

# 空撮斜め写真を用いたネパールヒマラヤ・クンプ地域における 近年の氷河変動

藤田耕史\*、佐藤洋太\*、井上公\*\*、坂井亜規子\*、砂子宗次朗\*、杉田暁\*\*\*、福井弘道\*\*\*

\*名古屋大学大学院環境学研究科、\*\*国立研究開発法人防災科学技術研究所、\*\*\*中部大学国際 GIS センター

## 1. はじめに

気候変動に伴うヒマラヤ地域の氷河変動を把握することは、全球の海水準上昇に対する氷河縮小の寄与を見積もる上で重要である他、将来にわたる人口増加が見込まれているインド平原における水資源管理の観点からも重要である。これまでに数多くおこなわれている衛星データによる数値標高モデルを利用した研究では、空間分解能が高くても 10 m 程度であり、氷河上の詳細な融解過程を把握するには十分でなかったが、近年利用が進む、小型無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicles: UAV) による空撮と Structure from Motion (SfM) 技術を用いた画像解析により、1 m 未満の高空間分解能での氷河変動の研究が可能になりつつある(文献:1)。

本研究では、名古屋大学大学院環境学研究科の雪氷圏変動研究室が所蔵する 2007 年に撮影されたネパールヒマラヤ・クンプ地域の空撮写真に加え、2016 年に中部大学国際 GIS センターが同地域で実施した空撮写真を SfM 処理することで、近年の氷河変動を 1 m 以下の高空間分解能で明らかにすることを目的とした。さらに、ヒマラヤにおける氷河変動の見積もりにおいて大きな不確実性をもたらしている、岩屑(デブリ)被覆氷河の融解過程を明らかにするために、2017~2018 にかけてロールワリン地域のトラカルディン氷河を対象に、UAV およびヘリコプターを利用した空撮を実施し、デブリ氷河の融解に大きく寄与していると指摘されている(文献:2)氷壁の分布と氷河低下速度の関係について詳細な解析をおこなった。

## 2. 方法

空撮斜め写真から SfM ソフトウェアによって処理された 3D モデルに位置情報を付与するために、2017 年 4~5 月に干涉測位 GPS を用いた現地観測を実施し、80 点以上の基点 (Ground Control Points: GCPs) の位置座標を計測してある。これらの情報を元に SfM ソフトウェアにて 2007 年の空撮写真からオルソ画像と数値標高データ (Digital Elevation Models: DEMs) を作成した。

トラカルディン氷河のデブリ域を対象に、2017 年 10 月に固定翼 UAV、Sky Walker X-5 (Hobby King 社) を用いた空撮を実施した。また、2018 年 10 月に同氷河にてヘリコプターによる空撮を実施し、それぞれの空撮写真について Agisoft 社の PhotoScan により SfM 処理をおこなった。さらに、SfM 処理により作成したオルソ画像(解像度 0.2m)から、氷壁をマニュアル抽出した(図 1)。

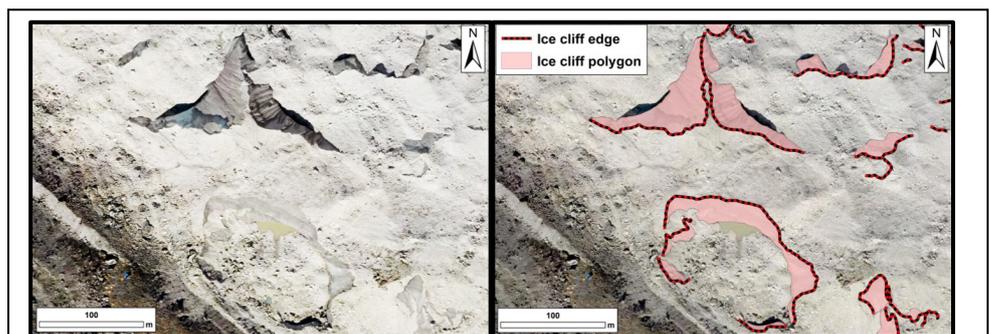


図1 UAV 空撮と SfM 処理により得られた解像度 0.2m のオルソ画像(左図)とそこから抽出した氷壁の例(右図)。赤太線は氷壁のリッジライン、ピンクハッチは氷壁の面ポリゴン。

## 3. 結果

GPS 観測によって得られた測点を Inverse Distance Weighting (IDW)法により解像度を揃えた DEM にし、その値を真値と仮定して空撮写真から得られた DEM と比較、誤差を求めたところ、標準偏差にして 2.51~1.82m という結果が得られた。一般に、人工衛星のステレオ画像から作成される DEM の誤差は 15~20m 程度であることから(文献:3)、本研究の手法が氷河表面の詳細な地形変化をとらえるのに有効であることは明らかである。

図2に2007年、2017年、2018年のDEMの差分から得られた、過去10年間(2007~2017)と1年間(2017~2018)の氷河表面の低下速度の分布を示す。それぞれの期間における平均低下速度はそれぞれ  $-1.94 \text{ m a}^{-1}$ 、 $+1.47 \text{ m a}^{-1}$ であった。

抽出された氷壁はそれぞれの年で約500であった。抽出した氷壁リッジラインから得られる氷河単位面積あたりの「長さ密度」は  $7.9 \times 10^{-3} \text{ m m}^{-2}$ となり、先行研究(文献:4)で

示されている近傍地域における値の最大値( $7.4 \times 10^{-3} \text{ m m}^{-2}$ )と同程度であり、トラカルディン氷河のデブリ域は氷壁が多いことが示された。また、氷壁ポリゴンを元に氷壁の方位を求めたところ、北西向きの氷壁が卓越していることがわかった。ヒマラヤの他地域における先行研究において、氷壁の向きは氷河の流動方向にかかわらず北向きに偏ることが指摘されており(文献:2,4)、先行研究の主張を裏付ける結果が得られた。

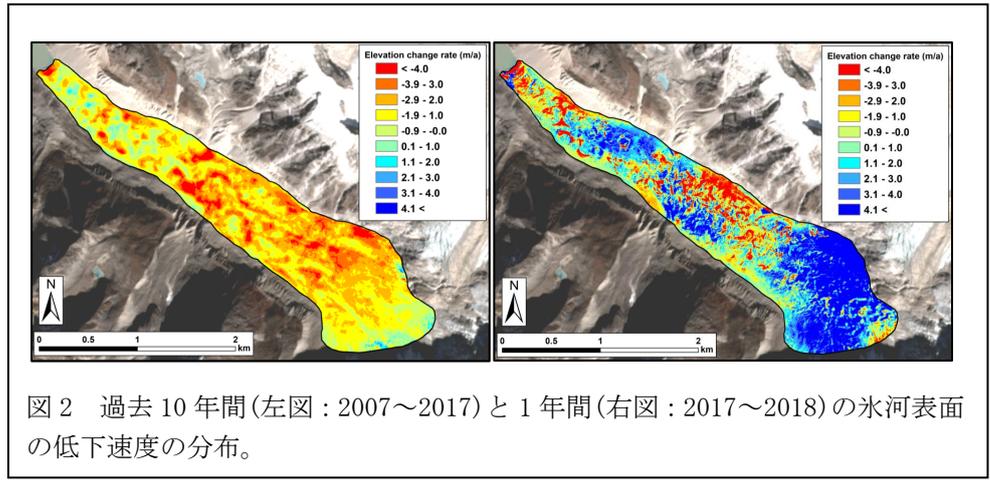


図2 過去10年間(左図：2007~2017)と1年間(右図：2017~2018)の氷河表面の低下速度の分布。

#### 4. 考察

2007年からの10年間における氷河表面は毎年約2 mずつ低下していることが算出されたが、その空間分布は非一様である(図2左図)。一方、2017~2018年にかけての氷河表面は氷河末端部で低下しているものの、特に最上流部で上昇傾向にあることが明らかとなった(図2右図)。同期間に観測した氷河質量収支と気象データの解析からは、氷河の質量増加に寄与するようなイベント(例年より低温傾向にあった/降雪量が多い傾向にあった)などは検出されておらず、はっきりとした原因はわかっていない。また、氷河表面の低下・上昇は氷河表面の融解の多少(質量収支)に加え、氷河流動の影響を考慮する必要がある。このため、より深い理解のためには衛星データから氷河流動の分布と時間変化を求めると共に、氷河の厚さの情報をアイスレーダ観測などにより取得する必要がある。

氷壁の分布が氷河の表面低下に与える影響を見るために、氷河末端から500 m毎に区画を設定し、その区画毎における表面低下速度と氷壁の長さ密度を求め、比較した(図3)。この結果、氷壁が多く存在するところでは激しい表面低下が生じていることが明らかとなった。氷壁の融解・消耗は水平方向に生じ、back wasting と呼ばれている。氷壁が水平方向にわずかに後退した場合、鉛直投影面で見れば狭い面積ではあるものの、鉛直方向には多量の氷が失われた事になる。大きな表面低下が生じている箇所にはより多くの氷壁があることから、デブリ氷河の縮小の空間分布に氷壁の分布が大きく影響していることが示唆された。

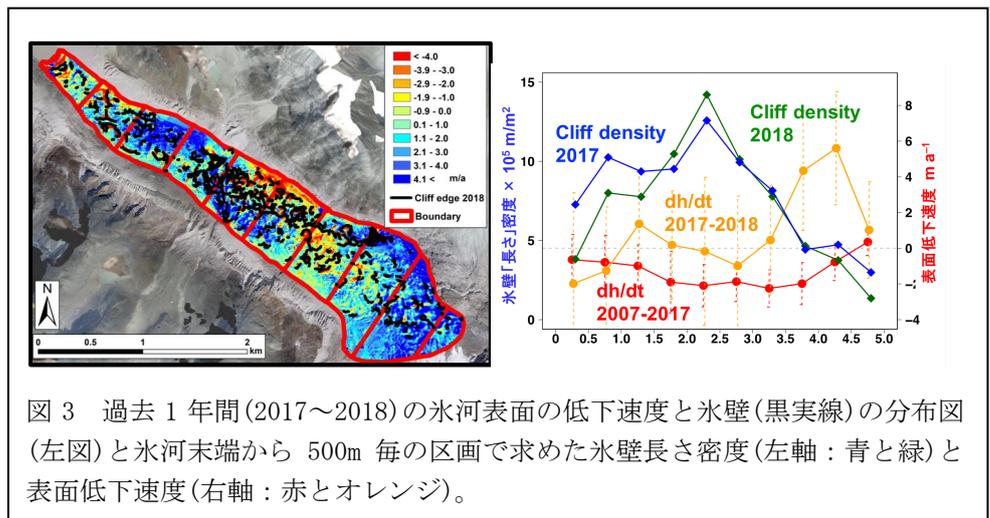


図3 過去1年間(2017~2018)の氷河表面の低下速度と氷壁(黒実線)の分布図(左図)と氷河末端から500m毎の区画で求めた氷壁長さ密度(左軸：青と緑)と表面低下速度(右軸：赤とオレンジ)。

#### 5. まとめ

本研究では、UAV および航空機、ヘリコプターによる空撮写真から SfM 処理をおこなって得られた高解像

度のオルソ画像と DEM から氷河表面の低下速度の分布を求めると共に、デブリ氷河の融解の鍵を握るとされる氷壁との関係について解析をおこなった。これまでの先行研究で利用されてきた人工衛星から作成される DEM の高さ精度は 15~20 m であったため、氷河変動を精度良く見積もるには観測期間を長く採る必要があった。また、人工衛星データの解像度は 5~10 m 程度であり、氷壁を識別することはほぼ不可能であった。一方、今回空撮データより作成したオルソ画像は 0.2 m という超高解像度であり、氷壁の分布を詳細に解析することが初めて可能となった。今後はより多くの氷河で UAV もしくはヘリコプターによる空撮を実施し、超高解像度データを蓄積することで、氷河の表面低下と氷壁の分布の関係性が他の地域においても成立するかどうか、気候の違いによる影響を受けているかどうか、などについて検討を進めることが可能になると期待できる。なお、当初予定していたクンプ地域におけるヘリ空撮データについては、その使用許可を中部大学国際 GIS センターがネパール関係機関に確認するのに時間を要したため、解析手法の検証にはロールワリン地域にて取得したデータを用いた。

## 6. 謝辞

本研究は中部大学問題複合体を対象とするデジタルアース共同利用・共同研究 IDEAS201833 の助成を受けたものです。

## 参考文献・データ

1. Immerzeel WW, Kraaijenbrink PDA, Shea JM, Shrestha AB, Pellicciotti F, Bierkens MFP, de Jong SM: High-resolution monitoring of Himalayan glacier dynamics using unmanned aerial vehicles. *Remote Sensing of Environment*, **150**, 93-103, doi:10.1016/j.rse.2014.04.025, 2014.
2. Sakai A, Nakawo M, Fujita K: Distribution characteristics and energy balance of ice cliffs on debris-covered glaciers, Nepal Himalaya. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, **34**(1), 12-19, doi:10.2307/1552503, 2002
3. Nuimura T, Fujita K, Yamaguchi S, Sharma RR: Elevation changes of glaciers revealed by multitemporal digital elevation models calibrated by GPS survey in the Khumbu region, Nepal Himalaya, 1992-2008. *Journal of Glaciology*, **58**(210), 648-656, doi:10.3189/2012JoG11J061, 2012
4. Watson CS, Quincey DJ, Carrivick JL, Smith MW: Ice cliff dynamics in the Everest region of the Central Himalaya. *Geomorphology*, **278**, 238-251, doi:10.1016/j.geomorph.2016.11.017, 2017