

日本周辺海域の気候変動予測とそのダウンスケーリング

Climate change projection and its downscaling in Pacific Ocean around Japan

石川 洋一*
Yoichi ISHIKAWA *

海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 地球情報科学技術センター
Center for Earth Information Science and Technology, Research Institute for Value-Added-Information Generation,
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

摘 要

海洋における気候変動の影響は、海水温の上昇、海水位の上昇などに見られており、その将来予測は水産・海洋生態系の影響評価や適応策の検討のために重要な情報である。気候変動予測は大気海洋結合モデルや地球システムモデルを用い、温室効果ガスの排出に関する将来予測を外力として計算されるが、より詳細な情報を得るために、大気海洋結合モデルの結果を外力として用いたダウンスケーリングと呼ばれる手法が使われている。その結果は、放射強制力の変化による平均的な海水温の上昇に加えて、領域ごとに海洋循環の変化に伴って異なる特徴が見られている。この将来予測データセットはデータ統合・解析システムから公開されており、様々な分野の影響評価・適応策の検討に利用されることが期待されている。

キーワード：海洋循環, 気候変動予測, 数値モデル, ダウンスケーリング
Key words : ocean circulation, climate change projection, numerical model, downscaling

1. はじめに

産業革命以降の二酸化炭素などの温室効果ガスの排出に伴う地球温暖化の影響は地球システム全体に現れており、気候変動に関する政府間パネル(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change) 第6次報告書統合報告書(IPCC, 2023)では、“人間活動が主に温室効果ガスの排出を通して地球温暖化を引き起こしてきたことには疑う余地がなく、1850年～1900年を基準とした世界平均気温は2011年～2020年に1.1℃の温暖化に達した”と報告されている。この影響は海洋にも及んでおり、図1に示されるように海面水温は表面気温とほぼ同じように温暖化が進んでいる(IPCC, 2019)。このような温暖化の海洋への影響は、熱膨張に伴う水位の上昇、表層の方が下層よりも昇温量が大きいことによる成層の強化などにも現れており、そのような変化の評価とその将来予測に関する情報が、水産資源や生態系へどのような影響を与え、適切な適応策の策定・実行に必要とされている。

気候変動に関連した海洋の変動は人為起源の温暖化に加えて自然変動の影響もあるため、日本周辺の海洋変動には様々な時空間スケールの変動・変化が見られている。図2(a)は日本近海の海面水温変動の

時系列を示したものの(文部科学省及び気象庁, 2020)で、長期的なトレンドとしての温暖化に加え、数年から数十年スケールの変動が見られる。また、長期的なトレンドも海洋循環に関連して地域的な偏りも見られ、図2(b)に見られるように日本近海の全海域平均では100年あたり1.1℃の上昇に対して、太平洋側ではやや上昇率が小さく、日本海側では大きいといった違いが見られている。

2. 海洋変動の将来予測

地球温暖化を含む気候変動の予測は、大気・海洋それぞれの循環の変化とともに、大気海洋間の相互作用も表現した大気海洋結合モデルや、更に物質循環を取り入れた地球システムモデルを用いて行われる。天気予報や海洋の短期予測では、観測データをもとにした初期値から予測されるいわゆる初期値問題を解いているが、温暖化予測では、温室効果ガスの将来濃度を入力パラメータとし大気海洋結合系の応答をシミュレートすることによって将来の推定を行う問題を解いている。そのため、天気予報では時間が経つに連れて、例えば低気圧の発達などの自然変動に伴う予測の不確実性が増えていくのに対し、温暖化予測でも自然変動に伴う不確実性は存在して

受付：2024年6月15日，受理：2024年10月9日

* 〒236-0001 横浜市金沢区昭和町 3173-25, E-mail : ishikaway@jamstec.go.jp

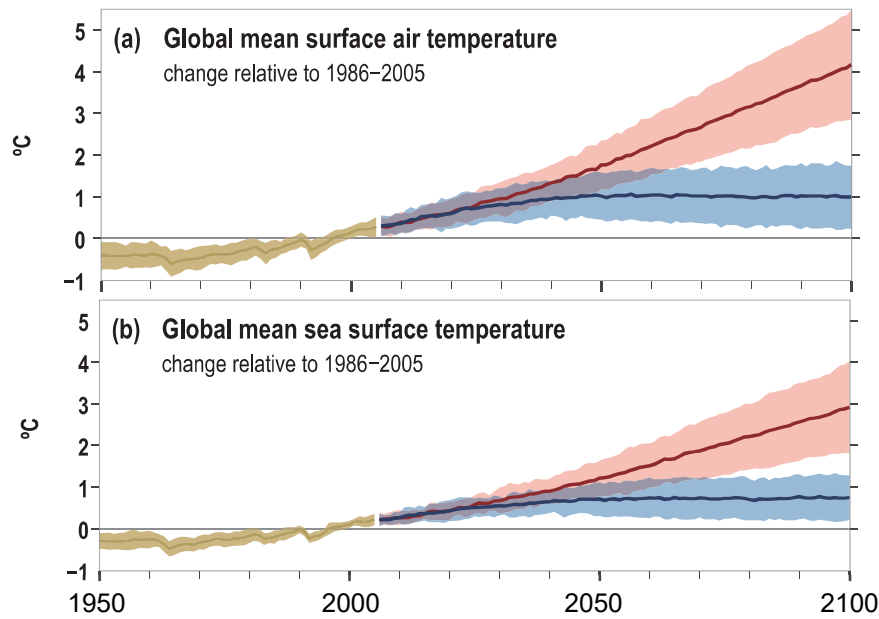


図1 1950年以降の(a) 全球平均表面気温 (b) 全球平均海面水温の観測結果，及び温室効果ガスの低排出シナリオ (RCP2.6) と高排出シナリオ (RCP8.5) の下での将来の変化予測。
IPCC (2019) Figure SPM.1 より引用。1986年～2005年平均からの偏差を示している。

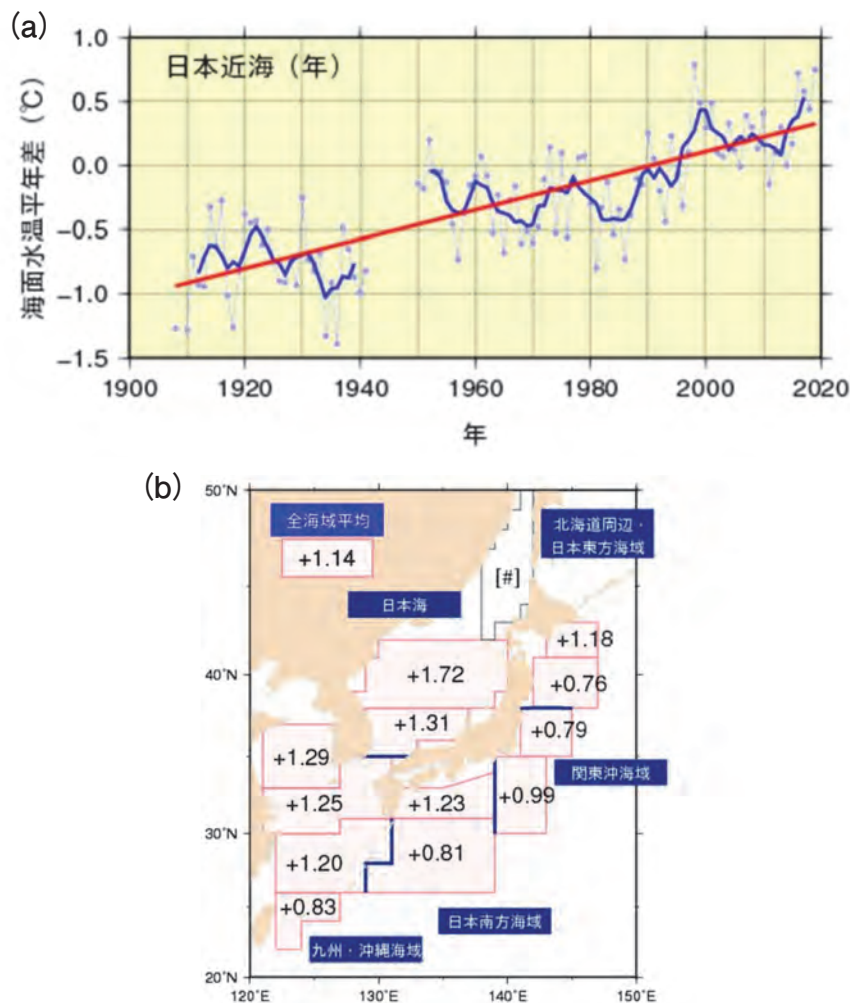


図2 日本近海海面水温。

- (a) 全海域平均海面水温(年平均)の年々差の推移。青丸は各年の年々差(年平均値と年々差との差)を、青の太い実線は5年移動平均値を表す。赤の太い実線は長期変化傾向を表す。年々差は1981年～2010年の30年間の平均値(文部科学省及び気象庁(2020)図12.1より引用)。
- (b) 海域平均海面水温(年平均)の上昇率(°C/100年)。数字は信頼水準99%以上で統計的に有意な値を示す。上昇率が「#」とあるものは、その海域では統計的に有意な長期変化傾向が見出せないことを示す(文部科学省及び気象庁(2020)図12.2より引用)。

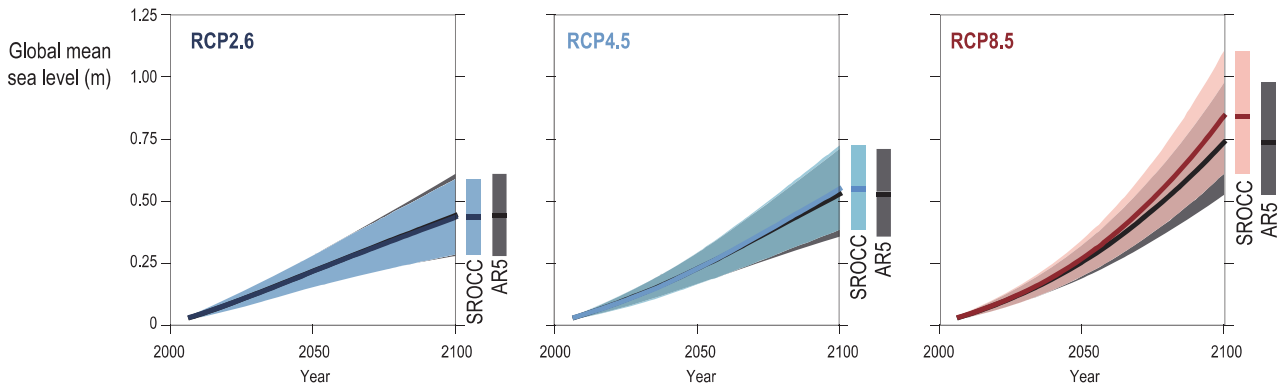


図3 IPCC 海洋雪氷圏特別報告書で示された温室効果ガス排出シナリオ RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 での全球平均水位の時系列 (Oppenheimer (2019) Figure4.9 より引用)。

この図には参考として IPCC 第5次評価報告書 (AR5) の結果 (Church *et al.*, 2013) も示されている。結果は、南極寄与を除く全ての要素について AR5 の結果に基づいているおり、陰影を付けた領域は、可能性の高い範囲と考えられる。

いるが、それ以上に温室効果ガスの濃度が現在に比べて増えるほど結果の差が顕著となるため、統計的に有意な結果が得られやすい。なお、英語では「天気予報や海況予報における予測」は forecast や prediction が用いられるのに対し、「気候変動に関する予測」は projection が用いられ、区別されていることにも留意してもらいたい。

温暖化予測のシミュレーションで用いられる温室効果ガスの将来濃度の推定値は「排出シナリオ」と呼ばれ、複数の「排出シナリオ」が社会経済モデルを用いて作成されている。結合モデル相互比較計画 (CMIP) では異なるグループで開発された大気海洋結合モデルに対して同じ排出シナリオを用いてシミュレーションを行い、その結果を相互比較することにより、モデルによる違いも含めて排出シナリオに対応した将来予測を評価している。

第5期結合モデル相互比較計画 (CMIP5) では代表的濃度経路 (RCP) として、RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 の4ケースが示された。この RCP の後ろの数字は2100年ごろの人為起源の温室効果ガスによる放射強制力増加量のおおよその値であり、数字が大きいほど人為起源の温室効果ガスの影響が大きくなっている。また第6期結合モデル相互比較計画 (CMIP6) ではこの放射強制力に社会経済経路 (SSP) を組み合わせたシナリオが示されており、主に5種類のシナリオがされている。

図1は2つの RCP シナリオ (RCP2.6 と RCP8.5) を用いて計算された将来の海面水温の予測結果を示しているが、RCP2.6 では2050年ごろでは現在気候と比べ1℃程度高いあたりではほぼ横ばいになっているのに対し、RCP8.5 では上昇し続けている。この傾向はほぼ表面気温の将来予測と同じようになっている (図1)。一方で、図3は IPCC 海洋雪氷圏特別報告書における海水位の将来予測を示しているが、シナリオによって幅があるものの、いずれのシナリオでも2100年まで全球平均した海水位は上昇し続

けるという予測がされている。これは氷床の融解が進むことと海洋表層の貯熱量が増え続けることと対応しており、RCP2.6 シナリオでは海面水温の上昇が止まるという予測とは対照的なものとなっている (Oppenheimer *et al.*, 2019)。

3. 海洋における気候変動予測のダウンスケーリング

前章で紹介した CMIP で用いられている大気海洋結合モデルにおいて、海洋部分の空間解像度はおよそ 50 km~100 km となっている。この解像度は海洋が気候システムにおいて果たす役割をある程度再現することはできるものの、日本周辺海域の特徴的な現象を再現するには必ずしも十分ではない。例えば、黒潮・親潮の幅はおよそ 100 km 程度であり、また、対馬海峡・津軽海峡といった海峡の幅はせいぜい数 10 km であるため、西岸境界流である黒潮、親潮や海峡通過流を再現するためには 10 km 程度の解像度で表現することが求められる。そのため、低解像度のモデル結果から高解像度の出力を求める手法としてダウンスケーリングと呼ばれる手法が用いられてきた (例えば高薮・金光 (2010))。大気のダウンスケーリングでは、広域現象とローカル現象との統計的関係式に基づいて空間解像度の低いデータから空間解像度の高いデータへ変換する統計的ダウンスケーリングと、領域モデルを用いてその強制力や境界条件として低解像度モデルの出力を用いる力学的ダウンスケーリングという異なる特徴を持つ手法が使い分けられてきた。一方、海洋では力学的ダウンスケーリングが用いられてきたが、その理由として、海洋では統計的ダウンスケーリングを適用できるだけの十分な観測データが揃っている場合が少ないこと、複雑な地形や空間スケールの小さい物理プロセス (上述の西岸境界流や海峡通過流など) が統計的な内挿では表現が難しいことなどが挙げられる。力学的ダウンスケーリングは高解像度の領域海洋モ

デルを用いた計算を行う必要があるため、計算機資源の制約などによりダウンスケーリングを行うシナリオ数や条件を変えて複数計算を行うことで不確実性の低減を試みるアンサンブル実験の試行回数に限りがあるという欠点があるが、近年のスーパーコンピュータの発展に伴い海洋の影響を評価することができるデータセットを作成することができるようになってきた。

海洋のダウンスケーリングデータセットとしてCMIP5の大気海洋結合モデルの結果をもとに北太平洋及び日本近海を対象としたFORP(Future Ocean Regional Projection)がある(Nishikawa *et al.*, 2021; Yamanaka *et al.*, 2021)。このデータセットは図4に示す通り、北太平洋全域を10 km 解像度でカバーしたNPモデルと、日本周辺海域を2 km 解像度でカバーしたJPNモデルを用いて2段階でのダウンスケーリングの結果をまとめたものとなっている。温室効果ガスの排出シナリオとしてはRCP8.5とRCP2.6の2ケース、モデルの不確実性を評価するために4つの異なるCMIPモデルを強制力として用いている。

図5はRCP8.5シナリオの4モデルをもとにダウンスケーリングをした海面水温の将来予測の結果であり、21世紀末と21世紀初めの差の分布を示している。4つの図を比べてわかるように、温暖化による海面水温の変化は海洋循環の変化などの影響により空間的には均一ではなく、またモデルによって昇温のパターンは異なっている。このFORPダウンスケーリングデータセットをもとにして、図6は日本近海の水温上昇をRCP8.5及びRCP2.6シナリオそれぞれについてまとめたものである。RCP8.5シナリオでは領域平均した昇温量が3.58℃に対し、北海

道の南東域で4.94℃、太平洋東北沖で4.91℃、日本海北部で4.47℃の上昇となっている。

ただし、例えば黒潮続流や亜熱帯と亜寒帯の混合水域のように変動が大きな海域では、RCP2.6シナリオにおいて温暖化によるトレンドよりも自然変動によるばらつきの方が大きく、統計的に有意な長期変化傾向を検出はされていない。また、どちらのケースについても日本海では亜熱帯より亜寒帯の方が大きな昇温量を示している。これらの地域的な変化は平均的な大気温・海水温の上昇に加えて、海洋循環場の変化が複合的に関係していると考えられており、これらの海域における水産資源や海洋生態系への温暖化影響を考える上でもより詳細なモデルによる予測や不確実性の評価が必要である。

図7は2 km 解像度の日本近海ダウンスケーリングの結果のうち、瀬戸内海を拡大したものである。このダウンスケーリングモデルでは瀬戸内海のシミュレーションを行う際に重要となる潮汐混合も表現できており、現在気候の結果には潮流の強い海域において、夏であっても周囲よりも低い23℃程度の海面水温が見られている。一方で、今世紀半ばにはこれらの低水温域はそれほど顕著に見られず、両者の差をとると現在水温が低い海域においてより昇温が大きく、外洋域では2℃弱の昇温となっているのに対し、瀬戸内海では最大2.5℃上昇するという結果となった。これは温暖化によって成層が強化される効果が潮汐混合の効果を打ち消し、現在気候では低水温となっている海域でも大気の影響を直接受けた水温となったと考えられる。現在気候においても低海水温域周辺の陸域の気温などの気象要素は海水温の影響を強く受けており、温暖化に伴う水温上昇は陸域における様々な分野にも影響を及ぼす可能性

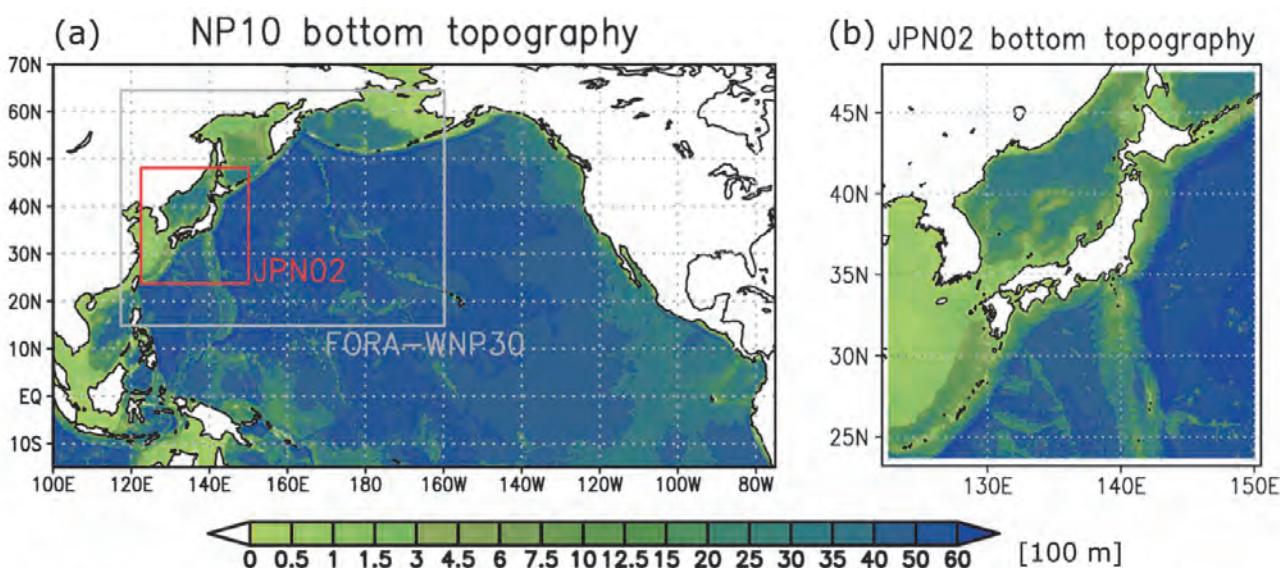


図4 FORP ダウンスケーリングデータセットの領域とモデルの海底地形。

(a) NP10 モデル, (b) JPN02 モデル。Nishikawa *et al.* (2021) より引用。灰色の矩形は海洋再解析データセット FORA-WNP30 (Usui *et al.*, 2017) の領域を示す。

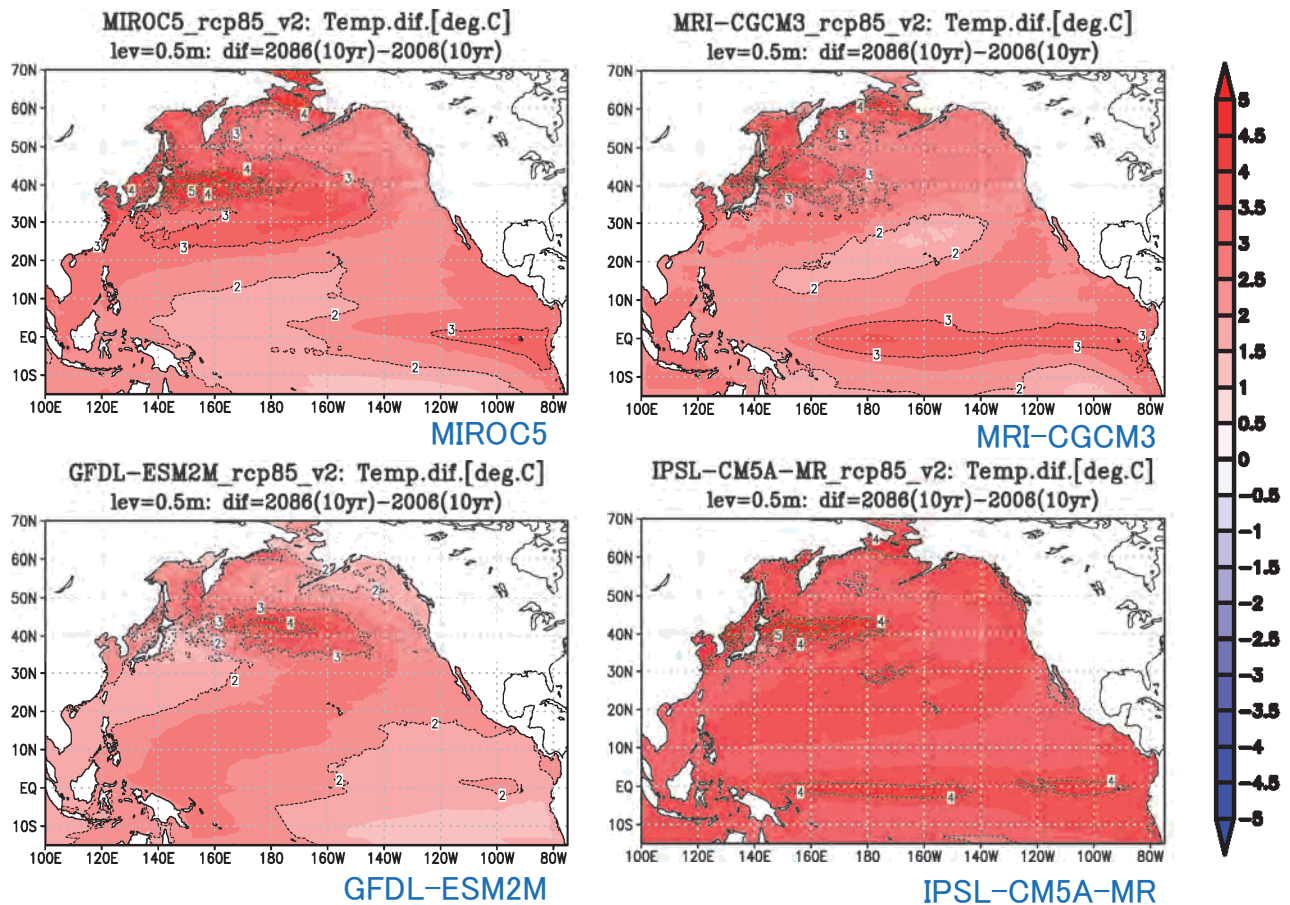


図5 FORP-NP10 で得られた海面水温の将来変化。
2086 年～2095 年平均と 2006 年～2015 年平均の差。それぞれ CMIP5 のモデル。(左上)MIROC5, (右上)MRI-CGCM3, (左下)GFDL-ESM2M, (右下)IPSL-CM5A-MR のからダウンスケーリングした結果。

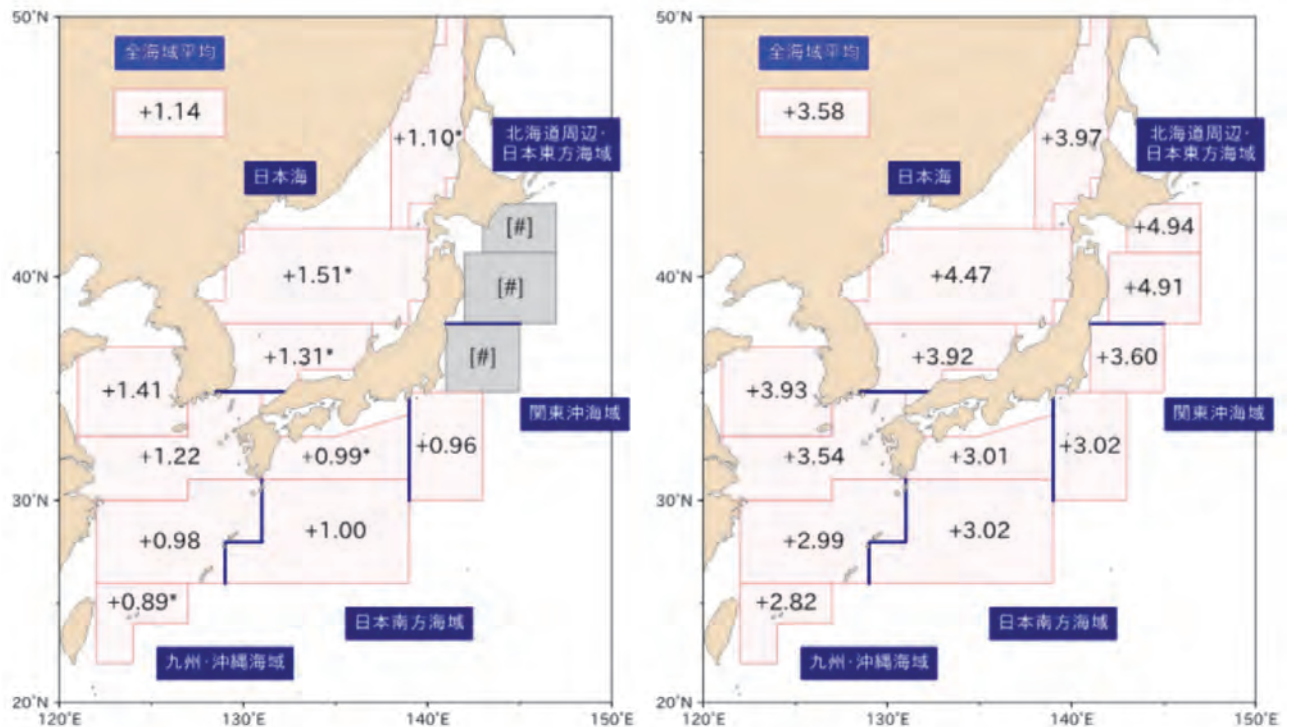


図6 21 世紀末の日本近海の世界平均海面水温の 20 世紀末からの上昇量(°C)。
2°C上昇シナリオ(RCP2.6, 左)及び 4°C上昇シナリオ(RCP8.5, 右)に基づく見積もり。図中の無印の値は信頼水準 99%以上で統計的に有意な値を,「*」を付加した値は 95%以上で有意な値を示している。「#」は, その海域では統計的に有意な長期変化傾向が見出せないことを示している。(文部科学省及び気象庁(2020)図 13.1 より引用)。

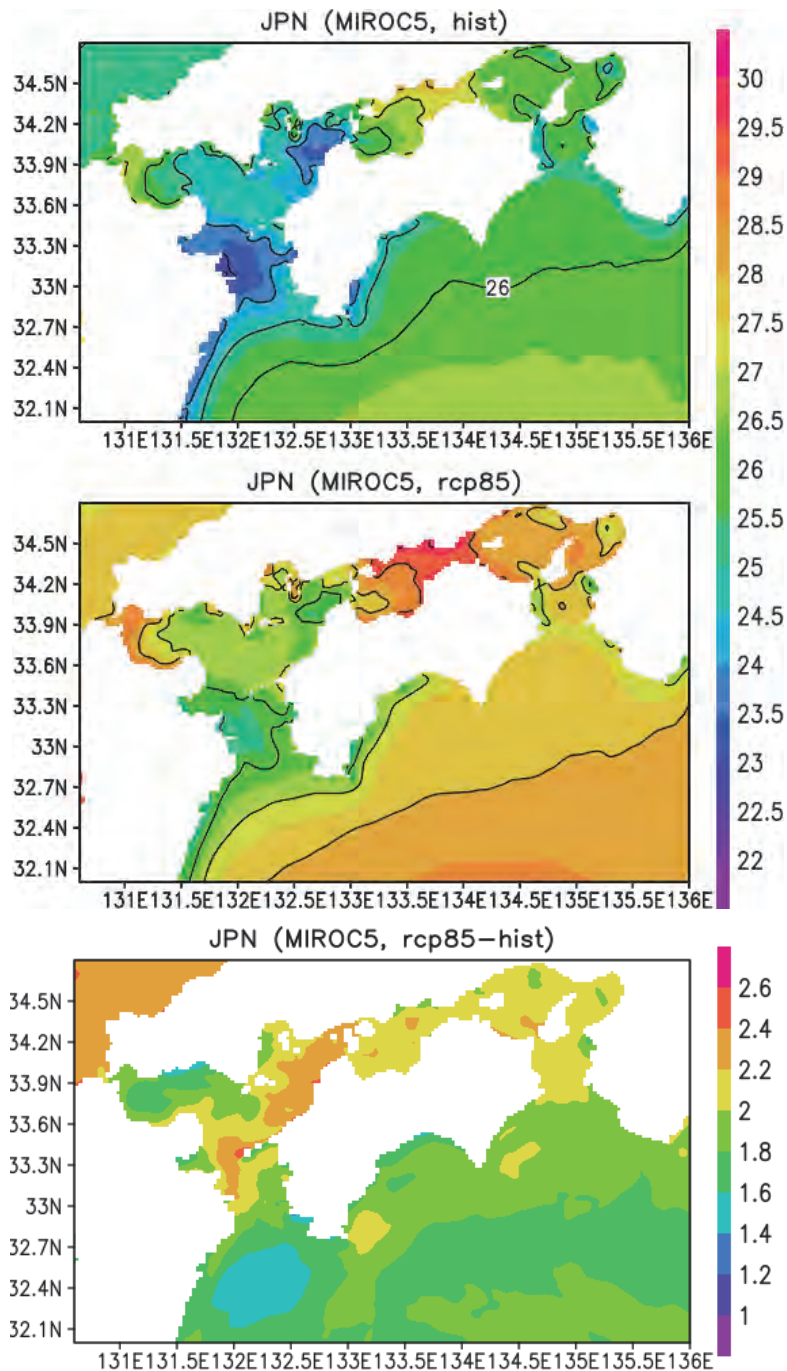


図7 FORP-JPN02 の8月の海面水温.

(上)1996年～2005年平均. (中)2046年～2055年平均. (下)2046年～2055年平均と1996年～2005年平均の差.

がある。

4. おわりに

本稿では海洋における気候変動予測のダウンスケーリングについて紹介したが、海洋における温暖化の影響は様々な領域やプロセスに見られておりその解析はニーズに合わせて多岐にわたることが想定されている。そこでここで紹介したFORPデータセットはデータ統合・解析システムDIAS(Data Integration Analysis System: <http://diasjp.net>)からダウンロードしてそれぞれの目的に合わせて自由に

解析したり、影響評価に用いたりすることができるようになっている。さらに、FORPバージョン4ではここで紹介した水温・水位などの物理プロセスに加え、栄養塩・プランクトンなど生物化学プロセスを表現したモデルも含まれており、基礎生産の将来変化などについても評価することができるデータセットとなっている(Nishikawa *et al.*, submitted)。

また、現在行われている文部科学省の気候変動予測先端プログラムでは新しい将来予測データセットの作成が始まっている。このデータセットはCMIP6の将来予測データセットをベースに、大気海洋結合モデル・領域大気モデル・領域海洋モデルを階層的

に組み合わせたダウンスケーリングによって作成する計画となっている。このデータセットの特徴はいくつかあるが、これまでのダウンスケーリングと比較して大気の大気ダウンスケーリングともシナリオなどが同じ設定となっており、統合的な解析をすることができること、多数メンバーのアンサンブル計算を計画しており確率的な評価をすることができること、非温暖化条件での計算を含んでおり現在気候で生じた現象に関するイベントアトリビューション研究にも使うことができる、などが挙げられる。

すでに海洋ダウンスケーリングデータを用いて、水産分野や海洋生態系分野における将来予測に用いられているが、今後も日本周辺海域のダウンスケーリングデータセットはこれらの応用分野のニーズも踏まえて、様々な改良、例えばシナリオ・アンサンブル数の追加、予報変数の拡充、高解像度化などを進めていくことが期待されている。このようなデータセットの拡充には計算量やデータ容量の増加を伴っていることもあり、データ作成者・利用者が協力して新たなデータセットの活用を進めていくことが必要である。

引用文献

- Church, J., Church, J. A., Clark, P. U., Cazenave, A., Gregory, J. M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M. A., Milne, G. A., Nerem, R. S., Nunn, P. D., Payne, A. J., Pfeffer, W. T., Stammer, D. and Unnikrishnan, A. S. (2013) Sea level change. *In: Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley, P. M. (eds.), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York.
- IPCC (2019) Summary for policymakers. *In: Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegria, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B. and Weyer, N. M. (eds.), IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3–35. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.001>
- IPCC (2023) Summary for policymakers. *In: Core Writing Team, Lee, H. and Romero, J. (eds.), Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, Geneva, Switzerland, 1–34, <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>
- 文部科学省及び気象庁 (2020) 日本の気候変動 2020 : 大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書
- Nishikawa, S., Wakamatsu, T., Ishizaki, H., Sakamoto, K., Tanaka, Y., Tsujino, H., Yamanaka, G., Kamachi, M. and Ishikawa, Y. (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>
- Oppenheimer, M., Glavovic, B. C., Hinkel, J., van de Wal, R., Magnan, A. K., Abd-Elgawad, A., Cai, R., Cifuentes-Jara, M., DeConto, R. M., Ghosh, T., Hay, J., Isla, F., Marzeion, B., Meyssignac, B. and Sebesvari, Z. (2019) Sea level rise and implications for low-lying islands, coasts and communities. *In: Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegria, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., Weyer, N. M. (eds.), IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 321–445. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.006>
- 高藪 出・金光正郎 (2010) 力学的ダウンスケーリングのレビュー. 天気, 57(7), 435–437.
- Usui, N., Wakamatsu, T., Tanaka, Y., Hirose, N., Toyoda, T., Nishikawa, S., Fujii, Y., Takatsuki, Y., Igarashi, H., Nishikawa, H., Ishikawa, Y., Kuragano, T. and Kamachi, M. (2017) Four-dimensional variational ocean reanalysis: a 30-year high-resolution dataset in the western North Pacific (FORA-WNP30). *Journal of Oceanography*, 73, 205–233. <https://doi.org/10.1007/s10872-016-0398-5>
- Yamanaka, G., Nakano, H., Sakamoto, K., Toyoda, T., Urakawa, S., Nishikawa, S., Wakamatsu, T., Tsujino, H. and Ishikawa, Y. (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>



石川 洋一 / Yoichi ISHIKAWA

海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門・地球情報科学技術センター センター長。京都大学博士(理学)。専門は海洋物理学、気候学。主に気候変動予測データの作成やその活用に取り組んでいる。

