

公益信託エスベック地球環境研究・技術基金
2022年度採択研究課題報告書

題目：地球温暖化による海洋表層混合層浅化が海洋光合成に及ぼす影響

1. はじめに

黒潮親潮混合域は、黒潮と親潮が合流し、両方の海水が混在する海域である。豊富な栄養塩を含んでいることから、好漁場であり、二酸化炭素吸収能力が高く、日本周辺の気候だけでなく、世界規模の気候に多大な影響を及ぼしている。近年、地球温暖化に伴い、海洋表層の成層が強化され、表層への栄養塩供給の抑制と、それに伴う生物生産の減少が危惧される。また、表層の成層強化は海洋混合層厚の減少を引き起こし、それに伴った混合層渦周辺のサブメソスケール流動も抑制されることが北大西洋の数値実験から報告されているが、北太平洋における同様な研究は未だ実施されておらず、それが栄養塩供給や植物プランクトンに及ぼす影響についても不明である。そこで本研究では、サブメソスケールを許容する計算格子を流れと生態系モデルについて用い、気候予測モデルの結果のうち、現代の結果と85年後の結果からそれぞれ気候値を作成し、それらを境界条件として用いた高解像度数値実験を実施した。本研究の目的は、現代と85年後を比較して、サブメソスケールの流動がどのように変化し、それが海洋低次生態系に及ぼす影響を明らかにすることである。

2. 方法

本研究で用いた気候モデルは以下の Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) datasets における ScenarioMIP.DKRZ.MPI-ESM1-2-HR.ssp585 の海洋、生態系モデルである。まず海洋大循環モデルは、ドイツ気候コンピューティングセンター (DKRZ: Deutsches Klimarechenzentrum) による、MPIOM1.63 (tripolar TP04, approximately 0.4deg; 802 x 404 longitude/latitude; 40 levels; top grid cell 0-12 m) で、海洋生物地球化学モデルは、OcnBgchem: HAMOCC6 を用いている。MPIOM1.63 は水平方向に Arakawa-C グリッドを採用し、鉛直方向は静水圧近似を施し、またブジネス近似を用いている。サブグリッドスケールにおけるパラメタリゼーションには、等密度面における混合 (Redi, 1982) と解像されていない渦による層厚とトレーサー輸送 (Gent et al. 1995) が用いられている。鉛直混合は、Pacanowski and Philander (1981) によるリチャードソン数依存スキームと混合層内の風による混合との組み合わせによってパラメタ化している (Mauritsen et al. 2019)。

これらのモデルの月ごとの平均値としての出力データのうち、2015 から 2034 年のもの

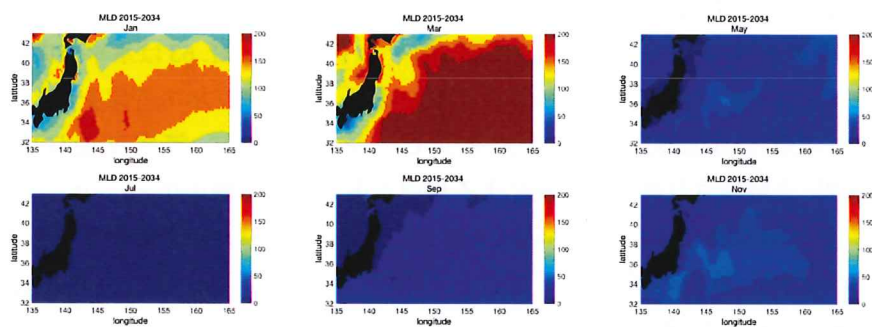
と、2080 から 2100 年のデータを用いて、それぞれの 20 年平均の月平均気候値を作成した。作成した気候値のうち海面に関するものは、正味の海面における熱フラックス、淡水フラックス、東西・南北方向それぞれの風応力、短波放射量が含まれる。また、高解像度モデル Regional Ocean Model System (ROMS, Shchepetkin, A. F., and J. C. McWilliams 2005) の水温が著しく気候値からずれるのを防ぐために、月平均気候値と ROMS の海面水温差に調整率をかけて、それを熱フラックスに加えて、ROMS の海面水温を極力月平均気候値に近づけるナッジング手法も水温については用いている。ROMS の初期条件と水平境界条件として、CMIP6 のデータから作成した物理場に関する月平均気候値には、海面高度、水平流速、水温、塩分が与えられた。これらの月平均気候値を境界条件として設定し、ROMS をサブメソスケールが許容できる水平解像度 3km の計算格子を作成して数値実験を実施した。計算を実施した海域は、北緯 34° から 40°、東経 150° から 156° の範囲である。

ROMS の生態系モデルは、Fasham et al. (1990)らの先行研究による低次生態系 NPZD モデル(Gruber et al. 2006)を本研究対象海域における低次生態系の変化を調査するために用いた。本研究における NPZD モデルは栄養塩（硝酸塩 NO_3^- ）、植物プランクトン (Phytoplankton)、動物プランクトン (Zooplankton)、デトリタス (Detritus) の要素を含む。初期、境界条件には上述の CMIP6 データセットにおける硝酸塩濃度月平均気候値、クロロフィル濃度月平均気候値、植物プランクトン、動物プランクトンを用いた。しかし、モデルに含まれるデトリタスについては、初期条件は濃度 0 とし、デトリタスの季節変化が平衡状態として繰り返される様になった 5 年目から結果を解析に用いた。

3. 結果と考察

3.1. CMIP6 結果の比較

まず、対象とした海域で CMIP6 結果をもとに作成した現代と 85 年後の未来の気候値を比較したところ、未来の黒潮続流は現代と比べて北偏して流れ、続流南側で温暖化に伴った混合層の浅化が 10m 程度認められた (図 1)。



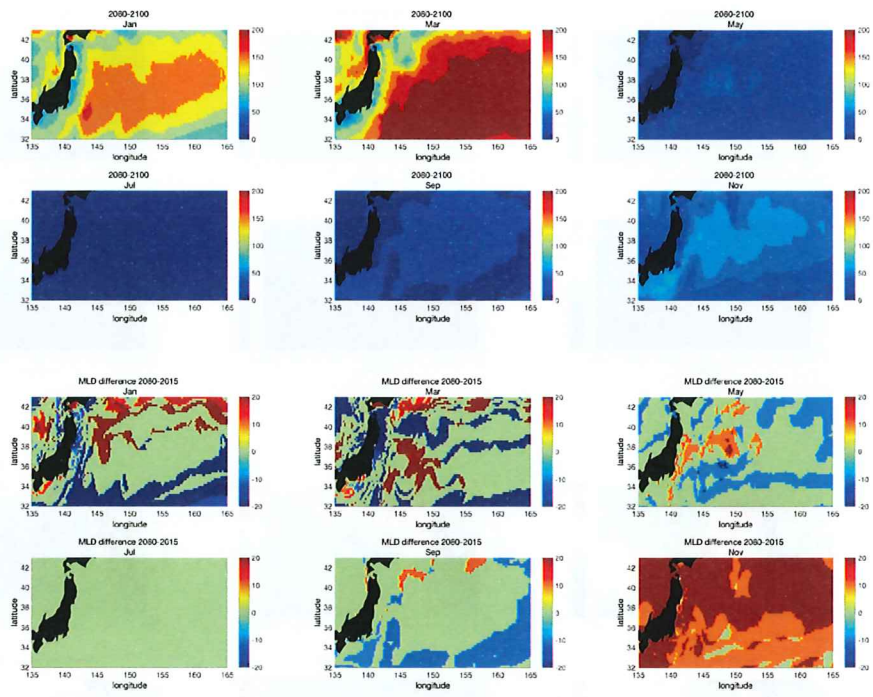
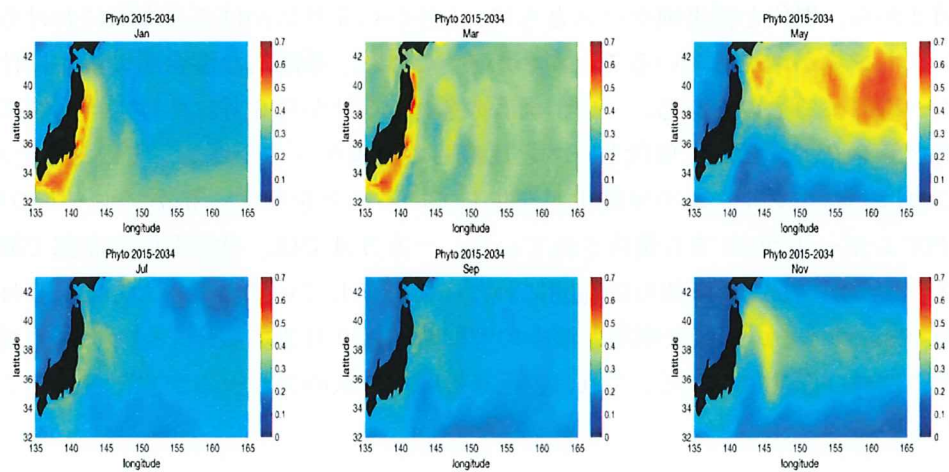


図 1. CMIP6 の結果から算出した 20 年月平均混合層の 1, 3, 5, 7, 9, 11 月における鳥瞰図。上 2 段は 2015-2034 年、中 2 段は 2080-2100 年、下 2 段は後者から前者を差し引いた差を示す。



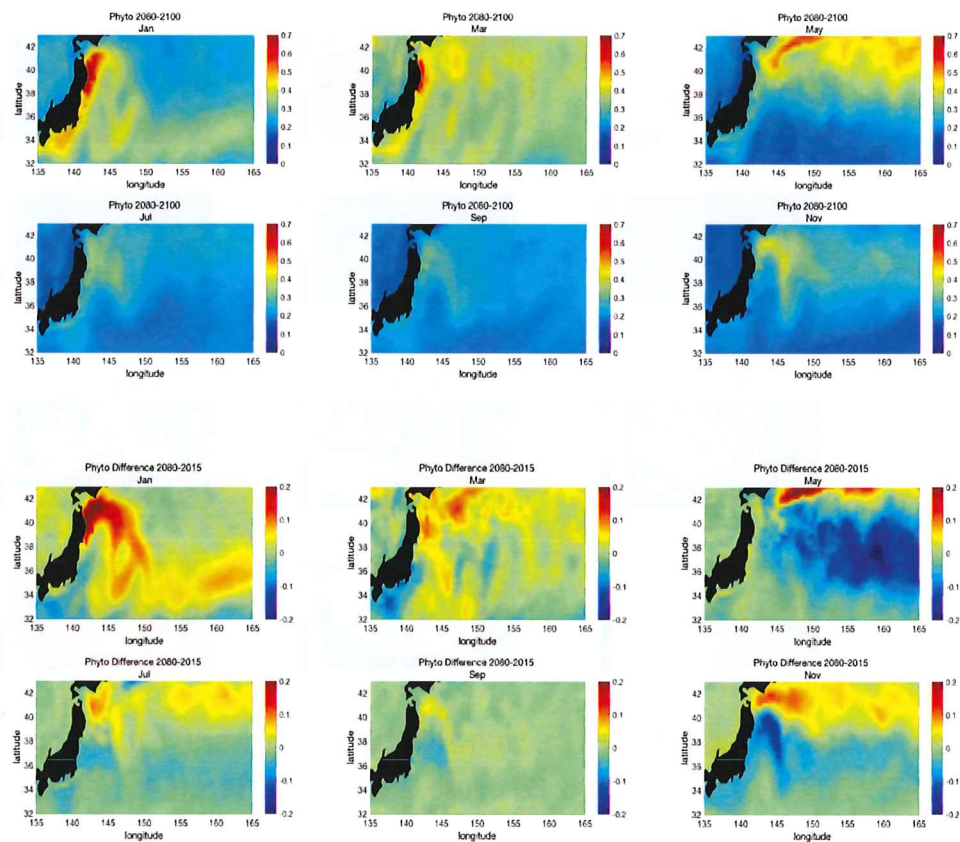


図 2. CMIP6 の結果から算出した 20 年月平均植物プランクトン量 (mmol N/m^3) 表層 100m 平均値の 1, 3, 5, 7, 9, 11 月における鳥瞰図。上 2 段は 2015-2034 年、中 2 段は 2080-2100 年、下 2 段は後者から前者を差し引いた差を示す。

図 2 から、現代と将来両ケースともに、1 月から 5 月にかけて当海域における植物プランクトン量が増加していることがわかる。これは、季節的な混合層の浅化に伴う春季ブルームによるものである。一方、両者の差は、1 月から 3 月にかけて当海域における植物プランクトン量が、現代ケースと比較して将来ケースで増加していることがわかる。これは、春季ブルームの早期化が発生していることを示す。春季ブルームの早期化は、IPCC レポート 2022 でも報告されている。一方 5 月では、当該海域の北部で植物プランクトン量が増加し、南部の広範囲にわたって減少していることがわかる。5 月の減少は約 40%に達する。同様な増加と減少の空間分布は 9 月まで振幅を弱めながら続くが、11 月には再び顕著に現れる。これは、亜寒帯域での秋のブルームが強化されることを示唆している。

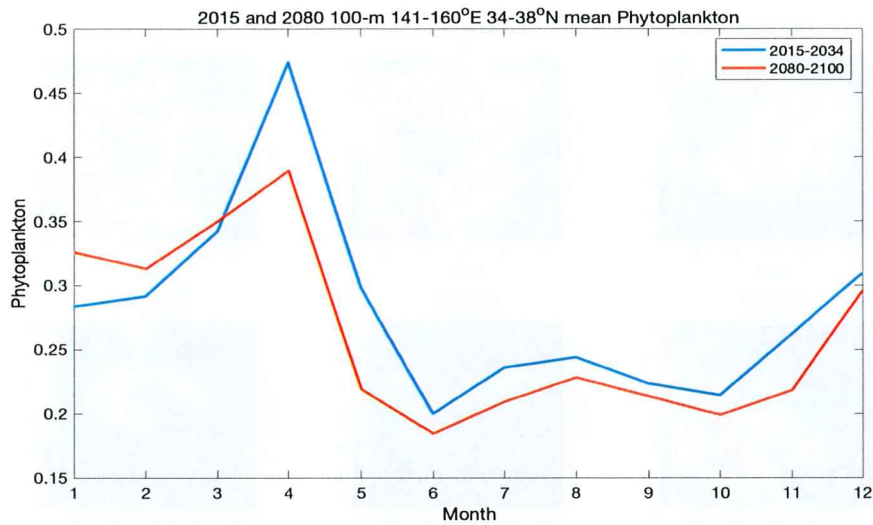


図 3. 両方ケースにおける植物プランクトン濃度通年平均 (mmol/m^3 赤 : 2080-2100、青 : 2015-2034)

CMIP6 の植物プランクトンを $141-160^\circ \text{E}$ 、 $34-38^\circ \text{N}$ で時間の関数として平均し、現代と未来のケースの時系列を比較したところ、未来では、植物プランクトンの春季ブルームが 10 日程度早期化していることがわかった。

3.2. ROMS による現代と未来の結果の比較

解像度 3 km の ROMS の結果は、2080-2100 年の黒潮-親潮混合域で、混合層の浅化と成層強化に伴い、渦運動エネルギー (EKE、図 4) や鉛直流、渦浮力フラックス、硝酸塩フラックスが年間を通して、主に冬季に減少していることがわかった。

表層 100m 平均渦運動エネルギーの月平均値は、現代ケースにおいては、3月と5月で値が $0.03 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 程度以上に大きくなっており、その後減っていくという季節的変動が見られる (図 4)。将来ケースも同様な変動が見られたが、将来ケースの方が渦運動エネルギーの値が全体的に減少していることがわかった。このような変動が観察される要因として、将来ケースで表層の成層が強化されていることが挙げられる。

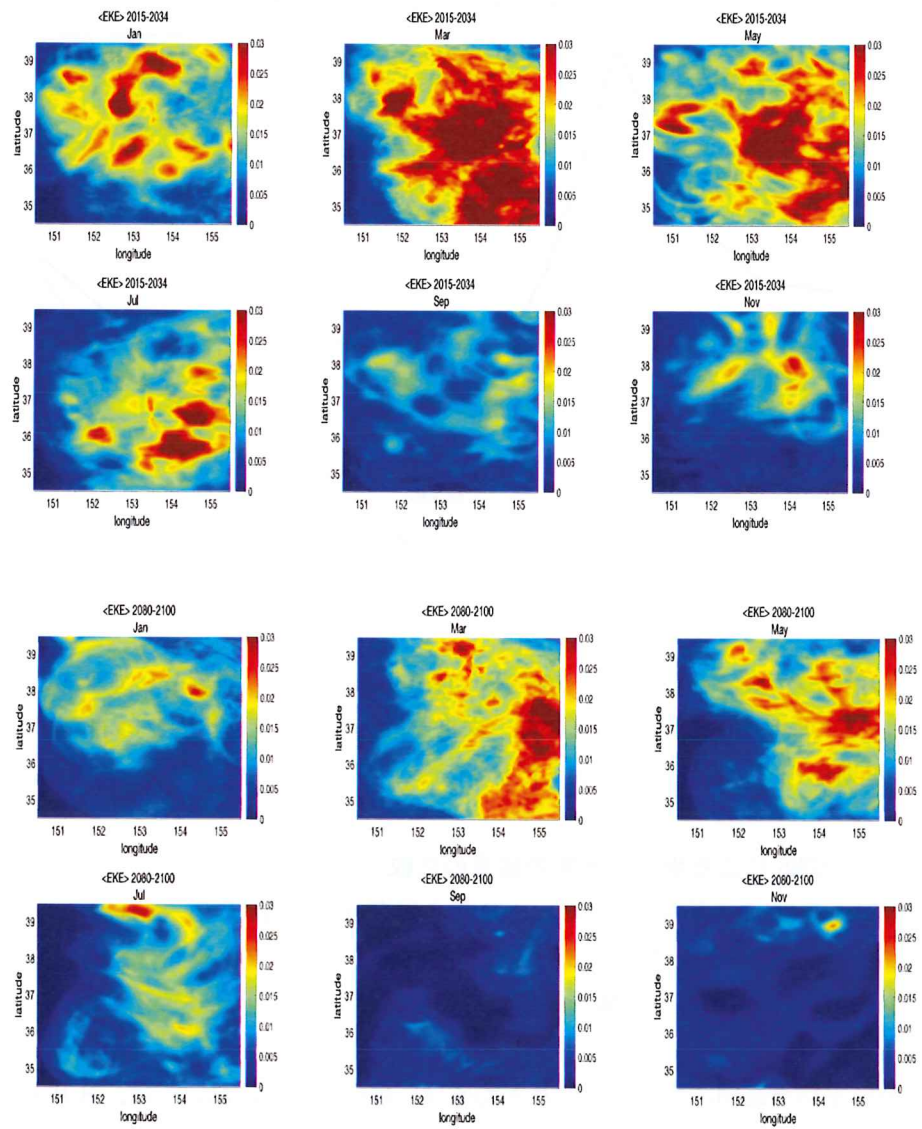


図 4. 渦運動エネルギー季節的空間月平均分布図 (J 上 2 段 : 2015 下 2 段 : 2080)

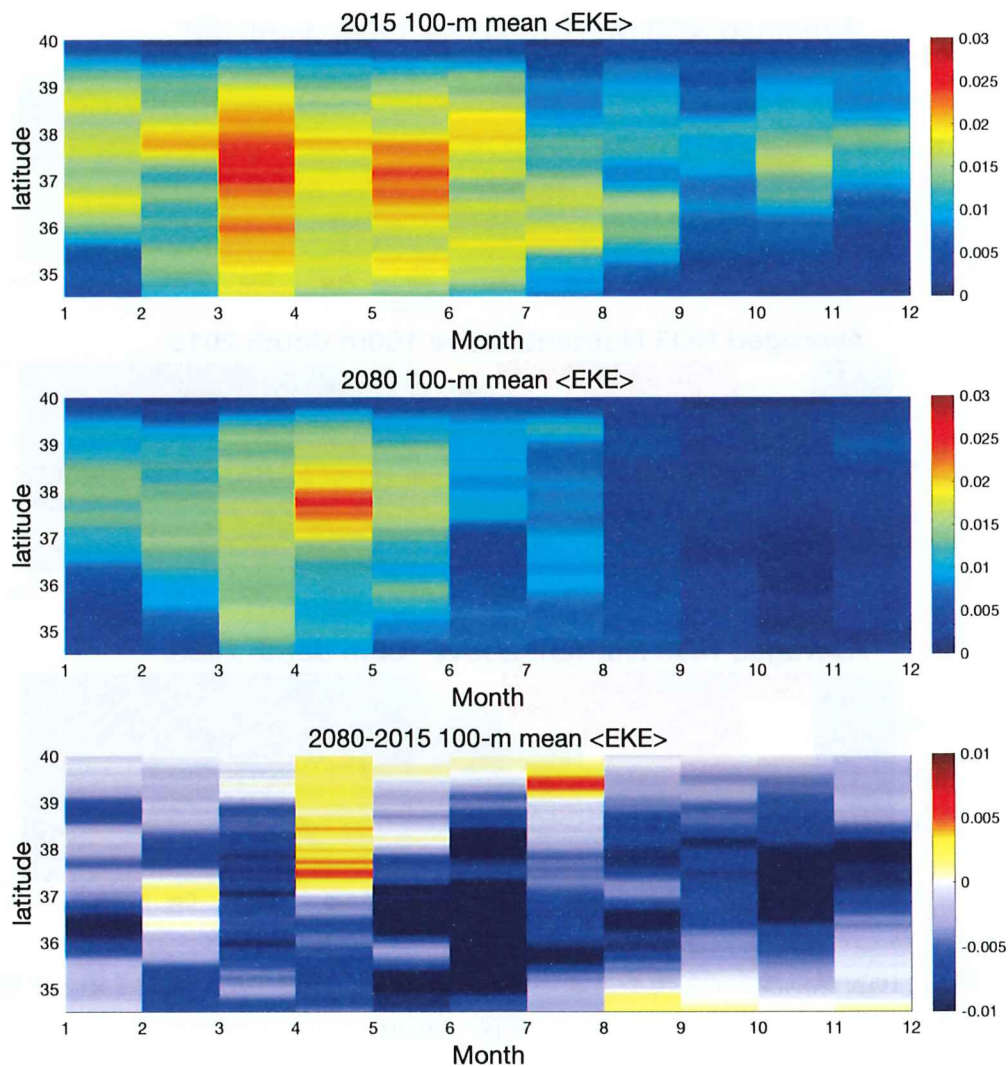


図5. 表層 100m 平均した渦運動エネルギーを緯度と月の関数 (Hovmoeller 図) として図示したもの。(上段：2015 中段：2080 下段：差 2080-2015)

表層 100m 平均した渦運動エネルギーの Hovmoeller 図から、現代と将来ケースともに 1 月から値が増加し、3 月から 5 月の間に最大値に達し、その後、値が減少していくといった鳥瞰図で見られたのと同様な季節変化が確認でき、これはサブメソスケール活動の季節性を示した Sasaki et al. (2014) による結果とも整合的である。将来ケースと現代との差を見ると、渦運動エネルギーが全体的に将来では減少していることがわかり、減少幅が大きいのは、5 月から 7 月の間であり、約 40% 減少していることがわかる。一方、4 月から 5 月にかけては、将来的に対象海域の北部で値が増加してい

ることがわかり、この変動が混合層の変動と渦浮力フラックスと同期していた。

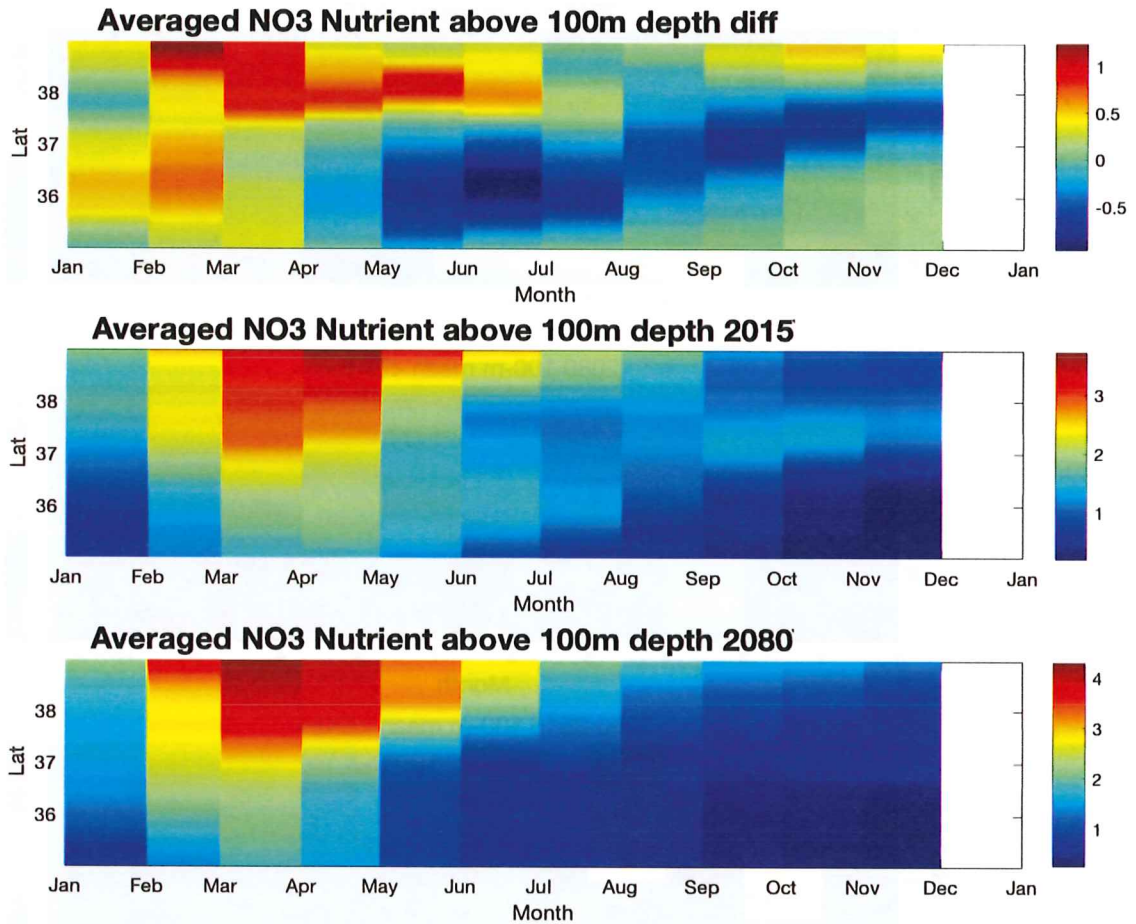


図 6. 100m 深以浅の硝酸塩濃度通年変化 (mmolN/m³ 緯度平均 上段：差 中段：2015 下段：2080)

表層 100m 平均した硝酸塩濃度の Hovmoeller 図は、現代と将来ケースともに 2 月から 6 月末までの間、対象海域の高緯度では値が相対的に高くなっており、それ以外では、値が比較的小さくなっていることがわかる(図 6)。これは、冬季の高緯度域で季節的な混合層の増加に伴ってより多くの硝酸塩が表層混合層に取り込まれ、それが春から夏にかけて植物プランクトンによって消費されるためである。将来ケースと現代ケースの差は、対象海域の北部で、将来ケースの方は硝酸塩濃度が高くなり、一方南部では低くなっていた。この北部での硝酸塩濃度の増加に関して、硝酸塩と海水の密度の平均南北断面図を作成した。

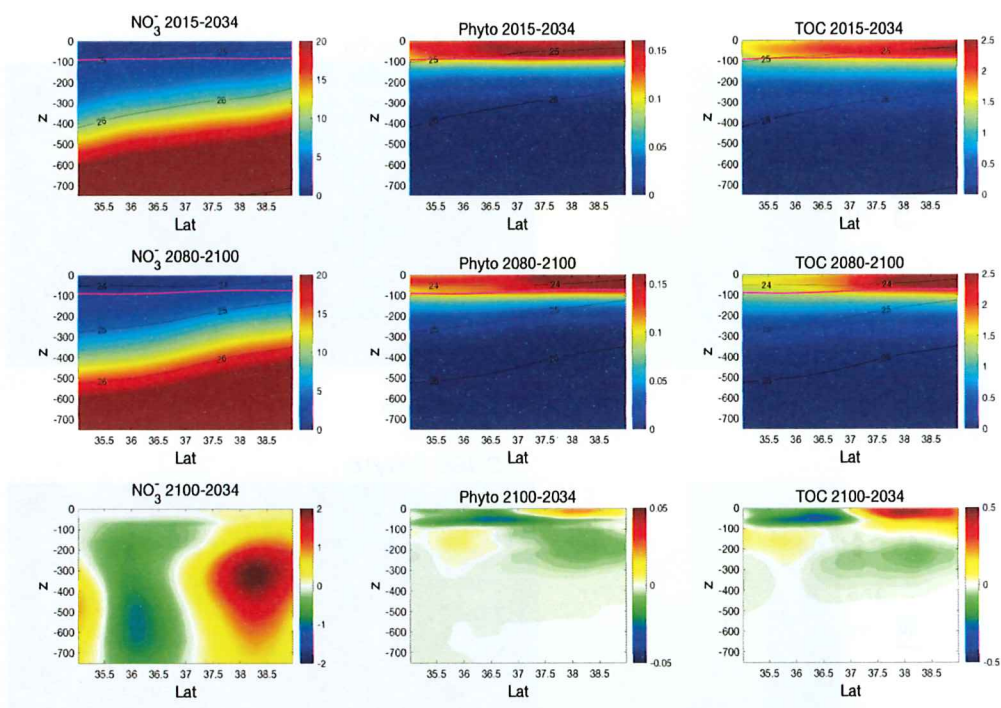


図7. 硝酸塩濃度、植物プランクトン濃度、全有機体炭素濃度鉛直分布図（横軸：緯度 縦軸：深度 左図： NO_3^- (mmolN/m^3) 中図：Phytoplankton(mmolN/m^3) 右図：TOC(mmolN/m^3)

経度方向および20年で平均した硝酸塩濃度の鉛直断面は、将来ケース現代ケースともに、硝酸塩濃度が深度の増加に伴い、値が高くなり、密度面と硝酸塩濃度の等値線はほぼ平行となる(図7)。両ケースの差をとると、将来ケースの方が、対象海域の南部で硝酸塩濃度が低くなり、北部で高くなっていることがわかる。これは、黒潮続流が将来ケースで強化される時に、密度面の傾斜が急になることを考えれば理にかなっているが、CMIP6では解像度が低いため、フロントの強化に伴う密度面の傾斜の変化を十分に表現できておらず、硝酸塩濃度の北部での増加は予測されていない。

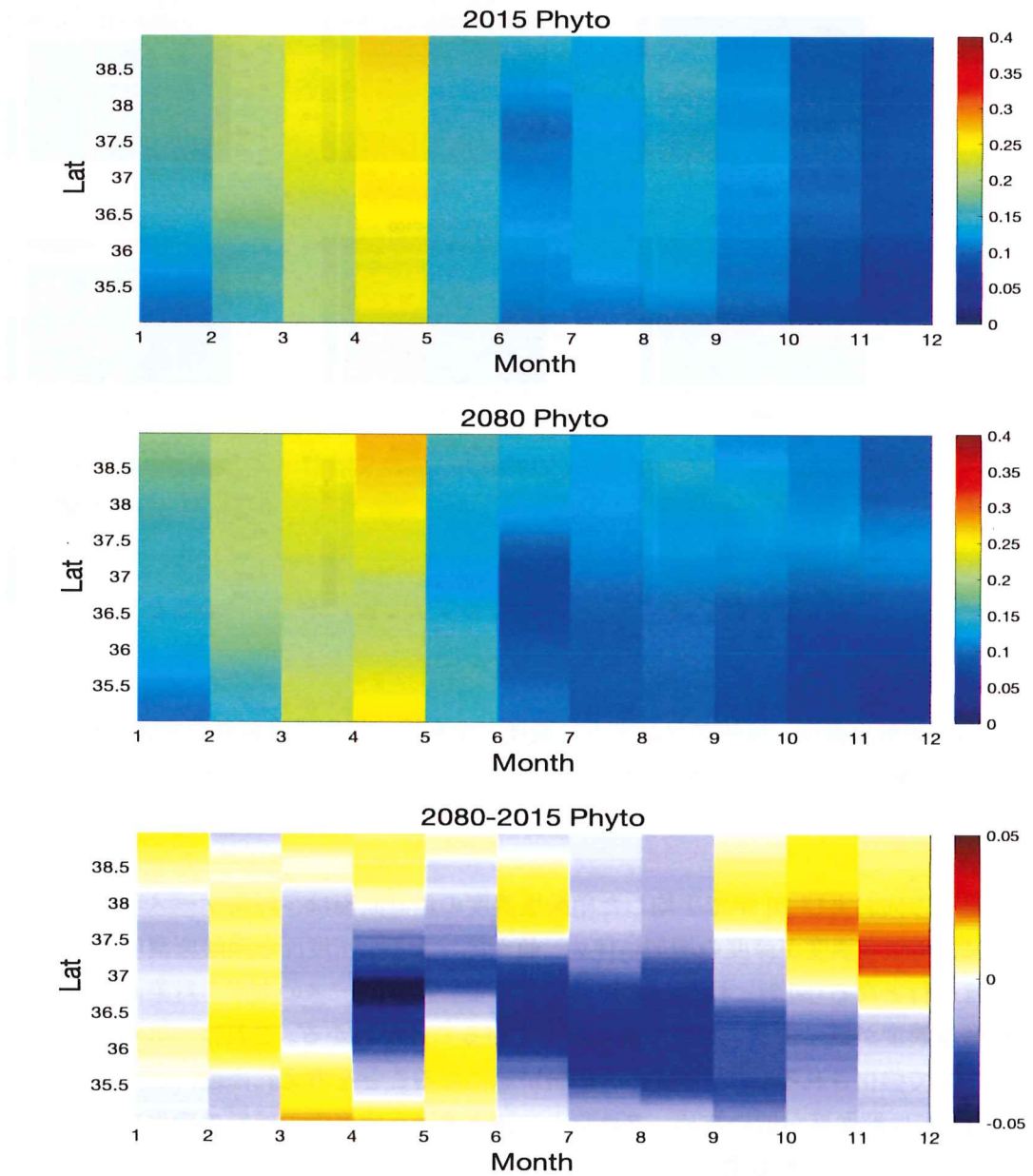


図 8. 100m 深以浅の植物プランクトン濃度通年変化 (mmolN/m^3 緯度平均 上段：2015
中段：2080 下段：差)

表層 100m 平均した植物プランクトン量の Hovmoeller 図は、現代と将来ケースともに

典型的な植物プランクトンの季節的な消長を表している(図8)。即ち成層化に伴う植物プランクトンのブルームが発生する2月から4月末までの値が相対的に大きく、それ以降は徐々に減少していることがわかる。将来ケースと現代ケースの差は、2月の始まりから値が一気に約25%増加している。これは、CMIP6の結果にも現れている将来ケースにおける春季ブルームの早期化がROMSでも見られることを意味する。それ以降は、植物プランクトン量が将来ケースの方が少ない状態が続いていることがわかる。

また、ROMSの植物プランクトンの沈降フラックスとデトリタス沈降フラックスは共に2080年代で弱化していることがわかった。

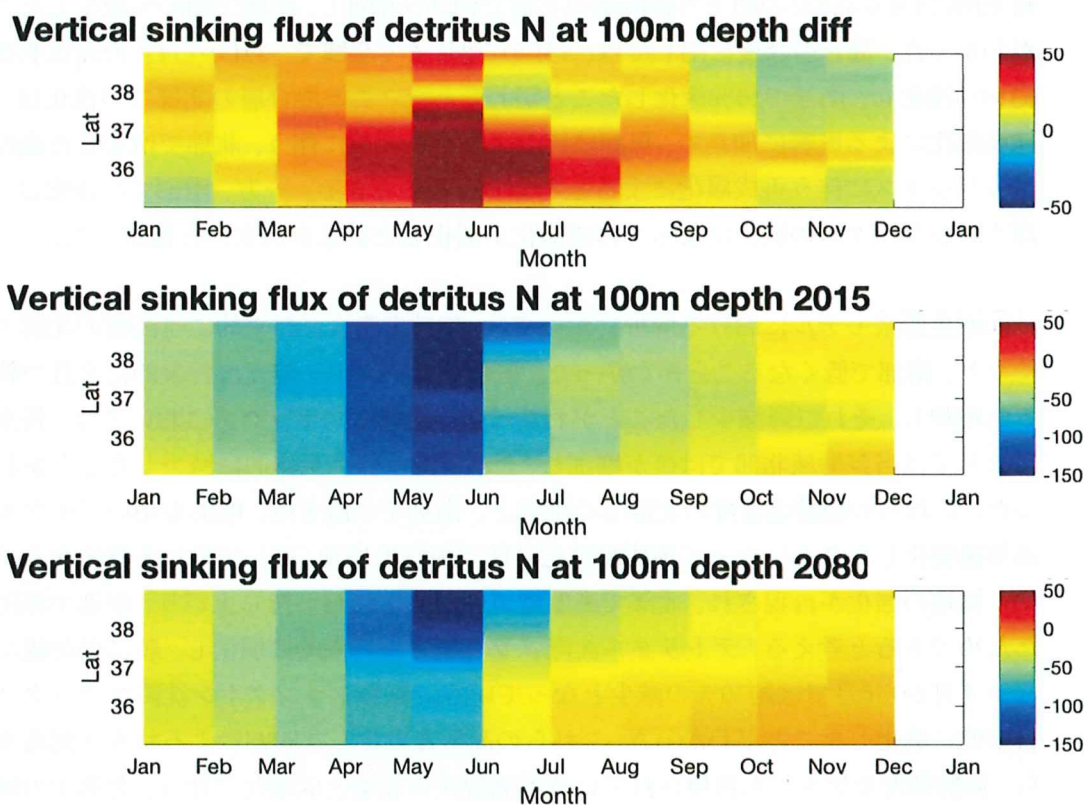


図9. 100m 深デトリタス沈降フラックス通年変化(緯度平均 横軸:月 縦軸:緯度 mmolN/m²day 上段:差 中段:2015 下段:2080、上段ずで赤は沈降の減少を表す)

100m 深におけるデトリタス鉛直沈降フラックスのHovmoeller 図は、現代と将来ケースともに類似した季節的な変化を示した(図9)。2月から6月末までは負の値が大きくなっており、活発な沈降が発生している。それ以降は、値が0に近づき徐々に沈降が減少していくことがわかる。両方ケースの差を見ると、全期間に渡り正の値をとり、すなわちデトリタス沈降フラックスが弱化していることがわかる。特に弱化幅が大きいのは4

月から6月で、約30%になっている。

4. まとめ

ROMS物理モデルにおける解析から、海面高度平均値からの差の通年変化と水平流速鉛直分布図から、黒潮のpoleward shiftが示唆された。渦運動エネルギーは将来ケースにおける値が全体的に減少し、減少幅が大きいのは5月から7月の間であり、約40%である。一方、4月において、当該海域の北部で値がやや増加したことがわかった。鉛直分散は将来ケースにおける値が全体的に減少したことがわかった。渦浮力フラックスの値は将来的に1月から6月の間で当該海域の北部で約25%増加し、南部で約30%減少したことがわかった。混合層深度に関しては、1月から2月まで全域で、3月から4月の間は北部で約10%浅化し、南部で10%深化したことがわかった。この混合層の北部での浅化は、地球温暖化による影響に加えて、黒潮続流フロントの北偏に伴う、北部で増加した渦浮力フラックスに伴う再成層化によると考えることができる。一方、南部での深化は、渦浮力フラックスの減少によって再成層化が弱化した効果が大きいと推察した。

ROMS生態系モデルにおける解析においては、硝酸塩濃度が将来的に当該海域の北部で高くなり、南部で低くなることがわかった。植物プランクトン濃度は将来的に2月で約25%増加し、それ以降減少したことがわかった。硝酸塩フラックスにおいては、将来的に2月では当該海域北部では値が増加し、それ以降は値が全体的に減少したことがわかった。これらの硝酸塩濃度の北部での増加と、南部での減少は、ROMSを用いてモデルを高解像度化したことによって地球温暖化に伴う海流の増加、そしてそれを維持するフロント構造の強化が再現され、北部で密度躍層や硝酸塩躍層が持ち上がり、南部で深化したためであると考えられる。デトリタス沈降フラックスは将来的に弱体化し、特に弱体化幅が大きい4月から6月では約30%の減少となっている。植物プランクトン沈降フラックスも将来的に弱体化したことがわかった。これらの高解像度化したROMSによる将来予測結果から、低解像度モデルでも再現されている黒潮続流の北偏と成層化に伴う、北部での植物プランクトンの増加と、南部での減少が同様に確認できた。一方で、CMIP6では再現されない黒潮北偏に伴うフロント躍層傾斜の増加がROMSでは予測されており、これに伴った北部での栄養塩躍層の持ち上がり、供給の増加、南部での躍層の深下と供給の減少が、現実では、CMIP6の予測より顕著になることが、本研究結果から示唆された。

5. 謝辞

本研究を支援くださった、公益信託 エスペック地球環境研究・技術基金に感謝いたします。本報告書は、2022年度に東京海洋大学大学院博士前期過程を修了したジンビチ

ヨン君が本基金で購入した計算機や周辺機器を用いて修士論文研究を私の指導のもと実施し、その結果から抜粋して作成しました。ジンビチヨン君に感謝します。

6. 参考文献

Gent P.R., Willebrand J., McDougall T.J., McWilliams J.C., Parameterizing eddy-induced tracer transports in ocean circulation models, *J. Phys. Oceanogr.*, 25 (1995), pp. 463-474, 10.1175/1520-0485(1995)025<0463:PEITTI>2.0.CO;2

Redi M.H., Oceanic isopycnal mixing by coordinate rotation, *J. Phys. Oceanogr.*, 12 (1982), pp. 1154-1158, 10.1175/1520-0485(1982)012<1154:OIMBCR>2.0.CO;2

Pacanowski, R. C., & Philander, S. G. H. (1981). Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans. *Journal of Physical Oceanography*, 11(11), 1443-1451. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1981\)011<1443:Povmin>2.0.Co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1981)011<1443:Povmin>2.0.Co;2)

Mauritsen, T., Bader, J., Becker, T., Behrens, J., Bittner, M., Brokopf, R., et al. (2019). Developments in the MPI-M Earth System Model version 1.2 (MPI-ESM1.2) and its response to increasing CO₂. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11, 998-1038. <https://doi.org/10.1029/2018MS001400>

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.

Fasham, M. J. R., Ducklow, H. W. and McKelvie, S. M. (1990), A nitrogen-based model of plankton dynamics in the oceanic mixed layer. *Journal of Marine Research*, 48, 591-639.

Gruber, N., H. Frenzel, S. C. Doney, P. Marchesiello, J. C. McWilliams, J. R. Moisan, J. J. Oram, G. H. Plattner, and K. D. Stolzenbach (2006), Eddy-resolving simulation of plankton ecosystem dynamics in the California Current System, *Deep Sea Res., Part I*, 53, 1483-1516.

Sasaki, H., Klein, P., Qiu, B. *et al.* Impact of oceanic-scale interactions on

the seasonal modulation of ocean dynamics by the atmosphere. *Nat Commun* **5**, 5636 (2014). <https://doi.org/10.1038/ncomms6636>