

学位論文題名

Large scale mass transportations on the Earth from satellite gravimetry: Climate changes and earthquakes

(衛星重力観測でみる質量の大規模な移動: 気候変動と地震)

学位論文内容の要旨

地球型惑星では大規模な物質循環システムが形成され、様々な自然現象が起きている。地球惑星内部で起こるマントル物質の湧昇は、表層に薄く硬いプレートを生成し、やがてプレート同士を移動・衝突させ、造山運動や地震/火山活動を引き起こす。太陽熱が駆動する大気の対流は、大陸に降雨/降雪をもたらし、表層で大規模な水の循環システムを構築させる。また、数万年もしくは数十年スケールで繰り返される気候変動は、氷床・氷河を消失/形成させ、さらには海水準面を上昇/下降させる。こうした一連の現象は、地殻/マントル、水/氷といった質量を持つ物質の移動によるものであり、そこには必ず重力場の変化が伴う。すなわち、重力場時間変化の観測はこれらのダイナミクスを解明する鍵なのである。近年目覚ましい進歩を遂げた宇宙測地技術は、地球上で起こるわずかな重力変化を高い精度と詳細な時空間分解能で計測することを可能とした。中でも、2002年にNASA/DLRが打ち上げた重力観測衛星GRACEは、その高い精度と応用性の広さから、地球惑星ダイナミクス研究に革命をもたらしつつある。GRACEは2つの衛星からなる双子型の人工衛星で、双子衛星間の距離を精密に測ることによって、地球表層や内部で起こる質量移動に起因した数 μ Gal(地球の標準重力の数億分の1)にも満たないわずかな重力時間変化を全球にわたって観測する(Adam, *Nature*, 2002)。

本研究では、GRACEを始めとする重力観測衛星を用いて、様々な地球物理現象によって生じる地球上の大規模質量変動について研究を行った。本論文は、以下の4つの話題について記述する。(1) GRACEによる北極振動がもたらす半球規模の降水(降雪)量異常の検出 (2) GRACEが捉える北極圏の小氷河帯(Iceland, Svalbard, Russian High Arctic)の氷消失 (3) SLR(Satellite Laser Ranging)衛星による低次重力場観測から推定される1991-2011年のグリーンランド氷床の質量収支 (4) GRACEが捉える2011年東北沖地震に伴う地震時重力変化

(1) GRACEによる北極振動がもたらす半球規模の降水(降雪)量異常の検出

北極振動(AO: Arctic Oscillation)とは、北極域と中緯度域間で起こる大気圧のシーソー現象であり、北半球における主要な大気変動パターンの一つである。北極振動はとりわけ、北半球の冬季の気候に大きな影響を及ぼす。正の北極振動は高緯度地域に高い降水量と低い気温を、中緯度地域に低い降水量と高い気温をもたらす。一方、負の北極振動はこれらの状況を反転させる。本研究は、この北極振動がもたらす半球規模の降水量異常のシグナルを重力衛星GRACEから検出した。GRACEから推定されるユーラシア大陸における冬季の表層質量(土壌水分量・積雪量)偏差は、高緯度地域(北緯55度以北)で北極振動指数と高い正の相関、中緯度地域(北緯20度から55度)で高い負の相関を示した。すなわち、正の北極振動が発生した冬は高緯度地域で降水量異常が、負の北極振動が発生した冬は中緯度地域で降水量異常が生じていることを示唆する。グリーンランドでは北緯75度を境界として、北部で正の相関、南部で負の相関が見られた。北極振動はその位相に応じて、北半球の高緯度・中緯度地域間で約1000Gtにも及ぶ質量をシーソー的に移動させていることが空間的に明らかになった。GRACEデータの非季節・経年成分の統計的な主成分分析(EOF解析: Empirical Orthogonal Function Analysis)を行うと、北極振動は第一主成分として現れる。EOF解析から、ユーラシア大陸、グリーンランドでは北極振動が冬の降水量異常に主要的な役割を果たすが、北米大陸ではエルニーニョ南方振動の影響のほうが顕著であることが明らかになった。

(2) GRACE が捉える北極圏の小氷河帯(Iceland, Svalbard, Russian High Arctic)の氷消失

温暖化に代表される近年の気候変動は、世界各地の氷床・氷河を融解・消失させている。本研究は、重力衛星 GRACE から、Iceland, Svalbard, Russian High Arctic のような北極圏の小氷河帯においても同様の氷消失が起きていることを明らかにした。2004-2012 年までの GRACE の月毎の重力データから、氷河の損失率として、Iceland では 10.9 ± 2.1 Gt/yr、Svalbard では 3.6 ± 2.9 Gt/yr、Russian High Arctic では 6.9 ± 7.4 Gt/yr という結果を得た。その総量は 21.4 ± 12.4 Gt/yr であり、1961-2002 年に行われた現地調査の結果の約 2 倍の速度である。さらに我々は、Svalbard 氷河と Russian High Arctic の一部である Novaya Zemlya 氷河では、その損失率に、かなりの時間変動性があることを突き止めた。これらの氷河は、2008 年までは経年的な負の質量収支を示すが、2009/2010 年の冬で正の質量収支に転じている。このような時間変動性により、2004-2008 年の期間では、氷河の損失率は 32.9 ± 19.2 Gt/yr に上方修正される。2009/2010 年の冬は、観測史上最大の負の北極振動が発生した時期であり、北極振動による降水量異常を反映しているのかもしれない。

(3) SLR(Satellite Laser Ranging)衛星による低次重力場観測から推定される 1991-2011 年のグリーンランド氷床の質量収支

グリーンランド氷床の質量収支は、この 20 年の間、宇宙測地的な手法による観測が盛んに行われてきた。その一つに、航空機搭載のレーザー測距計による観測がある。1993 年から 2003 年までの観測によると、グリーンランド氷床の質量収支は減少傾向にあり、その減少速度は -70 Gt/yr と見積もられた(e.g. Krabill et al. 2000)。また、航空機レーザー測量と並行して、人工衛星 ERS-1 搭載のレーダー高度計による計測も行われた。1992 年から 2002 年までの観測によると、グリーンランド氷床の質量収支は増加傾向にあり、その増加速度は $+11$ Gt/yr と推定された(e.g. Zwally et al., 2005)。両者の観測は同時期に行われていたにも関わらず、その推定量に大きな食い違いが見られる。その後 2003 年以降に行われた ICESat によるレーザー測量や ERS-2, Envisat, ALOS による合成開口レーダー測量では、いずれの結果も約 -200 Gt/yr の負の質量収支で、同様の傾向が得られている。本研究は、このようなグリーンランド氷床の質量収支の推移を、人工衛星による重力観測から解析を試みる。中でも我々は、GRACE 衛星の打ち上げ以前から運用を続ける SLR 衛星による低次重力場解に着目した。ここでは、他の測地観測との比較のため、1991-2011 年までの SLR 重力解を示す。SLR 重力解から、グリーンランド氷床では、1991-2002 年までは約 $+20$ Gt/yr の正の質量収支、2003-2011 年では約 -200 Gt/yr の負の質量収支を得た。2000 年代の推定値は、他の測地観測と良く一致しており、1990 年代は、ERS-1 のレーダー高度計測と良く一致する。1990 年代の氷床の拡大傾向は、同時期に始まった温暖化によるものであろう。気温の増加は氷床を融解させる一方で、水蒸気量の増加をもたらし、さらには降雨/降雪量を増加させる。1990 年代は水の涵養量が流出量をわずかに上回っていたが、2000 年代に入りそのバランスが崩れ、流出量が涵養量を大きく上回ったものと予想される。

(4) GRACE が捉える 2011 年東北沖地震に伴う地震時重力変化

2011 年 3 月 11 日に東北地方太平洋沖にて、 $M_w 9.0$ の超巨大地震が発生した。本研究は、この東北沖地震によって生じた地球表層・内部の質量移動に起因した重力変化について記述する。重力衛星 GRACE は地震発生後に、プレート沈み込み帯の背弧側、東北地方を中心に最大で $-7\mu\text{Gal}$ の重力減少を検出した。重力衛星によって地震に起因する重力変動が検出されたのは、2004 年スマトラ地震($M_w 9.2$)、2010 年チリ中部地震($M_w 8.8$)に続き、本地震で 3 例目となる。陸域に展開される GPS 局と宮城沖に設置された海底基準局の地殻変動データから推測される断層のすべり分布を用いて、推定される地震時重力変化を数値シミュレーションしたところ、GRACE の観測と非常によく一致した結果が得られた。また、観測された重力変化は主に、断層運動に伴う断層上盤側の体積膨張を反映していることが明らかになった。

学位論文審査の要旨

主査	教授	日置幸介
副査	教授	古屋正人
副査	教授	小山順二
副査	准教授	知北和久
副査	准教授	吉澤和範
副査	准教授	稲津 將

学位論文題名

Large scale mass transportations on the Earth from satellite gravimetry: Climate changes and earthquakes

(衛星重力観測でみる質量の大規模な移動: 気候変動と地震)

博士学位論文審査等の結果について (報告)

地球型惑星では大規模な物質循環システムが形成され、様々な自然現象が起きている。地球惑星内部で起こるマントル物質の湧昇は、表層に薄く硬いプレートを生成し、やがてプレート同士を移動・衝突させ、造山運動や地震/火山活動を引き起こす。太陽熱が駆動する大気の対流は、大陸に降雨/降雪をもたらし、表層で大規模な水の循環システムを構築させる。また、数万年もしくは数十年スケールで繰り返される気候変動は、氷床・氷河を消失/形成させ、さらには海水準面を上昇/下降させる。こうした一連の現象は、地殻/マントル、水/氷といった質量を持つ物質の移動によるものであり、そこには必ず重力場の変化が伴う。すなわち、重力場時間変化の観測はこれらのダイナミクスを解明する鍵なのである。近年目覚ましい進歩を遂げた宇宙測地技術は、地球上で起こるわずかな重力変化を高い精度と詳細な時空間分解能で計測することを可能とした。中でも、2002年にNASA/DLRが打ち上げた重力観測衛星GRACEは、その高い精度と応用性の広さから、地球惑星ダイナミクス研究に革命をもたらしつつある。GRACEは2つの衛星からなる双子型の人工衛星で、双子衛星間の距離を精密に測ることによって、地球表層や内部で起こる質量移動に起因した数 mGal (地球の標準重力の数億分の1)にも満たないわずかな重力時間変化を全球にわたって観測する。

本学位論文では、GRACEを始めとする重力観測衛星を用いて、様々な地球物理現象によって生じる地球上の大規模質量変動について研究を行っている。その内容は以下の4つの話題に分けられる。(1)北極振動(AO)がもたらす半球規模の降水(降雪)量異常のGRACEによる検出、(2)GRACEが捉えた北極圏の小氷河帯(Iceland, Svalbard, Russian High Arctic)の氷の消失、(3)SLR (Satellite Laser Ranging) 衛星による低次重力場観測値から推定される1991-2011年のグリーンランド氷床の質量収支、(4)GRACEで捉えた2011年東北沖地震に伴う地震時重力変化。

これらのそれぞれにおいて著者の松尾功二君は優れた新知見を得ており、また既にその多くはGeophys. J. Int.やGeophys. Res. Lett.等の英文一流専門雑誌に掲載されている。これらの研究は測地学のみならず地球の動力学、気候変動、地震学等に大いに貢献するものである。よって著者は、北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格あるものと認める。