

ボリビア・アンデス山脈における氷河流動モデルを用いた氷河後退解析

東北大学大学院工学研究科 学生会員 ○吉澤一樹
 日本大学工学部 正会員 朝岡良浩
 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首都圏では、氷河の融解水は貴重な水資源の一つである。近年、気候変動に伴う氷河後退が発生しており、氷河融解水を起源とする将来的な水資源量を評価する必要がある。氷河融解水や氷河変動プロセスの把握には数値シミュレーションが有効であり、多くの既往研究で用いられてきた。氷河変動を考える上で、氷河の流動現象のモデル化は不可欠である。しかし、ボリビア・アンデス山脈において氷河の流動性に着目した研究は極僅かである¹⁾。そこで本研究は、ボリビア国 Zongo 氷河を対象に氷河流動モデルを用いて氷河の流動性が氷河後退に及ぼす影響について考察する。

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 Zongo 氷河 (2.11km²) (図-1) である。フランス研究開発局(IRD, Institut de recherche pour le développement)の観測データを使用した。

氷河域抽出には衛星画像が使用され、正規化積雪指数(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。各標高帯の質量収支計算のために、氷河の下流部 5050m 地点に設置した気象観測装置 (AWS1, AWS2)から 2005 年 7 月 1 日~2010 年 6 月 30 日の 5 年間の気象データを取得した。

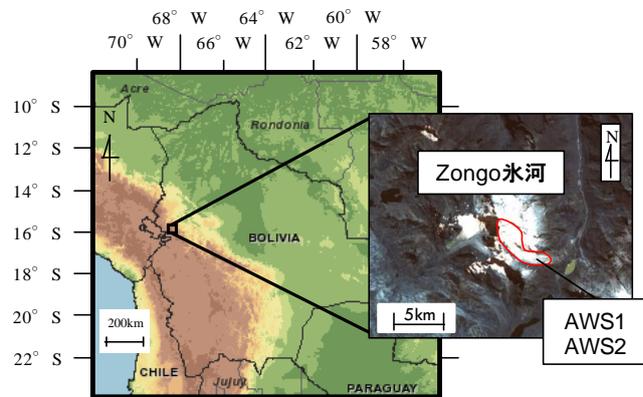


図-1 研究対象地域

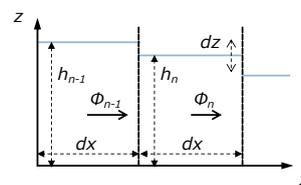
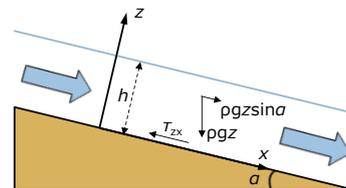


図-2 氷河流動モデルの概念図

3. 氷河流動モデル

本研究では、氷河内部の質量収支から氷河流動モデルを用いて氷厚を推定した。全長 3km の Zongo 氷河を空間間隔 dx (100m) で各標高帯に分割し、時間間隔 dt (1 年) で 2006~2010 年の 4 年間の氷厚を計算する (図-2)。ここで、基盤地形に垂直上向きに z を、流下方向に x をとる。深度 z における氷河流速 u_n は、層流と仮定した氷の流動則に従うとすると、以下の式で表せる²⁾。

$$u_n = u_s - \frac{2A}{n+1} (\rho g \sin \alpha)^n (h-z)^{n+1} \quad (1)$$

ここで、 u_s は氷河の表面流速(m/year)、 A は流動係数、 n は氷の流動則のべき指数、 ρ は氷の密度(916.4kg/m³)、 g は

キーワード 氷河融解・質量収支モデル, Zongo 氷河, 地形依存性, 氷河流速, 表面傾斜, 氷厚,

連絡先 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 東北大学工学研究科土木工学専攻 水環境システム学研究室

TEL022-795-7455

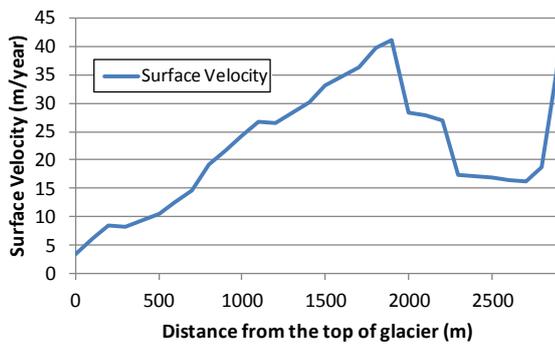


図-3 各標高帯の表面流速

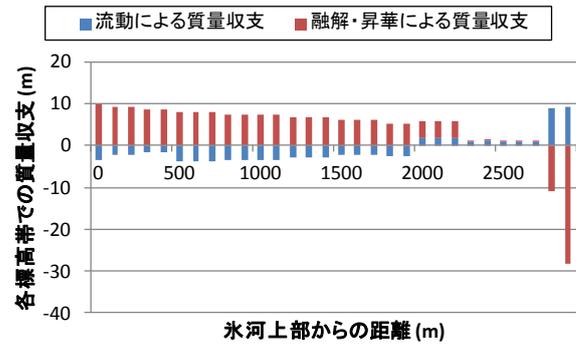


図-4 各標高帯の質量収支 (2006~2010 年)

重力加速度(9.81m/s^2), α は表面傾斜角($^\circ$), h は氷厚(m)である. 流動係数 A は Zongo 氷河の年平均表面温度から Paterson (1994)の代表値 (-2°C 時) 2.4×10^{-24} ($/\text{sPa}^3$)を使用した³⁾. n は応力の増加に合わせて $n=1\sim 5$ と変化するが, 本研究では代表値 $n=3$ を使用した. 表面傾斜角 α には標高データから求めた空間間隔毎の平均値を, 計算開始時の氷厚には Soruco *et al.* (2009)による推定値を使用した⁴⁾.

空間間隔 dx で区切った氷河内部の質量収支から, 1年後の氷厚(h_n')は以下の式で表せる.

$$h_n' = h_n + \frac{(\phi_{n-1} - \phi_n)}{dx} \cdot dt + dz \quad (2)$$

ここで, ϕ_n は氷の流量であり, u_n を底面から表面まで積分して求める. dz は年間の質量収支であり, 氷河融解・質量収支モデル⁵⁾(ETI, Enhanced Temperature Index model with albedo parameterization)と気象データ(気温・降水・日射・湿度・風速)を用いて日計算から時間積分して求められる.

4. 結果および考察

モデル計算の終了時(2010年)の氷厚から各標高帯の表面流速 u_s を決定した(図-3). モデル計算の精度を示すために, Zongo 氷河下部(4950~5100m)の表面流速の推定値と観測値の比較を行った. 2007~2010年の観測値の平均値(16.9m/year)(標準偏差 $\sigma=5.4\text{m/year}$)に対して, モデル計算値の平均値は 17.1m/year ($\sigma=0.9\text{m/year}$)であった.

氷河流動モデルを用いて計算した氷河の流動と融解・昇華による各標高帯での4年間の質量収支を図-4に示す. 質量収支が負となったのは最下流部の2つの標高帯のみであり, 氷河流動によって輸送された氷体よりも多く融解と昇華が発生したためである. 氷河上部で涵養された氷体は氷河流動によって, 下部に移動している. しかし, 2300~2800m帯では, 流動による質量収支が極めて小さい. これは, 下流部(2300~2800m帯)の表面傾斜角が上流部の平均値(27.4°)に比べ, 12.4° と小さく, 流速が大きく減少するためである. 上流部から輸送される氷体に対して, 下流部に流下する氷体が少ないために, この標高帯の氷厚は 87.8m(2010年)と最大である. 以上の結果より, 氷河変動を扱う数値シミュレーションにおいて, 氷河の流動性は氷河の後退に大きな影響を及ぼすと考えられる.

謝辞

本研究は, 環境省の環境研究総合推進費(S-14)の支援により実施されました. 本研究で使用されたデータはフランス政府開発局(IRD)によって提供されました. ここに記して深甚なる謝意を表します.

参考文献

- 1) Marion REVEILLIET *et al.*, 2015: Simulations of changes to Glacier Zongo, Bolivia (16°S), over the 21st century using a 3-D full-Stokes model and CMIP5 climate projections, *Annals of Glaciology*, 56, pp.89-97
- 2) J. W. GLEN, 1958: The Flow Law of Ice, A distribution of the assumptions made in glacier theory, their experimental foundations and consequences, pp.171-183
- 3) W. S. B. PATERSON, 1994: The Physics of Glaciers, 3rd Edition, *Butterworth-Heinemann*
- 4) Alvano SORUCO *et al.*, 2009: Mass balance of Glacier Zongo, Bolivia, between 1956 and 2006, using glaciological, hydrological and geodetic methods, *Annals of Glaciology*, 50, pp.1-8
- 5) Pablo FUCHS *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)*, 69, pp.187-192