

近年のグリーンランド氷床で増加している降雨の変動の実態を 詳細に定量化することに成功

本研究では、過去のグリーンランド氷床周辺の大気・雪氷物理状態を出来る限り正確に再現する数値シミュレーションを行い、急速な温暖化が進行しているグリーンランド氷床における1980年以降の降雨量の詳細な時空間変動を初めて提示しました。解析の結果、氷床全体として見てみると、降雨量と全降水量(降雪量と降雨量の総和)に占める雨の割合は統計的に有意に増加していることが分かりました。氷床上の降雨は、様々な物理プロセスを介して氷床の雪氷質量損失を引き起こし、全球の海面水位を上昇させると考えられているため、更に詳細な実態把握が必要不可欠です。

氷床上における降雨は、その重要性にも関わらず、直接観測が依然として非常に難しいことから、詳細な実態把握には至っておりません。そこで、本研究では、気象研究所で開発してきた最新の雪氷圏に特化した領域気候モデルを活用して、氷床上降雨の詳細な時空間変動の解明に取り組みました。

その結果、氷床全体として見てみると、1980年から2019年にかけて降雨量と全降水量(降雪量と降雨量の総和)に占める雨の割合は統計的に有意に増加しており、更に、氷床を構成する8個の流域毎に分けてみると、日本の研究チームが近年特に着目してきた北西部における増加傾向が最も顕著であることも明らかになりました。なお、月別に見てみると、氷床全体では9月に、また北西部では7月に増加傾向が顕著でした。また、温暖化の指標として良く注目される短時間強雨の実態についても調べてみたところ、氷床全体で降雨量が増加している9月には、特に南部において有意な増加傾向があることが示されました。

本研究成果は数値シミュレーション結果の解析に基づいており、実際に降雨量を観測したものではありませんが、グリーンランド氷床において温暖化に起因する降雨量増加が既に始まっていることを強く示唆しています。今後は、海外の共同研究機関とも協力して、更に詳細な実態把握に取り組みます。更に、そこで得られる知見を気象研究所の地球システムモデルに導入して、将来予測の信頼性向上とそれに基づく適応策(地球温暖化による社会への影響を低減させる対策)の高度化に繋げていく予定です。

この研究成果は、2021年7月27日付けでアメリカ地球物理学連合が発行する科学誌「Geophysical Research Letters」に公開されました。

<発表論文>

掲載誌: Geophysical Research Letters

タイトル: Rainfall on the Greenland ice sheet: present-day climatology from a high-resolution non-hydrostatic polar regional climate model

著者名: M. Niwano^{1, 2}, J. E. Box³, A. Wehrlé³, B. Vandecrux³, W. T. Colgan³, and J. Cappelen⁴

所 属:1 気象庁気象研究所.2 国立極地研究所.3 デンマーク・グリーンランド地質調査所.4 デンマーク気象研究所

DOI: 10.1029/2021GL092942

URL: https://doi.org/10.1029/2021GL092942

<関連情報>

本研究は、科学研究費補助金プロジェクト「グリーンランド氷床気候システム研究最前線の開拓」(JP17KK0017)、「次世代極域気候モデル開発と広域観測によるグリーンランド氷床質量損失メカニズム解明」(JP17K12817)、「南極氷床表面質量収支高精度推定手法の確立」(JP18H05054)、「地球システムモデルの高度化と北極域における黒色炭素粒子の気候影響評価」(JP18H03363)、「過去40年間の南極氷床表面質量収支高精度計算」(JP20H04982)、環境省地球環境保全試験研究費「光吸収性エーロゾルの監視と大気・雪氷系の放射収支への影響評価ー地球規模で進行する雪氷圏融解メカニズムの解明に向けて一」(MLIT1753)、及び北極域研究加速プロジェクト(ArCS II)(JPMXD1420318865)の助成を受けて実施されました。

問合せ先:気象研究所 気象予報研究部 主任研究官

国立極地研究所 客員准教授 庭野 匡思

メール: mniwano@mri-jma.go.jp

(広報担当)

気象研究所 企画室 広報担当 電話:029-853-8535

1. 背景と経緯

現在、北極域では、地上気温上昇率が北半球のそれの約2倍となっており、全球的な温暖化進行のホットスポットとなっています(AMAP SWIPA報告書,2017)。2018年に発表されたIPCC海洋・雪氷圏特別報告書によると、北極域の温暖化は、近未来においても継続する可能性が高い、と指摘されています。近年の急速な北極域での温暖化の影響を受けて、グリーンランド氷床の表面を覆う雪氷の融解が頻繁に引き起こされるようになり、周辺の海洋に流出する融解水の量が急増しています(IPCC海洋・雪氷圏特別報告書)。結果として、2006年から2015年にかけての全球海面水位上昇率(3.6 mm year⁻¹)に対するグリーンランド氷床の寄与は22%(0.8 mm year⁻¹)と推定されており、現在の全球的な海面水位上昇の主要な要因と考えられています。

温暖化が急速に進む北極域では、これまで雪として降っていた降水が雨として降る頻度が増えていく可能性が考えられています。しかし、グリーンランド 氷床を含む北極域における降水量の直接観測は非常に難しく、正確な実態把握に至っていないのが実情です。その代表的な理由は、一般的な雨量計で必須のヒーターを維持させるために十分な電力を北極域ではなかなか利用することが出来ないことが挙げられます。

氷床に降る雨は、表面付近の雪の温度を上げることから、氷床表面融解の一因になる可能性があります。また、雨が氷床縁辺の氷河に存在するクレバスなどを伝って基盤地形に接する氷河底面に到達すると、雨が氷河にとっての潤滑剤の役割を果たして氷河の流動を加速させ、氷体として周辺の海洋に流出することも増えてくる可能性があります。これらの物理プロセスは最新の地球システムモデル*1では十分に考慮されておらず、将来の温暖化予測の不確定性の一因となっている可能性があります。

本研究では、気象研究所が国立極地研究所などと連携して開発してきた雪氷圏に特化した世界最先端の高解像度領域気候モデル (NHM-SMAP) *2を用いて、1980年から2019年にかけてのグリーンランド氷床上の降雨の変動実態を初めて評価しました。本モデルの計算対象領域を図1に示します。

2. 主な結果

(1) モデルの信頼性

まず始めに、気象庁55年長期再解析*3をもとに、領域気候モデルNHM-SMAPを用いた数値シミュレーションを行い、1980年から2019年にかけての長期気候計算を行いました。グリーンランド氷床上には、降雨量を直接観測しているサイトは存在しないのですが、沿岸の露岩域にはデンマーク気象研究所(デンマークとグリーンランドの現業気象機関)によって現業的に維持されている自動気象観測装置が多数存在します。その中から、最新の信頼のおける測器で降水量を測定しているサイトを6つ抽出して、各サイトにおいて観測された月積算雨量をモデル計算結果と比較しました(図2)。その結果、モデルによる推定結果は観測と良く相関しており、平均誤差(ME)と二乗平均平方根誤差(RMSE)

は、同種のモデル評価研究の結果と比べても遜色が無いことが確認されました。このことから、NHM-SMAPはグリーンランド氷床周辺の降雨量を十分正確に計算出来ている可能性が高いと判断しました。

(2) 氷床上降雨量の気候状態

領域気候モデルNHM-SMAPによる1980年から2019年にかけての気候計算結果から、1981年から2010年にかけての30年分のデータを取り出し、氷床上降雨量の気候値を計算しました(図3a)。降雨は氷床縁辺域の標高2000 m以下の領域で集中的に起きていることが分かりました。1980年から2019年にかけての降雨量の変化傾向(図3b)を見てみると、ほぼ全ての領域で降雨が増加傾向にあることを示しているものの、定量的には地域によって大きくことなることも分かりました。雪氷融解が特に加速し始めた2010年以降に注目すると(図3c)、北西部、西部、南西部、南部、及び南東部の各流域において偏差が20 mm以上となる場所が他の流域と比べ多く見られ、降雨の増加が顕著であることが分かりました(流域の定義については図1を参照)。しかし、同時に、年によって、地域特性が異なることも見えてきました(図3d)。

(3) 地域特性

以上について、より詳細に見るために、氷床全域、あるいは、流域毎に面積積算した降雨量の1980年から2019年にかけての変化を解析しました(図4)。 氷床全体として見てみると、降雨量(図4a)と全降水量(降雪量と降雨量の総和)に占める雨の割合(図4b)は統計的に有意に増加していることが分かりました。本結果によると、解析期間中最大の降雨量が記録されたのは2012年であり、これは記録的な氷床表面融解イベントが発生した年に相当します。

流域毎に見てみると、降雨量と全降水量に占める雨の割合について最も大きな増加傾向を示した流域は北西部でした(図 4c、図 4d; 他の流域での計算結果の図は省略)。夏期のグリーンランド氷床上には、高気圧が頻繁に停滞することが知られています。近年、その高気圧の中心位置が年々緩やかに北偏しつつあることが複数の先行研究によって報告されています。北西部は、その北偏した高気圧の西側縁辺に位置することから、南から暖かく湿った空気が以前よりも到達しやすくなっております。このことが降雨増加の一因と考えられます。現在、我が国では、北極域研究加速プロジェクト(ArCS II: Arctic Challenge for Sustainability I^{*4})というナショナルフラッグシッププロジェクトを推進しており、気象研究所もその重要な一翼を担っています。その中の戦略目標①「先進的な観測システムを活用した北極環境変化の実態把握」の雪氷課題には、本論文の筆頭著者(庭野)が課題副代表者として参加参画しています。当雪氷課題は、これまでの様々な経緯から北西部に特に注目して現地での観測的研究を進めています。本論文は、その方針の意義を補強するものであると言えます。

(4)季節特性

グリーンランド氷床における降雨の大部分は6月から9月にかけて引き起こさ

れます。その4ヶ月の内のどの月に最も降雨変化が顕著であるかについても調べました。その結果、氷床全体としてみると、降雨量と全降水量に占める雨の割合の増加傾向は9月にのみ見られ(図4e、図4f;他の月の計算結果の図は省略)、他の期間には明瞭な変化が見られない(図略)ことが明らかになりました。9月は、南部における夏の融解期間の終わりのタイミングであると同時に、下旬には北部の一部で雪が降り始める季節の変わり目にあたります。そのため、その時期の氷床表面の多くの場所では雪が消えて氷が露出しています。言い換えると、クレバスも多数露出していることになります。このことは、雨による氷床流動、及びその結果としての氷体の海洋への流出が既に多くの場所で引き起こされ始めている可能性を示唆します。なお、近年、北極域では海氷減少が進行しており、それは9月において特に顕著であることが複数の先行研究によって報告されています。海氷が減少すると海面から大気に蒸発する水蒸気量が増加します。このことが、9月の降雨増加の重要な要因として考えられます。

一方で、全流域中で最も大きな降雨量と全降水量に占める雨の割合の増加傾向を示した北西部の変化は7月において最も顕著でした(図4g、図4h;他の月の結果は省略)。このことは北西部の特異性の一端を示す結果と考えられ、ArCS IIなどを通してより詳細な解析を進めていくことが必要です。

(5) 短時間強雨

日本では、長期的に見て大雨や短時間強雨が統計的に有意に増えており、その背景要因の一つとして温暖化があると考えられています*5。我々は、グリーンランド氷床においても同様の変化が起きているのかどうかを調べるために、NHM-SMAPによる1時間間隔の計算結果の解析を行いました。なお、海外の同種の領域気候モデルは、6時間間隔より長い時間間隔のデータのみしか保持しておらず、この解析が出来るのはNHM-SMAPの大きな強みと言えます。そこでは、各年の9月の月最大1時間降水量の経年変化に着目しました。過去に気象研究所において日本を対象として行われた研究によると、月最大1時間降水量は温暖化の指標として有効であることが確認されています。解析の結果、氷床全域で9月の月最大1時間降水量が増加しており、それがとりわけ南部において顕著であることが分かりました(図5)。南部は、先行研究によると、氷床質量損失のホットスポットであり、現在は主に、本研究を共同で実施したデンマークの研究グループによって精力的な観測が進められております。

3. 今後の展望

今回の研究結果は、グリーンランド氷床において、温暖化に起因する降雨量増加が既に始まっていることを示唆しています。しかし、地域的・季節的な変化の特徴はバリエーションが豊かであることも明らかになりました。今後は、海外の共同研究機関とも協力して、氷床上における降雨量・降雪量の更に詳細な実態把握に取り組みます。そのために、現地観測の更なる充実とモデルの一層の高度化を実現させたいと考えています。更に、そこで得られる知見を気象

研究所の地球システムモデルに導入して、将来予測の信頼性向上とそれに基づく適応策(地球温暖化による社会への影響を低減させる対策)の高度化に繋げていく予定です。

グリーンランド氷床は日本から遠く離れた場所に位置していますが、そこで引き起こされる氷床質量損失は全球の海面水位を上昇させることから、日本にも影響を与えます。

グリーンランド氷床の気候変動に関わる研究成果は、適応策に関する取組のより一層の推進に役立てられるとともに、地球温暖化による影響についての理解を深めることに寄与すると期待されます。

気象研究所では、今後も気候変動に関する様々な研究を推進していき、その 成果を科学的な理解や対策に貢献出来るように努めていきます。

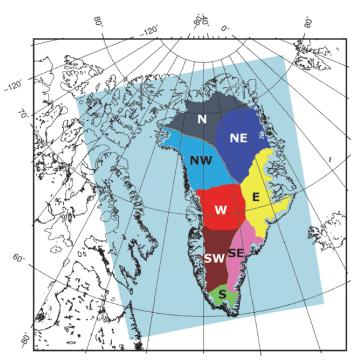


図1 グリーンランド氷床上に存在する8個の代表的な氷河流域。 各氷河流域は、北部(N)、北東部(NE)、東部(E)、南東部(SE)、南部 (S)、南西部(SW)、西部(W)、及び北西部(NW)を示す。

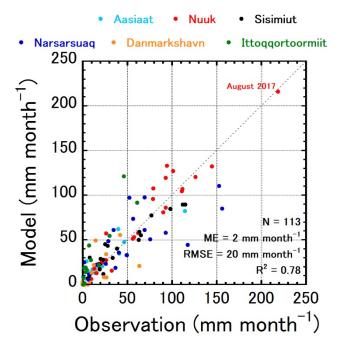


図2 モデルによって計算された降雨量の観測との比較 2014年から2018年にかけての夏期(6月~9月)における月積算降雨量について、図3aに示す6つの地点において比較を実施。

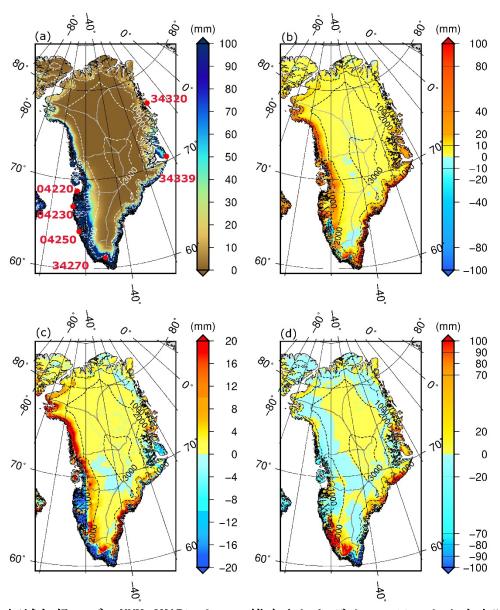


図3 領域気候モデルNHM-SMAPによって推定されたグリーンランド氷床上降雨の気候状態

(a) 1981年から2010年における年積算降雨量の気候値(mm)、(b) 年積算降雨量の1980年から2010年にかけての変化(mm)、(c) 2010年から2019年にかけての期間における平均年積算降雨量の気候値(a) に対する偏差(mm)、及び、(d) 2017年の年積算降雨量の気候値(a) に対する偏差(mm)。(b)に示す変化は、地域による違いを強調するために、線形トレンド(mm year⁻¹)にトレンド解析期間(40年)をかけた結果を示している。(a) に示している数字は世界気象機関WMOによって規定された観測所地点番号であり、それぞれの地点名は、Aasiaat(04220)、Sisimiut(04230)、Nuuk(04250)、Narsarsuaq(34270)、Danmarkshavn(34320)、及びIttoqqortoormiit(34339)に対応する。地図中の実線は氷床の流域境界を示し、点線は標高を1000 m間隔で示す。

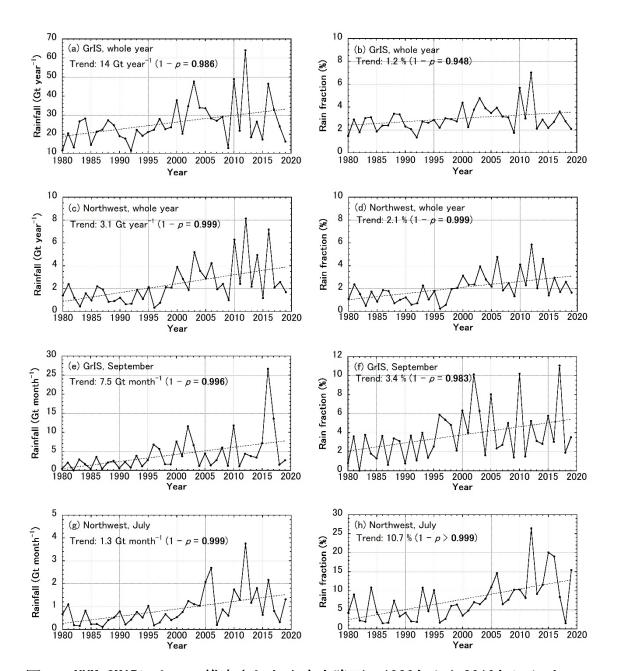


図4 NHM-SMAPによって推定された氷床上降雨の1980年から2019年にかけての 変化の詳細な解析

各図中に示している"trend"は、本研究では変化を示す量として以下の通り定義している:線形トレンドにトレンド解析期間(40年)をかけた結果。(a, c, e, g)と(b, d, f, h)は、それぞれ、領域積算した降雨量と領域平均した雨の全降水量に対する割合を示す。(a, b)全氷床上の年間を通した結果、(c, d)北西流域における年間を通した結果、(e, f)全氷床上の9月における結果、及び(g, h)北西流域における7月の結果。図中の太字の数字は、破線で示された変化が高い信頼性を持つことを示す。

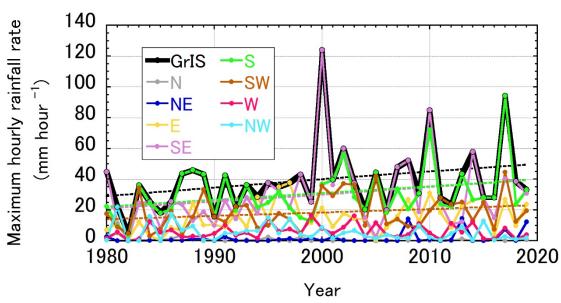


図 5 NHM-SMAPによって推定された9月の氷床上における月最大1時間降雨量経年変化

氷床全域(GrIS)、北部(N)、北東部(NE)、東部(E)、南東部(SE)、南部(S)、南西部(SW)、西部(W)、及び北西部(NW)について個別に示す。 氷床全域、南東部、南部、及び南西部については、変化傾向を点線で示す。なお、氷床全域と南部では、それらの変化傾向は有意である。

注釈

1) 地球システムモデル

地球上の気候システムを構成する大気・海洋・陸面・雲・河川・雪氷・成層圏・大気汚染物質といった多岐に渡る要素を、物理法則に則った微分方程式で表現し、定量的に見積もる数値モデル全般を指す総称。

2) 領域気候モデル (NHM-SMAP)

気象研究所が開発した雪氷圏に特化した領域気候モデル。気象庁の現業天気予報で使われていた領域非静力学大気モデルNHMと詳細な積雪変質モデル SMAPを組み合わせた、世界的に見ても先進的なモデルです。なお現在は、現業天気予報では、NHMではなく新しい非静力学モデルasucaが使われており、NHMは研究目的で使用されています。

3) 気象庁55年長期再解析

データ同化(全球数値予報モデルと観測データを合わせた解析手法)により、全地球上を規則的な格子間隔(約55 kmメッシュ)で、水平方向・鉛直方向の大気・海面・地表面の状態を表したデータ。

4) ArCS IIのホームページ

https://www.nipr.ac.jp/arcs2/

5) 「日本の気候変動2020 -大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書-

https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/index.html