HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ネパール・ヒマラヤの氷河変動 ： 水資源は枯渇するのか
Author(s)	朝日, 克彦
Description	平成25年度北海道大学低温科学研究所共同利用研究集会『氷河変動の地域性に関する地理的検討』. 2013年6月17日-18日. 北海道大学低温科学研究所, 札幌市.
Relation	朝日克彦編, 平成25年度北海道大学低温科学研究所共同利用研究集会『氷河変動の地域性に関する地理的検討』報告書. 北海道大学低温科学研究所, 2014, iii, 46p.
Citation	平成25年度北海道大学低温科学研究所共同利用研究集会『氷河変動の地域性に関する地理的検討』報告書, 12-17
Issue Date	2014-05
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/56260
Type	conference paper
File Information	12.asahi.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

ネパール・ヒマラヤの氷河変動：水資源は枯渇するのか

Glacier variations in Nepal Himalayas: implications for water resource depletion

朝日克彦（信州大）*
Katsuhiko ASAHI (Shinshu Univ.)

キーワード：ネパール・ヒマラヤ，氷河縮小，氷河融解水，水資源，枯渇
Key wards: Nepal Himalayas, glacier shrinkage, glacier-melt water, water resource, depletion

1．はじめに

「ヒマラヤの氷河は世界のどこよりも急速に後退しており，近い将来ヒマラヤから氷河が消滅する．またアジア 14 億の人口がヒマラヤの氷河を起原とする河川水を水資源としており，水資源不足が懸念される」　これは，IPCC 第四次評価報告書第２作業部会のヒマラヤの氷河に関する記述に象徴されるように，今日広く流布している認識である．この言説は果たして事実なのか．フィールドでの参与観察およびデータから検証する．

2．ヒマラヤの氷河形成気候

ヒマラヤはアッサムのナムチャバルワからパキスタンのナンガパルバットまで東西 2400km に及ぶ大山脈である．その北側に広がるチベット高原と併せ顕著に標高が高い山域が広がっている．この山塊が大気循環の駆動力となり，地域の気候条件を規定している．冬季には拡大した同心円を循環する偏西風はヒマラヤ山脈の南側を東進する．春になるとこの偏西風はチベット高原の北側へ経路がシフトする．また冬季は積雪により冷源となっていたチベット高原は日射を吸収して熱源となり低圧帯を形成する．この補償流としてインド洋から湿った大気が北上する．北上する大気の流れはコリオリの力により東に傾き南西の季節風となる．いわゆる南西モンスーンである．この南西モンスーンによりヒマラヤ南斜面に大量の降雨がもたらされる．アラビア海を北上するモンスーンはインド亜大陸の西ガーツ山脈に地形性の降水をもたらしその背後はステップ帯になる．しかしベンガル湾を北上するモンスーンはヒマラヤ山脈に阻まれ，ヒマラヤ山脈に沿って西進し降水をもたらす（図１）

したがってヒマラヤの降水量を概観すると東ほど多く西で少ない．世界最多雨のチェラプンジはベンガル湾のすぐ北に位置する．この夏季モンスーンがほとんど到達しないヒマラヤ最西部やその西隣のカラコルム山脈やヒンドゥクシュ山脈では上述の偏西風擾乱による冬季の降水が顕著である．

このように，ヒマラヤ山脈は夏季に顕著な降水があり年降水量の７～８割が６～９月の雨季に集中する．すなわち一般的な北半球と異なり，気温の高い夏季に標高の高い場所で降雪があり氷河を涵養している．同時に，氷河の消耗域では消耗が生じ，涵養と消耗が同時期に生じている．したがって，僅かな気温上昇でも，１）昇温により消耗量が増加する，２）氷河上でそれまでの降雪が降雨に変化しうるため，氷河の涵養量が減少する，３）降雨による顕熱が氷の融解を促進する，４）積雪被覆域が裸氷に変わるためアルベドが低下し，氷の消耗が促進される，５）氷上に藻類が繁茂しアルベドが低下する，といった複数のフィードバック効果によって，より一層氷河が縮小，後退し易い．北半球一般でいえば，夏季気温の上昇は消耗量を増加させうるだけであるが，この点が大きく異なり，ヒマラヤの氷河の特徴といえる．

3．ネパール・ヒマラヤの氷河変動

東西に長いヒマラヤ山脈のうち，そのほぼ中央部をなすのがネパール・ヒマラヤである（図２）．南西モンスーンの強い影響により夏季の降水が年降水量で卓越する．ネパール東部の体表的山域であるエベレスト山域において，わが国の研

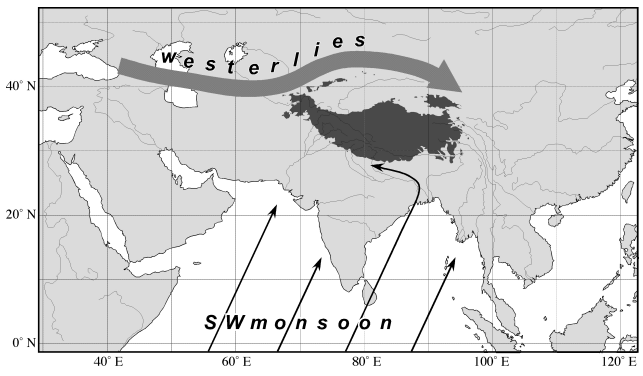


図１　ヒマラヤ山脈を取り巻く気候環境
黒い網掛けは標高 4000m 以上

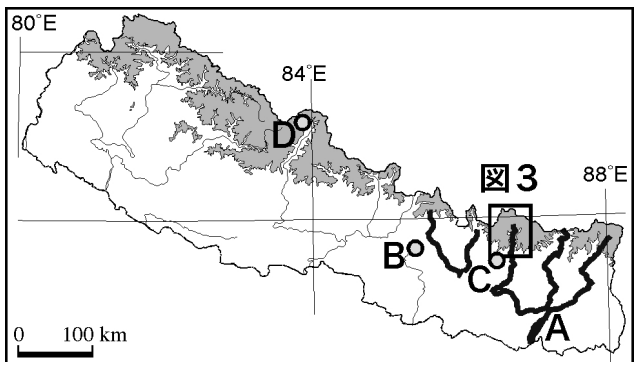


図２　ネパール・ヒマラヤ
黒い網掛けは標高 4000m 以上．A: コシ川水系，B: カトマンズ，C: チアルサ，D: ムスタン

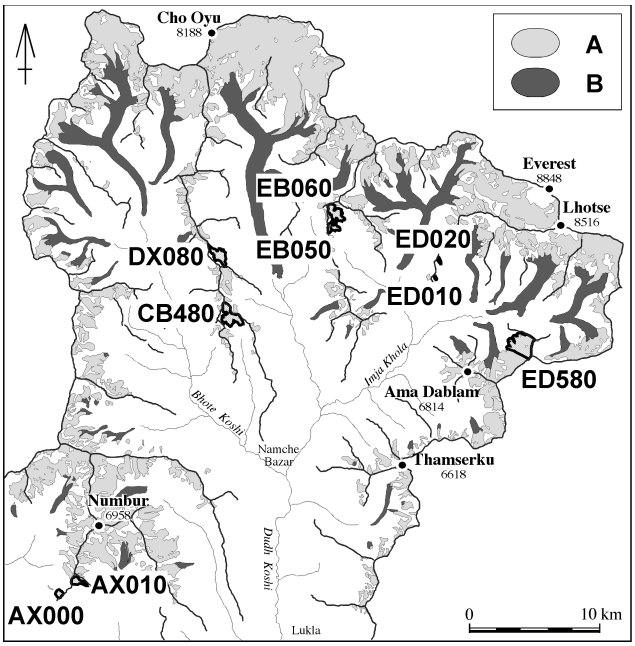


図３　エベレスト山域における末端観測が行われている小型氷河
A：裸氷域，B：岩屑被覆域

究グループは 1970 年以降，９ヶ所の氷河で末端位置の変動を定点観測している（図３）．いずれも裸氷からなる小型氷河である．したがって気候変動により敏感に応答していると考えられる．一例として９ヶ所のうち EB050 氷河について，末端位置の測量結果（図４）および定点写真（図５）を示す．観測期間 36 年間では末端位置は継続して後退している．また定点写真において氷河背後の山に着目すると氷厚も年々薄くなっている様子が分かる．９ヶ所の氷河の末端観測結果をまとめたのが図６である．図は横軸が観測した年，縦軸は１目盛が 100mの末端後退を意味する．実線が右下がりであれば氷河末端の後退を意味し，実線の傾きが急になれば後退速度が速まっていることを意味する．９ヶ所いずれの氷河も

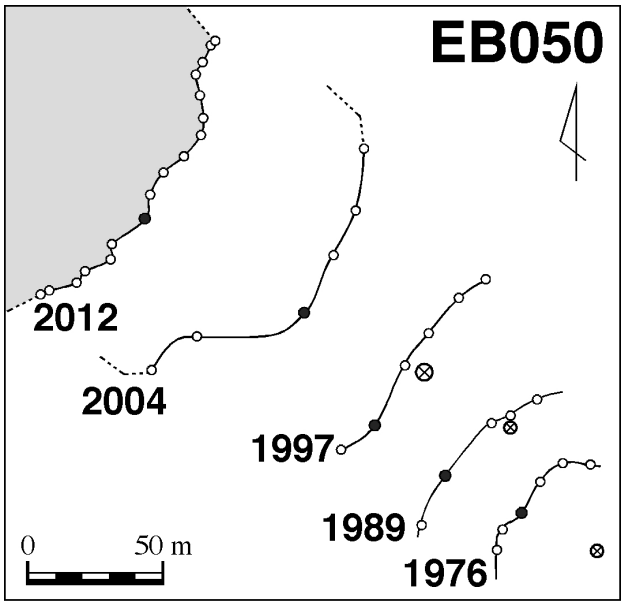


図４　EB050 氷河末端後退の観測図
丸印は測点を表す．

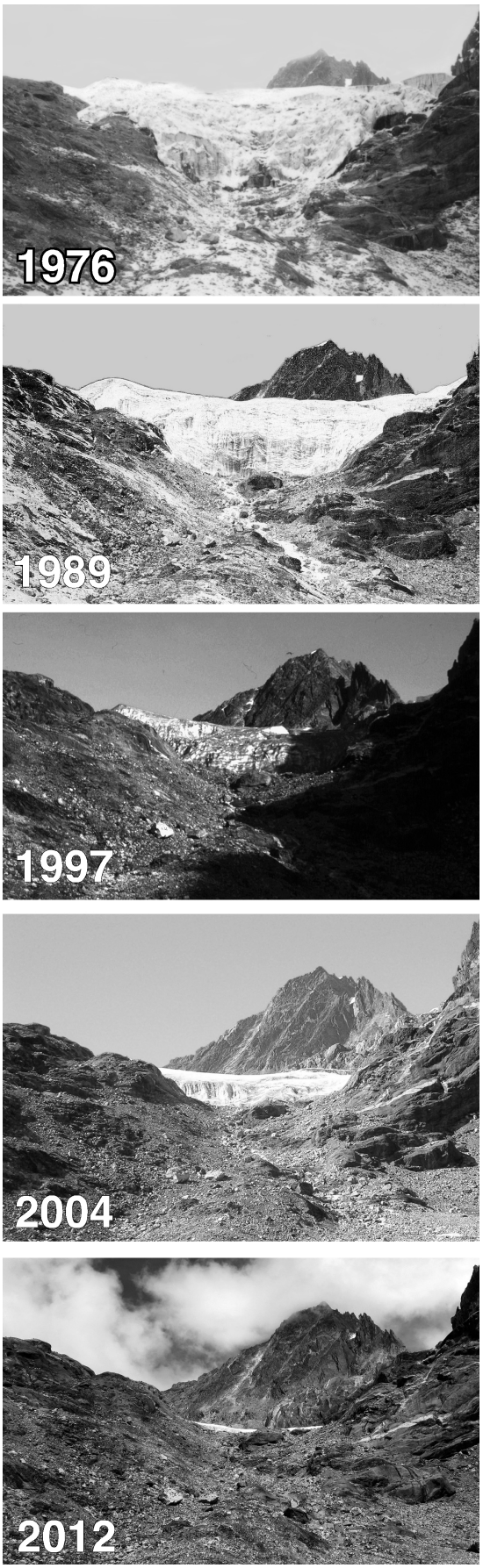


図５　エベレスト山域，EB050 氷河の末端変動の様子
1976 年，1989 年の写真は氷河情報センター提供

観測期間中，末端後退が継続していた．また後退速度の変化は，AX010 氷河でやや顕著に後退が加速しているが，このほかは概ねコンスタントに後退が継続している．或いは，今世紀に入ってから後退速度がやや鈍化している氷河もある．

アジアにおいてこのように末端観測が中期的に継続している氷河はたいへんに貴重であるが，全体の中ではごく一部の観測事例にとどまる．そこで空中写真判読によって氷河末端変動の面的な傾向を把握する．1992 年にネパール測量局が撮影した空中写真を実体視判読し，エベレスト山域の詳細な氷河分布図（氷河目録）を作成した．この分布図と 1958 年撮影空中写真から作成されたインド測量局 1 インチ／1 マイル地形図に描かれた氷河の輪郭とを比較する．ただし地形図に描かれた氷河の形状の正しさは担保されているとは言い難い．そこで空中写真判読の結果と比較してその形状が妥当だと判断された氷河のみを対象にして比較した（朝日，2001）．

エベレスト山域には 383 の氷河が現存する．このうち末端変動を検討したのは 178（46.5%）である．1958-1992 年の 34 年間での末端変動を検討した結果，末端位置が後退していた氷河は 107（60.1%），変化なしが 62（34.8%），前進が 9（5.1%）であった．なお検討した総数 178 個体のうちＣ型氷河は 139（78.1%），Ｄ型氷河は 39（21.9%）である（図７）．

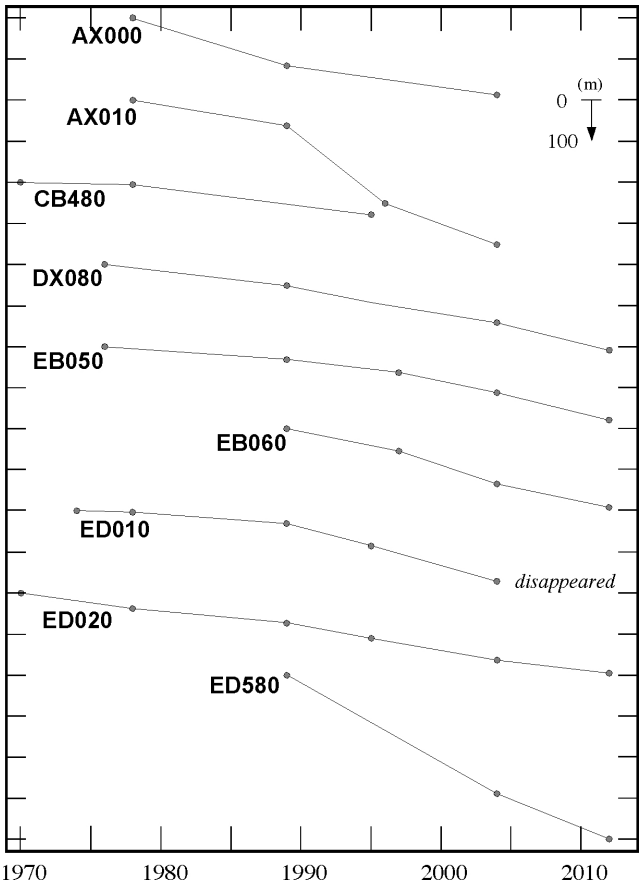


図６　エベレスト山域における９ヶ所の小型氷河の 1970 年以降の末端変動
丸印は末端位置の観測年次

検討した氷河のうち半数以上が後退していたことから多くの研究で指摘されているように，変動傾向は後退が卓越していることを裏付けている．一方で多数のＣ型氷河を含め１／３が停滞，５％が前進しているという事実も見逃してはならない．ヒマラヤの氷河変動に関しては後退ばかりが強調されているが，すべての氷河が後退している訳ではないことは常に考慮しておく必要がある．

４．氷河後退の背景

世界的に 1840 年をピークとする小氷期の氷河拡大から漸次気温上昇する気候状態に対応して氷河は縮小傾向にある．ネパールの場合，小氷期の氷河拡大は 1900 年頃まで継続し，それ以降後退を始めたと考えられる．エベレスト山域南方，AX010 氷河の南，約 25km 地点のチアルサ（Chialsa；標高 2770m）がエベレスト広域圏において 1967-1998 年の気温観測データが存在する．このデータについて年平均気温，夏季最高気温・最低気温の変化をまとめると（図８），夏季最低気温の上昇が最も大きく，10 年で 0.61ºC の割合で上昇している．上述のように夏季最低気温の上昇は降雪を効果的に降雨に代えうる．したがって，この夏季最低気温の上昇傾向が氷河の後退傾向に大きく寄与しているものと推察される．

５．氷河融解が水資源に及ぼす影響

WWF Nepal（2005）をはじめ多くの論考において，「ヒマラヤの氷河融解は顕著であり，近い将来の消滅が危惧される．アジアの大河川はヒマラヤ･チベットの氷河を起原としており，流域 14 億人の水資源が危機にさらされる･･･」との言説がなされている．地球温暖化の被害者の典型としてネパール

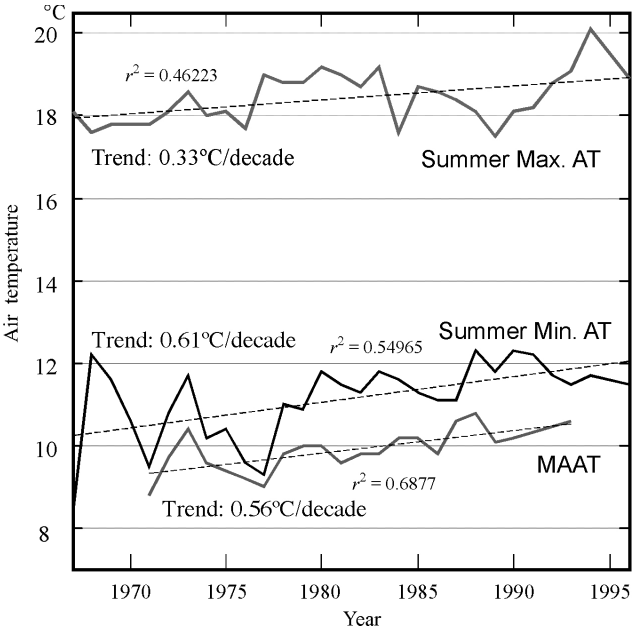


図８　エベレスト山域南方，チアルサにおける 1967 年以降の気温変動．チアルサの地点は図２参照

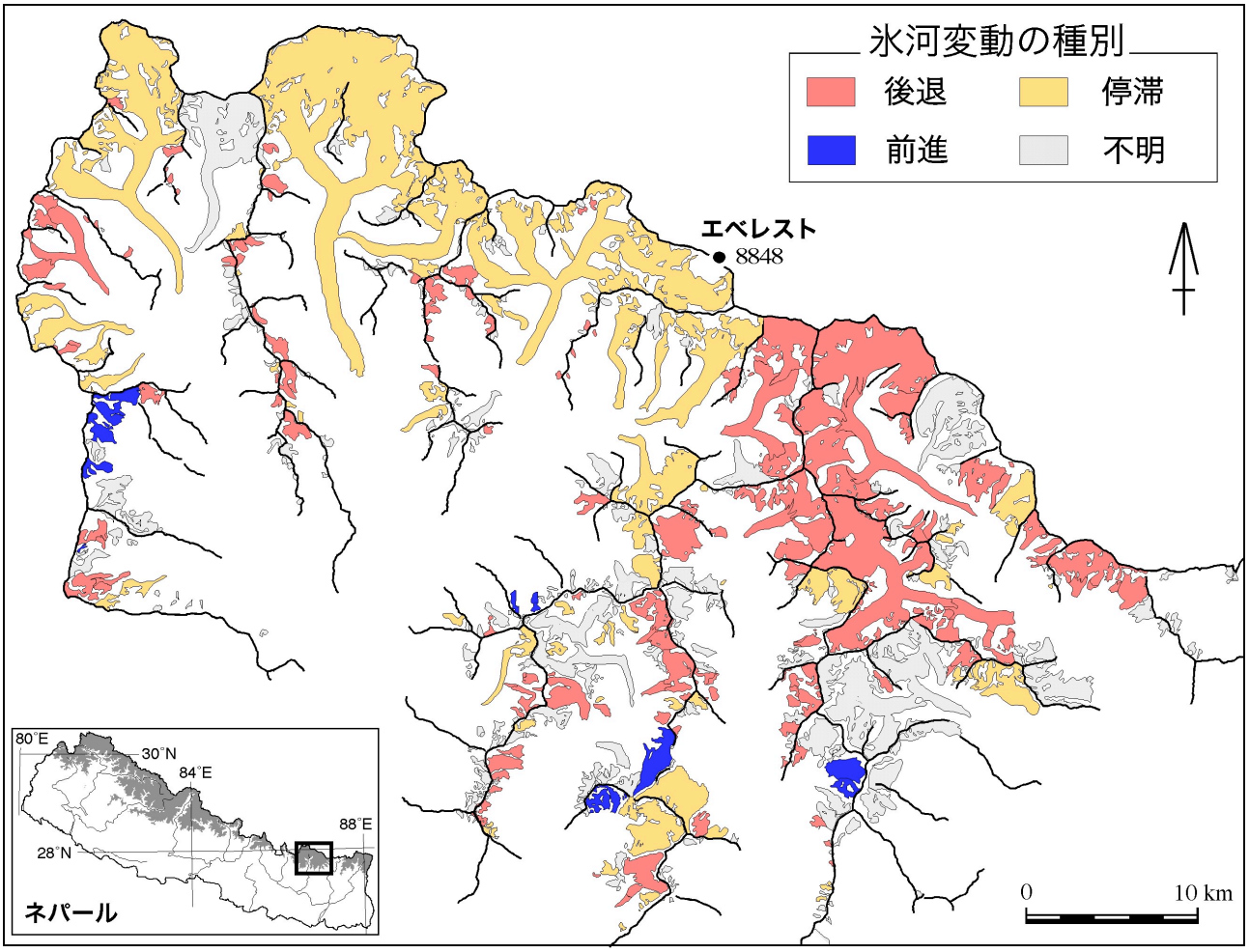


図７　エベレスト山域における，1958-1992 年の氷河末端変動のまとめ

が扱われている．言説の様なことははたしてあり得るのか．水資源の観点に絞って考察したい．

２章で記述のとおり，ネパール・ヒマラヤは南西モンスーンの強い影響下にある．ベンガル湾からの湿った大気の流れがヒマラヤの地形性の上昇気流によって降水をもたらす．そのためヒマラヤ南面の山麓部で特に降水量が多くなり，年降水量は 2000 mm を越える．図９ではA）でエベレストを源流とするドゥドゥコシ川流域，B）では 8000m級のアンナプルナ，ダウラギリを越えてヒマラヤ北面から貫流するカリガンダキ川流域での月別平均降水量を表している．山麓で 2000 mm を超える降水量は山中に入るにしたがって減少し，ヒマラヤ山脈主脈を越えた北面では 200ｍｍないしそれ以

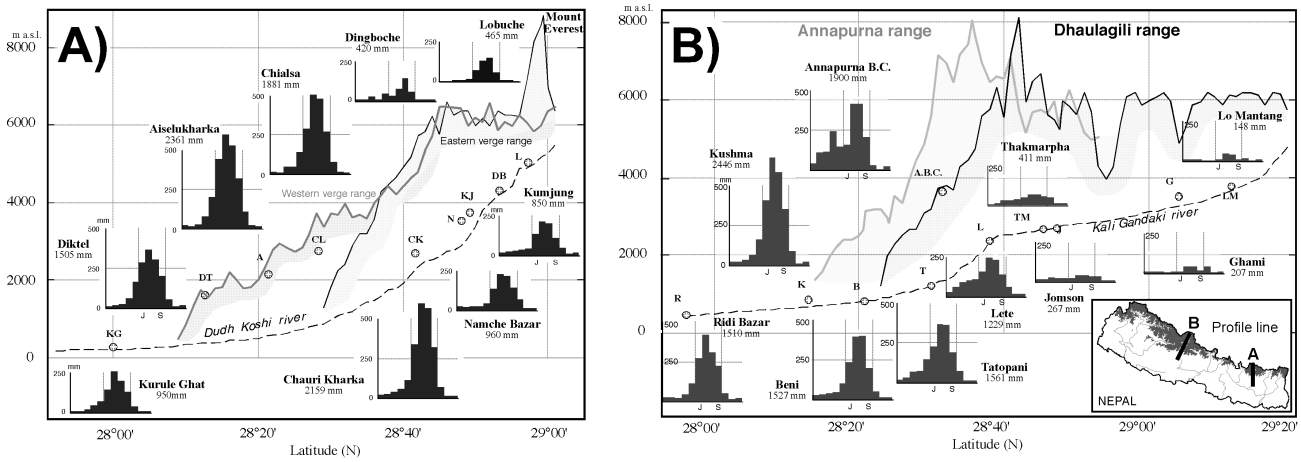


図９　ヒマラヤ山中の南北断面における月別平均降水量分布
A：ドゥドゥコシ川流域，B：カリガンダキ川流域　破線はそれぞれの河床縦断面，実線は河川両岸の稜線を表す．

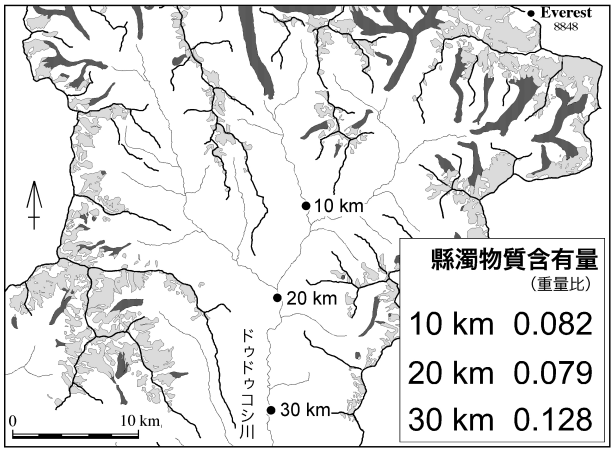


図 10 エベレスト山域，ドゥドゥコシ川における河川水に占める懸濁物質量

下の著しい乾燥気候（砂漠気候）になる．このようにヒマラヤ山脈南斜面はそもそも世界的にも多雨の地域であり，一方氷河地帯は年降水量が 500 mm を切る乾燥気候下にある．

集水域面積における氷河の占める割合は，例えばネパールの３大水系のうち東部のコシ水系では水系内の氷河目録（朝日，2001）があり，正確な氷河面積を算出できる．コシ川がネパールからインドへ越流するコシ水門における集水域面積は 27533 km^2 あり，この集水域において氷河の総面積は 1380.5 km^2 である．氷河の占める割合は５％となる．氷河を起原とする水が流出するのは河川本川と氷河そのものに限定される．氷河近傍であっても氷河でない場所は氷河融解水ではなく降水の流出河系である．集水域内の降水量が一様であるとすれば，コシ川において氷河融解水の占める割合は５％となる．実際には降水量はヒマラヤ山中ほど少なくなるから，この割合はもっと少なくなる．モデル計算による河川水に占める氷河融解水の割合は，コシ川を含むガンジス川水系全体で 3.3％と見積もられている（Miller，2012）．本川の起原が氷河であるからとしてあたかも氷河融解水が流出しているかの様に説明されるが，集水域面積のほとんどは氷河融解水とは関係のない降水起原であり，河川水に占める氷河融解水の割合は極めて限定的である．また河川流出量のピークは雨季，すなわち夏季である．氷河の融解も夏季であり，河川流量のピークと氷河融解水の供給は時期が一致する．この様に，氷河融解水が河川流量に占める割合は極めて限定的であり，また乾季に氷河融解水に依存している事実もない．河川本川の起原が氷河であることからあたかも水系全体が氷河融解水起源であるかのような言説も適切ではない．

実際に氷河の融解水は水資源として利水されているか．氷河融解水は，主にシルト・クレー質からなる，氷河上・氷河下で凍結破砕された岩屑を大量に含んでいる．そのため，「グレーシャーミルク」と呼ばれるほど白濁している．エベレスト山域の主たる河川，ドゥドゥコシ川において，氷河からの流出口から 10km，20km，30km 地点において河川水を採水（2012 年 8 月）し，この中に含まれる懸濁物質量を測定した（図 10）．懸濁物質はほとんどが花崗岩起原のクレーであった．いずれの地点においても含有量は 0.1％（重量比）程度であり，30km 程度の距離では懸濁物質量が顕著に減少することはない．したがってこの河川水を灌漑に利用し耕地に散水すると重量比 0.1％のクレーを農地に散布することになる．懸濁物質は有機質を含まないので，散水を続ければ農地が粘土質に覆われ，農耕に利用できなくなると考えられる．

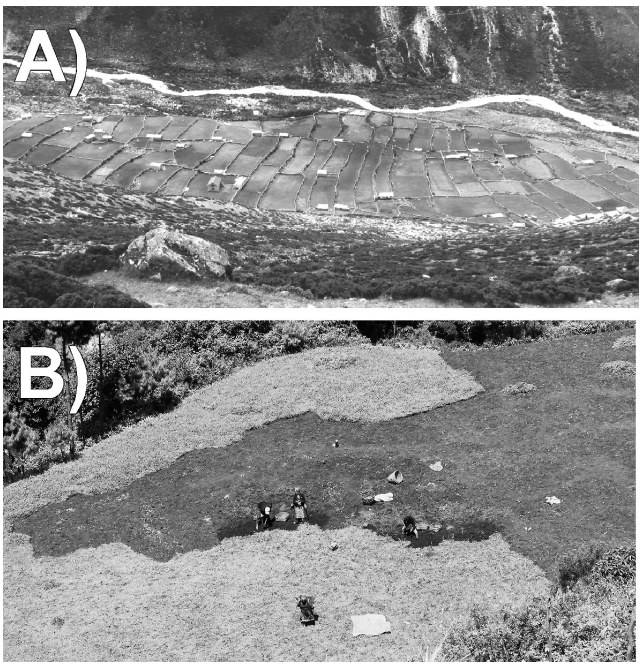


図 11　氷河下方での農業的土地利用の様子
Ａ：エベレスト山域，最上流部の農耕地（標高 4300m；ディンボチェ）．ジャガイモを栽培しているほかは輪作による休耕地．耕地直上の河川は氷河末端から 3km の融氷河水起原の河川．農地への引水はない．Ｂ：Ａより下流，標高 3000mの農地．ジャガイモの収穫（８月）．天水による栽培で河川水は利用していない．

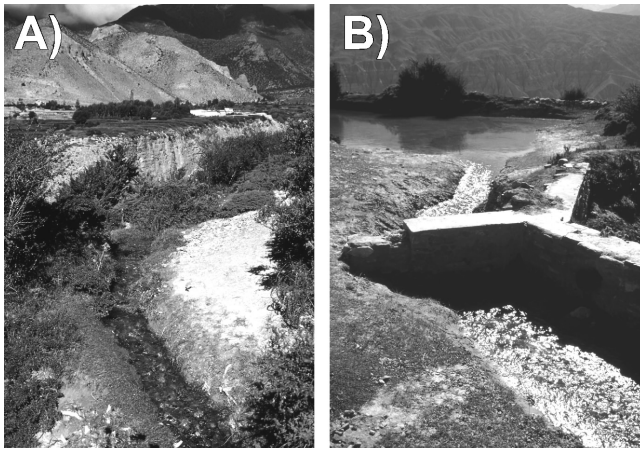


図 12　乾燥地帯での灌漑（中央ネパール，ムスタン）
場所は図２参照．Ａ：灌漑水路．後景の斜面の背後に氷河があり，この融氷河水を起原とする水が引かれている．水路を長く築き日射により水温を上げている．Ｂ：灌漑水路上のピット．数百メートルおきにピットを設置し，融氷河水に含まれるシルト分を沈殿させ，オーバーフローだけが灌漑水路を流下する様にしている．

実際, エベレスト山域では河川水を灌漑に利用する施設は存在しなかった. エベレスト山域では農業的土地利用の上限高度は 4300m 地点である．ここでは輪作により一部の農地でじゃがいもを栽培している（図 11）. この地点においてもなお年間降水量 500mm 程度はあり（図９）, なおかつその８割弱がモンスーンの夏季にもたらされている. すなわち, 生育期間においては天水で農業を行える限界であり, これより標高が下がれば降水量は一層増え, じゃがいも, トウモロコシ, ヒエ等の栽培作物は天水で生産がまかなえる.

ただし, ネパール・ヒマラヤにおいて, 氷河融解水を灌漑に一切利用していない訳ではない. 図 12 は中央ネパール, ムスタン地方の灌漑設備である. この地方はアンナプルナーダウラギリ山系の背後にあってモンスーンの風下のため, 夏季の降水が極端に少ない（図９Ｂ）. 年降水量は 200ｍｍ以下であり, 強い乾燥気候下にある. 天水は期待できないため, 氷河起源の河川水を引水して灌漑に利用している. しかし河川水が含む縣濁物質の問題がある. そこで, 灌漑への引水量を必要限度に絞ったうえで, 細い水路を延長数 km 敷設する. さらに水路上, 数百メートルおきにピットを設置する. 流れ込む灌漑水はピットに湛水し, 静水状態で縣濁物質が沈殿する. 上澄みが流下する仕組みになっており, 灌漑水路の末端では縣濁物質をほとんど含まない透明な水になっており, この状態でようやく農業用に利水できる. また長い水路を通過することで氷河起源の冷たい河川水が日射によって十分に暖められる効果もある. このような特別な設備を備えてはじめて氷河融解水を灌漑用に利用しており, 極端な乾燥地域での例外事例である.

大規模な灌漑のもと稲作が行われているのは標高 1000m 以下のタライ平野である. 灌漑の水源がスンコシ本川でなければそこには氷河起源の水は含まれていないし, スンコシ本川であっても上述の通りでその割合は５％以下でしかない. あたかも氷河融解水が水資源として活用され. 氷河の後退, 消滅によって枯渇するかのような言説が流布しているが, このように, そもそも水資源としての利用は例外事例に限られ, 利用実態はほとんどないといえる. また, 温暖化によって降雪が減少することだけが取り上げられているが, 減る雪は降雨に代わり, 降水量として見た時には変化はない. そのうえ氷河融解水の流量ピークとモンスーン降水による河川流量ピークはその時期が一致する. したがって, 仮に氷河が消滅したとしても河川流出量やその時期に大きな変化は生じにくいと考えられる.

６．まとめ

ネパール・ヒマラヤの氷河, 氷河変動の実態を報告し, 水資源の観点から考察した. 以上をまとめると,

１）ネパール・ヒマラヤの氷河は現在後退傾向にある.

２）後退の要因として小氷期以降の全般的な後退傾向のほか, 夏季最低気温の上昇がより大きく寄与していると推測される.

３）融氷河水は縣濁物質を多く含み, 農業用の灌漑には例外事例を除いて利用されていない.

４）大規模な灌漑による農業用の利水においては, その河川水は氷河起源ではないか含まれていても僅かである.

以上を指摘できる. したがって,「ヒマラヤの氷河は世界のどこよりも急速に後退しており, 近い将来ヒマラヤから氷河が消滅する. またアジア 14 億の人口がヒマラヤの氷河を起原とする河川水を水資源としており, 水資源不足が懸念される」という言説は科学的根拠が乏しい.

文献

朝日克彦（2001）：ネパール・ヒマラヤ東部の氷河目録と最近の氷河変動. 雪氷 63: 159-169.

Cruz, R.V., Harasawa, H., Lal, M., Wu, S., Anokhin, Y., Punsalmaa, B., Honda, Y., Jafari, M., Li, C. and Huu Ninh, N. (2007): Asia. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 469-506.

Miller, J. D., Immerzeel, W.W. and Rees, G. (2012): Climate change impacts on glacier hydorology and river discharge in the Hindu Kush-Himalayas. Mountain Research and Development 32: 461-467.

WWF Nepal (2005): An overviwe of glaciers, glacier retreat, and subsequent impacts in Nepal, India and China. WWF Nepal, Kathmandu.