

氏 名 服部 晃久

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2357 号

学位授与の日付 2022 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 地上測地観測およびリモートセンシング観測を用いた南極氷
床質量変動と GIA 変動の研究

論文審査委員 主 査 土井 浩一郎
極域科学専攻 准教授
青山 雄一
極域科学専攻 准教授
奥野 淳一
極域科学専攻 助教
三浦 哲
東北大学 大学院理学研究科 教授
大坪 俊通
一橋大学 大学院社会学研究科 教授

(様式3)

博士論文の要旨

氏 名 服部 晃久

論文題目 地上測地観測およびリモートセンシング観測を用いた南極氷床質量変動と GIA 変動の研究

南極氷床は現存する最大の大陸氷床であり、全球の海水準を 60 m 上昇させるほどの大量の淡水を保持している。近年、観測技術の発達により人工衛星による観測から、南極氷床がその質量を減少しつつあることが明らかにされてきた。南極氷床の融解は、全球的な海面の上昇につながるため、地球科学的な見地のみならず、社会的見地からも重要視されている問題である。そのため、南極氷床の変動をより正確に捉えることが求められている。

GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) は 2002 年に打ち上げられ 2017 年にミッションが終了されるまでの間、地球重力場の時間変動を推定することで、それまで調べるのが難しかった南極氷床の変動の空間分布、時間変化を観測することに成功した。これは地球重力場の変動から、その重力変化を引き起こす表面質量の増減が推定されたことを意味する。しかしながら、観測される重力変動には、南極氷床の増減だけでなく固体地球の変形によって生じる重力変動も含まれるため、GRACE による衛星重力観測だけではこれらの要因を分離できない。現在の南極氷床変動を正確に捉える上で、南極における固体地球の変形、特に約 2 万年前の最終氷期最盛期 (Last Glacial Maximum: LGM) 以降の南極氷床変動による固体地球の粘弾性応答である GIA (Glacial Isostatic Adjustment) 変動を、適切なモデル化によって観測値を補正することが求められている。

本研究では、日本の南極地域観測隊が Lützow-Holm 湾周辺で実施してきた測地観測データの解析を通じて、GIA による地殻・重力変動の検出と、既存の GIA モデルとの比較を通じて、当地域の GIA の特徴を明らかにすることを試みた。

まず、昭和基地および Lützow-Holm 湾沿岸に位置する露岩観測点 (Langhovde, Skarvsnes, Padda, Rundvågshetta) で実施された GNSS 観測から、2010 年以降の当地域における地殻変動を求めた。本研究が対象とする GNSS 観測データは、精密単独測位 (Precise Point Positioning) 手法を適用して測位を行うことで、各 GNSS 観測点において少なくとも数 cm 程度の精度で地球上での位置を決定することができる。連続的に取得されたこの GNSS 観測データを適切に処理することで、観測点の変位速度を推定することが可能である。本研究では、南極における GNSS 観測から推定される鉛直方向の変位速度を、GIA による地殻変動と、現在の南極氷床変動による弾性変形の合算であると考え、各観測点における鉛直方向の変位速度を用いて GIA の議論を行った。

近年の質量変動に対する弾性変形を議論するために、GRACE による衛星重力観測、および複数の人工衛星で実施されてきた衛星高度計観測データを用いた。これらのデータは、現在の南極氷床において、西南極側での急激な融解と東南極の Dronning Maud Land における降雪増加による表面質量の増加を示す。本研究では、これら衛星観測から明らかにされた現在の南極氷床変動と、標準的な地球の弾性構造を仮定した弾性応答を比較した。

その結果、Lützow-Holm 湾では 2010 年から 2017 年の間におおよそ 1 mm/year の速度で沈降する向きの弾性変形が生じていることが明らかになった。

さらにこの弾性変形の結果に基づくと、いずれの GNSS 観測点においても、微小ながら隆起の傾向が検出され、当地域における GIA が、弾性変形による沈降を打ち消すほど大きい隆起を生じさせていることを明らかにした。つまり、昭和基地内の International GNSS Service (IGS) 観測網の一点である IGS 点 SYOG では GNSS 観測から 0.85 ± 0.75 mm/year の隆起傾向が検出されているが、これに現在の弾性変形による影響を補正した結果、昭和基地における GIA に伴う地殻変動は約 2 mm/year ほどの隆起となり、現在にいたるまで地殻の隆起が継続していることを示唆している。これは現在一般的に用いられている GIA モデルより求められた予測値よりも大きな値であり、現在提唱されている LGM 以降の氷床融解史に疑問を投げかける結果である。また、露岩観測点での結果ではどの観測点においても約 1~4 mm/year の GIA による隆起傾向が検出された。特に、より南側の観測点である Rundvågshetta では SYOG よりも大幅に速い 2.31 ± 0.45 mm/year の隆起が推定された。このような地域性は過去の氷床分布を反映しているものと考えられ、Lützow-Holm 湾沿岸での南北方向に見られた地殻変動の特徴は、GIA モデルからも十分予測されるものであった。

本研究では GNSS 観測での結果と同様に、昭和基地で実施された重力観測の結果に基づいて、昭和基地の地表面での重力変動から、GIA による重力変動の検出と GIA にモデルとの比較による議論を試みた。

昭和基地では絶対重力計 FG5 による絶対重力測定が過去複数回実施されている。2018 年までに行われた FG5 による重力測定の結果から、当地域における地表面での重力変動が -0.22μ Gal/year (重力の増加する方向を正の方向)と推定され、GNSS 観測の結果が隆起傾向にあることと整合的な結果が得られた。重力観測における現在の南極氷床変動による重力擾乱の影響は、荷重による弾性変形と変形に伴うポテンシャルの変化だけと考えた場合には、その影響は $0.1 - 0.3 \mu$ Gal/year の重力増加の影響となる。しかし、質量の存在自体による引力効果を含めると、観測点近傍の質量分布変化に大きな影響を受けるため正確な補正が難しい。そこで本研究では、昭和基地内で連続観測が実施されている超伝導重力計による重力観測と、無人航空機を用いた空撮調査を行うことで、昭和基地内の積雪分布変化によって超伝導重力計で観測された重力変化の一部を説明できることを明らかにした。これは、昭和基地で実施される重力測定には、 3μ Gal 程度が近傍の積雪の増減に伴う引力効果として含まれている可能性を指摘するものである。

本研究によって、測地観測データから推定された GIA を要因とすると考えられる地殻・重力変動は、観測推定誤差、また積雪分布の時間変化による影響を考慮しても、既存の GIA モデルよりも絶対値として大きい変動であることが明らかになった。これは、現在提唱されている Lützow-Holm 湾の氷床融解史では十分に再現できていない、過去の氷床融解過程が存在する可能性を示唆する。本研究で得られた結果を踏まえて過去の氷床融解史モデルを再構築することで、より詳細な LGM 以降の南極氷床融解過程が明らかになることが期待される。また、より正確な GIA による重力変動が明らかにされることで、GIA のモデルエラーが軽減されることが見込まれ、現在の南極氷床変動の理解が進むことが期待される。

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 服部 晃久

Title
論文題目 地上測地観測およびリモートセンシング観測を用いた南極氷床質量変動と
GIA 変動の研究

近年の衛星重力ミッション GRACE などによる観測から南極氷床の質量減少が明らかになってきており、グローバルな海面上昇への懸念から南極氷床の質量変動の監視は社会的に重要なミッションとなってきている。しかし、GRACE によって観測される質量変動には地球表面の質量変動だけでなく、地球内部の質量変動も含まれており、南極域では氷床の質量変動とともに、地殻変動に伴う質量変動も同時に観測される。南極域での質量変動に伴う主要な地殻変動は Glacial Isostatic Adjustment (GIA:氷河性地殻均衡)であるが、それを近似する適当な GIA モデルが南極域ではまだ確立されていないのが現状であり、そのため推定される氷床質量変動にもかなりの誤差が含まれている。このため、より正確な南極氷床質量の変動推定には GIA モデルの確立が重要な課題となっている。

申請者は南極・昭和基地及びリュツォ・ホルム湾沿岸の露岩域で実施された GNSS 観測や絶対重力測定で得られた変動に対し、GRACE や衛星高度計などのリモートセンシングデータを利用して現在の雪氷変動に起因する地殻変動を補正し、GIA に伴う地殻変動を取り出した。これを既存の GIA モデルから予測される変動と比較したところ、空間的な変動傾向は類似しているものの変動量は観測値のほうがかなり大きいという結果となった。GIA モデル計算では、現実的な範囲内で地球内部構造に関するパラメータを変化させたものの、いずれも観測結果を説明できないことから、Kawamata et al. (2020, Quaternary Science Reviews)で報告された新たな氷床融解過程を既存の氷床融解史に組み込み、再度計算を行ったところ、観測結果とよく整合する結果が得られた。氷床が現在も存在している南極域でこのような成果が得られたことは世界的に見ても例がなく、地殻変動観測が氷床融解史の拘束に寄与できるだけでなく、地殻変動観測から未知の氷床融解過程を発見する可能性も示唆しており、当該分野でのインパクトが大きく、高く評価できる。

申請者は上記の内容を中心として、以下に示す 5 章からなる論文にまとめた。第 1 章では、研究背景となる南極氷床の変動について紹介し、研究対象となる GIA の説明、最近の観測的 GIA 研究の紹介、南極域で実施されている測地観測の紹介を行った後、本論文の目的について述べている。第 2 章では、表面荷重に対する固体地球の弾性変形、粘弾性変形の理論的背景について説明している。第 3 章では、自身も携わった南極域での測地観測や解析に使用した衛星リモートセンシング観測、ドローン空撮も含めて、本論文に関連した観測について概説している。第 4 章では、昭和基地とリュツォ・ホルム湾で実施された GNSS 観測と絶対重力測定から得られた地殻変動や重力変化について述べるとともに、衛星リモートセンシングデータから推定される現在の氷床変動により生じる弾性変形を補正し、GIA に伴う変動を求めた。これらを既存の GIA モデルから予測される変動と比較し、

空間的な変動傾向は整合的であるものの、予測される変動よりも観測された変動のほうが大きいという結果が得られた。特に、重力変化は GIA モデルとの乖離がより大きくなっており、その要因の一つとして近傍の積雪変化に伴う引力変化の影響が考えられる。このためドローン空撮から表面地形モデル (DSM) を作成し、約 1 年間の DSM の変化から昭和基地内の積雪分布の時間変化を求め、重力測定に及ぼされる引力変化の推定を試みた。それを絶対重力測定の行われる部屋に設置されている超伝導重力計のデータから地球潮汐などの周期変化成分を除いて得られる重力残差と比較したところ、両者はよく整合していた。このため、近傍の積雪変化の重力変化への寄与は $\pm 1 \mu \text{Gal}$ 程度であると結論づけ、絶対重力測定から求めた重力変化にも同程度の影響を与えると示唆した。そして、本章の最後に、既存の GIA モデルと観測結果の乖離について議論を行った。既存の GIA モデルを使った変動量の予測では地球内部構造パラメーターを現実的な範囲内で変化させるなど試行錯誤したものの、観測値と整合させることができなかった。このため、予測値を左右するもう一つの要因である氷床融解史について検討した。Kawamata et al. (2020) では、岩石の表面露出年代測定などから 9000 年前から 6000 年前にかけての約 3000 年間に宗谷海岸南部で 400m 以上の急激な氷床融解が生じていたことを明らかにした。その結果を氷床融解史に組み込んで GIA に伴う変動を計算することで、観測値とよく一致する結果が得られることを示した。第 5 章では、まとめとして、本論文で得られた成果を総括するとともに、GIA 研究を進める上での必要とされるデータやモデルの進展など今後の展望を述べている。

8 月 5 日に開催された公開発表会及び審査委員会では、1 時間弱の発表および 40 分余りの質疑応答を行った。質疑応答では、GNSS 観測や処理解析方法、ラングホブデの観測結果の取り扱い、先行研究との座標系の違いによる影響、GIA モデルで使用した粘性構造の影響などについて質問があり、申請者は的確に答えた。

申請者を退出させた後の審査員のみでの審査では、本論文は南極域の測地学、特に GIA に伴う地殻変動の解明に大きく寄与しており、博士学位論文の内容として十分であると評価された。また、自身で現地の観測データを取得しただけでなく、データの処理解析やモデル計算に至るまでできることはすべて行っており、研究者として十分な力量を示している、との評価があった。発表に関しても、論理的な内容になっており、とてもわかりやすいと評価された。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 章の GNSS 観測に関連する部分はすでに査読付き国際誌 (Geophysical Research Letters) に掲載済みである。