

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22244058

研究課題名(和文) 過去と将来の気候における南極氷床の変動と力学的挙動に関する数値シミュレーション

研究課題名(英文) Simulations of the evolution and dynamics of the Antarctic ice sheet in past and future climates

研究代表者

R・G Greve (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) 28,300,000円、(間接経費) 8,490,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、南極とグリーンランド氷床の過去と将来の変動を、数値モデルによって解析した。重要な成果として、最終氷期(2万年前)における南極氷床の棚氷が現在よりも小さかったにも関わらず、その底面融解量が現在よりも大きかったことが判明した。我々はこの数値モデルを用いて、様々な温暖化シナリオの下で将来の氷床変動を見積もる国際プロジェクトSeaRISEに参画した。その結果、最も大きな気候変動シナリオRCP8.5における100及び500年後の海水準上昇への寄与は、南極氷床が0.1及び1.5 m、グリーンランド氷床が0.2及び2.0 mと示された。これらの成果はIPCC AR5の記述に引用された。

研究成果の概要(英文)：We investigated the evolution and dynamics of the Antarctic ice sheet and, complementarily, of the Greenland ice sheet, in changing climates in the past and future by numerical modelling. An interesting finding was that at the Last Glacial Maximum 20,000 years ago the total area of the floating ice shelves of Antarctica was smaller than today, but the total amount of basal melting under the ice shelves was significantly larger. We participated in the international community effort SeaRISE and assessed the likely contribution of the Antarctic and Greenland ice sheets to sea level rise under a variety of future climate scenarios. For the strongest RCP 8.5 "business as usual" scenario, the model-averaged values were approximately 0.1 m after 100 years and 1.5 m after 500 years for Antarctica, and 0.2 m after 100 years and 2.0 m after 500 years for Greenland. These results served as input for the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学 ・ 気象・海洋物理・陸水学

キーワード：氷床 棚氷 力学 数値モデル 南極 グリーンランド 気候変動 海面上昇

1. 研究開始当初の背景

南極氷床は地球上で最も大きな氷体であり、氷の全量は海水準 60 m に相当する。南極では気温が非常に低いため、氷床表面での融解はほとんど生じない。その代わりに、流れの速い氷流が氷を沿岸に運び、冰山を海洋へと排出している。

南極氷床の交換速度(氷床質量と年間涵養量の比)は 1.2 万年に達するが、近年の地球温暖化に対して驚くべき速度で変化を示している。この事実は、2007 年に公開された IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) の第 4 次レポート(AR4)にまとめられた観測データによって示されたものである。したがって、10~100 年スケールの地球温暖化現象においても、南極氷床の変動に影響が及ぶことが予想される。こうした背景から、IPCC AR4 では「近年の観測で示唆される氷流動に起因した氷床変動プロセスは、現状の数値モデルでは考慮されていない。このようなプロセスが、気候変動に対する氷床の脆弱性の原因となり、将来の海水準上昇を加速させる可能性がある。氷流動に関するプロセスの理解はまだ限定的であり、その影響の大きさには統一的な見解が得られていない」との記述がなされた。この記述は、気候温暖化に対する氷床変動予測を精緻化するために、氷床数値モデリングの専門家に努力を促したものである。

2. 研究の目的

本研究プロジェクトは、IPCC AR4 における上記の記述に応えるものである。この研究では、南極氷床の過去(氷期間氷期変動)と将来の変動(気候温暖化に影響を受けた変動)を解析するものであり、特にその将来変動に重点を置いた取り組みである。2013 年に公開された IPCC AR5 へのデータ提供を、研究の最終目的とする。

この目的を達成するために我々は、国際的な氷床モデル比較プロジェクト SeaRISE (Sea-level Response to Ice Sheet Evolution) に参画した。このプロジェクトは、複数の氷床モデルを使った数値シミュレーションを比較して、地球温暖化の影響を受けて変動する南極とグリーンランド氷床が、今後 100 年の間に海水準上昇に与える影響を、より正確に見積もることを目的としたものである(tinyurl.com/srise-lanl, tinyurl.com/srise-umt)。SeaRISE の枠組みの下で我々は、2 種類の数値実験を実施した。第 1 の実験では、(1)気温と降水量、(2)氷床の底面すべり、(3)海洋の変化(南極氷床に関しては棚氷の底面融解、グリーンランド氷床に関しては海洋における氷融解)、それぞれに対する氷床変動の感度実験を行った。第 2 の実験は「R8 実験」と呼ばれるもので、南極とグリーンランドそれぞれ異なった形で、上記 3 つの外部強制を組み合わせた条件の下で行う。R8 実験で使用され

る外部強制条件は、IPCC AR5 で規定された RCP (Representative Concentration Pathway) 8.51 と呼ばれる将来の気候変動シナリオに基づいている。

南極氷床に関しては、その将来変動に加えて、過去の氷床変動に関する実験も実施した。約 2 万年前の最終氷期に焦点を絞り、現在よりも大きな氷床と比較的小さな棚氷からなる当時の氷床を再現し、南極氷床を取り巻く海洋との相互作用を詳しく解析した。

比較的小さな空間スケールでの氷床変動プロセスも、本研究が取り組む課題のひとつである。この取り組みでは、東南極クイーンモードランドに位置するしらせ流域を対象として研究を進めた。しらせ流域は、日本の深層氷コア掘削地であるドームふじ基地と、昭和基地が位置するリュッツォホルム湾とをつないでおり、しらせ氷河の速い流動場の特徴づけられている。ここでは特に、しらせ氷河の流動が現在の氷床に与える影響と、その将来変動の解明を試みた。

3. 研究の方法

研究プロジェクトの中心となるのは、氷床全域の変動を扱う数値モデル SICOPOLIS (www.sicopolis.net) の改良モデルである。本プロジェクトが開始された 2012 年 4 月の時点では、SICOPOLIS version 2.9 が運用されていた。このバージョンでは、浅層近似と呼ばれる計算手法が用いられており、氷床変動に重要な役割を果たす氷床と海洋の相互作用を適切に扱うことができなかった。そこで我々は、モデルに様々な改良を加えて version 3.0 と 3.1 を開発した。これらのバージョンでは、接地線の移動、海洋との境界で生じるカービング、棚氷の底面融解など、氷床・海洋相互作用を計算に組み込めるようになっている。

南極氷床全域の数値実験は SICOPOLIS で実施した。グリーンランド氷床に関する SeaRISE の実験は、SICOPOLIS に加えて、東京大学と JAMSTEC (海洋研究開発機構) で開発されたモデル IcIES と、フルストークスと呼ばれる手法に基づいた Elmer/Ice (elmerice.elmerfem.org) によっても行われた。さらに Elmer/Ice はしらせ流域の数値実験にも適用した。

4. 研究成果

(1) Iizuka et al. (2010) による研究では、SICOPOLIS version 2.9 を比較的低解像度かつ棚氷と結合しない条件で使用して、42.2 万年前から現在までの南極氷床の変動を再現した。この数値実験の結果、しらせ流域と宗谷流域の分氷嶺が過去に移動したことが示された。この結果は、氷床沿岸部で採取された氷の酸素同位体 ($\delta^{18}\text{O}$) とイオン濃度が示唆する氷床変動と整合するものである。

SICOPOLIS への氷床・棚氷結合動力学プロ

セスの組み込みは無事に完了した。この作業の主要部分は、佐藤建の博士研究 (tinyurl.com/sato2012) の一部によって行われたものである。得られた結果の一部は論文として公表した (Sato and Greve, 2012)。氷床の将来変動予測には、数値実験の基点となる氷床形状の初期条件が必要となるが、この初期条件を規定するために、Eemian 間氷期から現在まで 12.5 万年にわたるシミュレーションを行った。氷床形状が自由に变化する条件で実験したところ、観測された氷床形状、特に接地氷床と棚氷の分布を再現することが非常に困難であった。そこで、氷床形状を固定して、氷の流動速度と温度だけが变化する条件でスピナップ実験 (過去に観測された気候条件下で実験を行って氷床形状の初期条件を導く手法) を行うこととした。図 1 は 20 km の解像度で計算された氷床表面流動速度である。沿岸に向かう水流と棚氷の速い流れが良く再現されている。これらの計算結果を観測値と比較検証したところ、良い一致を示した (Sato, tinyurl.com/sato2012, Fig. 6.1)。

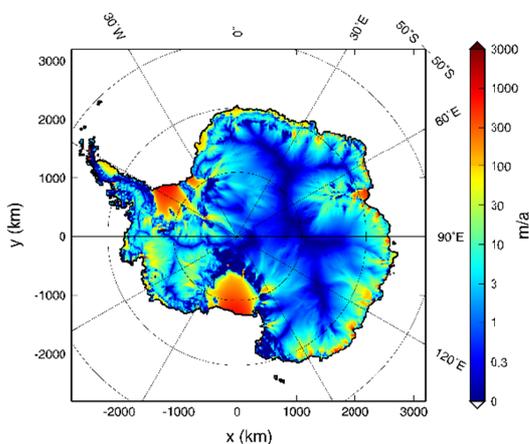


図 1: 数値氷床モデル SICOPOLIS によって計算された南極氷床の表面流動速度。

(2) グリーンランド氷床に関する実験は SICOPOLIS、IcIES、そして Elmer/Ice を使って行われた。Greve et al. (2011) による初期の研究では、SICOPOLIS と IcIES によるスピナップ実験と将来変動実験を比較した。その結果、SICOPOLIS に関しては、上記の南極氷床実験で用いたスピナップ (氷床形状を一定に固定して氷の流動速度と温度のみが変化) を採用することにした。その一方で IcIES を用いた実験では、氷床形状が变化する条件でスピナップを行ったが、その結果氷床の大きさが観測値よりも有意に大きなものとなった。

フルストークスモデルである Elmer/Ice (Gagliardini et al., 2013) は計算に時間がかかるため、長期間にわたるスピナップ実験は難しい。そこで SICOPOLIS によって得られたスピナップの結果を初期条件として用いて、100 年スケールの将来変動実験を行った。Seddik et al. (2012) による研究では、SeaRISE

によるスピナップの結果も使って、浅層近似モデルである SICOPOLIS との比較を行っている。その結果 Elmer/Ice は、底面すべりの増加に対して SICOPOLIS よりも大きな氷損失を予測する一方、気温上昇に対する損失量は比較的小さく見積もることが示された。

Greve and Herzfeld (2013) で公表した研究では、SICOPOLIS を用いて 20、10 および 5 km の空間解像度でグリーンランド氷床のスピナップ実験を行い、特に 4 つの主要な氷流・溢流氷河についてその結果を比較した。計算された流動速度を観測値と比較したところ、両者の整合性は解像度によって異なり、20 km 解像度では観測結果をほとんど再現できないのに対して、5 km 解像度では比較的良好な一致が示された。解像度を変えた設定で、SeaRISE による条件を使った将来変動予測も行った。その結果、氷床体積の絶対値は解像度に強く依存するものの、外部強制に対する体積変化の感度 (標準実験と外部強制実験によって得られた氷床体積の比) の解像度による違いは、海水準相当で数 cm 程度であった。

(3) SeaRISE 実験は、気温と降水に関する大気の変化、底面すべりの変化、海洋の変化、さらに RCP8.5 に相当する R8 実験、それぞれに対して 3 つの感度実験から構成されている。南極氷床に関しては 6 つの氷床モデル (本研究からは SICOPOLIS)、グリーンランド氷床に関しては 9 つのモデル (本研究からは SICOPOLIS、IcIES、Elmer/Ice) が参画し、Elmer/Ice は SeaRISE における唯一のフルストークスモデルとなった。SeaRISE 実験の最も重要な成果のひとつは、南極氷床の変動は棚氷の底面融解に最も敏感であるのに対して、グリーンランド氷床の変動には大気 (気温・降水量) の変化が最も重要となる点である。

R8 実験において計算された氷床体積変化 (海面より上にある氷の体積変化を標準実験の結果と比較した値) を図 2 (南極氷床) と図 3 (グリーンランド氷床) に示す (Bindschadler et al., 2013)。南極氷床では、全てのプロセスを組み入れて計算した 4 つの数値実験 (実線) は、氷床体積減少、すなわち海水準上昇への寄与を示している。しかしながら、その値は数値モデルによって大きく異なる。各モデルの平均値は SICOPOLIS の結果と非常に近い値を示し、海水準に換算した体積減少量は 100 年後に 0.08 m、200 年後に 0.27 m、500 年後に 1.51 m となっている。グリーンランド氷床の変動量は、各モデルの平均値で 100 年後に 0.22 m、200 年後に 0.53 m、500 年後に 2.02 m であった。グリーンランド氷床の減少量は南極氷床よりもやや大きいものの、両者は概ね近い値を示した。

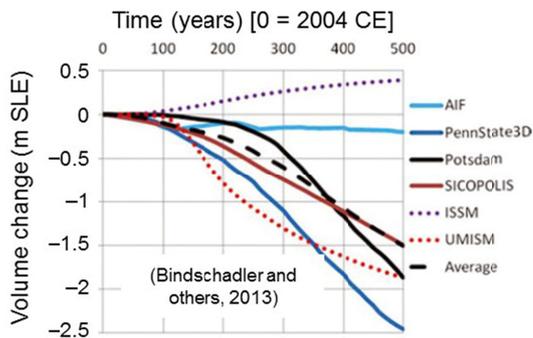


図2: 南極氷床に関するR8複合実験の結果得られた氷の体積変化(海水準相当のm単位)。点線は棚氷底面融解を考慮しない実験結果で、平均値には含まれていない。

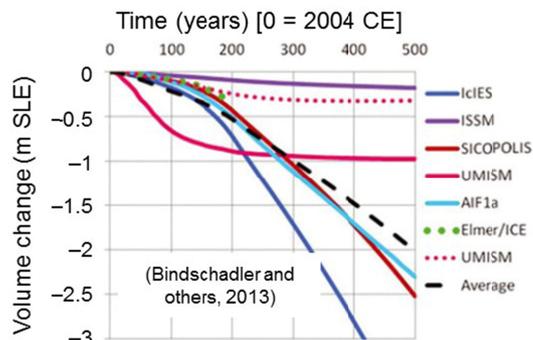


図3: 図2と同じ実験をグリーンランド氷床について行った結果。

SeaRISE 実験のより詳細な結果解析は、Nowicki et al. (2013a,b)によって報告された。更に我々は Levermann et al. (2013)による以下の研究に協力した。この研究では SeaRISE の結果を用いて、南極氷床の4つの流域で棚氷の底面融解と氷床変動の関係性を明らかにしている。さらに気候モデル比較実験CMIP-5 (Coupled Model Intercomparison Project)、および EU プロジェクト Ice2Sea に基づいて予測される海水温度の変化に、線形反応理論を適用することで、氷床の将来変動予測を行った。その結果、IPCC で検討された4つの気候変動シナリオ(RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5)のもとで、2100年までに各流域が失う氷量が示された。

(4) Kusahara et al. (T. Sato, R. Greve, A. Abe-Ouchi を著者に含む; Ann. Glaciol. 56(69)に投稿中)では、SICOPOLIS を用いて12.5万年前から2万年前までの実験を行い、最終氷期における南極氷床棚氷の再現を試みた。その結果、最終氷期の棚氷面積は現在よりも小さかったにもかかわらず、当時の棚氷底面融解総量は現在の3倍に達することが、棚氷・海水・海洋結合モデルによる解析で示された。このような結果が得られた原因は、最終氷期の南極では、南極周極深層流の暖かい海水がより容易に棚氷の底面に流入していたためと考えられる。

(5) 海外研究協力者である B. Galton-Fenzi (ACE CRC, Tasmania, Australia)との共同研究

によって、南極棚氷底面における現在の融解量をより正確に推定するため、物理過程に基づくパラメータ化手法を開発し、海洋モデルによる最適化を行った。この手法では南極の棚氷を6つの領域(東まわりに Amundsen/Bellingshausen Seas and western Peninsula, Weddell embayment, East Antarctica I, Amery Ice Shelf, East Antarctica II, Ross embayment)に分け、棚氷底面における海水温度と融解温度との差に対して、それぞれ異なった融解感度を設定している。計算される底面融解量は海水温度の変化に依存するため、現在とは異なる気候条件での融解量を予想することができる。この研究結果の一部は、2013年12月のAGU(米国地球物理連合大会)(R. Greve, T. Sato and B. Galton-Fenzi による発表)を含むいくつかの学会で報告された。

(6) さらに我々は、東南極のしらせ流域に Elmer/Ice を適用して実験を行った。ここでは流れの速い部分と遅い部分に着目して、フルストークスモデルと浅層近似モデルとの比較を行った。この実験の初期的な結果は、2013年に東京の国立極地研究所で開催された極域シンポジウムで公表されている(T. Zwinger, H. Seddik, R. Greve, F. Saito, A. Abe-Ouchi による発表)。しかしながら、予測できなかった数値計算上の問題が発生し、本プロジェクト期間内に研究は完了していない。今後数か月にわたって実施する実験によって最終的な結果が得られる見込みである。

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13件)

Levermann, A., and 14 others (including R. Greve as 6th author). 2013. Projecting Antarctic ice discharge using response functions from SeaRISE ice-sheet models. Earth Syst. Dynam. Discuss 4(2), 1117-1168. DOI: 10.5194/esdd-4-1117-2013. 査読無

Gagliardini, O., and 14 others (including R. Greve as 7th author). 2013. Capabilities and performance of Elmer/Ice, a new-generation ice sheet model. Geosci. Model Dev. 6(4), 1299-1318. DOI: 10.5194/gmd-6-1299-2013. 査読有

Greve, R. and U. C. Herzfeld. 2013. Resolution of ice streams and outlet glaciers in large-scale simulations of the Greenland ice sheet. Ann. Glaciol. 54(63), 209-220. DOI: 10.3189/2013AoG63A085. 査読有

Nowicki, S., and 30 others (including A. Abe-Ouchi as 3rd author, R. Greve as 9th author, F. Saito as 25th author). 2013a. Insights into spatial sensitivities of ice mass response to environmental change from the SeaRISE ice sheet modeling project I:

Antarctica. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 118(2), 1002-1024.

DOI: 10.1002/jgrf.20081. 査読有

Nowicki, S., and 30 others (including A. Abe-Ouchi as 3rd author, R. Greve as 9th author, F. Saito as 25th author). 2013b. Insights into spatial sensitivities of ice mass response to environmental change from the SeaRISE ice sheet modeling project II: Greenland. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 118(2), 1025-1044.

DOI: 10.1002/jgrf.20076. 査読有

Bindschadler, R. A. and 27 others (including A. Abe-Ouchi as 3rd author, R. Greve as 8th author, F. Saito as 22nd author). 2013. Ice-sheet model sensitivities to environmental forcing and their use in projecting future sea level (the SeaRISE project). *J. Glaciol.* 59(214), 195-224.

DOI: 10.3189/2013JoG12J125. 査読有

Gillet-Chaulet, F., O. Gagliardini, H. Seddik, M. Nodet, G. Durand, C. Ritz, T. Zwinger, R. Greve and D. G. Vaughan. 2012. Greenland ice sheet contribution to sea-level rise from a new-generation ice-sheet model. *The Cryosphere* 6(6), 1561-1576.

DOI: 10.5194/tc-6-1561-2012. 査読有

Herzfeld, U. C., J. L. Fastook, R. Greve, B. McDonald, B. F. Wallin and P. A. Chen. 2012. On the influence of Greenland outlet glacier bed topography on results from dynamic ice-sheet models. *Ann. Glaciol.* 53(60), 281-293.

DOI: 10.3189/2012AoG60A061. 査読有

Sato, T. and R. Greve. 2012. Sensitivity experiments for the Antarctic ice sheet with varied sub-ice-shelf melting rates. *Ann. Glaciol.* 53(60), 221-228.

DOI: 10.3189/2012AoG60A042. 査読有

Seddik, H., R. Greve, T. Zwinger, F. Gillet-Chaulet and O. Gagliardini. 2012. Simulations of the Greenland ice sheet 100 years into the future with the full Stokes model Elmer/Ice. *J. Glaciol.* 58(209), 427-440.

DOI: 10.3189/2012JoG11J177. 査読有

Blatter, H., R. Greve and A. Abe-Ouchi. 2011. Present state and prospects of ice sheet and glacier modelling. *Surv. Geophys.* 32(4-5), 555-583.

DOI: 10.1007/s10712-011-9128-0. 査読有

Greve, R., F. Saito and A. Abe-Ouchi. 2011. Initial results of the SeaRISE numerical experiments with the models SICOPOLIS and IcIES for the Greenland ice sheet. *Ann. Glaciol.* 52(58), 23-30.

DOI: 10.3189/172756411797252068. 査読有

Iizuka, Y., H. Miura, S. Iwasaki, H.

Maemoku, T. Sawagaki, R. Greve, H. Satake, K. Sasa and Y. Matsushi. 2010. Evidence of past migration of the ice divide between the Shirase and Sōya drainage basins derived from chemical characteristics of the marginal ice in the Sōya drainage basin, East Antarctica. *J. Glaciol.* 56(197), 395-404.

DOI: 10.3189/002214310792447707. 査読有

[学会発表](計18件)

Kusahara, K.: Modeling sea-ice extent and basal melting of Antarctic ice shelves at the Last Glacial Maximum. IGS (International Glaciological Society) Symposium on Sea Ice in a Changing Environment, Hobart, Tasmania, Australia, 2014.03.10.

Greve, R.: Simulations of the Antarctic ice sheet in past and future climates with the model SICOPOLIS, using a simple parameterisation of ice-shelf basal melting. AGU (American Geophysical Union) Fall Meeting, San Francisco, USA, 2013.12.11.

Zwinger, T.: Full Stokes ice sheet model Elmer/Ice, and its application to regional drainage systems in Greenland and Antarctica. Fourth NIPR Symposium on Polar Science, Tokyo, 2013.11.15.

Sato, T.: A simple parameterisation of ice shelf basal melting and its implementation in the ice sheet model SICOPOLIS. DACA-13 (Davos Atmosphere and Cryosphere Assembly), Davos, Switzerland, 2013.07.08.

Saito, F.: Recent status of development of the numerical ice sheet/shelf/stream model IcIES. WGOMD/SOP Workshop on Sea Level Rise, Ocean/Ice Shelf Interactions and Ice Sheets. CSIRO Marine and Atmospheric Research, Hobart, Tasmania, Australia, 2013.02.18.

Seddik, H.: Full Stokes or shallow ice approximation? Comparing the ice flow dynamics at the Shirase Drainage Basin, Antarctica. AGU (American Geophysical Union) Fall Meeting, San Francisco, USA, 2012.12.05.

Greve, R.: Ice sheet modelling and applications to Greenland, Antarctica and the Martian polar caps. Australasian Fluid Mechanics Conference, Launceston, Australia, 2012.12.04. [招待]

Abe-Ouchi, A.: Why and how did the Middle Pleistocene Transition occur? Modelling challenge of the ice sheet change in both hemispheres. Third NIPR Symposium on Polar Science, Tokyo, 2012.11.26. [招待]

Greve, R.: Ice sheet modelling and ap-

plications to the past, present and future glaciation of the Earth. IPICS (International Partnerships in Ice Core Sciences) Open Science Conference, Giens, France, 2012.10.02. [招待]

Seddik, H.: Simulations of the Greenland ice sheet 200 years into the future with the full Stokes model Elmer/Ice. IGS (International Glaciological Society) Symposium on Glaciers and Ice Sheets in a Warming Climate, Fairbanks, USA, 2012.06.28.

Greve, R.: Cooperation between the Nordic countries and Japan in advanced ice sheet and glacier modelling. Northern Environmental Research Symposium, Hokkaido University Sustainability Weeks, Sapporo, 2011.10.31. [招待]

Greve, R.: Implementation of ice shelf dynamics in the ice sheet model SICOPOLIS. IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) General Assembly, Melbourne, Australia, 2011.07.02.

Sato, T.: SeaRISE sensitivity experiments with the model SICOPOLIS for the Antarctic ice sheet with varied sub-ice-shelf melting rates. IGS (International Glaciological Society) Symposium on Interactions of Ice Sheets and Glaciers with the Ocean, San Diego, USA, 2011.06.09.

Greve, R.: Modelling the present-day state and future evolution of the Greenland Ice Sheet with the models SICOPOLIS and IcIES. AGU (American Geophysical Union) Fall Meeting, San Francisco, USA, 2010.12.15. [招待]

Sato, T.: Modeling the flow of the Antarctic Ice Sheet with the SeaRISE set-up: influence of different treatments of the flow regimes. AGU (American Geophysical Union) Fall Meeting, San Francisco, USA, 2010.12.14.

Seddik, H.: Investigating the Greenland ice sheet evolution under changing climate using a three-dimensional full-Stokes model. AGU (American Geophysical Union) Fall Meeting, San Francisco, USA, 2010.12.14.

Greve, R.: Towards a Japanese contribution to the multi-model community effort SeaRISE. IGS (International Glaciological Society) Symposium on Snow, Ice and Humanity in a Changing Climate, Sapporo, 2010.06.25.

Greve, R.: Implementation of marine ice dynamics and ice shelf dynamics in the ice sheet model SICOPOLIS. IGS (International Glaciological Society) Symposium on Snow, Ice and Humanity in a Changing Climate,

Sapporo, 2010.06.22.

〔図書〕(計1件)

Church, J. A., and 13 others (and 57 contributing authors including R. Greve). 2013. Sea level change. In: T. F. Stocker and 9 others (Eds.), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 1137-1216. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA.

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

Homepage: <http://tinyurl.com/simantics>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

R・G GREVE (GREVE, Ralf)

北海道大学・低温科学研究所・教授

研究者番号: 90374644

(2) 研究分担者

阿部 彩子 (ABE-OUCHI, Ayako)

東京大学・大気海洋研究所・准教授

研究者番号: 30272537

杉山 慎 (SUGIYAMA, Shin)

北海道大学・低温科学研究所・准教授

研究者番号: 20421951

(3) 連携研究者

藤田 秀二 (FUJITA, Shuji)

国立極地研究所・

気水圏研究グループ・准教授

研究者番号: 30250476

本山 秀明 (MOTOYAMA, Hideaki)

国立極地研究所・

気水圏研究グループ・教授

研究者番号: 20210099

齋藤 冬樹 (SAITO, Fuyuki)

独立行政法人海洋研究開発機構・

地球環境変動領域・研究員

研究者番号: 60396942