干渉 SAR 時系列解析による準上下変位速度と AHP 法に基づく地すべり地形活動度との関係

RELATIONSHIP BETWEEN QUASI-VERTICAL VELOCITY FROM INSAR TIME-SERIES ANALYSIS AND AHP-BASED LANDSLIDE TOPOGRAPHIC ACTIVITY

宇佐見 星弥[1,2]・石丸 聡[1]・佐藤 昌人[3]
Seiya USAMI, Satoshi ISHIMARU and Masato SATO

[1]北海道立総合研究機構（〒060-0819 札幌市北区北 19 条西 12 丁目）
E-mail: usami-seiya@hro.or.jp, ishimaru-satoshi@hro.or.jp
[2]北海道大学大学院情報科学院（〒060-0814 札幌市北区北 14 条西 9 丁目）
[3]防災科学技術研究所（〒305-0006 つくば市天王台 3-1）
E-mail: m-sato@bosai.go.jp

***Key Words**: landslide activity assessment, InSAR time-series analysis, analytic hierarchy process, Minobu Mountains, Shizuoka Prefecture*

1. はじめに

地すべりの再活動ポテンシャル（活動度）を広域的に評価することは，地すべり対策の優先順位付けや開発適地評価において重要である．しかし，地すべりの多くは山地斜面に位置しており，またその数も膨大であることから，個々の地すべりの変動を網羅的に観測することは現実的に難しい．このため，地形判読と Analytic Hierarchy Process（AHP）法に基づく地すべり地形活動度評価手法（AHP 評価）が開発され [1)-3)など]，地すべり対策の優先順位付けなどに活用されてきた．しかし，AHP 評価には，地形判読者の経験や解釈の違いによる属人性および評価作業の煩雑さといった課題が残されている [2)]．

近年，高精度地形データや衛星観測データの整備が進み，それらを活用した地すべり地形活動度評価の研究が進展している [4),5)など]．なかでも，人工衛星搭載の合成開口レーダ（SAR）を用いた干渉 SAR 時系列解析（TS-InSAR）は，地すべり変動を面的かつ直接的に観測できることから，地すべり地形活動度評価への活用が期待されている [5)]．

しかし，AHP 評価が地形形成に必要な比較的長期の地形学的時間スケールを扱うのに対し，TS-InSAR で捉えられる変動は直近 12 年程度であり，両者では活動度として扱う時間スケールが異なる．

そこで本研究では，将来的な TS-InSAR による地すべり活動度評価の実現を見据え，TS-InSAR で取得した地すべり移動体の準上下変位速度と，AHP 評価による活動度との関係を検討した．

2. 研究方法

(1) 研究対象地域と評価対象の地すべり移動体

本研究では，身延山地の静岡県側に位置する藁科川および西河内川上流域を対象とした（**図-1**）．本地域の基盤は，白亜系から古第三系までの付加体（混在岩・泥岩・砂岩泥岩互層・泥岩砂岩互層）から構成され [6)]，国内でも特に地すべり地形が密集する [7)]．以上の地域において，アクセスが比較的容易な地すべり移動体や近年変動が確認されている地すべり移動体を地形判読により 47 箇所選定した．

地形判読には，国土交通省中部地方整備局静岡河

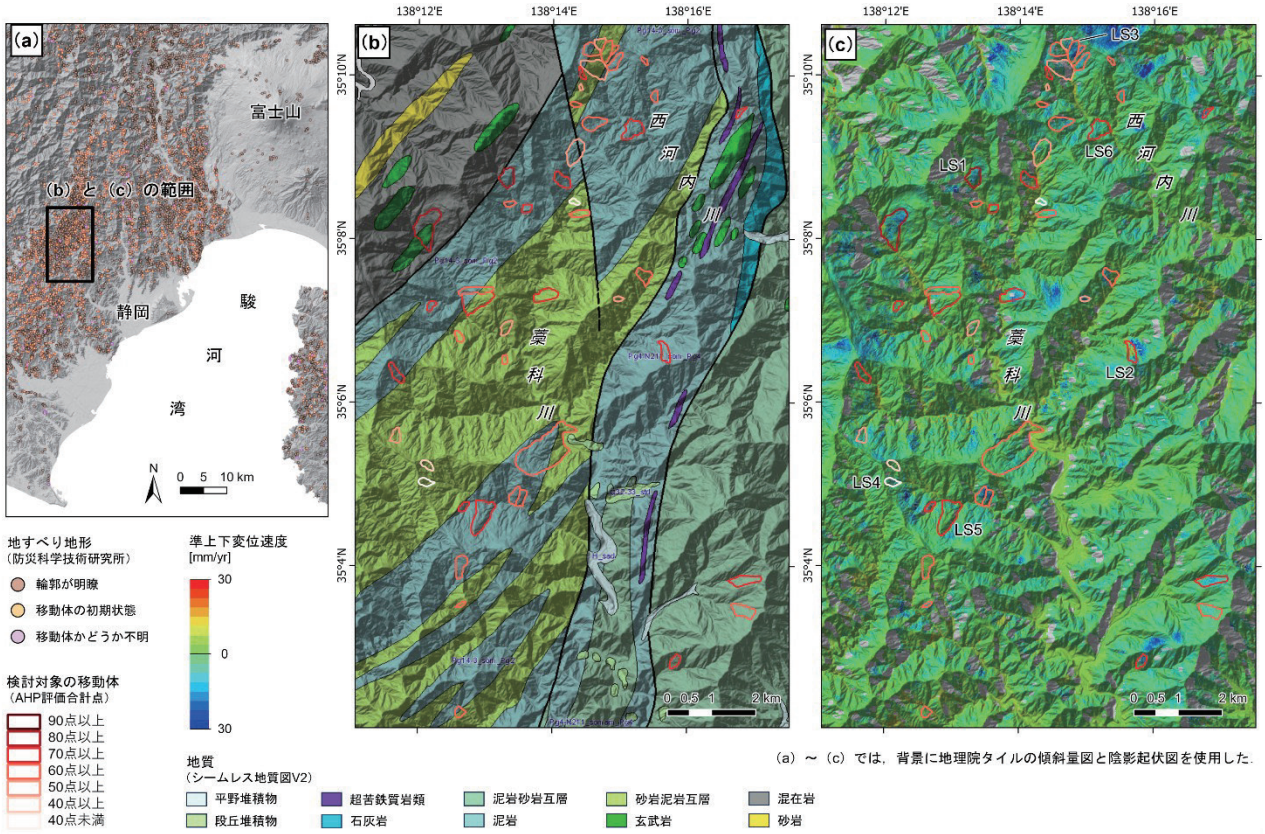


図-1　研究対象地域と評価対象の地すべり移動体．(a) 研究対象地域の範囲と周辺の地すべり地形分布．(b) 研究対象地域の地質分布と AHP 評価合計点の空間分布．(c) 準上下変位速度と AHP 評価合計点の空間分布．LS1～LS6 は，図-2～図-7 に対応．

川事務所が 2018 年 10 月～2019 年 1 月に取得した航空レーザ測量データを用いて作成した，ピクセルスペーシング 1 m の傾斜量図を使用した．選定時には，対象とする地すべり移動体が，地形判読による直感的な活動度や複数の地質に広く分布するように配慮した．また，TS-InSAR で変動を捉えることが難しいレイオーバー・レーダーシャドウ・フォアショートニングの影響[8]も考慮している．

(2) 干渉 SAR 時系列解析（TS-InSAR）

ALOS-2/PALSAR-2 の L バンド SAR データを用いて TS-InSAR を実施した（**表-1**）．解析には RINC0.46[9] と LiCSBAS2[10]を使用し，前処理として電離圏遅延補正[11]，対流圏遅延補正[12]，位相ノイズ補正（移動窓サイズ 64 ピクセル）[13]を適用した．

さらに，TS-InSAR 処理によって得られた各軌道の衛星視線方向変位速度画像に対して 2.5 次元解析[14]を実施し，準上下変位速度を算出した（**図-1**）．これは，TS-InSAR では衛星視線方向との幾何関係により変位速度が過小評価される場合があるため[5]，その影響を可能な限り低減することを目的としている．

表-1 TS-InSAR の諸元

軌道/向き	北行軌道右向き	南行軌道右向き
パス	126	19
フレーム	690	2910
ビーム	U2_8	U2_7
開始	2014 年 9 月 19 日	2014 年 10 月 28 日
終了	2023 年 5 月 19 日	2023 年 6 月 27 日
ペア数	21	57
分解能	10 m	

(3) AHP 評価

地すべり移動体の判読に使用したものと同じ傾斜量図を使用し，47 箇所の地すべり移動体に対して AHP 評価を実施した（**図-1**）．AHP 評価は，北海道立総合研究機構が公開している評価シート[3]を用いて 1 名で実施し，明らかに誤判読がないことを別の 1 名が確認した．

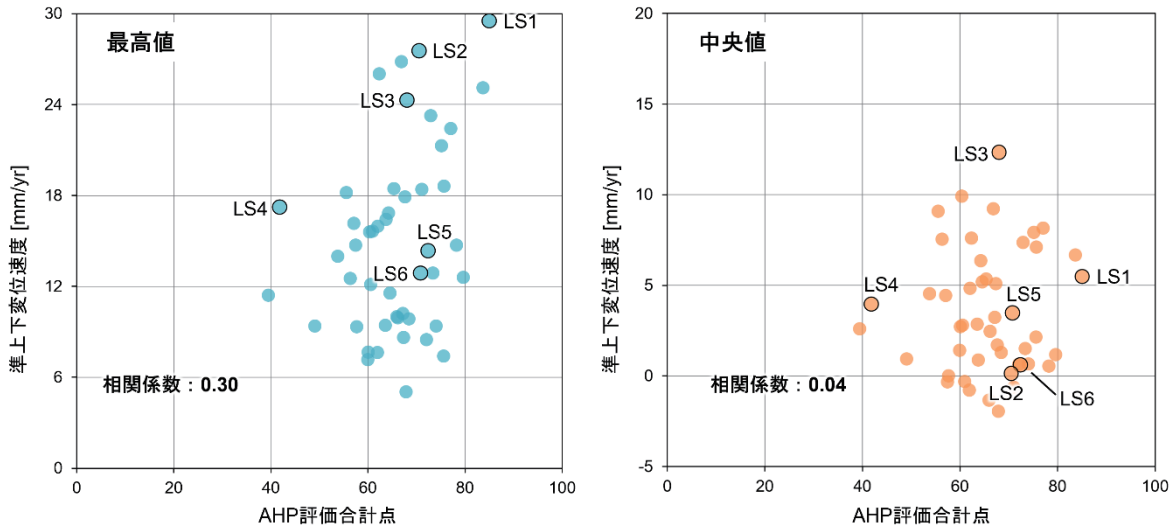


図-2　準上下変位速度と AHP 評価合計点との関係

3. 結果と解釈

(1) 準上下変位速度と活動度との対応関係

図-2 に，地すべり移動体内部の準上下変位速度と AHP 評価合計点との関係を示す．縦軸は準上下変位速度，横軸は AHP 評価合計点である．

図-2 から，地すべり移動体内部の準上下変位速度の最高値では，AHP 評価合計点と弱い正の相関が認められ，特に AHP 評価合計点が 80 点以上の地すべり移動体では顕著に高い変位速度を示した．一方，中央値では両者に明瞭な関係は確認されなかった．

(2) 個別の地すべり移動体の地形と準上下変位速度

図-3 は，図-2 において黒丸で囲んだ LS1～LS4 周辺の拡大図である．

LS1 は，地すべり移動体内部の変位速度が最高である（図-2）．この地すべり移動体では，特に顕著な沈降が末端部のサブユニットにおいて生じている（図-3）．一方，地すべり移動体内部の準上下変位速度の中央値に着目すると，47 箇所の地すべり移動体全体の中で中程度であった（図-2）．

LS2 では，地すべり移動体の頂部に顕著な沈降傾向が，中腹部～末端部で隆起傾向が確認された（図-3）．LS2 では，2018 年 8 月頃に大規模崩壊が発生しており，これらの変位はその前兆現象 [15]を捉えたと考えられる．一方，準上下変位速度の中央値では顕著な変位が確認されなかった（図-2）．なお，LS2 では光学衛星画像でも判読可能な規模の変動が確認されていることから [15]，頂部の沈降および末端部の隆起が実際の変位を示すのか，あるいはアンラップエラーによるものかは判別できない．

LS3 は，準上下変位速度の中央値が最も高く，最高値でも全体の 6 番目に高い地すべり移動体である（図-2）．地すべり移動体の大部分で沈降傾向が確認され，特にサブユニット頂部付近で顕著な変位がみられた（図-3）．また，現地調査では地すべり移動体の変動方向と調和的な構造物の変状も確認された（図-4）．

LS4 は，AHP 評価合計点が比較的低い地すべり移動体である．その一方で，準上下変位速度の最高値は比較的高く，中央値では全体の中間的な値を示した（図-2）．現地調査では，比較的新しいと思われる擁壁に地すべり移動体の変動方向と調和的な亀裂を確認し，最近の変動が示唆された（図-5）．

4. 議論

(1) 準上下変位速度と活動度との関係とその要因

検討結果から，TS-InSAR で観測した準上下変位速度の最高値が高いほど，AHP 評価合計点も高くなる傾向が確認された．また，LS3 や LS4 のように TS-InSAR で顕著な変位が確認された地すべり移動体では，現地調査でも地すべり移動体の変動方向と調和的な地盤変状が認められた．これらのことから，TS-InSAR で得られる準上下変位速度と AHP 評価合計点との間には，一定の関係があると考えられる．

AHP 評価では，地すべり移動体内部のサブユニットが活動的である場合，それを含む地すべり移動体全体の活動度を高く評価する [3]．LS1 のように，TS-InSAR ではサブユニットに顕著な変動が確認される事例が複数認められたが（図-6，図-7），AHP 評価は，このような地すべり移動体の活動度を高く評価

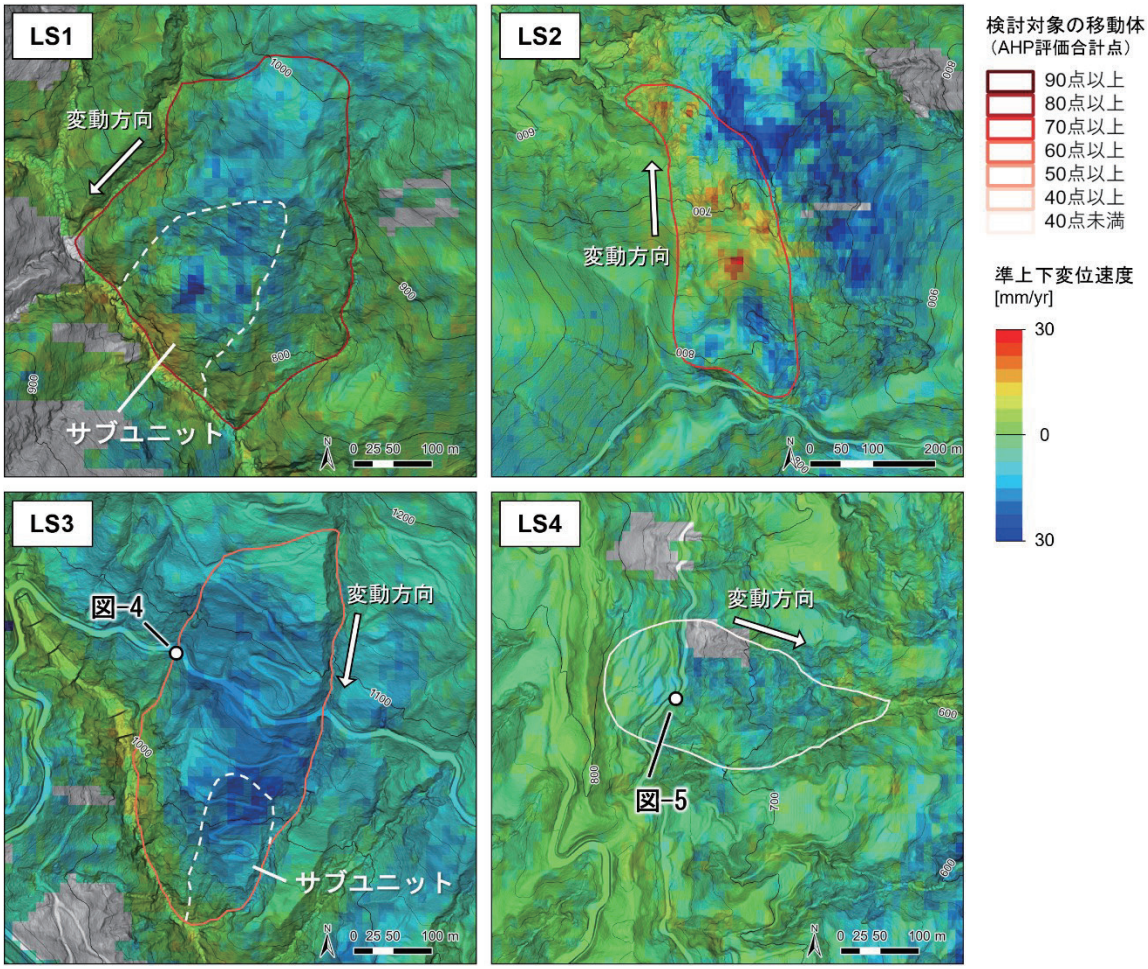


図-3　準上下変位速度と AHP 評価合計点との関係．LS1 と LS3 には，顕著な変動を示すサブユニットを示す．LS3 と LS4 では現地調査を実施し，確認した地盤変状を図-4 と図-5 に示す．



図-4　LS3 で確認した地盤変状（撮影日：2025.11.3）

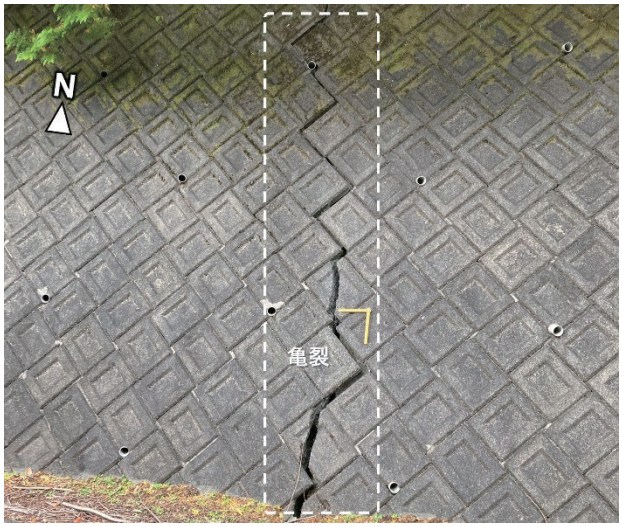


図-5　LS4 で確認した地盤変状（撮影日：2025.11.4）

する設計である．これに対し，地すべり移動体内部の準上下変位速度の中央値は広範囲の画素を平均的に反映するため，地すべり移動体の区分によっては顕著な変動を示すサブユニットの影響が相対的に小さくなる．このため，AHP 評価が重視するサブユニットの活動性は，準上下変位速度の中央値にくらべ最高値により強く反映された可能性がある．

このことから，AHP 評価が一部のサブユニットの変位に強く依存することが，地すべり移動体内部の準上下変位速度の中央値に比べて，最高値と AHP 評価合計点との関係が明瞭だった一因と考えられる．

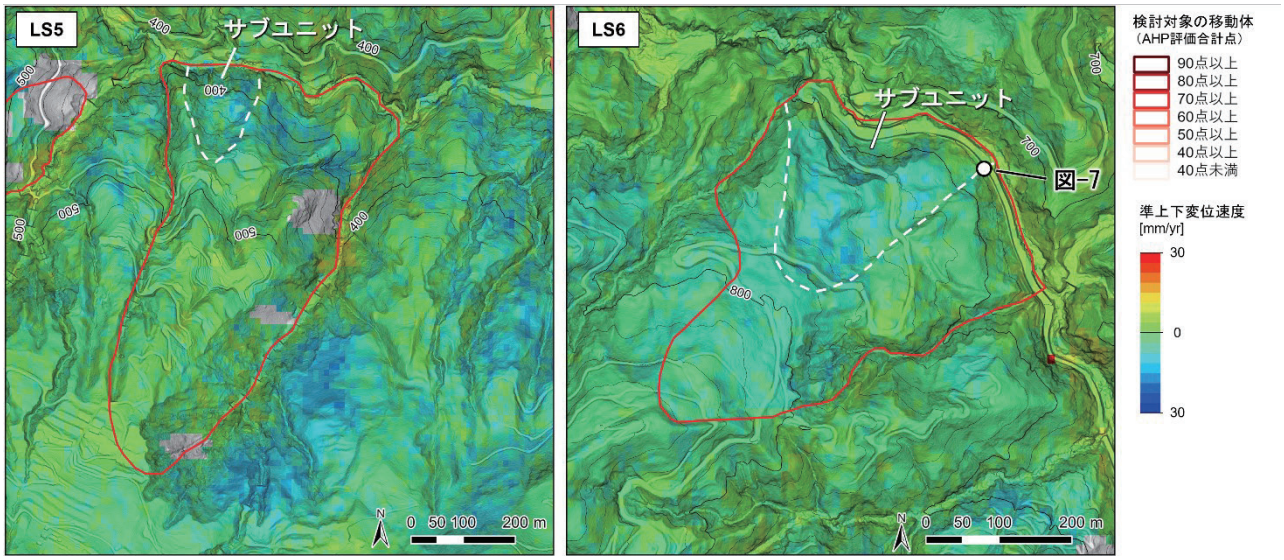


図-6　サブユニットが顕著に変動している地すべり移動体の例．LS6 では現地調査を実施し，確認した地盤変状を図-7 に示す．



図-7　LS6 で確認した地盤変状（撮影日：2025.11.3）

また，TS-InSAR がサブユニットの変動を強く反映していることは，TS-InSAR を用いた活動度評価における地すべり移動体区分の重要性を示唆している．

(2) TS-InSAR を用いた活動度評価の注意点

TS-InSAR で得られる準上下変位速度と AHP 評価合計点との間には一定の関係が認められた一方で，TS-InSAR と AHP 評価では対象とする時間スケールが異なる点には注意が必要である．AHP 評価は長期的な地形発達過程を評価するのに対し，TS-InSAR では使用する衛星が運用を開始して以降（ALOS-2 であれば，直近 12 年程度）の変動を示す．そのため，LS4（図-3，図-5）のように AHP 評価合計点が比較的低い場合でも，現在進行中の変動が TS-InSAR で検出される事例が存在すると考えられる．

また，LS2 のように地すべり移動体内部で複雑な変動が生じた場合やアンラップエラーが含まれる場合には，正負の変位が相殺されることで中央値が小さくなる可能性がある．このため，TS-InSAR を用いた地すべり活動度評価では，最高値など複数の指標を併用することが望ましい．なお，最高値を用いる場合，地すべり活動度評価が特定の 1 画素に依存することになることから，アンラップエラーなどのノイズに対してより堅牢な 90 パーセントタイル値を用いることなども有効だと考えられる．

5. まとめと今後の展望

本研究では，TS-InSAR で取得した地すべり移動体の準上下変位速度と，AHP 評価による地すべり活動度との関係を検討した．その結果，TS-InSAR で得られる準上下変位速度と AHP 評価合計点との間には一定の関係が認められ，特に地すべり移動体内部の準上下変位速度の最高値との相関が中央値よりも相対的に高かった．これは，AHP 評価がサブユニットなどの局所的な活動性を重視していることに加え，TS-InSAR にもそのような局所的変動が反映されているためだと考えられる．これらの結果は，将来的に，TS-InSAR を用いた地すべり活動度評価の実現可能性を示唆するとともに，活動度評価における地すべり移動体区分の重要性を示すものと考えられる．

一方，本研究は限定的な範囲を対象とした検討であり，検討結果の一般化には注意が必要である．また，JAXA が 2024 年に打ち上げた ALOS-4/PALSAR-

3 の登場により，ALOS-2/PALSAR-2 では観測が難しかった比較的急速に変動する地すべりの変動の計測可能性も提唱されている [16]．したがって，今後は継続的かつ高頻度な L バンド SAR 衛星データを他地域にも展開して事例を蓄積し，より地すべり変動の実態に則し，かつ実用的な地すべり活動度評価を実現していく必要がある．

謝辞：本研究は，令和 7 年度砂防・地すべり技術センター研究開発助成（研究代表者：宇佐見星弥），JSPS 科研費 25K00175（研究代表者：宇佐見星弥），東京大学地震研究所特定共同研究 2024-B-02，国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター地球観測研究公募（EO-RA4）の援助を受けました．航空レーザ測量データは，国土交通省中部地方整備局静岡河川事務所および G 空間情報センターから入手しました．研究に際し，日本工営株式会社の八木浩司博士，日本大学の佐藤浩教授，北海道大学情報科学研究院（国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構）の田殿武雄客員教授，鳥取大学の河野勝宣准教授にご助言をいただきました．現地調査では，名古屋大学大学院の當麻央介氏にご協力いただきました．以上，ここに記して感謝申し上げます．

参考文献

1) Miyagi, T., Prasad, G. B., Tanavud, C., Potichan, A., and Hamasaki, R.: Landslide risk evaluation and mapping: Manual of aerial photo interpretation for landslide topography and risk management, Rep. Nat. Res. Ins. Earth Sci. Disas. Prev., No.66, pp.75-137, 2004.
2) 八木浩司，檜垣大助，㈳日本地すべり学会平成 14 年第三系分布域の地すべり危険箇所調査手法に関する検討委員会：空中写真判読と AHP 法を用いた地すべり地形再活動危険度評価手法の開発と阿賀野川中流域への適用，日本地すべり学会誌，Vol.45，pp.358-366，2009．
3) 北海道立総合研究機構：地すべり活動度評価手法マニュアル（案）ver.1.3，2012，https://www.hro.or.jp/industrial/research/eeg/development/publicati35 ons/pub033.html，2026.5.24
4) Kohno, M., and Higuchi, Y.: Landslide susceptibility assessment in the Japanese archipelago based on a landslide distribution map, Int. J. Geo-Information, Vol.12, Arc no. 37, 2023.
5) 宇佐見星弥：国土地理院の時系列干渉 SAR 画像に基づく北海道の活動性地すべり地形データマップの作成と精度検証, E-journal GEO, Vol.19, pp.132-144, 2024.
6) 産業技術総合研究所：20 万分の 1 シームレス地質図 V2，https://gbank.gsj.jp/seamless/，2026.5.24．
7) 清水文建，八木浩司，井口隆，大八木紀夫：5 万分の 1 地すべり地形分布図第 14 集「静岡」，防災科学技術研究所研究資料，No.221，https://dil-opac.bosai.go.jp/publication/nied_tech_note/landslidemap/pdf-14.html，2026.5.24．
8) 神山嬢子，江川真史，國友優：人工衛星 SAR 画像による河道閉塞箇所の緊急判読調査手法の提案，平成 26 年度国土交通省国土技術研究会論文集，pp.13-17，2014．
9) Ozawa, T., Fujita, E., and Ueda, H.: Crustal deformation associated with the 2016 Kumamoto earthquake and its effect on the magma system of Aso volcano, Earth, Planets and Space, Vol.68, Art no. 186, 2016.
10) Morishita, Y., Lazecky, M., Wright, T. J., Weiss, J. R., Elliot, J. R., and Hooper, A.: LiCSBAS: An open-source InSAR time-series analysis package integrated with the LiCSAR automated Sentinel-1 InSAR processor, Remote Sensing, Vol.12, No.3, Art no.424, 2020.
11) Gomba, G., Parizzi, A., Zan, F. De., Einder, M., and Bamler, R.: Toward operational compensation of ionospheric effects in SAR interferograms: The split-spectrum method, IEEE Trans. Geos. Remote Sens., Vol.54, pp.1446-1461, 2016.
12) 小澤拓，清水慎吾：数値気象モデルを用いた SAR 干渉解析における大気遅延誤差の軽減，測地学会誌，Vol.54，pp.137-147，2010．
13) Baran, I., Stewart, M. P., Kampes, B. M., Perski, Z., and Lilly, P.: A modification to the Goldstein radar interferogram filter, IEEE Trans. Geos. Remote Sens., Vol.41, pp.2114-2118, 2003.
14) Fujiwara, S., Nishimura, T., Murakami, M., Nakagawa, H., and Tobita, M.: 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry, Geophysical Research Letters, Vol.27, pp.2049-2052, 2000.
15) Taima, O., and Saito, H.: Monitoring of active landslides in the Southern Japanese Alps using D-InSAR and optical satellite images: A case study of the Morokozawa landslide, Proc. Jpn. Geos. Union Meeting 2025, HDS07-02, 2025.
16) Usami, S., Ishimaru, S., and Tadono, T.: Advantages of high-temporal L-band SAR observations for estimating active landslide dynamics: A case study of the Kounai landslide in Sobetsu town, Japan, Remote Sens., Vol.16, No.15, Art no.2687, 2024.

（2026.5.29　**受付**）