

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13989

研究課題名（和文）南極海沿岸域のデータ同化プロダクト開発

研究課題名（英文）Development of ocean state estimations for the Antarctic coastal regions

研究代表者

中山 佳洋（NAKAYAMA, Yoshihiro）

北海道大学・低温科学研究所・助教

研究者番号：30840201

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：西南極モデルについては、アジョイントデータ同化を実施できた。平均場について高い観測との一致が見られ、手法の有用性を示した。しかし、経年変動の再現性が大きく改善されず、さらなる原因解明を実施した。高解像度化、感度実験を実施し、氷河融解水の影響や、海洋と海底の相互作用についての研究を実施した。東南極モデルについては、生態系モデルを組み込み、グリーン関数法同化を実施中で、論文の準備を進めている。本研究では、同化、高解像度モデル、観測データを組み合わせ、両領域の研究を実施した。ハイインパクトジャーナルを含む14本の論文が掲載され、内容的にも分野に一石を投じる新たなプロセスの発見に繋がった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

南極沿岸域の中で、最も南極の氷損失が卓越するアムンゼン海、観測データ/数値モデル研究ともにほとんど実施されてこなかった東南極沿岸トッテン氷河/棚氷沖における研究を行った。棚氷融解を駆動する大気/海洋プロセスについて、新しい見方を示した研究も多く、学術的に意義があるものとなった。これらの知見は、全球モデルなどのより低解像度開発やそのためのパラメタリゼーション開発に役立てられる。長期間のシミュレーションである気候モデルにおける海洋循環や海水準といった全球環境将来予測スキルの発展に資する。

研究成果の概要（英文）：In our study of the West Antarctic, we developed ocean state estimates with explicit ice shelf cavity representations, using adjoint sensitivities. While these estimates matched observational data for the mean state, they didn't capture interannual variability accurately. For a better agreement with observations, we conducted high-resolution simulations, exploring subglacial freshwater discharge and ocean-current-bottom topography interaction. For the East Antarctic, we are optimizing models using Green's functions and adding biogeochemical components. This aims to create a comprehensive ice shelf-ocean-carbon coupled simulation, enhancing our understanding of climate interactions.

Our work, publishing 14 articles including high-impact journals (e.g., Nature Communications and Geophysical Research Letters), advances our understanding of ice shelf melting and Antarctic ice loss.

研究分野：極域海洋学

キーワード：南大洋 南極 海面上昇 棚氷 データ同化

1. 研究開始当初の背景

海水準変動を予測する上で、最も不確かな要素が南極氷床である。南極沿岸域の海が氷床の変動をコントロールすることがわかってきており、その理解が急務である。しかし、この分野の世界最先端の研究は、観測データは数が不十分で、モデルは過去の観測データの再現性が乏しいために、大きく前進できていない。現実の南極の海で何が起きているのかよくわかっておらず、将来予測の不確実さの原因となっている。中低緯度の外洋域の研究であれば、モデルの再現性を向上させる同化技術を適用することができるが、南極沿岸域には、現時点でその技術がうまく適用できていない。そこで、研究代表者らは、棚氷融解が卓越しているアムンゼン海、トッテン氷河/棚氷沖の海洋領域モデルを開発してきた。モデルを安価/高速に駆動できるように、研究的に重要で、観測データが南極沿岸域の中では多く存在する、南極の中でも重要な領域に注目し、(a)綿密な観測とモデルの比較、(b)膨大な数の感度実験、を可能にし、データ同化がうまくできていない理由を特定し、同化プロダクトを開発する。開発できれば、現実の海で実際に起きている海の変化のメカニズムが理解でき、精細な将来予測も可能となる。

2. 研究の目的

南極の氷は、その上に雪が降り積もり、圧密されることで形成され、徐々に大陸沿岸部へと流れ、一部の地域では海へと流れ込み、棚氷(氷が海へと押し出され、陸上から連結して洋上にある氷)を形成する。近年の研究から、南極の氷の海への流出(氷損失)は、高温の水塊の大陸棚上への流入、棚氷の融解によって、強くコントロールされていることがわかってきた。したがって、棚氷の融解を決定する、大陸棚上や棚氷下の海洋のプロセスの理解が必要である。特に、現在の南極全体の中で、70%以上の氷損失が引き起こされているとされるアムンゼン海(Figure 1)、今後、氷損失が増加し、アムンゼン域と同等、またはそれ以上に、氷損失が増える可能性が指摘されているトッテン氷河/棚氷域(Figure 1)についての理解が求められている。理解が進まない原因は、観測データは数が不十分で、モデルは、観測データの再現性が乏しいためである。そのため、現実の海で何が起きているのかよくわかっていない。例えば、既存のモデル結果を比較すると、観測データとの高い整合性が実現されやすいとされる領域モデルであっても、モデル間にシミュレートされた南極沿岸部の海洋循環、水塊性質に差があり、観測データから得られる経年変動をモデルで再現することも難しい。将来予測の不確実さの原因となっている。中低緯度の外洋域の海洋研究であれば、同化を用いてデータの再現性を向上できるが、極域沿岸域では、データ同化がうまく実装できていない。技術自体は確立しているものの観測データの再現性が多領域と比べて劣り、棚氷/海氷など極域に特有なプロセスのデータ同化計算コードにバグがある、観測データが不足している、観測の季節に偏りがあるなどが原因として指摘されている。そこで、本研究の目的は、「南極沿岸域の海洋変動を再現できるデータ同化プロダクトの開発」である。

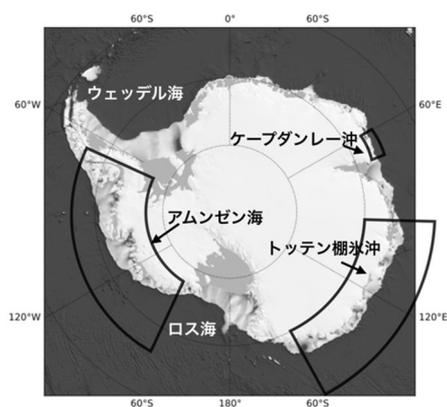


Figure 1: 海底地形と南極沿岸域の地名。実線は開発中の海洋モデル領域を示す。

3. 研究の方法

本研究では、海洋モデル Massachusetts Institute of Technology General Circulation Model (MITgcm) を用いてデータ同化を実施する。データ同化とは、総合評価値をモデルと観測値の差の重み付け二乗和として定義して、この総合評価値が最小となるように、モデルパラメータ、モデルの外力となる大気の大気再解析データ、モデル初期値などの最適化を行うことである。本研究では、より簡略で少数のモデルパラメータを最適化するグリーン関数法、及び、大気の大気再解析データなどを含めた数万以上のパラメータの最適化を行うことのできるアジョイント法を利用する。東南極トッテン域については、グリーン関数法を用いたデータ同化を、西南極アムンゼン域については、すでにグリーン関数法を用いたデータ同化は実施されており、さらに適応が難しいとされる、アジョイント法を用いたデータ同化を実施する。さらに、(a)綿密な観測とモデルの比較、(b)膨大な数の感度実験、を実施する。データ同化の問題点を特定し、南極沿岸域に特化した同化プロダクトを開発する。

4. 研究成果

西南極モデルについては、アジョイント法を用いたデータ同化を実施した (Nakayama et al., 2021, Geoscientific Model Development (GMD) 誌に掲載)。20 回のアジョイントを用いた繰り返し計算 (イテレーション) を実施した結果、イテレーション実施前には、2014 年に冷たい水塊が大陸棚上に形成され、現実と異なる結果が再現されていたが、20 イテレーション目には、高温の水塊の大陸棚上への流入が見られ、観測との再現性が大きく向上した (Figure 2)。

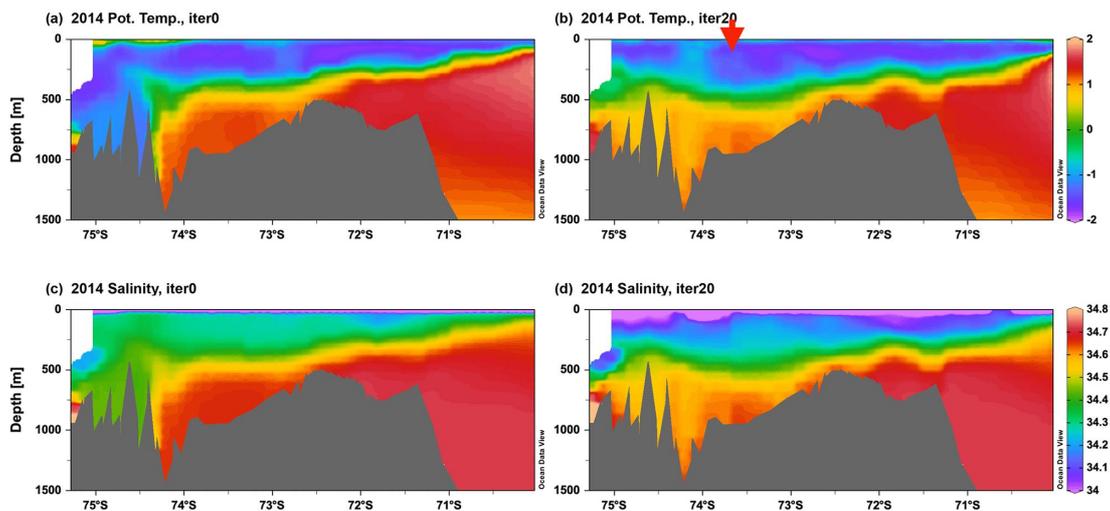


Figure 2: (a, c) 最適化前、(b, d) 20 イテレーション後のアムンゼン海東部の水温 (上段)、塩分 (下段) の断面図。詳細は、Nakayama et al., 2021 (GMD) に示される。

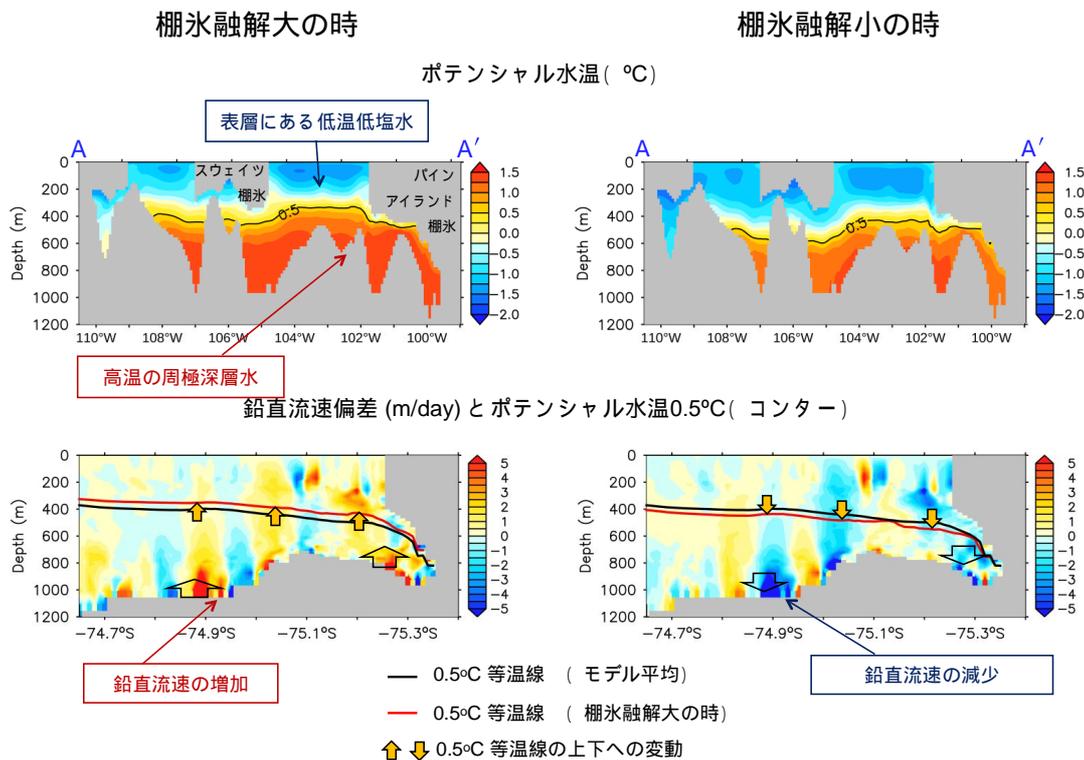


Figure 3: 東アムンゼン海、パインアイランド棚氷全面部の (上段) 水温、(下段) 鉛直流速の断面図。左図は、棚氷融解が高い時期、右図は棚氷融解が低い時期を表す。棚氷融解が高い (低い) 時期は、鉛直流速が強化 (弱化) され、高温の水塊がより浅い (深い) 水深に位置していることが確認できる。

平均場について高い観測再現性との一致が見られ、手法の有用性を示したものの、経年変動の再現性が大きく改善されず、現モデルに含まれていないプロセスが棚氷融解や海洋場の再現性に

影響を与えていることが示唆された。そこで、その原因の一つと考えられる棚氷下部から海へと流出する氷河融解水の影響を見積もった研究を実施した(Nakayama et al., 2021 Geophysical Research Letters 誌に掲載)。さらに、高解像度化を実施し、経年変動の再現性を向上させることに成功した。この結果から、新たに海洋と海底の相互作用が棚氷誘拐に寄与するという新しい見方を提唱した (Figure 3, Park et al., 2023, Nature Communications 誌に掲載)。

東南極モデルについては、モデルを開発した(Nakayama et al., 2021 Geophysical Research Letters に掲載)。さらに、このモデルについて、2019年に新しく取得された海底地形データへのモデル地形の更新を行った。生態系モデルを組み込み、現在、グリーン関数を用いた同化の実施、論文投稿の準備を進めている。

データ同化と高解像度化を組み合わせることで、計画通り、両領域の研究を実施できた。特に、西南極域モデル開発においては、内容的にも分野に一石を投じる新たなプロセスの発見に繋がり、論文の成果、内容ともに、素晴らしい成果となった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 12件／うちオープンアクセス 11件）

1. 著者名 Nakayama Yoshihiro, Menemenlis Dimitris, Wang Ou, Zhang Hong, Fenty Ian, Nguyen An T.	4. 巻 14
2. 論文標題 Development of adjoint-based ocean state estimation for the Amundsen and Bellingshausen seas and ice shelf cavities using MITgcm-ECCO (66j)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geoscientific Model Development	6. 最初と最後の頁 4909 ~ 4924
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/gmd-14-4909-2021	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 Yamazaki Kaihe, Aoki Shigeru, Katsumata Katsuro, Hirano Daisuke, Nakayama Yoshihiro	4. 巻 7
2. 論文標題 Multidecadal poleward shift of the southern boundary of the Antarctic Circumpolar Current off East Antarctica	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eabf8755
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.abf8755	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 Mensah Vigan, Nakayama Yoshihiro, Fujii Masakazu, Nogi Yoshifumi, Ohshima Kay I.	4. 巻 165
2. 論文標題 Dense water downslope flow and AABW production in a numerical model: Sensitivity to horizontal and vertical resolution in the region off Cape Darnley polynya	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Ocean Modelling	6. 最初と最後の頁 101843
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ocemod.2021.101843	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 Nakayama Yoshihiro, Greene Chad A., Paolo Fernando S., Mensah Vigan, Zhang Hong, Kashiwase Haruhiko, Simizu Daisuke, Greenbaum Jamin S., Blankenship Donald D., Abe Ouchi Ayako, Aoki Shigeru	4. 巻 48
2. 論文標題 Antarctic Slope Current Modulates Ocean Heat Intrusions Towards Totten Glacier	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 101843
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021GL094149	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 Nakayama Yoshihiro, Cai Cilan, Seroussi Helene	4. 巻 48
2. 論文標題 Impact of Subglacial Freshwater Discharge on Pine Island Ice Shelf	5. 発行年 2021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) 10.1029/2021GL093923	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 Dotto Tiago S., Heywood Karen J., Hall Rob A., Scambos Ted A., Zheng Yixi, Nakayama Yoshihiro, Hyogo Shuntaro, Snow Tasha, Wahlin Anna K., Wild Christian, Truffer Martin, Muto Atsuhiko, Alley Karen E., Boehme Lars, Bortolotto Guilherme A., Tyler Scott W., Pettit Erin	4. 巻 13
2. 論文標題 Ocean variability beneath Thwaites Eastern Ice Shelf driven by the Pine Island Bay Gyre strength	5. 発行年 2022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/s41467-022-35499-5	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 -

1. 著者名 Nakayama Yoshihiro, Hirata Toshiki, Goldberg Daniel, Greene Chad A.	4. 巻 49
2. 論文標題 What Determines the Shape of a Pine Island Like Ice Shelf?	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) 10.1029/2022GL101272	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 Lin Y., Yang Q., Shi Q., Nakayama Y., Chen D.	4. 巻 50
2. 論文標題 A Volume Conserved Approach to Estimating Sea Ice Production in Antarctic Polynyas	5. 発行年 2023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) 10.1029/2022GL101859	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 Nakayama Yoshihiro, Wongpan Pat, Greenbaum Jamin S., Yamazaki Kaihe, Noguchi Tomohide, Simizu Daisuke, Kashiwase Haruhiko, Blankenship Donald D., Tamura Takeshi, Aoki Shigeru	4. 巻 50
2. 論文標題 Helicopter Based Ocean Observations Capture Broad Ocean Heat Intrusions Toward the Totten Ice Shelf	5. 発行年 2023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) 10.1029/2022GL097864	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 Poinelli M., Nakayama Y., Larour E., Vizcaino M., Riva R.	4. 巻 50
2. 論文標題 Ice Front Retreat Controls on Ocean Dynamics Under Larsen C Ice Shelf, Antarctica	5. 発行年 2023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) 10.1029/2023GL104588	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 Shrestha Kalyan, Manucharyan Georgy E., Nakayama Yoshihiro	4. 巻 51
2. 論文標題 Submesoscale Variability and Basal Melting in Ice Shelf Cavities of the Amundsen Sea	5. 発行年 2024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) 10.1029/2023GL107029	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 Hyogo Shuntaro, Nakayama Yoshihiro, Mensah Vigan	4. 巻 129
2. 論文標題 Modeling Ocean Circulation and Ice Shelf Melt in the Bellingshausen Sea	5. 発行年 2024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) 10.1029/2022JC019275	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 Nakayama Yoshihiro, Wongpan Pat, Greenbaum Jamin S., Yamazaki Kaihe, Aoki Shigeru	4. 巻 12
2. 論文標題 How Can Helicopters Help Us Determine the Health of Antarctica's Oceans?	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Frontiers for Young Minds	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/frym.2024.1080545	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 Park Taewook, Nakayama Yoshihiro, Nam SungHyun	4. 巻 15
2. 論文標題 Amundsen Sea circulation controls bottom upwelling and Antarctic Pine Island and Thwaites ice shelf melting	5. 発行年 2024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/s41467-024-47084-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

[学会発表] 計13件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Nakayama Yoshihiro, Greene Chad A., Paolo Fernando S., Mensah Vigan, Zhang Hong, Kashiwase Haruhiko, Simizu Daisuke, Greenbaum Jamin S., Blankenship Donald D., Abe Ouchi Ayako, Aoki Shigeru
2. 発表標題 Antarctic Slope Current controls warm ocean intrusions towards Totten Glacier
3. 学会等名 EGU General Assembly 2021, Online (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nakayama Yoshihiro, Greene Chad A., Paolo Fernando S., Mensah Vigan, Zhang Hong, Kashiwase Haruhiko, Simizu Daisuke, Greenbaum Jamin S., Blankenship Donald D., Abe Ouchi Ayako, Aoki Shigeru
2. 発表標題 The development of East Antarctic ocean simulation with a focus on the Totten Glacier
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021, Online
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nakayama Yoshihiro
2. 発表標題 観測データの再現性の高い数値モデルの開発と 海洋-棚氷相互作用の研究
3. 学会等名 日本海洋学会2021年度秋季大会, オンライン開催
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshihiro Nakayama, Dustin Carroll, Pat Wongpan, Ryosuke Makabe, Shintaro Takao, Hong Zhang, Dimitris Menemenlis
2. 発表標題 Optimization and evaluation of a high-resolution, regional, East-Antarctic ocean biogeochemistry model with novel in-situ physical and biogeochemical observations
3. 学会等名 Ocean Science Meeting 2022, Online (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nakayama Yoshihiro, Hirata Toshiki, Goldberg Daniel
2. 発表標題 What determines the ice shelf shape?
3. 学会等名 EGU General Assembly 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nakayama Yoshihiro
2. 発表標題 Understanding the Southern Ocean through model-data synthesis
3. 学会等名 日本海洋学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nakayama Yoshihiro, Greenbaum Jamin S., Wongpan Pat, Yamazaki Kaihei, Noguchi Tomohide, Simizu Daisuke, Kashiwase Haruhiko, Blankenship Donald D., Tamura Takeshi, Aoki Shigeru
2. 発表標題 Helicopter-based ocean observations capture broad ocean heat intrusions towards the Totten
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nakayama Yoshihiro
2. 発表標題 Understanding southern ocean through model-data synthesis
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nakayama Yoshihiro
2. 発表標題 Helicopter-based ocean observations capture broad ocean heat intrusions towards the Totten Ice Shelf
3. 学会等名 Forum for Research into Ice Shelf Processes (FRISP) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshihiro Nakayama, Dustin Carroll, Pat Wongpan, Ryosuke Makabe, Shintaro Takao, Hong Zhang, Dimitris Menemenlis
2. 発表標題 Optimization and evaluation of a high-resolution, regional, East-Antarctic ocean biogeochemistry model with novel in-situ physical and biogeochemical observations
3. 学会等名 The 28th IUGG General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nakayama Yoshihiro
2. 発表標題 Understanding the Southern Ocean through model-data synthesis
3. 学会等名 SOOS Symposium 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nakayama Yoshihiro
2. 発表標題 観測モデル融合研究から理解する南大洋/南極沿岸域
3. 学会等名 日本海洋学会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshihiro Nakayama, Alena Malyarenko, Taewook Park, Tsubasa Yasui, Hong Zhang, Dimitris Menemenlis
2. 発表標題 Understanding the Southern Ocean through model-data synthesis
3. 学会等名 Ocean Science Meeting 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024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
研究協力者	メネメンリス ディミトリス (MENEMENLIS Dimitris)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	サルーシ ヘレン (SERROUSI Helene)		

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			
英国	University of East Anglia	University of Edinburgh		
中国	Tsinghua University	Sun Yat-sen University		
米国	University of California Irvine	NASA Jet Propulsion Laboratory	Dartmouth College	他2機関
韓国	Korean Polar Research Institute	Seoul University		