



Title	ネパールヒマラヤの氷河湖欠壊災害について : Tsho Rolpa氷河湖の調査例
Author(s)	藤原, 滉一郎; FUJIWARA, Koichiro; 五味, 高志 他
Citation	北海道大学農学部 演習林研究報告, 52(2), 208-245
Issue Date	1995-08
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/21392">https://hdl.handle.net/2115/21392</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	52(2)_P208-245.pdf



# ネパールヒマラヤの氷河湖欠壊災害について

—Tsho Rolpa 氷河湖の調査例—

藤原 滉一郎\* 五味 高志\*\*

The Hazards due to Glacier Lake Outburst Flood  
in Himalaya, NEPAL: Study of the Tsho Rolpa Glacier Lake

by

Koichiro FUJIWARA\* and Takashi GOMI\*\*

## 要 旨

ネパール・チベットなど高山氷河の発達している地域では、一部の氷河の末端に氷河湖が形成されている。規模の大きなものは $10^6 \sim 10^8 \text{m}^3$ の水をたたえ、モレーンなどの安定度の小さいダムで堰止められている。このような氷河湖の欠壊は、下流の集落や道路などに被害を与えるのみではなく、数十 km 下流の水力発電施設等にも被害を与える。しかし、氷河湖の研究を含めて、氷河湖欠壊の研究は着手されたばかりで、事例調査の集積も必要な段階でもある。

筆者らは、ネパールのロールワリング・ヒマールにある Tsho Rolpa (ツオーロールパ) 氷河湖を対象とする、1994年のポストモンスーン期の調査に参加した。Tsho Rolpa 氷河湖は、標高 4500m に位置し約  $70 \times 10^6 \text{m}^3$  の貯水量があり、ダム堤体は高さ約 150m のエンドモレーンである。モレーン内部には化石氷塊があるが、モレーン下流斜面の勾配は 30度の急勾配で、湖水からの浸透水と推測される漏水箇所も確認され、欠壊の危険度の高い氷河湖である。1991年に小規模な欠壊があった隣接の Ripimo Shar 氷河湖の流下痕跡を調査し、これから Tsho Rolpa 氷河湖が小規模に欠壊した場合の洪水流・土石流を想定すると、4 km 下流の集落と 10km 下流の集落に被害が及ぶことが明らかになった。大規模に欠壊した場合は、土砂や洪水波は 100km 下流の産業の中心地である中央山地帯 (ミッドランド) にも達する可能性が高い。氷河湖の発達に関する基礎的研究の推進と災害軽減策を樹てるための総合的調査の実施の必要性を述べた。

キーワード：ヒマラヤ、氷河湖、氷河湖欠壊災害、土砂移動

---

1995年3月31日受理 Received March 31, 1995

\*北海道大学農学部附属演習林

The University Forests, Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo 060, Japan

(現在) 山形大学農学部生物環境学科森林資源学講座

〒997 山形県鶴岡市若葉町1-23

Present address; Section of Forest Resources, Faculty of Agriculture, Yamagata University 1-23,

Wakaba-machi, Tsuruoka-shi, Yamagata 997, Japan

\*\*北海道大学大学院農学部林学科砂防学講座

Laboratory of Erosion Control, Department of Forestry, Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo 060, Japan

## 目 次

はじめに .....	209
1. ネパールの概況 .....	210
(1) 概 況 .....	210
(2) 自然災害の実態 .....	212
2. 氷河湖欠壊に関する研究の現状 .....	214
3. Rolwaling 川 .....	217
(1) 流域の概況 .....	217
(2) Ripimo Shar 氷河湖の欠壊に伴う土砂移動の実態 .....	220
4. Tsho Rolpa 氷河湖の概況 .....	225
(1) 氷河湖の発達と現況 .....	225
(2) モレーンの構造 .....	229
(3) GLOF 発生の可能性 .....	233
(4) GLOF による災害予測 .....	234
5. 氷河湖欠壊の防災対策 .....	238
おわりに .....	239
文 献 .....	239

## はじめに

氷河湖 (glacier lake) の欠壊 (グロフ, GLOF: Glacier Lake Outburst Flood) による災害は、ヒマラヤ山系をかかえる中国 (チベット)・ネパール・ブータンやアンデス山系の国々で報告されている。しかし、それらの体系的な研究は始まったばかりである。筆者らは、1994年10~11月に、国際協力事業団 (JICA) の短期派遣専門家として、ネパールのロールワリング・ヒマール (Rolwaling Himal) の氷河湖と1991年に欠壊した氷河湖を調査する機会を得た。ここでは、氷河湖の形状や湖が欠壊した場合の洪水・土石流について調査したことを報告する。内容は極めて粗いが、氷河湖の存在と、下流の土地利用などを含めて現状を記載し、今後のこの種の調査研究や国際協力の一助となることを目的とした。

ネパール国内の自然災害の実態は現地踏査と文献 (Sherestha, 1989 や Sharma, 1988) で行った。GLOF に関する既存の報告 (Feng, 1991 や Liboutry et al., 1977 など) から、氷河湖の実態や GLOF の実態を把握した。GLOF の発生に伴う土砂移動や洪水流に関しては、現地で土砂の生産量と堆積・流下形態を把握し、土砂移動の影響を検討した。ネパール国内で最も危険とされている Tsho Rolpa 氷河湖を対象に、形状や構造を測量・電気探査などで調査した。なお、本報告で用いた Rolwaling 流域の地名は、1981年発行の Schneider E. の地形図から転用

した。

調査隊の構成は、JICA 長期派遣専門家山田知充博士（北海道大学低温科学研究所・雪害科学部門）をリーダーとし、ネパール政府のカウンターパートである水エネルギー委員会（WECS: Water and Energy Commission Secretariat）の R.R.Maskey 氏と S.Joshi 氏、JICA 短期派遣専門家の北高穂氏（応用地質株式会社・電気探査担当）、アシスタントの福山亮氏（北海道大学院地球環境科学研究科修士課程・雪氷物理学部門）と筆者らである。本報告には、この調査隊の得たデータを使用した。Tsho Rolpa 氷河湖の構造・地形・気象のデータ等は山田博士・P.K.Mool 氏（WECS）・門田勲氏（名古屋大学大気水圏科学研究所、1992～1994年 JICA 長期派遣専門家）・坂井亜規子氏（北海道大学院地球環境科学研究科修士課程・雪害科学部門）から教示を受けた。また、WECS 責任者の Dr.R.Bhatte、山田博士、JICA ネパール事務所の関係者には、調査中は勿論、ネパール滞在中には全面的な協力のご指導を受けた。

以上の方々に、深く謝意を表す。

## 1. ネパールの概況

### (1) 概 況

ネパールは東経80°～88°・北緯26°～30°に位置し、面積14万 km<sup>2</sup>、人口1500万人である。南北200kmの幅の中で、標高86mのテライ平原から8848mのエベレストを主峰するヒマラヤへ変化しており、その地形変化に伴って亜熱帯から高山氷雪地帯へと多様な自然環境がみられる。ネパールは近年まで自給経済政策をとっており、インドとチベットとの交易と農業を主とする産業で支えられてきた。最近になり、急速に近代化の政策がおし進められている。しかし、国内産業は農業と観光に依存しており、輸出産業も少ないことから、政府の外貨収入は、トレッキング・登山などの許可料が主位を占める。このような状況で、ヒマラヤ山系の豊富な流水を活用する多くの発電プロジェクトが進められている。これらは、産業や生活のエネルギー対策とともに、周辺諸国へのエネルギー輸出としても計画されている。さらに、日本をはじめとする国際援助の対象にもなっている。このプロジェクトの課題の1つとして、GLOFによる洪水や土石流対策があげられている。

ネパールは、インドプレートとユーラシアプレートの衝突による地殻変動により山地と溪谷が発達し、その地形区分は東西に平行に区切られる。南からテライ平原・シワリク山地・中央山地（ミッドランド）・高山地（サブヒマラヤ）・ハイヒマラヤに区分されている（図-1）。ヒマラヤ山系を源とした、3大河川であるカルナリ・ガンダク・コシが、ガンジスに至り広大な氾らん原を形成している。森林は、ネパール南部と中部に帯状に分布しており（図-2）、国土の約40%が森林に覆われている（Sherestha,1989）。しかし、近年の農地拡大や過放牧・燃料材の利用で森林は急速に減少している。

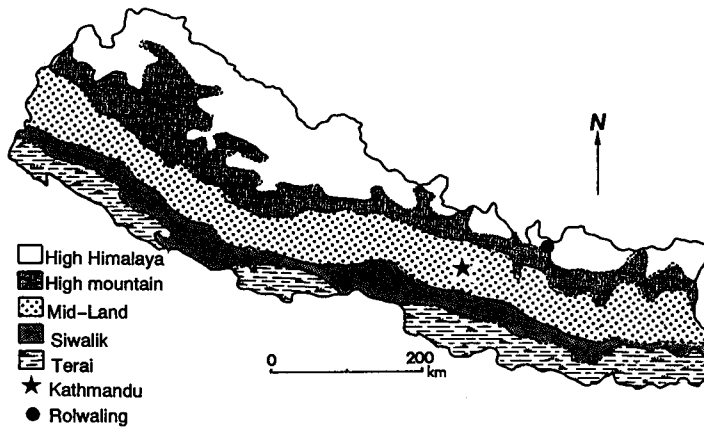


Fig. 1 Physiographic map of NEPAL.

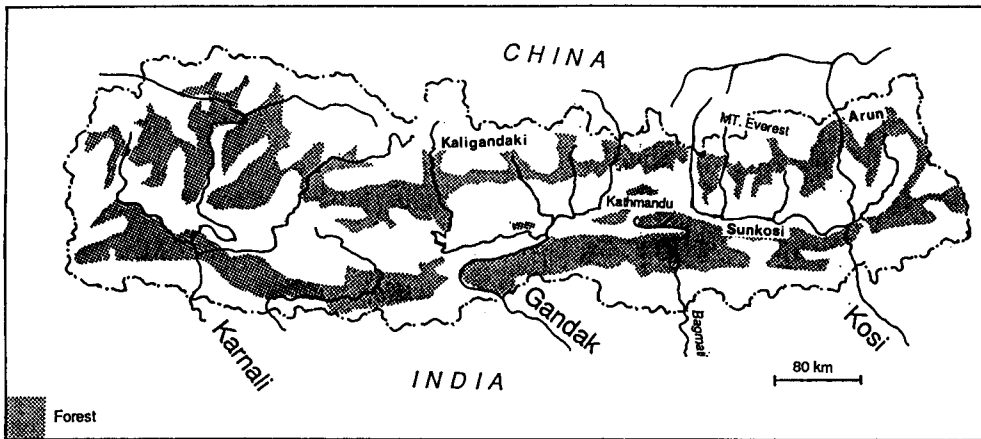


Fig. 2 Map of the forest cover.  
After Sherestha B.M. (1988)

南に位置するテライ平原はガンジス川の氾らん原の一部である。亜熱帯気候に属し、*Acacia* sp.・*Dalbergia* sp.・*Shorea* sp.などの亜熱帯の植生がみられる。シワリク山地から流入する河川は、大規模な扇状地を形成し、砂・シルト・礫の堆積深は5000mに達している。これらの地域の河川は乾期には涸れ、雨期のみ水流がみられ、集中豪雨によって洪水も発生している。テライ平原は、かつて低湿な密林地帯であり、インド勢力の侵入を防いでいたが、近年は開拓が進み、ネパールの総人口の50%が住み、ネパール全土の約70%の穀物を生産し、米などの農業地帯として発展している。一方、燃料材需要の増加やインドへの輸出によって、急激な森林の減少がみられる。

シワリク山地は標高1000~1500mの丘陵性の山地である。丘陵は乾燥しており、それらの場所は、固結度の低い泥岩や砂岩によって構成されているため、無数の谷が発達している。テ

ライ平原へ流れる河川の大部分はこの山地を源としている。丘陵地には、*Pinus sp.*・*Castanopsis sp.*などの亜熱帯植生や暖帯の樹木が生育している。

中央山地（ミッドランド）は海拔1500～2000mの地域で、標高1000mのポカラ・カトマンズなどの盆地を含み、ネパールの政治や文化の中心地として古くから栄えてきた。風化し易い泥岩・砂岩や地殻変動を受けたもろい岩石によって構成されている。雨期と乾期が明瞭に分かれ、雨期には集中豪雨がみられる。カトマンズなどの盆地は、かつて湖であったため、シルトや砂・礫が厚く堆積している。山麓や山地には *Quercus sp.*・*Pinus sp.*などの森林が分布しているが、多くの斜面は段々畑が造られイネやヒエが栽培され、残りの斜面では放牧が行われている。近年は、人口増加にともなう過度の農地開発や過放牧・燃料材採集によって裸地化が進んでいる。集落は河岸の低地には少なく、山腹の地すべり地や稜線部の比較的緩斜面に発達している。

高山地帯は標高2000～4000mに位置し、ヒマラヤの前縁部で、氷期の氷食作用を受けた地形が存在する。また、地殻変動による隆起と河川の侵食作用によって深い谷と急峻な谷壁斜面が発達している。気候帯は温帯から亜寒帯に属し、*Pinus sp.*・*Abies sp.*・*Tsuga sp.*などの針葉樹と多様な広葉樹が生育している。

標高4000m以上の地域をハイヒマラヤと呼び、急峻な山々は雪や氷に覆われ、氷河が発達している。氷食作用を強く受けた溪谷には、山岳民族が農業や牧畜を営んでいる。寒冷な気候のため、矮少化した *Juniperus sp.* *Ericaceae*, 草本類がみられる。土壌の発達も悪い。

## (2) 自然災害の実態

多様な地形・地質・気候条件を備えているネパールでは、さまざまなタイプの自然災害が発生している（表-1）。1984年度の記録では、1年間の洪水・地すべり災害で約400人が死亡し、

Table. 1 Types of natural hazards

Types of hazards	Most common region of Nepal	Frequency of occurrence
Earthquake	All over the country and particularly in western Nepal	Destructive type once in a 50 years
Rainfall	West to east Nepal	Annually
Landslide Rockslide Soil creep	Midland and Higher montain	Annually
Soil erosion	Midland and Terai	Annually
Flood Debris flow	Mountain and Terai	Annually
Glaicer lake outburst flood	Central and eastern High Himalaya	Once in a 3 years

After Sharma C.K.(1988)

5000戸が倒壊している。近年は、森林の減少や土地利用の拡大 (Bhatta, 1994) による、災害規模の拡大が指摘されている (Sharma, 1988)。

### a. 地震

プレートの衝突で、主境界断層 (MBT) と主中央衝上断層 (MCT) の大規模な構造線が東西に走っている。MBT は中央高地とシワリク山地の境界部に位置しており、MCT は中央山地の北部に位置している。震源は、MCT の南側とネパール西部に集中的に分布している。1934年の地震では、カトマンズを中心に3400人が死亡しネパール史上最悪の地震災害であった。しかし、地震によって発生した地すべりや崩壊などの記録は確認することができなかった。

### b. 降雨

モンスーン期には集中的な降雨がみられる。ネパール国内の年平均降水量は、図-3に示したように、200~4000mm と差が大きい、全国平均は1700mm とされている。とくに東西はカリガンダキ川とコシ川の間、南北はカトマンズの北からハイヒマラヤまで地域において、短時間でまとまった降雨が発生する。これらの集中豪雨によって、地すべりや土石流などの災害の発生が報告されている (岡本ほか, 1993)。

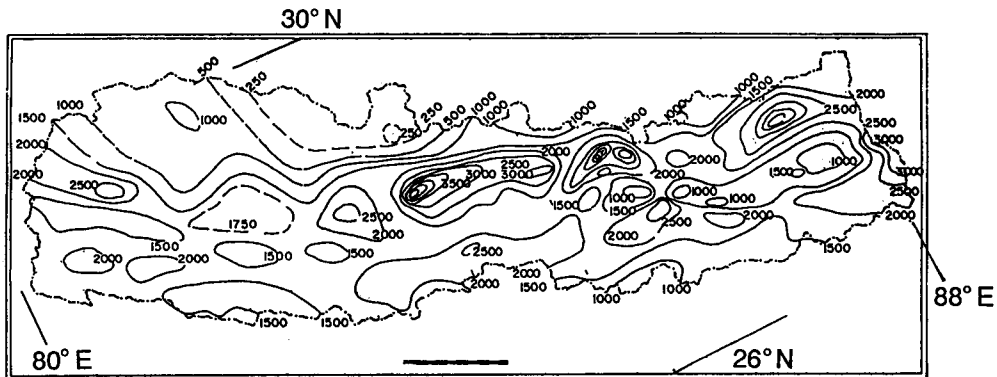


Fig. 3 Mean annual precipitation 1971-1985(mm).  
After Sherestha B.M.(1989)

### c. 表土侵食

表土の侵食はおもにモンスーン期に起こり、ネパール全域で生じている。特に近年は、人口増加による土地改変や森林の減少と関連して表土侵食量が増加し、ベンガル湾デルタ地帯のムール島の拡大がヒマラヤなどの上流域における侵食土砂流出量の増加と関連するともいわれている。土壌侵食の問題は、人口増加や農業・畜産業による土地利用が拡大してきた1960年代に入って顕著になり、ネパール全国で年間0.2~0.5mmの表土が減少しているとされ、裸地における表土侵食量は森林地帯の20~60倍との報告もある (Sharma, 1988)。また、河床の土砂堆

積量の増加は、低水時の流量の減少と洪水時の流出量の増加をまねき、災害問題や土地利用問題をより深刻にしている。

#### d. 斜面災害

急峻なヒマラヤ山系の山腹斜面には地すべりや斜面崩壊の発生跡がみられるが、発生頻度や規模は大きくなく、人的被害も少ない。一方、中央山地では MCT の地殻変動による脆弱な地質のため、活発に地すべりや斜面崩壊が発生しており、地すべり土砂が流路をせき止めた記録も残っている。中央山地はネパール文化の中心地であり、生産活動のための開発が進行している。これらの開発による大規模な洪水や地すべり災害の増加が指摘されており、1993年7月の降雨では約1500人が死亡している(岡本ほか, 1995)。シワリク山地は侵食抵抗性の弱い地層からなっているため、斜面崩壊が多発し山地溪流は多量の土砂で埋積していて、出水時にテライ平原へ流出する。

#### e. 洪水災害と土石流災害

山地域では谷が深く低地の集落が少ないため、洪水被害はみられないが、大量の渓床堆積土砂や斜面崩壊土砂が土石流となって流下する可能性が大きい。また、中央山地周辺は0次谷崩壊が直接土石流化しているなど、地域の地質条件によって発生する土砂移動形態が異なっている(岡本, 1993)。洪水災害が最も顕著にあらわれるのは、テライ平原である。シワリク山地から流出する土砂と洪水流によって、扇状地では、流路変動や洪水氾濫が頻繁に発生している。とくにコシ川は200年で流路が115kmも西に移動した(檜垣ほか, 1992)。

#### f. 氷河湖欠壊災害

氷河湖欠壊災害は高山地域のみではなく、洪水は下流の広い範囲にわたって橋の流出や発電所の破壊を引き起こす。また、渓岸侵食による斜面崩壊や地すべりの発生といった二次災害の可能性もある。

ネパールでは、新たな土地利用が進んだ結果、表土侵食や地すべり・洪水などの災害が頻繁に発生し、災害問題としては大きな位置を占めていた。しかし、氷河湖欠壊による災害の発生は突発的で、下流の広い範囲にわたって影響をおよぼす。このため近年ネパール政府は電力開発との関連でも大きな関心をよせている。

## 2. 氷河湖欠壊に関する研究の現状

近年、ヒマラヤ山系のネパール・チベットとアンデス山系のペルーでの氷河湖欠壊(GLOF)に関する総括的な報告が相次いで行われた。ネパールでは、Yamada(1993)が氷河湖の発生から GLOF 災害対策までを論じている。ネパールにおける GLOF の発生は、表-2に示したように14件が確認されており、そのうち12件が1960年以降に発生している。ネパール政府の氷河湖対策や研究は1980年代から WECS を中心にはじめられ、1987年には Arun 川と Sun-Kosi 川上

流の氷河と氷河湖において、中国とネパールの共同調査が行われた。日本のODAは、WECSをカウンターパートとして氷河湖の形態・構造・形成過程などに関する基礎的な調査を1990年から始めた。現在では、氷河の消耗・氷河湖の水収支や熱収支などに関する基礎的なデータが蓄積され、解析が可能となりつつある。GLOFに関してはいくつかの個別調査の報告がある。Vuichard & Zimmermann (1986) は、Dig Tsho GLOF (1985年発生) の土砂収支を報告しているが、土砂移動に関する調査例は少ないため、実態は十分に把握されているとは言えない。

Table. 2 Records of GLOF in Nepal

Date	Locate Basin	Name of Glacier Lake	Cause of GLOF	Note
450 years ago	Seti Khola		Ice-cored moraine collapse	50~60m thick debris covered
1935. 8	Sun Kosi	Targyling gully	Ice-cored moraine collapse due to Seepage	
1964. 9	Arun	Gelhaipco	Moraine collapse due to ice falling into the lake	
1964	Trisuli	Longda		
1964	Sun Kosi	Zhangzangbo	Moraine collapse due to Seepage	Water level rising 8m
1968	Arun (Mt.Everest)	Ayico		
1969	Arun (Mt.Everest)	Ayico		
1970	Arun (Mt.Everest)	Ayico		
1977. 9	Dudh Kosi	Nare Glacier	Ice-cored moraine collapse	
1980	Tamur	Phuchan		Water level rising 20m
1981	Sun Kosi (Bhote Kosi)	Zhangzangbo	Moraine collapse due to glacier calving	Peak discharge of 16,000m <sup>3</sup> /s
1982. 8	Arun	Jinco	Moraine collapse due to glacier sliding into the lake	
1985. 8	Dudh Kosi	Dig Tsho	Moraine collapse due to rock avalanche	Peak discharge of 8,000m <sup>3</sup> /s
1991. 7	Tama Kosi	Chubung Ripimo Shar		Water level rising 1m

\*After Yamada (1993)

中国では、中国科学院氷河寒地学蘭州研究所が中心となって、氷河湖の研究が行われている。Xu & Feng (1994) はチベットにおいて272の氷河湖を対象に調査し、このうちの139のモレーンダム湖のうち34(24%)についてはGLOFの危険があることを指摘している。これらは、10~50×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>の貯水量があり、ネパールに流入する河川の上流域に位置しているため、チベットとともにネパール国内でもGLOFの危険が指摘されている。GLOFについては表-3のよ

うに12例についての報告があり、発生原因は氷雪崩れ（8例）・パイピング（1例）・氷河の前進（1例）があげられている。洪水流では50km下流で年最大流量の12倍の流量や120km下流で10000m<sup>3</sup>/sの例が、土石流では40km下流で4.8×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>の土砂が堆積した例などが記載されている。

ペルーの氷河湖では、Lliboutry et.al (1977) が、モレーンダムの発達や水の動きについて報告している。

氷河湖を形成しているダムには、土砂のみのモレーン・中心部に氷の核があるモレーン・氷河の氷によるダムの3つのタイプがある。GLOFの発生原因は、流出量の急激な増加によって湖水がオーバーフローし、ダム堤体が急激な侵食によって欠壊する場合と、周辺斜面の土石や氷河・雪氷が氷河湖への崩落に起因する波浪によって堤体が欠壊するケース、また、水圧の増加によるダム堤体の漏水が欠壊を引き起こす場合などが報告されている。地震の発生が、水圧の変化や堤体の弱体化を引き起こす可能性もある。しかし、これらの報告からは、モレーン堤体の内部構造は不明な点が多く、また、GLOFの発生機構に関する実験的な研究もなされていない。

Table. 3 Records of GLOF in Tibetan Himalaya

Date	Locate Basin	Lake Name	Cause of GLOF	Release of Water Volume	Note
1935. 3	Bhote Kosi	Tara Cho	Dam Piping	6.3 (×10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	
1940. 7	Ahmchu	Qunbixiama cho	Ice Avalanche	12.4	Peak discharge 1,200m <sup>3</sup> /s
1954. 7	Nianchu	Sangwang Cho	Glaicer Avalanche into lake	300.0	Peak discharge 10,000m <sup>3</sup> /s
1964. 8	Trisuli	Longda Cho	Debris flood with a peak discharge	10.8	Peak discharge 3,100m <sup>3</sup> /s
1964. 9	Arun	Gelhaipu Cho	Ice Avalanche	23.4	Peak discharge 3,260m <sup>3</sup> /s
1964. 9	Nyang	Damenlahe cho	Ice Avalanche	2.0	
1970. 8	Arun	Aya Cho	—	90.0	Formed debris fan 4.6×10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
1972. 7	Xibaxiaqu	Poge Cho	Ice Avalanche	—	
1981. 6	Yarling Zangbo	Zari Cho	Ice Avalanche	—	
1981. 7	Bhote Kosi	Zhangzangbo	Ice Avalanche	18.9	
1982. 8	Arun	Jin Cho	Ice Avalanche	12.8	
1988. 7	Palong zangbo	Mutui Cho	Ice Avalanche	3.3	Peak discharge 1,540m <sup>3</sup> /s

\*After XU D.&FENG Q.(1994)

現在ネパールは5つの水河湖を重点的に調査している。そのなかでGLOF発生の危険が大きいと言われている水河湖がTsho Rolpa水河湖である。

### 3. Rolwaling 川

#### (1) 流域の概況

Rolwaling 川流域はネパールの行政区では Janakpur に属し、カトマンズ北西約500km(北緯28°東経86°)に位置する。水系は Rolwaling から Bhote Kosi 川→Tamba Kosi 川→Sun Kosi 川となり、ガンジス川に合流しベンガル湾へそそいでいる。

流域面積300km<sup>2</sup>、標高は Bhote Kosi 川との合流点の1400m から Gaurisankar (7146m) の南稜7010mの最高点まで、北側はチベットとの国境で6000m以上の高山が連なり、東側は Khumbu Himal に接する。流域の約30% (100km<sup>2</sup>) は1年を通じて氷雪に覆われる高山域であり、この中に Ripimo Shar と Trakarding の2つの水河がある(図-4)。河川はこれらの氷河を源とし、大小の支流から水を集め、チベットより流れる Bhote Kosi 川に合流する。河床の勾配は、Beding 集落を境にして、上流域は平均12%下流部は30%であり、Bhote Kosi 川に合流すると10%になる(図-5)。2つの氷河は、標高4500m付近にエンドモレーンを形成している。流域の西端の標高2000mには Simigaon 村があり、温暖な気候でバナナも栽培されている。標高2500~3700mの森林はモミ・ツガ属等の常緑針葉樹とカンバ・シャクナゲ・ナラ・ハンノキ属の混交林で、斜面下部では胸高直径1m位の大径木もみられる。左岸中流部には約20年前に10km<sup>2</sup>を超える森林火災が発生しており、現在は再生林がみられる。標高3700m以上では高木類は少なくなり、シャクナゲやカンバが矮生している。4000m付近では、植生の分布もまだらであり、低木類のみとなる。

流域の総人口は約1000人で、ほとんどは Simigaon を拠点としているが、標高3700mの Beding にはシェルバ族が約300人(約70世帯)が生活している。住民は農業が主産業であり、Simigaon ではヒエと牧畜、Beding ではジャガイモとヤクの放牧が中心である。Simigaon では、一部に出づくり地がみられたが、耕作ではなく一時的な放牧のために少人数が滞在する小規模なもので、林間放牧といってもよい。Beding では、夏期には標高4000mに位置する Na の集落に移住している。Beding に隣接する下流(Gyabrug, Chameka)には冬の家とその周辺にジャガイモ畑があり、その外側は放牧地と露岩地が混在する土地利用で、この間に針葉樹が単木的に残っている。Beding は写真-1でみられるような崖錐斜面を、石積みによって階段状にして家と畑を作っている。集落にはチベット仏教の寺や小学校もあり、シェルバ族の生活の中心地となっている。Na(写真-2)はU字谷の広い谷底部にあり、右岸のいくつかの小溪流の扇状堆積地がジャガイモ畑となっている。耕作地は、水平化と家畜の侵入を防ぐために1m前後の高さの石垣に囲まれている。家畜はヤク・ヒツジ・ヤギが林間や森林限界以上の土地に放

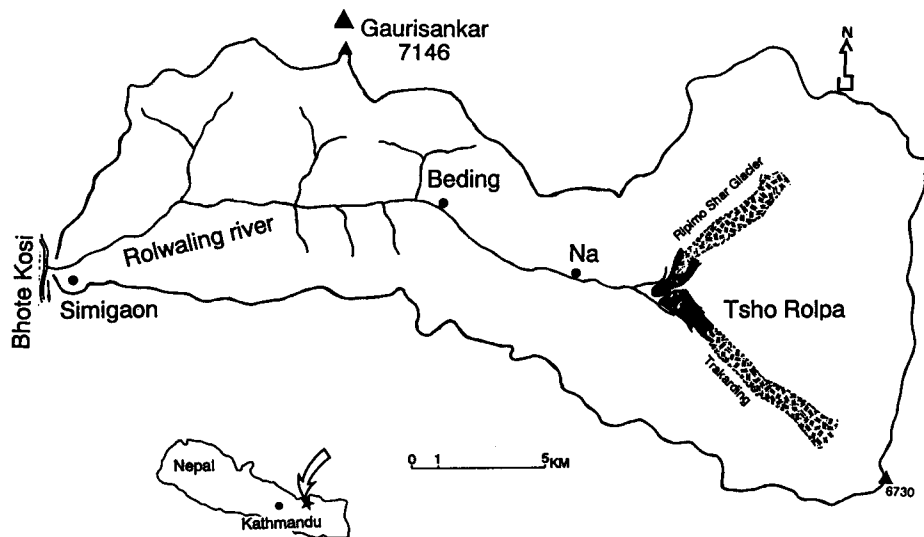


Fig. 4 Location of the study site.

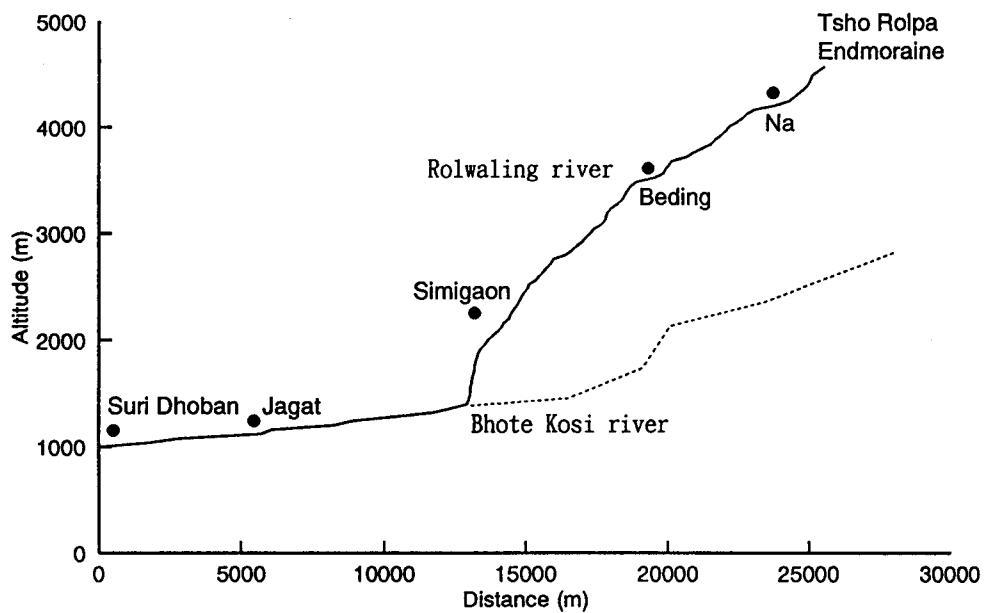


Fig. 5 The Longitudinal Profile of Rolwaling.

牧され、夏期の放牧地は標高5000m 付近まで広がっている。野生のヤク（マウンテンゴート）の姿もみられた。

住民は農業の他に、RolwalingとKhumbu間のトレッキングの人々を対象にしたガイドやポーターの仕事があり、貴重な現金収入源である。Bedingのシェルパはガイドの仕事が多く、村内にエベレスト登山者が15人もいと誇っていた。燃料はキシレンも使用していたが、平常はシャクナゲの落葉を焼きつけにし、シャクナゲ・カンバ・モミの枝や幹などを利用し、他にヤクの糞の乾燥させたものを利用して。住居は石積みの壁構造であり、梁・柱、出入口・窓



**Photo. 1** Beding village.



**Photo. 2** Na village  
The arrow shows the end moraine of Tsho Rolpa.

の枠や棚には針葉樹の割木をチョンナ加工して用いていた。住居で木材使用量として多いのは屋根・床で、これらはすべて針葉樹の割木であった。燃料としての木材使用量は1戸当り年間で3 m<sup>3</sup>前後(層積5~10fm)とみられ、住居用も含めてその収穫は、チベット仏教の暦に木材伐採の日・草刈の日などが決まっていて、この日以外の採取は原則として行われず、過伐は防がれている。

乾期は10~5月、雨期は6~9月であり、年降水量は2000~3000mmで、Tsho Rolpa 湖の気象観測期間中の最大日降水量は35mmであった(坂井, 1995)。流量は1993年から夏期に観測されているが、今回の調査結果も加えて、その値を表-4に示した。

1991年7月には Ripimo Shar で氷河湖の欠壊があり、Beding を中心に民家の破壊や家畜の流出等の被害を受けた。また、この GLOF によって Tsho Rolpa に危機感をいただいた村民は、ネパール政府に対して Tsho Rolpa 氷河湖の無害化対策を陳情した。このことも GLOF 研究の対象地となった理由の1つとされている。

Table. 4 Discharge of Rolwaling river

Research Date	Catchment Area (km <sup>2</sup> )	Average Velocity (m/s)		Discharge (m <sup>3</sup> /s)	
		June 1993	November 1994	June 1993	November 1994
Tsho Rolpa	79.0	0.73	—	3.36	0.7
Na	160.0	1.80	1.19	14.14	2.09
Beding	197.0	2.25	1.80	27.22	6.54

※ Data of June 1993: after Mool et al. (1993)

## (2) Ripimo Shar 氷河湖の欠壊に伴う土砂移動の実態

1991年7月 Ripimo Shar の氷河湖欠壊によって、Beding では水面が約1 m 上昇し、河原の運動広場は洗い流された。増水は一晩続き、朝には川に近い家屋が倒壊し始めたので川の近くに住んでいる村民は避難した。増水は24時間後には通常の水位に回復したが、出水によって家屋の倒壊や農地等の流出などの被害があった(Damen, 1992)。氷河湖周辺を放牧地に使用している村民の話によると、欠壊した氷河湖はエンドモレーンより約1 km 上流に位置していたという。ただし、この氷河上には現在も約10の湖があり、正確な位置は不明である。発生場所はエンドモレーンより1 km 上流であったが、エンドモレーンの欠壊地点直上流部の高い位置(エンドモレーン頂部より2 m 下)に周辺の堆積物と異なる細粒堆積物が段丘状に分布していることから、欠壊した湖から流出した水はエンドモレーン直上流部に一時的に湖を形成し、この湖が直接エンドモレーンの欠壊を引き起こしたと判断した。

エンドモレーンの欠壊部分は一部であり、その大きさは幅80m・深さ15m・長さ300mである。

欠壊の形状からは、オーバーフローによる侵食の可能性も否定できないが、浸透水の増大による欠壊と想定された。欠壊による総流出土砂量は $225 \times 10^3 \text{m}^3$ であり、流下した土砂はエンドモレーン直下から1500m 下流に幅300m にわたって堆積した(立体写真-2, 3)。とくに、エンドモレーン末端から500m の範囲には集中的に堆積していた(図-6)。堆積地の横断地形L1・L2(図-7)は共に中央部に堆積量が多く、現地観察からも流路の周辺には舌端状の土砂堆積が確認できた。この範囲の堆積土砂の平均堆積深は約3 m であり、堆積量は $180 \times 10^3 \text{m}^3$ と計算され、モレーンの侵食土砂の約70%は流出地点直下に堆積していたことになる。堆積物は最大径10m の礫から粘土まで含まれているが、表面には径1 m 位の礫が多く分布していた。堆積

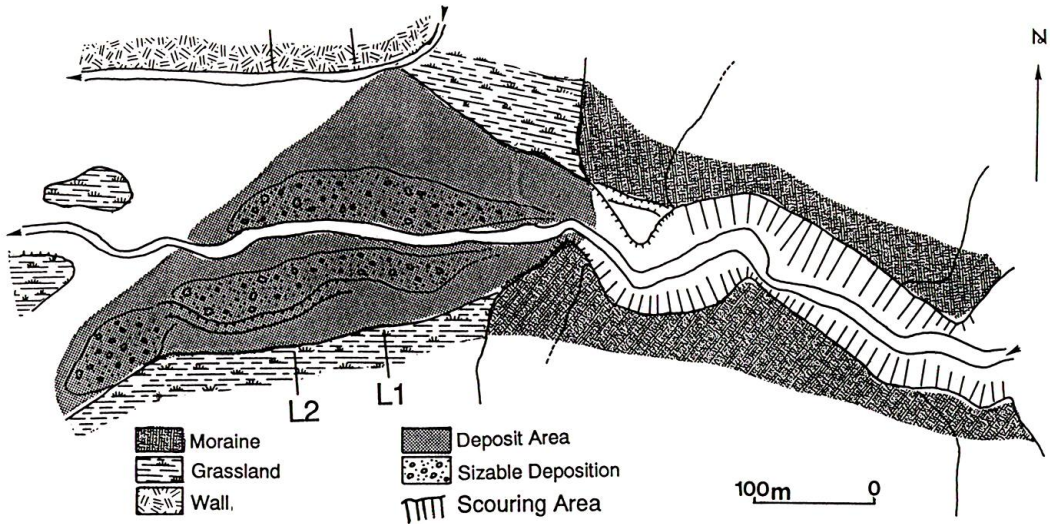


Fig. 6 Planimetric view of deposition due to Ripimo Shar GLOF.

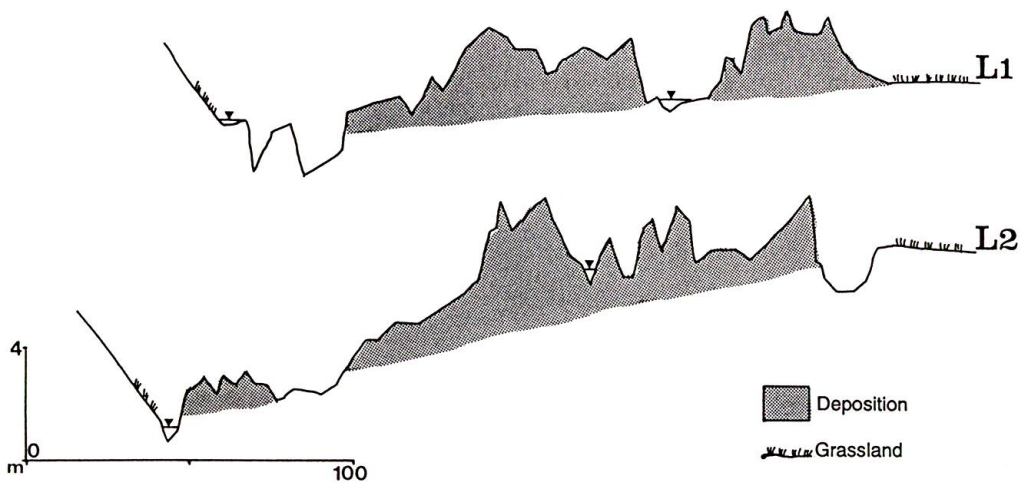
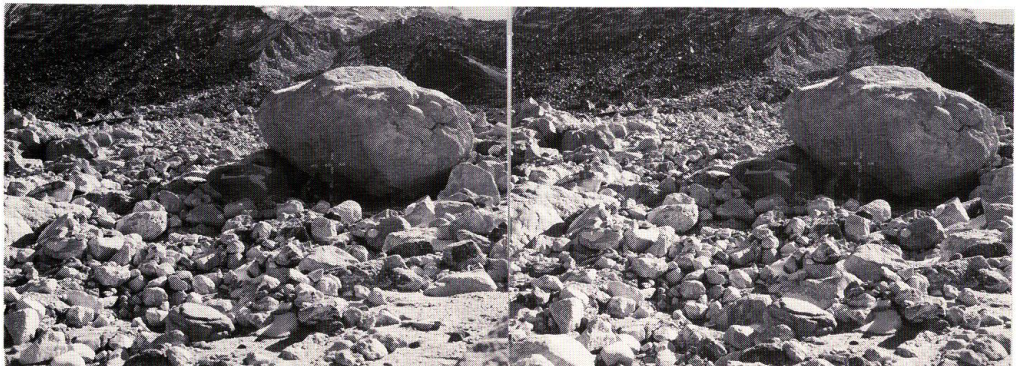


Fig. 7 Cross profile of the deposition due to Ripimo Shar GLOF.

後の流出水や降雨などで表面の細粒土砂は流出し、このような表面状態になったと考えられる。このエンドモレーン直下の500~1500mの間には侵食・堆積地点が部分的に分布し、堆積深も50cm以下であった。GLOFによって発生した洪水流はモレーンの侵食によって土石流化するが、直下に拡散し堆積することによって土砂と水は分離し、洪水流のみが下流へ達したと判断できた。また、Na周辺の流路には部分的に堆積地点があったが、この堆積地の直上流200mに溪岸侵食をうけた痕跡があることから、流下した洪水流は溪岸や溪床の土砂の侵食を引き起こし、小規模な土砂流が堆積・侵食を繰り返し流下したと判断できた。モレーンの直下で集中的に堆積しているのは、過去の氷期によって形成された比較的緩勾配のU字谷の広い谷底部が土砂の堆積空間として作用した結果である。Dig Tsho GLOFでも同様に欠壊地から約2 kmの区間に集中して堆積していることが報告されている (Vuichard& Zimmermann,1986)。

洪水流はNa周辺でみられたように溪床や溪岸土砂の侵食・堆積を伴いながら流下していた。NaからBedingの区間には土砂の堆積する拡幅空間を2箇所確認した。侵食・堆積を繰り返しながら流下してきた土砂は川幅の相対的な拡幅空間では掃流力の減少にともない堆積してい



**Stereo Photo. 1** The deposition due to Ripimo Shar GLOF.



**Stereo Photo. 2** Ripimo Shar GLOF.

る。図-8に示した河床の堆積深は平均1mで、堆積土砂の総量は $20 \times 10^3 \text{m}^3$ であった。Beding集落下の拡幅空間では、一部に上流からの土砂による堆積地が形成されていたが、全体的には侵食傾向にあった。Bedingから下流は河床勾配が大きくなり、侵食傾向が強くV字谷(写真-3)が深くなる。このため、河状の観察は部分的にしかできなかったが土砂が堆積している空間は1箇所のみであった(写真-4)。一方、Bhote Kosi川での踏査ではRipimo Shar GLOFによる影響はほとんど見られなかった。

GLOFが発生した場合、その下流では溪床に不安定土砂があることから雨期などに発生する小規模の洪水でも土砂移動が発生することが予想される。また、土砂の移動は川幅や谷地形に大きく作用されており、河川地形と河岸河床の不安定土砂をふくめた検討をおこなうことが必要である。

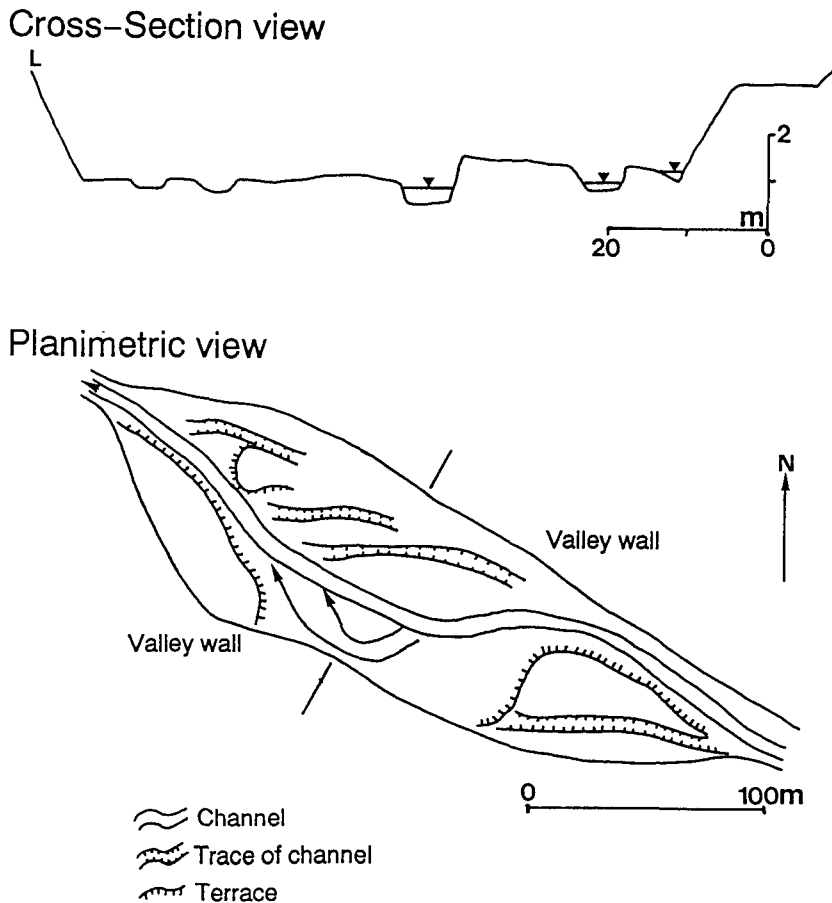
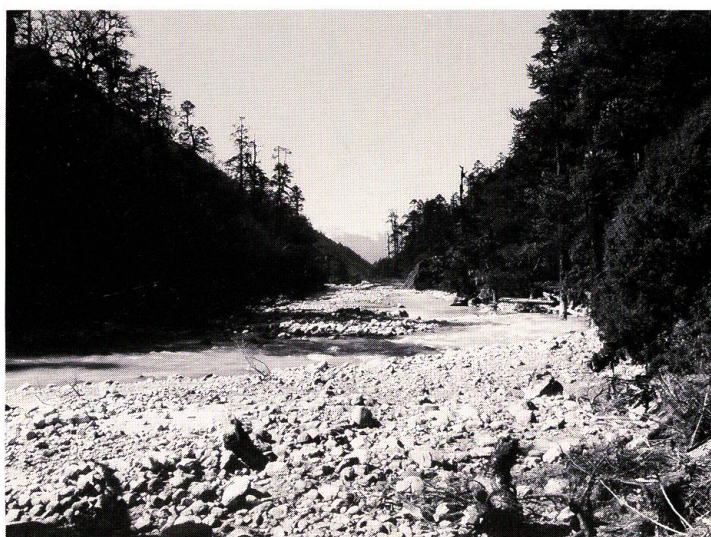


Fig. 8 Profile of the wide riverbed section at the upper parts of Beding.



**Photo. 3** The condition of Rolwaling river at the lower parts of Beding.



**Photo. 4** The wide riverbed section at the lower parts of Beding.

#### 4. Tsho Rolpa 氷河湖の現状

##### (1) 氷河湖の発達と現況

標高約4500mに位置し、氷河の末端にある湖は右岸の Tsoboji 山体の他は、エンドモレーン・サイドモレーン・氷河末端に囲まれている (写真-5, 6, 7, 8, 9・図-9)。サイドモレーンのある左岸側では谷底幅約100mのV字谷 (Abration Valley: 写真-7) を経て山腹斜面になっている。右岸側は、急峻な斜面で、山腹から崩壊した崖錐堆積物がみられる。山腹斜面は岩盤が露出し、一部に植生 (草本) も分布しているが、上部には小さい氷河や氷冠がある。

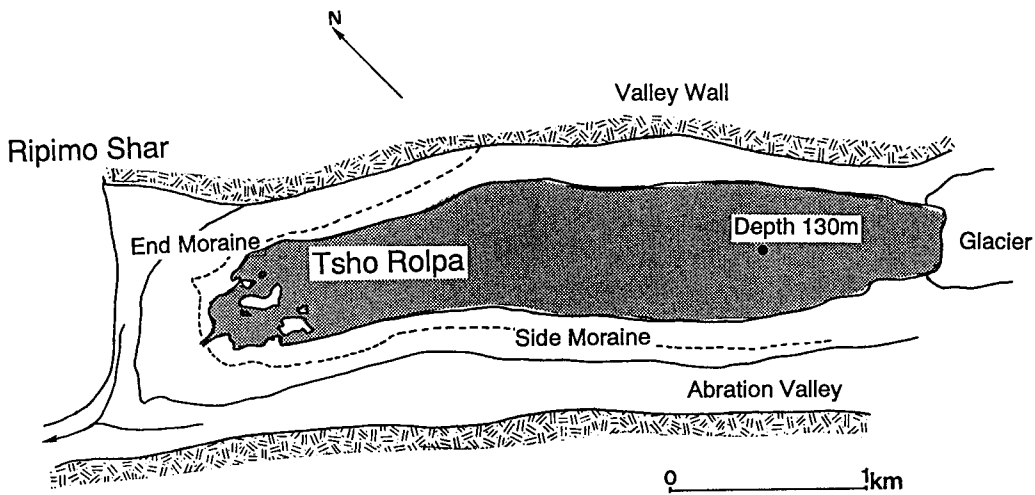
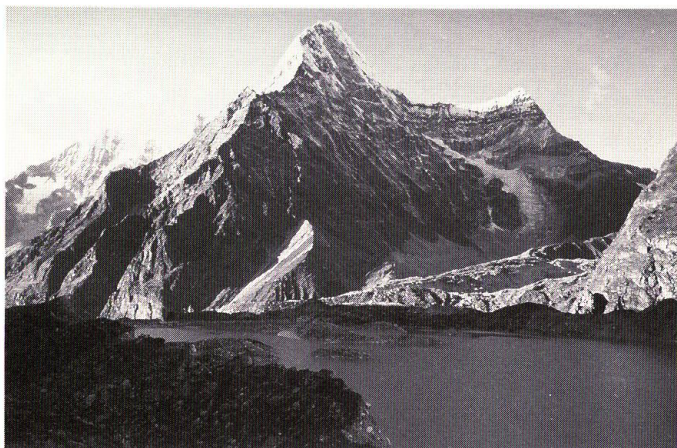


Fig. 9 Planimetric view of the Tsho Rolpa glacier lake.

氷河湖は1993年2月の調査で全長約3 km・幅0.5 km・面積1.37 km<sup>2</sup>になり、最大水深130 m・平均水深50 m・貯水量は71 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>に達する。エンドモレーン上流部には、デブリが厚く堆積したために残ったと考えられる島が4つある。その他に、小さな島や岩が水面に出ているものが多数ある。氷河湖に流入する河川はないが、氷河融解により湖の水を満たしており、湖水面は夏期と冬期で1 m変動する。エンドモレーンの一端から氷河湖の流出 (Spillway: 立体写真-3) があり、平均流出量は2.3 m<sup>3</sup>/s (最大15 m<sup>3</sup>/s・最小0.2 m<sup>3</sup>/s) である。エンドモレーン下流斜面には湧水があり流出量は20 l/sで、湧水箇所と湖水面の高低差は50 mである。氷河湖の年最高気温は10℃・最低気温は-15℃であり、11月から4月まで湖は氷に覆われる。水温の年間変化は0~6℃であるが、水深40 m以下では約3℃で安定している (坂井, 1995)。湖水はサイドモレーンや氷河底部の融解水から供給される細粒の粘土・シルトが浮遊しているため白濁している。また、氷河底面からの流出水が確認されている。



**Photo. 5** Tsho Rolpa glaicer lake and Trakarding glaicer.



**Photo. 6** Tsho Rolpa glaicer lake.



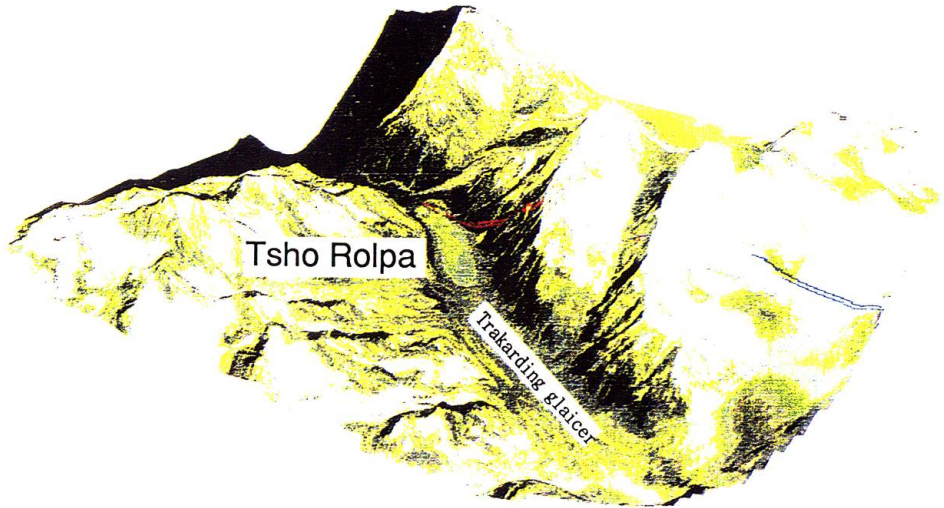
**Stereo Photo. 3** The spillway at Tsho Rolpa.



**Photo. 7** The abration valley.  
The arrow shows the side moraine.

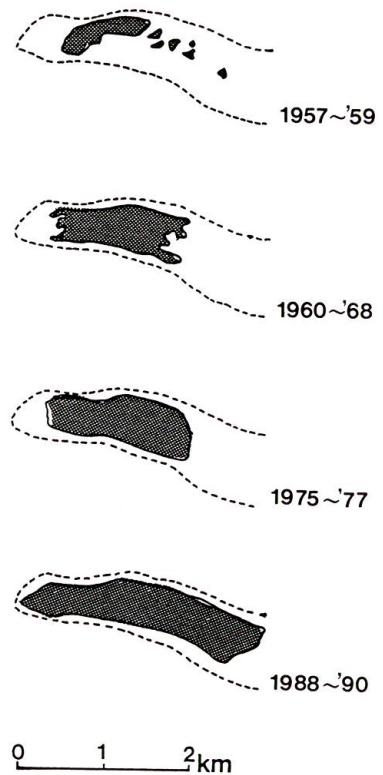


**Photo. 8** The side moraine of Tsho Rolpa.



**Photo. 9** Digitized topographic data of Tsho Rolpa glacier lake area.  
After Mool (1995)

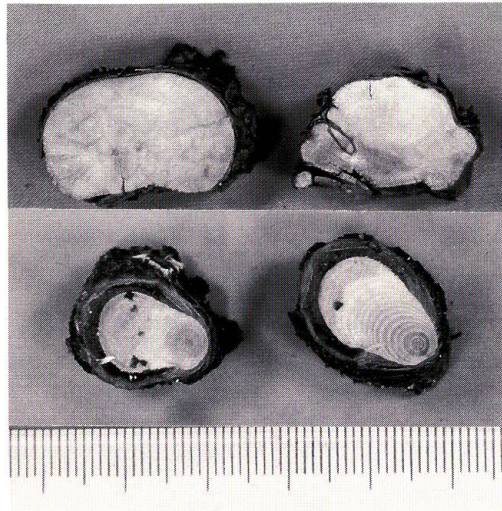
Mool et al. (1993) は氷河湖の発達過程を示し、1958年頃は小さい池が部分的に分布し総面積は $0.23\text{km}^2$ であったが、1960年代には一つの湖となり、1977年以降急速に氷河末端方向に拡大し1990年には面積が $1.27\text{km}^2$ となった(図-10)。<sup>94</sup>年6～11月の1夏の間、氷河末端は約30m後退し、氷河湖が拡大し続けていること示していた。最深部で年間 $0.37\text{m}$ の湖底部の融解があったと指摘(坂井, 1995)していることから、約30年間で湖の貯水量は急速に増大してきた。また、エンドモレーン上流側斜面に島状に生育している低木群(写真-10)に、生育木と枯死木があり、枯死木の年輪は20年で生育木の年輪が30年であること、および湖水に近い生育木の年輪幅が約10年前より小さくなり生育状態が悪くなっていることから(写真-11)、約10年前に枯死木が分布している位置に湖水が侵入してきたと推測でき、Mool et al. (1993)の湖水面のエンドモレーン方向への拡大年代と一致した。



**Fig. 10** Development of Tsho Rolpa glacier lake.  
After Mool et al.(1993)



**Photo. 10** The end moraine of Tsho Rolpa.  
The arrow shows the sampling point of tree discs.



**Photo. 11** Tree ring of Akuriru (Sherupa name)  
at Tsho Rolpa end moraine.  
Upper: Dead trees  
Lower: Growing trees, show the bad growth within last 10 years

## (2) モレーンの構造

エンドモレーンの堤体は、斜面長300~450m (写真-12)・高低差150mの馬蹄形で、山体及びサイドモレーンにつながっている。モレーンの下流斜面勾配は上部で30%、斜面脚部で15%になる(図-12)。モレーン下流側斜面は、最大で長径約10mの礫が点在しているが、礫間には砂・シルトがありツツジ科などの低木類(樹齢20~30年)や草本が散生し(写真-12)、放牧地として利用されていることから、約30年間は安定状態にあったと判断した。エンドモレーン尾根部と湖水面の高低差は2~20mであるが、湖水の流出口の右岸側と左岸側では左岸側が相対的に低い。エンドモレーンには現在の流出口の他に、連続した凹地が4箇所ある(図-13)。



Photo. 12 The end moraine of Tsho Rolpa.

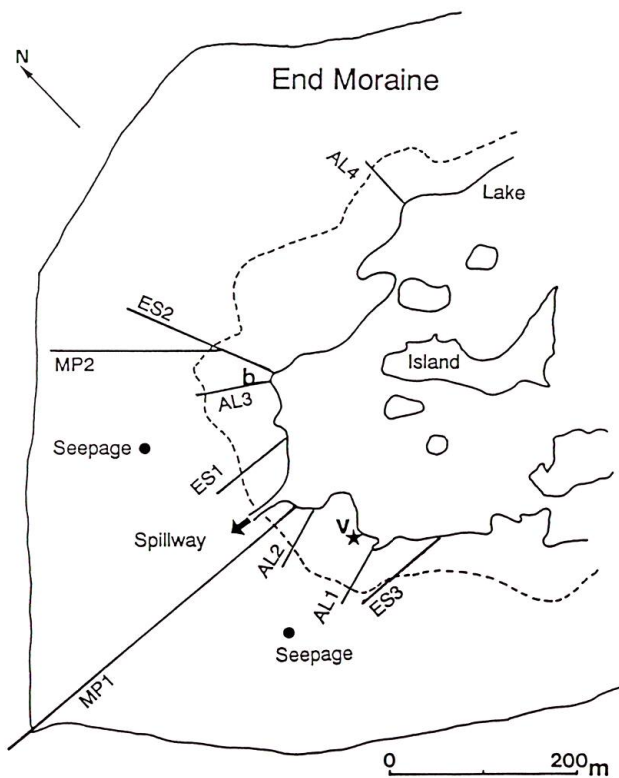


Fig. 11 The end moraine of Tsho Rolpa glacier lake.  
 MP1,2: Moraine profile line  
 AL1~AL4: Profile of the trench at the end moraine  
 ES1~ES3: Electrical survey profile line  
 V: Point of tree ring observation  
 Seepage: Seepage point

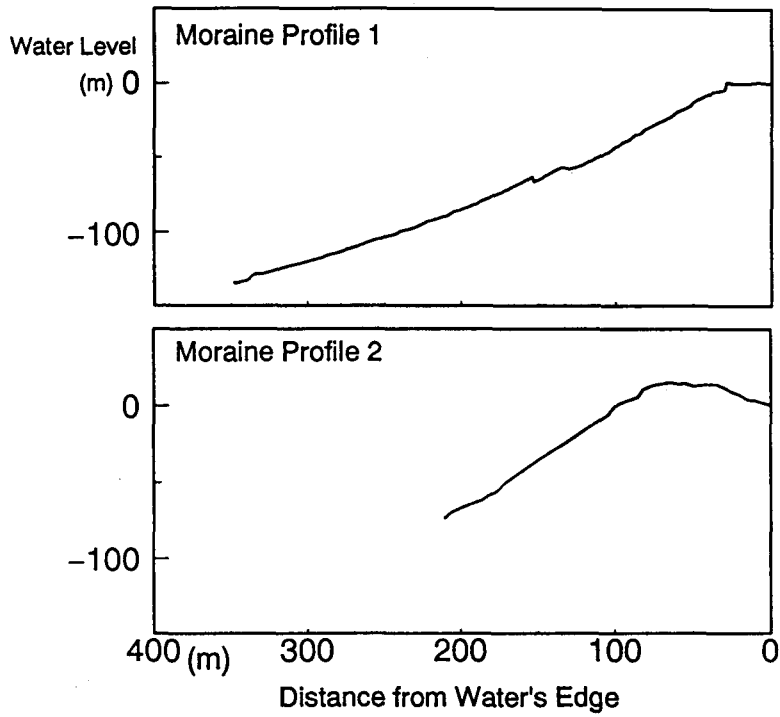


Fig. 12 The longitudinal profile of Tsho Rolpa end moraine.

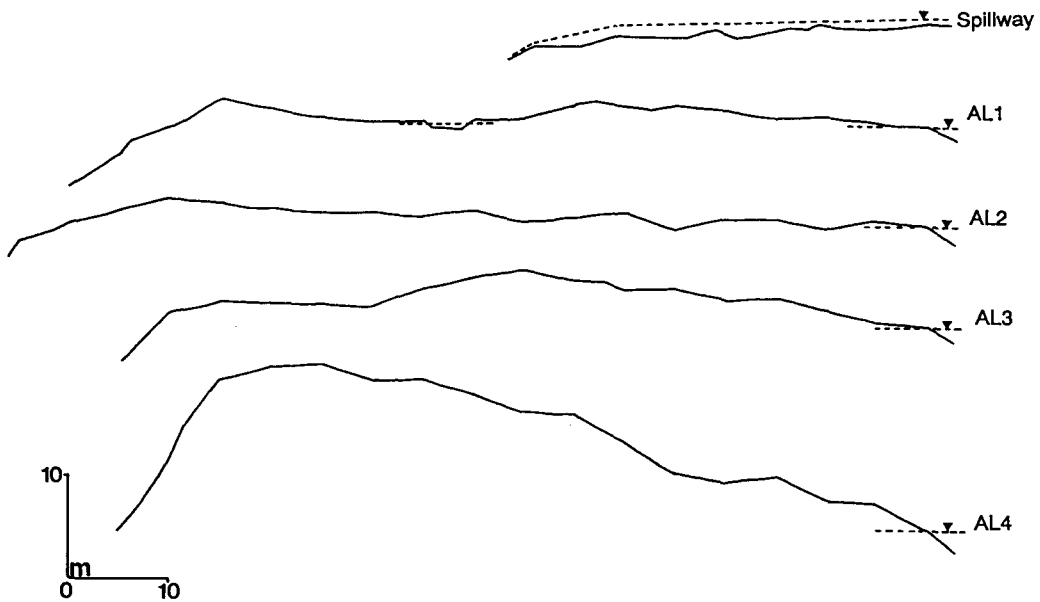
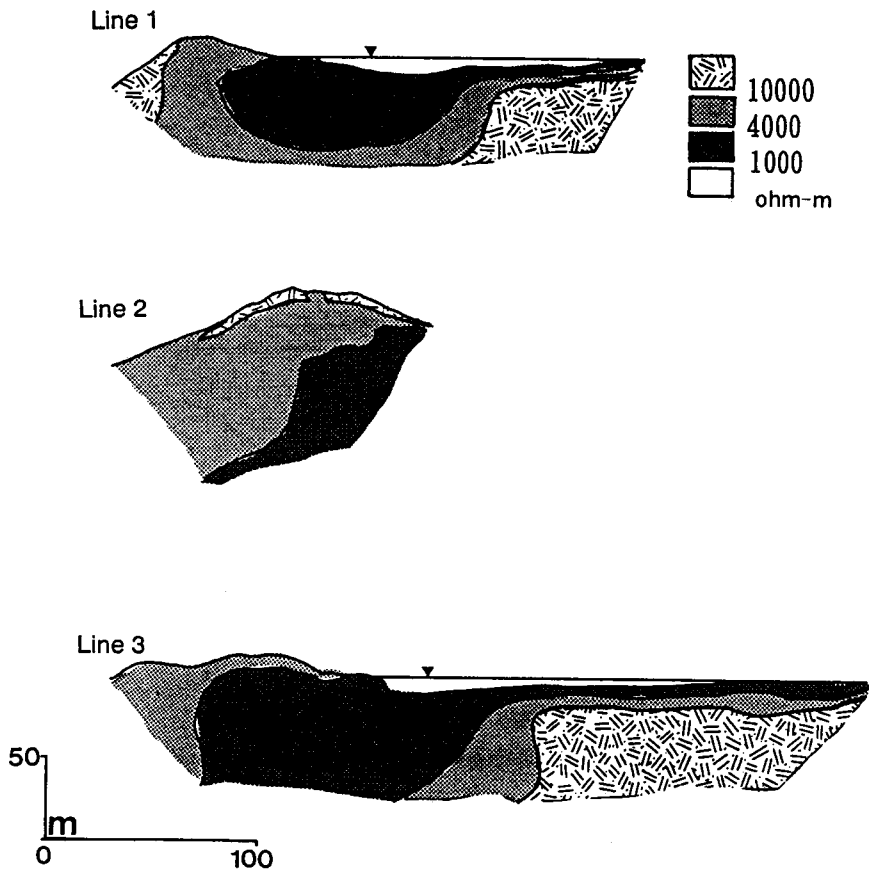
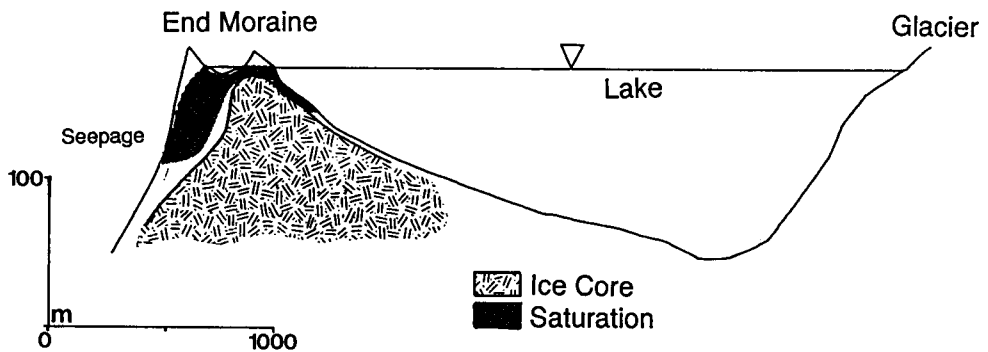


Fig. 13 The cross profile of the trench in the end moraine.



**Fig.14** Profile of the electrical survey line.  
 1000 ohm-m: Infiltration of water  
 4000~10000 ohm-m: Mixed ice and debris  
 Upper 10000 ohm-m: Ice area  
 Surveyed depth = 50m

After Kita (1995)



**Fig.15** The assumption of moraine structure.

Reynolds (1994) はこれを旧流出口として、エンドモレーン1箇所 (ほぼES2ラインに一致する) とサイドモレーン1箇所を加えて6箇所示しているが、その形状や植生から旧流出口と断定することは困難であり、モレーンの形成過程を含めた検討が必要である。ただし、比高が小さいAL-1は湖水面の上昇期には流出する場合があるとみられ、モレーン尾根部と湖水面の間に三日月型の池が形成されている。

サイドモレーンの湖側は、調査期間中に凍結融解による崩落と風食が常にみられた。モンスーン期はさらに雨滴侵食も加わると考えられ、サイドモレーンの湖水面側斜面後退速度も年間 $10^1\text{cm}$ のオーダーと推定された。

エンドモレーンの構造は、人工構造物ではロックフィルダムが最も近い。Tsho Rolpa 氷河湖のエンドモレーンの形状に最も似ている日本国内のフィルダムは堤高154m・堤頂幅12mであり、堤体法面の勾配は下流側で25%・上流側で18%となっている。Tsho Rolpaのエンドモレーンの勾配は下流側で30%・上流側で3%となっており、下流側斜面を比較した場合、ダムの堤体としては極めて不安定な形状である。しかも、径 $10^1\text{m}$ を超える巨礫から数 $10^{-6}\text{m}$ の粘土が無秩序に堆積しているため、展圧による強度や遮水効果を期待できない。これらの条件からはエンドモレーンがロックフィルダムとして存続していることを説明することは難しい。

図-14に示した測線の電気探査解析の結果によると、エンドモレーン近くの島を中心に深度50m付近で抵抗値 $10,000\text{ohm}\cdot\text{m}$ 以上を示し、氷塊の存在が明らかになった (北, 1995)。この氷塊が50m以下にも連続していると判断し、エンドモレーン上流側の氷塊が湖上流の氷河末端まで連続していて氷河湖全体が氷の器と考えると、湖が保持されている状況を説明できる (図-15)。また、抵抗値 $4,000\sim 10,000\text{ohm}\cdot\text{m}$ の範囲では、氷と土砂が混合している状態であり、 $1,000\sim 4,000\text{ohm}\cdot\text{m}$ の範囲では、水が浸透している状態であることがわかった。

### (3) GLOF 発生の可能性

Tsho Rolpa 氷河湖欠壊のいくつかのケースを想定してみた。外力が加わらない場合でも欠壊の可能性はあるが、地震やモンスーン時に可能性が高い。

第一にエンドモレーンの全体的な滑動である。氷体の下部は湖水や自重圧によって融解が続くと考えられる。氷河や氷河湖の基礎岩盤表面は古い年代の氷河による侵食跡であり、摩擦は大きくないと想定される。氷河湖湖底の融解が進み基礎岩盤まで達した場合、基礎岩盤を移動する流水はエンドモレーンの滑動を助長する。これが、最も規模の大きい欠壊の想定である。この条件を明らかにするためには、エンドモレーン上流側の湖底氷体から氷河末端氷塊の一体性と湖底氷体の融解速度などを解明する必要がある。

第二には、エンドモレーン内部の浸透水の拡大による欠壊である。現在、エンドモレーンの下流側斜面では2箇所の漏水が確認され、モンスーン期の流出量は毎秒 $20\text{l/s}$ を超えている。エンドモレーンは大礫から粘土までの大小の粒子で構成され、粘土が粒子間を結合する役

割を果たし、浸透水を抑えていると考えられる。電気探査の結果からは、エンドモレーンの上流側から浸透域の広がり、モレーン下流部で地表面から50mの深さで確認することができた(図-14, Line2)。漏水地点は湖水面から50m下部にあり、電気探査データの浸透域の範囲と一致することから、浸透水が下流側まで達し漏水していると判断できる(図-15)。今後、この浸透水が漏水路を拡大した場合、或いはモレーンが外力(波浪・地震)をうけ急激に漏水路が拡大した場合などにはエンドモレーンの破壊を引き起こす有力な原因となる。

第三に溢水とそれに伴うエンドモレーンの欠壊である。氷河湖は周辺斜面の崩壊・雪崩や地すべりの崩落による湖水面の急上昇や波の発生がありうる。とくに、崩壊や雪崩については、右岸側 Tsoboji 山体の中腹に氷体が付着しており、これらの氷塊や雪崩が湖まで到達した場合、発生する波の規模によってモレーンに影響を与える。右岸側山脚部(写真-6)はいくつかの崖錐が発達中であり、その中には下部の侵食や崖錐内部の氷体の融解が進んだ場合には崖錐が不安定な状態になり、 $10^4 \sim 10^5 \text{m}^3$ の土砂や氷が一度に崩落する可能性を持つものもある。左岸側の上流部には支流の氷河が氷河湖に直接に面しており、融解が進んで、不安定土砂が累積しており、今後の急激な土砂や氷の湖への流入が想定される。また、氷河末端部が湖へ流入する可能性も考えられる。これらの現象が引金となって波浪が発生し、波高が2m以上でエンドモレーンに達した場合、AL1, AL2などの凹地を越流する。越流水が堤体下流部を侵食し漸次侵食規模が拡大した場合には、湖水の流出口が新たに形成されGLOFに発展する可能性が大きい。5mの波高が到達した場合にはその可能性はさらに大きくなる。なお、エンドモレーンの上流側には大小の島があり、湖の上流部で発生した波浪がこれらの島や湖底の地形によって変化する。波浪は入江状の狭い場所を通過するため、エンドモレーン近くで想像以上に波高が高くなることもありうる。この点を検討するためには、模型実験を行うことが有効であろう。

#### (4) GLOFによる災害予測

氷河湖が欠壊した場合、とくにエンドモレーンの大部分が欠壊した場合の災害予測は困難である。洪水流は、直下では波高50mを越え、下流の広い範囲での災害が予想される。この規模の崩壊・流下は、日本では木曾の伝上崩れがある。この場合 $10 \text{km}^2$ の表土が侵食され、堆積深は厚いところで40mに達した。このスケールの欠壊災害予測は組織的で総合的な調査を行ない、下流の地形・地表状態を把握したうえで、シミュレーションを行うことで具体的になる。

ここでは、Ripimo Shar GLOFのようなエンドモレーンの一部が欠壊した場合を想定し、下流の影響を検討した。氷河湖欠壊の想定規模は、土砂生産量が $10^5 \text{m}^3$ 、洪水波の波高は最大で20mである。

Tsho Rolpaがこの規模で欠壊した場合、土石流はRipimo Sharのエンドモレーンと左岸谷壁(脚部は崖錐堆積物)間の幅 $10^4 \text{m}$ ほどの狭窄区間を流下する。その際エンドモレーンや崖

錐堆積物を侵食し、土砂の流出量が増大する。流下した土石流は Ripimo Shar GLOF と同様に大部分の土石を Na と Ripimo Shar エンドモレーン間のU字谷の谷底部に拡散し堆積する。ついで、右岸側の垂直な大岩壁にぶつかり、土砂流の第一波の流下速度は減少すると考えられる。土砂の堆積は Na の橋の上流部までと推測され、土砂と分離した洪水流が Na から下流へ流下すると考えられる (図-16)。

Na の付近では Ripimo Shar GLOF より強度の溪岸侵食が発生する。危険区域は、洪水波が10m では農地を中心とした範囲であるが、20m では民家と道が壊滅する (図-17)。Beding では、集落がある右岸側が現流路より低くなっていることもあり、また土砂流の直進性のために洪水流は直接住居のある斜面に当たると思われる。洪水流水面が5 m 上昇した場合には斜面下部の住宅5戸が流出する。10m 上昇した場合には寺院を中心に集落の半分が流出し、15~20 m の上昇でほぼ壊滅的なダメージをうける。

Beding より下流域の範囲では土砂の堆積地点は少ない。洪水流によって溪岸や溪床の侵食などが考えられる。侵食土砂は流路内の拡幅部や屈曲部に一時的に堆積するが、その後の出水によって容易に流出する。下流域では洪水流によって吊橋などが被害を受けると考えられる。

以上が Tsho Rolpa 湖の堤体に小部分欠壊が生じた場合の Rolwaling 川の災害予測であるが、Beding 集落より下流域はほぼ安全であると判断できた。しかし、氷河湖の堤体となっているエンドモレーンが全体的に滑動・欠壊した場合には、この付近でも数十 m の洪水波が達する可能性があり、下流では河床勾配が大きいことから、溪岸侵食が発生し、住居や耕作地になっている斜面が、脚部侵食により大規模な崩壊や地すべりを誘発することも考慮する必要がある。

Bhote Kosi 川合流点より下流では、洪水波の規模によって災害状況は大きく変わる。Bhote Kosi 川との合流地点での河床勾配は10%であり、土砂はより下流へ運搬されると想定される。

Jagat 付近には兩岸に比高3~5 m の土石流段丘がある。その堆積物は、最大径5 m の岩塊から粘土までであるが、分級が明瞭ではないことから、集合運搬の土砂が堆積したものと判断した。段丘面には耕作地があり堆積年代は特定できないが、100年以上前ののものであると推定した。Jagat から下流では河岸堆積物は直径0.5m の礫が主体になり、堆積層序も認められた。Tsho Rolpa 氷河湖が最大規模で欠壊した場合には、Jagat 付近で大量の土砂が堆積する可能性がある。

洪水流は中央山地付近まで達すると、細粒土砂は堆積し始めるが(写真-14)、この地域では農地の開発や過放牧・燃料木の採取によって斜面の裸地化が著しく、上流域からの流下土石流よりも、中央山地の土地利用による土砂流出が大きいと推測された。GLOF の規模が大きい場合には、これに大量の土砂が加わり、低地の一時的な氾濫災害のみでなく、河床の上昇による慢性的氾濫域や低湿地の発生も想定される。

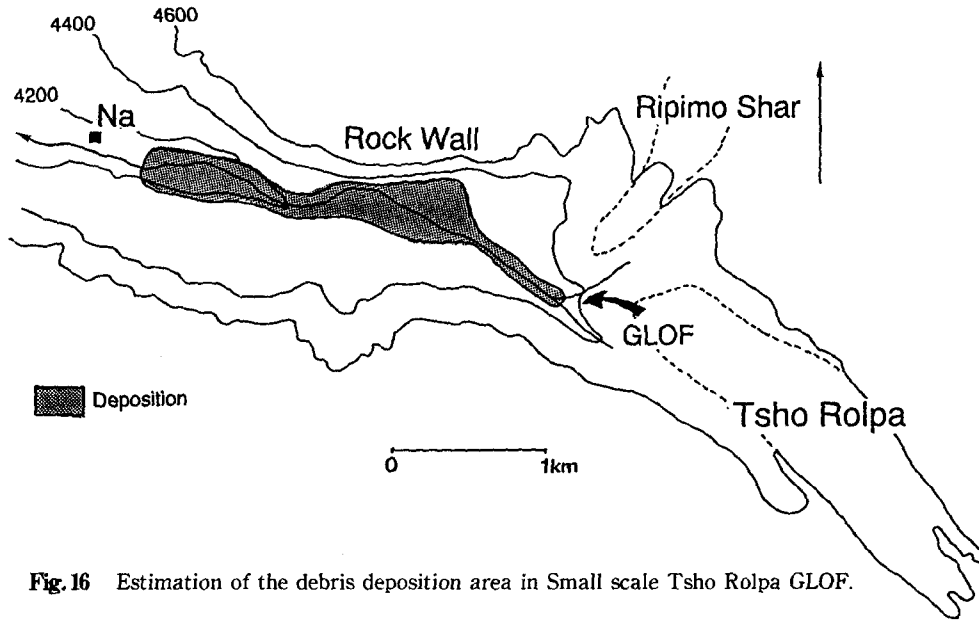


Fig.16 Estimation of the debris deposition area in Small scale Tsho Rolpa GLOF.

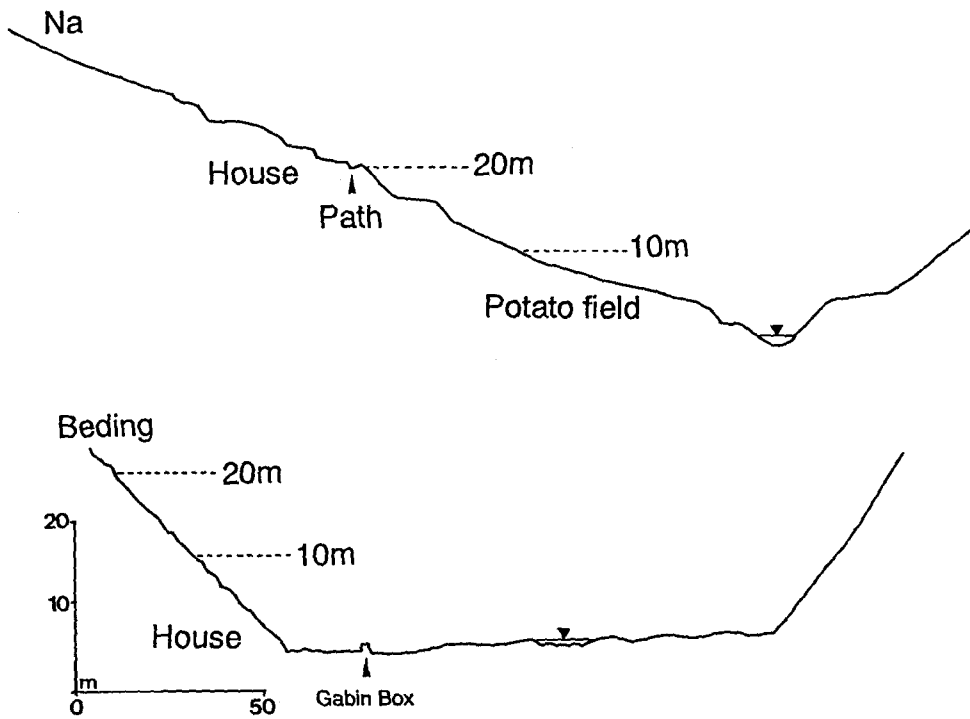
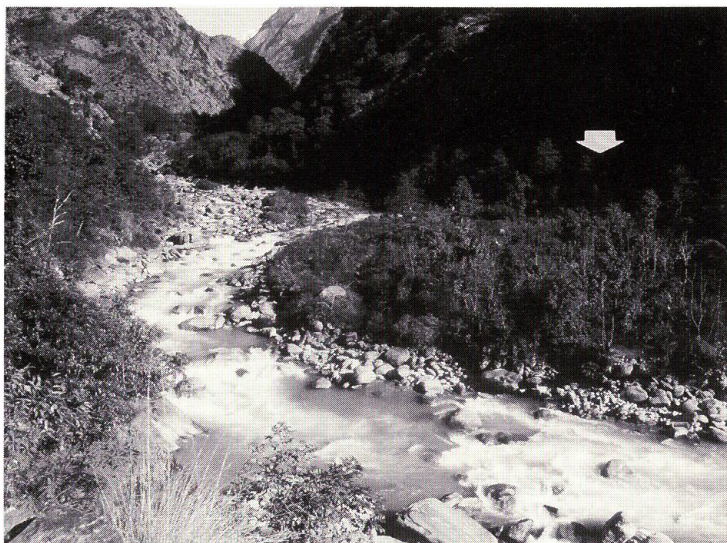
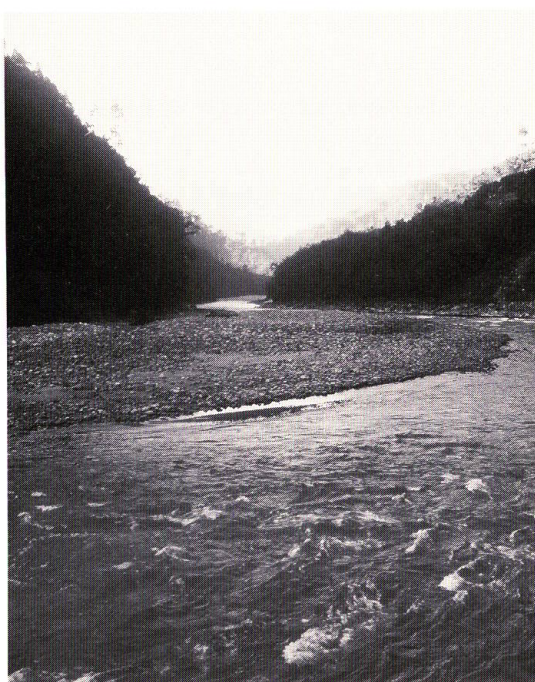


Fig.17 Valley cross profile at Na and Beding.  
If the water level will rise 10m due to Tsho Rolpa GLOF, potato field may be washed away in Na, houses washed away in Beding.



**Photo.13** The condition of the Bhote Kosi river at the lower parts of Suri Dhoban.  
The arrow shows the even age trees after debris flow.



**Photo.14** The condition of the Bhote Kosi at Mid-Land.

## 5. 氷河湖欠壊の防災対策

氷河湖欠壊の原則的な対策は、言うまでもないが氷河湖を発生させないこと、発生した場合には小さいうちに水を排除し埋めることである。このためには、以下の3点が必要となる。

第一に、氷河の消長を含めて、氷河湖の発生とその後の発達過程に関する基礎的な調査研究である。

第二に、衛星写真や空中写真とヘリコプターの観察による氷河末端部や小さい氷河湖の現状や変化を把握できる定期的な観測体制の確立である。

第三に、上記の2点をベースにし、地上パトロール隊を派遣して必要な調査を行い、水の排除等の作業を実施する。このパトロール隊は、専門的な訓練を受けたシェルパなどの山岳地域の住民で組織することは現状でも可能であろう。

一方、ヒマラヤには1,000以上の氷河湖が存在すると言われている。チベットの例では、10%強が危険な湖であったことから、ネパールやブータンも同様の比率で存在するとみると、100以上の危険な氷河湖が存在することになる。この対応策の確立には、氷河湖ダム堤体の構造・強度、化石氷塊の消長、GLOF 発生の原因解明、GLOF 災害の軽減策、氷河湖の排水方法などの基礎的そして組織的研究が必要である。

Tsho Rolpa 氷河湖はヒマラヤ山系に存在する氷河湖の典型であり、これまで数年の観測データを蓄積している。上述の氷河湖研究および GLOF 対策研究の場としての役割は大きい。このような観点から、気象や水文の観測を継続すると共に、Trakarding 氷河本体の変化状況の観測や氷河湖への大規模な氷塊が流出する可能性などを検討する。さらに、エンドモレーンの形状の測定と電気探査・重力探査などによる構造の把握を詳細に行い、一方で流出口や島の形状の時系列変位も測定する。サイドモレーンについても、侵食量などの測定を行う必要がある。

GLOF 対策としては、以上の調査の進行をみながら、湖水面の低下を目的とした作業を行う。1回の湖水面の低下は2~3 mをめどとし、流出口を掘り下げる。流出口を爆破するのではなく、ジャッキ等を利用して巨礫を除去すれば、流水の侵食力によってこれが可能であると判断した。湖水面低下方法は、筆者等も現地に入る前までは、Reynolds (1994) と同様にサイホン方式による湖水のくみ出しを想定していたが、気圧が低く(約600hPa)、モンスーン期の流出水(10m<sup>3</sup>/s以上)に対応するには装置が大規模なものになり、建設や運転のコストが大きくなるので、流出口の掘り下げを提案した。

水面の低下後も湖の形状や陸化した部分と旧陸地の変位の調査を行う。とくに、島とエンドモレーンが陸続きになった場合の漏水の変化をみる必要がある。これらの、水位低下作業と調査の繰り返しによって、水面が10~15m低下した段階で本格的な排水と埋土の方法を検討する。湖水面の低下によって、エンドモレーン上流側斜面で堤体と湖水水圧とのバランスが崩れることにより、すべり破壊の可能性も考えられるため、水面低下作業は慎重に行う必要がある。

下流域の対策方法としては、Na の農地は現状のまま利用を続けるとしても、家屋をより高い位置に移転する。Beding では集落下の河床を 5～10m 下げる。Beding 集落の下流部に滝があるので、その上部の爆破によって渓床は低下する。また、Beding の川に近い家屋は、下流などの村落に移転することが望ましい。Na と Beding 間に洪水流の減速や土砂の堆積を目的とした砂防堰堤の築造も考えられるが、建設に際して機材や人員の輸送に巨額の費用がかかり、自然へのインパクトも大きいので、実現の可能性は厳しい。

### お わ り に

今回の調査は短期でかつ断片的なものであり、今後より詳細かつ体系的な調査が必要であるが、この調査で氷河湖の形状と GLOF における土砂移動の実状の一部が明らかになった。また、大規模な GLOF の場合は洪水流や土石流の発生にともない、斜面脚部の侵食による地すべり・崩壊が発生し、Bedin 集落全体が被災する可能性があることを指摘した。さらに、GLOF などの大規模な攪乱の発生後は渓床やその周辺に不安定な土砂が堆積し、土砂移動等の影響は攪乱発生後数十年にわたってみられる (Hey,1979) ことから、より詳細かつ長期的な土砂移動調査と共に、流域全体の土地利用状況等の把握が必要となってくる。

GLOF 対策の問題は単に氷河湖周辺の災害問題にとどまらず、水利用計画・河川管理計画・森林管理・土地利用計画にいたる幅広い問題であり、国際河川管理の課題でもある。また、GLOF の対策作業では自然保護との整合性も問題になると考えられる。今後、氷河湖そのものの調査に基づく無害化対策を行うと共に、過去に発生した GLOF の調査に基づき土砂移動予測や氷河湖を含む流域の地形と土地利用転換による被害軽減対策のための調査を進める必要がある。調査組織は対象とする現象が多岐にわたるため、雪氷関係の専門家を中心に砂防・河川・森林の各専門家が協力することが望ましい。また、現在非常に少ないネパール国内の専門家や調査員の育成も重要である。ネパール政府においては、関係機関との協力によって災害発生時の対応や経済への影響を検討し、GLOF 災害時の対応のマニュアル作りを進める必要があるとともに、ヒマラヤ流域は複数の国にわたるために一国の枠組みを超えた防災計画の検討が望まれる。とくに、上流域のチベットとの共同対策機関の樹立が望まれる。今後、日本はこの面も含めた長期の協力体制をとり、現地のみでなく国内にも海外での活動を支援し、データを集積し研究する恒常的な組織の必要性を感じた。

### 文 献

- Bhatta B.P.(1994): Utilization of Nepal Himalayan forests in harmony with their consevation.The 1994 Obihiro Asia and the Pacific seminar on education for rural development, 17-37p.

- Damen M.(1992): Study on the potential outburst flooding of Tso Rolpa Glacier Lake, Rolwaling valley, east NEPAL. ITC report,44p.
- Feng Q.(1991): Characteristics of glacier outburst flood in the Yarkant river, Karakorum mountain. Geojournal, 25. 2/3 255-263.
- Hey R.(1979): Dynamic process-response model of river channel development. Earth Surface Processes, 4, 59-72p.
- 桧垣大助・岡本敦・菊池正敏 (1992): ネパールの土砂災害, 新砂防, 44-6, 35-40p.
- 北高穂(1995): Tsho Rolpa エンドモレーン付近における電気探査, 応用地質株式会社, (JICA への報告書)
- Lliboutry L.・Arnao B.M.・Pautre A.・Shneider B.(1977): Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca,PERU. I. Historical failures of moraine dams, their causes and prevention. Journal of Glaciology, 18, 79, 239-254p.
- Lliboutry L.(1977): Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, PERU. II.Movement of a covered glacier embedded within a rock glacier.Journal of Glaciology, 18, 79, 255-273p.
- Lliboutry L.・Arnao B.M.・Shneider B.(1977): Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca,PERU. III. Study of moraine and mass balance at SAFUNA.Journal of Glaciology, 18, 79, 275-290p.
- Mool P.K. et al.(1993): Interim report on the field investigation on the Tsho Rolpa Glacier Lake, Rolwaling valley. WECS Report,44p.
- Mool P.K.(1995): Monitoring of land cover of glaciated mountain environment, Rolwaling-Sadarmatha-(Everest) area, Nepal, using remote sensing(ERDAS IMAGINE)and GIS technique.JICA report, 29p.
- 岡本敦・大井英臣・天尾潔 (1995): ネパール中央部で1993年7月に発生した土石流災害について, 新砂防, 47-5, 23-29p.
- Reynolds J.M.(1994): Hazard assessment at Tsho Rolpa,Rolwaling Himal, northern Nepal. Technical Report, Reynolds Geo-Sciences Ltd,No J9402. 002, 56p.
- 坂井亜規子(1995): ネパールヒマラヤにおける氷河湖の熱的特性, 北海道大学大学院地球環境科学研究科, 修士論文, 23p.
- Sharma C.K.(1988): Natural Hazards and man made impacts in the NEPAL Himaraya. 142p.
- Sherestha B.M.(1989): Forest plans of NEPAL. Educational Enterprise P Ltd., 216p
- Yamada T.(1993): Glacier Lakes and their outburst floods in the Nepal Himaraya. JICA,
- Vuichard D.&Zimmermann V.D. (1986): The Langmoche Flash-Flood,Khumbu Himal, Nepal. Mountain Research and Development, 6-1, 90-93p.
- Vuichard D.& Zimmermann V.D. (1987): The 1985 catastrophic drainage of a moraine dammed lake, Khumbu Himal,NEPAL: Cause and consequence. Mountain Research and Development, 7-2, 91-110p.
- Xu D. & Feng Q.(1994): Dangerous Glacier Lakes and Their Outburst Features in The Tibetan Himalayas. Bull.of Glacier Research, 12,1-8p.

### Summary

Glacier lakes are mostly unstable as the moraine and ice dams are susceptible to breakage. The dams are generally broken due to being overtopped by rising water. Overtopping and seepage of dam is caused by the rising water level, melting and avalanche powering into the lake. Another factor leading to dam breakage is the probability of earthquakes. The sudden outburst of glacier lake water is commonly known as a Glacier Lake Outburst Flood (GLOF). There are 14 historical records of GLOFs in NEPAL. Almost all of the GLOFs occurred after 1960. In the last thirty years, GLOFs have occurred more than once every three years ( Table.2, Yamada 1993).

That is a very frequent rate compared to other natural disasters. Sudden high magnitude flow caused by the GLOF causes disasters in the downstream areas. The effect is proportional to the volume the water released. Typical examples of damages done by GLOFs are that the hydropower stations, bridges, fields, paths, and also some people are drowned. The study to predict GLOFs is now continuous in the Water and Energy Committee Secretariat (WECS) in NEPAL. A great deal has been studied about the actual condition of the glaciers and glacier lakes as sources of disaster (Yamada,1993). The studies to predict GLOFs are not only research on how to eliminate the glacier lake, but also to understand the influence of the debris movement and flash floods. Very little has been stated about the debris movement caused by the GLOF. The large magnitude of GLOF damage has its aftermath continuing for several years (Hey, 1979), because many unstable sediments deposited around the channel flow out again after the GLOF. It is important to study the cost of damages caused by sediments progressively deposited at the time of the GLOF and in the few years following.

This first study is to understand the forms and structure of the moraines enclosing the Tsho Rolpa glacier lake in Rolwaling Himal, which is the most dangerous one. The second analysis is to measure changes in the river-bed in the view of debris movement and flash flooding in the Ripimo Shar GLOF. These may give us some ideas to plan the counter-measures for GLOFs in NEPAL.

The volume of collapsed moraine depositions and the riverbed changes define the mechanism of debris movement and the flood. In Tsho Rolpa glacier lake, the forms of the end moraine and water level were measured. Tree ring analysis and the growth process of shrubs explain the stability time of the soil surface. Electrical survey is used to understand the structure of the end moraine. These data suggest the distribution of the glaciated debris and the ice core in the inner portion of the end moraine. Finally methods of depreciating the glacier lake and planning for the prevention of disaster due to GLOFs in Rolwaling valley could be set up.

The following people are acknowledged for their assistance. Dr.T.Yamada (JICA Expert), Mr.T.Kita (JICA Expert OYO-Chisitsu K.K), R.R.Maskey, S.Joshi (WECS) and Mr.T.Fukuyama (JICA Assistant), who are the team of research in work undertaken. Mr. P.K.Mool(WECS), Mr.T.Kadota and Miss A.Sakai who assisted in the collection of field data. Dr.G.R.Bhatta(WECS), Dr.T.Yamada and JICA staffs of Nepal office who advised and supervised the team during their stay in NEPAL.

## 1. Study site

Rolwaling valley is located at the foot of Mt. Gaurisankar(7146m), south of the border of Tibet in east Nepal. This valley is surrounded by mountains of about 6,000m. The study site lies in the elongated latitudinal Rolwaling valley. The upper part of the valley is covered by the complex, Ripimo Shar Glacier and Trakarding Glacier (Fig.4). The Rolwaling valley slopes are generally steep and narrow. The total catchment of the Rolwaling valley is 300km<sup>2</sup>. The slope angle of the Rolwaling River at the upper part of Beding is 12% and below Beding it is 30% (Fig.5). The mean temperature is 2°C, and from November to March is well below zero when the valley is covered with snow of about 10cm depth.

The matrix is large scale mass movement consisting of various mechanically weathered rocks, resulting in different structure and rock types. On the steep slopes one finds large rock fall and scree. At the foot, there are talus slopes and wide rock fans in the high glaciated areas. Flat areas are found only near the glaciated valleys around Na village.

The Rolwaling valley is covered with forest due to humid climate conditions. Ranging from 3,000 to 4,000m, there is mixed forest of rhododendron and fir, and above 4,000m very scattered low pine, herbs and low scattered shrubs.

Rolwaling valley is only sparsely populated by less than 1,000 people, of which approximately 300 people are living in the main village of Beding. Na village is a settlement for cattle farming and potato crops during summer.

## 2. Conditions of Rolwaling Basin

### (1) The debris movement of Ripimo Shar GLOF

The size of the scoured area of the end moraine by the GLOF is 300m long, 80m wide, and 15m deep. The total volume of scoured sediment is  $220 \times 10^3 \text{m}^3$ . The scoured sediment from the end moraine is deposited within 1,500m in length and within 300m in width; immediately downstream, and most of the sediment is deposited within 500m of the moraine(fig.6). It looks like an alluvial fan. The cross profile shows a remarkable trend of deposition in the center of the alluvial fan(fig.7). Field observation also points out the deposition forms. The average depth of the deposition within 500m of the outburst is 3m and its total volume is  $180 \times 10^3 \text{m}^3$ . Seventy percent of the sediment that was scoured from the end moraine was immediately deposited after the outburst. The deposition consists of many types of rocks of sizes ranging from 10m to the size of clay. The scoured end moraine triggered the debris flow, but the sediment particles settled within 500m downstream, and the great volume of water which continued flowing downstream caused flash floods in the lower basin. This point is also suggested by Vuichard Zimmerman(1986) about Dig Tsho GLOF.

Around Na village, a number of depositions and bank erosions describe the river side. Two wide river bed sections lie between Na and Beding. In these river conditions, the debris moved from the upper part of the basin are deposited by decreasing tractive force. The average depth of deposition is 1m, and the total volume of deposition is  $20 \times 10^3 \text{m}^3$ . Understanding these river conditions is important to predict the debris movement and to

protect the people and establishments. In the Beding village, there is also a wide river bed section where deposition of sediments are found. But according to the total trend of sediment movement scouring surpasses deposit. Near the lower part of Beding, the river bed is narrow and steep, except some parts, where it is wide. In the confluence of Rolwaling and the Bhote Kosi, the influence of the GLOF is not significant. The riverbed is slowly changing after the GLOF due to repeated sediment movements. These changes sometimes bring about small magnitude disasters such as floods and debris flow.

## (2) The state of Tsho Rolpa glacier lake

Tree ring analysis in the end moraine shows that growing trees are 30 years old and dying trees are 20 years old. Dead trees located near lake shore were influenced by the change of the water level of the lake in successive seasons. The growing trees' rings show the bad progress of growth within the last ten years. This fact shows the lake water level increases to a certain level every 10 years, which supports the development of the glacier lake(Fig.10).

The slope length of the end moraine is 400m and the height is 150m(Fig.12). The slope angle in the upstream slope is 3% and the downstream slope is 30%. The difference between seepage points and water in the lake is 50m. The moraine is formed of several types of rocks. Between the rocks, small material like sand and silt are sandwiched. Almost all of the material is rock where stunted trees about 30 years old are growing. Tree ring analysis suggests that the stability time of the moraine is at least 30 years.

The result of the electrical survey makes clear the different structures of the end moraine which are highly resistant. The existence of ice in the moraine is found above 10,000 ohm-m, from 4,000 to 10,000 ices mixed with debris, 1,000 to 4,000 is saturated with water and below 1,000 ohm-m is water(Fig.14,Kita 1995).

This field evidence shows that the structure of the end moraine is unstable. The electric survey suggested the existence of an ice core within the end moraine. The ice core inside the end moraine has the advantage to trap the water which is melted from the glaciers forming the lake(Fig.15). Accumulated data suggest that glacier lakes keep their water in an ice vessel. The following are important to understand the relations of the equilibrium of the end moraine. Understanding the melting speed of the ice core is vital for prediction of GLOFs. It is necessary to understand morainal changes and the development of the glacier lake. The ice core melts due to water and the pressure of the lake. If the water reaches the bedrock, it flows in between the bedrock and the bottom of the moraine, which causes the moraine to slip and collapse. Electric survey of the entire Tsho Rolpa glacier lake is needed to understand the transformation of the end moraine.

The measuring of seepage points and electric surveying of the moraine reveals the saturation zone vividly. The results of the electric survey show that the saturation zone is situated at the average depth of about 50m, and also the depth of the seepage point from the water surface level of the lake is about 50m. This shows that the spring might be the water from the glacier lake. The enlargement of the seepage point to the saturation zone from the lake causes the moraine to collapse. So it is significant to understand the changes of seepage discharge and the area of the saturation zone to

understand moraine stability. If there is a small quake the rippling of the lake will increase, and the overflow may carry the GLOF. These conditions of change in the ripple waves when there is a small quake may easily bring on a GLOF.

### **(3) The conditions around Tsho Rolpa**

Around the glacier lake, there are many phenomena which will trigger a GLOF, like ice collapse, rock collapse, landslide, and avalanche. The ice clinging to the steep slope of Mt. Tsoboji (6689m, more than 2000m above the lake) may be collapse and fall into the glacier lake. This would certainly increase the water pressure and cause high waves which might overtop the moraine dam.

The talus at the side moraine will be destroyed by the erosion of the contact between lake and slope. The yielded  $10^3 \times 10^4 \text{m}^3$  sediment may change the condition of the lake. At the opposite bank of the lake there are small glaciers which deposit sediment cumulatively. This cumulative deposition is an impending danger because if the deposit falls into the lake it causes waves of about 2m which might spill from the lowest trench, increasing the possibility to collapse the moraine. The probability of a GLOF is higher if the wave is 5m.

## **3. Predictions for the GLOF**

### **(1) The countermeasures for Tsho Rolpa glacier lake**

Meteorological observation, hydrological observation, studies of the distribution of the ice core and the transformation due to melting of ice at the end moraine are continuing. The development of the Trakarding Glacier should be also measured. In addition to these words, it is important to measure the side moraine collapse around Tsho Rolpa glacier lake. This survey and other operations should be continued, such as a project to decrease the water level by using Leverage to remove the rocks in the spillway. The objectives are to decrease 2~3m of water level blowing up the moraine is not needed only the use of leverage and tractive force is required. The siphon method is not suitable because of the high cost and is bulky. Remeasuring the shape, the transformation of the moraine, and the seepage condition, to understand the influence of the operations after a 2 or 3m reduction of water level, might be necessary. Repetition of the survey and the operation will have to continue until the water level is reduced by 15m. All that point, large-scale works can be started for completely eliminating the lake water. During the operation, it is possible to collapse upstream slope of the end moraine by changing the balance between the water pressure and the moraine. Measuring the water level in the lake and observing the structure of the end moraine might be helpful to predict the effectiveness of the counterbalance measures.

### **(2) The disaster control measures for Tsho Rolpa GLOF**

Using the information of the sediment movement in the Ripimo Shar GLOF helps to predict the influence of the debris movement and flash flood in the Tsho Rolpa GLOF. We assume the following small scale of the GLOF, within 20m in height of the water head and within  $10^5 \text{m}^3$  in volume of the scoured sediments. The debris flow due to the Tsho Rolpa GLOF may reach Na village. Between Tsho Rolpa glacier lake and Na, the edge

of the Ripimo Shar end moraine and the talus will be eroded and will form the bulk of the debris flow. In the glacial valley the debris flow will spread and be deposited over the wide valley floor. Crashing against the vertical right wall will decrease the tractive force. Seventy to eighty percent of the sediment produced by the GLOF may deposit around Na.

The river at Na and Beding may show greater erosion than that of the Ripimo Shar GLOF. During the flash flood the water level will rise by 10m which may wash away the potato field, bridge and path at Na and a temple and another 10 houses in Beding. Prior to the GLOF, the houses at Na village should be evacuated to the upper slope and Beding village to Gabrug or Chameko in Beding. It is possible to lower the riverbed about 5m if we blow up the falls at the lower part of Beding. If there is a rise of about 20m in water level all the houses of Beding will be destroyed (Fig.17). It is not appropriate to build dams to protect sediment because of high cost and large volume. At the lower part of Beding the slope will collapse and bank erode, and these changes may bring large scale landslides after the GLOF. Once the debris is deposited, it is easy to be transported by the following flood. There will be repeated deposition and scouring at the Bhote Kosi river. Noticeable movement may be shown even at Malepu. Below Malepu only fine sediment will reach. Around Midland the land is intensely used, and pasture and deforestation are causing fine sediment production constantly. These sediments and GLOF sediments will combine and bring the flood disaster in semipermanent wet land, by rendering fertile land less productive.

### (3) Further planning for the prediction of GLOFs

Thorough knowledge is needed to recognize the debris movement and the development trends of glacier lakes. The following is necessary to predict the GLOF hazards. Further observations should be established in regard of debris movement and flash floods. The land use plan should be changed. Hazards of disaster may be reduced, which may facilitate the construction of hydroelectric power plants, if they are useful to the local population and not threatened by frequent Himalayan earthquakes, which could cause a GLOF.

The GLOF problem is not only a problem for glacier lakes, but also the land use of the whole basin. Several branches such as river topography, forestry, and resource management should join to clear up the GLOF problem in NEPAL. Also, the projects should be jointly studied by many scholars. The project demands the consideration of the neighboring countries from the source to the mouth of river.