

氏 名 白水 薫

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2036 号

学位授与の日付 平成 30 年9月28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 合成開口レーダーデータを用いた南極氷床における時空間
流動分布推定に関する研究

論文審査委員 主 査 准教授 土井 浩一郎
教授 本山 秀明
助教 青山 雄一
准教授 澤柿 教伸
法政大学社会学部
准教授 中村 和樹
日本大学工学部
主幹研究員 山之口 勤 リモート・センシング
技術センター

(様式3)

博士論文の要旨

氏 名 白水 薫

論文題目 合成開口レーダーデータを用いた南極氷床における時空間流動分布推定に関する研究

現在、南極氷床からの氷（水）質量の損失が全球的な海面上昇に影響を及ぼすと指摘されている。南極氷床の質量損失の原因の一つに地球温暖化による極域氷床の融解とそれに続く氷流からの流出がある。それらの流動速度は南極大陸の棚氷厚や海水の密接度など周辺環境と密接な関わりがあり、流動速度の変化は南極氷床の質量変化を左右する。このため、氷流を含む氷床全域の流動速度分布を時系列的に把握することで、周辺環境との関係を理解する上で有用な情報が得られることが予想され、加えて、より精密な氷床流出量の推定にも貢献できる。

氷流の流動速度推定に関する研究では、全天候型のセンサであり、極夜期や悪天候時にも観測可能であるという利点があることから、マイクロ波を用いた衛星観測技術である合成開口レーダー（Synthetic Aperture Radar ; SAR）が数多く使われてきた。

本研究では、東南極・宗谷海岸南部の氷床・氷流地域を研究対象地域として、SARデータを用いて低速域から高速域までの流動速度を時系列かつ広域にマッピングし、面的な流動分布特性の把握を目的に流動速度変動の検出を試みた。

氷床から氷流域の幅広い流動速度をカバーするために、本研究では日本の人工衛星ALOS（回帰周期46日）のSARセンサPALSARが2007～2011年に取得したSARデータに対して、Interferometric SAR（InSAR）手法およびoffset tracking手法という2つの手法を適用し、氷床の流動を求めた。InSAR手法は、氷床のような流動速度の緩やかな地域の流動を観測するのに適した手法である。一方、offset tracking手法は、InSAR手法では検出の難しい高速の流動を検出できる手法である。したがって、本研究では氷床上の緩やかな動きをInSAR手法、氷流上の速やかな動きをoffset tracking手法で検出することで、これまでの流動速度マップに比べ幅広い速度範囲の流動を高分解能に推定した。

InSAR手法では位相差に含まれる地形に起因する位相（地形縞）をDigital Elevation Model（DEM）を使用して除去するが、地形縞除去の精度はDEMの精度に依存する。しかしながら、南極域でInSAR手法に適用可能な高精度な既存のDEMはあまりないため、本研究では、ALOSに搭載された光学センサPRISMの取得した2枚の光学画像（直下視と後方視）をステレオ視することで新たなDEM（PRISM-DEM）を作成し、InSAR手法に適用した。PRISM-DEMの精度は、レーザー高度計ICESat/GLASのデータおよび研究対象地域の露岩域および氷流・氷床上で実施したGNSS観測データと比較することで評価した。PRISM-DEMは氷床上で2.80 m、氷流上で4.86 m、露岩上で6.63 mの精度を有し、既存のDEMに比べ高精度であることが示された。作成したPRISM-DEMの精度がInSAR解析での変位量推定に与える影響量はALOS/PALSARの1回帰周期（46日間）あたり氷床域で2.7 mm、氷流域で4.6 mm、露岩域で6.3 mmと非常に微小であると算出さ

れ、本研究の流動速度マップ作成に適用可能な DEM であると結論付けた。

InSAR 解析および offset tracking 解析を行った結果、氷床域については InSAR 手法で、氷流上では offset tracking 解析で流動を検出できた。通常変動しない露岩域において観測された変位量から offset tracking 手法に含まれるエラー推定は衛星の視線方向 (Range 方向) で最大 3.36 m/46days、衛星の進行方向 (Azimuth 方向) で最大 2.64 m/46days と見積もられ、一方、InSAR 手法に含まれるエラー推定では ~ 0.036 m/46days と高い精度を有することが分かった。併せて、GNSS 観測値との比較を行うことで精度検証を行ったが、offset tracking 手法の場合には流動速度 0.19m/day、流動方向 4.1°、InSAR 手法の場合には流動速度 0.008m/day、流動方向 11.7° と見積もられた。

InSAR 手法および offset tracking 手法で得られる変位量の検出限界を求めるために、任意の変位量を設定し検証した結果、ALOS/PALSAR の場合 InSAR 手法では約 2.5 m/46days 程度で検出限界を生じ、offset tracking 手法では Azimuth 方向 320m/46days、Range 方向 378 m/46days 程度と見積もられた。実際に、当該地域での InSAR 解析では 2.5 m 程度を境に流動速度の速い地域で流動速度を正しく推定することが出来ず、今回得られた InSAR 解析における検出限界と一致する。これらの検出限界の検証結果より、約 2.5 m/46days よりも変位の小さい地域では InSAR 手法によって推定した結果、それよりも変位の大きい地域では offset tracking 手法により推定した結果を採用し、流動速度マップを作成した。2007~2011 年にかけての 9 ペアのデータを用いて氷床から氷流にかけての幅広い速度域で高い分解能を持つ流動速度マップを作成した。

この流動速度マップを基に対象地域に含まれる Skallen 氷河および Telen 氷河上で流動速度を測定した結果、上流部から下流部にかけてのほぼ全域で流動速度を推定することが出来た。また、上流から Grounding line (GL) 周辺までの地域で流動速度が加速し、それよりも海側では流動速度がほぼ一定であった。GL よりも海側の浮氷舌域で流動速度が一定であることについては、Skallen 氷河および Telen 氷河の GL 付近ではボトルネック状の地形の効果が流動に影響を与えていると推測した。

また、Telen 氷河の氷流末端部分では流動速度の経年的な加速傾向が見られた。Skallen 氷河と Telen 氷河は末端部分が交差し、Telen 氷河は Skallen 氷河の末端部のカービングした氷山に流出を堰き止められる位置関係にある。Telen 氷河氷舌末端部では流動方向が北西方向から北北西方向へ変化しており、Skallen 氷河の氷山の堰き止めを避ける向きに流動方向が変化している結果が得られた。これによって Telen 氷河は末端部の堰き止めから解放されることで流動速度が加速したと考えられる。

先行研究では海氷や氷山が氷舌の流出を堰き止めることに起因して、氷流の氷舌末端部で冬期の方が夏期よりも流動速度は減速することが報告されている。今回の対象地域の氷流では 2007~2011 年にかけて周辺の氷山や海氷に大きな大規模な変化が観測されず、当該地域では流動速度に目立った変化は見られなかった。

(備考)

- 1 用紙の大きさは、日本工業規格 (JIS) A4 縦型とする。
- 2 和文で作成する場合は 2,000 字~3,000 字、英文で作成する場合は 700 語~2,000 語程度とする。

ただし、生命科学研究科に出願（申請）する場合は、英文 700 語程度で作成すること。

- 3 1行あたり 40 文字（英文の場合は 80 文字）、1 ページあたり 40 行で作成する。
- 4 上マージン、下マージン、右マージンは 2 cm、左マージンは 2.5 cm とする。
- 5 タイトルと本文の間は、1 行空ける。
- 6 片面印刷とし、ホチキス止めをしないこと。
- 7 別紙の添付は不可。
- 8 ページ番号は入れないこと、また改行を行わないこと。
- 9 図表を挿入する際は、白黒印刷でも判別できるように配慮すること。
- 10 論文審査に合格し、博士号が授与された場合は、本要旨を総合研究大学院大学リポ
ジトリにおいて、インターネット公開する。

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 白水 薫

Title
論文題目 合成開口レーダーデータを用いた南極氷床における時空間流動分布推定に関する研究

本博士論文では、南極氷床を観測した合成開口レーダー (SAR) データに対し、差分干渉 SAR(DInSAR)手法とオフセット・トラッキング (OT) 手法を適用することにより、氷流を含む氷床域の流動速度の時空間分布(時系列マップ)を作成する方法を開発するとともに、研究対象地域として選んだ東南極・宗谷海岸南部にそれら方法を適用して、表面流動速度の時系列マップを作成し、流動速度の時間変化の有無について調べたものである。

本論文は 6 章から構成され、第 1 章では背景および研究の目的について述べている。氷床の流動速度の変化は南極氷床の質量収支を左右する要因の一つであるが、どのようなメカニズムで流動速度の変化が起こるのかという疑問が研究動機となり、氷床の流動速度マップを作成し、その時間的かつ空間的变化を可視化することで、メカニズム解明に向けた端緒を捉えることを目的とした。

第 2 章では SAR データを用いた氷流・氷床流動速度の推定方法として、動きの遅い氷床の流動の測定に適した DInSAR 手法と氷流などの比較的速い流動の測定に適した OT 手法についてまとめ、各手法による測定精度の検証結果を示した。

第 3 章では、DInSAR 手法を用いて流動を測定するために不可欠な高精度な Digital Elevation Model (DEM)の作成についてまとめるとともに、ALOS/PRISM の光学画像を用いて宗谷海岸南部の沿岸から氷床域にかけて地域をカバーする従来の DEM よりも高精度な DEM (PRISM-DEM) を作成した結果を示した。さらに、氷床や氷流、露岩域において GNSS 観測により得られた地上検証データを用いて、作成した PRISM-DEM の精度検証を行った。

第 4 章では、2007 年から 2011 年にかけて宗谷海岸南部を観測した ALOS/PALSAR による 10 時期 SAR データを使い、DInSAR 手法と OT 手法を適用して作成した氷床域の流動速度マップを示した。流動速度マップの作成に際し、数値実験等の結果から、2.5 m/46 日よりも遅い流動に対しては DInSAR 手法を適用し、それよりも速い流動については OT 手法を適用した。なお、DInSAR 手法ではレーダーの照射方向(レンジ方向)の変位しか観測できないため、求めたレンジ方向の変位を PRISM-DEM により地形の最大傾斜方向に射影し、各画素での流動速度とした。

第 5 章では、結果の得られた 9 時期の流動速度マップから、氷流の下流域 2 か所と氷床域 1 か所の 3 測線に沿った 10~30 km の範囲の流動速度を抽出し、流動特性と流動の時間変化を調べた。その結果、空間的な流動速度分布としては、氷流上流から接地線にかけて加速し、接地線付近から下流はほぼ一定となるなど、地形との関係性が示された。また、時間的な変化としては、スカーレン氷河とテーレン氷河の末端域で、それぞれ速度の減速

と加速が見られた。スカーレン氷河とテーレン氷河は末端部で交差しており、速度の変化と同期して、互いに反発し合う方向に流動方向の変化が見られた。氷床域の測線については、分水嶺位置に大きな時間的变化が見られたが、本論文においてはデータの処理過程により生じた誤差か、実際に起きた変化かを断定することができなかった。

第6章では、結果や考察をまとめ、その結果判明した課題を踏まえた手法の改善提案や多くの地域への本手法の適用により、広汎な地域での時間的・空間的な流動特性の把握を進めることができるといった今後の研究展望を示した。

本論文では、SAR データから DInSAR 手法と OT 手法を組み合わせることで流動速度を求め、流動速度の遅い氷床域から速い氷流域まで氷床域全体を面的かつ時系列で可視化に成功した点が評価できる。また、氷床上や露岩上で GNSS 観測を自ら実施し、氷床の流動速度の推定精度や作成した PRISM-DEM の精度を検証したことも評価できる。今後、マップ作成手法や誤差推定を含めた仕様を標準化することで、ここで用いた手法を様々な場所に応用でき、氷床流動研究に大きく貢献することが期待できる。なお、本論文の第3章は査読付き国際誌に掲載されている。以上より、審査委員会では、本論文が博士学位論文として十分な水準にあることが、審査員全員一致で認められた。

(備考)

1. 用紙の大きさは、日本工業規格 (JIS) A 4 縦型とする。
2. 1 行あたり 40 文字 (英文の場合は 80 文字), 1 ページ当たり 40 行で作成する。
3. 上マージン, 下マージン, 右マージンは 2 cm, 左マージンは 2.5 cm とする。
4. タイトルと本文の間は, 1 行空ける。
5. ページ番号は入れない。
6. 出願者 (申請者) が論文審査に合格し, 博士号が授与された場合は, 本紙を総合研究大学院大学リポジトリにおいて, インターネット公開する。

Note:

1. The sheets must be Japanese Industrial Standard (JIS) A4 vertical.
2. Each line shall have approximately 40 characters in Japanese or 80 characters in English, and each page shall have 40 lines.
3. The top, bottom, and right margins must be 2 cm and the left one must be 2.5 cm.
4. Single spacing is required between the title and the text.
5. There must be no page numbers.
6. If the applicant is conferred a doctoral degree, this paper will be published on the SOKENDAI Repository.