

機関番号：10101

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21710028

研究課題名（和文）気候変動が山岳高地の地中環境に及ぼす影響評価

研究課題名（英文）Study on Influence of Climate Change on Mountain-Top Ground Environment

研究代表者

岩花 剛（IWAHANA GO）

北海道大学・大学院地球環境科学研究院・特任助教

研究者番号：70431327

研究成果の概要（和文）：

大雪山系山頂部の4地点において、永久凍土が存在することが証明された。今回の調査によって設置された最も深い10m地温観測孔の観測から、永久凍土の下面深度はさらに深く、30-40m以上深いと推定された。富士山頂でも3mの地温観測孔を2地点で掘削し、地温観測を行ったが、少なくとも測定深度内に永久凍土の存在は確認できなかった。ボーリングコアの解析によって、シベリアと日本の山岳永久凍土帯で共通する雪氷層位学的特徴を捉えることができた。

研究成果の概要（英文）：

The occurrence of permafrost was confirmed at four observed points in the summit area of Mt. Daisetsu. The extrapolation of the lower part of the ground temperature profile from 10m bore-hole, which installed during this study, indicates the depth of the permafrost base to be 30-40m. I monitored two ground temperature profiles down to 3m on the summit of Mt. Fuji, but I have not confirmed the occurrence of permafrost. Analysis of boring cores from Siberia and Japanese mountain permafrost showed similar characteristics of cryostratigraphy.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境影響評価

キーワード：永久凍土・山岳・同位体・大雪山系・富士山・凍土

1. 研究開始当初の背景

地球規模の気候変動(特に地球温暖化と降水量の変化)が陸域へ及ぼす影響について、IPCCの第4次報告書で永久凍土の変化による影響が初めて加えられた。これは、地中に永久凍土層が広く分布するシベリアやアラスカ、極北カナダでの生態系変化が永久凍土の動態変化に強く影響を受けることを世界が認識しはじめたためである。

日本の位置する経度において日本列島が永久凍土分布の南限であり(図1)、大部分は大雪山系に展開している。地中の凍結層は難透水層となることから、地表層の水文環境に大きな影響を与える。北海道・大雪山系には広い面積にわたり永久凍土が分布し、その特殊な環境下に多くの稀少な動植物が生息しており、その生態への影響は未知数である。永久凍土の後退による生態系への影響は、富士山をはじめとする日本の山々でも報告されつつある。

2. 研究の目的

地球規模の気候変動が日本の高山帯生態系や高山地形へ与える影響についての知見は非常に限られている。山地の生態系は、気温の上昇や降水量の変化に伴う地中の物理的变化に強く応答して影響を受けるが、特に土壌の凍結融解(季節凍土)や多年凍結による不透水層の存在(永久凍土)が高山環境でしばしば重要となる。

本研究は、観測サイト(最も永久凍土が厚く分布するサイトとして東シベリアのヤクーツク、日本では唯一安定した永久凍土が確認されている大雪山系山頂部、過去に永久凍土の存在が報告されたが現在かなりの後退が推測される富士山頂部の3地域)を利用して、気候変動が凍土が絡む生態系と水循環現象に与える影響を評価するものである。

3. 研究の方法

(1) 観測地点

①大雪山系山頂部

調査域は、北海道・大雪山系中央部、北海岳南部から平ヶ岳南部、標高1600-2200mの山頂域である。大雪山系は、更新世初期からの断続的な噴火によって形成された。1970年代に永久凍土の分布が報告されており、この永久凍土は最終氷期最寒期以降約2万年にわたって凍結状態を保っていると考えられている。

観測システムの設置場所は、以下の4サイトである。

Gサイト(五色岳サイト)

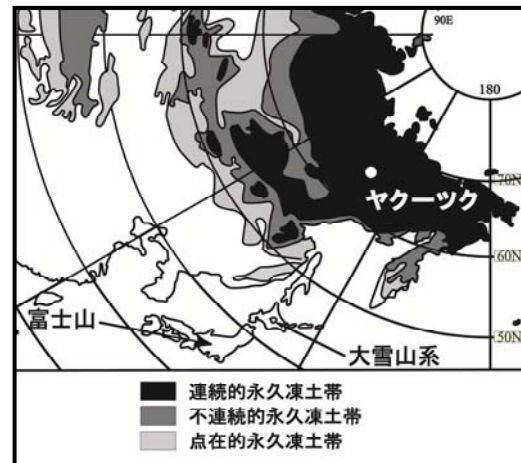


図1. 永久凍土の分布図と観測サイトの位置

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。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。システムの設定地点は五色岳から北東に約200mの標高2035mの地点である。2005年より微気象の観測を開始した。本研究期間には、10mのボーリングを行い、土壌のサンプリングと地温センサーの設置を行った。

Kサイト(小泉岳サイト)

2008年5月より地温の観測(2.3m)を開始した。

Hサイト(白雲岳サイト、図1)

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。

Pサイト(パルササイト、図1)

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。

②富士山頂

永久凍土が急速に融解しつつあるという報告もあるが、実際は永久凍土の存在は証明されていない。

金明水サイト(以下、金明サイトと記す)は、白山岳から富士火口方面に下った比較的起伏の緩やかな小丘上(標高3693m)に位置し、虎岩サイト(以下、虎岩サイトと記す)は、火口南側の虎岩上部の平らな部分(標高3682m)に位置する。

金明サイトでは、地温およびその他の微気象項目の観測を行い、虎岩サイトでは、地温

のみの観測を行った。

金明サイトの観測期間は、2008年8月22日～2010年10月12日である。虎岩サイトの観測期間は、2008年10月28日～2010年9月30日である。

(2) 測定方法

①大雪山系山頂部

本報告における観測値は、2005年10月から2010年10月までに測定されたものである。

GサイトおよびK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ブを検定して使用した。地温プロブは、 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 $\pm 0.09^{\circ}\text{C}$ 以下である。測定深度は、Gサイトにおいて4.00mまでの14深度、Kサイトにおいて2.30mまでの10深度である。土壌水分の測定はEnviroSMARTセンサー(Sentek)を用いた。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CR1000およびCR10X データロガーとマルチプレクサ(Campbell Scientific, Inc.)を用いた。

今回新たにGサイトに掘削したボアホールの地温測定・記録には、10.0mまでの11深度に他のサイトと同様に校正を行ったサーミスタ(TMC-HD)を設置しU12-008 ロガー(Onset 社)で1時間毎に計測と記録を行った。

HサイトおよびP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、Hサイトで3.45mまでの8深度、Pサイトで1.54mまでの4深度である。

ボーリングによって採取した土石試料は凍結状態のまま研究室に持ち帰り、秤量した後凍土中の水が蒸発しないように採取した。含水率の少ない土試料からの水抽出には遠心分離機を使用した。質量分析計(Delta-V)によって $\pm 0.1\%$ の精度で採取した水の酸素安定同位体比を測定した。

②富士山頂

気温および雨量は、三脚上部(比高2m)に取り付けた複合気象測器(WXT520; Vaisala)によって、地表層0.3mの平均体積土壌水分は、ロッド長0.3mのTDR(Time Domain Reflectometry)センサー(CS616; Campbell)を地表面に垂直に刺すことによって測定した。積雪深は、白いビニールテープを巻いた支柱を地面に突き刺して固定し、サーミスタ温度計を0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5m高に固定し、その温度および地表温度の日変化を気温の日変化と比較して推定した。気

温の日変化の標準偏差値と地表および地上部温度の日変化の標準偏差値の差が 0.5°C 以上となった日にその深度までの積雪があったと判断した。

金明サイトにおける地温測定では、深度1.1mまで8深度はサーミスタセンサー

(104ET; 石塚電子), 1.1mより深い3.0mまで10深度はPt100センサー(昭和産業)を用いた。

金明サイトの雨量を除くすべての観測項目は、データロガー(CR1000; Campbell)によって30秒毎に計測し、10分間の統計値を記録した。雨量はイベント毎に感知され、10分積算値を記録した。

虎岩サイトでは、深度0.01mに小型温度ロガー(おんどとり Jr., TR51A; T&D), 0.2, 0.7, 1.1mに小型温度ロガー(おんどとり Jr., TR52S; T&D), 1.7, 2.2, 2.7, 3.0mにサーミスタセンサー(TMC50-TD)を設置して小型ロガー(HOBO/U12-008; Onset)で1時間毎の測定値を記録した。

地温センサーは、ケーブル同士を上記の測定深度間隔で固定したものを直径約5cmのボアホールに挿入した後、空隙埋めるように砂礫でボアホールの隙間を充填した。すべての地温センサーに関して、氷-水恒温槽にて 0.03°C の分解能(おんどとり Jr. は、 0.1°C)で検定を行った。

4. 研究成果

(1) 大雪山系山頂部

① 10m ボーリングと地温測定

大雪山系の山頂部では、活動層と永久凍土上層部の温度観測が継続されているが、永久凍土層の底面深度はわかっていない。活動層とは、永久凍土帯において季節的に凍結・融解を繰り返す地表層のことである。これまでに、物理探査によって永久凍土層の下限は8~9mと見積もられている。また、我々の4m地温観測からも10m程度掘ると永久凍土層下限深度の見通しがつくと考えられた。予算と技術的な問題から10mまでのボーリング実施となったが、山岳地温測定孔としては、日本で最深である。1年間の地温測定の結果、10m深でもなお、温度的に安定した永久凍土が存在することが判明した(図2)。1m深から最深部10mまでの年平均地温は、 -2.93°C から -1.78°C まで一様に増加した。調査地の年平均気温が -4°C 前後であることを考えると、長期的にはこの場所での永久凍土が成長中であると言える。また、10m深においては年温度変動幅が 0.5°C 以下となり、ほとんど変化しない。

8~10mの深い部分の地温プロファイルを外挿すると、永久凍土層は考えられていたよ

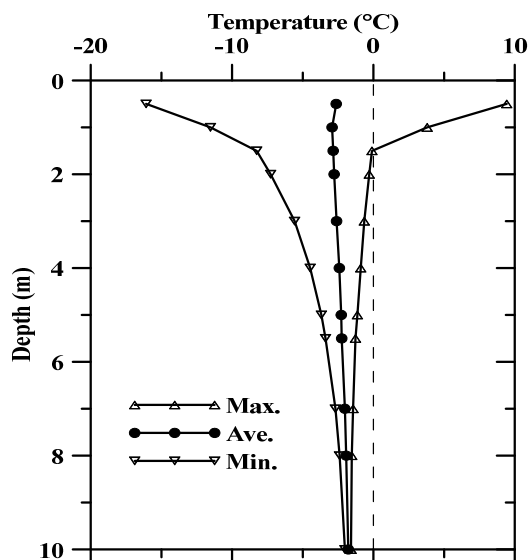


図2. Gサイト(五色岳サイト)における2009年10月15日から2010年9月14日までの10m地温プロファイル(Max.:最大値, Ave.:平均値, Min.:最小値).

りもさらに深く30~40mとなる可能性が示された。予測された深度よりも深部にわたり永久凍土層が存在する可能性が示されたが、本観測サイトは北半球の永久凍土分布南限に位置するため、近年の気候変動の影響でその消長が注目される。

② 長期観測から示された地中環境の変化

Gサイトでは、2005年の秋以降5年間にわたり、5m深までの活動層および永久凍土層上部の地温プロファイルを観測することができた。観測期間の5年間では、活動層厚が1.2~1.5mの変動幅を記録した。シベリアなどの永久凍土帯でシルト質土壌の場合の活動層厚変動幅に比べると0.2m程度大きな変動幅である。これは、本観測地の土壌が火山灰で構成され非常に透水性のよい活動層を形成しており、単純な熱伝導以外に融雪水や雨水の浸透による熱輸送によって活動層厚が影響を受けているためと考えられる。活動層厚が5年間で一意的な変化を見せず、変動したのに対して、永久凍土層の温度は徐々に温暖化傾向を示した。これは冬期に4m深の地温が-3°C以下となる期間が短くなっていることから明らかである。活動層厚およびその地温プロファイルの季節変化は、地表面の動植物の生態系に大きな影響を与えるため、表面植生調査等と地温変動のモニタリングと同時に継続することが今後の課題である。

大雪山系では、Gサイトの他に3箇所にて1.6~3.5mまでの地温変化を得ることに成功した。これまでの3~5年間の地温観測からは、2010年で最大融解深が最大となり深部の

永久凍土温度は昇温傾向を示した。この地温の温暖化傾向は、4調査サイトで共通していた。本研究により、大雪山系には2000mを超える山頂部だけでなく、比較的標高の低いPサイトにおいても永久凍土の存在が確認され、この山域に広範囲にわたって永久凍土が分布していることが示された。

山地山頂部としては、はじめて長期的な土壌水分プロファイルの連続データが得られた。Gサイトにおける1.2m深までの土壌水分変化は、2005~2009年までは、地表面の融解が始まる5月から融解深が0.6m程度となる6月にかけて0.2~0.6mの表層部分が30%を超える高含水率で維持される傾向を示し、7月以降は融解深の増加に伴って高含水層が活動層深部へと移動した。7月以降においても降雨イベントのたびに地表層まで高含水層となり、降雨後2~3日で再び0.5mより浅い層が乾燥化することが観測された。地表層の透水係数等の土壌物理係数データはまだ取得されていないが、透水性の高い物質で活動層が構成されているためと考えられる。2010年融解期の土壌水分プロファイルの変化は他の年と明らかに違い、観測期間を通じて1.2m深までの全層が35%から飽和状態に近い高含水率で推移した。この活動層の湿潤化は、後で示す2010年夏期の降水量の大きさに起因するものと考えられたが、こうした大きな土壌水分の変動やその周期が特異なものであるか否かを長期的に観測して判断する必要がある。

2010年の猛暑は山岳地にも大きな影響をもたらすことがわかった。2010年夏期シーズンは、北海道の山岳観測史上最高の気温と最大の降雨量を観測し、土壌水分は極めて高い状態に保たれたことが分かった。この変化は東シベリアで近年観測された永久凍土地帯の極端な土壌水分増加に似ている。東シベリアでは、土壌の水による飽和のためタイガ林が枯死する現象がみられたが、日本の山岳永久凍土帯においても今後の生態系への影響を監視することが重要となる。また、山岳地における降水量の変化は観測例が乏しいため未知である。これまでに取得された大雪山系のデータからは、2010年夏の値が観測史上最大となった。

2010年に観測した大きな融解深は、夏期降水量の多さの他に夏期の気温の高さも影響したものである。積算暖度と積算寒度はそれぞれ正の日平均気温、負の日平均気温の絶対値を融解期および凍結期について積算した値である。積算暖度は、気温による凍土融解に対する強制力の指標として用いられる。積算暖度は、2009年まで968~1121 degree-day°Cの値を示していたが、2010年の値は約30%も大きなdegree-day°Cであった。一方、2010年の積算寒度も観測を始めてから

最大となったが、夏期の気温の高さが継続した効果が上回り、凍土をこれまでで最も深く融解させたと考えられる。

③ 山岳凍土帯水循環の地球化学的調査

ボーリングコアを凍結状態で研究室に持ち帰り、体積含水率と氷の同位体比を深さ方向に分析した。代表的な凍土中体積含水率の深さ変化例として、GおよびKサイトの結果を図3左に示した。両サイト共に1.4m深付近で体積含水率がステップ状に増加する。この深度は活動層厚に相当し、季節的に凍結融解を繰り返す層と多年にわたり凍結したままの永久凍土層の境である。一方、図3右にはHサイトにおける酸素安定同位体比の深さ変化を示した。Hサイトにおいても活動層厚に相当する深度(1.3m)付近で酸素安定同位体比の値が活動層の -13‰ 程度の値から -25‰ 前後の値にまで数十cmの間に急激に低下することを発見した。さらに採取済みのボーリングコアの解析を進めて、上記の体積含水率および水同位体比の変化が調査した山岳永久凍土帯に広く当てはまる特徴であることを確かめる必要がある。永久凍土層の酸素安定同位体比の値が、積雪の値($-10\sim-20\text{‰}$)よりも低いことから、最終氷期の氷が保存されている可能性がある。今後、年代測定や層位学的な手法などを組み合わせて山岳永久凍土の過去の長期的変化を捉え、今後の変化の予測に役立てることが重要である。

また、本調査で判明した活動層及び永久凍土層上層部の地球化学的特徴は、東シベリアと同様であることが示された。つまり、シールド層と呼ばれる地下氷の大規模融解を遅らせる高含水率の層が1–2m深に存在し、この層以深で氷の同位体比が大きく変化することが示された。地下氷の酸素安定同位体比プロファイルの特徴を用いて地球化学的に

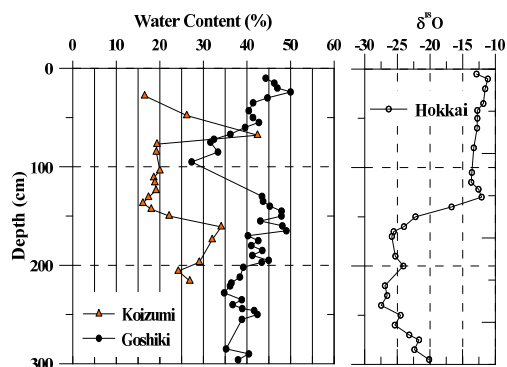


図3. GサイトとKサイトにおける体積土壌含水(氷)率プロファイル(左)とHサイトにおける酸素安定同位体比プロファイル。

山岳永久凍土の融解過程を捉えられる可能性がある。

(2) 富士山頂

富士山頂の2箇所約3mの測温孔を設置し、2年間の温度測定を実施した結果、永久凍土の存在は確認されなかった。調査地点は、気象条件に基づく既存の分類では永久凍土が連続的に存在すると判定されるにも関わらず、地温変動が大きく融解しやすい、特徴的な凍土環境におかれていると考えられる。

風衝地において地表面からの季節的な凍結深は深く、3m以深に達したが、激しい降雨の度に大きな地温上昇が記録され、2~3mの凍土も9月~10月以降の激しい降雨イベントによって完全に融解した。この層の凍結は以降数ヶ月も遅れた。降雨浸透がこの場所の地表層温度変化を決定する大きな要因である。

本調査において集中観測を行ったKサイトにおいては、永久凍土形成・維持の観点から以下のような環境にあると考えられる。冬の寒気は十分な地中冷却力を持ち、地表の冷却を妨げる積雪は春先まで少ない状態が続き、地中は強度に冷却される。夏期に地中温度を上昇させる大気強制力は弱い(比較的小さな融解指数)が、年間1000mmを超える降雨が透水性の高い地中を三次元的に浸透するために凍土は効率的に融解する。この融解層は中部日本特有な秋期の大雨イベントのためにさらに昇温し、地表面が凍り始めた後まで長く存在する。また、この時期に夏期には観測される深部の凍結層が完全に融解してしまう可能性がある。

富士山頂における凍土を含む地中の温度変化は年変動が激しく、凍土は熱的に不安定な状態であると考えられるため、現時点で利用できる情報では近年の気候変動による富士山頂の地中環境への影響を評価することは難しい。今後の富士山における地表層温度および凍土の長期的動態評価は、より深部にわたる長期間の連続的な多点の地中観測および地表面微気象の観測を拠り所にして行う必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① 岩花剛・池田敦・福井幸太郎・斉藤和之・末吉哲雄・原田鉱一郎・澤田結基, 2011: 富士山頂における3m深地温測定(2008-2010年)―永久凍土の存在確認と長期変化把握に向けて―. 雪氷, 73, 2, 119-131 (査読有)
- ② P. Y. Konstantinov・A. N. Fedorov・T. Machimura・G. Iwahana・H. Yabuki・Y. Iijima・F. Costard, 2011: Use of automated recorders (data loggers) in permafrost temperature monitoring (in Russian). Earth Cryosphere, 15, 1, 23-32. (in Russian; 査読有)
- ③ M. L. Lopez・T. Shirota・G. Iwahana・T. Koide・T. C. Maximov・M. Fukuda・H. Saito, 2010: Effect of increased rainfall on water dynamics of larch (*Larix cajanderi*) forest in permafrost regions, Russia: an irrigation experiment. Journal of Forest Research, 15, 6, 365-373. (査読有)
- ④ 池田敦・岩花剛, 2010: 富士山頂の凍土融解過程の検討. 地学雑誌, 119, 5, 917-923. (査読有)
- ⑤ 池田敦・岩花剛・田村亨・福井幸太郎・渡邊達也, 2010: 富士山の永久凍土―若手研究者による総合調査開始―. 富士学研究, 7, 1, 63-68. (査読無)
- ⑥ T. Koide・H. Saito・T. Shirota・G. Iwahana・M. L. Lopez・T. C. Maximov・S. Hasegawa・R. Hatano, 2010: Effects of changes in the soil environment associated with heavy precipitation on soil greenhouse gas fluxes in a Siberian larch forest near Yakutsk. Soil Science and Plant Nutrition, 56, 4, 645-662. (査読有)

[学会発表] (計4件)

- ① 末吉哲雄・池田敦・岩花剛, 50cm地温による永久凍土検出手法の数値モデルによる検証―富士山での永久凍土観測への適用のために―, 富士学会シンポジウム, 2010年10月16日, 静岡市・静岡
- ② 池田敦・岩花剛・末吉哲雄, 富士山の凍土環境―永久凍土は融けたのか? あるいはなかったのか?―, 富士学会シンポジウム, 2010年10月16日, 静岡市・静岡
- ③ T. Sueyoshi, A. Ikeda, G. Iwa

hana, Verification of 50cm-ground-temperature method for permafrost detection by idealized numerical experiments, international symposium on snow, ice and humanity in a changing climate, 21-25 June 2010, 札幌市, 北海道

- ④ Go Iwahana 他8名 (招待講演), Influence of increased rainfall on the hydrological and thermal conditions of the active layer in a larch forest, Yakutsk, 日本地球惑星科学連合2009年大会, 2009年5月21日, 幕張市・千葉

[その他]

ホームページ:

シベリアにおける永久凍土調査に関するアウトリーチ報告

<http://gcoe.ees.hokudai.ac.jp/orse/?cat=536>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩花 剛 (IWAHANA GO)

北海道大学・大学院地球環境科学研究所・特任助教

研究者番号: 70431327

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし