

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 7日現在

機関番号：35403

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2011

課題番号：20540430

研究課題名（和文）カービング氷河の変動と氷河前面湖とのフィードバック仮説の検証とモデル開発

研究課題名（英文）Verification of a hypothesis and development of a numerical model on feedback mechanism between variation of calving glaciers and proglacial lakes

研究代表者

内藤 望 (NAITO NOZOMU)

広島工業大学・環境学部・教授

研究者番号：90368762

研究成果の概要（和文）：湖に流入している氷河の場合、氷厚の変動と湖への氷体分離速度との間に正のフィードバックが働きうるという仮説を裏づけるための貴重な観測データを蓄積した。具体的には、南米パタゴニア氷原のペリート・モレノ氷河において、氷厚減少速度、末端部の流速、氷河前面の湖水位等を反復観測した。またブータン・ヒマラヤにおいても、2氷河の氷厚減少量を測定するとともに、18氷河・氷河湖の規模の変化を比較写真撮影により検出した。

研究成果の概要（英文）：Valuable observational data were obtained in order to verify a hypothesis that a positive feedback can operate between variation of glacier thickness and calving rate into a proglacial lake in case of a lake-calving glacier. In concrete terms, glacier thinning rate, terminal flow speed, water level of proglacial lake and so on were repeatedly measured at Glaciar Perito Moreno in the Patagonia Icefield, South America. In addition, glacier thinning was surveyed on two glaciers and size change was detected through repeat photos on 18 glaciers and glacial lakes, in the Bhutan Himalayas.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：氷河変動学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象・海洋物理・陸水学

キーワード：氷河変動、カービング、氷河湖、氷河流動、フィードバック

1. 研究開始当初の背景

近年の地球温暖化に伴い、世界各地の山岳氷河が縮小することで海面上昇に大きく寄与することが社会的な注目を浴びている。また一方で、ヒマラヤ地域等では、氷河が縮小する際に形成・拡大しうる氷河湖の決壊による洪水災害も大きな問題となっている。

氷河規模の変動は、第一義的には気候変化に起因するものであるが、その定量的な理解、特に将来予測のためには、氷河の動力学的な

理解が欠かせない。とりわけ湖や海へ末端部分の氷体が流入し、断続的に氷塊が分離して水中へと崩落しているカービング氷河の場合には、氷河の動力学的条件がその変動に大きく影響する。このようなカービング氷河の変動メカニズムは、未だ十分に理解されているとは言い難い。

本研究代表者は、ヒマラヤ地域における氷河観測結果から、巨大な氷河湖にカービングしている氷河の場合には、その氷厚減少速度

と氷河末端から氷河湖中へ崩落するカービング速度との間に、正のフィードバック機構が働くとの仮説を見いだした。カービング氷河の変動メカニズムを理解し、その将来を予測するためには、この仮説を定量的に検証することが本質的に重要な課題となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、末端部が湖にカービングしている氷河の中流部から下流部にかけての氷厚減少速度と末端部におけるカービング速度との間に正のフィードバック機構が働くとの仮説を、現地観測データをもとに検証することを第一の目的とした。そして、複数の氷河地域を対象として、両者の定量的な相関関係を調べることで、汎用的なカービング氷河の変動モデルの構築を目指し、将来の変動予測に資することもさらなる目的とした。

3. 研究の方法

(1) ペリート・モレノ氷河観測

2008年12月～2009年1月および2010年2月～3月に、南米パタゴニア氷原の一角を占める、アルゼンチンのペリート・モレノ氷河(図1)において以下の現地観測を実施した。

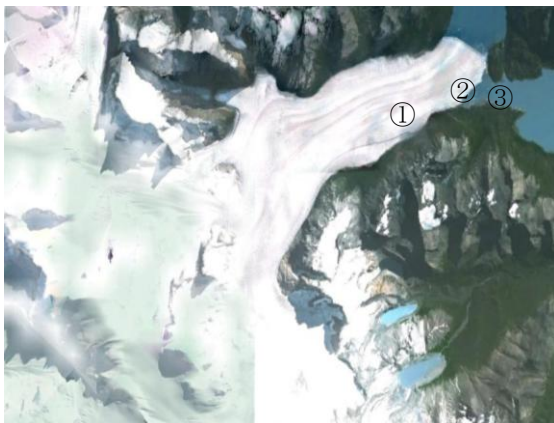


図1. ペリート・モレノ氷河 (Google Earth)。①～③は、以下の現地観測項目の対象範囲。

① 氷河下流域の氷厚変化測量

氷河右岸の露岩上に設置された測量基点からトータルステーションを用いた光波測距により、氷河表面の10測点を測量した。この測点は、1990年以来、固定された水平座標の氷河表面の鉛直座標を繰り返し測量するもので、その変化から氷厚変化を検出するものである。氷河表面の起伏の影響による誤差は、多点での結果を比較して検証する。

② 氷河末端部の縁辺位置測量と流速測定

氷河末端部を一望できる氷河前面の湖岸に、約400m長の基線を設け、その両端からトータルステーションを用いた三角測量により、氷河末端氷崖の突起状上端を多数測量する。この三角測量を現地観測期間中、原則

1日1回繰り返し実施した。日々の測量データを比較することにより、氷河末端の縁辺位置の変動や流速分布を求めた。

③ 氷河前面湖水位の連続測定

氷河前面湖中に水位計を投入、固定し、データロガーに接続することにより、通年におわたる連続測定を実施した。

(2) ブータン・ヒマラヤの氷河、氷河湖観測

2010年9月～10月に、ブータン・ヒマラヤにおける共同研究調査に参加する機会を利用し、以下の観測を実施した。

① 2氷河の氷厚変化測量

比較的小型の2氷河について、キネマティックGPS測量により、その氷河表面を測量した。この2氷河は、かつて本研究代表者らによって1998～2003年の期間に測量されたものであり、過去測量データとの比較から、氷厚変化を求めた。

② 18氷河・氷河湖の変動検出の写真撮影

調査のための長大な踏破ルート沿いには、多数の氷河、および氷河湖が分布している。そこで過去の踏破時に撮影された写真と同じアングルとなる写真を撮影することで、それぞれの変動量を検出した。前項のような測量に比べると、変動を検出する精度は低い、広域で多数の氷河・氷河湖を対象とできる利点がある。

(3) ヒマラヤの氷河湖面積拡大速度の解析

衛星画像解析によって、ヒマラヤにおける合計30個の氷河湖の面積を求めた。使用した衛星画像は、1960年代～1970年代前半のCORONA衛星画像と、1990年代～2000年代のLANDSAT衛星画像等である。これら新旧の面積から、各氷河湖の面積拡大速度を算出した。

4. 研究成果

(1) ペリート・モレノ氷河

氷河下流域では、 $1\sim 1.5\text{ m a}^{-1}$ の速さで氷厚が薄くなっていた。また、氷河末端部の流速と湖水位との関係を探ったが、場所による氷厚の違いによる影響が大きく、有効圧力と流速との関係は複雑で不明瞭であった。

一方、共同研究者と協同して実施された、氷河下流域の表面流速の連続測定と、氷河下流域の全層掘削孔を利用した氷河内水位の連続測定により、両者の間の明瞭な相関関係が得られている。これにより同氷河の流動は、氷河底水圧に大きく依存していることが明らかとなった。

(2) ブータン・ヒマラヤの氷河

ジチュダモ氷河下流域では、2003～2010年の間に $3\sim 4\text{ m a}^{-1}$ の速さで氷厚が薄くなっていた。同氷河では、1998～2003年に比べて、縮小速度が加速していた。また、ジャゼ・ラ(峠)南東の小型無名氷河でも、1999～2010年の間に $1\sim 3\text{ m a}^{-1}$ の速さで氷厚が薄くなっていた(図2)。さらに過去との写真比較によ

り、多数の氷河における後退と氷河湖の拡大が検出できた。ブータン・ヒマラヤにおける氷河変動については、未だ定量的に把握された例が少なく、これらの結果は地域の氷河変動傾向を把握する上で、貴重な成果といえる。

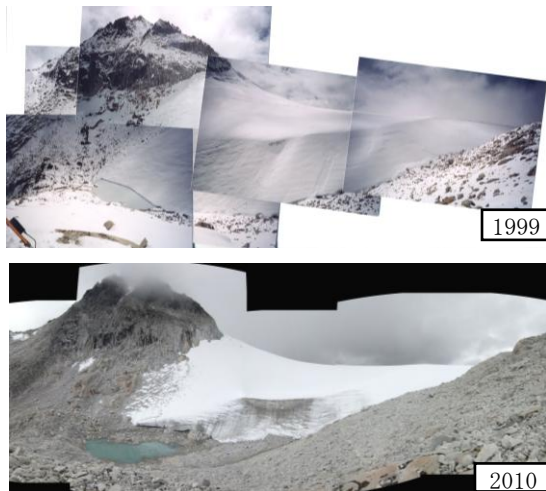


図2. ジャゼ・ラ南東の無名氷河の比較写真。上：1999/10/2、下：2010/9/23に撮影。

(3) ヒマラヤの氷河湖面積拡大

解析した合計30個の氷河湖のうち、7個の氷河湖は急速に拡大していた。一方、残り23個の面積拡大速度は極めて小さく、むしろ面積変化の点では安定な氷河湖と考えられた(図3)。そして、この2つのグループへの大別は明瞭であった。この2グループの違いは、カービング活性度の差によるものと考えられる。すなわち氷河湖の水深がカービングを活発に誘発するまで成長した場合には、氷河末端の後退および氷河湖の拡大が急速に進行する一方、氷河湖が浅い場合には、融解による緩慢な末端後退と湖拡大でしかないと考えられる。

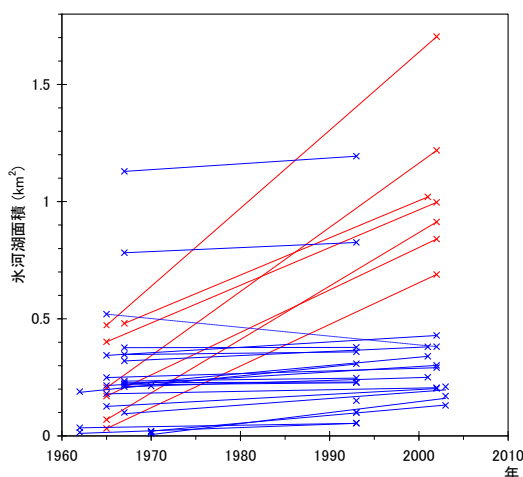


図3. 衛星画像解析によるヒマラヤ30氷河湖の面積拡大の様子。赤線は急速拡大している氷河湖、青線は面積変化が緩慢な氷河湖。

(4) 総括

南米パタゴニアとヒマラヤという2地域を対象として、貴重な現地観測データを得たことは、単なるケース・スタディに留まらない汎用的な成果を目指すという点において、本研究の当初の目的の一部は達したと言える。

しかし、現地観測における種々の制約もあり、本研究の第一の目的である仮説検証のために必要な観測データの質としては、未だ完全とは言い難い。本研究で得た観測結果は、全て仮説を裏づける傍証と言える内容ではあるが、仮説の部分的な証明と言うべき段階である。したがって今後もさらなる現地観測の充実が期待される。

そして第二の目的としていた、カービング氷河の変動モデル構築については、第一の目的以上に未達と言わざるを得ない。モデル構築に耐える汎用的な定式化を目指すには、やはり観測データが質・量の両面において不十分であった。ただし、本研究で得られた貴重な観測データは、最終目標への到達に確実に貢献するものである。つまり当初の目標設定がやや高すぎた嫌いがあるものの、本研究はそれに向けた一里塚としての成果は充分にあげられたと総括できる。

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4件)

- ① Naito, N., 他7名(1番目): Recent glacier shrinkages in the Lunana region, Bhutan Himalayas. *Global Environmental Research*, 査読有, Vol. 16, No. 1, 2012, in press.
- ② Sugiyama, S., N. Naito, 他6名(3番目): Ice speed of a calving glacier modulated by small fluctuation in basal water pressure. *Nature Geoscience*, 査読有, Vol. 4, No. 9, 2011, 597-600. doi:10.1038/ngeo1218
- ③ Aniya, M., N. Naito, 他13名(7番目): Glaciological research project in Patagonia 2006-2009: Studies at Glaciar Perito Moreno, Hielo Patagónico Sur, in area of Hielo Patagónico Norte and along the Pacific Coast. *Bulletin of Glaciological Research*, 査読有, Vol. 29, 2011, 1-17. https://www.jstage.jst.go.jp/article/bgr/29/0/29_0_1/pdf
- ④ Sugiyama, S., N. Naito, 他6名(3番目): Hot-water drilling at Glaciar Perito Moreno, Southern Patagonia Icefield.

Bulletin of Glaciological Research,
査読有, Vol. 28, 2010, 27-32.

https://www.jstage.jst.go.jp/article/bgr/28/0/28_0_27/pdf

[学会発表] (計 16 件)

- ① 内藤望：ヒマラヤにおける氷河変動と氷河湖決壊洪水。
電気・情報関連学会中国支部連合大会(招待講演), 2011年10月22日, 広島市.
- ② 内藤望, 他5名(1番目): 2010年秋期ブータン・ヒマラヤにおける小型氷河の変動調査報告。
雪氷研究大会(2011・長岡), 2011年9月20日, 長岡市.
- ③ Sugiyama, S., N. Naito, 他6名(3番目): Calving glacier dynamics controlled by subglacial water pressure close to ice overburden pressure in Glaciar Perito Moreno, Patagonia.
EGU General Assembly 2011, 2011年4月7日, Vienna, Austria.
- ④ 内藤望：ヒマラヤの氷河縮小と氷河湖決壊洪水。
大気環境学会・日本水環境学会・廃棄物資源循環学会中国四国支部合同講演会(招待講演), 2009年6月26日, 広島市.
- ⑤ 内藤望, 榎本浩之, 他6名(1番目): 南パタゴニア氷原ペリート・モレノ氷河動態観測-2007, 2008年観測報告-。
雪氷研究大会(2008・東京), 2008年9月24日, 東京都文京区.

[図書] (計 1 件)

- ① Naito, N.: Summer accumulation type glaciers. In "Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers", ed. by V. P. Singh, P. Singh and U. K. Haristha, Springer, 2011, 1107-1108.

[その他]

- ① 中国新聞, 「氷河縮小 世界に警鐘」(研究紹介), 2012年4月2日.
- ② 読売新聞(中部支社版), 「ヒマラヤ解ける氷河」(研究紹介), 2012年2月14日.
- ③ KUENSEL, 「Visual glacier shrinkages in the decades」(ブータン王国の現地新聞に研究成果解説文を寄稿), 2012年2月11日.
- ④ 内藤望：地球温暖化に伴う氷河の変化。
インテレクチャル・カフェ広島(産官学連携講演会), 2011年12月13日, 広島市.
- ⑤ 内藤望：地球温暖化と氷河。
はつかいち環境講座(一般市民向け公開講座), 2010年12月16日, 廿日市市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内藤 望 (NAITO NOZOMU)

広島工業大学・環境学部・教授

研究者番号：90368762

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし