

## 別紙 4

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 ヒマラヤ地域における高解像度航空写真測量データを用いたデブリ氷河変動過程に関する研究

(A study on fluctuation process of Himalayan debris-covered glaciers with high-resolution aerial photogrammetry)

氏 名 佐藤 洋太

## 論 文 内 容 の 要 旨

アジア高山域の氷河は近年数十年の間に縮小傾向にある。同地域には下流部が岩屑（デブリ）に覆われた、「デブリ氷河」が多く分布しているが、このデブリ氷河は表面状態が不均一で複雑な変動過程を示すことが知られている。デブリ氷河の挙動はその特徴的な地形に起因するものとされてきたが、微細な地形の変化や短期間の変動を検出・解析するためには高解像度かつ高精度のリモートセンシングデータが必要不可欠である。

本研究ではヒマラヤ地域のデブリ氷河を対象に、無人航空機（UAV）・ヘリコプター・飛行機を用いた高解像度航空写真測量データの取得・解析を通して、（1）氷河上の氷壁（ice cliff）がデブリ氷河の衰退に与える影響、（2）デブリ氷河の末端に形成される氷河湖（proglacial lake）が氷河の動態に与える影響、というデブリ氷河に特有な二種類の地形の影響の解明に取り組んだ。

論文前半ではネパール・ヒマラヤのデブリ氷河を対象に、氷河上に形成される氷壁のダイナミクスと融解量の推定に取り組んだ。デブリ氷河上に形成される氷壁と呼ばれる微地形は局所的に氷河の質量損失を促進する可能性がある。そこで、氷壁の空間分布特性とその形態的特徴、そして氷壁のダイナミクス（形成・存続・消滅の過程）を解明するため、ネパール・ヒマラヤ Trakarding 氷河を対象に 2007 年、2018 年、2019 年の 3 時期のポストモンスーン期に取得した高解像度航空写真測量データの解析を行った。2018 年と 2019 年の高解像度地形データからは氷壁インベントリ（氷壁のマップ）を作成した。その結果、氷壁はデブリ域の面積のそれぞれ 5～6%を占めていること、氷壁が密に分布している領域では比較的大きな表面標高低下（ $>2.0 \text{ m a}^{-1}$ ）が生じていることが明らかとなった。また、2018 年から 2019 年にかけて氷壁の存続・形成・消滅を追跡したところ、

全氷壁面積の約 15%が新たな氷壁に置き換わっていることを見出した。そして、氷河の流動が停滞する中流部では、氷河表面の水路と氷河内の水脈の分布と一致して、多くの氷壁が新たに形成されていることが明らかとなった。本研究はデブリ氷河全域を対象に氷壁の形成場所とその数、氷壁の形成要因の解明に取り組んだ初めての研究である。

また、前述の高解像度地形データと現地観測によって得られた気象データとデブリの温度データを組み合わせ、熱収支モデルを通して 2018-2019 年の一年間を対象とした氷壁融解量の推定に取り組んだ。その結果、通年かつ氷河全体の毎時間の氷壁融解量を 1.0 m という高分解能で初めて推定することに成功した。熱収支モデルの計算により、氷壁の融解量は一年間を通して 5 月と 6 月に最大となり（各月全体の 15%）、全体の氷壁融解量の 55%は北向きの氷壁群で生じていることが推定された。また、氷壁の融解速度は標高よりも氷壁の方位に依存し、南向きの氷壁が最も速く融解することがわかった（ $\sim 0.035 \text{ m w.e. day}^{-1}$ ）。そして、氷壁の融解速度はデブリで覆われた氷河表面の約 8 倍であり、氷壁の専有面積は氷河系全体のわずか 0.5 %であるのに対し、氷河系全体の約 5%の質量損失が氷壁において発生していることが明らかとなった。

論文後半ではヘリコプターによる写真測量データを用いて、末端氷河湖の形成と、それに伴う氷河ダイナミクスの変化の解明に取り組んだ。アジア高山域では、末端氷河湖が急速に増加し拡大しているが、ヒマラヤ地域では末端氷河湖と氷河の相互作用は未だに未解明の知見が多く残っている。そこで、航空写真測量と GPS 測量データを用いて、2000 年から 2018 年にかけてのブータン・ヒマラヤ、ルナナ地域の Thorthormi 氷河と Lugge 氷河を対象に、表面標高変化、表面流動速度、氷河湖の拡大速度についての解析を行った。湖末端氷河である Lugge 氷河の氷河湖拡大率や表面低下率、表面流速場は 2000 年以降ほぼ一定に保たれていた。一方で Thorthormi 氷河では陸末端氷河から湖末端氷河へ変化した 2011 年以降、末端氷河湖の拡大が加速し、表面標高低下速度が 2 倍に増加し、表面流速も大幅に増加（ $>150 \text{ m a}^{-1}$ ）していることが明らかになった。これは湖の形成と Thorthormi 氷河における陸末端型氷河から湖末端型氷河への移行が、浮上速度の正（圧縮）から負（伸長）への変化を引き起こし、氷河の急激な流速増加と標高低下が生じたと考えられる。本研究は、ヒマラヤ地域において末端氷河湖形成に伴う氷河のダイナミクスの変化を初めて報告した例である。

本研究は高標高域のデブリ氷河のデブリ域全域を対象とした高解像度航空写真測量データを取得した数少ない研究事例であり、デブリ氷河地形とデブリ氷河変動過程への新たな理解をもたらし、その影響の定量化を試みた点で重要である。今後、同地域において、航空写真測量や現地観測によるさらなる長期観測を続けることで、より一層デブリ氷河地形とその変動過程への理解が進むことが期待される。