

気象数値予報再解析データを用いた氷河湖拡大の監視手法の提案

○北海道大学農学部（現：大学院環境科学院・北極域研究センター） 中山智博
 北海道大学 大学院農学研究院 桂真也
 北海道大学 広域複合災害研究センター（現：政策研究大学院大学） 山口真司

1. 研究の背景

現在、地球温暖化に伴って氷河が後退し、氷河湖が拡大、決壊の危険が高まっている。また、氷河湖周辺の人口も増加している。氷河湖決壊洪水（Glacial Lake Outburst Flood: GLOF）は人々の生活や社会基盤に被害を及ぼす災害で、下流域の国にも被害を及ぼす国際的災害である。そのため、対策が急務である。しかし、GLOF発生国は発展途上国が多く、堰や堤防の設置などのハード対策は先進国の援助に依存している。

一方、従来のソフト対策として、衛星写真の解析や現地観測を行って氷河湖の水位、拡大状況の監視を行い、危険度を評価する手法が挙げられるが、衛星写真からは氷河の融解・水の流入プロセスに基づいた流入水量の推定ができない。現地観測の場合、アクセスは困難な上に観測に必要なインフラがなく、自動観測設備も設置されていない。そのため、すべての氷河湖を個別に監視することは現実的ではない。

また、既往の氷河融解水・融雪水の流出量を推定するモデルでは、水の流出特性・土壌特性といった現地観測データを必要とするタンクモデルを用いており、特定の場所にも適用可能なモデルである。そのため、全世界の氷河湖監視に応用できる汎用性の高いモデルは未だ存在しない。

一方、気象数値予報の全球モデルは全球の大気/陸面/海洋の状況を高解像度で推定することができる。本研究では気象数値予報再解析データなどオープンソースデータと、全世界でも使用でき、一般の計算機でも行える汎用性が高い解析手法のみを用いて、氷河湖に流入する水量を推定することを目的とした。本手法により、全世界の氷河湖で、氷河融解・水文学的プロセスに基づいた流入水量の推定を行うことが可能となる。

2. 研究対象地

対象地はネパールヒマラヤに位置する Tsho Rolpa 氷河湖（27.9°N86.5°E）である。この氷河湖の面積は 1.4 km²、湛水量は約 8200 万 t と、ヒマラヤで最大の氷河湖である。現在も拡大を続けており、ヒマラヤで最も危険な氷河湖であるとされているため、様々な現地調査やハード対策の試みがなされている。

流域内には 2 つの氷河、Trakarding 氷河と Trambau 氷河が存在し、それらからの融解水が湖に供給されている。

3. 研究手法

解析期間は比較するデータセットが存在する期間である、1993/5/1～12/18 である。流入水の起源には、氷河、デブリ氷河、融雪、降雨がある。本研究では、起源ごとに生産水量を数値予報データから計算し、起源となる地物の面積を乗じ、流入水量を算出して観測値と比較、精度を検証した。

Fig.1 に概略図を示す。USGS National Map 3DEP Downloadable Data Collection 1 Arc-second DEM（以下、USGS 30m DEM）を用いて氷河湖の流域面積を算出した。数値予報モデルは欧州中期予報センター（ECMWF）の ERA5-Land 再解析データを用いた。モデルの格子の解像度は 0.1°四方で、対象地を 3 つの格子でカバーしている。本研究では格子毎の値を熱収支モデルに代入し、氷河域、デブリ氷河域、融雪域ごとに毎時の融解水量を算出、7 日間積算した。

集水域内の融解中の氷河/デブリ氷河/融雪域の面積を Landsat-5 TM C2 L1（以下、Landsat-5）のマルチバンド画像から算出した。バンド合成により正規化雪氷指数（NDSI）を算出し、雪氷被覆域を抽出した。氷河域は

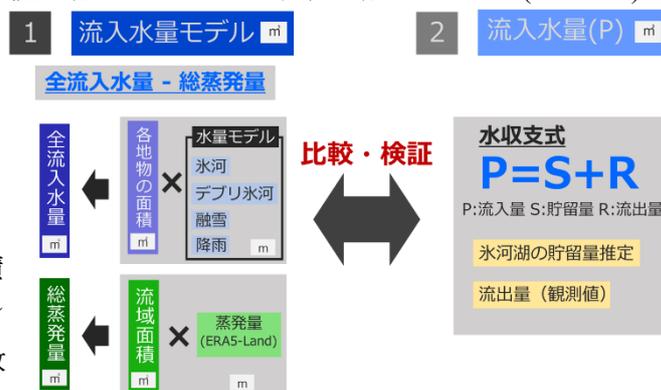


Fig. 1 手法の概略図

氷河台帳 RGI 7.0 に基づき積雪と分離した。デブリ氷河は熱抵抗値を解析期間内の 3 期間の Landsat-5 の Band6 と ERA5-Land の値を用いて推定し、その平均値と NDSI を用いて抽出した。

気温 0°C となる等高度線(凍結線: FL)を ERA5-Land の気温と露点温度から算出した。FL の下側を氷河融解域とし、その面積を求めた。積雪前線(SFL)を Landsat-5 画像の積雪域の前面を USGS 30m DEM を用いて等高線で近似して求め、SFL と FL に囲まれた部分を融雪域とした。降雨量は雨雪判別を 0~4°C の範囲で 1°C ごとに行い、0°C 未満を雪、4°C 以上を雨とし、温度帯毎の降雨量を算出、降雪と分離した。蒸発量を引くことにより、氷河湖に流入する正味の水量(流入水量モデルの出力値)を算出した。

次に、流入水量モデルと水収支により変換した流入水量の観測値(Observation)の比較を行う。Landsat-5 画像から NDWI (正規化水指数)を算出し、氷河湖の湛水域を推定した。Maharjan, S.B et al.(2019)²⁾の 10cm 解像度 DTM から Tsho Rolpa 氷河湖の 3D TIN モデルを作成し、Sakai et al.(2000)³⁾で報告された最大水深 131m との仮定を行って氷河湖の貯留量を推定した。流出水量は Fujita & Sakai(2014)¹⁾で用いられた観測値を使用した。水収支式から流入水量を算出し、本手法、及び Fujita & Sakai(2014)のモデルの計算値と比較、精度・妥当性を検証した。

4. 結果・考察

計算の結果、本手法の計算値は、観測値から水収支で算出したものと近い値、同じ傾向を示した。(Fig. 2)

起源ごとの計算値を Fujita & Sakai(2014)と比較すると、降雨以外の起源で傾向、値が概ね一致し、流入水量の変動を精度良く再現できた。(Fig. 3)降雨量は、Fujita & Sakai(2014)の値の 2 倍になっている。その原因としては、計算の簡略化のために降雨量の高度変化の影響を考慮していないこと、汎用性向上のために現地の気象データでモデルを最適化していないことが考えられる。また、デブリ氷河の融解量算出の誤差が期間の前半で大きく、熱抵抗値の算定の精度が影響していると考えられる。

本手法により、数値予報データを使用して氷河湖への流入水量を起源毎に推定し、その変動傾向を再現できることが分かった。本手法は全てオープンソースのデータを利用しており、地域依存性のある変数や手法を使用していない。したがって、全世界、発展途上国での GLOF 対策に活用可能であることが示唆される。

謝辞

本研究では ERA5-Land 再解析データを ECMWF より、Landsat4-5 TM C2 L1、及び USGS National Map 3DEP Downloadable Data Collection 1 Arc-second DEM を USGS よりオープンソースで使用させていただいた。

参考文献

- 1) Fujita, Koji & Sakai, A.(2014). Modelling runoff from a Himalayan debris covered glacier. Hydrology and Earth System Sciences Discussions.
- 2) Maharjan, S.B.; Joshi, S.; Peppas, M.V.; Xiao, W.; Liang, Q. (2021). Digital elevation models and bathymetry data of Tsho Rolpa glacier lake, Nepal, 2019. NERC EDS Environmental Information Data Centre. (Dataset).
- 3) Sakai A. Chikita K. Yamada T. (2000). Expansion of a moraine-dammed glacial lake, Tsho Rolpa, in Rolwaling Himal, Nepal Himalaya. Limnology and Oceanography, 45(6), 1401-1408.

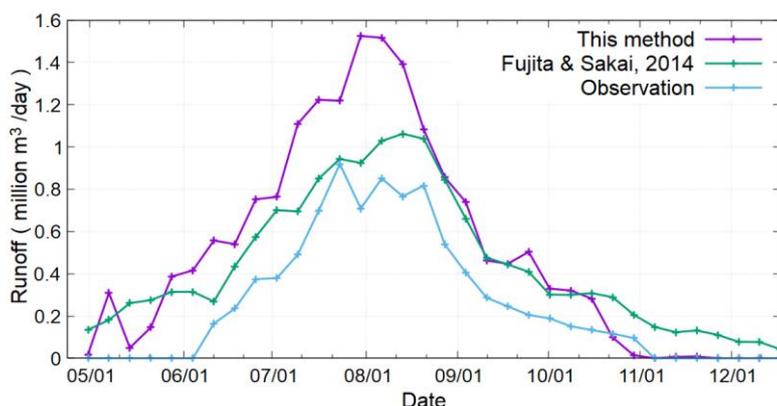


Fig. 2 流入水量モデルの精度比較

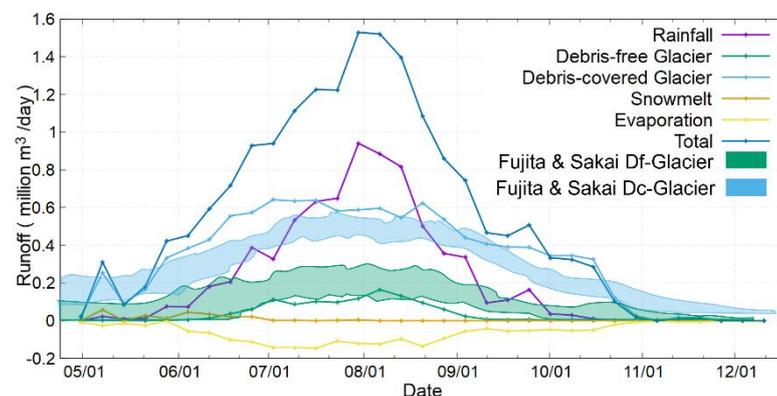


Fig. 3 地物ごとの生産水量とその精度比較