

学 位 論 文 題 名

Extra-zonal permafrost on block slope
in Shikaribetsu Mountains, Central Hokkaido, Japan

（北海道中央部，然別山地における局地的永久凍土）

学位論文内容の要旨

粗大な礫が堆積する斜面は岩塊斜面と呼ばれ、凍結破碎作用の卓越する中～高緯度の山岳地域に広く分布する地形である。岩塊斜面は永久凍土を維持しやすい特性を持ち、山岳永久凍土の分布に大きな影響を及ぼしている。岩塊斜面の永久凍土形成・保存プロセスとして、その空隙内部で移流による熱輸送の効果や、地下水の生成が生じることが指摘されてきた。しかし岩塊斜面における永久凍土の形成・保存プロセスはこれまでに解明されておらず、山岳永久凍土の分布モデル構築を進めるにあたって大きな問題となっている。

そこで本研究では、主に現地観測の結果に基づき、1. 岩塊斜面における永久凍土の形成維持機構 2. 永久凍土の分布とその支配要因を明らかにすることを目的とする。調査地域は大雪山系南部の然別山地である。

本論文は7章から成る。第1章では岩塊斜面における永久凍土の形成・保存プロセスに関するこれまでの研究を概観し、本研究の意義について述べ、第2章では、研究対象地域の概要を説明する。

第3章では、地温のモニタリングおよび積雪層構造の記載によって、岩塊斜面に生じる空気対流が Chimney effect と呼ばれる密度流であることを実証し、また積雪層の存在が空気対流の障害とならないことを示した。外気が氷点下に下がる冬季において相対的に暖かい斜面内部の空気は浮力によって上昇し、斜面最上部から放出される。そのため斜面中部～下部にかけて負圧が発生し、外気が補償流として地下空隙に侵入する。このとき雪も吸引されるため、積雪層の存在は空気対流の阻害要因にはならない。このような空気対流が持続するため、活動層は効率よく冷却されることが明らかになった。

ヨーロッパアルプスのボーリング調査などから、岩塊斜面の永久凍土層は非常に氷に富むことが知られており、この形成・保存プロセスが岩塊斜面の永久凍土の形成維持機構の本質であると考えられている。第4章では新しい観測手法を用いて、岩塊斜面の空隙を充填する地下水のモニタリングを行った。その結果、地下水は冬季の空気対流で冷却を受けた活動層に流入した融雪水の再結氷で成長し、秋の降雨イベントと同調して融解が生じることが明らかとなった。モニタリングを行った1年間では、地下水は+2.5cmの成長を示し

た。このような地下氷の収支が正の年が連続すると永久凍土は成長し、負では衰退すると考えられる。岩塊斜面の永久凍土は、地表面の熱収支で分布が決まる一般的な永久凍土とは形成維持機構が大きく異なることが、本研究によって初めて明らかになった。

第5章では、然別山地全域における永久凍土分布の支配要因を考察した。永久凍土の分布を明らかにするため、比抵抗映像法を用いた電気探査と永久凍土の指標植物 (*Sphagnum* spp.) のマッピングを行った。電気探査の結果、永久凍土層はいずれも斜面末端部や谷底に分布し、ミズゴケ群落と分布がほぼ一致することが明らかとなった。この調査によって、従来永久凍土の存在を示すとされたミズゴケ群落と永久凍土の一致が初めて確認された。然別山地のミズゴケ群落は、岩塊斜面の下部、および谷底に分布が集中する傾向が認められる。斜面下部や谷底は、融雪水や降水が流入する地形条件であり、岩塊層地下に伏流水の存在が推測される。第4章の結果より、岩塊斜面の地下氷は融雪水の再結氷によって成長することが明らかである。したがって岩塊斜面の永久凍土は、地下氷の形成に必要な融雪水の流路に沿って分布すると考えられる。すなわち、岩塊斜面では水文環境が永久凍土の分布を決定しているといえる。

第6章では、本研究で得られた成果をまとめ、結論を述べる。主な結論は以下の通りである。

- ・ 岩塊斜面における永久凍土の形成は、大きく2つのプロセスによって支配される。すなわち、1. 外気と斜面内部の温度差に起因する空気対流、 2. 融雪水の再結氷による地下氷の成長 である。
- ・ 岩塊斜面における永久凍土の分布は、融雪水の流入する斜面末端部および谷底に限定される。岩塊斜面の永久凍土は、地下氷の成長に必要な融雪水が供給される地下水の流路にそって分布すると考えられる。

学位論文審査の要旨

主査	教授	小野	有	五
副査	教授	平川	一	臣
副査	教授	福田	正	己
副査	教授	大畑	哲	夫
副査	助教授	渡邊	悌	二

学位論文題名

Extra-zonal permafrost on block slope in Shikaribetsu Mountains, Central Hokkaido, Japan

(北海道中央部，然別山地における局地的永久凍土)

山岳永久凍土の分布には、斜面方位、積雪や堆積物の粒径などのローカルな要因が複雑に関係している。したがって、気候変動にともなう山岳永久凍土分布の変化を理解するためには、その形成・保存プロセスの詳細を明らかにする必要がある。いっぽう山岳地域には、粗大な礫が堆積した岩塊斜面が広く分布している。岩塊斜面では外気の移流や高い含水率の凍土層が特徴的に生じることから、独特な永久凍土の保存プロセスがあると考えられている。しかし観測例が乏しいためそのプロセスは明らかになっておらず、分布モデル構築の上で大きな問題となっている。

申請者は、局地的永久凍土を有する岩塊斜面において行った地温・積雪・地下氷の3年間にわたる現地観測結果を基に、世界に先駆けて岩塊斜面に分布する永久凍土の保存プロセスを明らかにした。また電気比抵抗探査および植生調査の結果から、永久凍土分布の支配要因を明らかにした。これらの研究成果は以下に要約される。

積雪底地表面温度 (BTS) 観測、地温プロファイル観測および積雪調査の結果、岩塊斜面の最上部から温風を排出し、斜面の中～下部に分布する通気口から外気を吸引する空気対流の存在が見出された。この対流現象は、岩塊斜面の内部と外気の温度差によって生じる Chimney effect で説明される。冬季、外気よりも暖かい斜面内部の空気は浮力によって上昇し、斜面最上部から放出される。そのため斜面中部～下部にかけて負圧が発生し、外気が補償流として斜面地下の空隙に侵入する。このとき、補償流によって雪は局所的に吸引され、入気口が形成される。このため、積雪は空気対流の阻害要因にならないことが明らか

となった。

岩塊斜面の末端部にパイプを埋設し、その内部で生じる地下水の深さの変化を約1年間（2000.11～2001.11）モニタリングした。その結果、地下水は融雪期に急成長を示し、また地下水の融解は秋の降雨イベントと同調して生じた。約1年間のモニタリング終了時、地下水は前年の11月と比較して+2.0cmの増加であった。以上の観測事実から、岩塊斜面の越年地下水は、地下空隙に流入する融雪水および降水と永久凍土層の熱交換の結果として生じることが明らかになった。

永久凍土の分布を明らかにするため、比抵抗映像法による電気探査と指標植生（アカエゾマツ林床のミズゴケ類）のマッピングを行った。その結果、永久凍土は然別山地に分布する岩塊斜面の末端部や谷底に、広く分布することが示された。このような永久凍土の分布は、地下水の形成維持に関わる伏流水の存在に強く支配されていると説明できる。

以上の成果は、気候的な下限高度より低い標高に分布する局地的永久凍土の保存プロセスを明らかにするとともに、世界の山岳地域に広く分布する岩塊斜面・岩石氷河で報告されている移流や地下水の形成プロセスの解明にも貢献するものである。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院課程における業績や取得単位なども併せ申請者が博士（地球環境科学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。