

令和元年6月18日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02992

研究課題名（和文）フルスケール雪崩実験と多項式カオス求積法を用いた次世代型雪崩ハザードマップの作成

研究課題名（英文）Full-scale avalanche experiments and development of hazard map with PCQ

研究代表者

西村 浩一（NISHIMURA, KOUICHI）

名古屋大学・環境学研究科・教授

研究者番号：10180639

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,310,000円

研究成果の概要（和文）：雪崩の包括的データの取得を目的に組織的なフルスケール雪崩実験を北海道のニセコアンヌプリで実施した。厳冬期には雪上車を用いて、また融雪期には人工爆破によるフルスケール雪崩実験を試みた。後者ではビデオによる雪崩の動態の観察、ドローンを用いた発生量、走路上での削剥量と堆積量の把握、小型加速度計を用いた運動状態の観測、赤外放射温度計による温度の非接触測定、さらにはドップラーレーダを用いた計測も行われた。データの解析結果に基づき雪崩運動モデルの検討を行うとともに、多項式カオス求積法（PCQ法）を用いて雪崩発生箇所、規模、底面や内部摩擦等々の不確定性を考慮した次世代型雪崩ハザードマップを作成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人工雪崩実験により得られたデータは雪崩運動モデルの検証と改良に用いられたほか、2017年3月27日に栃木県的那須で発生し8人が犠牲となった雪崩事故に際して、栃木県教育委員会の雪崩事故検証委員会（研究代表者である西村が副委員長を務めた）において、本プロジェクトの成果に基づく雪崩の運動状態の再現と作成されたハザードマップが資料として活用された。

研究成果の概要（英文）：Systematic full-scale avalanche experiments have been carried out in Niseko, Hokkaido. Several video cameras were used to investigate the flow behavior. Further, drones were applied not only to record the avalanche motion but to create the digital elevation models for the pre- and post-avalanche events. In order to record the internal motion of avalanches, inertial measurements units (IMU) were also set. Seismometers and infrasound microphones were also set close to the avalanche path. Furthermore, a Doppler radar and an infrared camera were introduced. Obtained results revealed that the combination of different data is effective measures to characterize their structures.

Further, we draw the snow avalanche hazard map in the study area with taking into account the uncertainty of the model input parameters: volume, bed friction angle and the position of the release. We introduced the Polynomial Chaos Quadrature method (PCQ) and probability of the avalanche arrival was evaluated.

研究分野：雪氷学、自然災害科学

キーワード：雪崩実験 ハザードマップ 多項式カオス求積法

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

雪崩の本質を真に理解するためには、現象を直接観測することが不可欠であるのは言うまでもない。しかし、雪崩は急峻な山岳地帯で明確な前兆現象もなく発生することが多く、観測は決して容易ではない。そこで、スイス、フランス、ノルウェーなどいわゆる雪崩国では、発生域にあらかじめ爆薬等を設置して人為的に雪崩を発生させる試みが行われてきた。日本でも1988年に黒部峡谷において人工雪崩実験が行われ、その後約10年間にわたり続けられた地道な雪崩観測は、内部構造の理解に飛躍的な進展をもたらした。

雪崩の運動や到達距離を求めるモデルは、当初、その多くが雪崩全体を質点または剛体と見なして記述するものであったが、ここ数年は、複雑な地形上での雪崩の高さや広がりなどの情報が得られる連続体モデルの構築も行われるなど、着実な発展が進んでいる。いずれのモデルも一応の成果をあげてはいるが、雪崩の内部構造、雪の取り込みや堆積、さらには森林等の効果に関連した未知のパラメータが多数含まれており、改善を要する課題も多い。しかし、実際の雪崩のデータが質、量ともに限られているため、それぞれのモデルの有効性、正当性を客観的に評価することは容易でないのが現状である。

### 2. 研究の目的

上記の背景のもと、本研究では、国内ではおよそ25年ぶりとなる組織的なフルスケール雪崩実験（通称：平成雪崩大実験）を行い、モデル検証のための国際標準とも成り得る雪崩の包括的データを取得し、それに基づく2次元さらには3次元を視野に入れた雪崩運動モデルを確立する。さらには、雪崩発生箇所、規模、底面や内部摩擦等々の各種のモデル入力値がもつ不確定性を、多項式カオス求積法（Polynomial Chaos Quadrature：PCQ法）を応用して考慮する革新的な次世代型雪崩ハザードマップの作成を最終目標とした。

### 3. 研究の方法

本研究では、初年度に国際的研究組織の構築、他の地球規模崩壊現象を対象とする研究者を含めた国際ワークショップ開催による情報と意見交換、さらには実験対象域と測定項目の選定等、各種準備作業を実施する。そして、続く3年間で北海道のニセコアンヌプリで人工雪崩実験を実施して多角的な計測を行うとともに、運動モデルの構築とハザードマップの作成を行う。さらに、最終年度にも、ニセコ町において国際ワークショップを開催し、研究成果の集約と今後の研究の遂行に関して議論を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 国際ワークショップの開催

本プロジェクトの初年度である2015年12月に北海道のニセコ町において国際シンポジウムを開催した（図1参照）。初日（12月9日）は「雪崩発生危険度を予測する」と題して、スキーヤー、スノーボーダー、スキー場管理者、行政管理者等、一般の方々を対象としたオープンシンポジウム（公開講演会）を、また10日から12日にかけては、「積雪の構造」「雪崩のダイナミクス」さらには今冬からニセコで実施予定の「人工雪崩実験」をテーマにワークショップを実施した。フランス、スイス、英国、スペイン、ノルウェーから計10名の研究者を迎えるとともに、国内からも雪氷、気象、火山、地震、数理科学の分野の研究者が集い、積雪や雪崩に関する最先端の研究内容について報告と議論が行われた。述べ4日間と比較的長丁場ではあったが、初日のシンポジウムは200人超、翌日からのワークショップも日々60人程度の参加者があり、積雪と雪崩（なだれ）を多角的視点から論じる数々の興味深い発表とそれに続く活発な議論が交わされた。また国外の参加者からは、スイスやフランス、ノルウェーなどの大規模な雪崩とは異なる、ニセコでの「小さい雪崩」を対象とした実験に深い興味が寄せられ、新規の測定項目や手法、さらには自らが使用しているレーダーなどの機器の貸与に至るまで、多くの提言が会期終了後も相次いだ。



図1: "International Symposium on snow and avalanche in Niseko" on December, 2015.

#### (2) 人工雪崩実験

北海道のニセコアンヌプリでの人工雪崩実験による雪崩の流動と内部構造の解明に向けた研究では、2017年3月16日に見返り沢で雪上車を用いた小規模な雪崩、また同年3月25日には水野の沢での人工爆破により湿雪の雪崩発生に成功した（図2）。前者では3個のIMUセンサー（図3）を雪崩内部に混入させたほか、ビデオや赤外カメラによる撮影）が、また後者では上記に加えて、地震計と空振計が設置された他、ドローンによる上空からの撮影（図4も実施された。ワイヤレス超小型の加速度計、ジャイロスコープ、磁気センサー、GPSを備えた計測機器（Inertial Measurement Units: IMU）3個を直接雪崩内部に投入して雪崩の動態を捉える観測は世界的にも初の試みであったが、雪崩の内部の速度を捉えるトレーサーとして十分な可能

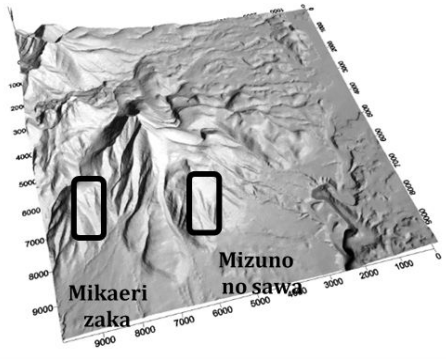


図 2: Two snow avalanche observation sites in Niseko



図 3: IMU (inertial measurement unit)

性を持つことが明らかになった。特に 3 月 25 日の実験では GPS によるトラッキングに成功し、雪崩内部の速度が 10m/s、また加速度は  $20\text{m/s}^2$  の範囲にあることを明らかにし(図 5)、ドローンの映像解析から求められた結果とも良い精度で一致した。しかしながら加速度計、ジャイロスコップ、磁気センサーは衝撃や振動に極めて

敏感で、記録に大きなノイズが混入する結果となった。そこで、名古屋大学の振動台を用いた校正実験をもとに、精度の向上とノイズの除去に向けたフィルターの作成を行った。地震計と空振計からも人工爆破とそれに続く雪崩の流動の記録に成功した(図 6)。

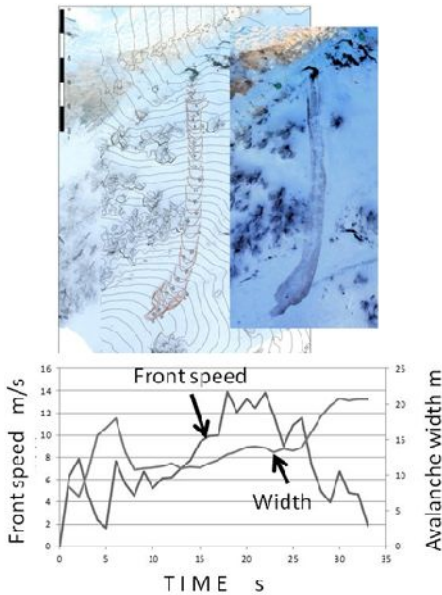


図 4: Wet snow avalanche released at Mizuno-no-sawa on March 28, 2016. Top: Entire flow by drone and front position every one second. Bottom: Estimated front speed and width.

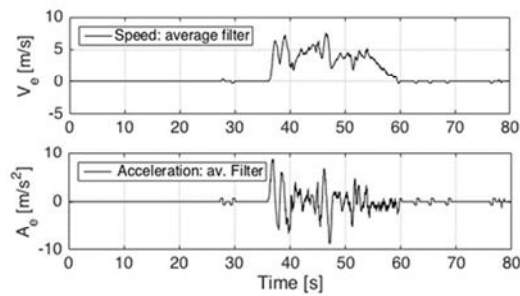


図 5: Internal snow avalanche speed and accelerations obtained with a IMU sensor

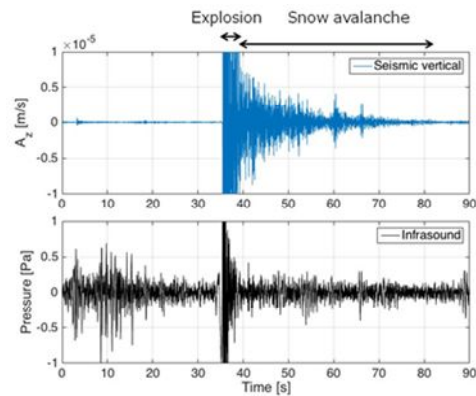


図 6: Recording of seismic and infrasound data on March 25, 2017

2018 年はさらに組織的な観測を展開した。IMU センサーを 5 個、地震計と空振計(微気圧計)を 3 台、赤外ビデオカメラ、対岸にはドップラーレーダを準備した。また走路上には内部速度を検出する 5 組の光学センサと衝撃圧測定用のロードセルを組み込んだ観測タワーを設置した。さらに雪崩の動態と前後の積雪深の変化から雪崩の発生量、走路上での削剝と堆積量の把握を目的にドローンも 3 台導入された(図 3)。しかし、3 月 24 日に実施された 2 回の人工爆破はともに雪崩の発生には至らず、データの取得は次年度に持ち越された。ただし、翌日に近傍の沢で雪崩が自然発生し、地震波動が記録に成功したほか、ドローンによる雪崩発生量と走路上での積雪の取り込み量の計測と解析が行われた。これらの成果は 10 月にオーストリアのインスブルックで開催された ISSW2018 において、報告されたほか、論文としても公表した。

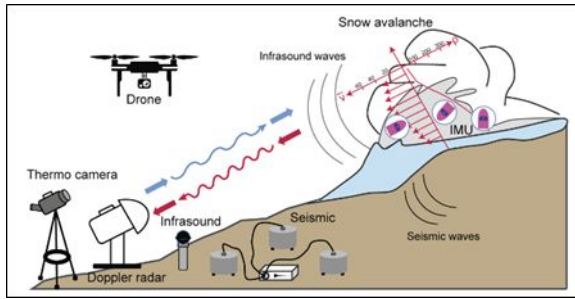


図 7: Schematic picture of the full-scale experiments conducted at Mt. Niseko Annupuri.

最終年度である 2018 年度も、スペイン、オーストリア、カナダからの研究者の参加のもと、組織的な観測体制が構築され、北海道のニセコ地域において雪崩実験が実施された。残念ながら、当該年度は前年と打って変わって、例年になく少雪となった一方で融雪も早く進行し、対象域での雪崩発生危険度が著しく増大した。このため人工爆破による雪崩実験が実施できない状況となり、急遽、3月26日に雪上車を用いた雪崩発生を試みた結果、ドップラーレーダによる速度構造、カメラとビデオ撮影による雪崩の動態、レーザープロファイラ搭載型のドローンを用いた雪崩発生前後の雪面形状の計測、地震計とインフラサウンドマイクロフォンによる雪崩発生のモニタリングや赤外放射温度計による雪崩温度の非接触測定に成功した。雪崩堆積物の詳細な観測結果も踏まえて、現在解析が鋭意進められている。

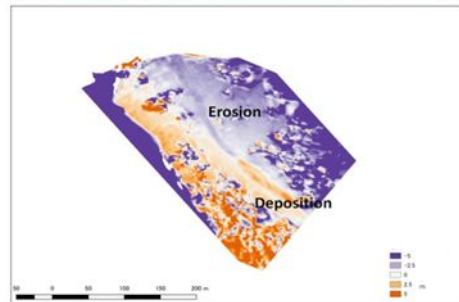


図 8: Wet snow avalanche on March 24, 2018. Upper: picture taken just after the release, Lower: erosion and deposition map obtained with drone pictures taken before and after the incident

### (3) 雪崩運動モデルの精緻化と雪崩ハザードマップの作成

Titan2D を含む浅水方程式に基づく複数の 2 次元雪崩モデルについて比較検討のほか、非線形物理学の観点から新規のアルゴリズムを組み込んだ粒状体流れの物理モデルの導入、さらには雪崩モデルの 3 次元への拡張についても検討が進められた。

雪崩の到達確率を示すハザードマップ作成についても、フルスケール雪崩実験の結果と、雪崩災害データベースから得られた、底面摩擦や内部摩擦係数、発生量などの確率分布について現実的な値を用いて試験的に計算をおこない、安定性や結果の妥当性について検討が進められ、実用化のレベルにまで達した。ちなみに 2017 年 3 月 27 日に栃木県的那須で発生し 8 人が犠牲となった雪崩事故に際しても、栃木県教育委員会の雪崩事故検証委員会（研究代表者である西村が副委員長を務めた）において、本プロジェクトの成果に基づく雪崩の運動状態の再現と作成されたハザードマップが資料として活用された。

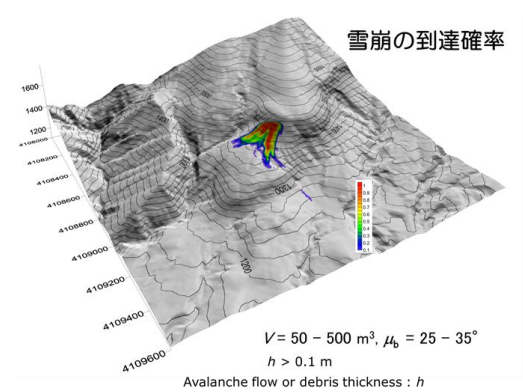


図 9 : Avalanche hazard map at Nasu-dake.

### (4) 国際ワークショップの開催

平成 30 年 12 月 7 日～12 月 10 日にかけて、2015 年に続きニセコ町民センターにおいて、第 2 回国際雪・雪崩シンポジウム in ニセコ (International symposium on snow and avalanche in Niseko) を開催した。

初日 (12 月 7 日) は、例年当地で開催されている「ニセコなだれミーティング」の一環として、第 1 部では「雪崩発生予測の現状」と題して、スキーヤー、スノーボーダー、スキー場管理者、行政管理者等々、一般向けの公開講演会を開催した。ウィンターシーズンに先駆け、雪崩事故・災害を防止する観点から、国内外の専門家 4 名が講演を行った。続く第 2 部では第 1 部での講演と、新谷暁生氏によるニセコの現況の紹介を踏まえ、参加者全員によるオープンディスカッションを展開した。参加者は約 200 名であった。

また 8 日から 9 日にかけては、「積雪」、「吹雪」、「雪崩」をテーマに、フランス、スイス、スペイン、カナダ、オーストリアの研究者 7 名に加えて、国内の雪氷、気象、土石流、火山、地

震、数理科学の分野の研究者約 40 名が集い、最先端の研究紹介と情報交換を行うワークショップを実施した。さらに、最終日の 10 日には「ニセコ雪崩情報発信のこれからを考える」と題して、スキー場管理者と行政管理者に研究者を加えたステークホルダーが集い、ニセコでの雪崩事故防止に向けた取り組みのこれからについて意見交換が行われた。



図 10: International symposium on snow and avalanche in Niseko, 2018

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 9 件)

Cristina Perez-Gullen, Kae Tsunematsu, Kouichi Nishimura, Dieter Issler, Avalanches on Mt. Fuji, Japan: Seismic detection and tracking combined with numerical simulations, Proceedings, International Snow Science Workshop, Innsbruck, Austria, 査読無, 2018, 11-15

Takeuchi Yukari, Nishimura Koichi, Patra Abani, Observations and numerical simulations of the braking effect of forests on large-scale avalanches, Annals of Glaciology, 査読有, 2018, 1-9.

Kouichi Nishimura, Cristina Perez-Gullen, Yoichi Ito and others, Studies on the snow avalanche dynamics by the full-scale experiments in Niseko, Japan, Proceedings of International Snow Science Workshop, Innsbruck, Austria, 査読無, 2018, 50-53.

森啓輔、伊藤陽一、西村浩一、Abani Patra, 連続体モデル TITAN2D を用いた雪崩の運動のシミュレーション 室内実験との比較検討、雪氷、査読有、80(4) 2018、277-287.

森啓輔、西村浩一、常松佳恵、阿部修、Abani Patra、連続体モデル TITAN2D を用いた雪崩の運動のシミュレーション 雪崩への適用と多項式カオス求積法を用いたハザードマップの作成、雪氷、査読有、80(4) 2018、289-296.

Fujita K, Inoue H, Izumi T, Yamaguchi S, Sadakane A, Sunako S, Nishimura K, Immerzeel WW, Shea JM, Kayastha RB, Sawagaki T, Breashears DF, Yagi H, Sakai A (14 authors) Anomalous winter-snow-amplified earthquake-induced disaster of the 2015 Langtang avalanche in Nepal. Natural Hazards and Earth System Sciences, 査読有、17(5), 2017, 749-764, doi:10.5194/nhess-17-749-2017.

Nishimura, K., Tsunematsu, K., Mori, K., Patra, A., Hazard mapping of snow avalanche flow with polynomial chaos quadrature, Proc. 3rd International symposium -Physics, chemistry and mechanics of snow-, 査読無、2017, 42-43.

Ito, Y., Naaim-Bouvet, F., Nishimura, K., Bellot, H., Thibert, E., Ravant, X., Fontaine, F., Measurement of snow particle size and velocity in avalanche powder clouds, Journal of Glaciology, 査読有、2017, 63, 249-257.

西村浩一、齋藤佳彦、伊藤陽一、新屋啓文、「国際雪・雪崩シンポジウム in ニセコ」開催報告、雪氷、査読無、78(1), 2016, 101-104

〔学会発表〕 計 21 件(うち招待講演 3 件/うち国際学会 9 件)

西村浩一、雪崩研究の新しい取り組み、雪崩災害防止セミナー(招待講演) 2019.

Kouichi Nishimura, Cristina Perez-Gullen, Yoichi Ito and others, Studies on the snow avalanche dynamics by the full-scale experiments in Niseko, Japan, International Snow Science Workshop, Innsbruck, Austria, 2018(国際学会).

Cristina Perez-Gullen, Kae Tsunematsu, Kouichi Nishimura, Dieter Issler, Avalanches on Mt. Fuji, Japan: Seismic detection and tracking combined with numerical simulations, International Snow Science Workshop, Innsbruck, Austria, 2018(国際学会)

伊藤陽一、西村浩一、齋藤佳彦、今井俊昭、堀川信一郎、Cristina Perez-Gullen, Dieter

Issler, Jan-Thomas Fischer 他、人工雪崩実験による雪崩ダイナミクスの解明 -その6 2018年冬期に実施した人工雪崩実験および自然発生した雪崩の観測-、雪氷研究大会、2018. 西村浩一、粉粒体としての雪崩 - 発生と運動 -、粉体工学会『計算粉体力学研究会』(招待講演) 2017.

伊藤陽一, 西村浩一, 齋藤佳彦, Perez-Guillen C, 砂子宗次郎, 新屋啓文, 山口悟, 新谷暁生、人工雪崩実験による雪崩ダイナミクスの解明 - その4 2017年冬期に実施した実験の概要 -、雪氷研究大会、2017.

Perez-Guillen C, 西村浩一, 伊藤陽一, 山口悟、人工雪崩実験による雪崩ダイナミクスの解明 - その5 新たな計測技術の適用 -、2017.

西村浩一、最新の科学による雪崩の解析 - その構造と運動 -、愛知県山岳連盟『第21回遭難を考える講演会』(招待講演) 2017.

Nishimura, K., Tsunematsu, K., Mori, K., Patra, A., Hazard mapping of snow avalanche flow with polynomial chaos quadrature, International Symposium "Physics, Chemistry and Mechanics of Snow" (招待講演), 2017.

西村浩一, 伊藤陽一, 山口悟, 齋藤佳彦, 新谷暁生, 人工雪崩実験による雪崩ダイナミクスの解明 - その1 国際シンポジウムの開催と予備実験の実施 -, 雪氷研究大会, 2016.

齋藤佳彦, 西村浩一, 伊藤陽一, 新谷暁生, 齋藤翔吾, 木村一郎, 今井俊昭, イセンコ・エフゲーニー, 人工雪崩実験による雪崩ダイナミクスの解明 - その2 UAV撮影画像による雪崩動態解析 -, 雪氷研究大会, 2016.

伊藤陽一, 西村浩一, 藤田耕史, 山口悟, 和泉薫, 河島克久, 上石勲, 冬季の異常積雪によって増幅された2015年ランタン大なだれ災害, 雪氷研究大会, 2016.

Kouichi Nishimura, Full-scale snow avalanche experiment in Niseko, International Symposium on snow and avalanche in Niseko 2015.

他8件

〔図書〕 計(2)件

遠藤徳孝、小西哲郎、桂木洋光、西村浩一他、名古屋大学出版会、地形現象のモデリング(海底から地球外天体まで) 2017、279.

西村浩一、朝倉書店、低温環境の科学事典、2016、411.

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://snowscience.sakura.ne.jp>

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

前野 深 Maeno Fukashi

東京大学 地震研究所 准教授 研究者番号: 20444078

河島 克久 Kawashima Katsuhisa

新潟大学 災害・復興科学研究所 教授 研究者番号: 40377205

西森 拓 Nishimori Hiraku

広島大学 理学研究科 教授 研究者番号: 50237749

上石 勲 Kamiishi Isao

国立研究開発法人防災科学技術研究所 雪氷防災研究部門・雪氷防災研究センター

総括主任研究員 研究者番号: 60455251 (H29年度まで)

山口 悟 Yamaguchi Satoru

国立研究開発法人防災科学技術研究所 雪氷防災研究部門・雪氷防災研究センター主任研究員

研究者番号: 70425510

小田憲一 Oda Kenichi

日本大学 理工学部 助教 研究者番号: 70632298

藤田耕史 Fujita Koji

名古屋大学 環境学研究科教授 研究者番号: 80303593

竹内由香里 Takeuchi Yukari

国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所主任研究員 等 研究者番号: 90353755

常松佳恵 Tsunematsu Kae

山形大学 理学部 准教授 研究者番号: 90722207