

Impact assessment of the Seto-Inland Sea Heat Environment Downscaled Based on CMIP5 Model Ensemble

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2018-05-10 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00049531

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



CMIP5にもとづくダウンスケーリング計算 による瀬戸内海熱環境場の将来変化予測

森 信人¹・今井優樹²・二宮順一³・安田誠宏⁴・間瀬 肇⁵

¹正会員 京都大学防災研究所 准教授 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: mori@oceanwave.jp

²学生会員 京都大学大学院防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³正会員 金沢大学理工研究域 助教 (〒 920-1192 石川県金沢市角間町)

⁴正会員 京都大学防災研究所 助教 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁵正会員 京都大学防災研究所 教授 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

近年, 地球温暖化の海岸・海洋への将来変化予測及びその影響評価が進められ, 2013年9月にはIPCC WGI第5次報告書 (AR5) が発表された. AR5における影響評価は, 主に Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) の将来予測を用いて行われ, そこに登録される Global Climate Model (GCM) の空間解像度は水平100km~300kmである. このため, 日本やこれ以下の領域スケールにおける将来予測や影響評価の必要性がAR5でも指摘されている. そこで本研究では, CMIP5を対象に全球や西日本を含む10海域について大気・海洋物理量について解析を行いとりまとめた. また, 得られた西日本の将来変化結果を外力に考慮し, 領域海洋モデルによる瀬戸内海のダウンスケーリング計算を行った. これにより, 海域毎の将来変化特性を明らかにするとともに, 瀬戸内海の詳細な海洋物理環境場の将来変化予測を行った.

Key Words: the Seto-Inland Sea, heat environment, water profile, CMIP5, ROMS, downscaling

1. 序論

近年, 地球温暖化に伴う海岸・海洋への将来予測及びその影響評価研究が進められている. 2013年9月にIPCC WGI第5次報告書 (IPCC-AR5 WGI, 2013; 以下AR5と略記) が発表され, 気候変動の予測に関して大きな進歩が見られた. 例えば, 海面更正気圧の極域方向への変化 (12章4.4節), 全体的な蒸発量の増加 (12章4.5節), 海洋表層の塩分減少 (12章4.7節) などの予測結果がまとめられている¹⁾. これらの将来予測の主たる情報源である Coupled Model Intercomparison Project Phase 5²⁾ (CMIP5) には, 全61種類の Global Climate Model (GCM) が登録され, それらはCMIP5で定められた実験仕様に基づいて再現気候実験や将来気候実験が行われたものである.

例えば, 将来気候において, 温室効果ガスの濃度経路で定義される共通の温暖化シナリオ RCP (Representative Concentration Pathways) を用いることで, シナリオ間の定量的な評価を可能にしている. 一方これら GCM は, 目的に応じたばらつきを有し, 例えば水平空間解像度については, 粗いもので約300km, 細かいものでも100km程度である. この空間スケールに伴い, AR5における影響評価は全球から総観規模などの大規模スケールにおける検討が多く, 日本やこれ以下のスケ-

ールにおける影響については一貫性を保った評価はなされていない. 例えば, 森ら³⁾は雲量の将来変化において全球平均ではほぼ横ばいであるのに対し, 西日本周辺では約10%の減少と予測している.

また, 日本周辺において海水温や炭酸カルシウム飽和度の将来予測を用いた地球温暖化による沿岸生態系の将来影響評価が行われている. 例えば, Takaoら⁴⁾は日本沿岸海域における藻場の顕著な減少を予測しているが, GCMの Sea Surface Temperature (SST) の将来予測にもとづく簡易的な指標に依る影響評価である.

そこで本研究では, CMIP5を対象に全球や西日本を含む領域スケールの海面近傍の大気・海洋物理量について解析を実施する. また, 得られた西日本の月平均将来変化を外力として考慮して, 領域海洋モデルを用いた瀬戸内海の長期積分を行うダウンスケーリング計算を行い, 瀬戸内海の詳細な海洋物理環境場の将来変化予測を行う.

2. 手法の概略

(1) CMIP5の解析手法

海岸・海洋への将来変化については, CMIP5の大気・海洋結合モデル (AOGCM) の将来予測結果を解析した. 解析対象は, CMIP5に登録されている全61種類のGCM

の海洋および気象データとした。ただし、コントロールランアンサンブル、初期値アンサンブルおよび物理アンサンブルが行われている GCM については、各モデルにおいて 1 シナリオのみを解析対象とした (CMIP5 表記で r1i1p1 を解析対象)。

CMIP5 全体の共通した計算期間を考慮して、ここでは現在気候を 1996~2005 年、将来気候を 2084~2093 年と定義する。それぞれの期間において 10 年間の年平均および月平均を求め、将来気候と現在気候の差を将来変化と見なした。解析対象とした物理量は、海洋モデルの外力として必要となる、海面水温 (SST)、海面付近気温 (T_{2m})、風速 (U_{10})、雲量 (CLT)、海面更正気圧 (SLP)、短波放射 (RadSW)、長波放射 (RadLW) である。また、放射強制力の将来シナリオとしては、RCP4.5 および 8.5 シナリオ (放射強制力 4.5 W/m^2 および 8.5 W/m^2) を対象とした。解析における海域区分は、全球、太平洋等の代表的な海洋と日本 ($N25^\circ \sim 47^\circ$, $E122^\circ \sim 150^\circ$)、西日本 ($N27^\circ \sim 35^\circ$, $E125^\circ \sim 136^\circ$) の 10 海域とした。

(2) 海洋モデルと計算条件

CMIP5 の RCP8.5 シナリオの解析結果で得られた将来変化を境界条件として、ROMS (Shchepetkin・McWilliams⁵⁾) を用いて瀬戸内海の将来変化のダウンスケール計算をした。計算条件は鉛直方向に σ 座標を用い、解像度は水平 1 km、鉛直 20 層とした。瀬戸内海の計算は、先行研究⁶⁾の結果を踏まえ、観測結果との比較の容易な 2004 年の 1 年間を計算対象とした。2004 年を対象とした再解析では、大気境界には JMA-GPV、海洋の側方境界には JCOPE データ、潮位の側方境界条件には TPXO7.0 のデータを与えた。河川については、瀬戸内海に流入する 243 河川 (1, 2 級河川) からの 1 時間毎の流入量、水温、塩分を与えた。この結果、2004 年を対象とした計算では、観測と比較して SST については春季~秋季で良好な再現結果が得られ、冬季で SST が高めに出る傾向が得られた⁶⁾。

将来気候の計算条件としては、CMIP5 の解析で求めた西日本の将来変化量 (現在気候と将来気候の差分) を 2004 年の境界条件に上乗せした。雲量と海面更正気圧については、それぞれ現在気候における再現性や気圧勾配の将来変化を考慮するために、現在気候値を元にした将来変化量比を割増した。このため、現在気候条件の計算は、CMIP5 の historical run のバイアスを含まない結果となる。また将来条件における側方境界は、鉛直水温分布の将来変化を考慮して以下のように与えた。まず、MIROC5 における西日本の海洋内部解析を行い、鉛直水温分布の将来変化を求めた。次に、この海底から海面に向かう非線形な昇温を考慮し、鉛直水温分布

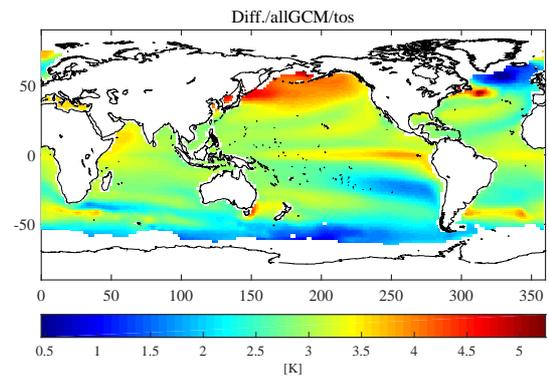


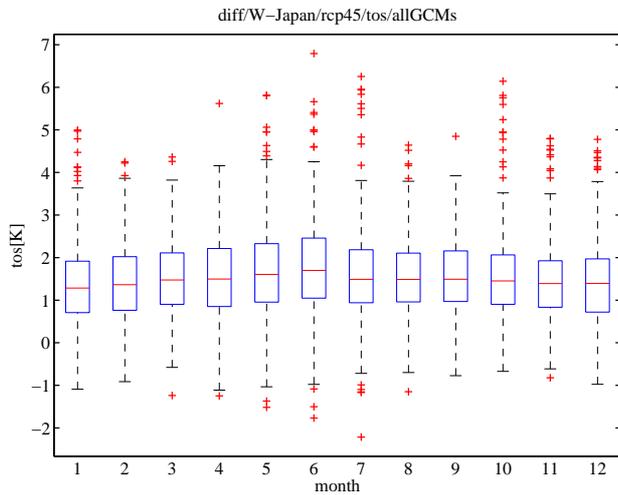
図-1 マルチモデルアンサンブルによる SST 将来変化
：空間分布：RCP8.5 シナリオ

の将来変化を指数関数で曲線回帰することで西日本の水温構造の将来変化を求めた。得られた水温構造の近似曲線に西日本における SST の CMIP5 解析結果を考慮することで、瀬戸内海の将来気候における鉛直水温分布側方条件を作成した。MIROC5 のパフォーマンスについては 3. で後述する。

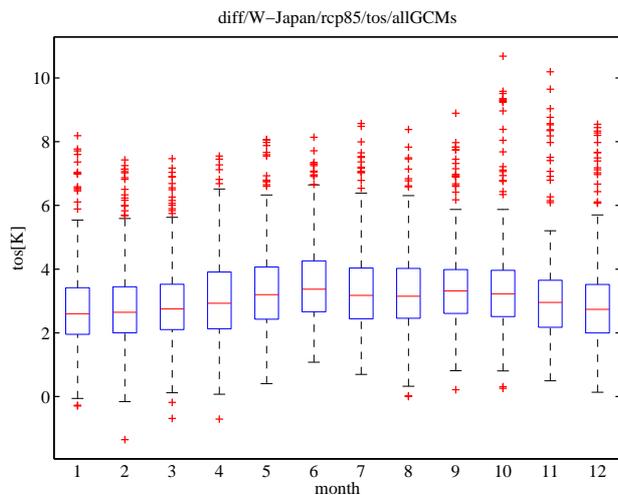
3. CMIP5 を対象とした界面近傍物理量の将来変化

(1) SST の将来変化

図-1 に SST の将来変化量の空間分布を示す。全ての海域で顕著な昇温傾向が見られるが、特に太平洋北部と大西洋北西部では、約 4 度の昇温が見られる。とりわけ、太平洋北西部にあたる日本周辺では大きな将来変化が見られ、日本南方の平均的变化から北に向かって昇温傾向が強まり、昇温の空間分布の局所性が強いことがわかる。一方、南緯 50 度付近の南極海および大西洋北部では比較的昇温傾向が小さく、約 1 度の将来変化が予測されている。図-2 に示すのは、西日本における SST のそれぞれ RCP4.5, 8.5 シナリオにおける月平均将来変化である。RCP4.5 シナリオにおける SST の昇温は最大で 6 月の 1.7 度、最小で 1 月の 1.4 度である。RCP8.5 シナリオにおいても同様の月平均昇温傾向が見られ、最大で 6 月の 3.5 度、最小で 1 月の 2.8 度の昇温であり、RCP4.5 シナリオ下における予測結果の約 2 倍である。これらのシナリオ下における西日本の将来変化は、いずれも全球における年平均変化である RCP4.5 シナリオの 1.1 度、RCP8.5 シナリオの 2.6 度より大きく、西日本の昇温傾向は比較的大きいことが確認されている³⁾。一方、図-3 に示す RCP8.5 シナリオ下の西日本における SST 年平均将来変化の AOGCM 比較結果より、昇温傾向は約 1~約 7 度でありモデル間のばらつきはシナリオ間におけるばらつきよりもオーダーが大きい



(a) RCP4.5 シナリオ



(b) RCP8.5 シナリオ

図-2 マルチモデルアンサンブルによる西日本における月平均 SST の将来変化 (赤横線: アンサンブル平均, 箱: 27・75% 値, パー: 上下限值, 十字プロット: 外れ値, 単位: K)

い. 本稿の 4 節において, 瀬戸内海の側方条件として考慮される MIROC5 の SST 昇温は年平均で 3.3 度であり, モデル間アンサンブル平均 3.2 度とほぼ一致していることが確認できる.

(2) CMIP5 の解析結果のまとめ

SST の他に, T_{2m} , SLP, U_{10} , CLT, Rad SW, Rad LW にについても解析を行った. 表-1 に示すのは, 最終的に得られた期間平均による将来変化量のまとめである. 本研究で着目した日本と西日本は外洋に比べ顕著もしくは特異な将来変化を示す物理量が多い. 例えば, SST の昇温は全球平均で 2.69 度であるのに対し, 日本は 3.80 度, 西日本は 3.03 度と温暖化傾向が強い. また, 雲量における全球平均将来変化は 0.52% の増加とほぼ横ばいであるが, 日本では -3.26% の減少, 西日本では -3.17% の減少が予測されている. さらに, 短波放

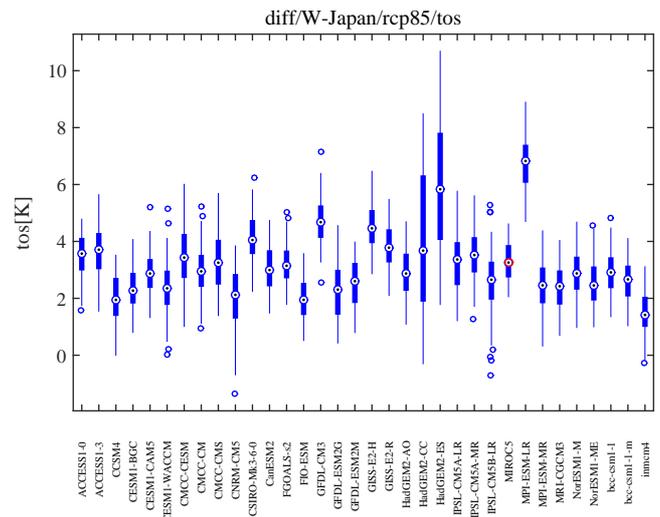


図-3 マルチモデルアンサンブルによる AOGCM 比較: 年平均 SST の将来変化: RCP8.5 (青点: アンサンブル平均, 箱: 27・75% 値, パー: 上下限值, 青丸プロット: 外れ値, 単位: K)

表-1 解析対象変数の今世紀末変化量: RCP8.5 (地上気温: T_{2m} , 海面更正気圧: SLP, 高度 10m 風速: U_{10} , 短波放射: Rad SW, 長波放射: Rad LW)

Variable	Global		Japan		West Japan	
SST	2.56 K	0.91% ↗	3.80 K	1.34% ↗	3.18 K	1.10% ↗
T_{2m}	3.64 K	1.29% ↗	3.76 K	1.30% ↗	3.24 K	1.10% ↗
SLP	-18.9 Pa	0.02% ↘	14.6 Pa	0.01% ↗	16.9 Pa	0.02% ↗
U_{10}	0.09 m/s		0.27 m/s		0.31 m/s	
CLT	0.52%	0.80% ↗	-3.26%	6.11% ↘	-3.17%	5.46% ↘
Rad SW	22.6W/m ²	6.93% ↗	4.70W/m ²	2.85% ↗	6.78W/m ²	3.75% ↗
Rad LW	-3.66W/m ²	2.26% ↘	23.2W/m ²	6.71% ↗	22.8W/m ²	6.18% ↗

射については, 全球は 22.6 W/m² の増加が見込まれる一方, 日本は 4.70 W/m² 増加, 西日本では 6.78 W/m² 増加と比較的变化が小さく, 長波放射においては, 全球平均で -3.66 W/m² の減少傾向であるのに対し, 日本, 西日本ではそれぞれ 23.2 W/m², 22.8 W/m² 増加傾向で変化が大きい. このように, 日本周辺における将来変化特性は全球平均と比べ特徴的な結果となった.

以上, 全球と日本周辺の物理量将来変化について述べたが, この他の海域においても局所的な将来変化を示す物理量が多い. これらの海域の解析結果については紙面の都合上別の機会に示すこととする.

4. 瀬戸内海の熱環境場の将来変化予測

前節で行った CMIP5 の解析結果をもとに, ダウンスケーリング計算による瀬戸内海の物理環境場の将来変化予測を行った. 得られた結果については, その将来インパクトの強い熱環境について解析を行い, 以下は月平均の将来変化についての結果である.

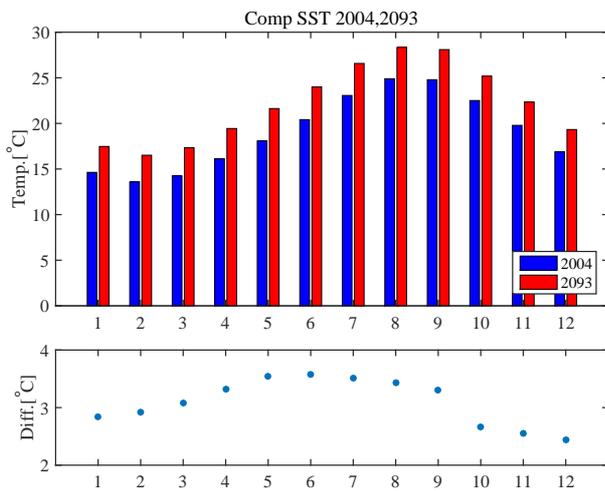


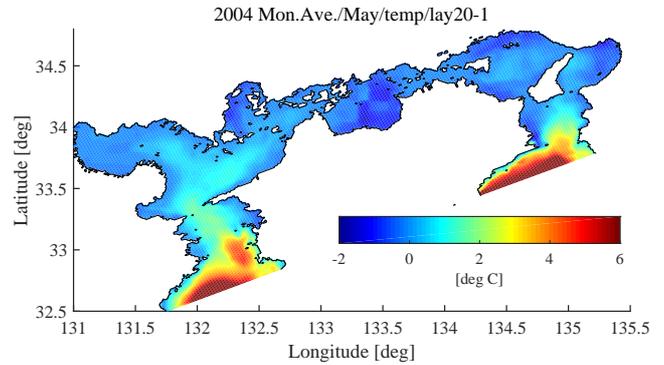
図-4 瀬戸内海全体の月平均 SST の将来変化：RCP8.5
(青：現在気候，赤：将来気候)

(1) SST の将来変化

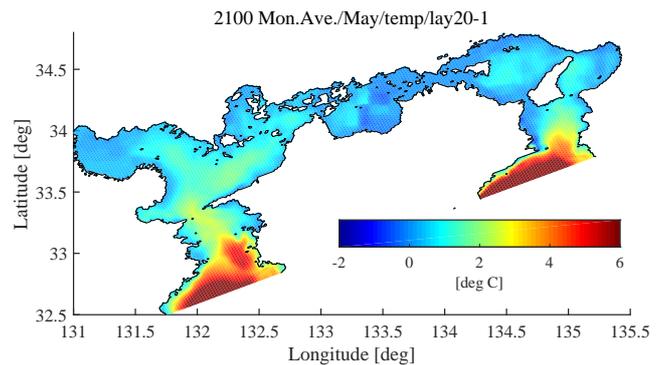
瀬戸内海全域平均の SST の月変化を図-4 に示す．SST 将来変化については西日本における CMIP5 解析結果と同様夏季における昇温傾向が強くなり最大で 6 月の 3.58 度であり、図-2(b) に示されるように西日本 6 月平均将来変化とほぼ同じ結果であった．一方、瀬戸内海における最小昇温は 12 月の 2.84 度であり、西日本平均の最小昇温月の 1 月と一致しなかった．瀬戸内海の昇温傾向は低い方から 12 月ついで、11 月、10 月となっており、1 月はこれに続き 4 番目となっている．これら冬季の瀬戸内海 SST 将来変化は、図-2(b) に示す西日本の海洋の将来変化と比べて低い昇温傾向予測が多くなっている．

(2) 上底層の水温偏差空間分布の将来変化

瀬戸内海のダウンスケーリング計算条件は鉛直 20 層として実施し、海面から 1 層目を上層、20 層目を底層としてその水温偏差の空間分布について解析を行った．海洋上層は大気側の影響を受け易いため、年間を通して底層より水温が高いことが多くある．このため、現在・将来気候共に、上底層の水温偏差は冬季から夏季にかけて瀬戸内海全域で昇温傾向にある．特に、豊後水道や紀伊水道では、太平洋に向かって水深が比較的深度になるため、上底層の鉛直混合の遅れによる上底層の水温偏差が顕著である．例えば、5 月における上底層の水温偏差空間分布 (図-5) では、現在気候、将来気候共に太平洋に面した瀬戸内海南側から中央部に向かって水温偏差が広がっていることがわかる．また、瀬戸内海中央部の水深の浅い燧灘では、現在気候においては上底層の水温偏差がほぼないのに対し、将来気候では上層の方が底層に比べて 1 度前後水温が高くなっている．一方、11 月における上底層の水温偏差空間分布 (図-6)



(a) 現在気候



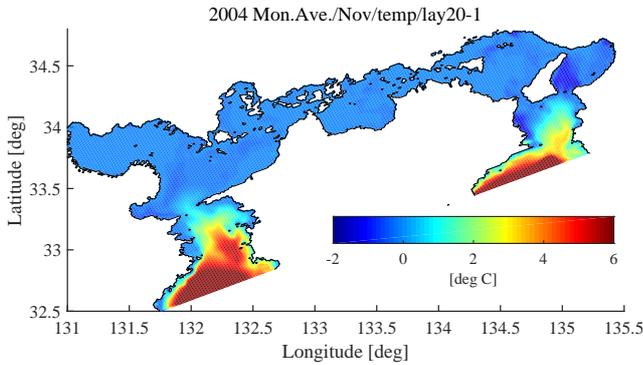
(b) 将来気候

図-5 上底層の水温偏差空間分布：5 月平均

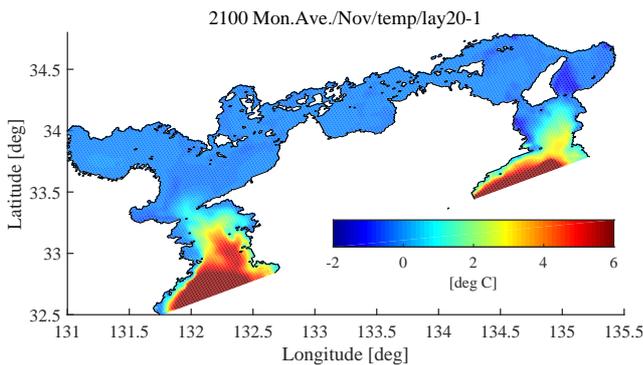
では、太平洋に面した豊後水道や紀伊水道を除き現在気候、将来気候共に上底層の水温偏差が小さいことがわかる．冬季は海洋上層の水温がそれより低い大気側の気温から影響を受け冷却される．このため、上底層の水温偏差の大きい夏季における将来気候においても、冬季においては海洋上層の降温により起こる上底層の海水密度差が鉛直混合に寄与し鉛直混合が進むことで、水温偏差は現在気候と同様の空間分布になったと考えられる．

(3) 水深別水温空間分布の将来変化

夏季における瀬戸内海では、四国を中心とした時計回りの流れが卓越していることが知られている．図-7 に示す水深別空間分布の 7 月平均将来変化では、これに伴う太平洋から流れ込む海水により、豊後水道において水深 1m、50m 共に昇温傾向が低くなっていることが確認できる．また、水深 1m における図-7(a) の将来変化において、浅海域である沿岸付近では 4 度近くの昇温が見られ、豊後水道を除いた瀬戸内海全域では 4 度弱の昇温が見られる．沿岸域と豊後水道の昇温差は最大で 1 度以上が予測され、瀬戸内海の海面付近水温の将来変化の空間的不均一性が確認された．一方水深 50m における将来変化 (図-7(b)) では、豊後水道と紀



(a) 現在気候



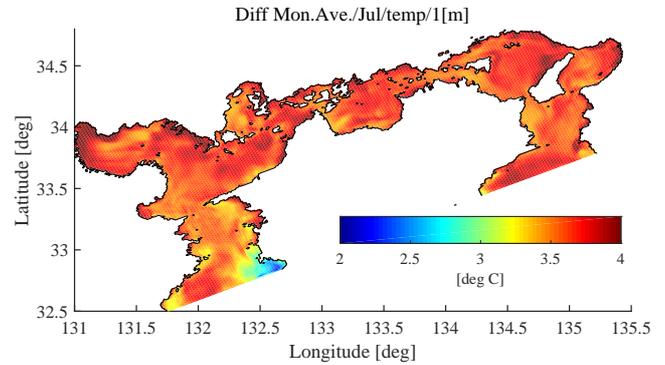
(b) 将来気候

図-6 瀬戸内海の各気候における上底層の 11 月平均水温偏差空間分布

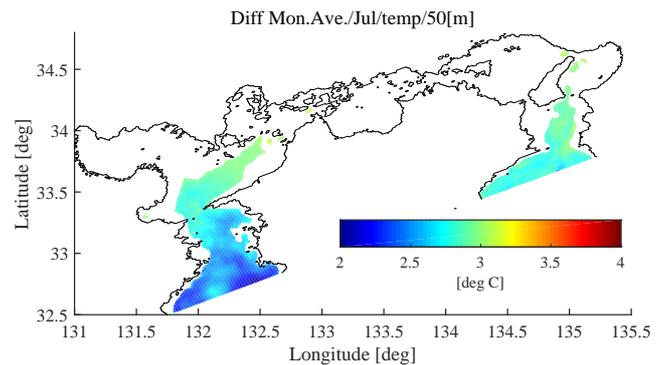
伊水道の昇温差は 0.5 度程度と、その空間的不均一性は海面付近より低い。

(4) 鉛直水温分布の将来変化

大気側の将来変化影響を受ける海洋内部の温度成層域は、その水深によって変化し易い。ダウンスケーリングで対象とした領域の瀬戸内海の平均水深は 22.2m であるが、水深に伴う温度成層の違いは特に冬季に現れ易く、水深の浅い燧灘や播磨灘と水深の深い紀伊水道や豊後水道の将来変化影響を受ける成層域は異なる。例えば、燧灘、紀伊水道における 12 月平均鉛直水温分布をそれぞれ図-8 に示す。海面から水深 20m に着目すると、燧灘では表層に向かって昇温傾向であるのに対し、紀伊水道では海面近傍における昇温傾向の小さい増加が見られるが表層に向かって全体的に降温傾向にある。これとは対照的に、1 月における播磨灘と豊後水道の鉛直水温分布の将来変化では、水深の浅い播磨灘で表層に向かって降温傾向であるのに対し、豊後水道では表層に向かって昇温傾向が見られた。



(a) 水深別水温月空間分布；水深 1m



(b) 水深別水温月空間分布；水深 50m

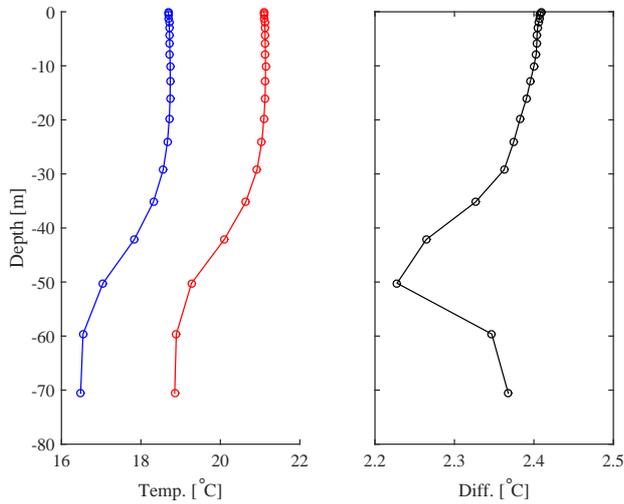
図-7 瀬戸内海の水深別月平均水温空間分布の将来変化(7月)

(5) 瀬戸内海の物理環境場将来予測のまとめ

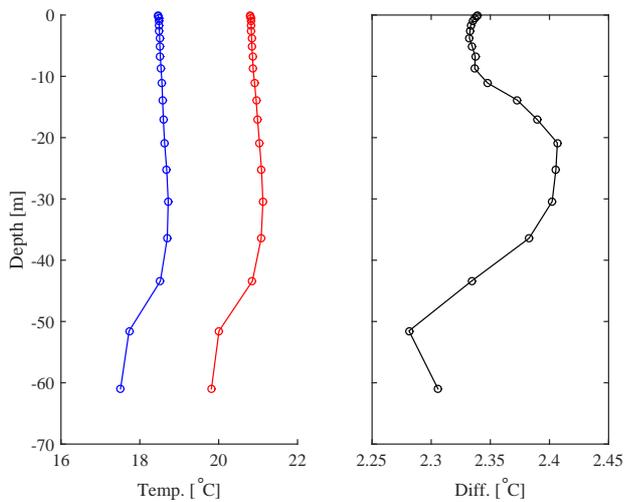
瀬戸内海物理環境場の将来変化の空間的均一性は、瀬戸内海の水平・鉛直方向混合の卓越が支配的である。夏季と冬季における SST の将来昇温差、上底層の水温差の夏季における増加傾向と冬季における現在気候と将来気候の類似性、水深別で見た水温将来変化の空間的不均一性、鉛直水温分布の将来変化特性の水深による違いなどから、瀬戸内海物理環境場における将来変化の把握には、領域スケールでの将来予測の必要性を示唆している。

5. 結論

AR5 でまとめられた CMIP5 を解析することにより、全球及び日本周辺における大気・海洋物理量の月平均将来変化を求めることができた。SST の将来変化は全球平均で 2.56 度の昇温が見込まれるが、特に太平洋北西部に位置する日本周辺では各月平均で全球平均より 1 度前後大きい。この他にも、雲量において全球平均の将来変化がほとんど現れていないのに対して日本周辺で減少傾向が見込まれ、長波放射においては全球平均が減少傾向であるのに対して日本周辺の増加傾向が予



(a) 燧灘



(b) 紀伊水道

図-8 瀬戸内海の12月月平均水温鉛直分布の将来変化, 左: 水温(青: 現在気候, 赤: 将来気候), 右: 水温将来変化

測されている。

CMIP5の解析結果を考慮した瀬戸内海の将来ダウンスケーリング計算による将来変化予測では, その熱環境に着目し解析を行った。その結果, 瀬戸内海全域平均で SST における夏季の昇温が CMIP5 西日本解析結果と整合性がある一方で, 冬季における昇温傾向の低下月に両者の相関がないことが明らかとなった。上底層の水温偏差は夏季に将来大きくなることが予測される一方で, 冬季は将来変化がほとんど現れない結果となった。また, 海面近傍の水温空間分布から沿岸域における顕著な昇温が確認できた。ついで, 水深に伴う冬季の鉛直水温分布構造の相対性が明らかとなった。以上, 本研究では西日本スケールから瀬戸内海のダウンスケーリング計算を実施することで, 瀬戸内海の詳細な熱環境将来変化特性を明らかにした。

謝辞: 本研究は, 文部科学省気候変動リスク情報創生プログラムおよび科学研究費補助金による成果である。

参考文献

- 1) IPCC-A5 WGI (2013): Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Chapter, 12, <https://www.ipcc.ch/>, 2014年5月アクセス。
- 2) CMIP5 (2013): Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/>, 2014年5月アクセス。
- 3) 森信人・今井優樹・二宮順一・安田誠宏・間瀬肇: CMIP5にもとづく瀬戸内海の長期物理環境場の将来変化予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70(2), pp.1271-1275. 2014.
- 4) Takao S., Kumagai N. H., Yamano H., Fujii M., Yamanaka Y.: Projecting the impacts of rising seawater temperatures on the distribution of seaweeds around Japan under multiple climate change scenarios. Ecology and evolution 5(1), 213-223, 2015-01. 2014.
- 5) Shchepetkin, A. F. and J. C. McWilliams: The regional Ocean Modeling System: A split-explicit, free-surface, topography following coordinates ocean model, Ocean Modeling, Vol.9, pp.347-404. 2005.
- 6) 田中悠祐・森信人・二宮順一・杉松宏一・八木宏・安田誠宏・間瀬肇: 海洋波浪結合モデルを用いた瀬戸内海の長短期物理環境場の再現, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69(2), pp.511-515. 2013.

(2015.3.18 受付)

Impact assessment of the Seto-Inland Sea Heat Environment Downscaled Based on CMIP5 Model Ensemble

Nobuhito MORI, Yuki IMAI, Junichi NINOMIYA, Tomohiro YASUDA and Hajime MASE

This study projects heat environmental changes of the Seto-Inland Sea in Japan using the Regional Ocean Modeling System (ROMS) calculating to downscale and considering Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) ensemble results on West Japan. The IPCC-AR5 WGI was published in September 2013. Although there are many impact assessments on global or large scale changes in the coastal ocean environment, there are few studies on smaller scale changes, So this study analyzes CMIP5 for near-sea surface on global and local ocean areas including West-Japan and calculates the long-term analysis in the Seto-Inland Sea as present and future using ROMS considering West-Japan results of CMIP5. It also examined the projection of heat environmental changes of the Seto-Inland Sea.