

報告番号

※

第

号

主 論 文 の 要 旨

論文題目 Monitoring of glaciers and their regional shrinkage over mid-eastern Himalaya using high resolution satellite observations
(高解像度衛星データをもちいた東ヒマラヤにおける氷河縮小に関する研究)

氏 名 OJHA Sunal

論 文 内 容 の 要 旨

The Himalayan range scales over 2,400 km in length covering the national territory of Bhutan, India, China and Nepal which feeds the major river basins in Asia. The glaciers in this region are the major source to maintain hydrological regime of the rivers which, in recent decades, receive largest threat to climate change. The scientific evidences show that the glaciers in Himalayan region are retreating at the rate similar to those in other part of the world and more aggressive melting is reported for last few decades.

To enhance our understanding on Himalayan glaciers and to fill the scientific gap between global and regional scale, first we studied 5301 glaciers in mid-eastern Himalaya which covers the area of $5691 \pm 893 \text{ km}^2$. Those glaciers were manually delineated by using 104 ALOS derived satellite images. We found that 4459 glaciers covering the area of $1853 \pm 141 \text{ km}^2$ are debris free ice (C-glaciers) whereas 842 glaciers covering the area of $3839 \pm 753 \text{ km}^2$ are debris covered (D-glaciers) which is a novel estimation in Mid-eastern Himalaya. Again 842 debris covered glaciers are separated into clean part (C-part) and debris part (D-part) covering the area of $2867 \pm 167 \text{ km}^2$ and $971 \pm 236 \text{ km}^2$, respectively. This inventory reveals comparatively better status of glaciers as compared to other inventories because of high resolution images (2.4 m, ALOS-PRISM) from recent years were utilized during the delineation. The D-glaciers are situated distinctly flatter than that of C-glaciers. Over the regional scale, D-part coverage is found to be declining from west (Langtang massif) to east (Bhutan massif).

At the second stage, the glacier polygons from ALOS images (2006-2010) are compared with other set of glacier polygon obtained in 1992 based in aerial photographs to analyse decade glaciers shrinkage over the Nepal territory. Our shrinkage analysis is confined to Nepal territory: Ganesh Himal in the west to Kanchenjunga in the east due to limitation on data availability. Since 1992, the total glacier area decreased from $1616 \pm 247 \text{ km}^2$ to $1477 \pm 232 \text{ km}^2$ giving a -8.5% area change ($-0.5 \pm 0.1 \%$ a^{-1}) during the study period. The area of C-glaciers changes from $481 \pm 35 \text{ km}^2$ to $427 \pm 32 \text{ km}^2$ whereas D-glaciers changes from $1136 \pm 212 \text{ km}^2$ to $1050 \pm 200 \text{ km}^2$ giving -11.2% (-0.70% a^{-1}) and -7.5% (-0.47% a^{-1}) area changes, respectively. The small glaciers for both C- and D-type has lost its larger proportion of area whereas medium and large size glaciers has lost its smaller proportion during the last two decades. In total, 61 C-type glaciers covering the area of $2.4 \pm 0.3 \text{ km}^2$ has totally disappeared during the study period which is one of the interesting result of this research. The D-glaciers are found to be shrank in lower rate than that of C-glaciers which is due to insulating properties of supraglacial mantle. Our study showed high rate of shrinking in recent decades as compared to similar study done previously in the similar region. Area change shows significant correlations with minimum elevation ($r = 0.30$, $p < 0.0001$), maximum elevation ($r = -0.18$, $p < 0.0001$), altitudinal range ($r = -0.50$, $p < 0.0001$), glacier area ($r = -0.62$, $p < 0.0001$), and mean slope ($r = 0.16$, $p < 0.0001$) suggesting that larger glacier tends to have lost larger area (but smaller percentage) and vice versa. Intra-regional analysis of the glacier change clearly shows high rate of shrinking in western massif as compared to eastern massifs during the study period.

To understand the dynamics of D-part formation, we, thirdly, investigated the relation between D-part area and its corresponding potential debris supply (PDS) slope for 842 D-glaciers. The PDS slopes in southern-side has better correlation with its debris-part formation than that situated in northern-side of Himalayan barrier. The correlation weakens as it goes from eastern to western massifs which can be related to its larger PDS area and steeper PDS slope in western massifs. Further investigation shows PDS slopes facing SE to W orientation has stronger control over D-part formation which is related to diurnal freeze-thaw cycle in southern slope of mountain barrier. The PDS gradient also play vital role in dimension of D-part area whereas latitude has less or no influence on D-part formation in this study area.

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目 高解像度衛星データをもちいた東ヒマラヤにおける氷河縮小に関する研究

氏 名 OJHA Sunal

論 文 内 容 の 要 旨

ヒマラヤ山脈は、ブータンやインド、ネパールを含めたアジアの主要な流域に跨っており、その長さは2,400 km 以上にも及んでいる。この地域の氷河は、この数十年間気候変動によって脅威にさらされている河川の流量を維持するための重要な資源である。近年の研究によると、この地域の氷河は、他の地域に位置する氷河と比較してほぼ同等の割合で縮小傾向であるものの、最近数十年間に限っては急速に縮小していることが示されている。ヒマラヤ地域の氷河変動をより詳細に理解するために、まず、東中央ヒマラヤに位置する 5301 の氷河 ($5691 \pm 893 \text{ km}^2$)を研究対象とし、104 枚の ALOS (Advanced Land Observing Satellite)画像を用いて各氷河を抽出した。

その結果、この地域の 4459 の氷河 ($1853 \pm 141 \text{ km}^2$)は、岩屑被覆域を持たないクリーンな氷河(以下 C 型氷河)であるのに対して、842 の氷河 ($3839 \pm 753 \text{ km}^2$)が末端に岩屑被覆域をもつデブリ氷河(以下 D 型氷河)であることが新たに明らかとなった。分類した D 型氷河のうち、裸氷域と岩屑被覆域の面積はそれぞれ $2867 \pm 167 \text{ km}^2$, $971 \pm 236 \text{ km}^2$ であった。作成した氷河インベントリーは、氷河を手動抽出する際に 2006 年から 2010 年に取得された高解像度衛星画像(ALOS-PRISM)を用いているため、中解像度衛星画像を用いて作成された他の氷河インベントリーよりも信頼性が高いと考えられる。D 型氷河は、C 型氷河と比較して明らかに傾斜が緩い場所に位置していた。また地域毎に比較すると、岩屑被覆域率は西(Langtang 山域)から東(Bhutan 山域)の地域にいくに従って低下していることが明

らかとなった。

次に 2006 年から 2010 年の ALOS 画像を用いて作成した氷河のポリゴンと、1992 年の空撮画像から作成した氷河ポリゴンの比較を行い、ネパール・ヒマラヤ内における氷河変動の解析を行った。この解析は、データが限られていたため、西の Ganesh Himal から東の Kanchenjunga までを対象域とした。その結果、この地域の氷河面積は 1992 年以降 $1616 \pm 247 \text{ km}^2$ から $1477 \pm 232 \text{ km}^2$ に縮小しており、その割合は -8.5% ($-0.5 \pm 0.1\% \text{ a}^{-1}$) であった。C 型氷河の面積は $481 \pm 35 \text{ km}^2$ から $427 \pm 32 \text{ km}^2$ と変化し、D 型氷河の面積は $1136 \pm 212 \text{ km}^2$ から $1050 \pm 200 \text{ km}^2$ となった。それぞれの面積変化率は、C 型氷河が -11.2% ($-0.70\% \text{ a}^{-1}$)、D 型氷河は -7.5% ($-0.47\% \text{ a}^{-1}$) であった。また、C 型、D 型に関わらず小型氷河は、この 20 年間でその面積の多くが縮小したのに対して、中、大型氷河の縮小量は小さいことが示された。さらに、1992 年から 2000 年代後半の間、 $2.4 \pm 0.3 \text{ km}^2$ に相当する 61 の C 型氷河が消失したことが本研究によって明らかとなった。一方で、D 型氷河は岩屑被覆域の持つ融解抑制効果によって、C 型氷河と比較すると融解速度が低く抑えられている。本研究は、過去に類似した地域を対象とした研究結果と同様に、この地域の氷河が最近数十年で急速に縮小していることを示している。2 時期の氷河面積変化は、各氷河の最低標高値 ($r=0.30, p<0.0001$)、最高標高値 ($r=-0.18, p<0.0001$)、標高範囲 ($r=-0.50, p<0.0001$)、氷河面積 ($r=-0.62, p<0.0001$)、平均傾斜角 ($r=0.16, p<0.0001$) と有意な相関関係にあった。また、大型氷河の消耗した面積自体は広いが、氷河面積に対する割合は小さい一方で、小型氷河の消耗面積は狭いものの、氷河面積に対する割合は大きい傾向にあることが示唆された。対象域における地域毎の氷河変動解析を行ったところ、西側に位置する氷河は、東側の氷河と比較して急速に縮小していることが示された。

最後に、岩屑被覆域形成の原因を理解するために、842 の D 型氷河を対象として、各岩屑被覆域とその周辺の斜面(Potential Debris Supply, PDS)との関係を調査した。その結果、ヒマラヤ山脈の南側斜面に位置する氷河の PDS は、北側の氷河の PDS よりも岩屑被覆域の面積と良い相関があることが明らかとなった。また、両者の面積の相関は東から西へいくに従って弱まるが、これは西へ行くほど PDS の面積が大きく、急傾斜であるためと考えられる。さらに、南東から西を向く PDS が、岩屑被覆域の形成を支配していることが明らかとなったが、これは南側斜面における日中の凍結融解作用が大きいためと考えられる。また、PDS 面積と傾斜の関係性から PDS の傾斜は岩屑被覆域の形成に重要な役割を果たし

ていると考えられる。一方、緯度と岩屑被覆域の形成には大きな関係性は見られなかった。