

Studies on glacial lake development in the eastern Nepal Himalaya from 1964 to 2010

（ネパール・ヒマラヤ東部における1964～2010年の氷河湖の発達に関する研究）

学位論文内容の要旨

Recent climate change has rendered widespread problems in the Himalaya: one of the most prominent problems is glacier retreat leading to the formation and expansion of glacial lakes. Such lakes often break and cause a glacial lake outburst flood (GLOF) resulting in loss of property and life. Mool et al. (2001) identified 20 potentially dangerous glacial lakes in the Nepal Himalaya: among them, 12 lakes lie in the Dudh Koshi basin. However, none of them have been studied in detail except some works in the Imja Glacier Lake. Owing to methodological limitations, detailed morphological mapping has not been carried out yet. This study aims (1) to develop methodology for detailed 3D topographic mapping and (2) to analyze and discuss glacial lake development in the Dudh Koshi basin.

This study used the images of Corona KH-4A (1964) and Advanced Land Observing Satellite (ALOS) PRISM (2006) to generate digital terrain models (DTMs) and topographic maps of glacial surfaces/lakes and their surroundings in the Leica Photogrammetric Suite (LPS) platform. The DTMs and topographic maps provided excellent representation of the elevation and micro-landform topography of the glacier surface, such as its supra-glacial ponds/lake, surface depressions, ice cliffs, and moraine ridges, with an error of about ± 4 m (maximum). This study concluded that DTMs produced from the Corona and ALOS PRISM images are suitable for the use in studies of the surface change of glaciers.

There were altogether 58 glacial lakes in 1964, which climbed to 74 in 1992 and 90 in 2010 with the total surface area of 4.45, 7.37 and 8.09 km² for the respective years. This suggests the slower expansion of the glacial lakes from 1992 to 2010 in comparison to the earlier period. Likewise, there were 13, 16 and 17 glacial lakes larger than 0.01 km² in 1964, 1992 and 2010. Most of the lakes have not been expanding since 1992. Expansion of the most dynamic and dramatically developed three lakes (Imja, Chamlang-North and

Chamlang-South) amounted to the total lake expansion during 1992 and 2010; hence, all other lakes have not been expanding or only small expansion has occurred from 1992 onward. The surface areas of glaciers (clean type) in 1964 and 2008 were 140.6 and 118.1 km² respectively: the 22.5-km² glacial area decreased, which amounted to 16% loss. Two glaciers with surface area of 39,270 and 90,540 m² in 1964 were completely disappeared between 1964 and 2008.

Average surface lowering of the Imja glacier was 16.9 m for the dead-ice area west of the lake and 47.4 m for the glacier surface east of the lake. Between 1964 and 2002, the lake surface lowered by 82.3 m. The glacier surface in 1964 in the up-glacier area was considerably lower than the top of the lateral moraines, in contrast with, the down-glacier area where glacial surface was as high as lateral moraine ridges. This suggests that by 1964, there had already been a greater degree of glacier ice melting in the up-glacier area. Further, the gentler surface condition in the lower half of the mapped area had already become conducive to the initiation of the small supra-glacial ponds before 1964.

The depth of the Chamlang-S Lake was found to be 87 m, which was measured by sonar-sounding machine (Eagle Fish Elite 500c) on a boat. The depth measurement by the machine was also calibrated with fishing line in a supra-glacial pond. Extensive surface lowering that is as high as 156.9 m is visible in the up-glacier area of the Chamlang-South Glacier. The average lowering of the glacier for the 42 years from 1964 to 2006 in the entire area was 37.5 m with average rate of surface lowering 0.9 m/year. The average surface lowering for the 45 years from the 1964 glacier surface to the 2009 lake bottom was 99.5 m at a rate of 2.2 m/year, and the minimum and maximum surface lowering in the lake during the period was 12 m and 153.8 m, respectively.

Morphological studies based on the topographic maps in 1964 (pre-GLOF) and 2006 (post-GLOF) in and around the Sabai Tsho revealed the following pre-GLOF conditions: narrow damming terminal moraines, lake water level as high as terminal moraine ridge, and steep mountain slope with hanging ice/glacier immediately up from the lake. These three conditions are considered as the major factors to assess the GLOF danger from the 'potentially dangerous' lakes by Mool et al. (2001). Morphological studies on the five large 'potentially dangerous' lakes, exhibit that only Chamlang N and Chamlang-S lakes have high potentiality to GLOF occurrence and that Imja Tsho and Dudh Pokhari have medium potentiality, while Sabai Tsho has smaller potentiality.

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	渡 邊 悌 二
副 査	特任教授	平 川 一 臣
	准教授	白 岩 孝 行
	助 教	澤 柿 教 伸
	教 授	岩 田 修 二 (立教大学観光学部)

学 位 論 文 題 名

Studies on glacial lake development in the eastern Nepal Himalaya from 1964 to 2010

(ネパール・ヒマラヤ東部における1964～2010年の氷河湖の発達に関する研究)

申請者は、ネパール・ヒマラヤ東部ドウドウ・コシ (Dudh Koshi) 流域を対象地域として、1960年代以降の氷河の表面形態の変化および氷河湖の発達を明らかにした。特に、これまで不可能とされてきた1960年代の氷河の表面形態を等高線間隔1 mで図化することに初めて成功するとともに、これまでの図化精度を飛躍的に向上させることができた。従来の研究によると、ネパール・ヒマラヤに存在する氷河湖のうち、20の氷河湖が特に危険であると考えられているが、対象地域には、そのうち12の氷河湖が存在している。調査対象地域は、ヒマラヤの中でも危険度が高い氷河湖がもっとも密集していると考えられる。

本研究では、まず、2006年のALOS PRISM画像と1964年のCorona画像から詳細な数値標高モデル (Digital Elevation Model: DEM) および地形図を作成した。Corona KH-4A画像を用いた三次元図化はこれまでは行われておらず、図化手法の開発が必要となる。このため、本研究では、イムジャ氷河とイムジャ氷河湖を対象として、Leica Photogrammetric Suites (LPS) を用いた手法開発を行った。Corona画像に欠落している地上基準点 (GCP) データは、ALOS画像から得ることで補完した。その結果得られたDEMは、最大4 mの誤差に収まった。

次に、ドウドウ・コシ流域全域における氷河湖の発達について、Corona KH-4A, LANDSAT TM5 およびALOS 画像を用いて二次元解析を行った。1964年には合計58の氷河湖が認められたが、1992年には74に、2010年には90に増加していた。それぞれの年におけるこれらの氷河湖の総面積は、4.45 km², 7.37 km², 8.09 km²であった。このことから流域全体では、1992年以降に氷河湖の発達速度が低下していることがわかった。面積が0.01 km²以上の大型の氷河湖に着目して解析した結果、氷河湖の拡大は、イムジャ、チャムラン南、チャムラン北の3つの氷河湖で著しく、その他の氷河湖の面積はほとんど変化していないことが明らかになった。さらに、2000年以降に著しい面積拡大が認められるのは、イムジャ氷河湖のみであることもわかった。

特に著しい発達速度を示した、イムジャ、チャムラン南、チャムラン北の3つの氷河湖について、1964～2010年の期間のうち8年度分について湖の形態および面積の二次元解析を行

った。また、イムジャおよびチャムラン南の両氷河湖とその氷河について、1964～2006年にかけて氷河表面の形態について三次元解析を行ったところ、イムジャ氷河では、末端付近の氷河表面高度がラテラル・モレーンよりも高い場所があることが判明した。イムジャ氷河では、氷河湖西部（氷河末端部）で 16.9 m、東部（氷河上流部）で 47.4 m の氷河融解が認められた。イムジャ氷河湖の湖面高度は 1964 年から 2002 年の間に 82.3 m 低下していた（Sakai et al. 2003 による湖水深地図を利用）。チャムラン南氷河でも、氷河表面高度低下量は、末端付近で小さく上流部で大きかった。なお、氷河湖の底面で生じた氷河融解量の計算を進めるために、2009 年に現地でソナー・サウンディングにより、湖水深地図を作成した。2009 年時点の湖の最大深度は 87 m で、水量は $35.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ であった。

さらに、これらの結果に加えて、氷河湖決壊を発生させる要因のうち地形学的・形態学的要因（ターミナル・モレーンの幅、ターミナル・モレーンと湖水面の比高、湖に連続する基盤岩壁の角度の大小・比高および落石の可能性、懸垂氷河崩落の可能性）を中心に、特に重要と考えられる 5 つの氷河湖（イムジャ、チャムラン南、チャムラン北、サバイ・ツォ、ドゥドゥ・ポカリ）について、その決壊発生の危険度を評価した。この結果は、イムジャ氷河湖がもっとも危険であるという従来から考えられていた評価とは異なる結果をもたらした。これまでに詳しい調査がまったく行われてこなかったチャムラン南およびチャムラン北氷河湖の今後の変動に注目する必要があることが明らかになった。

以上のとおり、申請者は高精度の三次元処理によって氷河表面形態変化と関連づけることでヒマラヤの氷河湖の発達に関する新知見を得たものであり、ヒマラヤのみならず世界中の氷河表面形態変化の研究および氷河湖発達に関する研究に対して貢献するところ大なるものがある。

審査委員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院博士課程における研鑽や修得単位などもあわせ、申請者が博士（環境科学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。