

## 2019年5月21日に木曽御嶽山で発生した 大規模雪崩の状況と原因に関する考察

鈴木秀雄<sup>\*1</sup>・齋藤武士<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> 信州大学総合理工学研究科理学専攻地球学ユニット, 〒390-8621, 長野県松本市旭3-1-1

<sup>\*2</sup> 信州大学学術研究院理学系, 〒390-8621, 長野県松本市旭3-1-1

## A discussion of the circumstances and causes of the massive avalanche that occurred at Mt. Kiso Ontake on May 21st 2019

Hideo SUZUKI<sup>\*1</sup>, Takeshi SAITO<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> Institute of Science, Academic Assembly School of Science and Technology,  
Shinshu University 3-1-1 Asahi, Matsumoto, 390-8621, Japan

<sup>\*2</sup> Department of Geology, Faculty of Science, Shinshu University  
3-1-1 Asahi, Matsumoto, 390-8621, Japan

### Abstract

A large-scale snow avalanche that occurred on 21st May 2019 on the slope between the Ichinoike and the Ninoike craters at Mt. Kiso Ontake was unprecedented in terms of location and scale. The avalanche flowed into the Yukawa River downstream of the Ninoike crater, where a mudslide also occurred. Field observations of avalanche slopes were conducted, and the sediments transported by the avalanches were analyzed from the geological viewpoint of grain size and mineral composition. Volcanic ash deposits, which derived from the 2014 phreatic eruption, were observed on the snow surface around the area where the avalanche was produced, suggesting the fine-grained ash with low water permeability caused the avalanche generation. Simple snow block sliding experiments, investigating snow conditions and the effect of volcanic ash, indicated that not only appropriate weather and snow conditions but the presence of volcanic ash promote sliding. We concluded that the avalanche was possibly promoted by muddy water with volcanic ash in addition to heavy rains and high temperatures.

### 1. はじめに

2019年5月21日朝に木曽御嶽山(図1)の剣ヶ峰付近の一ノ池から二ノ池にかけての斜面(図2)で発生した雪崩(以下, 二ノ池雪崩)は, 二ノ池湖畔の登山道を埋め尽くし, 二ノ池湖畔にある二ノ池山荘と付帯設備の一部を損壊させた。國友ほか(2019)では, 発生時刻は地震計の観測から午前6時40分頃と推定している。この雪崩は, その一部が二ノ

池火口縁を乗り越えて北側斜面へ越流するほどの大きな規模であった。二ノ池に至る登山道に古くからある石室山荘のご主人によれば、これまでに、二ノ池山荘（旧二ノ池本館）や二ノ池湖畔の登山道に被害が及ぶような大規模な雪崩の記録は無かったということである。

同じ日に、下流の湯川上部においても雪堆積層の崩落と泥流が発生した。二ノ池雪崩との発生の前後関係ははっきりしていないが、國友ほか（2019）では、これを二ノ池雪崩の後に発生したとしている。湯川上流部での雪堆積層の崩落と泥流発生については、2011年5月11日から15日の間にも発生しており、崩落位置もほぼ同じであることを、現地調査と写真による比較から確認している。このことから、湯川上流部での雪堆積層の崩落と泥流は、2019年5月の雪崩発生以前にも繰り返し発生していたと考えられる。一方で、二ノ池雪崩は2019年5月に特異的に発生しており、その要因は明らかになっていない。

今回の雪崩を最初に報告した國友ほか（2019）では、大量の水を含んだ雪が雪泥（スラッシュ）化して流動するスラッシュ雪崩としているが、我々の現地調査では後述するように全層雪崩として発生した可能性が示された。全層雪崩の発生原因の一つは、融雪や降雨による積雪底面の含水率が増加し、グライドが速くなることである（日本雪氷学会、2005）。また、春先の大量降雨や気温変動などの気象条件や火山灰の存在などが雪崩の発生要因と指摘する次のような研究報告がされている。中川ほか（2009）は、富士山でのスラッシュ雪崩の発生条件について、気象条件による発生傾向が見られるとし、それに加え、時田（1993）では、火山噴出物で覆われていることや難透水層の形成について指摘している。火山灰による難透水層の形成については、池谷ほか（1978）は有珠山で、小橋ほか（1994）：恩田ほか（1996）は雲仙岳で指摘している。また、Ohba et al.（2005）：Oikawa et al.（2018）は、水蒸気噴火では粘土質火山灰が卓越して噴出するため、雪崩の

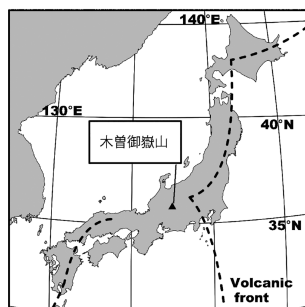


図1 木曽御嶽山の位置図

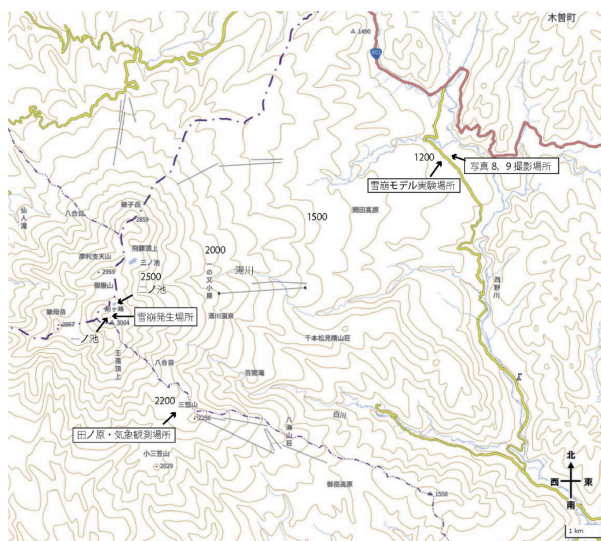


図2 木曽御嶽山周辺の本研究に関連した場所を示した位置図。国土地理院地図（電子国土web）に加筆。



発生の要因である難透水層形成が促進されてグライド増加が起きていた可能性があるとしている。2011年5月と今回の雪崩発生の間には、2014年9月の木曽御嶽山水蒸気噴火があり、剣が峰において層厚35 cm程度の火山灰が降り積もっている（御嶽山降灰合同調査班，2014：及川ほか，2015）。この火山灰の影響によって今回の雪崩が引き起こされた可能性がある。

我々は2019年5月に木曽御嶽山で発生した雪崩の現地調査を行い、崩落および堆積状況を詳細に観察・記録した。雪崩によって流下した堆積物を採取し、その粒度分析と鉱物構成分析から2014年火山灰層が雪崩発生引き起こす要因となったかについて検討を加えた。さらに、雪と水と火山灰による雪崩の模擬実験を行って、火山灰層の有無が摩擦係数を低下させるか検討した。また、過去の気象データから、雪崩が発生した年とそれ以外の年の気象条件の違いについて検討を行い、今回の雪崩の発生要因について考察したのでここに報告する。

## 2. 現地調査

### 2.1. 実施内容

二ノ池雪崩発生3日後の2019年5月24日に、二ノ池河畔から雪崩全体の俯瞰観察を行い、湯川上流部の泥流発生基点と考えられる崩落箇所も上部から確認した。2014年の噴火以降、木曽御嶽山山頂周辺では立入規制区域が設定され、二ノ池雪崩の発生場所もこの区域内に位置するため、この日は区域外からの観察のみを実施した。規制区域内の調査が認可された後、6月13日と25日に、一ノ池から雪崩発生斜面、二ノ池、泥流が流下した湯川の上部に渡って調査を実施した。崩れ残った雪渓部と雪崩のデブリ、運ばれた堆積物を観察し、スコップですくい、分析用に330 ml 容器一杯量を採取した。残雪が完全に消えた7月30日と8月18日には、一ノ池、一ノ池から雪崩発生斜面、二ノ池における2014年噴火火山灰の堆積状況と雪崩デブリ堆積物の残存状況を観察し、スコップですくい、分析用に330 ml 容器一杯量を採取した。また、8月26日、9月19日には、湯川の中流部～上流部にかけて、堆積物の残存状況を確認した。

### 2.2. 観察結果と解釈

#### 2.2.1. 雪崩の全体像

雪崩の破断面の最上部は一ノ池から二ノ池への流路上の標高2975 m 地点で、法面長さ約136 m、幅約50 m の範囲の残雪が、全層に渡って崩落していた（写真1）。上部はほぼ矩形に崩落、斜面半ばから下側に向かってやや広がり、二ノ池に接した場所では雪崩の幅は約64 m であった。法面長さについては、崩落最上段の破断面から崩落斜面最下部において現地にてハンドヘルド GPS 機（ガーミン社の GPSMAP62S）を使用して測定した。記録した GPS 位置情報から距離を算出し、幅については歩測による実測を基準に写真判読を行って算出した。

#### 2.2.2. 雪崩崩落斜面

崩落雪堆積層厚は、破断面最上部からやや斜面下方の標高2950 m 地点で、210 cm であった（図3）。しかしながら、測定日は崩落発生後3週間経った6月13日であるため、

崩落雪堆積層厚は融雪により減少していたと考えられる。そこで、5月24日の写真と6月31日に同じ位置から撮影した写真を比較した結果、雪の厚みが約2/3となっていることから、崩落時は3 m 程度あったと推定した。崩落規模はこれらの数字を元に、幅50 m×法面長さ136 m×雪の厚み3 m =  $2.04 \times 10^4 \text{ m}^3$  であると見積もった。國友ほか（2019）では  $2.0 \times 10^4 \text{ m}^3$  と報告しており、本研究による概算とほぼ一致している。この規模は、カナダの雪崩サイズ分類システム（日本雪崩ネットワーク、2017）によれば、崩落質量の点からサイズ4（大規模）に相当する。

最上部の破断面（図4の破断面①-1）は、その直下の破断面（図4の破断面①-2）との距離も短く、幅も半分程度しかない。これらは一つの破断面と捉えることもできるが、側方両側に対となる破断面が存在するため別のものと考えた。斜面の中央部に向かって左手側に明瞭な破断面があり、右手側にもそれと対になる小さな破断面がある（図4の破断面②）。斜面の下側1/3ぐらいの位置にも、斜面の中央部に向かって左手側に明瞭な破断面があり、右手側にもそれと対になる小さな破断面がある（図4の破断面③）。これらのことから、崩落は少なくとも4つのブロックに分かれて起こった可能性が高い。今回の破断面よりも上流部分の崩落せずに残った積雪層にもクラックが3カ所あったが、このクラックからの崩落はその後も起きず、融雪により消失した。崩落した斜面中間やや上、破断面②と破断面③の間と崩落せずに残った雪面上の流心部に2014年噴火火山灰の流下した痕が認められた（図4）。2014年火山灰層は特徴的な青灰色を示すため容易に識別できる。また、側方破断面下部の積雪層と地表面の間には水の層があった（図3）が、これは発生後3週間経ってから確認したもので5月24日の遠望での観察では確認できなかった。

6月13日の観察では、破断面中央には、水が通ってできたと思われる穴があり、雪堆積層内部に浸透した水がパイプ状にえぐったと考えられるが、火山灰の流出痕は認められな



図3 破断面底部の水の層。破断面最上部からやや斜面下方の標高2950 m 地点（図7 積雪層厚測定位置）。2019年6月13日撮影。

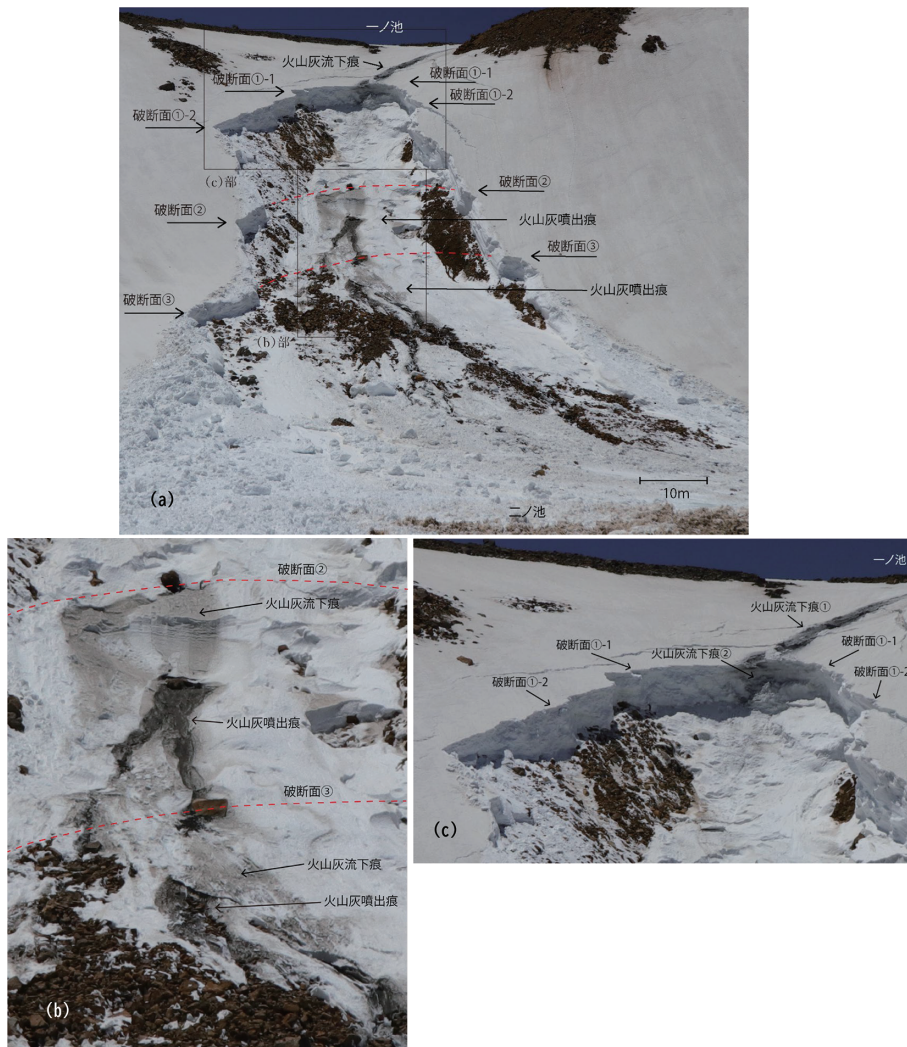


図4 雪崩発生斜面の写真。2019年5月24日撮影。撮影位置は図7 通称二・五ノ池の縁。(a) 斜面の全景写真。(b) 発生斜面中央の火山灰噴出・流下痕の拡大写真。(c) 最上部の破断面の拡大写真。

かった(図5)。最上部の破断面の下部においては、雪堆積層がアーチ状の空洞となっていて、その空洞の地面側に火山灰が堆積し、雪堆積層側にはスプーンカット形状の窪みが形成されており、その峰部にも火山灰がへばりついてた(写真2)。しかし、5月24日の観察では、これらの存在は確認できなかった。破断面より上の雪面は、窪んで樋状の雨裂が刻まれ、薄く火山灰に覆われていた(写真3)。観察時には水流は無かったが、この火山灰の流下痕は、5月24日の観察でも確認しており(図4)、雪崩発生時に雪面上を火山灰が含まれた水が流れていたことを示している。





図5 最上部の破断。2019年6月13日撮影。撮影位置は図7破断面最上部の10 m ほど下流。

### 2.2.3. ニノ池の雪崩痕跡

5月24日の観察時点では、ニノ池の南東側は、雪崩の下部から扇状に展開していた比較的小さい雪塊からなるデブリ堆積物によって覆われていたが、6月13日の観察時点では、これらの小さな雪塊からなるデブリ堆積物は融解によって消え去り、雪崩流心近くに残っていた大きなデブリ堆積物のみが残っていた。これらは、停止した場所の湖面に平行な層理面を見せていて、岩屑なだれの堆積物とよく似た流れ山の産状を呈していた（写真4）。これは、崩落後に雪堆積層が斜面をそのまま滑走し、転動しなかったことを示している。これらの堆積物は、雪の堆積層の間に何層かの水の薄い層を挟み、表面は4～50 cmの岩石や10 cm以下の礫、粗粒砂で覆われていた。堆積最下部の20 cm厚の氷の層は、調査したすべての流れ山状の堆積物で確認された（図6）。

雪崩はニノ池に到達した箇所から扇状に広がりながら、ニノ池を北東へ進み、ニノ池北東側の火口縁に到達した。その場所での雪崩の幅は約110 mであった。ニノ池火口縁付近にあった雪塊はブロック状で、その径は4～50 cmから2 m程度であった。一部は火口縁を乗り越えて溢流したが、他の大部分はニノ池下流側へ流れ、その一部は火口縁の尾根上のニノ池山荘の付属設備を破壊し、さらにニノ池山荘の南東側の玄関を破壊し、北東側から室内へ流れ込んでいた。崩落斜面下部からニノ池までは雪のみのデブリ堆積であったが、ニノ池の北東部の地形的高まりで土石堆積物と入り混じっていた（写真1）。



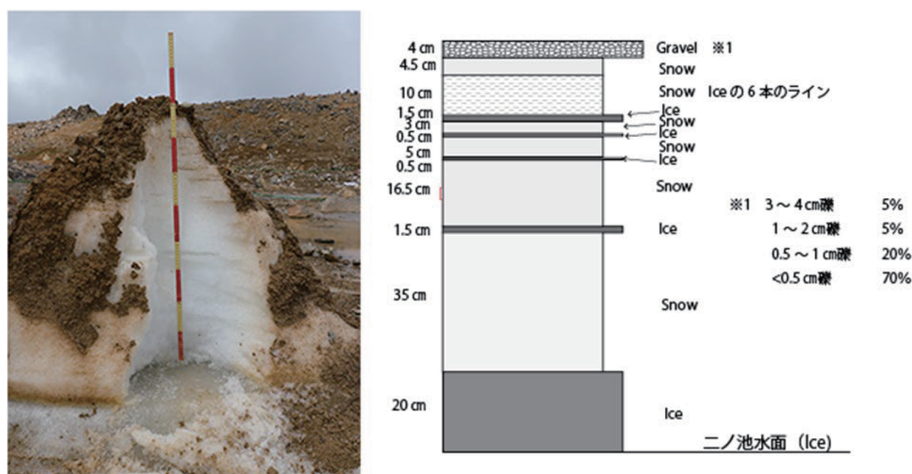


図6 二ノ池に堆積した雪崩デブリ堆積物の写真と内部の雪層の積み重なるの観察結果。2019年6月25日撮影。撮影位置は図7雪崩デブリ東側端付近。

#### 2.2.4. 湯川の雪堆積層崩落と泥流

2019年5月22日朝、木曽御嶽山東北東の開田高原から湯川上流部の標高2850 m 付近の雪堆積層の崩落と泥流の流下を確認した（写真5-a）。5月24日の調査では、雪面上に幅4～5 m の溝状の流下痕と雪面上に少量の堆積物を確認した。流下痕は大きく右へカーブしていて、流下痕から外れたカーブ外側の雪面が堆積物で幅広く汚れていることから、オーバーフローするほどの多量の泥を含む水が流れたと考えられる。二ノ池の流出口から標高差で50 m 下った地点で、大きく雪堆積層が崩落していた（写真6）。この崩落と一ノ池から二ノ池への流路上の崩落は、湯川の泥流発生状況から、同じ日に発生したと見られるが、その発生時刻の前後関係はわからない。湯川中流部から上流部にかけて、8月26日、9月19日に調査したが、ほとんど堆積層として確認できるものはなかった。

我々は、2011年5月14日にも今回と同様に湯川を下する泥流を確認している（写真5-b）。この泥流の発生時期は、気象データと期間前後の写真記録から、2011年の泥流発生日時は5月11～12日の間と推定される。

#### 2.2.5. 一ノ池の2014年噴火火山灰

二ノ池雪崩発生場所より上流に位置する一ノ池には、2014年噴火火山灰が堆積しており、西側火口縁では2019年8月18日の時点で、20～40 cm の火山灰層を確認した。一ノ池の噴火口に近い南側の火口縁には、それ以上の層厚の堆積物が残っており、一ノ池へと再移動していると考えられるが、立入規制の関係で未調査である。一ノ池は2014年噴火火山灰で埋まっており、2018年9月13日の時点で、火山灰層をその下の地表面まで掘り下げ、折り尺を用いて層厚の測定を行い、40 cm 以上の火山灰層を確認した。火山灰が一ノ池から二ノ池雪崩発生場所を経由して二ノ池へと再移動していることは、2018年9月の調査でも目視によって確認している。

### 3. 分析および実験と解釈

#### 3.1. 流下堆積物の粒度と粒子の構成

雪崩と泥流によって流下した堆積物の粒度分析と構成粒子の観察を行い、各堆積物の同定と対比を行った。堆積物は一ノ池から二ノ池、さらに湯川源頭部へかけての9地点において計10試料を採取した(図7)。粒度分析用の試料は、そのまま乾燥させたものを使用し、篩によって粒度ごとに選別し、各粒度の重量割合を計測した(図8, 表1)。構成粒

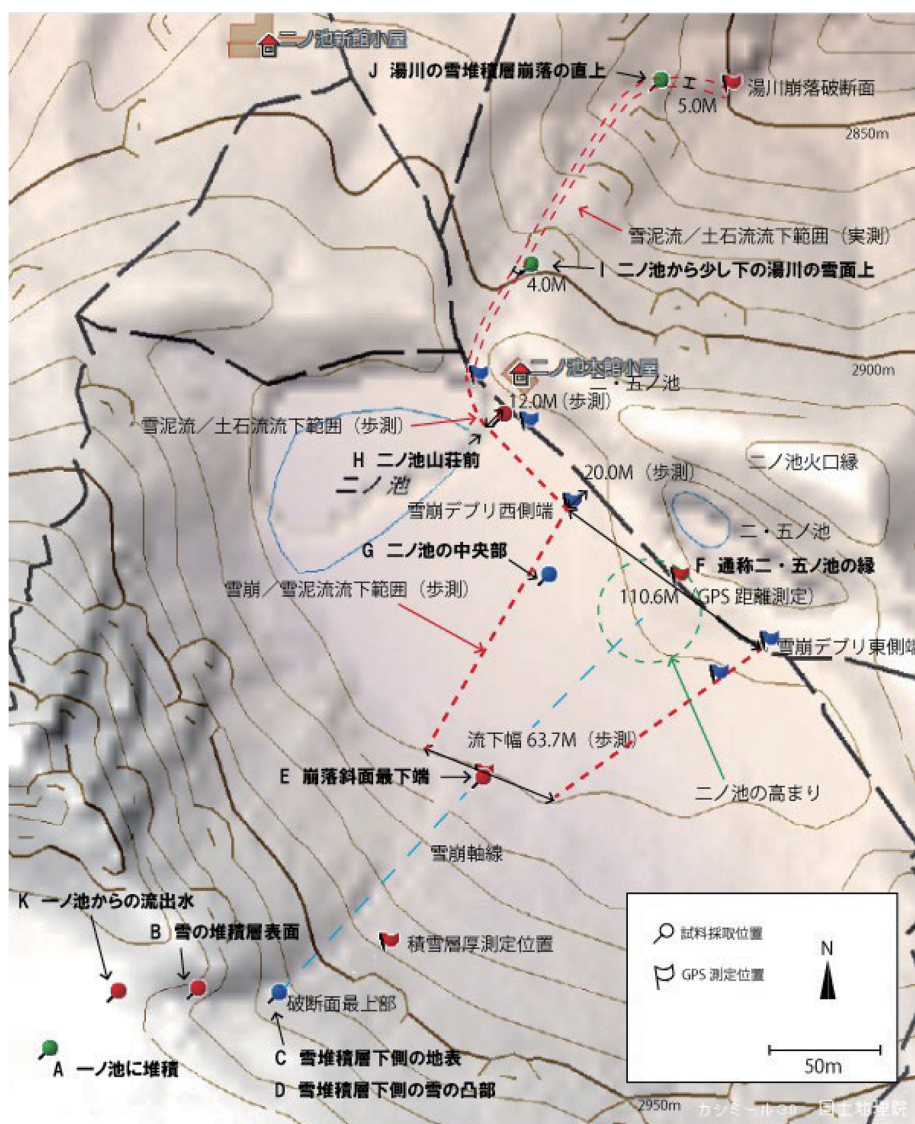


図7 ニノ池周辺の雪崩観察地点と試料採取地点の位置図。カシミール3D に加筆。

子観察用の試料は、水簸、乾燥後、篩によって選別、125~250  $\mu\text{m}$  の粒度のものから薄片試料を作成し、偏光顕微鏡を用いて1試料あたり500点以上の粒子について鑑別して種類分けを行い、その種類の構成割合を測定した(表2)。Fragmentは岩片類であるが、CristobaliteやTridymiteなどの二次晶出した $\text{SiO}_2$ 鉱物と思われるものも含めている。Altered Mineralは元の鉱物が推定できたものだけとしている。Uncertainは、偏光顕微鏡での観察では特定できなかったが、岩片には分類できないものである。

一ノ池に堆積していた2014年噴火火山灰(表1-A)が二ノ池への流下物の供給源と考えられる。崩落部より上の雪面上に残っていた試料(表1-B)と崩落した雪の堆積層下側下面の凸部に付着していた試料(表1-D)はシルトに富み、崩落した雪の堆積層下側の地表面に堆積していた試料(表1-C)は、B、Dと比較するとシルトに乏しく、中粒砂に富む傾向が認められた。これは、2014年噴火火山灰(表1-A)が流下するときに分級し、CとB・Dに分かれたと考えられる。崩落斜面最下端の堆積物試料(表1-E)は、粗粒砂、中粒砂に富み、次に礫が富むという構成で、それより上部の採取試料の粒度構成とは異なる特徴を示した。二ノ池の中央部の堆積物試料(表1-G)はEと似た粒度構成を示した。二ノ池の火口縁手前の池(通称二・五ノ池)の縁(表1-F)と二ノ池山荘前の堆積物(表1-H)は、礫の割合が非常に多く、シルトは少ないという類似した特徴を示した。湯川の源頭部の雪面上の堆積物試料(表1-I)は、中粒砂と細粒砂が約9割を占め、ほぼ同じ割合であるという特徴を示した。Iからさらに下った雪堆積層崩落の直上の堆積物(表1-J)は、礫が7割を占める粒度構成を示した。

これら全ての構成粒子は、主要造岩鉱物が少なくFragmentに富む特徴を示した(表2)。特に雪崩破断面より上位に位置する一ノ池の堆積火山灰(表2-A)と雪面上に残っていた試料(表2-B)では、90%以上がFragmentに分類された。雪崩発生斜面上の(表2-C、D、E)ではFragmentの量比は80%台に減少した。二ノ池では、中央部を除くとFragmentの量比は70%台であった。PlagioclaseやOPX、CPXの量比は、Fragmentの量比が減少するにつれて増加する傾向が認められた。Fragmentの色は、一ノ池に堆積していた2014年噴火火山灰(A)から雪崩斜面上(C、D)では、黒色のものが多いのに対して、下流の通称二・五ノ池の縁Fから湯川源頭部(I、J)では茶色のものが多い。

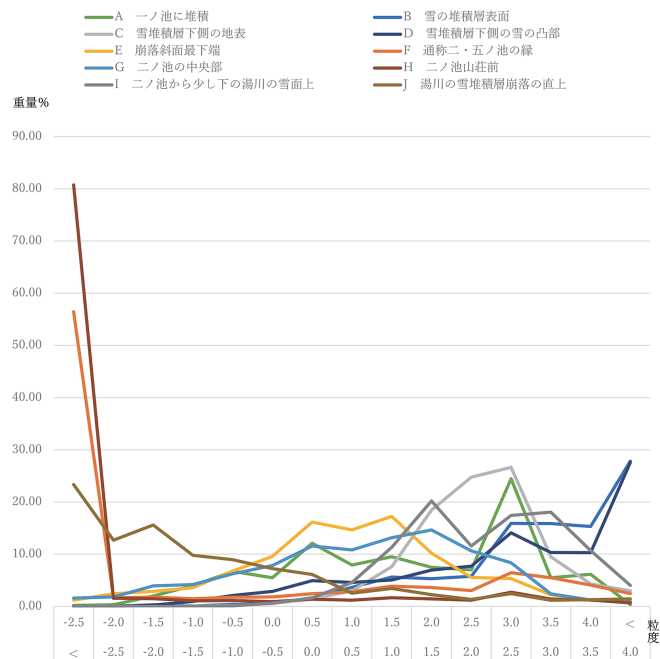


図8 堆積物の粒度分析結果。堆積物の採取地点は図7を参照。

表1 堆積物の粒度分析結果（重量％）。

堆積場所	礫	粗粒	中粒	細粒	シルト・粘土
A 一ノ池に堆積	13.18	25.51	24.00	36.06	0.36
B 雪の堆積層表面	0.79	5.85	16.70	47.07	27.83
C 雪堆積層下側の地表	0.27	4.93	50.83	40.47	2.97
D 雪堆積層下側の雪の凸部	3.26	12.37	19.72	34.72	27.58
E 崩落斜面最下端	16.82	40.39	32.99	8.76	1.43
F 通称二・五ノ池の縁	63.10	7.09	10.52	16.05	2.48
G 二ノ池の中央部	17.76	30.24	38.43	12.00	0.91
H 二ノ池山荘前	85.99	3.49	4.26	5.35	0.67
I 二ノ池から少し下の湯川の雪面上	0.09	6.82	43.09	46.14	4.04
J 湯川の雪堆積層崩落の直上	70.38	15.89	7.02	4.89	1.43

表2 堆積物の構成鉱物分析結果。

	Fragment	Altered mineral	Opaque mineral	Glass	Plagioclase	Alkali feldspar	Biotite	OPX	CPX	Hbl	Qtz	uncertain
A 一ノ池に堆積	90.0%	0.3%	2.7%	0.8%	5.3%	0.0%	0.0%	0.7%	0.1%	0.0%	0.0%	0.1%
B 雪の堆積層表面	94.5%	0.5%	0.0%	0.3%	4.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	0.0%	0.2%
C 雪堆積層下側の地表	84.7%	0.1%	1.0%	1.3%	9.2%	0.0%	0.0%	0.8%	1.4%	0.1%	0.0%	1.3%
D 雪堆積層下側の雪の凸部	88.8%	0.8%	0.5%	0.8%	8.6%	0.0%	0.0%	0.1%	0.2%	0.0%	0.0%	0.2%
E 崩落斜面最下端	86.4%	0.2%	0.2%	1.1%	9.5%	0.0%	0.0%	1.6%	1.1%	0.0%	0.0%	0.0%
F 通称二・五ノ池の縁	72.8%	1.1%	0.7%	2.3%	16.5%	0.0%	0.0%	3.0%	3.0%	0.2%	0.0%	0.4%
G 二ノ池の中央部	85.4%	0.7%	1.3%	0.4%	8.7%	0.0%	0.0%	1.8%	1.8%	0.0%	0.0%	0.0%
H 二ノ池山荘前	78.0%	1.5%	0.8%	2.9%	11.9%	0.0%	0.0%	1.1%	3.8%	0.0%	0.0%	0.0%
I 二ノ池から少し下の湯川の雪面上	77.2%	1.6%	1.1%	0.7%	13.0%	0.0%	0.0%	4.0%	1.9%	0.1%	0.0%	0.4%
J 湯川の雪堆積層崩落の直上	83.5%	1.5%	0.0%	1.1%	8.3%	0.0%	0.0%	2.1%	3.0%	0.2%	0.0%	0.4%



### 3.2. 雪崩モデル実験

2014年噴火の火山灰と水が全層雪崩発生にどのような影響があるのか確かめるため、木曾町開田高原、標高1150 mの野外（図2）で雪層の滑り出しやすさを調べるモデル実験を行った。自然雪の2層（下層部のベースは自然雪をバットに、上層部のブロックは同じ自然雪をステンレスの皿に入れ、実験時には下層部のベースはバットに入れたままで、上層部のブロックのみ皿から取り外したものをバットの中の雪に乗せる）を用いて、これらをゆっくりと傾斜させ、滑り出す角度を傾斜計で測定することで、滑り出し易さを評価した（図9）。実験当日の気温および雪の状態の違いによる影響を考慮し、それらの条件が異なるように日を違えて、4回の実験を実施した。実験場所の標高と実際の雪崩発生場所とは標高差において1800 mの違いがあるが、実験を1月～2月の間に行うことで、発生場所の5月の気温と雪の状態に近くなると考えた。また、実験ごとに2層間に火山灰や水を加えるなどの条件を変え、それらの影響を検証する個別実験を行った。火山灰は一ノ池に堆積していた2014年噴火火山灰（3.1, A）をそのまま使用した。2層間の条件は、上層部のブロックには手を加えず、下層部のベースについては以下の4種類で実験を行った。①：そのままの状態、②：水を加えた状態、③：表層に火山灰を塗布した状態、④：②または③の状態にそれぞれ水または表層に火山灰を塗布し、水と火山灰が両方存在する状態。実験はこれらの条件を順番に変えて、以下の2パターンで実験を行った；パターン1（①→②→④）、パターン2（①→③→④）。これは、水と火山灰の影響をそれぞれ単独で評価するためである。

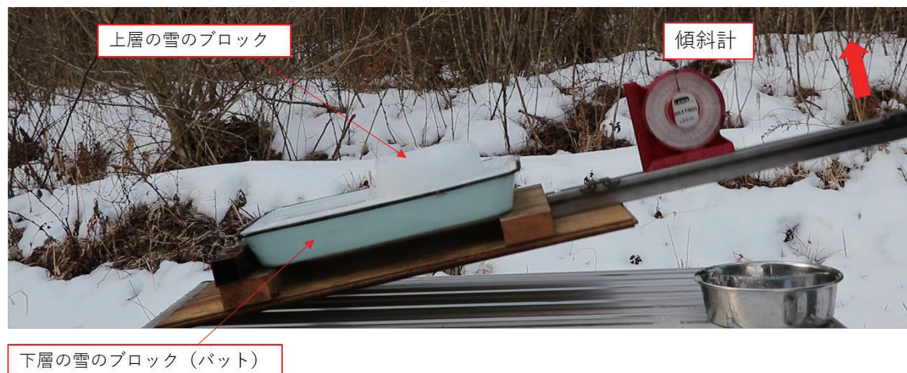


図9 雪崩モデル実験装置。

### 3.2.1. 第一回実験

2020年1月30日7時40分から8時30分にかけて、一回目の実験を行った（表3-a）。気温は、 $-2.3 \sim -0.9^{\circ}\text{C}$ （気象庁 HP の過去の気象データから）であった。雪の状態はザラメで、バットと皿に入れて突き固めたものを一晩屋外に放置し、使用した。ベースもブロックも共に雪のみの状態の場合（条件①）は、10回実施したが1回を除いて60度以上の傾斜まで滑り出さなかった。ベースを水に浸した状態の場合（条件②）もほぼ同様であったが、ベースに火山灰を追加した状態の場合（条件③、④）、先に水を加えているかいないに関わらず（パターン1、パターン2ともに）、ブロックは火山灰が無い状態（条件①、②）は14回中2回のみ滑ったのに対し、11回中11回滑るという結果であった。

### 3.2.2. 第二回実験

2020年2月6日16時00分から17時00分にかけて、二回目の実験を行った（表3-b）。気温は、 $-8.5^{\circ}\text{C}$ （気象庁 HP の過去の気象データから）であった。雪の状態は新雪で結晶が成長しておらず、気温が低いこともあって、結晶同士の結びつきが弱い状態であった。バットと皿に入れて突き固めたものを4時間屋外に放置したものを使用し、パターン1では、ブロックとベースの間に水が十分に入ることによる影響を見るため、ベース部に幅6cm 深さ3cmの溝をつくり、その溝の上にブロックを乗せて実験を行った。パターン2では、パターン1との違いを見るため、溝はつくらなかった。雪のみの状態（条件①）では、16回中2回を除いて、それ以外は60度以上の傾斜まで滑り出さなかった。その2回はパターン1の45度、パターン2の40度で、ベースに溝ありと溝無しはほぼ同じ結果であった。ベースを水や火山灰を加えた状態（条件②～④）では、9回実施したが、60度以上傾けても滑らなかった。

### 3.2.3. 第三回実験

2020年2月12日15時30分から16時20分にかけて、三回目の実験を行った（表3-c）。気温は、 $6.4 \sim 6.5^{\circ}\text{C}$ （気象庁 HP の過去の気象データから）であった。雪の状態は新雪で結晶が成長しておらず、空気を多く含んでいた。これをバットと皿に入れて突き固めたものを一晩屋内に放置して使用した。火山灰の有無に関わらず、ベースもブロックも水を含まない状態（条件①、③）では雪のブロックは6回実施したが滑らなかった。ベースを水に浸して、火山灰を塗布した場合（条件④）では、7回中2回、65度でブロックが滑ることが確認された。

### 3.2.4. 第四回実験

2020年2月20日10時45分から11時45分にかけて、四回目の実験を行った（表3-d）。気温は、 $1.5 \sim 3.1^{\circ}\text{C}$ （気象庁 HP の過去の気象データから）であった。雪の状態は、湿った新雪で結晶が成長しておらず、十分にザラメ化していない。これを型に入れて突き固めたものを使用した。火山灰の有無に関わらず、ベースもブロックも水を含まない状態（条件①、③）では10回実施したが、60度を超えても滑らなかった。火山灰を塗布した場合は21回中10回滑るときがあったが、低角で滑り出したのはパターン2の条件④の状態のときの45度の2回だけであった。

これらの4回の実験の結果から、下側のベースと上側のブロックの間に水に十分に混じり合った火山灰を挟在させた条件で滑りやすくなる傾向にあるが（第一回実験）、火山灰

の火山灰が水と十分に混じり合うことができなかった場合には滑らないこと（第二回，第三回実験）が分かった。火山灰の水溶性物質（gypsum など）が水に溶解し，火山灰が水と十分に混じり合うことが滑りやすくなる条件の一つと考えられる。気温が $-8.5^{\circ}\text{C}$ と低温では，水は氷結してしまい，接着剤の役目を果たしてベースとブロックが一体化して全く滑らず，むしろ，条件①で滑り出すことがあった（第二回実験）。これは，低温によって接合面が接着せずに表層雪崩に類似する現象が起きたと考えられる。雪の状態はザラメ状の場合に最も滑りやすく（第一回実験），新雪の場合には滑りにくい傾向にあった（第二～第四回実験）。以上をまとめると，火山灰と水が十分に混じり合うことが可能な程度の温度の水があり，雪が新雪ではなく，十分に融解凍結を繰り返して雪が水で飽和し，ザラメ化して雪粒同士が融着しない状態となっている場合，火山灰が，雪層の接合面のグライドを増大させる可能性があることが分かった。

表3 雪崩モデル実験結果。使用機器は図8、実験場所は図2を参照。>XXは、その角度まで滑り出さなかったことを示す。

(a) 第一回実験（実施日時：2020年1月30日7時40分～8時30分，気温：-2.3～-0.9℃，雪：ザラメ）

実験パターン	ベース	ブロック	一回目	二回目	三回目	四回目	五回目	六回目
			滑落角度（度）					
1 (水→火山灰の順に追加)	雪	雪	75 滑落，ブロック破損	>60 滑落前に止める	>60 滑落前に止める	>60 滑落前に止める		
	雪+水	雪	>60 滑落前に止める	45 滑落，ブロック破損	>60 滑落前に止める	>60 滑落前に止める		
	雪+水+火山灰	雪	45	44	42			
2 (火山灰→水の順に追加)	雪	雪	30 滑落，ブロック破損	>60 滑落前に止める	>60 ベース滑落，破損	>60 滑落前に止める	>60 滑落前に止める	>60 滑落前に止める
	雪+火山灰	雪	35	33	28			
	雪+火山灰+水	雪	28	30	32	32	30	

(b) 第二回実験（実施日時：2020年2月6日16時00分～17時00分，気温：-8.5℃，雪：新雪）

実験パターン	ベース	ブロック	一回目	二回目	三回目	四回目	五回目	六回目
			滑落角度（度）					
1 (水→火山灰の順に追加)	雪	雪	>70	>70 ベース脱落	>75	>70	>80	
	雪（幅6cm 深さ3cm溝）	雪	>80	45	50	>80	80	80
	雪（幅6cm 深さ3cm溝）+水	雪	>70	>70	>60 ベースが動いた			
	雪（幅6cm 深さ3cm溝） +水+火山灰	雪	>70 ベースが動いた	>70	>70 ベースが動いた			
2 (火山灰→水の順に追加)	雪	雪	60	40	>60	>60	>60	
	雪+火山灰	雪	>60	>60	>60			
	雪+火山灰+水	雪	>60	>60	>70			

(c) 第三回実験（実施日時：2020年2月12日15時30分～16時20分，気温：6.4～6.5℃，雪：新雪）

パターン	ベース	ブロック	一回目	二回目	三回目	四回目
			滑落角度（度）			
1 (水→火山灰の順に追加)	雪	雪	>70	>70	>70	
	雪+火山灰 （ブロック接地面より小さく）	雪	>70	>70	>70	
	雪+火山灰 （ブロック接地面全面）+水	雪	ベースが溶けてしまった			
2 (火山灰→水の順に追加)	雪（水を含ませる）	雪	70（わずかに滑って止まる）	>70	>70	
	雪（水を含ませる）+火山灰	雪	>70	>70	65	>70
	雪（水を含ませる）+火山灰+水	雪	65	>70	>70	

(d) 第四回実験（実施日時：2020年2月20日10時45分～11時45分，気温：1.5～3.1℃，雪：湿った新雪）

パターン	ベース	ブロック	一回目	二回目	三回目	四回目
			滑落角度（度）			
1 (水→火山灰の順に追加)	雪	雪	>70	>70	>70	
	雪+火山灰	雪	>70	>70	60	>70
	雪（水を含ませる）+火山灰	雪	>70	>70	80	70
2 (火山灰→水の順に追加)	雪	雪	>70	>70	>80	>70
	雪（水を含ませる）	雪	>60	>70	>70	
	雪（水を含ませる）+火山灰	雪	>70	>70	>70	
	雪（水を含ませる）+火山灰+水	雪	>70	60	45	70
	雪（水を含ませる）+火山灰（追加）+水	雪	>60	>70	60	
	雪（水を含ませる）+火山灰+水（追加）	雪	70	60	45	



### 3.3. 気象データ分析

雪崩モデル実験の結果、水が凍結せずに雪の中に浸透し、火山灰中の水溶性物質（gypsum など）が水に融解し十分に混じることが可能な適度な温度の水が存在する気温（実験では $-2.3^{\circ}\text{C}$ 以上）と水と火山灰が存在することで二ノ池雪崩は発生したのではないかと我々は考えた。それならば2014年噴火の翌年の春が火山灰の堆積量も多く、雪崩発生の可能性が最も高かったと考えられるが、2015年春から2018年春まで、そのような事例は報告されていない。そこで、2015年から2019年までの各3月から5月について、日別平均気温（図10）と日別降水量（図11）について比較検討した。また、湯川で泥流が発生した2011年についても併せて検討した。御嶽山（標高3,000 m）の気温は観測されていないので、開田高原（標高1,200 m）の気温データから標高差分の気温として、100 mあたりの遞減率を $0.6^{\circ}\text{C}$ として $-10.8^{\circ}\text{C}$ を減じた値を山頂部の気温として使用した。なお、2014年～2016年に新潟大学災害・復興科学研究所が観測した田ノ原（標高2,200 m、図2）の気温データを元に標高差を補正して求めた山頂の気温も、気象庁の開田高原の値を元に求めたものとはほぼ同様であったため、開田高原の値を元に補正した気温値は妥当なものだと考える。

#### 3.3.1. 2019年（雪崩および泥流発生）

2019年は3月から降水量が多く、4月中旬以降、日平均気温の上昇と下降の変動幅が、数日から1週間程度の間に $9^{\circ}\text{C}$ 近くになるなど急で、降水もあったことから、雪堆積層は融解と凍結のプロセスを繰り返していたと考えられる。5月15日以降、日平均気温はプラスに転じ、雪の融解が進み、降水もあったことから雪堆積層中の水分量が増加していったと考えられる。日降水量が5月20日に10.5 mm、5月21日に90.5 mm、1時間降水量が5月21日の4時から7時にかけて、13.0～19.5 mmであり、この間の気温は $1.0\sim 2.9^{\circ}\text{C}$ であることから、5月21日夜半から早朝にかけて集中的に大量の降雨があった（表4）。5月21日9時の700 hPaの高層天気図（図12）を見ると、日本の北には強い低気圧、太平洋上にも弱い低気圧があり、日本列島には南南東からの強く湿った気流が流れ込んでいたことがわかる。

#### 3.3.2. 2011年（泥流発生）

2011年の降水量は、2月、3月から増え、4月下旬以降さらに増えた。4月下旬から、2019年と同様に温度上昇と下降の変動が、数日から1週間程度の間に $9^{\circ}\text{C}$ 近く変わるなど急で、降水もあったことから、雪堆積層は融解と凍結のプロセスを繰り返していたと考えられる。5月以降、平均気温はプラスに転じ、降水量が急激に増えた。降水量の日別合計が5月10日に103.5 mm、5月11日に143.5 mm、5月12日に41 mm、1時間降水量の最大がそれぞれ、16 mm、17.5 mm、7 mmと観測されている。平均気温は $1.6\sim 4.5^{\circ}\text{C}$ で、この3日間に集中的に大量の降雨があったことが示されている。そして、2019年と同様に短時間での集中した降雨があったのは、5月11日の12:00～18:00である（表5）ことから、この間、あるいは間をおかずに崩落が発生したと考えられる。

#### 3.3.3. 2015年（木曽御嶽山水蒸気噴火直後）～2017年

2015年と2017年は、降水量が多く観測されている日もあるが、平均気温が低いため、山頂付近では降雪時間が降雨時間よりも卓越していたと考えられる。2016年は、非常に多い

降水量が観測されていて、平均気温がプラスであることから、大量の降雨があったと考えられる。これらの年の4月から5月にかけての平均気温の変動は激しくなく、緩やかに上昇している。このため、融雪は穏やかに進化したと考えられる。

#### 3.3.4. 2018年

2018年は、激しい気温の変動が4月上旬と5月上旬にある。この点は2019年5月21日の状況と似ている。3月に至るまで、多い降水量は観測されておらず、4月に106.5 mm, 108.5 mm と多い降水量が観測されたが、平均気温は $-3.3^{\circ}\text{C}$  と $1.0^{\circ}\text{C}$  と低めであったことから、降雪であったと考えられる。そして、平均気温がプラスに転じた5月中旬以降において、著しい降水量が観測されていないことが、2019年の気象状況との違いである。

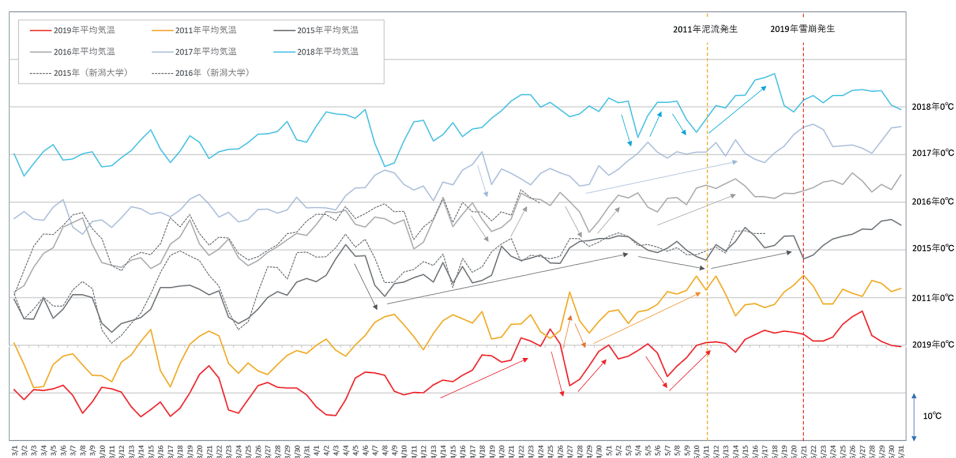


図10 外挿した木曾御嶽山山頂付近の3月から5月の日別平均気温変化。実線は気象庁の開田高原のデータから外挿した値。点線は新潟大学が設置した田ノ原のデータから外挿した値。矢印は平均気温変化の傾向を示す。

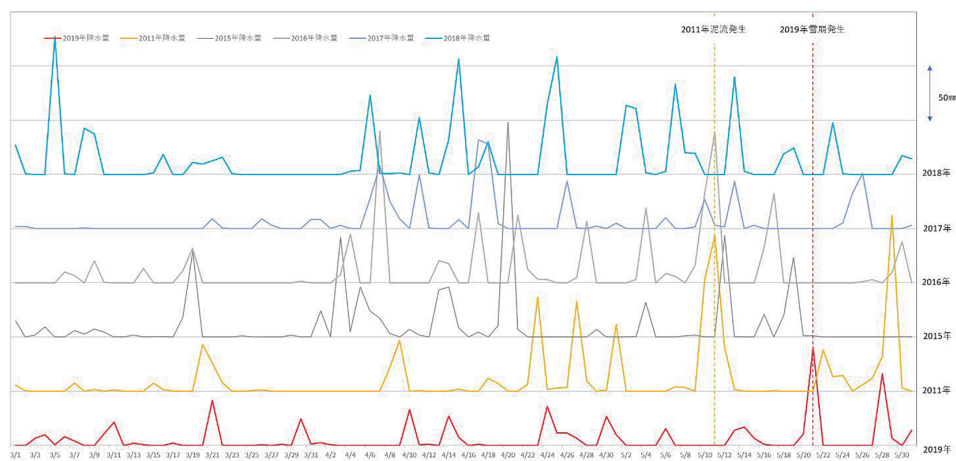


図11 気象庁観測点「御嶽山」で観測された3月から5月の日別降水量の年別変化。

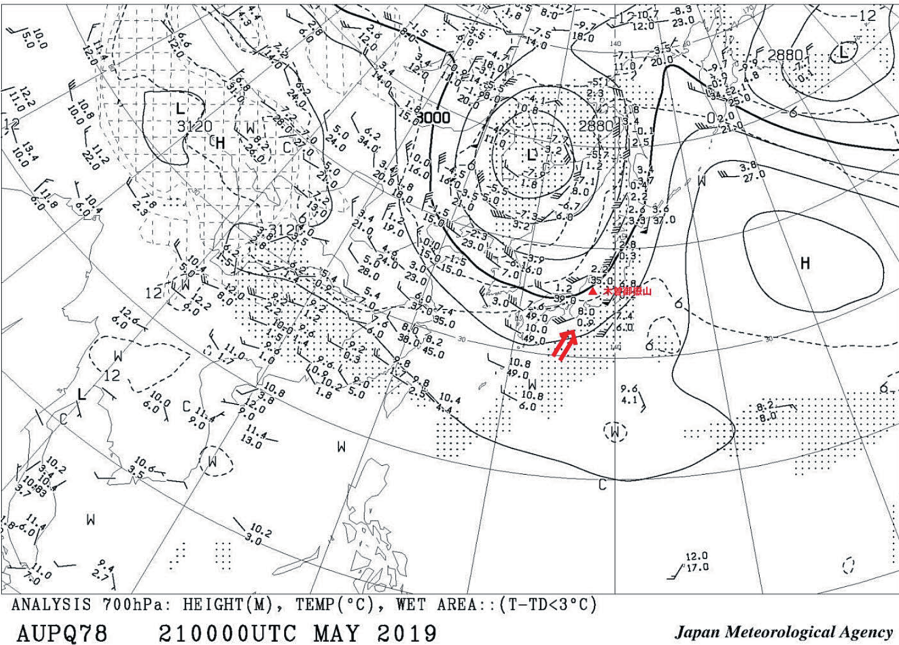


図12 2019年5月21日9時の700 hPa 高層天気図（気象庁）に加筆。赤三角印が  
木曽御嶽山、矢印が風向を示す。

表4 2019年5月の開田高原と御嶽山の気象データ（気象庁）。御嶽山の気温は開田高原  
の値から外挿。

年月日時	開田高原		御嶽山	
	気温 (°C)	降水量 (mm/hour)	気温 (°C)	降水量 (mm/hour)
2019/5/20 18 : 00	14.6	0	3.8	0
2019/5/20 19 : 00	12.5	0	1.7	0
2019/5/20 20 : 00	11.4	0	0.6	0
2019/5/20 21 : 00	11.1	0.5	0.3	1
2019/5/20 22 : 00	11	2.5	0.2	5
2019/5/20 23 : 00	10.8	2	0	3
2019/5/21 0 : 00	10.7	0.5	-0.1	1.5
2019/5/21 1 : 00	11	0.5	0.2	1.5
2019/5/21 2 : 00	10.9	3.5	0.1	5
2019/5/21 3 : 00	11.3	6	0.5	7.5
2019/5/21 4 : 00	11.8	8.5	1	13
2019/5/21 5 : 00	12.4	12.5	1.6	18
2019/5/21 6 : 00	12.9	16.5	2.1	19.5
2019/5/21 7 : 00	13.7	11.5	2.9	17
2019/5/21 8 : 00	13	5.5	2.2	4.5
2019/5/21 9 : 00	12.8	1.5	2	2.5
2019/5/21 10 : 00	12.2	2.5	1.4	2
2019/5/21 11 : 00	13.2	0	2.4	0
2019/5/21 12 : 00	17.4	0	6.6	0
2019/5/21 13 : 00	17.6	0	6.8	0



表5 2011年5月の開田高原と御嶽山の気象データ（気象庁）。御嶽山の気温は開田高原の値から外挿。

年月日時	開田高原		御嶽山	
	気温 (°C)	降水量 (mm/hour)	気温 (°C)	降水量 (mm/hour)
2011/5/10 0 : 00	13.8	0	3	0
2011/5/10 1 : 00	13.8	0	3	0
2011/5/10 2 : 00	14.3	0	3.5	1.5
2011/5/10 3 : 00	15.4	0.5	4.6	2
2011/5/10 4 : 00	16.8	0.5	6	2
2011/5/10 5 : 00	16.2	0	5.4	5
2011/5/10 6 : 00	16.7	0	5.9	2
2011/5/10 7 : 00	16.3	0.5	5.5	2
2011/5/10 8 : 00	16.1	2	5.3	3.5
2011/5/10 9 : 00	16	4.5	5.2	8.5
2011/5/10 10 : 00	16.4	5	5.6	11
2011/5/10 11 : 00	16.4	3	5.6	12
2011/5/10 12 : 00	16.3	3.5	5.5	4
2011/5/10 13 : 00	16.1	7	5.3	7.5
2011/5/10 14 : 00	16	7	5.2	15.5
2011/5/10 15 : 00	16.4	7	5.6	6.5
2011/5/10 16 : 00	16.3	3	5.5	2.5
2011/5/10 17 : 00	15.9	3	5.1	5
2011/5/10 18 : 00	15.6	5.5	4.8	5
2011/5/10 19 : 00	15.3	2.5	4.5	2
2011/5/10 20 : 00	13.9	1.5	3.1	1.5
2011/5/10 21 : 00	13.4	0	2.6	0.5
2011/5/10 22 : 00	12.7	0.5	1.9	3.5
2011/5/10 23 : 00	12.6	0	1.8	0
2011/5/11 0 : 00	12.5	0	1.7	0.5
2011/5/11 1 : 00	12.3	0.5	1.5	0.5
2011/5/11 2 : 00	12.2	1	1.4	2.5
2011/5/11 3 : 00	12.2	3	1.4	4
2011/5/11 4 : 00	11.8	5.5	1	4
2011/5/11 5 : 00	11.6	3.5	0.8	5
2011/5/11 6 : 00	11.7	0	0.9	1.5
2011/5/11 7 : 00	11.7	0.5	0.9	3
2011/5/11 8 : 00	10.7	1	-0.1	4.5
2011/5/11 9 : 00	10.8	3.5	0	11.5
2011/5/11 10 : 00	10.9	4	0.1	6
2011/5/11 11 : 00	11.2	5	0.4	7.5
2011/5/11 12 : 00	11.8	1	1	6.5
2011/5/11 13 : 00	12.2	8.5	1.4	16.5
2011/5/11 14 : 00	12.4	10	1.6	11
2011/5/11 15 : 00	12.4	4.5	1.6	10.5
2011/5/11 16 : 00	13.1	6	2.3	10
2011/5/11 17 : 00	14.5	3.5	3.7	5
2011/5/11 18 : 00	14.2	7.5	3.4	13.5
2011/5/11 19 : 00	13.5	6	2.7	9
2011/5/11 20 : 00	13.3	5.5	2.5	5.5
2011/5/11 21 : 00	13.4	4.5	2.6	4
2011/5/11 22 : 00	13.7	0.5	2.9	1
2011/5/11 23 : 00	13.3	0	2.5	0.5

## 4. 考察

### 4.1. 雪崩発生要因

現地調査の観察結果（2.2. 観察結果に記載）と分析・実験結果（3. 分析および実験に記載）から、以下のように雪崩の発生プロセスを考察した。

#### 4.1.1. 雪崩発生前

一ノ池から二ノ池にかけての斜面には、3 m 厚程度の雪堆積層があり、その底部には、3 月以降の湿った雪や降雨（図11）と4 月以降の気温の急激な上昇と下降（図10）に伴って、氷化した層が形成されていた（図3）。上流の一ノ池には、2018年9月の時点で、少なくとも層厚40 cm 以上の2014年噴火火山灰が堆積しており、それらは噴火以降、侵食作用により継続的に水とともに二ノ池へ流れ込んでいた。6月13日の観察で、水抜けパイプ、底部のアーチが確認でき（図5、写真2）、火山灰が雪堆積層底部のアーチに付着していたことから、雪堆積層底部いっばいに火山灰混じりの水が流れていたと考えられる。また、5月22日の観察においても、雪堆積層の底部に火山灰混じりの水が流れていたことは確認されている。以上のことから、雪崩発生前に雪崩発生斜面の雪堆積層底部には火山灰を含んだ水の流路が存在していたと考える。

#### 4.1.2. 雪崩発生時

2019年5月10日以降は、日最高気温が10℃を超え、日平均気温も1℃以上が観測されている（図10）。そのため、雪堆積層はザラメ化していたと考えられ、5月20日夜から5月21日朝にかけて集中的に降った雨が、雪堆積層にしみ込んだが、下部には不透水層が存在するため、雪堆積層は水によって飽和していき不安定化していったと考えられる。5月20日の気温は、降水量が観測され始めた21時以降で0℃以上、5月21日の気温は多い降水量が観測された3時から7時にかけて1℃以上であり（表4）、雪崩モデル実験の第一回実験（表3-a）の条件に近く、雪堆積層底部に流れ込んだ火山灰混じりの水は、底部のグライド増加を促進し、先の飽和による不安定化とともに雪堆積層は滑り易くなっていたと考えられる。

雪崩の発生斜面は、破断面から二ノ池までの地形は、平均斜度24度で、破断面付近では斜度34度、二ノ池手前では12度と上部から下部へと傾斜が緩くなっている。そのため、水の流速も下部に行くほど低下し、水の飽和層は斜面の上部よりも下部において厚くなっていたと考えられる（Gude et al., 1998）。そのため、下部の雪堆積層の重量は増加し、その底部を流れる水も増加して浮力も増したことで、下部の雪堆積層が上部より不安定化していき、下部の雪堆積層から崩落が始まったと推察される。破断面②より上部では雪面が白い状態で火山灰噴出痕が無い。そして、破断面②に沿って薄く面状に広がった火山灰流出痕が見られ、顕著な火山灰噴出痕が破断面②と破断面③の間の中間部の崩落斜面中央に見える。同じように破断面③より下部においても面状に広がった火山灰流出痕が見られ、顕著な火山灰噴出痕が中間部の崩落斜面中央に見える（図4）。これらの観察から見て、破断面②より下部において、雪堆積層の底部に流れる水は多く、水の飽和層が厚くなっていたと考えられ、破断面②もしくは破断面③から崩落が始まった可能性が高い。その後、下部の雪堆積層の崩落によって支えを失った上部も不安定になって崩落したと考えられる。

崩落した雪堆積層のブロックは、転動することなく滑走した状態で滑り落ちたが、一部は碎けて散らばり、二ノ池に扇状に雪のデブリ堆積を残した（写真1）。雪崩は二ノ池を滑走し、通称二・五ノ池手前の高まりに乗り上げながらその場の堆積物を削った。一部はその場に停止したが（図12）、一部は二ノ池火口縁に乗り上げ溢流し、その他は、土砂を含む泥流となって、湯川へと流れ下ったと考えられる（写真5-a）。これは、堆積物の構成鉱物の割合から、雪崩発生斜面上では、fragmentの色は黒いものが多く、2014年噴火による堆積物の割合が多いことを示すのに対して、通称二・五ノ池の縁から下流では、fragmentの色は茶色いものが多く、古い噴火による噴出の堆積物の割合が増していることを示すこと整合的である（表2）。湯川源頭部から湯川の雪堆積層破断面までの雪面上には、溝状の水路が形成されていて、流路が曲がる箇所では外側に流下堆積物が広がっていることなどから、大量の水に流下物を含んだ状態であったと考えられ、二ノ池から下流では泥流となっていた可能性が高い（写真5-a, 写真6）。

#### 4.2. 雪崩の発生メカニズム

國友ほか（2019）では、今回の雪崩を大量の水を含んだ雪が雪泥（スラッシュ）化して流動するスラッシュ雪崩と報告した。

スラッシュ雪崩については、富士山において多くの調査、研究が為されており、その発生要因として、時田（1993）では、地表面が不安定な火山噴出物で覆われていること、多量の積雪があること、斜面の表層が凍結し、難透水層を形成していること、凍結層がある程度融解し、不安定な状態になること、急激な気温上昇があること、降雨による水の供給が行われることを条件に挙げている。また、中川ほか（2009）では、積雪（凍土増）の存在、日本海を低気圧が東進、気温上昇、激しい降雨、富士山山頂付近の気温が0℃以上を条件に挙げている。今回の御嶽山の雪崩の発生環境もこれらの条件に合致するところが多い。しかしながら、雪泥流とスラッシュ雪崩の定義については、過去の研究において、以下のように提唱されている。

Gude et al. (1998) では、スラッシュ雪崩という用語は、湿った雪崩との混合を意味するが、雪泥の臨界量の形成の十分な要素ではなく、放出を決定する要因は水位から求められた水理量であり、雪崩の定義とは異なるということから、別の用語スラッシュ・トレント（Slush Trent）を推奨し、雪泥流の高エネルギーの流れとしている。

亀田ほか（2017）では、雪泥は、融雪が急激に進んだり、強い降雨で積雪の空隙が水で満たされると、雪は液体に近い性質をもつようになるものとしており、小林ほか（1998）では、雪泥流は、積雪が水で飽和して流動する雪と水の混相流体であるとされ、スラッシュ雪崩は、「雪泥雪崩」と呼ぶことが提案されている。

スラッシュ雪崩は、多量の水を含んだ雪（スラッシュ）が山腹斜面を流下する雪崩であり、積雪中の水層や凍結した地面が不透水層となっているとき、急激な融雪や強い降雨があると雪は多量の水を含み、雪と水の混相流となり斜面を流下すると定義されており（日本雪氷学会, 2014）、一般的な雪崩とは異なるとされている（Gude et al., 1998）。

論者によって違いがあるが、雪泥化して崩落するという点は一致している。

雪崩の発生直後の5月24日に観察した時点では、発生点が面状であり、破断面・滑り面

が鮮明で、雪崩の発生点より上部にクラックの発生が見られるなど、地盤面上の残雪堆積層が全層に渡って崩落していることが確認できた。二ノ池の雪崩堆積物にはブロック状の比較的大きい雪塊が多く含まれ、6月13日まで堆積構造が観察できる程度に保存されており、崩落前の積雪堆積構造をそのまま残していたことから(図6)、少なくとも雪崩の中心部分は雪泥化していなかったことを示唆しており、むしろ、秋田谷ほか(1998)が示している破断面が面で発生し、滑り面が地面という面発生の全層雪崩の特徴を多く示しており、面発生の全層雪崩が発生したと考える。二ノ池に扇状に広がった水で飽和したデブリ堆積物が存在していたこと、二ノ池から湯川に至る流下痕跡に、レヴィ状の堆積物や雪面上に穿たれた溝状の水路跡(写真6)のような雪泥流の特徴が見られたことから、二ノ池から湯川にかけては、雪泥となって流下した可能性があるが、発生時点では、面状に破断し、ブロックとして崩落したと見るべきで、今回の雪崩は、スラッシュ雪崩ではなく、秋田谷ほか(1998)の分類に従って、面発生湿雪全層雪崩とするのが適当と考える。

雪崩の発生時刻の想定は、國友ほか(2019)によれば、5月21日午前6時40分頃とされている。気象庁の御嶽山雨量計の当日のデータで、午前3時から7時にかけて、時間雨量20 mm 近い降雨が観測されており(表4)、雪崩の発生の直接的な原因は、大量の雨が短時間集中して降ったことであると言えるだろう。しかし、大量の降雨のみで、今まで雪崩が発生したことが無い場所でサイズ4という大規模の雪崩が発生したとするには不十分である。なぜならば、2011年5月においても、1時間当たり15 mm を超す降水量が観測されており、このときは、5月10~11日の2日間にわたって降り続いており、5月10日は103.5 mm、5月11日は143.5 mm と2019年5月21日の90.5 mm を大幅に超えていた(表5)にも関わらず、湯川上流部からの雪堆積層の崩落と泥流は発生したが、一ノ池から二ノ池への斜面で雪崩は発生していないからである。

2011年と2019年の環境条件の大きな違いは、2014年噴火による火山灰の有無であると考ええる。2014年の噴火で一ノ池に堆積した火山灰が水と共に流下している事実と火山灰が挟在することによって雪ブロックが滑りやすくなるという実験結果が、この火山灰の存在が雪崩発生を左右したと示唆している。また、火山灰によるモルタル状皮膜の形成によって、水の浸透能低下を引き起こし(恩田ほか, 1996)、発生した表面流によって、土石流や出水を発生させる要因となっている(Jitousono et al., 1997)とあり、雲仙岳の火山灰の例では、降雨後の最終浸透能が土石流発生限界雨量とほぼ一致するという結果が得られている(小橋ほか, 1994)。2014年の噴火以降、一ノ池から二ノ池へ火山灰の流出は続き、雪崩発生斜面の流路にも礫の間に火山灰堆積が存在していた。2014年噴火火山灰は粘土質火山灰であり(Ohba et al., 2005; Oikawa et al., 2018)、火山灰を含む水が流下して火山灰が堆積すれば、雪堆積層と地面の間に不透水層を形成し(恩田ほか, 1996; 松下ほか, 2013)、融雪水・降水の地面への浸透が妨げられ、残雪堆積層の飽和度が高くなり、底部の水量増加を促し、集中的に降った大雨によって、火山灰が雨水と共に雪堆積層の底面へと流れ込んだことによって、雪堆積層底面のグライドが高められたことで崩落が発生し、面発生の全層雪崩となったと考える。



## 5. まとめ

木曽御嶽山で2019年5月21日朝に発生した二ノ池雪崩の現地調査を行い、崩落状況を観察するとともに、雪崩によって運ばれた堆積物の分析と、2014年火山灰を用いた雪崩のモデル実験を行った。その結果、二ノ池雪崩は先行研究（國友ほか，2019）が報告したようなスラッシュ雪崩として発生したのではなく、面発生全層雪崩として発生したことが明らかとなった。その後、二ノ池から下流の湯川を流下する時点では雪泥化していた可能性が高いと考える。

堆積物の粒度分析および鏡下観察の結果、上流では2014年噴火火山灰が卓越しており、下流では2014年噴火より以前の古い堆積物が混じっていた。現地での観察と併せて、雪崩発生斜面の雪堆積層には、雪崩発生前から2014年噴火火山灰が雪面と底部に流入しており、雪崩は流下する時に2014年噴火より以前の古い堆積物を巻き込んだことがわかった。また、雪崩発生斜面の雪堆積層最下層には氷化層が存在することもわかった。雪崩のモデル実験の結果、下層の雪が氷化していて、水と火山灰が十分に混合された状態で上層と下層の雪の間に挟在させた場合に滑りやすくなることがわかった。これらの事実から、2014年噴火火山灰と氷化層の存在が雪崩発生の一つの要因であったと考えられる。

今回の雪崩発生前と、それ以前の気象データを検討した結果、2019年には融雪期において、0℃をまたぐ大きな気温の変動があり、雪崩発生日には南南東からの強く湿った気流が流れ込んで大量の降水量（降雨と思われる）があったことがわかった。融雪期に0℃をまたぐ大きな気温の変動によって、雪堆積層中の氷化層形成が促進され、2014年噴火火山灰堆積層が上部の一ノ池に存在することで、粘土質に富んだ火山灰が雪崩発生斜面に供給され続けることで、難透水層が形成されていたと考えられる。そして、短時間に多量の降雨が発生するような気象条件下では、難透水層より上の雪堆積層中の水の飽和が進むことで、雪堆積層が不安定化する。また、水が粘土質の火山灰とともに雪堆積層底部に流入することによって、堆積雪層底部のグライドの増大が発生し、雪堆積層が不安定化する。これらの要因が重なったことによって、今回の雪崩が発生したと考える。

## 6. 謝辞

新潟大学災害・復興科学研究所の河島教授には、雪氷学に関する基礎的な文献について教授いただいたとともに、2014年～2016年の田ノ原の気温データをご提供していただいた。また、査読者の榊原厚一助教および山田昌樹助教には有益なご助言を頂き、本稿は大きく改善された。以上の方々に深く御礼申し上げます。

## 7. 引用文献

- 秋田谷英次・遠藤八十一，1998，雪崩の発生機構（雪崩）．気象研究ノート，**190**，1-17.
- Gude, M., and Scherer, D., 1998, Snowmelt and slushflows: hydrological and hazard implications: *Annals of Glaciology*, **26**, 381-384.
- 池谷 浩・米沢谷誠悦，1978，1977年有珠山噴火に伴う火山噴出物の分布とその影響．土木技術資料，**20**（10），534-539.

- Jitousono, T., Nagata, O., Teramoto, Y., and Shimokawa, E., 1997, Surface Runoff on Hillslope Covered by Pyroclastic Flow Deposit and Volcanic Ash in Unzen Volcano. 砂防学会誌, **49** (5), 42-48.
- 亀田貴雄・高橋修平, 2017, 雪氷学, 古今書院, 349p.
- 小橋澄治・水山高久・小杉賢一朗・ヘンドロヤント, 1994, 雲仙火山における降下堆積物の浸透特性. 砂防学会誌, **47** (1), 47-50.
- 小林俊一・和泉 薫, 1998, 雪泥流(雪崩) -- (雪崩の内部構造と運動). 気象研究ノート, (190), 83-90.
- 國友孝洋・田ノ上和志・堀川信一郎・山中佳子, 2019, 御嶽山二ノ池で発生したスラッシュ雪崩. 日本火山学会講演予稿集, 2019, 231.
- 松下拓樹・笠村繁幸・池田慎二・伊東靖彦・原田裕介・上田真代・松澤 勝・中村 浩, 2013, 斜面と平地における積雪内の水の浸透に関する現地実験. 雪氷研究大会講演要旨集, 2013, 213.
- 中川達也・荒木孝宏・三輪賢志・石井靖雄・小川紀一朗・千葉達朗・佐野寿聰, 2009, 富士山周辺で発生するスラッシュ雪崩の発生条件の検討. 砂防学会誌, **62** (2), 56-59.
- 日本雪崩ネットワーク, 2017, 気象・積雪・雪崩の観察と記録のガイドライン, 102.
- 日本雪氷学会 公益社団法人, 2014, 雪氷辞典, 307p.
- 日本雪氷学会 社団法人, 2005, 雪と氷の事典, 760p.
- Ohba, T., and Kitade, Y., 2005, Subvolcanic hydrothermal systems: Implications from hydrothermal minerals in hydrovolcanic ash: Journal of Volcanology and Geothermal Research, **145**, (3-4), 249-262.
- 及川輝樹・山岡耕春・吉本充宏・中田節也・竹下欣宏・前野 深・石塚吉浩・小森次郎・嶋野岳人・中野 俊, 2015, 御嶽山2014年噴火. 火山, **60** (3), 411-415.
- Oikawa, T., Oba, T., Fujinawa, A., and Sasaki, H., 2018, Geological study of phreatic eruptions: Journal of the Geological Society of Japan, **124**, (4), 231-250.
- 恩田裕一・竹中千里・水山高久, 1996, 雲仙火山灰が浸透能低下を引き起こす原因. 砂防学会誌, **49** (1), 25-30.
- 御嶽山降灰合同調査班, 2014, 御嶽山2014年9月27日噴火による降灰分布, 火山噴火予知連絡会会報, **119**, 96-101.
- 時田和廣, 1993, 富士山に発生するスラッシュ雪崩について. 砂防学会研究発表会, **42**, 4.



写真1 発生した雪崩の全景。2019年5月24日撮影。撮影位置は図7のF通称二・五ノ池の縁。



写真2 破断面下部。2019年6月25日撮影。撮影位置は図7の破断面最上部。



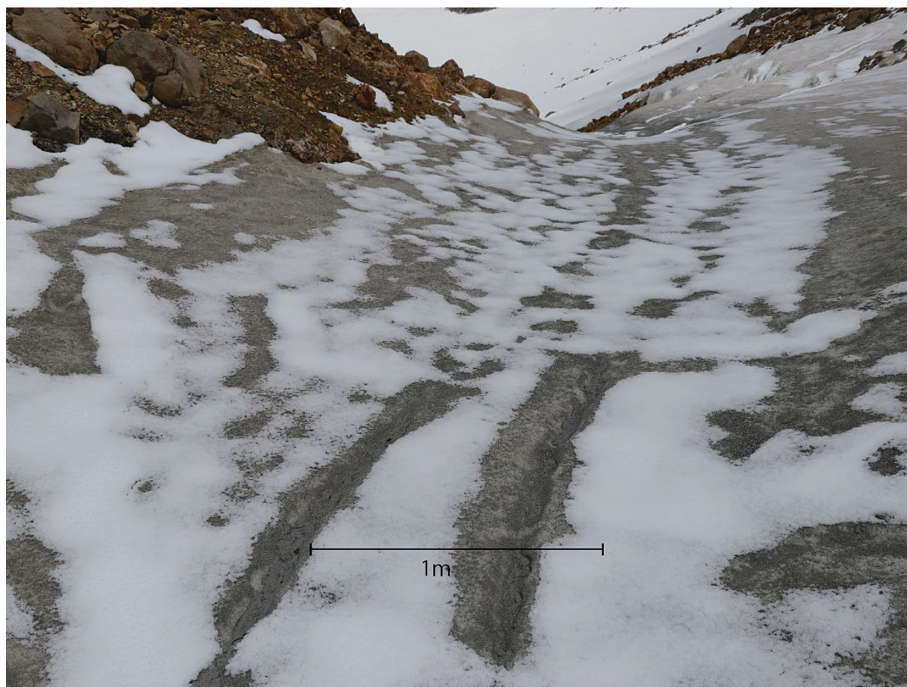


写真3 破断面より上の積雪層。観察直前の降雪によって、雨裂に雪が載っている。  
2019年6月13日撮影。撮影位置は図7のB雪の堆積層表面。

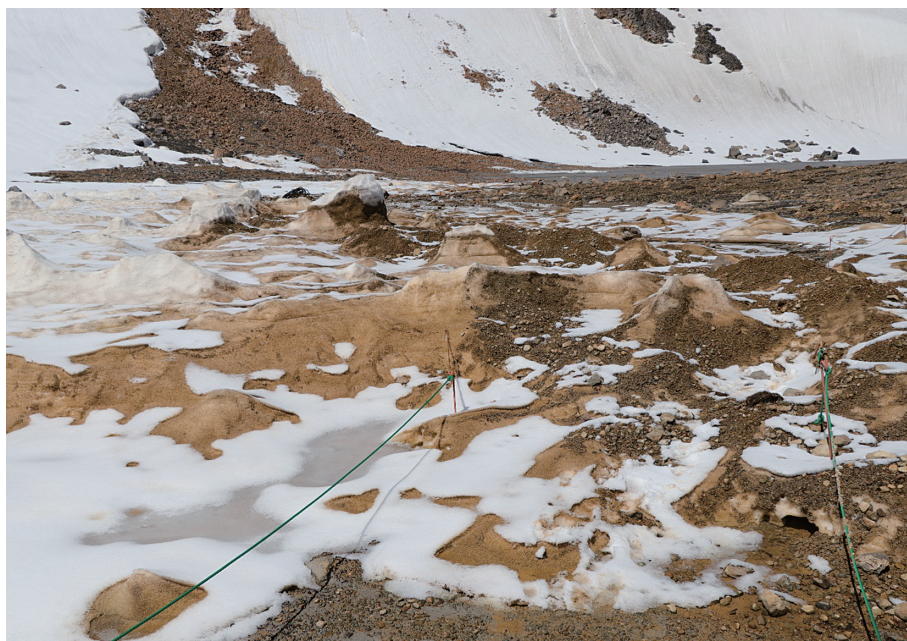


写真4 二ノ池東側に残っていたデブリ。2019年6月13日撮影。撮影位置は図7の雪崩デブリ東側端とF通称二・五ノ池の縁の中間。





写真5 湯川に発生した泥流。開田高原から撮影（位置は図2参照）。  
(a) 2019年5月23日撮影。(b) 2011年5月15日撮影。

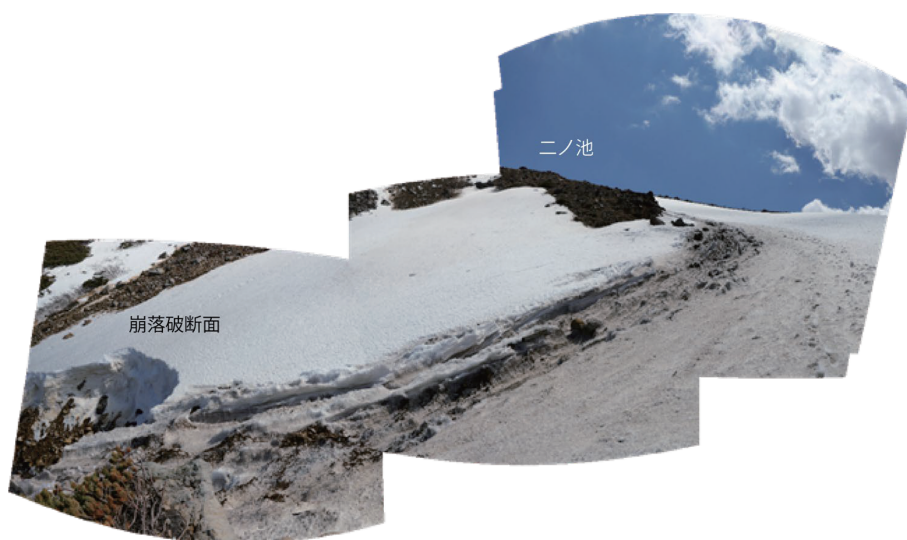


写真6 湯川上流部の崩落。2019年5月24日撮影。撮影位置は図7の湯川崩落破断面。