

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：30108

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18738

研究課題名（和文）温暖化による永久凍土地帯の地形変形を追う：広域数値シミュレーションによる未来予測

研究課題名（英文）Terrain Deformation in Permafrost Regions due to Global Warming: Prediction with a Mesoscopic Numerical Simulation

研究代表者

蟹江 俊仁（Kanie, Shunji）

北海道科学大学・工学部・教授

研究者番号：10332470

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、永久凍土地帯で深刻化する温暖化によると思われる地形変化や崩壊を、大気から地表面を経て永久凍土層に至るまでの鉛直方向の凍結融解モデルと、二次元平面空間における地下水流動モデルを組み合わせた疑似三次元広域シミュレーションモデルにより再現するものである。本研究の結果、近年永久凍土地帯などの極寒冷地域において頻発する大規模森林火災により、どのような過程で永久凍土の融解が促進され、地表面沈下などの地形変形が発生するのかが予測できるようになった。あわせて、今後発生する気象擾乱などにより、深刻な永久凍土の融解やそれに続く地形変形があらかじめ予測できるようになったと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

永久凍土は最終氷河期から現在に至るまで、少なくとも1万年の歳月をかけて形成されたものである。しかし、近年の環境擾乱による永久凍土の融解と、それに伴う地形変形はわずか数年の間に加速度的に進むものであり、地表面沈下や法面の崩壊のみならず、表面植生が生育できなくなるなどの影響により、大気中の二酸化炭素吸収能力の低下や地球温暖化の促進にもつながると考えられる。本研究結果で得られた数値シミュレーションは、観測された環境変化、あるいは予測される環境擾乱による永久凍土の劣化や地形変形をいち早く予測できるため、適切な環境保全対策を講じるなど、地球温暖化の促進を抑制するために有効であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to simulate terrain deformation in permafrost regions due to global warming such as subsidence and landslides with a numerical simulation. This quasi-three-dimensional model combines a vertical freeze and thaw model based on thermal transfer with a groundwater flow analysis on a 2-dimensional plane. As a result of the study, it becomes possible to simulate the degradation of permafrost caused by environmental disturbances such as wildfires and abnormally high air temperatures during summer. It is helpful to predict the terrain deformation in advance of the occurrence and to apply suitable countermeasures to prevent serious damage by environmental disturbances.

研究分野：寒地環境工学、構造工学

キーワード：永久凍土 凍結融解 数値シミュレーション 地形変形

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、永久凍土地帯では新たな大規模地滑りや陥没などの崩壊現象が見られるようになり、地球温暖化の影響が懸念されている。2020年5月には、ロシアのノリリスクでディーゼル・タンクの倒壊と軽油流出による深刻な環境問題が発生しており、永久凍土地帯の変状がより深刻になってきているのではないかとわれはじめていた。これまで永久凍土地帯における地形生成や地形変状に関わる研究は、フィールド調査や人工衛星を用いたリモートセンシングなどの観測・観察的アプローチが多く、変状追跡や崩壊過程についてもその延長線上で考えられることが多かった。しかし、生成に関しては時間スケールにおいて1,000年から10,000年という長い過程を評価する必要があり、その間の複雑で特殊な環境条件との組み合わせを考慮しなければならない一方、近年深刻化しつつある崩壊過程については長く見積もっても100年程度、場合によっては数年間の時間スケール問題であり、適切な環境条件を取り込んだシミュレーションモデルにより、その現象解明と抑止対策まで検討できるのではないかと考えた。

研究開始時において提案者らは、そのプロトタイプとなる疑似三次元解析モデルを用いて試験的に永久凍土地帯の変状分析に適用したところ、数十年程度の間のもはやかな平均気温上昇や特異年における夏場の単年気温上昇でさえ、永久凍土面深さの分布に大きな影響を与え、深刻な地盤沈下や地形崩壊を招くことが予想されていた。この解析結果は、JAXAの衛星画像を用いたInSAR分析により発見された経年的地盤沈下の観測結果とも良く整合することが確認されていた。

こうしたことから、この着想を発展させて積雪による冬期断熱効果と融解期における融解水による浸透流や土壌水分量変化、さらには夏期の地表面蒸発量などを取り込み、地下水流動をはじめとする永久凍土地帯の地盤内で発生している現象を、広域数値シミュレーションにより解明しようと考えた。このような試みはこれまでに行われておらず、温暖化による永久凍土地帯の地形変形・地形崩壊の現象説明と予測、さらには制御対策までを、工学的手法に基づいて一貫して評価することを考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、永久凍土地帯で深刻化する温暖化によると思われる地形変化や崩壊を、大気から地表面を経て永久凍土層に至るまでの鉛直方向の凍結融解モデルと、二次元平面空間での地下水流動モデルを組み合わせた疑似三次元広域シミュレーションモデルにより再現し、その原因と抑止対策を考えるものである。

昨今は、地球温暖化に起因すると思われる夏場の異常高温や降水量の増加、北方圏域における森林火災の頻発、冬場の積雪量の増加などが発生しており、その結果として地形変形が見られるようになってきた。このような現象を数値シミュレーションで追うことにより、気象擾乱が発生した際に深刻な地形変形につながるとと思われる場所をいち早く推定し、融解水の流動状況を変化させることなどにより、その後の制御・抑止対策を提案することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究の着想のもととなった疑似三次元解析モデルをベースに、研究協力者らによる人工衛星画像によるInSAR分析結果や現地計測結果と比較検証しながら、永久凍土の地形変形につながる気象擾乱による影響を定量的に評価することを試みた。主な研究のステップは以下の通りである。

(1) 積雪・降水・蒸発を見込んだシミュレーション・モデルの開発

永久凍土地帯における積雪は地中の温度低下に対しては断熱効果を発揮する一方、融解すると

地中に浸透して地下水位上昇に寄与する。近年は永久凍土地帯での降水量にも変化があると言われており、融雪期には従前以上に土壌水分量が上がっているとも指摘されている。最初のステップでは、現在永久凍土地帯で発生していると思われる積雪深と降水量の影響を考慮した新しいモデルの提案を行った。

(2) 地中温度分布観測結果との比較検証

シベリアやアラスカでは、長年、地中の温度分布が計測されている。このため、観測期間が長く観測密度も高い2地域（ロシア・ヤクーツク周辺、アラスカ・フェアバンクス周辺）を対象に、近年の環境条件をもとに行ったシミュレーション解析と実測値との比較を行い、解析の妥当性を検証した。ただし、ロシア・ヤクーツク周辺での現地調査は、ロシアによるウクライナ侵攻の影響を受け、2022年および2023年は実施することができなかった。

(3) 環境変化・環境擾乱発生個所における検証解析

永久凍土地帯の地形変状の原因には、温暖化に伴うと思われる気温上昇や降水量の変化に加え、森林火災による植生の変化も要因の一つと考えられている。シベリアにおける森林火災が経年的地盤沈下に与える影響をInSAR画像分析等から研究している研究チームと協力し、このような環境変化に伴う比較的短期間での現象が発生している個所を対象に、解析結果との検証を行い、モデルの妥当性を確認した。

(4) 広域モデルによるシミュレーションと制御対策の提案

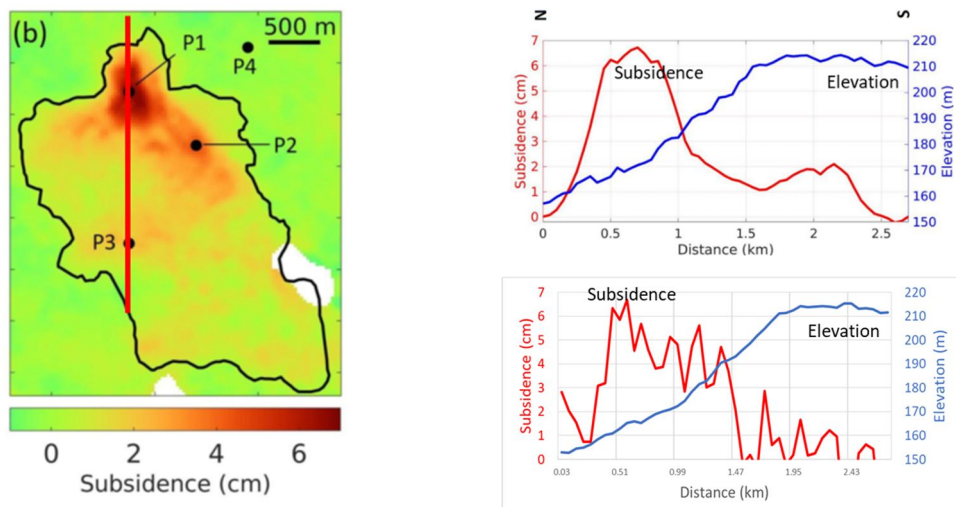
工学的な視点での活用では、現在発生している現象に対する説明と、近い将来に発生しうる現象の予測、さらにはその制御・抑止対策が求められる。近年、気温や降水量などに顕著な変化が見られる地域として、アラスカ州フェアバンクス郊外やロシア・ヤクーツク近郊の大規模森林火災跡地を対象に、本モデルによる広域シミュレーションを実施し、現象の説明と地形変形の抑止対策についての検討を行った。

4. 研究成果

主な研究成果は以下の通りである。

(1) 様々な気象擾乱効果を考慮した疑似三次元シミュレーションモデルの作成と検証

表面植生層による夏場の断熱効果や降雨の影響、冬場の積雪による断熱効果などを見込んだ凍結融解解析ができるシミュレーションモデルを作成し、InSARによる画像分析結果と比較検証を行った。その一例を図-1に示す。この図は、シベリア・マイヤ地区で発生した大規模森林火災の後、InSAR画像分析により地表面沈下が観測されたため、森林火災による表面断熱層の劣化と地形的特徴を取りこんだ上で実施した解析結果との比較を示したものである。



(a) 大規模森林火災エリアと沈下量分布 (b) 現地計測結果(上)と解析結果の比較(下)
図-1 シベリア・マイヤ地区における大規模森林火災後の地表面沈下

この図を見て明らかなように、森林火災による表面断熱層の喪失と現地の地形的条件から、融解水が流出しやすいところで地表面沈下が顕著となる傾向があり、本研究で行った数値解析結果は現地計測結果と良い整合性を見せている。近年、北方圏域における森林火災は年々増加傾向にあり、複数の地点を対象に同様の解析を行い、現地計測と解析結果との比較からその妥当性が確認されている。

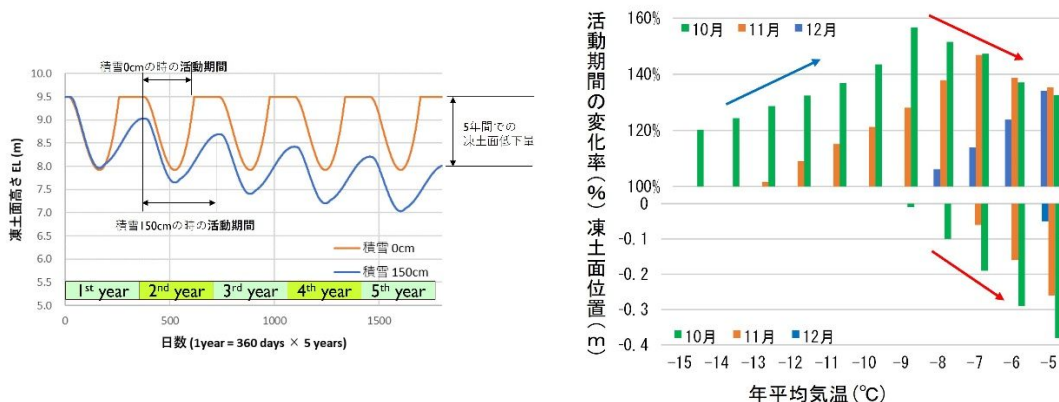
この他、2020年に発生したロシア・ノリリスクで発生したディーゼル・タンク倒壊事故についても解析を実施し、その原因が夏場の異常高温による永久凍土の過剰融解であることを突き止めた。このように本研究成果により、永久凍土地帯で発生する気象擾乱と永久凍土の融解が科学的に関係づけられるようになることで、その後の過剰融解や地形変形に対する抑止対策が検討できるようになったと考える。

(2) 今後の融解促進が懸念される地域の推定

森林火災や異常高温など、実際に発生した後の影響を評価するのみならず、降水量の増加や積雪量の増加による融解促進の効果がどのような地域で懸念されるのかを考えることが可能となった。特に地球温暖化の一つの効果でもある気中水分量の増加は降水量や積雪深の増加につながると考えられている。そこで、降水量や積雪深の増加が深刻な凍土融解をもたらす地域を探るために、年間平均気温や温度振幅、想定される積雪深を変化させながら解析を行った。

図-2(a)は積雪がない場合とある場合(150cm)に凍結融解サイクルにおける活動期間がどのように変化するかを見たものである。活動期間とは、春先に凍土表面が融解を開始してから冬場に凍結が完了するまでの期間と定義しており、積雪がない場合には夏場に融解が進行しても、冬になれば比較的早い時期にまた凍結が進み、元の凍土面高さまで回復できる。しかしこの例のように、積雪深が150cmと深くなると、冬場の冷気が凍土面に十分に伝わらず、元の凍土面高さに戻ることができなくなってくる。この解析では、積雪の影響が5か年続けて発生すると、凍土面は1.5mも下がるということが示されている。図-2(b)は年平均気温の影響を評価したものであり、横軸の年平均気温に対して活動期間や凍結面の低下がどう変化するかを示している。図の上部は積雪時期ごとの活動期間への影響を示し、下部は融解深への影響を表している。すなわち、年平均気温が-9よりも低いところでは、積雪量の増加により冬場の凍結促進が多少遅れても、融解深の増加にはつながらないと考えられる。しかし、年平均気温が-8よりも高くなると、年間平均気温に応じて積雪深の影響が深刻となり、融解深が大きくなっていくことがわかる。

このような条件を満たす場所は、たとえばフェアバンクスのような連続永久凍土地帯の外縁部に近いところであり、昨今の降雨量の増加や積雪量の増加は、連続永久凍土地帯の後退につながる可能性のあることが示唆された。

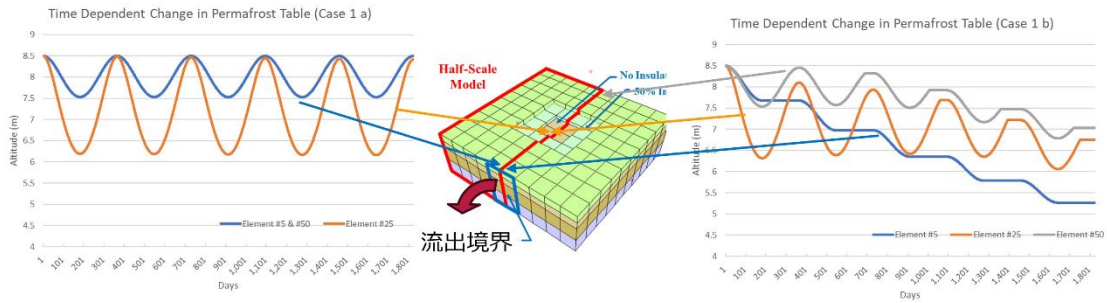


(a) 積雪量が活動期間に与える影響の計算例 (b) 年平均気温と積雪による凍土面低下
 図-2 凍結融解サイクルにおける活動期間と凍土面低下への影響

(3) 抑止対策の提案とその効果の検証

永久凍土の融解に起因する地形変形の抑止対策は、その地域の地形的特徴や気象条件・環境条件によりさまざまなものが考えられる。しかし、最も効果的な対策の一つと考えられるのは融解水の流れを制御することである。たとえば図-3 は平坦な土地で一定の凍土面位置を保っていた場所の中央で、表面植生層が失われた後の凍結面変動を示したものである。気温の年間変動の影響を受けて凍結融解を繰り返し、夏場の融解深は表面植生層の有無により大きく異なるものの、「(a) 融解水の流出がない場合」は領域内から融解水が失われないため、元の凍土面高さを保持することができる。これに対し「(b) 融解水の流出がある場合」は、凍結融解サイクルの繰り返しにより凍土面高さは年々低下していくことになる。また、流出境界との関係性により、低下の速度や量にも大きな差が生まれることがよくわかる。このような状況は何らかの気象擾乱により融解が進む場所ごとに、その地形的影響を反映した融解水の流出のしやすさを反映するものと考えられる。

このような状況下で考えられる抑止対策は、融解水の流出の防止あるいは流路の変更といった手段である。永久凍土地帯の場合、夏場の融解深はたかだか数 m であり、止水壁などの対策を取ることは容易であると考えられる。しかし重要なことは、融解水の流路を適確に推定することであり、本解析手法は極めて有効であると考えられる。本研究成果が、永久凍土地帯での融解が深刻な影響をもたらすと考えられる事象が発生したところでの抑止対策検討に活用されることを期待している。



(a) 融解水の流出がない場合

(b) 融解水の流出がある場合

図-3 融解水の流出の有無による凍土面高さへの影響

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 蟹江 俊仁
2. 発表標題 Mesoscopic-Model Simulation of Freeze and Thaw with Groundwater Flow for Terrain Change in Permafrost Regions
3. 学会等名 19th International Conference on Cold Regions Engineering (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shunji Kanie
2. 発表標題 Evaluation of Terrain Deformation due to Environmental Disturbance in Permafrost Regions Using a Mesoscopic Model
3. 学会等名 International Symposium on Ground Freezing (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shunji Kanie
2. 発表標題 Risk of Infrastructures in the Arctic due to Global Warming
3. 学会等名 International Symposium on Cold Regions Development (招待講演) (国際学会)
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
研究分担者	鄭 好 (Zheng Hao) (40775384)	北海道大学・工学研究院・助教 (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
---------	---------