

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：13101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23651179

研究課題名(和文) 雪崩発生原因としての表面霜形成における過冷却霧の役割の実証的研究

研究課題名(英文) Study on the contribution of super-cooled fog to the formation of greatly grown surface hoar as a cause of avalanche release

研究代表者

和泉 薫 (IZUMI, Kaoru)

新潟大学・災害・復興科学研究所・教授

研究者番号：50114997

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円、(間接経費) 600,000円

研究成果の概要(和文)：表層雪崩のすべり層となる弱層の種類に表面霜がある。この表面霜は放射冷却で冷えた雪面に大気から過剰水蒸気が供給されて気相成長すると考えられてきた。本研究は、弱層になりうるような発達した表面霜は、過冷却霧(雲)に覆われることで新雪や気相成長した表面霜からなる雪面に過冷却水滴が付着して形成されることを明らかにした。また、発達した表面霜の弱層が形成された直後に大量の降雪があれば、表層雪崩の発生に直結するが、そのような気象条件の組み合わせは頻度的に稀であることも明らかにされた。

研究成果の概要(英文)：Surface snow is one of snow types on sliding layer of surface snow avalanches. It has been considered that surface hoar developed by supply of excess atmospheric vapor to radiation-cooled snow surface.

This study revealed that greatly grown surface hoar, which could become sliding layer snow of surface snow avalanche, was formed by attaching of super-cooled droplets in super-cooled fog/cloud covering snow surface of newly fallen snow or lightly grown surface hoar, and that heavy snowfall just after developing surface hoar directly led to the release of surface snow avalanche. However, the successive combination of above two meteorological conditions was revealed to hardly occur under normal change of weather in actuality.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学、自然災害科学

キーワード：表層雪崩 表面霜 弱層 過冷却霧 気相成長

### 1. 研究開始当初の背景

表層雪崩は一般に積雪内の相対的に弱い薄い雪層(弱層)をすべり面として発生する。この弱層の種類の一つが表面霜で、積雪の表面に大気中の水蒸気が昇華凝結して形成されるとされてきた。このような表面霜の形成とそれによる表層雪崩の発生過程は、国内外とも雪氷学分野では定説となっている。

研究代表者の和泉は、国内外における雲中山岳地の雪面、未凍結河川脇や消雪パイプ敷設道路脇の雪面等で、表面霜と似た霜の結晶を観察してきた。これらは過冷却微水滴が関与しているはずにもかかわらず付着した凍結水滴は少なく、あたかも定説通り大気中の水蒸気が昇華凝結して形成された表面霜のように見えた。しかし油川英明(2003)によって、“雪結晶は過冷却水滴の結晶化で生成されることが実験的に確かめられ、天然の雪結晶が、水蒸気の大いなる過飽和度を必要とせず雲粒を含んだ水飽和の雪雲の中で十分に生成する”ことが示された。これはまさに過冷却霧に覆われた雪面で過冷却微水滴の結晶化で表面霜の結晶が十分生成することを示唆している。

また、平成 18 年豪雪時に秋田県仙北市付近で集中して発生した表層雪崩災害現場を現地調査したところ、河川など凍結していない開水面脇にある斜面から表層雪崩が発生しており、特に犠牲者の出た鶴の湯温泉では、濛々と湯煙の上がっている露天風呂横の斜面が発生源であった。これら表層雪崩となった新雪が降る直前には、降雪のほとんどない低温状態が継続し開水面からの過冷却霧で雪面に表面霜が形成されやすい状況下であったことが確かめられた(和泉, 2007)。

これら論文および現地調査から本研究の着想に至ったものである。

### 2. 研究の目的

本研究は、雪結晶の成長に関する新しい研究成果と平成 18 年豪雪時に秋田県内の温泉地帯で多発した表層雪崩災害の現場調査を基に、表層雪崩の発生原因となる表面霜が、これまでの定説である大気中の水蒸気の雪面への昇華凝結という気相成長だけによるものではなく、過冷却水滴の結晶化が主であることを、低温室での室内実験及び積雪寒冷山地での現場観測から実証することを目的とする。

### 3. 研究の方法

無雪期に既設の低温実験室において、保存雪の表面に超音波霧化器によって発生させた過冷却霧をファンで吹き付け、過冷却水滴の結晶化によって表面霜が急速に発達することを実証する。さらに過冷却水滴の大きさ・温度、気温、表面雪温、風速、湿度など表面霜の発達条件を実験的に把握する。それら実験データに基づき積雪期には、表層雪崩の発生する山地積雪斜面において、過冷却霧

の移流による自然状態での表面霜の形成過程や、霧発生ファン+ノズル一体型ユニットで発生させた過冷却霧による人工的な表面霜の成長過程を観測し、過冷却水滴の結晶化によって表面霜が急速に発達すること、その表面霜を弱層とした表層雪崩が発生しうることを現地で実証する。

具体的には、まず降雪期前に準備段階として、新潟大学災害・復興科学研究所内の低温実験室に小規模実験斜面を作成し、その雪面に超音波霧化器によって過冷却霧を吹き付け、霜結晶の形成を実験的に確認し、現地での観測手法を検討する。

厳冬期に、積雪寒冷地域にある温泉地に観測サイトを設定し、既存の気象観測装置を設置して一般気象観測を行う。それと並行して、斜面上に無線温湿度ロガーを設置し、観測サイトでデータを受信して斜面への過冷却霧の移流状況を把握する。また随時、放射温度計で斜面積雪の温度を測定するとともに、雪面の霜結晶を顕微鏡観察し表面霜の形成過程を明らかにする。

冬期観測地は平成 18 年豪雪時に死者 1 名を出した表層雪崩災害現場である秋田県乳頭温泉郷鶴の湯温泉付近の斜面または長野県など高標高にある山岳道路付近の斜面を候補地とした。しかし、これら可能性の高い場所でも冬の気象経過次第では、過冷却霧の移流で表面霜が形成される機会がないことも考えられたので、その場合は霧発生ファン+ノズル一体型ユニットで過冷却霧を発生させ斜面積雪の表面に広く吹き付け、人工的に表面霜を形成して観測を行うこととした。

### 4. 研究成果

上記の研究方法に従って本研究を遂行する予定であったが、新潟大学災害・復興科学研究所内の低温実験室が、建物改修工事のため長期間使用できなくなったこと、研究代表者の和泉が、病気のため入院を繰り返したこと、またその治療過程において氷点下での野外観測ができなくなり予定を変更せざるを得なくなった。

そこで、野外で連続的に気象観測を行っているサイトにおいて発達した表面霜が観測された事例のうち、研究代表者(和泉)、研究分担者(河島)、研究協力者(松元)が関係したものを国内外から収集し、それらの分析によって研究目的に近い研究成果を得られるように研究手法を修正した。

表面霜の観測を気象観測とともに行った事例は以下の通りである。

- (A) ノルウェー・スピッツベルゲン島氷帽上  
1987 年 6 月、和泉
- (B) チリ・アイセン州コヤイケ・アルト&ポルテスエロ・イバニエス(2010 年 8 月、2013 年 7 月、河島・松元)
- (C) 新潟県十日町市辰乙(2014 年 1 月、和泉・竹内)
- (D) 北海道札幌市北区(2014 年 2 月、和泉・

秋田谷)

(E)新潟県小千谷市真人(2014年1月、河島・松元)

(F)新潟県魚沼市大白川(2014年3月、河島・松元)

以下に本研究で得られた成果を列挙する。

#### 1) 低温室における表面霜の成長実験

超音波加湿器で発生させた過冷却微水滴を雪表面に供給し表面霜の発達を促す低温室内実験から、雪の表面状態により形成される霜の結晶に違いが生じ、雪面が降りたての新雪状態か、大気中の過剰水蒸気が昇華凝結して小さいながらも既に気相成長による表面霜が形成されている状態、すなわち結晶成長過程に近い状態になっていれば、過冷却水滴の供給により表面霜が大きく成長することがわかった。一方、積雪表面の雪が堆積後に自由表面積を減らす変態過程を受けた場合には、大きな表面霜は発達しにくい。

#### 2) 野外観測の解析から得られた結果

野外で表面霜の形成が確認された時点より前の気象条件を上記6箇所解析したところ次のようなことが明らかとなった。

表面霜が大きく成長する前の積雪表面は、新雪が降り積もって間もない状態か、小さいながらも気相成長による表面霜が形成されている状態であることが必要。

上の表面状態の積雪が、放射冷却によって生じた過冷却霧や過冷却雲に長時間(半日程度以上)にわたって覆われることによって、過冷却水滴が積雪表面の新雪や霜に付着・凍結して表面霜が急速に大きく発達する。

気相成長で形成された表面霜は、大きさ数ミリ程度の小さなプレート状やコップ状の結晶形をしており元の雪にしっかり凍着しており、表層雪崩の弱層にはなりにくい。

大きく成長した表面霜はシダ状(樹枝状)の結晶形で長さは数cmにも達する。それらシダ状結晶が折り重なって形成された空隙の多い表面霜層は、低密度で力学的強度の小さい弱層になりうる。

表面霜を観測した6箇所では、表面霜層が形成された直後に多量降雪が続くことは皆無であった。

#### 3) H18年乳頭温泉雪崩の発生過程

本研究を始める契機となった2006年2月に発生した秋田県仙北市乳頭温泉での雪崩災害現場近傍にある乳頭雪量観測所など近隣の気象観測所における気象データを解析し、上の1)2)の成果と合わせて次のような発生過程が考察された。

乳頭温泉雪崩発生前日の朝に気温急低下とともに若干の降雪がありその後半日以上低温下で過冷却雲に覆われ続けてシダ状の表面霜が新雪表面に形成され、その表面霜層形成直後に多量の降雪がもたらされて表層雪崩の発生に至ったものである。

#### 4) 表面霜層を弱層とする表層雪崩の発生頻度

以上の成果は、過冷却水滴の付着によって表面霜の結晶成長が急速に進行し表層雪崩のすべり層となりうる薄い表面霜の弱層が形成されるためには、特別な気象条件の組み合わせが必要であることを示している。すなわち、放射冷却で大気中の水蒸気の昇華凝結により雪面に表面霜が形成された後または新雪の堆積直後に、濃密な過冷却雲に覆われて、過冷却水滴が積雪表面の雪や霜に付着・凍結すれば大きな表面霜が急速に発達する。こうした特別な気象条件の組み合わせで成長した表面霜層の上すぐに大量の新雪が堆積した場合のみ、表面霜を弱層とする表層雪崩は発生しうることになる。

雪崩発生に至る気象推移において発達した表面霜の形成直後に多量降雪が必要であることから、表面霜を弱層とする表層雪崩の発生は、頻度的にかなり限定されることになる。そこで、前述の秋田県乳頭雪量観測所における過去10冬期分の気象データを分析した結果、表面霜の急速成長後の大量降雪という気象条件の組み合わせは、この乳頭温泉雪崩災害が発生した時にしかない極めて稀な気象推移であることがわかった。また2)で述べたように野外観測で発達した表面霜が観測された事例で直後に大量降雪を伴ったことは皆無であることから表面霜を弱層とする表層雪崩の発生頻度はかなり少ないことが明らかにされた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計5件)

Evgeny A. PODOLSKY, Kaoru IZUMI, Vladimir E. SUCHKOV, Nicolas ECKERT, Physical and societal statistics for a century of snow-avalanche hazards on Sakhalin and the Kuril Islands(1910-2010), Journal of Glaciology, Vol.60, 2014, 409-430. DOI:10.3189/2014JG13J143

荒川 逸人、和泉 薫、河島 克久、石井 吉之、季節積雪におけるプッシュゲージによる硬度と微細構造との関係について、日本雪氷学会誌 雪氷、75巻、2013、449-460.

西田 陽一、橋立 広隆、上石 勲、和泉 薫、雪崩予防杭の斜面雪圧特性に関する研究、第27回北陸雪氷シンポジウム、2012、65-70.

伊豫部 勉、河島 克久、和泉 薫、Web上で公開される積雪深情報の実態と一元的集約による積雪深分布図の作成、日本雪工学会誌、28巻、2012、13-22.

栗原 靖、河島 克久、和泉 薫、湿潤高密度積雪の引張破壊強度の密度・含水率

依存性、日本雪氷学会誌 雪氷、74 巻、2012、23-31 .

〔学会発表〕(計 12 件)

和泉 薫、河島 克久、伊豫部 勉、町田 敬、2012/13 冬期に発生した特徴的な雪崩災害について、雪氷研究大会講演要旨集、2013 年 9 月 19 日、北見工業大学 .

伊豫部 勉、河島 克久、和泉 薫、2011/12 冬期に於ける全国および新潟県内の積雪深分布の特徴、2012 年度日本雪氷学会北信越支部研究発表会、2012 年 4 月 15 日、加賀市 .

伊豫部 勉、河島 克久、和泉 薫、多機関データの統合化による詳細な積雪深分布図の作成、雪氷研究大会講演要旨集、2012 年 9 月、福山市 .

和泉 薫、河島 克久、伊豫部 勉、太田 あみ、東北地方で多発した 2011-12 年冬期の雪崩災害、雪氷研究大会講演要旨集、2012 年 9 月、福山市 .

池田 慎二、中村 明、和泉 薫、河島 克久、伊豫部 勉、阿部 修、小杉 健二、根本 正樹、野呂 智之、秋田県仙北市玉川温泉において発生した雪崩災害の調査報告、雪氷研究大会講演要旨集、2012 年 9 月、福山市 .

伊東 靖彦、池田 慎二、竹内 由香里、遠藤八十一、和泉 薫、上石 勲、畠田 和弘、野呂 智之、新潟県糸魚川市柵口地区において発生した大規模雪崩、雪氷研究大会講演要旨集、2012 年 9 月、福山市 .

秋山 一弥、和泉 薫、雪崩の発生規模と流動性、雪氷研究大会講演要旨集、2012 年 9 月、福山市 .

Tsutomu IYOBE, Katsuhisa KAWASHIMA, Kaoru IZUMI, Features of snow accretion damages caused by heavy snowfalls to Japanese cedar plantation in December 2009 and 2010 in the niigata area. Central Japan, 8<sup>th</sup> Alexander von Humboldt international Conference, Natural Disasters, Global Change and the Preservation of World Heritage Sites, Cusco, Peru, 2012.

Katsuhisa KAWASHIMA, Takane Matsumoto, Kaoru IZUMI, Yasushi KURIHARA, Large-scale collapse events of perennial snow patches in Japan related to Torrential rainfall, 8<sup>th</sup> Alexander von Humboldt international Conference, Natural Disasters, Global Change and the Preservation of World Heritage Sites, Cusco, Peru, 2012.

太田 あみ、和泉 薫、元村 幸時、奥大山スキー場雪崩事故調査報告、雪氷研究大会講演要旨集、2011 年 9 月、長岡市 .

西田 陽一、上原 隆信、上石 勲、和泉 薫、下村 忠一、小規模のり面に設置した雪崩予防杭の斜面雪圧に関する研究、

雪氷研究大会講演要旨集、2011 年 9 月、長岡市 .

河島 克久、伊豫部 勉、和泉 薫、長野県北部地震によって松代・松之山地域で発生した雪崩の特徴、2011 年度日本雪氷学会北信越支部研究発表会、2011 年 5 月 14 日、福井市 .

〔図書〕(計 1 件)

(公社)日本雪氷学会編(和泉 薫:編集委員・分担執筆者)新版 雪氷辞典、古今書院、2014、pp.307.

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

和泉 薫 (IZUMI, Kaoru)

新潟大学・災害・復興科学研究所・教授  
研究者番号: 5 0 1 1 4 9 9 7

### (2) 研究分担者

河島 克久 (KAWASHIMA, Katsuhisa)

新潟大学・災害・復興科学研究所・准教授  
研究者番号: 4 0 3 7 7 2 0 5

### (3) 研究協力者

松元 高峰 (MATSUMOTO, Takane)

新潟大学・災害・復興科学研究所・産学連携研究員

研究者番号: 2 0 3 7 4 2 0 9