

# 気候変動適応策の検討に資するための高解像度海洋モデルを用いた海洋将来予測データベース構築

課題責任者

五十嵐 弘道 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 情報エンジニアリング  
プログラム

著者

西川 史朗\*<sup>1</sup>, 黒木 聖夫\*<sup>2</sup>, 杉山 徹\*<sup>1</sup>, 五十嵐 弘道\*<sup>1</sup>, 石川 洋一\*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup>海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 情報エンジニアリングプログラム, \*<sup>2</sup>海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 地球情報基盤センター

令和 2 年度までに開発した水平解像度 10km および 2km の領域海洋モデルを中心とする海洋モデルシステムを用いて、CMIP5 (第 5 次結合モデル相互比較プロジェクト) の複数モデル・シナリオの大気データや大気再解析データ (JRA55) から作成された海面外力データによる海洋モデルシミュレーションを実施することにより、北太平洋域 10km および日本近海域 2km の 2 種類の海洋過去再現・将来予測データセット改良版を作成した。前者(10km データ)では簡単な生物地球化学過程を含むことによる予測項目の拡充が、後者(2km データ)では潮汐過程を含むことによる物理過程の高度化が各改良版データの特徴の 1 つとなっている。各データについて日本周辺海域を中心とした基本的な再現・予測性能を検証するとともに、データセット公開に向けての準備を進めた。

キーワード：海洋将来予測, 低次生態系, 潮汐過程, 高解像度海洋モデル, CMIP5

## 1. はじめに

本課題では、令和 2 年度より参画した「統合的気候モデル高度化研究プログラム」領域テーマ C「統合的気候変動予測」のサブ課題「海洋将来予測データベースのための統合型海洋モデル開発」(以下、統合プロ課題)において日本周辺海域の将来予測データセットを作成することを目標に海洋モデル開発などを行ってきた。令和 2 年度は、その統合プロ課題目標のため、水平解像度約 10km の北太平洋海域モデル (NP)、水平解像度約 2km の日本近海域モデル (JPN)、全球海洋モデル (GLB) の 3 つからなる海洋モデルシステムを導入・開発した[1]。モデル開発・改良のポイントとしては、データセットの利用ニーズも踏まえ、GLB と NP に簡単な生物地球化学過程 (低次生態系) を導入したことと、JPN に潮汐を陽に表現する過程を導入したことが主な改良点である。統合プロ課題の最終年度となる令和 3 年度は、前年度までに開発・改良したそれらの海洋モデルを用い、新たな地球シミュレータ (ES4) 上で大規模実験 (プロダクトラン) を行うことで、目標とする海洋将来予測データセットの作成を行った。

## 2. モデルと実験の概要

使用する海洋モデルシステムの主な仕様・特徴を表 1 にまとめた (各モデル詳細については令和 2 年度の当課題報告書[1]も参照)。これらは昨年度までに DA システムや ES3 で開発・調整を行い、2021 年 3 月より稼働開始された ES4 に移植して、長期積分のための調整を行った。

海洋過去再現・将来予測実験を行うための海面外力として、CMIP5 (第 5 次結合モデル相互比較プロジェクト) より MIROC5 と MRI-CGCM3 の 2 つのモデルの historical, RCP2.6, RCP8.5 の各シナリオケースの大気要素から作成した大気外力データ[6]と、大気再解析 (JRA55) に基づく海洋モデル駆動用大気データセット JRA55-do[7]を使用し

た。これを用いて表 2 および表 3 に示す期間の積分実験を実施することで、2 種類の海域予測データセットを作成した。その詳細は 3 節と 4 節で述べる。

## 3. 北太平洋域 10km 将来予測データの作成

GLB および NP モデルを用いて表 2 に示す連続長期積分実験を実施することで、北太平洋域 10km 解像度の将来予測データセットを作成した。(ここで、1960-1969 年は NP モデルスピンアップ期間と見なし、データセットから除外した。) 1960 年 1 月 1 日の初期値として、別途 GLB 相当モデルと JRA55-do を用いて 1830 年積分した結果を各実験共通初期値として用いた (気象研究所提供、詳細略)。以下にこの 10km データセット (NP モデル結果) 検証の一例を示す。

図 1 は日本周辺海域で平均した海面水温の 1970 年から 2100 年までの時系列を NP モデルの各結果 (図 1a) および外力に使用した CMIP5 の対応するオリジナル結果 (図 1b) からそれぞれプロットしたものである。過去再現期間 (1970-2005 年) について JRA55-do 結果 (図の緑線) を観測値に近いリファレンスとして考えると、CMIP5 オリジナルデータでは両モデルとも全体的に低温バイアス傾向となっているが (図 1b)、本データの対応する各結果 (図 1a) ではこのバイアスが軽減されてより観測値に近づいていることがわかる。この点以外では、海面水温の年々～経年変動や 2100 年に至る将来変化など各 NP モデル結果は CMIP5 オリジナル結果とよく対応しており、妥当な CMIP5 ダウンスケーリング結果となっていることが示唆される。図 2 はある年の 5 月 (春季ブルームに対応) における海面クロロフィル a 分布を NP モデル結果と衛星観測による気候値分布と比較したものである。外洋域における大局的な分布 (亜寒帯域と東部赤道太平洋での高クロロフィル a 分布、亜熱帯域での低クロロフィル a 分布) に

ついてモデルは観測をある程度よく再現しているといえる一方、観測に見られる亜寒帯沿岸の高い分布については、今回用いた低次生態系モデル・設定は非常に簡略化されたタイプのモデル・設定を採用しているために再現の難しい部分と考えられる。

#### 4. 日本近海域 2km 将来予測データの作成

JPN モデルを用いて表 3 に示すタイムスライス期間の積分実験を実施することで、日本近海域 2km 解像度の将来予測データセットを作成した。以下にこの 2km データセット (JPN モデル結果) を検討した一例を示す。

図 3 は大気外力として MIROC5 を用いた場合の現在気候 (historical) の 8 月の海面水温平均値を 10 年分 (1996–2005) 平均したものである。NP モデル (図 3a) と比較して JPN モデル (図 3b) では豊後水道等で低水温分布が表現されている。JPN モデルで表現されたこの低水温分布の特徴は、同様の実験設定 (大気外力データ以外) で駆動された Sakamoto et al. (2019)[5] で表現されたものに似ており、衛星観測とも整合的である ([5]の Fig. 9 参照)。JPN モデルでは潮汐を陽に表現することにより、瀬戸内海等で海面水温の表現性が向上したことがわかる。図 4 は、大気外力として MIROC5 を用いた場合の将来予測シナリオ RCP8.5 での 8 月の海面水温平均値の 10 年分平均 (2046–2055) から現在気候での 8 月の海面水温平均値の 10 年分平均 (1996–2005) を引いたものである。NP モデル (図 4a) では瀬戸内海東部で水温上昇がより顕著になる傾向があるのに対し、JPN モデル (図 4b) では潮流が強く低水温分布が表現された部分で水温上昇がより顕著になっている。水温上昇の局所的な分布の違いは、鉛直混合、海面フラックス、水平的な熱フラックスのバランスで決まっていると考えられるが、詳細なメカニズムの解析は今後の課題である。

#### 5. データセット公開に向けて

今回作成した海洋予測データセットは、以前に当課題 (ES3 所内課題) で作成した Future Ocean Regional Projection (FORP) データセット[6][8] の改良版の位置づけであり、FORP version 4 として DIAS (データ統合・解析システム) サイトにおいて公開予定で、NetCDF による整備 (メタデータ整備) などの公開準備を進めている。また、本データは、気象庁・文部科学省により取りまとめが進められている「気候予測データセット 2022」に海域の予測データとして取り入れられる予定となっている。

#### 謝辞

本課題は、文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム領域テーマ C 「統合的気候変動予測」 (JPMXD0717935561) のもと実施している。海洋モデル開発において、気象研究所の辻野様、坂本様、山中様に多大な協力を頂いた。

#### 文献

- [1] 西川史朗, 杉山徹, 黒木聖夫, 五十嵐弘道, 石川洋一 "気候変動適応策の検討に資する海洋将来予測データベース構築のための海洋モデル開発", Annual Report of the Earth Simulator. April 2020 - February 2021, (2021)
- [2] Tsujino H, Nakano H, Sakamoto K, Urakawa S, Hirabara M, Ishizaki H, Yamanaka G, "Reference manual for the Meteorological Research Institute Community Ocean Model version 4 (MRI.COMv4)". Technical Reports of the Meteorological Research Institute, 80., (2017)
- [3] Urakawa S, Tsujino H, Nakano H, Sakamoto K, Yanamaka G, Toyoda T, "The sensitivity of a depth-coordinate model to diapycnal mixing induced by practical implementations of the isopycnal tracer diffusion scheme", Ocean Modelling 154, (2020)
- [4] Nakano H, Matsumura Y, Tsujino H, Urakawa S, Sakamoto K, Toyoda T, Yanamaka G, "Effects of eddies on the subduction and movement of water masses reaching the 137°E section using Lagrangian particles in an eddy-resolving OGCM", Journal of Oceanography 77, 283-305, (2021)
- [5] Sakamoto K., Tsujino H, Nakano H, Urakawa S, Toyoda T, Hirose N, Usui N, Yamanaka G, "Development of a 2-km resolution ocean model covering the coastal seas around Japan for operational application", Ocean Dynamics 69, 1181–1202, (2019)
- [6] Nishikawa S, Wakamatsu T, Ishizaki H, Sakamoto K, Tanaka Y, Tsujino H, Yamanaka G, Kamachi M, Ishikawa Y, "Development of high-resolution future ocean regional projection datasets for coastal applications in Japan", Prog. Earth. Planet. Sci., 8 (7), (2021)
- [7] Tsujino H, Urakawa S, Nakano H, et al., "JRA-55 based surface dataset for driving ocean-sea-ice models (JRA55-do)", Ocean Modelling 130, 79-139, (2018)
- [8] 西川史朗, 若松剛, 石川洋一, 五十嵐弘道 "気候変動適応策の検討に資するための領域海洋将来予測データベース構築", Annual Report of the Earth Simulator. April 2019 - March 2020, (2019)

表 1: 海洋モデルシステムの基本的な仕様

	GLB (全球モデル)	NP (北太平洋海域モデル)	JPN (日本近海域モデル)
用途	(NP の親モデル)	10 km データセット作成 (JPN の親モデル)	2 km データセット作成
海洋モデルコード	MRI.COMv4.6 (T sujino et al. 2017 [2])	(GLB と同じ)	(GLB と同じ)
領域	全球	99°E-75°W, 15°S-63°N	117°E-160°E, 20°N-52°N
水平解像度	1°×1/2° (tripolar)	1/11°×1/10°	1/33°×1/50°
水平格子点数	364×366	2049×784	1423×1604
鉛直層	NP と同様の 60 層 + BBL	60 層 (表層 2m, 最下層 600m)	(NP と同じ)
側面境界	(周期境界)	GLB からの オフラインネスティング	NP からの オフラインネスティング
潮汐、河川流入	潮汐なし、河川流入あり	潮汐なし、河川流入あり	潮汐あり、河川流入あり
生物地球化学過程	NPZD + 炭素循環	NPZD + 炭素循環	なし
参考論文	Urakawa et al. (2020) [3]	Nakano et al. (2021) [4]	Sakamoto et al. (2019) [5]

表 2: GLB および NP モデルにおける各実験の期間

	Historical	RCP2.6	RCP8.5
MIROC5	1960-2005	2006-2100	2006-2100
MRI-CGCM3	1960-2005	2006-2100	2006-2100
JRA55-do	1960-2018		

表 3: JPN モデルにおける各実験の期間

	Historical	RCP2.6	RCP8.5
MIROC5	1991-2005	2086-2100	2041-2055, 2086-2100
MRI-CGCM3	1991-2005	2086-2100	2041-2055, 2086-2100
JRA55-do	1991-2005, 2006-2018		

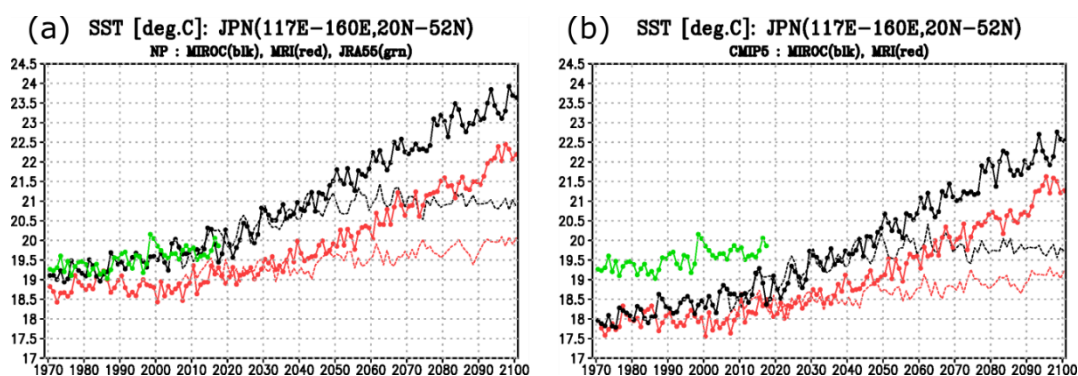


図 1: 日本周辺海域 (117-160°E, 20-52°N) で平均した海面水温の年毎時系列を (a) NP モデル結果、および (b) CMIP5 オリジナル海域データ結果で示したもの。黒は MIROC5 (太線: historical+RCP8.5, 細線: RCP2.6)、赤は MRI-CGCM3 (太線、細線は MIROC5 と同様) を示す。緑は NP モデルの JRA55-do ケースを示し、(a)と(b)で共通である。単位は°C。

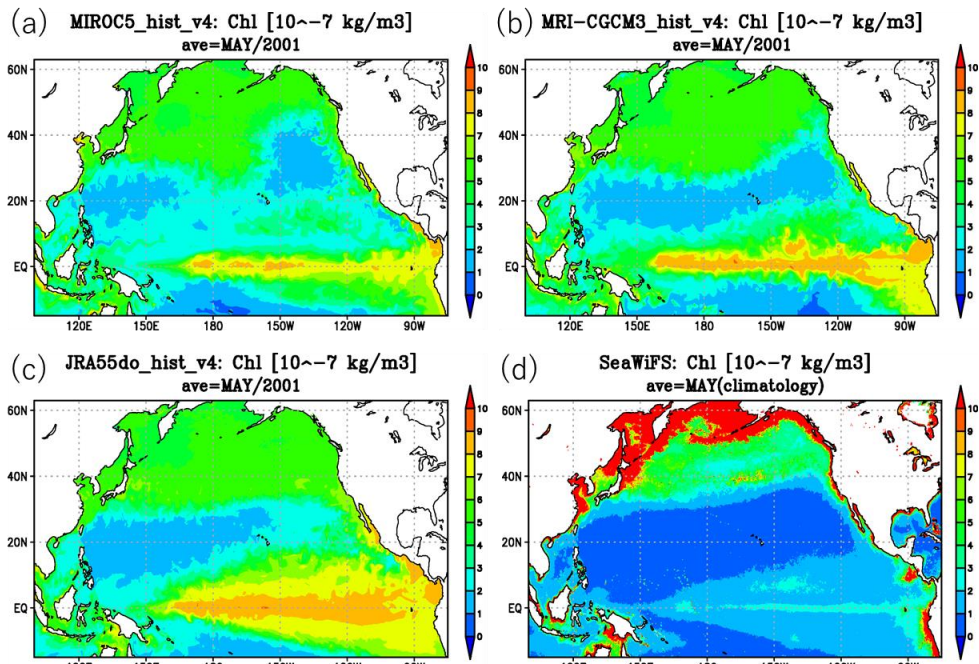


図2: 2001年5月平均の海面クロロフィルa分布(単位:  $10^{-7}$  kg m<sup>-3</sup>)をNPモデルによる(a)MIROC5,(b)MRI-CGCM3,(c)JRA55-do各ケースについて示したものと、(d)衛星データSeaWiFSにおける海面クロロフィルaの5月の月別気候値分布を示したものと。

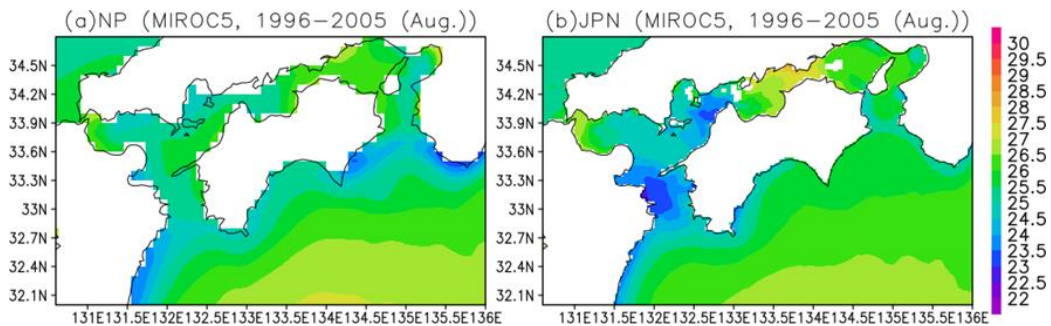


図3:(a)NPモデル,(b)JPNモデルにおける8月の海面水温平均値の10年分の平均(1996-2005、MIROC5、Historical)。単位は°C。

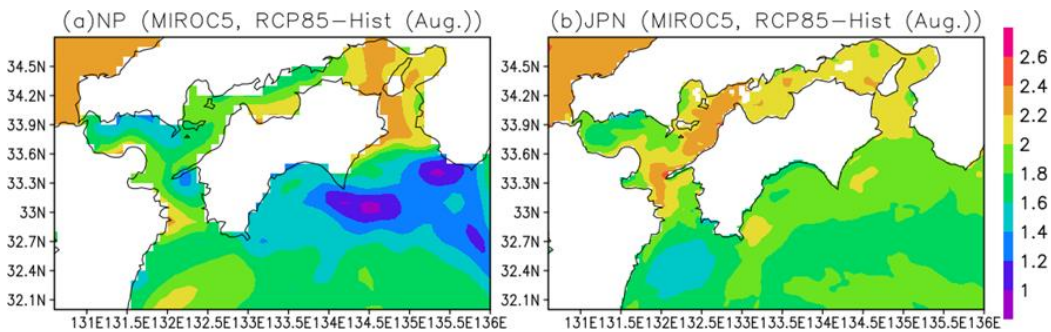


図4:(a)NPモデル,(b)JPNモデルについて、将来気候の8月の海面水温平均値の10年分の平均(2046-2055年、MIROC5、RCP85)から現在気候の8月の海面水温平均値の10年分の平均(1996-2005年、MIROC5、Historical)を引いたもの。単位は°C。

# Improvement of High-Resolution Future Ocean Regional Projection Datasets for the Climate Change Adaptation Research in Japan

## Project Representative

Hikomichi Igarashi Information Engineering Program, Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

## Authors

Shiro Nishikawa \*<sup>1</sup>, Masao Kurogi \*<sup>2</sup>, Toru Sugiyama \*<sup>1</sup>, Hiromichi Igarashi \*<sup>1</sup>, Yoichi Ishikawa \*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup>Information Engineering Program, Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology,

\*<sup>2</sup>Center for Earth Information Science and Technology, Research Institute for Value-Added-Information Generation,

\* Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

We have developed a revised version (version 4) of the high-resolution "Future Ocean Regional Projection (FORP)" datasets using an improved ocean model system and CMIP5/JRA55 based atmospheric forcings. The datasets consist of the North Pacific ocean dataset with 10km horizontal resolution and the regional ocean dataset around Japan with 2km resolution. The points of the datasets improvement are (i) addition of biogeochemical processes/variables in the 10km dataset and (ii) inclusion of explicit tides in the physics of the 2km dataset. We have confirmed the basic performance of the historical and future projection simulations of each data and are preparing the datasets release.

**Keywords :** Ocean Future Projection, High-Resolution Ocean Model, Biogeochemical Process, Tide process, CMIP5

## 1. Introduction

In the previous year, we have developed the ocean model system for high-resolution (10km and 2km horizontal resolutions) ocean future projection around Japan under the research project of the "TOUGOU" program [1]. The goal of the project is to produce an improved/revised version of "Future Ocean Regional Projection (FORP)" datasets [2], the previous versions of which have been developed in the "SI-CAT" program in 2016–2019 [3], to contribute to the climate change adaptation research in Japan. The points of the ocean model improvements to revise the datasets were (i) addition of a simple biogeochemical process in the 10km model and (ii) inclusion of explicit tides in the physics of the 2km model [1]. In this report, we briefly introduce the development of the improved version of the datasets using these ocean models.

## 2. Models and Forcings

The ocean model system consists of the lower resolution global ocean model (GLB), the North Pacific ocean model with 10km resolution (NP), and the regional ocean model surrounding Japan with 2km resolution (JPN), using a one-way off-line nesting method from GLB to NP and from NP to JPN [1]. These were based on the MRI.COMv4 (Tsujino et al. 2017 [4]) ocean model code, and the basic specifications of each model were written in our previous report [1].

To perform ocean historical and future projection simulations to produce the datasets, we used atmospheric data from the CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) climate model outputs. We have chosen MIROC5 and MRI-

CGCM3 with historical (1960-2005), RCP2.6, and RCP8.5 (2006-2100) scenarios. We also used the JRA55-do data [5] for historical simulations. Details of the experiments to produce the revised FORP datasets are shown in sections 3 and 4.

## 3. North Pacific dataset with 10km resolution

Using the GLB and NP models, we conducted sequential integration experiments of historical and future scenario projection shown in Table 1, to produce the North Pacific dataset with 10km resolution. We used a common initial condition of 1 Jan 1960 for each historical experiment of the GLB and NP models. The initial value data came from the results of 1830 years integration using another GLB-type ocean model and cyclic forcings of the JRA55-do. Here, we briefly introduce some examples of the physical and biogeochemical variables of the 10km dataset.

Figure 1 plots time series of the area-averaged sea surface temperature (SST) around Japan for the NP model results (Fig. 1a) and the corresponding CMIP5 original ocean results (Fig. 1b). Figure 1b indicates that the CMIP5 original results had lower SST biases in this region, where the JRA55-do case is considered to be realistic. These SST biases were effectively reduced in the NP model results (Fig. 1a). Except for this, the annual, decadal, and future changes of the SST in each model/scenario were similar between the NP model and CMIP5 original results. Figures 2a-c show monthly mean maps of sea surface chlorophyll in May 2001 for three NP results, comparing with the corresponding observation climatology map from the satellite data (SeaWiFS, Fig 2d). The general pattern (higher in the

subpolar and eastern equatorial regions, and lower in the subtropical region) found in the observation were generally well represented in the NP model results. On the other hand, the extremely higher values in the subpolar coastal regions (Fig. 2d) were not reproduced in the NP model results (Fig. 2a-c), probably because the present biogeochemical model was too simple to reproduce these coastal blooms.

#### 4. Regional ocean dataset around Japan with 2km resolution

Using the JPN model, we conducted time slice experiments as shown in Table 2, to produce the regional downscaling dataset with 2km resolution. Here, we briefly introduce an example of the ocean state representation of a coastal region of Japan in the 2km dataset.

Figure 3 shows the monthly mean SST in August averaged from 1996 to 2005 for the MIROC forced cases of the NP (Fig. 3a) and JPN (Fig. 3b) model results. Lower SST structures in the Bungo Channel (around 33–33.3°N) and the Itsuki-Nada Strait (around 34°N) represented in the JPN model (Fig. 3b) were similar to the results of Sakamoto et al. (2019)[6] and consistent with Satellite observations (not shown), which were not reproduced in the NP model (Fig. 3a). It is indicated that the inclusion of explicit tides in the JPN model led to the improved representation of the SSTs in these regions. Large differences between the NP and JPN model results were also found in the SST future change in these regions (not shown). Investigating the detailed mechanism of the difference is a future work.

#### 5. Preparation to release the revised datasets

The revised datasets produced here would be collectively termed “FORP version4” and released at the DIAS site. We are preparing the NetCDF and the metadata of the datasets.

#### Acknowledgement

We thank Drs. H. Tsujino, K. Sakamoto, and G. Yamanaka of

the MRI/JMA for their many valuable supports in developing the ocean model systems. This study was conducted under the theme C of the TOUGOU program (JPMXD0717935561) supported by the Ministry of Education, Culture, Sports Science and Technology.

#### References

- [1] Nishikawa S, Sugiyama T, Kurogi M, Igarashi H, Ishikawa Y, "Improvement of Ocean Downscaling Models for Future Climate Projection to Contribute the Climate Change Adaptation Research in Japan", Annual Report of the Earth Simulator. April 2020 - February 2021, (2021)
- [2] Nishikawa S, Wakamatsu T, Ishizaki H, Sakamoto K, Tanaka Y, Tsujino H, Yamanaka G, Kamachi M, Ishikawa Y, "Development of high-resolution future ocean regional projection datasets for coastal applications in Japan", Prog. Earth. Planet. Sci., 8 (7), (2021)
- [3] Nishikawa S, Wakamatsu T, Ishikawa Y, Igarashi H, "Development of Future Ocean Regional Projection Datasets to Contribute the Adaptation Plan against the Climate Change", Annual Report of the Earth Simulator. April 2019 - February 2020, (2020)
- [4] Tsujino H, Nakano H, Sakamoto K, Urakawa S, Hirabara M, Ishizaki H, Yamanaka G, "Reference manual for the Meteorological Research Institute Community Ocean Model version 4 (MRI.COMv4)". Technical Reports of the Meteorological Research Institute, 80., (2017)
- [5] Tsujino H, Urakawa S, Nakano H, et al., "JRA-55 based surface dataset for driving ocean-sea-ice models (JRA55-do)", Ocean Modelling 130, 79-139, (2018)
- [6] Sakamoto K., Tsujino H, Nakano H, Urakawa S, Toyoda T, Hirose N, Usui N, Yamanaka G, "Development of a 2-km resolution ocean model covering the coastal seas around Japan for operational application", Ocean Dynamics 69, 1181–1202, (2019)

Table 1 : Periods of GLB/NP model experiments

	Historical	RCP2.6	RCP8.5
MIROC5	1960–2005	2006–2100	2006–2100
MRI-CGCM3	1960–2005	2006–2100	2006–2100
JRA55-do	1960–2018		

Table 2 : Periods of JPN model experiments

	Historical	RCP2.6	RCP8.5
MIROC5	1991–2005	2086–2100	2041–2055, 2086–2100
MRI-CGCM3	1991–2005	2086–2100	2041–2055, 2086–2100
JRA55-do	1991–2005, 2006–2018		

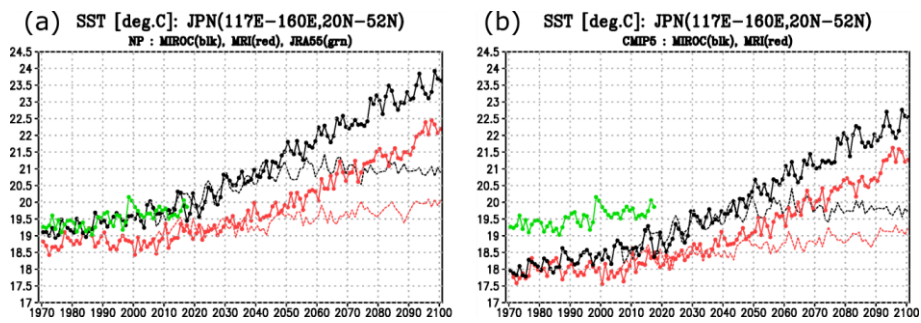


Figure 1: Time series of area-averaged sea surface temperature around Japan (117–160°E, 20–52°N) for the NP model results (Fig. 1a) and the corresponding CMIP5 original ocean results (Fig. 1b), where black line: MIROC, red line: MRI-CGCM3, thick line: historical+RCP8.5, and thin line: RCP2.6. Green line in both panels denotes the JRA55-do case of the NP model. Unit is °C.

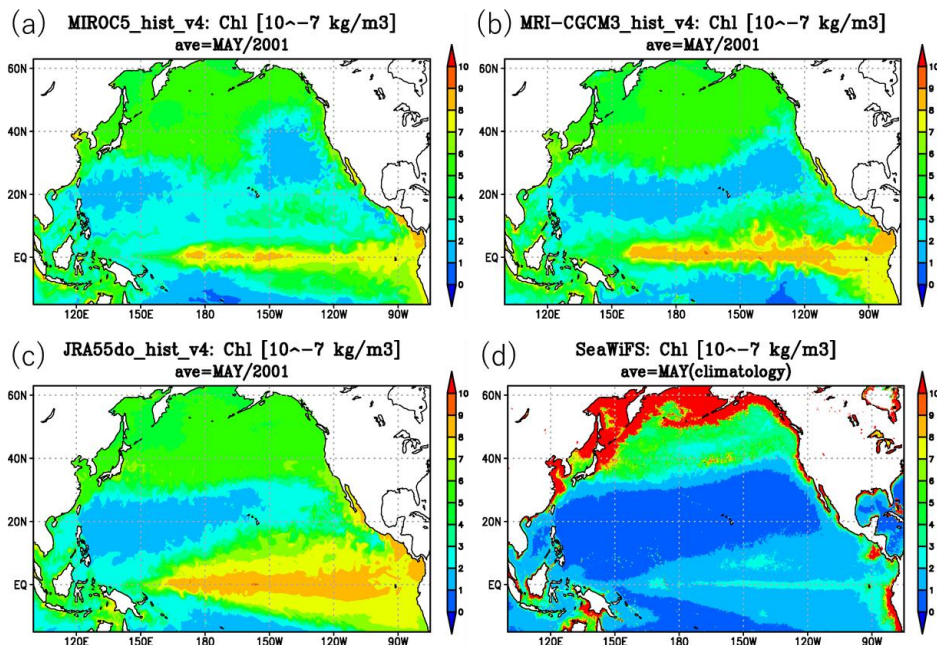


Figure 2: Monthly mean maps of sea surface chlorophyll in May 2001 for the NP results: (a) MIROC5, (b) MRI-CGCM3, and (c) JRA55-do. (d) The corresponding observation climatology map from the SeaWiFS data. Unit is  $10^{-7}$  kg  $m^{-3}$ .

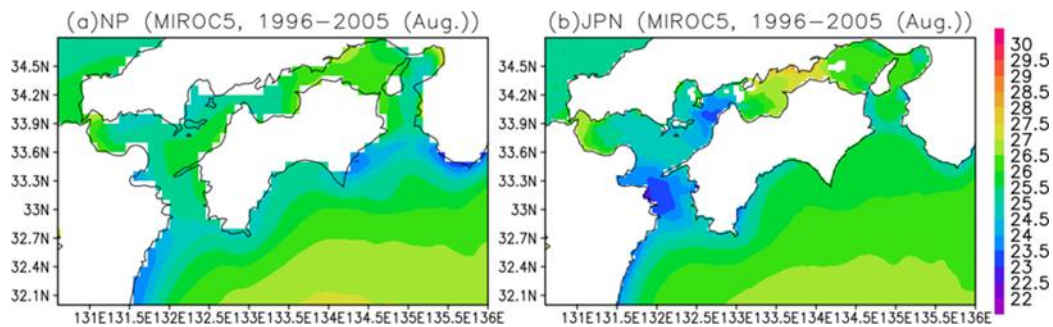


Figure 3: Monthly mean sea surface temperature in August averaged from 1996 to 2005 for the MIROC forced cases of the NP (Fig. 3a) and JPN (Fig. 3b) results. Unit is °C.