

スラッシュ雪崩の発生機構に関する研究

佐野 友洋

1. 背景・目的

富士山大沢崩れでは2024年4月9日08時20分にスラッシュ雪崩が発生した（富士砂防事務所，2024）。発生機構の力学的解明には至っていないため，Richards式および山野井・遠藤（2002）のせん断強度式を組み込んだ物理制約付きニューラルネット（PINNs）によるPhy-G-KANを構築し，アメダス観測データを用いて因果連鎖を定量的に解明することを目的とした。PINNsとは物理法則を損失関数に組み込んだニューラルネットであり，過去の発生事例データに依存せず物理法則から発生機構を推定できる。

2. 方法

図1にモデルの概念図を示す。アメダス御殿場等4地点の10分解像度データ（288点）を入力とし，不飽和浸透解析と積雪せん断強度評価をPINNsに統合した水理・力学連成モデルを構築した。

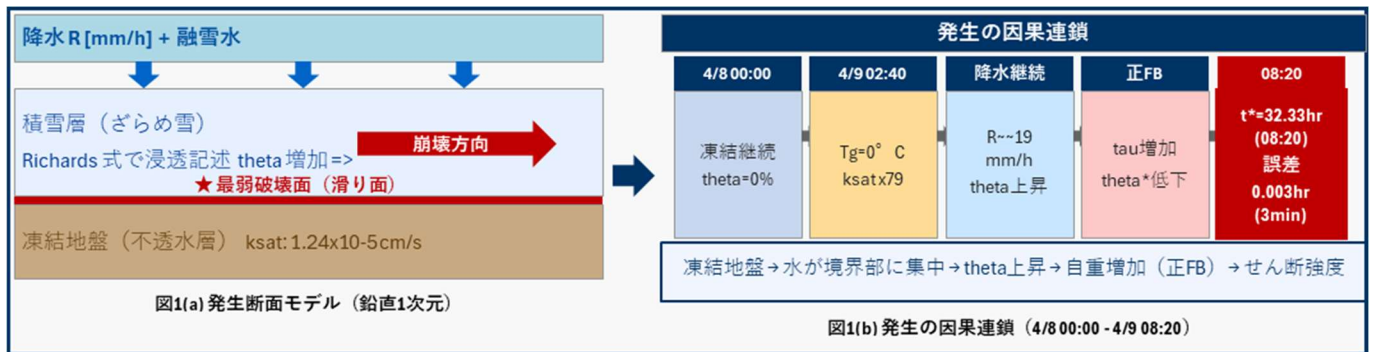


図1 Phy-G-KAN モデル概念図（断面図と因果連鎖）

2.1 不飽和浸透プロセスの定式化

積雪を多孔質媒体とみなし，鉛直水分移動の支配方程式として1次元混合型Richards式（Richards, 1931）を採用した。

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dz} \left[K(\theta) \left(\frac{d\psi}{dz} + 1 \right) \right] + S(t) \quad \dots (1)$$

θ : 体積含水率, $K(\theta)$: 不飽和透水係数 (van Genuchten, 1980), ψ : マトリックポテンシャル, $S(t)$: 降水ソース項。飽和透水係数 $ksat$ は地中温度 T_g のシグモイド関数とし，凍結時 ($1.24 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$) から融解時 ($9.82 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, 79倍) へ連続的に変化させた。

2.2 破断面における強度低下の定式化

最弱破壊面は「積雪と凍結地盤の境界」に形成されると考えた。根拠は，①高柳ら（2024）の定圧一面せん断試験による境界部の強度が最低，②Imaizumi et al. (2021)による凍結層形成と境界部への水分集中の観測，③山野井・遠藤（2002）の含水率増加に伴う指数的強度低下，の3点である。境界直上のざらめ雪層に以下の構成則を適用した。

$$\sigma = K \cdot \rho_{dry} \cdot g \cdot z \cdot \exp(-0.235\theta) \quad \dots (2)$$

$K = 4.97 \times 10^{-4}$ (ざらめ雪), $\rho_{dry} = 420 \text{ kg/m}^3$, $\sigma_0 = 21,380 \text{ Pa}$, $\theta^* = 8.44\%$ 。含水率増加に伴う自重増加 (動的 τ ; $\Delta \tau = +441 \text{ Pa}$) も考慮した。

2.3 PINNsへの統合

式(1)(2)を損失関数 L_{phys} に組み込み PINNs を構築した。過去の発生データに依存せず物理法則から発生機構を推定できる点が本手法の特徴である (Gong & Zha, 2025)。

3. 結果

動的 τ モデル ($R = 20 \text{ mm/h}$, $\beta = 30^\circ$, $z = 1.5 \text{ m}$) は $t^* = 32.33 \text{ hr}$ を再現し，公的記録 (4月9日08:20) との誤差は 0.003 hr (3分) であった (表1)。R細分化実験 (GROUP-F) により臨界降雨強度が

約 19 mm/h と定量化され、御中道観測局ピーク値（約 23 mm/h）と整合した（図 2）。XAI Sobol 感度分析では、発生時刻 t^* の変動に対して降雨強度 R （80.1%, $r = -0.968$ ）、傾斜角 β （14.7%）、積雪深 z （5.2%）の寄与が得られた。

表 1 主要パラメータスイープ結果

条件	R [mm/h]	t^* [hr]	誤差 [hr]
GROUP-C 動的 τ (最優秀)	20	32.33	0.003 ★
GROUP-A 通常 VG	20	32.64	0.31
GROUP-E 全部乗せ	18	33.31	0.98
GROUP-D ヒステリシス	20	33.60	1.27

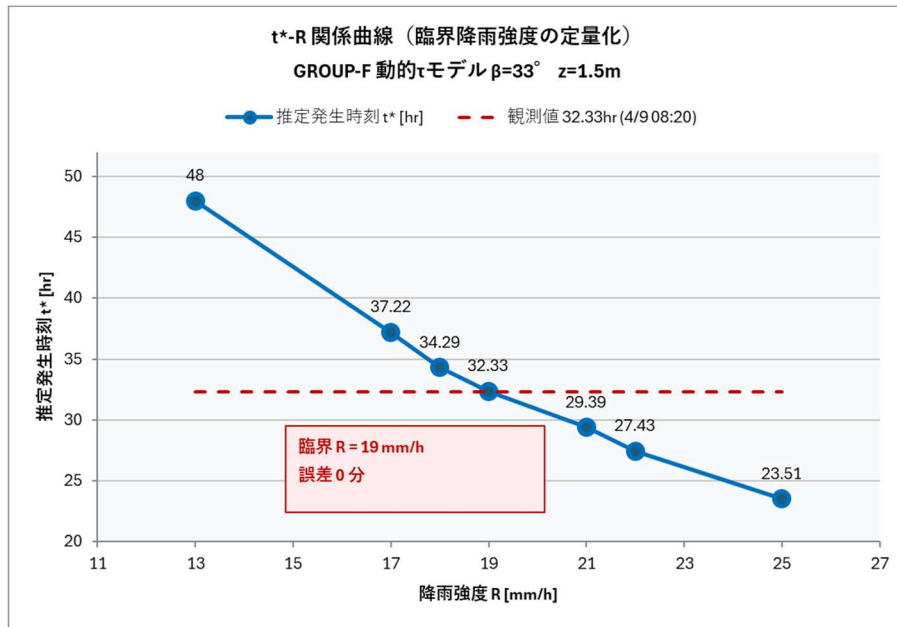


図 2 t^* -R 関係曲線（臨界降雨強度の定量化）

4. 考察

4月9日 02:40 に地中温度が 0°C を通過すると $ksat$ が 79 倍に急変し、降水ソース項が活性化された。 θ の上昇とともに動的 τ が増加し（自重増加）、 θ_{*dyn} が 8.44%から 7.84%へ低下する正のフィードバックが働いた結果、4月9日 08:20 に θ が θ_{*dyn} を突破し崩壊が生じた。Sobol 感度分析は t^* 変動の 80.1%が降雨強度 R で説明されることを示し、降雨モニタリングが早期警戒の最重要指標であることを定量的に裏付けた。

5. 結論

凍結地盤による排水阻害 → 降水浸透 → 自重増加の正フィードバック → せん断強度臨界突破という因果連鎖を物理制約付き AI により定量的に証明した。発生時刻の再現誤差は 3 分 (0.003 hr) であり、臨界降雨強度 約 19 mm/h の定量化は早期警戒システムへの直接的な応用が可能である。今後は 1 m-DEM による傾斜角精密化、実降水時系列の直接入力が課題である。

参考文献

- 1) 富士砂防事務所 (2024) : スラッシュ雪崩発生について、記者発表資料, 4月18日.
- 2) Richards, L.A. (1931): Physics, 1(5), 318-333.
- 3) van Genuchten, M.T. (1980): Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 892-898.
- 4) 高柳剛ら (2024) : 積雪が盛土安定性に及ぼす影響に関する検証.
- 5) Imaizumi, F. et al. (2021): Earth Surface Dynamics, 9, 1381-1398.
- 6) 山野井克己・遠藤八十一 (2002) : 雪氷, 64(4), 443-451.
- 7) Fierz, C. et al. (2009): IHP-VII Tech. Doc. Hydrol., 83.
- 8) Gong, X. & Zha, Y. (2025): Water Resources Research, 61.