

日本の永久凍土環境の監視

岩花 剛

北海道大学大学院地球環境科学研究院

北海道・大雪山系には広く永久凍土が分布し、山岳景観や生態系が凍土との微妙なバランスの上に成り立っている。地球温暖化による凍土の融解は、現在固体状態で地形を維持し、同時に地下水の難透水層として地表の植生分布に大きな影響を与えている地中状態の変化を意味する。地球温暖化によって今後大きな変化見込まれる自然環境の監視および生態系への影響把握は重要な課題である。本研究助成により、大雪山系および富士山頂に永久凍土温度の観測システムを構築することが出来たので、これまでに観測された永久凍土の熱的状态について報告する。

大雪山系・五色岳の観測サイトでは、高山帯に日本ではじめて本格的な微気象観測システムを構築し、2005年7月の観測開始することができた。約3年が経過して、現在も観測を継続中である。また、本研究助成により、新たに小泉岳・白雲岳・平ヶ岳南方パルサ湿原の3サイトにおいて地温観測を始めることができた。これは、大雪山系全体の地中環境把握を面的な議論に進めるために重要な観測網構築であった。この結果、全てのサイトにおいて永久凍土の存在が明らかにされつつある。永久凍土が連続的に分布する山岳地における微気象環境を含めた永久凍土のモニタリングを長期的に実施し、この特殊な環境に生息する植生の変化との関係を監視していく予定である。

日本の最高地点であり、最も寒冷な条件下に晒される富士山頂においても1970年代に永久凍土の存在が報告されている。本研究によって初めて3mを越える地温観測システムが構築し、連続的観測が開始した。地温観測の結果は、山頂部でも部分的に永久凍土が存在しない場所がある可能性を示していた。また、観測された地温も高く、山頂部一帯において永久凍土層が存在するところでも、その地温は融点付近にある不安定なものである可能性が考えられた。今後、地温観測孔と気象測器の通年観測データを継続的に取得し分析すること、また、空間的な凍土の分布を捉えることで、今回観測された高い地温が、富士山頂の状態を代表するものなのか、火山性地熱が山頂部の地温を高く保っているのか評価できる可能性がある。過去に報告された永久凍土の分布の変化状況についても調査を進める。

日本の永久凍土環境の監視

岩花 剛

北海道大学大学院地球環境科学研究院

1 研究の背景と目的

温暖化による地球環境への影響が各国で報告されつつある。わが国でいち早くその影響を受けると考えられるものは、山岳永久凍土の分布状態である。北海道・大雪山系(図1)には広く永久凍土が分布し、山岳景観や生態系が凍土との微妙なバランスの上に成り立っている(小泉・新庄, 1983, 福田・木下, 1974 など)。地球温暖化による凍土の融解は、現在固体状態で地形を維持し、同時に地下水の難透水層として地表の植生分布に大きな影響を与えている地中状態の変化を意味する。観測測器の設置が難しいこと、また短期的な観点から産業的に利益が見込まれないことなどが理由で、日本の山岳地帯での精密な気象観測及び地中の熱的状态の把握はこれまでほとんど行われてこなかった。しかし、地球温暖化によって今後大きな変化見込まれる自然環境の監視および生態系への影響把握は重要な課題である。

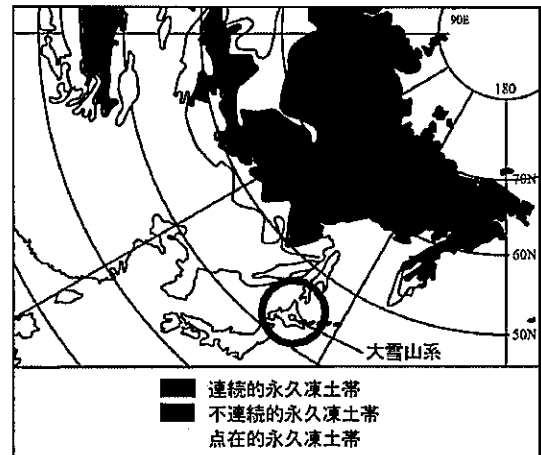


図1 北半球の永久凍土分布図

(Harris, 1986 より)

高地の環境変化と動植物(登山者を含む)の生態系への影響の把握を念頭に以下の2点を研究の目的とした。

- ・ 定量的議論および、モデル計算に十分耐えうる詳細かつ高精度な観測データを日本最大の永久凍土地帯、北海道大雪山系において取得すること。
- ・ 1971年にNature誌上で発表された富士山頂の永久凍土(Higuchi&Fujii, 1971)の現状を把握し、今後の長期モニタリングに備えた観測機器の設置を行うこと。

本研究助成により、大雪山系および富士山頂に永久凍土温度の観測システムを構築することが出来たので、これまでに観測された永久凍土の熱的状态について報告する。

2 大雪山系における調査

2.1 観測地点

観測システムの設置場所は、以下の4地点である。

A) 五色サイト (地点1, 図2)

登山道から十分に離れた北海平の東に位置する五色岳付近の台地である (図2)。この台地はほぼ平坦で、卓越風方向に300~400mの吹走距離をとることができる微気象観測に比較的適した場所である。システムの設置地点は五色岳から北東に約400mの標高2015mの地点である。2005年より微気象の観測を開始し、徐々にその項目を増やしつつある。

B) 小泉サイト (地点2, 図2)

小泉岳 (2158m) の頂上付近に設置したサイトである。1970年代から福田・木下 (1974) によって永久凍土の存在が報告され、近年においてもIshikawa & Hirakawa (2000) によってその空間分布が論じられている地点である。2008年5月より地温の観測 (2.3m) を開始した。

C) 白雲サイト (地点3, 図2)

白雲岳 (2229m) の火口内のサイトである。融雪期直後に火口に一時的な湖が現れ、凍土の融解とともに一気にその水が排出される現象が見られる。2008年7月より地温観測 (3.45m) を開始した。

D) パルササイト (地点4, 図2)

平ヶ岳 (1752m) の南方に存在する日本で唯一確認されているパルサ湿原 (高橋・曾根; 1988) に設置したサイトである。対象4地点の中では最も標高が低い永久凍土が確認されている。2008年9月より地温測定 (1.54m) を開始した。

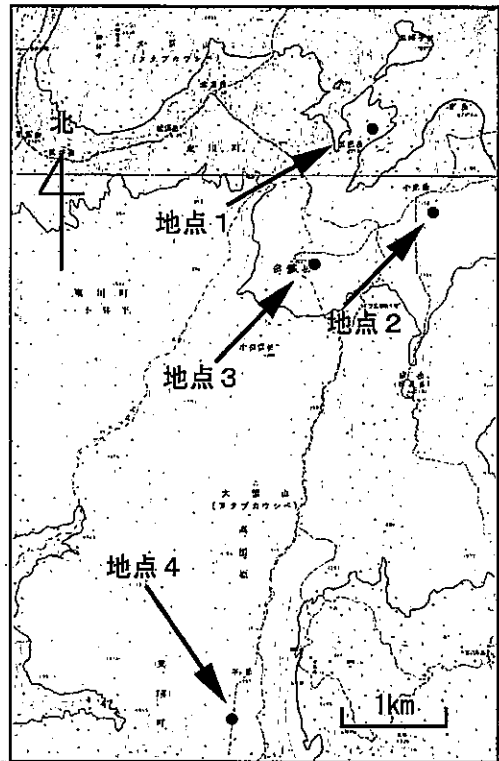


図2 大雪山系における調査地点

2.2 観測方法

本報告における観測値は、2005年7月から2008年10月までに測定されたものである。この間、測定機器の故障や破損、動物によるケーブルの切断等により測定項目によっては数日から数ヶ月の欠測が生じた。

五色サイトおよび小泉サイトの地温測定には市販のサーミスタ (104ET, 石塚電子) を用いた自作のプローブを検定して使用した。地温プローブは、0°Cの氷-水恒温槽中にて0.02°Cの精度で検定し、-20から30°Cにおける確度は±0.09°C以下である。測定深度は、五色サイトにおいて0.01, 0.05, 0.10, 0.20, 0.30, 0.50, 0.70, 0.90, 1.10, 1.30, 1.50, 1.70, 1.90, 3.00, 4.00mの14深度、小泉サイトにおいて0.10, 0.20,

0.40, 0.60, 0.80, 1.00, 1.30, 1.60, 2.00, 2.30mの10深度である。これらのサイトでは、10秒毎に測定し、30分間平均として記録した。測定及びデータ記録にはCR10Xデータロガーとマルチプレクサ(Campbell Scientific, Inc.)を用いた。

白雲サイトおよびパルササイトでは、他のサイトと同様に校正を行ったサーミスタ(TMC-HD)とU12-008ロガー(Onset社)を用いて地温測定を行った。測定深度は、白雲サイトで0.10, 0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50, 3.00, 3.45mの8深度、0.50, 1.00, 1.25, 1.54mの4深度である。

2.3 結果と考察

地温概要

A) 五色サイト

2005年10月から2008年10月における4m深までの地温プロファイル変化を図3に示す。2005年においては、10月初旬に表層からの凍結が始まり、10月中旬には永久凍土層から上部融解層への凍り上がりが始まる。11月中に全層が氷点下の地温となり、活動層はほぼ -9°C 以下まで地温が降下する。ここで活動層とは、多年凍土帯において凍結・融解を繰り返す地表層のことである。2006年の2月下旬から徐々に表層からの加熱が始まり、5月の初旬に完全に積雪が消滅した後、活動層の融解が始まった。5月から8月下旬までは平均 1.22cm/day の割合でほぼ一様に融解深が増加したが、6月下旬の比較的気温の低い状態が続き、融解深の一時的な現象が観測された。9月中の融解深の増加はほとんど見られなかった。活動層の厚さは2005年、2006年においてそれぞれ1.28, 1.46mであり、2007年にはさらに深度が増した。この変化が継続的なものか、自然の年々変動によるものかは、今後観測を続けて解析する予定である。活動層の融解開始は、2007・2008年においても5月の初めであった。

B) 小泉・白雲・パルササイト

今回新たに設置した3サイトにおける2008年8月20日時点の地温プロファイルを図4に示す。すべてのサイトにおいて、融解期末期に氷点下の地層が存在することがわかった。最も標高の低いパルササイトでは、融解深が最も浅く、意外な結果を示した。これ

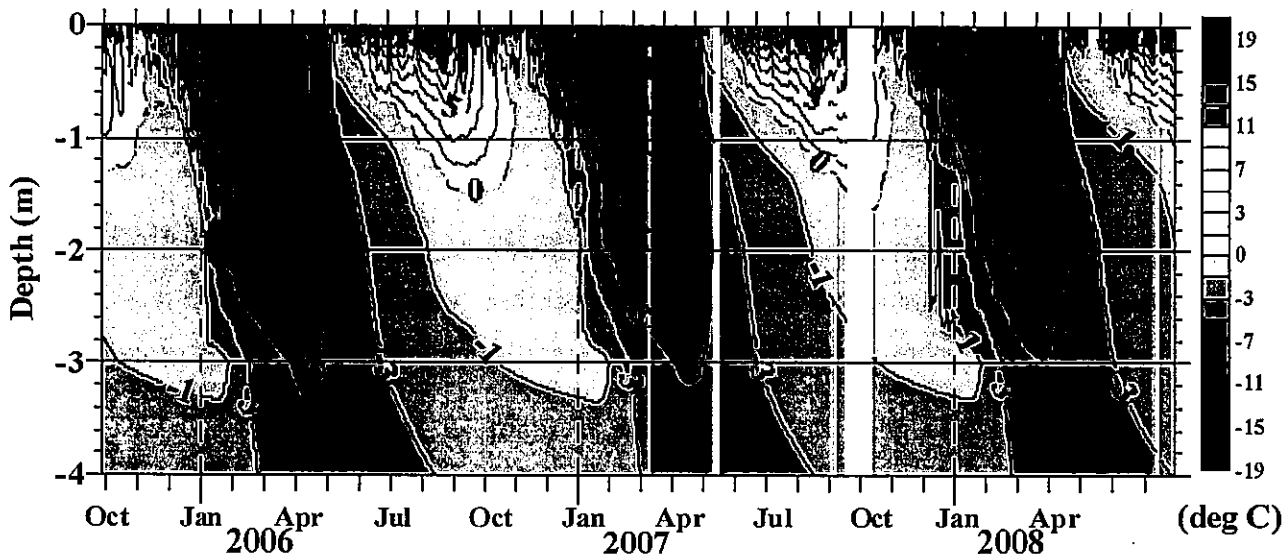


図3 五色サイトにおける地温プロファイルの変化

は、パルサの頂上部での地温観測結果である。パルサ湿原においては、永久凍土が広く分布していると推測される標高2000m前後の他3サイトに匹敵するか、さらに温度の低い部分が特殊な環境の下に維持されている可能性がある。今後、この凍土の状態と湿原の植生との関係について調査を進めていく。

永久凍土の存在

五色サイトにおいては、サーミスタセンサを用いて作成した地温計による測定によって、1年のうち最も多くの熱量が地中に蓄えられていると考えられる9月下旬においても0°C以下の地層が2ヵ年連続して存在することがわかった。この多年凍土（永久凍土）は、少なくとも4m以深まで存在していると推測される。

国際永久凍土協会の定義による永久凍土の存在証明には、2ヵ年以上連続して0°C以下の地層が存在することが必要である。五色サイトでは、この条件を満たす観測結果が得られた。他の3サイトについても今後観測を継続して、永久凍土の存在証明および現状の報告を行いたい。

2.4 まとめと今後の展望

高山帯に日本ではじめて本格的な微気象観測システムを構築し（五色サイト）、2005年7月の観測開始することができた。約3年が経過して、現在も観測を継続中である。また、本研究助成により、新たに小泉・白雲・パルサと3サイトにおいて地温観測を始めることができた。これは、大雪山系全体の地中環境把握を面的な議論を進めるために重要な観測網構築であった。この結果、全てのサイトにおいて永久凍土の存在が明らかにされつつある。永久凍土が連続的に分布する山岳地における微気象環境を含めた永久凍土のモニタリングを長期的に実施し、この特殊な環境に生息する植生の変化との関係を監視していく予定である。

3 富士山頂における調査

3.1 地温観測

携帯型エンジンドリルを用いて、山頂火口周辺に深さ約3mの地温観測孔を2本、設置した。1本目の観測孔は、2008年8月20日に、山頂において比較的平坦な面が広がる北西側の風衝地（地点1、標高3695m）に掘削し、2本目は、同年9月28日に、火口内に突き出る岩盤（虎岩）の付け根付近（地点2、標高3680m）に掘削した。1本目の観測孔の横に、高さ2mの気象観測塔を設置し、気温、気圧、湿度、雨量、風向・風速の観測を地温観測と同時に開始した（図5）。また、土壌水分計（地表付近）と、温度センサーを用いた簡易積雪深計も設置した。観測にはデータロガーを用い、定時の測定データが自動記録されるようにした。

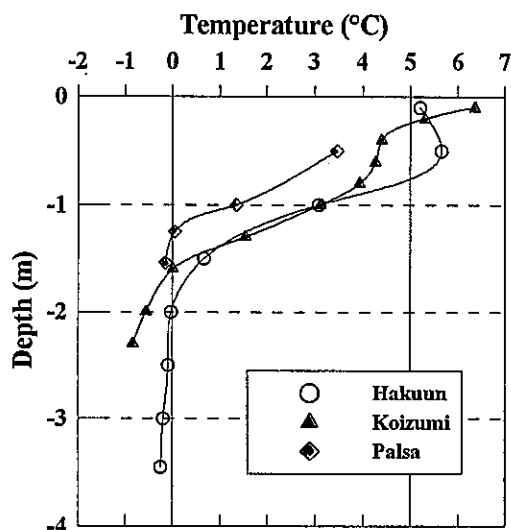


図4 小泉サイト・白雲サイト・パルササイトのボアホールにおける2008年8月20日時点での地温プロファイル

3.2 結果

3.2.1 地温

地点1では、深さ3.1 mまでは砂礫層で、ボーリングビット径(約5 cm)よりも大きな火砕岩礫が若干含まれていた。3.1 m深にて岩盤もしくは粗大な礫に当たったため掘削を終了した。掘削時には深さ2 m付近で火砕物の間に氷が確認されたものの、2.5 m以深のボーリングコアはきわめて乾燥しており、氷は確認されなかった。掘削直後2 m深の地温は 0.0°C であったが、3 m深の地温は $+0.3^{\circ}\text{C}$ であり、その後、9月末までに全層の融解が確認された。掘削後約1ヵ月が経過した時点(9月26日0時)の地温プロファイルは、2.2 m以深がほぼ 0.1°C で一定となっていた(図6)。この地温プロファイルからは、2.2 m以深は掘削時の擾乱によって地温が 0°C を上回っているが、観測孔周辺は同深度で融点にて凍結しているように思われた。この地点での永久凍土の有無を判定するためには、少なくとも翌年の秋季までの地温データが必要だが、現段階でも深さ2.5 m付近より深くには融点に近い永久凍土が存在することが予想される。

また、地点2も砂礫層からなり、表層部に礫が多いものの、2 m以深はより細粒でシルトも多く含んでいた。とくに2 m以深のコアは水を多く含んでおり、掘削孔の底(深さ3.3 m)までまったく凍結していなかった。掘削11日後の10月9日0時の地温プロファイルは、顕著な日変化が見られる表層を除き、ほぼ全層が 3°C を上回っていた(図6)。同地点における2007年10月から1年間の平均地表面温度は -0.7°C であり(池田、未公表データ)、また同期間の山頂の平均気温が -6.0°C であることから、同地点では永久凍土の存在が十分見込まれるにもかかわらず、得られた地温プロファイルはむしろ永久凍土が存在しない可能性を示唆した。地点2では掘削からデータ回収時点までの経過時間が短い、3.0 mおよび3.3 m深の地温は掘削の翌朝まで急降

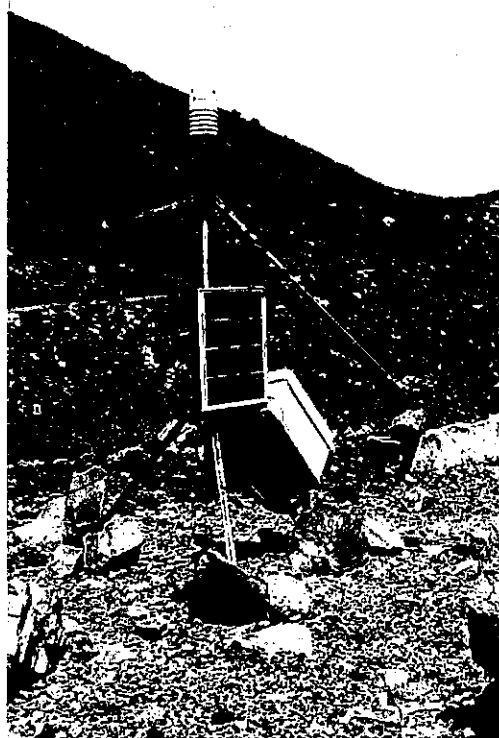


図5 自動気象観測装置全景(地点1)。

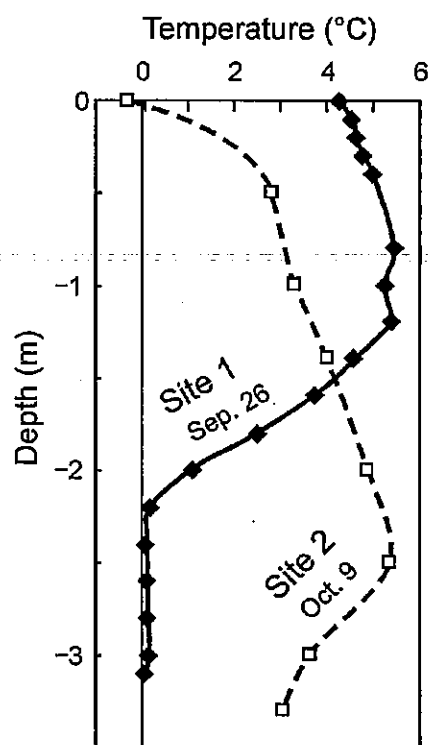


図6 地温断面図。地点1は2008年9月26日0時、地点2は2008年10月9日0時のもの。センサーの位置を記号で示した。

下したあとは緩やかな上昇に転じているため、その深度の地温には掘削による加熱の影響はほとんど残っていないと思われる。

3.2.2 まとめと今後の展望

地点2における地温観測の結果は、山頂部でも部分的に永久凍土が存在しない場所がある可能性を示していた。また、地点1で観測された地温も高く、山頂部一帯において永久凍土層が存在するところでも、その地温は融点付近にある不安定なものである可能性が考えられた。

今後、地温観測孔と気象測器の通年観測データを継続的に取得し分析すること、また、空間的な凍土の分布を捉えることで、今回観測された高い地温が、富士山頂の状態を代表するものなのか、火山性地熱が山頂部の地温を高く保っているのか評価できる可能性がある。過去に報告された永久凍土の分布の変化状況についても調査を進める。

謝辞

本研究の遂行にあたりエスプレック地球環境研究・技術基金が大きな助力となりました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 小泉武栄, 新庄久志, 大雪山永久凍土地域の植物群落, *日生態会誌*, 33, 357-363, 1983.
- Harris, S. A., *The Permafrost Environment*, 276 pp., Barnes & Noble Books, Ottawa, 1986.
- Ishikawa, M., and Kazuomi Hirakawa, Mountain permafrost distribution based on BTS measurements and DC resistivity soundings in the Daisetsu Mountains, Hokkaido, Japan, *Permafrost and Periglacial Processes*, 11 (2), 109-123, 2000.
- 福田正己, 木下誠一, 大雪山の永久凍土と気候環境 (大雪山の事例とシベリア・アラスカ・カナダとの比較を中心としての若干の考察), *第四紀研究*, 12 (4), 192-203, 1974.
- 高橋伸幸, and 曾根敏雄, 北海道中央高地, 大雪山平ヶ岳南方湿原のパーサ, *地理学評論*, 61 (A) (9), 665-684, 1988.