

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23403006

研究課題名(和文) カービング氷河の急激な後退に氷河流動が果たす役割

研究課題名(英文) The role of glacier dynamics on rapid retreat of calving glaciers

研究代表者

杉山 慎 (SUGIYAMA, SHIN)

北海道大学・低温科学研究所・准教授

研究者番号：20421951

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、人工衛星データの解析と現地観測によって、パタゴニアと南極半島におけるカービング氷河の変動とそのメカニズム解明に取り組んだ。その結果、南パタゴニア氷原における1984年以降の氷河変動を定量化し、近年の氷河後退と流動変化の関係を明らかにした。また氷河湖の底面地形と水塊構造を測定し、湖が氷河変動に果たす役割を示した。さらに南極半島のカービング氷河を熱水掘削することによって、氷河底面の水理環境と氷河流動の関係を明らかにした。以上の成果は、特に研究の進んでいないパタゴニア・南極半島地域におけるカービング氷河の変動と、そのメカニズムの理解を推し進めるものである。

研究成果の概要(英文)：We carried out satellite and field measurements to study the role of glacier dynamics in rapid retreat of calving glaciers. Glacier front positions and ice speed over the entire area of Southern Patagonia Icefield were quantified from 1984 to 2011. Details of the data revealed the fundamental role of glacier dynamics in the significantly large retreat observed in several glaciers. Lake measurements confirmed the influence of bed geometry on glacier stability, and unique lake temperature structures in front of calving glaciers. We also performed hot water drilling on glaciers on Livingston Island in Antarctic Peninsula. Subglacial and englacial measurements provided us clues to understand the mechanism of short-term ice speed variations. These results demonstrated that the glacier dynamics is a key driver of the recent rapid retreat of calving glaciers, and also suggested potentially important role of ice-lake interactions in the glacier change.

研究分野：雪氷学

キーワード：カービング氷河 パタゴニア 南極半島 氷河湖 氷河流動 熱水掘削 気候変動 地球変動予測

### 1. 研究開始当初の背景

南米パタゴニアの氷河は、近年急速に縮小して海水準の上昇に顕著な影響を与えている。しかしながら、気候が厳しくアクセスも困難なパタゴニアでは、氷河の観測データが乏しくその研究は遅れている。その結果、パタゴニア氷原の変動が海水準変動予測における重要な不確定要素となっている。

パタゴニアの氷河は海や湖への流入(カーピング)に特徴づけられる。カーピング氷河は通常の氷河と比較して急激に変動し、氷河変動と同時に流動速度が上昇することが知られており、グリーンランドやアラスカでは特に大きな末端・流動変化が観測されている。しかしながら、カーピング氷河の後退に氷河流動が果たす役割は、良く理解されていない。

これまでに申請者は、山岳氷河の流動変化を詳細に観測し、氷河の底面水圧が氷の上載荷重に近づくと(氷が水に浮く寸前)、流動速度が急激に増加することを明らかにした。末端付近が水に浸されたカーピング氷河の底面は常に高い水圧にさらされており、水圧変動に対して氷河流動がより敏感に変化すると予想される。たとえば気温上昇によって融解が増加すれば、融解水が底面に流入して水圧が上昇して氷河が加速、その結果、氷の流出による「氷厚減少」「上載荷重減少」「流動加速」「氷厚減少」という正のフィードバックが働きうる。すなわち気候の変動だけでなく、氷河流動が主要因となって氷河の後退が駆動されている可能性がある。

### 2. 研究の目的

上記のような背景に基づいて本研究では、パタゴニア南部のカーピング氷河を中心に野外観測と人工衛星データ解析を行い、以下の手法でカーピング氷河特有の変動メカニズムを明らかにすることを目的とした。

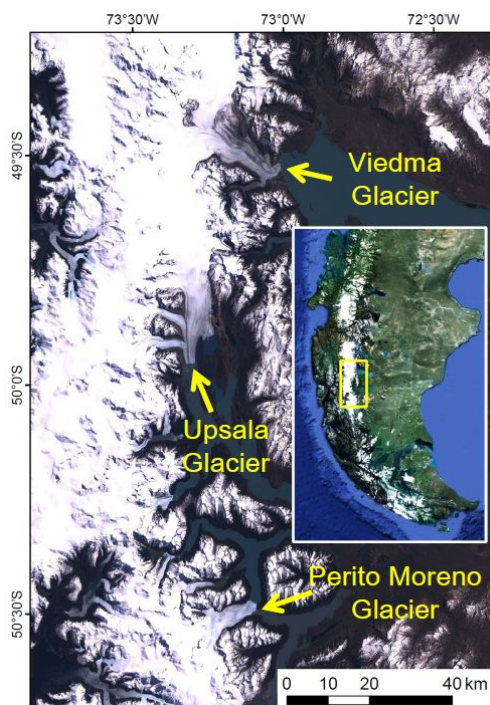


図1. パタゴニア南氷原研究対象地

(1) カーピング氷河の末端位置、流動速度、表面高度を人工衛星データによって解析し、過去に報告された観測データおよび衛星データと比較する。この作業から、過去約20年間にわたる氷河末端位置、氷厚、流動速度の変化を定量化する。

(2) パタゴニアと南極半島の氷河において流動、底面水圧、気温観測を行い、気温および底面水圧と流動速度の関係を明らかにする。

(3) 上記の衛星解析、野外観測の結果に基づいて、氷河後退と流動変化との関係を調べ、カーピング氷河の流動変化が氷河変動に果たす役割を明らかにする。特に近年大きな後退が観測されているウブサラ氷河に関しては、氷河末端付近の流動場を詳細に解析し、氷厚変化との因果関係を調べる。

(4) カーピング氷河の変動に関する数値モデルを構築し、パタゴニアと南極半島におけるカーピング氷河の将来変動予測を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) 人工衛星データの解析

南パタゴニア氷原におけるカーピング氷河の末端位置変動を、LANDSAT 画像の読み取りによって測定した。この測定には一般的なGISソフトウェアを利用した。さらに撮影時期の異なる衛星画像(LANDSAT、ALOS PRISM、ALOS PALSER など)に画像相関法を適用し、氷河の流動速度を測定した。特に本プロジェクトにおいて独自に開発したプログラムを使用することで、より高い測定精度で、広い時空間範囲をカバーする大量の画像処理が可能となった。以上の測定を南パタゴニアのカーピング氷河全てにおいて実施し、1984年から2011年における末端位置と流動速度の変化を定量化した。

ウブサラ氷河、ペリートモレノ氷河、アメギノ氷河(図1)においては、2006~2011年に撮影されたALOSプリズムのステレオペア画像を使って、デジタル標高モデル(DEM)を作成した。この作業には実体視モニターとデジタル写真測量システム(Leica Photogrammetry Suite)を使用した。さらにスペースシャトル搭載レーダで2000年に測量されたSRTM標高データを加えて、2000年以降の氷河標高変化を算出した。

#### (2) パタゴニアでの野外観測

本研究の実施期間中3度にわたって、南パタゴニア氷原のペリートモレノ氷河、ウブサラ氷河、ヴィエドマ氷河において野外観測を実施した。氷河上ではGPSを自動運転して、流動速度を連続的に測定した。氷河末端付近ではインターバルカメラによるカーピング観測を行ったほか、カーピングによって生じる波を水位計によって記録した。氷河前の湖では、ボートに固定した測深ソナーによって湖底地形を測量した。またボートからCTDを投入して水温と濁度の鉛直構造を測定した。さらに湖水をサンプリングして、国内にて濁度の定量、酸素水素同位体の測定を行った。

表 1. 南パタゴニアにおける野外観測

期間	観測地	観測内容	参加者
2012年12月~ 2013年1月	ペリートモレノ ウブサラ ヴィエドマ	流動 カービング 気象 湖底地形 湖水特性	杉山、澤柿、榑原 箕輪内藤、武藤 Skvarca
2013年12月~ 2014年1月			杉山、澤柿、榑原、 箕輪、内藤Skvarca
2014年10月	ペリートモレノ ウブサラ		榑原、箕輪Skvarca

また氷河の周辺では、自動気象ステーションによる長期気象観測を継続している。

(3) 熱水掘削

2015年1~2月、南極半島リビングストーン島の Johnsons 氷河と Hurd 氷河において、熱水掘削を含む氷河観測を実施した。氷河上の3か所で北大低温研のシステムを使った掘削を行い、氷河底面水圧、氷の温度を測定した。また掘削孔カメラを挿入して孔内観察を行った。掘削地点ではGPSによる流動速度連続測定を実施し、底面水圧の変化との比較を行った。なおこの野外観測は、マドリッド工科大学 Francisco Navarro 教授との国際共同研究によって実施した。

4. 研究成果

(1) 氷河の末端変動と流動変化

人工衛星データの解析によって、南パタゴニア氷原のカービング氷河のほとんどが、1980年代以降後退を続けていることが明らかになった(図2) Sakakibara and Sugiyama, 2014)。中でもホルヘモン、HPS12、ウブサラ氷河に代表されるいくつかの氷河は、際立って急速な後退を示している。さらに本研究によって、南パタゴニア氷原全域をカバーする氷河流動マップが完成した。このデータをもとに流動変化を解析したところ、上記の3氷河は後退に伴う加速が確認され、パタゴニアにおけるカービング氷河の急速な後退に、流動変化が大きな役割を果たしていることが明らかになった。

ウブサラ氷河の末端変動、流動速度、表面高度の変化を詳細に調べたところ、2008年以降の急速な後退と同時に、20-50%の流動加速と最大で年間39mの表面高度低下が明らかになった(Sakakibara et al., 2013)。この期間、氷河末端における浮力は氷の上乗荷重を上回っており、急激な氷厚減少によって氷が浮き、末端崩壊を招いている可能性が強く示唆された。さらに氷河末端付近の湖底地形を解析したところ、上流に向かって水深が増加する地形が2008年以降の後退加速に重要な役割を果たしていることが示された。

一方、ペリートモレノ氷河とアメギノ氷河の末端位置、流動速度、表面高度を比較したところ、隣接する両氷河の全く異なる振る舞いが明らかになった(Minowa et al., 2015)。アメギノ氷河は2000年以降急激に後退し氷厚が減少しているのに対して、ペリートモレノ氷河はほぼ一定の末端位置を保ったまま

わずかに氷厚が増加している。表面高度と質量収支の分布を比較検討したところ、ペリートモレノ氷河の涵養域が十分な面積を持つものに対して、アメギノ氷河の上流域は非常に狭い。すなわちAAR(涵養域面積比)の差が異なる氷河変動の原因であり、氷河下流域の地形に起因する流動状態がAARの変化に影響を与えたものと考えられる。

以上の成果は、南パタゴニアにおけるカービング氷河変動の全容を明らかにし、流動速度の分布と変動を氷原全域にわたって初めて定量化したものである。また個々の氷河を詳しく解析した結果は、氷河流動と末端変動、氷厚変化の関係について重要な知見が与えるものである。

(2) 氷河の短期流動変化

ペリートモレノ氷河上の2か所、ウブサラ氷河、ヴィエドマ氷河において測定した流動速度は、顕著な日変動を示した(図3)。流動変化は気温と強い相関があり、融解水の流れによって底面水圧が上昇し、氷河が加速していることを示している(Sugiyama et al., 2011)。少なくとも夏期間は、いずれの氷河でも顕著な流動変化が起きており、カービング氷河の流動が力学的環境変化に敏感であることが確認された。その一方でペリートモレノ氷河において観測した冬期間の流動速度には、大きな変化が見られなかった。また、ペリートモレノ氷河の上流側やヴィエドマ氷河では、流動変化の振幅が比較的小さく、氷河の構造によって流動変化の感度が異なることが示された。

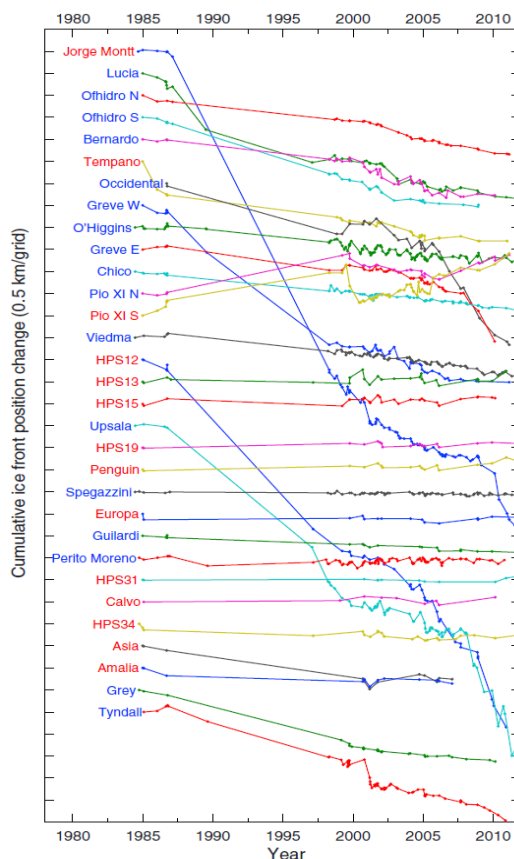


図 2. 南パタゴニアにおける全カービング氷河の末端位置変動



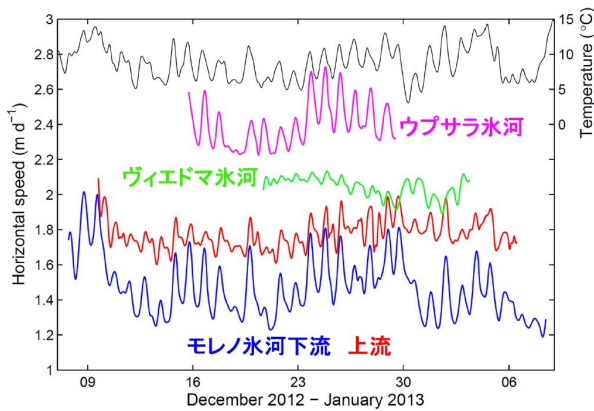


図 3. 各氷河で観測された短期流動変化

以上の結果は、今後の温暖化や湖水面の変動によって流動速度が変化し、氷河変動に影響を与えることを示すものである。また環境変化に起因する氷河流動の変化は、氷河によって大きく異なる可能性が高い。

(3) 湖底地形と湖水特性

ペリートモレノ氷河、ウブサラ氷河、ヴィエドマ氷河が流入する湖では、それぞれに特徴的な湖底地形が測定され、この地形が氷河変動に重要な役割を果たしていることが強く示唆された。たとえばウブサラ氷河では、2008 年まで安定していた氷河末端位置に岩盤の突起が見つかり、氷河を安定化させていたと考えられる。突起から上流側に向かって深くなる地形が、2008 年に始まった後退を加速させた可能性が高い。

湖水温は、それぞれの湖において顕著に異なる空間分布を示した。比較的水深の浅い (~150 m) ペリートモレノ氷河の湖は、ほぼ一様に比較的暖かい湖水 (~6 °C) で満たされていた。その一方で深い水深を持つウブサラ氷河の湖では、表層 200 m (3~4 °C) とその下 500 m までの中層 (1~2 °C) が存在し、さらに底層には 1 °C 以下の冷たい水塊が観測された。この冷水は濁度が高く、氷河底面から排出された融解水と考えられる。さらにヴィエドマ氷河では、表層 100 m の暖水 (6~7 °C) の下に、ほぼ融解温度に保たれた非常に冷たい水が存在した (図 4)。氷河底面から流出する融解水と考えられるこの冷水は、高濁度で密度が高く、氷河前に形成された盆地状の湖底地形に滞留しているものである。このような冷たい水が氷河前に存在することで、末端融解が抑制されている可能性がある。

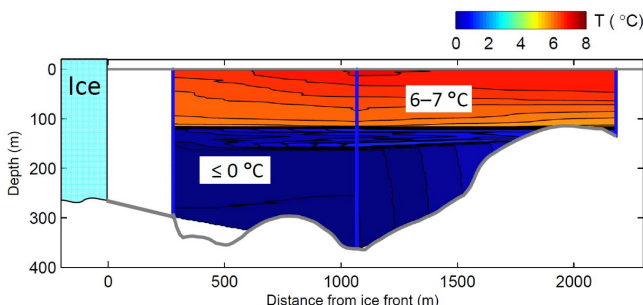


図 4. ヴィエドマ氷河が流入する湖の水温構造

各氷河において測定された湖底地形は、これまで研究が進んでいなかった湖底地形とカービング氷河変動の關係に重要な情報を与えるものである。また、カービング氷河前の水温・濁度分布は、過去に報告例のない特異な湖水構造を初めて明らかにしたものである。したがって、湖に流入するカービング氷河の末端融解への理解に新しい知見を与えるものと考えている。

(4) 氷河の末端消耗

湖の水位測定によって得られたペリートモレノ氷河のカービング頻度は、夏に大きな値を示した。一方、衛星データの解析結果は夏期に氷河末端の消耗が大きいことを示し、その季節変動は気温ではなく湖水温と良い相関を示している。これらの結果は、カービング氷河の末端消耗、すなわちカービングと末端水中融解が、湖との相互作用にコントロールされていることを示唆する。湖が氷河変動に果たす役割はこれまでほとんど検討されていない。よって本研究の成果は、湖との相互作用がカービング氷河の変動メカニズムに重要な役割を果たす可能性を新たに提案するものである。

(5) 熱水掘削

南極半島リビングストーン島において、氷河上 3 か所で計 5 本の熱水掘削に成功した。掘削後数日経って、孔内の水位が低下して不規則な変動を示し、氷河底面に排水システムが存在することが明らかになった (図 5)。上記の水位低下は突発的な流動加速の直後に起きたものであり、底面水理環境と氷河流動の因果関係を示している。

南極半島において、氷河底面観測を目的とした熱水掘削は初めての試みであり、このデータは同地域の氷河底面環境を初めて明らかにしたものである。掘削孔に設置した底面水圧センサとサーミスタチェーンはその後自動運転で測定を続けており、今後実施するデータ回収により、興味深いデータを提供するものと期待される。

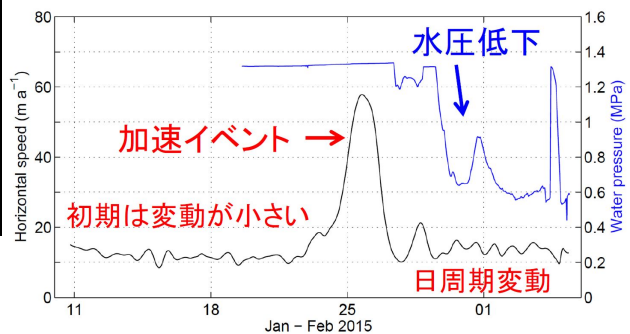


図 5. リビングストーン島 Johnsons 氷河における底面水圧と流動速度の変化

## 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 21 件)

Sugiyama, S., D. Sakakibara, S. Tsutaki, M. Maruyama and T. Sawagaki. 2015. Glacier dynamics near the calving front of Bowdoin Glacier, northwestern Greenland. *J. Glaciol.*, 61(226), 223–232. doi: 10.3189/2015JoG14J127. (査読有)

Minowa, M., S. Sugiyama, D. Sakakibara and T. Sawagaki. 2015. Contrasting glacier variations of Glaciar Perito Moreno and Glaciar Ameghino, Southern Patagonia Icefield. *Ann. Glaciol.*, 56(70), 26–32. doi: 10.3189/2015AoG70A020. (査読有)

Sakakibara, D. and S. Sugiyama. 2014. Ice-front variations and speed changes of calving glaciers in the Southern Patagonia Icefield from 1984 to 2011. *J. Geophys. Res.*, 119. doi:10.1002/2014JF003148. (査読有)

Sugiyama, S., T. Sawagaki, T. Fukuda and S. Aoki. 2014. Active water exchange and life near the grounding line of an Antarctic outlet glacier. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 399C, 52–60. doi:10.1016/j.epsl.2014.05.001. (査読有)

Fukuda, T., S. Sugiyama, T. Sawagaki and K. Nakamura. 2014. Recent variations in the terminus position, ice velocity and surface elevation of Langhovde Glacier, East Antarctica. *Antarc. Sci.*, 326(6), 636–645. doi:10.1017/S0954102014000364. (査読有)

Sakakibara, D., S. Sugiyama, T. Sawagaki, S. Marinsek, P. Skvarca. 2013. Rapid retreat, acceleration, and thinning of Glaciar Upsala in the Southern Patagonia Icefield, initiated in 2008. *Ann. Glaciol.*, 54(63), 131–138. doi: 10.3189/2013AoG63A236. (査読有)

Muto, M., and M. Furuya, 2013. Surface Velocities and Ice-Front Positions of Eight Major Glaciers in the Southern Patagonian Ice Field, South America, from 2002 to 2011, *Remote Sens. Environ.*, 139, 50–59. doi:10.1016/j.rse.2013.07.034. (査読有)

Nishimura, D., S. Sugiyama, A. Bauder and M. Funk. 2013. Changes in ice-flow velocity and surface elevation from 1874 to 2006 in Rhonegletscher, Switzerland. *Arc. Antarc. Alp. Res.*, 45(4), 552–562. doi: 10.1657/1938-4246-45.4.552

Tsutaki, S., S. Sugiyama, D. Nishimura and M. Funk. 2013. Acceleration and flotation of a glacier terminus during a proglacial lake formation in Rhonegletscher, Switzerland. *J. Glaciol.*, 59(215), 559–570. doi: 10.3189/2013JoG12J107. (査読有)

杉山慎, 澤柿教伸, 津滝俊, 榊原大貴, 丸山未妃呂. 2013. グリーンランド北西部における氷床・氷帽・カービング氷河の変動, 北海道の雪氷, 33, 73–76. (査読無)

箕輪昌紘, 榊原大貴, 杉山慎, 澤柿教伸, Pedro Skvarca. 2013. 人工衛星画像を用いた南パタゴニア氷原カービング氷河の流動速度測定, 北海道の雪氷, 32, 114–117. (査読無)

榊原大貴, 杉山慎. 2012. 人工衛星画像を用いた南パタゴニア氷原カービング氷河の流動速度測定, 北海道の雪氷, 31, 101–104. (査読無)

杉山慎, 澤柿教伸, 福田武博. 2012. 南極ラングホブデ氷河における熱水掘削, 北海道の雪氷, 31, 89–92. (査読無)

Sugiyama, S., P. Skvarca, N. Naito, H. Enomoto, S. Tsutaki, K. Tone, S. Marinsek and M. Aniya. 2011. Ice speed of a calving glacier modulated by small fluctuations in basal water pressure. *Nature Geosci.*, 4, 597–600. doi:10.1038/ngeo1218. (査読有)

Tsutaki, S., D. Nishimura, T. Yoshizawa and S. Sugiyama. 2011. Changes in glacier dynamics under the influence of proglacial lake formation in Rhonegletscher, Switzerland. *Ann. Glaciol.*, 52(58), 31–36. (査読有)

Aniya, M., P. Skvarca, S. Sugiyama, T. Aoki, T. Matsumoto, R. Anma, N. Naito, H. Enomoto, その他 7 名. 2011. Glaciological research project in Patagonia 2006–2009: Studies at Glaciar Perito Moreno, Hielo Patago'nico Sur, in area of Hielo Patago'nico Norte and along the Pacific Coast. *Bulletin of Glaciological Research*, 30, 1–17. (査読有)

Dalban Canassy, P., A. Bauder, M. Dost, R. Fäh, M. Funk, S. Margreth, B. Müller and S. Sugiyama. 2011. Hazard assessment investigations due to recent changes in Triftgletscher, Bernese Alps, Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 2149–2162.

福田武博, 杉山慎, 澤柿教伸. 2011. ALOS/PRISM データの解析によるラングホブデ氷河表面高度測定, 北海道の雪氷, 30, 75–78. (査読無)

〔学会発表〕(計 50 件)

Sakakibara, D. and S. Sugiyama. Ice-front variations and speed changes of calving glaciers in the Southern Patagonia Icefield from 1984 to 2011. AGU Fall Meeting, December 16, 2014, San Francisco, USA

Minowa, M., D. Sakakibara, S. Sugiyama and P. Skvarca. Seasonal variations in the terminus position and frontal ablation rate of Glaciar Perito Moreno, a freshwater calving glacier in the Southern Patagonia Icefield. AGU Fall Meeting, December 16, 2014, San Francisco, USA

Sakakibara, D. and S. Sugiyama. Ice front and flow speed variations of marine terminating outlet glaciers along the coast of Prudhoe Land, northwestern Greenland. NIPR Symposium on Polar Science, December 5, 2014, NIPR, Tachikawa, Japan

Minowa, M., D. Sakakibara and S. Sugiyama. Seasonal variations in the terminus position and frontal ablation rate of Glaciar Perito Moreno, a freshwater calving glacier in the Southern Patagonia Icefield. AOGS, July 29, 2014, Royton Sapporo Hotel, Sapporo, Japan

Sugiyama, S., M. Minowa, D. Sakakibara, Y. Ohashi, P. Skvarca, T. Sawagaki, N. Naito. Thermal structures of proglacial lakes in the Southern Patagonia Icefield. IGS symposium, May 27, 2014, Chamonix, France

Sugiyama, S., T. Sawagaki, T. Fukuda and S. Aoki. Warm water and life beneath the grounding zone of an Antarctic outlet glacier. EGU, April 9, 2013, Wien, Austria

Sugiyama, S., S. Tsutaki, D. Sakakibara, T. Sawagaki, S. Matsuno, M. Minowa, M. Maruyama, J. Saito, S. Matoba and S. Yamaguchi. Mass loss of glaciers and ice caps in northwestern Greenland. ISAR-3, January 16, 2013, Miraikan, Tokyo, Japan

Sakakibara, D. and S. Sugiyama. Ice front variations and velocity of outlet glaciers terminating in Inglefield fjord, the Northwest Greenland. ISAR-3, January 15, 2013, Miraikan, Tokyo, Japan

Muto M. and M. Furuya. Spatial and Temporal Glacier Flow Velocity Changes in Southern Patagonia Icefield: 2002-2011. AGU Fall Meeting, December 4, 2012, San Francisco, USA

Sugiyama, S., T. Sawagaki and T. Fukuda. Hot water drilling and subglacial measurements at the floating tongue of Langhovde Glacier, East Antarctica. IGS Symposium, June 29, 2012, Fairbanks, USA

Fukuda T., S. Sugiyama and T. Sawagaki. Ice velocity, surface elevation and grounding line position of Langhovde Glacier, an outlet glacier in East Antarctica. IGS Symposium, June 28, 2012, Fairbanks, USA

Sakakibara, D., S. Sugiyama, T. Sawagaki, S. Marinsek and P. Skvarca. Rapid retreat, acceleration, and thinning of Glaciar Upsala in the Southern Patagonia Icefield, initiated in 2008. IGS Symposium, June 28, 2012, Fairbanks, USA

Sugiyama, S., P. Skvarca, N. Naito, H. Enomoto, K. Tone, S. Tsutaki, S. Marinsek and M. Aniya. Calving glacier dynamics controlled by subglacial water pressure close to ice overburden pressure in Glaciar Perito Moreno, Patagonia. EGU, April 7, 2011, Wien, Austria

〔その他〕

ホームページ

<http://www.ice.lowtem.hokudai.ac.jp/~sugishin/research/hokudai2/patagonia/patagonia.html>

プレスリリース

[http://www.hokudai.ac.jp/bureau/topics/press\\_release/110808\\_pr\\_lowtem.pdf](http://www.hokudai.ac.jp/bureau/topics/press_release/110808_pr_lowtem.pdf)

[http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/topics.html#h27\\_1](http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/topics.html#h27_1)

テレビ報道 (北海道テレビ)

<http://www.htb.co.jp/patagonia/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉山 慎 (SUGIYAMA SHIN)

北海道大学・低温科学研究所・准教授  
研究者番号：20421951

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

澤柿 教伸 (SAWAGAKI TAKANOBU)

北海道大学・地球環境科学研究所・助教  
研究者番号：70312410

内藤 望 (NAITO NOZOMU)

広島工業大学・環境学部・教授  
研究者番号：90368762

古屋 正人 (FURUYA MASATO)

北海道大学・理学部・教授  
研究者番号：60313045

榎本 浩之 (ENOMOTO HIROYUKI)

国立極地研究所・  
国際北極環境研究センター・教授  
研究者番号：00213562