

潮位と熱応力に起因する東南極ラングホブデ氷河棚氷の破碎メカニズム

Tidal and thermal stresses drive fracture of the ice shelf of Langhovde Glacier, East Antarctica

箕輪 昌紘¹, Evgeny Podolskiy², 杉山 慎¹
Masahiro Minowa¹, Evgeny Podolskiy², Shin Sugiyama¹
Corresponding author: m_masa@lowtem.hokudai.ac.jp (M. Minowa)

南極氷床沿岸部に形成する棚氷は、氷床内陸の氷質量変化を制御する重要な構成要素である。棚氷の変動や破碎メカニズムを理解する為に、2018年夏期に東南極ラングホブデ氷河棚氷上で氷河流動、氷震、気象等の野外観測を実施した。氷震データに階層クラスタリング法を適用することで、氷震の分類を行なった。7つに分類された氷震の発生頻度の時系列変化は、潮位に起因する短期の氷河変位や気温変化と関係を示した。このことは棚氷が潮位変動や熱応力によって破碎することを示すものである。

1. 研究の背景

南極氷床沿岸は、約7割を超える領域で棚氷や浮氷舌が形成する¹⁾。氷床内陸で形成した氷は相対的に流れの速い氷流を經由し沿岸部の棚氷や浮氷舌において氷質量を損失する。さらに、棚氷は内陸の氷河を力学的に押し留めておく抗力を有する。このため、棚氷や浮氷舌の変動メカニズムを理解することは、将来の南極氷床変動を理解する上で非常に重要である。

棚氷や浮氷舌は末端からの氷山分離（カービング）と海洋による底面融解により質量を失っている。南極氷床全体では凡そ両者が同程度の大きさの消耗量であることが知られている^{2, 3)}。

氷床が定常状態にある場合、カービングは比較的散発的な現象で、その速度は上流からの氷河流動速度と均衡する。一方で、近年の大気や海洋の変動に起因して棚氷においても急速な崩壊をし得ることが示されており⁴⁾、棚氷の変動や破碎メカニズムを高時間分解能で測定することが求められている。

氷河の変動や破碎メカニズムを測定する手法として注目されているのが地震計を用いた氷震の測定である⁵⁾。本研究では、東南極ラングホブデ氷河棚氷の末端近くで氷震の連続観測を実施した。測定した地震波にクラスタリング手法の一つである階層クラスタリングを適応するこ

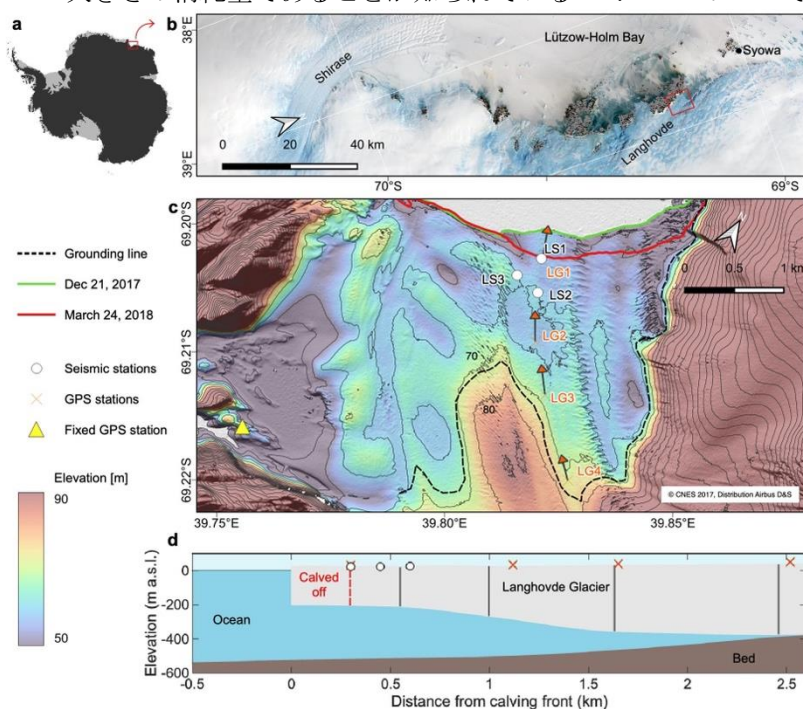


図1 (a) 南極氷床における観測対象地域を赤枠で示す。(b) 研究対象地域リュツォ・ホルム湾内において、観測を行ったラングホブデ氷河を赤枠で示す。(c) ラングホブデ氷河棚氷の表面地形図をカラースケールと等高線で示す。氷震測定場所を白丸で示す。橙色のベクトルは、GPSによって測定をした観測期間内の流動ベクトルを示す。(d) 熱水掘削により測定をしたラングホブデ氷河棚氷の縦断面図。灰色垂線の地点で掘削を行った。地震計(白丸)とGPS局の場所(橙罫印)を合わせて示す。

¹北海道大学 低温科学研究所

²北海道大学 北極域研究センター

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University
Arctic Research Center, Hokkaido University

とで、氷震を分類し、氷震の発生メカニズムを考察する。

2. 手法とデータ

2. 1 地震計による氷震測定とその解析

2018年1月8日から24日にかけてラングホブデ氷河棚氷の末端から～500 mの領域で氷震の観測を実施した⁹⁾。地震計は一辺が200 mを持つ三角形を描くように展開した。広域帯地震計を氷河上に20～30 cmの小穴を掘り、内部に設置した。氷震は400 Hzで記録した。氷融解による地震計の傾きによる影響を抑制するために、2～3日ごとに測器の水平を補正した。観測の詳細はMinowa *et al.* (2019)⁹⁾に詳しい。

2. 2 階層クラスタリング

階層クラスタリングを適応することにより、氷震の分類を行った。まず、LS1で取得した氷震データにSTA/LTAトリガー法⁷⁾を用いて、氷震を検出した。総当たりで各氷震の相関係数を計算し、相関係数が0.7以上であった氷震について線型スタック処理を行い、S/N比を向上させた氷震を合成した。その後、群平均法により、クラスタ内の全ての氷震間の距離の平均でクラスタ間の距離を定義することで、類似度の計算をした。計算される類似度に閾値を与えることで、計7つのクラスタ（以後Cと記す）を作成した。

分類された各氷震について、テンプレートマッチングを行い、氷震を検出した。テンプレートマッチングでは、相関係数が0.8以上であるものを、同様のメカニズムにより発生した氷震であると仮定して検出している。

3. 結果と考察

3. 1 各クラスターの特徴

図2に分類された7つの氷震を示す。C1, 2は中心周波数をそれぞれ8 Hz, 10 Hzを持つ低周波の波が分類された。C3, 4はより高周波の15～30 Hzに平均波の中心周波数が見られる。C5, 6はさらに高周波の140 Hz付近に平均波の中心周波数が見られた。最後にC7では中心周波数の不明瞭な、広域の周波数成分を持つ氷震が分類された。

これらの各クラスターについて、三つの地震計でのデータを比較してみると、C1-4のクラスターに関しては、全ての地震計LS1-3で同様の波形が測定された。一方で、C5-7は単独の地震計でしか測定されていなかった。このことは、C1-4の氷震は、比較的大きなエネルギーを発生させる氷震発生メカニズムであるのに対し、C5-7は比較的小きなエネルギーを発生させる、狭域な範囲での氷震であることが示唆された。

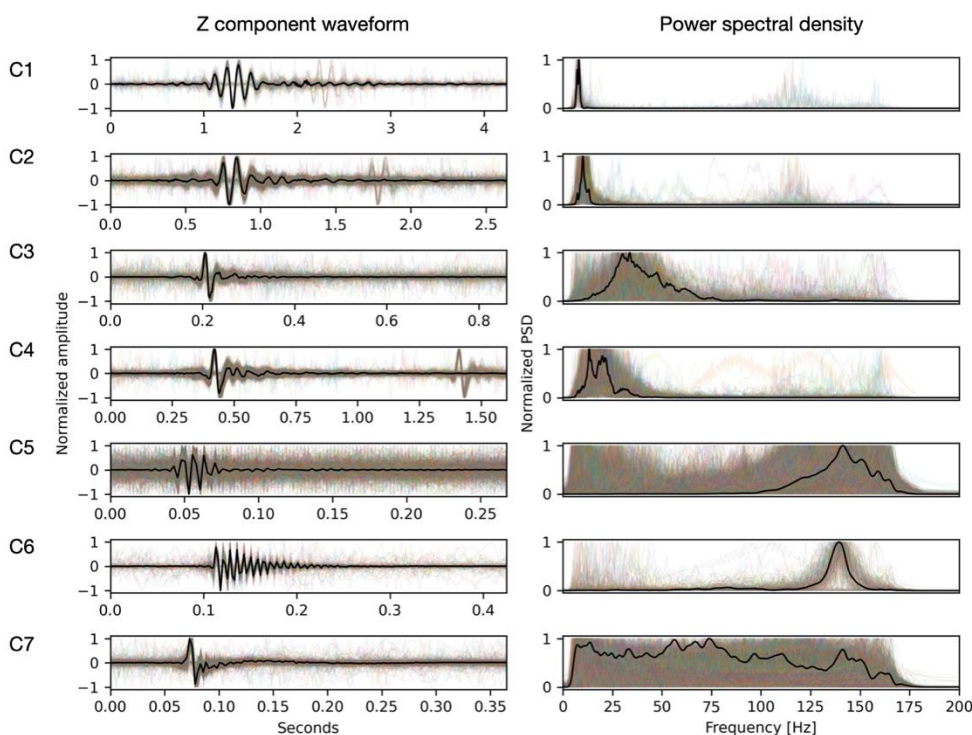


図2 分類された7つのクラスター(C1-7)。左列に氷震の鉛直成分波形、右列にパワースペクトル解析を行った結果を示す。黒実線は平均波形。

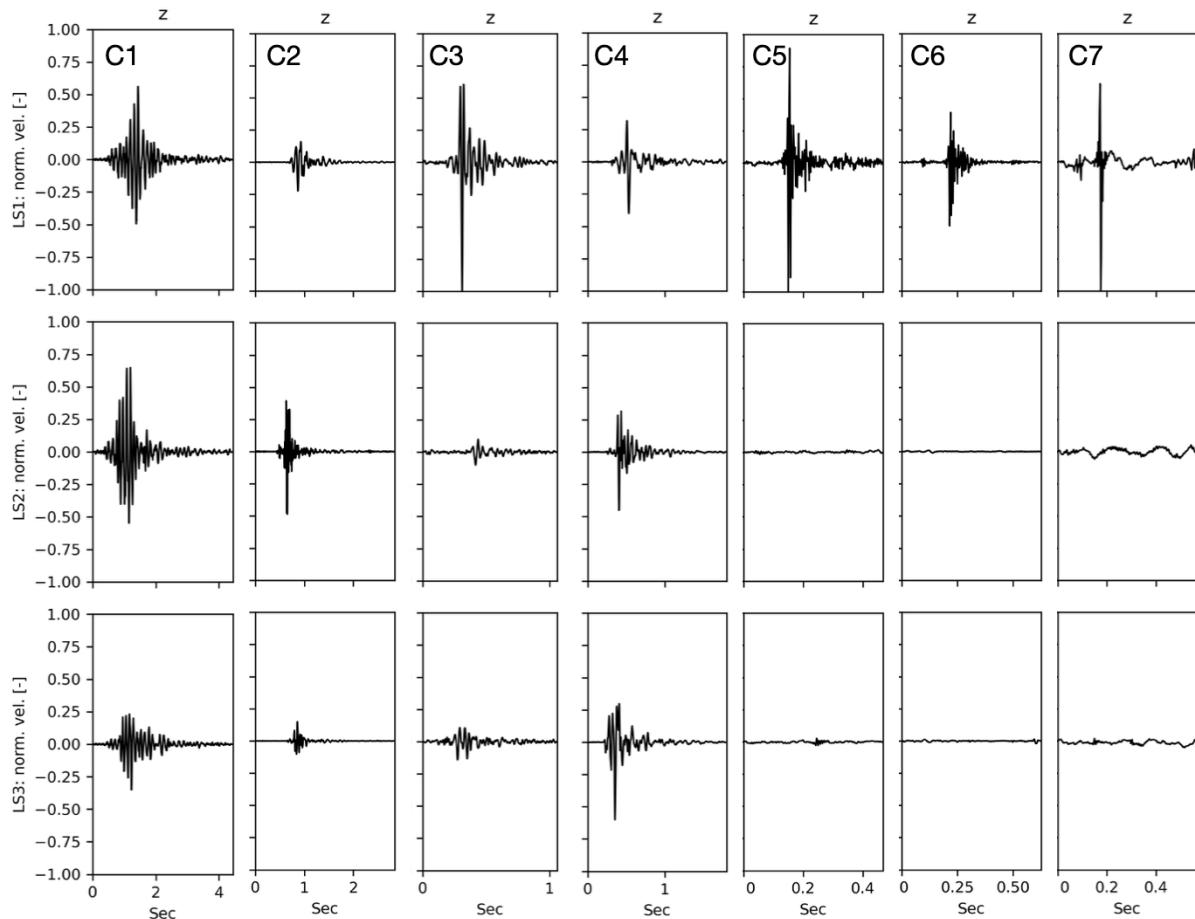


図3 三つの地震計 (LS1-3) で測定したそれぞれのクラスタにおける鉛直成分の波形。振幅は最大振幅で正規化している。

3. 2 各クラスターにおける氷震発生頻度の時系列分布

C1-7 の氷震について全ての測定データにテンプレートマッチングを行った結果を図4に示す。それぞれの発生頻度はそれぞれ、C1-81回, C2-855回, C3-601回, C4-1,299回, C5-11,852回, C6-230回, C7-2,198回であった。

各クラスターが検出される時刻は異なっている (図4)。例えば、C1, 2とC3, 4では氷震の発生頻度に日変動が見られたが、前者と後者では位相がおおよそ半日ずれていた (図4)。これらの氷震の発生頻度は、潮位変動と同期していることが見出された。C1, C2は潮位の低下速度が最大となる時に最も高頻度で氷震が観測された。その一方で、C3, C4は潮位の上昇速度が最大となる時に高頻度で測定された。これまでのGPS観測により、ラングホブデ氷河棚氷は潮位変動に弾性的に応答し、鉛直方向や水平方向に変位することが報告されている (Minowa et al., 2019)⁶。氷河の応力変化による氷破碎が氷震の

原因であることが示唆される。

C5も同様に日周期で氷震が増減の様子が見られた。これは、気温が低下するタイミングと一致する傾向が見られた。気温低下による氷の収縮による応力変化が氷震の原因として考えられる。C6, C7は不明瞭な変動を示し、現段階で氷震の発生メカニズムは不明である。

4. まとめと今後の展望

東南極のラングホブデ氷河において2018年1月に測定をした氷震について、階層クラスタリングを応用し、氷震の分類を試みた。合計で7つのクラスターに分類された。C1-4は潮位変動と同期した変動を示した。C5は気温低下と同期した変動を示した。潮位変動や熱収縮による応力変化が氷震の原因となることを示唆する。

階層クラスタリングでは、氷震の波形の類似度を特徴量として分類に使用している。今後、クラスターを作成する際に、閾値をより客観的に決定したり、周波数領域で氷震間の類似度を算

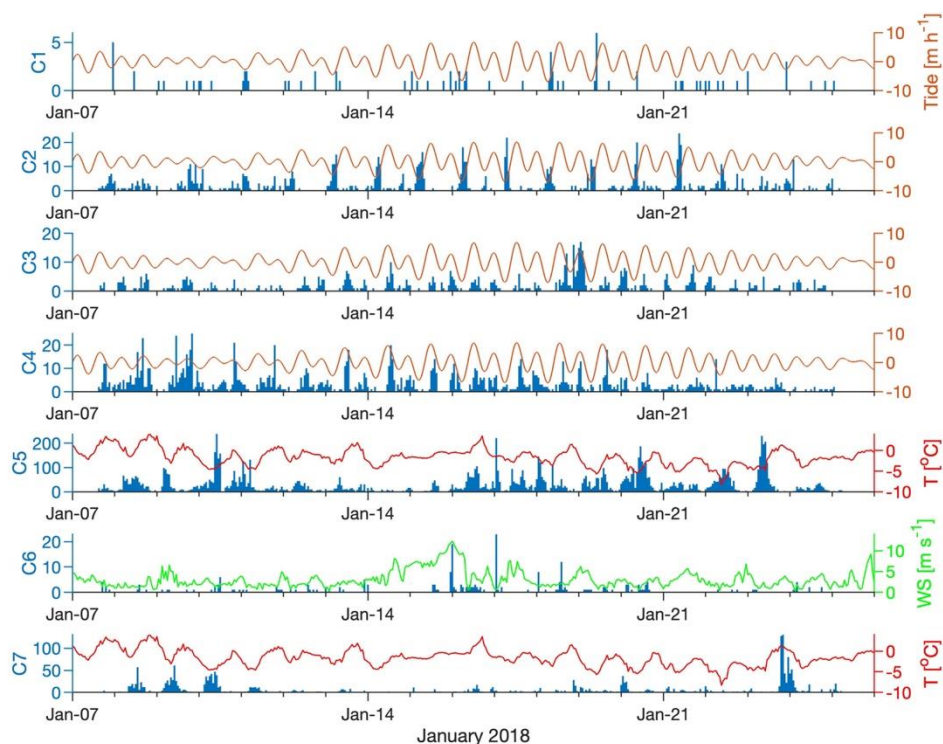


図4 各クラスタの発生頻度. 各クラスタの平均波を全観測の地震波にテンプレートマッチングさせる事で検出した. 昭和基地で取得した潮位変化速度と気温, 風速を合わせて示す.

出したりといった改善が考えられる. また, C1-4 は設置した全ての地震計で測定された. 今後, 地震波の到達時間や振幅を比較することで, 氷震の震源を特定することで, 氷震の発生メカニズムの理解を深める必要がある.

【謝辞】

本研究は南極地域観測第9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)及び若手研究(22K14093)の助成を得て実施した. 地震波データの解析には, Pythonの公開ライブラリであるObsPy⁷⁾を利用した.

【参考文献】

1) Bindschadler R *et al.*, 2011: Getting around Antarctica: New high-resolution mappings of the grounded and freely-floating boundaries of the Antarctic ice sheet created for the International

Polar Year, *The Cryosphere*, **5**(3), 569–588.
 2) Rignot E *et al.*, 2013: Ice-shelf melting around Antarctica, *Science*, **341**, 266–270.
 3) Depoorter M *et al.*, 2013: Calving fluxes and basal melt rates of Antarctic ice shelves, *Nature*, **502**, 89–92.
 4) Joughin I *et al.*, 2021: Ice-sheet retreat drives recent Pine Island Glacier speedup, *Science Advances*, **7**, eagb3080.
 5) Podolskiy E and Walter F, 2016: Cryoseismology, *Review of Geophysics*, **54**(4), 708–758.
 6) Minowa M *et al.*, 2019: Tide-modulated ice motion and seismicity of a floating glacier tongue in East Antarctica, *Annals of Glaciology*, **60**(79), 57–67.
 7) Krischer *et al.*, 2015: ObsPy: A bridge for seismology into the scientific Python ecosystem, *Computational Science & Discovery*, **8**, 014003.