

藤田 耕史 Koji Fujita 名古屋大学 大学院環境学研究科 准教授

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、その変動の実態は必ずしも十分に把握されていない。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。

1 はじめに

われわれ人類が生きていくうえで欠 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きわめて重 要な役割を担っている (IPCC, 2007)。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、す べて融けきった場合、海水準にして70 ~80 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16万、面積にして785 × 10³ km²あ るとされている (Dyurgerov & Meier, 2005)。 氷河・氷帽は量的には圧倒的に少ない



(NASA World Wind)

図1 チベット高原を中心とするアジア高山域

ものの,氷床に比べて気候変化への応 答が速いため,100年程度の時間スケー ルでは,海水準の変化の約1/3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)(IPCC, 2007)。

チベット高原を中心とするアジア高 山域(図1)には、全氷河面積のうち15 %, 116 × 10³ km²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され 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、 地政学的にきわ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 古屋大学, 京都大学, 北海道大学を中 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



図2 氷河の質量収支の概念図(左)と中央チベットのドンケマディ氷河(右)

を行った(渡辺・上田, 2001)。筆者は1990 年代にヒマラヤの氷河を頻繁に訪れ, 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」と定 義される。そして, 氷が自らの重さに よって流動することにより, 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、留意すべき点である。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



図3 ステーク法の概念図

表す貴重な指標といえる。

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。氷河上に 竹やアルミなどの棒 [ステーク (stake)] 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,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 を意味している(図3)。ステーク高の 変化を氷の質量に換算するには,各地 点での積雪の密度を把握しておく必要 がある。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1 年の間隔を置いて測定することで,氷 河全体の質量変化が求められる(図4)。 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 "境保全の現分



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

図4 キルギスの氷河最上部 (4,600 m) に設置した自動気象計

タが失われてしまうため、ステークを 継続的にメンテナンスすることが連続 データを得るうえで重要となるが、労 力に対して得られるデータの少なさゆ 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 済の悪化に伴い,減少の一途をたどっ ている。

境保全の現と



図5 ブータン・ガンジュラ氷河における測量風景

|4| 測量による長期変化の観測|

日本に拠点を置くわれわれが、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 (Fujita et al., 2001)。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(図5)。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6)。

南米のパタゴニアやアラスカにおい ては、1950~1970年代における地図 との比較により広範囲での氷河変動の 様子が明らかになっているが (Arendt et al., 2002; Rignot et al., 2003), 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。この 地域には1950年代にインド測量局が 作成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、われ いえ、世界の他の地域の氷河に比べ、

われがその原図を入手することはきわ 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7) (Fujita *et al.*, 1997, 1998, 2001)。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 (図8) (Fujita et al., 2001)。

5 急激な氷河縮小の原因

われわれの観測は、わずか3例とは



2006年と2007年にGPS測量を行い,隔年の測点が交差する点における標高変化 を求めた。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。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





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

図7 ネパールヒマラヤにおける氷河の質量変化



図8 左から1978年, 1989年, 1998年, 2008年に撮影された東ネパール・AX010氷河の変化



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ものであ る。この結果は何を意味するのだろう か? 「ヒマラヤではよそよりも温暖化 が進んでいる?」とも考えたくなるが、 ヒマラヤの4,000 mを超える高所での 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(上野, 2001; Bollasina et al., 2002)。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 (Liu & Chen, 2000)。一方, アメ





ブータン

2

ガンジュラ氷河

黒線は先行研究の例 (Oerlemans & Fortuin, 1992)。青と赤の線は図8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

年降水量 (mm 水当量)

4

5

3

夏雪型

7

6

図10 1℃の温暖化に対する氷河の応答

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 (Duan et al., 2004)。

われわれ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。同様の解 析は,世界の氷河縮小が海水準上昇に もたらす影響に関する研究で行われて いる (Oerlemans & Fortuin, 1992; Raper & Braithwaite, 2006)。降水の季節性につい ての一例を図9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 がゼロとなる条件)を探したうえで、そ こから一律に1°Cの温暖化を与えたと きの「氷河の融け具合」を求める (Fujita, 2008)。

このような計算によって求めたのが 図10である。先行研究 (黒線, Oerlemans & Fortuin, 1992) では、降水量が多い地



-1.6

-1.8

0

1

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 対して氷河はよ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 (Oerlemans & Fortuin, 1992; Raper & Braithwaite, 2006)。さらに、同様の計算 を図9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 倍の融けやすさをもつことが示された。 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 もよく一致している。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(Fujita, 2008)。

温暖化に伴って氷河上で起きる事象 を示した概念図を図11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1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」を減らすうえに,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うえで、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

爆境保全の現分



欧米の氷河では、Aの効果だけが作用する

図11 ヒマラヤにおける氷河縮小の主要因

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。

6 さいごに

ここ半年ほどの間に、IPCC 第四次 報告書の信憑性に対する異議申し立て がなされ、特にそのきっかけともなっ たヒマラヤの氷河の行く末に対する関 心が高まっている (Bagla, 2009; Cogley et al., 2010)。今回のスキャンダルが明る みに出て以降、さまざまな人々が、さ まざまなメディアを通じ、さまざまな 発言をしているが、実際にヒマラヤの 氷河を観測している研究チームは片手 に余るほどしかいない。中でもわれわ れのグループは、先達より受け継いだ データを元に,比較的長期にわたる氷 河の変化の様相を明らかにしており. 「で、結局のところ、ヒマラヤの氷河は いったいどうなっているの?」という, 社会的な問いかけに対し,具体的数値 を提示できる数少ない立場にいると自 負している。本稿では示すことができ なかったが、ここ数年、1990年代以降 の氷河変動の実態を把握するための観 測を実施しており、 ヒマラヤの氷河の 縮小が、一部で加速していることを明 らかにしつつある。これらの成果をな るべく早く一般に公開すべく、準備を

進めているところである。

氷河は「温暖化のカナリア」といわれる。本稿で紹介したわれわれの研究は、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なく、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。

[文 献]

Arendt, A. A., Echelmeyer, K. A., Harrison, W. D., Lingle, C. S. & Valentine, V. B. (2002) *Science*, **297**, 382–386.

Bagla, P. (2010) Science, 326, 924-925.

Bollasina, M., Bertolani, L. & Tartari, G. (2002) Bull. Glaciol. Res., 19, 1-11.

Cogley, J. G., Kargel, J. S., Kaser, G. & van der Veen, C. J. (2010) *Science*, **327**, 522.

Duan, K. Q., Yao, T. D., Thompson, L. G. (2004) *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L16209.

Dyurgerov, M. B. & Meier, M. F. (2005) *Glaciers* and the changing earth system: A 2004 snapshot— INSTAAR Occasional Paper No. 58, Boulder, Colorado.

Fujita, K., Nakawo, M., Fujii, Y. & Paudyal, P. (1997) *J. Glaciol.*, **43**, 583–588.

Fujita, K., Takeuchi, N. & Seko, K. (1998) *Bull. Glacier Res.*, **16**, 75–81.

Fujita, K., Kadota, T., Rana, B., Kayastha, R. B. & Ageta, Y. (2001a) *Bull. Glaciol. Res.*, 18, 51–54.

Fujita, K. (2008) Earth Planet. Sci. Lett., 276 (1-2), 14-19.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007) Climate change 2007: The physical science basis—Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC, Cambridge University Press, Cambridge and New York.

Liu, X. D. & Chen, B. (2000) Int. J. Climatol., 20, 1729–1742.

Oerlemans, J. & Fortuin, J. P. F. (1992) *Science*, **258**, 115–117.

Raper, S. C. B. & Braithwaite, R. J. (2006) *Nature*, **439**, 311–313.

Rignot, E., Rivera, A. & Casassa, G. (2003) *Science*, **302**, 434–437.

上野健一. (2001) 雪氷, 63 (2), 201-205.

渡辺興亜, 上田豊. (2001) 雪氷, 63 (2), 147-157.

勝田 和 名古屋大学: 略 歴:199



藤田 耕史 Koji Fujita 名古屋大学 大学院環境学研究科 准教授

A 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,名古屋大学大気水園科学研究所助手。2001年より現職。 受賞歴:中谷宇吉郎科学奨励賞(1998年),日本雪氷学会平田賞(2002年),日本雪氷学 会論文賞(2007年)
- 専門:アジアの氷河変動とアイスコアの研究。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。最近は現地観測とり 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:[分担執筆]『ヒマラヤと地球温暖化:消えゆく氷河』(昭和堂)など

境保主の現