

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (海外学術調査)

研究期間：2014～2017

課題番号：26257202

研究課題名(和文) アジア高山域における大型氷河の動態把握と変動メカニズムの解明

研究課題名(英文) Investigation of state and fluctuation mechanisms of glaciers in high mountain Asia

研究代表者

藤田 耕史 (Fujita, Koji)

名古屋大学・環境学研究科・准教授

研究者番号：80303593

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,160,000円

研究成果の概要(和文)：アジア高山域の雪氷圏変動予測において大きな不確実性をもたらしている大型氷河の変動メカニズムを明らかにするために、現地観測、衛星データ、数値計算モデルを駆使した解析と研究を進めた。デブリ厚の指標であるデブリの熱抵抗値を衛星データから求め、氷河融解を求めるモデルを開発し、気候変化に対する氷河の応答を解析した。衛星データ解析により、詳細な氷河の質量変化を算出するとともに、広域においては氷河インベントリを整備し、東ヒマラヤにおける氷河変動とデブリ氷河の形成要因を明らかにした。さらに、気候変化への氷河の応答が地域的に大きく異なり、属している気候そのものに影響を受けていることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：To better understand fluctuations and their mechanisms of large glaciers in high mountain Asia, we conducted in-situ observations in the Nepal and Bhutan Himalayas with analyses of remotely sensed satellite data and of numerical modelling. We developed a numerical model for debris-covered glaciers, in which distribution of debris thermal resistance was estimated with remotely sensed data as a proxy of debris thickness, and then ice melting was calculated by considering heat balance. By analyzing high resolution remotely sensed satellite data, we revealed mass changes in a couple of Himalayan glaciers. In addition, we compiled glacier inventory covering high mountain Asia, and then revealed areal changes in glaciers in the eastern Himalayas. We also revealed that debris-cover extent was highly correlated with upper glacier-free slope facing southwest at which diurnal freeze-thaw cycle could produce and supply debris material on glacier.

研究分野：氷河学

キーワード：氷河 ヒマラヤ 水資源 リモートセンシング

1. 研究開始当初の背景

近年の世界各地における氷河縮小については多くの報告があるが、アジア高山域には世界の氷河の約2割近くが存在するにもかかわらず、その変動の実態は十分には把握されておらず、IPCC 報告書の信頼性を揺るがすスキャンダルのかげとなつた。また、個数は少ないながら、氷河面積の多くを占める大型氷河(> 10 km²)の多くは下流域が土砂堆積物(デブリ)に覆われており、気候変化への応答が複雑であることが指摘されている。デブリ下の氷の融解については実験的研究が多くおこなわれ、断熱効果による融解抑制効果が知られているものの、実際の氷河変動への影響については未だ確たる知見は得られていない。このため、融解の推定において裸氷の融解量に便宜的な係数を掛けるなどの扱いをされることが多く、アジア高山域における氷河変動が水資源や海水準上昇に与える影響を見積もる研究において、大きな不確定要因となっている。また、上記スキャンダル以降、異なる衛星データ(重力/レーザー高度計)による研究が報告されたが、各研究の氷河縮小速度の差異は大きく、十分なコンセンサスは得られていない。

2. 研究の目的

アジア高山域における氷河変動とその影響を受ける水資源変動を把握、理解する上で、大きな不確定要素をもたらしている大型氷河の動態とその変動メカニズムを理解するために、ヒマラヤの大型氷河において、気象、質量収支、氷河ダイナミクスの現地観測をおこなう。さらに、大型氷河を特徴付けている土砂堆積物の融解への影響を考慮した氷河質量収支モデル、流動モデルを構築し、氷河変動を引き起こしている各種要因(気候変化などの外的要因/流動や地形などの内在的要因)の寄与を定量化する。また、衛星観測による広域解析を通じ、アジア高山域における氷河変動の実態を解明する。

3. 研究の方法

デブリ氷河の融解モデル

デブリの厚さを熱伝導率で除した「熱抵抗値」を衛星データから推定する方法はこれまでに確立していたが、衛星のシーン間の不確実性や、熱抵抗値の不確実性が質量収支および氷河融解量に及ぼす影響については検討が十分でなかった。そこで、現地観測を予定しているネパールヒマラヤ・ロールワリン地域のトランバウ氷河を対象に、多時期の衛星データから求めた熱抵抗値と、それを境界条件とする氷河流出量を求め、熱抵抗値の不確実性とその影響を検討する。

現地観測

これまでにおこなわれている現地観測に基づく氷河変動の研究に対しては、氷河規模が

小さいことや、低標高に偏っていることが問題として指摘されていた。一方、ヒマラヤの多くの氷河はアイスフォールによって高標高に位置する涵養域へのアクセスが困難であった。衛星データや過去の登山隊の記録を精査することにより、ネパールヒマラヤ・ロールワリン地域のトランバウ氷河は、比較的安全に6000mの高標高域までアクセスできることがわかり、本研究における現地観測の対象とした。ここにステーク網をはじめとする、氷河、気象の観測体制を構築し、質量収支やダイナミクス、気象に関するデータを取得する。特にデブリ被覆域においてデブリの熱伝導率や含水率を計測し、デブリ内の温度分布を連続観測することで、熱抵抗値の推定における不確実性を減らすための解析をおこなう。

衛星データ解析

予算や治安の制約により、複数の地域での現地観測は困難なため、衛星データを活用した氷河変動解析をおこなう。具体的には高分解能の衛星データ(JAXA ALOS「だいち」)により東ヒマラヤの氷河インベントリを整備し、特にデブリ被覆域を判別することで、デブリ氷河の分布に関する統計解析をおこなうための基礎データとする。また、多時期の衛星データからデジタル標高データを作成し、その差分から氷河変動量を広域かつ高解像度で求める。

広域解析

デブリ氷河の特異的な変動を明らかにするためには、バックグラウンドとしての氷河変動を広域で理解する必要がある。そこで、アジア高山域全体を網羅する氷河インベントリを利用し、気候変化に対する氷河の応答について解析を進め、その支配要因について明らかにする。

4. 研究成果

デブリ氷河の融解流出モデル

1990年代におこなわれた観測により気象水文のデータがあるトランバウ氷河(ネパールヒマラヤ・ロールワリン地域)を対象として、岩屑(デブリ)に覆われた氷河の融解流出モデルを開発した(図1)。流域からの流出は降水の高度分布に影響を受け、また、デブリによる融解抑制効果はそれまで考えられていたよりも小さいことを明らかにした(Fujita and Sakai, 2014)。

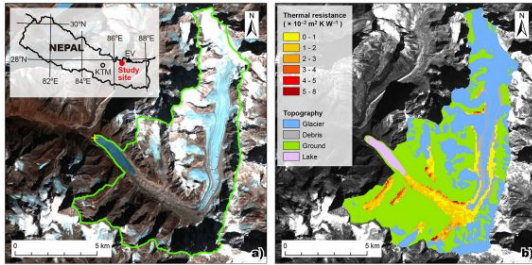


図 1 ネパールヒマラヤのトランバウ氷河 (a)と衛星データ解析により推定したデブリの熱抵抗値分布(b)。

デブリ氷河の形成要因

デブリ氷河がなぜデブリに覆われるようになったのか?を明らかにするために、東ヒマラヤにおける氷河インベントリをデブリ被覆域の情報も含めて整備した。解析の結果、氷河上流にある、氷河に覆われていない斜面の面積が下流のデブリ被覆面積を決定づけていることを明らかにした(図 2)。冬季の七千 m を超える高標高においても特に南向き斜面は日中にプラスの温度になるため、激しい日周期の凍結融解作用によって風化が進み、岩屑が生成供給されることが示唆された(Nagai et al., 2016; Ojha et al., 2017)。

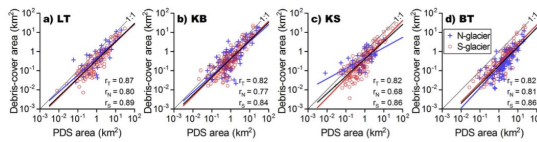


図 2 東ヒマラヤの四地域における氷河上部斜面の面積とデブリ被覆域面積の関係(a:LT ランタン、b:KB クンプ、c:KS カンチェンジュンガ・シッキム、d:BT ブータン)。

氷河変動

World Glacier Monitoring Service(WGMS)が中心となってとりまとめている、世界中で観測されている氷河の質量収支データを解析した共同研究により、21 世紀に入って以降の氷河縮小がこれまでにないペースで進んでいることを明らかにした(Zemp et al., 2015)。また、本科研費による研究の一環として、これまで観測がおこなわれていなかったブータンヒマラヤにて氷河観測を実施し、氷河縮小が顕著であるとされる東ヒマラヤの中でも、より急速に氷河縮小が進んでいることを明らかにした(Tshering and Fujita, 2016)。より広域の氷河変動を明らかにするために、高解像度衛星データによる東ヒマラヤにおける氷河インベントリの整備を進め、ネパールヒマラヤにおける近年の氷河変動を明らかにした(Ojha et al., 2016, 2017)。一方で、近年利用可能になった軍事偵察衛星から詳細なデジタル標高データを構築することにより、ネパールヒマラヤの氷河を対象に 1970 年代から最近にかけての長期の氷河変

動量を明らかにした(Lamsal et al., 2017; Nuimura et al., 2017)。これら一連の解析により、東ヒマラヤという比較的限られた地域においても、氷河変動には大きな違いがあることを明らかにした(図 3)。

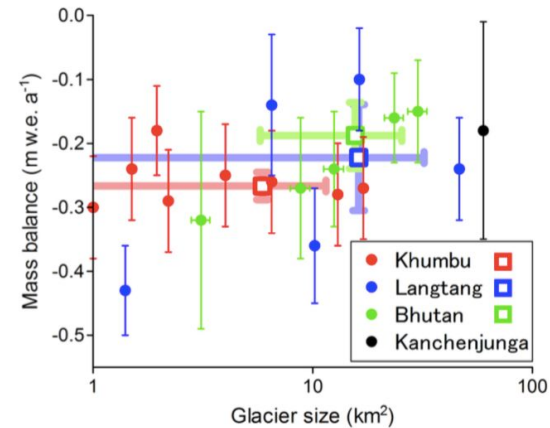


図 3 東ヒマラヤにおける 1970 年代から 2000 年代にかけての氷河変動量。

広域解析

多様な気候帯を有するアジア高山域の氷河を包括的に理解するために、全域を網羅する氷河インベントリを整備した(Nuimura et al., 2015)。このインベントリを元に、氷河が存在するために必要となる、高標高における降水量を推定し、これまでに整備されていた気候データの降水が過小評価されていることを明らかにした(Sakai et al., 2015)。さらに、気温変化に対する氷河の応答を解析し(図 4)、近年衛星観測によって明らかになりつつある氷河変動の地域的な差異がこの氷河の応答によって説明しうることを明らかにした(Sakai and Fujita, 2017)。これら一連の研究は、気候変化に対する氷河の応答が、気温や降水量、さらには降水の季節パターンによって異なることを示しており、氷河変動の将来予測に関する研究を進める上で重要な知見といえる。

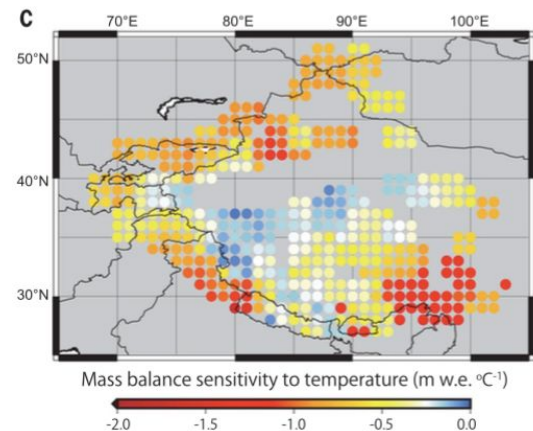


図 4 1 の気温変化に対する氷河質量収支の応答。

現地観測

本研究の主要目的である、大型氷河の現地観測については、2015年4月に発生したネパール・ゴルカ地震によってその観測開始を一年延期せざるを得ない状況となったものの、2016年5月に観測網を整備し、2016年10～11月、2017年10～11月に観測を実施した。論文としての成果は出ていないものの、これまでの解析によって、以下のことが明らかになりつつある。

- 1) 6000 mの高標高においても融解が生じており、氷河全体として縮小が続いている。
- 2) 観測された質量収支の高度分布と質量収支モデルを組み合わせることで、降水の高度分布がほぼゼロ(高度によらず一様)であること。
- 3) 衛星データから推定する熱抵抗値は現場での測定値に比べ過小評価されており、推定法の改良が必要である。
- 4) 一方で、現場での測定値から求めた熱抵抗値をデブリ氷河の融解モデルに適用したところ、観測されたデブリ下の融解を精度良く再現することができた。

以上の結果は、デブリの熱抵抗値分布の推定法の改良ができれば、デブリ氷河の質量収支を合理的に求めることができることを意味しており、今後の研究の方向性を示すことができたといえる。この他、氷河流動や氷厚について良好なデータを取得しており、引き続き解析を進めていく。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 19 件) 全て査読有り

1. Azam FM, Wagnon P, Berthier E, Vincent C, Fujita K, Kargel JS (2018) Review of the status and mass changes of Himalayan-Karakoram glaciers. *J. Glaciol.*, 64, 61-74, doi:10.1017/jog.2017.86
2. Fujita K, Inoue H, Izumi T, Yamaguchi S, Sadakane A, Sunako S, Nishimura K, Immerzeel WW, Shea JM, Kayastha RB, Sawagaki T, Breashears DF, Yagi H, Sakai A (2017) Anomalous winter-snow-amplified earthquake-induced disaster of the 2015 Langtang avalanche in Nepal. *Nat. Hazard. Earth Sys. Sci.*, 17, 749-764, doi:10.5194/nhess-17-749-2017
3. Lamsal D, Fujita K, Sakai A (2017) Surface lowering of the debris-covered area of Kanchenjunga Glacier in the eastern Nepal Himalaya since 1975, as revealed by Hexagon KH-9 and ALOS satellite observations. *Cryosphere*, 11, 2815-2827, doi:10.5194/tc-11-2815-2017
4. Nagai H, Ukita J, Narama C, Fujita K, Sakai A, Tadono T, Yamanokuchi T, Tomiyama N (2017) Evaluating the scale and potential of GLOF in the Bhutan Himalayas using a satellite-based integral glacier-glacial lake inventory. *Geosciences*, 7, 77, doi:10.3390/geosciences7030077
5. Nuimura T, Fujita K, Sakai A (2017) Downwasting of the debris-covered area of Lirung Glacier in Langtang Valley, Nepal Himalaya, from 1974 to 2010. *Quatern. Int.*, 455, 93-101, doi:10.1016/j.quaint.2017.06.066
6. Ojha S, Fujita K, Sakai A, Nagai H, Lamsal D (2017) Topographic controls on the debris-cover extent of glaciers in the Eastern Himalayas: Regional analysis using a novel high-resolution glacier inventory. *Quatern. Int.*, 455, 82-92, doi:10.1016/j.quaint.2017.08.007
7. Sakai A, Fujita K (2017) Contrasting glacier responses to recent climate change in high-mountain Asia. *Sci. Rep.*, 7, 13717, doi:10.1038/s41598-017-14256-5
8. Salerno F, Thakuri S, Tartari G, Nuimura T, Sunako S, Sakai A, Fujita K (2017) Debris-covered glacier anomaly? Morphological factors controlling changes in the mass balance, surface area, terminus position, and snow line altitude of Himalayan glaciers. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 471, 19-31, doi:10.1016/j.epsl.2017.04.039
9. Aizen EM, Aizen VB, Takeuchi N, Mayewski PA, Grigholm B, Joswiak DR, Nikitin SA, Fujita K, Nakawo M, Zapf A, Schwikowski M (2016) Abrupt and moderate climate changes in the mid-latitudes of Asia during the Holocene. *J. Glaciol.*, 62, 411-439, doi:10.1017/jog.2016.34
10. Kargel JS, Leonard GJ, Shugar DH, Haritashya UK, Bevington A, Fielding EJ, Fujita K, Geertsema M, Miles ES, Steiner J, Anderson E, Bajracharya S, Bawden GW, Breashears DF, Byers A, Collins B, Dhital MR, Donnellan A, Evans TL, Geai ML, Glasscoe MT, Green D, Gurung DR, Heijenk R, Hilborn A, Hudnut K, Huyck C, Immerzeel WW, Jian LM, Jibson R, Käab A, Khanal NR, Kirschbaum D, Kraaijenbrink PDA, Lamsal D, Liu SY, Lv MY, McKinney D, Nahirnick NK, Nan ZT, Ojha S,

- Olsenholler J, Painter TH, Pleasants M, Pratima KC, Yuan QI, Raup BH, Regmi D, Rounce DR, Sakai A, Shangguan DH, Shea JM, Shrestha AB, Shukla A, Stumm D, van der Kooij M, Voss K, Wang X, Weihs B, Wolfe D, Wu LZ, Yao XJ, Yoder MR, Young N (2016) Geomorphic and geologic controls of geohazards induced by Nepal's 2015 Gorkha earthquake. *Science*, 351, aac8353, doi:10.1126/science.aac8353
11. Nagai H, Fujita K, Sakai A, Nuimura T, Tadono T (2016) Comparison of multiple glacier inventories with a new inventory derived from high-resolution ALOS imagery in the Bhutan Himalaya. *Cryosphere*, 10, 65-85, doi:10.5194/tc-10-65-2016
 12. Ojha S, Fujita K, Asahi K, Sakai A, Lamsal D, Nuimura T, Nagai H (2016) Glacier area shrinkage in eastern Nepal Himalaya since 1992 using high-resolution inventories from aerial photographs and ALOS satellite images. *J. Glaciol.*, 62, 512-524, doi:10.1017/jog.2016.61
 13. Tshering P, Fujita K (2016) First in situ record of decadal glacier mass balance (2003-2014) from the Bhutan Himalaya. *Ann. Glaciol.*, 57(71), 289-294, doi:10.3189/2016AoG71A036
 14. Zhang Y, Hirabayashi Y, Fujita K, Liu SY, Liu Q (2016) Heterogeneity in supra-glacial debris thickness and its role in glacier mass changes of the Mount Gongga. *Sci. China Earth Sci.*, 59, 170-184, doi:10.1007/s11430-015-5118-2
 15. Nuimura T, Sakai A, Taniguchi K, Nagai H, Lamsal D, Tsutaki S, Kozawa A, Hoshina Y, Takenaka S, Omiya S, Tsunematsu K, Tshering P, Fujita K (2015) The GAMDAM glacier inventory: a quality controlled inventory of Asian glaciers. *Cryosphere*, 9, 849-864, doi:10.5194/tc-9-849-2015
 16. Sakai A, Nuimura T, Fujita K, Takenaka S, Nagai H, Lamsal D (2015) Climate regime of Asian glaciers revealed by GAMDAM Glacier Inventory. *Cryosphere*, 9, 865-880, doi:10.5194/tc-9-865-2015
 17. Zemp M, Frey H, Gärtner-Roer I, Nussbaumer SU, Hoelzle M, Paul F, Haeberli W, Denzinger F, Ahlström AP, Anderson B, Bajracharya S, Baroni C, Braun LN, Cáceres BE, Casassa G, Cobos G, Dávila LR, Delgado Granados H, Demuth MN, Espizua L, Fischer A, Fujita K, Gadek B, Ghazanfar A, Hagen JO, Holmlund P, Karimi N, Li ZQ, Pelto M, Pitte P, Popovnin VV, Portocarrero CA, Prinz R, Sangewar CV, Severskiy I, Sigurðsson O, Soruco A, Usubaliev R, Vincent C (2015) Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. *J. Glaciol.*, 61, 745-761, doi:10.3189/2015JoG15J017
 18. Fujita K, Sakai A (2014) Modelling runoff from a Himalayan debris-covered glacier. *Hydrol. Earth Sys. Sci.*, 18, 2679-2694, doi:10.5194/hess-18-2679-2014
 19. Takeuchi N, Fujita K, Aizen VB, Narama C, Yokoyama Y, Okamoto S, Naoki K, Kubota J (2014) The disappearance of glaciers in the Tien Shan Mountains in Central Asia at the end of Pleistocene. *Quatern. Sci. Rev.*, 103, 26-33, doi:10.1016/j.quascirev.2014.09.006
- 〔学会発表〕(計 72 件) 研究代表者による発表のみ記載
1. Fujita K, Sunako S, Sakai A, Fukui K, Sugiyama S, Kayastha RB (2017) In-situ measurement of mass balance on a debris-covered Trambau Glacier, Nepal Himalaya. American Geophysical Union Fall Meeting 2017, New Orleans, USA, Dec 11-15
 2. Fujita K, Inoue H, Izumi T, Yamaguchi S, Sadakane A, Sunako S, Nishimura K, Immerzeel WW, Shea JM, Kayastha RB, Sawagaki T, Breashears DF, Yagi H, Sakai A (2017) Anomalous winter-snow-amplified earthquake-induced disaster of the 2015 Langtang avalanche in Nepal. Third Pole Science Summit - TPE-CSTP-HKT Joint Conference, Kunming, China, Jul 10-12 [invited]
 3. Sakai A, Fujita K (2017) Contrasting glacier responses to recent climate change in high-mountain Asia. Third Pole Science Summit - TPE-CSTP-HKT Joint Conference, Kunming, China, Jul 10-12 [invited]
 4. 藤田耕史, 井上公, 泉岳樹, 山口悟, 貞兼綾子, 砂子宗次朗, 西村浩一, Immerzeel WW, Shea JM, Kayastha RB, 澤柿教伸, Breashears DB, 八木浩司, 坂井亜規子 (2016) 冬季の異常積雪によって増幅された 2015 年ランタン大なだれ災害. 雪氷研究大会, 名古屋, Sep 28-Oct 1
 5. 藤田耕史 (2016) 現地調査報告・ランタン村に何がおきたか?. 2015 ランタン大なだれ復興支援シンポジウム, 市ヶ谷, Jan 10 [invited]

6. 藤田耕史, 的場澄人, 竹内望, 青木輝夫 (2015) 熱収支モデルをもちいたアイスコア中の氷板からの夏気温復元. 日本地球惑星科学連合大会, 幕張, May 24-28. [invited]
7. Fujita K (2015) Altitudinal gradients of air temperature and precipitation constrained by long-term mass balances of Yala Glacier, Langtang Valley, Nepal Himalayas. International Symposium on Glaciology in High-Mountain Asia, Kathmandu, Nepal, Mar 1-6
8. Sakai A, Fujita K (2015) Climate regime and sensitivity of Asian glaciers revealed by GAMDAM Glacier Inventory. International Symposium on Glaciology in High-Mountain Asia, Kathmandu, Nepal, Mar 1-6
9. Fujita K, Sakai A (2015) Modelling runoff from a Himalayan debris-covered glacier. International Conference on Climate Change Innovation and Resilience for Sustainable Livelihood, Kathmandu, Nepal, Jan 12-14
10. Sakai A, Fujita K (2014) Climate regime and sensitivity of Asian glaciers revealed by GAMDAM Glacier Inventory. The 5th Third Pole Environment Workshop, Berlin, Germany, Dec 8-9 [invited]
11. Fujita K, Sakai A (2014) Modelling runoff from a Himalayan debris-covered glacier. Asia Oceania Geosciences Society 2014 Annual Meeting, Sapporo, Japan, Jul 28-Aug 1

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.cryoscience.net/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

藤田 耕史 (FUJITA, Koji)

名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授

研究者番号：80303593

(2)研究分担者

福井 幸太郎 (FUKUI, Kotaro)

公益財団法人立山カルデラ砂防博物館・学

芸課・学芸員

研究者番号：10450165

杉山 慎 (SUGIYAMA, Shin)

北海道大学・低温科学研究所・教授

研究者番号：20421951

(3)連携研究者

(4)研究協力者

坂井亜規子 (SAKAI, Akiko)

名古屋大学・大学院環境学研究科・研究員

研究者番号：40437075

Rijan B. Kayastha

Associate Professor, Kathmandu

University, Nepal