

ヒマラヤ地域における氷河湖モニタリング手法の研究

(財) リモート・センシング技術センター 小野 誠

1. はじめに

ヒマラヤ山脈は日本の気候に大きな影響を与える存在であり、日本の気候変動を把握するうえで最も重要な調査研究対象のひとつである。近年、このヒマラヤ地域において地球温暖化の影響と考えられる氷河湖の増加が急速に進んでおり、これに伴い GLOF (Glacier Lake Outburst Flood) と呼ばれる氷河湖決壊洪水が発生する危険性も高まっている。

本調査研究では、衛星リモートセンシングデータを活用した氷河湖モニタリングのための基礎技術を確立することを目指す。これまでの氷河湖研究においてもリモートセンシングデータは利用されているが、本調査研究では新しい我が国の衛星 ALOS (Advanced Land Observation Satellite) に搭載された光学センサと合成開口レーダ (SAR: Synthetic Aperture Radar) の有効な活用を視野に入れ、光学センサデータと合成開口レーダ画像の特性を活かした新しい解析技術を提案する。

本調査研究を進めるにあたり、はじめに過去の氷河湖に関する研究の調査をおこない、リモートセンシング技術の有効な活用法について整理した(2章)。次に、ブータン王国に出向き、最新の氷河湖に関する情報の入手と新しい衛星データの利用についての議論を目的としてヒアリング調査をおこなうと共に、1994年の氷河湖決壊洪水による被害地域の現地調査をおこなった(3章)。これらの調査結果を踏まえ、1960年代からの衛星リモートセンシングデータを用いて氷河湖の変遷および氷河湖決壊洪水の被害域に関する解析をおこない(第4章)、GLOF 防災・減災のための氷河湖モニタリングを目的とした新たなリモートセンシングデータの利用可能性について検討した。

2. ヒマラヤ氷河湖に関する研究調査

ICIMOD (International Centre for Integrated Mountain Development) は 2000 年にネパールとブータンにおいて氷河湖に関連した調査を包括的に行い、河川流域ごとに氷河や氷河湖の詳細な情報を整理しており、その調査結果は以降の調査研究で基礎情報として広く利用されている。

氷河湖および氷河湖決壊に関する研究は、現地調査に基づくものが多数を占めるが、衛星画像を利用した研究も少なくない。衛星データの利用方法としては、時系列光学センサ画像の判読による氷河湖の変遷状況の把握を目的とするものがほとんどであり、土地被覆分類や地形高度データと組み合わせた 3D 画像の利用などはわずかであった。このような衛星画像を使用した研究では、すべて光学センサのデータが使用されており、SAR データを用いた解析等は見られなかった。SAR は雲を透過した観測が可能のため GLOF 等の緊急時でも観測できる可能性が高いうえ、光学センサでは取得できない情報が入手できる可能性もある。

3. 現地ヒアリング調査

2006年8月30日～9月8日の日程で、ブータン王国の政府系機関へ、氷河湖決壊とその早期警戒システムに対する取り組みや、過去の GLOF 災害等に関する聞き取り調査、及び 1994 年 GLOF 被災地域の現地視察を実施した。

聞き取り調査を実施した機関は、地図作製や測量を実施する農業省の Department of Survey and Land Records (SLR) と、氷河湖に対して直接的な測量・現地調査や、海外の研究機関との共同研究の実施を担当する貿易産業省の Geological Survey of Bhutan (ブータン地質調査所: GSB) である。SLR は 2008 年よりの第 10 次 5 年計画において、ブータン国土の主要部については 1:25000 の地図作製

を行う予定であるとのことであったが、今回、我々が研究で利用した日本が運用している ALOS 衛星の PRISM データの件を説明したところ、氷河湖域はもとより、ブータン全土の地図作製に是非利用したい旨意見があった。また、GSB では年に一回行なっている氷河湖群の現地調査の内容と、氷河湖の現状について詳しく説明していただいた。この際、今回の研究でも使用している合成開口レーダ画像の利用を提案したところ、GSB でも ICIMOD による氷河湖・氷河に関するアップデートの際に使用を試みていくとのことであった。

9月6日火曜日に、1994年のGLOFにおいて大きな被害を被ったPho Chu(Chuは川の意)沿いの都市Wangdu Phodrang及びPunakhaへ現地視察を行った。主要な目的はGLOFによる被災痕跡の調査及びGPSを用いた衛星データの地理座標評定用のGCP値取得である。GPS測位にはキャリブレーションも考慮しGarmin社のハンディGPS etrex/VISTAとetrex/SUMMITの2台を用いて行った。なお、ここで取得したGPSデータは衛星画像の解析において使用した。

4. 衛星データを用いた解析

4.1 GLOF 被害域の解析

GLOF (Glacier Lake Outburst Flood) は氷河湖決壊洪水と呼ばれる現象で、氷河先端部においてモレーンでせき止められて形成された湖の水が何らかの要因で流出し、その結果、下流域に甚大な洪水被害をもたらす。1994年に発生したルナナ地方のルゲ氷河湖の決壊では、ポチュからチェンチュ流域に沿って洪水と土石流による甚大な被害が生じた。ここでは、ポチュ〜チェンチュ流域の中でも、比較的大きな被害が確認されているプナカからワンデュポタンまでの範囲を対象として、GLOF対策としての衛星画像の有効な活用方法について検討した。

まず、地形の高度情報として衛星およびスペースシャトルからの観測により作成されたSRTM、ASTER、PRISMの3つのDSM(Digital Surface Model)データの利用を検討したが、PRISMのDSMデータが水平方向・垂直方向ともに解像度が最も高く、プナカ・ゾンなどの大規模な建造物の高度も反映されていることがわかった。

つぎに、現地調査により取得したGPS情報を利用して、ALOSのパンシャープン画像の幾何学的な水平方向の位置精度を確認したところ、平均で約12mの誤差であり、使用したGPSの測地精度の15mであることから判断して、かなりの高い精度をもつことが確認された。またGPSデータとALOS-DSMデータの比較では、GPSの高度の方がやや高くなる傾向がみられた。

GLOF被害域の解析においては、現地の分類地形図およびDSMデータを利用して、GLOFに起因した水位上昇による氾濫域を推定し、被害可能性の高い場所を確認した。また、時系列の光学センサ画像を用いて、河道および河岸周辺地形の変遷を調査し、GLOF対策のためには定期的な地形情報の更新が必要であるとの結論を得た。

4.2 氷河湖の解析

Lunana 氷河湖地域における氷河湖解析では、まず時系列の衛星画像解析により、氷河湖の時間的な成長の様子を約37年にわたりモニターした。その中で、Lunana 地域における主要な3つの氷河(Raphstreng, Thortormi, Lugge)とその氷河湖について、湖面面積の変化を調査した。その結果、Raphstreng Tshoでは約10000 m²/yearで湖面面積が拡大していったが、1990年代には氷河の後退が可能なる末端に達し、湖面面積の増加は収まっている。Lugge Tshoは1994年に起きたGLOFの原因となった氷河湖であり、湖面面積の変化もそこを境にはっきりと分かれている。平均的な湖面面積拡大量は約25000 m²/yearである。

Thortormi Tsho は、定性的にもはっきりと湖面の拡大が確認されている氷河湖であり、その面積拡大速度は約 23000 m²/year と求められた。しかし、SAR 画像では Thorthormi Tso のように湖面面積の小さい池(Spragglacial lake)の群集はとらえられない場合が多くみられた。

DEM を用いた氷河湖地形把握では、衛星画像単体ではわかりにくい各氷河の高低関係の把握がなされ、その結果として LuggeII 氷河の融解が進む事態が発生すると Thortormi 氷河への融解水の流入やそれに伴うモレーン浸食の可能性が指摘された。また、Drukchong 氷河の Lugge 氷河への融解水の流入等については、現状では GLOF や災害につながる状況はみられないとの結論に至った。

ERS データを用いた干渉 SAR による山岳氷河の解析は、過去に解析例が皆無に等しいチャレンジングな解析であった。結果は定量的な変化を具体的に示すことにはならなかったものの、通常光学センサでは検知できない氷河表面の融解に伴う微細なコヒーレンス変化が Thortormi 氷河上にて現れており、今後の利用可能性を示す結果となった。また、DEMと ScanSAR 画像の相互利用によるブータン全土における氷河湖モニタリングの可能性についても示すことができた。

4.3 提案可能な mitigation / monitoring プランについて

またこれらの結果をもとに、現実的に実現可能性のある Mitigation Plan の提案を行った。これらの提案にあたり、ブータン王国の国力や国民性も含めた実現可能性のある提案となっている。具体的な提案内容は、「1/25000 程度の縮尺での地図の整備」と、「衛星データを用いた定期的なブータンヒマラヤの全域の撮像と氷河湖変動の監視」の 2 つである。地図は、現在ブータンにおいても整備にあたり衛星の利用を検討している部分であり、また災害時の避難計画や GLOF を考慮に入れた土地利用計画のためにも必要なものであり、また実現性の面からも PC、ソフトウェア、データがあれば実現可能なものである。また後者については、ブータン全土を 1 枚の衛星画像で監視しようというものである。コスト的には非常に安価でモニタリングが可能である。技術的にみて ScanSAR 画像のレーダーシャドウ部のシミュレーションなど、あと数点検討が必要な部分が存在するが、十分に実現可能性があると思われる。

過去のブータン王国自身やヨーロッパ諸国による Hazard Mitigation Report にあった「防災サイレン」や、「ハザードマップ」といった防災プランは 4000 万円とのコスト試算がなされていることから、実現にはかなりハードルが高い。衛星データの利用も同じく従来は費用対効果の面で問題があったが、IT 化、パソコンの高性能化に伴い計算機インフラの問題は解決しつつある。また衛星データの価格については、ALOS データが 1 シーン 25000 円で販売開始となり、一気に解消可能となってきている。また、差し迫った GLOF 危険性のない今こそ防災・減災のための基盤整備のチャンスであるといえる。無論、「防災サイレン」や、「ハザードマップ」等の取り組みは「発災時に安全を確保する」ためには重要である。しかし、「発災の可能性を予察し、対策に取り組む」ための基盤を整備することも、また同様に重要であると考えられる。人工衛星を用いた氷河湖減災害への取り組みは、後者の事項に対して特に有効である。以上の事項から、本研究で提案したような基盤地図の整備やブータン全土の広域氷河湖モニタリングなどの、「発災を予察し、対策に取り組む」ための Mitigation Plan は実行可能、かつ強力な手法となりうるであろう。