

衛星高度計 ICESat-2/ATLAS データ処理による白瀬氷河の氷厚推定

中田アドリアン[†] 佐竹祐里奈[†] 中村和樹^{††}

南極氷床の消耗量の定量化には、氷河の氷厚分布を高精度に把握することが不可欠である。しかし、南極域における氷厚の現地観測は極域特有の気象条件等により困難である。本研究では、衛星レーザー高度計である ICESat-2/ATLAS により取得される橢円体高データを用いて、南極の中でもとくに流動速度の速い白瀬氷河を対象として氷厚推定を行った。ICESat-2/ATLAS による白瀬氷河の氷厚推定に先立ち、ICESat-2/ATLAS と REMA を比較した。その結果、両者は比較可能であることがわかった。氷厚推定においては、氷河の氷床接地面よりも下流に対して静水圧平衡を仮定する方法を採用し、1 km 四方のグリッドを設定することにより、白瀬氷河浮氷舌における氷厚分布図を作成した。その結果、2019 年～2024 年のいずれの年においても、氷河の上流から下流にかけて氷厚が減少していることがわかった。

Ice thickness Estimation of the Shirase Glacier using Satellite Altimetry ICESat-2/ATLAS Data Processing

Adrian Nakata[†], Yurina Satake[†] and Kazuki Nakamura^{††}

Accurate quantification of mass loss from the Antarctic ice sheet requires a high-precision understanding of glacier ice thickness distributions. However, in situ observations of ice thickness in Antarctica are difficult because of polar weather conditions. This study estimated ice thickness of Shirase Glacier, which is known the fastest-flowing glaciers in Antarctica, by using ellipsoidal height data acquired by the satellite laser altimeter ICESat-2/ATLAS. A comparison between ICESat-2/ATLAS and REMA was conducted prior to the ice-thickness estimation for Shirase Glacier, and the results showed that the two datasets are comparable. This study adopted an approach that assumes hydrostatic equilibrium downstream of the grounding line of the glacier and generated a 1 km grid to produce an ice-thickness distribution map for the Shirase Glacier. As a result, the estimated ice thickness of the Shirase Glacier decreased from upstream to downstream in all years from 2019 to 2024.

1. はじめに

南極氷床は地球規模の海面変動に大きな影響を与える要素であり、その消耗量を定量的に把握することは重要である。消耗量を正確に推定するためには、氷河の空間的な氷厚分布を高精度に観測することが不可欠である。しかし、南極地域における氷河の氷厚を直接観測することは、観測範囲が広大であることやブリザードのような極域特有の気象条件により容易ではない。このような背景から、極域においては人工衛星によるリモートセンシングデータを用いた観測が行われている。近年では、衛星レーザー高度計である ICESat-2/ATLAS により、南極地域において高精度かつ高密度な高度観測データが取得可能となっている。

東南極に存在する白瀬氷河は、南極氷河の中でも流動速度が速いことで知られる。近年では、白瀬氷河下へ沖合からの暖水が流入することによる底面融解が報告されており¹⁾、白瀬氷河を詳細に調査することは南極氷床の質量収支の高精度化のためにも重要である。以上から、本研究では ICESat-2/ATLAS が取得したデータを用いて、白瀬氷河における氷厚を推定すること目的とする。

2. 使用データ

2.1 ICESat-2/ATLAS

ICESat-2 は、2018 年 9 月にアメリカ航空宇宙局 (NASA) によって打ち上げられた人工衛星であり、レーザー高度計 Advanced Topographic Laser Altimeter System (ATLAS) を搭載している。本研究では、2019 年 1 月から 2024 年 12 月までに取得された ICESat-2/ATLAS データを使用した。

2.2 数値表層モデル REMA

Reference Elevation Model of Antarctica (REMA) は、商用光学衛星 WorldView シリーズが 2009 年以降に取得した画像を用いて整備された数値表層モデルである。本研究では、ICESat-2/ATLAS から推定される氷厚を評価するため、2023 年 10 月 6 日に WorldView-2 により取得された画像を用いて生成されたプロダクトを用いた。

2.3 Landsat-9/OLI-2

研究対象である白瀬氷河における解析範囲を設定するために、Landsat-9 に搭載された Operational Land Imager-2 (OLI-2) による光学画像を使用した。本研究では、2019 年から 2024 年までに取得された Landsat 衛星データのうち、各年において雲の影響が少ない画像を選定した上で使用した。

[†]日本大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Nihon University

^{††}日本大学工学部情報工学科

Department of Computer Science, College of Engineering, Nihon University

3. 解析方法

3.1 ICESat-2 標高の算出

ICESat-2/ATLAS の観測データは、WGS-84 を基準とした楕円体高 (h_s) であり、ジオイド高 (h_g) を含むため、観測大正における標高 (h) は式 (1) で算出される。

$$h = h_s - h_g \quad (1)$$

なお、本研究ではジオイド高として EGM2008 を採用した。以降、ICESat-2/ATLAS による標高 (h) を ICESat-2 標高と呼ぶ。

3.2 ICESat-2 標高の氷厚への変換

本研究では、トゥルーカラー合成した Landsat-9 画像を用いて、各年において白瀬氷河の浮氷舌と定着氷の境界を目視により判別し、解析対象範囲を定めた。解析対象範囲内の ICESat-2 標高に対して、以下に示す手順により白瀬氷河の氷厚を推定した。はじめに、既往の研究²⁾と同様に、1 年毎に ICESat-2 標高をスタッキングした上で ICESat-2 標高に対して前処理を行い、1 km 四方のグリッドを設定してラスタライズした。つぎに、1 m 以下である ICESat-2 標高を除外した。さらに、氷床接地線上の標高は 140 m 前後であることから、140 m 以上示す ICESat-2 標高は外れ値として除外した。最後に、グリッド内に ICESat-2 標高が 3 点未満である場合は当該グリッドを解析から除外した上で、グリッド毎に ICESat-2 標高の平均値を算出して標高の代表値とした。この手続きによりデータが欠損したグリッドは逆距離荷重法を用いて補間した³⁾。

以上の前処理を施した各グリッドの ICESat-2 標高に対して、以下に示す氷厚変換の手続きを適用した。本研究の解析対象は、氷床接地線より下流である浮氷舌を解析対象としており海に浮いている。このため、氷河下流に対して静水圧平衡が適用できると考えられるため、氷の密度を 900 kg m^{-3} 、海水の密度を 1030 kg m^{-3} と仮定して⁴⁾、ICESat-2 標高から氷厚 (H) へ変換するための式 (2) が得られる。

$$H = 7.92 \times h \quad (2)$$

4. 解析結果

4.1 ICESat-2 および REMA による楕円体高の比較

本研究では、氷厚推定に先立ち、ICESat-2/ATLAS により取得された楕円体高と、数値表層モデル REMA による楕円体高の比較を行った。比較には、2023 年 10 月 26 日に取得された ICESat-2/ATLAS データと、2023 年 10 月 6 日に取得された WorldView-2 画像を基に生成された REMA を用いた。また、REMA は 2 m 分解能の数値表層モデルであり、ICESat-2/ATLAS データと比較するために、本研究では REMA を Bilinear 法

により 1 km 四方のグリッドに再サンプリングを行った。

ICESat-2 と REMA の取得日には 20 日の差があるため、白瀬氷河の流動による位置ずれの影響を考慮する必要がある。そこで、既往の研究⁵⁾に基づき、白瀬氷河の流動速度を 2.48 km a^{-1} と仮定し、REMA を氷河流動方向に平行移動した上で高度比較を行った。その結果を図 1 に示す。図 1 から、ICESat-2/ATLAS を真値とする REMA の RMSE は 8.88 m であった。

さらに、白瀬氷河の浮氷舌においては多数のクレバスが存在していることから、本研究では REMA の楕円体高の高低からクレバスを目視で確認し、クレバスにおける楕円体高を解析から除外した上で、REMA と ICESat-2 を比較した。その結果を図 2 に示す。図 2 から、クレバスを除外した場合の RMSE は 5.33 m となり、除外前と比較して誤差が 3.55 m 低減した。

4.2 ICESat-2 による氷厚分布

2019 年から 2024 年における白瀬氷河の氷厚分布図を 3 に示す。図 3 から、白瀬氷河においては、上流から下流にかけて氷厚が減少する傾向が確認された。また、氷河の中央流線に沿った氷厚分布を図 4 に示す。図 4 から、2019 年から 2024 年のいずれの年においても上流から下流にかけて氷厚が減少する傾向が見られた。

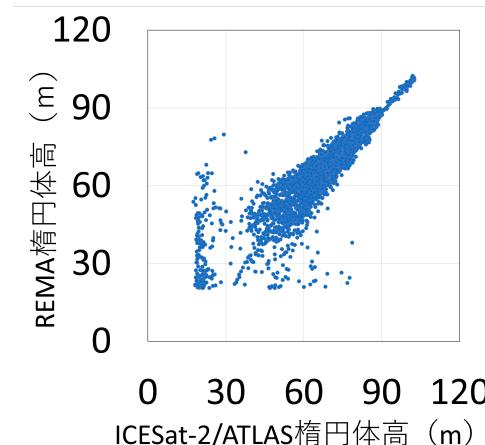


図 1 ICESat-2/ATLAS および REMA による楕円体高の関係

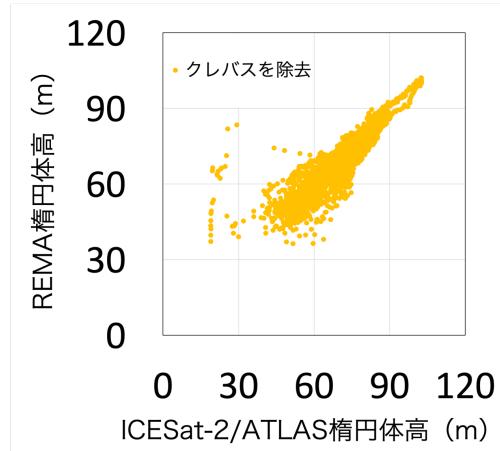


図 2 クレバス除去後の ICESat-2/ATLAS および REMA による樁円体高の関係

5. 考察

本研究では、ICESat-2/ATLAS により取得された衛星高度計データを用いて、白瀬氷河の氷厚推定を行った。氷厚推定に先立ち、REMA との樁円体高の比較を通じて、ICESat-2/ATLAS データを評価した。図 2 から、氷河の流動とクレバスを考慮した ICESat-2/ATLAS の RMSE は 5.33 m であり、ICESat-2/ATLAS と REMA は比較可能であることがわかったなお、図 1 および図 2 から、氷河の流動だけでなく、クレバスも考慮した場合の ICESat-2/ATLAS の RMSE は、氷河の流動のみを考慮した場合の RMSE と比較して 3.55 m 低減した。この結果は、白瀬氷河において衛星高度計データと DEM を比較する際には、地表形状を考慮した前処理が重要であることを示している。

図 3 および図 4 から、ICESat-2/ATLAS データに対して、グリッド化および前処理を施すことにより、白瀬氷河浮氷舌における氷厚分布を面的に把握することが可能であることがわかった。また、白瀬氷河の浮氷舌において、上流から下流にかけて氷厚が減少する傾向が確認された。これは、白瀬氷河の氷がリュツォ・ホルム湾に流れ出た後、氷が浮氷舌として湾に留まることにより、下流の氷は上流の氷と比較して海水と接触する時間が長く、底面融解が進んだ結果と考えられる。

以上のことから、ICESat-2/ATLAS データに対して適切な前処理を行うことで、白瀬氷河氷厚の空間分布を把握するための有効な手法となり得ることが示された。

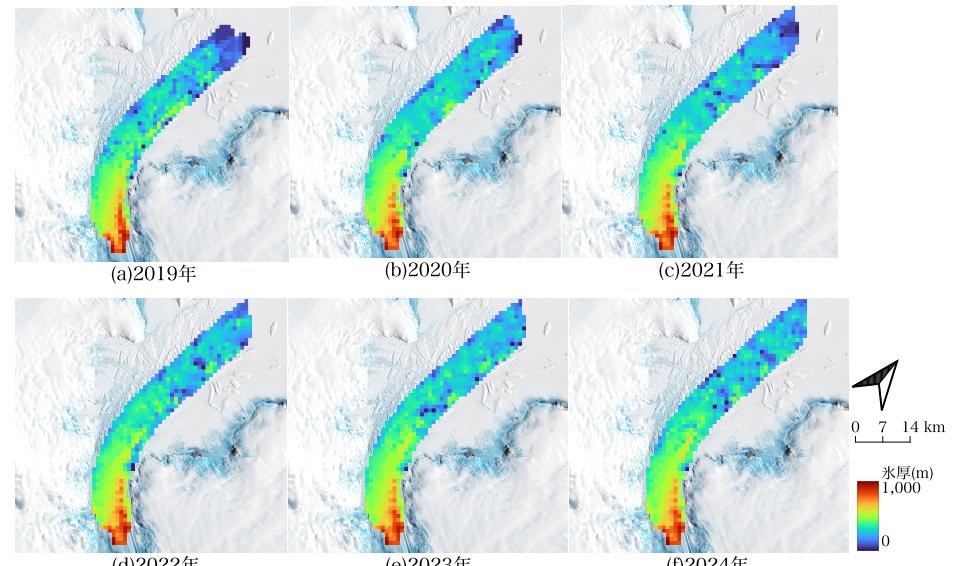


図 3 ICESat-2/ATLAS による 2019 年～2024 年における氷厚分布図（背景画像は 2023 年 10 月 28 日における Landsat-9 画像によるトゥルーカラー画像、R : Band4、G : Band3、B : Band2）

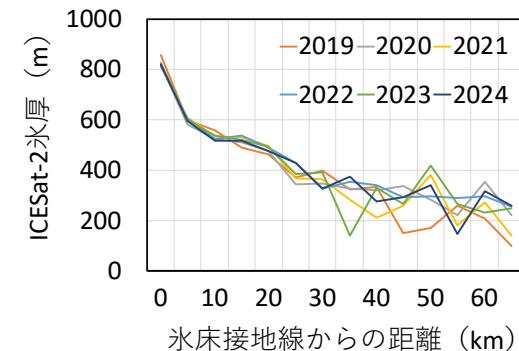


図 4 2019 年から 2024 年における中央流線に沿った白瀬氷河の氷厚分布

6. まとめ

本研究では、衛星レーザー高度計 ICESat-2/ATLAS により取得された橢円体高データを用いて、白瀬氷河を対象とした氷厚推定手法について検討した。ICESat-2/ATLAS による白瀬氷河の氷厚推定に先立ち、ICESat-2/ATLAS と REMA を比較した。その結果、両者は比較可能であることがわかった。また、2019 年～2024 年の ICESat-2/ATLAS データを用いて白瀬氷河の氷厚を推定した結果、氷河の上流から下流にかけて氷厚が減少していることがわかった。

今後は、CryoSat-2 に代表されるレーダー高度計データとの比較を行い、レーザー高度計とレーダー高度計の観測特性の違いから、白瀬氷河における積雪深の推定について検討する。

謝辞

ICESat-2/ATLAS データは、アメリカ航空宇宙局から提供を受け、CryoSat-2/SIRAL データはヨーロッパ宇宙機関より提供を受けた。

参考文献

- 1) Hirano, D., Tamura, T., et al.: Strong ice-ocean interaction beneath Shirase Glacier Tongue in East Antarctica, *Nature Communications*, 11, Article No.4221, 2020.
- 2) Y. Satake and K. Nakamura: Temporal Variations in Ice Thickness of the Shirase Glacier Derived from Cryosat-2/SIRAL Data, *Remote Sensing*, 15, 2023.
- 3) Watson, D.F. and Philip, G.M.: A refinement of inverse distance weighted interpolation. *Geoprocessing*, 2, pp. 315–327, 1985.
- 4) Y. Fuji: Aerophotographic interpretation of surface features and estimation of ice discharge at the outlet of the Shirase drainage basin, Antarctica. *Antarctic Record*, 72, pp. 1–15, 1981.
- 5) 中村和樹, 青木輝夫, 山口悟:南極・白瀬氷河の 20 年間の流動速度変動, *雪氷*, 7(1), pp. 3–15, 2017.