出結果と超音波流速計で計測した流速、マンニングの流速公式で算出した流速を示す。なお、超音波流速計で計測した流速は表面流速のため、高橋の流速分布を仮定し0.6倍し平均流速とした<sup>5)</sup>。

### 3.1.4 結論

図-7より、ピーク流量時までに着目すると半理論式で算出した流速は超音波式流速計の分解能(1 m/s)を考慮すれば超音波式流速計で計測した流速と一致している。一方、後続流では半理論式による流速は超音波流速計よりも大きい値を示した。超音波流速計では特定の位置しか流速を計測できず流れの中心を捉えていない可能性があるが、測域センサでは横断的に土石流を計測できるため流速の早い流れの中心部を捉えたためと考えられる。

マンニングの流速公式による算出結果との比較ではマンニングの粗度係数( $n$ )を0.04とやや低めの値とした流速と概ね一致した。流速が3 m/s以下と遅く、フロント部が不明瞭で礫径が後続流と大きな違いがみられない「不完全土石流」では通常の土石流と比較し粗度係数が小さいことから<sup>5)</sup>、対象土石流はこれと同様な流れであった可能性が考えられる。

## 3.2 表面流観測

### 3.2.1 背景

一般に、火山灰が堆積した斜面では浸透能が低下して表面流が発生しやすくなるために、土石流が頻発するようになることが知られている(例えば<sup>6)</sup>など。本研究では、降灰斜面の降雨・流出の機構に関して降灰の有無による変化の特徴を定性的および定量的に理解することを目的に、火山灰堆積斜面における表面流量と雨量の観測を行っている。本報告では、平成26年に観測された表面流発生イベントについて、総雨量、表面流量、土石流流量(以下、流量という)の相関性を分析し、その定性的な特徴を把握した。

### 3.2.2 観測及び分析方法

表-2 平成26年表面流発生イベント観測対斜面は、

No.	イベント発生日	総雨量(mm)	表面流量(cm <sup>3</sup> )	流量(m <sup>3</sup> )
1	2014/3/12	42	2764	欠測
2	2014/3/29	76	2970	20
3	2014/5/12	74	28410	欠測
4	2014/5/14	56	9187	0
5	2014/5/26	69	7036	欠測
6	2014/6/2	52	929	欠測
7	2014/6/17	90	5895	欠測
8	2014/6/20	168	30788	63.03
9	2014/6/26	222	132328	272.46
10	2014/7/2	78	6434	2.51
11	2014/7/9	97	3933	欠測
12	2014/7/13	21	830	欠測
13	2014/7/20	6	3907	欠測
14	2014/7/30	83	15376	30.7
15	2014/8/1	82	31310	53.89
16	2014/8/4	63	257	9.25
17	2014/8/8	19	2476	13.32
18	2014/8/18	23	8931	
19	2014/8/25	22	8641	12.95
20	2014/8/29	18	10984	24.26
21	2014/9/18	122	5507	16.58
22	2014/10/1	47	5508	10.07
23	2014/10/5	29	3293	欠測
24	2014/10/12	79	9110	欠測
25	2014/11/1	23	12565	16.09
26	2014/11/9	25	2089	0
27	2014/11/24	35	18266	欠測
28	2014/11/30	43	5267	欠測
29	2014/12/16	31	307	欠測
30	2014/12/20	25	5997	0.7

土石流観測を実施している桜島有村川3号砂防堰堤近傍の火山灰堆積斜面である。観測プロットの面積は約1.8 m<sup>2</sup>、勾配約12°で、発生した表面流および流出土砂は、斜面下部から計測装置へ流出し、それぞれ計量・記録される。なお、装置の構造、計測の原理については既往文献<sup>7)</sup>に詳述されている。

本検討で対象としたのは、2014年に表面流が発生した30イベントである。各イベントの雨量、表面流量、流量の総量を算出し、総雨量-表面流量、総雨量-流量、表面流量-流量の相関性について分析・考察した。

### 3.2.3 結果

表-2に分析対象の表面流発生イベントの一覧を示す。30イベントのうち、土石流観測が欠測となったイベントが14件、欠測ではなく土石流(流量)が発生しなかったイベントが2件あった。また、降雨規模としては100 mm未満程度が多く、100 mmを超えるのは3件のみであった。

図-8総雨量と表面流量、図-2に総雨量と流量、図-3に表面流量と流量の関係を示す。いずれも、(a)全データ、(b)総雨量50 mm未満、(c)総雨量50~100 mm、(d)総雨量100 mm超のイベントをプロットしている。

図-8~10の(a)についてみると、総雨量-表面流量および総雨量-流量の関係は100 mm超のイベントで、表

面流量・流量では、雨量規模に関わらず正の相関が認められる。このことは、総雨量 100 mm 超のイベントをプロットした各図のパネル (d) を見ても明らかである。一方で、総雨量 50 mm 未満のパネル (b) では、表面流量・流量でやや正の相関が認められるが、いずれも明瞭な特徴は読み取れない。総雨量 50~100 mm のパネル (c) では、総雨量・流量、表面流量・流量で正の相関が認められるが、◇印で囲んだイベントなどは、各降雨規模での傾向から逸脱している。

いずれの相関性も 100 mm 超で明瞭になることから、例えば流域の降雨分布や斜面の水分状態がほぼ一様（飽和）となり、降雨が直接的に流出に影響した可能性が示唆される。

### 3.2.4 まとめ

火山活動が活発な桜島の火山灰堆積斜面における表面流発生イベントについて、降雨量・表面流量・土石流流量の相関性について分析を試みた結果、総雨量 100 mm を超える降雨規模で、各項目のいずれの組み合わせでも正の相関性が認められた。

## 4. 空中写真を用いた火砕流発生時の地形生成

### 4.1 はじめに

火山噴火に伴う火砕流のように発生頻度が低い現象の場合、過去の発生イベントの情報を新たな視点で再整理すると新しい情報を得られる可能性がある。火砕流による災害は国内では雲仙普賢岳噴火後に発生した事例以降、大規模なものは存在しない。一方、火砕流の運動機構を分析するために数値表層モデル（以下、DSM）が必要であった。そこで、当時撮影された多数の空中写真に、近年発展の著しい Structure from Motion（以下、SfM）を用いて、当時の地形をデジタルデータとして復元することを試みた<sup>8)</sup>。

### 4.2 方法

土木研究所が保有していた噴火後の密着焼き空中写真をデジタルスキャナで電子化した。撮影記録などを元に位置情報等を付与する処理等を行なった。

表-3 に示す平成 3 年（1990）の噴火前後から平成 5 年（1993）の火砕流・土石流の頻発時までの期間に撮影された空中写真を用いた。SfM のソフトウェアとしては Smart3DCapture（以下、S3C）を用いた。S3C は選択した空中写真を用いて自動的に地形生成まで実施するソフトウェアである。

表-3 に示す空中写真は、火砕流発生などのイベント発生範囲のみを撮影したものの、つまり変動の激しい山地

や河川沿いしか撮影されていないことが多いため、不動

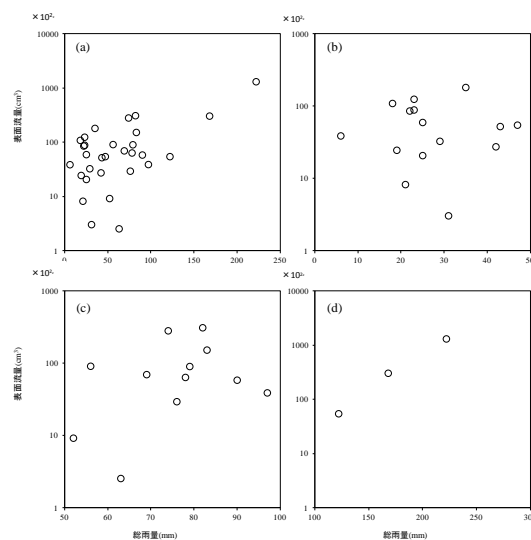


図-8 総雨量と表面流量の関係

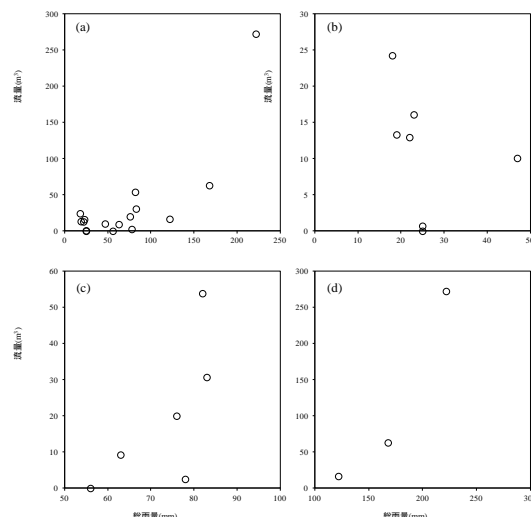


図-9 総雨量と流量の関係

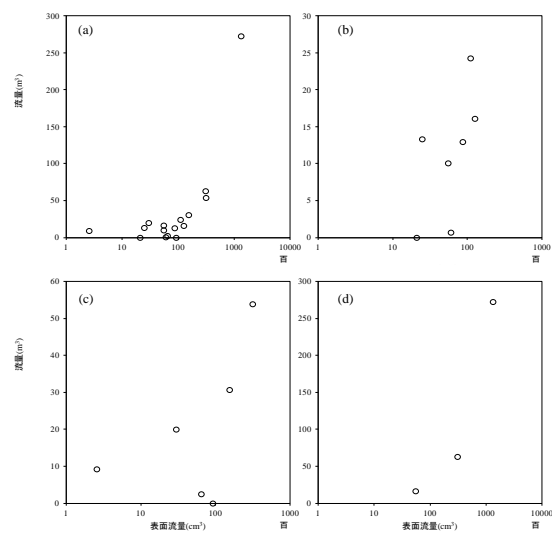


図-10 表面流量と流量の関係  
表-3 使用した空中写真リスト

撮影年月日	撮影機関	撮影縮尺	コース数	撮影枚数	現存枚数	スキャン枚数	対象地区 <sup>*1</sup>	備考
1991/6/4	アジア航測社	1:15,000	1	11	11	16	水無川	資料保存(7/27/11)
1991/6/16	国際航業社	1:15,000	3	46	36	36	水無川～西麓	(欠) 海城10段 (57-60/94-96/97-99) (欠) C4
1993/6/17	大成ジオテック社	1:10,000	3	24	24	24	C2～3: 水無川流域	
1993/6/20	大成ジオテック社	1:10,000	2	13	13	13	C1A-C1B: 中尾川流域	
1993/6/21	大成ジオテック社	1:8,000	2	17	17	17	C2A-C2B: 水無川流域	
1993/6/21	大成ジオテック社	1:8,000	2	27	27	27	水無川流域	
1993/6/24	大成ジオテック社	1:8,000	1	12	11	11	C2: 水無川流域	(欠) C1-中尾川
1993/6/24	大成ジオテック社	1:8,000	1	11	11	11	C3: 水無川流域	C2とごくわずかに重なっている
1993/6/27	大成ジオテック社	1:10,000	1	11	11	11	C4: 水無川流域	C4-中尾川 (3Dモデリング処理に不都合)
1993/6/27	大成ジオテック社	1:15,000	1	12	12	12	C1: 中尾川流域	
1993/6/27	大成ジオテック社	1:8,000	1	14	14	14	C2: 水無川流域	



図-11 SfMの結果 (930627)

点が少なく現在の地形図と比べて位置の特定が難しい。そこで、噴火の前後に広域を撮影した写真を参照画像として位置情報を付与し、他の時期についてはその画像を元に同じ特徴点(建物など)を探して位置座標をつけた。

上述のようにして作成したそれぞれの時期のSfMによる数値表面層モデル(以下、DSM)に対して、現況の地形図において不動な点と考えられる数点選択し、DSMの誤差を評価した。

### 4.3 結果

SfMで生成したDSMの鳥瞰図の例を図-11に示す。空間解像度が細かいDSMが生成されるため、家屋が土砂に埋まる様子がよく分かる。図-12には、各時期について生成したDSMの範囲を示す。図-13には、各時期の画像に地理座標を付与するために参照画像とした910616のDSMに等高線を重ねた段彩図を示す。なお、どの時期のDSMかはyymmddの6桁の数字で記載する。

910616のDSMを見ると、等高線が滑らかで、視認する限り、火山の形状が最もらしく生成したことが分かる。

つぎに、各時期の誤差分析の結果を表-4に示す。いずれの方向であっても標準偏差はほとんどの場合3m内外であるものの、特定の方向のみ6、7mの誤差が生じた場合がある。また、930621の高さ方向のみ15mの誤差を得た。SfMは隣接する写真の類似の特徴をもつ点(特徴点)を根拠に合理的に写真を接続する方法である。このプロセスに起因して、今回の場合、写真の境界に存在する海ではうまく地形が接続されない場合があった。

その影響が広範囲に及び不合理な地形が生成した。この

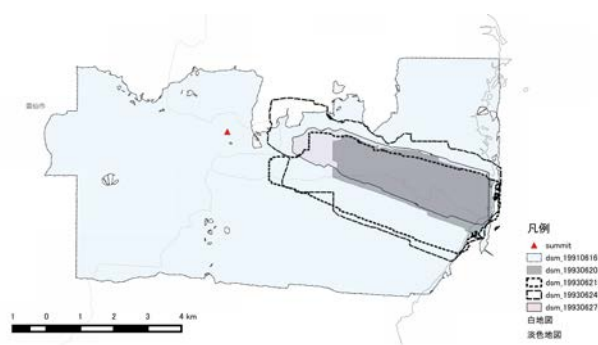


図-12 SfMによる地形を生成した範囲

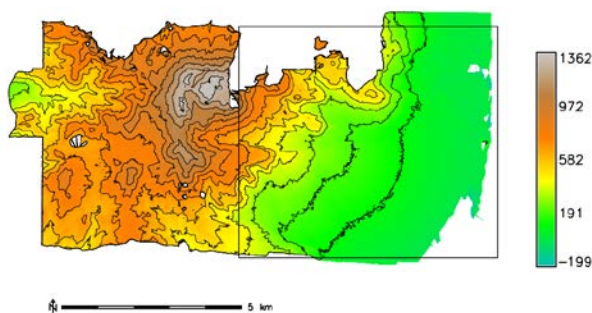


図-13 910616のDSMと等高線

表-4 誤差

date	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$	$\sigma$	comment
910616	3.33	6.96	3.58	8.51	reference
910604	1.91	1.62	2.53	3.56	
930617	2.45	1.74	6.02	6.73	
930620	2.69	1.27	1.87	3.51	
930621	1.32	1.20	15.68	15.78	
930624	1.70	1.00	1.51	2.48	
930627	1.64	1.06	1.47	2.45	

yymmddの様式で記載。σは標準標準偏差の大きさを、添字は方向を表す。

ため、いくつかの時期では大きな誤差が生じた。標準偏差の値をみると10m未満の誤差であり、簡易な操作で大量の地形を生成可能であるにも関わらず、比較的よい精度の地形が生成されたことが分かる。

なお、火山地域の写真を用いる場合、噴煙下の写真では地形が生成されない場合がある。1ピクセルあたりの情報量を拡大することで噴煙等の下の地表面の情報を使用できるようになり、地形が生成できる場合がある<sup>8)</sup>。

## 5. 融雪火山泥流のハイドログラフに関する基礎的研究

### 5.1 はじめに

融雪火山泥流の氾濫計算を行う場合、ハイドログラフを与える必要があるが、火山噴出物が雪を解かし、泥流化するプロセスは十分に明らかでなく、合理的に与えることが難しい。近年、村重ら<sup>9)</sup>によりモデルが開発され

ているが、融雪速度よりも積雪内浸透速度が常に大きいことを仮定している。しかし現実には速度が逆転する可能性もある。また積雪密度や水の存在が融雪速度に影響すると考えられ、本研究ではこれらの検討を行った<sup>10</sup>。

## 5.2 方法

### 5.2.1 融雪速度と浸透速度の関係

融雪速度  $v$  は村重ら<sup>9)</sup>の提案した式で表される。一方、浸透速度  $v_i$  は Darcy 則を適用する。本研究では2式を用いて  $v$  と  $v_i$  が等しくなる火山噴出物の温度  $T_t$  を検討する。火山噴出物と積雪が接触した瞬間は簡単に求まる：

$$T_t = (E(1 - r_{sl}) + Gr_{sl})\rho_{sn}k(-\psi_{sn0})/k_s \dots (1)$$

ここに、 $E$ :雪の融解熱、 $G$ :雪の昇華熱、 $r_{sl}$ :熱の損失率、 $\rho_{sn}$ :積雪密度、 $k$ :不飽和透水係数、 $\psi_{sn0}$ :接触点の圧力水頭、 $k_s$ :火山噴出物の熱伝導率である。 $\rho_{sn}$ は雪の乾き密度  $\rho_{dry}$  と飽和度  $S$  により決まるのでこれらを変化させたときの  $T_t$  の変化を考察した。

### 5.2.2 積雪密度および積雪内水分量の観測

焼岳の近傍にある穂高砂防観測所にて  $\rho_{sn}$ 、 $S$  の観測を行った。 $\rho_{sn}$  は採土円筒により積雪を採取し、質量を計測して求めた。 $S$  は TDR プローブ (CS616, Campbell 社製) で計測できる比誘電率  $K_{a,obs}$  および  $\rho_{sn}$  から推定した。プローブは地上から 5、30、55、75 cm の位置に差し込み、深度分布が分かるようにした。

## 5.3 結果および考察

### 5.3.1 融雪速度が浸透速度を上回る条件

図-14 は  $S$ 、 $\rho_{dry}$  と  $T_t$  の関係を示す。図-14 を見ると  $T_t$  は  $S$  と正の相関が見られる。これは  $S$  が増加すると透水性が増すためである。一方、 $\rho_{dry}$  が増加すると次第に増加して減少する傾向を呈する。これは、 $\rho_{dry}$  が増加すると  $v$ 、 $v_i$  は低下するが、はじめは  $v$  の低下の影響が大きく、次第に  $v_i$  の低下の影響が大きくなるためである。

### 5.3.2 積雪密度と積雪内水分量が融雪に与える影響

図-15 は 10 cm ごとの  $\rho_{sn}$  の、図-16 は計測位置における  $S$  の時系列変化を示す。図-15 より、3月18日計測のものを除き、 $\rho_{sn}$  の深度分布は時間的な変化が小さい様に見える。一方、2月15日まではいずれの深度でも飽和度が小さい(図-16)。3月以降では 5 cm 地点で  $S$  が徐々に上昇しているが、これは地中熱による融雪が原因と考えられる。以上、積雪期の雪は  $S$ 、 $\rho_{sn}$  の変化を無視しえるが、融雪期は  $S$ 、 $\rho_{sn}$  の増加を考慮しなければならないと考える。

## 5.4 おわりに

本研究により  $\rho_{sn}$ 、 $S$  がハイドログラフに大きく影響することが予想された。ただし、考察は限られた条件での

ものであることに注意されたい。

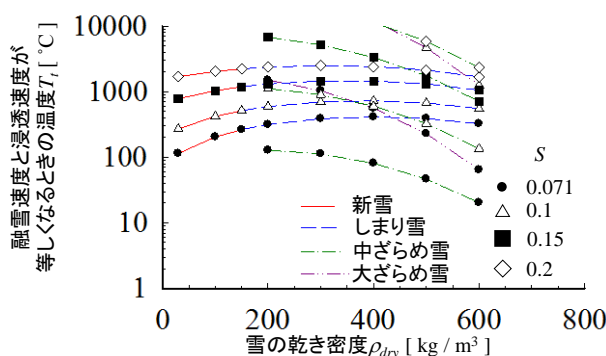


図-14  $\rho_{dry}$  -  $T_t$  関係

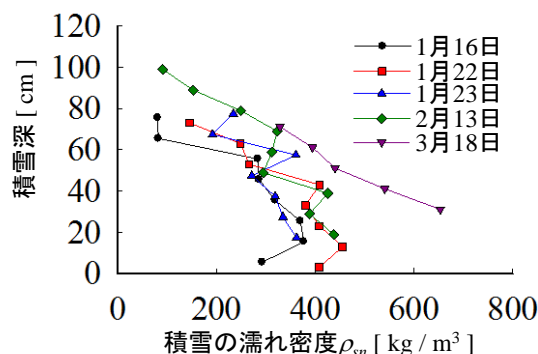


図-15 積雪密度  $\rho_{sn}$  と積雪深の関係

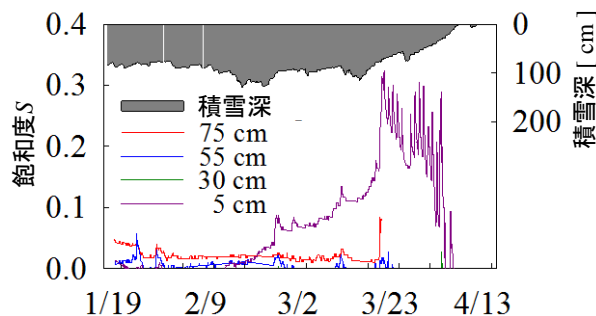


図-16 飽和度および積雪深の時系列変化

## 6. 砂防堰堤の内部応力評価手法に関する研究

### 6.1 はじめに

大量の火砕堆積物が堆積した溪流で発生する大規模土石流に対応するような砂防堰堤を設計する場合、従来の安定計算では堰堤の規模が相当程度大きくなることがあるため、現在発展している技術の適用性を検討する余地がある。コンクリート構造物に対する詳細な応答解析の手法のひとつとして有限要素法が用いられることが多い。しかし、砂防の分野においては研究実績或使用実績が多いとはいえ、堰堤や地盤のモデルリング、外力の与え方などを検討する必要がある。本研究ではまず、今後の準備を兼ねて単純なモデルでの解析を行う。つまり、砂

防堰堤を均質な等方線形弾性体としてモデリングし、土石流による外力を定常な流体力として静的に与えた場合の堰堤内部の応力を3次元有限要素法により評価した。

## 6.2 解析方法

本研究では群馬県利根郡片品村に位置する仁加又沢第三堰堤(高さ14.0 m)を解析対象とした。ただし、1.5 mの腹付けをした場合を想定し、天端幅は4.5 mとした。基礎式は式(1)の通りである：

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda\delta_{ij}\varepsilon_{kk} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $\sigma_{ij}$ :応力テンソル、 $\varepsilon_{ij}$ :ひずみテンソル、 $\delta_{ij}$ : Kronecker のデルタ、 $\mu (= \nu E / ((1 + \nu)(1 - 2\nu)))$ 、 $\lambda (= E / (2(1 + \nu)))$ : ラメの定数、 $E$ :弾性係数、 $\nu$ :ポアソン比である。 $E$ 、 $\nu$ はそれぞれ  $2.5 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、 $0.20$  とした。コンクリートの単位体積重量は  $22.56 \text{ kN/m}^3$  とした<sup>1)</sup>。

解析は砂防堰堤と地盤の両方について行った。なお、地盤は解析に影響のない程度に余裕を持って設定している。拘束条件としてコンクリートの底面、側面ともに地盤と完全に固定しているとした。地盤部分については底面を完全固定、側面は鉛直方向にのみ可動するとした。

土石流はピーク時の流量を与えることとした。当該砂防堰堤の計画では  $888 \text{ m}^3/\text{s}$  であるので、これの1.0倍、3.0倍、5.0倍、7.0倍、10.0倍の5ケースを設定し、その違いが与える影響を考察した。土石流流体力は三角形分布で与え、満砂、未満砂の2ケースを想定してさらに静水圧、堆砂圧を与えた。土石流流体力の作用点の中心は設計指針に則って決定した。また、メッシュ(全て四面体要素とした)の数を5214、36,448、95,921の3ケース設定し、適切な有限要素数を検討した。計算はまず砂防堰堤の自重解析を行い、元来作用している内部応力を計算し、自重解析で発生したひずみをゼロに設定し直した上で土石流流体力を与え、発生する内部応力を計算した。

## 6.3 結果と考察

図-17に満砂状態でピーク流量  $\times 10$ の流量を与えた時に作用するせん断応力分布を代表として示す。図-17を見ると、せん断応力は堰堤の底面付近で大きくなる傾向を示す。特に形状が変化する箇所で大きな値となり、最大  $2,324.7 \text{ kN/m}^2$  であった。なお、土石流の流量がいずれの場合でも短期許容応力度を下回っており、非常に大きな流量であっても砂防堰堤は安定であることが示された。

図-8にメッシュサイズと応力最大値の関係を示す。図-18よりメッシュサイズの影響は大きいことが分か

る。

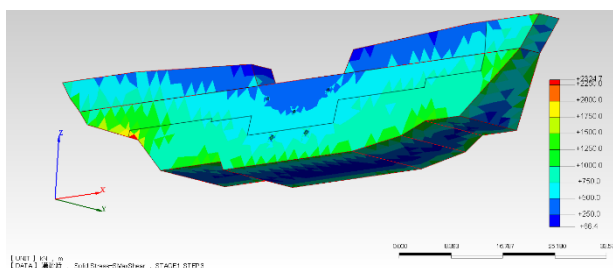


図-17 満砂時の最大せん断応力(ピーク $\times 10$ )

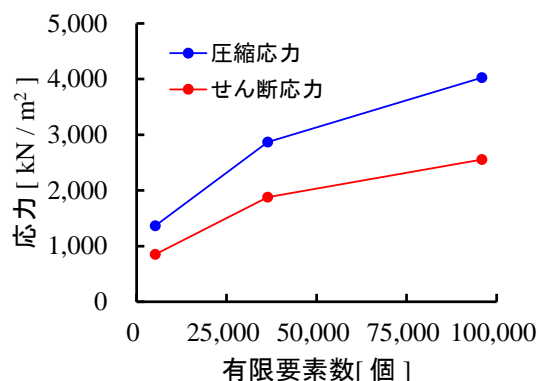


図-18 メッシュサイズと応力最大値の関係

## 6.4 まとめと課題

本研究では砂防堰堤に大規模な土石流が作用した場合の内部応力を有限要素法により検討した。検討の結果、土石流が相当程度大きい場合でもコンクリートの許容応力に収まることが分かった。ただし、土石流の作用はより単純で理想的であり、かつ、コンクリートのモデリングも理想的である。つまり、実際に破損する場合に大きく影響する打ち継ぎ目などの弱部の影響を考慮しない場合である。またメッシュサイズの影響も大きいことが判明したため、今後さらなる検討を行う必要がある。

## 7. おわりに

平成26年度は国外ではインドネシア・クルー火山、国内では御岳山が噴火し、いずれも火山噴出物、火砕流、その後の降雨を原因とする土石流によって被害が生じた。本報告にはクルー火山の現地調査結果や、火山活動に関連する土石流、降灰斜面と流出現象、融雪泥流の被害推定のための融雪現象の基礎検討、アーカイブ空中写真による過去の知見の復元技術、ハード対策など幅広く検討を行なった。次年度が本研究課題の最終年度であるため、これらの知見を実務で活用しやすいように整理する予定である。



## 8. 謝辞

インドネシア・クルー火山調査において、クルー火山砂防観測所に調査協力していただいた。桜島における土石流観測及び斜面侵食観測について国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所および桜島出張所に全面的に協力して頂いた。雲仙普賢岳の空中写真は表に示した航測会社に使用を許可して頂いた。融雪の現地観測について京都大学防災研究所附属徳高砂防観測所にフィールドを提供していただいた。砂防堰堤の応力解析のための参考情報を国土交通省関東地方整備局利根川水系砂防事務所にご提供していただいた。以上の関係各位に御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 藤村直樹、清水武志、石塚忠範、池田誠、横尾公博、福島淳一、水野直人：クルー火山 2014 年噴火における火砕流と土石流発生状況に関する調査報告、平成 27 年度砂防学会研究発表会、B-50-51、2015
- 2) 石塚忠範、藤村直樹、清水武志、池田誠、福島淳一、水野直人、横尾公博：クルー火山 2014 年噴火における降灰と土石流に関する調査報告、平成 27 年度砂防学会研究発表会、B-48-49、2015
- 3) 清水武志・吉永子規・水谷佑：桜島有村川流域における土石流観測と斜面侵食観測、砂防学会誌、Vol. 67、No. 5、pp. 23-26、2015
- 4) H.-M. Hong, H.-S. Huang and S. Wan: Drop characteristics of free-falling nappe for aerated straight-drop spillway, J. Hydraul. Res., Vol. 48, No. 1, pp. 125-129, 2010
- 5) 高橋保：土石流の機構と対策、近未来社、p. 432、2004
- 6) 地頭蘭隆・下川悦郎：火山灰に覆われた桜島山腹斜面における表面流出、新砂防、Vol. 42、No. 3、pp. 18-23、1989
- 7) Kisa, H., Yamakoshi, T. and Ishizuka, T. (2015) : Impact of short-term temporal changes in volcanic ash fall on rainfall threshold for debris flow occurrence in Sakurajima, Japan, International Journal of Erosion Control Engineering
- 8) 鈴木英夫、清水武志：災害対応アーカイブ空中写真からの三次元情報抽出、写真測量学会平成 26 年度秋季学術講演会、E-5、2016
- 9) 村重慧輝、堤大三、宮田秀介、藤田正治、酒井英男、上石勲：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、Vol.67、No.6、pp.3- 10、2015
- 10) 泉山寛明、清水武志、水谷佑、藤村直樹、石塚忠範、堤大三：積雪内水分量と火山噴出物による融雪速度の関係に関する基礎的研究、H27 砂防学会研究発表会概要集、2015
- 11) 土木学会：コンクリート標準示方書 [ダムコンクリート編]、2002

## A STUDY ON EMERGENCY MITIGATION MEASURES AGAINST SEDIMENT-RELATED DISASTERS CAUSED BY VOLCANIC ERUPTION

**Budgeted** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2011-2015

**Research Team** : Erosion and Sediment Control Research Group  
(Volcano and Debris flow)

**Author** : ISHIZUKA, Tadanori

FUJIMURA, Naoki

SHIMIZU, Takeshi

IZUMIYAMA, Hiroaki

**Abstract** : The objective of this study is development or improvement of the methods of estimating the area in which debris flow by volcanic ash, pyroclastic flow, or lahar by snow melt cause societies disastrous damage. In FY2015, we conducted 1) field survey about state of debris flow and pyroclastic deposit caused by the Kelud volcano 2014 eruption, 2) field observation of relationship between rainfall and runoff on ash-deposited hillslope and of debris flow velocity measurement in the Sakurajima volcano, 3) creation of digital surface models after the Unzen volcano 1990-1993 eruption applied to Structure from Motion using archive air-photos, 4) theoretical analysis and observation to clarify the speed ratio between snow melt and snow melted water infiltration, 5) response analysis between a debris flow and a check dam in order to consult optimum configuration plan of check dams if huge debris flow related to volcanic activities occurs.

**Key words** : Kelud volcano 2014 eruption, Sakurajima volcano, debris flow observation, observation of rainfall-runoff related to ash-deposited hill slope, Unzen volcano, Structure from Motion (SfM), observation of snow melt, finite element method