



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Abrupt permafrost thaw processes after wildfire revealed by InSAR and on-site observations at Batagay, Northeastern Siberia [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	柳谷, 一輝; Yanagiya, Kazuki
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第14794号
Issue Date	2022-03-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/85937
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Kazuki_Yanagiya_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士(理学) 氏名 柳谷一輝

審査担当者	主査	教授	古屋正人
	副査	教授	日置幸介
	副査	准教授	高田陽一郎
	副査	教授	蟹江俊仁(工学研究院)
	副査	准教授	石川守(地球環境科学研究院)

学位論文題名

Abrupt permafrost thaw processes after wildfire revealed by
InSAR and on-site observations at Batagay, Northeastern Siberia
(シベリア北東部バタガイにおける山火事後の急激な
永久凍土融解プロセス: InSAR と現地観測による解明)

博士学位論文審査等の結果について(報告)

近年の地球温暖化に伴う北極域の永久凍土の融解は、凍土中に固定されていた有機炭素の微生物分解を通じた大気中への再放出とそれによる更なる温暖化の可能性という「凍土炭素フィードバック」として懸念されている。永久凍土帯は北半球の4分の1の面積を占めていることから、グローバルな環境変動をさらに加速する可能性がある。また、含水率の高い凍土帯の融解は地盤沈下による不可逆的な地形変化(サーモカルスト)や建造物等のインフラの破壊といったローカルな社会的影響もあるため、凍土融解の実態は幅広い時空間スケールで把握する必要がある。しかし、永久凍土は通算2年以上0°C以下にある地下構造と定義されているため直接観測にはボアホールが必要で、地上観測点は非常に少なく、地域的偏在も著しい。凍土の現地観測が盛んに行われてきた北米のアラスカに比べて、特にシベリア北東部の実態把握は遅れている。一方、凍土融解の将来予測に向けた現状の地球システムモデルでは、一定の平均気温上昇に伴う経年融解の効果は組み込まれているが、森林火災等による擾乱によって進行する急速融解の効果は考慮されて来なかった。急速融解の効果は局所的とはいえ、地下深部にまで影響を及ぼす。また最近の温暖化に伴って北極圏でも森林火災の規模も頻度も増大している。このような背景から、シベリア北東部において火災後にどのように凍土融解が進行していくかを詳細に把握し、そのメカニズムを理解することは喫緊の重要課題になっている。

本論文は、このような現況にある火災後の急激な永久凍土融解プロセスについて、マイクロ波リモートセンシング手法の一つである合成開口レーダー干渉法(Interferometric

Synthetic Aperture Radar : InSAR) を用いて、シベリア北東部にあるサハ共和国バタガイの周辺において発生した 2014 年、2018 年、2019 年の森林火災後の凍土融解に伴う沈降と凍上による地盤変動を検出し、凍土融解量(と水分移動)の時空間変化を調べた。さらに、InSAR データの検証と補完を目的に、プローブによる融解深測定、土壌水分量測定、植生変化等の現地調査も実施し、2019 年と 2021 年の 9 月には著者自身も参加した。

2014 年の火災はヤナ川北西岸で発生したもので、火災発生 2 年後から 5 年間の地盤変動をシベリアで初めて L-band の ALOS-2 と C-band の Sentinel-1 で同時に検出した。従来の InSAR に基づく凍土帯の火災後地盤変動の検出例と異なり、地盤変動時系列に対して何も仮定することなく、夏季の急激な沈降と共に、初冬の凍上と厳冬期の沈静化を実証し、5 年間で終息しつつあることを示した。このデータから総経年沈下量を推定しただけでなく、火災深刻度が比較的一様であったにも拘らず、尾根や斜面方向による地盤変動の空間的不均一性を明らかにした。また凍上シグナルについて、未だに間隙流体の凍結に伴う体積膨張とするモデルが先行研究で提示されていたが、水分の移動を伴うアイスレンズ形成を説明する凍上理論で解釈したのも初めてである。

2018 年と 2019 年の火災は、バタガイを特に有名にしている世界最大の融解浸食地形(通称“バタガイカ-メガスランプ”)と同じ斜面で発生した：2018 年跡の標高はバタガイカメガスランプとほぼ同じで 2014 年火災跡に比べ 120m ほど低く、2019 年火災跡の方がさらに低い。バタガイカ-メガスランプ自体が 1970 年代の森林伐採をきっかけとしていることから、同じ斜面での火災がどのような凍土融解と地形変化をもたらすかを調べることは、研究者のみならず地域住民にとっても大きな関心事である。本論文でまず明らかになったことは、火災前の冬と火災直後の冬の ALOS-2 データによる InSAR から火災前と後の一年間では凍上シグナルが卓越し、凍上期間そのものが火災後 2 年目にさらに伸びていること、年間を通じて沈降が卓越するのは火災後一年後以降であることである。また、2018 年跡の累積沈降量が最大 10cm 程だったのに対して、2019 年跡は小さく、地下水そのものの不均一な分布が示唆された。これら地盤変動の時間変化は現地測定した融解深の増加とも整合的である。また 2014 年跡の累積沈降量の方が大きいことも明らかになり、元々の地下水の厚さを反映している可能性がある。

さらに 3m の空間分解能をもつ ALOS-2 SM1 モード画像による InSAR データから、2018 年跡では変動域と非変動域の明瞭な境界の存在、2019 年跡ではガリー地形底部での顕著な凍上を検出した。2018 年跡の変動域/非変動域の明瞭な境界は斜面上の微小な凹凸と対応することも分かった。融解深と土壌水分の現地調査の結果とこれらの空間的不均一性を比較すると、変動シグナルの空間変化は融解深ではなく土壌水分量と明確な相関があることを確認した。火災後の地盤変動については、地盤変動シグナルから融解深を推定するというアルゴリズムが成立しないことを示唆している。

これらを要するに、著者は、シベリア北東部のほぼ同じ気候条件での 3 箇所の火災跡を取り上げてその後の凍土融解過程と地下の温度構造・土壌水分変動の実態について新見見を得たものである。それらは森林火災等の擾乱による凍土の急速融解の過程の理解や将来予測のためのモデリング手法に対して大きく貢献するところである。

よって著者は、北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格あるものと認める。