

2009年ネパールヒマラヤ・ヤラ氷河における 氷厚探査および流動測定

刀根賢太（北海道大学環境科学院、低温科学研究所）、杉山慎（北海道大学低温科学研究所）、福井幸太郎（立山カルデラ砂防博物館）、藤田耕史（名古屋大学）

1. はじめに

ヒマラヤの多くの氷河が近年急速に後退していることが最近の観測によって明らかになっている (e.g. 内藤, 2001). しかしながら長期間にわたって観測が継続されている氷河は少なく、後退量の定量的な評価が課題となっている。ネパールヒマラヤに位置するヤラ氷河は、1980年代から調査が行われてきた数少ない氷河であり、過去の観測データを利用することで近年の変動を明らかにすることが可能である。我々はこの氷河において、2009年10月31日から11月4日にかけて調査を行った。本報では、ヤラ氷河における氷厚探査および氷河表面の流動速度観測の結果を報告する。

2. 観測地

ヤラ氷河は、ネパールの首都カトマンズの北約60kmに位置するランタン谷に点在する氷河の一つである(図-1)。長さ約1.3km、流域面積約2.5km²、南西方向に斜面をもち、標高約5600から5100mにかけて流れている(図-2,3)。ヤラ氷河では1982年に定量的な観測が行われて以来、継続的に観測が行われており、近年氷河が

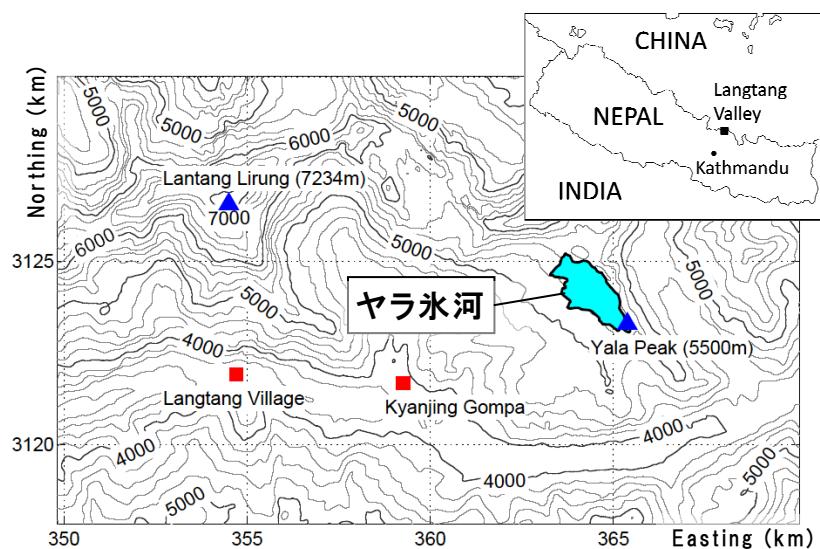


図-1 2004年のASTERのデータに基づいて描いた
ヤラ氷河周辺の地形図。座標系はUTMzone45。



図-2 南西方向から見たヤラ氷河。

著しく後退していることが報告されている(Ageta *et al.*, 1984; 内藤, 2001; Fujita *et al.*, 1998). また, 消耗域(1981年, 5180 m)と涵養域(1982年, 5400 m)において氷コアの全層掘削が行われ, その深さはそれぞれ 30 m と 60 m であった(Watanabe *et al.*, 1984).

3. 観測方法

3.1. 氷厚探査

GPR(Ground Penetrating Radar: GSSI社製 SIR3000)およびアイスレーダ(Ohio 州立大学製作)を用いて氷厚探査を行った. どちらも送信機で発生させた高電圧短パルスを受信機で受信するものである.

GPRは中心波長 270 MHzを使用する送受信機一体型のシステムで, 1/16 秒間隔で連続的に受信波を記録することができる. 氷河上流から下流にかけて約 1 m s^{-1} の速度で移動しながら測定を行った(図-3). 測線に沿った受信波強度の深度分布を図4に示す. 氷河中の電波伝播速度は氷中の伝播速度 170 m s^{-1} を用い, 図-4 から測線に沿った氷厚を読み取った.

一方, アイスレーダの中心周波数は 5 MHzであり, 受信波はデジタルオシロスコープ(Tektronix 社製 THS720std)とPCを用いて保存される. 送信機と受信機の距離を 20 mに固定し, 氷河中流から下流にかけて 20 m毎に測定を行った(図-3). アイスレーダ観測により得られた波形を図-5に示す. 各地点における岩盤反射波到達時間と氷河中の電波伝播速度 170 m s^{-1} から氷厚分布を求めた.

また, GPS キネマティック干渉測位(Magellan 社製 ProMark3)によって氷厚探査の測線に沿った氷河表面の標高を測量した.

3.2. 表面流動速度

2009年10月31日から11月4日にかけて, 氷河末端付近の2点でGPS(Leica

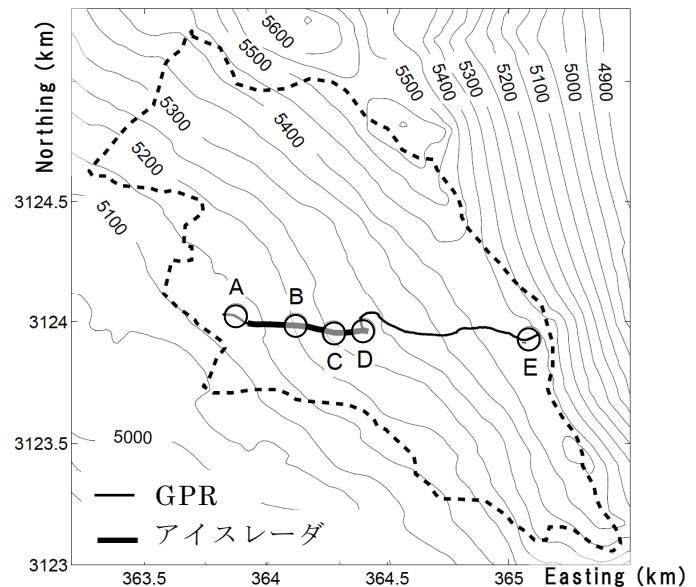


図-3 ヤラ氷河の地形図. 等高線の間隔は 50 m. 点線は氷河の輪郭, 実線は GPR およびアイスレーダの測線を示す. ○A-E は流動速度の測定点である.

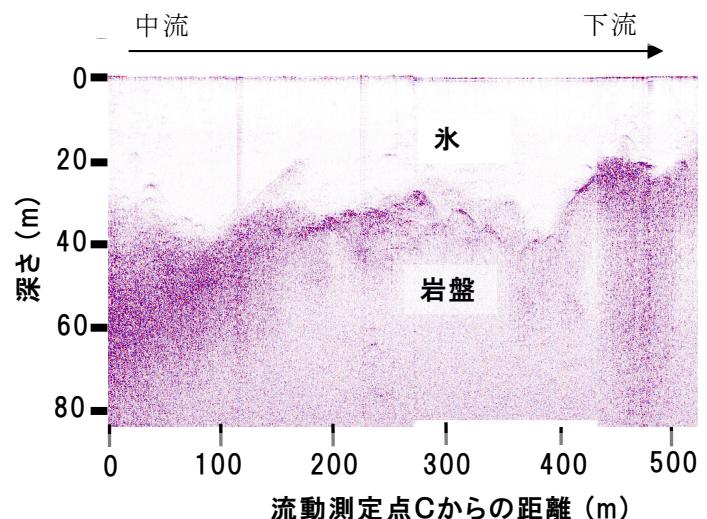


図-4 GPR 観測により得られた反射データ. 比誘電率の差が大きいところほど反射強度が強く, 濃い色で表わされる.

Geosystems 社製 System1200)により流動速度観測を行った(図-3 A, B). 氷河上に設置した測量用ポールの先端に GPS アンテナを取り付け、約 30 分間のスタティック干渉測位により 4 日間の移動量を測定した。また上流および中流の計 3ヶ所において、2008 年 9 月 26 日に測量したポールの位置座標を 2009 年 10 月 31 日に GPS スタティック干渉測位(Magellan 社製 ProMark3)によって再び測量し、この期間の流動速度を求めた(図-3 C, D, E)。

4. 結果

アイスレーダ観測の測線に沿った表面および岩盤の標高を図-6 に示した。岩盤の標高は、表面高度から氷厚を差し引くことにより求めた。図-6 に示した範囲における氷厚は、GPR 観測では 16.9–40.9 m で平均氷厚は 30.5 m、アイスレーダ観測では 16–17 m で平均氷厚は 17 m であった。今回の氷厚探査により氷河末端付近の岩盤に凹地があることがわかった(図-6)。

流動速度観測の結果を図-7 に示した。水平方向の流動速度をベクトルで示し、鉛直方向の流動速度を上部の数字で示した。流動方向は最大傾斜方向にほぼ等しく、流動速度は上流部と下流部で小さく、中流部に近づくにつれて大きくなる、一般的な氷河における分布を示した。水平方向の流動速度は D 地点で最大値 7.3 m a^{-1} 、A 地点で最小値 1.1 m a^{-1} をとった。5 地点の平均流動速度は 3.7 m a^{-1} であった。

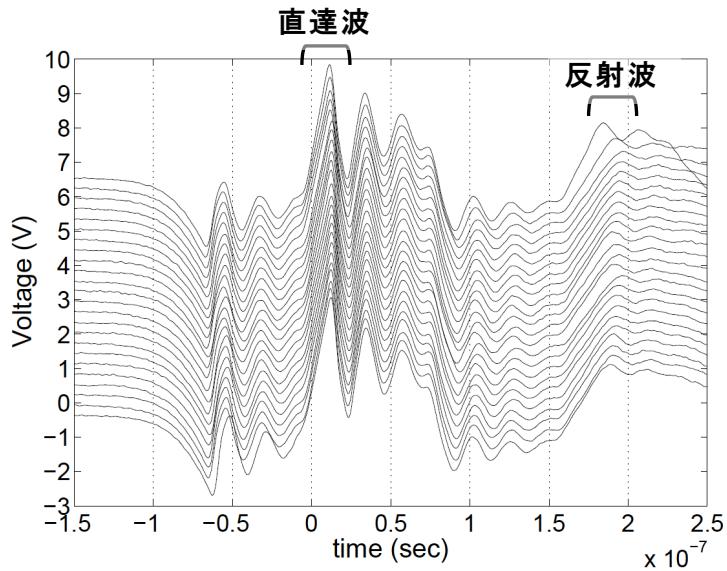


図-5 アイスレーダ観測により得られた受信波。

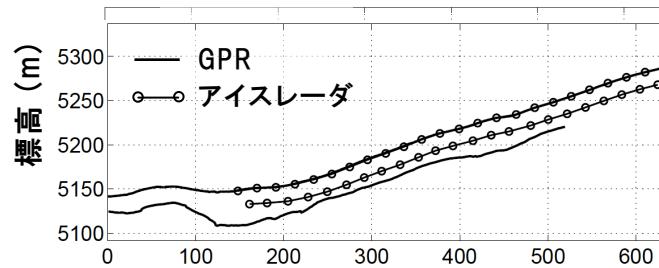


図-6 氷河表面および岩盤の標高。

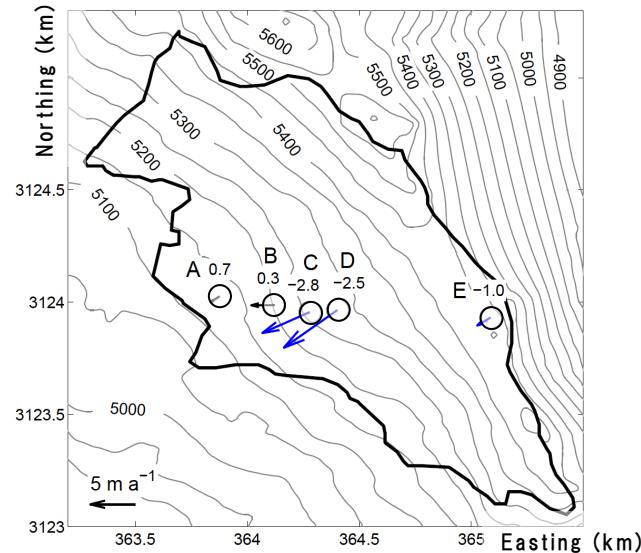


図-7 ベクトルは水平方向の流動速度、数字は鉛直方向の流動速度を示す。点 A, B は 2009 年 10 月 31 日から 11 月 4 日、点 C, D, E は 2008 年 9 月 27 日から 2009 年 10 月 31 日の移動量から年間流動速度を求めた。

5. 考察

アイスレーダ観測では GPR 観測に比べて岩盤の起伏を捉えられなかった。これは GPR 観測で用いた波長が約 0.63 m であるのに対し、アイスレーダ観測で使用した波長は 34 m と長く、アイスレーダの解像度が小さいことが原因であると考えられる。また、アイスレーダ観測で得られた氷厚は GPR で得られた氷厚と比較して約 45% 薄かった。物質中の電波伝播速度は波長依存性をもつが、本研究で使用した周波数 (270 MHz および 5 MHz) では氷中の伝播速度にほとんど差はなく、観測された氷厚が大きく異なった原因はよく分かっていない。

また、図 4において氷河中流部（横軸 0–約 150 m）では氷と岩盤の境界がはっきりしないことから、氷河底に礫まじりの氷の層（ティル）があることが示唆される。

6. まとめ

2009 年 10 月 31 日から 11 月 4 日にかけて、ネパールヒマラヤ・ヤラ氷河において氷厚探査、表面測量、および流動測定を行い、以下の点が明らかになった。

- ・中流部から下流部にかけての氷厚は約 17–40 m で、平均氷厚は約 30 m であった。
- ・下流部に凹地があり、表面地形と岩盤地形は一致していない。
- ・氷河表面の流動速度は水平方向に 1.1 m a^{-1} から 7.3 m a^{-1} の範囲で分布し、平均流動速度は 3.7 m a^{-1} であった。

謝辞

本研究は科研費 No. 19253001 の助成を受けた。調査に対し、Department of Hydrology and Meteorology に調査許可取得にご協力いただき、現地では著者以外の観測メンバーおよび Guide For All Seasons 社のスタッフの方々にもご協力いただいた。本文を取りまとめるにあたり、ここに深く謝意を表します。

【参考・引用文献】

- Ageta, Y., Iida, H. and Watanabe, O. (1984): Glaciological studies on Yala Glacier in Langtang Himal. *Glacial Studies in Langtang Valley, Report of the Glacier Boring Project 1981-82 in the Nepal Himalaya*, 41–47.
- 内藤 望, 2001 : ネパール・ヒマラヤにおける近年の氷河縮小. 雪氷, **63**, 207–219.
- Fujita, K., Takeuchi, N. and Seko, K. (1998): Glaciological observations of Yala Glacier in Langtang Valley, Nepal Himalayas, 1994 and 1996. *Bulletin of Glacier Research*, **16**, 75–81.
- Watanabe, O., Takenaka, S., Iida, H., Kamiyama, K., Thapa, K. B. and Mulmi, D. D. (1984): First Results from Himalayan Glacier Boring Project in 1981-1982, Part I. Stratigraphic analyses of full-depth cores from Yala Glacier, Langtang Himal, Nepal. *Glacial Studies in Langtang Valley, Report of the Glacier Boring Project 1981-82 in the Nepal Himalaya*, 7–23.