

高周波水位測定によるカービングの統計解析と周波数解析 Statistical and frequency analysis of calving by high-frequency surface wave measurement

箕輪昌紘（北海道大学 大学院環境科学院・低温科学研究所），

杉山慎（北海道大学 低温科学研究所），

榊原大貴（北海道大学 大学院環境科学院・低温科学研究所），

ポドリスキ エヴゲニ（北海道大学 低温科学研究所）

大橋良彦（北海道大学 大学院環境科学院・低温科学研究所），

澤柿教伸（法政大学 社会学部），内藤望（広島工業大学 地球環境学科），

スクヴァルカ ペドロ（パタゴニア氷原博物館）

Masahiro Minowa, Shin Sugiyama, Daiki Sakakibara, Evgeny Podolskiy,

Yoshihiko Ohashi, Takanobu Sawagaki, Nozomu Naito and Pedro Skvarca

1. はじめに

カービング（冰山分離）による氷河末端からの氷損失は，カービング氷河や氷床の変動に大きな影響を及ぼす¹⁾。カービングには様々な種類があり，主な種類としては空中からの氷塊落下や，水中からの浮上，さらにテーブル状の氷塊の分離が挙げられる²⁾。またその規模も様々である。しかしながら，カービングの種類や頻度，規模について観測することは困難であり明らかとなっていない。

カービングの規模や頻度について測定する手法の一つとして，氷塊が水面と接するときに発生する水面波を測定することが有効である³⁾。しかしながらこの水面波に関する研究例は少なく，手法の有効性は十分に明らかではない。

本研究では，カービングに起因する水面波を水圧測定により記録し，カービングの頻度と水面波の波高の日変動と季節変動を解析した。そして頻度と波高を気温や流動速度と比較することでその決定要因を考察した。また，異なる種類と規模のカービングにより発生した水面波を比較することで，カービングの種類による水面波の異なりを明らかにした。

2. 手法

2. 1 カービングに起因する水面波の測定

2013年12月15日から2014年1月4日，および2014年10月6日から10月20日，夏期21日間と春期16日間の計37日間，南パタゴニア氷原ペリート・モレノ氷河が流入

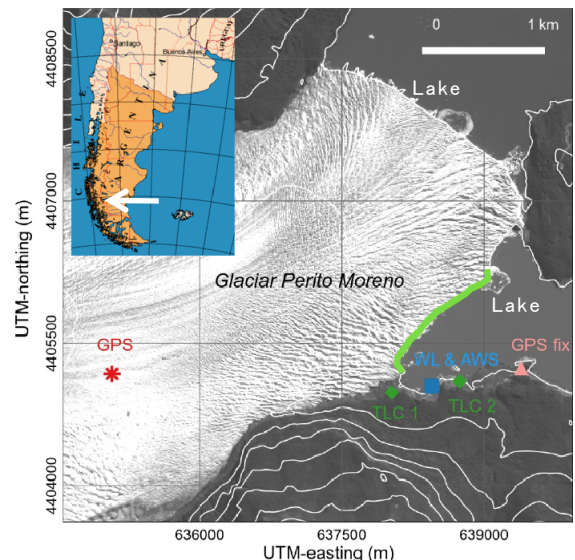


図1 GPS 測定の移動局（*）と基準局（▲），水圧センサーと自動気象ステーション（□□），インターバルカメラ（◆）の位置を示す。背景画像は2008年3月に人工衛星だいちにより撮影された画像。

する湖においてカービングに起因する水面波を測定した(図 1). HOBO U-20 水圧センサー(Onset 社)を水深 20 cm 付近に固定し, 2 秒間隔で水圧を連続測定して水位の変化を記録した. 測定精度は水位 ± 0.5 cm に相当する.

2. 2 インターバル撮影

デジタルカメラを使用して, ニヶ所から氷河末端をインターバル撮影した(図 1). カメラはパイクコム社のガーデンウォッチカム(解像度: 1280×1024 画素)を使用した. 撮影頻度は毎分 1 回である.

2. 3 GPS 流動測定

氷河末端から上流に約 4 km の地点で, 二周波 GPS(全地球測位システム)(測地衛星株式会社 GEM-1)を使用し流動速度を測定した(図 1). 長さ 2 m のアルミニウムポールを氷河表面に埋め込み GPS アンテナを設置した. スタティック干渉測位により夏期は 15 分毎に春期は 30 分毎にポールの位置座標を測定した. 測定誤差は, 水平方向に 2–3 mm, 垂直方向に約 10 mm である. GPS データの解析には RTKLIB を使用した.

2. 4 気象測定

氷河末端付近に自動気象ステーション(ヴァイサラ社 WXT520)を設置し, 気温, 大気圧, 湿度, 風速, 風向, 降水量を 5 分毎に測定した. また, GPS を設置した氷河上のポールにも小型温度ロガー(日置社 LR5001)を設置して気温を測定した. 測定精度はそれぞれ $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ と $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ である.

2. 5 カービングの検出

測定した水圧データ(P_l)を, 以下の式により気圧データ(P_a)で補正することで, 水位(H_l)を計算した.

$$H_l = (P_l - P_a) / \rho_w g \quad (1)$$

ここで, ρ_w は淡水の密度 (1000 kg m^{-3}), g は重力加速度 (9.81 m s^{-2}) である.

その後, 400 秒毎に水位データを区切りその極大値が 0.13 m を超えたものをカービングとして検出した(図 2). これらの閾値は, 水位から検出したカービングがインターバルカメラによる観察と一致するように設定した.

3. 結果と考察

3. 1 カービングの頻度

水位測定によって, 夏期 21 日間と春期 16 日間にそれぞれ 640 回と 195 回のカービングを検出した(図 3). 春期と夏期の日平均カービング頻度は, それぞれ 12 d^{-1} と 30 d^{-1} であった. これは季節平均の流動速度や気温の上昇と関係があると考えられる. さらに, 夏期のデータに着目すると, カービングの頻度は夏期気温と流動速度の変動に伴って数日から数週間の時間スケールで変化を示した(図 3a). 例えば, 12 月 15–26 日の平均カービング頻度が 21 d^{-1} であったのに対し, 12 月 27 日から 1 月 2 日の平均カービング頻度は 50 d^{-1} に増加した. 増加のタイミングは 12 月 27 日の気温上昇や流動速度増加のタイミングと一致していた. これらの結果は, 気温上昇による融解量の増加が氷破碎と流動を促進しカービングを引き起こすことを示唆している. 気温や流動速度とカービングの関係はペリート・モレノ氷河で行われた先行研究による結果と一致する³⁾.

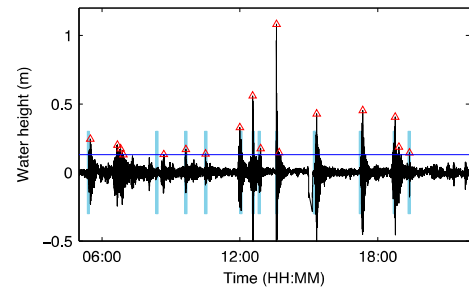


図 2 水位データ(実線)と水位から検出したカービング(▲). 青色の縦線はインターバルカメラで撮影されたカービングを示す.

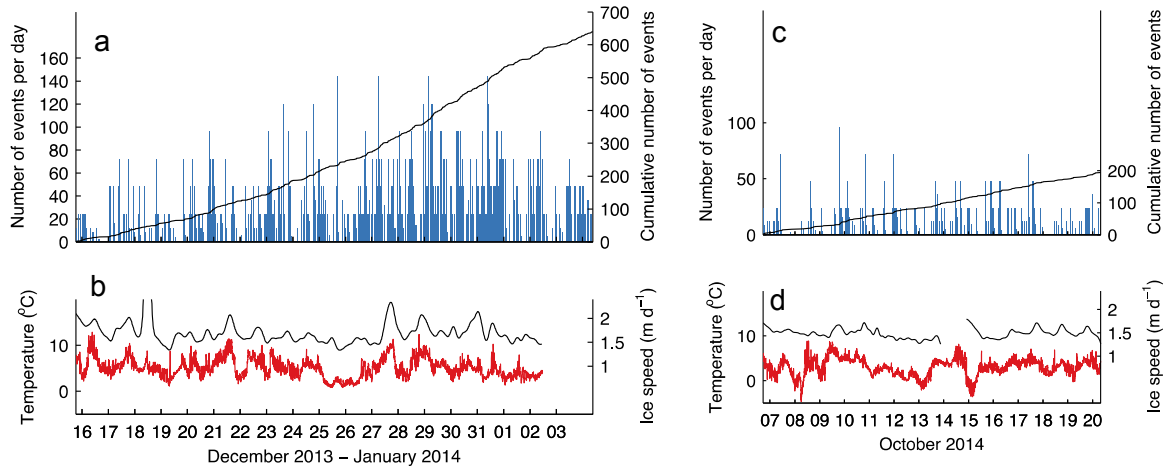


図3 (a) 夏期に測定したカービングの位置日あたりの発生頻度（左軸）と累積発生頻度（右軸），および（b）表面流動速度（黒線）と気温（赤線）．（c, d）春期に測定された同じデータセット．

次に春期と夏期のカービングの発生間隔と，カービングによる水面波の波高について比較した(図4)．夏

期は間隔 0.7 時間であったのに対し，春期は平均 1.7 時間と 2.4 倍であった(図 4a)．一方で，春期と夏期の平均波高は 0.33 m および 0.36 m と同程度であった(図 4b)．水位測定地点から

カービング発生地点までの距離が春夏で大きく変わらないとすれば，波高はカービングの規模に関係すると考えられる．したがって，カービング量の季節変動はカービングの規模ではなく発生間隔によって説明されることが示唆された．

3. 2 周波数解析

インターバル撮影で取得した画像情報を元にして，3 種類の特徴的なカービングに対応する水面波を抽出した(図5)．3 種類のカービングはそれぞれ，(A) 空中カービング大：氷河末端から大きな氷塊が水中に倒れこむ(図5A)，(B) 空中カービング小：末端から小さな氷塊が落下(図5B)，(C) 水中カービング：水中で分離した氷塊が浮上(図5C)である．A と B はペリート・モレノ氷河で頻繁に観測されるカービングである．C は

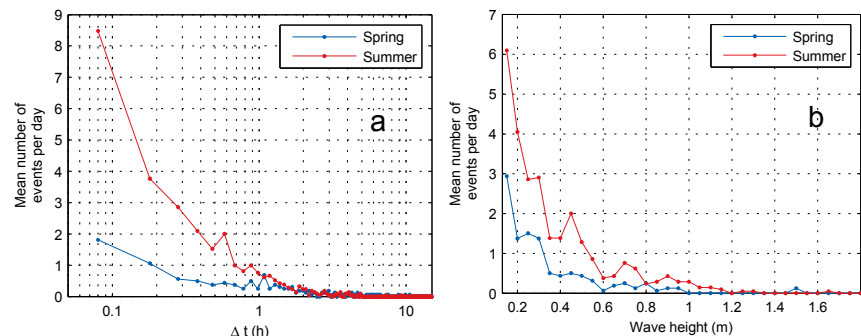


図4 (a) カービングの発生間隔と (b) 水面波の波高の日平均の測定回数．

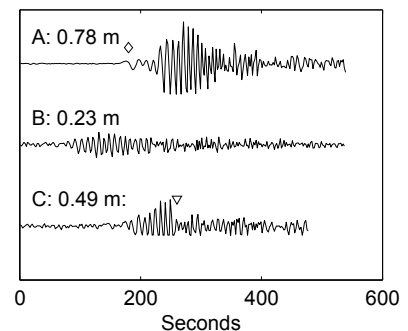


図5 特徴的な3種類のカービングイベントにより測定された波形と最大波高．A 空中からの大規模のカービング，B 空中からの小規模のカービング，C 水中からのカービング．

比較的稀なカービングで、夏期に3回、春期には発生しなかった。いずれのカービングもセンサーから~1100 m の地点で発生しており、氷塊の大きさは $A > B$, $A \approx C$ である。まず波形を比較すると、氷塊が大きいほど振幅の大きな水面波が測定された（図5）。AとCは同規模の氷塊であったが、Aの方が~30 cm 大きな水面波が測定された（図5A及びC）。また、Aで最初に到達する波が明瞭であるのに対し（図5◇）、B及びCでは明瞭でなかった。AとCでは最大振幅の後次第に振幅が減衰していくのに対し、Cでは振幅が顕著に減少している（図5▽）。これらの3つのカービングに起因する水面波について周波数解析を行った。いずれの水面波もカービングの発生していない時の水面波と比較して有意な周波数を持っていた（図6）。3つの水面波はいずれも卓越周波数を 0.11 Hz に持っていた（図6一点鎖線）。一方、AはBCと比較して、比較的強い周波数が 0.08–0.18 Hz に広く分布していた。これらの水面波の波形や周波数解析の結果は、原因となるカービングの規模と種類によって、水面波が異なる波形と周波数を持つことを示唆している。さらに解析事例を増やし一般的な関係を解明することが今後の課題である。

4. まとめ

2013年12月から2014年1月の夏期と2014年10月の春期の2度にわたり、南パタゴニア氷原ペリート・モレノ氷河のカービングに起因する水面波を測定した。また同時にカービングの様子をインターバル撮影した。その結果、夏期は春期に対して2.4倍多くのカービングが発生していた。この結果は、気温上昇による融解量の増加がカービングの季節変動を駆動することを示唆している。

3種類の特徴的なカービングに注目して、水面波の波形と周波数帯を比較したところ、カービングの種類と規模によって異なる波形と周波数が得られた。今後さらに解析事例を増やすことで、水面波とカービングのより一般的な関係を明らかにすることが重要である。本研究は水圧センサーによる高周波水位測定が、カービングの頻度や規模を測定する有効な観測手法となる可能性を示唆している。

【謝辞】

本研究は科研費（基盤研究 B23403006）及び日本雪氷学会井上フィールド科学研究基金の助成を受けて実施したものである。

【参考・引用文献】

- 1) Douglas I. Benn and 2 others, 2007: Calving processes and the dynamics of calving glaciers, *Earth-Science Reviews*, **82**, 143–179
- 2) C. J. van der Veen, 2002: Calving glaciers, *Progress in Physical Geography*, **26**, 1, 96–122
- 3) Y. Iizuka and 2 others, 2004: Water surface wave induced by calving events at Perito Moreno Glacier, southern Patagonia, *Bulletin of Glaciological Research*, **21**, 91–96

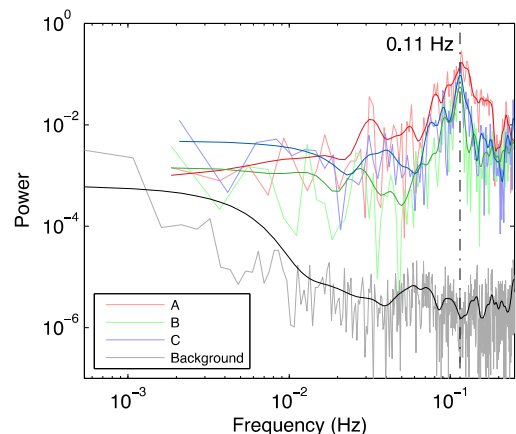


図6 図5で示したそれぞれのカービングに起因する水面波のパワースペクトル。灰色は静穏時における湖のパワースペクトルを灰色で示す。