

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K06145

研究課題名（和文）地表被覆の断熱機能からみた永久凍土都市の凍土安定性－凍土を守る土地利用の探求

研究課題名（英文）Thermal insulation function of ground cover on frozen soil stability in permafrost cities

研究代表者

小谷 亜由美（Kotani, Ayumi）

名古屋大学・生命農学研究科・准教授

研究者番号：80447242

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）：本研究では、森林生態系の凍土保護機能が土地利用変化によりどのように変化し、凍土安定性の変化が起こるかを解明するために以下の課題を実施した。1) 文献調査により、都市周辺域の土地利用と凍土保全への取り組み、表層土壌の攪乱をもたらす牧畜や耕作が土壌の熱物理特性に与える影響を整理した。2) 森林モニタリングサイトの観測データを解析し、地表植生と土壌水分が活動層の凍結融解過程に与える影響を評価した。3) 道路景観の写真を分析し、道路延長と森林伐採が凍土の熱動態に与える影響を検討した。これらにより、土地利用変化が凍土保護機能に与える影響を総合的に評価する基盤情報を整理した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、文献調査、森林の凍土環境の解析、都市周辺の景観解析という異なる手法を用いて、人間活動のもたらす凍土環境への影響を多角的に明らかにすることを目的としていたが、研究を進める中で多手法の融合が十分に進まず、その結果、人間活動がもたらす凍土への影響の定量化や効果的な凍土保全策の提案には限界があった。今後の課題として、データの精度向上と研究手法の改善とともに、異なる土地利用の相互作用も視野に入れた解析を進めることで、地域社会における環境教育や環境保護意識の向上に貢献することが期待される。

研究成果の概要（英文）：To clarify how land use change affects the permafrost protection function of forest ecosystems and how the active layer deepens, these tasks were carried out in. 1) A literature survey to investigate land use and permafrost conservation efforts in suburban areas and, in particular, to confirm the impact of livestock farming and cultivation on the thermophysical properties of soil. 2) Analysis of observation data from forest monitoring sites to evaluate the impact of surface vegetation and soil moisture on the thaw-freeze process of the active layer. 3) Road landscape photograph analysis to examine the impact of road extension and deforestation on the thermal dynamics of permafrost. These efforts provided basic information for a comprehensive evaluation of the impact of land use change on permafrost protection function.

研究分野：水文気象学

キーワード：地表被覆 土地利用 永久凍土 活動層 地表面熱収支

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

北極気候変動の影響を直接的・間接的に受ける位置に分布している寒冷圏陸域生態系では、近年、降水量や気温の極端現象の激化や頻発化に直面している (Arctic Monitoring Assessment Program, 2017)。この地域では、高緯度の気候と積雪や凍土過程により形成される地表面環境に適応した生態系が形成されている。永久凍土上の森林生態系では、夏季に地表面から 1 - 2m 程度融解する活動層は帯水層として機能し、その融解過程は土壌水分量や地中温度の時空間変動を通して陸域生態系の水・熱・物質循環に影響を及ぼす。また、地上植生の日射遮蔽効果と林床や土壌表層の有機物層の熱緩衝効果により、凍土の急激な融解を抑制することで凍土の安定性が維持される。このような凍土が気温だけでなく植生との相互作用によって成立する地域では、気候変動の凍土への影響は植生の変動を介して現れ、植生が凍土の安定性を左右するといえる (Shur and Jorgenson, 2007)。永久凍土の荒廃・後退の初期現象は、活動層の季節融解・凍結の季節変化の変調をとまなう融解深の増加 (活動層の深化) として現れる (Shuur et al., 2008)。したがって、様々な植生地における活動層の深度を決める要因を明らかにしておく必要がある。

連続永久凍土地域の東シベリアでは、連続多雨年に過剰に湿潤となった凍土表層の温度・水分環境の変容と同時に植生劣化がみられた (Iijima et al., 2014 など)。この地域では火災などの攪乱により地上植物が減少すると、凍土中含氷率の違いにより、凍土が消失して表層土壌乾燥化が進むことで裸地・草原化、サーモカルスト過程による湿地化と異なる植生変化が起こりうる。また気候変動の一方で、永久凍土の多くの地域において都市への人口集中が進んでおり、居住地、農地、工業用地、交通路等の土地利用が拡大している。このような土地利用変化は気候変動の影響を増幅し、永久凍土の後退を加速すると考えられる。非凍土地域では都市活動に伴う熱源機能いわゆるヒートアイランド現象や温室効果気体の放出による大気加熱の影響が問題となるが、凍土上では直接的な熱の放出だけでなく、地表被覆を変えることで地中の熱構造に影響をおよぼす。そして、ひとたび改変された地表面の影響は持続する。アラスカの Utqiagvik (バロー) では、集落内の活動層深は周辺の自然植生に比べて大きく、その空間変動が大きくなり (Klene and Nelson, 2019)、凍土安定性の低下がみられた。本研究で対象とするヤクーツクのあるサハ共和国/ヤクーチア (ロシア連邦) では、凍土上の建設物安定性低下 (Shiklomakov et al., 2017) や活動層深の増大による地形変化による家屋やインフラ損壊が顕在化し (Makarov and Torgovkin, 2018, Strauss et al., 2012) その対応策が急務となっている。土地利用変化が地表被覆の機能を通して地中熱環境に影響を及ぼすことは不可避であるが、影響を最小限に抑えて必要な都市活動を維持する凍土保全策の探求が求められている。

2. 研究の目的

本研究は、上記のような森林生態系のもつ凍土保護機能が土地利用変化に伴う地表被覆の改変に伴いどのように変化し、どの程度の活動層深化が起こりうるのかを明らかにすることを目的とする。森林生態系の持つ凍土保護機能として、地上植生や有機物層の持つ「断熱効果」と活動層土壌の持つ「熱伝導特性」があげられる (図 1)。放牧や林産物の収集などでは地表被覆の断熱効果だけに影響が及ぶが (踏みつけなどによる土壌物理性の変化は考慮する必要がある)、耕作や土地工事などで土壌環境にも攪乱が及ぶ場合には地中の熱伝導特性も変化する。

永久凍土地域でも最大規模の都市のひとつである東シベリアのヤクーツクとその周辺市街地はレナ川の河川低地に立地し、中心部の急進な都市化に加えて周辺の森林域に向かって様々な土地利用が拡大している (図 2)。周辺の森林は東シベリアのなかでも人間活動の影響が大きい地域であり、とくに中央部の植物量の多いレナ上流域や支流のアルダン川流域とともに伐採圧の増加が懸念されている (Bergen et al., 2013)。

東シベリアの森林生態系の研究は、20 世紀初頭から始まりとくに 1950 年代以降に凍土 - 森林生態系の調査が行われ、凍土森林生態系の凍土過程や水循環に関する知識の基盤がえられている (Pozdnyakov, 1963, Abaimov, et al., 2001 など)。また、操作実験を含む攪乱を受けた森林の凍土動態や (Fedrov et al., 2017 など)、伝統的な草原利用と凍土や水環境 (Crate et al., 2017) も研究が進められているが、現在進行中の土地利用変化に関する影響についてはこれから必要な研究と位置付けられる。地表被覆の断熱効果については、ヤクーツク周辺を中心とするレナ川中流地域の森林や草地の自然生態系で、立地地形や林床植生の違い、火災後の植生遷移段階に着目して調べられている。さらに林業や鉱山業跡地の植生回復 (Cherosov et al., 2010) といった、従来の人為的攪乱に関する研究との比較を通して、永久凍土上での人間活動による地表面攪乱が凍土安定性に対して持ちうるインパクトについて、様々な時空間規模の事例をもとに多角的な考察を進めたい。

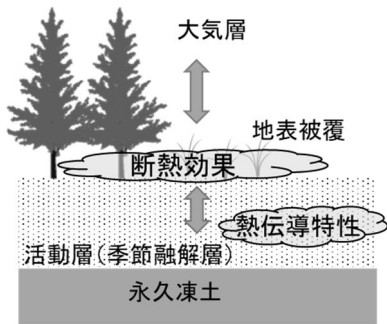


図1 森林生態系がもつ凍土保護機能としての「地表被覆の断熱効果」と「活動層の熱伝導特性」

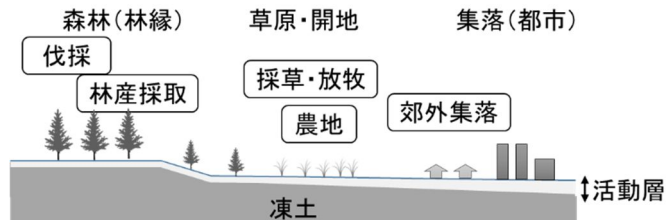


図2 森林～集落間の土地利用 市街地から周辺森林に向かって都市活動の拡大がみられる

3. 研究の方法

申請時には、東シベリア永久凍土地域の凍土森林生態系の現地観測を行い、森林生態系が持つ凍土保護機能の評価を行う計画であったが、COVID19 および国際政治問題により、ロシアへの渡航、機材の輸送、観測データの取得ができなかった。このため、入手可能なデータ（2020年までの観測データや、公開されているデータ）を用いる方法に変更した。

【当初計画】

集落から森林の間に位置する都市周縁域を対象として、調査点を設定する。ヤクーツク近郊にある森林モニタリングサイト(Spasskaya Pad 研究林, 共同研究機関の寒冷圏生物研究所の所管) では、経年の毎木調査に基づく森林情報に加えて森林気象と地中環境が計測されており、人為攪乱の影響を受けていない凍土森林生態系の値として利用する。

凍土・植生調査：ヤクーツク周辺市街地から森林モニタリングサイト間に5カ所(森林、伐採跡地、放牧地、農地、未舗装道路を想定、図2)の調査地を設定し、異なる攪乱程度の森林、異なる土地利用の場所で以下のような凍土森林情報を取得する。活動層厚、土壤水分、地温プロファイル、地上植物量、林床植物量、土壤有機物層厚など。土壤サンプルを取得し、土壤物理性(空隙率、飽和透水係数など)を測定する。

温度の多点計測：対象領域の様々な土地被覆10点と攪乱の程度の異なる森林10点の気温と地温(5cm)の連続測定(温度2chデータロガー、HoboU23 Pro)を行う。通年の測定データを用いて凍土凍結融解特性(凍結および融解時のN-Factor、surface offsetなど)を算出し、地表被覆の断熱効果指標を取得する。

凍土保護機能の評価：と で得られた様々な土地被覆の凍土・植生情報を用いて、断熱効果指標と凍土森林情報との対応関係を明らかにして非攪乱の森林生態系と比較する。土壤中の熱・水の鉛直輸送と合わせて季節融解深を計算し、地表被覆変化による凍土保護機能への影響を評価する。さらに、今後の土地被覆変化の時空間分布を想定して、対象地域の活動層深化パターンを推定する。

【変更後】

1) 凍土・植生情報と土地利用に関する情報収集

対象地域の都市周辺域の土地利用と凍土保全への取り組みについて、文献やインターネット経由で得られる情報収集をおこなう。凍土活動層の熱収支に影響を及ぼす植生被覆の季節動態およびその年変動について、対象地域にみられる伝統的な土地利用(牧畜や耕作など)と都市的な土地利用から凍土熱動態(活動層の凍結融解過程など)への影響に関する文献情報を整理する。

2) 森林生態系の凍土保護機能の解析

上記の森林モニタリングサイトにおける2020年までの観測値を用いて、活動層土壤の地温・凍結融解特性の時間変動と、土壤水分や地表被覆との関係を解析する。非凍土の参照値として、過去の研究や本研究の予備観測として実施した温帯森林、草地、湿地における地温と水分データも併用する。

3) 都市周辺の土地利用と凍土保護機能の評価

都市周辺の土地利用調査の代替として都市域外の道路沿いの景観に着目し、道路周辺熱環境の変化を対応させることを試みる。現地の共同研究者により取得された、自動車掲載のカメラで撮影した道路沿い景観の写真を用いて沿道の地表面状態を抽出し、既往文献から得られた熱特性からその影響を検討する。

4. 研究成果

4.1 凍土・植生情報

対象地域の都市周辺域の土地利用と凍土保全への取り組みについて、文献やインターネット経由で得られる情報収集をおこなった。公的統計サイトの一部は閲覧ができないこともあったが、ロシア内外のオープンアクセスの情報を利用することができた。学術調査に基づく論文情報に加えて、書籍（専門書ではなく、一般や子ども向けの書籍）からも、永久凍土に関する記載より現地で共有される凍土に関する情報が得られると考え、収集を進めた。

対象地域のサハ共和国では、永久凍土の保護と永久凍土の融解による環境への影響をおさえることを目的として、2018年に永久凍土の保護に関する法律（Об охране вечной мерзлоты в Республике Саха (Якутия)）が制定されている。ヤクーツク都市域における過去100年間で気温上昇に対する凍土温度の応答は、開発時期と凍土中の含水率により異なった（Kunitsky et al., 2022）。非都市的土地利用として牧畜や耕作と凍土環境との関係について英語で得られる情報は限られているが、家畜の放牧は限定された期間であり過放牧となった場合には土壌の熱・物理特性の変化、植物群落構造を通過する土壌への入射変化を通して、凍土の温度環境にも影響を与える（Makarov et al., 2020）。耕作地の地中温度を下げる対策としては、灌漑（水分供給）積雪除去・圧雪による冷却の促進、植生回復を組み合わせるにより遷移層を復元させる対策が有効とされる（Zhirkov et al., 2023）。

4.2 地表被覆・土壌水分と地温変動特性

人為影響の小さい森林として比較対象とするサイトにおいて、これまでに得られている地温データの解析より、地表植生の変化のある過去20年では、植生変化による地表断熱効果に加えて土壌水分の変動が活動層の融解凍結過程の年変動の原因と考えられた。温度計測に基づく地表断熱効果の評価は、被覆厚と測定深度の係数に不確実性が残り検討が必要であるが、年変動をとらえるには適していると考えられる一方で、同森林サイトの凍土融解深（活動層深）の間変動を説明する要因として、樹冠閉鎖度、林床葉面被度、有機物層厚の寄与が大きかったが、測定点周辺の樹種も説明要因の候補であった。樹冠閉鎖度と林床被度の指標は従来の画像解析で算出した数値で、樹種は目視で判別した指標であるが、直接的に写真を用いた画像判別による活動層深の推定モデルの構築を試みた。現段階ではデータ数の不足により十分なモデル構築とその検証ができていないため今後も改良を続ける。非凍土地域との比較として、国内において異なる地表被覆（草地と湿地）の土壌水分と地中温度のデータとして、草地（2020年11月～2021年4月）と林内（2023年9月～）の土壌水分と地温の測定を実施した。いずれにおいても常に土壌水分が飽和に近く、気温変動に対して地温の変動が小さかった。

4.3 都市域周辺の土地利用変化

凍土熱動態への人間活動の影響として道路沿いの景観に着目し、都市郊外の道路を走行する自動車よりインターバル撮影した写真から分かる沿道の地表面状態と、既往文献から得られた熱特性からその影響を検討した。草原区域を通る道路では、通行箇所は固定されず車両通行による裸地化範囲の拡がりが見られた。森林区域を通る道路は谷沿いの湿地の点在地に建設されて、道路の延長に伴って数kmおきに森林伐採区画とみられる領域が形成されていった。これらの面積は、それぞれ周辺森林の火災攪乱と比べると小規模であるが、将来的な道路延長と森林利用の拡大とともにどのような熱的影響が現れるかを注視する必要がある。

4.4 まとめ

本研究は、文献調査、森林の凍土環境の解析、都市周辺の景観解析という異なる手法を用いて、人間活動のもたらす凍土環境への影響を多角的に明らかにすることを目的としていたが、研究を進める中で多手法の融合が十分に進まず、その結果、人間活動がもたらす凍土への影響の定量化や効果的な凍土保全策の提案には限界があった。今後の課題として、データの精度向上と研究手法の改善とともに、異なる土地利用の相互作用をより詳細に解析する方法が必要と考える。

引用文献

- Abaimov, et al., 2001. Eurasian Journal of Forest Research 5, 95–106.
Bergen et al., 2013. In Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences. Groisman (Edit). p.357. Springer
Cherosov et al., 2010. In The Far North: Plant Biodiversity and Ecology of Yakutia. Troeva et al (Edit). p.390. Springer
Crate et al., 2017. Anthropocene 18, 89–104.
Fedrov et al., 2017. Permafrost and Periglacial Processes 28, 331–338.
Iijima et al., 2014. Ecohydrology 7. 177–187.
Klene and Nelson, 2019. Annals of the American Association of Geographers 109, 1394–1414.
Kunitsky et al., 2022. Land 11, 1513.
Makarov et al., 2020. Land 9, 365.
Makarov and Torgovkin, 2018, Earth's Cryosphere 22, 24–35.

Shur and Jorgenson, 2007. *Permafrost and Periglacial Processes* 18, 7–19.
Shuur et al., 2008. *Bioscience* 58, 701–714.
Shiklomakov et al., 2017. *Polar Geography* 40, 273–290.
Zhirkov et al 2023. *Land* 12, 197.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1 . 発表者名 A Kotani, S Nagai, S Tei
2 . 発表標題 Seasonality of public interest in trees detected by internet search activity
3 . 学会等名 the All-Russian Conference with International Participation THE ROLE OF BOTANICAL GARDENS IN THE CONSERVATION AND ENRICHMENT OF NATURAL AND CULTURAL FLORA (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 A Kotani
2 . 発表標題 Soil freezing and spring CO2 fluxes in larch forests of Siberia
3 . 学会等名 International Symposium on “ Pan-Arctic Water-Carbon Cycles and Terrestrial Changes in the Arctic: For resilient Arctic Communities ” .
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 小谷亜由美
2 . 発表標題 Decadal scale variation of permafrost active layer thickness at larch forests in eastern Siberia
3 . 学会等名 The 11th Symposium on Polar Science
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 小谷亜由美
2 . 発表標題 Effect of precipitation on interannual variability of permafrost active layer thickness at larch forests in eastern Siberia
3 . 学会等名 Japan Geoscience Union meeting 2020
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 A Kotani
2. 発表標題 Changing Seasonal Transition of Surface Energy Balance in Permafrost Larch Forest
3. 学会等名 THE FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小谷亜由美
2. 発表標題 10年のタワーフラックス観測による年々変動ー北東ユーラシア落葉針葉樹林の気候応答
3. 学会等名 日本農業気象学会全国大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

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	Institute for Biological Problems of...	North-Eastern Federal University	