

平成 27 年 3 月 14 日

氏 名 箕輪 昌紘

終了報告書

・派遣支援先 機関名：アラスカ大学フェアバンクス校（国名：アメリカ）

・受入研究者 Prof. Martin Truffer

・研究課題名（和文・英文）

（和文）北極圏におけるカービング氷河と海洋や湖との相互作用の解明

（英文） Interactions between calving glaciers and ocean/lake in the Arctic

・派遣支援期間：平成 26 年 12 月 1 日 ～ 平成 27 年 2 月 28 日

1. 派遣支援機関中の研究実施状況及びその成果

研究計画に基づいて、何をどこまで実施したか。どんな成果が得られたか

1.1 研究実施概要

海洋や湖に流入する氷河（カービング氷河）では、近年大きな変動が報告されている（e.g. Gardner et al., 2013）。その原因として、降雪や表面融解といった氷体表面の質量収支に、海・湖による融解と冰山分離（カービング）が加わるからである。特に、気候変動が氷河末端の水中融解やカービングに与える影響は明らかとなっていない。そこで本研究では、北極圏に数多く存在するカービング氷河の質量変化に、末端融解が果たす寄与を明らかにすることを目的とした。具体的には以下の3点について解決を試みた。

A. パタゴニアにおける氷河末端融解量の算出とアラスカ、グリーンランドとの比較

B. グリーンランド北西部ボードイン氷河での末端融解量の算出

C. 氷河・氷床の質量変化に末端融解が果たす寄与を解明

派遣開始後、まず始めにグループセミナーにおいて、パタゴニアやグリーンランドでの研究成果を発表した。その後、AGUに参加し、パタゴニアでの研究成果を発表した。グループセミナーやAGUでのコメントを参考に、受入教員との議論を通して末端融解量について解析を始めた。1月末には、アラスカ大学サウスウエスト校に在籍する Roman Motyka 氏や Jason Amundson 氏を訪問し、これまでの研究成果を発表した。同氏は、カービング氷河において同様の観測を行っている。これまでの、アラスカやグリーンランドでの氷河観測の概要や結果の紹介を受けた。得られた情報から、地域間での末端融解の違いについて研究成果をまとめた。最終週には、派遣期間中の解析結果を報告書としてまとめ、受入教員に提出、議論を行った。

1.2 研究内容の詳細

パタゴニアやグリーンランドにおける氷河前縁フィヨルドで現地測量した水温、塩分、濁度の鉛直分布を元に末端融解量の算出を試みた。末端融解量の算出までには2つの段階がある。はじめに、観測データからフィヨルド内に含まれる末端融解水の割合を計算する。次に、フィヨルド内の水塊のフラックスを仮定することで融解量を推定する。派遣期間中に末端融解量の割合を計算した。

先行研究によると、各水塊に状態量が保存するとき、二変数プロットを用いることで水塊を分類し、各水塊の存在比を計算することが可能である (Jenkins, 1999)。そこで本研究では、湖については温位 (Θ)と浮遊堆積物濃度 (SSC)を海洋については温位 (Θ)と塩分 (S)を使用した。

湖の場合、以下の数式を解くことで湖水と氷河流出水、末端融解水の割合 (X_s, X_d, X_m)を計算した。

$$SSC_l X_l + SSC_d X_d + SSC_m X_m = SSC \quad (1)$$

$$\Theta_l X_l + \Theta_d X_d + \Theta_m X_m = \Theta \quad (2)$$

$$X_l + X_d + X_m = 1 \quad (3)$$

ここで、SSC と Θ は測定した濁度と水温から計算した浮遊懸濁物質濃度と温位である。SSC_mはビエドマ氷河で測定した湖底部の0°C以下の水を氷河流出水と仮定し、その水塊の平均の浮遊懸濁物質濃度 (0.508 gL⁻¹)を使用した。また湖水のSSC_lと Θ_s は各湖で測定された温度躍層よりも上の水塊の平均値を使用した。 Θ_m は氷融解によって熱が失われた際の水塊の温度を示す。主に氷融解に必要な潜熱の影響で、 Θ_m は著しく小さな値を示す。

$$\Theta_m = -\frac{L}{c_{lw}} \quad (4)$$

ここでL (334.5 kJ kg⁻¹)は融解潜熱、 c_{lw} (3.98 kJ kg⁻¹ K⁻¹)は湖水の比熱容量である。

海洋の場合、以下の数式を解くことで海水と氷河流出水、末端融解水の割合(X_s, X_d, X_m)を計算した。

$$S_{As} X_s + S_{Ad} X_d + S_{Am} X_m = S_A \quad (5)$$

$$\Theta_s X_s + \Theta_d X_d + \Theta_m X_m = \Theta \quad (6)$$

$$X_s + X_d + X_m = 1 \quad (7)$$

ここで、 S_A と Θ は測定した塩分と水温から計算した絶対塩分と温位である。また海水の特性 S_{As} と Θ_s は先行研究を参考に、氷河底部に存在する大西洋水の平均値を使用した。 S_{Am} が0となる一方で、 Θ_m は主に氷融解に必要な潜熱の影響で著しく小さな値を示す。

$$\Theta_m = \Theta_f - \frac{L}{c_{sw}} - \frac{c_i}{c_{sw}} (\Theta_f - \Theta_i) \quad (8)$$

ここで、 Θ_f (-0.2°C)は海水の結氷点、L (334.5 kJ kg⁻¹)は融解潜熱、 c_{sw} (3.98 kJ kg⁻¹ K⁻¹)と c_i (2.1 kJ kg⁻¹ K⁻¹)はそれぞれ海水と氷の比熱容量である。 Θ_i (-15°C)は海水と接する氷河の氷温となる (Jenkins, 1999)。

異なる水塊が混合するとき、混合によって生成された水塊は二変数プロット上で一定の勾配を示す。理論

的に二変数プロットに描ける直線として、融解水と湖水/海水が混合した場合の melting-line と氷河底流出水と湖水/海水が混合した場合の runoff-line がよく使用される (e.g. Barthoromaus et al., 2013; Jenkins et al., 1999)。

A. パタゴニアにおける氷河末端融解量の算出とアラスカ、グリーンランドとの比較

南パタゴニア氷原のヴィエドマ氷河、ウプサラ氷河、ペリート・モレノ氷河の流れ込む4つの湖で融解量の算出を行った。一例としてペリート・モレノ氷河の氷河前縁湖 (Canal de los Tempanos)における θ /SSC ダイアグラムと末端融解量の割合を示す (図 1a, b)。表層から水深 60 m にかけて水塊は温かく ($\sim 7^\circ\text{C}$) 懸濁物質の少ない水塊 (0.02 g L^{-1}) が存在している (図 1a)。また、この水塊は melting-line に平行であった。60 m 付近に温度躍層が見られ、深度を増すごとに懸濁物質の多い水塊であった (図 1a)。この水塊は runoff-line に平行なことから、氷河流出水と湖水の混合水である。一方、アラスカの氷河前縁湖では、水温が全層に渡り $0.5\text{--}1.5^\circ\text{C}$ と非常に冷たく、ほとんど水中融解がないことが報告されている (Trüssel et al., 2013; Boyce et al., 2007)。このようにパタゴニアの湖は水温が顕著に高く、氷河変動に大きな影響を与えることが示唆される。

図 1a を元に式(1)–(3)を X について解くことで、末端融解量の割合を計算した。その結果、全層平均で 0.201% の融解水が含まれていることが明らかとなった (図 1b)。この末端融解量の割合は、解析を行ったパタゴニアの氷河の中で最大であった (表 1)。一方、これまでにグリーンランドやアラスカの海洋にカービングする氷河で計算された末端融解量の割合と比較すると、湖で末端融解量の割合は一桁ほど小さいことが明らかとなった (表 1)。

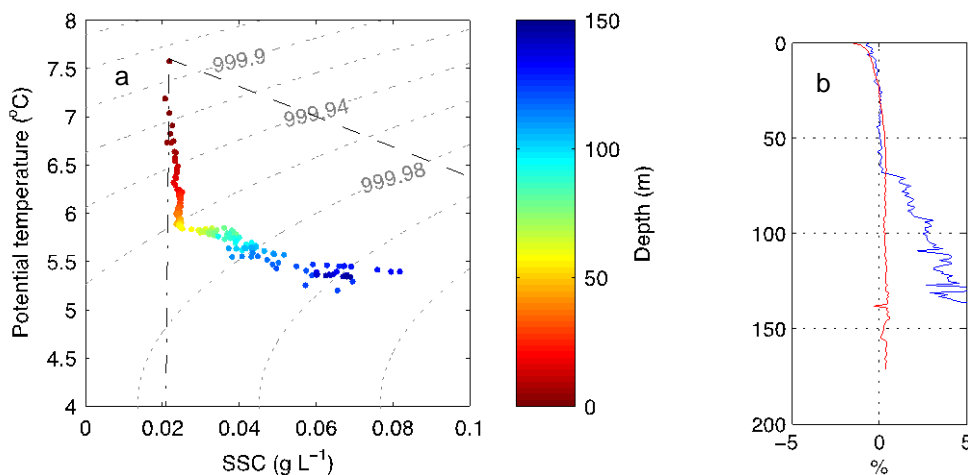


図 1. (a) ペリート・モレノ氷河の流れ込む氷河湖 (Canal de los Tempanos)の θ /SSC ダイアグラム。図中で一点鎖線は melting-line を点線は runoff-line をそれぞれ示す。灰色の点線は水温と SSC から計算した水塊の密度を示す。**(b)** 氷河末端に最も近い CTD データから計算した末端融解量の割合 (赤)と氷河底流出水量の割合 (青)を示す。

表 1. パタゴニアにおける各氷河の末端融解量の割合と、アラスカやグリーンランドの海洋にカービングする氷河での末端融解量の割合。

| | Meltwater fraction (%) | Region | Ocean/Lake | |
|----------------|------------------------|-----------|------------|------------|
| Glaciar Viedma | 0.109 | Patagonia | Lake | This study |

| | | | | |
|--|-------|-----------|-------|--------------------------|
| Glaciar Upsala | 0 | Patagonia | Lake | This study |
| Glaciar Perito Moreno (Brazo Rico) | 0.086 | Patagonia | Lake | This study |
| Glaciar Perito Moreno (Canal de los Tempanos) | 0.201 | Patagonia | Lake | This study |
| Yathe Glacier | 1.1 | Alaska | Ocean | Barthromaus et al., 2013 |
| Kangersuneq | 1-2 | Greenland | Ocean | Mortensen et al., 2013 |

B. グリーンランド北西部ボードイン氷河での末端融解量の算出

グリーンランド北西部ボードイン氷河で、 θ/S ダイアグラムと式(5)–(7)を使用し末端融解量の割合を算出した (図 2a, b)。フィヨルド底部 (300–340 m)には温かく、高塩分の北大西洋水が存在した。50–300 m にかけて水塊は melting-line 上にあることから、氷河融解水と海水の混合水である。表層の水塊 (< 50 m)は runoff-line と平行であることから、氷河流出水と海水の混合水が存在する (図 2a)。計算した末端融解量の割合は、全層平均で 0.414% であることがわかった。この値は、本研究で計算したどのパタゴニアの氷河よりも大きく、グリーンランド南西部やアラスカの氷河よりは小さい (表 1)。

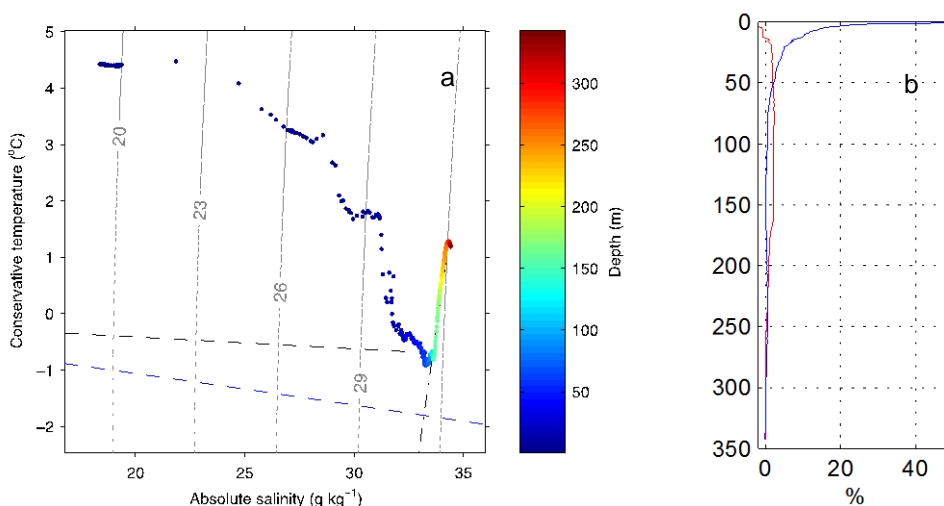


図 2 (a) ボードイン氷河の末端に最も近い観測点の θ/S ダイアグラム。melting-line を一点鎖線、runoff-line を点線で示す。青点線は海水の融解点を示す。 **(b)** 氷河に最も近い CTD データから計算した末端融解量の割合 (赤)と氷河底流出水の割合 (青)。

C. 氷河・氷床の質量変化に末端融解が果たす寄与を解明

研究課題 A、B より末端融解量は、パタゴニアの湖にカービングする氷河 > グリーンランド北西部ボードイン氷河 > アラスカ、グリーンランド西南部の海にカービングする氷河の順に大きくなり、地域間で大きく異なることが示唆された。このような末端融解量の異なりは、フィヨルド内の循環や末端融解に使われる水塊の特徴に原因すると考えられる。今後フィヨルド内の流速を推定し、融解量を算出する予定である。また、末端融解量を氷河の流動速度やカービング量、表面融解量と比較することで、氷河・氷床の質量変化に末端融解が果たす寄与を考察していく予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、受入教員の Martin Truffer 教授をはじめアラスカ大学フェアバンクス校の氷河研究室の皆様には有益なアドバイスを頂きました。また北海道大学理学院の知北和久准教授には湖データについて様々なアドバイスを頂きました。

参考文献

- Barthoromaeus et al., (2013) *Earth Planetary Science Letters*, **380**, 20–30.
Boyce et al., (2007) *Journal of Glaciology*, **53**(181), 211–224.
Gardner et al., (2013) *Science*, **340**(6134), 852–857.
Mortensen et al., (2013) *Journal of Geophysical Research*, **118**, 1382–1395.
Jenkins (1999) *Journal of Physical Oceanography*, **29**(3), 2370–2381.
Trüssel et al., (2013) *Journal of Glaciology*, **59**(213), 149–161.

2. 派遣支援期間中の研究発表概要

論文発表

- Minowa, M., Sugiyama, S., Sakakibara, D., & Sawagaki, T. (2015). Contrasting glacier variations of Glaciar Perito Moreno and Glaciar Ameghino, Southern Patagonia Icefield. *Annals of Glaciology*, **56**(70), 26–32.

学会発表

- American Geophysical Union, Seasonal variations in the terminus position and frontal ablation rate of Glaciar Perito Moreno, a freshwater calving glacier in the Southern Patagonia Icefield, Poster, December 16, 2014