資料２

2022年1月11日（火）
科学技術・学術審議会
海洋開発分科会 海洋科学技術委員会（第2回）

気候変動に関する話題提供

予測（シミュレーション・モデリング研究）の観点から

気象庁気象研究所　気候・環境研究部
辻野博之

- 現状の概観
  - 気候変動に関連して注目されている海洋の変化
  - 結合モデル相互比較プロジェクト（CMIP）における海洋モデル
  - 気候変動影響評価研究における領域海洋モデルの利用
  - 予測データの利活用について
- 今後10年間に期待される進展と達成に向けた課題

気候変動に関連して注目されている海洋の変化

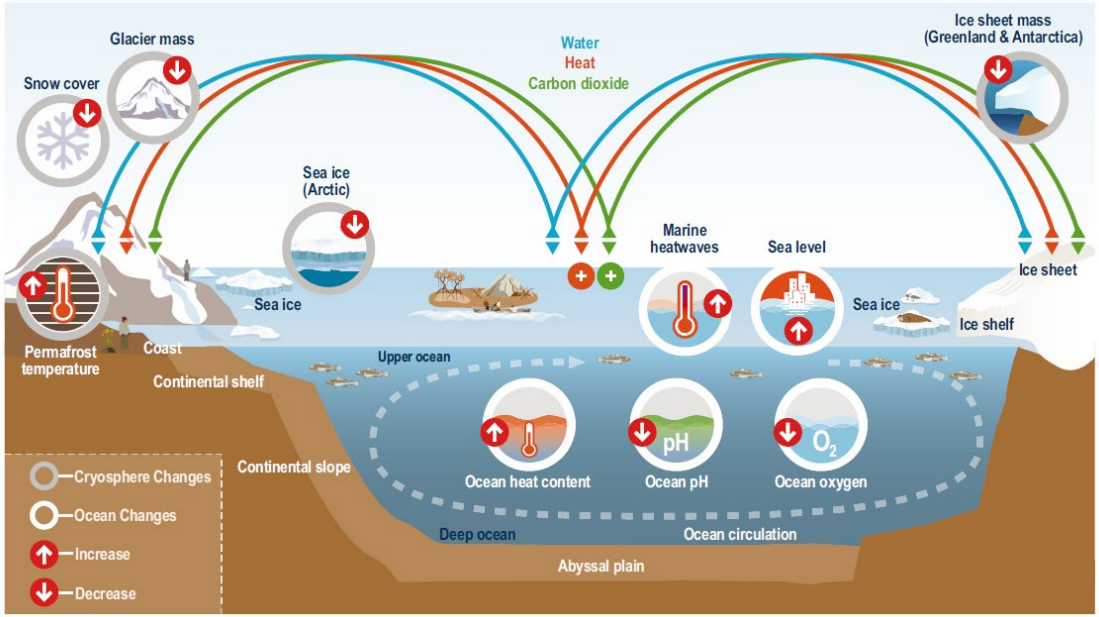
化石燃料の燃焼による二酸化炭素排出に起因して、以下のような海洋の変化が生じており、今後の推移に関する予測とそれに基づいた適応・緩和策の検討が求められている。

物理的環境

- 海洋温暖化
  - 平均水温分布の移動（生物適応は追いつくのか?）
  - 海洋熱波（水温異常が1週間以上継続する現象）
- 平均海面水位上昇
  - 特に高潮等顕著現象における最高水位
- 海洋循環
  - 鉛直成層
  - 沿岸湧昇
- 海氷減少
  - 北極海

生物地球化学的環境

- 海洋酸性化
  - 人為起源CO_2吸収による（海洋は25%ほど）
  - 殻を持つ海洋生物への影響
- 海洋貧酸素化
  - 水温上昇と鉛直混合の抑制による
  - 海洋生物の生育への影響
- 表層海洋への栄養塩供給減少
  - 植物プランクトンの基礎生産量への影響



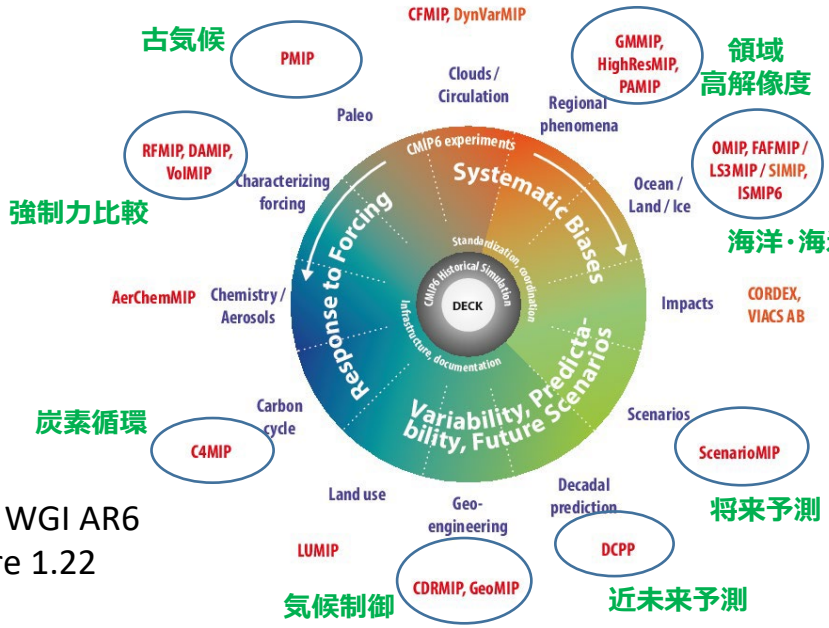
IPCC SROCC
Figure TS.2

結合モデル相互比較プロジェクト（CMIP）における海洋モデル

CMIP：IPCC 報告書に科学的根拠を提供する、国際気候変動モデリング・予測研究
世界気候研究計画（WCRP）が推進、気候変動研究の中核。海洋は結合モデルの構成要素。

参加機関はプロトコルに則って結合モデルシミュレーションを実施、データを提供。

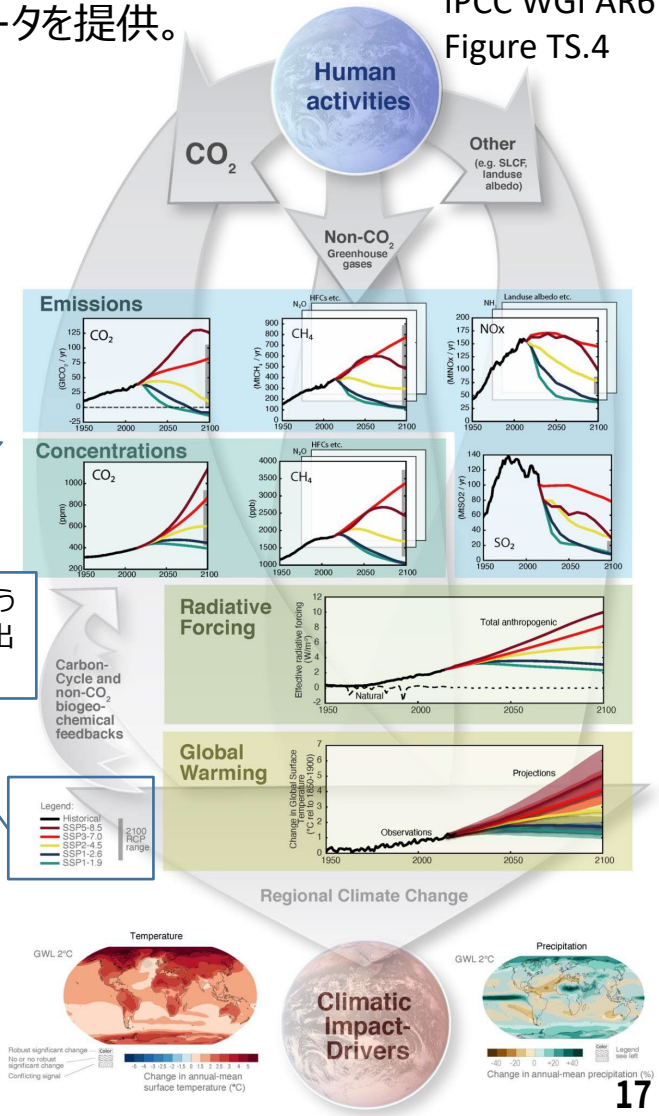
- 工業化前の状況、及び過去から現在までの再現計算
- 複数の共有社会経済経路（SSP）に沿った将来予測（右図）
- 気候感度評価、バイアスの特定、変動メカニズム解明を目的とした endorsed MIPs（下図）



IPCC WGI AR6
Figure 1.22

海洋モデルが関与する endorsed MIPs

IPCC WGI AR6
Figure TS.4



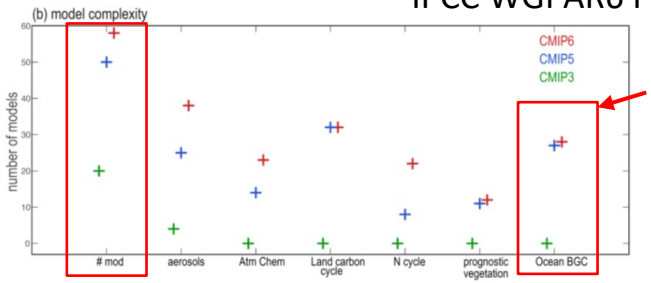
我が国からは2つのグループが初期から貢献

- 東大大気海洋研究所、海洋研究開発機構、環境研究所（MIROC）
- 気象庁気象研究所（MRI-CGCM, MRI-ESM）

結合モデル相互比較プロジェクト（CMIP）における海洋モデル

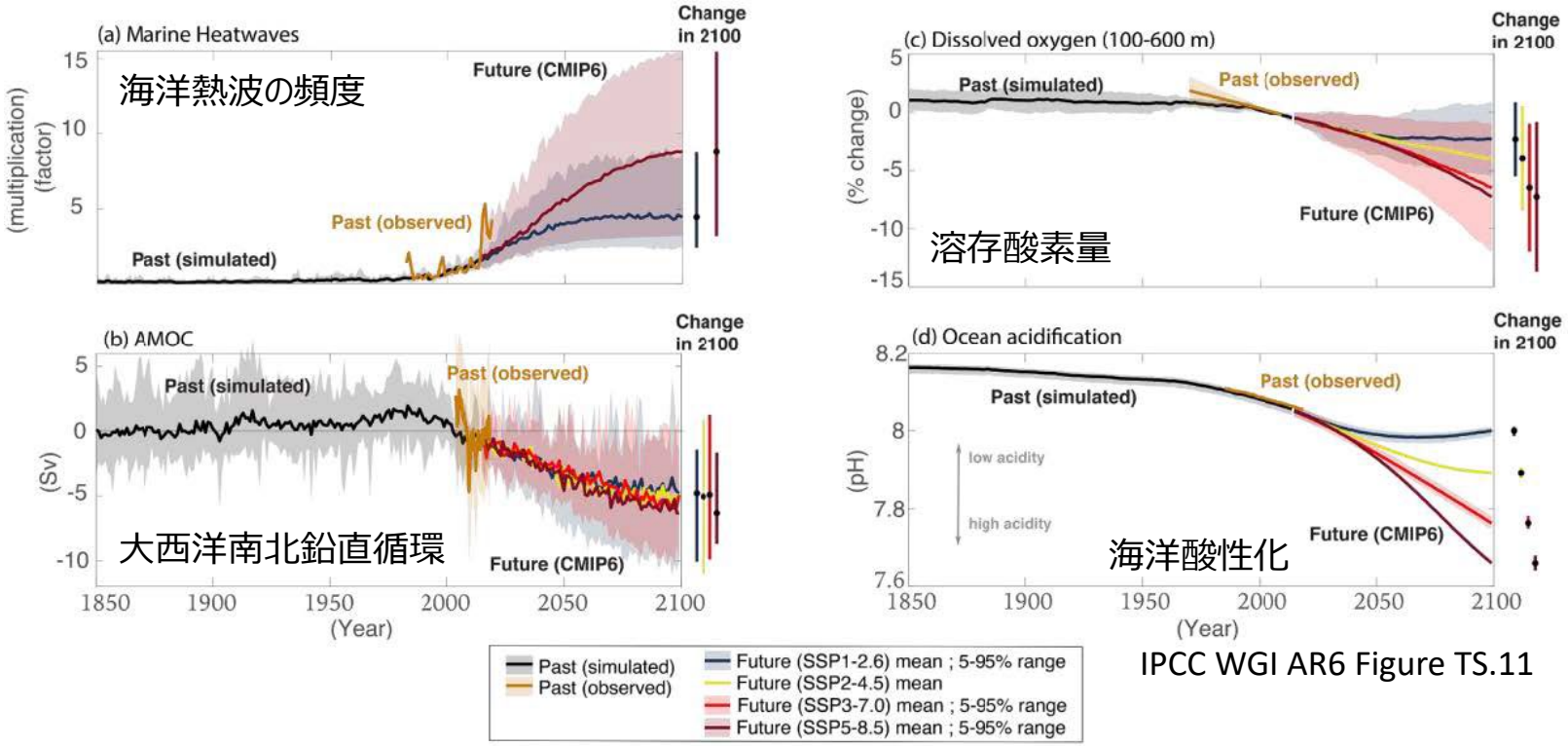
結合モデル（地球システムモデル）は
海洋の気候変化指標の予測が
できるように設計されている。

IPCC WGI AR6 Figure TS.2



約半分のモデル（含.日本の2グループ）が海洋生物地球化学の問題に対応可能

Recent and Future change in the ocean
Marine heatwaves, AMOC, Dissolved oxygen, and pH

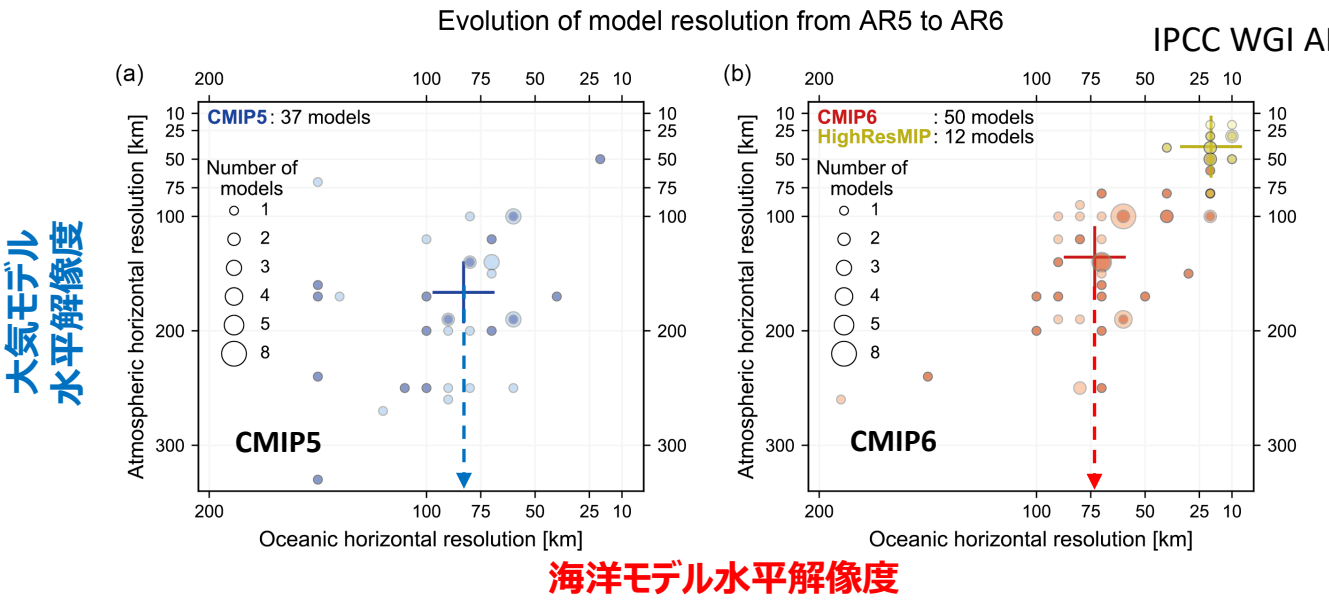


IPCC WGI AR6 Figure TS.11

- モデルの相違により予測値が大きくばらつく。信頼性評価や不確実性低減も重要な課題。
- モデル評価の指標となる、海洋長期再解析（過去再現）データセットの作成が望まれる。

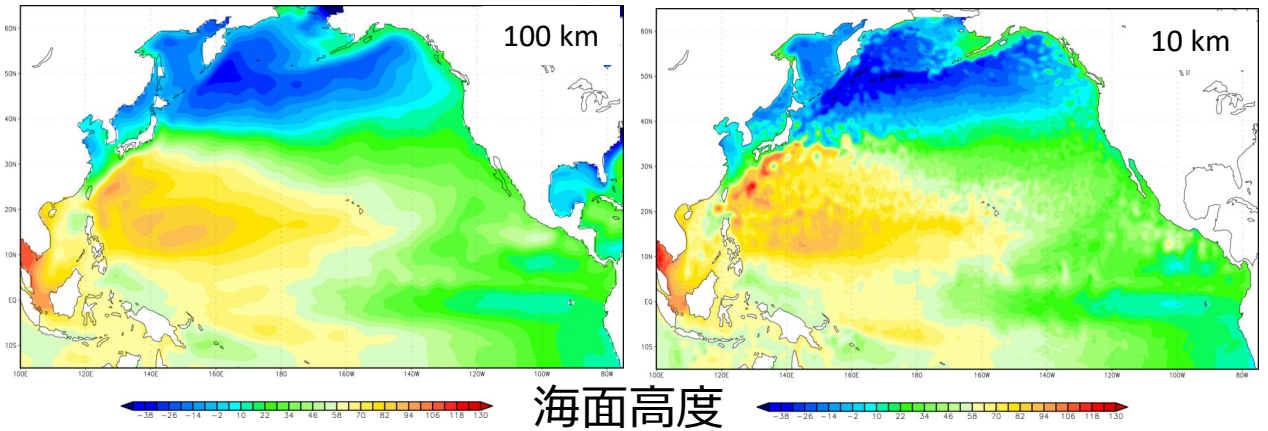
結合モデル相互比較プロジェクト（CMIP）における海洋モデル

地球システムモデルを用いてCMIPで要求される実験量（計算量）を実現するためには、海洋モデルに高い分解能を設定することは困難



- CMIP5からCMIP6に向けて海洋モデル解像度に顕著な進展は見られなかった
- HighResMIP （高解像度モデル相互比較）では予測実験数や種類が限られる

水平格子間隔50km以上の海洋モデルは低解像度に分類される



- 中規模渦や、黒潮などの西岸境界流を十分に表現するには、水平解像度 **10 km 程度が必要**とされている
- 低解像度＋パラメタリゼーションによる対応にも限界がある

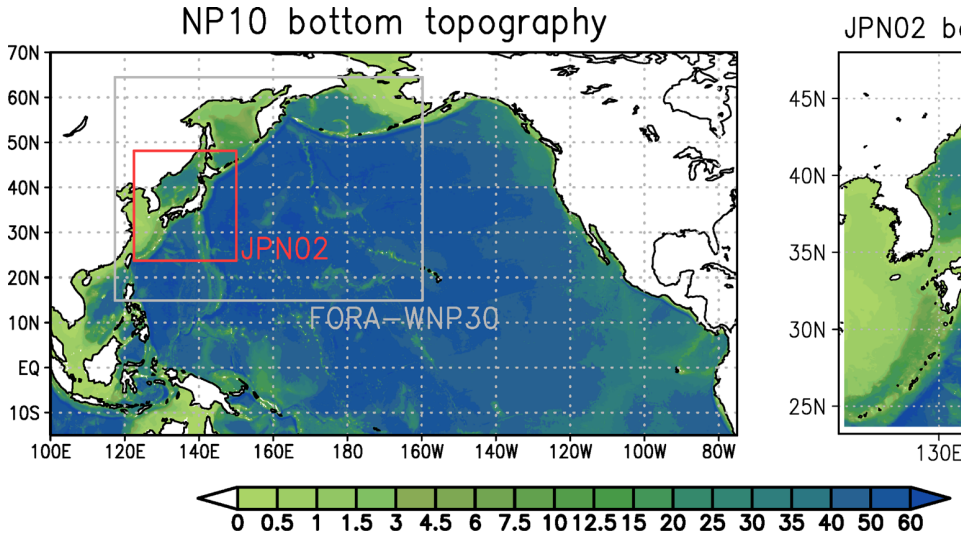
気候変動影響評価研究における領域海洋モデルの利用

日本周辺は黒潮や親潮など約100km幅の強い海流があり、縁辺海（日本海・オホーツク海など）と太平洋をつなぐ狭い海峡等、海岸地形も複雑

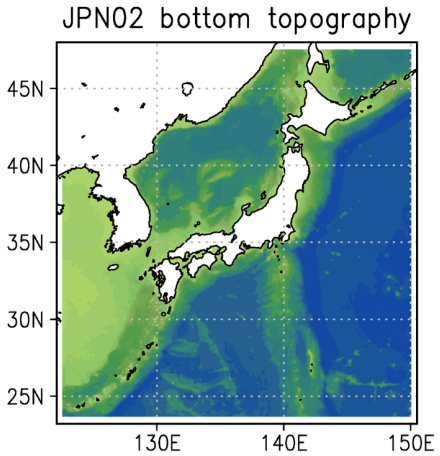
→ 日本周辺の海洋気候変動を詳細に知るには水平解像度 10 km 程度の **領域海洋モデルによるダウンスケーリング**が必要（気象分野でも導入済の技術）

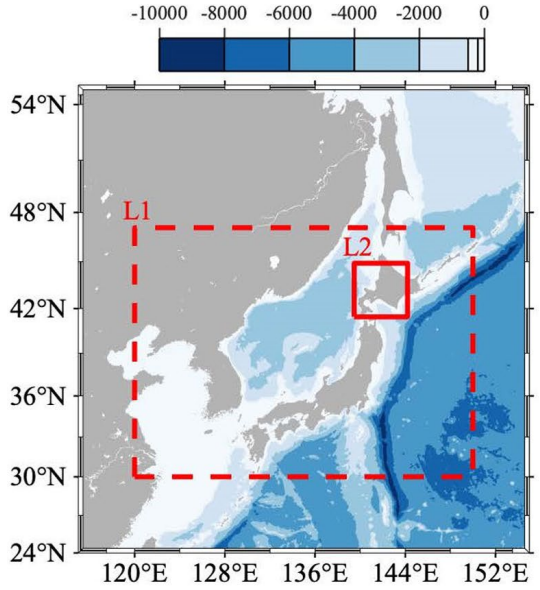
領域モデリング技術

- 全球モデルに領域モデルを埋め込む（ネスティング）技術
- 対象海域特有の現象の理解と再現技術
  - 黒潮や親潮の流路や流量（特に日本南岸の黒潮大蛇行の再現が難問）
  - 沿岸域や海峡等で生じる強い流れや渦による海水混合のプロセス
  - 河川からの栄養供給等の生物地球化学プロセス



Nishikawa et al. (2021) Figure 1

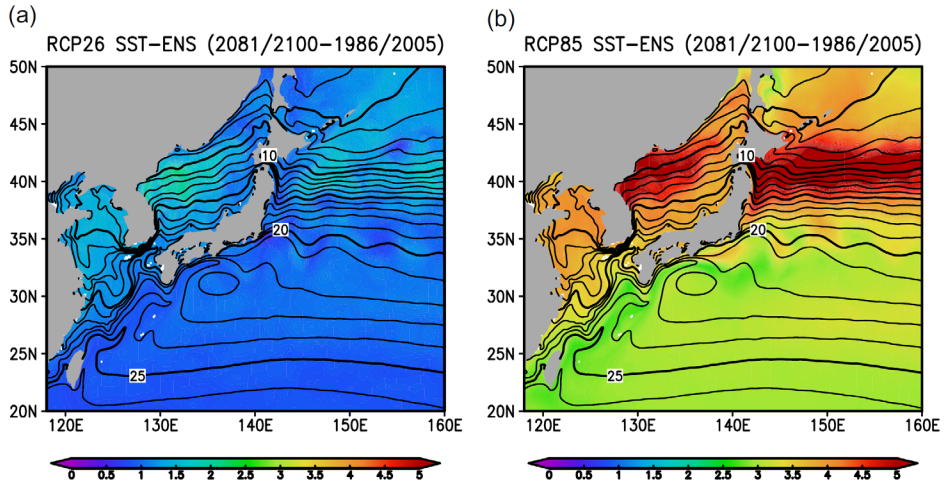




Fujii et al. (2021) Figure 1

気候変動影響評価研究における海洋モデルの利用

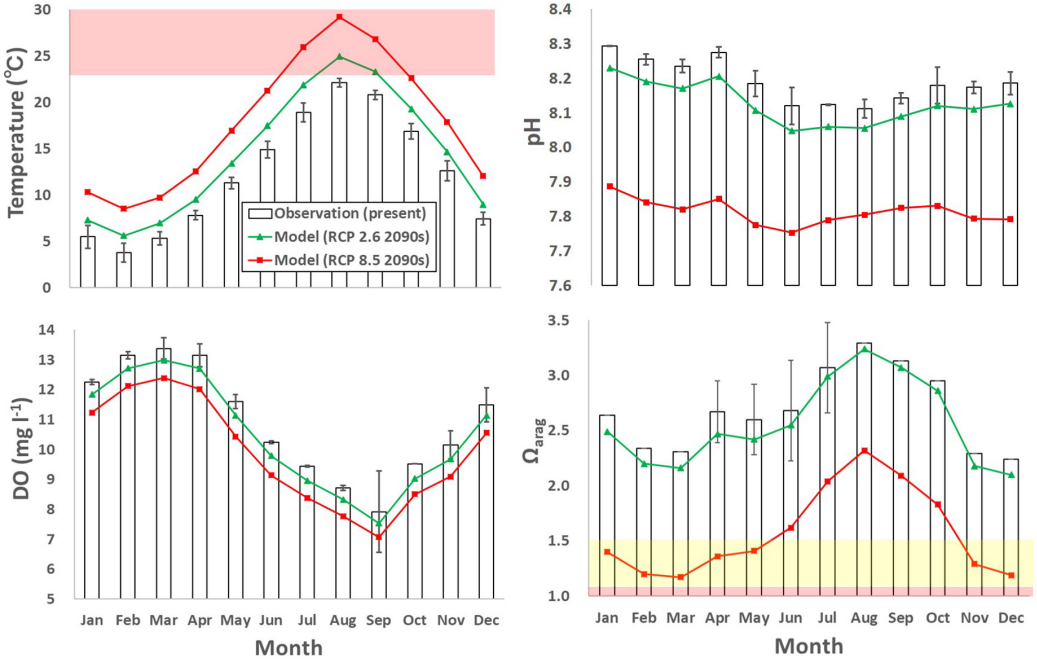
領域海洋モデルによる将来変化研究も CMIP の成果を活用して進められている。



← CMIP5 に参加した複数モデルによる RCP26（左） RCP85（右）シナリオの計算結果を境界条件として駆動した領域海洋モデルによる**21世紀末の**日本付近の**海面水温変化**

Yamanaka et al. (2021) Figure 6

Fig. 6 Projected SST changes [° C] (color) in the western North Pacific at the end of the 21st century (2081–2100) relative to the end of the 20th century (1986–2005) under the RCP2.6 (**a**) and the RCP8.5 (**b**) scenarios. Contours indicate the mean SST in the present climate (1986–2005)



← CMIP5 RCP26（**緑**） RCP85（**赤**）シナリオに基づく MIROC-ESM の計算結果を境界条件として駆動した領域モデルによる北海道忍路における**2090年代の生物地球化学パラメータ**

塗りつぶしてある部分は生物種にとっての注意（黄）・危険（赤）域を示す（水温はウニやホタテ貝、Ω_{arag}は炭酸カルシウムを殻にもつ生物）

Fujii et al. (2021) Figure 8

予測データの利活用について

CMIP 予測データの流通

- CMIP5, CMIP6 のデータは Earth System Grid Federation（ESGF）が運営する検索サイトを通じて取得可能。
- データファイルはその構成からファイル名に至るまで共通のルールに従って作成されており、利用者への便宜が図られている。
- データファイル作成の大部分は、予測計算実施者側が担っており、提出時点で厳しいチェックを受ける。

利用者は必要に応じて項目を指定してデータを検索しダウンロードする

データ提供基盤の研究推進への貢献

- このようなデータ提供基盤が、CMIP データの広範に亘る流通と、気候予測ビッグデータを用いた今後の気候研究の進展に多大な貢献をし続けるのは確実である。
- 我が国の海洋気候変動研究（領域モデル出力の提供）においてもこうした手法を参考にデータ提供基盤を整備することが望まれる。

我が国で実施される海洋気候変動予測の研究インフラ

海洋モデル（ソースコード）

結合モデル（地球システムモデル）用 汎用海洋モデル

- 東大大気海洋研究所・海洋研究開発機構：COCO (Hasumi, 2006)
- 気象庁気象研究所：MRI.COM (Tsujino et al., 2017)

…それぞれ物理モデルに加え、生物地球化学モデルが実装されており、実用的には概ね足りているものと認識されているが、性能向上へ向けた継続的な取り組みは必要。

領域モデリング用海洋モデル（上記に加え）

- Regional Ocean Modeling System (ROMS; Shchepetkin and McWilliams, 2005)
  - UCLA（米国）を中心に開発。
  - オープンソースであり利用者が多い。世界中のユーザーの協力により、生物地球化学モデルをはじめ様々な要素モデルが着脱可能。

計算機資源

- 各研究機関の大型計算機
- 文部科学省の気候変動研究プログラム等においては、地球シミュレータ（海洋研究開発機構）

…計算機資源による制約は顕在化していないものの、世界の先例となるような高解像度/高精度の気候予測計算などが計画されているわけではない。

データサーバ

- ESGF等、国際研究プログラムが用意するサーバー
- 国内ではデータ統合・解析システムDIAS（Data Integration and Analysis System）

今後10年間に期待される進展と達成に向けた課題

気候変動問題の社会的認知が進む中で、海洋気候科学も実用面での進展が必要

国内外における気候変動予測研究関連の計画（注.未確定のものを含む）

	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
IPCC/WCRP	IPCC-AR6					CMIP7計算実施			IPCC-AR7	
気候変動		気候変動データセット2022			気候変動レポート2025		気候変動データセット2027			気候変動レポート2030
影響評価適応策			Global Stocktake		気候変動影響評価報告書			Global Stocktake		気候変動影響評価報告書

■ CMIP6 を活用した**海洋気候変動研究の推進・影響評価手法の開発**

- モデルの誤差評価や気候変動プロセス研究の成果に基づく、予測結果の評価・選別と不確実性低減手法の確立。
- 品質管理を経た気候予測データと高解像度領域海洋モデルを用いたダウンスケーリング。
- 気候ビッグデータを活用した影響評価研究（パターン認識等へのAIの活用を含む）。

■ CMIP7 に備えた**予測モデルの開発・改良**

- CMIP6 の結果に基づく予測モデルの改良。特に大気-海洋結合モデルのバイアス低減。
- 日本域の気候変動影響評価研究に資する高解像度全球/領域モデルの開発改良。（領域大気海洋結合モデルの開発なども含む。）
- 近未来予測に対応するため、海洋モデルの初期化やドリフト低減の技術開発。
- 海面水位上昇の予測に関しては、雪氷圏モデリングの成果の導入も重要。
- 若手人材の育成や、最先端モデルの開発・維持体制の最適化。

今後10年間に期待される進展と達成に向けた課題

■ カーボンニュートラル等**社会実装に対応する予測モデル**の開発

- 地球規模の炭素循環と気候フィードバックプロセスの理解とそれに基づくモデルの改良。
- 気候制御の実効性を評価するための、海面を通した海洋によるCO_2の吸収や放出、海洋生態系改変によるCO_2固定量の変化等を定量化できるプロセスモデルの開発。
- 予測対象海域に特化した生物地球化学／海洋生態系プロセスモデルの開発。
- 海洋生物地球化学パラメータのナウキャスト（データ統合化）技術・観測網の開発。

■ 海洋気候変動研究を支援する**研究基盤・データの整備**

- 国内で実施された領域海洋気候変動予測データ等を広く流通させる仕組みの構築（共通するデータフォーマットの設定など）。ユーザーが利用しやすいデータプロダクトの創出。
- 個別の研究プロジェクト等によるプロセスレベルの集中観測データの迅速な流通。
- 海洋気候変動の予測結果の評価にあたっては、大気と同様の**長期海洋再解析データ**（観測と予測モデルを融合した過去再現データ）が大変有用。再解析で必要とされる観測データ取得体制※の維持・整備や再解析データ作成の専門家の育成が求められる。

（※）予測結果の解析や検証に必要なデータの解像度や再解析に必要な観測データについて

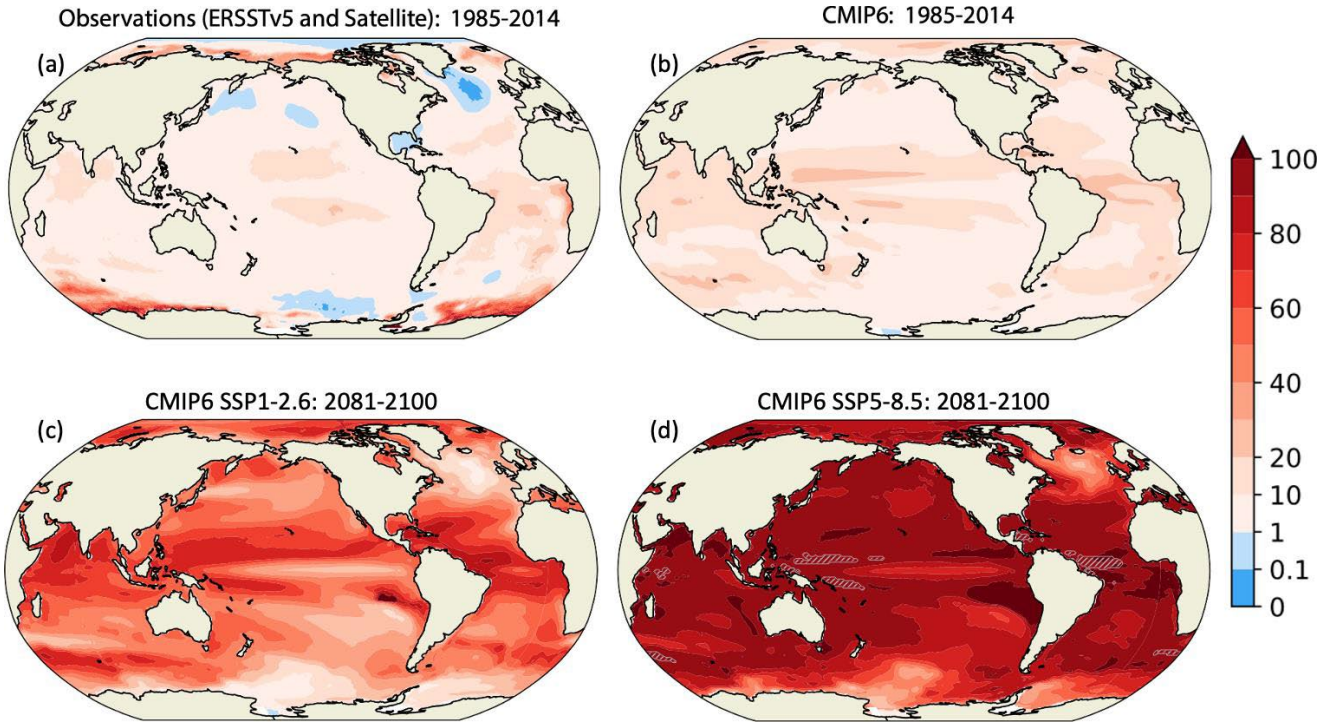
- 予測あるいは再解析データは全球レベルでは1x1度格子・月毎、沿岸域での利用を考慮するのであれば、0.25 x 0.25 度格子・5-10日毎の時空間解像度で利用できることが望ましい。
- 再解析データの品質を確保するためには、衛星海面観測データに加え、現場観測データ（表層から深層）については、例えば水平緯度経度3度格子に月1回の取得が最低限の目安となる。
- 自動観測装置（Argoフロート等）の較正用に船舶を用いた高精度現場観測は大変重要。
- 大気再解析や衛星から得られる洋上大気データ（海洋モデル駆動データとして使用）の検証には、定置ブイデータも不可欠。我が国から国際観測網への貢献を是非継続していただきたい。

補足説明資料

海洋熱波

海洋熱波（marine heatwave）：

- 定義の例：日別（11日移動平均）の海水温値の発生確率のうち上位1%の値をとる現象
- 水平規模は数百キロメートルに及び、1週間から1か月程度継続する。
- 下図は海面水温を指標とした海洋熱波の年間発生日数が工業化前と比較して何倍になるのかを示す。

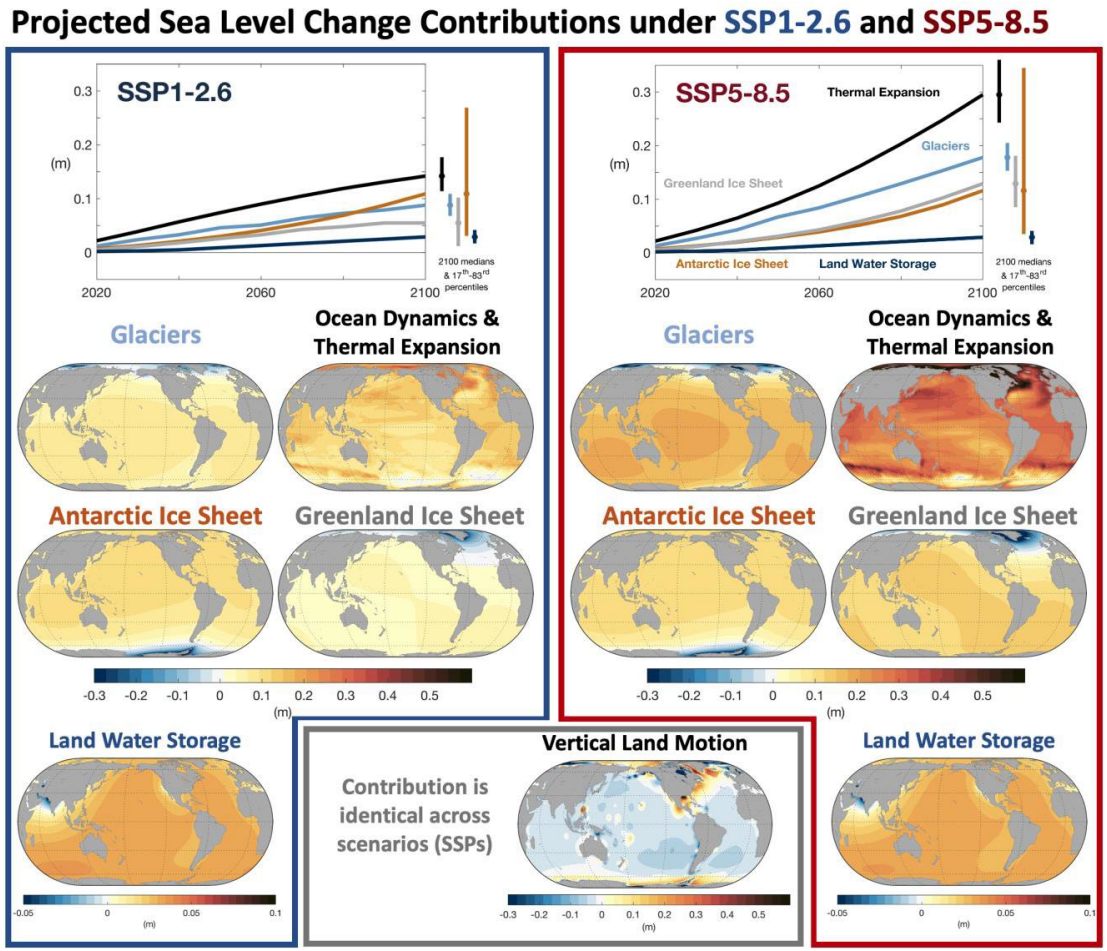


IPCC WGI AR6 Box 9.2 Figure 1

海面水位上昇

海面水位上昇に寄与する因子について：

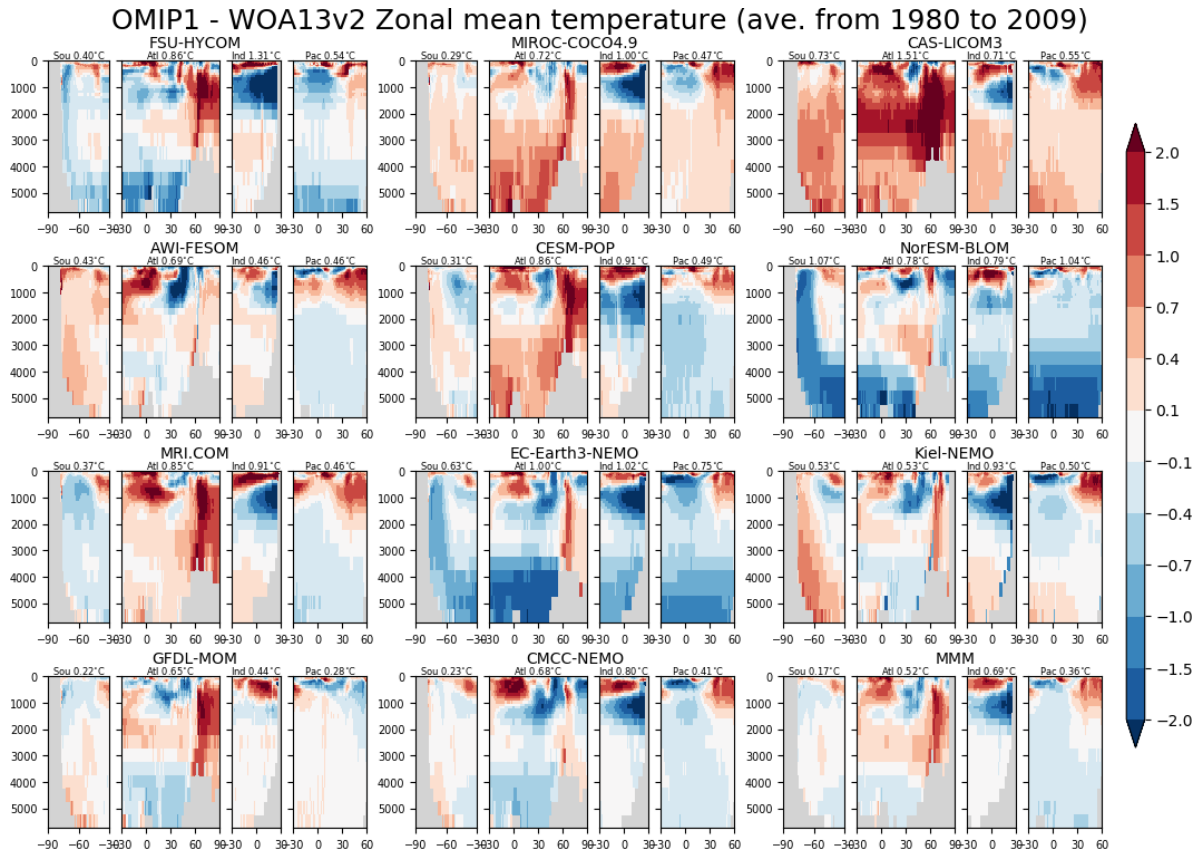
- 海水の熱膨張と、力学的な海水の移動（海洋モデルによって予測される部分）
- 氷河や永久凍土、氷床（南極大陸・グリーンランド）の消失等、雪氷圏からの流入
- 2100年までは概ね半々の寄与、その後は雪氷圏からの大量流入が危惧される。
- 海面水位は温室効果ガスの排出を止めても暫くの間は上昇を続ける。



IPCC WGI AR6
Figure 9.26

海洋モデルの性能評価

CMIP6-OMIPでは海洋モデルの再現性能評価が実施された。
下図は各海盆毎に東西平均した水温のバイアス（観測データからの差）



Tsujino et al. (2020)
Figure S33

近未来予測などの初期値問題においては、観測に基づいてモデルを初期化するため、予測時のモデルドリフトを低減するためには、バイアスが小さく抑えられていることが望ましい。
OMIPではバイアスがかなり小さく抑えられているモデルも見受けられた。

参考文献

IPCC, 2019, **Technical Summary** [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.- O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.

Arias, P. A., N. Bellouin, E. Coppola, R. G. Jones, G. Krinner, J. Marotzke, V. Naik, M. D. Palmer, G-K. Plattner, J. Rogelj, M. Rojas, J. Sillmann, T. Storelvmo, P. W. Thorne, B. Trewin, K. Achuta Rao, B. Adhikary, R. P. Allan, K. Armour, G. Bala, R. Barimalala, S. Berger, J. G. Canadell, C. Cassou, A. Cherchi, W. Collins, W. D. Collins, S. L. Connors, S. Corti, F. Cruz, F. J. Dentener, C. Dereczynski, A. Di Luca, A. Diongue Niang, F. J. Doblas-Reyes, A. Dosio, H. Douville, F. Engelbrecht, V. Eyring, E. Fischer, P. Forster, B. Fox-Kemper, J. S. Fuglestvedt, J. C. Fyfe, N. P. Gillett, L. Goldfarb, I. Gorodetskaya, J. M. Gutierrez, R. Hamdi, E. Hawkins, H. T. Hewitt, P. Hope, A. S. Islam, C. Jones, D. S. Kaufman, R. E. Kopp, Y. Kosaka, J. Kossin, S. Krakovska, J-Y. Lee, J. Li, T. Mauritsen, T. K. Maycock, M. Meinshausen, S-K. Min, P. M. S. Monteiro, T. Ngo-Duc, F. Otto, I. Pinto, A. Pirani, K. Raghavan, R. Ranasinghe, A. C. Ruane, L. Ruiz, J-B. Sallée, B. H. Samset, S. Sathyendranath, S. I. Seneviratne, A. A. Sörensson, S. Szopa, I. Takayabu, A-M. Treguier, B. van den Hurk, R. Vautard, K. von Schuckmann, S. Zaehle, X. Zhang, K. Zickfeld, 2021, **Technical Summary.** In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

Chen, D., M. Rojas, B. H. Samset, K. Cobb, A. Diongue Niang, P. Edwards, S. Emori, S. H. Faria, E. Hawkins, P. Hope, P. Huybrechts, M. Meinshausen, S. K. Mustafa, G. K. Plattner, A. M. Tréguier, 2021, **Framing, Context, and Methods.** In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. In Press.

Fox-Kemper, B., H. T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S. S. Drijfhout, T. L. Edwards, N. R. Golledge, M. Hemer, R. E. Kopp, G. Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I. S. Nurhati, L. Ruiz, J-B. Sallée, A. B. A. Slangen, Y. Yu, 2021, **Ocean, Cryosphere and Sea Level Change.** In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

参考文献

Fujii, M., S. Takao, T. Yamaka, T. Akamatsu, Y. Fujita, M. Wakita, A. Yamamoto, T. Ono, 2021, Continuous Monitoring and Future Projection of Ocean Warming, Acidification, and Deoxygenation on the Subarctic Coast of Hokkaido, Japan, *Front. Mar. Sci.* 8:590020, https://doi.org/10.3389/fmars.2021.590020.

Hasumi, H., 2006, CCSR Ocean Component Model (COCO) version 4.0, Center for Climate System Research Rep., 25, 103 pp., available at: https://ccsr.aori.u-tokyo.ac.jp/~hasumi/COCO/coco4.pdf.

Nishikawa, S., T. Wakamatsu, H. Ishizaki, K. Sakamoto, Y. Tanaka, H. Tsujino, G. Yamanaka, M. Kamachi, Y. Ishikawa, 2021, Development of high-resolution future ocean regional projection datasets for coastal applications in Japan, *Progress in Earth and Planetary Science,* 8:7, https://doi.org/10.1186/s40645-020-00399-z.

Shchepetkin, A. F., and J. C. McWilliams, 2005, The Regional Ocean Modeling System: A split-explicit, free-surface, topography following coordinates ocean model, *Ocean Modelling*, 9, 347–404.

Tsujino, H., H. Nakano, K. Sakamoto, S. Urakawa, M. Hirabara, H. Ishizaki, G. Yamanaka, 2017, Reference manual for the Meteorological Research Institute Community Ocean Model version 4 (MRI.COMv4), *Technical Reports of the Meteorological Research Institute*, Meteorological Research Institute, Japan, 80, https://doi.org/10.11483/mritechrepo.80.

Tsujino, H., L. S. Urakawa, S. M. Griffies, G. Danabasoglu, A. J. Adcroft, A. E. Amaral, T. Arsouze, M. Bentsen, R. Bernardello, C. W. Böning, A. Bozec, E. P. Chassignet, S. Danilov, R. Dussin, E. Exarchou, P. G. Fogli, B. Fox-Kemper, C. Guo, M. Ilicak, D. Iovino, W. M. Kim, N. Koldunov, V. Lapin, Y. Li, P. Lin, K. Lindsay, H. Liu, M. C. Long, Y. Komuro, S. J. Marsland, S. Masina, A. Nummelin, J. K. Rieck, Y. Ruprich-Robert, M. Scheinert, V. Sicardi, D. Sidorenko, T. Suzuki, H. Tatebe, Q. Wang, S. G. Yeager, Z. Yu, 2020, Evaluation of global ocean–sea-ice model simulations based on the experimental protocols of the Ocean Model Intercomparison Project phase 2 (OMIP-2), *Geosci. Model Dev*., 13, 3643–3708, https://doi.org/10.5194/gmd-13-3643-2020.

Yamanaka, G., H. Nakano, K. Sakamoto, T. Toyoda, L. S. Urakawa, S. Nishikawa, T. Wakamatsu, H. Tsujino, 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, *Journal of Oceanography,* 77:539–560, https://doi.org/10.1007/s10872-021-00593-7.