総説

ネパールの氷河湖決壊洪水

山田 知 充¹⁾

要 旨

地球温暖化の影響でネパール王国は、1960年代以降少なくとも14回、3年に一度以上の頻度で氷河湖決壊洪水（Glacier Lake Outburst Flood, 略称 GLOF）に襲われている。氷河湖は岩屑に覆われた氷河の末端に形成されて、モレーンで堰き止められている。モレーンは小氷期にできた不安定な堆積物である。容易に決壊し、数百万 m^3 から数千万 m^3 の湖水が数時間のうちに一気に溢れ出すため GLOF は鋭い洪水波形をもつ。インフラや村落の生活基盤の破壊、人命や家畜の損失に加えて、斜面崩壊、森林破壊、河床への膨大な堆砂など、ヒマラヤの自然にも深刻な損傷を与える。多量の土砂を含むため土石流の様相を呈し、破壊力が大きい。現在拡大を続けているネパールの氷河湖は1950～1960年頃に誕生した。その後急激に成長し、長さ1～3 km、幅500 m、深さ80～130 m、貯水量3000～8000万 m^3 もの大きさに拡大を遂げ、今後の GLOF 発生の危険は極めて高い。本総説では氷河湖を持つ氷河の特徴と氷河湖の分布、氷河湖決壊洪水の実態、その急激な成長過程を紹介し、今後に残された課題を述べる。

キーワード：氷河湖、氷河湖決壊洪水、ヒマラヤ、岩屑に覆われた氷河、モレーンダム

Key Words: glacier lake, glacier lake outburst flood, Himalayas, debris-covered glacier, moraine dam

1. はじめに

地球温暖化の影響でアジア高山地域の氷河が急速に後退しつつある（例えば Yamada *et al.*, 1992; Fujita *et al.*, 1997; Kadota *et al.*, 1997; Nakawo *et al.*, 1997）。それに伴って氷河の後退に起因する自然災害が頻発している。氷河湖決壊洪水（Glacier Lake Outburst Flood, 通称 GLOF）と呼ばれる洪水災害である。

ネパール・ヒマラヤにおける GLOF の“発見”は1985年8月4日午後、東ネパールのサプタコシ水系ドゥドコシ河上流の、エベレストで名高いクンブー地方を突然襲ったディグ・ツォー氷河湖の決壊洪水（ディグ・ツォー GLOF）によって、完成を1ヶ月後に控えたナムチェ水力発電所が技術者の見ている前で跡形もなく流失してしまった“事件”に始まる（Ives, 1986）。実はこれまでも同じクンブー地方にあるナレ氷河湖（図2の矢印

1) の決壊洪水の報告はあった（Miyahara, 1982; Fushimi *et al.*, 1985）が、山奥のなだれと同様で、手痛い被害を被らない限り関係者に広く認識されることがなかったのである。折からネパールの水資源開発適地は低山域から上流の氷河に近い高山地域へと移行しつつあったため、ネパール王国の水資源開発関係者に大きな衝撃を与えた。急速、過去に起こった洪水の原因調査がなされた結果（WECS Interim Report, 1987; LIGG, WECS and NEA, 1988）、多くが GLOF であり、しかも3年に1度以上の頻度で発生していたことが判明した。にわかに GLOF は氷河隣接地域における水資源開発にとって看過し得ない脅威であり、GLOF とこれに絡む氷河研究の重要性と緊急性が認識されるに至ったのである。

当時のネパールには氷河湖や氷河を自前で研究できるだけの体制は整ってはいなかったため、我国に専門家の派遣を要請した。これを受けて国際協力事業団（JICA）は日本雪氷学会に人材派遣を

1) 北海道大学低温科学研究所

〒060-0189 札幌市北区北19条西8丁目

打診した。1970年代から継続している氷河研究の成果をネパールに還元する好機と捉え、北海道大学低温科学研究所が派遣の責任機関となって1990年から1996年に亘って氷河研究者の派遣が実施された。本案件の調査・研究成果についてはYamada (1998)を、現地での活動に関しては山田 (1992a, 1992b, 1996, 1997)を参照されたい。

ここではネパールの氷河湖決壊洪水とその原因をなす氷河湖について、その概要を解説する。氷河湖の気象・水文環境や湖沼学的な動態については、目下本誌で企画されているヒマラヤの氷河に関する特集号に譲る。

2. ネパールの氷河と氷河湖

氷河湖とは氷河の流動や融解で形成される比較的規模の大きな水溜まりを言う。氷河底や氷河の削剥でできた凹地形、氷河の上や氷河の中に形成されるもの、氷河が集水域や支流河川を堰止めて形成されるものなど多くの種類がある。そのうち、ネパールやブータン、チベットの氷河地帯には、氷河上に形成され、モレーンで堰止められている氷河湖 (moraine-dammed glacier lake, 図1) が多数を占めている。これらモレーン堰止め湖の決壊がGLOF類発の元凶である。

ネパールヒマラヤの大規模な谷氷河の氷舌には16～19世紀の小氷期に形成された比高100～150 mにも達する新鮮なモレーンが発達している。氷舌とは舌状に延びた氷河の末端部でヒマラヤでは氷舌全域が消耗域となっている。ヒマラヤの氷河はアラスカやヨーロッパの氷河に比べ、多量の岩屑を含んでいる点に大きな特徴がある。ヒマラヤは若い山脈で今なお上昇を続けていると言われ、他の山脈に比べてとりわけ激しい風化を受け、岩屑の生産量が極めて多いからである。氷河は、周囲の急峻な斜面から間断なく供給される岩屑をベルトコンベヤーのように下流に運ぶ。氷舌まで運ばれた岩屑は、その側面(サイドモレーン)と前面(エンドモレーン)にモレーン (moraine) と呼ばれる岩、礫、砂、粘土鉱物から成る氷河堆積物を形成する。まるで城塞都市の護壁の様に切れ目なく氷舌を取り囲んでいるモレーンが、氷河湖形成の重要な場を提供し、また決壊の主役を演じているのである。

図1 典型的なモレーン堰止め氷河湖であるツォー・ロルパ氷河湖
Tsho Rolpa glacier lake being a typical moraine-dammed glacier lake.

モレーン堰止め湖は例外なく岩屑に覆われた氷舌に形成されている。ヒマラヤの大規模な谷氷河の氷舌は真っ黒に見え、純白に輝く氷河のイメージからはほど遠い薄汚れた印象を与える。岩屑を含んだ氷河は、巨大なモレーンの形成に加えて氷舌の表面に厚い岩屑を析出させている。氷舌を覆っている岩屑は、氷河が表面から融けるにつれて、氷河内部に含まれていた岩屑が表面に露出するので次第に厚くなってゆく。氷河表面が岩屑に覆われると、岩屑を通して伝わる伝導熱でしか融けなくなり、岩屑は断熱材となって氷河の融解を著しく抑制する。小氷期後の氷河の衰退過程において、岩屑含有量の少ないアラスカやヨーロッパアルプスの氷河では氷河末端は上流側へと後退している。しかし、ヒマラヤの岩屑で覆われた氷河は、岩屑が融解を妨げているため薄くなっただけで、未だ小氷期の氷河最拡大期のモレーンに接している。氷河の末端ほど岩屑の厚さは厚く (>2 m)、標高の高い上流に向かうにつれて薄くなり、純白

の氷河へと連なる。

岩屑が不均一に覆った氷河表面は、融解も不均一なために凹凸が激しく、凹地に融解水が溜まって多数の池ができていく。池は出来ては消え、消えては別の場所に出現し、一般に不安定である。池が拡大して氷河に張り巡らされた排水システムに繋がると排水されてしまうからである。Kirbride (1993) はニュージーランド南アルプスの氷河上の池の観察から、池は氷河内の水路が融解し、上部氷体が陥没してできるとしている。ネパールのリルン氷河上でもそのような池が見つっている (Sakai, 2000; personal communication)。池が長期間安定に維持され、深さを増し面積を広げ互いに連結し、湖へと成長する機構はまだ分か

っていない。

ネパールヒマラヤの氷河湖は圧倒的に東部、特にクンブー地方に集中している。ヒマラヤ山脈の東部は西部に比べて高さが高く、夏のモンスーンの降水量が多いため、岩屑で覆われた大規模な氷河が多数発達しているからである。一例として航空機観測によって詳しく調査された (Yamada, 1991; Yamada and Sharma, 1992) クンブー地方の氷河湖の分布 (Yamada, 1998) を図2 (Higuchi *et al.*, 1978 の Glacier Inventory Map 上に記載) に示す。そのうち既に決壊した氷河湖に矢印を付した。比較的狭い地域に大小 35 個もの氷河湖を数えることができる。チベットからヒマラヤ山脈に深い谷を刻んで南流している東部の国際河川、アルン

図2 東ネパールのクンブー地方の氷河湖の分布。矢印1-3は決壊した氷河湖の位置 Higuchi *et al.* (1978) に加筆。
1: ナレ氷河湖, 2: デイグ・ツォー氷河湖, 3: サバイ・ツォー氷河湖

Distribution of glacier lakes in Khumbu region, east Nepal. Arrows showing the lakes bursted in the past. Arrow 1: Nare glacier lake, arrow 2: Dig Tsho glacier lake, arrow 3: Sabai Tsho glacier lake.

(Arun)川流域(図3に示したネパールの河川参照. 85%がチベット領)には234の, スンコシ(Sun Kosi)川流域には45の氷河湖の存在が確認されている(LIGG, WECS and NEA, 1988). 全てが危険とは言えないが, これらの流域はGLOFの潜在的脅威が世界でも極めて高い地域である.

3. 氷河湖決壊洪水

モレーンで堰止められている氷河湖の決壊には何等かの外的要因による場合とモレーンダム自体が自発的に決壊する場合とがある. 決壊の外的要因としては氷河湖側面の急峻な斜面からの雪崩, 岩砕なだれ, 懸垂氷河の崩落, 斜面崩壊, 氷河湖側面に接する支流氷河末端の急峻なモレーンの崩壊, 氷河湖に接している氷河末端の崩落や湖への急激な滑動, 前進などがある. 多量の雪や氷, 岩屑, 土石が一気に湖へ落下することによって発生する大きな波が, 湖を堰止めているモレーンを超え越える際に不安定なモレーンを突き崩す. 地震によるモレーンの崩壊も外的要因として挙げられる. 自発的決壊の原因としてはモレーン内部の化石氷体の融解や永久凍土であったモレーンの融解によるモレーンの弱体化, モレーン内部に侵入した湖水が地下水脈を発達させることによるモレーン強度の低下などがある.

モレーンは単に岩屑が無秩序に積み上がったもので, わずか数百年前に形成された新鮮な氷河堆積物である. 未だ固結していない非常に不安定な構造物であるため, わずかな擾乱を受けただけでも容易に決壊してしまう. ひとたびモレーンから溢れ出た湖水はモレーンに開けられた開口部を侵食し, なお一層開口部を広げ, 掘り下げ, ますます多量の湖水を放出するに至る. こうして短時間のうちに解き放たれた大量の湖水は一過性の鋭い洪水波となって下流を襲う.

GLOFの規模や流下速度は, 湖水から溢れ出る湖水の絶対量に加えて, モレーンを切って流出するに要した時間, 河道が広い狭いかなど河道の形態に依存する. 同じ容積の湖水が溢れ出ても, 一気に溢れ出るほうが, 徐々に溢れ出るよりもピーク流量は大きくGLOFの破壊力は格段に大きくなる. GLOF被害の予測にはモレーンの破壊過程(即ち湖水流出量の時間変化)が重要である.

先に述べたディグ・ツォー氷河湖(湖面標高4400 m, 長さ1.3 km, 幅300 m, 面積5000 m², 最大深さ18 m, 貯水量675万m³, 図2の矢印2)の決壊洪水では, 背後のランモチェ氷河から落下して来た推定15万m³の氷なだれが湖を直撃し, 発生した波高5 mの大波がモレーンを決壊させたと推定されている(Vuichard and Zimmermann, 1987). 決壊によって500万m³の湖水が5時間にわたって溢れ出し, モレーンを88万m³削剥した. 最大流量が毎秒1600 m³と推定される洪水が, 平均斜度0.06の河道を毎秒4~5 mの速度で流れ下り, 300万ドルをかけたナムチェ水力発電所を流失させ, 橋梁14, 家屋30, 川沿いの多くの耕地, 生活道路を洗い流し, 家畜, 人命にも損害を与えるなど, 下流40 kmまでの河道に沿って大きな被害をもたらした(Vuichard and Zimmermann, 1986). 1981年にもスンコシ河を襲い, 中国とネパールの国境コダリに架かる友好橋を倒壊させ, ネパールの首都カトマンズからチベットの都ラサに向かうアルニコ・ハイウエーを各所で寸断し, スンコシ発電所に被害を与えた洪水があり, 後にザンザンボ氷河湖の決壊による洪水と判明した(Xu, 1988). 1900万m³の貯水量を持つ面積0.7 km²の氷河湖がモレーンダムの基部に開いた穴から1時間の間に溢れ出し, エンドモレーンに深さ35 m上部の幅230 m, 底部の幅40-60 mの決壊跡を残した. 最大流量毎秒15,920 m³もの奔流が平均斜度0.03の河道を平均速度毎秒9.8 mで流れ下り, 400万m³の土砂を移動させたと見積もられている. 突如遠雷の様な, あるいは無数のヘリコプターが飛来したようなゴーと言う音が聞こえたかと思うと, 20~30 mはあろうかという水の壁が押し寄せて来たと言う(村人談).

4. GLOFの特徴

氷河湖決壊洪水には, 普通の洪水と比べると, いくつかの特徴がある. 一つは, 短時間に溢れ出す一過性の洪水であるため, 洪水波形は鋭いピークを持つ. ある地点の水位を見ていると急激に上昇し, 急激に低下する. モレーンの岩屑を巻き込んで溢れ出た湖水は, 途中河岸を削り, 急峻な斜面から土石流を随所に発生させる. 河道沿いに森林破壊を伴いながら, 河道に大規模な削剥と堆砂

をもたらし、脆弱なヒマラヤの自然に鋭い破壊の爪痕を残す。GLOFは多量の土砂を含み、土石流の様相を呈しているため、時に土石が河道の狭隘部に数10 mの高さに堆積することがある。不安定なダムが一時的に河川を堰止め、それが再び決壊して二次的な洪水を引き起こすことも多い。土石を含む洪水なのでみかけ密度が大きく、破壊力も大きい。持続的な洪水でないため、流れ下るにつれて急激に減衰するとは言え、GLOFの規模にもよるが、発生源から数10 kmから時に200 km以上下流にまで被害が及ぶ。

ディグ・ツォー GLOF の例では、発生源から40 km下流までの間に300万 m^3 の土砂を移動させた。浮遊砂として流域から運びだされた量はその15%程度に過ぎず、大部分はこの間の河道の緩傾斜部に多量に堆積した(Vuichard and Zimmermann, 1986)。1964年に発生したアルン河上流のチベットにあるゲルパイプコ GLOF の例では、1 m^3 当り1.45トンもの密度を持つ土石流まがいの洪水であったと報告されている(Academia Sinica, 1979)。ザンザンボ GLOF では橋梁や水利施設の破壊跡から、洪水の破壊力は最大

1 m^2 当たり171トンにも達したとされる(Xu, 1988)。これらの洪水跡は今でも人工衛星画像上に明瞭に認めることができ、近年のGLOFであれば比較的容易に抽出可能なほどの痕跡を残している。

5. 頻発する GLOF

過去にネパールを襲った GLOF が人工衛星画像や航空写真による氷河湖決壊跡の判読、現地での聞き取り調査等から明らかにされた(Academia Sinica, 1979; WECS Interim Report, 1987; LIGG, WECS and NEA, 1988)。それらにその後発生した GLOF も加え、2000年1月現在までにネパールで知られている GLOF を表1に、その分布を図3にまとめた。最近では一昨年の1998年9月3日にクンブー地方ヒンク川源頭にあるサバイ・ツォー氷河湖(図2の矢印3)が決壊している(Dwivedi *et al.*, 1999)。表1からネパールで GLOF の発生が顕著になったのは1964年以降であり、その後は現在までに14件、3年に1度以上の高い頻度で発生していることが分かる。発生時期はモンスーン期である6月から9月に集中して

図3 表1に示した決壊した氷河湖の分布。矢印はザンザンボ氷河湖。

Distribution of the glacier lakes bursted in the past, which shown in Table 1. Arrow indicating Zhangzangbo glacier lake.

表 1 過去にネパールを襲った氷河湖決壊洪水

List of the glacier lake outburst floods happened in the past in Nepal.

No	Date	River basin	Name of lake	Cause of GLOF	Remarks and Damages
1	450 yrs ago	Seti Khola	Machhapuchhare	Ice-cored moraine collapse	Pokhara covered by 50-60 m thick debris
2	Aug. 1935	Sun Kosi	Taraco	moraine collapse due to seepage	66,700 m ² of wheat field, livestock, etc.
3	21 Sep. 1964	(Targyailing Gully) Arun	Gelhaipco	moraine collapse due to glacier sliding into the lake	dam breach 40 m deep and 23 million m ³ of water draining out. Bulk density of 1.45 t/m ³ . highway and 12 trucks etc.
4	1964	Sun Kosi	Zhangzangbo	moraine collapse due to Seepage	No remarkable damages
5	1964	Trisuli	Longda		
6	1968	(Zongboxan river) Arun	Ayaco	the lake bursting three times in 1968, 1969 and 1970	road, concrete bridge etc.
7	1969	Arun	Ayaco		
8	1970	Arun	Ayaco		
9	3 Sep. 1977	Dudh Kosi	Nare	ice-cored moraine collapse	mini-hydro plant, road, bridges, farm land
10	1980	Tamur	Punchan		one village destroyed; villager migrated after GLOF
11	11 July 1981	Sun Kosi	Zhangzangbo	moraine collapse due to glacier falling into the lake	dam breach 50 m deep and 40-60 m in width; max drainage being 16,000 m ³ ; 19 million m ³ of water drained out. Arniko Highway, friendship bridge, Sun Kosi hydropower station, farm land etc.
12	27 Aug. 1982	Arun	Jinco	moraine dam collapse due to glacier sliding into the lake	1600 heads of livestock, 187,000 m ² of farm land, houses of eight villages washed away
13	4 Aug. 1985	Dudh Kosi	Dig Tsho	moraine collapse due to glacier-ice avalanche	Namche hydropower station, 14 bridges, trails, cultivated land etc.
14	12 July 1991	Tama Kosi	Chubung	moraine dam collapse of Ripimo Shar glacier	houses, farm land etc.
15	May 1995	Kali Gandaki	?	Tsarang Chu upstream in Mustan	informed by a trecker
16	3 Sep. 1998	Hinkhu Khola	Sabai Tsho	moraine collapse due to glacier-ice avalanche	Two persons killed, property loss to be 3 million US\$

いる。図 3 から発生地域はネパール東部に偏っており、チベットにある氷河湖から発生した GLOF が 9 件もの多数を占めているのが注目される。

他のアジア高山地域の氷河に目を転ずると、カラコルムやパミール、天山山脈では氷河による堰止め湖の決壊洪水 (LD-GLOF) が顕著である。一方、ここで取り上げたネパール・ヒマラヤを含む大ヒマラヤ山脈やチベットのニエンチェンタンラ山脈では主にモレーン堰止め湖の決壊洪水 (MD-GLOF) が発生している (Hewitt, 1982; Ding and Liu, 1992)。氷河堰止め湖は氷河の前進によって形成されるのに対し、モレーン堰止め湖は氷河の衰退で形成される。地域による氷河活動の違いを反映して、決壊を起こす氷河湖の種類が異なるのであろう。カラコルムでは 1956 年以降に 30 件の LD-GLOF の発生があり、チベットでは MD-GLOF が 1935 年以来 19 回も発生していることが報告されている (Ding and Liu, 1992)。ブータンヒマラヤでも 1950 年以来少なくとも 4 回の MD-GLOF が発生している (Watanabe and Rothacher, 1996)。しかし、アジアの氷河地帯全域に亘って発生している GLOF の全貌は不明で

ある。

6. 急拡大する氷河湖

氷河湖の発達過程の一例として人工衛星画像や調査隊・登山隊によって撮影された写真、既刊の地図から復元されたツォー・ロールパ氷河湖の発達過程を図 4 に示す。

ツォー・ロールパ氷河湖は東ネパール、ロールワリン川源頭にあるトラカルディン氷河の氷舌上に形成された氷河湖である。ネパールヒマラヤで最大の規模を持ち、現在最も危険と見なされている。そのため 1998 年には氷河湖の決壊を感知し、カトマンズにある科学技術省水文気象局と下流域の村落に警報を発する早期警報システムが設置された。翌 1999 年 5 月からは下流で建設途上にある水力発電所を守るため、湖水位を 3 m 低下させ、決壊の危険を低減させる工事が 2000 年のモンスーン期前 (6 月上旬頃) の完成を目指して実施されている。

1958 年当時、面積が 0.23 km² であった大きな池が 1994 年には長さ 3.2 km、幅 500 m、面積 1.39 km²、最大水深 131 m、平均水深 55 m にまで

図4 ツォー・ロールパ氷河湖の拡大過程 (Mool *et al.* 1993 を改編)
Expansion processes of the Tsho Rolpa.

拡大した(表2参照)。その後も1999年までにトラカルディン氷河側に数100 m 拡大し、現在も拡大を続けている。面積の拡大傾向を外挿すると、氷河湖は1952年頃から拡大を始めたと推定される(Yamada, 1998)ので、ネパールヒマラヤ最大の氷河湖でさえその年齢は1994年時点で42歳程度なのである。

一般にモレーン堰止め湖の拡大は、深さ方向には湖底の氷河水の融解で、長さ方向には湖に接する氷河末端の氷崖のカービングで起こっている。他に可能性としては湖底の氷が浮力でカービングすることによる拡大も考えられる(Kirkbride, 1993)が、ネパールの氷河湖では観察されていない。カービングとは氷河の消耗過程の一つで、水に接した氷河から氷塊が分離する現象である。夏期には氷崖のカービングが活発で、小さな氷山が氷崖付近に漂っているのを見ることができる。冬期には不活発でほとんど起こらない。

ツォー・ロールパ氷河湖のおおよその平均拡大速度を概算すると、深さ方向には年間1.3 m

(55 m/42年)以上、長さ方向には年間76 m (3.2 km/42年)以上となる。この様に、氷河湖が形成されると、氷河の後退速度が大きく加速されるのである。

湖底の氷河水の融解は実際には湖底全体で一様には起こってはいない。拡大過程の図4とツォー・ロールパ氷河湖の湖盆図(図5c; Kadota, 1994)を重ね合わせて1994年の最深点(131 m)がいつ湖に取り込まれたかを見ると、1970年台初期の頃と推定される。その後わずか20数年で131 mも融解したことになり、湖底の氷の平均融解速度は年間5~6 mにも達している。一方1958年当時の大池部分の水深は20~80 m程度に過ぎず湖底氷の融解は驚くべき不均一を示している。氷河湖は岩屑に覆われた氷舌部分が融解しのできたのだから当然湖底氷は岩屑に覆われているであろう。岩屑の厚さと濁った湖水からの懸濁粒子の堆積量は湖の下流ほど厚く上流ほど薄く、従って下流ほど融解速度は小さく上流ほど大きいであろう。しかし、上述の不均一はそれだけでは恐らく説明が付かず、湖が氷崖のカービングで拡大する過程で、岩屑に覆われないで湖水が直接氷に接する状態がある期間継続し、その間に急速に湖底氷が融解するというプロセスが存在する可能性がある。いずれにせよ融解速度に極端な差があれば、昔から湖であった下流部よりも最近湖に取り込まれた上流部の方が深くなることはあり得ることになる。危険として調査された氷河湖の湖盆図(図5)を見るといずれも氷河末端付近が最も深いことを示している。

ツォー・ロールパ氷河湖の拡大成長過程から、一般にモレーン堰止め湖の発達過程は図6の様に模式化できる。当初氷河上に形成されていた多くの池(図6a)がお互いに繋がりあい、拡大を開始する。初期の氷河湖は図6bの様に、周りが氷体に囲まれている。これが成長拡大するに伴って鉛直方向には徐々に氷河の底面まで解け去って湖は深くなり、横方向にはサイドモレーン部分にまで拡大して湖は氷を介せず直接サイドモレーンに接するようになる図6c。図6dにまで拡大した氷河湖は氷河から切り離され、最大の大きさに達し、もはやこれ以上拡大することはない。航空機による観測の結果、ヒマヤラには図6に示した全ての

図5 ネパールで危険と見なされているモレーン堰止め湖の湖盆図
Bathymetric maps of the potentially dangerous moraine-dammed glacier lake in Nepal.

発達過程にある氷河湖の存在が確認された。氷河湖の発達のある段階までは、氷河湖は化石氷体を内部に含むモレーンで堰止められ、それが融け去った後は岩屑のみで出来たモレーンで堰止められる。湖を堰止めているモレーンには氷河湖の発達過程に応じて化石氷体を含むモレーンと、氷体を含まないモレーンの2種類があり、前者は比較的丈夫だが後者になると強度は低下し、決壊の危険は大きくなる。

ツォー・ロールパ氷河湖についてみると、湖は直接モレーンに接しているが、エンドモレーンの一部には電気探査により化石氷体の存在が確認された(Kita, 1995)。最大深度部分に氷河が融け残っているかどうかは確認されていないが、発達段階としては図6の(c)と(d)の間にあると見なせる。トラカルディン氷河の厚さを150 m程度と仮定すると、氷河底の基盤傾斜が氷河の表面傾斜と同じで現在の拡大速度が維持された場合、この氷河湖は2020年を待たずに現在の位置より2 km上流まで拡大して最大に達し、氷河から切り離さ

図6 モレーン堰止め湖の発達過程の模式図
Conceptual illustration of the development of a moraine-dammed glacier lake.

れるであろう。

ツォー・ロールパ氷河湖の他にも、危険と判断され現地調査が実施されたモレーン堰止め湖にはロワー・バルン氷河湖(Kadota and Mool, 1993)とイムジャ氷河湖(Yamada, 1992; Yamada and Sharma, 1992)、ツラギ氷河湖(Mool *et al.*, 1995)がある。これら4つの氷河湖の湖盆図をそれぞれ図5 a, b, c, dに、その概要を表2に示す。先に述べたようにいずれの氷河湖も氷河末端付近に最深部がある。大ヒマラヤ山脈南面の標高4000 mを越える高地にあり、面積は0.6~1.4 km²、最大水深80~130 m、平均水深42~55 mにも及び、2800万m³から7700万m³もの貯水量を誇っている。ちなみに黒部溪谷にある有名な黒部ダムの貯水量は1億5000万m³である。いかに多量の水を不安定なモレーン・ダムが支えているかが分かってう。ツォー・ロールパ氷河湖と同様の手法で追跡されたこれら氷河湖の拡大過程から、ロワーバルン氷河湖とイムジャ氷河湖、ツラギ氷河湖の年齢は、それぞれの調査年度現在で30歳、30歳、35歳と見積もられた。これをもとにツォー・ロールパと同様に平均拡大速度を求めると、深さ方向には1.2~1.6 m/年であり、湖によって大きな差はない。

表 2 図 6 に示した氷河湖の概要

Outline of the potentially dangerous glacier lakes in Nepal, shown in Fig. 6.

Name of the lake	Lower Barun	Imja	Tsho Rolpa	Thulagi
Location	27° 48' N 87° 07' E	27° 59' N 86° 56' E	27° 50' N 86° 28' E	28° 30' N 84° 30' E
Altitude (m a.s.l.)	4570	5000	4580	4146
Depth (m) Average	47	47.0	55.1	41.8
Maximum	109	99	131	81
Length (km)	1.1	1.3	3.2	2.0
width (km)	0.6	0.5	0.58	0.45
Area (km ²)	0.6	0.60	1.39	0.76
Stored water (million m ³)	28	28.0	76.6	31.8
Drainage area (km ²)	-	37.7	77.6	55.4
Approx. Age	30	30	42	35
Data obtained in	Mar., '93	April, '92	Feb. '93 - Jun. '94	Mar. '95
(Shown in Figure 6	-a	-b	-c	-d)

一方長さ方向では 40 ~ 70 m/年で湖による差は比較的大きい。カービングが活発に起こるようになった時期やその後の活発さが湖によって異なると考えられる。氷河湖の形成と発達のごく近年に始まり、わずか数十年の間に巨大な湖が出現したのである。これらの湖は、ツォー・ロールパ氷河湖と同様に、既にサイドモレーンまで拡大し、直接接している。しかし、モレーンの表面構造の観察から、エンドモレーンには未だ化石氷体を含み、その融解によってモレーンのレベルは低下しつつある。Imja 氷河湖での観測によると (Watanabe *et al.*, 1995) モレーンレベルの低下速度は場所によっては 5 年間に 20 m/年にも達すると言う。これら氷河湖の発達段階は図 6 の (b) と (c) の中間にあると見なされ、図 6 d に向かって、より深く、より広く、現在でも時々刻々と拡大を続けているのである。

7. 今後の課題

ネパール・ヒマラヤには表面が岩屑に覆われ、氷河拡大期の末端が未だモレーンに接している氷河は沢山あるにもかかわらず、氷河湖が形成されているのはそのごく一部に過ぎない。同じ気候条件下にあり、形態も似ている隣り合った氷河でも一方には氷河湖が形成され、他方にはない (例えばイムジャ氷河とローツェ氷河)。なぜ一部の氷河にだけ氷河湖が形成されているのであろうか？

夏のモンスーン期には上流の集水域から膨大な

融解水と降水が氷河に供給される。氷河にはこれを排水するシステムが氷河底と氷河内部、氷河上に張り巡らされている。モレーンのレベルが氷河の表面レベルより低いうちは、排水は順調になされるだろう。氷河が融解して氷厚を減じモレーンより低くなると、モレーンは排水の障害物となって立ちはだかる。モレーンの崩落や流水による浸食、氷河の前進によるモレーンの破壊などでモレーンの上端レベルが低い氷河や、モレーン内部に排水に十分な空隙や裂け目がある氷河では、氷河湖が形成されないか、形成時期が遅れるであろう。融解が進んで氷河の方がモレーンより低くなり、モレーンが排水の障害物となることによって氷河湖の形成が始まるのであろう。

一方、なぜネパールヒマラヤで 40 ~ 50 年前から氷河湖の形成が始まったのであろうか？ 近年の氷河湖の出現は地球温暖化の影響か、それとも氷河の縮退過程で、上述の作業仮説の様に、たまたま 40 ~ 50 年前からモレーンが排水の障害物となったことで発達を始めたのであろうか？ 岩屑に覆われた氷河上に点在する池が氷河湖へと拡大を開始する条件は何かと言い換えてもよからう。氷河湖の出現にはモレーンの形態や氷河の排水システムが本質的に重要と考えられ、今後の調査が待たれる。

一旦拡大を開始すると氷河湖上流側の氷河末端には氷崖が形成され、氷崖のカービングが湖の拡大に重要な役割を演じている。氷崖の形成機構や

崩落機構, 湖底の水河水の融解機構もまだよく分かっておらず, これらの解明が今後の課題として残されている。

また, GLOF 発生後現地調査がなされたのはナレ GLOF とディグ・ツォー GLOF, ゴンゴンボ GLOF, サバイ・ツォー GLOF だけで, GLOF の実態についても未だ不明の点が多く, 今後も発生直後の GLOF を数多く現地調査する必要がある。

文 献

- Academia Sinica, 1979: The comprehensive expedition of Academia Sinica in the Qing-Zang Plateau, the causes of outburst of glacial lakes in Xinzang, 1973. 4-8.
- Ding Y. and Liu J., 1992: Glacier lake outburst flood disasters in China. *Annals of Glaciology*, **16**, 180-184.
- Dwivedi, S. K., Acharya, M. D. and Joshi, S. P., 1999: Preliminary report on the Tama Pokhari GLOF of 3rd September 1998. *WECS Bulletin*, **10**(1), 11-13.
- Fujita, K., Nakawo, M., Fujii, Y. and Paudel, P., 1997: Changes in glaciers in Hidden Valley, Mukut Himal, Nepal Himalayas, from 1974 to 1994. *Journal of Glaciology*, **43**(145), 583-588.
- Fushimi, H., Ikegami, K., Higuchi, K. and Shankar, K., 1985: Nepal case study: catastrophic floods. *IAHS*, **149**, 125-130.
- Hewitt, K., 1982: Natural dams and outburst floods of the Karakoram Himalaya. *IAHS*, **138**, 259-269.
- Higuchi, K. and seven others, 1978: Preliminary report on glacier inventory in the Dudh Kosi region. *Seppyo*, **40** (Special Issue), 78-83.
- Ives, J. D., 1986: Glacier lake outburst floods and risk engineering in the Himalaya. *ICIMOD Occasional Paper*, **5**, pp 41.
- Kadota, T. and Mool, K. P., 1993: Preliminary report on the first field investigation on the Lower Barun glacier lake. *WECS Report*, No. 3/4/080893/1/1, Seq. No. 428.
- Kadota, T., 1994: Report for the field investigation on the Tsho Rolpa glacier lake, Rolwaling Valley, February 1993 - June 1994. *WECS N551*. 489 KAD.
- Kadota, T., Fujita, K., Seko, K., Kayastha, R. B. and Ageta, Y., 1997: Monitoring and prediction of shrinkage of a small glacier in the Nepal Himalaya. *Annals of Glaciology*, **24**, 90-94.
- Kirkbride, M. P., 1993: The temporal significance of transitions from melting to calving termini at glaciers in the central Southern Alps of New Zealand. *The Holocene*, **3**, 232-240.
- Kita, H., 1995: Electric resistivity exploration at Tsho Rolpa end moraine. *WECS N551*. 489 OYO.
- LIGG, WECS and NEA, 1988: Report on first expedition to glaciers and glacier lakes in the Pumqu (Arun) and Poiqu (Bhote-Sun Koshi) river basins, Xizang (Tibet), China. Science Press, Beijing, Chin, 192pp.
- Miyahara, T., 1982: Himaraya no hi (in Japanese). Bungeisyunju, Tokyo, 261 pp.
- Mool, K. P., Kadota, T., Maskey, P. R., Pokharel, S. and Joshi, S. P., 1993: Interim report on the field investigation on the Tsho Rolpa glacier lake, Rolwaling Valley. *WECS Report*, No. 3/4/021193/1/1 Seq. No. 436.
- Mool, K. P., Maskey, P. R. and Joshi, S. P., 1995: Preliminary report on the Thulagi glacier lake, Dhana Kholu Marsyangdi Basin. *WECS Report*, No. 2/3/170795/1/ Seq. No. 473.
- Nakawo, M., Fujita, K., Ageta, Y., Shankar, K., Pokhrel, A. P. and Yao T., 1997: Basic studies for assessing the global warming on the Himarayan cryosphere, 1994-1996. *Bulletin of Glacier Research*, **15**, 53-58.
- Vuichard, D. and Zimmermann, M., 1986: The Langmoche flash-flood, Khumbu Himal, Nepal. *Mountain Research and Development*, **6**, 90-93.
- Vuichard, D. and Zimmermann, M., 1987: The 1985 catastrophic drainage of a moraine-dammed lake Khumbu Himal, Nepal: cause and consequences. *Mountain Research and Development*, **7**, 91-110.
- Watanabe, T., Kameyama, S. and Sato, T., 1995: Imja glacier dead-ice melt rates and changes in a supra glacial lake, 1989-1994, Khumbu Himal, Nepal: danger of lake drainage. *Mountain Research and Development*, **15**, 293-300.
- Watanabe, T. and Rothacher, D., 1996: The 1994 Lugga Tsho glacial lake outburst flood, Bhutan Himalaya. *Mountain Chronicles*, *Mountain Research and Development*, **16**, 77-81.
- WECS Interim Report, 1987: Preliminary study of glacier lake outburst floods in the Nepal Himalaya; Phase 1 Interim Report. 4/1/200587/1/1 Seq. 252.
- Xu, D., 1988: Characteristics of debris flow caused by outburst of glacier lake in Boqu river in Xizang, China 1981. *Geojournal*, **17**, 569-580.
- Yamada, T., 1991: Preliminary work report on glacier lake outburst flood in the Nepal Himalayas. *WECS Report*, No. 4/1/291191/1/1 Seq. No. 387.
- Yamada, T. and seven others, 1992: Fluctuation of the glaciers from 1970s to 1989 in the khumbu, Shorong and Langtang regions, Nepal Himalayas. *Bulletin of Glacier Research*, **10**, 11-19.
- Yamada, T., 1992: Report for the first research expedition to Imja glacier lake. *WECS Report*, No. 3/4/120892/1/1, Seq. No. 412.
- Yamada, T. and Sharma, C. K., 1992: Glacier lakes and outburst floods in the Nepal Himalaya. *IAHS*, **218**, 319-330.
- Yamada, T., 1998: Glacier lake and its outburst flood in the Nepal Himalaya. Data Center for Glacier Research, Japanese Society of Snow and ice. Monograph No. 1. pp 96.
- 山田知充, 1992 a : 雪水分野からの開発途上国支援. 雪氷, **54**, 291-295.

山田知充, 1992b: ネパールヒマラヤの氷河湖決壊洪水. 河川, **553**, 126-137.

山田知充, 1996: ネパール滞在記. 雪氷, **58**, 258-259.

山田知充, 1997: 私の任国体験. EXPERT, **110**, 10-13.

DHM: Department of Hydrology and Meteorology

LIGG: Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology

WECS: Water and Energy Commission Secretariat

Glacier lake outburst floods in Nepal

Tomomi YAMADA¹⁾

1) *The Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University
Kita-19 Nishi-8, Kita-ku, Sapporo 060-0189*

Abstract: Due to the global warming, the kingdom of Nepal has suffered serious flood caused by outburst of a glacier lake (Glacier Lake Outburst Flood; GLOF in short). It happened at least 14 times since 1960 s, which corresponds to the frequency more than once every 3 years. The glacier lakes are formed on the glacier tongue of a debris-covered glacier and dammed up by a moraine. The moraine is fresh glacial deposits formed in the Little Ice Age and thus quite unstable. It tends to collapse easily. Lake-water of millions to several tens million m³ in volume is quickly drained out within several hours. The flood is characterized by an extremely sharp flood wave. GLOF destroys infrastructure and socio-economical bases of the village life, and incurs losses of human lives and valuable livestock along the river. In addition, fragile Himalayan nature also suffered serious damages by means of slope failures and forest destruction due to cutting the banks, and deposition of huge amount of debris on the riverbed. Because of huge amount of debris in the flood, it is characterized as a water-rich debris flow and thus its impact is remarkably strong comparing with an ordinary flood. Glacier lakes in Nepal were born in 1950 to 1960 and they have quickly expanded to the huge lakes such as 1-3 km in length, 500 m in width, 80-130 m in the maximum depth and 30-80 million m³ of stored water at present. They are still expanding, so that sustaining very high GLOF potential. This paper describes the characteristics of glacier on which the lake is developed, the distribution of a glacier lake, its rapid expansion processes and general features of GLOF. The problems to be solved are indicated for a future study of a glacier lake and GLOF.

(2000 年 2 月 17 日受付)