

氏 名 施 天焰

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2411 号

学位授与の日付 2023 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 Exploring spatial and temporal characteristics of current
Antarctic mass change -Independent Component Analysis
based on satellite geodetic data and numerical models-

論文審査委員 主 査 土井 浩一郎
極域科学専攻 准教授
野木 義史
極域科学専攻 教授
奥野 淳一
極域科学専攻 助教
福田 洋一
京都大学 名誉教授
松本 晃治
物理科学研究科 天文科学専攻 准教授

(様式3)

博士論文の要旨

氏 名 施 天 焰

論文題目

Exploring spatial and temporal characteristics of current Antarctic mass change - Independent Component Analysis based on satellite geodetic data and numerical models -

The Antarctic ice sheet (AIS) is the largest water and thermal energy storage of the Earth. AIS is keeping losing mass over the last few decades and has the potential for accelerating melting, but its spatial and temporal change patterns are very complex that have not been well understood. Mass change in AIS results from multiple physical processes like surface mass balance, ice dynamics, and the respond of solid Earth. Therefore, a statistical-based method named independent component analysis (ICA) is applied as an analytical framework in this work, to provide a new perspective for understanding the changing Antarctica.

This work qualitatively analyzes the spatial and temporal characteristics across Antarctica over the past two decades via the ICA method which can extract independent components from complex datasets, in an attempt to separate signals from different physical sources and improve understanding of AIS mass balance. This study is mainly based on satellite gravimetric observations from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) and GRACE Follow-On (GRACE-FO) missions, supplemented by satellite altimetry data from multiple missions. And combined with the numerical models including Glacial Isostatic Adjustment (GIA) and Surface Mass Balance (SMB) for examination.

Firstly, the six leading independent components from gravimetric data acquired during the GRACE and GRACE-FO are extracted. The results reveal that the observed continental-scale mass changes can be effectively separated into several spatial patterns that may be dominated by different physical processes. Results suggest that the overall mass changes in AIS are mainly the combination of long-term mass decrease such as Amundsen Sea Sector and Wilkes Land in Western Antarctica, mass increase of Dronning Maud Land and Marie Byrd Land in Eastern Antarctica, and other periodic components. Although the hidden independent physical processes cannot be completely isolated, some significant signals, such as glacier melt, snow accumulation, periodic climatic signals, and GIA effects, can be determined without introducing any external information. GIA models are introduced to examine the separation results of GRACE/GRACE-FO, and a very high spatial correlation was obtained by comparing the spatial distribution between models.

The results above are further corroborated by altimetry data. The same analysis of ICA is applied to resolution-reduced altimetry data for direct comparison with GRACE/GRACE-FO results. The remarkable influence of glaciers and snow accumulation could be determined by altimeter results as well, though altimeter results exhibit more complexity in high-frequency and periodic components. Comparable ICA results from two different datasets demonstrated that ICA components are physically meaningful.

The mass change from GRACE/GRACE-FO observations, surface mass change derived from the SMB model, and elevation changes from altimetry are compared for each AIS drainage basin. Based on the differences between the three kinds of time series, all basins can be divided into three groups that could be dominated by different physical processes. Periodic components suggested by ICA results are also interpreted by the regional comparisons, being linked with especially interannual climate signals.

Finally, some factors that influence ICA results are summarized for applying ICA in an appropriate way. The information contained in the input data is found to have a significant impact on results, while the form in which data is organized has barely any impact. This is highly relevant when using datasets with different spatial resolutions. Operations like filtering, resampling, and masking will be propagated to the results, thus some pre-processing can be used to better separate the object of interest. And the time period also has a direct impact on the ICA results, involving extreme events like anomalously large snowfall events in the late 2000s, which may cause dramatic spatial and temporal changes in the ICA results.

In addition, different ICA algorithms may be suitable for different data types. sICA is suggested as the preferred option for geophysical data, where the number of spatial samples is much larger than the number of temporal samples.

ICA provides a unique and informative approach to obtain a better understanding of both AIS-scale mass changes and specific regional-scale spatiotemporal signal variations.

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 施 天焰

Title
論文題目 Exploring spatial and temporal characteristics of current Antarctic mass change -Independent Component Analysis based on satellite geodetic data and numerical models-

申請者は博士論文において、南極全域をカバーする衛星重力および衛星高度計観測データに対し統計分析手法のひとつである独立成分分析（ICA）を適用し、南極大陸における複数の質量変動シグナルを統計的に独立なモードとして分離することに成功した。分離されたモードのうち、3つのモードの空間分布や時系列変化が、先行研究や数値モデルで判明している西南極やトッテン氷河などでの質量減少（氷床ダイナミクス）やマリーバードランドにおける氷河性地殻均衡（GIA）による質量増加、東南極の大量降雪イベントによる質量増加と明確な対応関係があることを見出した。これは南極域における衛星リモートセンシングデータに ICA を適用することで、様々な現象が混在する形で観測される変動が、個別の地球物理現象として分離検出できる可能性を示した。

博士論文では、第 1 章において衛星重力観測で明らかになった南極域の質量変動と研究目的について紹介し、第 2 章では南極域で質量変動を引き起こす物理現象と研究に使用した観測データについて紹介した。第 3 章では解析に用いた ICA について概観し、第 4 章では衛星重力および衛星高度計データに ICA を適用して得られた結果を示した。特筆すべき研究成果としては、衛星重力観測の解析から、西南極やトッテン氷河流域での急激な氷床質量減少を示すと思われるモード、GIA に伴うと考えられる質量増加を示すモード、および 2009 年と 2011 年に生じた大量降雪イベントと関連すると思われるモードを分離することに成功したことである。衛星高度計データの解析では、氷床質量減少や大量降雪イベントに伴う高度変化を示すモードは得られたものの、GIA に伴うと考えられる高度変化を明確に示すモードは得られなかった。これは GIA に伴う高度上昇率が小さいため、現状ではそれを捉えることのできない衛星高度計の限界を示したと理解できる。第 5 章では、衛星重力観測から得られた GIA に伴うシグナルと既存の GIA モデルとの空間相関やシグナルの大きさの比較を行い、その信頼性を確認した。また、氷河流域ごとに衛星重力データ、衛星高度計データ、および表面質量収支モデルに ICA を適用し、得られた 3 つの ICA 時系列を比較することにより、幾つかの流域における典型的な質量変動のメカニズムについて議論を試みた。第 6 章では、ICA に使用するデータ期間や分離するモードの数を変化させた解析結果の比較、データの空間分布と時間変化の何れの統計的独立性を仮定するかによって異なる複数の ICA のアルゴリズムを使って得られた結果の比較などの検討を行い、ICA 解析の前提条件や解析方法の違いが独立したモードの抽出に及ぼす影響について議論した。最後の第 7 章では、研究のまとめと今後の展望を示した。

本論文は一部定性的ではあるものの、南極氷床の質量変化を生じさせる現象の解明に大

きく寄与するものであり、博士学位論文として十分な内容を備えていると評価された。また、申請者の提示した手法は、従来の地質学的手法や現地測地観測に加えて、宇宙測地観測から GIA に伴う固体地球の変動を検出する有望な手法を新たに提示した点についても評価された。以上により、審査委員会としては博士（理学）の学位にふさわしいと全員一致で承認した。なお、第 4 章と第 5 章の衛星重力データへの ICA の適用と GIA モデルとの比較に関連する部分はすでに査読付き国際誌（Geophysical Journal International）に掲載済みである。