

インド・ヒマラヤ西部、ラダーク山脈の氷河湖の特徴

奈良間千之¹⁾、田殿武雄²⁾、池田菜穂³⁾、Sonam Gyalson⁴⁾

1) 総合地球環境学研究所

2) 宇宙航空研究開発機構

3) 京都大学防災研究所

4) Ladakh Ecological Development Group (LEDeG), Leh, India

日本の陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)に搭載されたPRISMとAVNIR-2の光学センサによって2007～2010年に撮影された高分解能衛星画像を用いて、インド北西部のラダーク山脈にある195の氷河湖(0.0001 km²以上)を確認した。そのうち0.001～0.05 km²の氷河湖数が93%を占めており、小規模な氷河湖が分布する地域である。最大の氷河湖(0.25 km²)はラダーク山脈南東部の北側斜面に位置する。主要な氷河湖のタイプはモレーンダム湖である。ラダーク山脈の氷河湖の最低位高度は、山脈の北西端(4860 m)と南東端(5560 m)で大きく異なる。1962年～1980年に撮影された米国軍事偵察衛星Corona KH-4A、KH-4B、Hexagon KH-9の衛星写真、その後のJERS-1(衛星)/OPS(センサ名)、SPOT4、Landsat7/ETM+、Terra/ASTER、ALOS/PRISM、ALOS/AVNIR-2の衛星画像の分析により、ラダーク山脈北西部のドムカル谷流域に分布する13の氷河湖の多くは1960年代以降に出現したことがわかった。ドムカル谷最大の氷河湖No.3は、1965～2000年に0.0012 km²/年、2000～2010年に0.0033 km²/年で拡大を続けており、2000年以降の拡大速度は大きい。ドムカル谷上流のタベイ・ルンバ谷の氷河前面には、2011年に新たに出現した氷河湖No.13を確認した。この氷河湖は2010年10月28日の衛星画像ではまだ存在していないが、2011年の6～8月のわずか2カ月間で面積0.0398 km²、体積528,000 m³、最大水深28 mまで発達した。この氷河湖はドムカル谷で2番目に大きく、現地調査や継続したモニタリングが必要である。

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

I. はじめに

ヒマラヤ山脈では1980年代以降に生じた氷河湖決壊洪水により大きな被害が報告されているが、ヒマラヤ山脈に分布する氷河湖の大きさ、出現時期、拡大履歴(拡大速度)、決壊の要因、氷河湖決壊洪水(glacier lake outburst flood: GLOF)の被害状況は地域によって異なっている^{1,2)}。ヒマラヤ山脈～ヒンドークシュ山脈の気候環境の異なる7地域の氷河湖のサイズと拡大速度を比較したGardelle et al.³⁾によれば、ブータンやネパール東部のヒマラヤ山脈東部では、大きな氷河湖が多数分布し、氷河湖の拡大速度が大きい。一方、ヒンドークシュ、ラホール、ガルワールなどヒマラヤ山脈西部やカラコルムの山域では、小規模な氷河湖の割合が大きく、氷河湖の拡大速度は小

さい結果が得られている。これまでの世界的な注目は、過去に生じた氷河湖決壊洪水の流出量と下流域の被害の大きさや、依然として存在する巨大な氷河湖とその拡大速度の大きさからヒマラヤ山脈東部に集中している。ヒマラヤ山脈東部の最近の大きな氷河湖決壊洪水といえば、1985年8月にネパール東部クンプ地域のディグツォ、1994年10月にブータン北部ルナナ地域のルゲ湖、1998年のクンプ地域のサバイツォなどがあげられ、その被害範囲は40～100 km以上に達する⁴⁻⁷⁾。この地域でみられる多くの氷河湖の出現時期は1950～1960年代以降であり、その中でも顕著に発達する氷河湖は、0.01～0.27 km²/年で拡大している^{1,8,9)}。急速に拡大する氷河湖もあれば、長年変化していないものもあり、そのメカニズム

はまだ完全には明らかになっていない。

最近では、水資源の保全や防災対策を目的として、ネパールの国際総合山岳開発センター (International Centre for Integrated Mountain Development: ICMOD) によってヒマラヤ全域の水河・氷河湖台帳が作成されている⁷⁾。日本の国際協力機構 (Japan International Cooperation Agency: JICA) と科学技術振興機構 (Japan Science and Technology Agency: JST) による地球規模課題対応国際科学技術協力 (Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development: SATREPS) のプータン氷河湖プロジェクトでは、地球観測衛星「だいち」(the Advanced Land Observing Satellite: ALOS) に搭載されたパンクロマチック立体視センサ (the Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping: PRISM) と高性能可視近赤外放射計 2 型 (the Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2: AVNIR-2) の光学センサで撮影された高分解能衛星画像を用いて、氷河湖台帳の作成がおこなわれ、その成果は WEB 上 (http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/bhutan_gli/index_j.htm) で公開されている^{10,11)}。

このようにヒマラヤ山脈東部では、氷河湖の現状報告やデータベースの作成がおこなわれているが、ヒマラヤ山脈西部やカラコルムでは氷河湖や氷河湖決壊洪水の現状に関する報告はほとんどない。ヒマラヤ山脈西部では、インド北西部のラダーク山脈のドムカル谷 (Domkhar) において 2003 年の氷河湖決壊洪水や氷河湖の拡大履歴が報告されている²⁾。カラコルム北部のフンザ地方のグルキン (Ghulkin) 氷河では、2009 年 6 月 14 日に氷河内・氷河底水路からの出水が生じて下流の村で被害がでている^{12,13)}。また、2011 年 7 月 30 日にカラコルムのタリス (Talis) 村では、氷河湖決壊洪水により約 130 の家屋破壊が破壊され、農作物にも被害が発生した¹⁴⁾。前述したように、世界的に注目されているヒマラヤ山脈東部では、1998 年のクーンブ地域のサバイツォの決壊を最後に大きな被害がでた氷河湖決壊洪水は報告されていない。一方、ヒマラヤ山脈西部では被害をとまう氷河湖決壊洪水が 2000 年以降数回生じている。これまでヒマラヤ山脈西部の氷河湖は、サイズが小さく、拡大速度も小さく、氷河湖決壊洪水の報告もほとんどないので、その存在はあまり注目されてこなかった。ヒマラヤ山脈西部において、氷

河湖決壊洪水の被害の程度や住民への脅威はたして小さいものだろうか。本研究では、ヒマラヤ山脈西部の氷河湖の現状を理解することを目的に、日本の地球観測衛星 ALOS に搭載された PRISM と AVNIR-2 のセンサで撮影された高分解能衛星画像を用いて、ラダーク山脈の氷河湖データを取得し、その分布や発達履歴などからこの地域の氷河湖の特徴を明らかにする。また、奈良間ほか²⁾によるドムカル谷の氷河湖の発達履歴データの更新をおこなった。

II. 研究地域

ラダーク山脈は、インド北西部のジャンム・カシミール州のラダーク地方 (中心都市: レー) に位置し、北西～南東方向に一直線に 380 km ほど伸びる、高度 6000～5000 m の山脈である。ラダーク山脈は、インド・ヒマラヤ西部 (インド・ヒマラヤ東部: アルナーチャル・プラデーシュとシッキム) の一部を構成し、山脈の西端はインド・パキスタン両国間で設定された停戦ライン (Line of Control) をわずかに越える (図 1a, b)。山脈には交通路である峠が多くあり、古くは人々の生活路として利用されていた。山脈の北側にシャヨク河、南側にインダス河が東から西へ流れ、山脈中央部の南側にラダーク地方の中心都市レーが位置する。2010 年に現地調査をおこなったドムカル谷は、ラダーク山脈北西部の南側斜面に位置する (図 1b)。ドムカル谷の流域には、32 の小規模な山岳氷河 (0.008 km²～1.2 km²) が分布し、その多くは本谷のプジュン (Phujung) 谷と支谷のゴンパ・ランチョン (Gongpa-Rangchong) 谷の上流に位置する (図 1c)。ドムカル谷の氷河面積 (9.9 km²) は流域面積 (182 km²) の 5% を占める。この地域の気候は非常に乾燥しており、WorldClimate (www.worldclimate.com) によるラダーク地方の中心都市レー (Leh; 3513 m) の年降水量の平均値 (1876～1969 年) は 93.1 mm である。降水の季節変化をみると、7～8 月に降水量が多い。

III. 方法

1. 衛星画像を用いた氷河湖データの取得

ラダーク山脈の氷河湖のデータを取得するため、地球観測衛星 ALOS の PRISM と AVNIR-2 の光学センサによって撮影された可視画像 (2.5 m

分解能の PRISM 画像と 10 m 分解能の AVNIR-2 画像）を使用した。氷河湖データの取得には、2007 年 10 月 28 日、2009 年 8 月 14 日、2010 年 7 月 31 日、2010 年 8 月 7 日、2010 年 8 月 29 日、2010 年 10 月 28 日に撮影された AVNIR-2 や PRISM 画像を使用した。オルソ補正されていない ALOS/AVNIR-2 の衛星画像には、衛星画像解析ソフト PCI Geomatica 10.3 を用いて The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) によって作成された数値標高モデル (Digital Elevation Model: DEM) を用いてオルソ画像を作成した。オルソ補正された衛星画像の位置精度の検証には、Global Positioning System (GPS) レシーバーである ProMark3 (Ashtech Co., Ltd) を用いてドムカル谷上流部の氷河湖周辺を歩いて位置情報を取得した。図 2 は、ドムカル谷の氷河湖 No.4、5、12 とその周辺で観測した GPS データ (2010 年 9 月 8 日) とオルソ補正された ALOS/AVNIR-2 の衛星画像 (2010 年 10 月 28 日撮影) を重ねて示したものである。AVNIR-2 画像の氷河湖と GPS データは一致しており、オルソ補正された衛星画像の位置精度は正確であった。

氷河前面にある 0.0001 km^2 以上の氷河湖を対象に、GIS 解析ソフト ArcGIS 9.3 を用いて手動により氷河湖のポリゴンデータ (氷河湖の輪郭を表現した多角形の GIS データ) を抽出した。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、同時期に撮影された ALOS/PRISM と ALOS/AVNIR-2 の画像のみパンシャープン画像を作成して使用した。本研究では、ドムカル谷の氷河湖番号 (ID No.1-No.13) は、奈良間ほか²⁾を使用した (図 1c)。

ドムカル谷の過去の氷河湖の出現時期と拡大履歴を明らかにするため、米国軍事偵察衛星である Corona KH-4A (KH-4A は衛星の型名、2.75 m 分解能、1965 年 10 月 8 日撮影) と Corona KH-4B (1.8 m 分解能、1971 年 9 月 28 日撮影) を使用した。1980 年以降の拡大履歴は、奈良間ほか²⁾で報告されているように、衛星名: Japanese Earth Resources Satellite-1 (JERS-1) / センサ名: Optical System (OPS; 17.5 m 分解能)、Satellite Pour l'Observation de la Terre 4 (SPOT4; 10 m 分解能)、Landsat7/ Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+; 分解能 30/15 m)、Landsat5/Thematic Mapper (TM; 30 m 分解能)、

Terra/ Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer (ASTER; 15 m 分解能)、ALOS/ PRISM・AVNIR-2 から時期の異なる氷河湖のポリゴンデータを取得した。本研究では、1965 年以降の氷河湖の拡大履歴を再考察した。

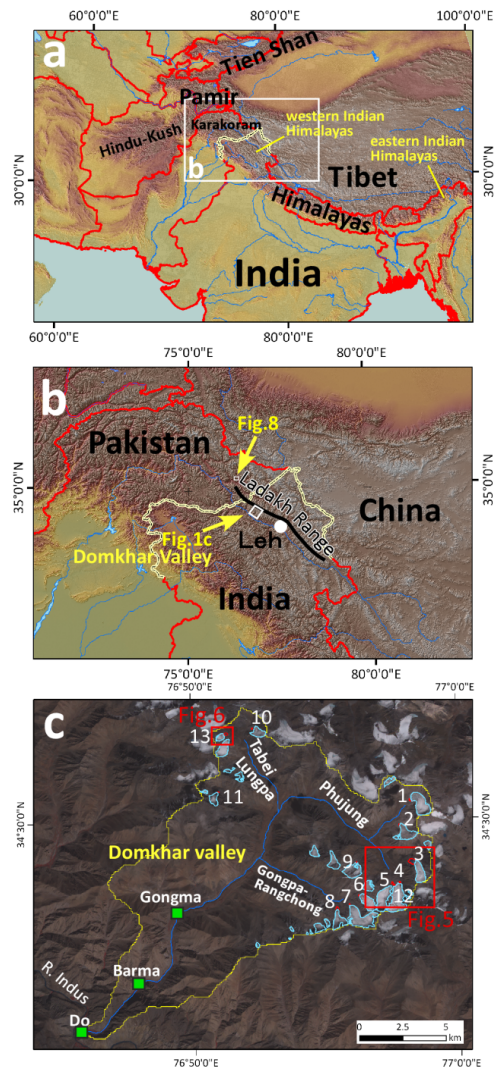


図 1 (a, b) インド北西部のラダーク山脈とドムカル谷の位置。(c) ドムカル谷の氷河と氷河湖の分布。

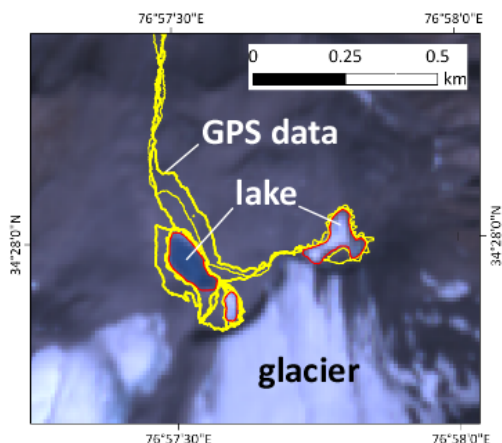


図2 2010年9月8日に徒歩で計測したGPS測量データ(黄線)と2010年10月28日撮影のALOS/AVNIR-2画像を基に作成した氷河湖のポリゴンデータ(赤線)。

IV. 結果と考察

1. ラダーク山脈の氷河湖の特徴

2007～2010年に撮影されたALOS/PRISM・AVNIR-2を用いて、ラダーク山脈に分布する195の氷河湖(0.0001 km²以上)のポリゴンデータを抽出した。氷河湖のタイプのほとんどはモレーンによって堰き止められたモレーンダム湖であり、その中でも氷河と接する氷河湖やモレーン表面に発達するサーモカルスト湖が確認された。図3は、ラダーク山脈の氷河湖の分布とその大きさ、流域ごとの氷河湖数、氷河湖のある流域の集落の位置と人口を示す。人口データは、2000年に実施されたインド統計局(Census of India)の調査結果をもとに地元政府が公表した資料に基づいている。集落の位置は、フランスのEditions Olizane社から出版されているトレッキングマップ「Ladakh & Zaskar (縮尺 1/150,000)」2008年版とGoogleEarthを参照した。ラダーク山脈の氷河湖の分布は、山脈の北西部と南東部に集中し、山脈中央部の南側斜面のレー付近とその東側に氷河湖はあまり存在しない。ラダーク山脈で最大の氷河湖(0.25 km²)は山脈南東部の北側斜面のヨハン・ヨクマ(Yohank Yogma)村とチュシュル(Chushul)村の上流にある。0.05 km²以上の氷河湖は8つあり、山脈の北西部と南東部に4つずつ分布し、現地調査をおこなったドムカル谷上流の氷河湖No.3も含ま

れる(図1c)。

流域ごとの氷河湖数をカラー分類で示したところ、山脈北西部の北側斜面に多数の氷河湖をもつ流域が多く存在し、ドムカル谷はラダーク山脈の中でも4番目に多くの氷河湖を抱える流域であった。氷河湖のある流域の集落(夏営地の滞在小屋は含まない)の分布をみると、氷河湖のある流域のほとんどの集落は存在するが、山脈南東部の北側斜面だけ氷河湖のある流域に集落が分布していないことがわかった。集落の人口分布では、山脈北西部の南側斜面で人口の多い集落が多く存在しており、集落が谷の中間部まで分布し、谷の距離が南東部地域よりも長いという特徴がある。また、山脈全体では、シャヨク河またはインダス河に合流する谷の出口付近に立地する集落が多くみられる。各流域の氷河湖と集落までの最短距離を算出したところ、最短で2.8 km、最長で28 km、平均15 kmであった。これはヒマラヤ山脈東部と比べると非常に短い距離であり、小さな氷河湖でも決壊した場合、各流域の下流域で被害を受ける可能性は十分にある。しかも、ラダーク山脈では、氷河湖と人々の暮らす居住地の距離が短い、その存在は人々に知られていない。山脈の南北には東西に流れるインダス河とシャヨク河があり、決壊する氷河湖のサイズや流出量にもよるが、その直接的かつ主要な被害範囲は両河川までの数km～30 kmに集中すると考えられる。

図4aは、ALOS/PRISMとAVNIR-2から抽出したヒマラヤ山脈西部のラダーク山脈、ヒマラヤ山脈東部のプータンのスンコシ(Sunkosh)川流域(ポチュー(Pho Chu)とモチュー(Mo Chu))、中央アジアの天山山脈のクンゴイ・アラトー山脈とイリ・アラタウ山脈における面積分類ごとの氷河湖数を示す。これら3つの山岳地域を比較すると、スンコシ川流域では0.05 km²以上の巨大な氷河湖が多く分布する。巨大な氷河湖の多くは、氷河末端部が岩屑で覆われた岩屑被覆型氷河の末端部で見られ、巨大なモレーンで堰きとめられている。一方、ラダーク山脈と天山山脈(クンゴイ・アラトー山脈とイリ・アラタウ山脈)ではどちらも小規模な氷河湖が多いが、0.005 km²以下の特に小さい氷河湖数は天山山脈でより多い結果であった。この要因として、天山山脈のクンゴイ・アラトー山脈とイリ・アラタウ山脈には、小規模な岩屑被覆型氷河があり、氷河前面のデッドアイス(氷

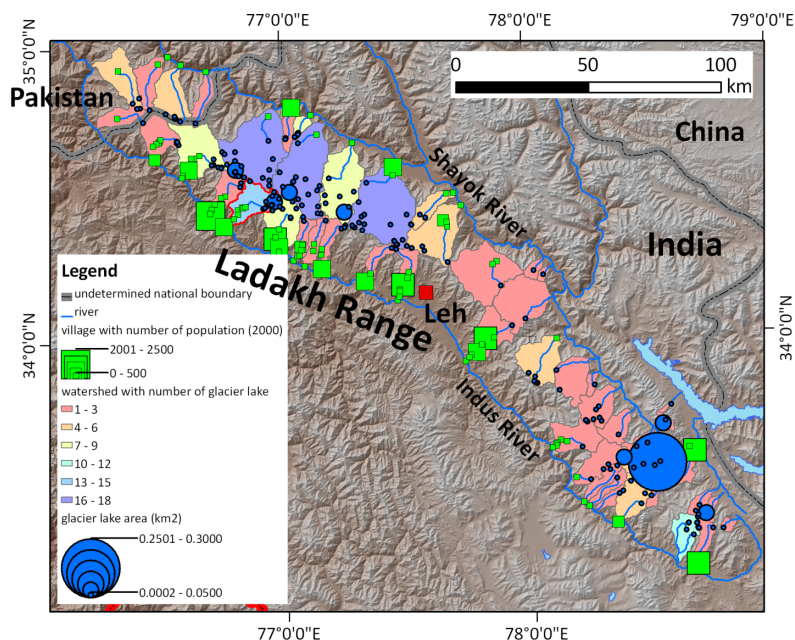


図3 ラダーク山脈の氷河湖データ（青丸と大きさ：氷河湖の分布と氷河湖面積、カラーのポリゴン：流域の氷河湖数、緑色の四角と大きさ：氷河湖のある流域の村の分布と人口）。赤線で囲った流域はドムカル谷流域を示す。

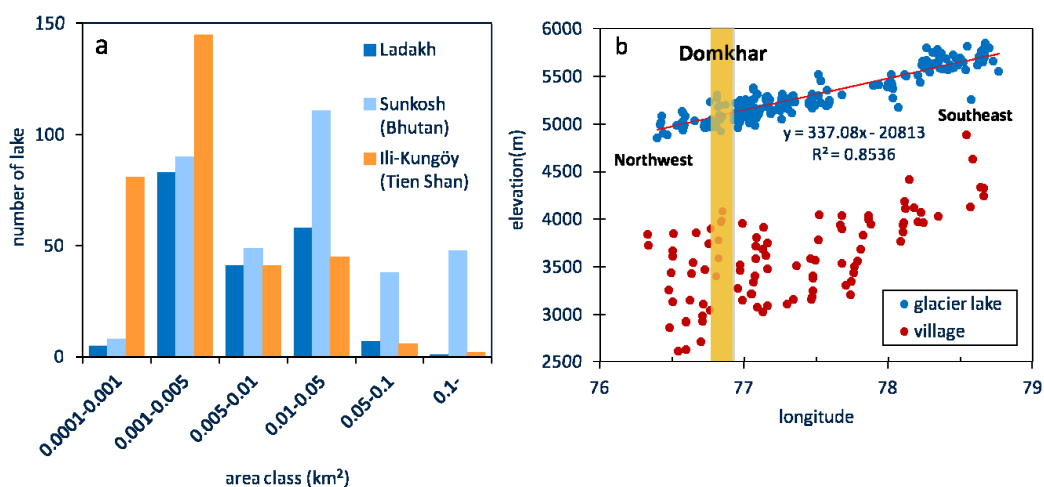


図4 (a) 氷河湖の面積別の数（インド・ヒマラヤ西部：ラダーク山脈、ブータン・ヒマラヤ：スンコシ河流域、天山山脈：イリ・アラタウ山脈、クンゴイ・アラトー山脈）、(b) ラダーク山脈の氷河湖（青丸）と氷河湖のある流域の集落の高度分布（赤丸）。オレンジの線はドムカル谷の位置を示す。

河末端部が岩屑に覆われ氷河の縮小時に取り残された氷塊）上に発達するサーモカルスト湖が多く発達しているためである。ラダーク山脈では、氷河末端部が岩屑に覆われていないクリーンタイプの小規模な氷河が多く存在し、サーモカルスト湖を形成する場所は少ない。このように3地域を比較することで、局地的な気候環境や山岳地形から生じる氷河サイズや氷河タイプ（クリーンタイプ・岩屑被覆氷河）の違いにより、発達する氷河湖が地域ごとに異なる特徴を持つことがわかる。

図4bはラダーク山脈の氷河湖と氷河湖が存在する流域の集落の分布高度を示す。氷河湖の分布高度は山脈の北西部と南東部で大きく異なる。氷河湖の最低位の高度は北西端で4860 m、南東端で5560 mであり、その高度差は700 mある。この違いは氷河の末端高度の違いを反映しており、年降水量の傾きが東西で大きいことが考えられる。ラダーク地方は気象観測所が少ないため降水データからの検証は難しいが、北西部では降水量が多いため氷河の平衡線高度が低くなり、氷河と氷河湖の分布高度はより低い位置にあると考えられる。同じインド・ヒマラヤのガルワール山岳地域の降水量の傾きは南北で大きいという報告もあり¹⁵⁾、

インド北西部の山岳地域は年降水量の傾きが非常に大きい地域といえる。氷河湖の存在する流域の集落の高度分布をみても、氷河湖と同じように北西部と南東部で大きな傾きがみられる。山脈北西部では、氷河湖と最上流部の集落の距離は短く、河川沿いに分布する集落数も多く、河川の距離も長い。つまり、氷河湖決壊洪水時の被害に関して、その土地利用にもよるが集落が谷の中間部まで入り河川沿いに多くの集落が分布する北西部は、より広範囲に影響を受ける可能性がある。

2. ドムカル谷の氷河湖拡大履歴 (1965～2010年)

図5aは、2010年に現地調査をおこなったラダーク山脈北西部の南側斜面のドムカル谷における(図1c)、米国軍事偵察衛星 Corona KH-4A によって1965年10月8日に撮影された衛星写真にALOS/AVNIR-2画像(2010年10月28日撮影)をもとに作成した氷河と氷河湖のポリゴンデータを重ねた図である。氷河の面積を比較すると、この45年間で明らかに氷河が縮小していることがわかる。現存する氷河湖(No.4、5、12)は1965年以降に氷河が縮小した場所に形成されている。ドムカル谷最大の氷河湖No.3(図5a、b)は、

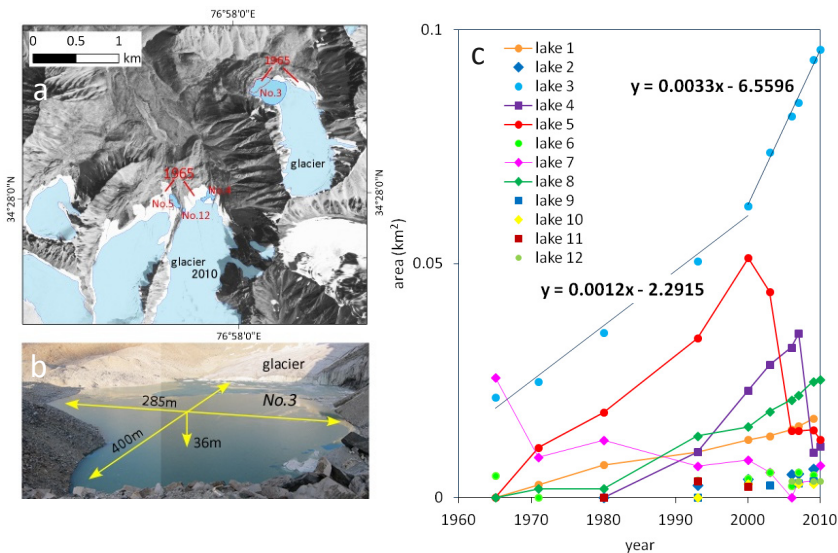


図5 (a) ドムカル谷の Corona KH-4A の衛星写真 (1965 年 10 月 8 日撮影) と ALOS/AVNIR-2 画像 (2010 年 10 月 28 日撮影) を基に作成した氷河と氷河湖のポリゴンデータ。範囲は図 1c に示す。(b) 氷河湖 No.3 の現地写真 (2010 年 9 月 6 日奈良間千之撮影)。(c) ドムカル谷の氷河湖拡大履歴。

1965年に小さな氷河湖（0.0214 km²）としてすでに存在していた。

ドムカル谷の1980～2010年の氷河湖の拡大履歴は奈良間ほか²⁾で詳しく述べられているが、ここでは1965年10月8日撮影されたCorona KH-4Aと1971年9月28日に撮影されたCorona KH-4Bの衛星写真のデータを加え、1965～2010年の45年間のドムカル谷の氷河湖拡大履歴を再考察した（図5c）。ドムカル谷には、2011年現在で13の氷河湖が存在する。このうち履歴を調べた12の氷河湖（No.13除く）の出現時期をみると、そのほとんどが1960年代以降に出現したことがわかった。ドムカル谷最大の氷河湖No.3の出現時期は、拡大速度から推定すると1950年頃だと考えられる。この氷河湖は、1965～2000年に0.0012 km²/年、2000～2010年に0.0033 km²/年の速さで拡大を続けており、2000年以降の拡大は急速になっている。しかし、この拡大速度は、0.01～0.27 km²/年で急速に拡大するヒマラヤ山脈東部の氷河湖^{1,8,9)}に比べると小さい。ドムカル谷の13の氷河湖のうち出現後に拡大を続ける氷河湖は3つ（No.1, 3, 8）あり、氷河湖No.1と8も前述のNo.3と同様に2000年以降の拡大速度がわずかに大きくなっている。一方、奈良間ほか²⁾でも説明されているように、氷河湖No.4と5は2000年代の出水による面積の減少が生じている。氷河湖No.9も同様に1965～1970年に排水による面積の減少（0.0257 km²から0.0086 km²）を確認できる。

3. 2011年にドムカル谷上流のタベイ・ルンパ谷に出現した氷河湖

2011年6月にドムカル谷のタベイ・ルンパ(Tabei Lungpa)谷の氷河湖前面に氷河湖が突然出現した（図1c; 氷河湖No.13）。この氷河湖は、2010年10月28日に撮影されたALOS/AVNIR-2画像では存在せず、2011年6月8日に撮影されたTerra/ASTER画像ではじめて確認できる（図6）。6月8日にまだ小さかった氷河湖（0.0072 km²）は8月3日（0.0398 km²; Landsat5/TM）までの約2カ月間で急激に拡大した。その後9月20日（Landsat5/TM）、10月11日（SPOT4）まで面積は変わらず推移する。2009年11月2日に撮影されたALOS/PRISMのDEMから氷河湖の水量を推定したところ、体積528,000 m³、最大水深28 mであった。この氷河湖

の面積と水量はドムカル谷の氷河湖の中で2番目に大きく、約45年間で形成された氷河湖のサイズを超える湖がわずか2カ月間で形成されたことになる。

このような短期間で形成された氷河湖の事例はイタリアン・アルプスと天山山脈で報告されている¹⁶⁻¹⁸⁾。イタリアン・アルプスのベルヴェデーレ(Belvedere)氷河では、岩屑被覆氷河上に発達した氷河湖が2001～2002年にかけて出現し、その後湖水は出水により減少した。氷河湖の面積は2001年9月に0.0035 km²、2002年5月に0.04 km²、2002年6月半ばに0.15 km²に達し、最大水量は3,000,000 m³であった¹⁹⁾。3人の犠牲者が出た天山山脈のズンダン西氷河湖では、2008年5月12日に0.0023 km²であったものが、2008年6月13日に0.026 km²、決壊した7月24日に0.0422 km²まで達し、水量は437,000 m³であった¹⁸⁾。これらはいずれも数カ月間で急激に発達した後決壊が生じていることから短命氷河湖(short-lived glacier lake)と呼ばれている¹⁷⁾。報告された短命氷河湖は、氷河底あるいは氷河内水路を通り出水している。ズンダン西氷河湖でも氷河湖をせき止めるアイスコアードモレーン内部に発達したアイストンネルが確認されており、冬季の凍結あるいはトンネル内の崩壊などで水路が封鎖され、雪融けにより春から夏にかけて氷河湖が一気に拡大したと考えられる¹⁸⁾。ドムカル谷では、2003年7月9～10日にゴンパ・ランチョン(Gongpa-Ranchong)谷上流の氷河湖No.6（図1c）で決壊洪水が生じている。この氷河湖の出水要因は、氷河湖前面のアイスコアードモレーン内部に発達したアイストンネルの開放によるものであった²⁾。この地域では、ブータンのように氷河湖を堰き止めるモレーンが崩壊するのではなく、天山山脈と同様に氷河湖はアイストンネルの開放により排水されるケースが主要因だと考えられる。

タベイ・ルンパ谷の氷河湖も排水路が冬季に凍結あるいは崩壊により塞がれ、雪融けとともに氷河湖が短期間で形成された可能性が高い。タベイ・ルンパに出現した氷河湖は大小二つの湖盆地形に形成されている。小さな湖盆の下流側にはほとんど起伏差のない地形が続くが、図7の氷河湖周辺の縦断面図で示されたように、大きな湖盆の右岸側は河床までの起伏差が非常に大きい。このモ

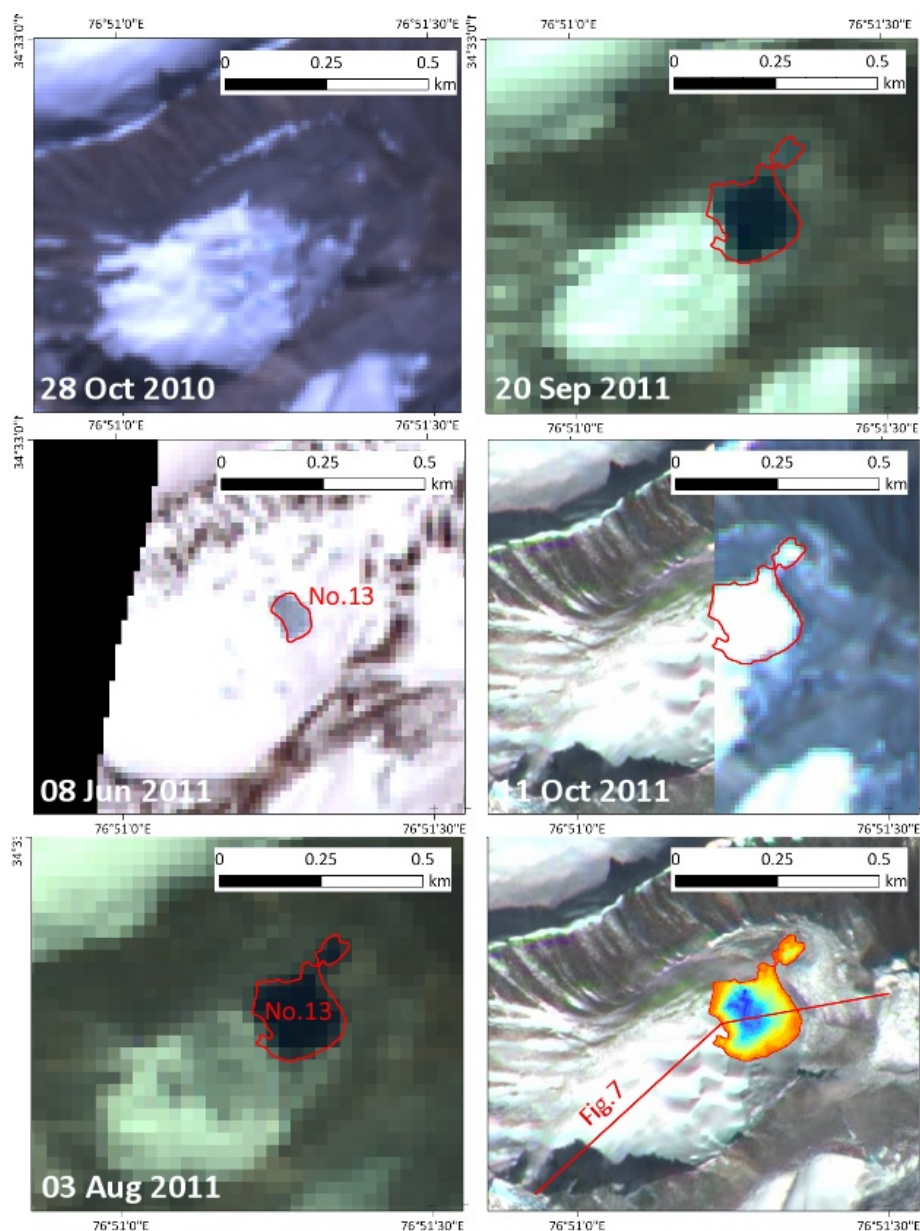


図6 ドムカル谷上流のタベイ・ルンパ (Tabei Lungpa) 谷に 2011 年に出現した氷河湖 (No.13) の面積変化。画像の範囲は図 1c に示す。使用した画像データは、ALOS/AVNIR-2 (2010 年 10 月 28 日撮影)、Terra/ASTER (2011 年 6 月 8 日撮影)、Landsat5/TM (2011 年 8 月 3 日と 2011 年 9 月 20 日撮影)、SPOT4 (2011 年 10 月 11 日撮影) である。図 7 の縦断面ラインと湖盆図を記した図は 2009 年 11 月 2 日撮影の ALOS PRISM/AVNIR-2 のパンシャープン画像を使用した。

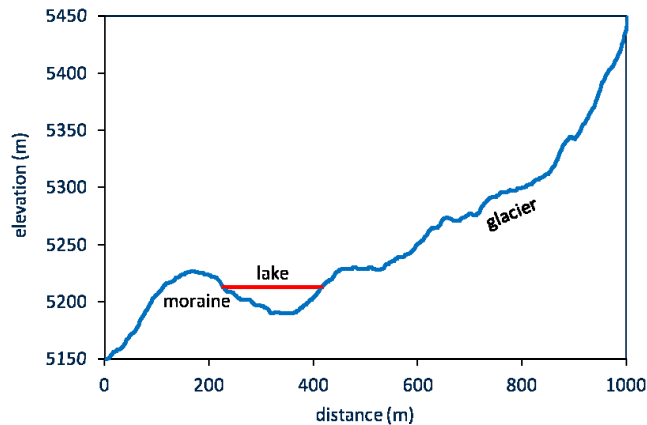


図7 ドムカル谷上流のタベイ・ルンバ (Tabei Lungpa) 谷に2011年に出現した氷河湖 (No.13) と氷河の縦断面図。縦断面のラインは図6に示す。

レーンが崩壊あるいはアイストンネルが形成された場合、氷河湖決壊の危険性が高まることが予想され、早期の現地調査と衛星画像による氷河湖のモニタリングが必要である。

4. ラダーク山脈の氷河湖決壊洪水の被害の特徴と今後の課題

これまでの結果から、ラダーク山脈の氷河湖は、山脈の北西部と南東部に集中していることがわかった。図4aと図5で示したように、その大きさはヒマラヤ山脈東部に比べて小規模であり、氷河湖の拡大速度も小さい。分布する氷河湖のサイズは 0.05 km^2 以下の小規模なものがほとんどだが、氷河湖と人々が暮らす集落の距離は $2.8 \sim 30 \text{ km}$ と極めて近いことから、小さな氷河湖の決壊洪水にでも川沿いの家屋や畑などに深刻な被害を与える可能性は十分ある。しかも、地元住民は氷河湖の存在を把握していない。ドムカル谷では、2003年7月に起きた小規模な氷河湖決壊洪水によって、川沿いに立地する多くの家屋が破壊されている。2010年8月5～7日ごろの集中豪雨によって生じた洪水でも河沿いの家屋や農地は深刻な被害を受けていることから、さらに大きな流出量が予想される氷河湖決壊洪水に対して川沿いで暮らす人々は十分な注意が必要である。

山脈周辺の集落はインダス河あるいはシャヨク河と山脈から流れ下る川の合流付近の扇状地上に

立地している。2002年8月に24人の犠牲者を出したタジキスタンのダシュト村を襲った氷河湖決壊洪水のように²⁰⁾、主要河川と支谷との合流地点に形成された扇状地上は、氷河湖決壊洪水による洪水堆積物で覆われる危険の高い場所である。

OCHA¹⁴⁾のレポートによれば、ラダーク山脈の北側、パキスタン領のシャヨク川下流の支谷フシェ (Hushe) 谷沿いに位置するタリス (Talis) 村 (家屋400、人口2850) で、2011年7月30日に生じた氷河湖決壊洪水により、約130の家屋が倒壊し、農地に深刻な被害が発生した (図1b)。図8は、タリス村上流の洪水を生じた流域 (a: 2012年1月6日に撮影されたALOS/AVNIR-2画像、マルチスペクトル10m分解能)、氷河湖決壊洪水前後を撮影した衛星画像 (b: 2011年7月26日撮影のSPOT4のパンシャープ画像、パンクロマチック10mとマルチスペクトル20m分解能、c: 2011年8月3日撮影のSPOT5画像、マルチスペクトル10m分解能) である。SPOT画像や2011年8月24日に撮影されたGoogleEarthの画像から確認したところ、決壊した氷河湖はフシェ谷の支谷のタリス村上流部の左岸側に位置する。洪水前後の画像を比較すると、この氷河湖面積は 0.0085 km^2 から 0.005 km^2 に変化していた。氷河湖を支えるモレーンの崩壊が画像判読で確認できない点から、この氷河湖はモレーン内部の水路を通して出水したと考えられる。下流域の被害箇所をみると、

扇状地上のタリス村で被害が大きく、幅 100 m ほどの土石流が二手に分かれている。このように、近年扇状地上の集落で被害が報告されており、氷河湖が上流にある扇状地上の集落では防災のために土地利用の見直しが必要である。

この地域の出水時の流量変化について考えてみる。この地域の氷河湖決壊洪水の要因として、モレーン内部に発達したアイストンネルの開放によるケースが多い²⁾。このようなタイプの氷河湖からの出水時の流出過程は、ヒマラヤ山脈東部の 1985 年のサバイツォや 1994 年のルゲ湖のようにモレーンが崩壊し流出量が短時間で増加するハイ

ドログラフとは異なり、時間とともに流量が徐々に増加すると推定されている^{5,21,18)}。このように地域ごとの氷河湖の特徴を把握することは、防災や災害教育をおこなううえで非常に役立つ。

これまで上述したように、この地域の氷河湖や氷河湖決壊洪水の特徴は、巨大な氷河湖が多いヒマラヤ山脈東部とは大きく異なっているが、小さい氷河湖の分布地域だからといってその存在を軽視できない。ラダーク山脈では、1970～1980 年代に生じた氷河湖決壊洪水に関するいくつかの情報がある。レーとドムカル谷の間に位置するニモ(Nimo)では、1970～1972 年に上流部で発生した

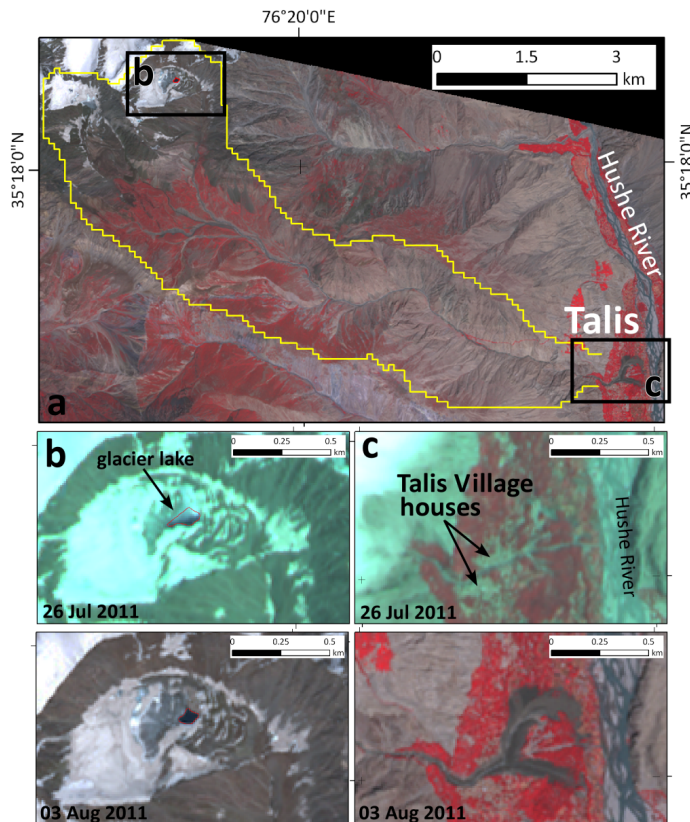


図8 パキスタン領、シャヨク河支流のフシェ谷沿いのタリス村を襲った洪水前後の衛星画像。(a) タリス村上流の洪水を生じた流域 (2012 年 1 月 6 日に撮影された ALOS/AVNIR-2 画像、マルチスペクトル 10 m 分解能)、黄色線は洪水が発生した流域を示す。画像の赤色は植生の場所を示す。場所は図 1b に示す。(b, c) 氷河湖決壊洪水前後を撮影した衛星画像 (b: 2011 年 7 月 26 日撮影の SPOT4 のパンシャープ画像、パンクロマチック 10 m とマルチスペクトル 20 m 分解能、c: 2011 年 8 月 3 日撮影の SPOT5 画像、マルチスペクトル 10 m 分解能)。

氷河湖決壊洪水により 10 人近くの犠牲者が出ている。住人の話では夜中に氷河湖が決壊したようである。ラダーク山脈には 195 の氷河湖が現存しており、ドムカル谷のタベイ・ルンバ谷の短期間で出現した氷河湖などもあり、ラダーク山脈の氷河湖の現地調査やモニタリングは継続しておこなわれるべきである。また、氷河湖と住民の居住地の距離が短いにもかかわらず、住民は氷河湖の存在を把握していない。現在、地域住民の災害対応力の向上に貢献するため、ドムカル谷で氷河湖決壊洪水に関する知識向上のためのワークショップ開催の準備を進めている。2010 年 10 月の事前打ち合わせでは、地元の環境 NGO 団体である Ladakh Ecological Development Group (LEDeG) とともにドムカル村の住民と対話し、開催の合意を得ている（図 9）。さらに、各流域の氷河湖地図の配布、ラダーク地方の防災関係者とのミーティングなど積極的

に情報の公開を進めていくことが大切である。

まとめ

2007～2010 年に撮影された ALOS/PRISM と AVNIR-2 を用いて、インド北西部のラダーク山脈における 195 の氷河湖（0.0001 km² 以上）のポリゴンデータを抽出した。ドムカル谷には 2011 年現在 13 の氷河湖が現存し、そのほとんどは 1960 年代以降に出現・発達したものである。拡大を続ける 3 つの氷河湖の拡大速度は 2000 年以降大きくなっている。ラダーク山脈に分布する氷河湖はヒマラヤ山脈東部に比べ小規模で、その拡大速度は小さい。しかし、各流域の氷河湖と集落の最短距離は 2.8～28 km と非常に短く、小規模な氷河湖が起こす決壊洪水でも深刻な被害を招く可能性はある。今後は、氷河湖の現地調査や衛星画像によるモニタリングとともに、氷河災害の知識向上のためのワークショップや氷河湖地図の配布など積極的な情報公開と対策を進めていく必要がある。

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）の予算をさせていただいた。ラダーク研究グループの月原敏博氏（福井大学）、竹田晋也氏（京都大学）、山口哲由氏（愛知大学）には、研究活動に関する住民との協議でお世話になった。小坂康之氏（総合地球環境学研究所）には、ヒマラヤ学誌の原稿や国際会議でお世話になった。現地調査では、LEDeG の Sonam Ngodup 氏やドムカル谷の住民の方々にご協力いただいた。二人の差読者の方には本稿に対する貴重なお意見をいただいた。また、ALOS の衛星画像は、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) 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



図 9 ドムカル村氷河湖ワークショップ事前説明会の様子（2011 年 10 月 31 日 Sonam Ngodup 撮影）

- workshop held at Seattle, Washington, USA, IAHS Publication 2000; 246, 165-175.
- 2) 奈良間千之, 田殿武雄, 谷田貝亜紀代, 池田 菜穂: 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. *ヒマラヤ学誌* 2011; 12, 73-83.
 - 3) Gardelle J, Arnaud Y, Berthier E: Contrasted evolution of glacial lakes along the Hindu Kush Himalaya mountain range between 1990 and 2009. *Global and Planetary Change* 2011; 75, 47-55.
 - 4) Ives J D: Glacier lake outburst floods and risk engineering in the Himalaya, ICIMOD Occasional Paper No.5 1986.
 - 5) Vuichard D, Zimmermann M: The 1985 catastrophic drainage of a moraine-dammed lake, Khumbu Himal, Nepal: Cause and consequences. *Mountain Research Development* 1987; 7, 81-110.
 - 6) Watanabe T, Rothacher D: The 1994 Lugge Tsho glacial lake outburst flood, Bhutan Himalaya. *Mountain Research Development* 1996; 16, 77-81.
 - 7) Mool PK, Wangda D, Bajracharya SR, Kunzang K, Gurung DR, Joshi SP: Inventory of Glaciers, Glacial lakes and Glacial Lake Outburst Floods: Monitoring and early warning systems in the Hindu Kush-Himalayan region-Bhutan. *ICIMOD*, 2001: 107-111.
 - 8) Richardson SD, Reynolds JM: An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quaternary International* 2000; 65/66, 31-47.
 - 9) Komori J: Recent expansions of glacial lakes in the Bhutan Himalayas. *Quaternary International* 2008; 184, 177-186.
 - 10) Ukita J, Narama C, Tadono T, Yamanokuchi T, Tomiyama 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* 2011; 52(58), 65-71.
 - 11) Tadono T, Kawamoto S, Narama C, Yamanokuchi T, Ukita J, Tomiyama N, Yabuki H: Development and Validation of New Glacial Lake Inventory in the Bhutan Himalayas Using ALOS 'DAICHI' . *Global Environmental Research*, in press.
 - 12) Roohi R, Ashraf A, Mustafa N, Mustafa T: Community based survey for assessment of glacial lake outburst flood hazards (GLOFs) in Hunza River Basin. Preparatory assessment report 2008; Water Resources Research Institute, National Agricultural Research Center, Islamabad, 32-46.
 - 13) Richardson, S.D., Quincey D.J.: Glacier outburst floods from Ghulkin Glacier, upper Hunza Valley, Pakistan. Abstract in EGU General Assembly, 2009.
 - 14) OCHA (United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs): Pakistan monsoon update (http://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/LinkClick.aspx_.pdf) 2011; 3. (参照 2012 年 1 月 5 日アクセス)
 - 15) Scherler D, Bookhagen B, Strecker MR, Blanckenburg FV, Rood D: Timing and extent of late Quaternary glaciation in the western Himalaya constrained by ^{10}Be moraine dating in Garhwal, India. *Quaternary Science Reviews* 2010; 29, 815-831.
 - 16) Haeberli W, Kääb A, Paul F, Chiarle M, Mortara G, Mazza A, Richardson S: A surge-type movement at Ghiacciaio del Belvedere and a developing slope instability in the east face of Monte Rosa, Macugnaga, Italian Alps, *Norsk Geogr. Tidsskr* 2002; 56, 104-111.
 - 17) Tamburini A, Mortara G, Belotti M, Federici P: The emergency caused by the "Short-lived Lake" of the Belvedere Glacier in the summer 2002 (Macugnaga, Monte Rosa, Italy), Studies, survey techniques and main results, *Terra glacialis* 2003; 6, 37-54.
 - 18) 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*, 2010; 10(4), 647-659.
 - 19) Kääb A, Huggel C, Barbero S, Chiarle M, Cordola M, Epifani F, Haeberli W, Mortara G, Semino P, Tamburini A, Viazzo G: Glacier hazards at

- Belvedere Glacier and the Monte Rosa east face,
Italian Alps: Processes and Mitigation,
Proceedings Interpraevent 2004; 1, 67-78.
- 20) Mergili M, Schneider JF: Regional-scale analysis
of lake outburst hazards in the south-western
Pamir, Tajikistan, based on remote sensing and
GIS. *Natural Hazards and Earth System Sciences*
2011; 11, 1447-1462.
- 21) Huggel C, Haeberli W, Kääb A, Bieri D,
Richardson S: An assessment procedure for
glacial hazards in the Swiss Alps, *Canadian
Geotechnical Journal* 2004; 41, 1068-1083.

Summary

Characteristics of Glacier Lakes in the Ladakh Range, Western Indian Himalayas

Chiyuki Narama¹⁾, Takeo Tadono²⁾, Naho Ikeda³⁾, Sonam Gyalson⁴⁾

- 1) Research Institute for Humanity and Nature (RIHN), Kyoto, Japan
- 2) Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Tsukuba, Japan
- 3) Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University
- 4) Ladakh Ecological Development Group (LEDeG), Leh, India

Using high-resolution optical imageries taken between 2007 and 2010 by the Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping (PRISM) and the Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2 (AVNIR-2) onboard the Advanced Land Observing Satellite (ALOS), 195 glacier lakes ($>0.0001 \text{ km}^2$) were investigated in the Ladakh Range, northwestern India. 93% of 195 glacier lakes are of sizes between 0.05 and 0.001 km^2 , small glacier lakes are distributed in this range. The largest glacier lake (0.25 km^2) is located in the southeastern part of the Ladakh Range, and Lake types are mostly moraine dammed lake. The lowest elevations of the glacier lakes differ greatly between northwestern ($4,860 \text{ m}$) and southeastern ($5,560 \text{ m}$) parts of the Ladakh Range. Corona KH-4A (8 October 1965), Corona KH-4B (28 September 1971), Hexagon KH-9, JERS-1/OPS, SPOT4, Landsat7/ETM+, Landsat5/TM, Terra/ASTER and ALOS/PRISM, ALOS/AVNIR-2 satellite imageries show that most of 13 glacier lakes in the Domkhar Valley have developed since the 1960s. Only 3 of the 13 glacier lakes have continued to expand since the 1960s, and their expansion rates have increased markedly since 2000. In upstream from the main Domkhar Valley, we confirmed a new glacier lake in front of a glacier in the Tabei Lungpa Valley. The lake did not exist on 28 October 2010, but then appeared suddenly over a span of about 2 months. The area of the lake increased from 0.0072 km^2 on 08 June 2011 (Terra/ASTER) to 0.0398 km^2 on 3 August 2011 (Landsat5/TM). The estimated volume of the glacier lake is $528,000 \text{ m}^3$ and its maximum depth is 28 m using a Digital Elevation Model (DEM) from ALOS/PRISM. This lake is the second-largest glacier lake in the Domkhar Valley.

Keywords: glacier lake, glacier lake outburst flood (GLOF), Ladakh Range, Indian Himalayas, ALOS satellite data