調査報告

氷河湖決壊洪水の危機にさらされるブータン王国 緊急に必要な監視調査

Risks of glacial lake outburst floods threaten Kingdom of Bhutan:
necessity of urgent monitoring

岩田 修二

IWATA Shuji

氷河湖決壊洪水（GLOF）による災害はブータンでも発生している。1998年と2002年に筆者を含むグループが氷河湖危険度調査を北西 北部ブータンで行った。その結果や過去の衛星画像の解析によると、ブータンの GLOF に関して最も危険とされるのはモレーンダム湖である。さまざまな氷河湖は、散らばった小氷河表面湖群 合体して巨大化した氷河表面湖 前面に氷体をもつモレーンダム湖 モレーンのみのダム湖という発達段階のいずれかに位置づけられる。決壊洪水危険度査定のためには、定量的査定が試みられなければならない。危険な氷河として、ルナナ東部のトルトミ氷河湖、モンデチュウ西支流源頭部氷河湖群、クリチュウ上流チベット側氷河湖が挙げられる。モニタリングのための衛星情報の提供、現地調査の援助、クリチュウ上流チベット側での調査・研究を進めるための中国側との交流が、さしあたって、実施されるべき日本からの貢献になろう。

Glacial lake outburst floods (GLOFs) have often caused severe disasters in Bhutan. Research groups including the present author conducted risk assessment of GLOFs in 1998 and 2002 in the northwestern and northern areas in Bhutan. These results and analyses of satellite images indicate that the most dangerous glacial lakes are likely to be moraine-dammed lakes with a large amount of lake water. In general, glacial lakes started as the scattered small supraglacial lakes, and develop a connected large supraglacial lake, and then a frontal dead-ice dammed lake, and finally a moraine-dammed lake. To conduct valid assessment of GLOF, quantitative researches on glacial lakes, moraine dams, and surroundings of lakes and glaciers are required. Dangerous glacial lakes at present are as follows: Thorthomi Glacial Lake in eastern Lunana, glacial lakes in the upper basins of Monde Chu, and those in the upper basins of Kuri Chu, which are located in Tibet on the southern slopes of Kula Kangri. Japanese geographers can assist scientists and officials in Bhutan providing satellite information for monitoring, supporting field researches, and intermediating between Bhutan and China for the research in the Kuri Chu basin in Tibet.

キーワード：氷河湖決壊洪水（GLOF）、ブータンヒマラヤ、現地調査、災害危険度査定、緊急支援

Key words: glacial lake outburst floods (GLOF), Bhutan Himalaya, field works, risk assessment, urgent support

I 1994年の洪水災害

1994年10月7日の朝、ブータン王国の古都プナカの住民たちは、街を流れるポチュウ（チュウは

川の意）が突然増水し洪水を起こしたことでパニックに陥った。増水した河水は川沿いに建つ民家を押し流し21人の住民が死亡した。さらに、川沿いに建つプナカゾンの壁の一部を破壊した(図1)。

図1 左：1994年のGLOFのときのプナカの洪水の範囲 右：1958年のプナカのゾンの写真
右図は西から東方を撮影した。ポチュウがゾンの北側を流れていることに注意（中尾 1958 による）。その後、ポ=チュウはゾンの南側に流路変更されたが、1994年には旧流路を含めた広い範囲に氾濫した。場所は図3に示した。

ゾンは城塞・要塞などと訳されているが、宗教と政治の拠点でもあり街の中心にある大きな城のような建物である。洪水の最中にプナカから十数キロメートル下流のウオンディホダンで撮影されたテレビ画像をみると、川幅いっぱいに流木が埋め尽くしている。住民によると死んだ魚もいっぱい浮きあがり、燃料の薪と食料が一度に手に入ると喜び人もいたという。

この突然の洪水に人びとは当惑した。10月のブータンは乾季で、洪水の前に上流に大雨が降ったという情報もなかった。しかし、ポチュウの上流に氷河湖があることは知られていたから、氷河湖が決壊したかもしれないと推定され、ブータン政府は10月10日から11月上旬まで調査隊を派遣した。その結果、予想通りポチュウ上流ルナナ地方のルゲ氷河湖のモレーンダムが崩れて洪水と土石流が起こったことが明らかになった。この災害は、現地の新聞『クエンセル Kuensel』で報道されていたが、世界が広く知ることになったのは『山岳の研究と開発』という学術雑誌に報告（Watanabe and Rothacher 1996）が掲載された1996年になってからであった。

氷河の堰き止めや、モレーンがダムになって形成される氷河湖の決壊と洪水は古くから知られていた現象であるが、1980年代以後、氷河の急激な

縮小、氷河湖の拡大にともなって、世界各地から報告されるようになった。1985年にはネパールのクンプ地方で完成直後の水力発電所を破壊する氷河湖決壊が起こり急に注目されることになった（Ives 1986; Vuichard and Zimmermann 1987）。氷河湖決壊洪水は glacial lake outburst flood を略して GLOF（グロフ）と呼ばれる。ヒマラヤの GLOF については、カトマンズに長く滞在して防止策を検討した山田知充による包括的な報告がある（Yamada 1998; 山田 2000）。

筆者が GLOF 中でもブータンの氷河湖に強い関心を惹かれるようになったのもこの頃からであった。その後、ブータンの氷河や氷河湖、氷河地形の研究を進める機会を得て、現地調査も行った。この報告では、依然として氷河湖が拡大を続け、決壊洪水の危険がなくなっていないブータンヒマラヤの氷河湖の現状を報告し、災害の防止・軽減のために何をすべきかを考えたい。あわせて、この機会に、ブータンでの野外調査の実情も断片的だが報告したい。

II ガンサーの警告

学生時代に、神田の古本屋で偶然手に取ったスイス山岳会の年報にブータンヒマラヤの雪峰と氷

河湖のすばらしいカラー写真が載っているのを見つけて衝動的に買った。秋の、氷河と氷河湖のすばらしく透明感ある、しかし哀愁のたよう写真である。スイスの地質学者アウグスト・ガンサーの寄稿であった(Gansser 1970)。ガンサーは大学院生の時(1936年)に単身チベットに潜入し聖山カイルスのまわりの地質図を作り(ハイム・ガンサー 1968)、その後、『ヒマラヤの地質』(Gansser 1964)という大著を著したヒマラヤ地質学のカリスマである。ガンサーは1965年、1967年など数回にわたってブータンで地質調査を行い、『ブータンヒマラヤの地質』(Gansser 1983)を刊行した。この本には写真・スケッチ・地図が多数掲載され、未知のブータンヒマラヤの登山の資料としても登山家に広く利用された。

「ルナナ：ブータン北部の峰・氷河・湖」と題されたスイス山岳会年報の記事にも、写真ばかりではなくスケッチや地図が多く収録されている。中でも、彼が1967年秋の調査旅行で観察したルナナ地方の氷河湖のスケッチマップは当時の氷河湖の状態を伝える貴重な情報である。岩田(2005)は、彼のスケッチマップを、1968年撮影のCORONA衛星の写真と比較してみた。ガンサーのスケッチマップはかなり正確に当時の氷河湖の状態を示している(図2)。

ガンサーのこの随筆風の紀行文は、ブータン北部ルナナ地方の山や氷河湖の美しさを示しただけ

ではなく、過去に起こった氷河湖決壊洪水の情報を掘り起こし、将来、起こるであろう氷河湖決壊の危険を強く警告したものであった。しかし、その後、ブータンで氷河湖決壊洪水に関する調査は1980年代に予察的な調査がブータン地質調査所によって行われただけであった。

III ブータンでの氷河湖調査

1. 現地調査を行うまでの経過

筆者を含む研究グループは、1973年からネパールヒマラヤで氷河や氷河気候・氷河地形の研究を続けてきた。この研究グループの実質的なリーダーである上田^{あげた} 豊(名古屋大学)は、1970年代にブータンヒマラヤの処女峰登山の登山許可を取るためブータンを訪問したことがあり、ブータンの氷河研究にひとかたならぬ情熱をもっていた。しかし、ブータンでの学術調査は登山以上に許可を取るのが難しく、これまでも何度か試みたがうまくゆかなかった。また、山岳地域でのトレッキング(徒歩旅行)もブータン政府が決めた料金が莫大で、長期の旅行は不可能であった。

1984年と1985年にブータンで登山活動を行った月原敏博(福井大学)は、ブータン通で毎年のようにブータンを訪れている。月原からの情報によって、1997年の秋、上田はブータンの首都ティンブーに飛び、国際協力事業団(当時)の地質専門

図2 左：ルナナ東部の氷河湖群のガンサーによる1967年のスケッチ(右側がトルトミ氷河、左側がラフストレン氷河；Gansser 1970) 右：同じ範囲のCORONA衛星画像(1968年撮影；黒枠内が氷河湖)

ルナナの場所は図3に、詳細図は図5に示した。

家，茂木 睦の仲介を得て，1998 年からブータン地質調査所とブータンの氷河湖と氷河に関する共同研究を始めることが決まった．現在まで続くブータンでの研究が始まったのである．

2. 1998 年の調査：スノーマン＝トレック沿いの氷河湖調査

1) 調査行程

1998 年の調査は，ブータン王国北西部から北部にかけての広い地域で行った．1994 年の GLOF の後，ブータン地質調査所は，緊急に SPOT の衛星画像とインド測量局の 1:50,000 地形図を用いて氷河と氷河湖の予察的なインベントリー（台帳＋地図）を作成していた．したがって，ブータン全域の氷河湖のおおよその情報は明らかになっていた．われわれの調査の第 1 の目的は，広く歩いて，なるべく多くの氷河湖を実際に観察し，氷河湖決壊洪水の危険度を現地での観察から査定することであった．第 2 の目的は，危険度の大きな氷河湖で氷河や湖のやや詳しい観測や今後の調査のための観測装置の設置であった．

リーダー上田 豊以下，筆者を含む日本側隊員 4 人とブータン側隊員カルマが参加した．多くの氷河湖を観察するために，ブータンヒマラヤ主脈の南側にそって，ブータン西北のチョモラリ（高度 7,326 m）東麓から，北部のルナナ地方を経て南下するスノーマン＝トレックと呼ばれているブータン最長のトレッキングコースを歩いた（図 3）．歩いた距離は合計 400 km 以上，調査期間の 37 日間ほとんど毎日歩きづめだった．トレッキングのマネジメントは，すべてトレッキング会社に任せた．ガイド，コック，キッチンボーイなど 4 人が食事・キャンプ設営・荷物運搬などの世話をしてくれた．荷物は，高度が 4,000 m 台の前半は馬で，5,000 m を超える後半はヤクで運んだ．ブータンではネパールのようなポーターによる運搬は一般的ではなく，荷物は家畜で運ばれる．

1998 年 9 月 11 日，まだ夏の暑い空気の中を，空港のある町パロの西，海拔 2,560 m のディゲゾンから歩き始めた．4,000 m まで 3 日間かけて谷沿いにゆっくり登る予定であったのが，モンスーンの大雨で途中の橋が流されていたため山越えの道にな

図 3 ブータン王国全域とルナナ，チャムカールの位置

調査ルートは赤がスノーマン＝トレック，青がチャブダ湖へのもの．Pr: パロ，T: ティンブー，Pn: プナカ，C: チャムカール（街），J: ジチュ＝ドラモの峠．

った。2日目は、朝 2,800 m から出発し、谷の側壁の尾根(4,320 m)を越えて 4,160 m でキャンプするという高山病になるためのような行程であった。その後も連日峠越えが続いた。ブータンを北から南に流れるいくつもの谷を横切って西から東に進むスノーマン＝トレックのルートは連日高い峠を越えなければならない。高さ 4,000 m 以上の峠を 15 越えた。最後に越えた峠はトレッキング終了 2 日前の 10 月 15 日に越えたタンペ＝ラ(4,600 m)で、あとは谷沿いに南下した。トレッキングの途中に、GLOF の可能性がある氷河湖に来ると、最寄りのキ

ャンプから氷河湖に寄り道し、1 日か半日氷河湖のまわりを歩き回って詳しい観察をした。合計 30 の氷河湖を観察対象にした。そして氷河湖ごとに台帳個別票(氷河湖データシート)を作成した(表 1)。

2) ルナナ

9 月 27 日の朝、5,240 m のガンラ＝カルチュン＝ラ(峠)を越えてルナナ地方に入った。GLOF が心配されている湖が最も多く分布するのがルナナである。ルナナはブータン王国の北部の隔絶された盆地状の地域で、どこから入るにしろ 5,000 m 以上の高い峠を越えなければならない。これらの峠は、

表 1 氷河湖台帳個別票の例

Code number of glacier lake: GLC-5 (GSB, 1999); Cham gl 383 (Mool et al., 2001)
 Name of glacier lake: Chubda Tsho
 River basin-1st order: Chamkhar Chhu
 -2nd order: Chamkhar Chhu eastern branch
 -3rd order: Churapokto Chhu
 Location -Longitude: 90°42'31.77"
 -Latitude: 28°01'25.91" (Mool et al., 2001)
 -Approx.: _____
 Dimension-length and width: 2.75 x 0.50 km (GSB, 1999); 2.645 km (Mool et al., 2001); Area: 1.035 km²
 (Mool et al., 2001); 1.16 km²
 -depth: unknown
 -lake surface elevation: 4763 m (Karma et al., 1999); 4880 m (Geological Survey Bhutan 1999;
 Mool et al., 2001)
 Plan shape: nearly rectangular
 Related glacier-name: one of Yakshing Glaciers (GC-4)
 -type: partly debris mantled valley glacier
 -interface with lake: the lake is on the glacier and upper end of the lake contact with high cliff
 of glacier front.
 Type of glacier lake: large supraglacial lake
 Record of past GLOFs: No
 Remarks: Other name is Churapokto Tsho by Geological Survey Bhutan (1999);
 Data sources-map: Map of 1:200,000 by USSR (by air-photos taken in 1974); 1:50,000 by Survey of India
 -satellite image: SPOT 1991/12/21; 2001/12/23
 -literature: Karma et al. (1999);
 Geological Survey Bhutan (1999);
 Mool et al. (2001)
 -field observation: Sept. 1999 by Geological Survey Bhutan and Oct. 2002 by Japan-Bhutan
 joint team led by Iwata

秋が深まると積雪によって閉ざされてしまうので、10月中旬までにはこの地域から出なければならない。したがってまだモンスーンの明けていない9月初めから調査を開始した。そのため、調査前半は雨や雪の中での調査や峠越えが多かった。

ガンラ＝カルチュン＝ラから、激しいあられの中を氷河の縁を通過して下り、懸谷の縁に来ると対面の主谷にガンサーが報告したタリナ氷河湖を眺めることができ、いよいよ氷河湖決壊洪水の本場ルナナに来たことを実感した。ガンサーが1967年に撮った写真では決壊洪水の跡が谷底いっぱいに白い河原として広がっていたが、そこは現在では灌木に覆われていた(図4)。ガンサーによると、タリナ氷河湖の洪水は1950年夏に起こりプナカのゾンに被害を与えていた。1994年のプナカの洪水被害は初めてではなかったのである。ガンサーのときと比べると氷河はわずかに後退しているが、湖背後の岩壁から氷舌端が湖水に崩落する危険は依然として存在している。ルナナの氷河湖を堰き止めるモレーンには大きな裂け目が形成され、湖面とモレーンの外側の地面との比高(高度差)はほとんどないのが救いである。

3) ルナナ東部の氷河湖調査

1994年に起こったルゲ湖の氷河湖決壊洪水の爪痕のすさまじさに驚きながら、ルナナに入って5日後にルナナ東部のタンザ村に到着した。海拔4,160mの広い河岸段丘上に十数軒の石造りの家屋が散らばっている。ヤクの飼育と畑作を生業としている村である。この村の背後には氷河湖決壊洪水を引き起こす恐れのある氷河湖がいくつもある(図5)。われわれはタンザ村にベースキャンプを置いて1週間調査を行った。

地形調査担当の岩田と奈良間千之は、湖の周囲の高い尾根や山腹斜面に上がって湖背後の氷河と斜面の状態、特に氷河なだれや崩壊の可能性を観察し(図6)、モレーンを歩き回ってアイスコア(氷核)の存否、モレーンの形成時代の推定(年代資料の測定)、モレーンからの漏水の有無などを調べた。雪氷学の上田と坂井亜規子、内藤望は氷河の上を歩き回って、氷河の活動性や構造、消耗速度を調査した。

湖そのものの調査も行った。10月6日にはゴムボートでラフストレン湖に漕ぎ出して水温や水深を測定した。風のない午前中に測定を終わらせる

図4 ルナナ地方西部のタリナ氷河湖群
左：1967年秋(おそらく10月)の状態(Gansser 1970)。右：1998年10月(岩田撮影)。

図5 ルナナ地方東部の氷河・氷河湖群とモレーン群（1998年の状態）

図6 タンザ村南側の高度4,716 m地点から見たベチュン氷河（左）とラフストレン氷河湖（1998年10月岩田撮影）

ため、早朝4時20分、暗いうちからキャンプを出発し、湖岸でボートを膨らませ、ネパールの氷河湖で豊富な経験をもつ坂井が艇長兼測定手として、探検部で川下りの経験豊富な奈良間が漕ぎ手となって観測した。岸辺で内藤と岩田がセオドライトで位置の測定を受けもった。幸運にも強風が吹かず無事観測を終えた。懸念されていた、上流側に接するトルトミ氷河湖群からの漏水は水温観測の結果からは認められなかった。

われわれの現地調査によって、トルトミ氷河上に無数にある湖群の拡大速度がたいへん大きいこ

と、そのモレーンダムは厚さが薄く、南側への漏水も激しい上に、ルゲ湖からの排水路によってモレーンの根元が侵食される可能性も大きいことが明らかになった（図7）。ルゲ湖は流出口がモレーンの崩壊などで堰き止められない限り危険は少ないことが明らかになった。現在のところ、最も注意して監視すべき氷河湖はトルトミ氷河湖群であるという結論を得た。

4) 湖の流出口の掘り下げ

ラフストレン湖も危険な湖である。大量の湖水が蓄えられ背後の氷河と山腹は急峻で雪崩や崩壊の可能性がある。ブータン政府は1996年から湖の流出口を広げる工事を人海戦術で行ってきた。われわれがタンザ村に到着したときは、3年間続いた工事が完成した直後で、タンザ村に向かう途中、下山する多くの労働者に会った。彼らにはネパール系ブータン人が多く含まれていた。賃金をたっぷり貰ったためか皆ニコニコしており、みすばらしい身なりにもかかわらず礼儀正しくあいさつする人が多いのに強い印象を受けた。

3年間、夏の間数百人の労働者を使って、人手による作業だけでモレーンに水路を掘り、3 m 以上

図7 衛星画像にみる2001年のルナナ東部タンザ氷河湖群
ルゲ湖から西方に続く白い土石流跡が1994年のGLOFの傷跡。スケールや氷河湖名は図5を参照（Terra衛星ASTER画像2001年11月）。

湖面を下げる事ができた。この程度の水位低下ではたいして効果がないのではないと思われるかもしれないが、長さ2km、最大幅1kmの大きさの湖ではたかだか数メートルでも莫大な水量になり、その効果は少なくない。この工事を担当したブータン地質調査局の技術者の話では、エンジンつきポンプやサイフォンによる排水では大量の水を汲み出せず、結局排水路の掘削に踏み切ったのだそうだ。しかも、外国のひも付き援助を好まないブータン政府は自分たちの経済力にみあった人力での工事に踏み切ったのであった。

5) ブータンの村と人びと

ブータンの人びとは、ルナナが特別な場所であると考えている。ルナナは、文化が違う、野蛮だ、人が悪い、などと平気で悪口を言う。中でもタンザの村人に対する評価は最低だ。確かに、タンザ村から南下するとき雇ったヤク使いたちとはトラブルを体験した。ガンリンチェンゼ峠の手前の5,000mのキャンプで「ここの滞在を1日短縮しなければ村に帰る」とゴネたので調査日数が1日減

ったし、最終日には約束の場所の数キロ手前で荷物を運ぶのをやめてしまった。しかし、もっとひどいトラブルや契約違反はネパールや中国で何度も経験している。われわれの滞在中、タンザの村人たちは概して好意的であった。タンザをはじめとしてルナナの人たちに対する評判が悪いのは、ルナナ以外のブータンの人びとの人柄がよすぎるからであると筆者は考える。家畜での荷運びの引き継ぎや、われわれとは別ルートでルナナに運ばれた荷物の別送もきちんと行われ、タンザのヤク使いとのトラブルを除けば、われわれのガイドとヤク使いや馬方との口論もなかったし、盗難にも遭わなかった。現代文明に汚染されていないという点ではブータンはまさに世界の秘境である。

トレッキング中にわれわれを世話してくれたガイドたちは自然保護には最大限注意し禁欲的であった。炊事用の燃料は薪ではなくブタンガスを用いたし、ゴミや空き缶、空き瓶なども現地に捨てず麻袋に詰めてもち帰った。ガイドたちは酒も飲まず、したがって、アルコール飲料の用意もごく

わずかであった。ネパールでの経験から、酒は途中の村で補給できると考えていた私は、人口密度が小さいブータンでは村も少なく、トレッキング中にチャン(どぶろく)やアラック(焼酎)が簡単には手に入らないことを思い知らされた。おかげで健康的な生活ができた。ネパールのトレッキングは村から村へ、耕地から耕地へと里山の旅という趣であるが、ブータンの山旅はほとんどが鬱蒼とした森の中から高山帯をたどる旅(図8)で、両者には大きな違いがある。ブータンの山旅は静かで

図8 ブータン北部の高山帯の砂礫の峠を越えるヤクのキャラバン(岩田撮影)

あるがさびしい。

6) 調査報告

帰国後、調査報告書を作成してブータン政府に提出した。調査した30の氷河湖の台帳個票、危険度チェック票をそろえ危険度の判定を行った。安全、やや危険、危険、きわめて危険という4段階に危険度を区分した。ラフストレン湖が「きわめて危険」とされたほか、四つの氷河湖が「危険」と判定された(Iwata et al. 2002a)。

3. 2002年の調査：チャブダ氷河湖の調査

1) チャブダ湖は危険か?

1998年の調査がきっかけになって、ブータン地質調査所の若手所員デオラジ=グルンが2001年秋に東京都立大学の大学院に留学生としてやって来た。その頃にはブータン地質調査所作成の氷河と氷河湖の台帳も出版されていたし(Geological Survey of Bhutan 1999)、カトマンズの山岳研究所ICIMODの台帳(Mool et al. 2001)も出版された。ICIMODの台帳には24の氷河湖が危険な氷河湖としてリストアップされていた(図9)。その中の一

図9 ブータンの氷河湖の分布(カール底湖のようなすべての氷河湖を示している)

赤丸がICIMODによって危険と判定された氷河湖(Mool et al. 2001)。

つは、デオラジ＝グルンが修士論文の調査を行っているチャムカールチュウの源頭にあった。デオラジ＝グルンの調査結果をフィールドで検討するついでに足を伸ばして氷河湖を観察することになった。その湖はチャブダ湖と呼ばれており、1999年に現地調査が行われ地形図が作られていた(Karma et al. 1999)。われわれに調査許可をくれた地質調査所のドルジ＝ワンダ所長は、チャブダ湖が数年以内に決壊する危険のあるなしを調べてほしいと言った。

2) チャブダ湖調査

2002年9月末に、デオラジと小森次郎(当時ともに東京都立大学大学院)、岩田は、ブムタン谷の中心の町チャムカールでコックを雇い出発した(図3)。地質調査所から借用したテント・炊事具などの装備と、チャムカールで購入した食料を馬5頭に載せてチャムカール川を遡った。川沿いの鬱蒼とした森林の中の小道をたどり、5日目に4,400mの地点にキャンプを設けた。ここに9月24日から26日まで滞在して氷河湖の調査を行った(Iwata et al., 2003a; Komori et al. 2004a)。

キャンプから2時間ほど歩くと、片麻岩の白い岩屑が石積みの重力式ダムのように谷を横切っている地形に来る。これが、チャブダ氷河末端(氷河前縁斜面)で、草本や地衣に覆われた暗色の古いモレーンを覆っている(図10)。この緩い氷河前縁斜面には上方からの表面流は認められなかつ

たが、歩いてゆくと礫の下から盛んな水音がした。ブータン地質調査所の1999年の調査でも同じような状況が認められている。そのときは、この氷河前縁斜面の基部から2箇所の水の流出を確認している。今回の調査では右岸寄りの1箇所で水の流れ出しが認められ、さらに左岸寄りでも流れ出ている形跡が確認できた。

この緩やかな氷河前縁斜面を登りきると湖の縁に出た。湖尻(下流末端)は浅く幅が狭くチャンネル状で、湖水は川のように流れて氷河前縁斜面頂部で礫の間に吸い込まれて見えなくなる。湖の奥の方には、台地状の島が複数ある(図11)。湖の両側は、植生のないハンモック状の起伏がある岩屑斜面が小氷期のラテラルモレーンまで続いている。つまり、湖は船底状の地形の底にある。岩屑斜面には片麻岩の大きな岩塊が不安定に積み重なり、崖状の部分には氷河水が露出しており、岩屑の厚さは1mほどであることがわかる。湖の中にある台地状の島の側面の急斜面も露氷の崖になっている。このような氷河湖のまわりの状況から、湖の両側の岩屑斜面が岩屑被覆氷河であることは明らかである。チャブダ氷河湖は岩屑被覆氷河の中央部に形成された氷河表面融解湖が拡大・連結したものである。湖の下流側の氷河前縁斜面も、植生を欠くことや、水音が浅い所から聞こえることなどから、前面(末端)モレーンというよりも岩屑被覆氷河の末端そのものといえよう。

図10 ブータン中央部北部チャムカールチュウ上流のチャブダ氷河の前縁斜面(2002年9月岩田撮影)

図 11 チャムカールチュウ上流のチャブダ氷河湖
下流側から上流部を望む．両側の砂礫の部分は氷河表面岩屑．白っぽい崖の部分は氷河水の露出部（2002 年 9 月岩田撮影）．

図 12 チャムカールチュウ上流の氷河と氷河湖
中央がチャブダ氷河湖，それ以外の氷河湖は無名（小森次郎 原図）．

3) 危険度査定

現地調査の結果によって，われわれは，チャブダ氷河湖は比較的安定した状態にあると判断した．1999 年のブータン地質調査所の調査結果(Karma et al. 1999) と比べると，この 3 年間にチャブダ湖や周辺のもレーンの状況は大きく変化したとはい

ないので，湖の拡大スピードや地形変化のスピードは穏やかである．また，岩屑被覆の面積に比べると湖の面積は小さく，氷河本体の体積が湖に比べてかなり大きいこと（図 12），さらに氷河末端部分の氷河前縁斜面の傾斜は緩く湖尻側の水深も浅いので，氷河末端部も形態的には安定している

と判断できる。湖尻から排出される水は、水音が連続して聞こえることから、表面岩屑と氷河水との境界を流下していると思われ、氷河を弱体化させる可能性が高い氷体内部の流下ではない。このようなことから、2~3年の間に氷河湖が決壊する危険は少ないと判断した。ただし、氷河湖の拡大や前縁斜面の監視などが不可欠なのは言うまでもない。

4) 牧民ツェワン = ノルブ

馬を提供して荷物を運んでくれたツェワン = ノルブ(当時27才)は、1999年の調査にも同行したそうだ。奥さんと4人の子供がいるが、家をもたず一年中天幕暮らしをしてヤク15頭と馬4頭を飼っている。ほぼ2箇月ごとに5箇所の牧地を巡回する「政府からは定着し耕作を勧められているが、与えられた土地は南部の海拔1,000 m 台の場所にあるので暑くて暮らせないし、低地の農業は方法を知らないから放棄した。ここで牧畜をするしかない」「トレッキンググループの荷運びもする、貴重な現金収入だ」と話していた。夜、たき火を囲んでいるときブータンの民謡を次から次へと歌ってくれた。ブータンの文化を誇りに思っており、仏教を信じ、山暮らしの生活の知恵があり、乏しい資源で生きてゆける。ツェワン = ノルブとともに、もっと山旅を続けたいと思った。

IV 氷河湖の形成とモレーンダムの決壊

1. ブータンとその周辺の氷河湖

ブータンの氷河湖は、位置と成因によって次の3タイプに区分できる。(1)氷河表面の融解による池や湖(図7)、(2)モレーンダム湖(図6)、(3)氷河のない氷河地形の流域にある湖である。氷河氷体が堰き止めた氷河ダム湖の存在は知られていない。これらの氷河湖のうちで、氷河湖決壊洪水GLOFの可能性のある氷河湖は、大きく拡大した氷河表面融解湖と、氷河に接していたり氷河前方の氷河から近い場所にある氷河湖である。氷河から遠くにある湖や現在の氷河のない流域にある氷河

湖がGLOFに関係ないのは言うまでもない。

佐藤ほか(2004)は、地形図とLANDSAT衛星画像によって、ブータンヒマラヤ(チベット側北面も含む)における氷河表面融解湖とモレーンダム湖の数と面積を計測した(表2)。ヒマラヤ主脈南側には小規模な氷河湖(平均0.17 km²)が多数あるのに対して北面では比較的大規模な氷河湖(平均0.31 km²)が数少なく存在する。これは、氷河の規模と数の違いの反映であり、南北の起伏の違いの反映でもある。図13の衛星画像でも氷河と湖の大きさの違いがわかる。図13中央部の北面にある湖は長さ5 km、幅1.7 kmの大きさをもつ。これに比べると図5や図6に示した南面ルナナ東部の氷河湖は面積が小さい。この画像からは、南面の氷河には岩屑被覆氷河が多く、北面の氷河には裸氷の消耗域をもつ氷河が多いこともわかる。

ブータンヒマラヤの主脈の南側には高さが4,500~5,500 mの高原状の山地が広がっている。そこには小規模な圈谷氷河や谷氷河があり小規模な氷河湖が多数存在する(図14)。これらの氷河湖も多くは最近形成された(図15)。

氷河湖がどのような氷河で発達するのかについてはいろいろ議論されているが定説はまだない。氷河表面融解池は岩屑被覆氷河では珍しくないが、裸氷河では形成されることはまれである。Reynolds(2000)は氷河表面の勾配が2度以下の場合に大きな表面融解湖が形成されるとし、佐藤ほか(2004)も氷河が存在する場所の傾斜が緩い場合に氷河湖が形成されると述べている。筆者は、岩屑被覆氷河では湖は氷河消耗域の中流部に氷河融解によって形成され、裸氷河では氷河前面と前面モレーンとの間の湛水によって形成されると考えている。

表2 ブータンヒマラヤ主稜線の北面・南面の現在の氷河湖の数と面積

地域	総数	総面積 (km ²)	平均面積 (km ²)
北面	72	22.5	0.31
南面	117	20.0	0.17

出典：佐藤ほか, 2004.

2. 氷河湖の形成と拡大

ヒマラヤ山脈の氷河湖が 1970 年代から急速に拡大してきたことはすでによく知られている (Yamada 1998; Ageta et al. 2000; Iwata et al. 2002a) . ブータンの氷河湖の形成状態を過去に遡って把握できる資料で、われわれが使ったものを、情報の得られた年と資料名を示す .

- ・ 1956 ~ 58 年 1:50,000 地形図 (インド測量局作成の空中写真図化の地形図)
- ・ 1966 年 CORONA 衛星写真 (アメリカ地質調査所)
- ・ 1967 年 Gansser のスケッチマップ (Gansser 1970)
- ・ 1968 年 CORONA 衛星写真 (アメリカ地質調査所)
- ・ 1974 年 1:200,000 地形図 (旧ソ連作成の高高度空中写真図化地図)
- ・ 1989 ~ 90 年 1:50,000 氷河湖地図 (SPOT 衛星画像判読による、ブータン地質調査所)

- ・ 1991 年 SPOT 衛星画像 (CNES, 分解能 20 m)
- ・ 2001 年 SPOT 衛星画像 (CNES, 分解能 20 m)
- ・ 2001 年以後 ASTER 画像 (Terra 衛星)

このうち、CORONA 衛星の写真は、軍事衛星が撮影した白黒銀塩写真 (フィルム) で、パラシュートで回収されたものである . 東西冷戦終了後、公開されアメリカ地質調査所で購入でき、1960 年代の実体視できる情報が得られる . これらのほかに、最近ではグーグルアース (Google Earth) の画像が利用できる .

これらの情報からブータンのいくつかの氷河湖について 1950 年代から 1990 年代末までの氷河湖の拡大の様子を図に示した (図 16) . ルナナ西部のタリナ湖 (図 4) のように 1950 年代にすでに形成されていた湖もあるが、ラフストレン湖、ルゲ湖 (図 5, 図 6) , チャブダ湖 (図 12) などは 1970 年代から 1980 年代に形成されたようである . 一方、トルトミ氷河やワチェ氷河のように、氷河表面融解池が現在拡大中のものもある . このような、い

図 13 ルナナとその北側のブータンヒマラヤ主脈の南と北の氷河と氷河湖
東西 47 × 南北 32 km の範囲が撮影されている . 南側のルナナでは右端にタンザ氷河湖群が見える . Terra 衛星 ASTER 画像 2001 年 11 月 20 日 .

図 14 ルナナ地方の南側に広がる 4,500 ~ 5,500 m の高原状の部分
図 3 の J (Jichu Dramo) が中央部に位置する。小規模な山腹氷河と多数の氷河湖がある。1: 50,000 地形図から作成した。上が北。

図 15 ルナナ地方の南側の高原上にある小規模な氷河と氷河湖
この氷河湖は 1984 年には存在していなかった (月原敏博の情報)。図 14 中の GLP19 氷河湖 (1998 年 10 月岩田撮影)。

ろいろな段階にある氷河湖を整理すると、岩屑被覆氷河でのモレーンダム湖の発達過程は、氷河表

面融解池の形成・拡大・結合 大きな氷河表面融解湖 拡大 上流側が深く下流側が浅くラテラルモレーンまで達した氷河湖 (下流の氷河末端との間には岩屑の覆われた氷河氷が存在する)

末端の氷体の融解によって末端モレーンが湖に接する、のようなシナリオが認められている。そのメカニズムは Yamada (1998) や Sakai et al. (2000, 2002), Richardson and Reynolds (2000), Benn et al. (2000) など、主に雪氷学者によって議論されている。

氷河湖に接している氷河前面の後退速度は、ルゲ湖では 1988 ~ 1993 年の 5 年間に 750 m に達している (図 16)。このような、年間 150 m にも達する大きな後退速度に関する説明はまだ不十分である (山田 2001)。一方、30 ~ 40 年間の平均では、Ageta et al. (2000) や Komori et al. (2004b) によると、ルゲ湖も含めて氷河湖拡大速度はほぼ等速で、年間 0.015 ~ 0.03 km² の範囲に入っている (図 17)。

1976 年と 2002 年の衛星画像によってブータンから中央ネパールまでのヒマラヤ山脈の南側と北側で氷河湖の拡大速度を計測した佐藤ほか (2004) によるとブータン南面での氷河湖拡大速度は大きく、計測した 26 年間で氷河湖面積はほぼ 2 倍になり、そのうち半分が新しく誕生した氷河湖である (図 18)。ブータン南面で氷河湖拡大率がこのように大きいことは、計測されたほかの地域の拡大率が 125 ~ 155% であることと比べると突出している。

V 危険な氷河湖

1. GLOF の原因

氷河湖に GLOF が発生するのは、何らかの引き金があって湖水が溢流したり、モレーンダムが破損・崩壊することによる。GLOF 発生の引き金や原因はきわめて多様である。これまでの GLOF の事例を参考にして、ヒマラヤでの GLOF 発生の間接的引き金・直接的引き金・直接的原因をリストアップし、それら相互の関係を図示した (図 19)。ここでは間接・直接の引き金と、モレーンダム崩

図 16 ブータンの氷河湖の拡大の時系列的な変化(黒い部分が湖 ; データの詳細は本文を参照されたい)

図 17 ブータン、ルナナ地方と東ネパールの氷河湖の拡大速度 (Komori et al. 2004a ; 図中の文献は Komori et al. 2004a を参照されたい)

壊の直接の原因 (大波・溢流, 水位上昇, ダムの脆弱性の増加) を区別した。

図 18 ブータンヒマラヤの氷河湖面積の 1976 年と 2002 年との変化
南面と北面での比較 (佐藤ほか 2004)

2. 決壊洪水危険度を査定する手法

それぞれの氷河湖について、これらの引き金や直接の原因の発生の可能性を検討するのが決壊洪水危険度の査定 (アセスメント) である。ブータンで調査した氷河湖について、氷河湖ごとの危険度査定チェックシートを作成した。中央ブータン、チャムカール流域のチャブダ湖の例を表 3 に示す。

図 19 ブータンヒマラヤにおけるモレーンダム湖の潜在的な原因
決壊洪水の間接的・直接的な引き金、直接的原因の因果関係を示した。

このシートでは、項目ごとに 5 段階の評価を行い、最終的には総合的危険度を示すようになっている。問題は項目ごとの評価をどのように総合査定にまとめるかである。1998 年にスノー＝マントレック沿いの危険度査定を行ったとき (Iwata et al. 2002a) には、項目ごとの 5 段階評価を総合する方法が定量的ではなかった。ICIMOD (Mool et al. 2001) が指定したネパールとブータンの危険な氷河湖についても、その査定方法は明らかにされていない (作成に関与したデオラジ＝グルンによると実際に明確な基準はなかったという)。

一方、日本では、地震や集中豪雨にともなう堰き止め湖が形成されることがあり危険回避のための調査と研究が進み、ある程度の定量的危険度査定が行えるようになっている (田畑ほか 2002)。

表 3 でわかるように個別評価項目は数が多い。これらを整理することを試みた (表 4)。まず、多くの氷河湖に共通な評価項目 (一般的評価項目) と、ある氷河湖に特有の評価項目、あるいは、特に注意すべき点についての評価項目 (特別評価項目) とに分ける。ここでは、一般的評価項目 (評

価項目 1) をとりあげる。さまざまな引き金や原因は原因・結果の関係が積み重なる構造、あるいは個別的な (小さな) ものが集積して包括的な (大きな) ものになる階層的な構造をもっている。そして、氷河湖決壊洪水 GLOF 危険とは、ダム湖から下流での危険である。それは、その場所の固有の条件による「下流の地点ごとの危険度」とダム湖や上流の河況による「上流から来る危険度」に分けることができる。

1) 下流の地点ごとの危険度

「下流の地点ごとの危険度」はその地点の「社会的条件」と「自然的条件」の二つに分かれ、前者は、人口・土地利用・施設立地・情報伝達などの統合されたものであり、後者は、ダム湖からの距離と比高や、川からの距離、最高水位との比高、避難場所の存否などの条件である。

2) 上流から来る危険度

「上流から来る危険度」は「ピーク流量」と「洪水発生の可能性」から構成される。「ピーク流量」の予測は急激な水位低下量の見積もりと、その地点の地形で決まってくる。これらと、「下流の地点

表3 ブータンヒマラヤのモレーンダム崩壊 / 湖決壊危険度評価・査定チェック票

Code number of glacier lake: GLC-5Name of glacier lake: Chubda Tsho**Glacier lake**

- Location to glaciers: ☐1. Supra- en- and sub-glacial 2. Ice-marginal
3. Proximal 4. Distal 5. In the basin without glacier
- Cause of lake: ☐1. By ice melting 2. Dammed by glacier 3. Dammed by moraine
4. Dammed by other landforms 5. River lake (by poor drainage)
- Water depth: 1. Deep 2. Medium 3. Shallow ☐4. Unknown
- Water volume: ☐1. Extremely large 2. Large 3. Small 4. Very small 5. Unknown
- Rate of lake expansion: 1. Extremely rapid 2. Rapid ☐3. Slow
4. Very slow 5. Stationary or shrinking 6. Unknown
- Possibility of landslides and/or debris flows from the catchment area:
1. High ☐2. Low 3. Extremely low 4. Unknown

Related glacier-Code number and name: GC-4 One of Yakshing Glaciers

-Occurrence of glacier/snow avalanches:

1. Extremely high 2. High ☐3. Low 4. Extremely low or no 5. Unknown
- Possibility of glacier surge: 1. Extremely high 2. High 3. Low 4. Extremely low or no ☐5. Unknown
- Activity of terminus: 1. Advancing 2. Stationary ☐3. Slow retreating
4. Rapid retreating 5. Unknown

Glacier front/lake interface

- Situation and feature of glacier front: high ice cliff
- Degree of calving: 1. Extremely high 2. High 3. Low 4. No ☐5. Unknown
- Supply of debris from the glacial front or upstream channel:
1. Extremely high 2. High ☐3. Low 4. No 5. Unknown

Glacier lake/moraine-dam interface

- Water depth at the base of moraine dam (hydrostatic pressure):
1. extremely large 2. large ☐3. small 4. unknown

Moraine-dam

- Volume and shape: no moraine dame
- Occurrence of mass movement on inner slopes: 1. Extremely high 2. High ☐3. Low 4. No 5. Unknown
- Existence of ice core: ☐1. Existing 2. Partly existent 3. No 4. Unknown
- Occurrence of seepage and/or piping: 1. Existing 2. Partly existing ☐3. No 4. Unknown
- Age and history of construction: unknown
- Relative height of outer slopes: 1. Extremely large 2. Large 3. Medium ☐4. Small 5. Unknown
- Inclination of outer slopes: 1. Extremely large 2. Large 3. Medium ☐4. Small 5. Unknown

ごとの危険度」については、日本では土砂災害の危険度地図が作成され一般に配布されるケースも増え、かなり査定可能となっている。ブータンでもルナナから流れ出すポチュウでは檜垣（2002）や桧垣・梅村（2003）の報告がある。下流の地点ごとのこれらの危険度の査定は今後ますます重要に

なってくるはずである。

「洪水発生の可能性」は「ダム崩壊の可能性」と言い換えることができる。外から計測・評価できる「ダムの高さ・厚さ」、「ダム湖の大きさ（面積・水深・湖盆形状）」、「ダム湖の周囲・背後からの引き金になる雪氷・地形変化（崩壊・氷河なだれ・

表 3 ブータンヒマラヤのモレーンダム崩壊 / 湖決壊危険度評価・査定チェック票
(続き)

-Possibility of geomorphic evolution on outer slopes: very low

-Relative height or inclination of the outlet channel: 1. Extremely high 2. High ☒ 3. Low 4. Unknown

-Shape of the outlet channel: 1. Narrow and sharp 2. Narrow and gentle
3. Wide and sharp ☒ 4. Wide and gentle 5. Unknown

-Conditions of side slopes of the outlet channel: no definite side slopes

GLOF history

-Record of past GLOFs: No

-Evidences of the past GLOFs: No

Overall assessment

-Degree of occurrence of moraine-dam failure and/or outburst:
1. High probability ☒ 2. Medium probability 3. Low probability
4. No occurrence 5. Impossible to evaluate

-Possible direct cause of moraine failure:
1. Overtopping and/or surge wave
2. Rise of water level and/or volume
☒ 3. Increasing of dam vulnerability

-Possible direct triggers of moraine failure: melting of ice at threshold

-Degree of danger (probability of hazard):
1. Very dangerous ☒ 2. Dangerous 3. Less dangerous
4. No danger 5. Impossible to evaluate

-Countermeasures or recommendations:

Remarks: The danger is not little, but no urgent danger exists. Glaciological detail assessment is required

Reliability: 1. Excellent ☒ 2. Good 3. Fair 4. Acceptable 5. Unreliable

氷河カービング・氷河サージ)」などは比較的评价が容易であるが、最も重要な「ダムの脆弱性」そのものの評価は簡単ではない。ネパールでは行われたがブータンでは例がないモレーンダムの物理探査、モレーン形成年代の測定 (Iwata et al. 2002b)、土木工学的手法でのダムの安定解析 (梅村 2002) などが必要になる。日本の崩壊堰止め湖の場合は、浸透流が徐々に増加することが決壊の引き金になる場合が最も多く、それは湛水が始まってからの時間の関数であると考えられているが (田畑ほか 2002)、ヒマラヤの氷河湖の場合にはモレーンダム内部に氷河水が存在するために同じように考えることはできない。しかし、モレーンからの漏水の有無は重要な評価項目である。

3) 数量的評価の試み

これまでのチェックシートでの評価、「ある」、「なし」や、「大」・「中」・「小」などの相対的评价を相互比較と集計が容易な 5 段階評価に読み替

えるための表を作った (表 5)。これをもとに、1998 年の査定で危険と査定された氷河湖の一つルゲ湖と、2002 年秋に調査したチャブダ湖のチェックシートの各項目の数量化、5 段階評価化を行い集計した。そのとき、(1) 各項の評価を平均できると考える場合: 5 段階評価 = (各かつこ内の 5 段階評価の合計) / (0 評価を除いたかつこ数) として評価する場合と、(2) 各項の最大値をとると考える場合: 5 段階評価 = (各かつこ内の 5 段階評価の最高値) をとる場合とが考えられる。両方のやり方で集計してみたが、両者は大きく異なり、定性的に行った総合的査定とも一致せず、期待するような結果は得られなかった。

いまのところ、氷河湖の決壊洪水危険度査定の指針について、まだ評価項目を数量化する方法は見つかっていない。日本で行われている、崩壊によって形成される土砂ダム (河川の閉塞) の決壊危険度査定も参考にならない。しかし、これから

は人工的に水位を下げる工事が行われた。これらでの GLOF 危険度は低下したが、大量の湖水が貯えられている事実は危険が依然として存在することを示している。もし、湖の背後から氷河なだれや崩壊物質が湖に落下すると大波や溢流によって GLOF が起こる可能性は高い。

ルナナのモレーンダムの脆弱性が特に心配されるのは、他の場所と違ってこの高度が低いことである。ブータン北部での永久凍土の下限は約 5,000 m であるが (Iwata et al. 2003b)、氷河湖は 4,500 m 前後の高度にあり、明らかに永久凍土の分布しない地域である。したがって、モレーンの中の氷河氷 (氷核) は速やかに融解するのである。

われわれが、いま最も危険であると考えているのはトルトミ氷河湖である。1998 年の調査報告でも最も危険な氷河であると判定したが、その後も氷河湖が拡大を続け、2002 年に聞いたオーストリア隊の情報ではトルトミ氷河湖の融け水がラフストレン湖側にも漏水しているという。2006 年 2 月 6 日の読売新聞に西側上空からみたトルトミ氷河湖の写真が載り決壊の危険を警告する記事が出た。特に南側のモレーンはルゲ湖からの流出河川で側刻され、漏水が激しい。1994 年のルゲ湖のインド地質調査所による災害調査報告で提案された導流堤の建設や、まだ氷河湖の水深が小さいうちに行える氷河上の排水路の拡大とモレーンの排水路の掘り下げ拡大による湖水水位の低下が必要であろう。

2) モンデチュウ (トンサチュウ) 西支流源流部

ルナナ流域の東隣の流域はモンデチュウの西流域である。その源頭部には少なくとも五つの、氷河に接した氷河湖がある (図 20)。このうち少なくとも四つは危険な氷河湖に挙げられている (図 9)。これらの氷河湖のある場所は、ルナナからブムタンにぬけるトレッキングルートからはずれており、ガンケルプンズム峰 (7,541 m) の登山ベースキャンプの位置からはずれている。2002 年の時点ではブータン地質調査所も含めて現地調査を行ったという話は聞いていない。緊急に地上で

の湖とモレーンダムの調査が必要な場所である。

3) クリチュウ上流チベット側 (北側からの脅威)

チャムカールチュウ流域のチャブダ湖を調べていたとき、いつも気になっていたのは、チベットに抜ける北側の峠、ムナカチュウ (モンラカルチュン=ラ) であった。この峠まで登るとクーラカンリ (7,538 m) の南面が見える。峠に行くことはできなかったが、衛星画像では峠の北側、クーラカンリのまわりの氷河には、多くの氷河湖があることがわかる (図 21)。GLOF の跡らしき地形もある。ここは、チベット ブータン国境の北側の流域、クリチュウ源流流域である。このクリチュウは東流した後、南に向きを変えブータン国内に入る。そして、この下流域にはブータンの重要な水田地帯が存在する。もし、この流域で GLOF が発生するとチベット側のいくつかの村に被害が出るだけではなく、下流のブータンに大きな被害が出るであろう。

小森・岩田 (2004) や Komori et al. (2004b) は、新旧の衛星画像の比較によって氷河湖の変化を明らかにした。Geological Survey of Bhutan (1999) の氷河湖台帳をベースに命名すると、KGL1 ~ 13 まで

図 20 モンデチュウ西支流源頭の氷河と氷河湖
画像の東西は 22 km、上が北。SPOT-TX
画像 (1993 年 12 月 11 日)。

の13の氷河湖を認めた(図21)。これらのうちでKGL9, KGL11, KGL13は急速に拡大しつつあり, KGL13は最大面積(2001年で1.70 km²)をもつ。KGL11は1967年にGLOFを起こした跡があり, これらはいずれも危険な氷河湖である。存在する位置からみてKGL6, KGL7, KGL8も危険な湖であると考えられる。これらについての現地での詳しい危険度査定が緊急に必要である。

VI われわれにできること

GLOF(氷河湖決壊洪水)危険度の大きな氷河湖は, きわめて単純化すると図22に示したように, 1) 貯えられた大量の水の存在があり, 2) 氷河なだれ・斜面崩壊・氷河(氷山)分離などによる急激な水位上昇・大波の発生, 3) モレーンダムの脆弱化(脚部の侵食, 氷核の融解, 漏水など)の進行が起こる氷河湖である。これら, 1) 2) 3) を監視(モニター)し, 査定(アセス)する必要がある。しかし, 発展途上国の中でも最貧国に位置づけられるブータンに自力で監視や査定を行うだけの財政能力はない。ブータンは王国であり仏教国であるので特に親日的である。日本はGLOFの調査にも先鞭をつけた。われわれはこの問題で支援ができるはずである。何ができるか考えよう。

図21 クリチュウ源頭西支流流域とクーラカンの氷河と氷河湖 (Komori et al. 2004a)

1. モニタリングのための衛星情報の提供

上記1)の大量貯水氷河湖は, 上記Vで指摘した危険な氷河湖が存在する地域にある氷河湖のほかにも, 多数存在する。そして, 今後の急激な氷河の融解によって, 急激な水位の増加が発生する可能性がある。これらを監視するために第1にすべきことは衛星画像による監視である。湖の背後の斜面やモレーンのなだれや崩壊危険度のある程度査定することもできる。

ブータン地質調査所などの政府機関の研究者や技術者には, 大学院でリモートセンシングの教育を受けた者が複数いるので, 衛星画像モニタリングは得意とするところである。しかし, 定期的に衛星画像を入手することは財政的に無理のようなのである。さらに高価なGISソフトも備わっていない。

わが国はASTERのような世界から高い評価を受けているセンサーを開発し, 衛星画像情報を提供できる能力をもっている。衛星情報の提供はすぐにでも可能なことであろう。

2. 現地調査の援助

上記の危険な氷河湖の要件2) 氷河なだれ・崩壊の発生の可能性や, 3) 脚部の侵食, 氷核の融解, 漏水などモレーンダムの脆弱化の進行程度には, 現地での詳しい調査が必要である。その中心になるのは地形学的調査である。湖岸でのなだれや崩

- 1) 大量の水のある湖
- 2) 氷河なだれ・氷河分離(氷山)などによる水位上昇・大波の発生
- 3) モレーンダムの脆弱化(浸食による崩壊, 氷核の融解, 漏水など)

図22 危険度の大きな氷河湖の模式図と危険性を作り出している要因

壊だけではなく、氷河地形研究者はモレーンの地形と構成物質の調査によって、モレーンの構造や脆弱性もかなり明らかにできる。ブータンの政府機関には氷河地形学の専門家はいないので地形学者の援助は不可欠である。

そして、危険度の高い氷河湖と査定された湖に関しては、1) モレーンの構造の物理探査や土木工学的安定度解析、2) 堰垣が試みたような、下流での災害危険度地図（ハザードマップ）の作成が必要になる。どちらも野外での調査が必要であり、国際協力機構（JICA）の仕組みをつうじて地形学者や土木技術者が協力するシステム作りを早急に進めなければならない。

3. 中国の氷河・氷河地形研究者とブータンの研究者との橋渡し

Vの3.で北側からの脅威としてクリチュウ上流チベット側の氷河湖の危険性を指摘した。これをブータンの地質調査所の所長に話したとき「巨大な中国政府に対してブータン政府は何も言えない」とあきらめ顔で話していた。しかし、われわれ日本の氷河地形・氷河研究者は中国の研究者とパイプをもっている。チベットの辺境であるクーラカンリ南面の氷河湖に関心を示す中国の研究者はいないと予想していたが、小森が話をもちかけると関心を示した氷河研究者がいた。チベットの辺境での調査には莫大な資金が必要であるが、ブータン・中国・日本の共同調査を実現しなければならない。

ブータン王国に援助するときには気をつけるべきことがある。ブータンは、チベット仏教を軸にした自国の文化・社会・経済を、外国の影響で変化させられるのを非常に嫌っている。ひも付きの援助や、借金漬け、西欧消費文化の流入などを避けようとしている。ブータンに対しては、これまで日本が途上国に行ってきたような大規模な建設を中心とした援助ではなく、現地に適した手作りの、ソフト中心の援助を考えるべきである。

（2006年8月3日受付 2006年11月16日受理）

文 献

- 岩田修二 2005. 地質学者ガンサーのルナナ氷河湖のスケッチマップ：コロナ衛星写真との比較．2004 年度北海道大学低温科学研究所共同研究集会報告書 アジア各地における氷河変動の比較研究 ，87-91.
- 梅村 順 2002. Imja 氷河湖 moraine dam の安定性解析手法とそのための調査・実験計画．平成 13 年度低温科学研究所共同研究集会報告書 氷河湖に関する研究集会 ，69-70 .
- 小森次郎・岩田修二 2004. チャムカール川，クリ川上流部における過去 45 年の氷河湖変動．平成 15 年度北海道大学低温科学研究所共同研究集会報告書 氷河湖に関する研究集会 ，62-76 .
- 佐藤成行・山田知充・白岩孝行・成瀬廉二・矢吹裕伯・斎藤光義 2004. ヒマラヤ山脈における氷河湖の台帳と変動地域特性．平成 15 年度北海道大学低温科学研究所共同研究集会報告書 氷河湖に関する研究集会 ，52-61 .
- 田畑茂清・水山高久・井上公夫 2002. 『天然ダムと災害』古今書院．
- 中尾佐助 1958. 『秘境ブータン』毎日新聞社．
- ハイム・ガンサー著，尾崎賢治訳 1968. 『神々の御座 ヒマラヤ名著全集 6』あかね書房．Heim, A. und Gansser, A. 1938. *Thron der Götter*. Zürich: Morgarten-Verlag.
- 檜垣大助 2002. GLOF による下流での土砂災害調査について．平成 13 年度低温科学研究所共同研究集会報告書 氷河湖に関する研究集会 ，71-76 .
- 檜垣大助・梅村 順 2003. ブータン西部ブナカ周辺の GLOF による河川沿いの侵食・洪水氾濫危険性調査．平成 14 年度北海道大学低温科学研究所共同研究集会報告書 氷河湖に関する研究集会 ，83-91 .
- 山田知充 2000. ネパールの氷河湖決壊洪水．雪氷 62: 137-147 .
- 山田知充 2001. モレーン堰き止め氷河湖の拡大と気象・水文・熱環境．雪氷 63: 223-234 .

- Ageta, Y., Iwata, S., Yabuki, H., Naito, N., Sakai, A., Narama, C. and Karma 2000. Expansion of glacier lakes in recent decades in the Bhutan Himalayas. In *Debris-covered glaciers* (Proceedings of a workshop held at Seattle, Washington, USA, September 2000), ed. M. Nakawo, C. F. Raymond and A. Fountain, 165-175. Wallingford: IAHS Publ.
- Benn, D. I., Wiseman, S. and Warren, C. R. 2000. Rapid growth of a supraglacial lake, Ngozumpa Glacier, Khumbu Himal, Nepal. In *Debris-covered glaciers* (Proceedings of a workshop held at Seattle, Washington, USA, September 2000), ed. M. Nakawo, C. F. Raymond and A. Fountain, 177-185. Wallingford: IAHS Publ.
- Gansser, A. 1964. *Geology of the Himalayas*. New York: Interscience Pub.
- Gansser, A. 1970. Lunana: the peaks, glaciers and lakes of northern Bhutan. *The Mountain World* 1968/69: 117-131. London: George Allen & Unwin.
- Gansser, A. 1983. *Geology of the Bhutan Himalaya*. Basel: Birkhauser Verlag.
- Geological Survey of Bhutan (GSB) 1999. *Glaciers and Glacier lakes in Bhutan*, Thimphu: Ministry of Trade and Industry.
- Ives, J. D. 1986. *Glacial lake outburst floods and risk engineering in the Himalaya*. Kathmandu: ICIMOD Occasional Paper 5.
- Iwata, S., Ageta, Y., Naito, N., Sakai, A., Narama, C. and Karma 2002a. Glacial lakes and their outburst flood assessment in the Bhutan Himalaya. *Global Environmental Res.*, 6: 3-17.
- Iwata, S., Narama, C. and Karma 2002b. Three Holocene and late Pleistocene glacial stages inferred from moraines in the Lingshi and Thanza village areas, Bhutan. *Quaternary International* 97/98: 69-78.
- Iwata, S., DeoRaj Gurung and Komori, J. 2003a. Report of Chubda Tsho in the head waters of Chamkar Chhu, Bumthang, 2002. In *Report of Japanese-Bhutan joint research 2002 on the assessment of glacier lake outburst flood (GLOF) in Bhutan*, ed. T. Yamada and N. Naito, 54-66. Sapporo: Hokkaido University.
- Iwata, S., Naito, N., and Narama, C. and Karma 2003b. Rock glaciers and the lower limit of mountain permafrost in the Bhutan Himalayas. *Zeitschrift für Geomorphologie N. F.*, Suppl.-Bd. 130: 129-143.
- Karma, Thapa, T. and Ghalley, K. S. 1999. *Preliminary report on Chubda Tsho in the head waters of Chamkhar Chhu*. Bhumthang: Engineering Geology and Glaciology Wing, Geological Survey of Bhutan (Unpublished Report).
- Komori, J., Gurung, D. R., Iwata, S. and Yabuki, H. 2004a. Variation and lake expansion of Chubda Glacier, Bhutan Himalayas, during the last 35 years. *Bull. Glaciol. Res.* 21: 49-55.
- Komori, J., Iwata, S. and Gurung, D. R. 2004b. Hazardous glacier lakes in the headwaters of Chamkhar Chhu and Kuri Chhu. In *Report of Japanese-Bhutan joint research 2003 on the assessment of glacier lake outburst flood (GLOF) in Bhutan*, ed. Y. Ageta and S. Kohshima, 48-64. Sapporo: Hokkaido University.
- Mool, P. K., Bajiracharya, S. R. and Joshi, S. P. 2001. *Report on inventory of glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods, monitoring and early warning system in the Hindu Kush-Himalayan Region*. Kathmandu: ICIMOD and UNDP-ERA-AP.
- Reynolds, J. M. 2000. On the formation of supraglacial lakes on debris-covered glaciers. In *Debris-covered glaciers* (Proceedings of a workshop held at Seattle, Washington, USA, September 2000), ed. M. Nakawo, C. F. Raymond and A. Fountain, 153-161. Wallingford: IAHS Publ.
- Richardson, S. D. and Reynolds, J. M. 2000. Degradation of ice-cored moraine dams: implications for hazard. In *Debris-covered glaciers* (Proceedings of a workshop held at Seattle, Washington, USA,

- September 2000), ed. M. Nakawo, C. F. Raymond and A. Fountain, 187-197. Wallingford: IAHS Publ.
- Sakai, A., Chikita, K., and Yamada, T. 2000. Expansion of a moraine-dammed glacial lake, Tsho Ralpa, in Rolwaling Himal, Nepal Himalaya. *Limnology and Oceanography* 45: 1401-1408.
- Sakai, A., Nakawo, M. and Fujita, K. 2002. Distribution characteristics and energy balance of ice cliffs on debris-covered glaciers, Nepal Himalaya. *Arctic, Antarctic and Alpine Res.* 34: 12-19.
- Vuichard, D. and Zimmermann, M. 1987. The 1985 catastrophic drainage of a moraine-dammed lake, Khumbu Himal, Nepal: cause and consequences. *Mountain Res. and Develop.* 7: 91-110.
- Watanabe, T. and Rothacher, D. 1996. The 1994 Luge Tsho glacial lake outburst flood, Bhutan Himalaya. *Mountain Res. and Develop.* 16: 77-81.
- Yamada, T. 1998. *Glacier lake and its outburst flood in the Nepal Himalayas*. Monograph No.1, Tokyo: Data Center for Glacier Research, Japanese Society of Snow and Ice.

< 著者略歴 > 岩田 修二 (いわた しゅうじ)

兵庫県生まれ。明治大学，東京都立大学で地理学（地形学）を学んだ。1974年からヒマラヤで氷河・氷河地形学の研究を始め現在に至る。立教大学観光学部教授。連絡先：
iwata-s@rikkyo.ac.jp