

平成17年度助成金使用報告

ネパール東部ヒンク・ホング地域およびブータンヒマラヤの 氷河湖の現状と拡大特性

小森 次郎*

Glacial Lake Expansion and Present Situation in Hinku and
Hongu Regions, Eastern Nepal and Bhutan Himalaya

Jiro KOMORI*

Abstract

Records of recent changes in growing ice-contact lakes in the Bhutan-China border region are investigated using satellite imagery. The results show that lake growth has continued at a growth rate of < 70 m/year in length and < 0.04 km²/year in area. In the debris-covered area of the glacier, the lake expands in stages through the initial appearance of supraglacial lakes and subsequent expansion of a coalesced lake. In the small debris-free or partially debris-covered glacier, the lake expands simply from a single lake. The initial year of appearance of most of the lakes at the southern and northern sides of the Himalayan mountains ranges from the 1950s to the 1970s and before the 1950s, respectively. Furthermore, the trace of the glacial lake outburst flood (GLOF) in the Hinku valley, and the present situation of the glaciers and the glacial lakes in the Hongu valley in eastern Nepal are confirmed by the field survey. Many boulders and coarse sands generated from the GLOF in 1998 remain distinctly and continuously at least 10 km downstream from the collapsed lake as a bare river bed with thick debris flow deposit. The assessment considered that there are no serious conditions regarding the GLOF given the present situation of both valleys. Comparison with previous data shows that the retreat speed of glaciers at the headwater of the Hongu valley is approximately 8 m/year.

Key words : global warming, glacier shrinkage, glacial lake outburst flood, eastern Himalaya,
Late 20th century

キーワード : 地球温暖化, 氷河縮小, 氷河湖決壊洪水, 東ヒマラヤ, 20世紀後半

I.はじめに

近年、ヒマラヤの山岳氷河は著しく縮小を続けており、いくつかの縮小した氷河のあとには氷河湖が形成されている。これらの氷河の融氷水は地域の貴重な生活用水やエネルギー資源として利用

されている。一方、この天然の湖はたびたび決壊し、氷河湖決壊洪水 (glacial lake outburst flood, GLOF) を生じ、下流域に被害をもたらす。そのため、氷河湖の分布や拡大傾向の把握、湖の将来像の予測は水資源の確保や防災管理をおこなう上で重要な課題である。また、湖の出現はそれ

* 日本大学文理学部自然科学研究所

* Institute of Natural Sciences, College of Humanities and Sciences, Nihon University

に隣接する氷河の縮小に大きな影響をあたえることから（例えば, Sakai *et al.*, 2000）氷河の変動を議論する上で氷河湖に注目する意義は大きい。さらに、現在は氷河と接していない湖の形成プロセスを検討する上で、現在氷河と接し、拡大を続けている氷河湖（以下「拡大氷河湖」とする）の拡大履歴の解明は重要である。氷河湖の形成・拡大に関する研究は、これまでアンデス山脈北部、ヒマラヤ山脈東部、ロッキー山脈北部、ニュージーランド南アルプス等のいくつかの氷河でおこなわれているが（例えば, Lliboutry, 1998; Yamada, 1998; Clague and Evans, 2000; Kirkbride, 1993），地域別に氷河湖の拡大特性を比較・検討した研究はこれまでに無い。また、湖の決壊の危険性評価には、堤体部分や周囲の斜面の状態を現地調査にもとづき検討する必要がある。そこで本研究は、異なる地域の氷河湖の形成・拡大状況を衛星画像と衛星写真をもとに検討し、さらに氷河湖決壊にともなう災害の特徴を明らかにするために、過去に決壊が起きた湖と今後その危険性がある湖が点在する山域で現地調査を実施した。

II . 調査地域と方法

本研究は、衛星画像データを用いたブータン・

チベット国境付近の氷河湖の拡大履歴の検討とネパール東部で実施した現地調査からなる（図1）。

拡大履歴の検討では湖の拡大傾向に地域差があることが期待されるブータン北部のヒマラヤ主脈を挟んだ北側と南側を調査対象地域とした。それぞれの氷河湖の形成・拡大状況について衛星写真、および衛星画像データをもとに検討した。使用した資料は1967年および1968年撮影のCorona衛星写真、1991年、2000年および2001年のLandsat衛星画像、1999年および2001年SPOT衛星画像で、幾何補正された画像と旧ソ連二十万分の一地形図および登山用地図（China Mountaineering Association and Mountaineering Association of Tibet, 1995）を基図として用いた。湖岸線は肉眼と一部は画像解析ソフトScion Image 4.0.2(Scion, Frederick, MD, USA)による画像処理で抽出し、湖の面積は描画ソフトCanvas 9(ACD System)を用い測定した。

現地調査は、ネパール東部のヒンク谷とホング谷で2005年9月27日～10月18日に実施した。調査範囲は、氷河に接している氷河湖の現況を明らかにし、さらに氷河湖決壊による周辺の影響を把握するために、拡大氷河湖と決壊洪水の履歴をもつ湖が分布する流域で、なおかつ調査期間や治



図 1 調査位置図 . A : ヒンク・ホング地域 . B : ブータン北部 / 中国国境地域の調査範囲 .

Fig. 1 Location map. A: Hinku and Hongu regions. B: Study area in Bhutan-China border region.

安等の条件を満たしている地域とした。調査は、
1. ホング谷源流域の拡大氷河湖の堤体部分の簡易測量と決壊に関わる事項（周辺斜面の地形、氷の有無、流出水の状況など）の記載、2. ホング谷上流の4つの氷河前縁部の簡易測量と既存データとの比較、3. 1998年に決壊したヒンク谷サバイ氷河湖（別名 Tam Pokhari）の堤体部と下流域の概査である。

III. 結果と考察

1) ブータンヒマラヤ周辺の氷河湖の拡大傾向

ブータン北部とチベットの国境付近に分布する氷河湖のうち、最近40年間に拡大を示した湖は14であった。これらの氷河湖の拡大プロセスは次の2つのパターンに分けることができる。

当初から単一の水域として拡大を続ける湖。

これは主として面積の小さな圈谷氷河とクーラカンリ山塊北面やヒマラヤ主脈の北面の谷氷河にみられ、消耗域の表面の岩屑が少なく、氷体が露出している氷河の下端部に認められる。氷河湖の出現から拡大の停止までは20～30年間で終了するものが多い。このような湖で現在も拡大を続けている湖の拡大速度はおおむね $0.01 \text{ km}^2/\text{年}$ 以下と小さい。

初期の複数の小さなスープラグレイシャルレイク（氷河上の湖）の出現と、それに引き続く一つの水域への融合と拡大を示す湖（Kirkbride, 1993; Yamada, 1998）。

水域の融合までの期間は10～20年程度のものが多い。これらの湖は主として消耗域の多くが岩屑に覆われた氷河に存在しており、大きく拡大した湖の下流部は複雑に入り組んだ湖岸線を示す。全体の拡大期間は少なくとも40年程度ある。

拡大氷河湖の成長速度はヒマラヤ主脈の南側で湖の長さ方向が最大70m/年、面積で最大 $0.04 \text{ km}^2/\text{年}$ であった。一方、北側では長さ方向が40m/年、面積が $0.03 \text{ km}^2/\text{年}$ となり、南側の方が早い。このような地域差は氷河の後退量（Karma et al., 2003）や氷河の流動速度の南北格差（Kääb, 2005）が原因として考えられる。さらに北側では、水域の上流部が谷の縦断形の遷急点に近づ

き、拡大可能な範囲の終盤に達している氷河湖が多くみられた。したがって、現在の湖が拡大期間の序盤～中盤にあるのか、それとも終盤にあるのかといった違いも拡大速度の違いの原因として考えられる。湖の出現年は、過去40年間の拡大速度から推定するとヒマラヤ主脈の南側で1970年代～1950年代、北側で1950年代～それ以前となる。ヒマラヤ主脈の南側の谷氷河の涵養域は、北側と比べて周囲が急峻で側壁からの岩屑の供給が盛んであり、岩屑に被覆される消耗域の割合が大きい。このような、岩屑被覆型氷河では氷河の縮小は表面の不均質な沈降として現れ（Iwata et al., 2000; Kadota et al., 2000），明瞭な湖盆地形はすぐには成立しにくいと考えられる。一方ヒマラヤ主脈の北側は、南側と比べて氷河の周りに急峻な斜面が少なく、消耗域表面の岩屑は少ない。そこでは氷河が少しでも縮小に転じた場合、氷の溶解は氷河末端から明瞭に進むことが予測される。そして、ターミナルモレーンのすぐ上流に湖盆地形が成立し、岩屑に被覆された南側の氷河よりも早くに湖が出現したと考えられる。今後、氷河後退量や氷河上の岩屑被覆量を定量的に南北で比較し、議論を進めていきたい。

2) ネパール東部ヒンク谷のサバイ氷河湖における決壊洪水

ヒンク谷源流の標高約4350mのサバイ氷河湖（Sabai Tsho又はTam Pokhari）は1998年9月に決壊した（口絵2図1, 2）。当時の状況や被害に関する報告はあるが（Dwivedi et al., 2000），発生後の地形変化や堆積物の詳細については明らかになっていない。今回の現地調査では決壊地点の約10km下流から河床を遡ることができた。クオテの小さな集落（決壊地点から7.5km下流）では河床中央に厚さ約5mの礫層が露出する（口絵2図5）。この露頭での堆積物は、細粒でやや有機質な基質に支持される亜円礫の下位層と、粗砂～細礫の基質と一部礫支持となる亜角～亜円礫の上位層に分けられた。2層の間には根を張ったまま枯死してから間もない灌木が見られたことから、2層の境界面が1998年の決壊洪水以前の地表であると判断された。また、上位の礫層には明

瞭なフローユニットが見られないことから、この礫層は1998年の氷河湖決壊洪水で時間の間隙をもたずに一連の土石流として堆積したものと考えられる。これらの堆積物の表面は、氷河湖決壊洪水の発生から7年後の現在、貧弱な地衣と草本の繁茂が認められる(図2図5,6)。2001年撮影のLandsat ETM画像では、このような河床は幅50~100m程の明灰色の谷として決壊地点から約11km下流まで追跡できる。これらは主に厚さ数mの土石流堆積物を載せる場所と、土石流によって侵食された崖錐や低位段丘の脚部からなる(図2図1)。概算ではこの決壊によって数10万m³の岩屑が移動したと考えられる。また、サバイ氷河湖は決壊以前と比べるとおよそ50m低下しており(Dwivedi et al., 2000; 図2図4)、1998年の決壊では約1000万m³の湖水が決壊したと考えられる。現在、湖水は安定した表流水としてV字状の開口部から流出しており、モレーンは上下流方向の奥行きが150m以上あり、デッドアイスもなく安定している(図2図3)。ターミナルモレーン内部や近傍には氷体は認められないことから、今後再び急激な逸水が起きる可能性は低い。

3) ネパール東部ホング谷の氷河湖の現況と決壊の危険性の評価

ホング谷源流域の氷河湖のうち衛星画像上で水域が氷河と接続している湖で、アプローチが可能であった6つの湖について堤体部分の簡易測量と周辺斜面の踏査をおこない、さらに氷河湖決壊の可能性について評価した。

ホングテン氷河中流部の氷河湖: Higuchi et al. (1978) の HX150 氷河に付随する水域。湖の下流約500mまでは岩屑に覆われたデッドアイスが残存しており、氷河湖の周辺では今でも地形変化が続いていると考えられる。ただし、周囲の斜面はなだらかなため氷体や岩盤の水域への急激な崩落は考え難い。流出水は湖の出口で伏流しているが、岩屑の間を流れている被圧はしていない。また、湖の堤体の役目となるモレーンが厚く安定していることから、氷河湖決壊の差し迫った危険性は小さい。

ホングヌブ氷河下流の氷河湖: Higuchi et al. (1978) の HX220 氷河に付随する水域。この氷河湖については、1991年におこなわれた測量の記録と写真が残されており(CREH, 1999)、それには後退しつつある氷河と湖の北西端とが接していることが示されている。今回の調査では、氷河は湖岸から離れており、14年間で氷河湖の拡大が停止したことがわかった。周囲の斜面、堤体の厚さ、流出水の状況から判断すると湖の決壊の可能性は低い。

パンチポカリ中央の氷河湖: Higuchi et al. (1978) の HX240 および HX250 氷河に付随する水域。水域は氷河とは接しておらず拡大は止まっている。周囲の斜面、堤体の厚さ、流出水の状況から判断すると湖の決壊の可能性は低い。

ホング氷河下流の氷河湖: Higuchi et al. (1978) の HX330 氷河に付随する水域。ホング谷本流に位置するホング氷河に形成された氷河湖で、湖の上流端より上流側にデッドアイスを内在した細かい起伏をもつ岩屑被覆型氷河が続く。湖岸にはホング氷河からの流入土砂によるデルタが形成されており、水域が拡大していないことがわかる。また、周囲からの氷体や岩盤の湖への崩落は考えにくく、決壊の可能性は低い。

チャムラン峰北西の氷河湖: Higuchi et al. (1978) の HX440 氷河に付随する水域。湖が直接氷河の氷体と接しており、現在も湖が拡大を続けていることがわかる。しかし、水域に接する氷河には山側へ後退するスペースがほとんど残されていないので、水域の拡大は長くは続かないと考えられる。周辺の斜面は急峻で、崩落した岩盤の突入の可能性がある。また、斜面上部で発生した雪崩は湖面近傍に達している。一方、湖の堤体部分は厚さがあり、流出水は湖の出口で伏流しているが岩屑の間を流れている被圧はしていない。したがって、氷河湖決壊の差し迫った危険性は小さい。ただし、ホング谷本流との合流地点で本流からの浸食が進んだ場合、堤体の脚部がえぐられて不安定になる可能性がある。

チャムラン峰南西の氷河湖: Higuchi et al. (1978) の HX470 氷河に付随する水域。湖の堤

体北西側からは灰白色の崩積岩塊がホング谷本流にまで続いている。周囲よりも明らかに淡色を示すこの岩屑は、堤体の北西部にある深さ約30mのV字状の新鮮な崩壊地形から伸びており、さらにホング谷との合流地点から約2km下流まで連続していることが2001年撮影のLandsat画像で確認できる。これらの特徴は、過去に岩屑の崩壊を伴った湖水の溢流があったことを示す。一方、現在の湖は氷河と接しておらず、氷河湖の拡大は停止している。水域の上流側には急傾斜の岩盤とそれに載る氷体が分布し、崩落の可能性も考えられる。以前に溢水した影響で湖の水位は下がっており、堤体は上下流方向に十分な奥行きをもっている。また、流出水は湖の出口で伏流しているが、岩屑の間を流れていて被圧はしていない。したがって、氷河湖決壊の差し迫った危険性は小さい。ただし、ホング谷の本流との合流地点で本流からの浸食が進んだ場合、堤体の脚部がえぐられて不安定になる可能性がある。

4) ホング谷の近年の氷河変動

ホング谷上流の4つの氷河について簡易測量と三次元写真測量を目的とした写真撮影をおこなった。対象とした氷河はホングヌブ氷河とその南側の2つの氷河、およびホング氷河の南東隣の氷河で、Higuchi *et al.*(1978)の氷河台帳のコードではそれぞれ HX220, HX210, HX200、および HX350 に相当する。これらの氷河は1991年の前出の調査によって測量基点の設置と氷河末端の測量がおこなわれている(CREH,1999)。1991年の測量結果と比較すると、過去14年間の氷河の後退量は年平均で7.5～8.7m/年であった。今後は三次元写真測量の解析から求めた表面低下量もあわせて質量変化の検討を進める予定である。

謝 辞

本研究では、平成17年度東京地学協会・調査研究助成金を使用した。現地調査に先立ち、海洋研究開発機構の門田 勤博士、矢吹裕伯博士、滋賀県立大学の伏見碩二教授、日本大学の梅村 順氏から現地の情報とアドバイスを受けた。現地立ち入りに関してトリップバン大学のVishnu Dangol博士の協力を受けた。写真測

量については株式会社保全工学研究所の中山聰子氏に協力していただいた。ここに記して御礼申し上げます。

文 献

- China Mountaineering Association and Mountaineering Association of Tibet (1995) *Immortal Mountains in the Snow Region*. Tibet People's Publishing House.
- Clague, J.J. and Evans, S.G.(2000) A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia. *Quat. Sci. Rev.*, **19**, 1763-1783.
- CREH (1999) *CREH data report 2, Basic studies for assessing the impacts of the global warming on the Himalayan cryosphere, 1994-1998*. IHAS and DHM.
- Dwivedi S.K., Acharya, M.D. and Simard R. (2000) The Tam Pokhari glacier lake outburst flood of 3 September 1998. *J. Nepal Geol. Soc.*, **22**, 539-546.
- Higuchi, K., Fushimi, H., Ohata, T., Iwata, S., Yokoyama, K., Higuchi, H., Nagoshi, A. and Iozawa, T. (1978) Preliminary report on glacier inventory in the Dudh Kosi region. *Seppyo*, **40**, 78-83.
- Iwata, S., Aoki, T., Kadota, T., Seko, K. and Yamaguchi, S. (2000) Morphological evolution of debris cover on Khumbu Glacier 1978-1995. *IAHS Publ.*, **264**, 3-11.
- Kääb, A. (2005) Combination of SRTM3 and repeat ASTER data for deriving alpine glacier flow velocities in the Bhutan Himalaya. *Remote Sens. Environ.*, **94**, 463-474.
- Kadota, T., Seko, K., Aoki, T., Iwata, S. and Yamaguchi, S. (2000) Shrinkage of the Khumbu Glacier, east Nepal from 1978 to 1995. Debris-Covered Glacier. *IAHS Publ.*, **264**, 235-243.
- Karma, Ageta, Y., Naito, N., Iwata, S. and Yabuki, H. (2003) Glacier distribution in the Himalayas and glacier shrinkage from 1963 to 1993 in the Bhutan Himalayas. *Bull. Glaciol. Res.*, **20**, 29-40.
- Kirkbride, M.P. (1993) The temporal significance of transitions from melting to calving termini at glaciers in the central Southern Alps of New Zealand. *Holocene*, **3**, 232-240.
- Lliboutry, L. (1998) Glaciers of Chile and Argentina. in *Satellite Image Atlas of Glaciers of the World: South America* edited by Williams, R.S., Jr. and Ferrigno, J.R., US Geological Survey, Professional Papers 1386 I, 109-206.
- Sakai, A., Chikita, K. and Yamada, T. (2000) Expansion of a moraine-dammed glacier lake, Tsho Rolpa, in Rolwaling Himal, Nepal Himalaya. *Limnol. Oceanogr.*, **45**, 1401-1408.
- Yamada, T. (1998) *Glacier lake and its outburst flood in the Nepal Himalaya, Monograph no. 1. Data Center for Glacier Research. Japanese Society of Snow and Ice.*