

ボリビア・アンデス山脈における熱帯氷河の水資源評価

東北大学工学部 学生会員 ○吉澤一樹

東北大学大学院工学研究科 正会員 朝岡良浩

サンアンドレス大学水理研究所 正会員 Pablo FUCHS

サンアンドレス大学水理研究所 Edson RAMIREZ

東北大学大学院工学研究科 正会員 風間 聡

1. 背景と目的

ボリビアの首都ラパスは氷河の融解水を主要な水源としている。近年、気候変動に伴う氷河後退が懸念され、将来的な氷河の水資源量を評価することが必要とされている。

既往研究において衛星画像から過去 23 年間のボリビア Condoriri 氷河群の面積変動が明らかにされ¹⁾、熱帯氷河に適した氷河融解モデルが開発された²⁾。既往研究ではシミュレーション期間中、氷厚は常に一定としていたが、本研究では長期シミュレーションのため衛星画像から抽出した氷河域と標高データから推定した氷河の断面形状を計算の初期条件としてモデルに組み込み、計算結果に基づいて氷河融解による水資源持続性について考察した。

2. 対象地域と使用データ

研究対象地域はラパス首都圏の主要な水源となっているボリビア西部に位置する Condoriri 氷河(図-1)である。

本研究で使用了衛星画像は Landsat-7 号の ETM+センサによって撮影された解像度 30m の画像であり、ブラジル国立宇宙研究所のホームページ(<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/index.php>)から取得された。氷河域抽出には正規化積雪指数³⁾ (NDSI, Normalized Difference Snow Index)を算出して、NDSI が 0.4 以上の画素を氷河域とした。氷河湖の除去のために一般的に陸地と水域を区別する際に使われる赤色の波長帯(0.63~0.69 μ m)を使用した。氷厚の変化を計算するために推定した氷河の断面形状を数値標高モデル(DEM, Digital Elevation Model)から推定した。DEM は全球 3 次元地形データ(ASTER GDEM)のバージョン 2 である。モデル計算のために、氷河の下流側に設置した気象観測装置から 2011 年 7 月 1 日~2013 年 6 月 30 日の 2 年間の気象データを取得した。

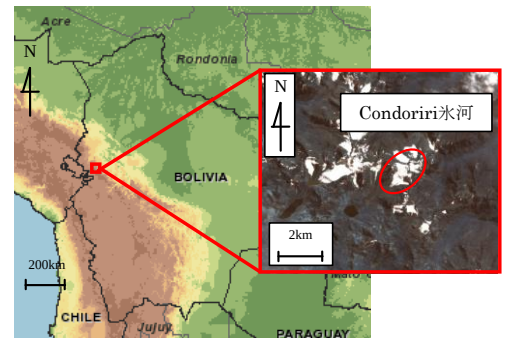


図-1 研究対象氷河(Condoriri 氷河)

3. 氷河融解モデル

本研究では氷河融解モデル(Enhanced temperature index model with albedo parameterization²⁾)を用いて標準計算と 3 つの気温上昇シナリオを作成して長期シミュレーションを行った。氷河の質量収支(GMB, Glacier Mass Balance)を以下の式から計算する。

$$GMB = a_s - M_i - S_i$$

ここで、 a_s (cm)は降雪量、 M_i (cm/日)は i 日の融解量、 S_i (cm/日)は i 日の昇華量である。 S_i は Zhang et al.の経験式⁴⁾より計算する。 M_i (cm/日)は i 日の日平均気温 T_i (°C)、日平均日射量 G_i (W/m²)、アルベド α_i から計算する。

$$M_i = \begin{cases} TF \cdot T_i + SRF \cdot (1 - \alpha_i) \cdot G_i & (T_i > T_c) \\ 0 & (T_i \leq T_c) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、TF, SRF は定数である。 T_c は降雨と降雪の閾値であり、本研究では 1.5°C 以下の場合の降水を降雪とした。 α_i は Oerlemans, J. et al.の経験式⁵⁾より計算する。

キーワード 氷河融解モデル、涵養域・消耗域、断面形状、質量収支、高度分布、水資源持続性

連絡先 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 東北大学工学部建築・社会環境工学科 水環境システム学研究室 TEL022-795-7455

本研究では、氷河を標高 50m 毎に分割して各標高帯において計算を行った。標高依存性の高い気温を、氷河上の気象観測装置(4930m 地点)と氷河の下流側の気象観測装置(4490m 地点)のデータから気温低減率 $0.90^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ を定め、各標高帯の気温を計算した。氷河の断面形状を氷河の両側を囲む斜面の標高の値から 2 次関数に近似して推定した(図-2)。30 年の長期シミュレーションを行うために、2 年間の気象観測データを 15 回繰り返す 30 年分のシミュレーションを標準計算とした。気温上昇シナリオも 2 年分の気温データを繰り返すが、9 つの大気循環モデル(GCM, General Circulation Model)から算定した気温上昇率の平均 μ ($0.034^{\circ}\text{C}/\text{年}$)と標準偏差 σ ($0.0097^{\circ}\text{C}/\text{年}$)に基づいて表-1 に示す 3 つのシナリオを作成した。GCM の排出シナリオは RCP4.5 とした。他のデータ(降水・日射・湿度・風速)は全てのシナリオで標準計算と同じデータとした。

4. 結果および考察

各シナリオの 30 年後のシミュレーション結果を図-3 に示す。計算初期の氷厚は標高 5000~5100m 帯で最も深くなった。30 年後の氷厚から涵養域は標準計算では標高 5150~5200m 帯、最低上昇シナリオでは標高 5200m 帯となった。さらに平均上昇・最高上昇シナリオでは全標高帯が消耗域となる。気温上昇によって平衡高度の位置が上昇するだけでなく、氷河全体の質量収支も減少する傾向にある。しかし、氷河質量の減少量だけでなく氷厚の深さも水資源量を評価するにあたり重要である。標高 5100m 帯は標高 5150m 帯に比べ氷厚の減少量は大きい、計算初期の氷厚が約 3 倍あるため 30 年後の氷厚は標高 5100m 帯の方が大きくなる。

以上の結果より、Condoriri 氷河において、今後 30 年間では標高 5000~5100m 帯の消耗域が水資源として有用であることを示唆している。仮に現在の気候が続く場合、30 年後でも持続的な水資源と考えられるが、最高上昇シナリオのような気候変化が起きた場合、融解速度の上昇に伴い水資源面の持続性は低下すると考えられる。

5. 今後の課題

本研究では、氷厚の経年変化を推定して、氷河融解水による水資源持続性について考察した。今後は、氷河面積の経年変化を考慮して、氷河全体の水資源量と持続性の評価に取り組む予定である。

謝辞

本研究は、地球規模課題対応国際科学技術協力(SATREPS)の援助による GRANDE によって実施されました。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Morizawa, K. et al., 2013: Temporal glacier area changes correlated with the El Niño/La Niña Southern Oscillation using satellite imagery, *Hydrological Research Letters*, 7(2), pp.18-22
- 2) FUCHS, P. et al., 2013: Estimation of glacier melt in the tropical Zongo with an Enhanced temperature index model, *Journal of Japan Society Civil Engineers, Ser.,B1(Hydraulic Engineering)*, Vol.69, pp.187-192
- 3) Dozier, J., 1989: Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat Thematic Mapper, *Remote Sensing Environment*, 28, pp.9-22
- 4) Zhang, W. et al., 1999 : Observation and estimation of daily actual evapotranspiration and evaporation on a glacierized watershed at the headwater of the Urumqi River, Tianshan, China, *Hydrological Processes*, 13, pp.1589-1601
- 5) Oerlemans, J. et al., 1998: A 1 year record of global radiation and albedo in the ablation zone of Morteratschgletscher, Switzerland, *Journal of Glaciology*, 44(147), pp.231-238

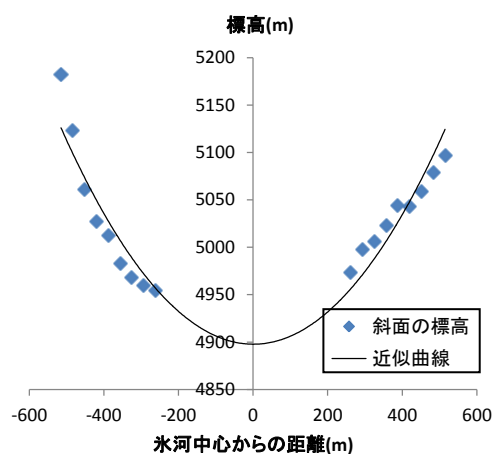


図-2 氷河断面形状(標高 4950m 帯)

表-1 各シナリオの気温上昇率

シナリオ名	気温上昇率($^{\circ}\text{C}/\text{年}$)
標準計算	0
最低上昇シナリオ($\mu-\sigma$)	0.024
平均上昇シナリオ(μ)	0.034
最高上昇シナリオ($\mu+\sigma$)	0.044

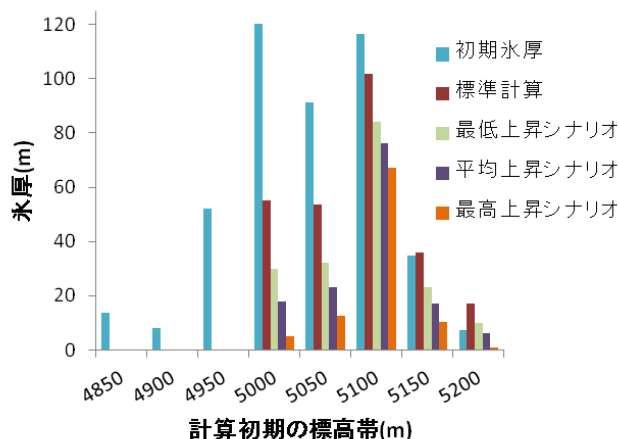


図-3 各シナリオの氷厚(30年後)