

学 位 論 文 題 名

A Geomorphic Study of Permafrost in the Nepal Himalaya

（ネパール・ヒマラヤの永久凍土に関する地形学的研究）

学位論文内容の要旨

Permafrost in Nepal has received very little scientific attention, despite the fact that Nepal is a country known for the Himalaya: even its distribution has not been clarified yet. This study deals with the distribution of rock glaciers and permafrost in five high Himal areas of the Nepal Himalaya: Kangchenjunga, Khumbu, Langtang, Annapurna, and Sisne.

Permafrost is an invisible phenomenon and its distribution is difficult to identify. Therefore, an indicator landform of rock glacier was used for aerial photograph interpretation to identify the present distribution of permafrost in five areas. Field observations were also made in order to check the rock glaciers in three areas of Kangchenjunga, Khumbu, and Langtang. First, rock glaciers of periglacial origin and glacial-origin were both mapped; and then size, altitude, and aspect of each of the rock glaciers only of periglacial origin were analyzed by GIS. The results show that: (1) the size of the rock glaciers tends to decrease from the east (Kangchenjunga) to the west (Sisne); (2) the mean altitude of the rock glaciers decreases towards the west; and (3) the aspects of the rock glaciers are variable, but southerly directions are most common.

Intensive field surveys were carried out at three sites in Langtang Himal (Yala, Gangja La and Helambu) to examine the relationship between permafrost distribution and geomorphological arrangement. Altogether, 140 seismic surveys, 9 ground temperature profile measurements, and 48 BTS (Bottom Temperature of Snow) surveys were conducted. The results obtained from each method were then crosschecked to minimize potential errors. The combined results from the three methods show that (1) the altitudes of the lower limit of the permafrost lie at 4,740 m at Yala site, at 4,820 m at Gangja La site, and at 4,670 m at Helambu site; (2) permafrost occurs in areas adjacent to rockwalls and in moraine areas where the glaciers have been retreating rapidly; and (3) the permafrost areas lie within the horizontal distance of about 300 m from the base of the rockwalls, whereas they lie within the distance of about 700 m from the glacier termini.

The foregoing results on the relationship between the permafrost area and debris-accumulated areas suggest a possibility that the permafrost development is strongly related to the debris supply, such as rockfall. Rockfall activities and exposed bedrock thermal regime were,

therefore, monitored and evaluated at altitudes between 4,600 m and 6,000 m in Kangchenjunga Himal. Effective freeze-thaw cycles were first calculated from measured rockwall temperatures at different altitudes, and then, the exposed rockwall area was analyzed by GIS. The results show that: (1) the south-facing rockwall experiences frequent diurnal freeze-thaw cycles, while the north-facing rockwall is characterized by seasonal freeze-thaw cycles; (2) the south-facing rockwall has greater number and amount of rockfall than the north-facing rockwall has; and (3) the altitudinal belt responsible for the rockfall activities ranges from 5,400 m to 6,000 m on the south-facing rockwalls, and from 5,000 m to 5,600 m on the north-facing rockwalls.

Finally, factors responsible for deciding the size, altitude, and aspect of the rock glaciers in the Nepal Himalaya were discussed focusing mainly on the debris supply regimes from the adjacent rockwalls. Summer precipitation water experiences freezing and thawing to expand cracks of the rockwall surface, so that more rockfall debris is produced; therefore, the concurrence of the effective freeze-thaw cycles and the large exposed rockwall area, especially of southerly directions, was considered as the major controlling factor for the development of the permafrost including rock glaciers.

学位論文審査の要旨

主 査 助 教 授 渡 辺 悌 二
副 査 教 授 平 川 一 臣
副 査 教 授 小 野 有 五
副 査 助 教 授 白 岩 孝 行

学 位 論 文 題 名

A Geomorphic Study of Permafrost in the Nepal Himalaya

(ネパール・ヒマラヤの永久凍土に関する地形学的研究)

ヒマラヤを含めた世界の山岳地域の永久凍土は、温暖化の進行による融解を受けており、災害発生や高山植物の生存への影響などの観点から、世界の研究者の大きな関心を集めている。しかし、ヒマラヤの永久凍土に関しては、50 cm 深の地温測定や、数地点での地震探査などに基づく、きわめて限定された研究がわずかな地点で行われているにすぎない。

申請者は、これまで山岳永久凍土や岩石氷河についての知見がほとんどなかったネパール・ヒマラヤの5つの地域において、空中写真判読と現地調査から、永久凍土の分布と形成条件を明らかにした。この研究成果は以下に要約される。

まず、ネパール・ヒマラヤを代表する東西の5つの地域（カンチェンジュンガ・ヒマール、クンプ・ヒマール、ランタン・ヒマール、アンナプルナ・ヒマール、シスネ・ヒマール）について、膨大な枚数の空中写真を判読して、氷河起源および周氷河起源の岩石氷河の分布を明らかにした。その結果、降水量が多いカンチェンジュンガ・ヒマールおよびクンプ・ヒマールでは氷河性・周氷河性の岩石氷河が出現するのに対して、より乾燥した西部の3地域では周氷河性の岩石氷河のみが分布していることが明らかになった。永久凍土の指標地形である周氷河性の岩石氷河に着目して、GISを用いて、個々の岩石氷河の面積、標高、方位を解析して、東西地域におけるこれらの差異を明らかにした。その結果、(1)面積は、ネパール・ヒマラヤ東部から西部に向かって小さくなること、(2)出現平均高度は、東部から西部に向かって低下すること、(3)分布方位にはばらつきがあるが、南向き斜面に多く存在すること、の3点が明らかになった。

次に、ランタン地域内の3つのサイト（ヤラ、ガンジャラ、ヘランプ）において、岩石氷河を含めた永久凍土の詳細な分布と周辺地形との関係について現地調査を行った。140地点で地震探査を、9地点で地温プロファイル測定を、48地点でBTS (Basal Temperature of Snow) 測定を実施した。これらのデータを総合した結果、永久凍土は、岩壁基部の巨礫堆積域および急速に後退し続けているアイスキャップ型氷河前面のモレーンに集中的にみられることが明らかになり、これらの永久凍土の水平方向の広がり、岩壁基部から約300 m、あるいは氷河末端から約700 mの範囲に限定されていることが明らかになった。ここでは、複数の手法を併用したことで、永久凍土分布の推定精度をあげることに成功した。

次に、ランタン・ヒマールにおける上記の永久凍土分布域と巨礫堆積域との対応関係から、永久凍土の発達には巨礫供給（落石）が関与していると考え、カンチェンジュンガ地域において岩壁の凍結破砕の定量化を行い、岩石氷河の形成にもっとも重要な岩屑（巨礫）

の生産が、凍結融解サイクル数の卓越する南向きの岩壁で大きいこと、それには夏のモンスーンによる岩壁への水分供給が重要な働きをしていると考えられること、凍結破碎にはもっとも適した高度帯があり、その高度が標高5,400～6,000 mであることを明らかにした。

最後に、これらを総合して、ネパール・ヒマラヤにおける永久凍土の発達は、夏のモンスーン期の降水量が大きく、凍結破碎の頻度が大きな高度帯に一致して岩壁が広く分布する東ネパール（カンチェンジュンガおよびクンプ・ヒマール）でより強化され、夏の降水量が小さく岩壁の分布高度が凍結破碎帯よりも低所に集中する西ネパール（シスネ・ヒマール）で弱くなることを指摘した。

以上の成果は、永久凍土の分布に関する国際的な研究ネットワークに対して、これまでデータの空白域であったネパール・ヒマラヤにおける永久凍土分布の情報を提供できる点で大きな貢献をなすものであり、また、これまで遅れがちであった地形学的な視点からの永久凍土研究分野の進展にとって重要な貢献をなすものである。さらには、温暖化による永久凍土融解が引き起こす災害軽減・防止のための基礎資料を提示した点でも大きな貢献をなす。

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。