

# 総合的なヒンドゥークシ・ヒマラヤの氷河湖決壊洪水の対応方策の検討

## 福井弘道

### Comprehensive GLOF (Glacial Lake Outburst Floods) Management Plan in the Hindu Kush – Himalaya (HKH)

#### Hiromichi FUKUI

**Abstract:** Glaciers in the Hindu Kush – Himalaya (HKH) region are a key focus area for rapidly retreating glaciers as a result of global warming. As the glaciers retreat, lakes form behind the newly exposed terminal moraines. Most of the glacial lakes in the HKH region have appeared within the last five decades, and some of these have grown very quickly in size. A rapid accumulation of water in the lakes can lead to sudden breaching of their unstable natural moraine dams. Huge amounts of water and debris are then released, in what are known as Glacial Lake Outburst Floods (GLOFs). This study aims to develop a GLOF risk management system including an EWS in the HKH region to enhance adaptive capacity for generating resources in coordination with the main stakeholders. The goal is to realize increase living standard, including assisting community-level efforts to establish mechanisms to protect people exposed GLOFs.

**Keywords:** GLOF、早期警戒システム（Early Warning System）、リモートセンシング（Remote Sensing）、気候変動適応策（Climate Change Adaptation）

#### 1. はじめに

IPCC 第4次報告書でも指摘され、一部ヒマラヤの氷河に関する記述が 2010 年に誤りであることが認められたが、地球温暖化など地球規模の気候変動により、世界各地に存在する多くの氷河が融解、縮退し、氷河の融解水が堰き止められてできる「氷河湖」が拡大・増加している可能性はかなり高い。ヒマラヤ山系に存在する氷河においてもこのような傾向は認められ、氷河湖の決壊による突発的な洪水リスク（氷河湖決壊洪水（GLOF (Glacier Lake Outburst Floods)）が高まりつつあり、下流域の人命や生活基盤、社会基盤、さらには生態系や水資源の利用問

題などに多大な影響を与えることが懸念されている。ICIMOD（国際山岳地域開発センター）は 1999 年から 2005 年にかけて、最初の氷河湖のインベントリを作成し、ヒンドゥークシ・ヒマラヤ (HKH) のヒマラヤ地域では 8790 の氷河湖が形成され、そのうちの 203 が決壊の危険性が高いとし、その後その一部の見直し調査が行われている（, 2010）。

Scherler, et al. (2011) の衛星画像を用いた解析によると、2000 年から 2008 年までの間に、ブータンやネパールなどモンスーンの影響する地域では、デブリで覆われ低い傾斜の末端部を持つ氷河は停止しているものの、65%以上の氷河は後退している。一方、同じ期間に偏西風の影響するカラコルム地域では、50%以上の氷河が前進あるいは停止している。Gardelle et al. (2011) は、HKH の 7 つの地域を事例にランドサットの画像を用いて、1990 年から 2009 年までの氷河湖の変動を調査した結果、一般的に

福井弘道 〒487-8501 愛知県春日井市松本町 1200

中部大学 中部高等学術研究所 国際 GIS センター

Phone: 0568-51-6682

E-mail: fukui@isc.chubu.ac.jp

HKH の東部では、氷河湖の数も多く、大きくなつていて多くが氷河の前面に形成されているのに対し、西部では数も少なく小さくなつていてその多くは、氷河表面に形成されているとした。具体的にこの 20 年間に、ブータンやネパールでは、25 から 45ha/年の速度で拡大し、西部インドではおよそ 4ha/年にとどまり、パキスタンやアフガニスタンでは、逆に 3ha/年から 8ha/年の速度で縮小していることが分かった。このように、東西に広い HKH 地域では、気象条件が異なり、その変動も西と東では氷河や氷河湖の変動実態が異なっている。

国連の防災グローバルファシリティー (the Global Facility for Disaster Reduction and Recovery (GFDRR)) では、潜在的な GLOF のリスクに対して、モニタリングや早期警報システムの整備が重要であると指摘している。

本研究は以上の背景から、GLOF の総合的なリスクマネジメントを行うために、空間情報技術や環境センシング技術、情報通信技術などの積極的な活用について検討したものである。これまで、筆者らが構築を進めてきた空間情報プラットフォーム（デジタルアジア）を、地球温暖化対応、GLOF リスク軽減へ具体的に実利用することを検討した。

## 2. 氷河湖のリアルタイムモニタリングとリスクマネジメント—地球温暖化適応方策の検討

2007 年から、エベレスト山麓の標高 5000m に位置し、将来の決壊可能性の高い氷河湖の一つであるイムジャ・ツォを試験地に、地球観測衛星を活用するとともに、地上モニタリング装置を設置し、氷河湖を観測する早期警戒システムの構築に着手した (Fukui et al., 2008)

氷河湖の危険度評価については、いまだクライテリアが明確でなく、急速に充実されつつある地球観測衛星情報や、現地調査情報を積極的に活用し、氷河湖の危険性の再検討が求められている。たとえば、氷河周辺の地形的要因による斜面崩壊や雪崩などトリガーとなる要素以外にも、氷河末端と接する氷河湖の存在自体が、融解と浮力の両方の影響によって氷塊が剥離し氷山として氷河湖へ流下するカービング現象を活発化させ、さらなる氷河湖の拡大を促すという正のフィードバックの存在が、氷河湖の温度成層や流動観測等から指摘されているが、具体的な氷河湖の拡大速度を推定するにはいたって

いない。さらに、氷河湖をせき止めているエンドモーレンの地下構造も、決壊の可能性の判断に不可欠であるが、科学的な調査は乏しい。2008 年調査では物理探査により、試験的な構造解析を試みた。衛星画像などを活用し、氷河湖の台帳を空間情報プラットフォーム上に構築し(図 1 は ASTER の画像を利用した氷河湖抽出の例である)、氷河湖拡大のメカニズムなどの検討やそれに基づいた、危険度評価の再検討は重要である。

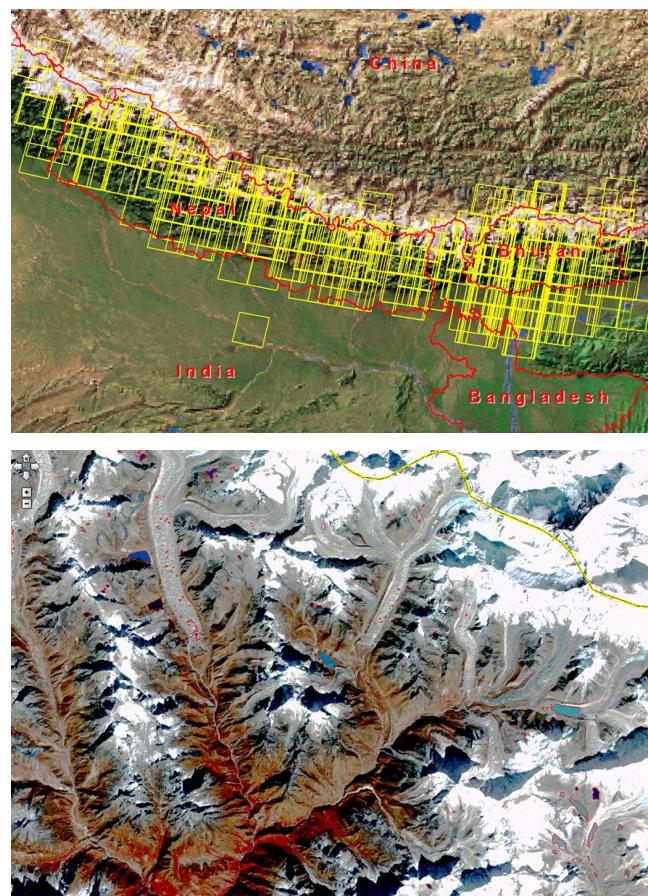


図- 1 ASTER 画像による氷河湖空間情報基盤

(上図：用いた ASTER 画像 DB, フットプリント、

下図：エベレスト付近の氷河湖抽出例)

さらに現実的な GLOF への災害適応策としては、危険な氷河湖の再評価とともに、決壊した場合にシミュレーションをもとに、河川流路沿いに被害を予測するハザードマッピングなどを活用したリスクマネジメントも必要となる。イムジャ氷河湖につい

ては、決壊した場合の最大流量と河道の地形情報から、氾濫域についての評価が必要となり、衛星画像などを活用して得られる詳細な DEM 等地形モデルと測量結果を用いた評価はその精度の向上につながった（図 2）。

危険な氷河湖の抽出、決壊時の被害予想に次いで有効な災害適応手段は、リアルタイムな氷河湖モニタリングと連動した下流地域社会への早期警戒システムの確立である。今回はイムジャ氷河湖において最新のインターネットによる情報通信技術とリアルタイムなセンシング技術を駆使した、頑強な早期警戒システムの開発実装を試験的に行うとともに、住民へのキャパシティ・ビルディングなど地域防災力の強化の第一段階を着手した（Fukui, 2010 および図 3）

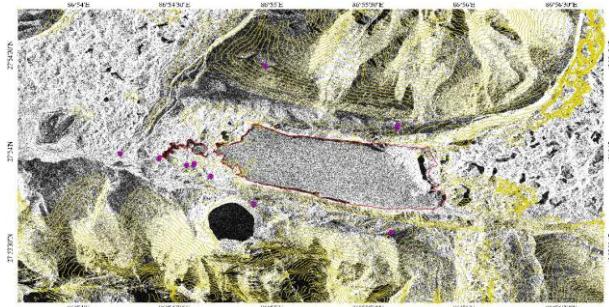


図-2 高解像度 SAR による DEM とベンチマーク

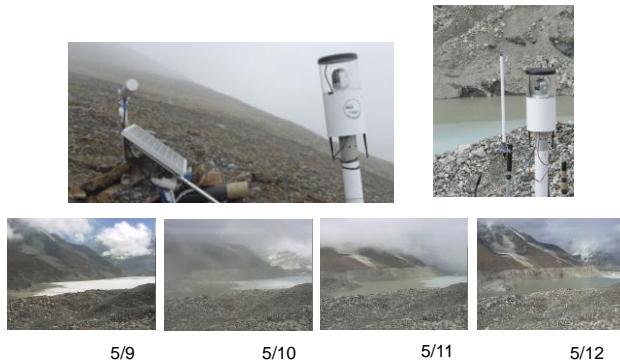


図-3 リアルタイムモニタリング装置と  
2008 年 5 月の融解する際の 9 日から 12 日の画像例

モニタリングや警報情報の伝達を行う通信環境については、

- A. wireless communication infrastructure
- B. C Band VSAT
- C. mobile satellite communication system

#### D. 3G Communication

といった幾つかの手法があり、初期構築、維持管理費用、接続頑強性など、系統電力網のない地域での設置環境に適した手法を検討する必要がある。

GLOF による災害を防止、軽減する最も効果的な手法は、湖の水位を下げる「水抜き工事、排水路工」であり、これまで、かつて GLOF を経験した、ネパールやブータンでは既に実施例があり、政府や地域社会からも要請されている。しかしそれには、モレーンダムの強度の詳細な検討や、高所作業域への重機の導入などの工事体制、コスト管理など困難な課題が多い。このような決壊洪水の可能性の高い氷河湖はヒマラヤ山系に多く存在し、また単に災害対策だけでなく、水資源開発や水力発電などエネルギー一対策、観光資源開発、流域環境管理といった諸課題に対応できる総合的でシステムティックな適応方策が今後求められることになる。

### 3. おわりに

GLOF の HKH 地域における総合的な取り組みについては、現在、UNISDR や UNDP などに協力して、早期警戒システムの導入を主題としたプロジェクト形成を行いつつある。また、図 4 に見るように、より定着した前線の観測基地の設計などについても坂設計事務所の渡辺氏らと検討中である。

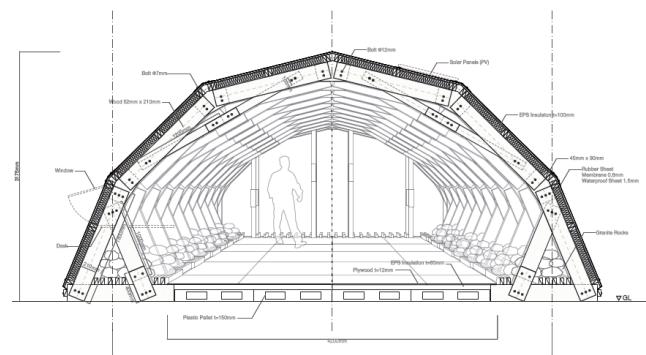


図-4 ヒマラヤ氷河湖観測基地のイメージ

さらには、環境問題や自然災害が多発するアジアにおいて人間の安全保障を実現し、持続可能なアジアのために具体的に行動する「国際救急支援情報基

地の構築（図5）」を提唱したい。近年の異常気象現象、地震津波複合災害などの事例に見るように、気象災害や自然災害は甚大化しつつあり、これに効果的に対応するためには、宇宙航空機技術やロボット技術、センシング技術など、新しい技術を総合化し、これまでの経験や知恵を結集した取り組みが重要となる。

そこでは、リアルタイムに情報をセンシングし共有するための情報基盤整備と、いざ災害が発生した場合に、効果的に対応可能なスーパー・メカニックや活動基地が必要になるとともに、より中長期的には国際的なボランティア精神と災害・環境を視点とする新たな産業・教育トレーニングの創出がはかられることになる。本構想は、1966年に、テレビ放送されて空前のブームとなった国際救助隊物語の、いわば現代版であり「環境自衛隊、Global Disaster Force」といえる。災害や環境問題に常時対応するための「サンダーバード基地」構想を、今こそ現実のものとして取り上げ技術革新、実装を行っていく必要があろう。

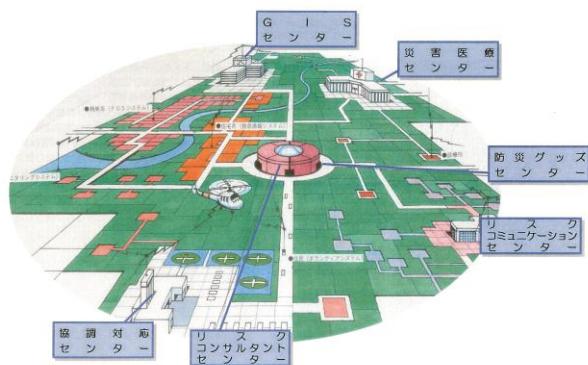


図-5 国際救急支援情報基地構想

## 謝辞

本研究は、JAXA の Sentinel Asia Project や  
産総研の GeoGrid Project および ICIMOD の協力、  
データ提供などを受けて実施しているものであり、  
改めてお礼を申し上げる。

## 参考文献

- Fukui,H., Limlaphapun,P., and Kameoka,T, 2008. Real time Monitoring for Imja Glacial Lake in Himalaya-Global Warming Front Monitoring System. *2008 Proceedings of SICE Annual Conference*, Vol1-8, IEEE, New York.2477-2480.
- Fukui,H.,2010. GEO-ICT on early warning for GLOF in Himalayan region.,International Symposium on Benefiting from Earth Observation, <http://earthobservation2010.blogspot.com/2010/01/10/hiromichi-fukui-geo-ict-on-early.html>.
- Gardelle,J.,Arnaud,Y. and Berthier,E., 2011. Contrasted evolution of glacial lakes along the Hindu Kush Himalaya mountain range between 1990 and 2009. *Global and Planetary Change* **75**, 47-55.
- Ives,J.D.,Shrestha.R.B. and Mool,P.K.,2010. Formation of Glacial Lakes in the Hindu Kush-Himalayas and GLOF Risk Assessment, *ICIMOD*, pp 57.
- Scherler,D.,Bookhagen,B. and Strecker,M.,2011. Spatially variable response of Himalayan glaciers to climate change affected by debris cover. *Nature Geoscience* **4**,156-159.