# グリーンランド北西部 Bowdoin 氷河における 末端位置の変動と海底地形の関係

# Influence of ocean bed geometry on the front variations of Bowdoin Glacier, northwestern Greenland

浅地 泉(北海道大学大学院環境科学院,低温科学研究所) 榊原大貴(北海道大学 北極域研究センター) 杉山 慎(北海道大学 低温科学研究所) 山崎新太郎(京都大学 防災研究所)

Izumi Asaji, Daiki Sakakibara, Shin Sugiyama, Shintaro Yamasaki

#### 1. はじめに

グリーンランド氷床では、沿岸部に位置するカービング氷河が近年急速に後退し、海水準変動に大きく寄与している<sup>1)</sup>.このような氷河後退は、表面質量収支に加えて氷河末端付近の動力学に駆動される.氷河の表面標高が低下し、flotation level(氷に作用する浮力と重力が等しくなる表面標高)に近づくと、カービングが促進されて急激な後退が起きると考えられている<sup>1)</sup>(図1).flotation level は、水と氷の密度と基盤標高から求められるため、この仮説の検証には、氷河前縁および氷河下の基盤標高を知る必要がある.そこで本研究では、近年の後退が著しいグリーンランド北西部 Bowdoin 氷河にて、前縁フィヨルドと氷河底面地形を測定し、1)氷河後退と基盤地形との関係性を明らかにして、上記の仮説を検証すること、2)現在の氷河表面標高の低下速度から将来の後退予測を行うことを目的とした.

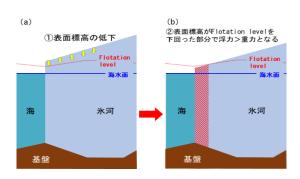


図1. 提唱されているカービング氷河の後退メカニズム. (a)表面標高が次第に低下し, (b)flotation level を下回る(浮力>重力)と、赤の斜線部の氷が失われて末端が後退する.

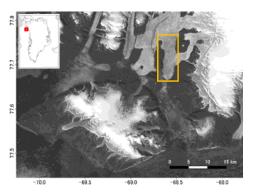


図2. 観測地周辺の Landsat8画像に Bowdoin 氷河を示す (黄枠).

#### 2. 研究対象地

図2に、本研究対象地であるグリーンランド氷床北西部 Bowdoin 氷河(77°41'N、68°35'W)を示す。Bowdoin 氷河は、氷床から南に向かって流れる全長約10 km、末端幅3 km のカービング氷河である。2008年以降、それまで安定していた末端位置が急速に後退したことが報告されている<sup>3)</sup>。

#### 3. 観測手法

#### 3.1 現地観測

Bowdoin 氷河が流入する Bowdoin フィョルドでは,2016年7月29日に末端付近3 km×6 kmの範囲で海底地形の測深を行った.全長6 m の小型船にソナー(Lowrance 社製 HDS-9 Gen2)と振動子(Airmar 社製 B175L)を取り付け,船速 $10\sim12$  km  $h^{-1}$ で航行しながら毎秒データを取得した.また,オハイオ大学で開発された氷レーダを用いて,氷河上約200地点で氷厚の測定を行った.また,同じ地点で GPS キネマティック測量を行い,氷河の表面標高を計測した.そして,表面標高値から氷厚の値を差し引くことで氷河下基盤地形の標高を求めた.

#### 3.2 人工衛星データ解析

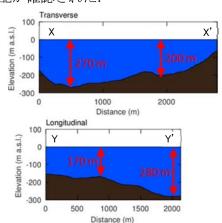
末端位置変動解析には,アメリカ地質調査所が配布する,Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus と Landsat 8 Operational Land Imager センサにより取得された人工衛星画像のうち,2000年から2016年までに取得された,雲が占める割合が60%未満のものを解析に使用した.そして,地理情報システムソフトウェア(QGIS)を用い,氷河末端位置を PC スクリーン上での目視判別により抽出した.また,2001年から2012年における氷河表面標高変化は,人工衛星 Terra および ALOS の光学画像から作成された数値標高モデルより測定した.DEM の地上分解能はそれぞれ 30 m と 15 m である.

# 3. 結果

### 3.1 末端位置と海底地形

末端位置は、2008年から2011年の間に氷河の西側部分で最大1.7 km 後退した(図3).一方で、東側の後退距離は0.4 km と比較的小さい.

また氷河前フィョルドでは、氷河末端西側と東側で深さが顕著に異なることが明らかとなった。その詳細を確認するため、末端を横断する X-X、縦断方向 Y-Y に沿った断面図を作成した。 X-Xでは西側には最大深さ約270 m の窪みがあり、東側にかけて180 m の丘を越え、地形は再び220 m まで深くなっていたことが確認された(図4a)。一方 Y-Y では、氷河末端に近づくにしたがって水深が深くなっており、水平距離2 km で約100 m の勾配が確認された。



**図4**. (a) 図2に示す X-X (b) Y-Y'に沿った断面図.

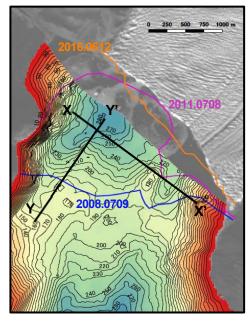
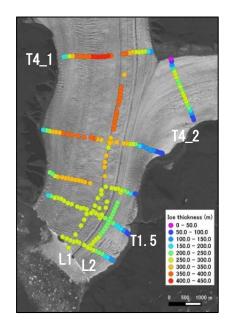


図3. 氷河前フィヨルドの海底地形図. 実線は2008-2016年の氷河末端位置.

# 3.2 氷河下の基盤地形

西側でより水深が大きくなるフィヨルド海底地形と整合するように、氷河下の基盤地形は本流側(西側)の方が深い(図5). 本流側最上流部の測線 T4\_1では最大415 m, 支流側の測線 T4\_2では最大264 m の氷厚が観測された. 平均氷厚は T4\_1で320 m, T4\_2で197 m であり、本流側の氷の方が厚いことが明らかとなった. これらの氷厚差は、本流と支流の合流地点である氷河上の中央モレーン(氷河が削った岩石の屑が運ばれ堆積した物)が境となっている. そして、本流と支流の氷厚差は、氷河下の基盤標高の差にも表れており、西側の標高が低く東側で高いことが明らかとなった



**図5**. 氷レーダ測定によって得られた 氷厚測定結果.

#### 3.3 表面標高変化

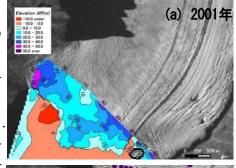
図5に示す L1上の31地点での、氷河表面標高の平均変化速度は、2001年から2012年の間で-2.5 m  $a^{-1}$ の速度であったことが明らかとなった.氷河の後退の始まる前の2001年から2007年まで、および後退後の2009年から2012年までの変化速度はそれぞれ、-4.94 m  $a^{-1}$ 、-1.91 m  $a^{-1}$ であった.大規模後退の起こる前後で、表面標高の低下速度が60%減少したことが明らかとなった.

#### 4. 考察

# 4.1 氷河の表面標高と flotation level

末端後退前の2001年と2007年、そして後退後の2010年のDEM を用いて、大規模後退の前後で氷河表面標高とflotation level を比較した.標高値がflotation level に対して十分に大きければ、氷に作用する重力が浮力に対して大きいため、氷河末端は力学的に安定していると考えられるもしも標高値がflotation level に近い、あるいは下回る場合は、氷河末端は浮力の作用でカービングが起きやすい状態にあったと推定できる.

その結果、2001年の表面標高は flotation level より10 m以上高く、浮力は重力よりも小さいことを示した(図6 a). しかし後退直前の2007年には氷河西側の表面標高がflotation level を下回り、氷厚の約90%が海水面下にあったことが判明した(図6b). この地域は2008年以降大きく後退している. 以上のことから、Bowdoin 氷河末端西側の領域では、氷厚の減少によって氷に加わる浮力が重力を上回ったため、大規模に後退したことが示唆された.



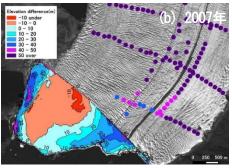


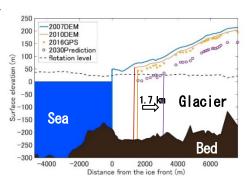
図6. (a)2001年 ASTER DEM (b)2007年 ALOS DEM に基づいた氷河表面標高と Flotation level との差(単位は m).

# 4.2 氷河の表面標高変化と後退予測

次に、氷河中心線での表面標高が今後も2.5 m a<sup>-1</sup>で低下し、表面標高が flotation level を下回った部分が失われると仮定して、氷河末端位置の将来予測を行った(図7). その結果、2016年から2030年までに末端位置は1.7 km 後退することが予測された.

この解析は、最近11年間の氷厚減少速度を将来にわたって一定と仮定したものであり、今後の表面質量収支変動、氷厚の減少にともなう流動速度の変化や水中融解による氷損失量の変化については考慮していない.

Bowdoin 氷河の流動速度は末端付近で最大となり、伸長流に伴う鉛直歪で氷が薄くなるため、末端付近では表面標高変化も大きい<sup>4)</sup>.したがって、Bowdoin 氷河の将来変動をより正確に予測するためには、将来の気候変動に加えて、氷河の後退と氷厚減少に伴った流動変化を考慮することが必要である.



**図7**. 中心線に沿った氷河の断面図と2007年,2010年,2016年,2030年 (予測)の氷河の表面標高.

#### 5. まとめ

本研究では、現地観測によりグリーンランド北西部 Bowdoin 氷河末端前縁に広がるフィョルドの詳細な形状、Bowdoin 氷河の氷厚および表面標高を測定した。また、衛星データ解析より氷河の末端位置の抽出および表面標高の経年変化を明らかにした。そして、大規模後退前後における氷河末端での力学的状態を精査した。その結果、氷への浮力と重力が釣り合う条件に達した領域が後退したことが明らかとなった。この結果は、氷河末端での力学的状態を考慮した氷河の後退予測を可能とした。

# 6. 謝辞

本研究は ArCS 北極域研究推進プロジェクトの支援を受けて実施した. 2016年夏のグリーンランド観測メンバーの協力に感謝する.

# 【参考文献】

- 1) Enderlin, E. M., I. M. Howat, S. Jeong, M. J. Noh, J. H. Angelen and M. R. Broeke, 2014: An improved mass budget for the Greenland ice sheet, *Geophysical Research Letters*, **41**(3), 866–872.
- 2) Benn, D. I., C. R. Warren and R. H. Mottram, 2007: Calving processes and the dynamics of calving glaciers, *Earth-Science Reviews*, **82**(3-4), 143-179.
- 3) Sugiyama, S., D. Sakakibara, S. Tsutaki, M. Maruyama and T. Sawagaki, 2015: Glacier dynamics near the calving front of Bowdoin Glacier, northwestern Greenland, *Journal of Glaciology*, **61**(226), 223-232.
- 4) Tsutaki, S., S. Sugiyama, D. Sakakibara, and T. Sawagaki, 2016: Surface elevation changes during 2007-13 on Bowdoin and Tugto Glaciers, northwestern Greenland, *Journal of glaciology*, **62**(236), 1083-1092.