

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 10 月 18 日現在

機関番号：82706

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25550048

研究課題名(和文) データ同化手法を用いたグリーンランド氷床の質量収支評価

研究課題名(英文) Evaluation of surface mass balance in the Greenland ice sheet, using data assimilation method

研究代表者

鈴木 和良 (SUZUKI, Kazuyoshi)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球表層物質循環研究分野・主任技術研究員

研究者番号：90344308

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、気候モデルと観測データを有機的に結ぶ新たなグリーンランド氷床の質量収支推定手法を開発することを目的とした。その結果、大気陸面結合データ同化システムを開発した。モデルは地域気候モデル(WRF)を用い、観測データとしては衛星重力観測(GRACE)データおよび気象観測データを用いた。まず、結合予報誤差共分散を用いることで、陸上観測の情報が大気を修正することが可能となった。さらに、大気とGRACEデータの両者をデータ同化することで、大気とグリーンランド質量収支の両者を改善することが可能となった。今後は、再解析データの精度検証と長期再解析に取り組んでいく予定である。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to develop a new mass balance estimation method for the Greenland ice sheet that can link climate models and observational data in a coordinated manner. To this end, we invented an atmosphere/land-surface coupling data assimilation system. The model utilized the World Research and Forecasting model (WRF), as well as Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data and meteorological observational data, as observational data. First, by utilizing coupling forecasting error covariance, modification of the atmosphere with land surface observational information was enabled. Furthermore, by assimilating data from both the atmosphere and GRACE data, the mass balance of both the atmosphere and Greenland could be improved. Hereafter, we intend to verify the accuracy of the reanalysis data as well as conduct long-term reanalysis.

研究分野：水文気候

キーワード：データ同化

### 1. 研究開始当初の背景

地球上の氷床は、南極大陸とグリーンランドに存在し、地球上の淡水量の約 50% を占める (IPCC, 2007). この氷床が全て融けた場合の海面上昇は、全球で約 64m に達し、氷床の質量収支は海面上昇に直結する大きな問題である。南極氷床とグリーンランド氷床を比較すると、グリーンランド氷床からの海面上昇への寄与は最大約 7m であり、海水準変動へのインパクトは南極氷床に比べて小さい。しかしながら、グリーンランド氷床の質量収支研究には、次の 2 つの点で重要性がある。1 つ目として、現在、南極氷床の変動がほとんど見られないのに対し、グリーンランド氷床では、今夏 (2012 年夏) に氷床全域で記録的な融解が観測され (Tedesco, 2012), 氷床の大規模な融解が報告されている。これは、地球温暖化などの気温変動に対して、グリーンランド氷床は敏感に反応することを示唆している。このことから、グリーンランド氷床の質量収支研究を行うことで、現在の温暖化の影響を見積もることが可能である。また、2 つ目としては、グリーンランド氷床の現在の変動は、温暖化が将来さらに進んだ場合の南極氷床の変動を推測する上での貴重な研究材料を提供する。これらの理由により、グリーンランド氷床の質量収支研究は重要である。

これまでのグリーンランド氷床の質量収支推定の研究は、大きく統合的アプローチ (氷床全体の変動を評価) と要素別アプローチ (氷床の質量収支に関わる構成要素を個別に評価) の 2 つに分かれる。統合的アプローチとしては、航空機搭載レーザー高度計によって氷床の表面高度を検出する方法、あるいは人工衛星搭載重量計による高精度の重力測定によって質量変化を検出する方法、がある。この統合的アプローチの問題点としては、レーザー高度測定では雲の影響による誤差が大きく、重力測定では重力データから質量収支に変換するアルゴリズムの精度に問題がある。一方、要素別アプローチは、氷床上の堆積量 (降雪量) と消耗量を要素別に算定することで、質量収支の変化を求める手法である。この手法では、消耗量ならびに降雪量は、それぞれモデルに依存して推定されるため、モデルに依存した誤差と氷床上のフォーシング誤差が問題となる。

### 2. 研究の目的

本研究では、統合的ならびに要素別アプローチによる両方の有効な情報を融合し、高精度の質量収支を評価するデータ同化システムを開発する。そして、開発された同化システムを用いる事で、グリーンランド氷床の質量収支変化、ならびに大気・海洋との相互作用について明らかにする。

### 3. 研究の方法

新たなグリーンランド氷床質量収支推定手法の確立を目指し、大気-陸面結合のデータ

同化システムを開発する。モデルは極域用に開発された地域気候モデル (WRF) を用い、観測データとしては、人工衛星観測から取得される重力と輝度温度データ、および気象観測データ、を用いる。モデルと観測データを融合させるデータ同化手法と観測演算子としては、Maximum likelihood Ensemble Filter と Gridded Statistical Interpolation を用い、大気とグリーンランド氷床上の状態量を再解析する。

### 4. 研究成果

#### (1) 研究の主な成果

##### ① 大気陸面結合データ同化システムの開発

Suzuki et al. (投稿中) によって以下の事が明らかになった。結合モデルは、大気、海洋、地表面、生物圏、および雪氷圏のプロセスの相互作用を表現する。これらの多圏相互作用を取り入れることは、モデルの予測を拡張し、それらの不確実性を減らすことができる。

本研究では、結合データ同化の基礎について、まず 2 つの変数を含む結合モデルにより、数学的なデータ同化の事例を通じて結合予報誤差共分散について解析を行った。そして、単一観測データ同化実験を通じて予報誤差共分散を分析するため、大気陸面結合によって最尤アンサンブルフィルタ (MLEF) データ同化システムを開発した。大気陸面結合データ同化による予報誤差共分散の構造は、予報と解析に大きな影響を与える。地域気候モデル WRF は 2 つの陸面モデルと結合された: Noah と Noah-MP モデルである。単一観測データ同化実験のために、降雪が生じている場所と晴天の場所の 2 地点選択した。この単一観測データ同化実験を通じて、予報誤差共分散の構造や相関が、データ同化の場所と陸面状態に依存することが分かった。予報誤差共分散と予報誤差相関は、降雪が生じている場合、より複雑な構造になった。より現実に近い複雑な陸面モデルである Noah-MP を用いることで、予報誤差が大気ならびに陸面で減少することが分かった。本研究は、予報誤差共分散の構造と相関が、結合データ同化に対して有用に働き、アンサンブルベースの予報誤差共分散の構造と誤差相関は有意義であることが示された。本研究によって、大気陸面結合データ同化を実観測に対して用いるための準備が整った。

##### ② GRACE データを用いたグリーンランド氷床の質量収支解析

松尾ら (2015) の GRACE データ解析によって以下の事が明らかになった。極域氷床の質量変化の様相を、直接的かつ定量的に捉えることが可能となった。GRACE 重力観測によって、グリーンランド氷床は、2002 年 8 月から 2014 年 6 月までの期間で、年平均  $25985 \pm 725$  億

トンの氷質量の減少が起きていることが分かった。これは12年間で合計約3兆トンの質量損失であり、約8 mmの海面上昇に寄与したことを意味する。グリーンランドにおける氷質量の減少は、2000年頃から始まり、その速度は日増しに加速している。2010-2014年の減少速度は、2002-2006年と比べると約2倍であった。氷質量の減少は、主要な溢流水河が位置する南東部や中西部、北西部で顕著である。これらの地域は、比較的気温が高く、降雪量も多いため、気候変動への感度が高い。さらに最近では、気候的に安定だと言われている北東部でも、氷質量の減少が見られる。グリーンランド氷床の縮退は今後も加速的に進行する可能性があるが、2013年の夏以降は縮退が停止していることもあり、その質量変化予測は難しい。今後も注意深く監視し続ける必要がある。

### ③ GRACE データを用いた応用研究

Suzuki et al. (2016)では、グリーンランドにおける質量収支の精度検証を行うため、これまで研究実績があるレナ川流域で貯留量に関する精度解析検討し、次の事について明らかになった。

レナ川流域の流域貯留量 (TWS) を分析するため、2002年4月から2015年8月までの期間に及ぶGRACEの146ヶ月分のデータを使った。そのデータを用いて、レナ川流域の貯留量変動を解析し、9月の流域貯留量が、翌春3月まで影響していることが明らかになった。さらに、月別の陸域貯留量と河川流出量のラグ相関を取ることで、前年11月の陸水貯留量が翌年の年間流出量と強い相関を持ち、この相関関係が11月～消雪前の5月まで継続することも明らかになった。さらに、北極沿岸のレナ川流域下流部で年間6mm以上貯留量が減少していることが明らかになった。この潮流量の減少については、約37%程度の変動が蒸発散量の増加によって説明可能であることが分かった。さらに、6月～8月までの夏季の気温が年0.36℃程度上昇傾向にあり、夏季の気温上昇が蒸発散量を増加させ、その結果と貯留量の減少が生じている可能性を指摘した。さらなる夏季の温暖化は、貯留量の減少を強める可能性がある。北極域の淡水循環のよりよい理解のためには、さらなるGRACEデータの蓄積と河川流出量データが必要となる。

### ④ GRACE データのデータ同化実験

ここでは、本研究で開発された大気陸面結合データ同化システムを用いて、GRACEデータを同化した場合のインパクトについて調査する。そのために、3種類の実験を行った。①気象データのみを同化した実験 (CONV DA)、②GRACEデータのみを同化した実験 (GRACE DA)、並びに③GRACE並びに気象データを同化した

場合の実験 (CONV+GRACE DA)である。図1に結果を示す。

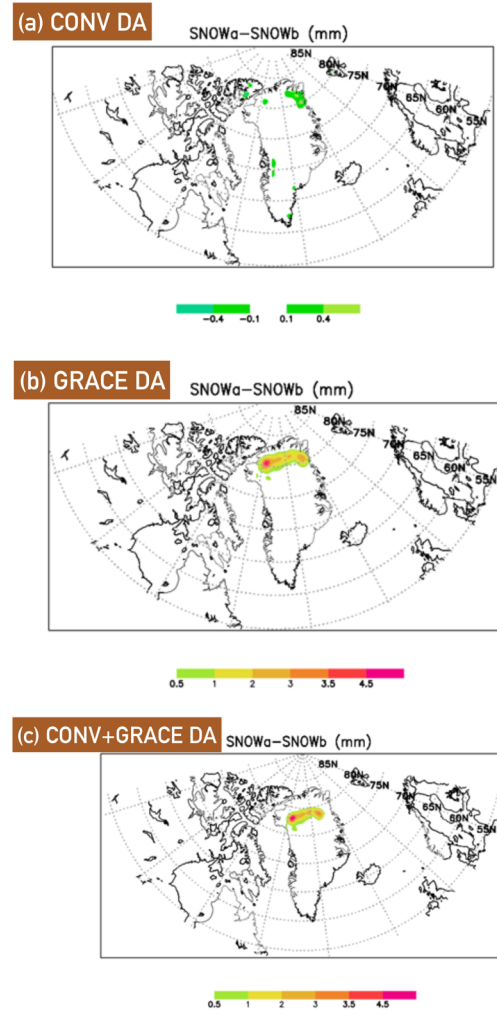


図1 各種観測データによる積雪水量の解析インクリメント 2012年7月15日00UTC. (a) CONV DA, (b) GRACE DA, (c) CONV+GRACE DA

図1aより気象データのみでのデータ同化では、大気陸面結合データ同化であっても、積雪水量の解析インクリメントが無視できるほど小さいことが分かる。一方、図1bから、GRACEによる貯留量変化をデータ同化することで、積雪水量のインクリメントが4.5mm以上に大きくなることが示された。さらに、両者のデータを同化した図1cを見ると、積雪水量のインクリメントの大きさは、GRACE DAとほぼ同じであるが、位置が南下していることが分かる。これはより内陸の標高の高い地域の積雪水量を修正していることを意味する。現時点では、これらの内、どの結果が最も現実と近いのかわからないが、本研究で開発された大気陸面結合データ同化システムが正常に動作していることを確認できる。また、CONV DAの結果から大気の観測は、陸面状態に対するインパクトは小さいことが分かる。

(2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

結合データ同化研究は、世界的に見て初期の開発段階にある。大気陸面結合データ同化に関して、まだ確立した手法は存在していない。本研究で開発した大気陸面結合データ同化システムは、世界的に見ても先駆的な研究であり、日本においても同様の研究事例は数少ない。結合データ同化について有用性を示すことが出来、今後の結合データ同化研究を勇気付ける成果となった。

また、世界気象機関(WMO)の一計画は、結合モデルとデータ同化の研究を優先研究分野と位置づけている。本研究成果は、WMOに対する貢献にもつながっていくと信じている。

### (3) 今後の展望

本研究で開発した大気陸面結合データ同化システムを用いた再解析データの作成が次の課題になってくる。今後は、長期的な再解析を行い、再解析データを作成し、それを用いた解析が目標となる。また、再解析データを、公開していくことも課題としていきたい。

(4) 当初予期していない事象が起きたことにより得られた新たな知見

当初の計画では、グリーンランド氷床の質量収支について衛星重力観測(GRACE)のデータを用い、その質量収支を解き明かすことを主眼としていた。しかし、GRACEデータの有効性そのものを検証する必要が生じ、これまでに研究実績があったシベリア・レナ川流域を対象とした流域貯留量変動の解析を行った。その研究成果として、北極海沿岸のツンドラ域で年間6mm水当量の乾燥化が生じ、それが夏の気温上昇に伴う蒸発散量増加が一因であることが分かった。この研究から、GRACEによる貯留量変動の精度が分かり、年間1mm水当量の変動を捉えることが出来ることを確認した。この研究で明らかになったシベリア・ツンドラ域の乾燥化の解明は、当初予期していた成果以上のものであり、重要な副産物といえる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Suzuki, K., K. Matsuo, and T. Hiyama. Satellite gravimetry-based analysis of terrestrial water storage and its relationship with runoff from the Lena River in eastern Siberia, *International Journal of Remote Sensing*, 査読有, 37(10), (2016), 2198-2210, doi:10.1080/01431161.2016.1165890.

- ② Suzuki, K., G. E. Liston, and Y. Kodama. Variations of winter surface net shortwave radiation caused by land-use change in northern Hokkaido, Japan, *Journal of Forest Research*, 査読有, 20(2), (2015), 281-292, doi:10.1007/s10310-015-0478-1.

- ③ Suzuki, K., G. E. Liston, and K. Matsuo. Estimation of Continental-Basin-Scale Sublimation in the Lena River Basin, Siberia, *Advances in Meteorology*, 査読有, 2015, (2015), 1-14, doi:Artn 286206. 10.1155/2015/286206.

- ④ 松尾功二, 福田洋一, 大坪俊通, 鈴木和良. 重力衛星が捉えるグリーンランド氷床の縮退, 月刊 地球, 査読無, 37(2), (2015), 25-31.

[学会発表] (計 9 件)

- ① Kazuyoshi Suzuki, Towards merging the observational and model information in Greenland through data Assimilation, International workshop on Greenland ice sheet mass loss and its impact on global climate change”, 2016年3月23日, 北海道大学, 北海道札幌市

- ② Kazuyoshi Suzuki, Ensemble data assimilation of multi-sensors' radiance at the northeast Eurasian continent, Joint PI meeting of Global Environment Observation Mission 2015, 2016年1月20日, TKP ガーデンシティ竹橋, 東京都千代田区

- ③ 鈴木和良, Milija Zupanski, 雪氷圏の地域気候研究のための陸域大気結合データ同化システム(CLAVEDAS)開発—予報誤差共分散, 雪氷研究大会2015, 2015年9月15日, 信州大学, 長野県松本市

- ④ Kazuyoshi Suzuki, Ensemble data assimilation of multi-sensors' radiance at the northern Eurasian continent, Joint PI workshop of Global Environment Observation missions 2014, 2015年1月15日, TKP ガーデンシティ永田町, 東京都千代田区

- ⑤ 鈴木和良, 松尾功二, 檜山哲哉, GRACEによって観測されたシベリア・レナ川流域における12年間の貯留量変動, 第5回極域科学シンポジウム, 2014年12

月5日, 国立極地研究所, 東京都立川市

- ⑥ 鈴木和良, 松尾功二, 檜山哲哉, GRACE  
によって観測されたシベリア・レナ川  
流域の貯留量変動, 雪氷研究大会  
(2014・八戸), 2014年9月20日, 八  
戸工業大学, 青森県八戸市
- ⑦ Koji MATSUO, Yoichi FUKUDA,  
Kazuyoshi SUZUKI, Accelerated/  
deaccelerated Ice Thickness  
Variations in Greenland from ICESat  
Laser Altimetry (2003-2009),  
AOGS2014 Global Cryosphere and Its  
Challenges, 2014年8月1日, ロイトン  
札幌ホテル, 北海道札幌市
- ⑧ 松尾功二, 福田洋一, 鈴木和良, グリ  
ーンランドの加速的・減速的な氷厚変  
動: ICESat 衛星 (2003-2009) による観  
測, 地球惑星科学連合大会 2014, 2014  
年4月30日, パシフィコ横浜, 神奈川  
県横浜市
- ⑨ 鈴木和良, グリーンランド氷床の質量  
収支に向けたアンサンブル・データ同  
化, 北海道大学低温科学研究所・研究  
集会「グリーンランド氷床の質量変化  
と全球気候変動への影響」, 2013年11  
月26日, 北海道大学, 北海道札幌市

[その他]

プレスリリース

「北極海沿岸のシベリア永久凍土の乾燥化を  
解明」

[http://www.jamstec.go.jp/j/about/press\\_r  
elease/20160429\\_2/](http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20160429_2/)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鈴木 和良 (SUZUKI, Kazuyoshi)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球表  
層物質循環研究分野・主任技術研究員

研究者番号: 90344308

### (2) 研究協力者

ZUPANSKI, Milija

コロラド州立大学・主任研究員

MERNILD, Sebastian

Sogn Og Fjordane University College・教授