グリーンランド北西部における氷帽の表面高度変化 Surface elevation change on ice caps in northwestern Greenland

斉藤 潤(北海道大学大学院環境科学院・低温科学研究所)
 津滝 俊(北海道大学低温科学研究所,国立極地研究所北極観測センター)
 澤柿 教伸(北海道大学地球環境科学研究院)
 杉山 慎(北海道大学低温科学研究所)
 Jun Saito, Shun Tsutaki, Takanobu Sawagaki, Shin Sugiyama

1. はじめに

グリーンランド沿岸には、氷床とは独立した氷河や氷帽が多数存在する¹⁾. これら氷河、氷帽の変動は気候変動の重要な指標であり、海水準変動に寄与している²⁾. 近年,氷床沿岸全域で氷河、 氷帽の質量損失がレーザー高度計搭載衛星 ICESat (Ice,Cloud,and land Elevation Satellite)の観測 によって見積もられ、急速な氷体縮小が明らかになった³⁾. しかし、ICESat の軌道間隔は 10-30 km であり、氷河氷帽の体積変化を正確に測定するには不十分である.そこで本研究では、陸域観 測技術衛星「だいち」(ALOS: Advanced Land Observing Satellite)のパンクロマチック立体視セ ンサ (PRISM) 画像から表面標高を高い空間分解能で測定し、グリーランド北西部カナック周辺 における氷帽表面高度変化を明らかにすることを目的とした.



図1 グリーンランド北西部カナック周辺の衛星 画像(Landsat 3,RBV/MSS, 1982 年 8 月 27 日撮影). 観測した氷帽を白枠で示す.

2. 研究対象地

カナック (77°28'N, 69°13'W)は、 グリーンランド北西部に位置する 村である.本研究では、カナック周 辺に位置する 4 つの氷帽の表面高 度変化を解析した.本稿ではこれ らの氷帽を Hurlbut Ice Cap, Ost Ice Cap, Five Glacier Dal Ice Cap, Kiatak Ice Cap と呼ぶ(図 1).

3. 使用データと解析手法

3.1. 人工衛星画像

氷帽表面の標高解析は, ALOS によって 2006-2010年に撮影された PRISM 画像 を用いた(表 1).地表 分解能は 2.5 m である.解析に用い たのは,直下視と前方視,また は直下視と後方視のステレオペ ア画像で,撮影時期の異なる 2 組のペア画像を比較することで 標高変化を測定した.

3.2. 表面高度とその変化の測定

ALOS・PRISMデータに RPC(rational polynominal coefficients)ファイルを付加 して,画像の画素情報を地理座標へ変換した.デジタルフォトグラメトリソフトウェ ア(ERDAS Inc., LPS:Leica Photogrammetry Suite)を使用したデジタル図化機を用 いて,ステレオ視モニター(Planar Systems Inc., SD2020)上で画像を実体視する.こ の実体視空間を使って,500 m 間隔に区切った格子点上で標高を測定し,2時期にお ける表面高度変化を算出した.標高の比較にあたっては,本来変化がないと考えられ る氷帽周辺の基盤岩域で,2時期の標高差がゼロに近づくように基準標高値を調整し た.実体視による標高測定では,画像の視認性の良し悪しが誤差に影響する.例えば, コントラストが低い箇所や起伏の激しい箇所,雲量の多い箇所で誤差が大きくなる⁴⁾. これらの影響を加味した標高測定誤差は±4 m 程度である⁵⁾.また,各氷帽の体積変化 量(ΔV)は次式で算出した.

$$\Delta V = \sum_{i} (\Delta h_i \times A)$$

Δh は氷帽の表面高度変化, i は各測定点を示す. A は氷帽上における測定点の単位面積 0.25 km²である.雪に覆われた高標高域では標高の測定が困難であり、今回の解析ではこれらの地域では標高変化がゼロと仮定して氷帽の体積変化を計算した。氷帽の面積は ESRI 社の ArcGIS を使用し,目視でマッピングして算出した.

表1 各氷帽の観測期間, 面積, 面積相対変化, 表面高度変化, 体積変化.

	Hurlbut Ice Cap	Ost Ice Cap	Five Glacier Dal Ice Cap	Kiatak Ice Cap
観測期間	2007/8/10-2010/7/3	2007/8/15-2009/8/3	2006/7/7-2010/8/28	2007/7/27-2010/8/28
面積(km ²)	140	18	69	92
面積相対変化(%)	0.32	0.65	0.57	0.32
表面高度変化(m/yr)	-1.7±0.8	-2.8 ± 1.3	-2.0 ± 1.0	-1.7 ± 1.0
体積変化(10 ⁶ m ³ /yr)	-172 ± 82	-50 ± 24	-126 ± 62	-117 ± 69



> -2.0
-2.0 - -1.5
-1.5 - -1.0
-1.0 - -0.5
-0.5 - 0
0 <

図2 各氷帽の年間の表 面高度変化(m/yr).(a) Hurlbut Ice Cap,(b)Ost Ice Cap,(c)Five Glacier Dal Ice Cap, (d)Kiatak Ice Cap.

4.結果および考察

各観測期間における 4 つの氷帽の表面高度 変化速度は,標高測定値が得られた範囲内の 平均で-1.7~-2.8 m/yr だった.また,体積変 化速度は-50~-172×10⁶ m³/yr であった. Ost Ice Cap は,観測した氷帽の中で最も低下速度 が大きく (2007 年 8 月 15 日から 2009 年 8 月 3 日で2.8 m/yr),その他の氷帽では1.7~2.0 m/yr となっている.また,各氷帽における面 積変化の相対量は Ost Ice Cap で最も高く, Hurlbut Ice Cap と Kiatak Ice Cap で最も低い 値を示した.氷帽面積が小さいほど裸氷域の 割合が大きく,表面の暗色化によるアルベド 低下や氷帽周辺の基盤岩域からの放射熱の供 給によって,表面融解が促進されると考えら れる^{6),7)}.

各氷帽における高度変化の標高依存性を解 析すると,全標高域で低下傾向にあるものの, 特に低標高において低下速度が大きい(図 3). カナック氷帽において 2012 年と 2013 年の夏 期に行われた現地観測では全標高域を含む測 線上の平均表面低下速度 0.2 m/yr に対して, 氷河末端部では 2.1 m/yr と,低標高で標高低 下が顕著であることが報告されている⁸⁾.カ ナックの夏期(6,7,8月)の気温は 1996 年か ら 2012 年にかけて上昇傾向にある(図 4). 降雪量の変化を無視すると,夏期の気温上昇 によって表面融解が増加し,標高低下に寄与 していることが示唆される.

グリーンランド北西部における氷河氷帽 (総面積 2699 km²)の表面低下速度 は,2003-2008年の平均で 0.6 m/yr と報告さ れている³⁾.本研究で得られた4つの氷帽(総 面積 254 km²)の平均値 1.8 m/yr はその約3 倍に相当する.この結果は,同地域の氷河,氷 帽の質量損失が近年加速していることを示唆 するものである.



図 3 Hurlbut, Ost, Five Glacier Dal, Kiatak Ice Cap の表面高度 変化(青点)とヒプソメトリー(緑 線).赤線は全データに対して線 形 近 似 し た も の で あ る.



図 4 カナック(77°46'N, 69°21'W) の夏期(6,7,8月)の平均気温変化. 赤線は全データの線形近似直線. 誤 差棒は日平均気温の標準偏差を示 す. 気温データは NOAA(National Climatic Data Center)より取得した.

5.まとめ

本研究では、グリーランド北西部カナック周辺に位置する4つの氷帽において、表面 高度変化を ALOS・PRISM データを用いて解析した.その結果、全ての氷帽において 表面高度の低下が観測され、2007-2009 年に Ost Ice Cap において最大の表面低下速度 2.8 m/yr が得られた.その他の氷帽の表面高度変化は 2006-2010 年にかけて-1.7~-2.0 m/yr であった.これらの値は, Bolchら³⁾によって報告されている 2003-2008 年の グリーンランド北西部の表面高度変化(-0.6 m/yr)の約3倍に相当する.また,表面高 度変化は特に低標高で著しいことが判明した.その要因として,夏期(6,7,8月)の気温 が上昇傾向にあり,低標高域の融解が増加している可能性が挙げられる.今後は,他の 衛星データを用いてより長い期間における標高変化を測定し,より詳細に氷帽の変動 を解析していく予定である.

謝辞

本研究は GRENE 北極気候変動研究事業の一環として実施した.

【参考文献】

- 1) Raster, P., *et al.* (2012) : The first complete inventory of the local glaciers and ice caps on Greenland. *The Cryosphere*, **6**, 1483-1495.
- 2) Meier, M. F., *et al.* (2007) : Glaciers dominate eustatic sea-level rise in the 21st century. *Science*, **317** (5841), 1064-1067.
- 3) Bolch, T., et al. (2013): Mass loss of Greenland's glaciers and ice caps 2003-2008 revealed from ICESat laser altimetry data. Geophys. Res. Lett., 37, 1-7.
- 4) 澤柿教伸・ラムサールダモダール. (2011). デジタル三次元空間における実体視地 形解析へのステレオスコピック技術の応用. *地理学論集*, **86**, 1-9.
- 5) Lamsal, D., et al. (2011) : Digital terrain modeling using Corona and ALOS PRISM data to investigate the distal part of Imja Glacier, Khumbu Himal, Nepal. Journal of Mountain Science, 8, 390-402.
- 6) Frank, P., *et al.* (2004) : Rapid disintegration of Alpine glaciers observed with satellite data. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L21402, doi:10.1029/2004GL020816.
- 7) Andreas, K., *et al.* (2002) : The new remote sensing derived Swiss glacier inventory: II. First results. *Annals of Glaciology.* **34**. 362-366.
- 8) 丸山未妃呂, 津滝俊, 榊原大貴, 澤柿教伸, 杉山慎, 2014: グリーンランド 北西部カナック氷帽における質量収支・流動速度・表面高度変化の観測, 北海道 の雪氷, 33