特別寄稿

ヒマラヤにおける 氷河変動

名古屋大学大学院 環境学研究科 准教授 藤田 耕史

著者紹介

略歷

1992年 京都大学理学部地球物理学科卒業 1998年 名古屋大学大学院理学研究科退学 1998年 名古屋大学大気水圏科学研究所助手 2001年 名古屋大学環境学研究科准教授

専門はアジアの氷河変動とアイスコアの観測と研究。
2002年から2004年にかけて、第44次南極地域観測隊として、
南極内陸のドームふじ基地にて越冬。
最近は現地観測とリモートセンシング、数値実験の融合に力を入れている。
著書に「ヒマラヤと地球温暖化一消えゆく氷河(分担)」(昭和堂)









特別寄稿

ヒマラヤにおける氷河変動 Changes in Himalayan Glaciers

名古屋大学大学院環境学研究科

准教授 藤田 耕史 Associate Professor Koii Fulita



要旨

世界各地に点在する氷河のうち、アジア地域には約15%が存在しているが、その変動の実態は把握されていなかった。ヒマラヤにおける氷河研究は、1970年代に日本の若手研究者らによって観測が始められ、1990年代における著者らの集中的な観測によって、急速に縮小していることが明らかになった。本稿では、氷河の変動の仕組みとその観測手法、ヒマラヤにおける氷河変動の実態とその原因について紹介する。

Abstract

Glaciers in the Asian highland, which account for 15% of glaciers worldwide, have not been well investigated. Japanese young scientists have launched researches for Himalayan glaciers in the 1970s. Our observations in the 1990s revealed rapid shrinkage of the glaciers. I introduce a basic of glacier fluctuations, observation methods, changes in Himalayan glaciers and causes of the rapid shrinkage in this paper.

1 はじめに

我々人類が生きていく上で欠かせない淡水のうち、7割は氷床・氷河などの「氷」として存在しており、地球の気候システムにとって極めて重要な役割を担っている。これらの氷のうち、9割は南極、1割はグリーンランドに「氷床」として存在し、全て融けきった場合、海水準にして $70\sim80\,\mathrm{m}$ に相当する。その一方で、残りの1% に満たない氷は山岳氷河や氷帽として世界各地に分布しており、その数は $16\,\mathrm{T}$ 、面積にして $785\times10^3\,\mathrm{km}^2$ あるとされている。氷河・氷帽は量的には圧倒的に少ないものの、氷床に比べて気候変化への応答が早いため、百年程度の時間スケールでは、海水準の変化の約 $3\,\mathrm{G}$ の $1\,\mathrm{t}$ は氷河の変化によってもたらされている(約半分は水温上昇による海水自体の膨張である)。

図1 チベット高原を中心とするアジア高山域(NASA World Wind) Fig.1 Asian highland around Tibetan Plateau. (drawn by NASA World Wind)

チベット高原を中心とするアジア高山域には(図1)、 全氷河面積のうち 15%、116 × 103km2 の氷河がある が、旧ソ連の中央アジアの国々(キルギスタン、ウズ ベキスタンなど)や、中国の天山山脈において継続的な 観測が行われている。以外は、氷河変動の実態は明ら かでなかった。特にヒマラヤ山脈は、地球上でも最も 標高の高い地形が集中し、第三の極ともいえる場所で あるが、地政学的に極めて微妙な場所ゆえに、調査が ほとんど行われていなかった。そんな中、1970年代に 初めてネパールにおける氷河観測を主導したのが名古 屋大、京都大、北海道大を中心とした研究グループで あり、当時の大学院生らが中心となって企画、観測を 行った。筆者は1990年代に名古屋大学大学院に入学 し、1970年代から1990年代にかけての氷河変動の実 態を明らかにしてきた。本稿では、ヒマラヤにおける 氷河変動について、その急速な縮小の実態とその原因 について紹介する。

2 氷河の質量収支

氷河は「自らの重量で常に流動する氷の固まり」として定義され、その規模の変動は、氷河を構成する氷の収支、「質量収支」によって支配される(図2)。氷河にとって収入となる降雪は「涵養」として、主に融解によって氷河から失われる氷の損失量(支出)は「消耗」

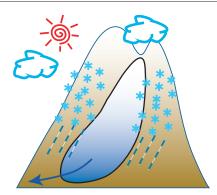




図 2 氷河の質量収支の概念図。右は中央チベットのドンケマディ氷河写真。 Fig.2 Concept of glacier mass balance (left) and photo of Dongkemadi Glacier on the central Tibet (right).

と定義される。そして、氷が流動することによって、上流で積もり、下流で融けることによるアンバランスを補完し、氷河の形が維持される。氷河は「寒い地域」にあると思われることが多いが、氷にとっては悪条件である「消耗する領域」が必ず含まれることは、留意すべき事項である。氷河の規模の変化は、この収支のバランスが変化することによって生じており、それゆえに気候変化を目に見える形で表す貴重な指標といえる。

いる。このようなステークを氷河上にまんべんなく設置し、半年ないし一年の間隔を置いて、雪や氷の密度とともに測定することで、氷河全体の質量変化が求められる。計測自体は簡便であるが、一度ステークが雪に埋没したり、融解によって倒れてしまったりするとその期間のデータが失われてしまうため、ステークをいかにメンテナンスするかが継続的なデータを得る上で重要となる。しかし、労力に対して得られるデータ

3 氷河質量収支の計測

氷河の質量収支を定量化するために採用されている 観測方法は、拍子抜けするほど単純なものである(図 3)。氷河上に竹やアルミなどの棒を設置し、ある一 定の時間をおいて氷河の表面から上に出ている部分の 「高さ」の変化を測る。ステーク高が短くなっていれば、 その場所が測定期間中に降雪によって涵養されている ことを示しており(写真 1)、長くなっていれば融解も しくは昇華蒸発によって消耗していることを意味して

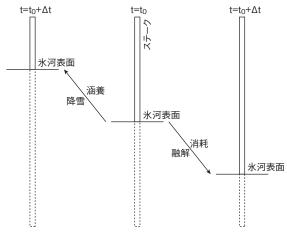


図3 ステーク法の概念図

Fig.3 Mass balance measurement by stake method.





写真 1 キルギス天山のグレゴリア氷河最上部(4600 m)に設置した自動気象計。2006 年(左)から 2007 年(右)にかけて積雪(涵養)によって埋まっている様子がわかる。

Photo1 Height change in automatic weather station on the top of Gregoriev Glacier, Kyrgyz Tienshan between 2006 (left) and 2007 (right) shown as an example of stake method.

の少なさゆえに、30年以上継続して質量収支が計測されている氷河はわずか39しかなく、気候変化への関心が高まりつつある現在においても、旧ソ連の崩壊や世界経済の悪化にともない、減少の一途をたどっている。

4 測量による長期変化の観測

日本に拠点を置く我々が、ヒマラヤの氷河でステーク法による質量収支観測を継続することは、財源的にも人的資源の面でも現実的でなく、これまで5年以上の連続観測は行われていない。このため、次善の策として行っているのが、測量による長期変化の観測である。これは、時代の異なる2枚の地図を比較することにより、氷河表面の高さの変化を算出するものである(写真2)。氷河周辺の岩盤地形に基線を設定し、そこからの相対的な角度と距離をレーザー測距儀によって測り、氷河の地図をつくる。最近では、複数の高精度



写真 2 ブータン・ガンジュラ氷河における測量風景 Photo2 Survey of Ganju La Glacier, Bhutan.

GPS を使う観測の測定精度の向上により、短期間の変化もとらえられるようになっている(図4)。

ヒマラヤにおける氷河変化は、先達が 1970 年代に測量したデータを元にしている。古いものでは 1950 年代にインド測量局が作製した地図があることがわかっているが、主に地政学的な理由から我々がその原図を入手することは極めて難しい。1990 年代に足繁くネパールに通い、測量を繰り返した結果、3 つの氷河についてその質量変化を得た(図5)。この中でも AX010 氷河は、その変化の写真がさまざまなメディアに取り上げられ、ヒマラヤにおける氷河縮小の象徴にもなっている (写真3)。

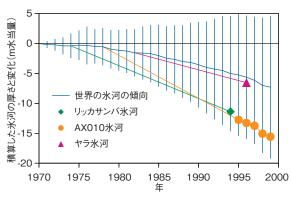
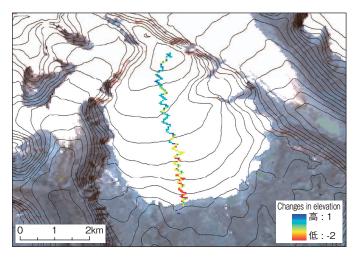


図5 ヒマラヤにおける氷河の質量変化。青い線は継続的に観測データがある39の氷河の平均と最大最小の範囲。

Fig.5 Volume changes in Himalayan glaciers. Blue line denotes average of continuous mass balance records worldwide with their variability.



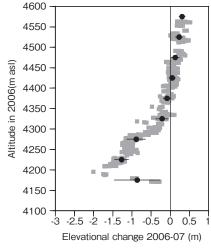


図 4 キルギス天山のグレゴリア氷河における GPS 測量の結果。2006 年と 2007 年の測点が交差する点における標高変化を求めた(左)。氷河の上部で涵養によって標高が高くなり、下部で融解によって氷河が薄くなっている様子がわかる(右)。画像はランドサットの可視画像、標高線はスペースシャトルのミッションで作成された全球標高データ SRTM を元に作成。

Fig.4 GPS surveys on Gregoriev Glacier, Krygyz Tienshan conducted in 2006 and 2007. Height changes at cross-points of the two measurements are depicted over Landsat visible image (left). Contour lines are drawn with Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Height changes between 2006 and 2007 shows height gain at upper elevation by accumulation and lowering at lower elevation by ablation (right).



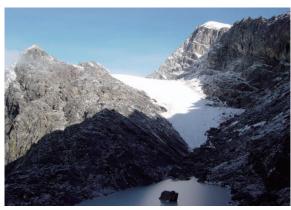
1978年



1989年



1998年



2004 年

写真 3 東ネパール・AX010 氷河の変化 Photo3 Changes in Glacier AX010, Shorong region, east Nepal.

5 急激な氷河縮小の原因

我々の観測は、わずか3例とはいえ、世界の他の地 域の氷河に比べ、ヒマラヤにおける氷河縮小が急速に 進んでいる様子を定量的に示した。この結果は何を意 味するのだろうか?「ヒマラヤでは余所よりも温暖化 が進んでいる?」とも考えたくなるが、ヒマラヤの4 千mを越える高所での気象観測は1990年代に始まっ たばかりで、温暖化云々を議論できるほどデータの蓄 積はない。比較的長期の観測データがあるチベット側 のデータを解析した研究によって、温暖化の事実はあ るものの、顕著な昇温は冬季に限定され、氷河の融解 に影響する夏季の温暖化はそれほど顕著でないことが 明らかになっている。一方、アメリカと中国の研究グ ループがヒマラヤ北面で掘削した「アイスコア」の分 析から、20世紀の100年間で降雪量が減少し続けてお り、氷河を形成する氷の供給量の減少が、温暖化によ る融解の増加を後押しする形で急速な氷河縮小をもた らしていることが示唆されている。

我々のグループはさらに、ヒマラヤ特有の気候に着 目した解析を行っている。古くから氷河の観測・研究が 行われてきた欧米の気候は冬に降水が集中するが、ア ジア地域はモンスーンの影響により夏季に降水が集中 する。この降水の季節性の違いが氷河の応答の仕方に も影響しているであろうという仮説に基づき、気候変 化(具体的には気温変化)に対する氷河の応答について、 数値実験に取り組んでいる。数値計算では、氷河上にお ける熱のやりとりを計算するモデルを構築し、実際の 観測データで検証を行ったのち、仮想的に温度を変え て氷河の応答を求めるという手順を踏んでいる。降水 の季節性についての一例を図6に示す。赤の夏雪型は アジアのモンスーン気候を、青の冬雪型は欧米の気候 を想定している。この降水パターンを保ったまま、降 水量を増減させ、氷河が定常的に存在しうる気温条件 (すなわち、年間の質量収支が0となる条件)を探した 上で、そこから一律に 1℃の温暖化を与えた時の「氷 河の融け具合|を求める。

このような計算によって求めたのが図7である。先行研究(黒線)では、降水量が多い地域の氷河ほど同じ1℃の温暖化に対して融けやすいことが示されていた。氷河全体で質量がバランスするためには、降った分だけ雪が融ける必要があるため、降水量が多いほど氷河はより暖かい場所に存在する。このような気候下で温暖化すると、融解に影響する正の気温が多くなり融解

量が増えるため、降水量が多いほど同じだけの温暖化 に対して氷河は良く融けることになる。

この関係式を応用すれば、ある地域の降水量と気温の変化がわかればその地域における氷河の縮小の程度を見積もることが可能になり、温暖化による海水準上昇の見積もりなどに利用されている。さらに、同様の計算を図6の仮想的な降水パターンを用いて行った結果、夏雪型の氷河(赤線)は冬雪型の氷河(青線)に比べ、ほぼ倍の融けやすさを持つことが示された。これは、個別の氷河で得られた気象と質量収支の関係をみた結果(記号)とも良く一致している。このことは、「同じだけ温暖化した場合、ヒマラヤの氷河の方が欧米の氷河よりも縮小しやすい」ということを意味しており、20世紀後半のこの地における急速な氷河縮小は、温暖化の進行程度よりも、モンスーン気候下の氷河が内包する特性ゆえに生じている現象であるといえる。

温暖化にともなって氷河上でおきる事象を示した概 念図を図8に示しつつ説明する。モンスーンの影響に より、ヒマラヤでは一年間に降る降水のほとんどが夏 にもたらされる。氷河にとってほど良い環境では、こ の夏季の降水は「雪」として降る。この雪は氷河を形 成する材料そのものであるだけでなく、太陽光に対す る反射率が高く、氷河の融解を抑制する効果がある。こ の状態から温暖化すると、それまで雪で降っていた降 水が「雨」として降るようになる。雨自体に雪を融か す効果はほとんどないものの、それまで白く氷河の表 面を覆っていた雪が降らなくなることで、温暖化する 前よりも吸収される太陽光が格段に多くなり、融解が 激増する。この結果、温暖化は、氷河にとっての収入 である「雪」を減らす上に、支出となる「融解」も促 進させるという、二重の効果で氷河を縮小させること になる。欧米の冬雪型の氷河では、もともと夏の降雪 がほとんどなく、温暖化によって雪から雨になる効果 は無視できるため、夏雪型ほど融解は増えない。

以上の結果は、気候変化に対する氷河の応答が、これまで説明されてきた年降水量だけでは表現できないことを意味しており、海水準上昇への氷河縮小の影響を見積もる上で、アジアの氷河の影響が過小評価されていることを示唆している。他方、氷河の変動から気温変化を推し量る場合には、アジア地域の温暖化の進行具合を過大評価してしまうことになる。ヒマラヤの氷河の急速な縮小は、わずかな温暖化にも敏感に応答するこの地の氷河の特性と、降雪量の減少が相乗的に影響していることの現れであり、「気温上昇(=温暖化)

による氷河縮小」という単純な因果関係では必ずしも 説明できないのである。

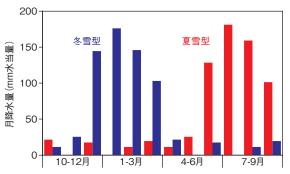


図 6 降水パターンの冬雪型(青)と夏雪型(赤)の例 Fig.6 Precipitation patterns for winter-type (blue) and summer-type (red).

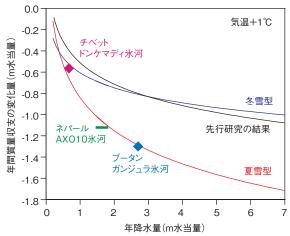


図7 1℃の温暖化に対する氷河の応答。黒線は先行研究の例。青と 赤の線は図6で示した降水パターンを用いた結果。記号はア ジアの氷河についての結果。

Fig.7 Sensitivities of glaciers to 1°C warming. Black line denotes a result from previous study. Blue and red lines denote results from different precipitation patterns shown in Fig.6. Symbols are of case studies for Asian glaciers.

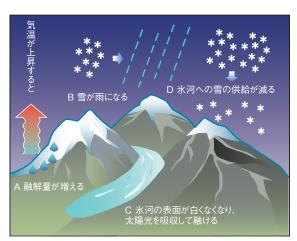


図8 ヒマラヤにおける氷河縮小の主要因。欧米の氷河では、A の効果だけが作用する。

Fig.8 Schematic figure explaining causes of shrinkage of Himalayan glaciers by warming. Only the process 'A' causes melt increase by warming on Euro-American glaciers.

6 最後に

氷河は「温暖化のカナリア」といわれる。我々の研究は、そのカナリアの「強さ/弱さ」にも、地域差があることを明らかにした。とかく「温暖化」のみが取り上げられがちな昨今であるが、自然現象がかように単純な因果関係で成り立っているはずも無く、現場を知る者としていかに多面的な視点を維持していけるかが課題だと感じている。

これまでの観測・研究によって、ヒマラヤにおける 氷河変動の実態を明らかにしてきたが、わずか数点の 観測データでは、ヒマラヤ全体の氷河変化を代表して いるとはいえない。現在、より広域での氷河変動量を 明らかにするために、衛星データを元にしたデジタル 標高データの作成を進めている。もちろん、これらの データを現地測量観測によって検証していかなければ ならないことはいうまでもない。

参考文献(主著者のみ)

- Fujita K, Seko K, Ageta Y, Pu J, Yao T (1996) Superimposed ice in glacier mass balance on the Tibetan Plateau. J Glaciol 42, 454-460.
- [2] Fujita K, Sakai A, Chhetri TB (1997) Meteorological observation in Langtang Valley, 1996. Bull Glacier Res 15, 71-78.
- [3] Fujita K, Nakawo M, Fujii Y, Paudyal P (1997) Changes in glaciers in Hidden Valley, Mukut Himal, Nepal Himalayas, from 1974 to 1994. J Glaciol 43, 583-588.
- [4] Fujita K, Takeuchi N, Seko K (1998) Glaciological observations of Yala Glacier in Langtang Valley, Nepal Himalayas, 1994 and 1996. Bull Glacier Res 16, 75-81.
- [5] 藤田耕史. (1998) チベット高原の寒冷氷河における 上積氷の研究. 雪氷 60, 379-385.
- [6] Fujita K, Ageta Y (2000) Effect of summer accumulation on glacier mass balance on the Tibetan Plateau revealed by mass-balance model. J Glaciol 46, 244-252.
- [7] Fujita K, Ageta Y, Pu J, Yao T (2000) Mass balance of Xiao Dongkemadi Glacier on the central Tibetan Plateau from 1989 to 1995. Ann Glaciol 31, 159-163.
- [8] Fujita K, Sakai A (2000) Air temperature environment on debris-covered area of Lirung Glacier, Langtang Valley, Nepal Himalayas. Int Assoc Hydrol Sci Publ 264, 83-88.

- [9] Fujita K, Nakazawa F, Rana B (2001) Glaciological observations on Rikha Samba Glacier in Hidden Valley, Nepal Himalayas, 1998 and 1999. Bull Glaciol Res 18, 31-35.
- [10] Fujita K, Kadota T, Rana B, Kayastha RB, Ageta Y (2001) Shrinkage of Glacier AX010 in Shorong region, Nepal Himalayas in the 1990s. Bull Glaciol Res 18, 51-54.
- [11] 藤田耕史. (2001) アジア高山域における氷河質量収 支の特徴と気候変化への応答. 雪氷 63, 171-179.
- [12] Fujita K, Nakazawa F, Takeuchi N, Nakawo M, Rana B, Azuma N, Fujii Y (2002) Ice core drilling on the southern slope of Nepal Himalayas. Memoir Nati Inst Polar Res Spec Issue 56, 59-66.
- [13] Fujita K (2002) Impact of dust on glacier mass balance of the Tibetan Plateau. J Arid Land Studies 11, 355-360.
- [14] 藤田耕史・大田岳史・上田豊 (2003) チベット高原に おける寒冷氷河からの流出特性と気候変動に対する 応答予測. 水文・水資源学会誌 16, 152-161.
- [15] Fujita K, Takeuchi N, Aizen V, Nikitin S (2004) Glaciological observations on the plateau of Belukha Glacier in the Altai Mountains, Russia from 2001 to 2003. Bull Glaciol Res 21, 57-64.
- [16] Fujita K, Abe O (2006) Stable isotopes in daily precipitation at Dome Fuji, East Antarctica. Geophys Res Lett 33(18), L18503.
- [17] Fujita K, Sakai A, Matsuda Y, Narama C, Naito N, Yamaguchi S, Hiyama K, Pu J, Yao T, Nakawo M (2006) Topographical survey of July 1st Glacier in Qilian Mountains, China. Bull Glaciol Res 23, 63-67.
- [18] Fujita K, Thompson LG, Ageta Y, Yasunari T, Kajikawa Y, Sakai A, Takeuchi N (2006) Thirty-year history of glacier melting in the Nepal Himalayas. J Geophys Res 111, D03109.
- [19] 藤田耕史 (2006) 氷河変動と海水準に関する最近の研究. 雪氷 68,625-637.
- [20] Fujita K (2007) Effect of dust event timing on glacier runoff: sensitivity analysis for a Tibetan glacier. Hydrol Process 21(21), 2892-2896.
- [21] Fujita K, Ohta T, Ageta Y (2007) Characteristics and climatic sensitivities of runoff from a cold-type glacier on the Tibetan Plateau. Hydrol Process 21(21), 2882-2891.
- [22] Fujita K (2008) Influence of precipitation seasonality on glacier mass balance and its sensitivity to climate change. Ann Glaciol 48, 88-92.
- [23] Fujita K, Suzuki R, Nuimura T, Sakai A (2008) Performance of ASTER and SRTM DEMs, and their potential for assessing glacier lakes in the Lunana region, Bhutan Himalayas. J Glaciol 54(185), 220-228.