

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K12301

研究課題名（和文）棚氷-海洋相互作用を含む気候モデルの開発

研究課題名（英文）Developing a climate model with an ice-shelf component

研究代表者

草原 和弥（Kusahara, Kazuya）

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(環境変動予測研究センター)・研究員

研究者番号：20707020

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：気候モデルに用いる全球海氷海洋モデルに棚氷要素を組み込むことを目的とし、水平解像度1度および0.25度の海氷海洋モデルの整備・運用を実施した。また、棚氷海洋相互作用の数値モデリング結果を現場及び衛星観測結果と直接比較・検証するために、東南極域領域モデルや南極周極モデルも整備・運用した。研究期間5年間で、計15本の原著論文を出版し、そのうち6本は筆頭著者としての成果創出することができた。本研究課題の実施により、棚氷要素を全球海氷海洋モデルに組み込むことに成功し、気候モデル内で南極沿岸域での氷床/棚氷-海洋相互作用を直接表現可能とする道筋をつけた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

各種設定において、南極沿岸域の3つの水塊（低温・高塩分の高密度陸棚氷、高温・高塩分の周極深層水、高温・低塩分の夏季表層水）の棚氷下への流入パターンの変化が、棚氷底面融解量を規定することを明らかにした。温暖化実験では、棚氷融解量が温暖化レベルに対して非線形応答することを見出した。さらに、全球1度全球モデルで2500年にわたる長期積分と仮想トレーサー実験を行い、南極沿岸の水塊の動態や海盆間の物質循環の時間スケールを見積もることに成功した。本課題による成果は、棚氷融解を数値モデルで直接表現できた点で学術的意義があり、また氷床変動を規定する棚氷変動の理解は海水準予測に貢献することから社会的意義も高い。

研究成果の概要（英文）：This research project aimed to incorporate an ice-shelf component into a global sea ice-ocean model, which has been used for climate modeling, and configured the models with horizontal resolutions of 1 degree and 0.25 degree. In order to compare and validate the modeling results of ice shelf-ocean interactions with observations in detail, we also prepared several configurations for East Antarctic regions and circumpolar Southern Ocean. During the five-year research period, we published a total of 15 original papers, 6 of which we were able to produce as the first author. The project has successfully incorporated ice-shelf component into a global sea-ice ocean model, paving the way for a direct representation of ice sheet/ice shelf-ocean interactions along the Antarctic coastal margins in a climate model.

研究分野：極域海洋学

キーワード：南極棚氷底面融解 南大洋 海氷 南極沿岸水塊 海洋モデリング 気候変動

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

氷床とは、大陸岩盤の上に存在する厚さ千 m ~ 数千 m に達する巨大な氷の塊であり、現在の気候状態ではグリーンランドと南極大陸の二か所に存在している。氷床の一部で海にせり出した末端部分を棚氷と呼ぶ。氷床・棚氷と海洋の相互作用は、地球気候システムを考える上で極めて重要である。本研究計画は南大洋での氷床-海洋相互作用に焦点を当てたものである。これまでの衛星データに基づく棚氷流動解析から、棚氷底面融解（海の熱によって氷床/棚氷が溶かされること）が南極氷床の質量収支に重要であることが明らかになりつつあった。また、棚氷とその周囲の氷床の薄化や流出速度の増加も報告されており、南極氷床からの加速度的な氷の流出、それに伴う海面水位上昇が危惧されていた。

地球気候の将来予測や気候システム理解のために、大気、海洋、海氷などの物理過程をコンピュータ上で再現できる気候モデルがある。各国の研究機関がそれぞれの気候モデルを用いて温暖化予測を実施し、IPCC レポートなどに利用されている。研究開始当時、氷床/棚氷-海洋相互作用を表現した気候モデルは存在せず、海面水位や極域海洋環境の予測には大きな不確実性があった。こういった課題の解決、不確実性の低減のために、本研究計画では、全球海洋海氷モデル及び気候モデルに氷床との接続部分である棚氷要素を導入し、その数値モデルを使った研究を計画した。

### 2. 研究の目的

本研究計画の目的は、全球海氷海洋結合モデルに氷床と海洋の結合部分である棚氷要素を導入し、氷床/棚氷-海洋相互作用が気候システムの中で果たす役割を明らかにすることである。

### 3. 研究の方法

海洋研究開発機構と東京大学大気海洋研究所で共同開発・運用されている海氷海洋結合モデル(COCO)に棚氷要素を導入する。COCO は日本の気候モデルの一つである MIROC の海氷海洋部分であることから、気候モデル利用されている海洋モデル設定に棚氷要素を導入できれば、気候モデルへの棚氷要素導入の第一歩になると考えた。研究実施期間中、全球 1 度と 0.25 度の全球海氷海洋モデルに導入することができた。棚氷要素を含む全球海氷海洋モデルによる一連の数値実験は、海洋研究開発機構が有する地球シミュレーターにおいて実行した。

### 4. 研究成果

ここでは、棚氷要素を含む全球 1 度海氷海洋モデルを用いた研究例として、極域海洋(南大洋と北極海)と三大洋(大西洋、インド洋、太平洋)の海盆間物質輸送タイムスケールを調べた研究事例を報告する(詳細は Kusahara and Tatebe 2023 を参照)。本モデルでは、大きな棚氷である Filchner-Ronne 棚氷(FRIS)と Ross 棚氷(RIS)下の海洋を陽に表現している(図 1A の赤色部分)。まず、この数値モデルを現在気候の大気条件を用いて、1500 年間のスピンアップし、本モデルが 1 度海洋モデルによる典型的な風成循環と熱塩循環を表現していることを確認した。次に、モデル内の領域を五つの海盆に分割し(図 1B)、それぞれの海盆内に全層一様な仮想トレーサーを配置して、1000 年間のトレーサー実験を実施した。仮想トレーサーの動態を調べることで、五大洋海盆間の輸送タイムスケールと輸送経路を推定することを試みた。

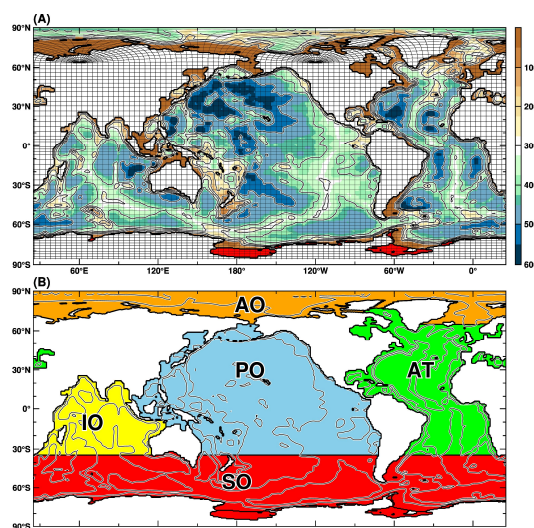


図 1: (A) モデル地形と (B) 海盆の定義。上の図の赤色部分は棚氷を示す。

極域海洋の海盆間物質輸送タイムスケール(南大洋は 114 年、北極海は 109 年)は、三大洋の輸送タイムスケール(大西洋は 217 年、インド洋は 163 年、太平洋は 338 年)よりも短いことがわかった。南大洋に配置した仮想トレーサーは、大西洋への向かう表層ルートと、太平洋とインド洋へ向かう底層ルートの二種類の北半球へ向かう流路があることがわかった。表層ルートは、南大洋起源の水塊を北大西洋及び北極海へ 100 年

程度で輸送できることが示された(図2は南大洋の仮想トレーサーの水平分布と帯状平均分布。図のトレーサーの値は、南大洋の体積の全海洋体積に対する比で規格化したもの)。大西洋の仮想トレーサーは、北大西洋海流と南極周極流によって、効率的に両極へと輸送されていた。大西洋子午面循環の中層南向きの流れが、北半球の水塊を南大洋への輸送に重要な役割を果たしていることが明確となった。北極海の仮想トレーサーは、大西洋を経由して、この大西洋子午面循環の中層の南向きの流れによって100年程度で南大洋域に到達し、南極周極流付近で亜表層付近まで湧昇しつつ、南大洋全域に広く分布することが示された。

FIRS と RIS に注目して、南大洋以外の水塊が流入するタイムスケールを見積もると、どちらも約150年程度であった。同様の解析を南極沿岸域に対して実施すると、南極沿岸域でのタイムスケールは経度・深度によって大きく異なることも分かった。南極沿岸へ向かって極向きの流れのある領域(例えば、南極周極流以南の亜寒帯循環であるウェッデルジャイア・ロスジャイアの東側海域)でタイムスケールが短くなり、他海域の水塊が比較的短時間で南極沿岸域に到達できることが分かった。

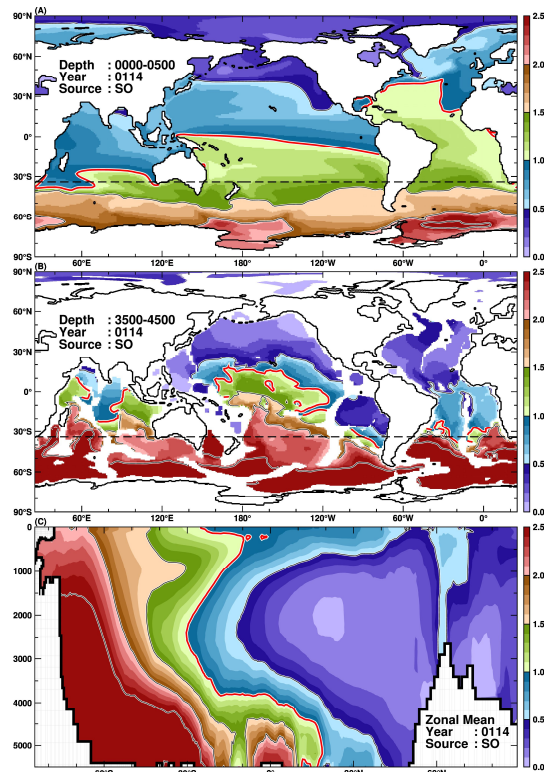


図2：南大洋仮想トレーサーの分布(A: 0-1000m 平均、B: 3500-4500m 平均、C: 帯状平均)。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件／うち国際共著 8件／うちオープンアクセス 14件）

1. 著者名 Fraser A. D., Wongpan P., Langhorne P. J., Klekociuk A. R., Kusahara K., Lannuzel D., Massom R. A., Meiners K. M., Swadling K. M., Atwater D. P., Brett G. M., Corkill M., Dalman L. A., Fiddes S., Granata A., Guglielmo L., Heil P., Leonard G. H., Mahoney A. R., McMinn A., van der Merwe P., Weldrick C. K., Wienecke B.	4. 巻 61
2. 論文標題 Antarctic Landfast Sea Ice: A Review of Its Physics, Biogeochemistry and Ecology	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Reviews of Geophysics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2022RG000770	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 Hirano Daisuke, Tamura Takeshi, Kusahara Kazuya, Fujii Masakazu, Yamazaki Kaihe, Nakayama Yoshihiro, Ono Kazuya, Itaki Takuya, Aoyama Yuichi, Simizu Daisuke, Mizobata Kohei, Ohshima Kay I., Nogi Yoshifumi, Rintoul Stephen R., van Wijk Esmee, Greenbaum Jamin S., Blankenship Donald D., Saito Koji, Aoki Shigeru	4. 巻 14
2. 論文標題 On-shelf circulation of warm water toward the Totten Ice Shelf in East Antarctica	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-023-39764-z	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 Ohashi Yoshihiko, Yamamoto-Kawai Michiyo, Kusahara Kazuya, Sasaki Ken'ichi, Ohshima Kay I.	4. 巻 219
2. 論文標題 Circumpolar distributions of age and anthropogenic CO2 content of Antarctic Bottom Water revealed by chlorofluorocarbon and sulfur hexafluoride	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Progress in Oceanography	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pocean.2023.103153	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 Kusahara Kazuya, Tatebe Hiroaki	4. 巻 10
2. 論文標題 Basin-scale tracer replacement timescales in a one-degree global OGCM	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Frontiers in Marine Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fmars.2023.1308728	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 Kusahara Kazuya, Hirano Daisuke, Fujii Masakazu, Fraser Alexander D., Tamura Takeshi, Mizobata Kohei, Williams Guy D., Aoki Shigeru	4. 巻 18
2. 論文標題 Modeling seasonal-to-decadal ocean-cryosphere interactions along the Sabrina Coast, East Antarctica	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The Cryosphere	6. 最初と最後の頁 43 ~ 73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/tc-18-43-2024	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 Kusahara Kazuya, Tatebe Hiroaki, Hajima Tomohiro, Saito Fuyuki, Kawamiya Michio	4. 巻 36
2. 論文標題 Antarctic Sea Ice Holds the Fate of Antarctic Ice-Shelf Basal Melting in a Warming Climate	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Climate	6. 最初と最後の頁 713 ~ 743
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/jcli-d-22-0079.1	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 Aoki Shigeru, Takahashi Tomoki, Yamazaki Kaihe, Hirano Daisuke, Ono Kazuya, Kusahara Kazuya, Tamura Takeshi, Williams Guy D.	4. 巻 3
2. 論文標題 Warm surface waters increase Antarctic ice shelf melt and delay dense water formation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Communications Earth & Environment	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43247-022-00456-z	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 Ohashi Yoshihiko, Yamamoto-Kawai Michiyo, Kusahara Kazuya, Sasaki Ken'ichi, Ohshima Kay I.	4. 巻 12
2. 論文標題 Age distribution of Antarctic Bottom Water off Cape Darnley, East Antarctica, estimated using chlorofluorocarbon and sulfur hexafluoride	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-12109-4	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 Kusahara Kazuya	4. 巻 16
2. 論文標題 Summertime linkage between Antarctic sea-ice extent and ice-shelf basal melting through Antarctic coastal water masses' variability: a circumpolar Southern Ocean model study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Environmental Research Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-9326/ac0de0	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 Veytia Devi, Bestley Sophie, Kawaguchi So, Meiners Klaus M., Murphy Eugene J., Fraser Alexander D., Kusahara Kazuya, Kimura Noriaki, Corney Stuart	4. 巻 129
2. 論文標題 Overwinter sea-ice characteristics important for Antarctic krill recruitment in the southwest Atlantic	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Ecological Indicators	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ecolind.2021.107934	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 Suzuki Tatsuo, Komuro Yoshiki, Kusahara Kazuya, Tatebe Hiroaki	4. 巻 49
2. 論文標題 Transient Influence of the Reduction of Deepwater Formation on Ocean Heat Uptake and Heat Budgets in the Global Climate System	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021GL095179	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 Kusahara Kazuya, Hirano Daisuke, Fujii Masakazu, Fraser Alexander D., Tamura Takeshi	4. 巻 15
2. 論文標題 Modeling intensive ocean-cryosphere interactions in Luzow-Holm Bay, East Antarctica	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Cryosphere	6. 最初と最後の頁 1697 ~ 1717
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/tc-15-1697-2021	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 Hirano Daisuke, Tamura Takeshi, Kusahara Kazuya, Ohshima Kay I., Nicholls Keith W., Ushio Shuki, Simizu Daisuke, Ono Kazuya, Fujii Masakazu, Nogi Yoshifumi, Aoki Shigeru	4. 巻 11
2. 論文標題 Strong ice-ocean interaction beneath Shirase Glacier Tongue in East Antarctica	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-17527-4	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 Arroyo Mar C., Shadwick Elizabeth H., Tilbrook Bronte, Rintoul Stephen R., Kusahara Kazuya	4. 巻 125
2. 論文標題 A Continental Shelf Pump for CO <sub>2</sub> on the Adelie Land Coast, East Antarctica	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Oceans	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JC016302	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kusahara Kazuya	4. 巻 33
2. 論文標題 Interannual-to-multidecadal responses of Antarctic ice shelf-ocean interaction and coastal water masses during the 20th century and the early 21st century to dynamic and thermodynamic forcing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Climate	6. 最初と最後の頁 4941-4973
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JCLI-D-19-0659.1	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 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 草原 和弥、平野 大輔、藤井 昌和、田村 岳史、溝端 浩平、青木 茂
2. 発表標題 東南極トッテン棚氷周辺海域における棚氷-海洋相互作用に関する数値モデリング
3. 学会等名 雪氷学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 草原 和弥、平野 大輔、藤井 昌和、田村 岳史、溝端 浩平、青木 茂
2. 発表標題 Modeling ocean-cryosphere interactions along the Sabrina Coast
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 (JpGU) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 草原 和弥、建部 洋晶
2. 発表標題 全球海洋モデルによる五大洋海盆間物質輸送タイムスケールの見積もり
3. 学会等名 海洋学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazuya Kusahara, Yoshiaki Komuro, Fuyuki Saito, Hiroaki Tatebe
2. 発表標題 Pathways of freshwater from Greenland Ice Sheet and its impacts on sea ice and ocean
3. 学会等名 Polar Science Symposium (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 草原 和弥、平野 大輔、藤井 昌和、田村 岳史、溝端 浩平、青木 茂
2. 発表標題 東南極トッテン棚氷周辺海域の海洋-海水-棚氷数値モデリング
3. 学会等名 日本海洋学会 2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 K. Kusahara, H. Tatebe, T. Hajima, F. Saito, M. Kawamiya
2. 発表標題 Nonlinear response of Antarctic ice-shelf basal melting in a warming climate
3. 学会等名 JpGU 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kusahara Kazuya、Hirano Daisuke、Fujii Masakazu、Fraser Alexander D.、Tamura Takeshi
2. 発表標題 Modeling warm water intrusion into Lutzow-Holm Bay, East Antarctica
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kusahara Kazuya
2. 発表標題 Interannual-to-multidecadal responses of Antarctic ice shelf-ocean interaction and coastal water masses during the 20th century and the early 21st century to dynamic and thermodynamic forcin
3. 学会等名 SCAR 2020 ONLINE (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 草原 和弥
2. 発表標題 20世紀南大洋における海洋・海氷・棚氷底面融解に関する数値モデリング
3. 学会等名 2019年度海洋学会秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------