

# 天山山脈北部地域における氷河湖決壊洪水に対する人間社会の脆弱性に関する研究

新潟大学理学部  
奈良間千之

## 1. 近年の中央アジアの氷河縮小と氷河湖決壊洪水

ヨーロッパ・アルプス、ヒマラヤ、アラスカなど世界の多くの山岳地域で氷河縮小が報告され (UNEP, 2007), 近年の地球規模の海面上昇は, アラスカやアジアの山岳氷河の縮小が大きな要因であると推定されている (IPCC, 2007). アジア山岳地域の氷河変動は, 高度計を搭載した ICESat の氷河表面の高度変化からヒマラヤ全域 (ヒンドークシュ~カラコルム~インドヒマラヤ西部~ネパール~ブータン) の 2003~2009 年の氷河の質量収支変動が提示された (Kääb et al., 2012). この結果によると, ヒマラヤ地域内でも 2000 年以降の変動は地域によって大きく異なり, ブータンやインド・ヒマラヤ西部の南側地域で質量収支の減少が大きい. 多時期の数値標高モデルによる氷河表面の高度経年変化から, 東ヒマラヤのクーンブ地域でも氷河表面の低下が報告されている (Bolch et al., 2008). 一方, カラコルムの氷河では, 巨

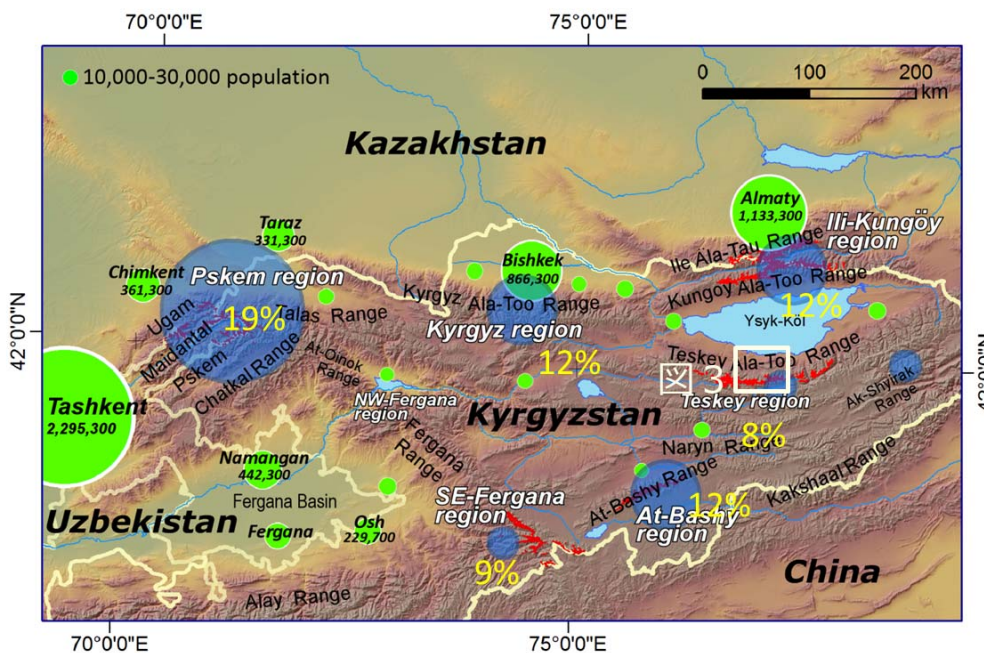


図1 1970~2000年の天山山脈の氷河面積の縮小と都市の人口分布

大な谷氷河の末端部の前進が確認され, 多時期の数値標高モデルからも正の質量収支が報告されている (Hewitt, 2005; Gardelle et al., 2012). 山岳氷河の変動はアジア山岳地域

の中でもさまざまであり, 氷河縮小にともない生じる海面上昇, 水資源減少, 災害の増加などの影響もあり, 地域ごとの現状分析が求められている. このような急速に変化しつつある雪氷圏の変動に対し, 現状分析の報告は科学的な研究分野で大きなインパクトを持っており, 近年 Nature や Science などに論文が掲載されている.

本研究の対象地域である中央アジアの山岳地域においては、3つの異なる時期に撮影された Corona KH-4B, Landsat 7 /ETM+, ALOS/PRISM-AVNIR-2 の衛星画像を用いて、天山山脈の氷河面積変動の地域的な違いが明らかになっている (Narama et al., 2010a). この結果では、1970~2000年の30年間で氷河縮小は地域によって19~8%の幅で変化しており、天山山脈内部でも大きな違いがある (図 1). 特に、タシケント、ビシュケク、アルマトゥなどの大都市が分布し、人口が集中する天山山脈外縁部で氷河縮小が大きい. その中でも氷河縮小が最も大きい西天山のプスケム地域は夏季が乾季にあたり、氷河縮小によって7月~9月に生じる氷河流出の将来的な減少は、繁農期の水利用に大きな影響をあたえることが懸念される. 近年の氷河縮小は水資源減少や海面上昇への影響が考えられているが、そのほかにも氷河湖決壊洪水という深刻な自然災害が生じている.

天山山脈では、氷河前面に氷河からの融け水が溜まってできた氷河湖が多数出現している (Narama et al., 2009). 2006年7月末~8月頭にはテスケイ・アラトー山脈

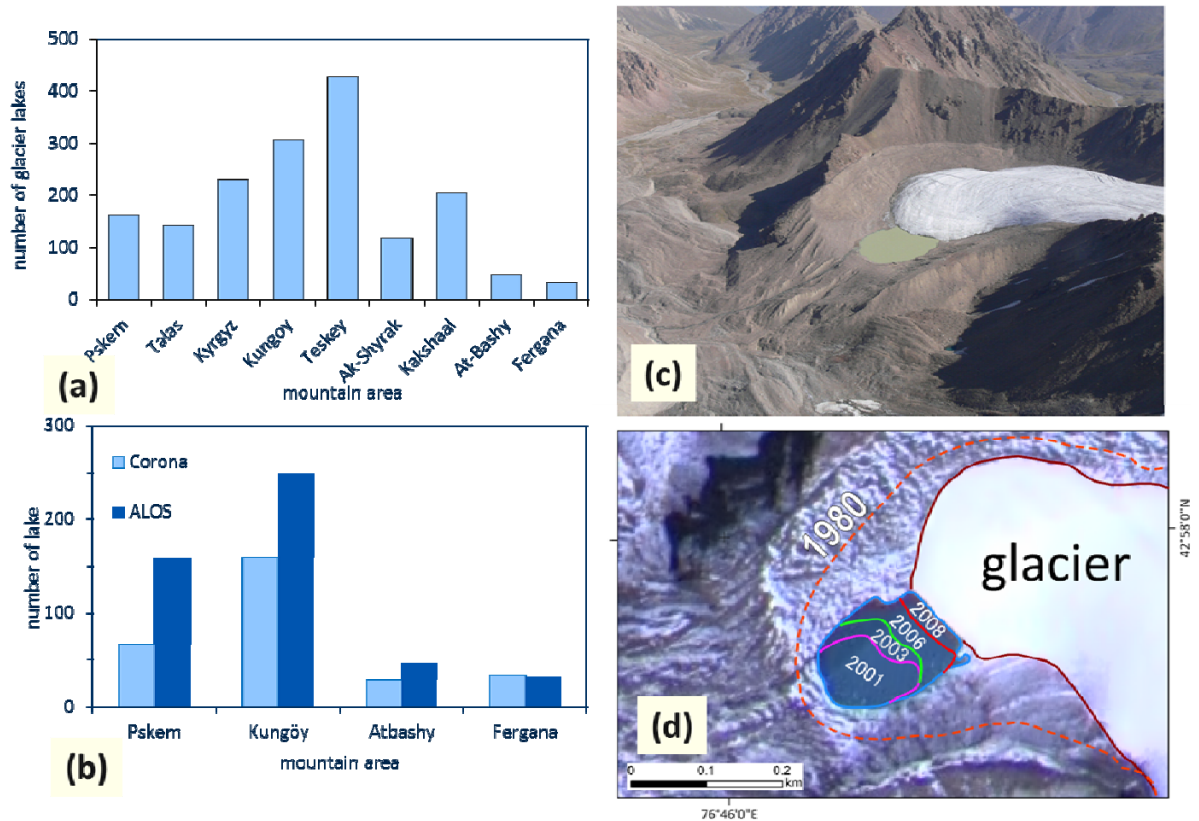


図 2 天山山脈の氷河湖データ (a) 天山山脈の9つの山岳地域の氷河湖数, (b) 同地域の Corona KH4 (1970年頃)と ALOS (2008-2010年)の氷河湖数, (c) イリ・クンゴイ地域の小規模な氷河湖, (d) 同氷河湖の面積変化

のカシュカスウ氷河湖, 2008年6~7月にはクルグズ・アラトー山脈のクズルスウ川上流の氷河湖, 2008年7月24日にはテスケイ・アラトー山脈の西ズندان氷河湖, 2009年6月4日にはクルグズ・アラトー山脈のタクルトール氷河湖, 2012年7月31

日には同山脈のテストール氷河湖など、2000年代に入り天山山脈では小規模な氷河湖決壊（GLOF）が生じており、一部では橋や農地の破壊や犠牲者も報告されている（Narama et al., 2010b）。

## 2. 氷河湖台帳の作成

このような現状から、天山山脈における氷河湖の分布やその特徴を把握するため氷河湖台帳を作成した。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、天山山脈の 9 つの山岳地域（プスケム地域、タラス地域、キルギス地域、イリ・ク

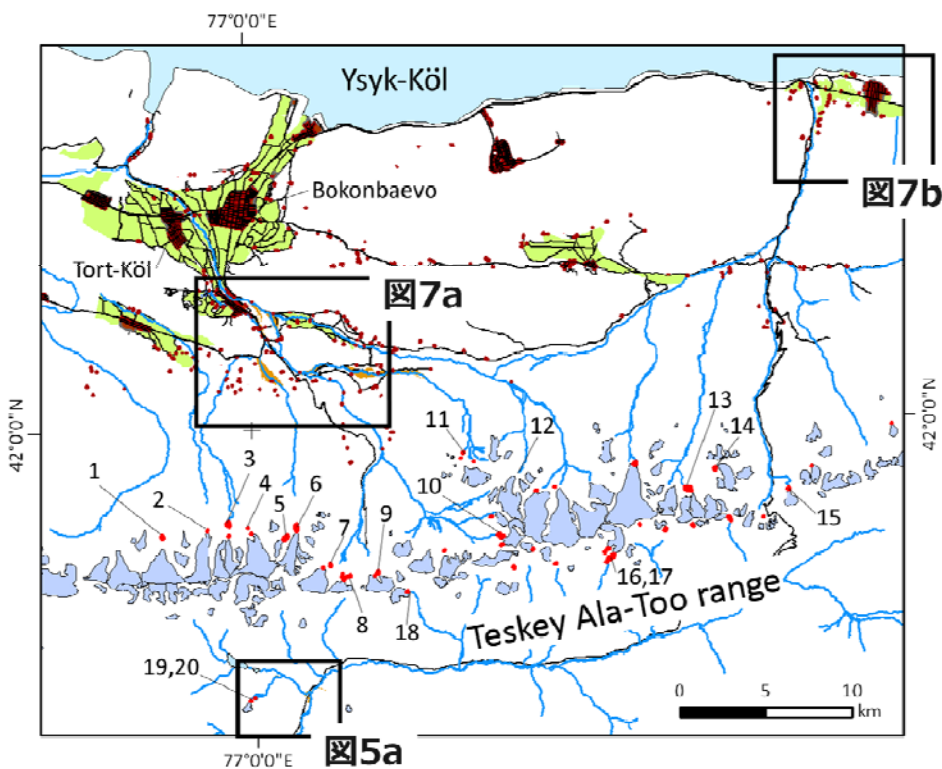


図 3 イシク・クリ州のトン地区の氷河・氷河湖と集落の分布。数字は現地調査した氷河湖を示す。赤色：氷河湖，薄い青：氷河，濃赤：都市，家屋，青線：河川，黒線：道路，黄緑：農地，オレンジ：GLOF 跡。黒枠は図 5a, 7a, 7b の範囲を示す

ンゴイ地域，テスケイ地域，アクシラック地域，コクシャル地域，アトバシ地域，フェルガナ地域）で氷河前面にある 0.001km<sup>2</sup> 以上の氷河湖を対象に，ArcGIS 上でマニュアルによるデジタル化で氷河湖のポリゴンデータを作成した。氷河湖ポリゴンのシェープファイルの属性データには，撮影日，使用した衛星画像，流域名，面積，高度，氷河湖タイプ，氷河湖 ID，修正日などの基本情報を加えた。使用し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) と Leica GPS900 (Leica Geosystems) の高精度 GPS を用いて，山岳地域の氷河湖周辺などを歩いて位置情報を取得し，比較した。

図 2a は，天山山脈の 9 つの山岳地域の氷河湖数を示す。確認した氷河個数は約 1600 (0.001km<sup>2</sup> 以上) であり，氷河個数は氷河分布にも影響されるが，氷河縮小が大きい

図 7b



山岳外縁部で多い結果であった。天山山脈で最も氷河縮小の大きいプスケム地域では、氷河湖数は最大ではなく、イリ・クンゴイ地域やテスケイ地域で多くの氷河湖が存在する。一方、年降水量が少ない天山内陸部のアクシイラック地域、アトバシ地域、フェルガナ地域の氷河湖数は少ない。人口が集中する天山山脈外縁部で氷河湖数が多いという結果は、自然災害が起こる確率が高く、被害規模が大きくなる可能性を示唆する。図 2b は、1970 年頃に撮影された Corona KH-4B と氷河湖台帳で使用した 2007 年頃の ALOS の衛星画像データを用いて明らかにした過去 40 年間の 4 つの山岳地域の氷河湖数の変化を示している。天山山脈外縁部に位置するプスケム地域とクンゴイ地域の現在の氷河湖数は 40 年前を上回っており、氷河縮小の小さい内陸部でその数は

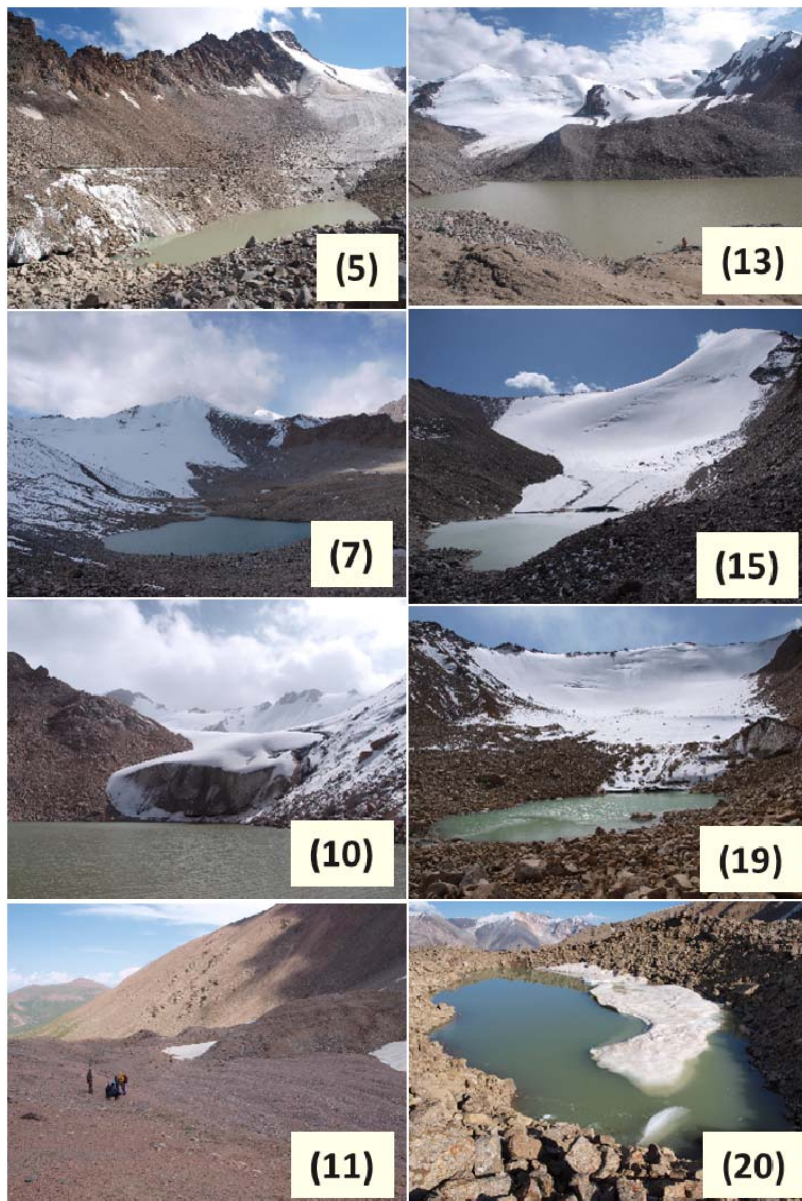


図 4 現地調査した氷河湖の写真。番号は図 3 の氷河湖の番号と一致する。黒枠は図 5a, 7a, 7b の範囲を示す

ほぼ同じであった。現在の氷河湖の中でも、1970 年頃から継続して存在する氷河湖は 2 割しかなく、その 2 割のほとんどは面積が変わらないか縮小していた。以上の結果から、現存する氷河湖の多くは 1980 年代以降に出現したものであることがわかった。氷河湖のタイプは、氷河前面のデッドアイス上に発達したサーモカルストタイプとモレーンによって堰き止められたモレーンダム湖の二つが挙げられる。

### 3. テスケイ・アラト一山脈の氷河湖の特徴

図 3 はテスケイ・アラト一山脈中央部の氷河と氷河湖の分布を示し、図には、家屋、都市、農地、河川、道路が描かれている。この地域には小規模な山岳氷河が分布し

ており、1970～2000年で氷河面積は8%減少した (Narama et al., 2006). 氷河前面には赤色で示した氷河湖が多数分布しており、数字は実際に現地調査をおこなった20の氷河湖を示す。現地調査では、氷河湖周辺のモレーンの地形観察、高精度GPS測量、湖盆図測量、アイスレーダーなどを実施した。下流域にはバカンバエボやトルトゴルなどの小都市があり、河川や道路沿いにはエンジの点で示された家屋やカシャールが点在する。黄緑で示した農地では、ジャガイモや大麦の栽培がおこなわれている。図4の8枚の画像は、現地調査した氷河湖の写真である。各写真の番号は図3の氷河湖番号と一致する。テスケイ・アラトー山脈中央部では、 $0.005 \text{ km}^2$ 以下の小規模な氷河湖が90%を占める。天山山脈全体でも小規模な氷河湖がほとんどで、このサイズは東ヒマラヤに比べると非常に小さい。その理由として、1) 氷河サイズが小さいこと、2) 氷河湖をせき止めるモレーンが新しく小規模であること、3) 1980年以降の発達であること、4) 氷河湖が大きく発達できない山岳斜面の地形場などが挙げられる。調査地の氷河のほとんどはクリーンタイプの岩屑被覆のない小規模な山岳氷河で、氷河湖は氷河末端部やすぐ下流のデッドアイスを含むデブリ帯上に発達する。氷河湖番号5, 10, 11, 19は出水後の写真で、5番のズندان西氷河湖は $45 \text{ 万 m}^3$ の湖水が流出している。氷河湖番号11のアンギサイ氷河湖跡では、1960年代～1980年に数回の氷河湖決壊洪水 (GLOF) が生じている。そのため、この地域で昔から暮らす人々は氷河湖決壊洪水を認識している。

#### 4. テスケイ・アラトー山脈の氷河湖決壊洪水

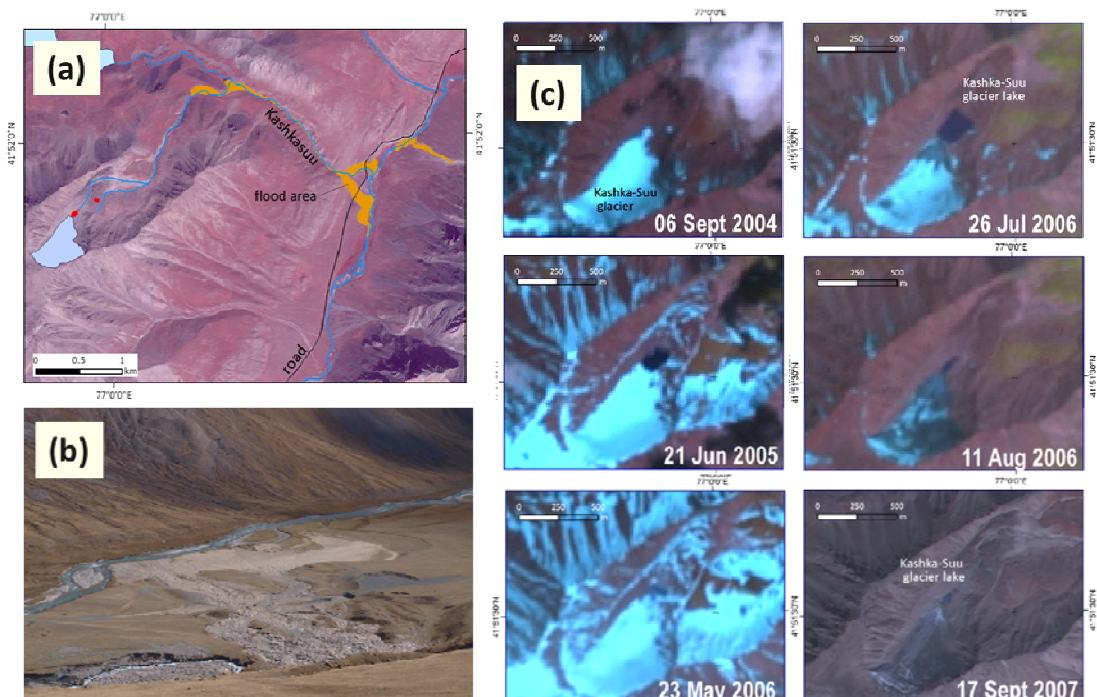


図5 2006年に生じたカシュカスウ氷河湖のGLOF。(a) カシュカスウ谷の氷河湖の位置と洪水堆積物、(b) 下流部の洪水堆積物の写真、(c) 氷河湖発達の時系列変化



2006年7月26日～8月11日の間には、テスケイ・アラトー山脈南斜面（図3）のカシュカスウ谷上流のカシュカスウ氷河湖（19）でGLOFが生じた（図5）。このGLOFでは、川沿いを走る山岳道路がGLOF堆積物に覆われて、一時不通になった（図5b）。またカシュカスウ谷と本谷の合流地点には、狩猟基地として夏季のみ運営している家屋が一軒あるだけで、被害は道路と橋だけであった。図5cは、Landsat7/ETM+とALOS AVNIR-2によるカシュカスウ氷河湖の発達過程を示す。2004年9月6日の衛星画像では氷河湖はわずかな水たまりほどの大きさである。それが2005年6月21になると急激に拡大している。2006年7月26日には2倍ほどの大きさになり、その後2006年8月11日の画像では水がなくなっている。高精度GPSで現地測量した結果、この決壊により氷河湖から14.4万m<sup>3</sup>の水量がモレーン内部のアイストンネルを通過して出水したことがわかった。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とラダーク山脈で報告されている(Haeberli et al., 2002; Tambunini et al., 2003; Narama et al., 2010b)。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。氷河湖面積は2001年9月に0.0035km<sup>2</sup>、2002年5月に0.04 km<sup>2</sup>、2002年6月半ばに0.15 km<sup>2</sup>に達し、最大水量は3百万m<sup>3</sup>であった(Käab et al., 2004)。最近では、インド北西部のラダーク山脈で突然出現した氷河湖の報告がある(奈良間ほか, 2012)。このように数カ月から1～2年間で急激に発達し決壊することから、このような氷河湖は短命氷河湖(short-lived glacier lake)と呼ばれている(Tambunini et al., 2003)。短命氷河湖は衛星データでさえモニタリングが難しいので、防災上もっとも危険な氷河湖といえる。

2008年7月24日には、テスケイ・アラトー山脈北面に位置するズندان西氷河湖(5)で氷河湖決壊洪水が生じた（図3）。この氷河湖は、上述したカシュカスウ氷河湖と同様に短命氷河湖で、2008年5月12日に0.0023km<sup>2</sup>であったものが、2008年6月13日に0.026 km<sup>2</sup>、決壊した7月24日に0.0422 km<sup>2</sup>まで達し、水量は43.7万m<sup>3</sup>であった(Narama et al., 2010b)。ズندان西氷河湖でも氷河湖をせき止める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(Narama et al., 2010b)。

## 5. 氷河湖の湖盆調査

テスケイ・アラトー山脈中央部の氷河湖の下流部のGLOF災害の大きさを把握するため、現地調査（モレーンの地形観察、GPS測量）した20の氷河湖のうち、10の氷河湖で湖盆図調査をおこなった。湖盆図調査には、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，アイトンネルの存在を調べた．GPS 測量では，ProMark3 (Ashtech Co., Ltd) や Leica GPS900 (Leica Geosystems) 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．さらに，氷河湖周辺の地形観察，過去の決壊履歴のデータ収集，過去に GLOF を生じた氷河湖で現地調査をおこない，この地域の氷河湖決壊洪水の主要因と被害の特徴を明らかにした．**図 6** は湖盆調査をおこなった 10 の氷河湖の

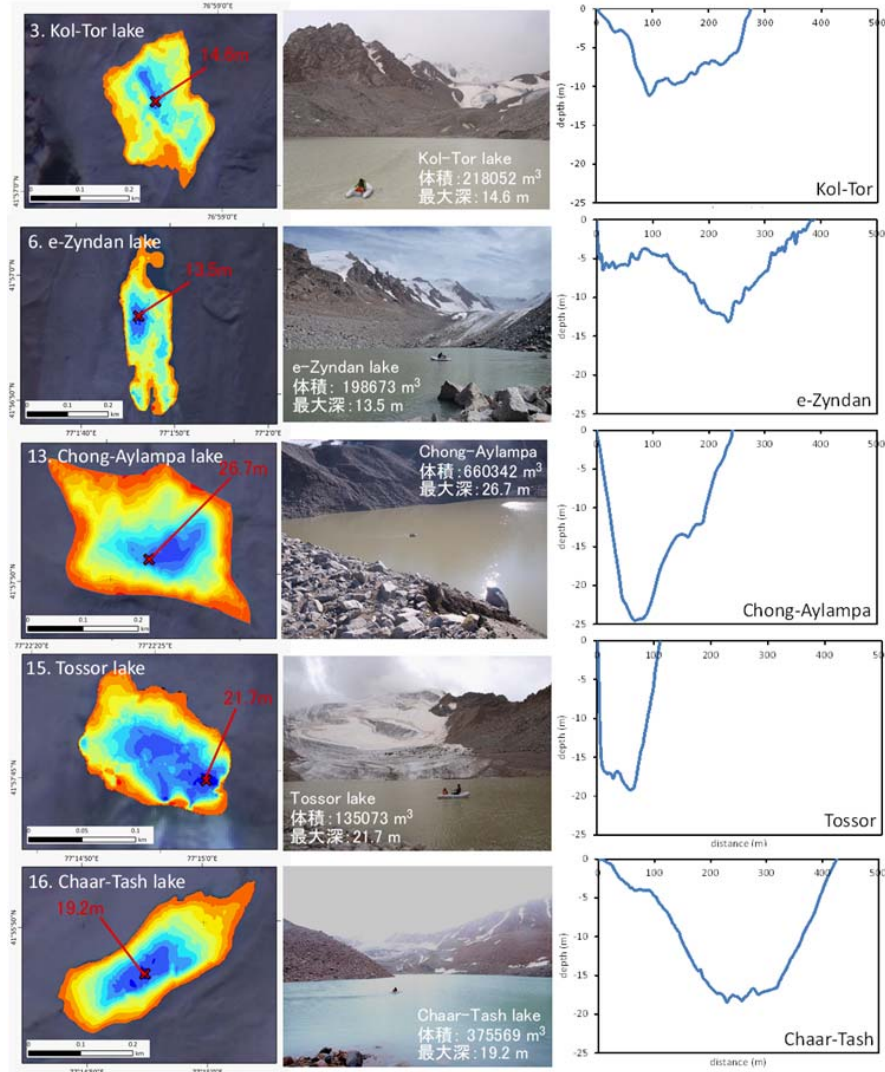


図 6 テスケイ・アラトー山脈中央部の氷河湖の湖盆図，写真，縦断面図．番号は図 3 の氷河湖番号と一致する．の時系列変化

うち 5 つの氷河湖の湖盆図，氷河湖の画像，縦断面図を示す．氷河湖の番号は図 3 の氷河湖番号と一致する．氷河湖の水深はすべて 30 m 以内であり，これまで調査した天山山脈の別の地域の氷河湖も同様であった．ここでは，東ヒマラヤ山脈で見られる水深 100m 以上ある大規模な氷河湖はほとんど存在しない．例外としてアクシイラック山脈のペトロフ氷河湖（水深 80m）やイニルチェック氷河のメルツバッハ氷河湖で水深のある氷河湖が確認されている．湖盆の縦断面図をみると，氷河

と接している氷河湖では氷河側で急激に水深が深くなるという特徴がある．縦断面形から氷河湖内部に存在するモレーンは，東ズンダン氷河湖（**図 3 の 6**）以外で確認できなかった．氷河湖の内部に過去に形成されたモレーンが水没されていると，決壊したとしても排水される水は内部のモレーンの高さまでであり，すべての湖水が流出されるわけではない．調査地の湖盆形は急激に水深が深くなるすり鉢状の形態のものが多かった．最大水深は，チョング・アイランパ氷河湖(13)の 26.7 mであった．本研

究で観測したテスケイ・アラトー山脈中央部の 10 の氷河湖，天山山脈の別の場所で観測した氷河湖，先行研究のデータを含めた天山山脈の 20 の氷河湖の面積と体積の相関関係は良く，両者の関係式を求めることができた．この近似式を用いれば，未調査の氷河湖の体積の推定が可能になる．同様な調査をおこなったインド・ヒマラヤ地域では近似式の傾きが少し異なり，面積に比べて氷河湖の体積が大きい傾向がみられた（奈良間ほか，2011）．

## 6. 自然災害と社会的脆弱性の関係について

これまでに生じた氷河湖決壊洪水(GLOF)の被害状況をまとめるとこの地域の被害の特徴がみえてくる．テスケイ・アラトー山脈の北側斜面と南側斜面では，北側斜面に多くの都市や村が点在し多くの人々が暮らしている．一方，南側斜面にある居住地はわずかで，夏の放牧のために夏季のみ暮らしている人がほとんどである．山脈の南側斜面は，豊かな牧草が生い茂り，温泉もあり，スルトの放牧地と呼ばれ昔から夏の放牧地として利用されている．2006 年のカシュカスウ氷河湖と 2008 年のズندان西

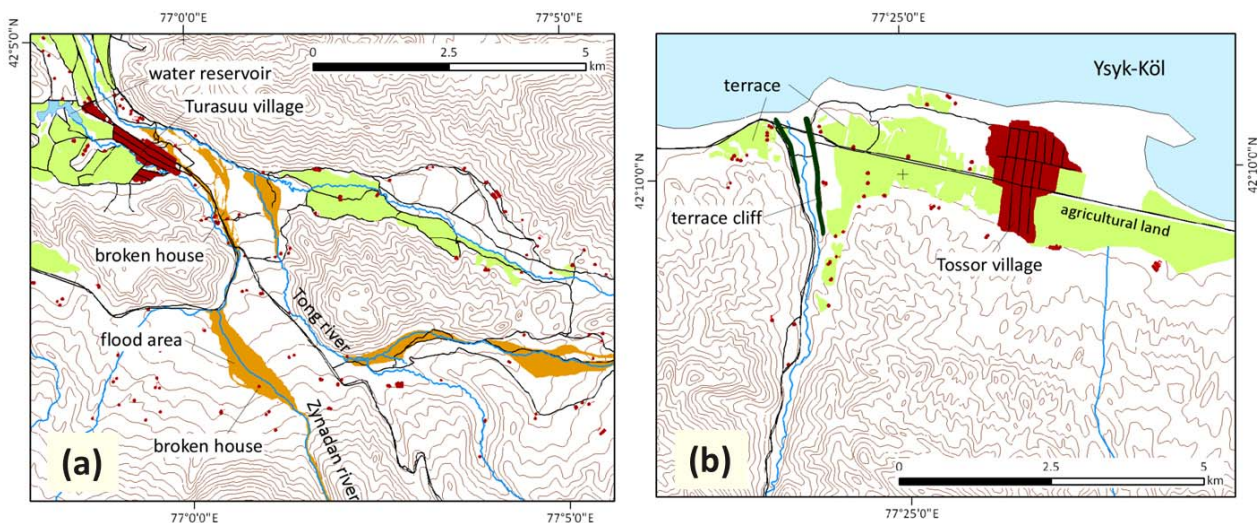


図 7 (a) ズندان川とトン川の下流部の土地利用図，(b) トッソール川の利用図

氷河湖で生じた GLOF を比較すると，2008 年のズندان西氷河湖の GLOF では，3 人の犠牲者をはじめ，家屋，家畜小屋，橋，電柱，道路，灌漑施設，魚の飼育施設，農地が破壊されるなど大きな被害がでて，多くの人々を混乱させた．下流部のバカンバエブの町の人々は洪水のうわさを聞いて多くの人々が山を駆け上がったたり，車で移動した．この GLOF では 3 人の犠牲者が出ているが，この 3 人は決壊から 6 時間後に落水しており，洪水が起こった時点での情報伝達の遅れと，道路封鎖など二次災害防止策が取られなかったのが原因だった．一方，2006 年のカシュカスウ谷では被害は少ない．自然災害とは，人間が暮らす場所で自然現象である誘因の発生があって生じるものであり，氷河湖という誘因の現象解明だけでなく，自然災害を軽減するための，



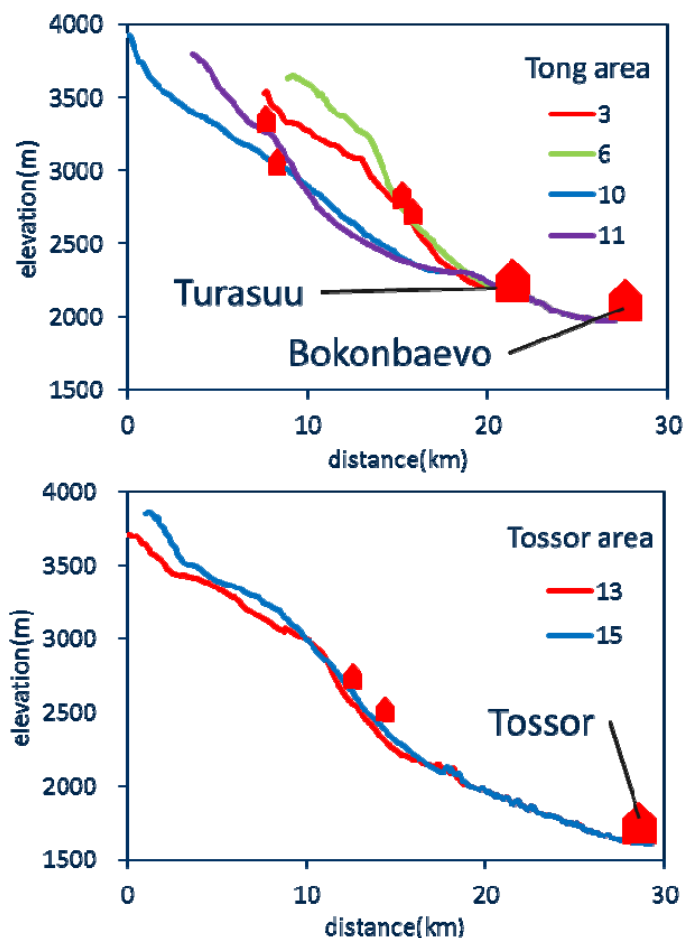


図8 同地域の氷河湖と都市との間の縦断プロファイル。

の家屋が川沿いや扇状地上に立地する。山麓でくらす人々は家畜を所持し、放牧をおこなっており、草地が近い川沿いや扇状地上で暮らす人々の数は少なくない。河川と居住地の比高差がほとんどないトン川やズンダン川では、河川沿いに多くの家が立地するので非常に危険である。牧畜民へのインタビューでは、過去のGLOFを経験した人は、川沿いや扇状地上での暮らしを選択しないという答えが返ってきた。いかに自然災害の知識が重要か思い知らされる。図7bはトッソール谷の下流部である。トッソール村の家屋は河床から比高50mほどの段丘面上に立地する。段丘崖では上流から運ばれた砂礫層を観察することができ、先行研究から最終氷期の河床面であることが明らかになっている。ここではほとんどの家屋が河床よりもだいぶ高い位置に立地するため、洪水の被害はほとんどうけない。

図8は調査地の6つの河川の縦断面図である。氷河湖から居住地までの距離は短くて8~10 kmほどである。さらに中腹部は急傾斜になっており、ズンダン西氷河湖やカシュカスウ氷河湖のGLOFのケースのように、この区間で河床の土砂を削り土石流となる地形勾配を持つ。土石流による土砂被害は山麓の扇状地上に限られ、土砂を堆積してさらに流れる洪水流は川沿いの家屋や農地を破壊する。ズンダン西氷河湖の

誘因と人間活動の関係性を探る必要がある。

図7aは調査地域のズンダン川下流部の図である(位置を図3に示す)。黄色で示したのは、GPS測量をおこなった2008年のズンダン西氷河湖で生じた決壊洪水跡である。トン川沿いの洪水堆積物は、1980年のアングサイ氷河湖のGLOF範囲である。2008年に生じたズンダン西氷河湖のGLOFでは、二つの家屋が破壊されている。さらに、下流部で一部被害のあった家屋周辺の家では30~40cmの泥水の浸水があり、農地は完全に土砂で破壊された。これら被災した家屋で暮らす人々は、1960~1970年代に生じた氷河湖決壊洪水を経験していない新しい移住者であった。今回の調査で家屋分布を調べてみると、1980年の洪水が起きたトン川沿いでは、依然多く

GLOF では、本来洪水流はズندان川を流れるはずがコースを変えたため、トゥラスウ村やその下流に位置する貯水池への被害はほとんどなかった。もし洪水流がコースを変えなかったら大きな被害になっていた可能性は十分ある。また、20 の氷河湖の体積と面積の関係式からテスケイ・アラトー山脈北側斜面の氷河湖の体積を求めたところ、50 万  $m^3$  以上の水量を持つ氷河湖は存在しなかった。2008 年 7 月に生じたズندان西氷河湖で 43.7 万  $m^3$  であるので、最大でも洪水範囲はそれを少し上回る程度しかなく、ほとんどがこれを下回る範囲であるといえる。この結果は、この地域全体の氷河湖の土石流は山麓の扇状地付近でとどまり、その後の洪水流が下流の河川から少しあふれる程度であることが推測できる。



図 9 トッソール谷の下流部の土地利用の様子。(a) 中流部の土地利用、(b) 下流部の段丘面

図 9a はトッソール谷の上流で、家屋が立地する最上流部の谷低地である。一部の家屋は河川沿いに立地しており非常に危険である。近くの住民に話を聞くと、チョン・アイランパ氷河湖の存在を認知している。ソビエト時代の調査時に危険だと言われていたがずっと同じ場所に住み続けており、災害の意識はない。図 9b は、トッソール谷の下流部である。最終氷期の段丘面は河床から 50m ほど高い位置にあり、家屋のほとんどは段丘面上に立地する。このような場所はイシク・クリ湖（ウスック・ゴル）周辺で多く観察でき、GLOF 災害の影響はほとんどない。これら調査した結果をまとめると、危険地域は土石流の影響がある山岳部の谷低地の川沿いや谷の出口である扇状地上であり、さらに

河床と居住地の比高差のない河川沿いで洪水流の影響を受けることが考えられる。

これまでの中央アジアで生じた GLOF の氷河湖の大きさ（水量）と下流域の被害状況をみると、被害の規模 (Disaster) と氷河湖の大きさ (Hazard) に相関関係はない。1998 年 7 月にギッサール・アライの 100 人以上の犠牲者をだした GLOF の流出量は、ズندان川上流の 3 人の犠牲者をだした GLOF の 1 割にも満たない。被害規模は、氷河湖の大きさに加え社会的な脆弱性 (Social vulnerability) が大きく関与する。ギ



ッサール・アライの GLOF では多くの人々が川沿いの低地で暮らし甚大な被害を受けたが、ズندان川の上流で暮らす人々は 1960～1970 年代に集中して生じた GLOF を経験しており、川沿いで被災した人々は過去の GLOF を知らない新しい移住者であった。GLOF 被害を軽減するためにはどうしたらいいだろうか？我々は誘因（自然現象）の発生“氷河湖の決壊”をコントロールすることは難しいが、社会的脆弱性である川沿いで暮らす土地利用形態や GLOF 災害の知識（氷河湖の存在、洪水流の特徴、危険な地形場）の改善により自然災害を軽減することができる。その解決策として、①誘因である氷河湖の地域的な特徴とその現象を詳細に知ることである。例えば、この地域の氷河湖決壊の要因は、アイスコードモレーン内部に発達した水路を通して出水することがこれまでの調査で分かっている。このような出水形式は流出口の大きさが制限されているので一気にすべての水が出水されることはない。そのため、出水後も水量が増加する過程で逃げる時間は十分あると考えられる。②氷河湖災害の知識を蓄えることである。発達と消滅を繰り返す氷河湖一つ一つに防止対策であるハード面（抑止工）の対応をすることは現実的に難しく、個々の対応力の向上が最も有効であると考えられる。つまり、自然災害に対する対応力の向上は、社会的な脆弱性による要因を減らすことにつながる。現在の氷河湖のほとんどは 1980 年代以降に出現したため、氷河湖と居住地が非常に隣接しているにもかかわらず、住民は氷河湖の存在を完全には把握していない。どこにどの程度の大きさの氷河湖があるのか。その氷河湖が出水した場合どの範囲にその被害は及ぶのかを把握できれば、今後の土地利用の見直しや土地選びや災害時の対応（避難・応急時の対応）に生かされるだろう。さらに、個々の対応力の向上だけでなく、地域的な対応力の向上（自治体による緊急対策網の整備、医療、交通などの災害対応）も改善していく必要がある。また、自然災害に対する知識向上のための情報公開を積極的におこなっていかなければならない。ズندان西氷河湖の際も調査結果を地元新聞に掲載したが、今回も氷河湖の調査結果を新聞に投稿しており、記事の掲載は決まっている。インド北西部のインド・ヒマラヤの一部を構成するラダーク山脈で氷河湖調査を実施し、その成果を基に 2012 年 5 月に村人を対象に氷河湖ワークショップを開催した。地元の住人が 120 人参加し、氷河湖の現状報告や洪水対策が話し合われた。ラダーク語で作成した報告書も配布し、知識の改善と向上に努めた。このような災害教育活動は今後重要になるだろう。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、国土地理協会より助成金を賜りましたことを、ここに深くお礼申し上げます。

## 引用文献

Bolch, T., Buchroithner, M. F., Pieczonka, T., Kunert, A., 2008. Planimetric and

- volumetric glacier changes in the Khumbu Himalaya since 1962 using Corona, Landsat TM and ASTER Data. *Journal of Glaciology*, 54, 592-600.
- Hewitt, K., 2005. The Karakoram Anomaly? Glacier Expansion and the 'Elevation Effect,' Karakoram Himalaya. *Mountain Research and Development*, 25, 332-340.
- Gardelle, J., Berthier, E., Arnaud, Y., 2012. Slight mass gain of Karakoram glaciers in the early twenty-first century. *nature geosciences*, 5, 322-325.
- Haerberli, W., Käab, A., Paul, F., Chiarle, M., Mortara, G., Mazza, A., Richardson, S., 2002. 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*, 56, 104-111.
- Käab, A., Huggel, C., Barbero, S., Chiarle, M., Cordola, M., Epifani, F., Haerberli, W., Mortara, G., Semino, P., Tamburini, A., Viazzo, G., 2004. Glacier hazards at Belvedere Glacier and the Monte Rosa east face, Italian Alps: Processes and Mitigation, *Proceedings Interpraevent*, 1, 67-78.
- Käab, A., Berthier, E., Nuth, C., Gardelle, J., Arnaud, Y., 2012. Contrasting patterns of early twenty-first-century glacier mass change in the Himalayas. *Nature*, 488, 495-498.
- Narama, C., Shimamura, Y., Nakayama, D., Abdrakhmatov, K., 2006. Recent changes of glacier coverage in the Western Terskey-Alatoo Range, Kyrgyz Republic, using Corona and Landsat. *Annals of Glaciology*, 43, 223-229.
- Narama, C., Severskiy, I., Yegorov, A., 2009. 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.
- Narama, C., Käab, A., Duishonakunov, M., Abdrakhmatov, K., 2010a. 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.
- Narama C, Duishonakunov M, Käab A, Daiyrov M, Abdrakhmatov K., 2010b. 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.
- 奈良間千之, 田殿武雄, 谷田貝亜紀代, 池田菜穂, 2011. 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*,



12, 73-83.

奈良間千之, 田殿武雄, 池田菜穂, Gyalson, S., 2012. インド・ヒマラヤ西部, ラ  
ダーク山脈の氷河湖の特徴. ヒマラヤ学誌, 13, 166-179.

Tamburini, A., Mortara, G., Belotti, M., Federici, P., 2003. 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, 6, 37-54.

UNEP, 2007. Global Outlook for Ice and Snow, UNEP, 235 pp.