

## 論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

氏 名 佐藤 洋太

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)

### 論文審査担当者

主 査 名古屋大学大学院環境学研究科 藤田 耕史 教授

副 査 名古屋大学宇宙地球環境研究所 檜山 哲哉 教授

副 査 名古屋大学大学院環境学研究科 坂井 亜規子 准教授

## 論文審査の結果の要旨

本研究は、ヒマラヤ地域に多く見られる岩屑被覆氷河（デブリ氷河）を対象に、無人航空機（UAV）・ヘリコプター・航空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）氷河上の微地形（氷壁）がデブリ氷河の融解消耗に与える影響、（2）デブリ氷河の末端に形成される氷河湖が氷河の動態に与える影響を明らかにしたものである。

ヒマラヤ地域においては下流部が岩屑（デブリ）に覆われた「デブリ氷河」が多く分布しており、全体としてデブリは氷の融解を抑制していると考えられている。一方で、デブリ域の表面起伏は極めて複雑で、傾斜が急なためにデブリに覆われていない氷壁や窪地に形成される池において吸収されるエネルギー（主に放射エネルギー）が氷の融解を促進し、デブリ氷河がデブリに覆われていない氷河と同程度の質量損失を示す原因と考えられている。これらの知見は、実験や個別の氷壁や池を対象とした観測によるものであり、デブリ域全体の氷河変動を高解像度で検出する取り組みは、衛星データの解像度、精度の制約によりこれまで限られていた。

そこで本研究の前半では、ネパールヒマラヤのデブリ氷河上に形成される氷壁の分布とその変動をとらえ、氷壁における融解量の推定に取り組んだ。ネパールヒマラヤのトラカルディン氷河を対象に、2007年（航空機）、2018年（ヘリコプター）、2019年（UAV）に航空写真測量を実施し、高解像度（0.5 m～2 m）の幾何補正画像およびデジタル標高データを作成した。2018年と2019年の高解像度データから氷壁を手動抽出してインベントリを作成し、氷河の表面低下の分布と比較するとともに、氷壁の存続・形成・消滅を追跡した。その結果、氷壁はデブリ域の面積の5～6%を占め、氷壁が密に分布している領域で顕著な表面低下（ $> 2 \text{ m a}^{-1}$ ）が生じていることが明らかとなった。また、2018年から2019年にかけて全氷壁面積の約15%が新たな氷壁に置き換わっており、特に氷河の流動が停滞する中流部で新たな氷壁が形成されていることを見出した。更に、氷壁の方位と傾斜を考慮する熱収支モデルを全氷壁に適用し、2018～2019年の一年間の氷壁融解量を推定した。その結果、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、氷壁の融解速度は標高よりも氷壁の方位に依存することを明らかにした。

本研究の後半では、GPS測量データ、航空写真測量データおよび衛星データを用いて、デブリ氷河の末端に形成される氷河湖と氷河の相互作用の解明に取り組んだ。ブータンヒマラヤ、ルナナ地域のトルトミ氷河とルゲ氷河を対象に、2000年から2018年にかけての表面標高変化、表面流速変化、氷河湖の拡大速度についての解析を行った。1960年代から末端に氷河湖を有しているルゲ氷河の氷河湖拡大率や表面低下速度、表面流速は2000年以降ほぼ一定であった一方、氷河上の池が集合して氷河湖が形成されつつあったトルトミ氷河では、2011年以降、氷河湖拡大速度の加速、表面低下速度の倍増、表面流速の大幅な加速（ $> 150 \text{ m a}^{-1}$ ）が明らかになっ

た。この急激な変化は、氷河湖の形成に伴ってトルトミ氷河の末端が陸終端型から湖終端型へ移行することで、氷河の流動場が圧縮から伸長へ変化し、氷河の急激な表面低下と流動加速が生じる正のフィードバックによるものと考えられる。これまで、氷河湖を有する氷河と有しない氷河の対比によって予想されていた氷河湖と氷河の相互作用が、単一の氷河・氷河湖システムにおいて短期間のうちに生じたことをヒマラヤ地域で初めて確認した事例である。

本研究は、ヒマラヤのデブリ氷河の融解変動過程について、衛星データと現地観測のギャップを高解像な航空写真測量によって埋める先駆的な研究であり、デブリ氷河の地形および氷河湖形成と氷河変動過程へ新たな理解をもたらすとともに、その影響の定量化を試みた点で重要である。よって本論文の提出者 佐藤洋太氏は、博士(理学)の学位を授与される資格があるものと判定した。