

学 位 論 文 題 名

Solifluction processes controlled by formation and melting of ground ice

（地中氷の形成と融解に伴うソリフラクションプロセス）

学位論文内容の要旨

寒冷地域の山地斜面では、ソリフラクションと呼ばれる土砂移動が発生する。そのプロセス解明は、周氷河環境の理解だけでなく、斜面発達予測モデル構築に不可欠のため、地形学の主要な課題となってきた。従来の研究では、季節凍土中の地中氷形成がソリフラクションの発生に関わっており、とくにその融解にともなう土壌水分上昇がジェリフラクションによる流動現象をもたらすと指摘された。しかし地中氷の状態、およびその融解による環境変化を同時に観測した例はなく、したがってソリフラクションのプロセスは曖昧な点が多い。本研究では、ソリフラクションに対する地中氷の役割に注目し、(1)地中氷の状態を知ること、(2)地中氷の形成と融解はどのようなソリフラクションプロセスをもたらすかを把握すること、(3)地中氷の融解とジェリフラクションとの関係を簡潔に表すことを目的とする。

調査はスウェーデン・Kärkevagge 流域および北海道大雪山でおこなった。Kärkevagge では、二つのソリフラクションロウプ上に設定した 34 地点において、地中氷、凍土融解深、地下水位、および地表・地中の土砂移動を観測した。これらの観測は 2000 年の融解期に行った。そのうち 1 地点では、地中の土砂移動と地表面温度を 1998 年 8 月から 2000 年 6 月まで 1 時間ごとに連続測定した。一方大雪山では、旭岳周辺の 14 地点において、地中氷、凍土融解深、および地下水位を観測した。これらの観測は 1999 年の融解期に行った。そのうち 1 地点では、地中の土砂移動、地中の温度を 1996 年 8 月から 2001 年 6 月まで、および地表の凍上沈下を 1998 年 9 月から 2001 年 10 月まで 1 時間ごとに連続測定した。地中氷状態の観測は、両地域において凍土の融解開始前に 80cm 深まで凍土ボーリングを実施し、凍土サンプルを分析することで含水比、または氷の飽和度を求めた。また地中の土砂移動の連続測定にはひずみプローブを用い、1m 深までの移動状況を観測した。

調査研究の結果は以下のようにまとめられる。

(1)地中氷の状態

氷の量は、両地域とも地表付近で多く深部ほど少ない傾向が見られた。その中にいくつかの「氷に富む層」が形成されていた。氷に富む層では、氷の飽和度が 100%以上、すなわち過剰氷が形成され、凍土サンプルの直接観察によりアイスレンズの存在も確認できた。

(2)地中氷の形成・融解とソリフラクションプロセス

Kärkevagge では、凍土融解期に顕著な土砂移動が発生した。この移動は、弾性変形および塑性変形のメカニズムによるジェリフラクションであった。ジェリフラクションは融解期の初期のみ発生し、融解前線が深くなると、水分飽和が継続していたにも関わらず停止した。したがって、ジェリフラクションの発生には、飽和状態以外の要因があると考えられた。一方大雪山では、水分飽和はほとんど見られなかった。それにもかかわらず、ジェリフラクションが融解期初期に発

生した。したがって、やはりジェリフラクション発生に対して飽和状態以外の要因があると考えられた。そこで、大雪山における地中の土砂移動状況を、地温および地中氷状態と比較検討した。まずひずみプローブ観測により、凍結期に3回、融解期に3回のイベントが発生したことを捉えた。このうち凍結期のイベントは、いずれもその発生時に凍結前線が存在した深度が、氷に富む層の分布に対応していた。また融解期のイベントでも、その発生時における融解前線深度が、氷に富む層の分布に対応していた。これは、凍結期に地中氷が形成されることで凍上が発生し、融解期にその地中氷が溶けることでフロストクリープおよびジェリフラクションが発生したことを示す。氷に富む層の融解とジェリフラクションの発生が一致する関係は、Kärkevaggeにおいても観測された。以上よりジェリフラクションは、飽和層の有無に関わらず、地中氷の量に規定されることが確かめられた。ただし60cm以深では、氷に富む層の形成により凍上は起こったものの、その融解時にジェリフラクションは発生しなかった。これより、ジェリフラクションを誘発する地中氷は、浅部に形成されたものに限られることが分かった。

(3) 地中氷の融解とジェリフラクションとの関係

ジェリフラクションに対する地中氷の役割を一般化するため、PGI (Potential Gelifluction Index) を提唱する。PGI は、凍土の含水比からその土層の液性限界値を引いたもので、指数が正の場合には潜在的にジェリフラクションが発生しうる状態、負の場合には安定状態にあるといえる。その結果、PGI は多くの地点で、最上層よりもやや下部の層で大きな値を示した。これは、最上層が表面角礫層に相当することを反映している。また、PGI を実際の地中土砂移動状況と比較してみると、移動が発生した層の付近で PGI が大きな値を示すことが分かった。したがって、PGI はジェリフラクションの発生を説明しうるといえる。以上より、ジェリフラクションによる移動 (G) を規定する要因は、PGI, 斜面傾斜 (θ), および深さ (D) であり、 G はこれらの関数、すなわち $G=f(PGI, \theta, D)$ と表すことができる。

以上のように、凍土中に氷に富む層ができる場合、その層が形成される時に凍上が発生し、融解する時にフロストクリープとジェリフラクションが発生することを、野外観測により初めて直接捉えることに成功した。また地中氷の形成と融解がソリフラクションの発生に重要な役割を果たすことを明らかにし、ソリフラクションプロセスの一般化に大きく貢献する結果を得た。

学位論文審査の要旨

主査	教授	平川	一臣
副査	教授	杉本	敦子
副査	准教授	渡邊	悌二
副査	准教授	石川	守
副査	助教	澤柿	教伸
副査	教授	松岡	憲知 (筑波大学大学院 生命環境科学研究科)

学位論文題名

Solifluction processes controlled by formation and melting of ground ice

(地中氷の形成と融解に伴うソリフラクションプロセス)

寒冷地域の山地斜面では、ソリフラクションと呼ばれる土砂移動が発生する。そのプロセス解明は、周氷河環境の理解だけでなく、斜面発達の予測モデル構築に不可欠のため、地形学の主要な課題となってきた。従来の研究では、季節凍土中の地中氷形成がソリフラクションの発生に関わっており、とくにその融解にともなう土壌水分上昇がジェリフラクションによる流動現象をもたらすと指摘された。しかし地中氷の状態、およびその融解による環境変化を同時に観測した例はない。本研究では、(1)地中氷の状態を知ること、(2)地中氷の形成と融解はどのようなソリフラクションプロセスをもたらすかを把握すること、(3)地中氷の融解とジェリフラクションとの関係を簡潔に表すことが主要な課題であった。

調査はスウェーデン・Kärkevagge流域および北海道大雪山でおこなわれた。Kärkevaggeでは、34地点において地中氷、凍土融解深、地下水位、および地表・地中の土砂移動について2000年の融解期に観測が実施された。そのうち1地点では、地中の土砂移動、地表面温度について1998年8月から2000年6月まで1時間ごとに連続測定された。大雪山では、旭岳周辺の14地点において、地中氷、凍土融解深、および地下水位について1999年の融解期に観測が実施された。そのうち1地点では、地中の土砂移動、地中の温度について1996年8月から2001年6月まで、地表の凍上沈下について1998年9月から2001年10月まで1時間ごとに連続測定された。地中氷の状態については、両地域とも凍土の融解開始前に80cm深まで凍土ボーリングにより試料を採取して含氷比、氷の飽和度が求められた。さらに地中の土砂移動について、ひずみプローブによって1m深まで観測が実施された。

調査研究の結果

(1) 地中氷の状態

氷の量は、両地域とも地表付近で多く深部ほど少ない傾向が見られる。またいくつかの「氷に富む層」が形成されていた。氷に富む層では、氷の飽和度が100%以上、すなわち過剰氷が形成され、凍土サンプルの直接観察によりアイスレンズの存在も確認される。

(2) 地中氷の形成・融解とソリフラクションプロセス

Kärkevaggeでは、凍土融解期に顕著な土砂移動が発生した。この移動は、塑性変形およびフローのメカニズムによるジェリフラクションであった。ジェリフラクションは融解期の初期のみ発生し、融解前線が深くなると、水分飽和が継続していたにも関わらず停止した。したがって、ジェリフラクションの発生には、飽和状態以外の要因があると考えられた。一方大雪山では、水分飽和はほとんど見られなかった。それにもかかわらず、ジェリフラクションが融解期初期に発生した。したがって、やはりジェリフラクション発生に対して飽和状態以外の要因があると考えられた。大雪山における地中の土砂移動状況を、地温および地中氷状態と比較検討した結果、凍結期に3回、融解期に3回のイベントが発生したことがひずみプローブ観測から捉えられた。このうち凍結期のイベントは、いずれもその発生時に凍結前線が存在した深度が、「氷に富む層」の分布に対応していた。また融解期のイベントでも、その発生時における融解前線深度が「氷に富む層」の分布に対応していた。これは、凍結期に地中氷が形成されることで凍上が発生し、融解期にその地中氷が溶けることでフロストクリープおよびジェリフラクションが発生したことを示す。「氷に富む層」の融解とジェリフラクションの発生が一致する関係は、Kärkevaggeにおいても観測された。以上よりジェリフラクションは、飽和層の有無に関わらず、地中氷の量に規定されることが確かめられた。ただし60cm以深では、「氷に富む層」の形成により凍上は起こったものの、その融解時にジェリフラクションは発生しなかった。これより、ジェリフラクションを誘発する地中氷は、浅部に形成されたものに限られることが明らかにされた。

(3) 地中氷の融解とジェリフラクションとの関係

ジェリフラクションに対する地中氷の役割を一般化するため、PGI (Potential Gelifluction Index) が提唱された。PGIは、凍土の含氷比からその土層の液性限界値を引いたもので、指数が正の場合には潜在的にジェリフラクションが発生しうる状態、負の場合には安定状態にあることを意味する。PGIは多くの地点で、最上層よりもやや下部の層で大きな値を示した。すなわち最上層が表面角礫層に相当することを反映している。また、PGIを実際の地中土砂移動状況と比較してみると、移動が発生した層の付近で大きな値を示す。したがって、PGIはジェリフラクションの発生を説明しうるといえる。以上より、ジェリフラクションによる移動 (G) を規定する要因は、PGI、斜面傾斜 (θ)、および深さ (D) であり、 G はこれらの関数、すなわち $G = f(\text{PGI}, \theta, D)$ と表すことができる。

以上のように、凍土中に「氷に富む層」ができる場合、その形成時に凍上が発生し、融解時にフロストクリープとジェリフラクションが発生することを、野外観測により初めて直接捉えることに成功した。また地中氷の形成と融解がソリフラクションの発生に重要な役割を果たすことを明らかにし、ソリフラクションプロセスの一般化に大きく貢献する結果を得た。

以上のとおり、申請者は寒冷気候環境下の土砂移動について新知見を得たものであり、凍土学、周氷河地形学ならび第四紀学の発展に貢献するところ大である。
よって、申請者は博士（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。