

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03982

研究課題名(和文) 永久凍土地帯における森林火災後の地盤変動：時空間変化の検出とモデリング

研究課題名(英文) Post-wildfire Ground Deformation over Permafrost Areas: Detection and Modeling of Spatial-Temporal Changes

研究代表者

古屋 正人 (Furuya, Masato)

北海道大学・理学研究院・教授

研究者番号：60313045

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：東シベリア・バタガイ周辺で2014・2018・2019年に発生した森林火災跡での凍土融解に伴う地盤変動を合成開口レーダー干渉法(InSAR)で検出し、詳細な時空間変化を調べた。2014年跡では火災後5年間で最大30cmは沈降したことが、初冬には明瞭な凍上シグナルがあることが、変動量は火災深刻度とは必ずしも対応しないことが明らかになった。一方、バタガイカクレータと同じ斜面で発生した2018年・2019年火災跡の沈降量はむしろ小さい。

これらに鉛直方向熱伝導による凍結融解と水平二次元の有限差分地下水流動モデルを組み合わせた解析を進めた。2019年から3年連続で融解深、土壌水分等の現地調査も実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

永久凍土の融解の進行は、広域的かつ緩慢なのか、局所的かつ急激なのか定量的には不明な点が多い。我々はシベリアのバタガイ近郊の森林火災跡における地盤変動を合成開口レーダー干渉法を用いて追跡し、火災直後から5年程度の融解過程を明らかにした。また融解深や土壌水分の現地観測データを取得して解釈した。凍土融解による永年の沈降量は、地下水の量や凍結面の深さで空間的に不均一に変化しており、火災深刻度との関連は薄い。バタガイカクレータと同じ斜面で発生した2018/2019年火災跡の沈降量は2014年火災跡よりも沈降量は少なかったが、防火帯として作られた道で侵食が進行しており今後の監視も必要である。

研究成果の概要(英文)：We detected the post-fire ground displacements by InSAR at the 2014, 2018 and 2019 scars near Batagay, Eastern Siberia, and examined their detailed spatial-temporal changes. The 2014 scar exhibited subsidence signals up to 30 cm at maximum during the 5 post-fire years, accompanying with clear frost heave signals in early winter. The subsiding area does not necessarily correspond to the burn severity. Meanwhile, the 2018 and 2019 scars on the same slope as Batagaika crater revealed rather smaller subsidence amplitude.

We applied the premelting theory of frost-heave to the observed uplift velocity at the 2014 scar. Also, we perform numerical modeling of the derived ground deformation, combining the freezing-thawing process due to thermal conduction along vertical direction with 2-D finite-difference ground-water flow model on the horizontal directions.

We performed onsite measurements of thaw depth, soil moisture and surface temperature in late September 2019, 2020 and 2021.

研究分野：測地学，地球物理学

キーワード：永久凍土 合成開口レーダー干渉法 森林火災 シベリア 地盤変動 サーモカルスト InSAR

1. 研究開始当初の背景

北極圏の永久凍土地帯では、近年の地球温暖化によって凍土の融解が進行し、それに伴う地形変化（サーモカルスト）や沿岸侵食、建造物等の各種インフラの損壊が自然災害として報告されている。一方、凍土地帯の土壌には二酸化炭素 CO_2 やメタン CH_4 といった温室効果ガスが含まれ、凍土地帯で蓄えられる炭素量は現在の大气中に含まれる炭素量の 2 倍とされる。そのため「凍土融解→温室効果ガスの放出→温暖化加速→さらなる融解加速」という正のフィードバックも懸念されている (Schuur *et al.*, *Nature*, 2015)。

一般に、永久凍土地帯には地表から深さ 1-2 m 程度の浅部には夏季には融解して水を含む土壌層である「活動層」があり、その下で最低 2 年以上は年間を通じて凍結する層が「永久凍土(層)」である。永久凍土は北半球の陸地の 4 分の 1 を占めるほど広域に分布する反面、現場で地下深さ方向の熱的状态を観測するためにはボアホールが必要であり、陸上観測点は極めて少なく、地域的偏在も著しい。したがって広域的かつ包括的に永久凍土の熱的状态を観測・監視するためには、衛星リモートセンシングが有効である。さらに最近になって、融解に伴って生ずる地盤変動（年間数 cm の変化）を画像として面的に検出できる合成開口レーダー干渉法 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, 以下 InSAR) が注目されている。一方で、凍土融解に関する従来からのもう一つの問題点は、北半球陸地の 4 分の 1 もの領域が「ゆっくりと広域的に融解しているのか、急激に局所的に融解しているのか」も分からなかったことで、地上観測データが少ないためどこから手を付けて良いかも分からない状況にあった。

しかし我々は、これまでの研究で凍土の融解は森林火災を契機として急激かつ局所的に開始し、火災終息後もその跡地で数年間は継続していることを掴んだ。森林火災は温暖化によって北極圏でも増加傾向にあり、大気汚染や森林学/生態学的な研究が活発に行われている。しかし凍土融解への影響という視点からの研究事例はアラスカでの事例に限られ (Lin *et al.*, *JGR-ES*, 2012; Iwahana *et al.*, *Remote Sens.* 2016), シベリア平原の森林火災に着目した InSAR による先行研究は我々が最初である。しかし、どの程度の森林火災が、どの位の凍土融解をもたらすか、活動層はどれほど深くなるか、土壌の熱的構造にどの位の期間に亘って効果を及ぼすのか、周囲の地形・植生との関係はどうかなどの基本的問いに答えられていない。

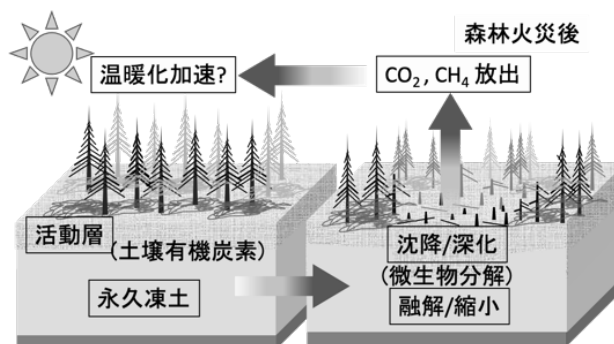


図 1. 森林火災後の植生喪失に伴って凍土融解と地表沈降と活動層の深化、土壌有機炭素分解による温室効果ガスの放出

2. 研究の目的

永久凍土地帯の森林火災跡地の InSAR による地表変位データを獲得し、火災直後から 5 年程度の期間における時空間的發展を追跡する。そのデータを解釈するために、融解深や土壌水分等の現地観測データを収集するとともに、熱・水文学的な数値モデルも用いて、地下の熱的・物理的状态を推定・抽出する。

3. 研究の方法

ALOS-2 と Sentinel-1 の InSAR 画像の解析によって、サハ共和国バタガイ周辺の森林火災跡地の凍土融解過程を追跡し、「時系列解析」を通じて季節的な沈降と凍上と含む経年的な地盤変動をマルチタイムスケールで検出し、凍土融解量を推定し、数値モデリングの比較対象とする。

火災跡周辺で、年に一回 5 日間程度での調査（融解深、地温、土壌水分、水準測量、ドローンによる植生調査）を 9 月に行う。9 月は夏季から冬季へ変わる時期で活動層厚が最も深く、その年で融解が最も進行する時期にあたり、経年的な変化を調べるためである。近傍の火災を経験していない森林との差異に注目した観測を実施する。

2020 年度はコロナ禍の影響で現地に向かうことはできなかったが、ロシア側の共同研究者に融解深測定等を依頼して、データを取得した。また、ALOS-2 の画像を従来の 10m から 3m の空間分解能で取得するために有償観測を実施した。

鉛直方向熱伝導による凍結融解と水平二次元の有限差分地下水流動モデルを組み合わせた数値モデリングを実施し、各種の観測データと比較する。

4. 研究成果

(1) 2014 年 7 月のバタガイ森林火災跡の地盤変動の時空間変化を、L-band の ALOS2 と C-band の Sentinel-1 の合成開口レーダー干渉法 (InSAR) によって検出した。シベリア域の森林火災に伴う地盤変動の初の検出事例であり、森林火災後 4 年目まで調べた初の研究事例である。アラスカ域では冬期は積雪の影響のため凍上のシグナルは検出されてこなかったが、後述のようにバタ

ガイ周辺では明瞭な凍上シグナルを見いだすことができた。

それぞれの衛星と運用周波数の特徴を生かすために L-band の ALOS2 による InSAR では低周波数による干渉性の良さを利用して長期的な時空間変化を (図 2), 一方 C-band の Sentinel-1 による InSAR では観測頻度(時間分解能)の高さを利用して, 季節的な変動の詳細を明らかにすることができた (図 3). また後者では ALOS2 と Sentinel-1 の整合性も確認した(図 4).

長期的変化: 図 2 は ALOS-2 の 50 枚の InSAR 画像を用いた時系列解析により, 火災後 4 年を経て沈降速度が鈍化しつつあることを示した (図 2 左は 2014 年火災跡の累積沈降水量, 図 2 右は左の b 地点の時系列). 沈降水量は空間的に不均一で火災深刻度との対応関係は明瞭ではない. 数値地図で確認したガリーが発達した領域での沈降水量が多いように見える. b 地点の時系列から火災後の 2 年間で最も沈降速度が大きく, 初冬には凍上シグナルも見える.

短期的(季節)変化: 2017 年には Sentinel-1 衛星が頻繁に当該地域を撮像していたため, 短期的な変位を追跡でき, ALOS2 の InSAR との比較も可能になった. 図 3 に一例を示す. 図 3 は秋以降の凍上を示し, 火災跡地が周囲に比べて大きく隆起していることが分かる. 従来, 冬季は積雪で干渉性が劣化するためデータが示されてこなかったが, 本研究地域では可能なことが実証された.

図 4 右の Sentinel-1 の累積値は, 図 3 の①から⑤の 5 枚で積算である. 11 月中には殆ど凍上が終了していることが分かる. 衛星視線方向が ALOS-2 と Sentinel-1 では逆であるにも拘らず LOS 変化の空間パターンがほぼ同じであるのは, 実際の変位がほぼ上下方向であることを示す.

(2) 地盤の沈降/隆起と凍土の融解量が実際にどう対応するかは, 何らかの現地観測データで検証する必要がある. またバタガイでは, 2018 年と 2019 年には車でアクセス可能な近傍地域で森林火災が発生しており, 今後の地盤変動の推移を InSAR で調べるにあたり, 火災直後の地表状況を把握しておくことも重要である. ロジスティクスの予備的調査もかねて 2019 年 9 月 20-23 日にバタガイ現地に向かい(図 5), 2014 年火災跡地(テント 2 泊), 2018-19 年火災跡地は 1 日限りではあったが, ピット掘削(温度計設置, 土壌水分測定, 図 6a, c, f), 融解深測定(図 6b, d, e, f), 簡易水準路線の設置(図 6c), ドローン撮影を行なった.

「融解深」はステンレス棒を地中に差し込んだときの限界深さとして測定する. 本調査時期の 9 月 20 日過ぎは降雪期の直前であり, 季節変化する「融解深」が最も深くなる時期で, 「活動層厚」に対応している. 図 6a, b は 2014 年火災跡での調査風景である. 図 6a では 113cm の深さでアイスレンズが現れた. また火災から 5 年経過して植生も回復しているが, 周囲の木々はまだ回復してはいない. この地点や図 6d に示した火災跡の「融解深」は 120cm を超えていたのに対して, 図 6d で明瞭なようにごく近傍でも焼失していない領域での融解深は 45cm 程度で, 80cm も深くなっている. また, 2018 年と 2019 年の火災跡地での融解深測定の結果を見ると, 2018 年火災跡は既に顕著に深くなっているのに対して, 2018 年火災跡では焼失域とそれ以外の違いが明瞭ではなかった.

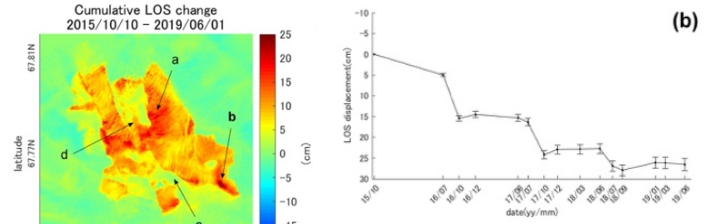


図 2: (左)2015-2019 年の累積変位. (右) 地点 b の時系列. (Yanagiya & Furuya, 2020)

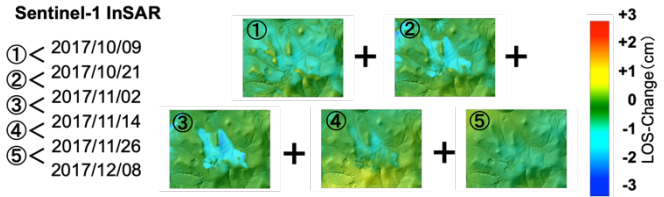


図 3: 図 2 右の Sentinel-1 の累積値は①から⑤で示した 5 枚の InSAR 画像を積算したものである. 11 月には凍上がほぼ終了していることが分かる.

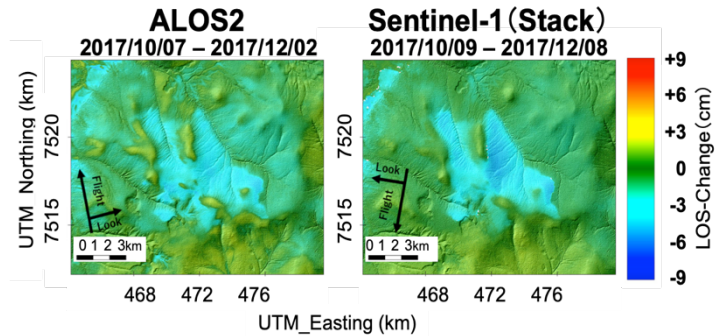


図 4: (左) 2017 年 10 月 7 日から同年 12 月 2 日までの ALOS2 による衛星視線方向(Line-of-sight)の変化. (右)2017 年 10 月 9 日から同年 12 月 8 日までの Sentinel-1 による LOS 変化の累積値.



図 5: バタガイ現地調査.2014 年火災跡地が北西にある.2018,19 年火災跡地は車で近傍までアクセスできた.

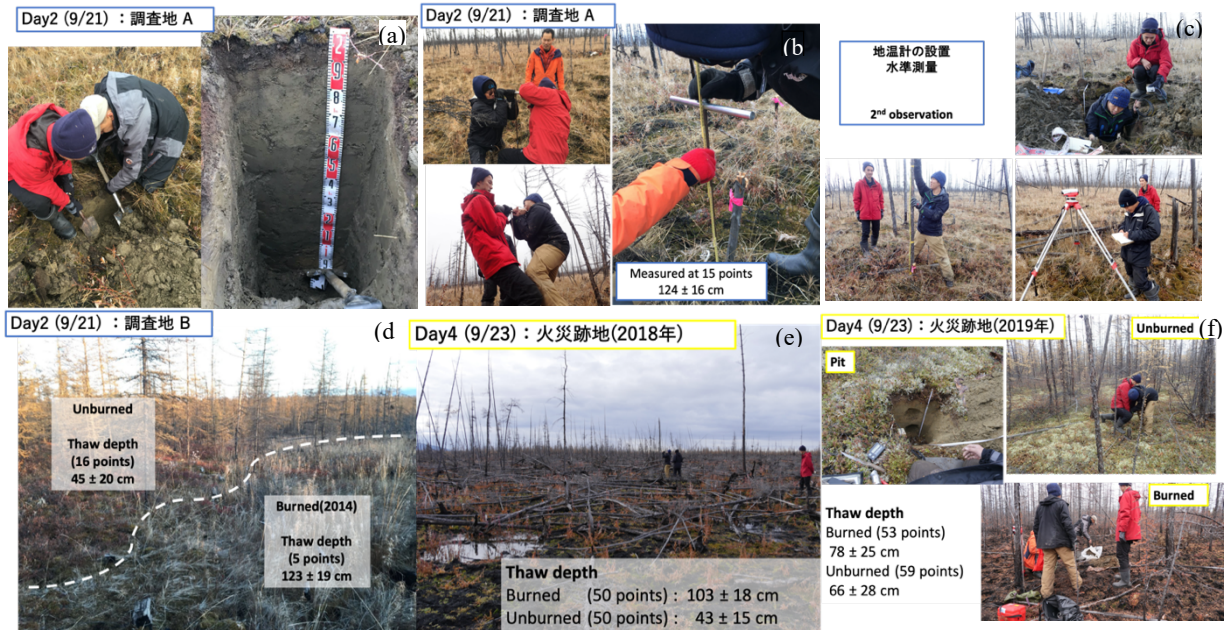


図 6: 現地調査の様子. (a)2014 年火災跡でのピット掘削.113cm を超えたところでアイスレンズが出てきた. (b) 2014 年火災跡での融解深測定. 120cm 超の深さ. (c)地温計の設置, 土壌水分測定, 水準路線の設置. (d)InSAR 画像で見つけていた 2014 年火災跡の植生の明瞭な境界. その付近での融解深測定にも顕著な差が現れた. (e)2018 年の火災跡地と融解深測定の結果. (f)2019 年の火災跡地と周辺の非焼失域での掘削と融解深測定.

(3) Yanagiya and Furuya (2020) で報告された 2014 年火災後最初のデータが 2015 年 10 月からだったため初期の沈下量/融解量は明らかになっていなかった. 2018-2020 年のデータ解析によって 2018 /2019 年の火災を跨ぐ地盤変動が検出された (図 7, 8). 従来の InSAR による凍土帯の火災後地盤変動検出で火災時期を挟むと干渉性の劣化で欠測になっていたが, 図 7 はヤナ川対岸の 2019 年火災 (2019/06/09-26), 図 8 はクレータ周辺の 2018 年火災 (2018/08/03-08) と 2019 年火災 (2019/07/12-22) の火災前後の SAR 画像から得られた地盤変動を示す.

図 7 のヤナ川対岸の 2019 年火災跡は最大で 15cm の沈降を示している. ただし空間的な不均一性が高く, ほぼ変動していない所もある. 一方図 8 のクレータ東側では 2018 年火災跡も 2019 年火災跡も火災五一年目は沈降よりは隆起(凍上)量の方が大きい. 火災発生時期がヤナ川北の図 7 では 6 月だったのに対して, 図 8 の二箇所は 7 月と 8 月だったことから, 融解深度が深くなるための期間の長さを反映していると考えられる.

火災を挟んだ画像でも InSAR が可能であることは技術的にも新規性がある. また地域的な隆起と沈降の違いは, 凍結面までの深さや地下水の量を反映していると考えられる.

JAXA の「だいち 2号」は海外では空間分解能がやや劣るモード (10m) で観測が続けられてきたが, 2020 年に現地作業が不可能になった代わりに, より空間分解能の高いモード (3m) による (株) パスコを通じて有償観測を要求し, JAXA にはこれまでに 4 回新規に撮像して頂いた. 図 9 に示すのは, 2010/10/23-2021/03/12 の SAR 画像から得られた 2018/2019 年火災跡地の地盤変動である. 10 月から 3 月にかけての厳冬期の変動で 2018/2019 年火災跡で場所に依じた不均一な凍上シグナルが現れている. 2019 年火災跡ではガリーそのものでは変動は小さく, それに挟まれた領域で顕著な変動が見られている. また, 北東に向かって緩やかに傾斜している地形の中間から下流部で振幅が大きい. 次年度以降に向けたより実効性のある現地観測の指針を得るためにも, 高空間分解能 InSAR による火災域全体の地盤変動を調べておくことには大きな意義がある.

沈降をもたらす要因には, (1) 表層の「活動層」中の空隙を占めていた氷の融解, (2) 「活動層」

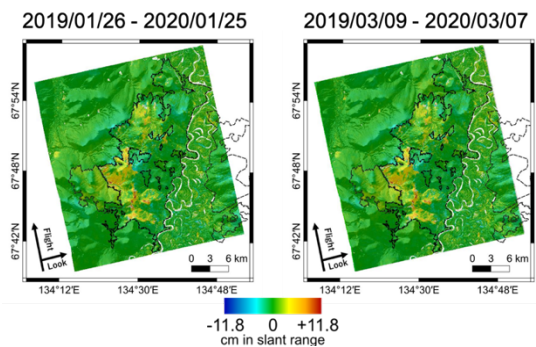


図 7: 2019 年火災前後の異なる 2 画像から得られた 2 つの独立した InSAR 画像. 左右で同じ空間パターンの変動を示し, 最大約 15cm の沈降を示す.

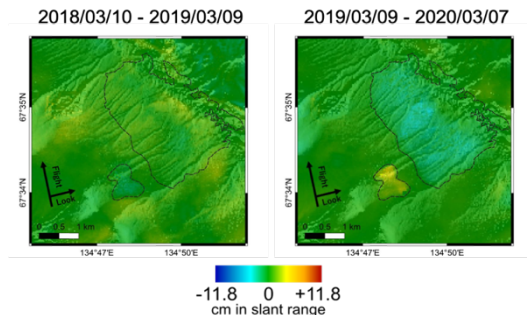


図 8: 左は 2018 年火災前後, 右は 2019 年火災前後の画像から得られた InSAR 画像. 左の 2018 年跡地は隆起が卓越している:2019 年跡では当然ながら殆ど変化ない. 右で 2019 年火災跡も最初の 1 年間は隆起が卓越しているが, 2018 年跡は沈降が卓越し始めている.

よりも深部にある地下水 (excess ice/massive ice)の融解の二つがあり, 前者は可逆的な季節変化をもたらすが, 後者は不可逆的で凍土域に特有のサーモカルスト地形の要因になる [Lin et al., 2014, 2015]. (1)のモデルに基づく, 凍上は「活動層」で起こる現象になり, 活動層が厚くなるほど凍上振幅も大きくなることになる. ところが図9の2018年火災跡の北西に広がる菱形領域で現れている凍上は, 振幅こそ火災跡ほどではないが有意であるにも拘らず, 現地測定した融解深は40cm程度と非常に浅かった. 凍土上端が元々地表面に近いために夏季に融解するが, 融解水が排水されることなく, その場で凍上の要因となっていると考えられる.

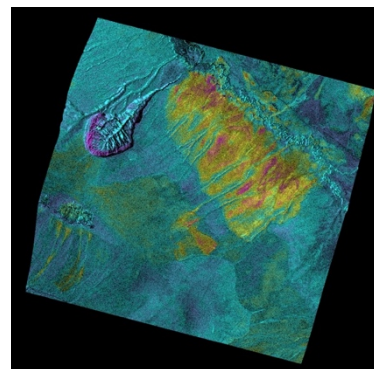


図 9: ALOS2 の 2020/10/23 と 2021/03/12 の SM1 画像で得られた地盤変動. 黄色から赤にかけて, 隆起のシグナルを示す. バタガイクレータの紫色は DEM の誤差と思われる.

(4) 予備的解析として, 図6で示した2014年火災跡における融解深データを疑似三次元解析プログラムによる数値モデリングで再現した. 比較に用いたのは以下の3箇所 (Table 1) であるが, 地点Bは図6dに示した近接する焼失域 (Burned) と非焼失域 (Unburned) を含んでいる. 測定値との比較を Table 2, 観測結果, 計算結果の時系列を図10示す. 一年目から三年目に同じような融解深度の発展が再現されているが, 現状のモデルでは地下水そのものの存在が考慮されていない. 2018年/2019年火災跡の融解深は2-3年後にかけてさらに深化していた. 地下水の存在そのものを考慮したモデリングは今後の課題であり, 図2の沈降量の再現においても不可欠であろう.

Table 1. Latitudes and Longitudes of Observation Points

	Latitude	Longitude
Point A	N 67.75774	E 134.41318
Point B	N 67.75083	E 134.36569
Point C	N 67.73736	E 134.40346

Table 2. Comparison of Thawing Depth between Observation and Analysis

Observation	A	B (Unburned)	B (Burned)	C
Element #	674	2146	2147	2978
Observed (cm)	124 ± 16	45 ± 20	123 ± 19	49 ± 21
Analyzed Max. (cm)	112.0	55.1	109.3	38.9

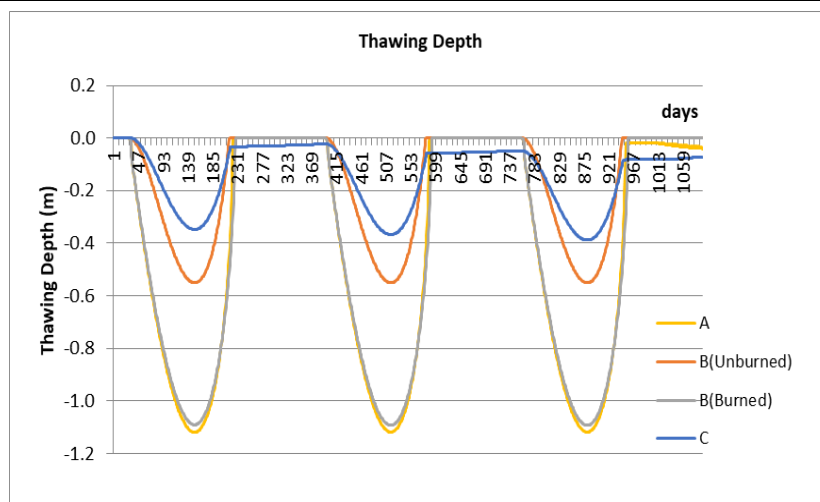


図 10: 融解深の時間発展シミュレーション

5. 主な発表論文等

Yanagiya, K., and M. Furuya (2020), Post-wildfire surface deformation near Batagay, Eastern Siberia, detected by L-band and C-band InSAR, *J. Geophys. Res., Earth Surface.*, doi:10.1029/2019JF005473.

柳谷一輝 (2022), 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), 北海道大学理学院博士論文.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kazuki Yanagiya and Masato Furuya	4. 巻 125
2. 論文標題 Post-wildfire surface deformation at Batagay, Eastern Siberia, detected by L-band and C-band InSAR	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research, Earth Surface	6. 最初と最後の頁 e2019JF005473
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2019JF005473	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 柳谷一輝, 古屋正人, 岩花剛, Petr Danilov, Alexander Fedorov
2. 発表標題 東シベリアの2014, 2018, 2019年森林火災跡地における凍土融解凍結過程の観測
3. 学会等名 JpGU-AGU Online Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柳谷一輝, 古屋正人, 岩花剛, Petr Danilov
2. 発表標題 InSARによる森林火災直後のサーモカルスト開始過程の研究
3. 学会等名 日本測地学会第134回講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柳谷一輝, 古屋正人, 岩花剛, Petr Danilov
2. 発表標題 InSARで検出した森林火災直後のサーモカルスト開始過程
3. 学会等名 雪氷研究大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuki Yanagiya, Masato Furuya, Go Iwahana, Petr Danilov
2. 発表標題 Thermokarst initiation process after wildfire: case studies of the 2018, 2019 and 2020 fires near Batagay, Eastern Siberia
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柳谷一輝, 古屋正人
2. 発表標題 東シベリア・バタガイ周辺における森林火災に伴う永久凍土の融解沈下と凍上量の時空間変化
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柳谷一輝, 古屋正人
2. 発表標題 InSARで検出した東シベリア・バタガイ周辺の森林火災後地盤変動と活動層厚の推定
3. 学会等名 雪氷研究大会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柳谷一輝, 古屋正人
2. 発表標題 InSARで検出した東シベリアの森林火災後地盤変動：凍上の物理的解釈
3. 学会等名 日本測地学会第132回講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柳谷一輝, 古屋正人
2. 発表標題 Batagay現地調査報告とInSARによる火災後地盤変動の時系列解析
3. 学会等名 永久凍土の変動とそのモニタリングに関する研究集会(極地研究所)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masato Furuya, Kazuki Yanagiya, Go Iwahana, Alexander Fedorov
2. 発表標題 Post wildfire surface deformation at Batagay, Eastern Siberia: detection by L- and C-band InSAR and preliminary report of field observation
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuki Yanagiya, Masato Furuya
2. 発表標題 Post wildfire surface deformation at Batagay, Eastern Siberia, detected by L band and C band InSAR
3. 学会等名 1st Southern Hemisphere Conference on Permafrost (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masato Furuya
2. 発表標題 ALOS2 InSAR Applications to Climate and Weather: post-wildfire ground deformation in Eastern Siberia and tropospheric dispersive phase during heavy rain
3. 学会等名 The Joint PI Meeting of JAXA Earth Observation Missions FY2019 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Yanagiya and Furuya (2020)の論文は、AGUのEOSで取り上げられた：
<https://eos.org/articles/wildfires-trigger-long-term-permafrost-thawing>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	蟹江 俊仁 (Kanie Shunji) (10332470)	北海道大学・工学研究院・教授 (10101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ロシア連邦	北東連邦大学ヤクーツク校	メルニコフ凍土研究所		
ロシア連邦	メルニコフ凍土研究所	北東連邦大学		