

シベリア南限の永久凍土分布の環境要因
- 確率の概念を用いた凍土分布図の作成に向けて-
Environmental factors of permafrost distribution
in the Southern Siberia.
- Toward for probability mapping-

山橋いよ・石川守 (北海道大学大学院環境科学院) ,
 Jambaljav YAMKHIN (モンゴル科学アカデミー地理学研究所) ,
 Sebastian WESTERMANN・Bernd ETZELMUELLER (オスロ大学)
 Iyo Yamahashi, Mamoru Ishikawa, Jambaljav YAMKHIN
 Sebastian WESTERMANN, Bernd ETZELMUELLER

1. はじめに

近年、地温の温暖化や活動層厚の増加、湖沼の減少など、温暖化に伴う南限地域の凍土の応答が報告されている。凍土の融解は、大気との熱や水収支、及び温室効果ガス収支に関わることから、寒冷地における自然環境変化の広域的把握は必須である¹⁾。よって、現在の分布を示す永久凍土分布図は極めて重要である。

シベリア南限モンゴルにおける既存の永久凍土分布図は、主に凍土の空間連続性に基づき凡例区分されている(図1a b)。一般に、南限地域の凍土分布は細部まで入り込んで複雑であり、地域的な地形起伏や植生被覆に大きく依存する。しかし既存の分布図は、地形や気象との対応が定性的なレベルで留まっており、そのような環境条件をパラメータに考慮していない。また、そのため将来の変化予測図への応用が難しい。よって本研究は、新たな確率の概念を用いた凍土分布図の作成を目的として、現地調査と地理情報システムGISによる総合的な解析から、凍土の存在に寄与する説明変数(環境因子)を明らかにした。

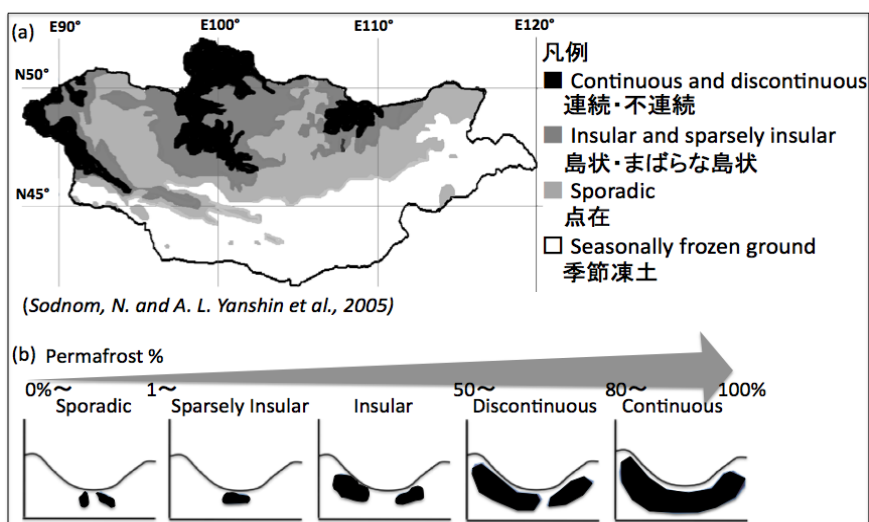


図1 (a) モンゴルの永久凍土分布図 (National Snow and Ice Data Center より).
 (b) 凍土分布状態の概念図 (Jambaljav YAMKHIN より).

2. 研究地域・使用データ

モンゴル中央部のハンガイ山脈周辺を対象地域とした(図2)。ここは大きな標高差と、山脈の左右で異なる森林分布が特徴的である。解析には現地観測地温データと、この他に凍土存在の環境因子を探るため、旧ソ連官製地図(mapstor.com)、解像度約15mのGeoCover™ Product(<http://www.earth.com>)、解像度1kmの数値標高モデルGTOPO30(USGS)、および解像度1kmのMODIS地表面温度(2002-2012年)を用いた。

◆ 現地観測地温データ

2012年7月19日から約2週間、モンゴル国内を車で移動し、短期間で約100地点の表層地温データ(0, 0.5, 0.75, 1m深)を取得した。そのうち対象地域内では51地点取得した(図2●)。また、33地点の深層(約10m)ボアホール永久凍土観測サイト²⁾(BH)のデータを使用した。これは通年を通して地温が観測されており、下部の永久凍土の実際の地温状態を観察できる。

3. 方法

GIS上に、現地でGPSに記録した観測地点をおとし、グリッドベースの各環境因子の値と表層地温との対応関係をみた。調べた環境因子は、標高、GISのSpatial Analysisツールにより求めた集水指数、曲率、日射(傾斜角・方位)、及び植生NDVIとMODIS地表面温度(2002-2012年の10年平均)である。次に、各環境因子の凍土存在への寄与を定量化するため、ロジスティック回帰分析を行った。このロジスティック回帰分析は、結果変数を2値とする確率統計手法である。そのために、BH観測データを基にし、観測地点の表層地温から、その場所の下部の地温状態を”凍土が存在する”・”凍土が存在しない”・もしくは”分からない”、の3段階に判定した。このモデルは、対象とする事象の発生に影響する複数の説明因子から、その事象が発生する確率pの確率曲線を導く(式1)。解析ソフトはR i386 2.15.1を用いた。

$$p = \frac{\exp(b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n)}{1 + \exp(b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n)} \quad (\text{式 1})$$

p: 確率(0 < p < 1), b: 係数, x: 1 から n 個の説明変数

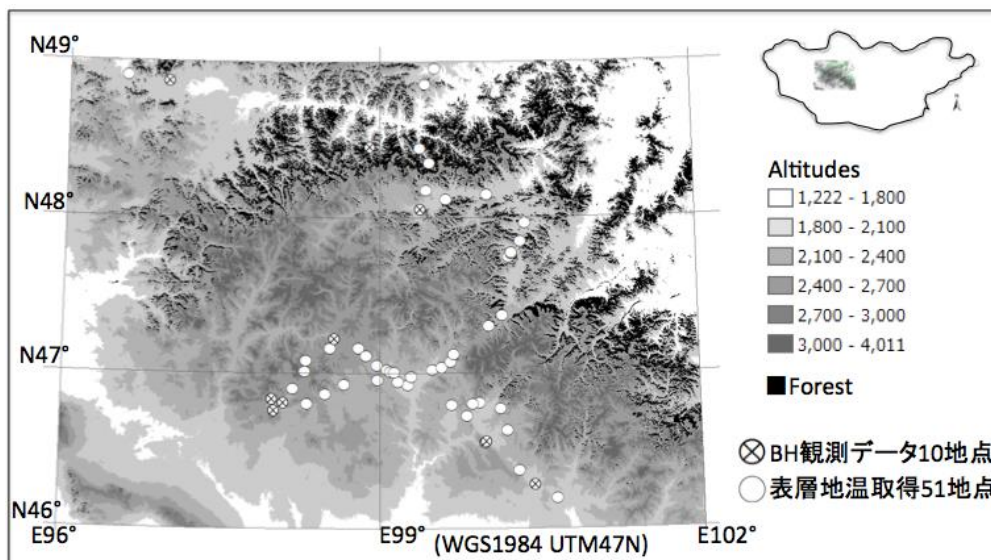


図2 対象地域と地温データの観測地点。

4. 結果と考察

4-1. 1m 深地温と標高の関係 (図 3)

図 3 は、北緯 49° 以下の草原で取得した 1 m 深地温[°C]と標高[m]の関係を示す。1 m 深地温が約 10~12 °C 以下から分布の傾きが負から水平傾向へと変化している。この負の傾きは、地温が標高の気温減率を反映し、気温低下の勾配に沿った地温低下を示す。一方、ある標高から凍土が存在し始めると、地中からの冷えが気温減率の効果を相殺するため傾きが小さくなる³⁾。つまり傾きが変化する 2000 m 付近の標高は、永久凍土の下限高度を示す値と言える。

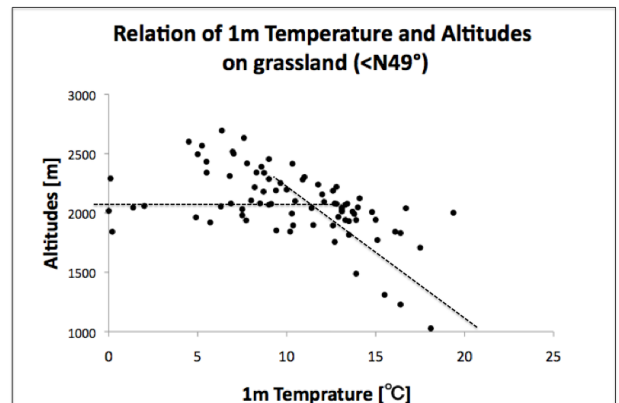


図 3 1 m 深地温と標高の関係。
※図中の点線は、感覚的に引いてある。

4-2. 地温の低い場所の特徴

現地での見知とグーグルアースでの解析により、特に地温の低かった環境場は主に 4 つあった。まず一つは川底・河川跡である。ある河川域の観測地点では、1 m 深地温は 6 °C 前後と低く、3 km ほど離れた周囲の地温と比べて約 8 °C も相対的に低かった。二つ目は、四方を山に囲まれた狭い谷底の河川近くで、ほぼ 0 °C の非常に低い地温だった。三つ目は森林下の地温で、1 m 深地温は約 6~7 °C に集中していた。そして最後は湖沼のそばであり、1 m 深地温はほぼ 0 °C に達していた。これらの特徴から、凍土が形成されやすい低い地温が保たれる環境場は、水の豊富な集水場所と森林下であることが言える。これは粘土層の役割が、夏季に高温になる乾燥地での凍土の維持に効いていると考えられる。含水率が大きい粘土層は熱容量が大きく、冬季を通し大気から地中に伝わった冷えが夏季でも保持されやすくなる。

4-3. BH 観測データによる、凍土が実際に確認される地点の表層地温傾向

33 地点のモンゴル国内の BH 観測データから、下部の地温が 0 °C 以下の状態であることを確認出来る地点の 1 m 深地温傾向を調べた。なおその際は、現地調査と同時期の地温平均値を調べた。その結果、地上から約 3 m の深さから凍土が始まる地点では、1 m 深地温は 8~9 °C に集中していた。それよりも浅い約 2 m の深さから始まる地点での 1 m 深地温は、5~6 °C に分布していた。さらに 1 m 深地温が 13 °C 以上となる BH データは無かった。これらの結果を用いて、次の 4-4 では観測地点の凍土存在状態を判定した。

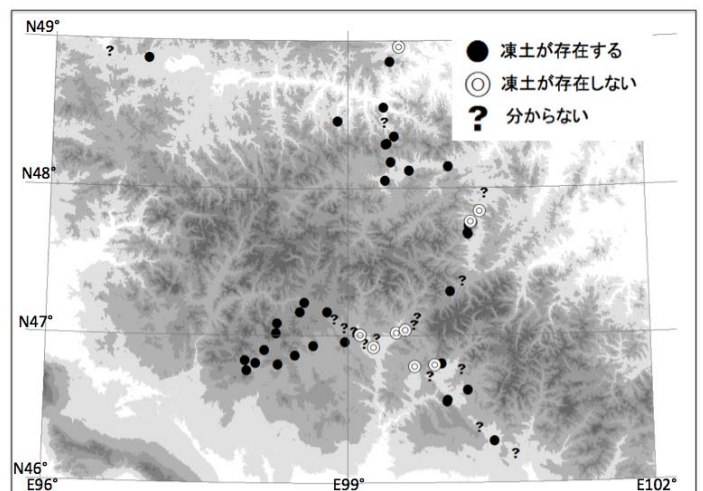


図 4 BH 観測データを基にした凍土存在状態の判定。

4-4. 観測地点の凍土存在状態の判定(図4)と統計解析の結果(図5)

BH観測データより、現地で取得した1m深地温を8~9℃以下(土壌の乾湿をさらに考慮)で”凍土が存在する”・9~13℃は”分からない”・14℃以上では”存在しない”,に分けた(図4).そして,”分からない”を除いた2値の凍土状態($N_{1,Yes}=36$, $N_{0,No}=10$, 合計 $N_{1+0}=46$)を結果変数とし,ロジスティック回帰分析を行った.その結果,先に述べた6つの説明変数のうち,高植生NDVIと高い標高,そして凹地を示すマイナスの曲率の組み合わせが最も凍土の存在を説明する変数となり,4-1および4-2を象徴する結果となった.結果のモデルを式2に示す.なお,変数間の相互作用(内部相関)は見られないことを確認した.

$$p = \frac{e^x}{1+e^x} = \frac{1}{1+\exp(37.03-0.16*(NDVI)-0.01*(Alt)+29.50*(curve))} \quad (式2)$$

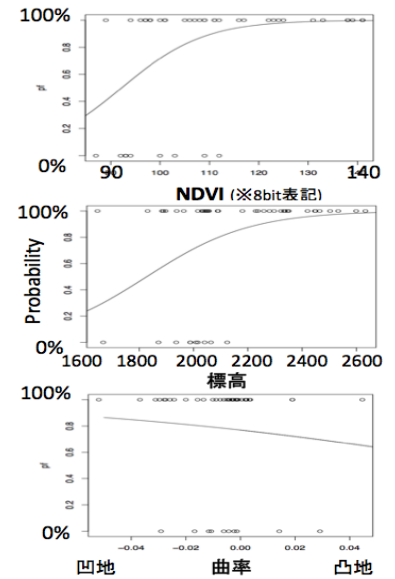


図5 3つの説明変数と確率曲線.

5. 課題・今後の展開

今回示した統計解析の結果は,現時点では試作段階の見解であり,“存在する・しない”のサンプル数Nの個数に差があることが課題として残る.一般に,BH観測データは主に凍土が存在する地点の観測データしかなく,存在しない地点のデータが不足している.そのため,“存在しない”という断定が難しい(よって本研究では,”分からない”の地温間隔を4℃設定している).そのため今後は存在しない地点のデータ補充を目指し,サンプル数を近づけて解析を行う必要がある.また,今回は1kmの解像度で行ったが,異なる解像度で変わる説明変数の違いを今後見ていき,不連続域の凍土存在環境の多様性を調べていきたい.

6. まとめ

現地観測データを基に, GIS とリモートセンシングを用いた総合的な解析から,凍土の存在する環境因子を明らかにし,統計手法による説明変数の定量化を試みた.現時点では,シベリアの南限モンゴル中央部の永久凍土の存在には,森林や湿潤植生を表す高NDVI,1800m以上の高い標高,そして凹地を示すマイナスの曲率が影響することが分かってきた.これは先行研究および現地研究者の既存の見解を支持する結果となった.今後も引き続き解析を進め,将来予測に应用可能な確率マッピングに向け,感覚的に留まっていた凍土存在場所の定量的把握を目指していく.

謝辞: 本研究には,平成25-27年度文部科学省科学研究費補助金(課題番号:21310001,代表者:石川守)及び,平成21-23年度同上(課題番号:2535041603)を使用した.また,モンゴルでの地温観測には海洋研究開発機構のプロジェクト経費を使用した.

参考・引用文献:

- 1) 串田圭司,原田鉦一郎,森淳子,岩花剛,澤田結基,片村文崇,福田正己,2007:永久凍土と活動層のリモートセンシング,日本雪氷学会誌「雪氷」,69巻2号221-228頁.
- 2) Ishikawa et al.,2012: Thermal State of Mongolian Permafrost, Proceedings of the 10th International Conference on Permafrost, Salehard, 173-178.
- 3) 藤井理行,増沢武弘,橋本泰助,小野田幹生,上野健,1999:1976-1998年における富士山の永久凍土下限高度の変化,1999年度日本雪氷学会全国大会要旨,38.