

平成 29 年 10 月 10 日

北海道大学 北極域研究センター長 殿

氏 名 箕輪 昌紘

## 終了報告書

- ・派遣支援先 機関名 : Geophysical Institute, University of Alaska (国名 : アメリカ合衆国)
- ・受入研究者 Professor Martin Truffer
- ・研究課題名 (和文・英文)
  - (和文) カービング氷河における末端消耗の比較研究
  - (英文) Comparative study of frontal ablation in calving glaciers
- ・派遣支援期間 : 平成 29 年 5 月 26 日 ~ 平成 29 年 9 月 23 日

## 1. 派遣支援期間中の研究実施状況

ArCS 若手研究者海外派遣事業の支援を受け、アラスカ大学フェアバンクス校の地球物理研究所に約 4 ヶ月滞在した。滞在中の目的は、これまでにパタゴニアやグリーンランドの氷河で取得した現地データの解析及び議論と、アラスカの氷河で現地観測を実施し共同研究体制の構築や比較研究を進めるためである。

まず始めの 1 ヶ月でこれまでの研究内容の紹介や議論、滞在中の研究計画を受入教員と打ち合わせた。その後アラスカで現地観測を行う氷河の人工衛星画像解析を行い、氷河末端位置、表面流動、表面高度変化を解析した。さらに、これまでパタゴニアやグリーンランドで取得してきた末端消耗に関するデータを受入教員と議論しながら解析を進めた。7 月中旬にはドイツのベルリンで開催されたパタゴニアの氷河変動に関する研究集会 [www.geographie.hu-berlin.de/en/professorships/climate\\_geography/patagonia\\_workshop](http://www.geographie.hu-berlin.de/en/professorships/climate_geography/patagonia_workshop) に参加し、最近 5 年間のパタゴニアでの研究成果を報告した。その後も人工衛星画像解析とこれまでの現地観測のデータ解析を進めた。8 月下旬には、パタゴニアでの研究成果を *Journal of Glaciology* に投稿した。9 月に入り観測機材のテストや観測の打ち合わせなどアラスカでの現地観測の準備を行い、9 月 11 日から 19 日にかけて LeConte 氷河においてアラスカ大学、オレゴン大学、オレゴン州立大学などの研究プロジェクトに加わることで現地観測を実施した。

LeConte 氷河は今回の主要観測メンバーの一人でもある Roman Motyka 教授がこれまで何度も現地観測を行ってきた氷河である。Motyka 教授は LeConte 氷河での現地観測を通して、氷河末端の水中融解の重要性を初めて定量的に明らかにしており、多くの研究者が現在もその研究手法を引用している (図 1) (Motyka *et al.*, 2003)。

## 2. 本派遣による研究成果

### 2.1. 研究背景

地球に存在する氷のほぼ全ては、北極や南極などになる氷河・氷床に蓄積されており、その縮小に伴って海洋に流れ込む淡水は、海面上昇や海洋・大気の循環に大きな影響を与えている (IPCC, 2013)。近年世界各地でこれらの氷河は縮小しているが、特に末端が海や湖流れ込む氷河 (カービング氷河) でその変動は顕著である。カービング氷河は北極圏や南極に多数存在し、近年の急激な縮小が海水準上昇に影響を及ぼしている (Gardner *et al.*, 2013)。カービ

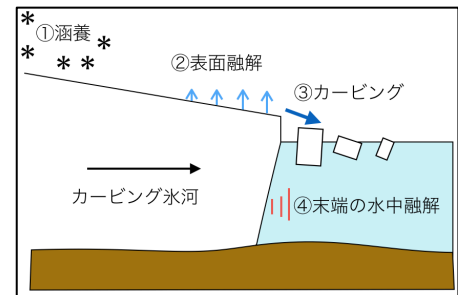


図 1. カービング氷河の質量収支は①- (②+③+④) により定義される。③と④は 末端消耗と総称される。

ング氷河で大きな変動が起きるのは、降雪や表面融解といった氷河表面での質量収支に、氷河末端での消耗プロセス (冰山分離 (カービング) と海・湖による水中融解) が加わるからである (図 1)。降雪や表面融解は気候変化の直接的影響を受けるが、気候変化が氷河末端のカービングや水中融解に与える影響は未だ十分に理解はされていない。そのため、将来の海水準上昇や地球規模の水循環を明らかにする上で、極域におけるカービング氷河の末端消耗プロセスを解明することは重要である。

### 2.2. 研究結果

#### 2.2.1 人工衛星画像解析

現地観測を実施した LeConte 氷河において人工衛星画像解析を実施した (図 2)。LeConte 氷河は北半球で最も低緯度に位置する海洋性カービング氷河で、Stikine 氷原の中で最も大きな質量損失を示している (e.g. McNabb *et al.*, 2014)。近年の氷河変動履歴を解析するために、氷河末端位置、流動速度、氷河表面高度の解析を行った。解析を行った期間はそれぞれ、末端位置が 1975

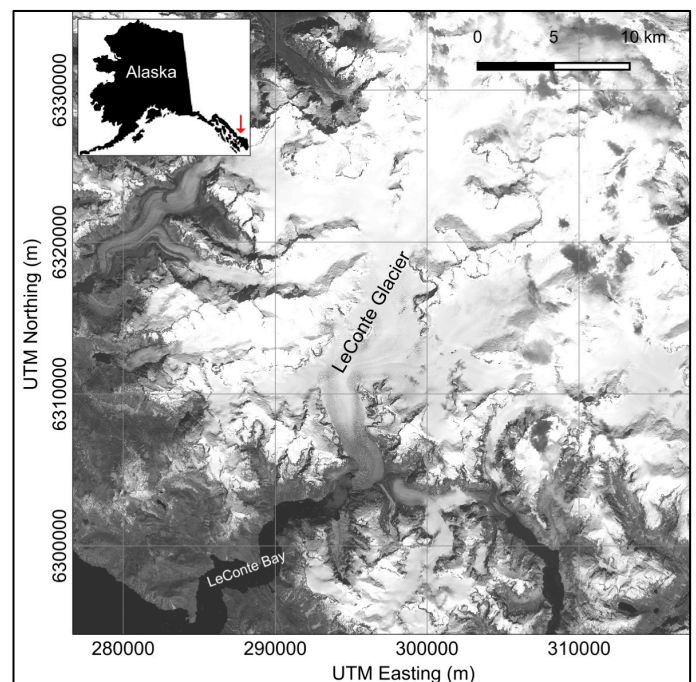


図 2. アラスカ, Stikine 氷原に位置する LeConte 氷河。

年–2017 年，流動速度が 1977 年–2017 年，氷河表面高度が 1979 年–2017 年である。

LeConte 氷河における氷河末端位置，流動速度，表面高度変化を図 3 に示す。末端位置は 1975 年から 1994 年まで安定していたが，その後わずか 4 年間で約 1.4 km と急速に後退した。1998 年から 2015 年まで安定傾向にあったが 2016 年からは再び後退傾向に転じている。流動速度は末端位置の変動に同期して変動を示した。1995 年から 2001 年にかけて流動速度は  $2000 \text{ m a}^{-1}$  から最大で  $4000 \text{ m a}^{-1}$  増加した。その後 2015 年までは  $2000 \text{ m a}^{-1}$  に戻ったが，2016 年以降わずかに速度の増加が確認できる。一方で平均の 1979 年から 2017 年の平均表面高度変化速度は  $-1.3 \text{ m a}^{-1}$  であった。データの時間解像度の関係で単純に末端位置変動や流動変化と比較することはできないが，例えば 2017 年の比較的大きな末端後退の際には，表面高度も大きく低下している様子がみてとれる。これらの結果は末端消耗量が短期間に急速に増加することで大きな氷河後退が発生したことを示唆している。今後この急速な末端消耗量の増加の原因について，気温や海水温データおよびフィヨルドの水深との比較や現地観測データを解析することで考察を進める予定である。

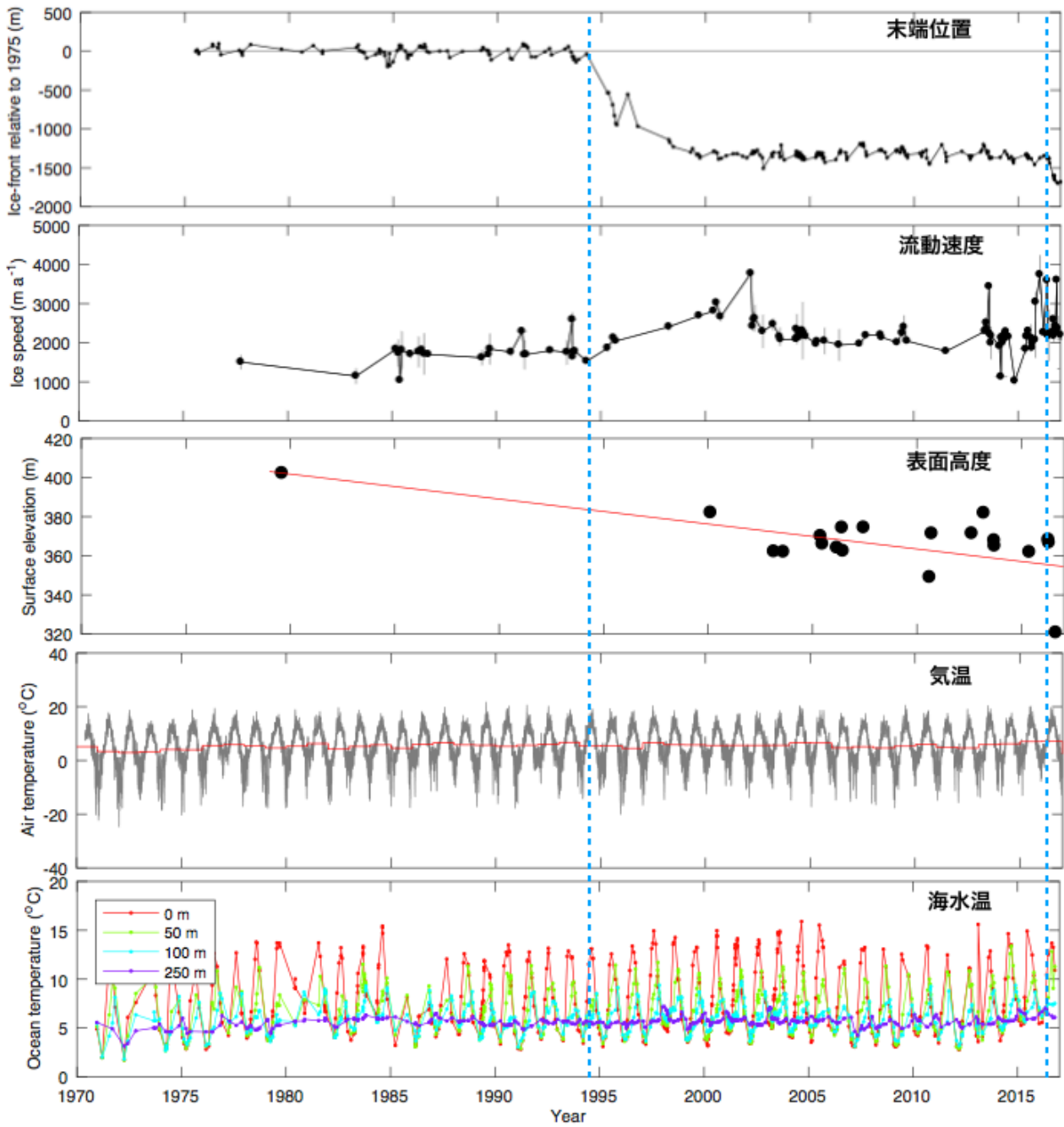


図 3. LeConte 氷河における過去 40 年間の末端位置変動、流動速度、表面高度変化、ジュノーで測定された気温とアラスカ湾で測定された海水温を合わせて示す。青の縦線は、急速な末端位置が発生したタイミングを示す。

## 2.2.2 現地観測データ解析

これまでに南極やグリーンランド、パタゴニアのカービング氷河で取得してきた現地観測データについてデータ解析を実施した。受入教員などと議論する中で特にカービングによって発生する津波について解析を実施した。例えば、パタゴニアのペリート・モレノ氷河とグリーンランドのボードイン氷

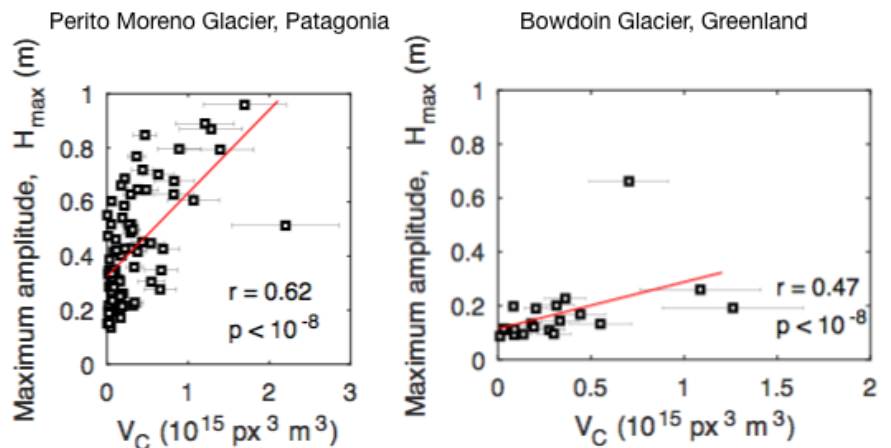


図4. カービング津波の最大波高とカービングした氷山の体積の相関図。左図はパタゴニア、ペリート・モレノ氷河、右図はグリーンランド、ボードイン氷河におけるそれぞれの相関図。

河において、カービング前後のタイムラプスカメラ画像を解析することで氷山の体積を定量化し、水面波の最大波高や周波数と比較をした。いずれの氷河においても水面波の最大波高とカービングをした氷山の体積に正相関を見出した（図4）。カービング量を直接測定する手法について様々な研究が行われているが、未だに有用な手法は開発されておらず、今回の結果はカービング津波がカービング量を直接測定する手法として有用である可能性を示している。現在、無人飛行機より取得した高精度数値標高モデルを用いて、より高い精度で氷山の定量化を試みている。今後、水面波と氷山の体積のより良い関係を明らかにし、カービング量を水面波から定量化していく予定である。この研究成果の一部は、*Journal of Glaciology* 誌に投稿し現在査読中である。

## 2.2.3 LeConte 氷河での現地観測

9月中旬に1週間程度 LeConte 氷河において現地観測を実施した（図5）。観測はアラスカ大学、オレゴン大学、オレゴン州立大学の共同プロジェクトであった。アラスカ大学が氷河変動をオレゴン大学、オレゴン州立大学がフィヨルドでの海洋観測をそれぞれ担当し両者の視点から氷河末端での質量損失メカニズムに迫る観測が実施された。派遣対象者はその中で、これまでも他地域で測定してきたカービング津波やフィヨルドでの水温、塩分、濁度、採水を実施し

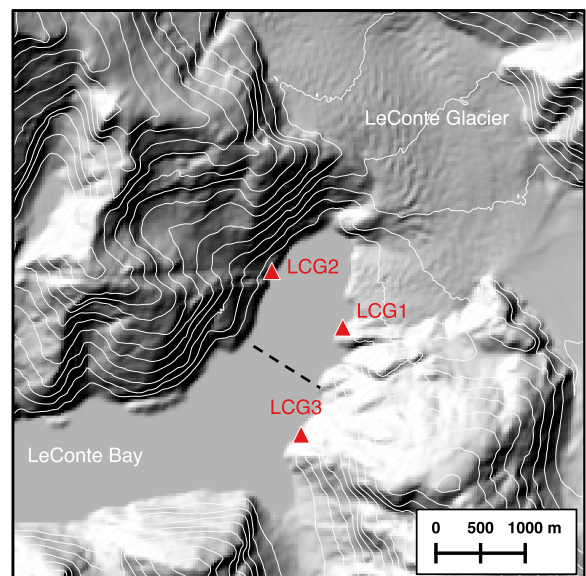


図5. LeConte 氷河末端。設置した水圧センサーの位置を赤色の三角で示す。フィヨルド内の点線に沿って水温や塩分、濁度の測定及び採水を実施した。



た。特に今回の観測では、本事業の支援を受けて水圧センサーをさらに一台新規購入し合計三台の水圧センサーを海岸に設置、観測を実施した。

カービング津波の測定結果を図6に示す。氷河末端に最も近い水圧センサー（LCG1）では観測期間全体を通してカービング津波を測定した。このデータから今後カービングの発生頻度を検出し、カービングの発生メカニズムや他地域との比較について研究を進めている。さらに二台の水圧センサー（LCG2, 3）で水面波を測定することにより、30-40個のカービングイベントを三台の水圧センサーで測定することに成功した（図6下図）。センサーによって波形や水面波の到達時間が異なるのが見て取れる。これらの情報は、カービングの発生地点を特定するのに有用である。観測期間中はアラスカ大学の観測チームが複数のタイムラプスカメラを用いてカービングの様子を記録している（図7）。今後これらのデータを比較することで、カービングの発生場所について共同研究を進める予定である。

氷河前縁のフィヨルドにおいて水温、塩分、濁度、採水を実施した。水温、塩分、濁度について現在アラスカ大学で初期解析をしており、今後データの共有を行う予定である。派遣対象者は採水した水について低温科学研究所において水安定同位体の解析を進めている。これらのデータを元に水中融解量の定量化を今後試みる予定である。

### 3. まとめ

4ヶ月という比較的長い期間海外の研究期間に滞在し人工衛星画像解析や現地データの解析、議論、野外観測を実施した。一番の収穫は、共通の野外観測を通して人脈の形成や共同研究の可能性を見出すことができたことである。特に派遣対象者の研究分野をリードする研究チームと同じフィールドで現地データを取得できたことは、今後共同研究へ発展する上で非常に有意義である。また、LeConte氷河ではマルチビームソナー、無人観測船、ドップラー流速計、地上レーダなど最新の機器を使用した観測が展開されており、観測の手伝いをする中で設置方法や測定方法、問題点などを知ることができた。これらの測器を使用した観測を検討しており、良い経験となった。幸いにも水面波データは他の観測メンバーが測定していない項目であり興味を持ってもらえた。現在は派遣中に実施した人工衛星画像解析を始め、現地観測で取得した水面波、水塊構造のデータを他の観測メンバーがそれぞれ測定したインターバルカメラ画像、気温、水温、地震波、水深、氷河流動速度といったデータ比較することでLeConte氷河の末端消耗メカニズムに迫る研究を進めている。今後は、アラスカで取得したデータをパタゴニア、グリーンランド、南極で取得したデータと比較することで、カービング氷河の末端消耗メカニズムについて比較研究を進めたい。

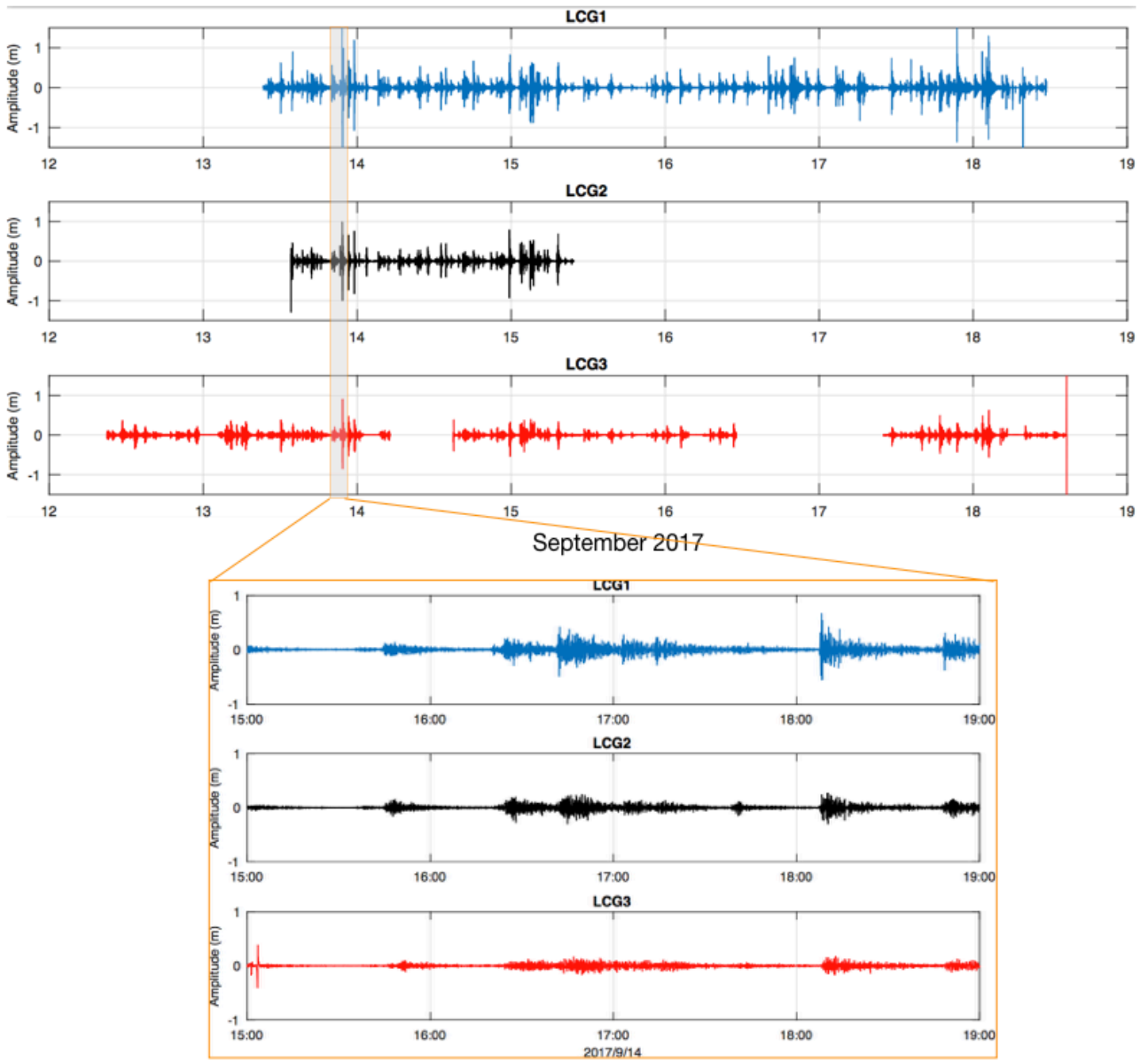


図 6. LeConte 氷河前縁のフィヨルで測定したカービング津波。上図が全期間の測定結果、下図が 9 月 14 日の 15 時から 19 時の拡大図をそれぞれ示す。測定点は図 5 に示す。

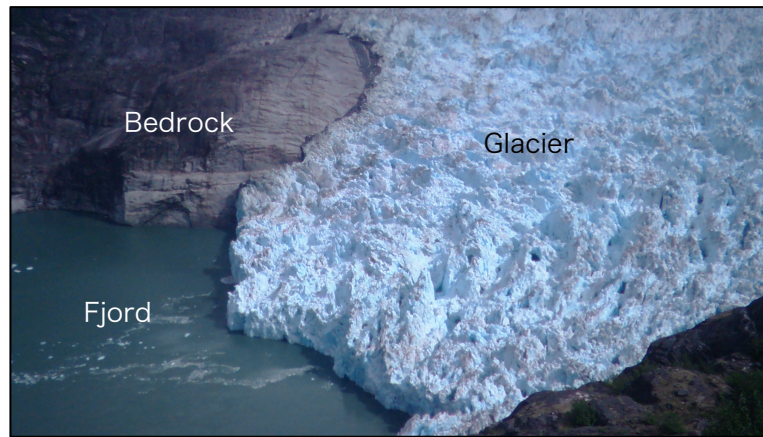


図 7. LeConte 氷河末端のインターバルカメラ画像。観測期間中は計 6 台のカメラで 15 秒ごとに氷河末端やフィヨルドの状況を撮影した。

#### 4. 派遣支援期間中の研究発表概要

- 箕輪昌紘, UAV による高解像度数値標高モデルを用いた氷河変動解析, 低温科学共同利用研究集会, 2017 年 6 月 26 日-27 日, 札幌
- Climate Impacts on Glaciers and Biosphere in Fuego-Patagonia, Changes in calving glaciers and glacier-lake interaction in the Southern Patagonia Icefield, oral, 19 July 2017
- M. Minowa, E. A. Podolskiy, S. Sugiyama, D. Sakakibara and P. Skvarca, Glacier calving observed with time-lapse imagery and tsunami waves at Glaciar Perito Moreno, Patagonia, *under review*, *Journal of Glaciology*

#### 5. 派遣支援期間中のアウトリーチ活動

- [GIGSA seminar \(https://www.gi.alaska.edu/gigsa/pizza-seminar-series\)](https://www.gi.alaska.edu/gigsa/pizza-seminar-series), Geophysical Institute, 「Glacier calving observed with time-lapse imagery and tsunami waves at Glaciar Perito Moreno, Patagonia」

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり受入教員の Martin Truffer 教授をはじめ Regine Hock 教授, またアラスカ大学フェアバンクス校の氷河研究グループの皆様にご支援を頂きました。LeConte 氷河での現地では Roman Motyka 名誉教授, Jason Amundson 准教授を始めとして観測メンバーにご支援をして頂きました。最後に今回の海外派遣の申請や研究計画, 実施に際して, 斎藤誠一センター長, 鈴木大路朗さんに多大なご協力をして頂きました。関係した皆様にご場をお借りしてお礼申し上げます。アラスカでの生活や研究の様子は [こちら \(https://photos.app.goo.gl/PtkIcJoMniG6Z7z1\)](https://photos.app.goo.gl/PtkIcJoMniG6Z7z1) からご覧になれます。

#### 引用文献

IPCC: Summary for Policymakers, 2013

Gardner, A. *et al.*, *Science*, 340, pp852–857, 2013

McNabb, R. W., and Regine Hock, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, pp153–167, 2014

Motyka *et al.*, *Annals of Glaciology*, pp57–65, 2003