

## 東南極ラングホブデ氷河接地線における氷震モニタリング

### Long-term monitoring of icequakes in the grounding zone of Langhovde Glacier, East Antarctica

箕輪 昌紘<sup>1</sup>, 近藤 研<sup>2</sup>, Evgeny Podolskiy<sup>3</sup>, 藤田 耕史<sup>2</sup>, 杉山 慎<sup>1</sup>  
Masahiro Minowa<sup>1</sup>, Ken Kondo<sup>2</sup>, Evgeny Podolskiy<sup>3</sup>, Koji Fujita<sup>2</sup>, Shin Sugiyama<sup>1</sup>  
Corresponding author: m\_masa@lowtem.hokudai.ac.jp (M. Minowa)

南極氷床沿岸部における溢流氷河のダイナミクスは南極氷床の質量変動に大きな影響を与える。東南極ラングホブデ氷河の接地域において氷体内の深度4mと200mに掘削孔地震計を設置し、2021年12月より氷震観測を実施している。氷震は夏期間には冬期間の2倍程度測定された。また引潮時に高頻度で測定された。一方、0.1-1Hz帯では1-6月にかけて微地震が増加する様子がみられた。それぞれの氷震発生メカニズムについて氷河流動や氷河融解水、潮位、さらに外洋で発生する風波との関連について考察を行う。

#### 1. 研究の背景

南極氷床は、氷床内陸で形成した氷が相対的に流れの速い氷流を経由し、沿岸部の棚氷や浮氷舌において氷質量を損失する<sup>1)</sup>。沿岸地域での氷流動メカニズムの理解は、南極氷床の質量変動を理解する上で鍵となる。特に、沿岸部で氷河が海洋に浮き始める領域は接地域と呼ばれ、氷床からの氷流出量を規定する場所であり、その流動・変動メカニズムを理解することは重要である。

接地域での氷流動は様々な時間規模の応力変化により制御されることが報告されてきた<sup>2)</sup>。例えば、数ヶ月から数年の時間規模では、棚氷底面融解の増加に伴う棚氷薄化が挙げられる。さらに、数週間から日の時間規模では、冰山分離や潮位の影響が挙げられる。また、これらの外部要因に加え、内陸に向かって基盤地形が深くなる場合、接地線が後退するにつれ流量が増える為、正のフィードバックが働き、氷床は急速な質量損失を引き起こす可能性がある。

一方、南極氷床では大気による氷河融解に限られるため、従来山岳氷河やグリーンランド氷床で報告される、氷河融解に起因する氷流動加速に限られると考えられてきた。しかしながら、近年のリモートセンシングデータの解析により、南極の各地で氷河表面融解が発生していること<sup>3)</sup>、また、南極半島の氷河を中心に、融解水が氷河流動の加速を引き起こす可能性が提案されるが<sup>4)</sup>、精度に限りがあり現場観測による仮説の実証やプロセスの理解が必要である。

本研究では、東南極ラングホブデ氷河の接地域付近において掘削孔地震計による氷震観測を実施した。観測期間は、2021年12月より2024年2月である。氷震データを解析し、氷河流動速度や気象、海洋条件と比較することで、ラングホブデ氷河の接地域における氷河流動メカニズムを明らかにする事が目的である。

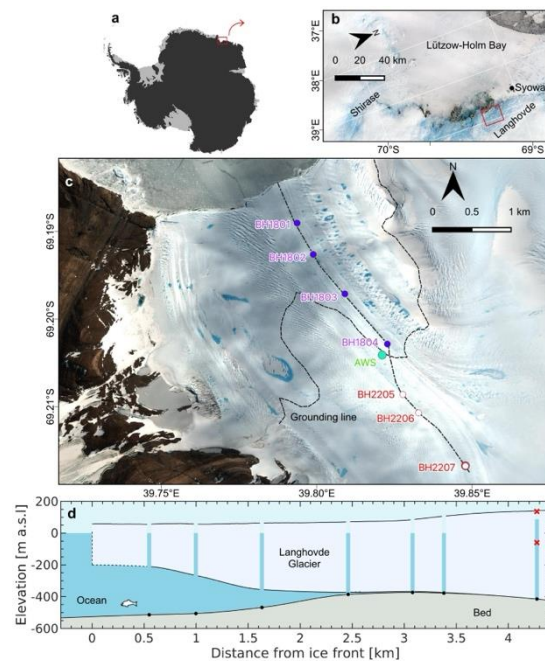


図 1. (a) 南極氷床における観測対象地域. (b) ラングホブデ氷河を赤枠で示す. (c) ラングホブデ氷河の可視光人工衛星画像. (d) 熱水掘削により測定したラングホブデ氷河の断面図.

<sup>1</sup>北海道大学 低温科学研究所  
<sup>2</sup>名古屋大学 環境科学研究科  
<sup>3</sup>北海道大学 北極域研究センター

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University  
Graduate School of Environmental studies, Nagoya University  
Arctic Research Center, Hokkaido University

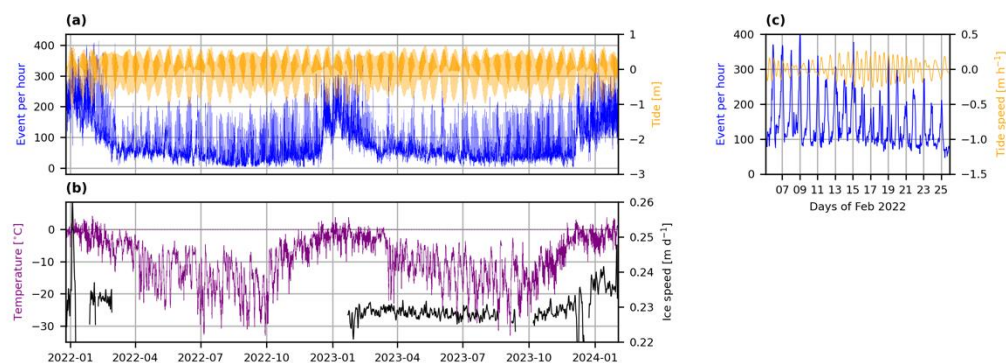


図 2. (a) 氷震発生回数の時系列分布 (青線), 潮位 (橙線). (b) 昭和基地における一時間毎の気温 (紫線) と LG2207 における氷河流動速度 (黒線). (c) 氷震発生回数の時系列分布と潮位の時間微分について 2022 年 2 月の期間を拡大して示す.

## 2. 手法とデータ

### 2.1 掘削孔地震計による氷震観測とその解析

BH2207 地点の掘削孔内 4 m と 200 m 深に掘削孔地震計を接地し氷震のモニタリングを行った. 観測期間は 2021 年 12 月 25 日から 2024 年 2 月 8 日である. 使用した地震計は, Lennartz 社 (現 REFTEK 社) の LE-3D/BH(s) MkIII であり, デジタルレコーダー (DATA-CUBE<sup>3</sup>, DiGOS 社) に接続し 50 Hz で記録した. 地震計の固有振動数は 1 Hz である.

測定した氷震データについて 2 種類の解析を実施した. 1 Hz 以上の周波数帯では, STA/LTA 法により氷震を検出した. 一方で 0.1–1 Hz の周波数帯では微地震の強度を定量化した. 取得した信号について 30 分毎に分割した後に 10 秒毎にスペクトル解析を実施した. 30 分毎にスペクトル密度の中央値を求め, 0.1–1 Hz 帯で二乗和平方根を算出した.

### 2.2 GPS/GNSS を用いた氷河流動観測

BH2207, BH1804 地点では, GPS (全地球測位システム) もしくは GNSS (全地球航法衛星システム) を運用し, アンテナ位置を毎秒測位することで, 氷河流動速度を算出した. 2021 年 12 月から 2022 年 2 月, 2023 年 12 月から 2024 年 2 月は, 氷河脇の露岩に基準局を設置し, 氷河上の移動局とスタティック法で干渉測位することにより解析を行なった. 解析には RTKLIB 2.4.2 を利用した. それ以外の期間については, 単独精密測位法によりアンテナ位置を測位した. 解析には, CSRS-PPP を利用した.

### 2.3 融解流出量モデリング

BH2207 地点における融解水流出量の算出を氷河表面質量収支モデルにより実施した<sup>5)</sup>. 昭和基地で測定される, 気温, 風速, 湿度, 下向き短波放射を, 夏期間現場観測によって氷河上で取得した値で補正することで, 氷河融解量の算出を行なった.

### 2.4 気象, 潮位, 海氷密接度

気象, 潮位, 海氷密接度といったそれぞれのデータについて取得し, 地震波データと比較を行なった. 一時間毎の気温, 風向風速, 潮位について昭和基地での観測値を利用した. 海氷密接度は, AMSR2 によるプロダクトを利用し, 南緯 66 度以南, 東経 34.2–39.5 度の領域と, ラングホブデ氷河前の南緯 68.8–69.1 度, 東経 39.9–40.6 度の領域に分けて平均値を算出し利用した. プロダクトの空間解像度は, 3.125 km である.

## 3. 結果と議論

### 3.1 氷河融解と連動した氷震

1 時間当たりの氷震は, 全期間平均で 84 回  $\text{h}^{-1}$  であった. 12 月から 3 月の平均値は 136 回  $\text{h}^{-1}$  と 4 月から 11 月の平均値 (59 回  $\text{h}^{-1}$ ) の 2 倍近く大きな値であった (図 2a). 氷震が増加した 12 月から 3 月の期間は, 気温が正となる期間と重なる (図 2b). また, 同期間の氷河流動速度は, 4 月から 11 月の流動速度と比較し, 4%程度増加している事が示された (図 2b).

各年の夏期間の氷震と融解流出量を比較すると, 流出量の増加が氷震の増加と同期する様子が見られる (図 3). 2021/22 年に BH2207 を用

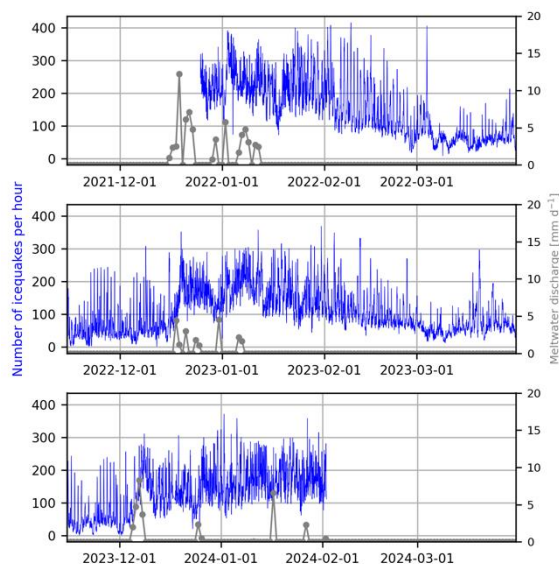


図 3. (a) 2021/2022 年, (b) 2022/2023 年, (c) 2023/2024 年の夏期間における高周波帯での微地震 (青線) と日融解流出量 (灰色線).

いて集中的に行った現地観測では、融解水の流入により、氷底水圧が上昇し、それと同期して氷河流動速度が増加するといった、大気状況の影響を受けた短期氷河流動加速を測定している<sup>9)</sup>。氷震の増加は、流動加速に伴う氷破碎の増加や、氷河底面での摩擦増加、氷底水流の活発化などが原因として考えられる。

### 3. 2 潮位と連動した氷震頻度

季節的な氷震の増加に加え、潮位変動と同調した短期的な氷震の変動も見られた (図 2c)。例えば、図 2c では 2022 年 2 月 6 日–25 日までの氷震と潮位の時間微分について時系列変化を示す。氷震が極大を取る時期が、引潮時と一致する様子が見られる。先行研究によるとラングホブデ氷河の水平流動速度は、棚氷末端にかかる静水圧の潮位変動に弾性的に応答し、引潮時に最大となることが報告されている<sup>9)</sup>。この潮位に起因した流動加速は、氷河の末端に向かうほど大きいことから、ラングホブデ氷河では、引潮時に伸長場が形成され、クレバス破碎が促進されたことで、氷震が観測された可能性がある。また、氷流動の加速は、基盤や露岩との氷・岩境界層での摩擦起源の氷震を増加させた可能性も考えられる<sup>7)</sup>。

### 3. 3 海氷密生度、風と連動した微地震

0.1-1 Hz の周波数帯での微地震は、これまでに述べた氷震の時系列変化と異なる変動を示し

た (図 4a)。低周波帯で微地震は、1 月から 6 月にかけて増加する様子が見られた。また、微地震は数日間の時間規模で増減を繰り返した (図 4a)。

低周波帯における微地震の増減は、風速と海氷密接度と明瞭な関連が見られた。1 月から 6 月の低周波帯微地震が増加する期間は、外洋において海氷密接度が低下する期間と一致した (図 4)。一方で、ラングホブデ氷河近傍の海氷密接度との関係は明瞭ではない。外洋において海洋密接度が低下する期間について、風速と低周波帯微地震を比較すると、風速が高い際に、微地震も大きいことが見て取れる (図 4a)。これらの結果は、外洋で強風時に開放水面で発生した風波が微地震の発生原因であることを示唆している。

例えば外洋で発生する風波が陸上に設置された地震計で微地震として観測されることは古くより知られ *microseism* として報告される<sup>9)</sup>。本研究で見られた 0.1–1 Hz 帯の微地震は *Secondary microseism* と呼ばれ、外洋で同周波の波が衝突し砕ける過程で、力が海底へと伝わり、海底が揺らされそこで発生するレイリー波が大陸まで伝わる事が発生原因とされる<sup>9)</sup>。昭和基地を含む南極大陸沿岸に設置された広域帯地震計でも、*Secondary microseism* の存在が報告されており、外洋の海氷密接度の指標として有用であることが報告されている<sup>10)</sup>。観測を行った地点は、基盤の上を流れる氷河であるため、海底から伝わったレイリー波が低周波帯微地震の原因である可能性が考えられる。一方で、低周波帯微地震の増減は、氷震の増減と無関係であることから、海洋より伝わる波が、氷河変動に与える影響は限られると考えられる。

## 4. まとめ

東南極ラングホブデ氷河の接地域において 2 年間の氷震連続観測の結果を報告した。氷震の発生頻度は融解水流出量や氷河流動と同調することが示された。大気の影響を受けた、季節的な流動加速と氷震増加の関係性や外洋からの影響による低周波帯微地震の増加に関して、同様の観測例はなく、新たな知見となり得る。特に観測結果は大気の影響が氷河流動に影響を与えることを示唆しており、今後温暖化が進むことで、氷床のダイ

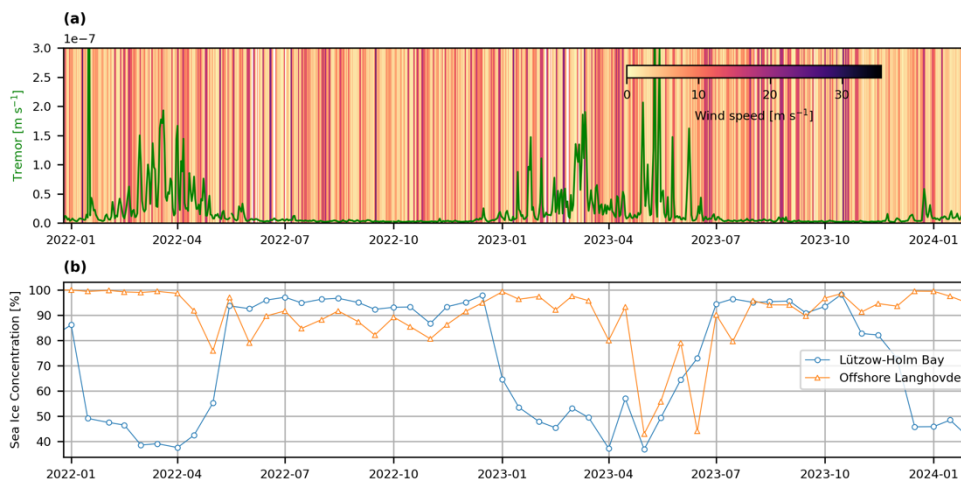


図 4 (a) 0.1–1 Hz における微地震 (緑線), 背景には, 色の濃淡で昭和基地の風速の 7 日間移動平均を示す. (b) AMSR2 プロダクトより算出した領域平均の海水氷接度の時系列分布. 南緯 66 度以南, 東経 34.2–39.5 度の領域 (青線) と, ラングホブデ氷河前の南緯 68.8–69.1 度, 東経 39.9–40.6 度の領域 (橙線) に分けて平均値を算出した.

ナミクスがどの様に機構を変えるのか考察する上で有用な成果となり得る.

現状では, 解析が時系列データの比較にとどまる. 今後波形データを精査する事で, 発震機構や震源などを特定することにより, より直接的に氷震データを氷床ダイナミクスと関連付けることが必要である.

#### 【謝辞】

本研究は南極地域観測第 X 期重点研究観測の一部として実施した. また科研費新学術領域研究 (17H06316) 及び科研費基盤 A (20H00186) の助成を得て実施した.

#### 【参考文献】

- 1) The IMBIE team, 2018: Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017. *Nature*, **558**(7709) 219–222. doi: 10.1038/s41586-018-0179-y
- 2) Santos, et al. 2021: Drivers of change of Thwaites Glacier, West Antarctica, between 1995 and 2015. *Geoph. Res. Lett.*, **48**, 20 (2021): e2021GL093102. doi: 10.1029/2021GL093102
- 3) Bell et al. 2018: Antarctic surface hydrology and impacts on ice-sheet mass balance. *Nature Climate Change*, **8**(12), 1044–1052. doi: 10.1038/s41558-018-0326-3
- 4) Tuckett et al. 2019: Rapid accelerations of

Antarctic Peninsula outlet glaciers driven by surface melt. *Nature Commun.*, **10**(1), 4311. doi: 10.1038/s41467-019-12039-2

- 5) Fujita and Ageta 2000: Effect of summer accumulation on glacier mass balance on the Tibetan Plateau revealed by mass-balance model. *J. Glaciol.*, **46**(153), 244–252. doi: 10.3189/172756500781832945
- 6) 近藤他 2022: 北海道の雪氷 No.41, 35–38
- 7) Minowa et al. 2019: Tide-modulated ice motion and seismicity of a floating glacier tongue in East Antarctica. *Ann. Glaciol.*, **60**(79), 57–67. doi: 10.1017/aog.2019.25
- 8) Kufner et al. 2021: Not all icequakes are created equal: Basal icequakes suggest diverse bed deformation mechanisms at Rutford Ice Stream, West Antarctica. *J. Geophys. Res.-Earth Surface*, **126**(3), e2020JF006001. doi: 10.1029/2020JF006001
- 9) Beucler et al. 2015: Observation of deep water microseisms in the North Atlantic Ocean using tide modulations. *Geoph. Res. Lett.*, **42**(2), 316–322. doi: 10.1002/2014GL062347
- 10) Grob et al. 2011: Observations of the seasonality of the Antarctic microseismic signal, and its association to sea ice variability. *Geophys. Res. Lett.*, **38**(11). doi: 10.1029/2011GL04752