

# ネパールヒマラヤ・トランバウ氷河における 1980–2015 年の表面標高変化 Surface elevation change of Trambau Glacier in Nepal Himalaya from 1980 to 2015

森本直矢 (北海道大学 大学院環境科学院・低温科学研究所)

杉山慎 (北海道大学 低温科学研究所)

藤田耕史 (名古屋大学 大学院環境科学研究科)

坂井亜規子 (名古屋大学 大学院環境科学研究科)

Naoya Morimoto, Shin Sugiyama, Koji Fujita, Akiko Sakai

## 1. はじめに

ヒマラヤに存在する氷河からの融解水は、生活用水や水力発電などの重要な資源となっている<sup>1)</sup>。一方、氷河融解水が貯留して氷河湖が形成されると、決壊洪水による甚大な被害の原因となる<sup>2)</sup>。これまでの研究から、ヒマラヤの氷河は小氷期以降縮小を続けており<sup>3)</sup>、近年では質量損失の速度が大きくなっていることが明らかになっている<sup>4)</sup>。本研究対象地であるトランバウ氷河は末端にネパール最大の氷河湖を持ち、湖に着目した研究が行われてきた。しかしながら、氷河の変動に関する研究は限られている<sup>5)</sup>。そこで本研究では、衛星画像解析と現地観測により、過去 35 年間にわたるトランバウ氷河の表面標高変化速度を明らかにすることを目的とした。得られた結果から、氷河変動の時空間分布を議論し、同地域で報告された過去の研究結果との比較を行う。

## 2. 研究対象地

トランバウ氷河 (27.9°N, 86.5°E) はネパールのロールワリン地域に位置している (図 1)。面積は 76.5 km<sup>2</sup>、標高 4500–6850 m に分布しており、標高 5000 m より下流側は厚さ数 10 cm–1 m 程度のデブリ被覆域、その上流側は裸氷域および涵養域となっている。2010 年の時点では、デブリ被覆域と裸氷域は急な岩壁で分離されている。氷河末端にはツォロルパ湖が存在しており、この氷河湖が決壊すると約 8900 万 m<sup>3</sup> の水が流出すると予測されている<sup>6)</sup>。

## 3. 研究手法

氷河表面の標高変化解析には 4 つの数値標高モデル (DEM: Digital Elevation Model), Hexagon, SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), ALOS (Advanced Land Observing Satellite), SETSM (Surface Extraction with TIN-based Search-space Minimization) を用いた (表 1)。Hexagon と ALOS は、それぞれ Hexagon KH-9 と ALOS PRISM

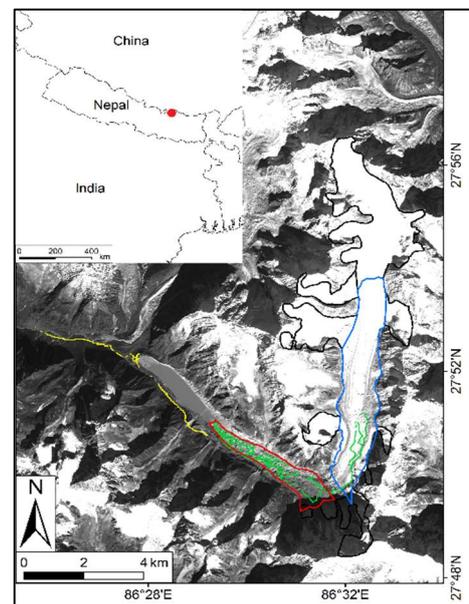


図 1 トランバウ氷河の衛星画像 (ALOS PRISM, 2010 年 12 月 15 日撮影)。赤、青、黒がデブリ被覆域、裸氷域、涵養域、黄と緑が氷河外と氷河上の GPS 測量点。

(Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping) によって撮影されたステレオペア人工衛星画像から作成した. SRTM と SETSM はそれぞれ United States Geological Survey と Polar Geospatial Center から公開されているデータを利用した. SETSM は人工衛星 WorldView-1 (DigitalGlobe Inc.) で撮影されたステレオペア画像から作成された DEM であり, デブリ被覆域のみのデータである. DEM はすべて, GIS 上で 30 m の格子点に内挿し, 1980–2000 年, 2000–2010 年, 2010–2015 年の期間における標高変化を解析した.

ALOS PRISM からの DEM の作成は澤柿ら<sup>7)</sup>の手法に従った. ALOS PRISM 画像に RCP (Rational Polynomial Coefficients) ファイルを付加し, 画素の位置情報を地理座標に変換した. この画像をデジタルフォトグラメトリソフトウェア (EARDAS Imagine 2014 ; EARDAS Inc.) を使用したデジタル図化機で読み込み, ステレオ視モニター (SD2020 ; Planar System Inc.) 上で立体視することで地表面の標高測定を行った. Hexagon のステレオペア画像は, 事前にフィルム由来の歪みを補正した上で<sup>8)</sup>, 以上のようにして作成した ALOS DEM から地上基準点を与えることで上述の立体視が可能となる. 類似の先行研究では, 変化がないと仮定できる氷河周辺地形で DEM 間の相対誤差を求めていることが多いが, 本研究では GPS (Global Positioning System) を用いた現地観測で得た地上較正点の座標を利用し, DEM 毎の垂直誤差を求め, 補正した.

現地観測は 2010 年 10–11 月に行った. 2つの GPS を用いたキネマティック干渉測位によって, 氷河上と氷河外の標高を総延長約 15 km にわたって 1 秒毎 (1–数 m 間隔に相当) に測定した (図 1). GPS データを GPS ソフトウェア (RTKLIB) で解析して得た座標データを GIS で読み込み, 各衛星 DEM の分解能で DEM として出力した (GPS DEM). この GPS DEM と各衛星 DEM の差分を計算し, その平均値を使って衛星 DEM の垂直誤差を補正した (表 1). GPS DEM と各衛星 DEM との標高差は標準偏差 2.4–9.9 m の分布を示した (図 2).

表 1 各衛星 DEM の画像撮影日, 分解能, 平均誤差および標準偏差.

DEM	画像撮影日	分解能 (m)	平均誤差 (m)	標準偏差 (m)
Hexagon	1980.10.1	9	19.9	9.9
SRTM	2000.2.11	30	- 39.5	7.4
ALOS	2010.12.15	2.5	- 9.7	4.1
SETSM	2015.5.4	8	- 4.0	2.4

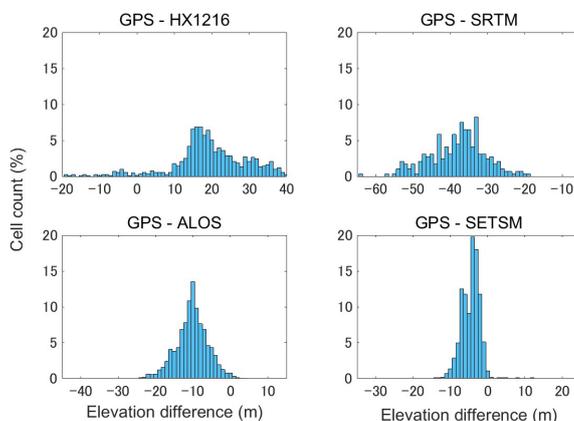


図 2 各 DEM の GPS DEM に対する標高差のヒストグラム. 高さのインターバルは 1 m.

#### 4. 結果

GPS DEM による補正を行った衛星 DEM の差分から、氷河表面標高の変化速度を求めた。その結果、1980–2000 年、2000–2010 年、2010–2015 年における表面標高の平均変化速度は、デブリ被覆域でそれぞれ  $-1.8 \text{ m a}^{-1}$ 、 $-2.0 \text{ m a}^{-1}$ 、 $-0.89 \text{ m a}^{-1}$  であった (図 3)。また、1980–2000 年、2000–2010 年における裸氷域での平均変化速度は  $-0.99 \text{ m a}^{-1}$ 、 $-0.60 \text{ m a}^{-1}$  であった (図 3)。デブリ被覆域の表面低下速度は裸氷域の約 2–3 倍であった。

1980–2000 年と 2000–2010 年を比較すると、デブリ被覆域では低下速度が増加する一方で裸氷域では低下速度が減少していた。その後、2010–2015 年にはデブリ被覆域の低下速度が大幅に減少していたが、これはデブリ被覆域上流で生じた表面標高の上昇に起因する (図 3 c)。

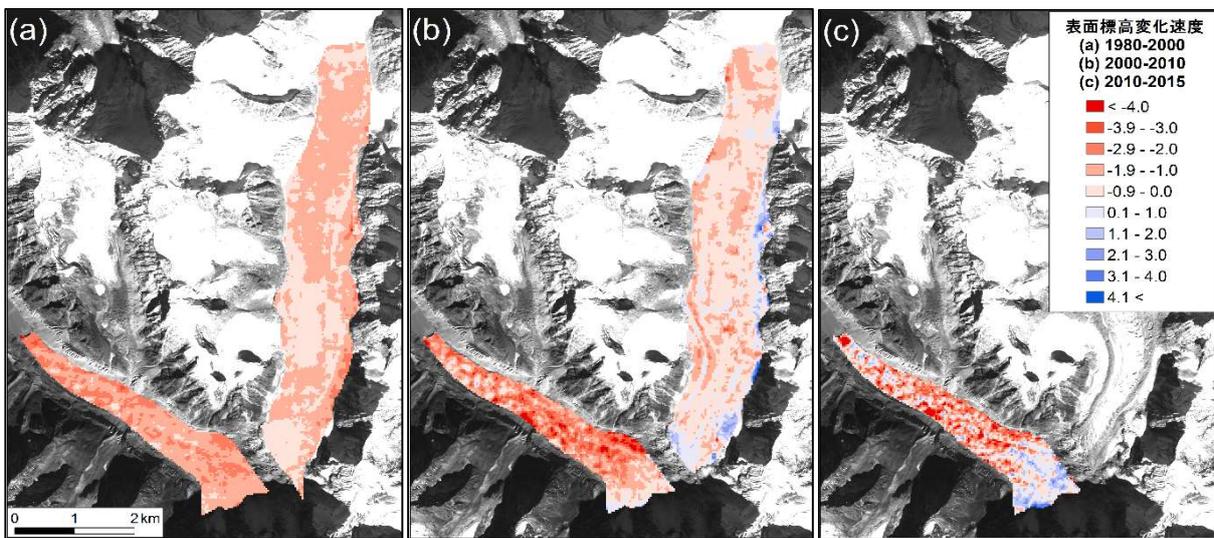


図 3 (a) 1980–2000 年、(b) 2000–2010 年、(c) 2010–2015 年における表面標高変化速度。

#### 5. 考察

氷河表面が数 10 cm 以上のデブリに覆われている場合、デブリの断熱効果によって融解が抑制される<sup>9)</sup>。しかし、本研究の解析では裸氷域よりもデブリ被覆域でより大きな表面低下速度が観測された。トランバウ氷河のデブリ被覆域は氷河上流側と分断され、隣接する岩壁からの雪崩によって供給される雪氷で氷体が保たれている。一方で裸氷域は上流の涵養域から流動による氷の供給があるため、雪氷供給量の差がデブリ被覆域で表面低下速度が大きい原因と考えられる。また、デブリの断熱効果を考慮した熱収支モデルにより、この氷河のデブリ厚は比較的薄く、融解の抑制効果が小さいことが示唆されている<sup>4)</sup>。2010–2015 年にデブリ被覆域上流で表面標高の上昇が生じた原因は、2015 年のゴルカ地

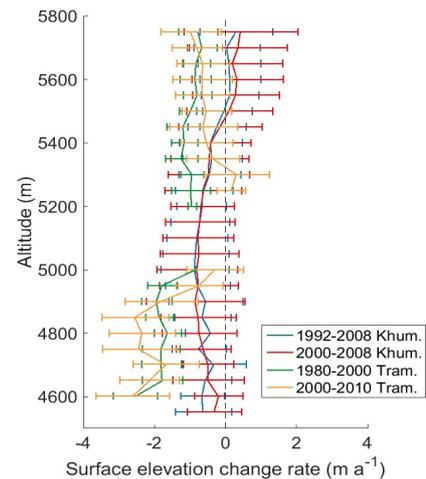


図 4 各標高帯 (50 m 毎) におけるトランバウ氷河 (黄・緑) と Nuimura ら<sup>4)</sup>の解析で得られたクンプ地域の氷河 (赤・青) の平均表面標高変化速度。エラーバーは標準偏差を示す。

震によって雪崩が誘発され、多量の雪氷が氷河上に堆積したことが原因と考えられる。

本研究で得られたトランバウ氷河の表面標高の変化速度を、Nuimura ら<sup>4)</sup>によって報告されている、同時期のクンプ地域における氷河の平均表面標高変化と比較した(図4)。その結果、同じ標高帯で比較すると、トランバウ氷河の低下速度がクンプ氷河に比べ、2-3倍大きいことが明らかとなった。クンプ地域では、末端に氷河湖を持つイムジャ氷河の質量損失が特に大きいことが先行研究で明らかとなっている<sup>4,10)</sup>。末端に湖を持つ場合、末端における上流側への抵抗がなくなる。そのため、氷河の上流側で鉛直上向きの流動がなくなると考えられる。したがって、本研究の結果と合わせて考察すると、末端に氷河湖を持つ氷河はより大きな速度で質量を失っていることが示唆される。

## 6. まとめ

本研究ではネパールヒマラヤのトランバウ氷河において、1980-2015年の3期間における表面標高変化を、衛星画像解析と現地観測によって測定した。その結果、デブリ被覆域は裸氷域の2-3倍の速度で表面標高が低下していることが明らかとなった。この結果は、デブリ被覆域が氷河上流部と分離しており、雪氷供給量に差があることが原因と考えられる。トランバウ氷河の表面標高低下速度は、隣接するクンプ地域の氷河と比較して大きい。この結果から、氷河の末端に存在する氷河湖が氷河の縮退を加速させることが示唆された。

### 【参考・引用文献】

- 1) Immerzeel, W. W., *et al.*, 2010: Climate change will affect the Asian water towers, *Science*, **328**, 1382-1385.
- 2) Shrestha, B. B. and H. Nakagawa, 2014: Assessment of potential outburst flood from the Tsho Rolpa glacial lake in Nepal, *Natural Hazards*, **71**, 913-936.
- 3) Bolch, T., *et al.*, 2012: The State and Fate of Himalayan Glaciers, *Science*, **366**, 310-314.
- 4) Nuimura, T., *et al.*, 2012: 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.
- 5) Fujita, K. and A. Sakai, 2014: Modelling runoff from a Himalayan debris-covered glacier, *Hydrology and Earth System Sciences*, **18**, 2679-2694.
- 6) Fujita, K., *et al.*, 2013: Potential flood volume of Himalayan glacial lakes, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **13**, 1827-1839.
- 7) 澤柿教伸・ラムサールダモダール, 2011: デジタル三次元空間における実体視地形解析へのステレオスコピック技術の応用, *地理学論集*, **86**, 1-9.
- 8) Surazakov, A. B. and V. B. Aizen, 2010: Positional accuracy evaluation of declassified Hexagon KH-9 mapping camera imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **76 (5)**, 603-608.
- 9) Østrem, G., 1959: Ice melting under a thin layer of moraine, and the existence of ice cores in moraine ridges. *Geografiska Annaler*, **41 (4)**, 228-230.
- 10) Bolch, T., *et al.*, 2011: Multi-decadal mass loss of glaciers in the Everest area (Nepal Himalaya) derived from stereo imagery, *The Cryosphere*, **5**, 349-358.