

令和 2 年 5 月 13 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02224

研究課題名(和文) Projecting discharge from the Greenland ice sheet using climatic forcings derived from atmosphere-ocean models

研究課題名(英文) Projecting discharge from the Greenland ice sheet using climatic forcings derived from atmosphere-ocean models

研究代表者

Greve Ralf (Greve, Ralf)

北海道大学・低温科学研究所・教授

研究者番号：90374644

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 22,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では氷床数値モデルSICOPOLISに複数の大気大循環モデルに基づく大気・海洋強制を適用し、グリーンランド氷床の将来変動を解析した。その結果、2015～2100年の海水準上昇寄与は、温暖効果ガスが継続的に排出されるとしたRCP8.5/SSP5-8.5シナリオでは $133.0 \pm 40.7$  mm、排出抑制を仮定したRCP2.6/SSP1-2.6シナリオでは $48.6 \pm 6.2$  mmであることが示された。さらに、新しいグリーンランド地殻熱流量マップを作成し、巨大な底面渓谷地形が氷底水流に与える影響の解明、ボードイン氷河とNEEM掘削サイトにおける局所的な流動状態の解析を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球上に存在する淡水の大部分は、グリーンランドと南極の氷床に氷として蓄積されており、その総量は海水準に換算して約65 mとなる。現在進行する人為起源の地球温暖化を背景として、氷床の変動とその動力学は、人類社会に直結した重要な研究課題である。本研究の成果は、国連のIPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)が取り組む次期IPCCレポート(AR6)に提供され、地球環境の変動予測の精緻化に貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：We conducted future-climate simulations for the Greenland ice sheet with the SICOPOLIS model, driven by atmospheric and oceanic forcings produced by an ensemble of global climate models (including MIROC). The simulated sea-level contribution of the Greenland ice sheet for the period 2015&#8211;2100 is  $133.0 \pm 40.7$  mm for the RCP8.5/SSP5-8.5 pathway that represents continued emissions of greenhouse gases, and it is  $48.6 \pm 6.2$  mm for the RCP2.6/SSP1-2.6 pathway that represents ambitious emissions reductions. Further, we constructed a new geothermal heat flux map for Greenland, simulated the impact of an observed basal mega-canyon on subglacial water flow, and investigated the local dynamics of Bowdoin Glacier and the NEEM ice core.

研究分野：雪氷・寒冷圏科学

キーワード：氷床 力学 気候変動 数値モデル グリーンランド

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 氷床は大陸規模で陸地を覆う氷体であり、現在の地球にはグリーンランド氷床と南極氷床が存在している。地球上の淡水の大部分はこれらの氷床に氷として蓄積されており、その総量は海水準に換算して約 65 m となる(南極氷床: 約 58 m、グリーンランド氷床: 約 7.4 m)。現在進行する人為起源の地球温暖化を背景として、氷床の変動とその動力学は、人類社会に直結した重要な研究課題である。

(2) グリーンランド氷床は、南極氷床と比較して温暖な気候下にある。そのため氷床周縁部では夏の表面融解(消耗)が顕著であり、グリーンランド氷床の氷損失には、融解とカービング(冰山分離)が同程度の寄与を果たしている。一方の南極氷床では表面融解はほとんど起きず、氷床の氷損失は、棚氷の底面融解とその周縁で起きるカービングによって発生する(、)。本プロジェクト申請当時、グリーンランドおよび南極氷床は既に温暖化の影響を受けて大きな変化を示していた。人工衛星(CryoSat-2)による高度計測のデータによれば、2011~2014年の間にグリーンランド氷床が失った氷量は、両氷床の総氷損失量の75%を占めていた( )。

(3) 人為的な気候変動に対するグリーンランド氷床と南極氷床の反応について、過去30年間にわたって数値モデルを使った研究が実施されてきた。SeaRISE(Sea-level Response to Ice Sheet Evolution)は複数の数値モデルコミュニティが協力して2009~2013年に実施したプロジェクトで、国連のIPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)による第5期報告書(AR5: Fifth Assessment Report)への貢献を目的としたものである。SeaRISEで実施された実験R8では、IPCCが規定するRCP(Representative Concentration Pathway)8.5(2100年における温室効果ガス最大排出量に相当するシナリオ)を外部強制とし、将来500年にわたっての氷床変動が解析された。その結果、21世紀中の海水準上昇への寄与は、全てのモデル出力の平均として、グリーンランド氷床が22 cmに対して南極氷床は8 cm、500年後までの寄与はそれぞれ2 mと1.5 mであることが示された( )。これらの結果は、海水準上昇への寄与は今後しばらくの間、グリーンランド氷床が南極氷床を卓越する可能性が高いことを示している。しかしながらSeaRISE実験の結果は、氷床モデルの間で結果が大きくばらついている。これは各モデルが採用するスピニングの手法や、表面・底面融解に代表される各プロセスの物理的解釈やパラメータ化手法が異なることが原因である。すなわち、氷床の将来変動予測には改善の余地が多く残されており、本研究プロジェクト実施の強い動機づけとなった。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究プロジェクトでは、将来の海水準上昇への影響がより大きいと考えられるグリーンランド氷床に着目する。また文部科学省が推進する大型北極研究ArCS(Arctic Challenge for Sustainability)プロジェクト([www.nipr.ac.jp/arcs](http://www.nipr.ac.jp/arcs), 2015-2020)が象徴する、日本における北極研究の機運の高まりもグリーンランドを研究対象とする理由のひとつである。プロジェクトの主要な取り組みとして、MIROCに代表される大気大循環モデルによって得られた将来気候予測を強制力として、氷床数値モデルSICOPOLIS(Simulation COde for POLythermal Ice Sheets, [www.sicopolis.net](http://www.sicopolis.net))を使ってグリーンランド氷床の変動を解析する。その目的は以下3つの疑問に答えることである。(i)従来ほとんど変化していなかったグリーンランド氷床の質量が、1990年を境に急激な減少に転じたが、このような氷床の振る舞いの再現とその原因説明が可能か?(ii)予想されている様々な気候変動の下で、21世紀中にグリーンランド氷床の融解によって生じる海水準上昇はどの程度か?(iii)グリーンランド氷床における将来の質量減少に対して、大気変動によって生じる表面融解の増加と、海洋変動によって生じる末端融解とカービングの増加、それぞれの寄与比率はどの程度か?

(2) 本研究は、SeaRISE完了後の後継プロジェクトであるISMIP6(Ice Sheet Modeling Intercomparison Project for CMIP6 [CMIP6: Coupled Model Intercomparison Project Phase 6], [www.climate-cryosphere.org/mips/ismip6](http://www.climate-cryosphere.org/mips/ismip6))に貢献するものである。ISMIP6は2014年秋に発足し、2015年にCMIP6のプロジェクトとして正式に認められた。ISMIP6のもとで国際連携に参画することで、大気大循環モデルによる最新の将来気候変動シナリオの利用が可能となる。その結果、雪氷圏の変動に起因する海水準変動(本研究ではグリーンランド氷床の質量損失)の予測精度を向上し、気候変動下におけるグリーンランド氷床の変動をより正確に理解することが可能となる。

(3) さらに、(i)グリーンランド北西部カナック地域に位置するボードイン氷河、および(ii)北部中央グリーンランドに位置するNEEM深層掘削サイトにおいて、局所的な氷床数値モデル実験を行う。これらの取り組みは、それぞれの地域で実施されるArCSプロジェクトの現地観測と連携したものである。

### 3. 研究の方法

(1) 本研究で中心的な役割を果たす SICOPOLIS は、長年にわたって改良を重ねられた、柔軟性のある、大規模氷床を対象とした熱・動力氷床モデルである。過去 25 年間にわたって開発が続けられており、これまでに、グリーンランド氷床、南極氷床、北半球全域を覆う氷床、火星の氷冠、その他多数の氷床に関してその過去と将来の変動に適用されている (www.sicopolis.net/publ)。接地氷床に対して適用される浅層近似、および浮氷に適用される浅層棚氷近似は既に確立された解法を用いる。それに加えて、グリーンランド氷床において沿岸への氷輸送を考える上で重要な、高速で流動する氷流・氷河に対して、浅層・棚氷高速流動ハイブリッド動力学を適用する。さらに、グリーンランド氷床の底面地形には、最新の数値標高モデル (DEM) を使用する。この底面地形データは、航空機による氷レーダ測定結果と、人工衛星観測に基づく氷流動速度を質量保存則に適用して得られた結果を統合して得られたものである。このデータを用いることで、連続的な谷地形が与えられて、氷流・溢流氷河の流動形態を現実に近い形で再現することができる。さらに本研究では、氷床底面の融解水の挙動と、融解水の層厚に相関した底面流動を数値モデルに組み入れる。

(2) 1990 年にいたる最終氷期・間氷期サイクルを対象に、グリーンランド氷床のスピナップ実験を行った。このスピナップによって得られる結果が、過去および将来の気候変動に対する氷床数値実験の初期条件となる。スピナップの過程では、ナッジングと呼ばれる手法を用いて、観測された現実の地形と数値計算結果との整合性を確保した。表面流動速度に関しては、IMBIE プロジェクト ( ) で規定される 20 の地域で底面流動を調整し、観測値と計算値の整合を図った。

(3) スピナップ実験の結果を初期条件として、1990 年から 2015 年、および 2015 年から 2100 年の氷床変動実験を実施した。ISMIP6 プロジェクトとの連携に基づいて、CMIP5 と CMIP6 に参画する多数の気候モデルによって得られた将来気候を強制として用いた。これらの気候変動予測は、PCP8.5/SSP5-8.5 および RCP2.6/SSP1-2.6 (温室効果ガス排出量の著しい削減を仮定したシナリオ) に基づいて計算されたものである。気候変動の強制は大気と海洋の各要素から構成される。大気強制は 1960~1989 年に対する差分の形で、氷床表面での質量収支と気温を規定する。海洋強制は、氷床の末端後退を海洋熱供給に対してパラメータ化することで与えられる。

(4) ボードイン氷河は、グリーンランド北西部カナック地域に位置する海洋性の溢流氷河である。ArCS プロジェクトで実施された現地観測と連携して、氷河流動とその潮汐変動について数値実験を行った。この実験は、高次の応力項を含むフルストークス氷流動モデル Elmer/Ice (elmerice.elmerfem.org) によって行われ、コントロールインバース法による底面摩擦の最適化を実施した。

(5) NEEM 氷コアは、グリーンランドにおいて顕著な氷流動が生じる地点で初めて掘削された深層氷コアである。掘削孔を用いた測定では、氷の変形と酸素同位体  $\delta^{18}\text{O}$  の値に強い相関関係が見いだされた (Dorthe Dahl-Jensen, personal communication 2017)。この結果と比較的単純な 1 次元流動モデルを組み合わせ、氷の粘性と深度との関係性を推定した。

### 4. 研究成果

(1) スピナップ実験によって、20 に分かれた地域で底面流動速度が顕著に異なることが明らかになった。特に北西グリーンランド氷流 (NEGIS) を含む地域で、底面流動が非常に大きいことが明らかになった。その他、Jakobshavn 氷流、Helheim 氷河、Kangerdlugssuaq 氷河など、主要な氷流流域を含む地域でも、平均よりも大きな底面流動が示された。図 1 に示したように、現在流動が速い地域でも、遅い地域でも、流動速度が良く再現されている。また過去 9000 年の数値実験においてナッジング手法を使ったことにより、現在観測されている氷体積および面積に良く整合する結果が得られた。

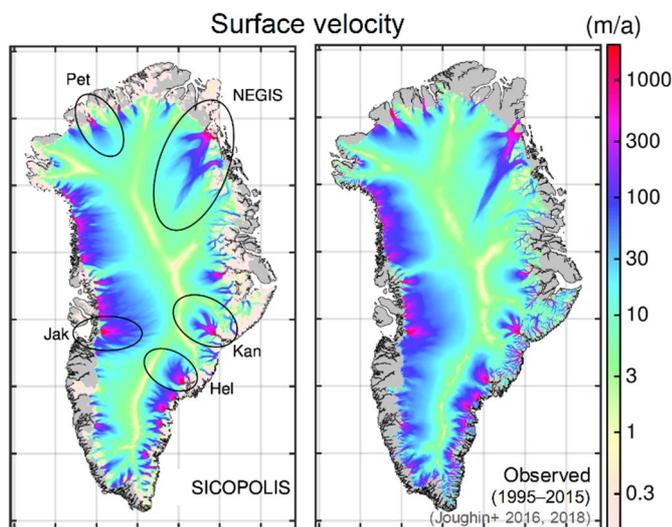


図 1 左：スピナップ実験によって得られた 1990 年のグリーンランド氷床表面流動速度。主要な氷流と溢流氷河について名前を示す。右：表面流動速度の観測値 ( )。

(2) スピンアップ実験の結果は、氷床底面と底面付近の温度条件をコントロールする地殻熱流量分布の推定にも用いられた。この作業は、全球地殻熱流量マップに、氷床深層コア掘削地点 (GRIP、Camp Century、Dye 3、NGRIP、NEEM) で測定された底面温度を組み合わせることで行われた。その結果得られた地殻熱流量の分布は、地球物理学的手法によって得られた従来の分布とは大きく異なる。南部と北西部では全般的に小さな値が、北部中央から北東部にかけては比較的大きな値が示された。こうして得られた地殻熱流量分布は、その後実施した過去と将来の気候変動に対する数値実験において境界条件として使用された。

(3) スピンアップの結果に基づいて、Petermann フィヨルドから氷床内陸にかけて氷床底面に見出された巨大渓谷地形が ( ) 氷床流動に与える影響について数値実験を実施した。その結果、渓谷地形による氷床流動に対する影響は小さいものの、この地形が、水理ポテンシャルに沿って移動する氷床底面融解水を流し出す水路の役割を果たすことが明らかになった。

(4) ISMIP6 の推奨する条件に従って 1990~2015 年の氷床変動再現実験を実施した。ここでは MIROC5-RCP8.5 を大気強制として採用し、海洋強制は考慮していない。その結果得られた氷床質量変動を図 2 に示す (hist と示された太黒線)。1990 年頃はほとんど変動が見られないが、その後すぐに大気温暖化の影響を受けて質量損失が始まっている。さらに 2015~2100 年における変動実験を行った。まず 1960~1989 年の気候を一定値として与えた場合には氷床がほぼバランス状態にあり (図 2 で ctrl\_p と示された黒線) この気候条件を仮定した場合は氷床にほとんど変化が生じないことが明らかになった。図 2 にカラーで描かれた 2015~2100 年の変動は、大気大循環モデルの各結果 (RCP8.5/SSP5-8.5 または RCP2.6/SSP1-2.6) を大気強制として行った実験の結果である。2100 年までの海面上昇に対する寄与は、RCP8.5/SSP5-8.5 の場合は  $133.0 \pm 40.7$  mm (平均値  $\pm$  標準偏差)、RCP2.6/SSP1-2.6 の場合は  $48.6 \pm 6.2$  mm であった。与える大気強制によって結果が大きく異なる結果は、効果的に気候変動を低減することが、今後の海水準上昇を抑制する上で重要であることを示している。CMIP5 によって提案された従来の気候変動予測 (SSP5-8.5 and SSP1-2.6 pathways) と比較して、CMIP6 による新しい予測 (SSP5-8.5 and SSP1-2.6 pathways) がより大きな氷床質量損失をもたらしており、この結果は大きな示唆を含むものである。図 2 において緑のハッチで示された範囲は、MIROC5-RCP8.5 の元で得られた海洋強制に起因する不確定幅である。この結果は、海洋の影響は無視できないものの、明らかに大気の方が大きな影響を与えることを示している。我々が SICOPOLIS によって得た結果を、別の氷床モデル ISSM によって得られた結果と比較すると、後者の方が気候に対する感度がやや小さい。しかしながら、氷床モデルによって生じる不確実性と比較して、気候モデルによって異なる大気強制が原因で生じる不確実性の方が圧倒的に大きいことも明らかになった。

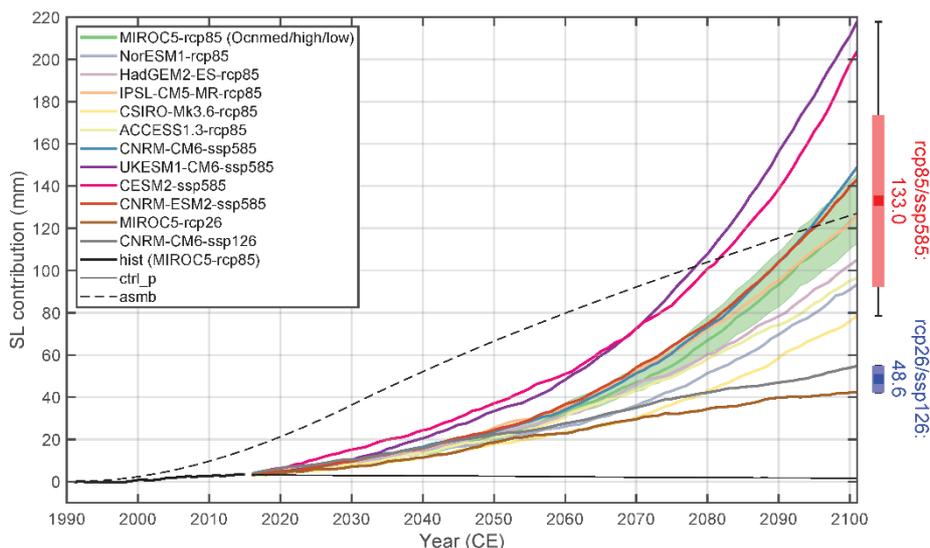


図 2 SICOPOLIS によって ISMIP6 の条件下で計算された、グリーンランド氷床の質量損失に起因する海水準変動 (SL)。hist は過去の変動実験、ctrl\_p は一定気候実験、asmb は模式的な表面質量収支変動実験の結果を示す。その他の実験結果は、RCP8.5/SSP5-8.5 または RCP2.6/SSP1-2.6 の下で大気大循環モデルによって得られた大気・海洋強制に対する氷床変動を示す。

(5) 現在の氷河地形に基づいて、ボードイン氷河の流動状態を Elmer/Ice モデルによって再現した。コントロール法で底面摩擦を最適化したところ、3 か所で大きな摩擦抵抗が生まれていることが明らかになった (図 3)。モデルによって得られた流動速度は観測と良く一致するものである。観測で示されたように、潮汐と氷河末端付近での流動変化は、逆相関することが示された

(満潮時に流動が遅くなる)。しかしながら、潮汐によって生じる流動変化の振幅は観測値の約1/3であり、その原因として氷河表面・底面の地形データの不備、またはクレバスによって氷河の流動性が高められている可能性が考えられる。さらに数値実験の結果によって、ボードイン氷河は末端付近の基盤凸部によって安定性が高められていることが示された。今後の氷河後退によっては、この基盤地形が原因で氷河が不安定化する可能性がある。

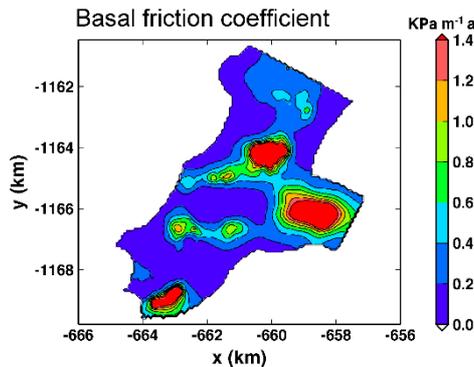


図3 ボードイン氷河の数値モデルを使って、参照実験によって得られた氷河底面摩擦係数の分布。赤・橙で示された値の高い部分が、底面の摩擦抵抗が大きい領域を示す。

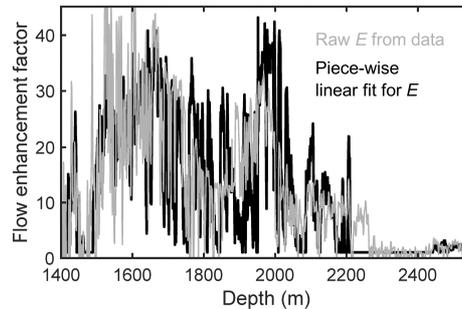


図4 NEEM 氷コアの底部 1150 m に対する流動エンハンスメントファクター  $E$  の値(結晶構造と不純物に起因する値)。灰線:観測された流動速度から直接求められた  $E$  の値。黒線:酸素同位体( $\delta^{18}O$ :氷の酸素安定同位体、気温の指標として用いられる)と  $E$  の間に単純な区間線形関係を仮定して計算された値。 $E=1$  の場合は氷は通常の粘性係数を持ち、その値は温度と有効応力によってのみ変化する。

(6)NEEM 掘削孔において実施された観測によって、氷の流動性と酸素同位体比との間に顕著な相関関係が見いだされた。すなわち、同位体によって温暖と推定される時期の氷は硬く、寒冷と推定される時期の氷は流動性が高い。この関係は、掘削孔の収縮およびせん断ひずみの両者について、ダンスガード・オシュガーイベントによる1000年スケールの変動についてまで確認できる。掘削地点における氷流動が浅層近似に従うと仮定して、エンハンスメントファクターと呼ばれる氷流動係数と酸素同位体の関係を区分線形の関係で表した。最終氷期の最寒冷期においては、エンハンスメントファクターの値は約40に達した(図4)。この値は通常氷期の氷に対して与えられる値よりも顕著に大きなものである。この関係が普遍的なものであるか、場所によって大きく異なるものなのか、更なるコアの掘削と解析が必要である。

#### <引用文献>

Vaughan et al., 2013. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis, pp. 317-382. Cambridge University Press. Van den Broeke et al., 2009. Science 326, 984-986. Rignot et al., 2013. Science 341, 266-270. Helm et al., 2014. Cryosphere 8, 1539-1559. Bindschadler et al., 2013. J. Glaciol. 59, 195-224. Morlighem et al., 2017. Geophys. Res. Lett. 44, 11051-11061. Zwally et al., 2012. GSFC Cryospheric Sciences Laboratory, at [tinyurl.com/zwally2012drainage](http://tinyurl.com/zwally2012drainage). Joughin et al., 2018. J. Glaciol. 64, 1-11. Bamber et al., 2013. Science 341, 997-999.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 16件／うち国際共著 18件／うちオープンアクセス 22件）

1. 著者名 Tsutaki, S., S. Sugiyama, D. Sakakibara and T. Sawagaki	4. 巻 62
2. 論文標題 Surface elevation changes during 2007-2013 on Bowdoin and Tugto Glaciers, northwestern Greenland	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Glaciology	6. 最初と最後の頁 1083-1092
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/jog.2016.106	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Nowicki, S. M. J., A. Payne, E. Larour, H. Seroussi, H. Goelzer, W. Lipscomb, J. Gregory, A. Abe-Ouchi and A. Shepherd	4. 巻 9
2. 論文標題 Ice Sheet Model Intercomparison Project (ISMIP6) contribution to CMIP6	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Geoscientific Model Development	6. 最初と最後の頁 4521-4545
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/gmd-9-4521-2016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Bernales, J., I. Rogozhina, R. Greve and M. Thomas	4. 巻 11
2. 論文標題 Comparison of hybrid schemes for the combination of shallow approximations in numerical simulations of the Antarctic Ice Sheet	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Cryosphere	6. 最初と最後の頁 247-265
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/cp-10-393-2014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Greve, R., R. Calov and U. C. Herzfeld	4. 巻 75
2. 論文標題 Projecting the response of the Greenland ice sheet to future climate change with the ice sheet model SICOPOLIS	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 低温科学 (Low Temperature Science)	6. 最初と最後の頁 117-129
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14943/lowtemsci.75.117	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Jouvet, G., Y. Weidmann, J. Seguinot, M. Funk, T. Abe, D. Sakakibara, H. Seddik and S. Sugiyama	4. 巻 11
2. 論文標題 Initiation of a major calving event on Bowdoin Glacier captured by UAV photogrammetry	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Cryosphere	6. 最初と最後の頁 911-921
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/tc-11-911-2017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tsutaki, S., S. Sugiyama and D. Sakakibara	4. 巻 1
2. 論文標題 Surface elevations on Qaanaaq and Bowdoin Glaciers in northwestern Greenland as measured by a kinematic GPS survey from 2012-2016	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Polar Data Journal	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20575/00000001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sakakibara, D. and S. Sugiyama	4. 巻 64
2. 論文標題 Ice front and flow speed variations of marine-terminating outlet glaciers along the coast of Prudhoe Land, northwestern Greenland	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Glaciology	6. 最初と最後の頁 300-310
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jog.2018.20	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Goelzer, H., and 30 others (including A. Abe-Ouchi as 5th author, R. Greve as 12th author, F. Saito as 25th author)	4. 巻 12
2. 論文標題 Design and results of the ice sheet model initialisation experiments initMIP-Greenland: an ISMIP6 intercomparison	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Cryosphere	6. 最初と最後の頁 1433-1460
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/tc-12-1433-2018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Calov, R., S. Beyer, R. Greve, J. Beckmann, M. Willeit, T. Kleiner, M. Rueckamp, A. Humbert and A. Ganopolski	4. 巻 12
2. 論文標題 Simulation of the future sea level contribution of Greenland with a new glacial system model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Cryosphere	6. 最初と最後の頁 3097-3121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/tc-12-3097-2018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Greve, R.	4. 巻 3
2. 論文標題 Geothermal heat flux distribution for the Greenland ice sheet, derived by combining a global representation and information from deep ice cores	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Polar Data Journal	6. 最初と最後の頁 22-36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20575/00000006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Seddik, H., R. Greve, D. Sakakibara, S. Tsutaki, M. Minowa and S. Sugiyama	4. 巻 65
2. 論文標題 Response of the flow dynamics of Bowdoin Glacier, northwestern Greenland, to basal lubrication and tidal forcing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Glaciology	6. 最初と最後の頁 225-238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jog.2018.106	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Chambers, C., R. Greve, B. Altena and P.-M. Lefevre	4. 巻 2019
2. 論文標題 On the possibility of a long subglacial river under the north Greenland ice sheet	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Cryosphere Discussions	6. 最初と最後の頁 1-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/tc-2019-141	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Rueckamp, M., R. Greve and A. Humbert	4. 巻 21
2. 論文標題 Comparative simulations of the evolution of the Greenland ice sheet under simplified Paris Agreement scenarios with the models SICOPOLIS and ISSM	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Polar Science	6. 最初と最後の頁 14-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polar.2018.12.003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Rezvanbehbahani, S., L. A. Stearns, C. J. van der Veen, G. K. A. Oswald and R. Greve	4. 巻 65
2. 論文標題 Constraining the geothermal heat flux in Greenland at regions of radar-detected basal water	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Glaciology	6. 最初と最後の頁 1023-1034
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jog.2019.79	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Goelzer, H. and 41 others (including A. Abe-Ouchi as 8th author, C. Chambers as 16th author, R. Greve as 24th author)	4. 巻 2020
2. 論文標題 The future sea-level contribution of the Greenland ice sheet: a multi-model ensemble study of ISMIP6	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Cryosphere Discussions	6. 最初と最後の頁 1-43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/tc-2019-319	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Nowicki, S. and 29 others (including A. Abe-Ouchi as 6th author)	4. 巻 2020
2. 論文標題 Experimental protocol for sea level projections from ISMIP6 standalone ice sheet models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Cryosphere Discussions	6. 最初と最後の頁 1-40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/tc-2019-322	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 van Dongen, E., G. Jovet, A. Walter, J. Todd, T. Zwinger, I. Asaji, S. Sugiyama, F. Walter and M. Funk	4. 巻 66
2. 論文標題 Tides modulate crevasse opening prior to a major calving event at Bowdoin Glacier, Northwest Greenland	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Glaciology	6. 最初と最後の頁 113-123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jog.2019.89	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計37件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 19件)

1. 発表者名 Sugiyama, S.
2. 発表標題 The ice sheet-glacier-ocean interaction in Greenland
3. 学会等名 Arctic Circle Assembly 2016 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Greve, R. and R. Calov
2. 発表標題 InitMIP-Greenland experiments with the ice sheet model SICOPOLIS
3. 学会等名 Seventh Symposium on Polar Science, National Institute of Polar Research
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Sugiyama, S., S. Tsutaki, D. Sakakibara, J. Saito, Y. Ohashi, M. Maruyama, N. Katayama, E. Podolskiy, M. Minowa, S. Matsuno, T. Sawagaki, S. Matoba, M. Funk, R. Genco and H. Enomoto
2. 発表標題 Recent ice mass loss of outlet glaciers and ice caps in the Qaanaaq region, northwestern Greenland
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Seddik, H., R. Greve, S. Sugiyama, D. Sakakibara, S. Tsutaki and M. Minowa
2. 発表標題 Modeling the flow dynamics of Bowdoin Glacier, Qaanaaq region, northwestern Greenland
3. 学会等名 IGS-IACS-CLiC International Symposium on the Cryosphere in a Changing Climate (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Greve, R.
2. 発表標題 InitMIP-Greenland experiments with the ice sheet model SICOPOLIS
3. 学会等名 NIPR Workshop 「グリーンランド氷床の変動と気候・環境変動の関わりに関する研究」, National Institute of Polar Research
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Greve, R. and R. Calov
2. 発表標題 InitMIP-Greenland experiments with the ice sheet model SICOPOLIS
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Greve, R., D. Dahl-Jensen and C. S. Hvidberg
2. 発表標題 Connection between climatic state and ice softness derived from deformation measurements of the Greenlandic NEEM borehole
3. 学会等名 日本雪氷学会・雪氷研究大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Greve, R.
2. 発表標題 Ice sheets, global warming and sea level
3. 学会等名 Chitose International Forum on Photonics Science & Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Greve, R., D. Dahl-Jensen and C. S. Hvidberg
2. 発表標題 Connection between climatic state and ice softness derived from deformation measurements of the Greenlandic NEEM borehole
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Greve, R., M. Rueckamp and A. Humbert
2. 発表標題 Simulations of the evolution of the Greenland ice sheet under Paris Agreement warming scenarios
3. 学会等名 Fifth International Symposium on Arctic Research (ISAR-5) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Chambers, C. and R. Greve
2. 発表標題 Simulating the effect on ice flow from a geothermal hot spot under the north-east Greenland ice sheet
3. 学会等名 NIPR Workshop 「グリーンランド氷床の変動と気候・環境変動及び人間活動の関わりに関する研究」, National Institute of Polar Research
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Greve, R., M. Rueckamp and A. Humbert
2. 発表標題 Simulations of the evolution of the Greenland ice sheet under Paris Agreement warming scenarios
3. 学会等名 NIPR Workshop 「グリーンランド氷床の変動と気候・環境変動及び人間活動の関わりに関する研究」, National Institute of Polar Research
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Chambers, C. and R. Greve
2. 発表標題 The riddle of the North-East Greenland Ice Stream; simulations testing if a large ancient volcanic area, under 3 km of ice, triggers the greatest flow of ice on Greenland
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Greve, R.
2. 発表標題 Geothermal heat flux distribution for the Greenland ice sheet, derived by combining a global representation and information from deep ice cores
3. 学会等名 IGS Nordic Branch Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Chambers, C., R. Greve, B. Altena and P.-M. Lefeuvre
2. 発表標題 Effects on SICOPOLIS Greenland ice sheet simulations of a hot spot and large basal river, two proposed geographic features hidden at the base of the ice
3. 学会等名 Ninth Symposium on Polar Science, National Institute of Polar Research
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Greve, R.
2 . 発表標題 Geothermal heat flux distribution for the Greenland ice sheet, derived by combining a global representation and information from deep ice cores
3 . 学会等名 Ninth Symposium on Polar Science, National Institute of Polar Research
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Chambers, C., R. Greve, B. Altena and P.-M. Lefeuvre
2 . 発表標題 Hot spots and large basal rivers? Effects on Greenland ice sheet simulations of proposed geographic features hidden at the base of the ice
3 . 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Sugiyama, S.
2 . 発表標題 Glacier change, ice-ocean interaction, and their impacts on human society in Qaanaaq, northwestern Greenland
3 . 学会等名 IASC Workshop on the Dynamics and Mass Budget of Arctic Glaciers and Mass Budget of Arctic Glaciers & Proglacial Marine Ecosystems (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Abe-Ouchi, A.
2 . 発表標題 Introduction: Cryosphere and climate interactions from past to future
3 . 学会等名 EGU General Assembly (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Rueckamp, M., R. Greve, and A. Humbert
2. 発表標題 Comparative simulations of the evolution of the Greenland ice sheet under simplified Paris Agreement scenarios with the models SICOPOLIS and ISSM
3. 学会等名 EGU General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chambers, C., R. Greve, B. Altena and P.-M. Lefeuvre
2. 発表標題 An investigation into a potential long subglacial river beneath the Greenland ice sheet using SICOPOLIS simulations
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Greve, R.
2. 発表標題 History and Japanese contribution to the International Association of Cryospheric Sciences IACS
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Greve, R., C. Chambers, T. Obase, F. Saito, S. Tsutaki and A. Abe-Ouchi
2. 発表標題 Optimizing basal sliding in spin-up simulations of the Greenland and Antarctic ice sheets with the model SICOPOLIS
3. 学会等名 IUGG General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Chambers, C., R. Greve, B. Altena and P.-M. Lefeuvre
2 . 発表標題 On the possibility of a long subglacial river under the north Greenland ice sheet
3 . 学会等名 日本雪氷学会・雪氷研究大会
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Greve, R., C. Chambers, R. Calov, T. Obase, F. Saito, S. Tsutaki and A. Abe-Ouchi
2 . 発表標題 ISMIP6 future projections for Greenland and Antarctica with the ice sheet model SICOPOLIS
3 . 学会等名 日本雪氷学会・雪氷研究大会
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Chambers, C., R. Greve, B. Altena and P.-M. Lefeuvre
2 . 発表標題 On the possibility of a long subglacial river under the north Greenland ice sheet
3 . 学会等名 Tenth Symposium on Polar Science, National Institute of Polar Research
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Greve, R., C. Chambers, R. Calov, T. Obase, F. Saito, S. Tsutaki and A. Abe-Ouchi
2 . 発表標題 ISMIP6 future projections for Greenland and Antarctica with the ice sheet model SICOPOLIS
3 . 学会等名 Tenth Symposium on Polar Science, National Institute of Polar Research
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Chambers, C., R. Greve, B. Altena and P.-M. Lefeuvre
2 . 発表標題 On the possibility of a long subglacial river under the north Greenland ice sheet
3 . 学会等名 AGU Fall Meeting ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Greve, R., C. Chambers, R. Calov, T. Obase, F. Saito, S. Tsutaki and A. Abe-Ouchi
2 . 発表標題 ISMIP6 future projections for Greenland and Antarctica with the ice sheet model SICOPOLIS
3 . 学会等名 AGU Fall Meeting ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Sugiyama, S., S. Tsutaki, D. Sakakibara and I. Asaji
2 . 発表標題 Short-term ice speed variations near the calving front of Bowdoin Glacier, northwestern Greenland
3 . 学会等名 Workshop on the Dynamics and Mass Budget of Arctic Glaciers & IASC Network on Arctic Glaciology Annual Meeting ( 国際学会 )
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Chambers, C., R. Greve, B. Altena and P.-M. Lefeuvre
2 . 発表標題 On the possibility of a long subglacial river under the North Greenland ice sheet
3 . 学会等名 Sixth International Symposium on Arctic Research (ISAR-6 online meeting) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 Rueckamp, M., R. Greve, C. Chambers, R. Calov and A. Humbert
2. 発表標題 ISMIP6 future projections for the Greenland ice sheet with the models SICOPOLIS and ISSM
3. 学会等名 Sixth International Symposium on Arctic Research (ISAR-6 online meeting) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Ralf Greve's homepage  <a href="http://www.ice.lowtem.hokudai.ac.jp/~greve/">http://www.ice.lowtem.hokudai.ac.jp/~greve/</a>  Project homepage  <a href="http://www.ice.lowtem.hokudai.ac.jp/~greve/progris/">http://www.ice.lowtem.hokudai.ac.jp/~greve/progris/</a></p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	阿部 彩子  (Abe-Ouchi Ayako)  (30272537)	東京大学・大気海洋研究所・教授    (12601)	
研究分担者	杉山 慎  (Sugiyama Shin)  (20421951)	北海道大学・低温科学研究所・教授    (10101)	
連携研究者	齋藤 冬樹  (Saito Fuyuki)  (60396942)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・その他部局等・研究員    (82706)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	榎本 浩之 (Enomoto Hiroyuki)  (00213562)	国立極地研究所・大学共同利用機関等の部局等・教授  (62611)	
連携研究者	東 久美子 (Goto-Azuma Kumiko)  (80202620)	国立極地研究所・大学共同利用機関等の部局等・教授  (62611)	
連携研究者	セディック ハキム (Seddik Hakime)  (10507172)	北海道大学・低温科学研究所・研究員  (10101)	2017年3月退職