

東南極ラングホブデ氷河における底面滑りの直接観測

Direct observations of basal sliding beneath Langhovde Glacier, East Antarctica

近藤 研^{1,2}, 杉山 慎¹, 箕輪 昌紘¹

Ken Kondo^{1,2}, Shin Sugiyama¹, Masahiro Minowa¹

Corresponding author: ken_kondo@gmail.com (K. Kondo)

南極氷床は、海へ流出する氷河の流動加速によって質量を失っている。そのため、氷河の速い流動を駆動する底面滑りの理解は喫緊の過大である。そこで本研究では、加速度計と水圧計を用いた底面滑り観測用の測器を新たに開発し、東南極ラングホブデ氷河で観測を行った。その結果、氷河の底面水圧増加と流動加速が生じた期間に、底面に設置した加速度計によって多数の振動が記録された。この結果は、氷河底面滑りの観測に加速度計が有用であり、底面滑りの発生・変動メカニズムに新たな知見をもたらす可能性を示す。

1. はじめに

南極氷床は近年質量を失っており、その融解が1979-2017年に14mmの海水準上昇を引き起こした¹⁾。南極氷床の質量損失は、沿岸部で海に溢流する氷河の流動が加速し、より多くの氷が海洋に流出したことが原因と指摘されている²⁾。氷河の速い流動は、氷が基盤を滑る底面滑りで生じているため、その発生・変動メカニズムの解明は喫緊の課題である。しかしながら、底面滑りは厚さ数百 m に及ぶ氷河の底で発生するため観測が困難で、発生メカニズムの理解が遅れている。底面滑り速度は、底面水圧に関係して変動すると指摘されているが³⁾、南極氷床で底面水圧が観測された例は極めて少なく³⁾、両者の関係性はよく理解されていない。これまでは、氷河底面滑りを歪み計⁴⁾やアンカーに接続したワイヤーリール⁵⁾を用いて観測した報告がある。しかしながら、南極で報告された底面滑り観測は僅か数例に限られる⁶⁾。

そこで本研究では、加速度計と水圧計を組み込んだ底面滑り観測測器を新たに開発し、東南極ラングホブデ氷河において底面滑りの観測を行った。本稿では、開発に際して行った運用テストと、熱水掘削孔を用いて氷河底面に設置した初期解析の結果を報告する。

2. 底面滑り観測測器の開発

(1) 測器の構成

本研究で開発した底面滑り観測測器は、直径34 mm、長さ0.45 mのステンレスパイプに加速度計と水圧計を内蔵する(図1a)。氷河底面の堆積物中



図1 (a) 開発した底面滑り観測測器。(b) 掘削孔を用いた底面滑り観測測器の設置イメージ。

に測器先端を打ち込むために、重さ8 kg、長さ2 mの真鍮丸棒を錘として取り付ける。本測器を、熱水掘削孔を利用して氷河底面に設置することで、底面滑りに伴って生じる測器の振動と、底面水圧を同時測定する(図1b)。加速度の測定には3軸加速度センサ(EPSON M-A352AD10)を用い、サンプリング周波数100 Hz、精度2 mGで測定する。水圧の測定には、ピエゾ抵抗素子を内蔵した圧力計(Valeport miniIPS)を用いて、サンプリング周波数1 Hz、精度10 cmで測定する。

(2) 運用テスト

氷河底面滑りに伴ってどのような加速度が記録されるのかを予め把握するために、測器が基盤を擦って移動する様子を再現した実験を行った。机に固定した測器先端を、ケースを満たす礫または砂に入

¹⁾ 北海道大学低温科学研究所

²⁾ 北海道大学環境科学院

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University
Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University

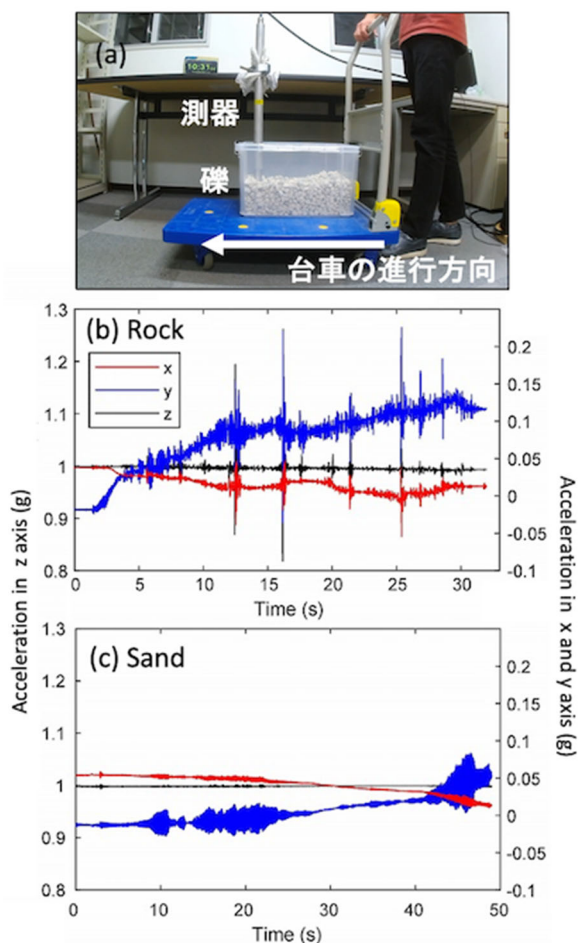


図2 (a) 底面滑りを模した測器のテスト. (b) 礫と(c) 砂の中を移動した際に得られた加速度データ.

れ、ケースが載った台車を前進させることで、測器が基盤上を移動する動きを再現した (図 2a). ケースに礫を満たし、0.35 m の距離を 30 秒で台車を前進させた際の結果を図 2b に示す. 測器が礫の中で強く滑った際には 3 軸全ての加速度に強いピークが見られた. また、ケース中の礫を砂に変え、0.35 m を 50 秒かけて台車を前進させた際の結果を図 2c に示す. このときには砂の中を滑らかに移動したため、加速度のピークが見られず、10 Hz 以下の細かな振動が記録された. これらの運用テストにより、設置する場所の材質によって測器の動きや測定される加速度の特徴が異なることが示唆された.

次に、3 軸加速度を用いた測器の姿勢検出を試験した. 測定された加速度が重力加速度であると仮定すると、3 軸加速度 ($a_{x,y,z}$) から測器の x 軸対地角 (α), y 軸対地角 (β) をそれぞれ以下の式から求められる.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \right) \quad (1)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}} \right) \quad (2)$$

上記二つの対地角を用いて、測器の傾き (θ) は以下で表される.

$$\theta = \cos^{-1}(\cos \alpha \cos \beta) \quad (3)$$

角度計 (新潟精機 ダイヤルスラントルール) を用いて測器を 30 度、45 度、60 度に傾けた際に、記録された加速度から算出される θ を比較した. その結果、角度計から読み取った傾斜と加速度から算出した傾斜の差は平均 0.7 度であり、1 度以下の精度で測器の傾きを測定できることが示された.

3. ラングホブデ氷河における観測

(1) 熱水掘削孔を用いた測器の設置

開発した底面滑り観測測器を、南極氷床から海へ流出するラングホブデ氷河 (69°11'S, 39°32'E) の底面に設置し底面滑りの観測を行った. ラングホブデ氷河は東南極の宗谷海岸からリュツォホルム湾へ流入する、末端幅 3 km の溢流氷河である (図 3). 2021 年 12 月 31 日に、接地線上流の氷厚 550 m 地点を熱水で全層掘削した. 掘削孔に挿入したビデオカメラの映像から、氷河底面が土砂に接地している

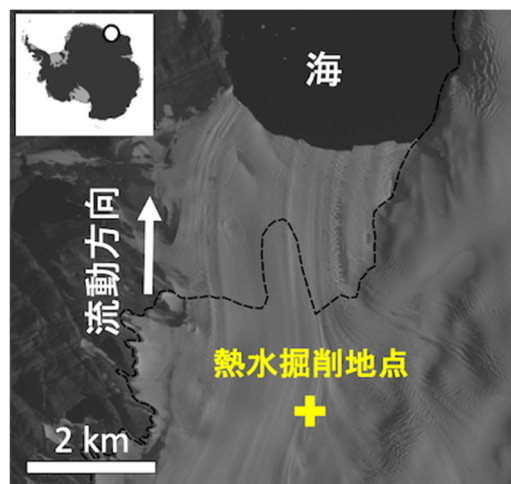


図3 研究対象地のラングホブデ氷河 (Landsat 8, 2020 年 3 月 2 日撮影). 底面滑り観測測器を設置した掘削孔 (+) と推定される接地線の位置 (破線) ⁷⁾を示す.

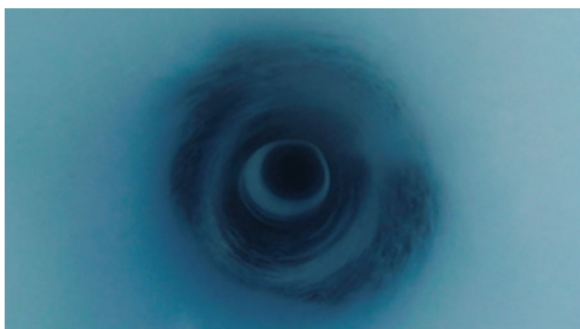


図4 底面滑り観測測器を設置した掘削孔の様子 (深度約200 m).

ことを確認した(図4). この掘削孔最深部に底面滑り観測測器を設置し、氷河表面に導いたケーブルにデータロガーを接続することで、底面水圧と加速度を連続測定した.

(2) 底面滑り観測結果

加速度計に記録された3軸加速度をローパスフィルタで処理し20 Hz以上の高周波成分を除いたのち、式(1-3)を用いて測器の傾きの推移を算出した. その結果、数時間から数日かけて測器の傾きが大きくなった後、数秒のうちに増加前の値まで傾きが減少する変動が繰り返し観測された. この動きは、氷河の底面流動に伴って測器が底面を滑りながら移動したことを示すと推測される. また、記録された加速度から、STA/LTAトリガー方式⁹⁾を用いて振動イベントの検出を行った(図5). その結果、1月2日から5日までに振動イベント数の増加が見られ、1月4日には1時間に625回の最大回数を記録した. これと同時期に、掘削孔の水圧増加と氷河表面の流動加速が観測された. したがって、底面の水圧上昇に起因する底面滑りの促進によって、加速度の振動イベント数が増加したと考えられる. 以上より、加速度計を用いた測器によって、これまで観測が困難であった氷河底面滑りの変動を観測できる可能性が示された.

5. まとめと今後の展望

本研究では、加速度計と水圧計を用いて氷河の底面滑りを観測する新たな測器を開発し、室内実験と東南極ラングホブデ氷河での観測を行った. 重力加速度によって測定される測器の傾きから、測器が底面流動に伴って移動する様子が観測された. また、振動イベント数が、底面滑り速度の指標となる可能性が示された.

ラングホブデ氷河での測定は、長期測定用の電源

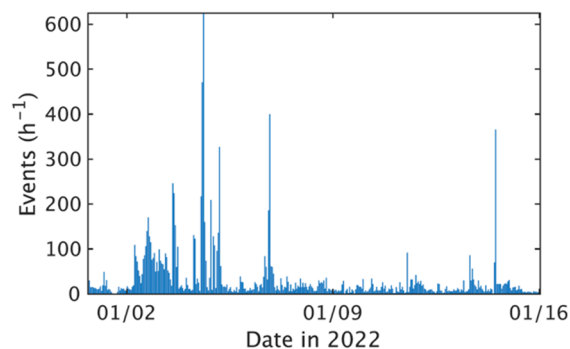


図5 加速度計で検出された振動イベント数.

系を接続し2022年2月以降も継続中であり、2023年1月にデータを回収する予定である. この長期観測により、底面水圧や底面流動の季節変動に関する新たな知見が期待できる. また、ラングホブデ氷河の底面で測定した加速度には、約24,400回の振動イベントが検出された. これらの振動イベントは、氷河底面における測器の動きや、周囲の流動・水文現象で生じる振動に起因して測定されたものと考えられる. したがって、加速度のより詳細な波形解析によって、氷河底面の堆積物の物理特性や、氷河底面滑りの発生・変動メカニズムに関する理解を推し進めることが、今後の課題である.

【謝辞】

本研究は南極地域観測隊第9期重点研究観測「氷床・海水縁辺域の総合観測から迫る大気-氷床-海洋の相互作用」の一部として実施した. また科研費新学術領域「熱-水-物質の巨大リザーバ全球気候変動を駆動する南大洋・南極氷床」の助成を受けた. 第63次南極観測隊メンバー、および熱水掘削で支援を受けた渡辺陽氏(マリン・ワーク・ジャパン)に感謝する. 底面滑り観測測器はクローバテック(株)の協力を得て製作された.

【参考文献】

- 1) Rignot E, Mouginot J, Scheuchl B, Van Den Broeke M, Van Wessem MJ and Morlighem M, 2019: Four decades of Antarctic ice sheet mass balance from 1979–2017. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **116**(4), 1095–1103.
- 2) Iken A and Bindenschadler RA, 1986: Combined measurements of subglacial water pressure and surface velocity of Findelengletscher, Switzerland: conclusions about drainage system and sliding

- mechanism. *J. Glaciol.*, **32**(110), 101–119.
- 3) Engelhardt H and Kamb B, 1997: Basal hydraulic system of a West Antarctic ice stream: constraints from borehole observations. *J. Glaciol.*, **43**(144), 207–230
 - 4) Fischer U and Clarke G, 1994: Ploughing of subglacial sediment. *J. Glaciol.*, **40**(134), 97–106
 - 5) Blake W, Fischer U, Bentley C and Clarke G, 1994: Instruments and Methods: Direct measurement of sliding at the glacier bed. *J. Glaciol.*, **40**(136), 595–599.
 - 6) Hermann E and Barclay K, 1998: Basal sliding of Ice Stream B, West Antarctica. *J. Glaciol.*, **44**(147), 223–230.
 - 7) Fukuda T, 2014: Variations in the terminus position, ice velocity and surface elevation of the Langhovde Glacier, East Antarctica. Hokkaido University, PhD thesis.
 - 8) Beyreuther M, Barsch R, Krischer L, Megies T, Behr Y, Wassermann J, 2010: ObsPy: A Python toolbox for seismology. *Seis. Res. Lett.*, **81**(3), 530–533.