

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26550001

研究課題名(和文) カービング氷河末端における氷融解量の直接測定

研究課題名(英文) Direct measurement of subaqueous melting at the front 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・教授

研究者番号：20421951

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)：カービング氷河(海や湖に流入する氷河)の水中融解は観測が困難で、その定量化とプロセスの理解が急務となっている。そこで本研究では、サイドスキャンソナーを使って氷河末端の水中形状を測定し、融解速度の測定を試みた。パタゴニア、グリーンランド、南極で観測を行った結果、パタゴニアの湖に流入するグレイ氷河にて、水中で前方に突出した氷河形状が明らかになった。水温の測定結果と合わせて、湖面付近でより著しい氷融解が示された。当初計画した手法では融解の定量化には至らなかったものの、水温、濁度、水同位体の測定から融解速度の推定に成功した。以上の成果は、淡水カービング氷河の消耗機構に新しい知見を与えるものである。

研究成果の概要(英文)：This project aimed to quantify subaqueous melting at the front of calving glaciers by mapping under-water ice geometry using a side-scanning sonar. We operated a sonar (Imagenex Model 872) in proglacial lakes and fjords in Patagonia, Greenland and Antarctica. At the front of Grey Glacier, a freshwater calving glacier in Patagonia, we found the ice front was extending into the lake by 50-100 m under the water surface. Together with water temperature distributions in the lake, our observation implies that ice melting is enhanced near the water surface. Melt rate was not quantified only from the sonar data, but water temperature, turbidity and isotope measurements enabled us to estimate the subaqueous melting rate at the front of Grey Glacier. The results provided new insights into the frontal ablation and evolution of freshwater calving glaciers.

研究分野：氷河学、雪氷学

キーワード：カービング氷河 サイドスキャンソナー 氷河湖 フィヨルド パタゴニア グリーンランド 環境変動 国際研究者交流

### 1. 研究開始当初の背景

近年、世界各地のカービング氷河（末端が海や湖に流入する氷河）が大きく後退し、海水準上昇に大きな影響を与えている。カービング氷河は陸上に末端を持つ通常の氷河よりも急激な変動を示すことが知られており、その理由はカービング氷河特有の質量維持機構にある。通常の氷河は、降雪による涵養と融解による消耗のバランスによって質量を維持している。その一方でカービング氷河は、末端で起きる消耗プロセス、すなわち「カービング（冰山分離）」および「水中での末端融解」が質量損失に重要な役割を果たしている（図1参照）。気候に同調して変化する降雪や融解とは異なり、カービング氷河末端（カービング端）での消耗プロセスは気候と無関係に大きな変動を示し、急激な氷河変動を駆動することが知られている。しかしながら、カービング、末端融解ともにその詳しいメカニズムは理解されていない。特にカービング端の水中融解量は測定が非常に困難で、変動メカニズムはもちろん、融解量そのものがほとんど測定されていない。その一方で、グリーンランドにおけるカービング氷河の後退と海洋の温暖化が指摘され、末端での水中融解の重要性が強く指摘されている。

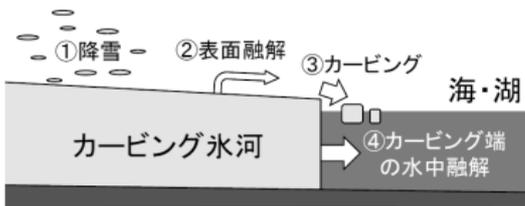


図1. カービング氷河の質量収支を決定する4つの要素。本研究では、カービング端における水中融解量の直接測定を目指した。

### 2. 研究の目的

上記のような背景に基づき、本研究ではカービング端の水中融解量を測定することを目指した。具体的には、水底地形探査用のサイドスキャンソナーを使って、水に浸かったカービング端の形状と位置を正確に測定する。この測定を繰り返すことによって、氷の融解速度を測定することができる。また氷表面の詳細な形状から、融解に必要な熱の輸送プロセスや融解水の挙動を明らかにする。また、氷河前の湖やフィヨルドで水温分布、塩分・濁度分布などを測定することによって、水中融解と氷河への熱供給に関する情報を得る。これらの観測結果から、カービング端の水中融解量を定量化し、融解メカニズムを理解することが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

#### (1) サイドスキャンソナー

サイドスキャンソナー（Imagenex社製、Model 872）を新規に調達して、氷河末端形状の測定システムを構築した。このソナーは音波を扇状に照射して、広い範囲の水底地形

を測定する装置である（図2a）。鉛直面内に広がるビームが水中の氷端面に届くよう、氷河端に沿って牽引する（図2b）。ソナーの探査範囲は公称300mであるが、明瞭な反射シグナルを得るために、安全が確保される範囲でなるべく氷河に近寄って測定を行った。周波数は260、330、800kHzを切り替えて使用した。測定後、GPS位置座標とソフトウェア（Chesapeake Technology社製SonarWiz）を使って、得られた反射像を実空間に投影した。またボートに測深ソナー（Lowrance社製）を搭載して、海・湖の深度を測定した。

この他、氷河前縁の湖やフィヨルドでは、CTD・濁度プロファイラ（JFEアドバンテック社製）を使って温度・濁度・塩分の鉛直分布を測定した。またニスキン採水器を使って湖水をサンプリングし、懸濁物質濃度と酸素同位体比を分析した。

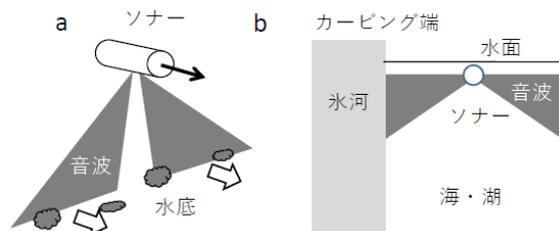


図2. サイドスキャンソナーによる(a)通常の水底地形測定および、(b)本研究で実施したカービング端測定の手法。

#### (2) 観測地

上記の測定を、パタゴニアのグレイ氷河とペリートモレノ氷河、グリーンランドのボードイン氷河とサン氷河、南極のジョンソン氷河において実施した。以下では主に、サイドスキャンソナーによって明瞭な反射像が得られたグレイ氷河での観測、結果、成果について記す。

グレイ氷河はチリ南部、南パタゴニア氷原の南東部に位置する淡水カービング氷河である。近年の後退によって末端が3つに分離しており、そのうち東側に位置する末端の前縁で観測を実施した。氷河端部は幅が約800mであり、我々の測定によれば、中心部での湖水深は約300mである。

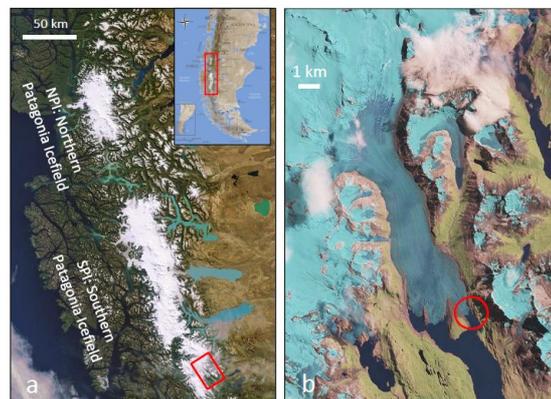


図3. (a) 南米パタゴニア氷原における研究対象地（ $\square$ ）および、(b) 観測を行ったグレイ氷河の東側末端（ $\circ$ ）。

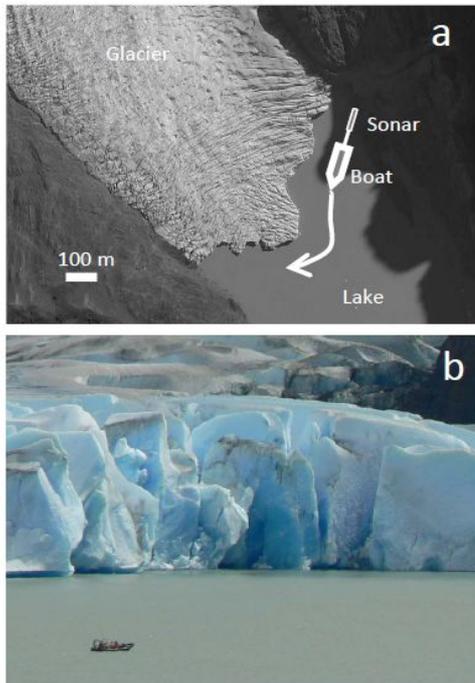


図 4. (a)グレイ氷河末端におけるサイドスキャンソナー測定を示す概念図(背景は2016年2月2日の Landsat 画像)。 (b)小型船を使った氷河前での観測の様子(2016年1月31日)。

#### 4. 研究成果

##### (1) サイドスキャンソナー

グレイ氷河の前縁で小型ボートによりサイドスキャンソナーを曳航し(図4)水中に位置する氷河端からの反射像を得た(図5)。反射像は氷が水中で突き出していることを示すものであった。すなわち、空中に見える氷河の末端位置と比較して、水中の氷が湖の方向に延びている。氷河近くでCTD測定を試みると、湖の水深よりも明らかに浅い深さで測器が氷に当たり、ソナー画像の解釈が正しいことが示された。水中に突き出した氷は不規則な形状をしており、水面から50m程度の深さで、概ね50-100m前方に突き出していることが確認できた。

このような氷の形状は、水中で氷河側にえぐれた構造を持つ海洋カービング氷河の末端と全く異なるものである。湖の深い部分で融解が抑制されていることが示唆され、その原因は湖の温度分布にあると考えられる。同じ南パタゴニア氷原の淡水カービング氷河(ペリートモレノ、ウブサラ、ヴィエドマ)での観測では、氷河底から流出する懸濁した冷たい融解水が、湖の深い部分に滞留していることが明らかになった(図6)。一方で日射によって暖められた表層水は、強いカタバ風によって100m以上の深さまで混合される。湖水面近くの氷は表層の暖水によって融解が進むのに対して、湖の深い部分では冷たい氷河融解水によって融解が抑えられていると考えられる。グレイ氷河における水温測定でも、表層50-100mが比較的暖かく、それよりも深い部分により冷たい湖水が確認さ

れた。このような温度構造が淡水カービング氷河に特有な氷河端形状を生み出している。湖に突き出した氷に作用する浮力は大規模なカービング(氷河端の崩壊)を招くため、水中融解がカービング氷河の末端消耗に強い影響を与えることが示された。この成果は、淡水カービング氷河に新しい知見を与えるものであり、2017年2月に国際雪氷学会のシンポジウムにて公表し、投稿論文を準備中である。

グレイ氷河では図5に示す明瞭な反射像が得られたが、グリーンランドやパタゴニアの他氷河では解析に足りる反射像は得られなかった。その大きな原因は、カービングの危険、氷河前に浮かぶ冰山などの影響で、十分近くまで氷河端に近寄れなかったためである。また、船の揺動によって安定した反射シグナルが得られない問題もあった。これらの結果から、サイドスキャンソナーを有効に運用するためには、比較的安定した氷河端に近寄り、静穏な条件で測定を行う必要があることが明らかになった。

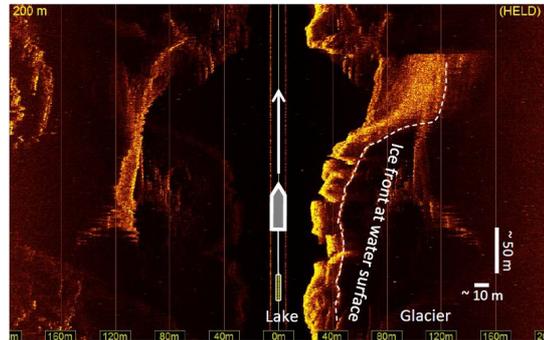


図 5. グレイ氷河末端におけるサイドスキャンソナーの反射像。中心線に沿ってソナーを曳航し、右側に位置する水中の氷河端からの反射が得られた。破線が水面における氷河末端位置。

##### (2) 氷河前縁湖の温度構造

本研究では、サイドスキャンソナー以外の測定や解析からも、水中融解の定量化とメカニズム解明に関する成果が得られた。

前述した通り、南パタゴニア氷原の3つの氷河で前縁湖の水温・濁度構造を測定した結果、淡水カービング氷河に特有な湖水温度分布が明らかとなった(図6)。この観測結果はカービング氷河の水中融解に関して重要な知見をもたらすだけでなく、氷河湖の熱構造に関する新しい発見である。この成果を論文にて報告したところ、当該論文が米国地球物理連合の機関誌にてハイライトされた(Sugiyama et al., 2016)。

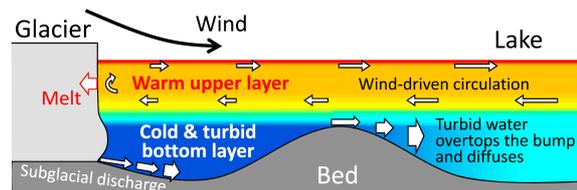


図 6. パタゴニアの氷河前縁湖の温度構造と循環を示す模式図(Sugiyama et al., 2016)。

### (3) 水中融解量の推定

南パタゴニア氷原ペリートモレノ氷河では、前縁の二つの湖 (Brazo Rico と Canal de los Tempanos) にて水温濁度の測定、および水同位体の分析を行い、これらの物理量を使って氷河端での水中融解量を見積もった。この手法は、過去に海洋カービング氷河に適用された技術を、初めて淡水カービング氷河に応用したものである (図7)。その結果、ペリートモレノ氷河の末端で生じる氷消耗の約半分が、水中融解によって起きている可能性が示された。淡水カービング氷河の水中融解は比較的少なく、末端消耗の多くがカービングによって起きていると考えられているが、本研究成果はそのような認識の再検討を迫るものである。

この手法によって精度良く融解量を見積もるためには、各物理量を詳細かつ長期にわたって測定する必要がある。また湖の循環に関するデータが必要となるが、そのような観測は本研究の範囲を超えるものである。係留系による長期観測、より空間密度の高いCTD観測とサンプリングが、今後の重要な課題として挙げられる。

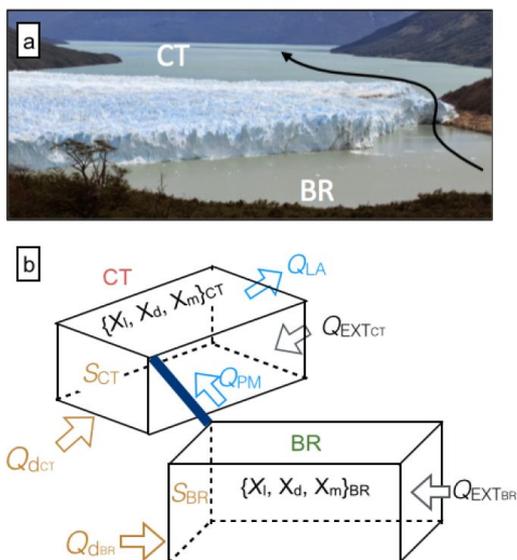


図7. ペリートモレノ氷河における、水中融解量の推定手法を説明する模式図。湖水は Brazo Rico (BR)から Canal de los Tempanos(CT)に流れており、氷河末端からは融解水 ( $Q_d$ ) が流入する。これらの条件を仮定して、湖水の熱、懸濁物質、同位体成分のバランスから、湖水に含まれる水中融解水の割合 ( $X_m$ ) が算出される。

### 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 12件)

Minowa, M., S. Sugiyama, D. Sakakibara, P. Skvarca. 2017. Seasonal Variations in Ice-Front Position Controlled by Frontal Ablation at Glaciar Perito Moreno, the Southern Patagonia Icefield. *Frontiers in Cryosphere Science*, **5**:1, doi: 10.3389/feart.2017.00001. (査読有)

Sugiyama, S., M. Minowa, D. Sakakibara, P. Skvarca, T. Sawagaki, Y. Ohashi, N. Naito and K. Chikita. 2016. Thermal structure of proglacial lakes in Patagonia. *J. Geophys. Res. Earth Surface*, **121**, doi:10.1002/2016JF004084. (査読有)

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)

[学会発表](計 13件)

Sugiyama, S., M. Minowa, M. Schaefer. Calving front of Grey Glacier in Patagonia is protruding into water under the lake surface. IGS symposium, February 13-17, 2017, Wellington, New Zealand.

M. Minowa, S. Sugiyama, Y. Ohashi, T. Sawagaki, S. Tsutaki, D. Sakakibara, S. Aoki, P. Evgeny and Y. Weidmann. Water properties and circulation in front of tidewater glaciers in northwest Greenland. IGS symposium, 10-15, 2016, La Jolla, USA.

Minowa, M., S. Sugiyama, D. Sakakibara, E. Podolskiy, Y. Ohashi and P. Skvarca. High-frequency surface wave measurements of micro-tsunamis generated by glacier calving. EGU Annual Meeting, 17-22, 2016, Vienna, Austria.

杉山慎, 箕輪昌紘, Marius Schaefer, パタゴニア・グレイ氷河のカービング端は水面下で湖に突き出している, 雪氷研究大会, 2016年9月28日~10月2日, 名古屋大学(愛知県・名古屋市).

箕輪昌紘, 杉山慎, 榊原大貴, Pedro Skvarca, 大橋良彦, 澤柿教伸, 内藤望, 南パタゴニア氷原におけるカービング氷河に末端消耗プロセスに関する研究, 雪氷研究大会, 2016年9月28日~10月2日, (愛知県・名古屋市).

箕輪昌紘, 杉山慎, 榊原大貴, Pedro Skvarca, 大橋良彦, 澤柿教伸, 内藤望, パタゴニア・ペリート・モレノ氷河における末端消耗メカニズム, 雪氷研究大会, 2015年9月13~16日, 信州大学(長野県・松本市).

箕輪昌紘, 杉山慎, 榊原大貴, Pedro Skvarca, 大橋良彦, 澤柿教伸, 内藤望, パタゴニア・ペリート・モレノ氷河における末端消耗メカニズム, 日本地球惑星連合大会, 2015年5月24~28日, 幕張メッセ(千葉県・千葉市).

Minowa, M., S. Sugiyama, D. Sakakibara, P. Skvarca, Y. Ohashi, T. Sawagaki, N. Naito and K. Chikita. Seasonal variations in the thermal structure of proglacial lakes in the southern patagonia icefield. International Symposium on Contemporary ice-sheet dynamics, August 17-22, 2015, Chamonix, France.

Sugiyama, S., M. Minowa, D. Sakakibara, P. Skvarca, T. Sawagaki, Y. Ohashi, N. Naito. Thermal structures of proglacial lakes in the Southern Patagonia Icefield. International Symposium on contribution of glaciers and ice sheets to sea level change, May 26-30, 2014, Chamonix, France.

Minowa, M., D. Sakakibara, S. Sugiyama and P. Skvarca. Seasonal variations in the terminus position and frontal ablation rate of Glacier Perito Moreno, a freshwater calving glacier in the Southern Patagonia Icefield. AGU fall meeting, December 15-19, 2014, San Francisco, USA.

[その他]

・プロジェクト ホームページ

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

・所属研究機関・広報誌記事

「南米パタゴニアで氷河と湖の境界に迫る」

<http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/newsletter/news42.pdf>

・米国地球物理連合 論文ハイライト

<https://eos.org/research-spotlights/in-patagonian-lakes-glacial-meltwater-lies-low>

・テレビ報道(北海道テレビ)

「パタゴニア 氷河×風×地球の未来」

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

・アウトリーチ

札幌市にて、トークイベント「ポプラ広場：南米パタゴニアの氷河と地球の未来」(朝日新聞社・北海道テレビ放送共催)にて講演。

パタゴニア、トーレス・デル・パイネ国立公園において、2016年2月1日と2017年3月10日に、現地観光ガイドとパークレンジャーを招いた一般向けの講演会を実施。

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・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)

法政大学・社会学部・准教授

研究者番号：70312410

山崎 新太郎 (YAMAZAKI SHINTARO)

北見工業大学・工学部・助教

研究者番号：40584602

(4) 研究協力者

箕輪 昌紘 (MASAHIRO MINOWA)

榊原 大貴 (DAIKI SAKAKIBARA)

シェーファ マリウス (MARIUS SCHAEFER)

スクヴァルカ ペドロ (PEDRO SKVARCA)