# 新潟大学災害・復興科学研究所 共同研究報告書

空撮画像を用いた雪崩モデルパラメータ推定と気象・積雪条件の関係

#### 研究代表者氏名 田邊 章洋 1)

## 研究分担者氏名 砂子 宗次朗<sup>1)</sup>,明石 亜子<sup>2)</sup>,新屋 啓文<sup>3)</sup>

# 1) 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター<sup>2)</sup> 新潟大学大学院<sup>3)</sup> 新潟大学災害・復興科学研究所

#### 研究要旨

近年発達している雪崩の流動モデルは、雪崩事例の再現やハザードマップの流動域推定等の用途で活 用されているが、これらの目的のためには、適切なモデルの入力値を設定する必要がある.雪崩流動モデ ルは欧米を中心に発達してきたため、低温環境で発生する乾雪表層雪崩への入力値の基準は提案されて いるが、日本で厳冬期にも頻発する湿雪全層雪崩については、設けられておらず経験的な値が使われてい る.本研究では、雪崩流動モデルを用いた広域ハザードマップ作成を将来的に実施するため、その事前準 備として日本で発生する雪崩を再現するモデルパラメータの基準を作成する.まずUAV(無人航空機)等 の航空機により雪崩を撮影した空中写真を用いて、入力値を変化させた多数の流動計算を実施し、対象の 雪崩を再現する入力値を推定する.次に雪崩発生時の気象・積雪条件を推定し、雪崩モデルの入力値を気 象・積雪条件の関数として確立することを目指す.

## A. 研究目的

近年雪崩の流動モデルは著しく発達しており, 欧米諸国ではこれらを用いた,流動領域を可視化 した雪崩ハザードマップが提案され始めている. このようなハザードマップの作成には,流動モデ ルのパラメータを適切に設定する必要がある.し かしながら,流動モデルは欧州を中心に発達して きた歴史的背景のため,欧米で問題となる乾雪雪 崩に対するパラメータ設定指針が示されている 一方で,日本で頻発する湿雪雪崩については知見 の蓄積が薄いのが現状である.

本研究の最終的な目標は、日本においても雪崩 の流動モデルを用いたハザードマップを作成す ることである.そのため、本研究課題では、流動 モデルの対象とされてきた乾雪表層雪崩と比較 して実績の乏しい湿雪全層雪崩に対する雪崩モ デルのパラメータ設定を明らかにすることを目 的とする.この目的のために、これまで記録され ている雪崩データ、特に全層雪崩を中心に収集す るとともに、対象とする雪崩を再現する最適なモ デルパラメータ推定を実施する.加えて、雪崩発 生時の気象条件から積雪変質モデルを用いて積 雪状況を推定し、雪崩モデルパラメータを気象・ 積雪条件の関数として表すことを目指す.これらの関係性を明らかにすることで,気象条件から最 適な雪崩モデルパラメータ設定の指針を示すこ とが可能となり,将来的な雪崩ハザードマップ作 成を可能にする.

#### B. 研究方法

本研究は主に二つのパートに分けることがで きる.一つ目は,再現対象とする雪崩事例の撮影 及びその解析,二つ目は雪崩事例を再現する雪崩 モデル入力値の推定である(図1).



図 1 研究の流れ. 雪崩事例を撮影および解析し, その事例に合う雪崩モデルの入力値を推定し,その 事例発生時の気象・積雪条件を推定する. 複数事例 集めることで, 流動モデルのパラメータを気象・積 雪の関数として表すことを目指す.

一つ目の雪崩事例の撮影及びその解析のため に,北陸及び東北地域を対象として冬季雪崩発生 時に速やかに現場に赴き、雪崩・積雪状況が経時 変化する前に UAV 空撮と積雪観測を実施する.こ のようにして取得した雪崩や、これまでに撮影さ れている雪崩事例,昨年度の研究課題(2023-8航 空写真を用いた積雪・雪崩堆積状況の判読と雪崩 モデルパラメータ推定;研究代表者:砂子宗次朗) で取得した航空機による積雪期の山岳域の空中 写真を用いて、雪崩事例の解析を行う.雪崩モデ ルで再現対象とするのは,流動範囲や距離,デブ リ厚さ等流動の結果であり、これらの定量的な値 は、空撮画像から SfM (Structure from Motion) 処 理にて作成されるオルソモザイク画像や数値標 高モデルを解析することで得られる.加えて,雪 崩モデルを実行するためには雪崩の発生区や初 期の厚さも必要となる.これらの情報も空撮画像 から同様に取得する.

二つ目の雪崩事例を再現する雪崩モデル入力 値の推定は、Fischer et al. (*J. Glaciol.*, **61** (229)、 875–888、2015)に倣って以下のように行う. 各事 例に対して、雪崩発生区、初期厚さを決定する. さらに推定したい入力値に適当な範囲の一様分 布を与え、ランダムに選択した雪崩モデルの入力 値 $\Theta_i$ を多数個用意する ( $i = 1, \dots, N_c$ ). そして、そ れらを用いた数値計算を実施し、計算結果と雪崩 事例の解析結果の一致度合を定量的に比較する. 雪崩事例での評価変数を $\hat{X}$ 、対応する数値計算か ら得られる変数を $X(\Theta)$ とすると、評価関数 $\alpha_X$ は以 下の2通りで表される:

$$\alpha_X = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{X(\Theta) - \hat{X}}{\sigma_{\hat{X}}}\right)^2\right),\tag{1}$$

$$\alpha_X = \begin{cases} 1 \ X(\Theta) < \hat{X}, \\ 0 \ otherwise. \end{cases}$$
(2)

本研究では、 $\hat{X}$ は流動距離、面積の一致度および逸 脱度、速度を表し、 $\sigma_{\hat{X}}$ は各 $\hat{X}$ に対する揺らぎを表 す. $\alpha_X$ は数値計算が観測事例に近ければ1に、遠 ければ0に漸近する.速度以外は式(1)で評価 し、速度については空撮画像から決定することが 困難であるため、全層雪崩で一般的に言われてい る速度の最大値(30 m/s)に安全係数をかけて $\hat{X} =$ 33 m/sとして、式(2)を用いた.各評価対象変数 Xに対して、重み $w_X$ 付きの総和 $\alpha(\Theta)$ をパラメータ  $\Theta$ に対する評価関数とした:

## $\alpha(\Theta) = \Sigma_X w_X \alpha_X.$

また,  $X = (1 \pm 0.05) \hat{X}$ を代入して得られる値 $\alpha_{lim}$ を閾値として採用し,  $\alpha(\Theta) > \alpha_{lim}$ なるパラメータ を最適パラメータとした.  $N_c = 10^4$ 個のランダム に選択したパラメータに対して,最適パラメータ をからなる分布を最適パラメータ分布として,そ の雪崩事例を再現するための入力値とした.

雪崩の動力学モデルとして OpenFOAM をプラ ットフォームとする faSavageHutterFOAM を用い た (Rauter et al., *Geoscientific Model Development*,

2923-2939, 2018). faSavageHutterFOAM は
次元空間に埋め込まれた地表面上で深さ方向に
平均化した粒子流の質量,流れのせん断,鉛直方
向の運動量の保存則を数値的に解く手法である.
流動計算を実施するための初期の雪の厚さと発
生区の位置を空撮画像から決定し,摩擦係数μ,流
体抵抗係数ξ,および雪の取り込みに関するパラ
メータe<sub>b</sub>を推定するパラメータとした.

## C. 研究結果

本研究では、6 雪崩事例に対してパラメータ分 布推定を行った.図2にその一例を示す.

この事例は 2021 年 2 月 12 日に発生した面発生 湿雪全層雪崩で,初期積雪深 2 m,発生区の面積 2009 m<sup>2</sup>,落差 92 m の雪崩であった.目的変数と して,流下距離 169.5 m,デブリ面積は 30 grids とした.推定するパラメータの初期分布は,摩擦 係数 $\mu \in [0.1, 0.6]$ ,流体抵抗 $\xi \in [100, 40000]$ ,浸 食係数 $e_b \in [0, 100000]$ とした.

この事例では、 $\mu$ は 0.4-0.45 の範囲に多く分布 し、その範囲でピークを持つ分布に収束した. 一 方、 $\xi$ は 15000-30000 の範囲でおおむね一様に分 布した. $\mu$ と $\xi$ の散布図では、 $\mu$ が大きくなるにつれ て $\xi$ も同様に大きくなる傾向がみられた.これは、



図 2 2021 年 2 月 12 日に発生した雪崩事例と, 推 定されたパラメータを用いた数値計算の重ね合わ せ (左図). 推定された最適パラメータ分布 (右図).

双方が底面抵抗則に関するパラメータであり,摩 擦係数が大きくなることで流動性が低下するの に対して,流体抵抗は逆数で定数として用いられ るため,流体抵抗が大きくなることで流動性を増 加する.定性的には,これらの競合によって,事 例を再現するのに最適なパラメータに収束する と考えられる. *e*bは初期に与えた範囲でほぼ一様 に分布しており,収束していない結果が得られた. ほかの変数と*e*bの散布図からは,相関がみられな かった.最適化されたパラメータを用いることで, 誤差を含みつつ,特に到達距離についてよく再現で きることを確認した.

同様のパラメータ推定を計6事例に対して実施 して、定性的に同様の結果が得られた.各事例で 推定された入力値をまとめて $\mu$ と $\xi$ の間の関係を 調べると、個別の事例でみられるような関係が得 られた(図 3).



図 3 すべての事例における摩擦係数と流体抵抗 係数の関係. 白丸がベストなパラメータ,下端,上 端が分布の最低値,最高値を表す.

#### D. 考察

図2で示した事例では,最適と判断された入力 値は比較的多かったが,最適と判断された入力値 が1つまたは2つの事例も存在した.これらの事 例を確認すると,流動範囲や停止位置が立木によ ってコントロールされている様子があった.本研 究で使った流動モデルは深さ方向に平均してい るため,立木等の3次元的な障害物を考慮するこ とができていない.また,得られた分布はテール の長い分布になることもあったが,これは再現対 象とする変数の精度や,変数の不足によるものと 考えられる.これらに対しては,より精度の良い 空撮画像を取得することで,改善される可能性が ある.ただし流体抵抗は速度の二乗に比例する係 数であり,速度は空撮画像から推定できないため, より正確な推定のためには,タイムラプスカメラ 等の設置が必要となる.

図3で示すように、本研究の結果から摩擦係数 と流体抵抗係数の間に相関があることが示唆さ れた.今後事例数を増やすことで、入力値を与え る場合の指針とできる可能性がある.

# E. 結論

雪崩事例の空撮画像を利用することで,事例を 再現する雪崩流動モデルのパラメータ分布を取 得した.得られたパラメータ分布は,特に摩擦係 数で収束する様子がみられ,摩擦係数と流体抵抗 の間で相関がみられた.今後は,雪崩事例を増や すことで,この相関関係をより明確に示すことを 目指す.

また、雪崩が発生した時の気象・積雪条件を整 理することで、気象・積雪条件の関数として流動 モデルパラメータを与えることができるように する予定である.

## F. 研究発表

## 1. 論文発表

なし

2. 学会発表(学会名・発表年月・開催地なども記入)

明石亜子ほか「数値標高モデルから潜在的な雪 崩発生区を推定する手法の確立」雪氷学会北信越 支部研究発表会,福井,2024/6/1

田邊章洋ほか「観測事例を再現する雪崩モデルの最適モデルパラメータの比較」雪氷研究大会

(2024・長岡), 長岡, 2024/9/16-9/19

田邊章洋ほか「一冬期の積雪状況を反映させた 確率論的雪崩ハザードマップの試作」雪氷研究大 会(2024・長岡),長岡,2024/9/16-9/19

明石亜子ほか「数値標高モデルから潜在的な雪 崩発生区を推定する手法の確立」雪氷研究大会 (2024・長岡),長岡,2024/9/16-9/19

G. 知的財産権の出願・登録状況(予定を含む) なし