

日本の永久凍土分布を気温条件から推定：将来大幅に 消失することを予測

2022年8月2日（火）

国立研究開発法人国立環境研究所

横畠徳太

石崎紀子

北海道大学北極域研究センター

岩花剛

国立研究開発法人海洋研究開発機構

斉藤和之

末吉哲雄

◆ 地中の温度が2年以上連続して0℃を下回る領域は「永久凍土」と呼ばれ、北半球陸域に広く存在しますが、現在の日本ではその存在は非常に珍しく、北海道大雪山・富士山・立山など、ごく限られた地点でしか永久凍土は確認されていません。

◆ 私たちは1930年頃から現在までの気候情報を用いることにより、日本全域において永久凍土が存在しうる場所の推定を行いました。その結果、現在の日本では、大雪山・富士山・立山に加えて、北海道の日高山脈・知床岳・斜里岳・阿寒岳・羊蹄山と、北アルプス・南アルプスにも、永久凍土が存在する可能性のある場所があることが分かりました。

◆ さらに、将来の気候予測情報を利用して、永久凍土を維持できる領域がどのように変化するかを予測を行いました。その結果、大雪山や富士山のように、緯度や標高が高い地域では21世紀末に永久凍土を維持しやすい環境がわずかに残るものの、日本全域で永久凍土を維持する環境が急激に減少することが予測されました。

◆ 今回の研究成果は、多様な生態系を維持する山岳環境の大きな変化が避けられないことを示しています。山岳環境を監視し、気候変動に対するさまざまな適応策を検討することが重要です。

本研究の成果は2022年8月1日にProgress in Earth and Planetary Scienceよりオンライン出版されました。

1. 研究の背景

2年以上連続して0℃を下回る地中を永久凍土と呼び、主に北半球高緯度のツンドラ・タイガ域に広く分布しています [1]。全球的な永久凍土分布の南限に位置しているために、現在の日本では、緯度と標高の高い山の上の非常に寒冷な場所の、ごく限られた地点でしか、永久凍土の存在が確認されていません [2]。永久凍土の融解は地中の現象であるため、観測することが難しく、特に山岳地帯はアクセスが難しいこともあり、その全体像が把握されていないのです。これまでの研究では、ヨーロッパやチベット高原において永久凍土の現状評価や将来予測がなされてきましたが、日本を含む東アジア地域では、特に将来予測に関してはほとんど研究がなされてきませんでした。私たちの先行研究 [3] では、大雪山系での現状評価と将来予測を行いました。同様の解析を日本全域で行ったのが、今回の研究成果です。

2. 研究の概要

私たちは、これまでの研究によって得られた診断手法 [3] を、日本域における1 km解像度の最新の気候予測情報を利用して適用することにより、永久凍土を維持する気温環境にある領域を「永久凍土領域」として、その現状評価と将来予測を日本全域において行いました。私たちが利用した日本1 km気候予測情報は、自治体や企業などの様々な主体が気候変動適応策を実施することを支援するために、最新の気候予測とバイアス補正技術を利用することにより作成されたものです [4]。1年のうち気温が0℃を下回る日数と0℃を上回る日数を計算し、過去の永久凍土の観測データから得られた関係式 [3] を用いることにより、永久凍土領域の推定を1 kmの細かさで行いました。

私たちが推定した永久凍土領域の全国マップの結果を図1に示します(拡大縮小できる地図は[こちら](#) [5])。これまで永久凍土が現地で確認されている観測点を赤で示していますが、私たちの推定結果が観測事実と整合的であることがわかります。前述のように、現在の日本では、大雪山・北アルプス・富士山のごく限られた地点でしか、永久凍土の存在が確認されていませんが、それ以外の場所、日高山脈・知床岳・斜里岳・阿寒岳・羊蹄山と、北アルプス・南アルプスにおいても、永久凍土領域が存在する可能性のあることが、私たちの研究で明らかになりました。高い解像度(1km)で、現実的な気温分布を表現する気候情報 [4] を利用することによって、このような推定が初めて可能となりました。

私たちが図1の推定のために利用した気候予測情報は、もともとなる気候モデルの違いにより、9通りのデータがあります。図1では、1kmごとの計算点において、9つのデータのうち永久凍土領域であると診断された割合を%で示しています。また図1では、永久凍土領域として診断された面積割合の過去20年間の平均値を表示しています。私たちの計算によると、緯度や高度が高く気温の低い山岳域に、永久凍土を維持する気温環境が存在することが分かりました [6]。図2では、全国の高度分布と永久凍土領域の分布を示します。

永久凍土領域の全国マップ

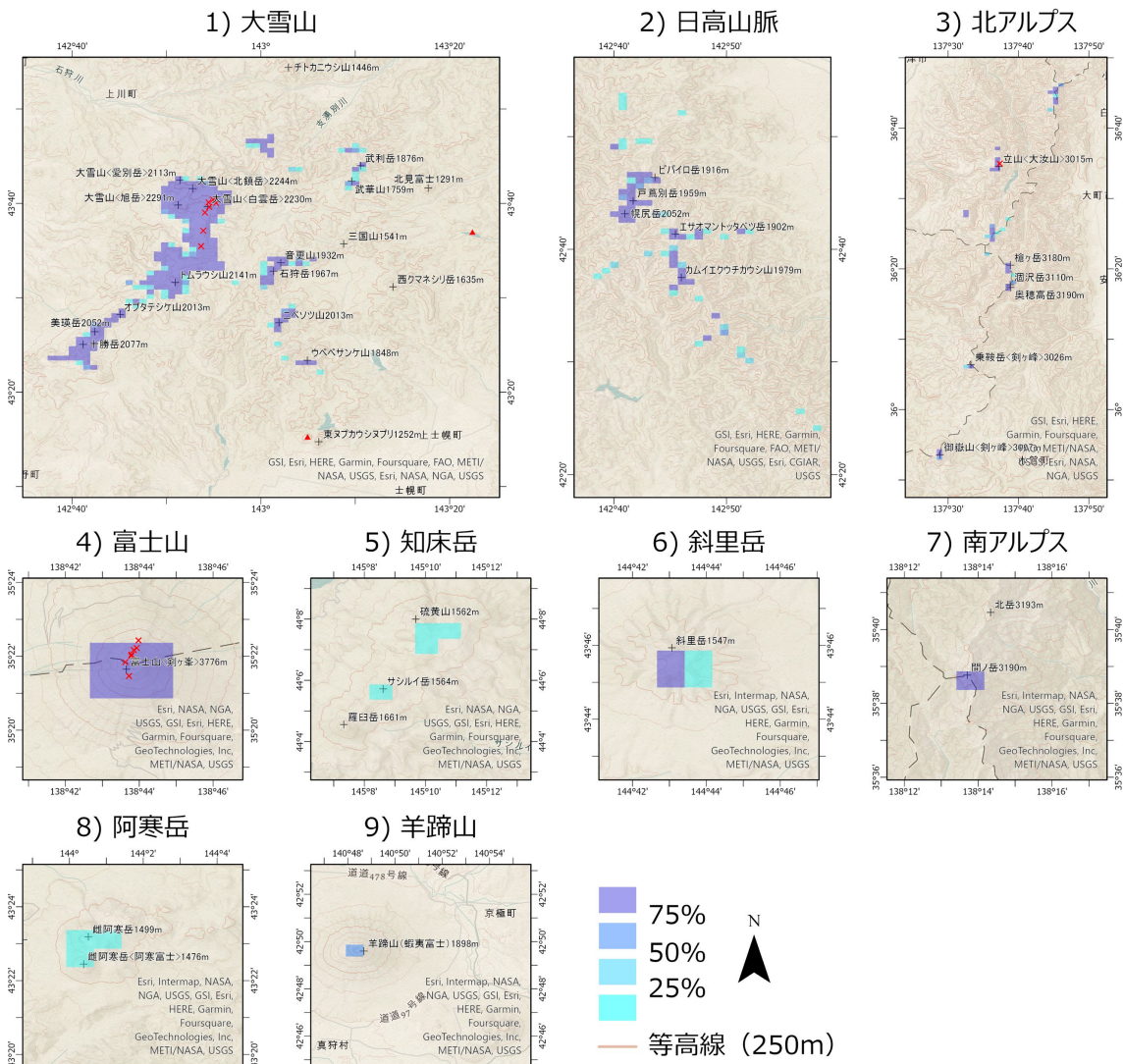


図1： 永久凍土を維持する気温環境（永久凍土領域）の分布図。過去20年（1999年から2018年）の平均値の結果を示す。0度を下回る/上回る気温の日数をカウントすることにより、永久凍土を維持する気温環境分布を推定した。9つの気候予測情報のうち、永久凍土を維持する気温環境と判断したデータの割合を%で示す。拡大縮小できる地図は[こちら](#) [5]

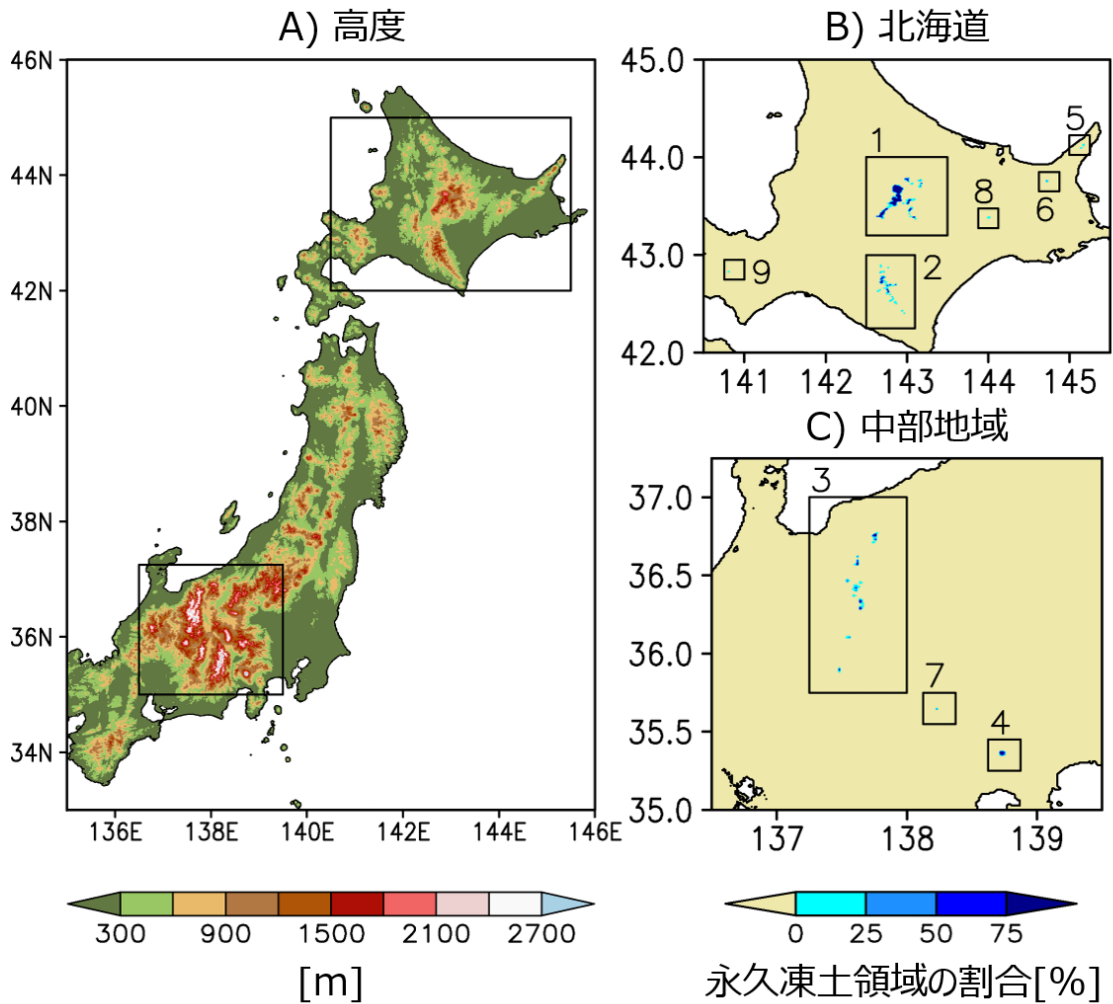


図 2 : 日本の高度分布 (左) と、永久凍土を維持する気温環境 (永久凍土領域) の分布 (右)。

図 3 に、永久凍土領域の面積の変化を示します。気候予測情報の違いによる結果の違いを灰色部分で表しています。図から分かるように、総じて、2000 年頃から永久凍土領域が減少していくことが分かります。これは私たちの大雪山系に関する先行研究 [3] で示した通り、地球温暖化に伴い、日本国内の気温も上昇しているためです。

図 3 で示される将来予測に関しては、3 つのタイプに分類できると考えています。

長期維持型： 大雪山系、富士山

境界型： 日高山脈、北アルプス

危機型： 知床岳、斜里岳、南アルプス、阿寒岳、羊蹄山

長期維持型は、比較的永久凍土領域が残る地域です。大雪山系や富士山は、永久凍土が存在できる現在の下限高度 [6] に比べて山頂標高が高いため、長期維持型に分類されます。とはいえ、大雪山や富士山でも、永久凍土領域は温室効果ガスの排出シナリオによらず将来大幅に減少します。将来の全球平均気温を安定化させる低炭素シナリオ（RCP2.6: 産業革命前に比べて全球平均気温上昇を 2℃に安定化する）が実現した場合に、2100 年時点でわずかにこの領域が残る（大雪山で 10 km²程度、富士山で 2 km²程度）ものの、他のシナリオでは 21 世紀後半にこの領域が消失する予測となりました。

境界型（日高山脈、北アルプス）は、永久凍土領域が現時点（2020 年前半）では残るものの、今後 20 年から 30 年の間にその領域が消失してしまうと予測される地域です。これは、永久凍土が存在できる現在の下限高度と山頂標高 [6] が同程度（後者が前者より少し高い）であるためです。さらに、危機型（知床岳、斜里岳、南アルプス、阿寒岳、羊蹄山）は、2020 年の時点で「永久凍土領域」と診断される領域が消失している可能性がある地域です。今回の分析では永久凍土領域として、気温データを利用して「永久凍土を維持する環境」を推定していますが、気温環境が変化しても地中に反映されるのにはある程度の時間がかかります。私たちの推定結果は、これらの領域で永久凍土が失われつつあるか、すでに消失している可能性を示しています。

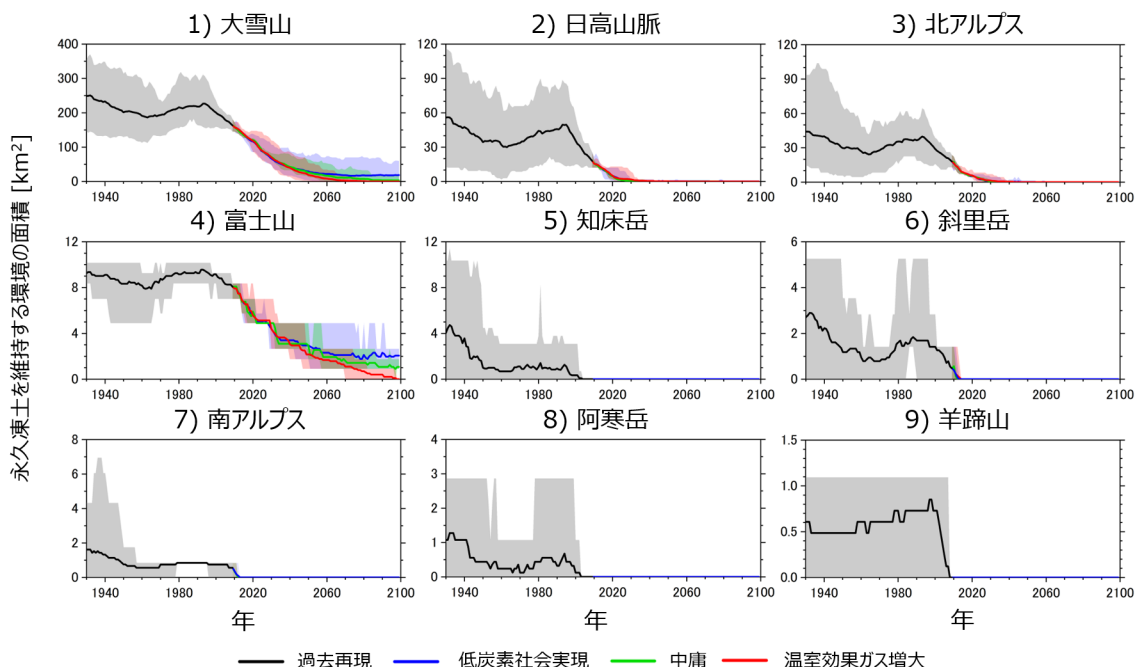


図 3 : 「永久凍土を維持する気温環境」にある領域（永久凍土領域）の面積の変化。9 つの気候予測情報を利用した結果の平均値を太線で表現する。灰色の部分は気候モデルの違いを示す。黒 = 過去再現実験（2018 年まで）、赤 = 将来にわたって温室効果ガス

濃度が増加するシナリオ (RCP8.5)、青 = 2100 年時点での全球平均気温変化を産業革命前に比べて 2°C 程度に安定させるシナリオ (RCP2.6)、緑 = 中庸シナリオ (RCP4.5) の結果。

3. 今後の展望

現在の日本ではごく限られた地点においてしか永久凍土が確認されていませんが、私たちの[推定結果](#) [5] は、さまざまな地域に、まだ確認されていない永久凍土が存在する可能性を示しています。日本に存在する永久凍土自体が非常に珍しいということもあり、「永久凍土が存在する極寒の地」として、人々の興味を引く場所となるかもしれません。また前述のように、日本の永久凍土は全球的な永久凍土分布の南限に位置するため、地球温暖化の影響を非常に受けやすいと考えられます [4]。このため日本の永久凍土は、気候変動の影響を示す指標として重要な観測対象であり、図 1 で示される領域は、今後の永久凍土調査地点として重要な候補となります。例えば知床はユネスコ世界遺産に指定されていますが、地球温暖化に対して非常に脆弱であるため、自然環境モニタリングを強化することが世界遺産委員会より推奨されています [7,8]。地球温暖化に対して敏感に応答する、日本の永久凍土をモニタリングすることで、既に起こっている気候変動の影響を把握することは非常に重要な課題です。

地面は凍結すると非常に硬くなるため、凍土の存在は力学的な安定性をもたらすと同時に、夏場の水分を保持する役割を持ちます。このため山岳永久凍土は、山の斜面を固定し、特殊な水分環境をもたらすことにより、その場所に特有の生態系を守るうえで重要な役割を果たしています (写真 1)。そして永久凍土の融解は、山岳地帯で斜面を不安定化し、また現在の生態系に大きな影響を及ぼすと懸念されています [3]。ここで示したような現在起こりつつある変化に対応し、将来起こり得る大きな変化に備えるため、現地観測や人工衛星データにより山岳地域の変動を精度良く監視し、山岳天然資源の保護などの適切な方策を立案することが、今後の重要な課題です。



写真1 北海道大雪山の景色。強風のために冬季の積雪が少なく、また地表植生が定着しにくい場所では、低い気温によって地表面が冷却されるため永久凍土が存在している。中央の奥に見えるのは白雲岳。太陽の周りに虹、ハロ（日暈）が見えていた。2019年9月6日撮影

4. 参考情報

[1] 最近の研究成果：地球温暖化で永久凍土の融解はどこまで進むか？

地球環境研究センターニュース 2021年10月号

<https://cger.nies.go.jp/cgernews/202102/363003.html>

[2] 永久凍土と地球温暖化 北海道大雪山調査レポート

地球環境研究センターニュース 2019年12月号

<http://cger.nies.go.jp/cgernews/201912/348001.html>

[3] 北海道大雪山の永久凍土を維持する環境が将来大幅に減少する

<https://www.nies.go.jp/whatsnew/20210730/20210730.html>

[4] 気候変動の影響評価における適切なバイアス補正手法の選択の重要性

地球環境研究センターニュース 2020年8月号

<https://cger.nies.go.jp/cgernews/202008/356003.html>

[5] 永久凍土領域の全国マップ（図1）を拡大縮小して確認できる以下の地図もご参照ください。

<https://nies.maps.arcgis.com/apps/instant/basic/index.html?appid=7dcb10dd38b649f49ced52e1b4a36d0f>

[6] 私たちの分析結果によると、現在の永久凍土を維持する気温環境の下限高度はおよそ $2997 - (\text{緯度} - 35) \times 177$ [m] と推定されました。緯度が1度下がることで、下限高度は177 [m] 程度上昇する、という推定結果です。

[7] 北見工業大学 地球環境工学科 雪氷環境研究室

<http://www.ohno-glaciology.com/theme.html>

[8] 知床に永久凍土はあるか？

https://www.shiretoko-sustainable.com/post/permafrost_2020

5. 研究助成

本研究は、文部科学省「統合的気候モデル高度化研究プログラム」(JPMXD0717935457)、「ArCS II 北極域研究加速プロジェクト」(JPMXD1420318865)、および国立環境研究所「気候変動適応研究プログラム」「脱炭素・持続社会研究プログラム」の支援を受けて行われました。

6. 発表論文

【タイトル】

Assessing and projecting surface air temperature conditions required to sustain permafrost in Japan

(日本において永久凍土を維持する気温環境の現状評価と将来予測)

【著者】

T. Yokohata¹, G. Iwahana², K. Saito³, N. N. Ishizaki¹, T. Matsushita⁴, T. Sueyoshi^{3,5}

【所属】

1. 国立環境研究所
2. 北海道大学北極域研究センター
3. 海洋研究開発機構
4. 筑波大学生命環境系
5. 国立極地研究所

【掲載誌】 Progress in Earth and Planetary Science

【DOI】 10.1186/s40645-022-00498-z

7. 問い合わせ先

【研究に関する問い合わせ】

国立研究開発法人国立環境研究所

地球システム領域 地球システムリスク解析研究室

主幹研究員 横畠徳太

e-mail : yokohata (末尾に"@nies.go.jp"をつけてください)

tel : 029-850-2783

【報道に関する問い合わせ】

国立研究開発法人国立環境研究所 企画部広報室

e-mail : kouhou0 (末尾に"@nies.go.jp"をつけてください)

tel : 029-850-2308

北海道大学社会共創部広報課

email : jp-press (末尾に"@general.hokudai.ac.jp"をつけてください)

tel : 011-706-2610