

## 別紙4

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 ネパール・ヒマラヤにおける高標高域に位置する氷河の質量収支と  
気候条件に関する研究

(Mass balance and climatic condition of a high altitude glacier in  
the Nepal Himalaya)

氏 名 砂子 宗次朗

## 論 文 内 容 の 要 旨

近年世界の氷河は縮小傾向にあるが、ヒマラヤ地域の氷河も質量が損失傾向にある。衛星データや数値計算を用いた氷河変動に関する研究は現在までに多く行われている一方で、現地観測に基づいた研究はアクセスの困難さから数えるほどしか報告されていない。また質量収支観測が行われた氷河の多くは、観測が容易な低標高域に位置した小型氷河であるため、地域代表性に乏しいことが指摘されている。従って、高標高域での質量収支が依然として待たれている。

氷河における長期間の質量収支復元や気候感度を推定する手法として、先行研究では主に気象データを入力値とする質量収支モデルを用いた方法が採用されてきた。他方、現地観測が困難な高標高域における降水量は、モデル内で推定したパラメータの採用や氷河より下流にて観測された降水量データを元に推定する手法が主であった。従って、高標高域での質量収支観測は、降水量の推定やモデル検証のためにも極めて重要である。さらに近

年の研究では、ヒマラヤやチベット高原の高標高域ほど気温上昇が進んでいる傾向にあると報告されている一方、気温や降水の変動を定量化・議論した研究は極めて少ない。そこで本研究は、ネパール・ヒマラヤの高標高域に位置する Trambau 氷河を対象に、現地観測と質量収支モデルを用いて 1980 年以降の質量収支の変動を復元した。併せて、Trambau 氷河が過去に平衡状態であった際の気候条件を氷河の面積高度分布と鉛直方向の流動を示す浮上速度を用いて復元し、現在気候と比較検討を行った。

ネパール・ヒマラヤに位置する Trambau 氷河にて質量収支、気象、流動及び氷厚観測を実施した。2016 年 5 月に質量収支観測用のステークを氷河上 5280–5850 m a.s.l. の範囲に設置し、2016, 2017, 2018 年 10 月にステークの高さ変化を読み取ることで、2016 年融解期 (5–10 月) 及び 2016–2017 年, 2017–2018 年の質量収支を求めた。観測した質量収支は 2016 年融解期に 5850 m a.s.l. 地点でわずかに正の値を得たものの、全体として負の値を示した。観測から得た質量収支を元に先行研究にて構築された質量収支モデルの検証を行った結果、気温減率と降水の高度に対する勾配を補正することによって、観測された質量収支を再現することができた。1980–2018 年の質量収支復元を行った結果、Trambau 氷河の質量収支は  $-0.65 \pm 0.39$  m w.e. a<sup>-1</sup> を示し、過去 39 年間質量が損失傾向にあることが明らかとなった。一方、先行研究で示された Mera 氷河の質量収支は、2008–2015 年の期間平衡状態であり、Trambau 氷河と傾向が異なった。この原因について、各氷河の面積高度分布及び気候条件の違いから検討した。両氷河での気候条件は同様と仮定し、面積高度分布のみを変更して Mera 氷河の質量収支を求めたところ、計算結果は Trambau 氷河と比較してより負の値を示した。Mera 氷河の面積高度分布が質量収支に優位に働いているとすれば、同一の気候条件にて計算した Mera 氷河の質量収支は、Trambau

氷河よりも正の値に近づくはずである。従って、各氷河での質量収支の傾向が異なる原因は、気候条件の違いであると示唆された。先行研究によれば、Mera 氷河上での降水量は Trambau 氷河の~1.7 倍程度であることが報告されており、本研究での比較結果を支持していた。加えて、Trambau 及び Mera 氷河の平均斜面方位を求めた結果、Trambau 氷河の南向き ( $223^{\circ}$ ) に対して、Mera 氷河は北東向き ( $44^{\circ}$ ) であることが示された。従って、Trambau 氷河では日射の影響を受けやすく且つ年間降水量が Mera 氷河と比較して少ないため、質量収支がより負の傾向を示すことが明らかとなった。

次に、質量収支モデルを用いて Trambau 氷河の現在の面積高度分布を維持するために必要な気候条件を推定した。自動気象計を設置した 4806 m a.s.l.地点での夏期平均気温と年間降水量を 1980–2018 年の季節変動パターンを考慮しつつモデル内で変化させた結果、必要な年間降水量は夏期平均気温に比して増加することが明らかとなった。他方、面積高度分布を維持するための夏期平均気温と年間降水量の組み合わせは無数にあり、過去 39 年間の気候条件との比較だけでは現在の気候変動を定量化できないことが示された。

氷河の表面標高変化は、表面での質量収支と鉛直方向の流動速度に値する浮上速度によって決定される。氷河が平衡状態の場合、氷河上での表面標高は不変なので質量収支と浮上速度は釣り合う。この関係を用いて、Trambau 氷河が平衡状態と仮定した際のダイナミクスを満たす質量収支を浮上速度から求めた。まず現地観測、衛星データ及び数値計算モデルから得た流動速度、氷厚分布、表面標高変化及び質量収支データを元に、独立した三つの手法から 2000–2016 年と近年の浮上速度を求めた。その結果、Trambau 氷河末端付近では、近年浮上速度が減速していることが明らかとなった。この原因として涵養量の減少や融解に伴う流動の減速によって、氷河上流からの氷のフラックス量が減少している可

能性が考えられる。Trambau 氷河のダイナミクスを満たす質量収支を再現するための気候条件を質量収支モデルから求めた結果、夏期平均気温及び年間降水量はそれぞれ  $4.0 \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$  と  $680 \pm 20 \text{ mm}$  を示した。他方、同量の降水量を仮定すると面積高度分布を維持するために必要な夏期平均気温は  $3.6 \pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$  と求められた。面積高度分布とダイナミクスをそれぞれ満たす夏期平均気温に差が見られた原因は、近年の面積高度分布の急速な変化に対して、気候変動に対する浮上速度の応答が遅いためであると考えられる。面積高度分布及びダイナミクスの両方を満たす気温と降水が Trambau 氷河の平衡状態の気候条件であると仮定すると、それぞれ  $3.8 \pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$  及び  $680 \pm 20 \text{ mm}$  を得た。この結果を 1980–2018 年の夏期平均気温及び年間降水量と比較すると、4806 m a.s.l.地点で  $+0.5 \text{ }^\circ\text{C}$  の温暖化及び  $+50 \text{ mm}$  の湿潤化が確認された。ヒマラヤ高標高域における気候変動に関する研究は限られているが、1975–2000 年の平均気温に対して、2000–2016 年の平均気温は約  $1^\circ\text{C}$  上昇したことが観測事実として報告されており、本研究の結果と整合的であった。一方、高標高域での降水量の変動傾向は依然として不明確であり、今後の研究が待たれるところである。

以上の通り、本研究は高標高域に位置する氷河の質量収支変動を明らかにした他、氷河の浮上速度と質量収支モデルを用いることで気候変動の定量化を試みた点で重要である。今後は、他の地域に位置する氷河の気象及び質量収支観測結果と本研究の結果を比較検討することで、ヒマラヤ地域に位置する氷河の気候条件に関する研究が更に進むものと期待される。

