

## 境界永久凍土の分布モデリング Spatial modeling of boundary permafrost

石川 守 (北大・地球環境科学研究所), Jambaljav Yamkhin (モンゴル科学アカデミー・  
地理学研究所), 山橋いよ (北大・環境科学院), Sebastian Westermann and  
Bernd Etzelmüller (オスロ大)

Mamoru Ishikawa, Jambaljav Yamkhin, Iyo Yamahashi, Sebastian Westermann and  
Bernd Etzelmüller

### 1. はじめに

凍土は多様な時間と空間スケールで発達・衰退する。全陸地の約 2 割に分布する永久凍土の消長には数千年規模の時間を要す。その一方で、全陸地の約 6 割を占める季節凍土は年～数十年規模で消長する。凍土衰退に起因した影響が人にとっての環境に潜在的(温暖化加速)にも顕在的(土地浸食の加速化, 水・生態系資源の劣化)にも及びつつある。これら諸現象の過程を理解したり, ハザードマップを作成したりするには, 凍土の安定性を空間的に示す分布図が不可欠となり, それには気候変動や地表面改変などによる影響を定量的に評価できるものであることが望まれる。

氷河や海氷といった「見える雪氷要素」に対しては, 衛星による直接観測や, 均一物性値を仮定した空間モデリングなどによってその分布や将来像を精度よく表示, 予測することができる。その一方で, これらの手法をそのまま「見えない雪氷要素」である凍土に援用するのは難しい。地上から視認できないこと, 氷, 水, 土粒子, 有機物などが様々な割合で混在しており物性値すら決定することが難しいことなどによる。気候モデル研究でよく参照される環北極域永久凍土・地下氷分布図(以下 IPA 図)では, 単位面積の 90-100%に永久凍土が分布する領域を連続的永久凍土帯(Continuous permafrost), 50-90%の領域を不連続永久凍土帯(Discontinuous permafrost)といったように曖昧さを含んだ凡例で永久凍土分布を表現している<sup>1)</sup>。

このような凡例区分は, グローバルスケールでの気候値や植生などの分布と永久凍土との対応を議論する際にはある程度有効である。北東シベリアのツンドラや北方林などの分布が連続永久凍土帯のそれにほぼ一致することがその好例であろう。その一方で, 永久凍土の発達や分布が地形, 植生, 土壌物性といったローカルな因子群に制約される不連続・点在および山岳永久凍土帯(境界域永久凍土)では, このような大まかな凡例区分は実用的ではない。にもかかわらずこのような地域にて永久凍土の分布を詳細に示すことのニーズは高い。熱的に脆弱な永久凍土の将来動態を予測する気候・雪氷学的な意義の他に, 永久凍土の衰退が植生や水文過程といった地域生態系サービスの急激な劣化を引き起こすことが現実的な問題となっているからである。本稿では主に筆者が関わってきた不連続帯や山岳域での永久凍土分布の研究成果を踏まえた上で今後の方向性について紹介する。

### 2. 北海道大雪山の永久凍土

北海道大雪山では, 1970 年代に山岳永久凍土が発見された<sup>2)</sup>。1980 年代には永久凍土の指標周氷河地形の記載<sup>3),4)</sup>や通年にわたる気温や地温の観測が行われた。その後,

多地点での物理探査、積雪底地表面温度や浅層地温観測などにより、永久凍土の分布・構造や維持・形成メカニズムなどが議論された<sup>5),6)</sup>。

IPA 図では大雪山とその周辺は点在帯区分として一色に塗られているだけで、これでは永久凍土の分布特性を十分に表しているとは言い難い。現実には標高や、地形起伏、地表層物質の熱物性などに応じて永久凍土は複雑に分布している。これまでの観測研究の蓄積によって永久凍土が発達しうる標高の下限や微地形（冬季間を通じて雪が堆積しない風衝地）が明らかになってきた<sup>7)</sup>。Ishikawa<sup>8)</sup>は解析図化機上で2×2mの標高グリッド（DEM）を作成し、各グリッドにおける積雪深の季節推移を考慮したうえで数mから数十メートルの規模でモザイク状に分布する風衝地の輪郭を描いた。

このような、グリッドサイズをできるだけ小さくして精度を高めるというアプローチは利用できるデータの精度や密度などによってその成否が決まる。大雪山では正確に標定できるステレオ空中写真が利用できるため高精度DEMが作成できた。その一方で、永久凍土の分布をこのような詳細スケールで表現するためには、地表面温度や地表層の熱物性についての情報も同様のグリッドスケールで求められる。

### 3. モンゴルの永久凍土

モンゴルはシベリアを中心としたユーラシア永久凍土帯の南限に位置し、IPA 図では国土北部は連続—不連続—点在—孤立的と遷移する永久凍土帯として、南部では季節永久凍土帯として示されている。Ishikawa et al.<sup>9)</sup>は、同国永久凍土帯のほぼ全域を網羅するように約40地点でのボアホール(3-15m深さ)による永久凍土温度観測を行い、連続的分布域では-2℃を下まわるような寒冷な永久凍土が存在する一方、南部の点在域では-1～0℃と温暖で融点に近い永久凍土が卓越することを見出した。

一方で、不連続帯から点在帯へと遷移する領域ではローカルな地形起伏（北向・南向・谷底）や植生被覆（草原・森林）、土壌の湿潤度、地下氷量などに依存して地温は大きくばらついていた。冬季に冷気湖が形成される谷底、森林に被覆される北向き斜面、湿潤で地下含氷量が多いところで地温が低くなる傾向がある。国土規模では緯度依存型極域永久凍土の、地域規模では地形依存型山岳永久凍土の分布特性がみられる。

各観測点での永久凍土の維持形成メカニズムは通年地温観測によって得た地温の鉛直プロファイルに反映されていた。乾燥した国土南部の谷底では、地表面付近の地温は大きくマイナス側に傾き、冬季間の冷気湖形成が永久凍土の維持に大きく寄与していること、多くの地下氷があるところでは、地温の年振幅量が小さく地下氷の相転移に多くの潜熱が消費されていることなどが推定された。さらに、森林下では直達日射が遮蔽されるため夏季の地表面温度上昇が抑えられ、このことが永久凍土の形成に寄与していることが示された。これら観測的知見に立脚し、同国における永久凍土の分布やその熱的安定性を将来予測への適用までを視野にいれ、地図化していくことが次の課題である。

### 4. 境界域永久凍土の分布表現

凍土は「物体」としてではなく「状態」として捉えるべきであり、これに従うと凍土は「分布図」というよりはむしろ「ポテンシャル図」として表現されるべきだろう。近年では、永久凍土分布（ポテンシャル）図はGISやリモートセンシングなどを援用して作成される。ここでは、単位グリッド内におけるパラメーター値（土壌熱物性、

標高, 斜面方位・傾斜, 植生, 積雪, 気温など) が均一であるという条件を前提としている。このような仮定は広大平坦な連続永久凍土帯 (ツンドラ, タイガ) ではある程度当てはまり, 実際に結果と点ベースの現地観測値との間により対応があることも示されている。その一方で, グリッド内での不均質性が顕著な山岳域や不連続永久凍土帯などでは, 各パラメーターに代入する値を一意に決められなくなる。これは本来的にフラクタル的次元をもつ地形の効果が大きくなるためである。この問題に対し, 大雪山の事例では, 可能な限りグリッドを小さくし, そこに導入しうるパラメーター値のばらつき幅をなるべく小さくするという発想に基づいている。ここでは各グリッドにおける永久凍土の有無や地温プロファイルなどが一意に出力される (決定論的アプローチ)。

一方, 境界域永久凍土の分布表現として, 不均質性や曖昧性をあえて認めたいうえでそれらを出力に含めることも考えている。すなわち, グリッドサイズはそのままで, グリッド内でのパラメーター群がどのような値でどのように組み合わせれば, 「どの程度の確率で」永久凍土が発達しうるのか, といったアプローチである (確率論的アプローチ)。この概念に基づいた先行研究は, 北米の山岳永久凍土にて行われてきた<sup>10)</sup>。

筆者らは, これまでにモンゴルで実施してきたボアホール地温観測結果に基づき, 決定論および確率論両アプローチでモンゴルの境界域永久凍土の分布を表現すべく研究を進めている。これらは永久凍土の熱的安定性・脆弱性およびこれらの将来動態を高精度で評価できるだけでなく, 生態・水文過程との相互作用評価にも応用できるものとなることを目指す。

前者のアプローチについて, 筆者らはすでに高解像度 (1×1 km) リモートセンシング地表面温度 (MODIS-LST) とボアホール地温観測結果との間に有意な相関を見出している。これを上部境界条件として, 熱伝導式や TTOP モデル<sup>10)</sup>によって, 各グリッドにて一意に決まる地温プロファイルの分布図を作成する。

後者のアプローチで作成するのは, 永久凍土が存在する確率をグリッド単位でマッピングしたものである。ここでは気候変動や地表面改変に伴う永久凍土の変化は各グリッドでの永久凍土存在確率の変化として定量的に表現される。解析では多点での地温観測によって重要性が示唆された地形・植生・気候値などを説明変数とし, これらを MODIS-LST と同様 1×1 km でグリッド化したのち, 結果変数 (永久凍土の有無) との間で回帰分析を行う。「見えない雪氷要素」である永久凍土の分布を表現する唯一無二の方法はない。多様に表現しそれらを比較検討していきたい。

#### 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) および, 平成 21-23 年度文部科学省科学研究費補助金 (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) Brown, J., O.J.J. Ferrians, J.A. Heginbottom and E.S. Melnikov, 1997: International Permafrost Association circum-Arctic map of permafrost and ground ice conditions, scale 1:10,000,000, U.S. Geological Survey, Washington, D.C.

- 2) 福田正己・木下誠一, 1974:大雪山の永久凍土と気候環境. *第四紀研究*, **12**, 192 - 202.
- 3) 曾根敏雄・高橋伸幸, 1986: 北海道大雪山北海平における凍結割れ目多角形土の冬期観測, *地理学評論*, **59A**, 654 - 663.
- 4) 高橋伸幸・曾根敏雄, 1988 : 北海道中央高地, 大雪山平ヶ岳南方湿原のバルサ, *地理学評論*, **61A**, 665 - 684.
- 5) Ishikawa, M. and K. Hirakawa, 2000: Mountain permafrost distribution based on BTS measurements and DC resistivity soundings in the Daisetsu Mountains, Hokkaido, Japan. *Permafrost and Periglacial Processes*, **11**, 109-123.
- 6) Ishikawa, M., K. Fukui, M. Aoyama, A. Ikeda, Y. Sawada and N. Matsuoka, 2003: Mountain permafrost in Japan: distribution, landforms and thermal regimes. *Zeitschrift für Geomorphologie, N.F.* **130**, 99-116.
- 7) Ishikawa, M., 2003: Thermal regimes at the snow-ground interface and their implications for permafrost investigation. *Geomorphology*, **52**, 105-120.
- 8) Ishikawa M. (2001). Distribution of mountain permafrost in the Daisetsu Mountains, Hokkaido, northern Japan, PhD thesis, Hokkaido University, 123pp.
- 9) Ishikawa, M., N. Sharkhuu, Y. Jambaljav, G. Davaa, K. Yoshikawa and T. Ohata, 2012: Thermal states of Mongolian permafrost. *Proc. 10th Int. Conf. Permafrost*, Salehard, 173-178.
- 10) Bonnaventure P.P., A.G. Lewkowicz, M. Kremer and C. Michael, 2012: A permafrost probability model for the Southern Yukon and Northern British Columbia, Canada: *Permafrost and Periglacial Processes*, 12 MAR 2012, DOI: 10.1002/ppp.1733
- 11) Smith MW. And D. Riseborough, 1996: Permafrost monitoring and detection of climate change. *Permafrost and Periglacial Processes*, **7**, 301-309.