

別紙 4

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目     ブータン・ヒマラヤにおける氷河分布および  
                   岩屑被覆域形成に対する気候と地形の影響

氏       名     永井 裕人

## 論 文 内 容 の 要 旨

ヒマラヤ氷河の変動は、海水準上昇の予測・内陸乾燥域における水資源管理・氷河湖決壊洪水対策などの観点から注目が高まっている。ヒマラヤ山脈では東西にわたって氷河の不均一な縮小が観測されており、インド・モンスーン気候の影響を受けやすいブータン・ヒマラヤの氷河では、気候変動に特に敏感であるという傾向が指摘されている。これまでの研究では氷河変動を把握するために氷河平衡線高度（ELA）が測定されてきた。しかしその地域代表性や特定の範囲におけるばらつきを解釈する際には、周辺斜面からの雪崩による涵養や氷河表面を覆う岩屑の有無による影響が定量解析されてこなかった。また氷河質量収支に大きな影響を与える岩屑被覆域の面積や形状を左右する要因についても明らかにされてこなかった。これらは雪崩や岩屑の供給源となる氷河周辺斜面および岩屑被覆域の空間解析が十分になされてこなかったことが原因である。そこで本研究では、ブータン・ヒマラヤの氷河について、高精細パナクロマチック衛星画像と数値標高モデルを用いて周辺斜面・岩屑被覆域付き氷河台帳を作成し、降水量と氷河周辺斜面の差異が氷河の標高分布と岩屑被覆の形成に与える影響を解析・議論した。

陸域観測衛星 ALOS に搭載された PRISM センサによって取得されたパナクロマチック画像（分解能 2.5 m）と数値標高モデル ASTER GDEM（1 画素 30 m 四方）によって得られた等高線を用いた目視判読と手動抽出によって、ブータン・ヒマラヤに分布する氷河 1579 個の氷河台帳を作成した。この台帳には氷河に雪崩や岩屑を供給しうる周辺斜面の輪郭と岩屑被覆域の輪郭も付属している。岩屑被覆氷河 213 個と岩屑被覆なし氷河 1366 個に分類すると、前者の方が総面積・平均面積が大きく個数が少なかった。氷河周辺斜面については、岩屑被覆氷河のものが岩屑被覆なし氷河のものに比べて総面積・平均面積が大きく、平均斜度が急であることがわかった。これは氷河周辺斜面が岩屑の供給源として岩屑被覆の有無に寄与していることを示唆する。また、氷河すべての存在する標高幅は岩屑被覆氷河の方が大きく 4000 m から 7500 m に達するが、氷河面積が最大となる標高は岩屑の有無によらず 5400 m であり、中央標高（氷河面積を二等分するような標高）の分布にも有意差は見られなかった。一方、氷河末端について個別の標高分布を比較すると、最高標高が高くなるほど末端までの標高差は大きくなり、この傾向は岩屑被覆氷河で顕著に

表れた。結果として、岩屑被覆氷河の末端は最高標高にかかわらず顕著に低いという傾向が得られた。

このような氷河の岩屑被覆、周辺斜面、標高分布の関係を理解するためには氷河を涵養する降水量の差異を把握することが重要である。そこで氷河の中央標高を ELA の代替として、熱帯降雨観測衛星 TRMM によって得られた年間平均降水量の空間分布と比較した。解析の結果、降水が多い地域ほど氷河の中央標高が低くなる傾向が得られた。これは周辺斜面が存在せず雪崩供給と岩屑被覆の影響を受けない氷河でも同様であった。この結果は、気温差の無視できるような狭い領域において、降水量の差異が ELA の主たる支配要因となっていることを示す。

さらに、同等の降水量で涵養されると思われる氷河の中央標高を比較すると、氷河面積に対して氷河周辺斜面面積が相対的に大きな氷河ほど、低い中央標高を持つことが分かった。そして氷河周辺斜面を氷河の一部と見なして中央標高を算出すると、この傾向は無くなった。これにより氷河周辺斜面は氷河を涵養させる役割を持ち、そのような斜面に多く囲まれた氷河ほど、低く温暖な環境にまで存在できることが明らかになった。この関係は岩屑被覆なし氷河では方位によらず斜度  $30\text{-}40^\circ$  の氷河周辺斜面で最も強くみられ、斜度別の面積分布や雪崩の頻度分布とも整合的であった。これは周囲からの雪崩涵養の卓越するような氷河であるほど、中央標高が低くなることを意味する。一方の岩屑被覆氷河では斜度  $60^\circ$  以上・南南西向き氷河周辺斜面で最も強くみられた。これは岩屑なし氷河とは明らかに異なる傾向であり、岩屑被覆との何らかの関係が示唆される。そこで、岩屑被覆氷河について岩屑被覆域と氷河周辺斜面の面積を比較したところ、岩屑被覆域と斜度約  $60^\circ$  ・南西向き氷河周辺斜面との間に最も顕著な正の相関が認められた。これは南西向き急斜面から最も多くの岩屑が供給されることを示唆する。このように南西向き急斜面を多く有するほど岩屑被覆氷河の中央標高が低くなり、かつ岩屑被覆面積が大きくなるということは、岩屑被覆による断熱効果と雪崩供給による卓越した涵養の両方が低標高に末端を有する大型の岩屑被覆氷河発達に寄与していることを示す。

このように氷河の標高分布にも影響を与える岩屑被覆域について、その形状と氷河流動方向との関係を比較した。すると、北向き氷河には細長い岩屑被覆域が多く見られるが、南向き氷河のそれは氷河消耗域全体を覆っていた。この違いは岩屑供給の卓越する南向き氷河周辺斜面の氷河に対する位置関係によって説明することができる。また ASTER 熱赤外センサを用いて冬季の昼夜の地表温度を測定すると、南向き斜面では凍結融解を伴う大きな温度変化があるのに対して、北向き斜面では凍結し続けている部分が多かった。これは日周期の凍結破砕作用が南向き斜面で特に卓越して生じていることを示す。一方、年周期の凍結破砕作用や永久凍土の融解、雪崩は岩屑被覆域の面積・形状との関係性が見られないことから、岩屑供給には大きく寄与していないと考えられる。

以上の通り、降水量と氷河周辺斜面は、氷河標高分布や岩屑被覆域の形成に大きな影響を与えるため、特にヒマラヤなどの山岳氷河の変動を理解する上で十分に考慮されるべきものであることが分かった。今後は降水の季節パターンや緯度の異なる他の地域でも同様の解析を行い比較検討することで、地理的環境が氷河変動に与える影響の理解が更に進むものと期待される。