



Title	知床をはじめとする北海道オホーツク海沿岸海域における海水変動予測実験
Author(s)	三寺, 史夫; Mitsudera, Humio; 佐伯, 立 他
Citation	低温科学, 82, 143-152
Issue Date	2024-03-29
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.82.143
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/91753
Type	departmental bulletin paper
File Information	12_p143-152_LT82.pdf



知床をはじめとする北海道オホーツク海沿岸海域における海水変動予測実験

三寺 史夫¹⁾, 佐伯 立¹⁾, 井上 知栄²⁾, 植田 宏昭²⁾,
中野渡 拓也³⁾, 黒田 寛³⁾

2023 年 12 月 1 日受付, 2024 年 1 月 10 日受理

北海道オホーツク海沿岸は季節海水が到達する北半球の最南端であり, 地球温暖化に敏感な海域と考えられている. 本研究では, 北海道東方海域での海水変動に着目し, 2050 年に関する海水変動を評価した. 予測実験は, オホーツク海全体をカバーする解像度 $1/10^\circ$ の海水・海洋モデルに北海道周辺の海域をカバーする解像度 $1/50^\circ$ のモデルをネスティングし, 第6期結合モデル相互比較計画 (CMIP6) における2050年を中心とした20年間の平均値と2000年のその差分値を大気境界条件に利用することにより行った. その結果, 低位温暖化シナリオにおいてさえ, 北海道沖の海水面積は2050年に現在の約1/3に減少する, という予測結果を得た.

Experiments on predicting sea ice variations off the coast of Hokkaido in the southern Sea of Okhotsk

Humio Mitsudera¹, Ryu Saiki¹, Tomoshige Inoue², Hiroaki Ueda²,
Takuya Nakanowatari³, Hiroshi Kuroda³

The southern Sea of Okhotsk off Hokkaido is the most southern region where sea ice can reach in the northern hemisphere. Therefore, it is considered that the sea ice in this region is sensitive to the global warming. In this article, we describe preliminary results of the numerical experiments evaluating the variations of the sea ice in 2050 off Hokkaido. A sea-ice and ocean coupled model, covering the sea surrounding the Hokkaido (with a grid of $1/50^\circ$), is nested to a parent model that covers the entire Sea of Okhotsk (with a grid of $1/10^\circ$), and is forced by an atmospheric data which is produced by utilizing the difference between the 2050 climate and the 2000 climate presented by the CMIP6 models, in order to project the sea ice variations of 2050. The sea-ice and ocean coupled model predicted that the sea ice area, would be reduced to 1/3 in 2050 compared to the present sea ice area even in a low greenhouse gas emission scenario.

キーワード: 海水変動予測, 北海道オホーツク沿岸, 第6期結合モデル相互比較計画 (CMIP6)
sea ice prediction, Sea of Okhotsk off the coast of Hokkaido,
Coupled Model Intercomparison Project phase 6 (CMIP6)

連絡先

三寺 史夫

北海道大学 低温科学研究所 環オホーツク観測研究センター

〒060-0819 北海道札幌市北区北19条西8丁目

Tel: 011-706-5478

Email: humiom@lowtem.hokudai.ac.jp

- 北海道大学 低温科学研究所 環オホーツク観測研究センター
Pan-Okhotsk Research Center, Institute of Low Temperature
Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan
- 筑波大学 生命環境系
Faculty of Life and Environmental Sciences, University of
Tsukuba, Tsukuba, Japan
- 国立研究開発法人 水産研究・教育機構 水産資源研究所
Fisheries Resources Institute, Japan Fisheries Research and
Education Agency, Kushiro, Japan

1. はじめに

1.1 背景

オホーツク海南部は北半球における季節海水の南限である。海水(流水)は1月中旬に北海道オホーツク沿岸に到来し、3月から4月初旬に気温の上昇とともに融解・後退する。海水は鉄など栄養物質の輸送やアイスアルジーの保持を通して海水融解直後の植物プランクトンブルームに大きな影響を与えることが分かってきた。また、アザラシは海水を出産や休憩に利用する。流水(海水)とそれに伴う海洋生態系・生物多様性は知床の世界自然遺産登録においてキーワードであり、水産資源管理、観光資源としても重要である。このため海水の消長は社会の大きな関心事である。

現在オホーツク海では海盆全体で見ると海水減少が著しく、海水域減少の割合は北半球で2番目に大きい(Cavalieri and Parkinson 2012)。特に2015年は、海水面積最大時でもほとんど海水がなく、海水面積の極小値をとった。しかしながら、サハリンから知床にかけての沿岸では、2015年であっても例外的に海水が張り、季節海水域は知床まで到達していた。このような海域による海水消長の相違は長期トレンドにおいても顕著であり、オホーツク海中央では上述のように減少傾向にあるものの、北海道沿岸からその東方にかけては海水面積に増減はほとんどないことが見出された(Toyota et al., 2022)。

以上の通り、海水の消長には海域特性が大きいことが特徴である。これは、地球温暖化による広域的な気温上昇に加え、オホーツク海に比して小さいスケールを持つ海流の寄与を示唆するものである。

冬季の北海道沿岸の特徴は、海水直下に非常に冷たい東樺太海流が流れていることである。これは風によって駆動され、オホーツク海北部(アムール川河口域)から知床にかけて大陸棚端を流れている(e.g., Ohshima et al., 2002)。海上保安庁砕氷巡視船「そうや」による2月の観測によると、東樺太沿岸流の冬季水温は -1.5°C 以下の結氷温度を保っている。少氷年においてさえ北海道沿岸まで海水が到達するのは、この冷たい東樺太海流が融解を抑制しつつ海水を輸送するためと考えられる。また、北海道沿岸における海水の年々変動には冬季季節風の影響が大きいことも分かってきた(Toyoda et al., 2022)。これも、東樺太海流が風駆動の海流であることと整合的である。

以上のとおり、オホーツク海海水変動は「オホーツク海全体のスケール」と「北海道沿岸スケール」(図1)を分けて考察すべきであろう。本稿では「北海道沿岸スケール」を

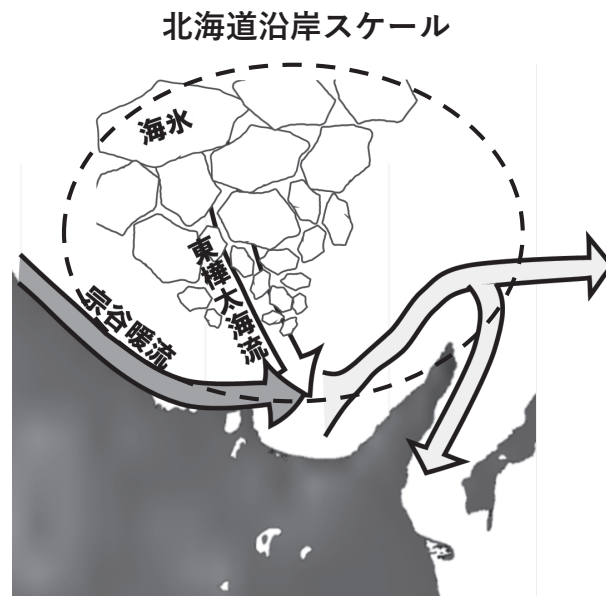


図1：海流の概念図および北海道沿岸海域のスケール

Figure 1: Schematic view of the current system off the Hokkaido coast of the Sea of Okhotsk. Dashed line circle indicates the scale associated with the Hokkaido coast.

中心に、海水・海洋シミュレーションとそれを用いた海水変動予測について述べる。

「北海道沿岸の海水は消失するのか」という問題は、大きな社会的関心事である。知床は2005年に世界自然遺産に登録されたが、それは「季節海水による影響を受けた生態系の顕著な見本である」ことが高く評価されたことによる。ユネスコ世界遺産委員会は2019年、2023年の決議においてオホーツク海での海水減少を懸念しており、気候変動に対するモニタリングと適応管理戦略の策定を勧告した。また、国内においても2018年に気候変動適応法が施行され、地域社会と連携した早急な研究開発が促されている。遺産管理、水産資源管理、観光など社会的影響の大きい沿岸域での海水変動予測は必要不可欠なものと考ええる。これまでの海水変動予測については、オホーツク海全体を対象とした2100年の予測(Yamanaka et al., 2021)や経験的な沿岸域予測(例えば、紋別の海水変動と地球温暖化の関係(青田ら, 1992))はあるものの、北海道沿岸域に着目した数値モデリングに基づく予測はなかった。以上を踏まえ、本研究の目的は北海道オホーツク沿岸に着目した海洋海水結合モデルによる海水変動予測を行うことである。

1.2 温暖化シナリオと沿岸スケールの海水変動予測実験

地球規模の気候変動予測は世界のさまざまな研究機関で行われており、それらの相互比較研究も行われてい

る。代表的なものは世界気候研究計画 (World Climate Research Programme: WCRP) が実施している結合モデル相互比較プロジェクト (Coupled Model Intercomparison Project: CMIP) であり、現在第6期 (CMIP6) のデータが公開されている。ただしCMIP6気候モデル群にはオホーツク海は存在するものの、解像度の制約のため、上で述べたような海域スケールに着目した解析には不適切である。

そこで我々は、CMIP6の大気データを境界条件として利用し、高解像度の海水・海洋モデルを駆動することで北海道沿岸スケールの海水変動予測を実施した。CMIP6ではCO₂排出シナリオに基づいていくつかの温暖化予測が提出されているが、我々はその中でSSP1-2.6 (低位温暖化シナリオ)、SSP2-4.5 (中位温暖化シナリオ)、SSP5-8.5 (高位温暖化シナリオ) を選び、2050年と2090年 (21世紀末) について予測を実施している。SSP1-2.6は産業革命以前の全球気温に比して21世紀末の昇温を2度以下に抑えようというシナリオで、国際社会が目指しているものである。21世紀末にはCO₂排出はほとんどゼロであることを想定している。実際、CMIP6気候モデル群の結果を集めた平均 (アンサンブル平均) は、21世紀末の全球平均気温で1.8℃の昇温と見積もられている。SSP5-8.5はCO₂排出に対して何も対策を講じない場合のシナリオである。CMIP6のアンサンブル平均では、21世紀末の全球平均気温が4.4℃の上昇と見積もられている。SSP2-4.5は両者の中間的なシナリオで、気温上昇のアンサンブル平均は2.7℃である。このように、21世紀末では、シナリオによって地球温暖化に大きな差異がある。気象研究所によるオホーツク海海水の変動予測 (Yamanaka et al., 2021) も、2100年を対象としていた。

2050年に関して言えば、現在までのCO₂排出の影響が残っており、気温におけるシナリオ間の違いはそれほど大きくはない (全球平均では、SSP1-2.6で1.8℃、SSP5-8.5で2.5℃程度の昇温)。しかしながら地球温暖化への適応策を策定する際の現実的な指標として、2050年の海水変動予測を行うことは有意義と考える。

以上を踏まえ、本稿では2050年の海水変動予測について主に述べる。2章で方法について概説し、3章で結果について述べる。最後に4章でまとめる。

2. 方法

2.1 海水・海洋モデル

1/10°格子でオホーツク海全域をカバーする「オホーツク海モデル」に、1/50°格子で北海道沿岸域を計算する「北海道モデル」をネスティングして、沿岸スケールの海水変

動を再現した。「オホーツク海モデル」は、水産研究・教育機構 (Japan Fisheries Research and Education Agency; FRA) がRegional Ocean Modeling System (ROMS) に基づき作成したモデルで (FRA-ROMS; Kuroda et al., 2017)、それに海水モデルを結合したものである (Headstrom, 2018)。モデルの鉛直座標、各種物理スキームやパラメータは、Kuroda et al. (2017) に準拠している。また、千島列島など潮汐の強い場所では、Tanaka et al. (2007) と同様にSt. Laurent et al. (2002) の潮汐パラメタリゼーションを導入している。海水モデルを結合しており、海水内部応力ではElastic-Viscous-Plastic パラメタリゼーション (Hunk and Dukowicz, 1997)、熱力学ではone-layer ice and snow dynamics (Mellor and Kantha, 1989) を採用している。過去再現実験の際は、大気外力として大気再解析データJRA55-do (Japanese 55-year atmospheric reanalysis (JRA55) for driving ocean-sea-ice models; Tsujino et al., 2018) の3時間平均値を使用した。また、北と西の境界は大陸であるが、南と東の側方は海洋であり、そこでの境界条件はFRA-ROMS 再解析による各年の月平均値を用いた。初期値はWorld Ocean Atlas 2001 (WOA01) である。積分期間は大気境界条件に衛星プロダクトが反映された1993年1月1日から2018年12月31日までの26年間である。この期間には典型的な多氷年 (2001, 2003)、少氷年 (2015) などが含まれている。

また、1/50°格子の「北海道モデル」は高解像度版FRA-ROMS (Kuroda et al., 2021) の海洋物理モデルに海水モデルを結合したものである。計算領域は、サハリン島南端から北海道周辺海域をカバーしている。側方境界条件は、親モデルである「オホーツク海モデル」の3時間ごとのデータに基づき更新した (すなわち「オホーツク海モデル」から「北海道モデル」への一方向のネスティング)。加えて境界で潮汐を陽に計算した (Kuroda et al., 2018)。海水部分は「オホーツク海モデル」と同様の設定である。過去再現実験では、大気境界条件はJRA55-doを用いた。また、積分期間は1993年1月1日から2018年7月31日である。

ここでは、まず過去再現実験を行い海水・海洋モデルのパフォーマンスを調べたのち、次節に述べる手順で温暖化実験を行い、海水の変動予測を実施した。

2.2 温暖化実験

CMIP6気候モデル群の中から、環オホーツク海地域における地表風の現在気候再現性評価した結果と、CMIP6におけるvery hot models (Shiogama et al., 2021) を考慮して、11モデルを選定した。そして、その大気データを

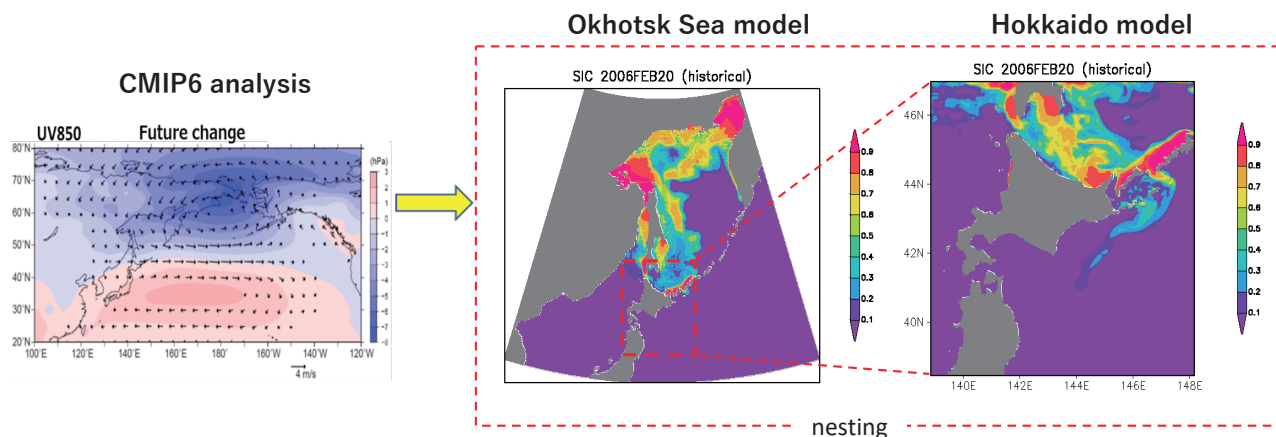


図2：知床海域の海水変動予測システム。オホーツク海モデル(中央；10km格子，陰影は海水密度度)に北海道モデル(右；2km格子，陰影は海水密度度)をネスティングし，海水・海洋モデルを開発した。これをCMIP6気候モデル群から得た「2050年」と「2000年」との差分値(左；陰影は気圧の差分，ベクトルは風速の差分)を利用した大気境界条件を用いて駆動する。黄色の矢印は，大気境界条件として強制することを意味する。

Figure 2: Prediction system of sea ice variations off the coast of Hokkaido. “Hokkaido model” with a resolution of 2 km (right panel where color shade denotes the ice concentration) is nested to the “Okhotsk Sea model” with a resolution of 10 km (central panel). The nesting model is forced by future atmospheric conditions derived from the difference between 2050 climate and 2000 climate in the CMIP6 (left panel, where the color shade denotes pressure difference and vectors denote the wind difference).

利用し，2.1節で開発した海水・海洋モデルを用いて知床海域の海水変動予測実験を行った。具体的な手順は以下のとおりである(図2)。

- ① CMIP6の中から選定した11のモデルを用い，現在と将来のアンサンブル平均(気候モデル群の平均)をそれぞれ作成し，それらから温暖化差分値を求めた。具体的には，上記の3つの温暖化シナリオについて，2040年-2059年の各月アンサンブル平均値(以下，2050年気候値と記述)と1990年-2009年の各月アンサンブル平均値(以下2000年気候値と記述)との差分値である。大気変数の差分値として地表気温・地表比湿・地表風・海面気圧・降水量・下向き長波放射量・下向き短波放射量，海洋変数の差分値として海面水温・海洋内部のポテンシャル水温について計算した。
- ② JRA55-do(1993年-2018年)に，①で作成した大気変数の温暖化差分値を加え，将来気候の大気境界条件とした。このように作成した「2050年」の大気境界条件は26年分あることに注意。一方，JRA55-do(1993年-2018年)のみの大気条件を，ここでは「現在気候」の大気条件と呼ぶ。
- ③ ②を大気境界条件とし，2.1節で開発した海水・海洋モデルを駆動することにより，「2050年」における知床海域の海水変動予測を行った。ここで「2050年」予測とは，「JRA55-do+2050年気候値と2000年気候値の差」の，26年分の大気データにより駆動された海洋・海水シミュレーションを意味する。具体的には，

各月の差分値を3時間毎に補間し，1993年から2018年のJRA55-doに加えて作成した大気強制力を用い，「オホーツク海モデル」(親モデル)と「北海道モデル」を駆動することにより海水変動予測実験を実施した。ただし，気温差分に関しては，オホーツク海より西側の大陸上(128°E-137°E, 37°N-62°N)の値を用いた。オホーツク海上の気温差は，CMIP6気候モデル群における海水融解の海上気温への影響を強く受けるためである。

親モデルである「オホーツク海モデル」の初期値はWOA01，側面境界条件はFRA-ROMS再解析による「現在気候」の各年の月平均値を用いた。このため，本研究における温暖化実験は，大気の温暖化により海表面から強制された海水温上昇に伴う，海水・海洋変動を解析することになる。

- ④ 気候モデル間のばらつきが海水変動予測に及ぼす影響を評価する。海水変動に影響が大きい北海道周辺(42.5-47.5°N, 140.0-145.0°E)の西風偏差とユーラシア大陸・シベリア東部(42.5-58.75°N, 127.5-137.5°E)の気温をインデックスとして気候モデル群を4分類し，分類したそれぞれのカテゴリーで上記①～③を実行することにより，マルチモデル間のばらつきによる影響を定量化する。

上記の①～④の手法は，「個々の気候モデルで得られた将来気候」を用いて海水モデルを駆動するという，通常

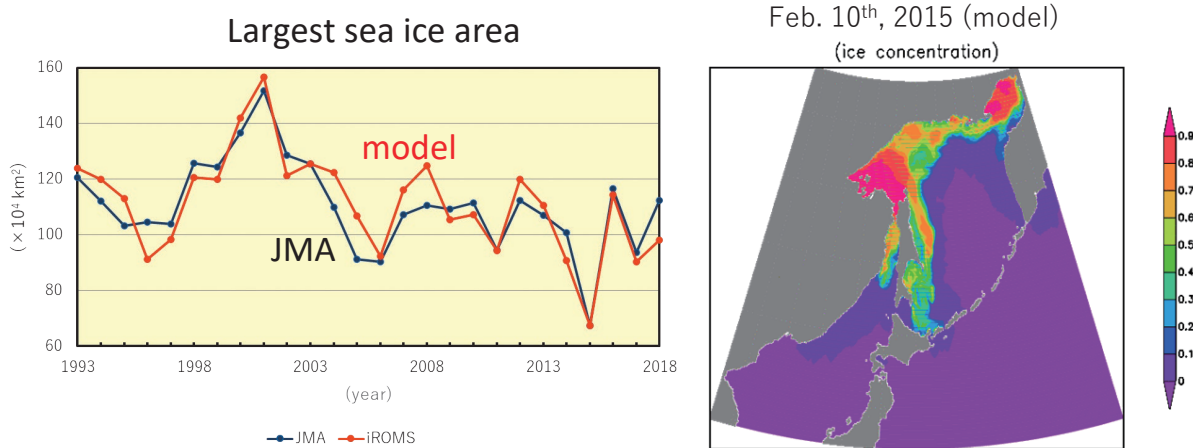


図3:「オホーツク海モデル」による過去(「現在気候」)再現実験の結果。(左)は各年の最大海水域面積の、気象庁による解析(青の実線)と海水・海洋モデル(赤の実線)を比較したもの、(右)は海水域面積最少年である2015年2月の海水・海洋モデルによる再現(陰影は海水密接度)である。2015年は海水域面積最少年にも関わらず海水は北海道沿岸に到達しており、これは観測と整合的である。

Figure 3: Historical simulation of the “present climate” from 1993 to 2018. (Left panel) Time series of maximum sea ice extent analyzed by Japan Meteorological Agency (blue solid line) and simulated by the “Okhotsk Sea model” (red solid line). (Right panel) Sea ice concentration (shade) of February, 2015, when the sea ice extent is maximum in the 2015 winter, simulated by the model. Note that 2015 recorded the minimum sea ice extent in the period between 1993 and 2018; nevertheless, sea ice reached the Hokkaido coast, which is consistent with observation.

のダウンスケーリングとは異なるものである。気候モデルでは、現在気候を正しく再現している(バイアスがない)との保証はない。したがって、気候モデルの現在気候を用いてダウンスケーリングを行った場合、得られる現在の海水分布にバイアスがある可能性がある。一方、温暖化差分値に基づく温暖化予測では、「現在気候」としてJRA55-doを用いるので、そこにバイアスはない。したがって、差分値に基づく「2050年」における将来変化も、モデル群のアンサンブルから得られる大規模な温暖化パターンを、純粋に反映したものとなっている。「バイアスのない現在の大気条件」というのは優れた点であり、また3.1節で示すように、海水変動シミュレーションは現在の海水変動を非常に良く再現していることから、この手法は海水変動の将来予測についても有望な結果を与えるものと考えられる。弱点は、「高低気圧など総観規模擾乱についても現在の大気変動と同じ」と仮定することになるので、総観規模擾乱の温暖化による影響(強さや経路の変化)を取り入れることができないことである。その海水分布への影響に関しては改めて考察することとする。

3. 結果

3.1 海水・海洋モデルの開発と過去再現実験

まず親モデルである「オホーツク海モデル」を用い、大気再解析JRA55-doを大気境界条件として、1993年から2018年の過去再現実験を行った。図3(左)はオホーツク海の

各年の最大海水域面積を示しており、オホーツク海全体の海水の再現性が非常に良いことがわかる。モデルの最大海水域面積と気象庁の解析値との相関(r)は、 $r=0.90$ であった。例えば2015年は記録的な少氷年であったが、気象庁の解析(オホーツク海の海水分布(月概況): https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/seaice/archive/c_1/okhotsk_monthly/2015/02/okhotsk_monthly.html)と同様、モデルでも知床海域に海水が到達する状況が再現された(図3右)。

次に、オホーツク海モデル(10km格子)に北海道モデル(2km格子)をネスティングし、北海道沿岸に焦点をあてたモデルを開発した。両者を比較すると高解像度の北海道モデルをネスティングすることによる明らかな改善がみられる。例えば、オホーツク海モデル(10km格子)の北海道近傍を拡大し(図4左)、衛星観測(図4右)と比較すると、オホーツク海モデルではアニワ湾での海水生成がみられず北海道沿岸の海水分布の再現性が低いことがわかる。一方、高解像度の北海道モデルではアニワ湾の海水生成が再現され(図4中央)、北海道沿岸域の海水分布は著しく改善している。また、海水面積(46°N以南)の北海道モデルにおける年々変動は衛星観測(Special Sensor Microwave/Imager: SSM/I)と比較してよく再現されており、モデルと観測値の相関は、 $r=0.85$ であった。

3.2 CMIP6モデル群における環オホーツク地域の将来変化

CMIP6モデル群のうちデータが利用可能な19モデルについて解析し、環オホーツク海域における冬季気候の再

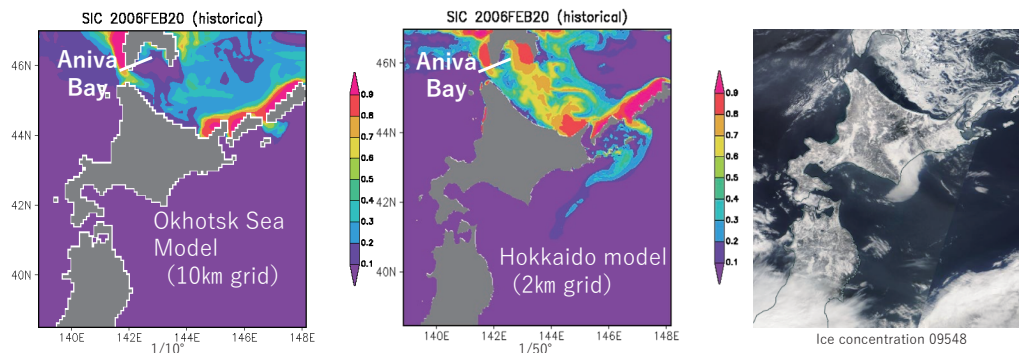


図4：(左)「オホーツク海モデル」による北海道近傍の海水分布の拡大図(2006年2月20日)。陰影は海水密度度。(中央)同日の「北海道モデル」における海水分布。陰影は海水密度度。(右)2006年2月20日のModerate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)による衛星画像。

Figure 4: (Left panel) Sea ice concentration (color shade) off the coast of Hokkaido on February 20th, 2006, simulated by the “Okhotsk Sea model”. (Central panel) Same as the left panel except for the simulation by the “Hokkaido model”. (Right panel) Satellite observation by Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) of the same day.

現性を評価した。その中で、将来予測においてvery hot models (Shiogama et al., 2021) と評価されている4モデルをまず取り除いた。その他の15モデルについて環オホーツク地域(30° N ~ 70° N, 120° E ~ 180° Eの領域)における地表風の水平分布再現性について、大気再解析JRA55を基準とし、二乗平均平方根誤差およびTaylorのスキルスコアを用いて評価を行った。多くのモデルは日本周辺の北西季節風やアリューシャン低気圧などの循環場をよく再現していたが、やや再現性が低いモデルも4つ存在した。これら4モデルを除いた11モデルのアンサンブル平均を用いて、海水・海洋モデル実験の大気境界条件として

与えるための温暖化差分量を低位温暖化シナリオ (SSP1-2.6)・中位温暖化シナリオ (SSP2-4.5)・高位温暖化シナリオ (SSP5-8.5)について計算した。

地表風の将来変化は、オホーツク海南部における地表西風成分の強化とアリューシャン低気圧の北上という特徴を示した。環オホーツク地域で言えば、オホーツク海北部で北風偏差、北海道付近で西風偏差となっていた。たとえば、低位温暖化シナリオ (SSP1-2.6)において、「2050年」での北海道付近の西風偏差は 0.6ms^{-1} 程度と評価された(図5左)。また地表気温に関して言えば、現在気候との差は低位温暖化シナリオでさえ北海道の緯度で 1.8°C を越え

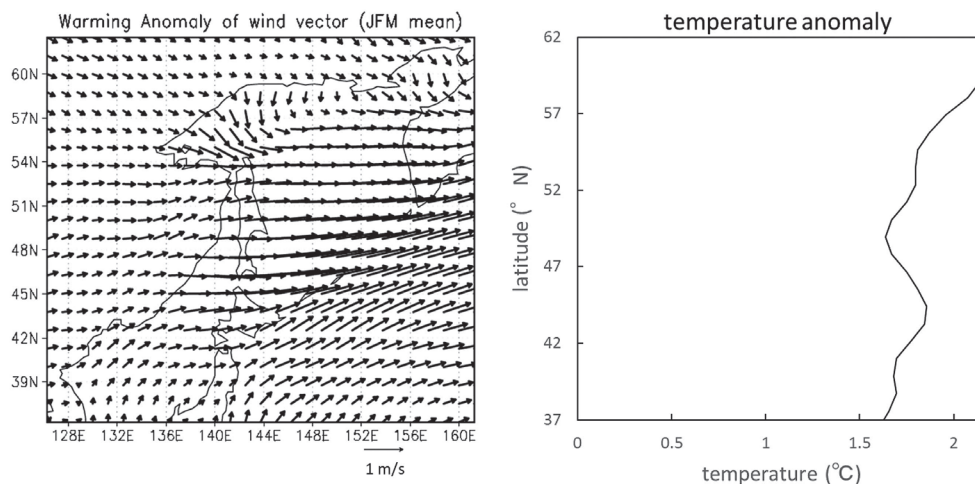


図5：(左) CMIP6による環オホーツク地域における「2050年」と「2000年」の地表風の偏差(低位温暖化シナリオ)。(右) オホーツク海・北海道の風上(128° E-137° E, 37° N-62° N)における地表気温偏差の東西平均

Figure 5: (Left panel) Difference of the surface wind (vectors) between “2050 climate” and “2000 climate” in the Pan-Okhotsk region derived from CMIP6 with low global warming scenario. (Right panel) Difference of the zonal mean surface temperature in the area 128°E-137°E, 37°N-62°N, between 2050 climate and 2000 climate estimated by CMIP6. The area is located westward of the Sea of Okhotsk and Hokkaido.

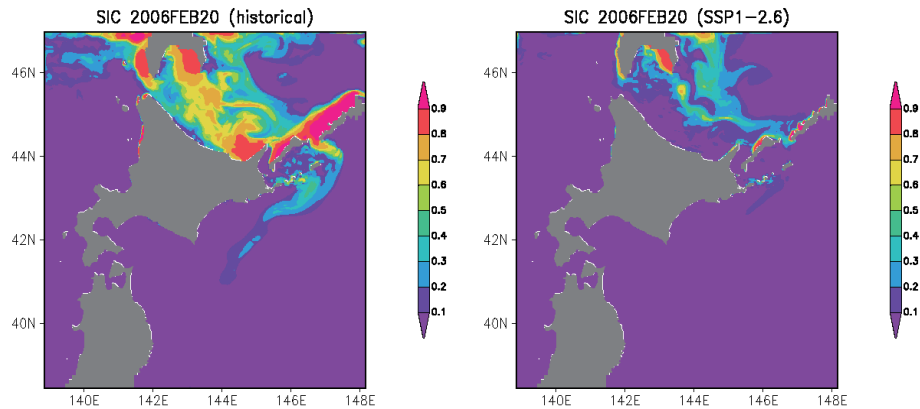


図6：（左）JRA55-doを用いて駆動した「現在気候」再現実験の、2006年2月20日の海水氷接度分布（陰影）。（右）CMIP6による将来気候（低位温暖化シナリオSSP1-2.6の「2050年」）に対応する温暖化実験から求めた海水氷接度分布（陰影）（2006年の大気データに温暖化差分値を足した実験）。

Figure 6: (Left panel) Simulation of sea ice concentration (color shade) on February 20th, 2006, in the “present climate” forced by JRA55-do. (Right panel) Same as the left panel, except for that of the “2050 climate” estimated by the low global warming scenario of CMIP6.

ており（図5右）、環オホーツク地域に対する温暖化の影響は大きいことがわかる。

3.3 温暖化実験

「2050年」における海水変動を評価するために、低位（SSP1-2.6）・中位（SSP2-4.5）・高位（SSP5-8.5）それぞれのシナリオについて、温暖化実験を行った。ここでは主に、高解像の北海道モデルを用いて行った解析結果について記述する。

図6に、例として2006年の大気データをもとにした、低位温暖化シナリオによる温暖化実験の結果を示す。気温上昇差分に関しては、オホーツク海より西側（128° E-137° E, 37° N-62° N）の値を用いた。オホーツク海風上での気

温上昇は、北海道の緯度で1.8℃を超えており、その結果、低位温暖化シナリオでさえも海水減少は顕著であることがわかった（図6）。2006年の再現シミュレーションでは海水は知床半島に到達し、そこで滞留して、高い氷接度を示している。一方、2006年の大気条件に基づく「2050年」の場合、図6の海水は北海道に到達していない。温暖化に伴う海水融解の増加および海水生産量の減少が、この海水減少をもたらすものと思われる。西風強化による海水の沖への輸送も、海水減少の一因かもしれない。

図7は各冬の北海道沿岸における積算海水面積の頻度分布である。0.5×10⁶ km²day毎に区分しており、「現在気候」では3.5×10⁶ km²dayを最頻値として、ほぼ左右対称に積算海水面積頻度が分布している。しかし温暖化すると、

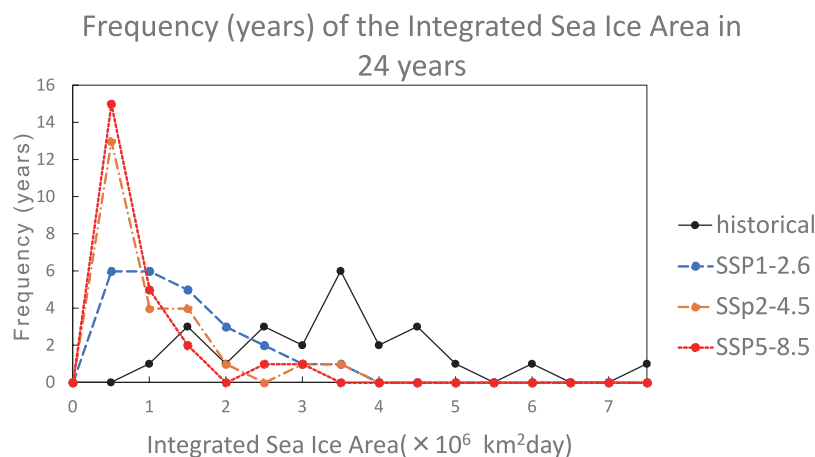


図7：北海道沿岸域(142° E-147° E, 43.9° N-46° N)における冬季積算海水面積の頻度分布。

Figure 7: Frequency distribution of the integrated sea ice area during each winter in the area 142°-147°E, 43.9°-46°N.

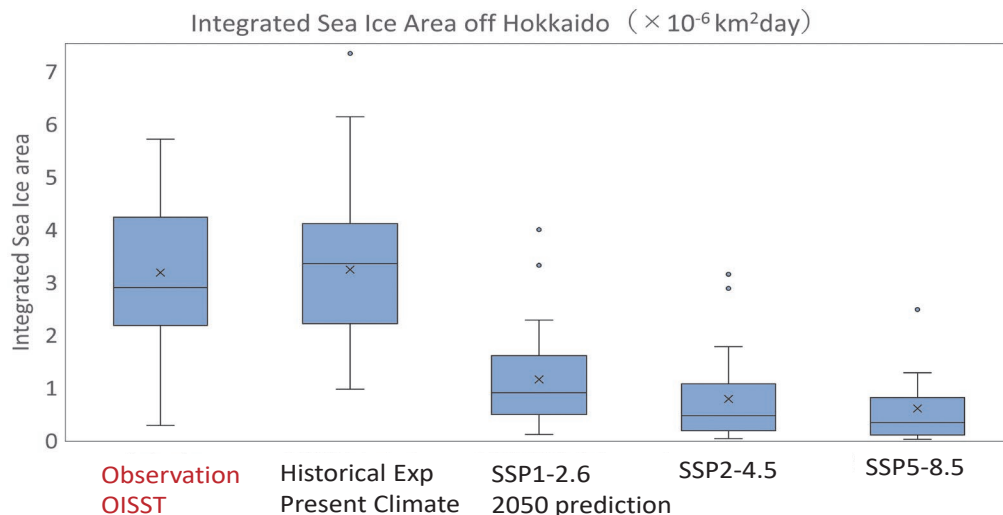


図8：北海道沿岸域(142° E-147° E, 43.9° N-46° N)における冬季積算海水面積の箱ひげ図。observationはOptimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST)による観測結果を表す。historicalは「現在気候」による実験結果、SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5はそれぞれ低位、中位、高位温暖化シナリオによる「2050年」の実験結果である。×は平均値を表す。

Figure 8: Box plots of the integrated sea ice area during each winter in the area 142°-147°E, 43.9°-46°N. “Observation” denotes that by Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST). “Historical” denotes the simulation by the atmospheric condition (JRA55-do) of the “present climate”. SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5 denote global warming scenarios of “2050 climate” representing low, medium, and high global warming, respectively. × denotes the mean value.

海水面積の頻度は面積縮小へと大きくひずみ、左右対称ではなくなる。低位温暖化シナリオでは最頻値は $0.5 \sim 1.0 \times 10^6 \text{ km}^2\text{day}$ で生じた。中位・高位温暖化シナリオでは最頻値が $0 \sim 0.5 \times 10^6 \text{ km}^2\text{day}$ の区分で生じており海水面積が大きく縮小するとの予測となった。

海水面積の頻度分布を箱ひげ図にしたのが図8である。箱ひげ図のひげの先端は最小値と最大値を表す。また、箱の部分は海水面積の25パーセンタイルから75パーセンタイルを示している（パーセンタイルとは、小さい数字から大きい数字に並べ替え、パーセント表示すること）。箱の中の線は中央値（メジアン）、すなわち50パーセンタイルを示している。×は平均値である。図8には、モデルの結果に加え、米国NOAAのOptimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST)による海水分布の箱ひげ図を「観測値」として載せた。

モデルによる「現在気候」の海水再現実験は、観測値をよく再現している。現在気候での中央値はモデルの方がやや大きい。平均値は観測とモデルともに $3.2 \times 10^6 \text{ km}^2\text{day}$ であった。このモデルの再現性を前提に、「2050年」の海水面積積算値を評価する。低位温暖化シナリオの平均値は $1.2 \times 10^6 \text{ km}^2\text{day}$ 、中央値は $0.90 \times 10^6 \text{ km}^2\text{day}$ であった。低位温暖化シナリオの場合でも、海水は現在気候に比して平均値で約1/3に激減するという結果を得た。さらに、中央値が平均値よりも小さいということは、温暖化

すると平均値に対して海水面積が小さな年の頻度が増えることを意味する。すなわち、海水面積が平均値を下回るような年はより多くなることもわかった。中位・高位温暖化シナリオでは平均値はそれぞれ $0.78 \times 10^6 \text{ km}^2\text{day}$ 、 $0.61 \times 10^6 \text{ km}^2\text{day}$ 、中央値が $0.46 \times 10^6 \text{ km}^2\text{day}$ 、 $0.33 \times 10^6 \text{ km}^2\text{day}$ である。平均値で見ると、海水面積は現在気候と比してそれぞれ1/4、1/5程度になることがわかる。中央値でみると、海水減少はさらに顕著である。

この顕著な海水減少について考察するために、北海道沿岸域での1月上旬の海面水温 (SST; 図9) を調べた。これは1/10°のオホーツク海モデルの結果であるが、大気強制力である温暖化差分値の分布は大スケールのものであり、海水到来前のSSTの解析には問題がないと考える。海水到来のプレコンディションとなる1月上旬の北海道沿岸SST (図9) では、「現在気候」から低位温暖化への差異が平均値で約 1.0°C と大きい。これは、「2050年」におけるシナリオ間での差異（低位温暖化シナリオと高位温暖化シナリオで約 0.5°C ）よりも大きい値である。北海道沿岸域では海水生産は「現在気候」においてもほとんどなく、東樺太海流に乗って北方より到来する海水が融解されつつ最終的に北海道沖に到達することを考えると、現在から2050年までのSST上昇による海水融解の増加が、図8に見られるような温暖化時における急激な海水減少を引き起こすものと示唆される。サハリン島沿岸の海水生産量の低下も北海

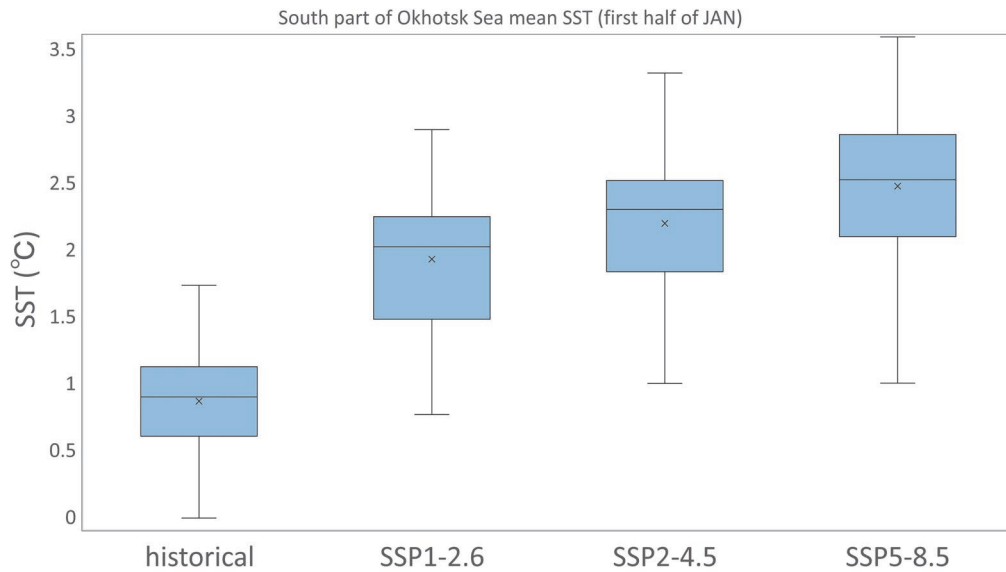


図9：1/10°モデルによる北海道沿岸域（142° E-147° E, 43.9° N-47° N）で領域平均した1月上旬の海表面水温（SST）の箱ひげ図。historicalは「現在気候」、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5はそれぞれ低位、中位、高位温暖化シナリオによる「2050年」の実験結果である。
Figure 9: Box plots of the mean SST during each winter in the area 142°-147°E, 43.9°-46°N. “Historical” denotes the simulation by the atmospheric condition (JRA55-do) of the “present climate”. SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5 denote global warming scenarios of “2050 climate” representing low, medium, and high global warming, respectively.

道沿岸の流氷減少に寄与していると思われるが、これは現在調査中である。

4. おわりに

本稿では、知床をはじめとする北海道沿岸における海水の変動予測について、その方法と初期的な結果を述べた。FRA-ROMSをベースとし、1/10°の「オホーツク海モデル」に1/50°の「北海道モデル」をネスティングするという、北海道沿岸に着目した海洋・海水モデルを構築した。大気解析データJRA55-doを大気強制とした過去（「現在気候」）再現実験を行ったところ、モデルは観測された海水面積を良く再現した。そして、それを基盤にCMIP6の「2050年気候値と2000年気候値との差分」を利用して温暖化実験を行った。その結果、低位温暖化シナリオであっても、「2050年」の北海道沿岸および東方の海水面積が現在に比して、平均値で約1/3に激減するという結果を得た。温暖化により北海道沿岸域における1月上旬の海表面水温が1.0°C程度上昇し、海水融解量が「2050年」までに大きく増加することが要因と思われる。このように、流氷に対する温暖化のインパクトは大きく、北海道沿岸に到達する海水は今後大きく減少する可能性が高い。

ここで用いた大気外力の温暖化差分値はCMIP6気候モデル群のアンサンブル平均を用いたものである。しかし

ながら、各々の気候モデルの将来予測にはばらつきがある。現在、オホーツク海風上の気温と北海道北部の西風偏差の値をインデックスに気候モデルを分類し、そのばらつきとその海洋・海水モデルへのインパクトを検討している。

将来海水が大きく減少したときの、その生態系への影響が社会的関心事である。微量栄養物質である鉄を運び、また海水下に植物プランクトンの春季ブルームの種となるアイスアルジーを保持するなど、海水の海洋基礎生産への影響は大きいと考えられる。また、海水はアザラシの出産や休憩のためのプラットフォームとなっていることなど、海水がなくなれば高次生態系にも大きなインパクトを与えられると思われる。水産資源の管理計画にとっても重要な要素であろう。ただ、海水減少に対するこれらの影響の定量的評価は、未だデータの不足のため困難というのが現状である。生態系モデルなども活用しながら、生態系への温暖化のインパクトを定量的に評価することが今後の課題である。

謝辞

本研究は環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20214002）により行われたものである。丁寧な査読をしてくださった中村氏に感謝します。

参考文献

- 青田昌秋, 石川正男, 村井克詞 (1992) オホーツク海・北海道沿岸の海水勢力と気温の統計的關係. 地学雑誌, **101**, 485-490.
- Cavalieri, D. J. and C. L. Parkinson (2012) Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010. *Cryosphere*, **6**, 881–889. <https://doi.org/10.5194/tc-6-881-2012>
- Haidvogel, D.B., W.P. Budgell, B.D. Cornuelle, E. Curchitser, E. Di Lorenzo, K. Fennel, W.R. Geyer, A.J. Hermann, L. Lanerolle, et al. (2008) Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the Regional Ocean Modeling System. *J. Comput. Phys.*, **227**, 3595–3624.
- Hedstrom, K. (2018) Technical Manual for a Coupled Sea-Ice/Ocean Circulation Model (Version 5). U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Alaska OCS Region. OCS Study BOEM 2016-037. 169 pp.
- Hunke, E. C. and J. K. Dukowicz (1997) An Elastic–Viscous–Plastic Model for Sea Ice Dynamics. *J. Phys. Oceanogr.*, **27**, 1849–1867. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1997\)027<1849:AEVPMF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1997)027<1849:AEVPMF>2.0.CO;2)
- Kuroda, H., T. Setou, S. Kakehi, S. Ito, T. Taneda, T. Azumaya, D. Inagake, Y. Hiroe, K. Morinaga, M. Okazaki, et al. (2017) Recent advances in Japanese fisheries science in the Kuroshio-Oyashio region through development of the FRA-ROMS ocean forecast system: Overview of the reproducibility of reanalysis products. *Open J. Mar. Sci.*, **7**, 62–90.
- Kuroda, H., T. Tanaka, S. Ito and T. Setou (2021) Numerical study of diurnal tidal currents on the Pacific shelf off the southern coast of Hokkaido, Japan. *Cont. Shelf Res.*, **230**, 104568.
- Kuroda, H., Y. Taniuchi, H. Kasai, T. Nakanowatari and T. Setou (2021) Co-occurrence of marine extremes induced by tropical storms and an ocean eddy in summer 2016: Anomalous hydrographic conditions in the Pacific shelf waters off southeast Hokkaido, Japan. *Atmosphere* 2021.
- Mellor, G. L. and L. Kantha (1989) An ice-ocean coupled model, An ice-ocean coupled model. *J. Geophys. Res.:Oceans*, **94**, 10937-10954.
- Ohshima, K. I., M. Wakatsuchi, Y. Fukamachi and G. Mizuta (2002) Near-surface circulation and tidal currents of the Okhotsk Sea observed with satellite-tracked drifters. *J. Geophys. Res.*, **107**, 3195. doi:10.1029/2001JC001005
- Shchepetkin, A.F. and J.C. McWilliams (2005) The regional oceanic modeling system (ROMS): A split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Model.*, **9**, 347–404.
- Shiogama, H., N. N. Ishizaki and 9 others (2021) Selecting CMIP6-based future climate scenarios for impact and adaptation studies. *SOLA*, **17**, 57-62.
- St. Laurent, L. C. and C. Garrett (2002) The role of internal tides in mixing the deep ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, **32**, 2882–2899.
- Tsujino, H. et al. (2018) JRA-55 based surface dataset for driving ocean–sea-ice models (JRA55-do). *Ocean Model.*, **130**, 79–139. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2018.07.002>
- Tanaka, Y., T. Hibiya and Y. Niwa (2007) Estimates of tidal energy dissipation and diapycnal diffusivity in the Kuril Straits using TOPEX/POSEIDON altimeter data. *J. Geophys. Res.*, **112**, C10021, doi:10.1029/2007JC004172, 2007.
- Toyoda, T., Y. Kitamura, R. Okada, K. Matsumura, K. Komatsu, K. Sakamoto, L. S. Urakawa and H. Nakano (2022) Sea ice variability along the Okhotsk coast of Hokkaido based on long-term JMA meteorological observatory data. *Okhotsk Sea and Polar Oceans Res.*, **6**, 27-35.
- Toyota, T., N. Kimura, J. Nishioka, M. Ito, D. Nomura and H. Mitsudera (2022) The Interannual variability of sea ice area, thickness, and volume in the southern Sea of Okhotsk and its likely factors. *J. Geophys. Res.: Oceans*, **127**, e2022JC019069. <https://doi.org/10.1029/2022JC019069>
- Yamanaka, G., H. Nakano, K. Sakamoto, T. Toyoda, L. S. Urakawa, S. Nishikawa, T. Wakamatsu, H. Tsujino and Y. Ishikawa (2021) Projected climate change in the western North Pacific at the end of the 21st century from ensemble simulations with a high-resolution regional ocean model, *J. Oceanogr.*, **77**, 539–560. <https://doi.org/10.1007/s10872-021-00593-7>