

氏 名 大川 翔太郎

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2657 号

学位授与の日付 2026 年 3 月 24 日

学位授与の要件 複合科学研究科 極域科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 衛星データを用いた東南極の氷河流動速度変化と質量収支  
推定の高度化に関する研究

論文審査委員 主 査 野木 義史  
極域科学コース 教授  
青山 雄一  
極域科学コース 准教授  
平野 大輔  
極域科学コース 助教  
中村 和樹  
日本大学 工学部 教授  
山之口 勤  
(一財)リモート・センシング技術センター  
研究開発部 先端技術課課長

# 博士論文の要旨

氏名：大川 翔太郎

論文題目：衛星データを用いた東南極の氷河流動速度変化と質量収支推定の高度化に関する研究

地球温暖化による海水温や気温上昇により、南極氷床の融解が今後さらに加速することが予想されている。これに伴い、氷床の質量損失が増加し、海に流出することで、全球的な海水準上昇という課題に直面している。氷床質量損失は、主に氷床・棚氷縁辺部の底面融解やカービングによって生じ、その変動は氷質量を内陸氷床から海洋へ輸送する主経路として機能する氷河の流動速度と密接に関係している。したがって、氷河の流動速度変動を正確に把握することは、氷床の質量収支を評価する上で重要である。

流動速度を推定した先行研究は複数存在するものの、多くは平均流動速度や年スケール以上の変動を対象としている。そのため、氷床接地線より下流域の氷河末端部に至る領域において、短周期の流動速度変動を含めて詳細に把握した研究は限られている。そこで本研究では、東南極で流動速度が最速の氷河である白瀬氷河を研究対象として、合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar: SAR) データを用いて流動速度変動を 2018 年 7 月から 2023 年 12 月までの 12 日間毎の流動速度を求め、季節変動および流動速度の空間分布の把握を試みた。また、本研究の解析期間中に白瀬氷河東側流線上で発生した流動速度の急激な減速について、その発生要因についても考察を行った。本研究では、氷河流動速度を算出するため、2018 年から 2023 年に取得された Sentinel-1 の SAR データに対して、氷河流動を観測するのに適したオフセットトラッキング法を適用した。オフセットトラッキング法は、氷表面のテクスチャや後方散乱強度の空間的パターンをもとに画像間の変位を検出する手法である。氷表面の融解などがあると画像間の相関が低下し、変位の推定精度に影響を及ぼす可能性があることから、本研究では最初にオフセットトラッキング法を適用した場合における流動速度の推定誤差について検証した。SAR 画像のピクセルサイズに起因する流動速度の推定誤差は 2.9 m/12-day と見積もられるが、不動点とみなされる露岩域での変位量のばらつき 0.4m/12-day はそれよりも小さいため、実効上の推定誤差としては妥当であると考えた。また、白瀬氷河上で実施した GNSS (Global Navigation Satellite System) 観測によって算出された流動速度を真値として Sentinel-1 により算出した流動速度と比較した結果、両者の差の平均は -2.33 m/12-day (算出された流動速度の 3%) と求められた。また、南極の夏季では流動速度の差が大きくなることも定性的に明らかとなり、氷表面の融解が、オフセットトラッキングの精度に影響を与えることが示唆された。

オフセットトラッキングにより算出された流動速度の時系列解析から、白瀬氷河の流動速度は氷河末端部 (カービングフロントより下流域) において、最大振幅 3.5m/12-day の顕著な季節変動を示し、上流に向かうにつれ振幅は小さくなるが、季節変動はカービングフロント周辺まで明瞭に見られた。一方、カービングフロントよりも上流側については、オフセットトラッキングの推定誤差を超える変動は見られなかった。この季節変動の

要因として、白瀬氷河前面の定着氷の年変動による堰き止め効果の寄与について AMSR2 による海氷密接度のデータを用いて調査した。流動速度の季節変動に対する定着氷の堰き止め効果を提示するには至らなかったものの、氷河末端からカービングフロント周辺で流動速度と海氷密接度の相互相関の傾向が変化するが判明した。

つぎに、オフセットトラッキングによって取得された白瀬氷河流動速度マップを作成した結果、2020年と2021年では白瀬氷河東側流線上において季節変動と異なる急激な流動速度の減速を発見した。この急激な減速の原因として、基盤地形に氷河末端部の氷山が座礁したものと考え、氷山の厚さとその周辺領域の水深を比較した。氷山の厚さは ICESat-2 の衛星レーザ高度計データから得られた表面高度から静水圧平衡を仮定して推定した。さらに、現地氷上音響観測によって取得された水深データと比較することにより、氷山の座礁可能性について検討した。その結果、2020年の減速イベントは水深の浅い海底に氷山が一時的に接地することによって発生したと考えた。その後、約半年の時間経過を経て流動速度の回復が確認された。氷山の薄化や小規模なカービングなど、他の要因が同時に影響した可能性を完全に排除することはできないものの、流動速度の回復時期が氷山の底面融解による接地解除と整合的であることから、周辺海洋の影響による氷山底面の融解が接地状態の緩和あるいは解消に主要な役割を果たした可能性が高いと考えた。一方、2021年の減速イベントは、白瀬氷河前面に存在する小島、エインストーインゲン (Einstøingen) 周辺の比較的水深が浅い領域に、氷河末端部の氷山が乗り上げる形で座礁したことで発生した可能性が高い。

氷山の座礁に伴う白瀬氷河流動の減速イベントおよび海底地形データを活用することにより、静水圧平衡の仮定に基づかない氷山の厚さ推定方法を検討した。具体的には、氷山の座礁が確認された地点での水深と ICESat-2 の表面高度データから氷厚を求め、表面高度から氷厚を求める係数を算出し、この係数を用いて氷河中央部や西側の氷山の厚さを推定した。この氷厚データに加えて、電波式底面融解計測機器 (autonomous phase-sensitive radio-echo sounder; ApRES) により推定された氷河底面融解率および SAR データから得られた白瀬氷河の流動速度を用いることで、氷河の流出フラックス推定を試みた。さらに、この流出フラックスに氷密度を適用することで氷の質量流出量を推定し、これに複数の観測・モデルに基づく表面質量収支を考慮することにより、白瀬氷河流域の質量収支を評価した。2020年の減速イベントを基に算出した氷厚と複数ソースの氷河底面融解率を使用して流出フラックスを計算した結果、質量収支は-0.4~-7.6 Gt 程度と推定され、この値は先行研究と調和的な結果となった。観測された氷山座礁現象と実測データ (海底地形・融解率・流動速度) を直接用いることにより、従来の静水圧平衡を仮定した氷厚に依存する方法ではなく、別の手法で氷河流出フラックスを計算できることを示した。

本研究の成果として、白瀬氷河における流動速度の時系列変動およびその分布特性を高精度かつ詳細に把握したことが挙げられる。とくに、季節変動に加えて一時的かつ急激な減速イベントを検出し、その原因が氷山の座礁であることを周辺海域の水深データとの比較から定量的に評価した。また、この座礁イベントを活用することで、従来の静水圧平衡仮定に基づいた氷厚推定とは異なる氷厚推定が可能となり、今後より現実的な氷床質量収支の評価に貢献しうると考える。

Results of the Doctoral Thesis Defense

## 博士論文審査結果

Name in Full

氏 名 大川 翔太郎

T i t l e

論文題目 衛星データを用いた東南極の氷河流動速度変化と質量収支推定の高度化に関する研究

地球温暖化の進行に伴う全球的な海面上昇への懸念を背景として、国際社会において南極氷床の質量変動を監視する重要性が高まっている。特に、南極横断山脈の東半球側に位置する東南極氷床は、地球上の氷の 80%以上を保有しており、その質量収支を定量的に把握することは、今後の海面上昇を予測する上で極めて重要である。氷床の質量収支推定には、主に「衛星高度計」、「衛星重力」、「涵養と消耗」の 3 つの手法が用いられているが、東南極氷床に関しては、手法間で推定結果に大きな差異が認められている。特に「涵養と消耗」手法による推定結果は、他の二手法と比較して、符号も含めて大きく異なることが指摘されている。この不一致の要因を明らかにするには、「涵養と消耗」手法において衛星観測などで直接捉えることが困難な「消耗」、すなわち南極域において支配的である棚氷や氷山として氷床から海洋に流出する氷質量の正確な評価が重要な課題である。氷流出量は、氷河・氷床の流動速度、接地線位置、および接地線上の氷厚によって定義される流出フラックスから算出される。申請者は「涵養と消耗」手法を用いた東南極氷床の質量収支推定の高度化に取り組むべく、南極域での広域かつ通年観測に有効な衛星搭載合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar: SAR) データを解析した。東南極で最大級の流動速度を有する白瀬氷河を対象に、高時間分解能流動速度マップを作成した。その解析により明らかとなった急速な減速イベントおよび流動速度の季節変化について、その要因を詳細に検討した。さらに従来の静水圧平衡仮定によらない氷山の氷厚推定方法や氷山群の底面融解率の推定法を導入し、下流域の氷山の氷厚から接地線での氷厚を復元することで、先行研究とは異なるアプローチによる流出フラックスの推定を行い、白瀬氷河の質量収支を算出した。これらの成果を 7 章からなる博士論文にまとめた。

第 1 章では、南極氷床変動と全球的な海面上昇、氷床質量収支推定、ならびに氷河・氷床流動に関する研究背景および先行研究を概観している。あわせて、本論文の対象領域である東南極白瀬氷河流域における先行研究についても整理し、本論文の目的を示している。第 2 章では、高時間分解能流動速度マップ作成に使用した SAR データとオフセットトラッキング解析方法について解説し、その推定精度の検証結果を示している。第 3 章では、回帰周期 12 日の Sentinel-1A SAR データから得られた流動速度マップに基づき、白瀬氷河における流動速度の季節変化を示している。さらに、2020 年および 2021 年に白瀬氷河東側流線の下流域で発生した急速な減速イベントの特徴を概説している。

第 4 章では、白瀬氷河の流動速度の季節変化が氷河末端域で顕著であり、上流に向かうにつれて減衰し、カービングフロント (CF) よりも上流側では不明瞭になるという空間的特徴を明らかにした。また、氷河末端から 5km 間隔での流動速度の相互相関解析から、CF が流動場の力学的境界となっていることを示した。流動速度の季節変化要因として、定着氷による力学的な堰き止め効果に着目し、衛星搭載マイクロ波放射計データから求められている海氷密接度 (Sea Ice Concentration : SIC) との比較解析を行った結果、SIC にも季節変化は認められたものの、流動速度の季節変化との正の相関

が示され、力学的な堰き止め効果が主要因である可能性は低いと結論づけている。第5章では、衛星搭載レーザ高度計データを用いて、減速イベント発生域における氷山の海面からの高さ(表面高度)を算出し、一様な氷密度と静水圧平衡を仮定して氷山の海水面下の厚さ(氷厚と表面高度の差)を推定したところ、音響測深データに基づく水深を上回ることが示され、この領域の氷山が座礁していること、ならびにこの座礁が減速イベントの原因であることを特定した。さらに、減速イベントの影響は座礁地点から上流に伝播するものの、CFよりも上流には及ばないことを明らかにした。

第6章では、質量収支推定の高度化を目指し、座礁現象を活用した新たな氷山の氷厚および底面融解率の推定方法を提案している。従来の静水圧平衡を仮定した氷厚推定では、氷山の密度構造と静水圧平衡の2つの仮定が正しいことを前提として表面高度から氷厚を推定している。一方、本論文では座礁氷山の海面下の厚さが水深と等しいと仮定し、表面高度との和を氷厚として扱い、表面高度から氷厚を算出するための関係式を構築した。この関係式は従来必要とされていた氷山の密度構造に関する仮定を不要とする点に特徴があり、非座礁氷山の氷厚推定にも適用可能である。さらに、2020年および2021年に発生した2つの座礁イベントにおける海面下の氷厚(すなわち水深)の差と、氷山の移動時間に基づいて底面融解率  $13.5 \text{ m/年}$  を導出した。白瀬氷河のCFより上流側では静水圧平衡が成立しないことを踏まえ、本手法と流動速度マップを用いて時間を遡り、下流域の氷山が接地線を通じた時点の氷厚を復元して流出フラックスを計算し、1998~2001年当時の質量収支として、 $-3.0 \pm 1.9 \text{ Gt/年}$  を推定している。座礁現象に着目し、実態に即した氷厚と流出量を評価することで、従来手法とは独立した新たな氷床質量収支推定手法を確立したことは大変重要な結果である。第7章では以上の結果を総括し、白瀬氷河の時空間的流動特性および本論文で提案した氷床質量収支推定法における誤差評価について考察するとともに、流動速度の季節変化要因のさらなる解明や質量収支推定精度の向上といった今後の展望を示している。

申請者が作成した白瀬氷河の高時間分解能流動速度マップに基づき見いだされた急速な減速イベントおよび流動速度の季節変化の特性とその要因解析は、同氷河の流動場の理解に大きく貢献する重要な知見である。また、その研究過程において、座礁現象に基づく新しい氷厚、底面融解率、ならびに流出フラックス推定手法を確立するとともに、既存の「涵養と消耗」手法による質量収支推定方法に内存する不確定性を具体的に指摘し、その改善に向けた方向性を示した点で高く評価できる。本研究は、今後、白瀬氷河の流動と海洋の相互作用の解明へと発展する可能性を有しており、固体地球・雪氷・海洋にまたがる学際的研究分野への貢献も大きい。申請者は在学中に国内学会で口頭発表1件、ポスター発表1件の学生優秀発表賞を受賞しており、2024年には第2章、第3章および第5章の内容を含む論文を、査読付き国際誌(Polar Science)に公表している。以上の理由により、審査委員会は、本論文が博士(理学)の学位の授与に値するものと認め、全員一致でこれを承認した。