

# 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

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>, 杉山 徹\*<sup>1</sup>, 黒木 聖夫\*<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

昨年度までに気候変動適応技術社会実装プログラム (SI-CAT) において構築した領域海洋予測データセットの改良版作成を目的として、海洋将来予測・ダウンスケーリングのための統合型海洋モデルの開発・改良を進めた。北太平洋海域モデルの主な改良点として、栄養塩・プランクトン等を予測変数とした低次生態系モデルを含む生物地球化学過程を導入した。また、高解像度日本近海域モデルについて、河川からの淡水流入の精緻化および潮汐変動を陽に表現するための改良を行った。

**キーワード** : ダウンスケーリング, 海洋モデル, 低次生態系モデル, 潮汐, 河川流入

## 1. はじめに

本課題ではこれまで地球シミュレータ (ES3) 等を活用して、平成 27 年度から令和元年度にかけて実施された気候変動適応技術社会実装プログラム (SI-CAT) の下、CMIP5 (第 5 次結合モデル相互比較プロジェクト) からいくつか選定したモデル・シナリオによる大気データを海面外力として用いた領域海洋モデル実験により、北太平洋海域 10 km および日本近海域 2 km の 2 種類の領域海洋将来予測データセット (FORP) を作成した (Nishikawa et al. 2021 [1])。今年度は、SI-CAT で明らかになったデータセットのユーザーニーズや課題を踏まえて海域の温暖化予測情報のさらなる充実を図るため、基盤となる海洋モデルの開発・改良を行う。

これまでのニーズ調査等から、海域における気候変動予測情報に関して、水温・水位などの物理変数だけでなく、栄養塩・プランクトンなどの生物化学変数に対するユーザーニーズが高いことが示されている。そこで、まず北太平洋を対象とした海洋モデルについて、生物地球化学過程 (低次生態系モデル) の導入を行い、物理環境変動から生態系変動まで統合的に解析可能なデータを創出できるようダウンスケーリングシステムを改良する (2 節)。さらに、日本域で高解像度化した海洋ダウンスケーリングモデルについて、沿岸域での海洋予測情報のさらなる高度化・拡充を図るため、潮汐過程の導入と河川流入過程の改良を行う (3 節)。

## 2. 低次生態系入り北太平洋海域モデルの開発

北太平洋海域 10 km の将来予測データセットとして栄養塩、プランクトンなどの低次生態系変量を含めた拡充を目指し、低次生態系モデルの導入を行う。そのために、北太平洋海域モデルを含めた海洋モデル基盤の再検討、更新を行った。ここでは、SI-CAT での北太平洋海域モデル基盤 (NP10) の後継として、気象庁の現業で用いられ

ているものと同様の仕様をもつ北太平洋海域モデル基盤 (NP モデル, 図 1a) を気象研究所の協力のもと新たに導入した (表 1)。NP モデルにおいて低次生態系モデルを動かすためには、その各予報変数について物理場と整合した最適な側面境界値を与える必要性から、全球海洋モデル (GLB モデル) も合わせて導入した (表 1)。本課題で導入した一連の海洋モデル基盤 (GLB, NP, JPN) では、共通の海洋モデルコードとして気象研究所共用海洋モデル MRI.COM の最新版である v4.6 (Tsuji no et al. 2017 [2]) が使用されており、SI-CAT で使用したもの (v4.1) から約 4 年分のバージョンアップがなされており、バグフィックスや高速化を含めた性能向上が期待される。

用いた低次生態系モデルは、海洋モデル MRI.COM v4.6 にオプションとして組み込まれている炭素循環付き NPZD (Nutrient-Phytoplankton-Zooplankton-Detritus) モデル (Nakano et al. 2011 [6]; Tsujino et al. 2017) で、CMIP に参画している気象研究所の地球システムモデル (MRI-ESM2: Yukimoto et al. 2019 [7]) で用いられているものと同様である。予報変数として、植物プランクトン (P)、動物プランクトン (Z)、デトリタス (D)、溶存無機窒素 (NO<sub>3</sub>)、溶存無機リン (PO<sub>4</sub>)、溶存酸素 (O<sub>2</sub>)、溶存無機炭素 (DIC)、アルカリ度 (Alk) を含んでいる。図 1b に NPZD モデル部分の模式図を示す。

本課題で導入した一連の海洋モデル群、すなわち、全球 (GLB)、北太平洋 (NP)、日本近海 (JPN) モデルはオフラインの単方向ネスティングシステムとして構築した。低次生態系入りの GLB および NP モデルについては、気象研究所で実施された JRA55-do (Tsuji no et al. 2018 [8]) を使った周期的大気外力に基づく 1937–2018 年再現実験に対応するテスト積分実験を実施した。テスト実験での低次生態系モデルの結果例をいくつか示す。図 2 は、GLB モデルによる約 80 年積分実験の低次生態系変量と水温の時系列を示す。植物プランクトンのブルームを含む季節変

動を再現しており、また、本長期積分中に生態系モデルの各変数の値にドリフト等が無く安定的に動くことを確認している。図3は、NPモデルによるJRA55-do大気外力を用いたテスト積分実験での低次生態系変量の表層月平均分布例を示す。基本的に気象研究所での対応する実験結果をよく再現しつつ、本NPモデルが機構の大型計算機上でも安定的に動くことが確認された。また各分布について、水平解像度約10kmで黒潮や中規模渦が解像されることに伴うより詳細な分布構造が表現されていることがわかる。

### 3. 高解像度日本近海域モデルの開発

日本近海域2kmの将来予測データセット改良のための海洋モデル開発として、これまで使用してきたベースモデルの更新を行うとともに、潮汐の導入と河川流入の改良を行った。親モデルとなる北太平洋域モデル(NPモデル)を上記の通りSI-CATのものから更新したことに伴い、日本近海域モデルについても気象庁の現業で用いられているものと同等の仕様をもつ日本近海域モデル基盤(JPN)を気象研究所の協力のもと導入した(表1)。JPNモデルの水平解像度はSI-CATの高解像度日本近海域モデル(Nishikawa et al. 2021)と同程度であり、モデル領域はやや広い(表1、図1)。地形、物理スキーム、パラメータ等のモデル設定はSakamoto et al. (2019)とほぼ同じであるが、GLBモデルとNPモデル(表1)との双方向ネスティングではなく、オフラインネスティングを用いているという違いがある。

開発したJPNモデルのテストとして、GLBモデルとNPモデルの物理モデル部分のみを駆動することで初期値と側面境界条件を作成しJPNモデルを駆動する以下のテスト実験を行った。まず、GLBモデルを1990年から2012年まで積分した。次に2000年1月1日のGLBモデルの物理場を補間することでNPモデルの初期値を作成し、NPモデルを2012年まで積分した。さらに、2011年1月1日のNPモデルの物理場を補間してJPNモデルの初期値を作成し1年間の積分を行った。

テスト実験ではJRA55-doの海面境界条件を用いることでモデルが駆動された。河川流入についてもJRA55-doの格子のデータ(Suzuki et al. 2018 [9]、水平解像度 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 、図4a)を、気象研究所で作成されたマッピングテーブルを用いてモデル格子に補間した(図4b)。JPNモデルでは潮汐を表現するため、起潮力ポテンシャルを与えると同時に、側面境界条件にNAO.99b潮汐予測システム(Matsumoto et al. 2000 [10])を用いて作成された潮位・潮流場を与えた。

図5は、JPNモデルの海面高度アノマリー(赤)を観測(黒)と比較したものである。JPNモデルは日本沿岸の潮位変動(振幅や位相、大潮、小潮の時期など)を基本的によく表現している。一方、瀬戸内海の内部など表現性が悪い部分もあり、例えば、多度津(図5c)ではモデルで表現される潮位変動の振幅が観測と比べて小さくなっている。これはモデルの解像度による地形の表現性が原因である

と考えられる。

モデルで潮汐を陽に表現することにより、例えば瀬戸内海等で海面水温の表現性が向上した。図6は瀬戸内海周辺の2011年8月の海面水温を示しているが、潮流の強い豊後水道などの領域で海面水温が低くなっている。これは強い潮流により混合層スキームで鉛直拡散係数が強化されることが原因であると考えられる。この時期の瀬戸内海の水温分布はSakamoto et al. (2019)と同様であり、豊後水道の低水温などの特徴は衛星観測とよく合っている(Sakamoto et al. (2019)のFig. 9参照)。また、河川流入のある沿岸付近で低い海面塩分が表現されていることも確認した(図省略)。

### 4. おわりに

来年度は、新たに導入されたES4を活用することで、本年度構築した各海洋モデルシステム(GLB, NP, JPN)および昨年度までに整備したCMIP5大気外力データを用いた、過去から2100年までの将来をカバーする海洋将来予測データセット改良版の本作成を行う予定である。

### 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] 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", *Progress in Earth and Planetary Science*, 8:7, (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, Yamanaka 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, Yamanaka G, "Effects of eddies on the subduction and movement of water masses reaching the  $137^\circ\text{E}$  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] Nakano H., Tsujino H, Hirabara M, Yasuda T, Motoi T, Ishii M, Yamanaka G, “Uptake mechanism of anthropogenic CO<sub>2</sub> in the Kuroshio Extension region in an ocean general circulation model”, *Journal of Oceanography* 67, 765-783, (2011)
- [7] Yukimoto S., Kawai H, Koshiro T, Oshima N, Yoshida K, Urakawa S, Tsujino H, Deushi M, Tanaka T, Hosaka M, “The Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and Basic Evaluation of the Physical Component”, *J. Meteor. Soc. Japan* 97(5), 931-965, (2019)
- [8] 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)
- [9] Suzuki T, Yanazaki D, Tsujino H, Komuro Y, Nakano H, Urakawa S, “A dataset of continental river discharge based on JRA-55 for use in a global ocean circulation model”, *Journal of Oceanography* 74, 421-429, (2018)
- [10] Matsumoto K., Takanezawa T, Ooe M, “Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: a global model and a regional model around Japan”, *Journal of Oceanography* 56, 567–581, (2000)

表 1： 本年度新たに導入、開発した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)	北太平洋海域 10 km 予測データセット作成 (JPN の親モデル)	日本近海域 2 km 予測データセット作成
海洋モデルコード	MRI.COMv4.6 (Tsujino 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	60 層 (表層 2m, 最下層 600m) + 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
主なプロセス	海水、河川流入 (潮汐なし)	海水、河川流入 (潮汐なし)	潮汐、海水、河川流入
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]

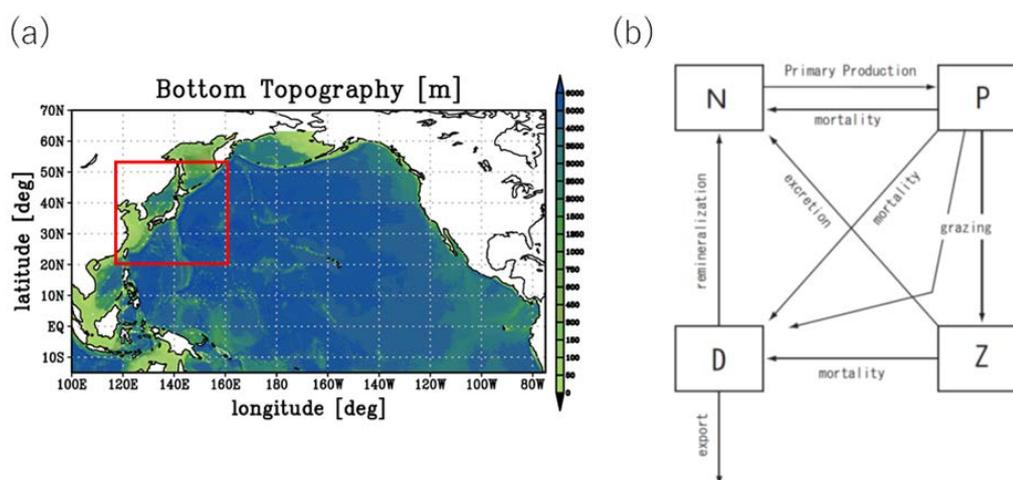


図 1： (a) 図は北太平洋海域モデル (NP モデル) の領域を示し、赤い四角が日本近海域モデル (JPN モデル) の領域を示す。(b) 全球モデル(GLB モデル)および NP モデルに導入した生物地球化学過程のうちの NPZD モデル部分の模式図 (Tsujino et al. 2017 より)。

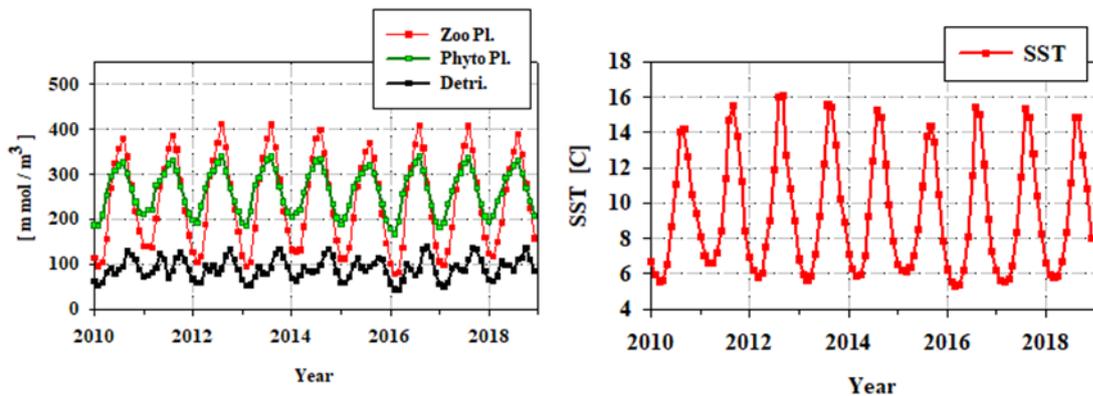


図2： 低次生態系入り GLB モデルについて、JRA55-do 大気外力でテスト駆動したときの最終9年間の動物・植物プランクトン、デトリタス、SST の月平均値経年変化を示す。解析領域は北太平洋域 (40°N-50°N, 160°E-180°E) の表層第2層である。

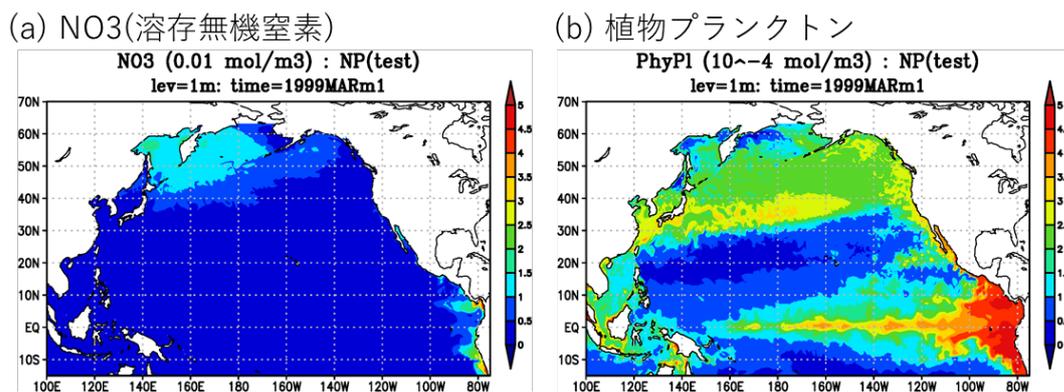


図3： 低次生態系入りの NP モデルについて、JRA55-do 大気外力の 1998-1999 年でテスト駆動したときの 1999 年 3 月時の月平均結果例。(a)  $\text{NO}_3$ , (b) 植物プランクトンの水平分布を示す。単位は (a)  $10^2 \text{ mol m}^{-3}$ , (b)  $10^4 \text{ mol m}^{-3}$ 。

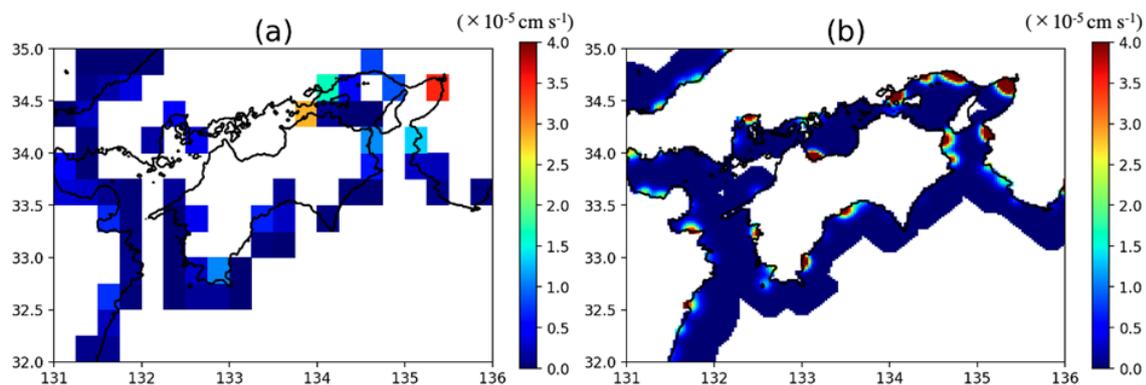


図4： 河川流入の年平均値 (2011 年)。(a) JRA55-do、(b) JPN モデル格子に補間されたもの。

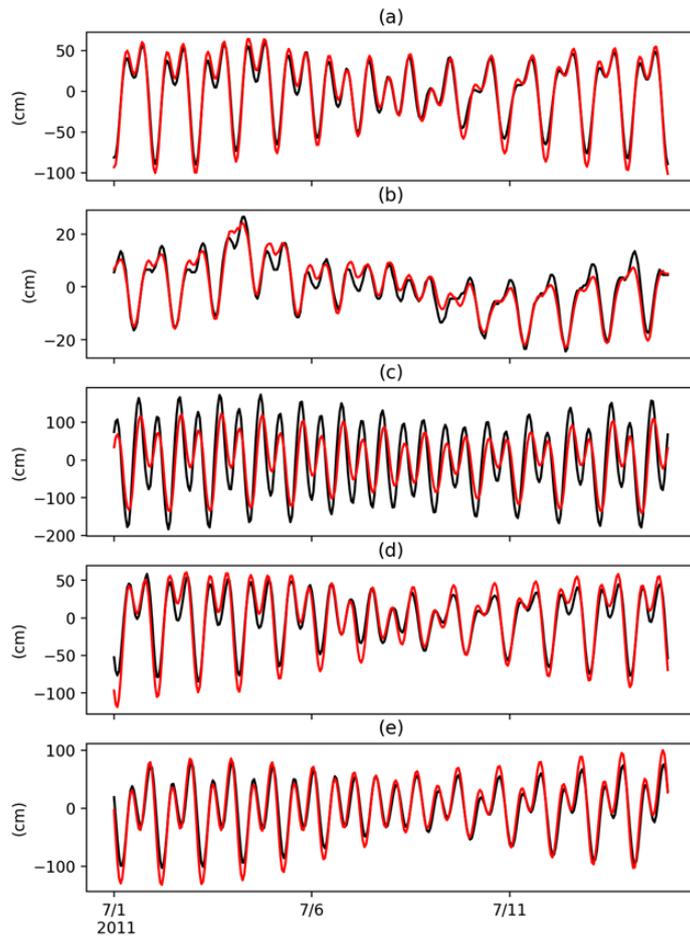


図5： JPN モデルテスト実験による、(a) 釧路、(b) 佐渡島、(c) 多度津、(d) 八丈島、(e) 石垣島における海面高度アノマリー。黒は観測 (JODC)、赤はモデルの値を示している。

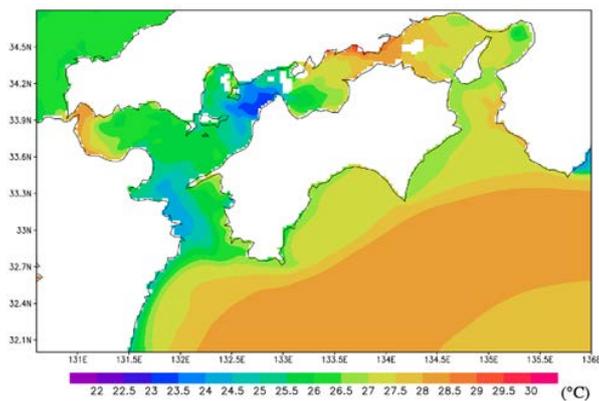


図6： JPN モデルテスト実験において表現された海面水温の1ヶ月平均値 (2011年8月)。

# Improvement of Ocean Downscaling Models for Future Climate Projection to Contribute the Climate Change Adaptation Research in Japan

## Project Representative

Hiromichi 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>, Toru Sugiyama \*<sup>1</sup>, Masao Kurogi \*<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

To improve the future ocean regional projection (FORP) datasets produced in the previous years, we conducted the improvement and test of the regional ocean models for future ocean projection and downscaling. One of the improvement points is the inclusion of a biogeochemical process into the North Pacific ocean model with a 10 km horizontal resolution. The biogeochemical process consists of a Nutrient-Phytoplankton-Zooplankton-Detritus (NPZD) model and a simple carbon cycle. The other improvement point is the inclusion of a tide process and an improved river input into the Japan-surrounding region ocean model with 2 km horizontal resolution. These improved regional ocean models were tested and checked using a historical surface atmospheric forcing.

**Keywords :** Dynamical Downscaling, Ocean Model, Biogeochemical Process, Tide process, River input

## 1. Introduction

In the previous years, we have developed the future ocean regional projection (FORP) datasets utilizing the Earth Simulator (version 3) under the Social Implementation Program on Climate Change Adaptation Technology (SI-CAT) project (Nishikawa et al. 2021 [1]). These have been used by various users to help climate change adaptation researches and plans in the Japanese local institutions and governments within and out of the project. The datasets consist of that from the North Pacific (NP) ocean model with a 10 km horizontal resolution (NP10) and that from the Japan-surrounding region (JPN) ocean model with 2 km horizontal resolution (JPN02). To further develop the future ocean projection information to satisfy various user needs, we are planning to develop a revised version of the FORP datasets. In this report, we briefly introduce the revision of the ocean model system to perform the dataset development.

## 2. Development of the NP ocean model

From inquiries of demands on the ocean climate projection datasets in the SI-CAT project, it was found that biogeochemical variables, such as nutrients and planktons, were important for climate change adaptation research in addition to the basic physical variables as temperature and sea levels. Thus, to improve the NP dataset of the FORP with 10 km resolution, we introduce a biogeochemical process into the NP ocean model system. To realize this, we replaced the previous NP10 model with the new GLB and NP model system shown in Table 1. These ocean models are based on the relatively new version (v4.6) of the MRI.COMv4 (Tsujino et al. 2017 [2]). The GLB and NP models incorporated a biogeochemical process within the

MRI.COMv4, which consists of a Nutrient-Phytoplankton-Zooplankton-Detritus (NPZD) model (Fig. 1b) with a simple carbon cycle (Nakano et al. 2011 [6]; Tsujino et al. 2017).

The GLB and NP models with the biogeochemical process were tested using a surface atmospheric forcing based on an atmospheric reanalysis data, JRA55-do (Tsujino et al. 2018 [7]). Figure 2 shows an example of the simulated results, monthly mean maps of a nutrient ( $\text{NO}_3$ ) and phytoplankton from the NP model. These were reasonably represented against observations and included fine structures due to the high horizontal resolution of the NP model.

## 3. Development of the JPN ocean model

To improve the JPN dataset of the FORP with 2 km resolution produced in the SI-CAT project, we also replaced the previous JPN02 model in SI-CAT by the new JPN model shown in Table 1. The new JPN model incorporated a tide process and a revised river input scheme and covered a wider horizontal domain around Japan (Fig. 1a) against the previous JPN02 model. The tide process includes tidal forcing in the barotropic component of the momentum equations and the NAO.99b fields (Matsumoto et al. 2000 [8]) for the side boundary conditions.

The JPN model were tested using the surface atmospheric forcing from JRA55-do and the corresponding river input data (Suzuki et al. 2018 [9]), by driving the physical model part of the GLB and NP models. We confirmed the basically good correspondence of the Japanese coastal sea level variations between the JPN model test results and observations (not shown). Figure 3, as an example of the JPN test results, indicates tidally induced low temperature in the Seto Inland Sea, and the

simulated feature in the JPN model was consistent with satellite observations.

#### 4. Future Plan

Utilizing the improved ocean model system reported above (GLB, NP, JPN: Table 1) and the new version of the Earth Simulator, we are planning to develop a new improved version of the FORP datasets. We are considering the use of the CMIP5 atmospheric forcing data developed in the SI-CAT project and also the JRA55-do data.

#### 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 system. 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, 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”, *Progress in Earth and Planetary Science*, 8:7, (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] Nakamo 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] Nakano H., Tsujino H, Hirabara M, Yasuda T, Motoi T, Ishii M, Yamanaka G, “Uptake mechanism of anthropogenic CO<sub>2</sub> in the Kuroshio Extension region in an ocean general circulation model”, *Journal of Oceanography* 67, 765-783, (2011)
- [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] Matsumoto K., Takanezawa T, Ooe M, “Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: a global model and a regional model around Japan”, *Journal of Oceanography* 56, 567–581, (2000)
- [9] Suzuki T, Yanazaki D, Tsujino H, Komuro Y, Nakano H, Urakawa S, “A dataset of continental river discharge based on JRA-55 for use in a global ocean circulation model”, *Journal of Oceanography* 74, 421-429, (2018)

Table 1 : Basic specifications of the ocean model system

	GLB (global model)	NP (North Pacific model)	JPN (Japan-surrounding)
Purpose	(Parent model of NP)	Future projection of NP with 10 km res. (Parent model of JPN)	Future projection around Japan with 2 km res.
Ocean model code	MRI.COMv4.6 (Tsujino et al. 2017 [2])	Same as GLB	Same as GLB
Region	Global	99°E–75°W, 15°S–63°N	117°E–160°E, 20°N–52°N
Resolution (hor.)	1°× 1/2° (tripolar)	1/11° × 1/10°	1/33° × 1/50°
Grid number (hor.)	364 × 366	2049 × 784	1423 × 1604
Resolution (ver.)	60 L (surf.:2m, bottom: 600m) + BBL	60 L (surf.: 2m, bottom: 600m)	Same as NP
Side boundaries	(Cyclic boundary)	Offline nesting from GLB	Offline nesting from NP
Processes	Sea ice, river input (W/O tides)	Sea ice, river input (W/O tides)	Tides, Sea ice, river input
Biogeochemistry	NPZD + Carbon cyc.	NPZD + Carbon cyc.	(None)
References	Urakawa et al. (2020) [3]	Nakano et al. (2021) [4]	Sakamoto et al. (2019) [5]

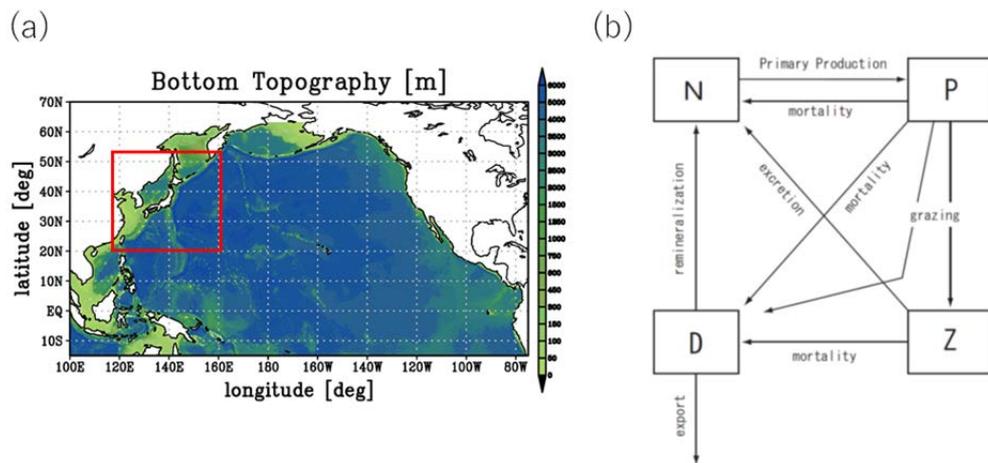


Figure 1: (a) The panel denotes the NP model domain, and the red rectangle denotes the JPN model domain. (b) Schematic of the NPZD component of the biogeochemical process (the panel is from Tsujino et al. 2017).

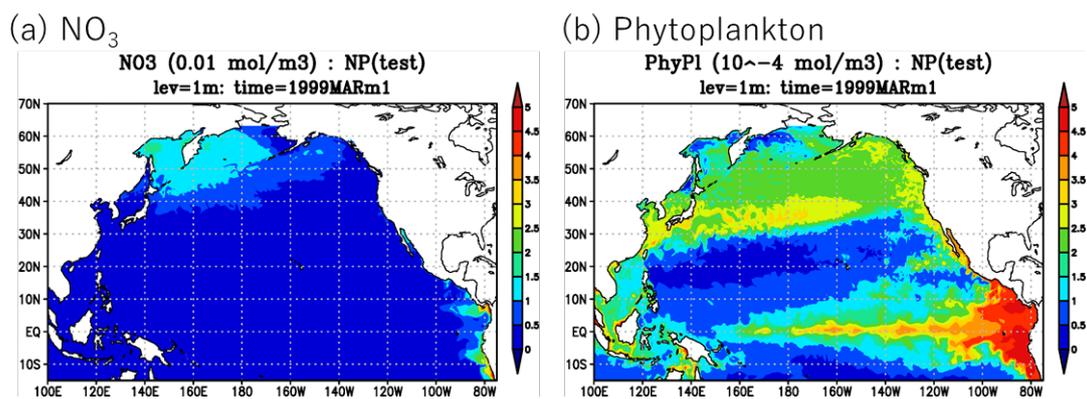


Figure 2: Simulated monthly mean (a) NO<sub>3</sub> and (b) phytoplankton on March 1999, from the test experiment of the NP model using the JRA55-do surface forcing. The units are (a) 10<sup>-2</sup> mol m<sup>-3</sup> and (b) 10<sup>-4</sup> mol m<sup>-3</sup>.

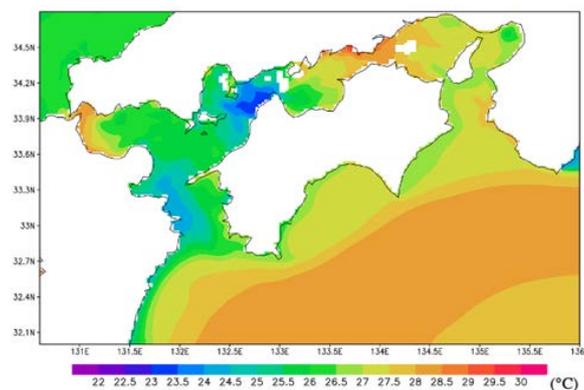


Figure 3: Simulated monthly mean sea surface temperature on August 2011, from the test experiment of the JPN model using the JRA55-do surface forcing.