急激な永久凍土の崩壊が引き起こす地形変化の自動検出

～最先端の画像解析技術により融解スランプを北半球規模でマッピング～

ポイント

・氷に富む永久凍土の崩壊により形成される融解スランプを無料衛星画像と深層学習により検出。
・北半球スケールに適用できる汎用性の高い検出モデルを構築。
・広範な永久凍土地帯で進行する地形変化の広域的な監視基盤構築に貢献。

概要

北海道大学大学院地球環境科学研究院のロウ・ペイチン研究員と石川　守准教授らの研究グループは、融解スランプ（Thaw slump, TS）の位置や広がりを、無料で入手可能な衛星画像から自動検出するフレームワークを開発しました。融解スランプは、氷に富む永久凍土[*1]の融解により形成される特異地形で、近年各地で多発しています。地すべりを引き起こし、周囲の生態系に深刻な影響を及ぼすほか、温室効果ガスの放出を加速させることで、地球温暖化をさらに進行させる可能性があります。研究グループは、Google Earth Engine のクラウドネイティブなデータの融合と深層学習（PyTorch[*2]）を組み合わせることで、本フレームワークを構築しました。学習データには、青海チベット高原（QTP）や北極圏に見られる多くの TS 事例を用いました。その結果、モデルが予測する TS 領域と実際のそれとの交差率（領域重複率）は QTP で 0.820、北極圏で 0.770、北半球全体で 0.776 となり、堅牢な汎用能力を備えた検出フレームワークを得ることができました。

この成果は、永久凍土層の融解や崩壊に伴う地形攪乱を広域的に監視する体制の構築に大きく貢献します。

なお、本研究成果は、2026 年 6 月 4 日（木）公開の ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 誌にオンライン掲載されました。



左：融解スランプ－氷に富む永久凍土層の融解はしばしば斜面崩壊を引き起こし、地すべり状地形を形成する。滑落崖に露出した地下氷は夏季には不可逆的に融解し、浸食前線が斜面の上方や側方へと広がっていく。右：融解スランプの拡張－融解スランプの拡張は、土砂流出や植生劣化など、周囲の生態系に大きな影響を与える。さらに永久凍土層中の有機炭素の放出により、温暖化が進行することが懸念されている。（写真はいずれもチベット高原。）

【背景】

氷に富む永久凍土の融解は、地盤を不安定化し大規模な地滑り地形（融解スランプ）を形成します。この地形変化は極めて急速に進み、周囲の植生を劣化させるだけでなく、地下氷中に蓄えられていた温室効果ガスを大規模に放出させ、温暖化を加速させます。融解スランプはどこで発生し、どのような速さで拡張しているのか？これを理解することは永久凍土融解による環境変動を地域的にもグローバルにも理解するために極めて重要です。おもに北極圏や高山といった極地で発生する融解スランプを現地で観測することはあまり現実的ではないため、衛星画像を用いた解析が求められます（図 1）。

【研究手法・成果】

本研究が開発したのは、無料で入手・利用可能な Sentinel1、2[*3] 衛星データや Google Earth Engine を用いて北半球規模で融解スランプを検出するための深層学習ワークフローです（図 2）。まずチベット高原や北極圏にある多くの融解スランプ事例を収集しこれを学習データとしました（図 3）。これを説明する変数（チャネル）として、Sentinel1 の偏波データ[*4]、Sentinel2 のマルチスペクトルデータとこれらから算出される植生や陸水に関する指標、さらに標高、斜面方位、傾斜といった地形データを参照しました。説明変数に対しては PCA[*5] や SNIC[*6] などにより事前に画像データ処理を行い計算の効率化・精度向上を図りました。深層学習では、ピクセル単位で画像解析したうえで融解スランプの境界や領域を識別します。本研究では PyTorch 環境下で DeepLabV3+、FPN、LinkNet、PAN、PSPNet、U-Net++といった多岐にわたるセグメンテーションモデル[*7] を導入することにより、多様な景観下で複雑な形状の融解スランプを精度よく検出できるようにしました。

チベット高原や北極圏に分布する計約 3,200 地点における融解スランプ画像をモデルの精度検証に用いました。適合率（モデルが融解スランプと予測したもののうち正解だった割合）はチベット高原で 0.794—0.835、北極域で 0.732—0.792、そして両者を併せた領域（北半球）では 0.761—0.812 となり、モデルによって融解スランプは精度よく検出されていることが示されました。さらに本研究では、多くの説明変数（チャネル）や画像解析技術を導入・試行したことにより、融解スランプを効率的かつ精確に検出する多くのノウハウも見出すことができました。具体的には、マルチスペクトルデータ（Sentinel2）の可視光線、近赤外線、短波長赤外線などが重要指標であること、PCA や SNIC といった事前画像ノイズ処理や説明変数の次元削減により、検出率（適合率）が大幅に改善されること、DeepLabV3+、LinkNet、U-Net++といった画像セグメンテーションモデルが極めて優秀であることなどが分かりました。

【今後への期待】

永久凍土の融解は今後も各地で進み、それに伴う陸面環境の激変が予想されています。本研究では、最先端の画像解析技術を寒冷圏の陸面環境研究に応用しましたが、この事例は融解スランプに限らず永久凍土地帯の地形変化を広域的かつ効率的に監視する体制の構築にも繋がるでしょう。

【謝辞】

本研究は JSPS 科研費（JP17H01849、JP25H01251、JP25H00507）及び Arctic Challenge for Sustainability III（ArCS3）の助成を受けたものです。

論文情報

論文名	Hemispheric-scale mapping of thaw slumps using a cloud-native and transferable deep learning framework（クラウドネイティブで汎用性の高いディープラーニングフレームワークによる北半球規模での融解スランプのマッピング）
著者名	Peiqing Lou[1、2]、 Tonghua Wu[2]、 石川　守[1]、 Jie Chen[2]（[1]北海道大学大学院地球環境科学研究院、[2]中国科学院西北生態環境資源研究所）
雑誌名	ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing（リモートセンシング学の専門誌）
ＤＯＩ	10.1016/j.isprsjprs.2026.06.002
公表日	2026 年 6 月 4 日（木）（オンライン公開）

お問い合わせ先

北海道大学大学院地球環境科学研究院　准教授　石川　守（いしかわまもる）

ＴＥＬ　011-706-2221　ＦＡＸ　011-706-4867　メール　mishi@ees.hokudai.ac.jp

ＵＲＬ　https://sites.google.com/view/mamoru-ishikawa

配信元

北海道大学社会共創部広報課（〒060-0808 札幌市北区北 8 条西 5 丁目）

ＴＥＬ　011-706-2610　ＦＡＸ　011-706-2092　メール　jp-press@general.hokudai.ac.jp

【参考図】

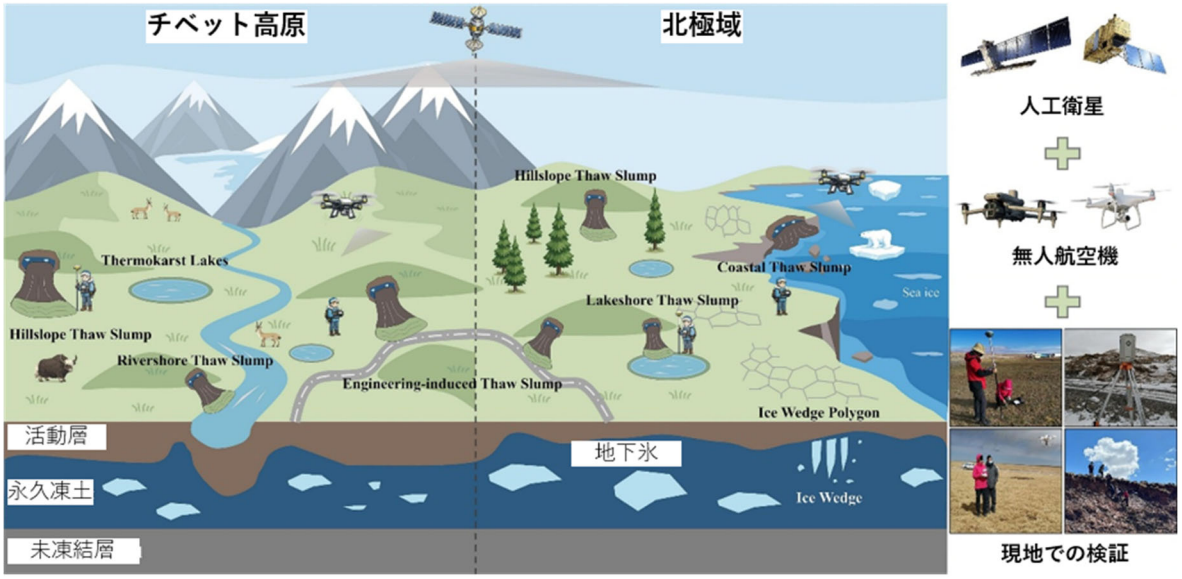


図 1. 北半球永久凍土地域における融解スランプの監視システム。融解スランプ(Thaw slump)は丘陵斜面(Hillslope)、河岸(Rivershore)、湖岸(Lakeshore)、海岸沿い(Coastal)に発達する他、人為的な土地地改変(Engineering-induced)などによっても形成される。Ice Wedge(楔状に発達した地下氷、地表面には多角形状の土壌の高まり(Ice wedge polygon)を形成する)。

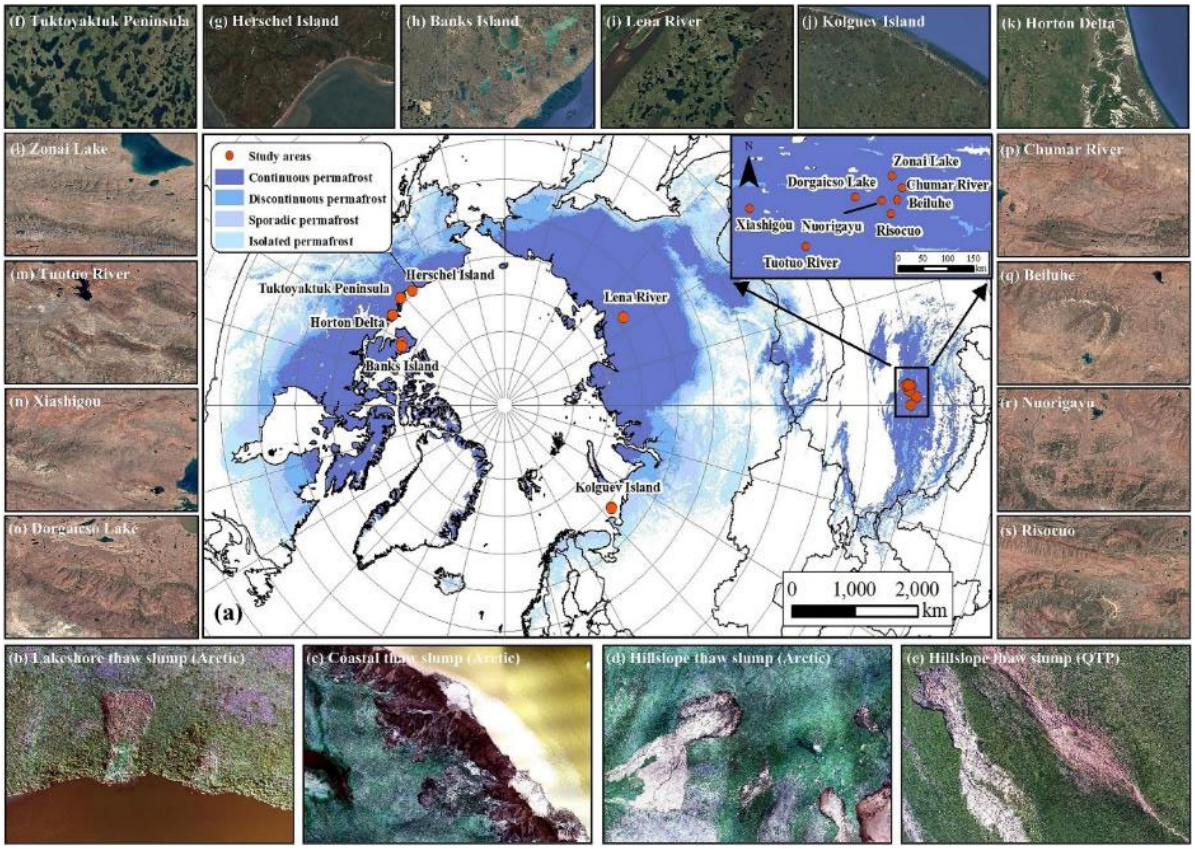


図 2. 学習データとした北半球の永久凍土帯における融解スランプの分布（a)、無人航空機によるオルソモザイク画像（b - e)、高解像衛星画像（北極圏（f – k)、チベット高原（l – s))。

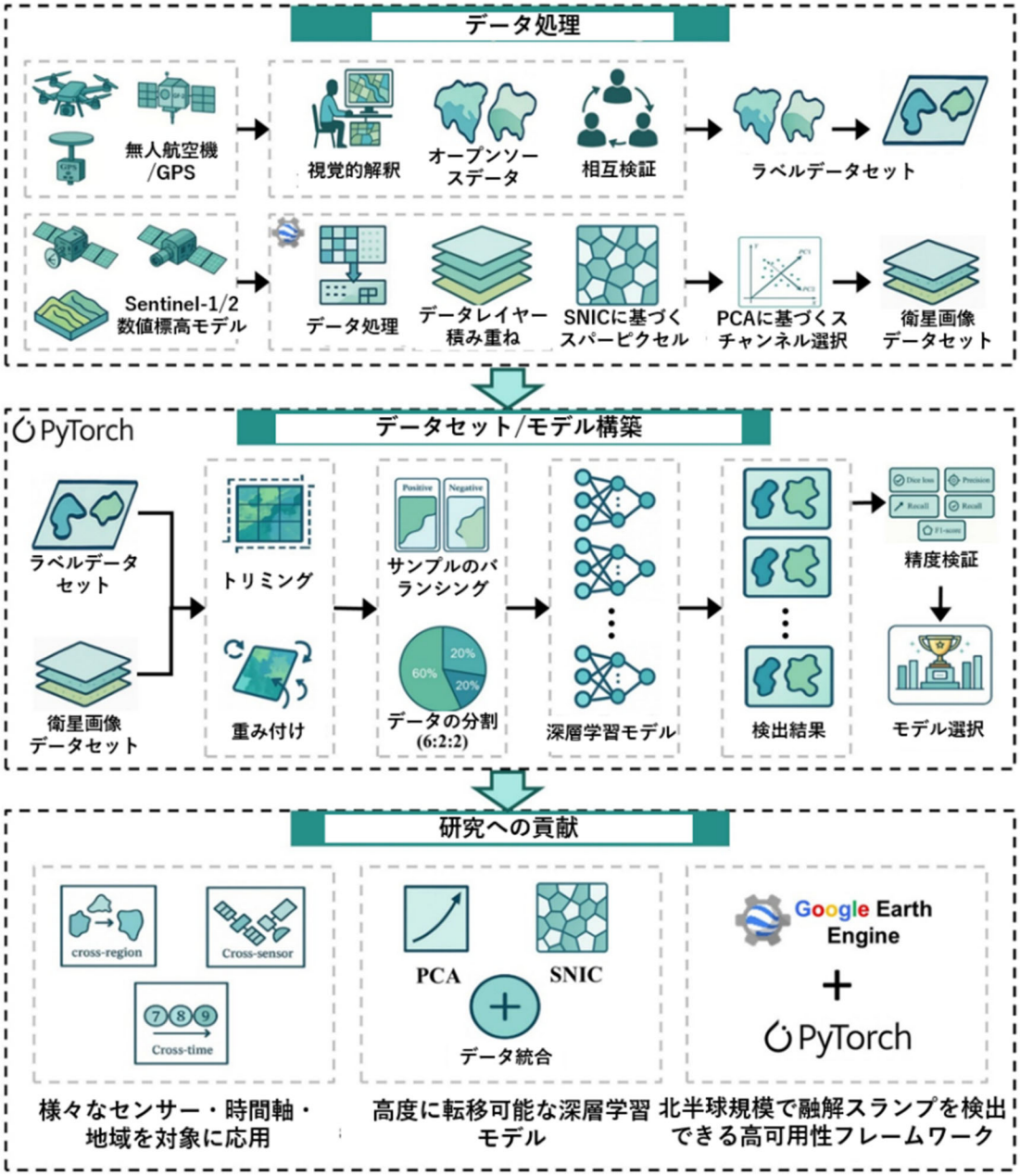


図 3. 融解スランプ検出のワークフロー概要

【用語解説】

＊1 永久凍土 … 2 年以上連続して 0°C以下を保つ土壌や岩石。しばしば多くの地下氷を含む。

＊2 PyTorch … Python ライブラリの一つで深層学習フレームワーク。

＊3 Sentinel1、2 … EU が主導する地球観測人工衛星。Sentinel-1 は C-band（4〜8GHz）の合成開口レーダー（SAR）を、Sentinel-2 はマルチスペクトルカメラを搭載している。

＊4 偏波データ … SAR で受発信する電波は振動方向によって水平・垂直偏波に分けられる。

＊5 PCA … 多数の変数をその情報をなるべく損なわずに少数の変数に変換する解析手法。

＊6 SNIC … 画像をピクセルの近傍関係に基づき、ピクセルのまとまり（スーパーピクセル）へと分割する手法。

＊7 セグメンテーションモデル … 画像をピクセル単位で解析し、各領域や物体を識別し分類する深層学習モデル。