

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13625

研究課題名（和文）衛星リモートセンシングによる氷河湖の短期面積変動の解明

研究課題名（英文）Remote sensing analysis of short-term areal change on glacial lakes

研究代表者

永井 裕人（Nagai, Hiroto）

早稲田大学・教育・総合科学学術院・講師（任期付）

研究者番号：50771474

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：合成開口レーダー（SAR）による氷河湖自動抽出手法を確立させ、湖の時系列面積変動を解析した。L/CバンドSARでは概ね問題なく抽出でき、12日おきの時系列解析の結果、湖の多くは夏季に拡大し冬季に縮小する傾向があった。高頻度観測SAR衛星により氷河湖データベースの高頻度更新が可能である。氷河湖変動把握のための重要な技術開発が達成された。

湖時系列変化と全球再解析気候データとの関連性を検討したところ、湖変動の年々の差異に有意に寄与する気象条件は認められなかった。氷河湖決壊洪水の発生年についても強く関連する条件は認められなかった。よりローカルな気象場や地形を解析する必要があるという示唆が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

広域に分布する氷河湖の面積を高頻度（～12日）に把握する手法が概ね確立された。従来は一度きりの氷河湖マッピングがほとんどであったが、合成開口レーダー衛星から自動的に何度も氷河湖マップを更新できるようになり「動的なデータベース」へのアップデートが達成されると期待される。

またこの手法を用いて、多くの氷河湖が年周期の拡大縮小を繰り返していることが明らかになった。これまでは温暖化によって氷河が融けて氷河湖が拡大し、洪水に至ることが危惧されてきたが、氷河湖の面積には季節変動も含まれるため、観測時期を揃えた氷河湖面積解析が必要であるという示唆が得られた。

研究成果の概要（英文）：An automatic glacier lake extraction method was established using synthetic aperture radars (SARs), and the time series of glacial-lake area were analyzed using this method. L-/C-band SARs could be appropriate, whereas the area was underestimated due to the surface waves in high-resolution modes (～3 m).

As a result of temporal analysis using C-band SAR observed every 12 days, many glacier lakes tend to expand/shrink in summer/winter. It is possible to develop and update a glacial lake database with weekly intervals. Significant technological development has been achieved for understanding glacier lake changes.

We examined the relationship between the temporal changes of glacier lakes and meteorological conditions, where no significant relationship were found. In the years of flood, common meteorological characteristics were not found. To examine the flood causes, a more local meteorological and topographical analysis would be needed.

研究分野：衛星リモートセンシング

キーワード：氷河湖 氷河湖決壊洪水 プータンヒマラヤ 合成開口レーダー リモート・センシング

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ヒマラヤなど雪氷圏高山域では、氷河後退に応じて「氷河湖」が形成される。氷河湖は未固結の氷河堆積物(モレーン)によって堰き止められていることが多く、モレーンが決壊し「氷河湖決壊洪水(GLOF: Glacial Lake Outburst Flood)」として被害が生じる場合がある。そのため GLOF に関する氷河湖変動プロセスの理解と現地の防災対策は、喫緊の課題である。従来から危険視されてきたのは大型の氷河湖であった。しかし最近、実際に GLOF 被害が報告されているのはむしろ小型の氷河湖が多い。小型湖は数が膨大であるため、地球観測衛星を用いた広域観測によって変動を把握し、GLOF への過程を含む氷河湖の変動形態を理解する必要がある。モンスーン季にも雲の影響を受けない合成開口レーダ(SAR)衛星観測により、小型氷河湖が年周期の拡大・縮小を繰り返すことが明らかになってきた。まずは降水量増加と気温上昇が関係していると推察されるが、湖の数が膨大であるため、長期間にわたる経年変化解析はいまだに実施されてきておらず、以下の点が未解明であった。

- ・ 小型氷河湖面積の年周期変動は、どのような気象条件に大きな影響を受けるか?
- ・ 小型氷河湖面積の年周期変動は、短期間の拡大・決壊に関係するのか?
- ・ 気象条件から GLOF に至りうる異常拡大を事前把握できないか?

2. 研究の目的

本研究では、氷河湖がなぜ・どのように面積を短期間に変動させるのか、またその一部がどのような条件で決壊洪水に至るのかを明らかにすることを目的とし、必要となる解析手法の確立と、それによる基礎知見の取得を実施する。ブータンヒマラヤに分布する氷河湖を研究対象とし、「SAR 画像を用いた湖岸線自動抽出手法の確立」「気象条件と氷河湖変動との対応分析」「洪水時の気象状況分析」の3つの小課題に分けて知見創出を目指す。

3. 研究の方法

3.1 SAR 画像を用いた湖岸線自動抽出手法の確立

本研究の対象地域はヒマラヤ山脈東部に位置するブータンヒマラヤである。この地域では9流域に733個の氷河湖が分布しており、それらの2011年までの地理空間情報は JICA/JST による SATREPS プログラム「ブータンヒマラヤにおける氷河湖決壊洪水に関する研究」で整備された[1]。この氷河・氷河湖台帳(データベース)から氷河湖のそもそもの位置情報を取得した。これら膨大な数の氷河湖の変動をを広域・高頻度に捉えるため、本研究では SAR 画像からの自動抽出手法を確立する。検討の結果、以下の手法が最適であるとの結論を得た。

まず陸域観測技術衛星「だいち2号」に搭載されたLバンド合成開口レーダ「PALSAR-2」の後方散乱強度画像を用いて、氷河湖岸線の自動抽出手法を確立する。Stripmap/ SM1 モード(3 m 分解能単偏波) 2 シーン(撮像日: 2014/12/27; 2015/11/5)、SM3 モード(10 m 分解能2偏波) 14 シーン(撮像日: 2015/3/12; 2017/7/21; 11/24; 2018/2/2; 3/2; 5/25; 7/20; 11/9; 2019/1/18; 2/6; 3/1; 5/24; 7/19; 8/30)を使用した。SM1 モードについては DN (Digital Number) 画像データに対して、

1. 後方散乱係数 (dB) への変換
2. Low-path filter によるスペックノイズ除去
3. -14 dB を閾値として湖とそれ以外を二値化分類
4. 湖セグメントをベクター形式へ変換
5. 氷河湖 ID の付与

を実施して湖岸線抽出を行った。SM3 モードについては、Low-path filter の代わりに平滑化フィルタ(10画素円)を用いて同様の処理を行った。

欧州宇宙機関のCバンド SAR 衛星「Sentinel-1」も利用した。使用した IW モードの空間分解能は10 m であり、2014/10/25 から 2020/5/26 まで12日間隔、計146シーンの画像を Google Earth Engine から入手した。これらの画像についてはすでに後方散乱係数に変換されているため、

1. Low-path filter によるスペックノイズ除去
2. -16 dB を閾値として湖とそれ以外を二値化分類
3. 湖セグメントをベクター形式へ変換
4. 氷河湖 ID の付与

の処理を実施した。

ドイツ宇宙機関のXバンド SAR 衛星「TerraSAR-X」も利用した。使用した Stripmap モードの空間分解能は2.5 m であり、2016/11/4 撮像の画像を購入した。DN 画像データに対して、

1. 後方散乱係数 (dB) への変換
2. 平滑化フィルタ(10画素円)によるスペックノイズ除去
3. -14 dB を閾値として湖とそれ以外を二値化分類
4. 湖セグメントをベクター形式へ変換
5. 氷河湖 ID の付与

の処理を実施し、氷河湖湖岸線のポリゴンデータを作成した。

3.2 気象条件と氷河湖変動との対応分析

氷河湖の短期面積変動に影響すると考えられる環境要因は、まずは降水と気温である。そこ

で「NCEP/NCAR 再解析気候データ (NCEP Reanalysis data provided by the NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, from their Web site at <http://www.cdc.noaa.gov/>)」から日別可降水量 (NCEP Reanalysis Daily Averages; Precipitable Water Content) と日別平均気温 (NCEP Reanalysis Daily Averages; Air temperature) の空間分布を導出する。これらは 1948 年から現在までの値を入手することができる。netCDF 形式にてすべてのデータを入手し、オープンソース・フリーソフトウェア「R」を用いて統計解析を行った。それぞれの月日の平均値、標準偏差を計算し、2014 年以降の湖面積変動との比較を実施した。

3.3 洪水時の気象状況分析

ブータンではこれまでに 7 個の湖について GLOF 発生年が記録されている (1954, 1957, 1994, 1998, 2000-2001, 2009, 2015) [2]。GLOF が発生した場所の「NCEP/NCAR 再解析気候データ」について GLOF 年とそれ以外の年のデータを比較し、特異な条件が見られないかを検討した。

3.4 GLOF 防災システムへの応用可能性検討

現在の GLOF 防災における課題は、早期警戒システムのトリガーを河川流量の異常とする限り、洪水が発生する前には危険を察知できないことである。本研究によって得られた知見をもとに、洪水発生前の早期警戒が可能であるかを議論する。

4. 研究成果

4.1 SAR 画像を用いた湖岸線自動抽出手法の確立

SAR 画像処理の結果 (Fig. 1) のような抽出結果を得た。手動抽出された晴天時の氷河湖岸線に重なる形で、その撮像日の輪郭が抽出された。スペックルノイズの影響が最も強く残ったのは PALSAR-2/SM1 と TerraSAR-X である。これらは他のモードよりも空間分解能が高く (<3 m)、湖表面のさざ波を高感度にとらえているものと考えられる。その結果、これらでは湖内側に欠損部分が発生し、湖面積を過小評価する傾向があることが分かった。しかしながらこれらの観測アーカイブに占める割合は極めて小さく (10%以下)、頻繁に観測されているのは PALSAR-2/SM3 と Sentinel-1/IW である。共に 10 m 分解能でありやや低解像度であるものの、感度が適当であるため、むしろ氷河湖モニタリングに適しているといえる。

一部の氷河湖岸線については、周辺の反射強度が同程度の値を示す場合に、湖以外の部分と結合したポリゴンが生成されることがあった (Fig. 1c)。これは周囲の積雪面において融解時の水分で反射強度が落ちるためと推察される。このような結果は通常よりも特異に大きな面積を示すので、統計的に除外することとした。

ここまでの結果により、氷河湖を SAR 画像から自動抽出することが可能であることが分かった。L バンド (PALSAR-2/SM3) と C バンド (Sentinel-1/IW) のどちらであっても同様の抽出が可能である。特に Sentinel-1 は 12 日周期の観測を継続しており、衛星データも無償で入手できる。観測の度に自動抽出を実施するアルゴリズムを実装することで現在の湖の状態を把握し続けることができ、さらなる動態把握に際して極めて大きな存在価値を持っているといえる。L バンドの PALSAR-2 については後継の PALSAR-3 および米国・インドの NISAR が開発中であり、これらを組み合わせることで今よりも高頻度な観測への貢献が期待できる。従来は一度きりの氷河湖データベース作成がほとんどであったが、本研究の成果から週単位のデータベース更新への道が拓かれた。今後はこの手法を用いて、webGIS 等を利用した氷河湖モニタリング・公開システムの社会実装を検討・議論をすべきであると考えられる。

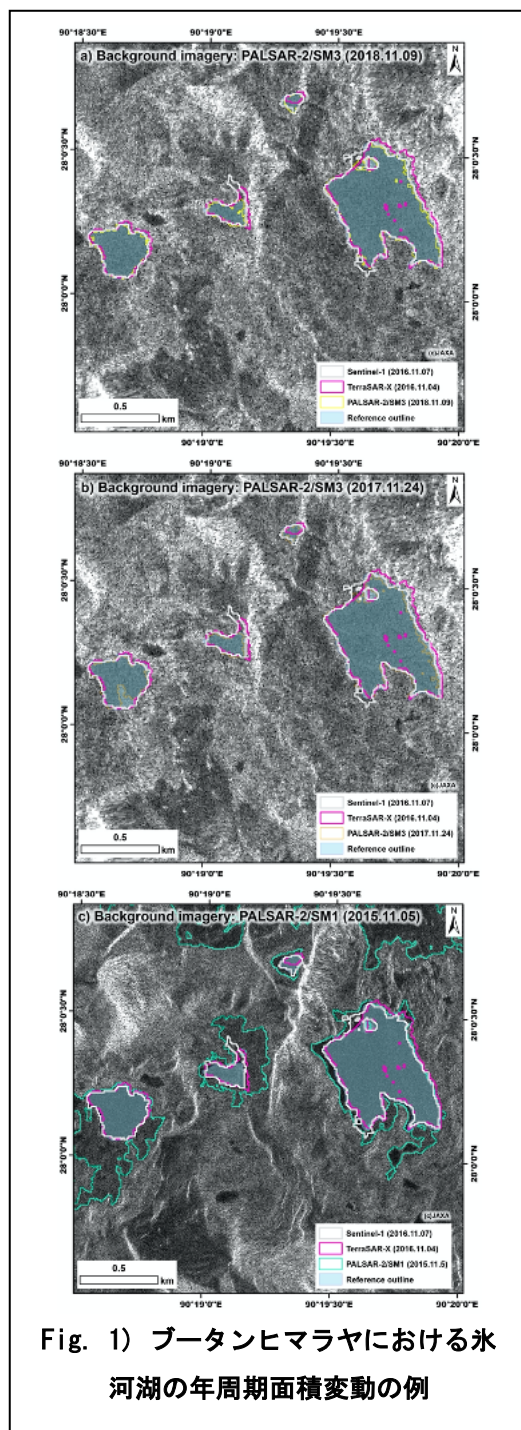


Fig. 1) ブータンヒマラヤにおける氷河湖の年周期面積変動の例

4.2 気象条件と氷河湖変動との対応分析

4.2.1 全湖時系列プロファイル

上記手法を用いて、2014年以降の Sentinel-1 観測で得られた氷河湖面積の時系列変化解析を実施した。様々なサイズの氷河湖が分布しているため、初期面積 (2014/10/25) を Fig. 2a-d の通り 4 分類して分析した。

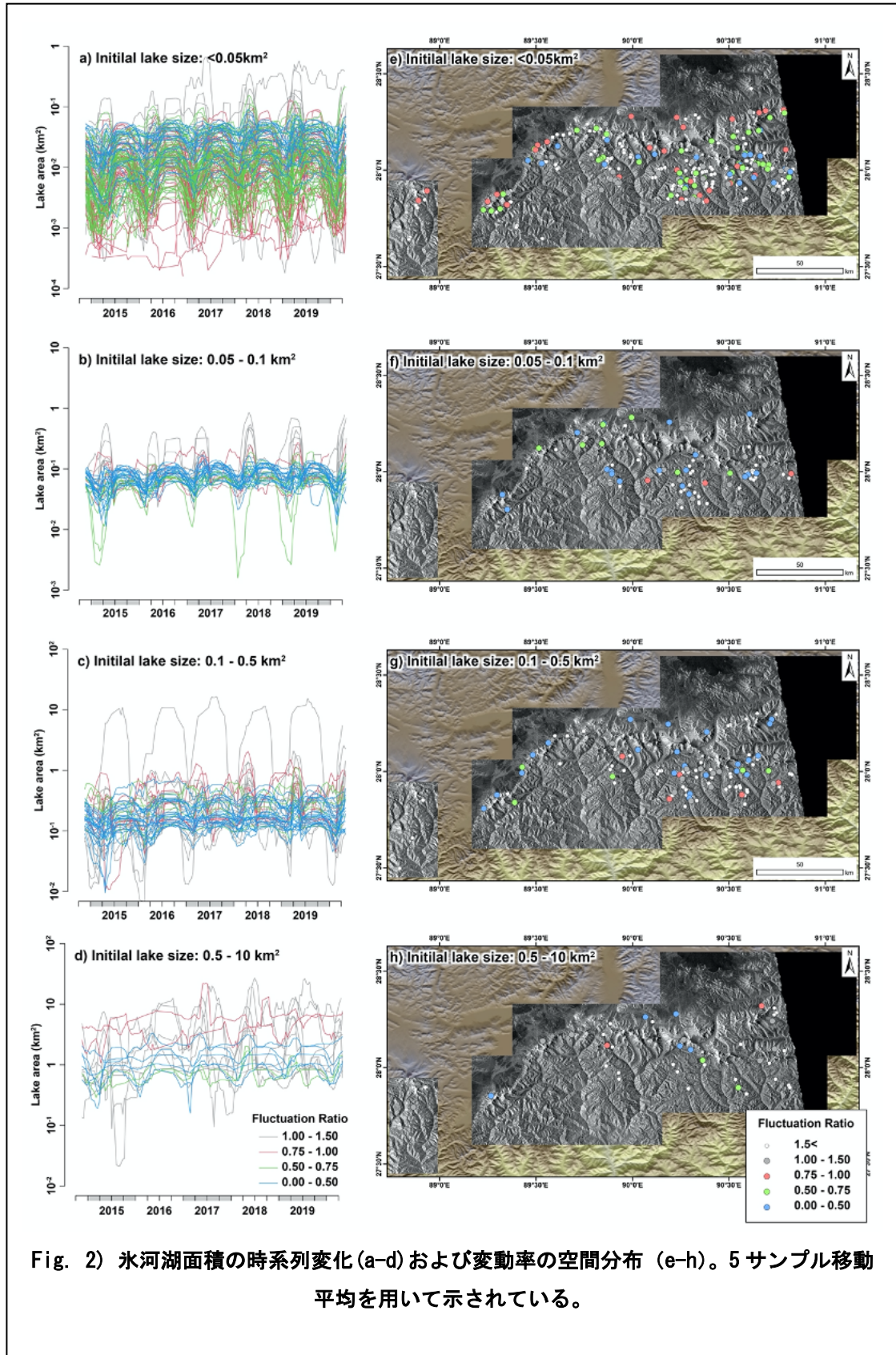


Fig. 2) 氷河湖面積の時系列変化 (a-d) および変動率の空間分布 (e-h)。5 サンプル移動平均を用いて示されている。

解析の結果、Fig. 2a-d の時系列変化を得た。すべてのサイズにおいて夏季に拡大し冬季に縮小するような季節変動を示す湖が多く確認できた。このような年周期変動の程度を分類するため、初期値 (2014/10/25) に対する拡大率の標準偏差を「変動率」として、0.5, 0.75,

1.00, 1.5 を閾値として分類した。変動率 1.5 以上の湖は周囲の陸面を誤抽出している可能性が高いため除外した。最小クラスの氷河湖 (Fig. 2a) では変動率 0.5-0.75 の湖が比較的多いものに対して、次に大きなクラスの氷河湖 (Fig. 2b) では変動率 0-0.5 の湖が比較的多くみられる、などサイズによって変動の程度がことなる傾向が示された。また変動率の空間分布については、特定の支流に偏ることなくほぼ均一に分布することが示された (Fig. 2e-h)。

4.2.2 拡大する湖と気候との関係

対象地域中央に分布する 10 個の氷河湖について異なる年の面積変動を比較し、気候との関係を検討した。その結果、規則的な変動を示さない氷河湖と明確な拡大縮小を毎年呈する氷河湖の両方が存在することが分かった。年々比較の結果、2015 年に比較的小さな面積で変動する様子が 10 個中 9 個の氷河湖で示された。一方、可降水量と気温の時系列変化を年々比較した結果、2015 年において特異な値は認められなかった。使用した気候データセットは 2.5 度グリッドであるため、比較的広域の多数の氷河湖を含むリージョナルな気候状態を示していると解釈できる。

これらから、氷河湖の年周期変動には個別の変動特性があることが明らかとなり、そして年々の拡大に差異が生じるのは、よりローカルな (谷ごとなどの) 気象場が関係しているのではないかという示唆が得られた。

4.3 GLOF 時の気象状況分析

ブータンヒマラヤで記録されている 8 回の GLOF について [2]、発生年の気象条件を平年と比較検証するため、NCEP/NCAR 再解析気候データセットから 1948-2019 の可降水量と気温の推定値を入手し、年毎の時系列変動プロファイルとしてまとめた。詳細検討の結果、これまで発生した GLOF に共通した気象条件の傾向は見出されなかった。よりローカルな気象場かあるいは誘因となるモレーンの崩落などが支配的と考えられる。このことより、気象観測から GLOF 発生を予想することは現時点では難しく、洪水発生要因の検討を先に進めるべきであるという示唆が得られた。

4.4 GLOF 対策を踏まえた氷河湖面積変動監視の意義

これまでのブータンにおける氷河湖の空間分布と面積の把握は、JICA/JST による SATREPS プログラム「ブータンヒマラヤにおける氷河湖決壊洪水に関する研究」で進められ、成果物の氷河湖台帳が web 公開されている。しかしこれは 2006-2011 に観測された光学衛星画像からの一度きりの手動抽出である。定期的な更新には毎回、膨大な作業時間が必要となる。

一方、本研究で確立された氷河湖岸線は、運用中の SAR 画像から自動抽出されたものである。膨大な数の氷河湖について雲の影響を受けずに定期的に面積変動を監視でき、定期的な台帳更新の先駆けとなる。災害対応のための緊急の衛星観測では、意思決定に資する迅速な情報提供が求められ、それに応えるための重要な基幹技術となる。今後はブータン・ヒマラヤのみならず、全球規模の氷河湖台帳作成へ、大きな波及効果が期待できる。

また本研究が注目する湖面積変動は、従来から多く研究されてきた年々変動よりも遥かに短期スケールのものである。湖面積が実は季節ごとに大きく異なっていたことが明らかとなり、温暖化と湖面積の関係を単純に論じることが正確ではないことが本研究で示された。氷河湖拡大を論じる際には「氷河後退のみならず季節差も考慮しなければいけない」という踏み込んだ観点につながった。氷河湖が通常よりも大きく拡大したモンスーン季の後であれば、縮小するために時間がかかることが予想され、冬季の面積も温暖化とは関係なく大きくなっている可能性がある。雲の多いモンスーン季にも有効な SAR 氷河湖監視にはそもそも季節差を考慮しなければいけないという知見が得られた。

GLOF 発生を気象観測から予見できれば地域の安全確保に大きく貢献することにつながるが、本研究からは気候条件との明確な関連性は見出されなかった。そのため、現時点の知見だけでは気象観測に基づく GLOF 警戒システムを構想することは難しいという結論に至った。今回のマクロな気象場の考察からさらに踏み込んで、ローカルな気象場や氷河湖それぞれの地形環境や谷ごとの気象特性を丁寧に比較検討する必要があると思われる。

引用文献

- [1] K. Fujita et al., "Outline of research project on glacial lake outburst floods in the Bhutan Himalayas," *Glob. Environ. Res.*, vol. 16, no. 1, pp. 3-12, 2012.
- [2] J. Komori, T. Koike, T. Yamanokuchi, and P. Tshering, "Glacial Lake Outburst Events in the Bhutan Himalayas," *Glob. Environ. Res.*, vol. 16, no. February 2012, pp. 59-70, 2012.

以上

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Hiroto Nagai
2. 発表標題 Climatic conditions amplifying seasonal areal change of glacial lakes in the Bhutan Himalaya
3. 学会等名 American Geophysics Union Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 永井 裕人、田殿 武雄
2. 発表標題 「だいち2号」を用いたブータン氷河湖台帳の更新にむけて
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 永井裕人
2. 発表標題 合成開口レーダーを用いた氷河湖監視システムの構築に向けて
3. 学会等名 (社)日本リモートセンシング学会第67回(令和元年度秋季)学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroto NAGAI
2. 発表標題 Details of short-term areal changes on glacial lakes in the Bhutan Himalaya: climatic analysis and SAR-based monitoring
3. 学会等名 American Geophysics Union Fall Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

NHKの科学番組「コスミックフロントNEXT」の2020/1/9放送回「宇宙から診断 地球の環境チェック」に出演し、本研究によって得られた学術成果の主要部分を約15分にわたって解説した。

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----