

インド・ヒマラヤ、ラダーク山脈のドムカル谷における 氷河湖と氷河湖決壊洪水の現状

奈良間千之¹⁾、田殿武雄²⁾、谷田貝亜紀代¹⁾、池田菜穂³⁾

1) 総合地球環境学研究所

2) 宇宙航空研究開発機構

3) 防災科学技術研究所

インド北西部のジャンム・カシミール州のラダーク山脈、ドムカル (Domkhar) 谷上流に分布する氷河湖の現状を衛星画像解析と 2010 年 6 月と 9 月の現地調査から明らかにした。また、2009 年 3、8 月、2010 年 8～9 月にも過去の氷河湖決壊洪水の発生時期やその被害に関する情報収集を現地でおこなった。Domkhar 谷上流部には、32 の小規模なクリーンタイプの氷河 (氷河表面がデブリで覆われていない氷河: 0.008km^2 – 1.2km^2) とモレーンで堰き止められた 11 の氷河湖 (0.003km^2 – 0.096km^2) が存在する。これら氷河の面積は 1994～2009 年の約 15 年間で約 3% 消失した。11 の氷河湖の拡大履歴をみると、3 つの氷河湖は 1980 年以降拡大を続けており、他の 3 つは急激に面積を減少させ、残りはほとんど変化していない。Domkhar 谷で最大の氷河湖 (0.096km^2) の拡大速度は、 $0.0013\text{km}^2/\text{year}$ (1980～2000 年) と $0.0033\text{km}^2/\text{year}$ (2000～2010 年) であり、2000 年以降拡大速度が大きくなっている。Domkhar 谷で 5 つの氷河湖を現地調査した結果、最大水深 40m ほどの氷河湖が 2 つあり、湖水量は約 $1,112,000\text{m}^3$ と $427,000\text{m}^3$ であった。Domkhar 谷における過去の氷河湖決壊洪水を衛星画像解析により調べたところ、2000 年以降に小規模な決壊が 4 回生じていた。Gongpa-Rangchong 谷の下流域に広がる土石流堆積物は、2003 年に生じた氷河湖決壊洪水によるものであった。調査した 5 つの氷河湖の面積と水量の関係式から、2003 年に決壊した氷河湖 (0.005km^2) の水量を見積ったところ、小規模な氷河湖 ($16,900\text{m}^3$) による決壊であることがわかった。この氷河湖決壊洪水は小規模であったが、下流域に土石流堆積物を堆積させ、Domkhar 谷で木製の橋、水車小屋、畑などを破壊した。この氷河湖の決壊要因は、氷河湖を堰きとめるアイスコードモレーン内部に発達したアイストンネルの開通によるものであった。Gongpa-Rangchong 谷の上流部にある氷河湖 ($427,000\text{m}^3$) では、湖を堰き止めるモレーン内部に発達するアイストンネルを確認した。

キーワード：氷河湖、氷河湖決壊洪水、衛星画像、ラダーク山脈、インド・ヒマラヤ

はじめに

ヒマラヤ東部地域 (ネパール東部～ブータン) では、近年の山岳氷河の縮小が報告されている¹⁻⁴⁾。この地域では、氷河の縮小にともない氷河湖が 1950～1970 年代より拡大しはじめ^{5,6)}、10 年に 1～2 度の割合で氷河湖決壊洪水 (glacier lake outburst flood: GLOF) が生じている^{7,8)}。最近では、1994 年 10 月にブータン北部ルナナ地域のルゲ湖 (1.16km^2) が決壊し、90km 下流のブナカ・ゾン (歴史的建造物) が洪水により破壊され、21 人の犠牲者がでている^{9,5)}。 0.1km^2 以上の巨大な氷河湖

が多数分布するブータン・ヒマラヤ地域では、ICIMOD (The International Centre for Integrated Mountain Development) が氷河湖決壊洪水の危険性の高い 24 の氷河湖を報告しており^{10,8)}、JICA/JST プロジェクトによる高解像度の ALOS 衛星画像を用いた氷河湖インベントリの作成も進行中である¹¹⁾。ネパール東部のツォ・ロルバ (0.98km^2)、イムジャ氷河湖 (0.95km^2)、ブータン北部ルナナ地域のトルトルミ氷河湖 (0.85km^2)、ラフストレン氷河湖 (1.23km^2) など決壊の危険性が高いと考えられている氷河湖では、モニタリングやアセスメ

ントなどの国際的な取組みがおこなわれている¹²⁾。

このような国際的な取り組みや関心は、災害の規模から巨大な氷河湖に焦点が置かれがちだが、ヨーロッパ・アルプス、中央アジア、ペルー・アンデスの山岳地域のように小規模な氷河湖の決壊洪水により局地的な被害に遭う地域もある。中央アジアの天山山脈では、1960～1970年代に0.01-0.05km²規模の氷河湖が決壊し、下流域で多数の犠牲者がでている¹³⁻¹⁵⁾。ギッサール・アライ地域では、1998年7月に小規模な氷河湖(50,000m³)が決壊し、下流のシャヒマルダン村で100人以上の犠牲者がでている²⁾。このような地域では、氷河湖と山麓で暮らす人々の居住地の距離は非常に近いので、小規模な氷河湖決壊洪水でも河川付近の住人が土石流の被害に遭うケースが報告されている^{16,17)}。

本研究の対象地域であるインド北西部のラダーク山脈においても、中央アジアやペルー・アンデスのように小規模な氷河湖が多数分布する。この地域の氷河湖はたびたび決壊しており、山岳地域で暮らす多くの人々は洪水に対して不安を抱いている¹⁸⁾。本研究では、インド北西部のジャンム・カシミール州のラダーク山脈、ドムカル(Domkhar)谷において、氷河湖の分布、氷河湖の発達履歴、氷河湖の状態、過去の氷河湖決壊洪水を衛星画像解析と2010年6月と9月の現地調査から調べ、この地域の氷河湖の現状を明らかにした。また、2009年3、8月、2010年8～9月に現地での聞き取り調査により明らかになった過去の氷河湖決壊洪水の発生時期やその被害状況についても述べる。

研究地域

調査地域は、インド北西部のジャンム・カシミール州、ラダーク山脈のドムカル(Domkhar)谷である(図1)。ラダーク山脈はインド・ヒマラヤに属しており、Domkhar谷はインド・ヒマラヤ北部に位置する。この谷には、上流からDomkhar-Gongma村(上村; 3800m付近; 北緯34度27分00秒; 東経76度49分20秒)、Domkhar-Barma村(中村; 3400m付近)、Domkhar-Do村(下村; 2900m付近)が分布する(図2)。流域には32の小規模な山岳氷河(0.008km²-1.2km²)が分布しており、その多くは本谷のNagrakagsa谷と支谷の

Gongpa-Rangchong谷の上流に位置する。氷河面積(9.9km²)はDomkhar谷流域(182km²)の5%を占める。この地域の気候は非常に乾燥しており、インド気象局の観測データによると、ジャンム・カシミール州のラダーク地方の中心都市レー(Leh; 3514m; 図1)の1951～1980年の年平均降水量は105.5mmである。降水の季節変化をみると、冬季～夏季(6月を除く)にかけての降水量が比較的多く、降水の最大月は8月である。Domkhar-Gongma村に設置された自動気象観測装置(3808m)の観測データ(2009年7月～2010年9月)¹⁹⁾によると、2009年7月～2010年6月の年平均気温は2.5℃で、観測期間中の降水量(雪を除く)は5、6月と8月に多い。

方法

衛星画像を用いた氷河湖のポリゴンデータの作成

ALOS PRISM/AVNIR-2(2009年11月2日撮影)の衛星画像をもとに、現在のDomkhar谷の氷河湖の分布を確認した。氷河前面にある0.001km²以上の氷河湖を対象に、ArcGIS 9.3を用いてマニュアルによるデジタイジングで氷河湖のポリゴンデータを取得した。氷河湖にはNo.1-No.11の氷河湖IDを記した(図2)。1980年以降の氷河湖の拡大履歴を調べるため、Hexagon KH-9(1980年9月16日撮影)、JERS-1(1994年7月27日撮影)、Landsat 7 ETM+(2000年9月4日)、SPOT4(2003年11月1日)、ASTER(2006年10月7日)、ALOS PRISM/AVNIR-2(2007年10月28日、2009年11月2日、2010年7月19日)の衛星画像を用いた。オルソ処理されていない衛星画像は、PCI Geomatica 10.3を用いてSRTM DEMでオルソ画像を作成した。高解像度の画像から氷河湖のポリゴンデータを取得するため、Landsat 7 ETM+(分解能30mのマルチスペクトルと15mのパンクロマティック)、SPOT4(20mのマルチスペクトルと10mのパンクロマティック)、ALOS AVNIR-2/PRISM(10mのマルチスペクトルと2.5mのパンクロマティック)のパンシャープン画像を用いた。

氷河湖の現地調査

Nagrakagsa谷とGongpa-Rangchong谷に分布する5つの氷河湖(No.3, 4, 5, 7, 8)で現地調査をおこなった(図2)。調査内容は、湖盆図調査、モレー

ンの地形観察、GPS 測量である。湖盆図調査では、アキレス製のゴムボート (PVL-260) と GPS 付属の魚群探知機 (LOWRANCE HDS-5) を用いて氷河湖の水深測量を実施した。取得した魚探データ (緯度経度、水深) を用いて ArcGIS 9.3 で湖盆図を作成し、湖水量を算出した。モレーンの地形調査では、モレーンの地表面状態、埋没氷の確認、漏水、アイストンネルの存在などを調べた。GPS 測量では、ProMark3 (Ashtech Co., Ltd) を用いてモレーン表面の地形測量や氷河湖の面積測量をおこなった。

ドムカル谷の過去の氷河湖決壊洪水 (GLOF)

Domkhar 谷における 2000 年以降の氷河湖決壊洪水の発生時期を明らかにするため、撮影年代の異なる衛星画像を用いて氷河湖の面積変化を調べた。氷河湖決壊洪水の発生時期をさらに限定するため、同年に撮影された複数の Landsat7 ETM+ を用いた。過去の氷河湖決壊洪水の日時や洪水の被害状況を知るため、Domkhar 谷の住民に聞き取り調査をおこなった。

結果

衛星画像を用いた氷河湖の分布と拡大履歴

Domkhar 谷の氷河のポリゴンデータを取得するため、2009 年 11 月 2 日撮影の ALOS PRISM/AVNIR-2 のパンシャープン画像を用いて、マニュアルによるデジタイジングで氷河域を抽出した。Domkhar 谷には小規模な 32 の山岳氷河 (0.008km^2 - 1.2km^2) が分布しており、氷河の総面積 (9.94km^2) はドムカル谷流域 (182km^2) の 5% を占める。32 の氷河のうち氷河湖のある 11 の氷河を対象に、1994 ~ 2009 年の 15 年間の氷河の面積変化を計測したところ、氷河面積は約 3% 縮小したことが明らかになった。インド・ヒマラヤの東部地域でも、衛星画像解析により最近の氷河縮小が報告されている^{20,21)}。周辺 mountain 地域では、中央アジアの天山山脈で 8 ~ 19% (1970 ~ 2000 年)²²⁾、崑崙山脈で 0.4% (1970 ~ 2000 年)²³⁾、パミールで 5% (1973 ~ 2009 年; Aizen 氏私信) の氷河縮小の報告がある。年降水量の少ない乾燥したラダーク山脈や崑崙山脈の氷河縮小の程度は小さい。

Domkhar 谷では 11 の氷河湖 (0.003km^2 - 0.096km^2) が確認され、各氷河湖に No.1-No.11 の氷河湖 ID

を記した (図 2)。氷河湖の分布高度は、標高 5000 ~ 5200m である。Nagrakagsa 谷上流の氷河湖 No.3 は、長さ 410m、幅 270m の最大面積 (0.096km^2) の氷河湖である (図 2, 3a)。氷河湖 No.1 (0.017km^2) と No.8 (0.025km^2) は氷河に接する比較的大きな氷河湖で (図 2, 3c)、その他の氷河湖は小さい (図 3b)。11 の氷河湖の出現時期を衛星画像で調べたところ、1980 年に撮影された Hexagon KH-9 の画像には氷河湖 No.1, 3, 5, 7, 8 を確認でき、1980 年以前から氷河湖の拡大ははじまっていた。ヒマラヤ東部地域でも、氷河湖の発達は 1950 ~ 1970 年代にはじまっているが⁵⁾、中央アジアの天山山脈では、現存する氷河湖のほとんどは 1980 年代以降に出現している¹⁵⁾。

図 4 は衛星画像解析から得られた 1980 年以降の氷河湖の拡大履歴である。比較的大きな氷河湖 No.1, 3, 8 は、1980 年以降拡大傾向を示す。特に氷河湖 No.3 の発達速度は著しく、1980 ~ 2000 年で $0.0013\text{km}^2/\text{year}$ 、2000 ~ 2010 年で $0.0033\text{km}^2/\text{year}$ であり、2000 年以降の拡大速度は大きくなっている。しかしながら、この拡大速度はヒマラヤ東部地域の 0.003 - $0.037\text{km}^2/\text{year}$ ²⁴⁾ や中央アジア・天山山脈のクンゴイ・アラトール山脈の $0.0059\text{km}^2/\text{year}$ ¹⁵⁾、テスケイ・アラトール山脈の $0.0053\text{km}^2/\text{year}$ ²²⁾ に比べると小さい。一方、氷河湖 No.4 と No.5 は急激に面積が小さくなっており、氷河湖から排水がおこなわれたことを示す。Landsat7 ETM+ を用いて排水の日時を調べたところ、氷河湖 No.4 と No.5 はそれぞれ 2008 年 10 月 12 日 ~ 2009 年 7 月 27 日と 2004 年 11 月 27 日 ~ 2005 年 8 月 26 日に小規模な氷河湖決壊洪水が生じていた (図 5)。2 つの氷河湖の水は排水後も残っており、Nagrakagsa 谷では目立った土石流堆積物は観察できなかった。氷河湖 No.7 も 2003 年 7 月 20 日 ~ 2003 年 10 月 15 日に面積を急激に変化させており、衛星画像解析から 3 つの氷河湖で急激な排水がおこなわれたことが明らかになった。氷河湖 No.7 は排水後に再び拡大している。

現地調査による氷河湖の湖盆図調査

Nagrakagsa 谷上流の氷河湖 No.3, 4, 5 と Gongpa-Rangchong 谷の氷河湖 No.7, 8 で現地調査をおこなった (図 2)。2010 年 7 月 19 日撮影の ALOS PRISM 画像では調査地周辺は厚い雪で覆われて

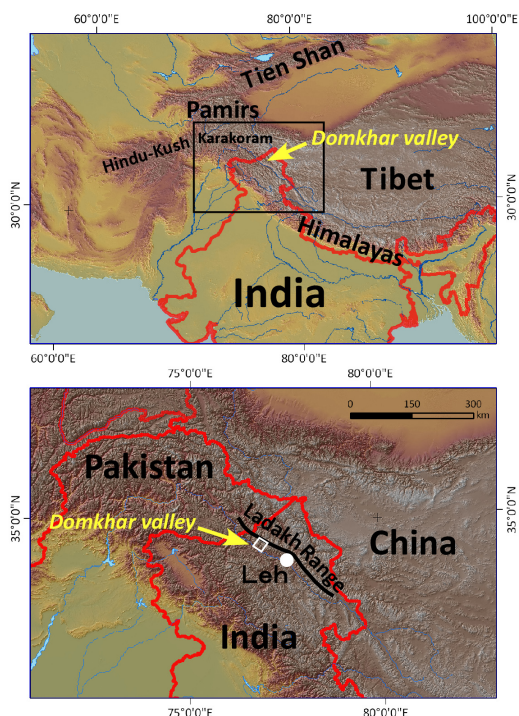


図1 インド北西部、ラダーク山脈の Domkhar 谷の位置。

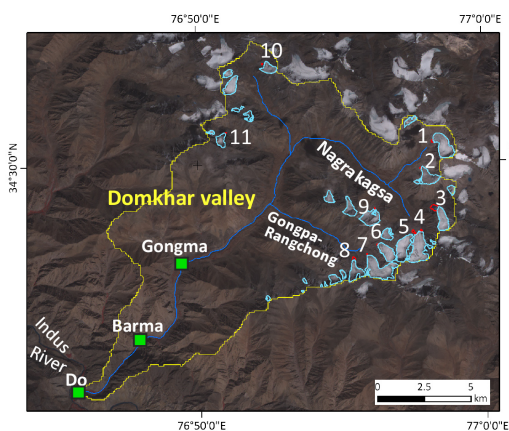


図2 Domkhar 谷全域図。黄線：Domkhar 谷流域、青線：川、水色線：氷河、赤線：氷河湖。番号は氷河湖 ID を示す。下流部には Domkhar の3つの村 (Domkhar-Gongma, Barma, Do) が分布する。

いる。現地調査は、標高 5000 ～ 5200m に分布する氷河湖が凍らず、氷河湖周辺の雪が融ける 9 月初めにおこなった。図 6 は、湖盆図調査でおこなったボートの調査風景とボートの軌跡を示す。

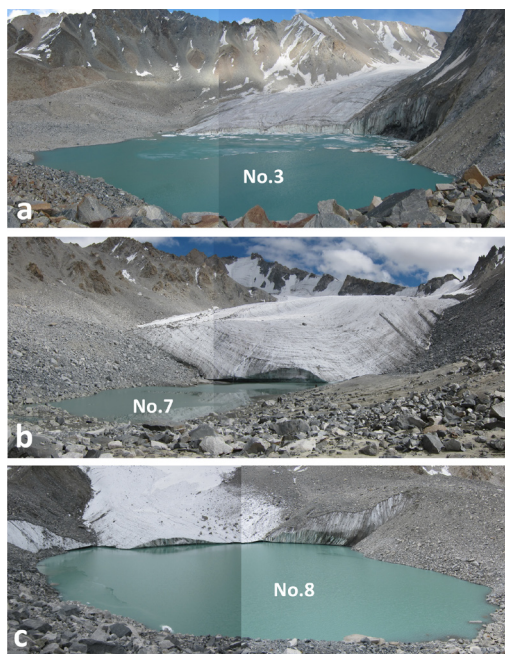


図3 (a) 氷河湖 No.3 (2010 年 9 月 7 日、奈良間千之撮影)。(b) 氷河湖 No.7 (2010 年 9 月 10 日、奈良間千之撮影)。(c) 氷河湖 No.8 (2010 年 9 月 10 日、奈良間千之撮影)

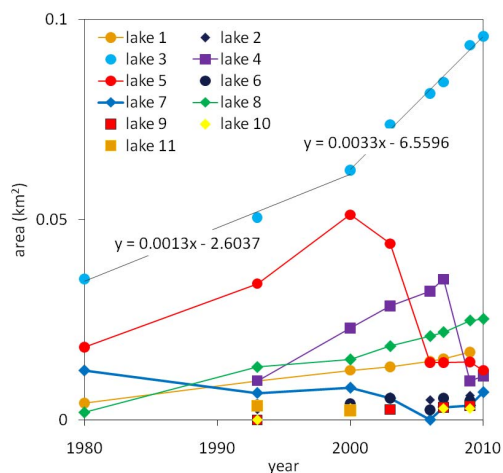


図4 1980 年～ 2010 年の 11 の氷河湖の面積変化

Nagrakagsa 谷上流の最大面積の氷河湖 No.3 では、氷河湖の半分は厚い氷に覆われていたため裸水域でのみ水深測量をおこなった (図 6a, 6b)。測量した最大水深は 35.9m であるが、中央部～氷河まで

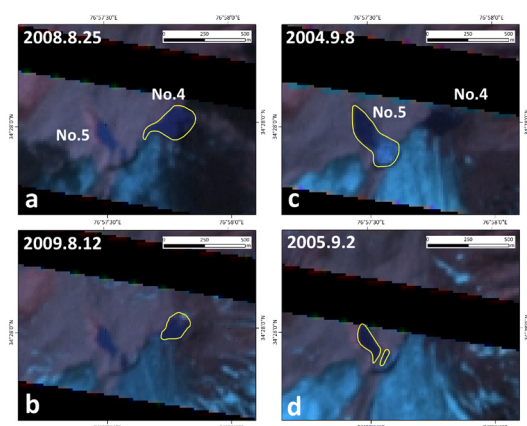


図5 (a, b) 氷河湖 No.4 と (c, d) 氷河湖 No.5 の流出前と流出後。氷河湖からの排水時期を限定した画像は雪が多く、湖の大きさを判別しにくいため、無雪期の衛星画像を提示した。

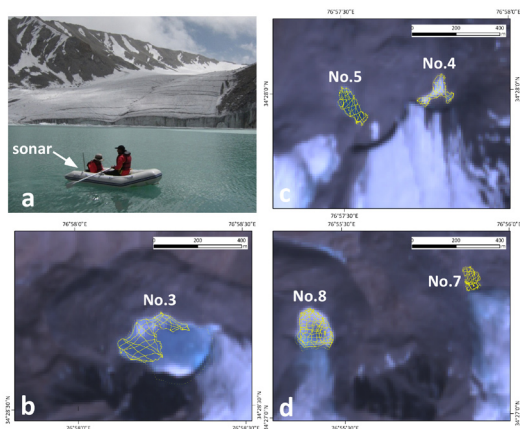


図6 (a) 氷河湖の湖盆図の調査風景、(b-d) 5つの氷河湖のボートの軌跡。氷河湖 No.3 の湖面の半分は凍っていたため、裸氷域のみ水深を測量した。

の水深を測量できなかったので実際的水深がさらに大きい可能性はある。氷河湖 No.3 においては、湖の周囲を 0m として最少湖水量 1,112,000m³ を算出した。2 番目に大きな氷河湖 No.8 は最大水深 39.2m、水量 427,000m³ であった。その他の氷河湖 No.4, 5, 7 は、水深 10m 以下で、水量 21,000m³、51,000m³、15,000m³ と小さい。図 7 は、調査した 5 つの氷河湖の水量と面積の関係を示す。両者は相関関係があるが、見積もった氷河湖

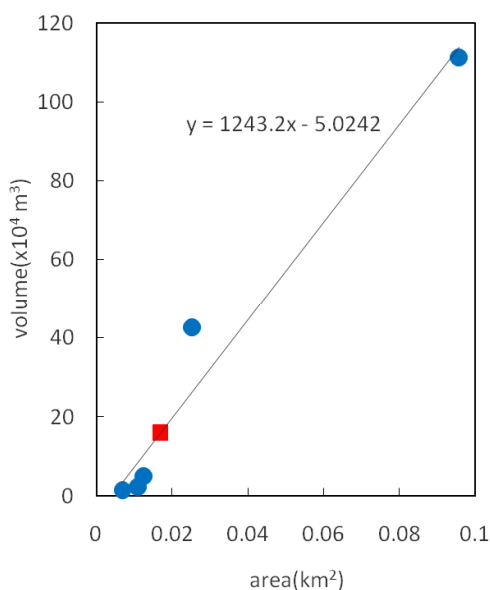


図7 5つの氷河湖の体積と面積の関係図。赤いマークは見積もられた氷河湖 No.1 の湖水量。

No.3 の湖水量は最小値であるため、実際の回帰式の傾きはより大きくなる。この回帰式を用いて、現地で調査できなかった比較的大きな氷河湖 No.1 (0.0169km²) の水量を求めたところ約 16,900m³ であった。

過去の氷河湖決壊洪水 (GLOF)

Gongpa-Rangchong 谷の下流域には厚い土石流堆積物を観察できる (図 8a)。この堆積物の出現時期を Landsat7 ETM+ で調べると、撮影された 2003 年 1 月 9 日と 2003 年 7 月 20 日の間に土石流堆積物が堆積していた (図 8b, c, d)。Gongpa-Rangchong 谷の上流にある 3 つの氷河湖の変化をみると、洪水堆積物の出現前の 2002 年 8 月 2 日撮影の Landsat7 ETM+ の画像には 3 つの氷河前面にそれぞれ氷河湖が存在する (図 9a)。土石流堆積物の出現後の 2003 年 7 月 20 日撮影の画像には氷河湖 No.7、2003 年 9 月 22 日撮影の画像には氷河湖 No.8 をそれぞれ確認でき、氷河湖 No.6 だけがわずかに縮小していた。

Gongpa-Rangchong 谷の土石流堆積物が堆積した 2003 年の洪水に関して、Domkhar 谷の住人や関係者にインタビューをおこなった。2000 年前

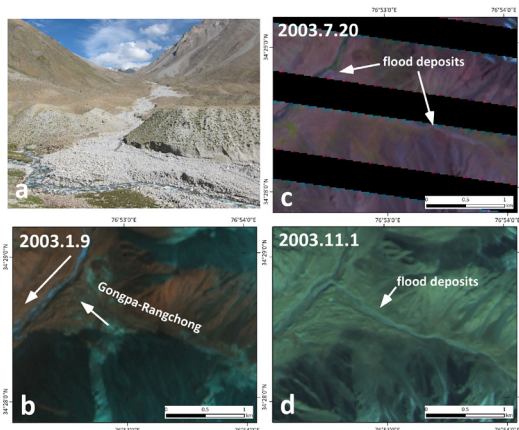


図8 (a) Gongpa-Rangchong 谷の土石流堆積物 (2010年9月5日、奈良間千之撮影)、(b, c, d) 土石流堆積物の堆積前と堆積後の衛星画像 (b, c: Landsat7 ETM+, d: SPOT4)。

半の洪水情報は、当時 Domkhar-Gongma 村の小学校教師1人と生徒2人から話を聞くことができた。2003年または2004年の6月末～7月初頭の深夜22時30分～23時頃、Domkhar-Gongma 村に突然洪水がやってきた。この洪水で下流の Domkhar-Gongma 村で大量の体長20～30cmの魚が死んでいるのが目撃され、電柱、学校の壁、木製の橋、畑、木、水車小屋が破壊された。この洪水は、Gongpa-Rangchong 谷からやってきた。話を聞いた教師は、もう一人の教師と3人の生徒とともに洪水の15～20日後に Gongpa-Rangchong 谷上流の氷河湖を訪れた。当時撮影された写真には、氷河湖 No.6 のターミナルモレーン外側の側壁に大きなホールを確認できる (図9c)。彼らの話によ

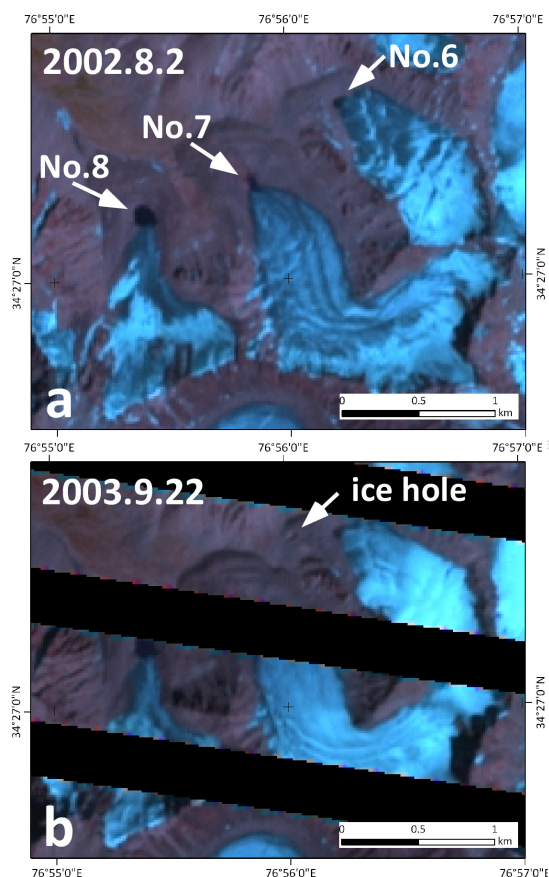


図9 (a, b) Gongpa-Rangchong 谷の土石流堆積前と堆積後の氷河前面の変化。(b)の矢印はアイスホールの位置を示す。(c) 氷河湖 No.6 のターミナルモレーンに出現したアイスホール (教師撮影)。ターミナルモレーン内部の埋没氷に発達したアイストンネルの出口。(d) 氷河湖 No.6 の排水後 (教師撮影)。



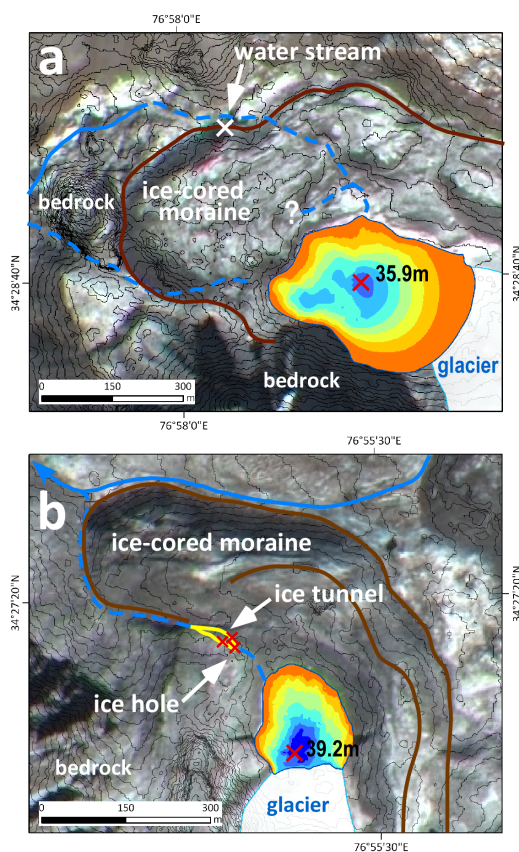


図10 (a) 氷河湖 No.3、(b) 氷河湖 No.8の前面図。青色の実線は表流水を示し、青色の点線はモレーンの表面の地形から推定される排水路を示す。

ると、当時、幅10m、高さ2～5mほどのホールには水が流れており、モレーン内部に発達したアイストンネルを通じて氷河湖の排水がおこなわれたようである。氷河前面には、湖水がなくなっているのが確認されている（図9d）。図9bのLandsat7 ETM+の画像（2003年9月22日撮影）をみると、氷河湖No.6を堰き止めるターミナルモレーンの斜面には窪んだ地形を確認できる。この地形は2003年1月9日以前の画像では確認できない。この地形は、写真（図9c）で確認できるモレーン内部にできたアイストンネルの出口のホールである。

Domkhar-Gongma村の複数の牧者の話では、洪水はその年に彼らが高所放牧地に移動する直前に発生し、その発生日はチベット暦の5月10～11

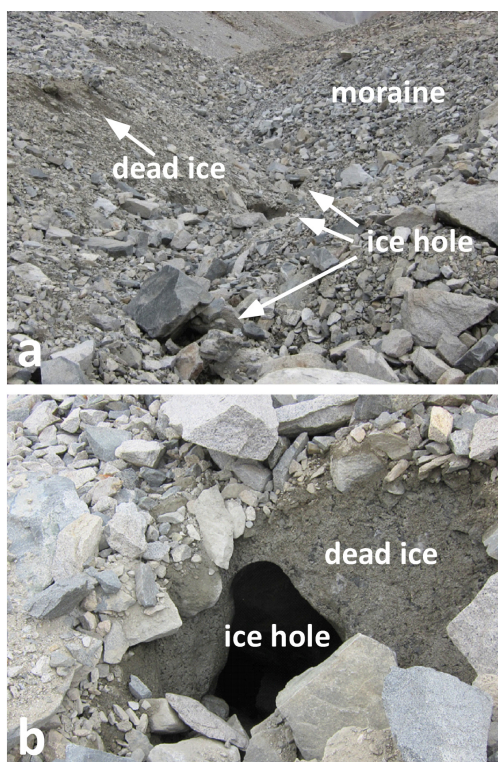


図11 (a) 氷河湖 No.8のモレーン上に分布するアイスホール（2010年9月10日、奈良間千之撮影）。(b) アイスホール（2010年9月10日、奈良間千之撮影）。

日であったという。この日付については、グル・リンポチュ（パドマ・サンバヴァ）の誕生日を祝う仏教行事にあたっていたために、明確に記憶しているとのことであった。チベット暦の5月10～11日は、西暦2003年のカレンダーで7月9～10日にあたり、土石流堆積物が堆積した2003年1月9日と2003年7月20日の間と一致する。また、前述のDomkhar-Gongma村の学校教師によれば、氷河湖No.6とNo.7は同じ年に洪水を生じさせたようである。氷河湖No.7は2003年7月20日～2003年10月15日の期間中に面積を急激に減少させており、氷河湖No.6とNo.7の湖水はどちらも2003年に排水されている。衛星画像解析と現地調査により、Gongpa-Rangchong谷下流域に土石流堆積物を堆積させた洪水は、2003年の氷河湖No.6の決壊によるものであった。2003年の氷

河湖 No.6 の氷河湖決壊洪水を含めると、2000 年以降にドムカル谷で 4 つの小規模な氷河湖決壊洪水が生じていたことが明らかになった。

考察

ドムカル谷の氷河湖決壊洪水の特徴

インド・ヒマラヤの調査地域とヒマラヤ東部地域の氷河湖決壊洪水の特徴を比較すると、ヒマラヤ東部地域ではモレーンの崩壊による決壊が多い。代表例として、1985 年のネパール東部のサバイ・ツォの氷河湖決壊²⁵⁾や 1994 年のブータン北部ルナナ地域のルゲ湖などがある⁹⁾。このタイプの流出特性は、モレーンの崩壊により多量の湖水が短時間に排水されるため、流量が急激に増加する^{16,26)}。氷河湖の決壊時にモレーンは破壊されるため、繰り返して氷河湖決壊洪水が起こる可能性は少ない。一方、Domkhar 谷の氷河湖決壊の要因はヒマラヤ東部地域と異なる。2003 年の氷河湖 No.6 の決壊でも明らかのように、湖水の排水はモレーン内部の埋没水に発達したアイストンネルを通しておこなわれる（図 9c）。モレーン内部のアイストンネルの発達による氷河湖決壊洪水は、崑崙山脈の Yarkant 川や中央アジアの天山山脈でも報告されている^{27,17)}。2008 年 7 月に天山山脈で生じた氷河湖決壊洪水では、モレーン内部に幅 4.5m、高さ 2m のアイストンネルが確認されている。

ヒマラヤ東部地域では、平坦な U 字谷底まで巨大なデブリ氷河が発達しており、比高のあるモレーン内側には氷河融解後に巨大な氷河湖を発達させる容量と空間がある。氷河湖を堰きとめるモレーンは、小氷期または完新世後期の前進時に形成されたものである²⁸⁾。一方、ラダーク山脈の氷河は、クリーンタイプの小規模な山岳氷河である。氷河は山岳部の傾斜のある稜線付近に発達しているため、小規模なモレーン内側に氷河湖が発達できる容量と空間は限られている。そのため、氷河湖の面積はヒマラヤ東部地域に比べて小さく、その水深は最大でも 40m ほどで、ヒマラヤ東部地域の氷河湖のように水深 100m を超えることはない。また、氷河湖を堰きとめるモレーンは小氷期から 1900 年代に形成されたもので、モレーン内部には多くの埋没水が存在する。モレーン内部には氷河からの融水によりアイストンネルが発達

し、アイストンネルの開通が氷河湖決壊洪水を生じさせる要因となっている。ラダーク山脈では、氷河末端部と永久凍土帯に近い位置にあるため、モレーン内部の埋没水は永久凍土や低い地温により維持されており、モレーン内部に多くの埋没水を残す要因となっている。氷河の規模、氷河の立地条件、モレーンの形成時期、周辺の気象環境の違いが氷河湖の大きさや氷河湖決壊洪水の要因の違いを生んでいると考えられる。

ドムカル谷の氷河湖決壊の危険度について

現地調査した 5 つの氷河湖のうち、決壊した場合下流域に大きな被害をもたらすことが予想される氷河湖 No.3 と No.8 について、Mool et al.¹⁰⁾ と Iwata et al.⁶⁾ で挙げられている評価項目を参考に、衛星画像解析と地形観察により氷河湖決壊の危険度を考察した。本研究の評価項目は 4 つ（①氷河湖のタイプと発達状況、②モレーンの状態、③アウトレットの状態、④氷河湖周辺の危険要因）である。

氷河湖 No.3 は、最大水深 35.9m、水量 1,112,000m³ のドムカル谷最大の氷河湖である。①氷河湖のタイプと発達状況：氷河湖のタイプはモレーンダム（堰き止め）湖である。氷河湖はドムカル谷で最も急速に拡大しており、その拡大速度は 2000 年以降さらに大きくなっている。緩やかな傾斜を持つ氷河末端部は氷河湖と接し、氷河の崩落により多くの氷塊が氷河湖に浮かんでおり、氷河湖を急速に拡大させる要因の一つとなっている。②モレーンの状態：氷河湖を堰き止めるモレーンの比高は、氷河湖面から 25m ある。モレーンを構成する岩屑は新鮮で、モレーンの形成時期は礫の風化度から小氷期から 1900 年代と考えられる。氷河湖 No.3 から流れる表流水は観察できないが、モレーン表面の流路跡の地形から排水路は右岸側と左岸側に 2 つある（図 10a）。右岸側の流路跡周辺に散在する水たまりは、モレーン内部に埋没水が存在することを示す。モレーン表面には、埋没水の融解にともなうマスマーブメントやモレーンの急傾斜・崩壊などは観察できない。また、モレーン下流側河床と氷河湖までの水平距離が 300m あるため、モレーンの崩壊により氷河湖決壊洪水がすぐに生じる可能性は低い。また、左岸側の流路跡では、モレーン内部の埋没水が露出するが、モ

レーン下流側と氷河湖までの水平距離は100mあり、モレーンがすぐに崩壊する危険性は低い。

③アウトレットの状態：モレーン外縁部の河床には、氷河湖 No.3 からの伏流水が図 10a に示した地点から表流水として流れている。右岸側の流路跡の出口付近のモレーン下流側の底部では、モレーン内部に流れる水流の音を確認でき、湖水はモレーン内部を通して排水がおこなわれているようである。しかしながら、表流水の流量は、氷河の規模に対して非常に小さく、氷河湖の拡大あるいは水位上昇が進んでいると考えられる。モレーン表面からアイストンネルの存在を確認できなかった。④氷河湖周辺の危険要因：氷河湖南側の岩壁には氷河の一部がへばりついており、崩壊による氷河と岩の氷河湖への落水は決壊の危険要因の一つに挙げられる。本研究の結果から、氷河湖 No.3 は確実に拡大を続けているが、モレーン崩壊による決壊の可能性は低い。しかしながら、氷河・岩の崩落による落水やアイストンネルの発達による決壊の可能性は残されている。今後はアイストンネルの発達状況を詳細に調査する必要がある。

Gongpa-Rangchong 谷上流の氷河湖 No.8 は、最大水深 39.2m、水量 427,000m³ の 2 番目に大きな氷河湖である。①氷河湖のタイプと発達状況：氷河湖のタイプはモレーンダム（堰き止め）湖で、1980 年以降緩やかに拡大している。氷河末端部は傾斜があり氷河湖と接している。②モレーンの状態：氷河湖を堰き止めるモレーンの比高は氷河湖から 17m ある。モレーンの形成時期は、モレーンを構成する岩屑の風化度から小氷期から 1900 年代と考えられる。モレーン外側斜面の一部にはモレーン内部の埋没水の融解によるマスマーブメントが起きているが、氷河湖からモレーン下流側斜面の水平距離は 200m あり、モレーンの崩壊により氷河湖決壊洪水がすぐに生じる可能性は低い。

モレーン表面の地形観察から、氷河湖 No.8 から流れる表流水はモレーン上で観察できないが、流路跡は左岸側に 1 ヶ所ある（図 10b）。氷河湖から 13m 高いモレーン上には、氷河湖からの流路跡を示す V 字谷状の地形を観察できる（図 11a）。この地形表面には、いくつかのアイスホールを観察でき、その深さは数 m ある（図 11b）。

アイスホールは一列に分布しており、モレーン内部に氷河湖から連続するアイストンネルが形成されていると考えられる。アイストンネルは少なくとも図 10b で示した位置まで発達している。③アウトレットの状態：モレーン外縁部の河床には表流水が流れているが、その流量は少なく、十分な排水がおこなわれていない。氷河湖 No.8 においても、氷河湖 No.3 と同様に氷河湖の水位上昇あるいは面積の拡大が進んでいると考えられる。④氷河湖周辺の危険要因：周りの岩壁は氷河湖から少し離れているため、岩壁からの崩落した岩が直接氷河湖に落水する可能性は低い。氷河両側には、岩屑で覆われた埋没水があり、湖水が埋没水下部まで発達すればその一部の水が氷河湖に落水する可能性はある。本研究の結果から、氷河湖 No.8 は、緩やかな拡大速度であるが十分な水量をもつ。モレーン崩壊による決壊の可能性は低いが、決壊の危険要因であるアイストンネルの存在を確認しており、今後のアイストンネルの発達が氷河湖決壊洪水を導く可能性はある。この氷河湖においても、アイストンネルの発達状況を詳細に調査する必要がある。

2003 年に決壊した氷河湖 No.6 で見積もられた氷河湖の水量はわずか 17,000m³ ほどであった。この氷河湖決壊洪水により、Domkhar-Gongma 村では畑、水車小屋、木製の橋などが破壊された。また、2010 年 8 月 5～6 日の集中豪雨による洪水で川沿いに立地する多くの家屋や木製の橋が流され、畑などにも被害が生じた。住民の話によると、8 月 5 日の日没後に Domkhar-Gongma 村で増水がはじまり、6 日の朝までに下流の Domkhar-Do 村に土砂を含む水流が到達している（図 2）。Domkhar-Gongma 村に設置された雨量計の降水記録では、5 日の 18 時～19 時 40 分、22 時から 6 日の 5 時にかけて降水があり、ピークは 6 日の 2 時 20 分ごろであった¹⁹⁾。2010 年 7～8 月に撮影された衛星画像をみると、集中豪雨前後で氷河湖の変化はみられず、この洪水に氷河湖からのオーバーフローや氷河湖決壊洪水が関与したという事実はない。また、アイストンネルの開放による氷河湖からの排水は数時間で終わるケースが多いが^{17,27)}、住民の話によると本流の洪水は 3～4 日間続いている。このように、Domkhar 谷の村では、小規模な氷河湖決壊洪水や集中豪雨による洪水でも、川

沿いで大きな被害を受けている。Domkhar 谷上流部には、2003 年の氷河湖決壊洪水の水量を大きく上回る氷河湖が3つ存在しており、近年の洪水被害の程度を考えると、川沿いの住居は川から離れた安全な高い場所へ移住するなどの対策が必要である。

まとめ

インド北西部のインド・ヒマラヤに属するラダーク山脈の Domkhar 谷には、11 の氷河湖が分布し、そのうちの3つの氷河湖は下流部に大きな被害をもたらすほどの水量を持つ氷河湖であった。Gongpa-Rangchong 谷下流部に土石流堆積物を堆積させた2003年の氷河湖決壊洪水は、氷河湖を堰きとめるモレーン内部の埋没水に発達したアイストンネルの開通により生じた。Gongpa-Rangchong 谷上流の約427,000m³の水量を持つ氷河湖では、氷河湖を堰きとめるアイスコアードモレーン内部に発達するアイストンネルを確認しており、今後のアイストンネルの発達には氷河湖の決壊を導く可能性がある。Domkhar 谷では、2003年の小規模な氷河湖決壊洪水や2010年8月5～6日の集中豪雨による土砂を含む水流で川沿いの住居や畑は被害を受けており、氷河湖決壊洪水に備えた対策が必要である。

謝辞

本研究は、総合地球環境学研究所の高所プロジェクト（代表：奥宮清人）のラダーク研究グループの活動としておこなわれた。本研究の実施には、高所プロジェクトの生態森林班（代表：竹田晋也）の予算を使わせていただいた。ラダーク研究グループの月原敏博氏（福井大学）から現地調査に関するご助言をいただいた。小林尚礼氏（写真家）から現地写真や地図などの調査資料を提供していただいた。現地調査では、Domkhar 谷の住民の方々にご協力いただいた。また、ALOS 衛星画像データは、ALOS 研究公募（RA）の枠組みで JAXA EORC で作成した高次成果物を使用した。ここに記してお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Karma Ageta Y. Naito N. Iwata S. Yabuki H.: Glacier distribution in the Himalayas and glacier shrinkage from 1963 to 1993 in the Bhutan Himalayas. *Bulletin of Glaciological Research* 20; 29-40, 2003.
- 2) UNEP: *Global Outlook for Ice and Snow*. UNEP, Nairobi, 2007: 124-131.
- 3) Bolch T. Buchroithner M.F. Kunert A.: Planimetric and volumetric glacier changes in Khumbu Himalayas since 1962 using Corona, Landsat TM and ASTER data. *Journal of Glaciology* 54: 592-600, 2008.
- 4) Salerno F. Buraschi E. Brucoleri G. Tartari G. Smiraglia C.: Glacier surface-area changes in Sagarmatha national park, Nepal, in the second half of the 20th century, by comparison of historical maps. *Journal of Glaciology* 54 (187): 738-752, 2008.
- 5) Ageta Y. Iwata S. Yabuki H. Naito N. Sakai A. Narama C. Karma: Expansion of glacier lakes in recent decades in the Bhutan Himalayas. In *Debris-Covered Glaciers, Proceedings of a workshop held at Seattle, Washington, USA*, IAHS Publication 246: 165-175, 2000.
- 6) Iwata S. Ageta Y. Naito N. Sakai A. Narama C. Karma: Glacial lakes and their outburst flood assessment in the Bhutan Himalaya. *Global Environmental Research* 6: 3-17, 2002a.
- 7) Richardson S.D. Reynolds J.M.: An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quaternary International* 65/66: 31-47, 2000.
- 8) Ives J.D. Shrestha R.B. Mool P.K.: *Formation of Glacial Lakes in the Hindu Kush-Himalayas and GLOF Risk Assessment*. ICIMOD, Kathmandu, 2010: 9-10.
- 9) Watanabe T. Rothacher D.: The 1994 Lugge Tsho glacial lake outburst flood, Bhutan Himalaya. *Mountain Research Development* 16: 77-81, 1996.
- 10) Mool P.K. Wangda D. Bajracharya S.R. Kunzang K. Gurung D.R. Joshi S.P.: *Inventory of Glaciers, Glacial lakes and Glacial Lake Outburst Floods: Monitoring and early warning systems in the Hindu Kush-Himalayan region-Bhutan*. ICIMOD, Kathmandu, 2001: 107-111.
- 11) Ukita J. Narama C. Tadono T. Yamanokuchi T.

- Tomiya N. Kawamoto S. Abe C. Uda T. Yabuki H. Fujita K. Nishimura K.: Glacial Lake Inventory of Bhutan using ALOS Data: Part I: Methods and Preliminary Results. *Annals of Glaciology* 58: in press.
- 12) Bajracharya S.R. Mool P.K. Shrestha B.R.: *Impact of climate change on Himalayan glacier and glacial lakes*. ICIMOD, Kathmandu, 2007: 50-54.
 - 13) Kubrushko S.S. Staviskiy Y.S.: Glacier lakes of Kyrgyz and their role in mudflow formation. *Data of Glaciological Studies* 32: 59-62, 1978. (in Russian)
 - 14) Kubrushko S.S. Shatrabin V.I.: Long-term prediction of glacial mudflows in Tien Shan. *Data of Glaciological Studies* 43: 60-62, 1982. (in Russian)
 - 15) Narama C. Severskiy I. Yegorov A.: Current state of glacier changes, glacial lakes, and outburst floods in the Ile Ala-Tau and Kungöy Ala-Too ranges, northern Tien Shan Mountains. *Annals of Hokkaido Geography* 84: 22-32, 2009.
 - 16) Haeberli W.: Frequency and characteristics of glacier floods in the Swiss Alps. *Annals of Glaciology* 4: 85-90, 1983.
 - 17) Narama C. Duishonakunov M. Kääb A. Daiyrov M. Abdrakhmatov K.: The 24 July 2008 outburst flood on the western Zyndan glacier lake and recent regional changes in glacier lakes of the Teskey Ala-Too range, Tien Shan, Kyrgyzstan. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10(4): 647-659, 2010a.
 - 18) 小林尚礼：ラダークとアルナーチャルの聖地調査。高所プロジェクト第4回全体会議発表資料：2010.
 - 19) 谷田貝亜紀代，中村尚，宮坂貴文：ラダーク気象観測—通年データと2010年8月洪水時の状況—。ヒマラヤ学誌 12: 60-72, 2011.
 - 20) Berthier E. Arnaud Y. Kumar R. Ahmad S. Wagnon P. Chevallier P.: Remote sensing estimates of glacier mass balances in the Himachal Pradesh (Western Himalaya, India). *Remote Sensing of Environment* 108: 327-338, 2007.
 - 21) Bhambri R. Bolch T.: Glacier mapping: a review with special reference to the Indian Himalayas. *Progress in Physical Geography* 33: 672-704, 2009.
 - 22) Narama C. Kääb A. Duishonakunov M. Abdrakhmatov K.: Spatial variability of recent glacier area changes in the Tien Shan Mountains, Central Asia, using Corona (~1970), Landsat (~2000), and ALOS (~2007) satellite data. *Global and Planetary Change* 71: 42-54, 2010b.
 - 23) Shangguan D. Liu S. Ding Y. Li J. Zhang Y. Ding L. Wang Z. Xie C. Li G.: Glacier changes in the west Kunlun Shan from 1970 to 2001 derived from Landsat TM/ETM+ and Chinese glacier inventory data. *Annals of Glaciology* 46: 204-208, 2007.
 - 24) Komori, J. 2008. Recent expansions of glacial lakes in the Bhutan Himalayas. *Quaternary International*, 184, 177-186.
 - 25) Vuichard D. Zimmermann M.: The 1985 catastrophic drainage of a moraine-dammed lake, Khumbu Himal, Nepal: Cause and consequences. *Mountain Research Development* 7: 81-110, 1987.
 - 26) Huggel C. Haeberli W. Kääb A. Bieri D. Richardson S.: An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*. J 41: 1068-1083, 2004.
 - 27) Zhang X.: Investigation of glacier bursts of the Yarkant River in Xinjiang, China. *Annals of Glaciology* 16: 135-139, 1992.
 - 28) Iwata S. Narama C. Karma: Three Holocene and late Pleistocene glacial stages inferred from moraines in the Lingshi and Thanza village areas, Bhutan. *Quaternary International* 97/98: 69-78, 2002b.

Summary

Current State of the Glacier Lakes and Related Outburst Floods in the Domkhar Valley, Ladakh Range, Indian Himalayas

ChiYuki Narama¹⁾, Takeo Tadono²⁾, Akiyo Yatagai¹⁾, Naho Ikeda³⁾

1) Research Institute for Humanity and Nature

2) Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

3) National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED)

We studied glacier lakes in the Domkhar Valley of the Ladakh Range (Indian Himalayas), state of Jammu and Kashmir, northwestern India, based on satellite images and a field survey undertaken in June and September 2010. Information about glacier lake outburst floods (GLOFs) in the past and their damages was collected by interviews for local people in March and August 2009 and August-September in 2010. 32 small (0.008km^2 – 1.2km^2) glaciers and 11 glacier lakes (0.002 – 0.096 km^2) were found in the valley. The glaciers shrank by 3% in total area from 1994 to 2009. Three of the glacier lakes have expanded since 1980, three glacier lakes shrank rapidly in the 2000s, and five glacier lakes have remained unchanged in its areal extent. The largest glacier lake (0.096 km^2) in the Domkhar Valley had expansions rate of $0.0013\text{ km}^2/\text{year}$ in 1980–2000 and $0.0033\text{ km}^2/\text{year}$ in 2000–2010; the expansion rate was higher after 2000. Of the five glacier lakes studied, two glacier lakes with maximum depths of $\sim 40\text{ m}$ had water volumes of $\sim 1,112,000\text{ m}^3$ and $\sim 427,000\text{ m}^3$. An investigation of GLOFs in the Domkhar Valley using satellite imagery showed that four small GLOFs occurred since 2000. Fresh debris-flow deposits in the Gongpa-Rangchong Valley have been caused by a small GLOF in 2003. Although the estimated volume ($\sim 16,900\text{ m}^3$) of the lake was small, wooden bridges, fields, and water mills in the villages of Domkhar Valley were damaged. This GLOF occurred when an ice tunnel opened within the ice-cored moraine damming the lake. We observed that ice-tunnel drainage from a glacier lake (water volume $\sim 427,000\text{ m}^3$) in the Gongpa-Rangchong Valley seem to develop at present.

Keywords: glacier lake, Glacier Lake Outburst Flood (GLOF), satellite imagery, Ladakh Range, Indian Himalayas