

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

地球温暖化が黒潮親潮混合域におけるサブメソスケール流動に及ぼす影響

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2023-07-11 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: Jin, Bichong メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/2859

修士学位論文

地球温暖化が黒潮親潮混合域におけるサブメソスケール流動に及ぼす影響

2022年度
(2023年3月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
海洋資源環境学専攻

ジン ビチョン

目次

要旨

1. 序論P1
2. データ及び方法P2
3. CMIP6 における MLD と Phytoplankton についての解析結果P4
4. ROMS 物理モデルにおけるシミュレーション結果P9
5. ROMS 生態系モデルにおけるシミュレーション結果P18
6. 鉛直分布に関する解析結果P24
7. 考察P28
8. 結論P29
9. 参考文献P29

[博士前期課程]

修士論文内容要旨

専攻 海洋資源環境学専攻
氏名 ジン ビチョン

論文題目：地球温暖化が黒潮親潮混合域におけるサブメソスケール流動に及ぼす影響

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、好漁場でありながら、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。

方法

本研究では、当該海域を研究対象とし、現在ケース（2015-2034）と将来ケース（2080-2100）を設け、第6期結合モデル相互比較プロジェクト（CMIP6）におけるMax Planck Institute Earth System Model(MPI-ESM-1-2) High-Resolution(HR 50km) ocean atmosphere 40 vertical levels 2015-2100の結果を用いて、20年気候値データを作成し、それを境界条件とする地域海洋モデル（ROMS）によるシミュレーションを実施した。ROMSの計算格子は、東経150-156度、北緯34-41度を3kmで解像するもので、これにNPZDモデルを結合させて気候値の数値実験を14年間実施し、最後の5年の結果を用い、双方のケースにおける渦運動エネルギー(EKE)・混合層深度・鉛直浮力フラックス、栄養塩フラックスの空間・鉛直分布・鉛直流の解析を行った。

結果と考察

まず、対象とした海域で作成した現代と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、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。ROMSの結果は、2080-2100年の黒潮-親潮混合域では、混合層の浅化に伴い、EKEや鉛直流、渦浮力フラックス、硝酸塩フラックスが冬季に減少していることがわかった。ROMSモデルの海面高度の平均からのズレと月の関数として5年を平均したレイノルズ解析の結果を見ると、黒潮の南側ではとくに減少していることがわかった。当該海域でのサブメソスケール活動が抑制され、硝酸塩が減少していることが原因だと考えられる。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年代で弱化的であることがわかった。

1. 序論

黒潮が房総半島東方で東へ流去すると、その流れは黒潮続流へと続く。黒潮はその表層を貧栄養として知られるが、光の届かない亜表層では大量の栄養塩を運ぶ栄養塩ストリームである。この黒潮栄養塩ストリームの栄養塩が光の届く表層混合層に供給されるのは、下流域である黒潮続流や、黒潮-親潮混合域である。本海域は、黒潮と親潮が合流し、低温低塩分の親潮と高温高塩分の黒潮水が水平的に攪拌する海域である。豊富な栄養塩を含んでいることから、好漁場でありながら、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。一方で、地球温暖化予測モデルは、2080年頃までに好漁場として知られる黒潮-親潮混合水域の海洋表層混合層が、10m程度浅くなることを予測している。この混合層の浅化は、より深層に多く分布している栄養塩を表層へ攪拌しにくくする効果があるため、海域の光合成を減少させると考えることができる。またこの黒潮-親潮混合水域では、攪拌だけでなく、黒潮が亜表層で運ぶ栄養塩が水平流に乗って混合層へ直接供給されるインダクションが発生しており、そのインダクションに混合層の浅化がどのような影響を及ぼすかは不明である。さらに、混合層が厚くなる秋から冬には、水平0.1-10kmで発生するサブメソスケールのフロント・渦・鉛直流が強化されることが知られている(Sasaki et al. 2016)。温暖化で表層の成層が強化されると、このサブメソスケールの鉛直流が弱まることが近年の数値実験から指摘されており(Richards et al. 2021)、栄養塩供給が減少することが危惧される。しかし一方で、植物プランクトンの春季ブルームの発生は、表層に漂う植物プランクトンが春に浅くなった混合層内にとどまり、安定した光を得て光合成が行えることで発生する。温暖化で栄養塩の供給が減少することが懸念される一方で、混合層の浅化は、春季ブルームの時期を各緯度帯で早める効果があるのではないかと推測される。しかしながら、従来の気候モデルの解像度は50km程度と粗いため、このサブメソスケールの流動を表現することができておらず、サブメソスケールの流動に伴う表層混合層の再成層化や(Fox-Kemper and Ferrari 2008)、それに伴う植物プランクトンの増殖の効果(Mahadevan et al. 2012)の抑制についての定量化は行われていない。そこで本研究では、この温暖化に伴う混合層の浅化が、どのように黒潮-親潮混合水域のサブメソスケール流動や光合成に影響を及ぼすかを、高解像度数値実験を温暖化予測モデルの結果を海面と水平境界の境界条件として用いて実施し、明らかにすることを目的とする。

2. データ及び方法

本研究で用いたモデルの結果は以下の Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) datasets における ScenarioMIP.DKRZ.MPI-ESM1-2-HR.ssp585 の海洋、生態系モデルの計算結果を使用している。この計算は以下のモデルを用いて実施された。

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、鉛直方向では静水圧ブジネス近似 (hydrostatic and Boussinesq approximations) 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) が含まれている。鉛直混合においては、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乱流混合との組み合わせによってパラメタ化している (Thorsten Mauritsen et al. 2019)。HAMOCC6 の特徴としては、窒素固定型藍藻を新たに別のコンパートメントとして取り扱っており (Paulsen et al. 2017)、気候変動下における窒素固定過程と海洋の生物地球化学過程に及ぼす影響を全球で予測する試みが行われている (Thorsten Mauritsen et al. 2019)。

これら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) 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、塩分が含まれる。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 らの先行研究による低次生産 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。

以下に、生態系モデルの詳細を示す。

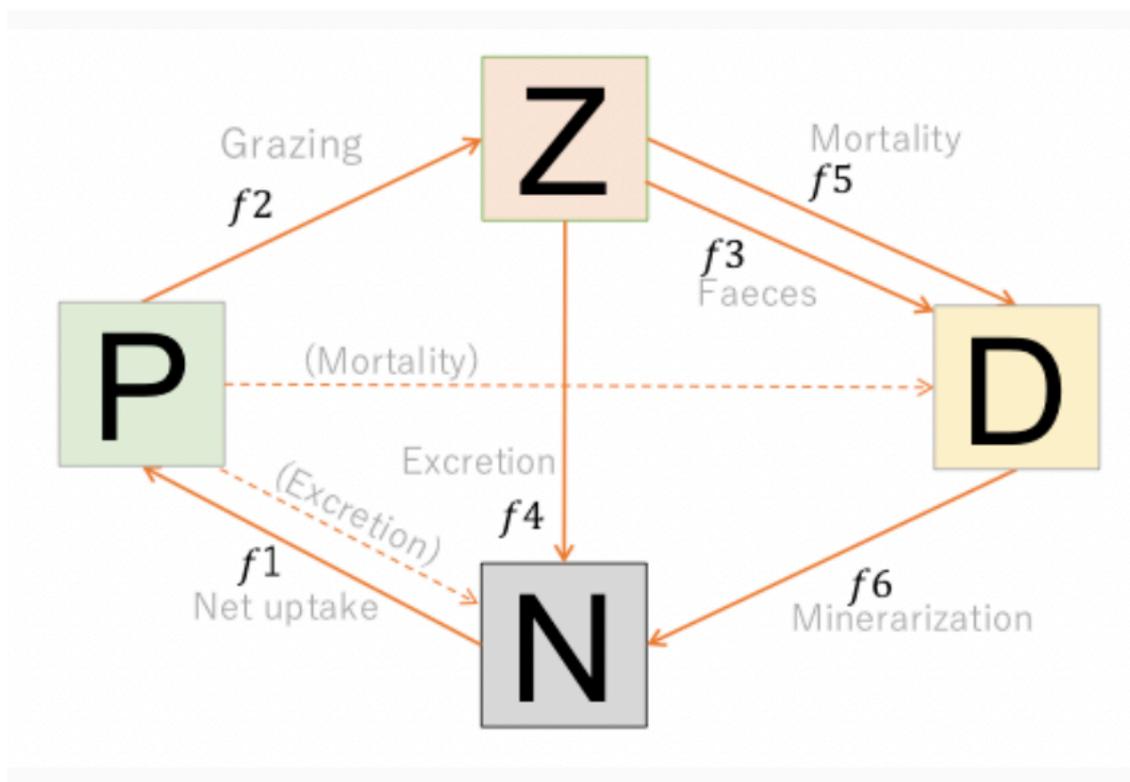


図 1. NPZD 生態系モデル模式図 (<https://m-kiyota.jimdofree.com>)

現代と将来の両期間の計算においては、モデル第 1 年目から 5 年目までは物理モデルだけを計算し、生態系モデルの計算は第 5 年目から開始した。その後さらに 5 年間計算を続け、第 10 年目から第 14 年目までの計算結果を本研究の解析に用いた。本研究は、CMIP6 の結果を黒潮-親潮混合水域について解析しつつ、ROMS によって得られた結果を主に解析に使用している。

主な解析項目は、MLD（混合層深度）、 NO_3^- （硝酸塩濃度）、植物プランクトン濃度、Total Organic Carbon (TOC：全有機体炭素) 濃度、EKE（渦運動エネルギー）、Sinking Flux（沈降フラックス）、 $w' b'$ （渦浮力フラックス）、 $w' \text{NO}_3'$ （渦硝酸塩フラックス）

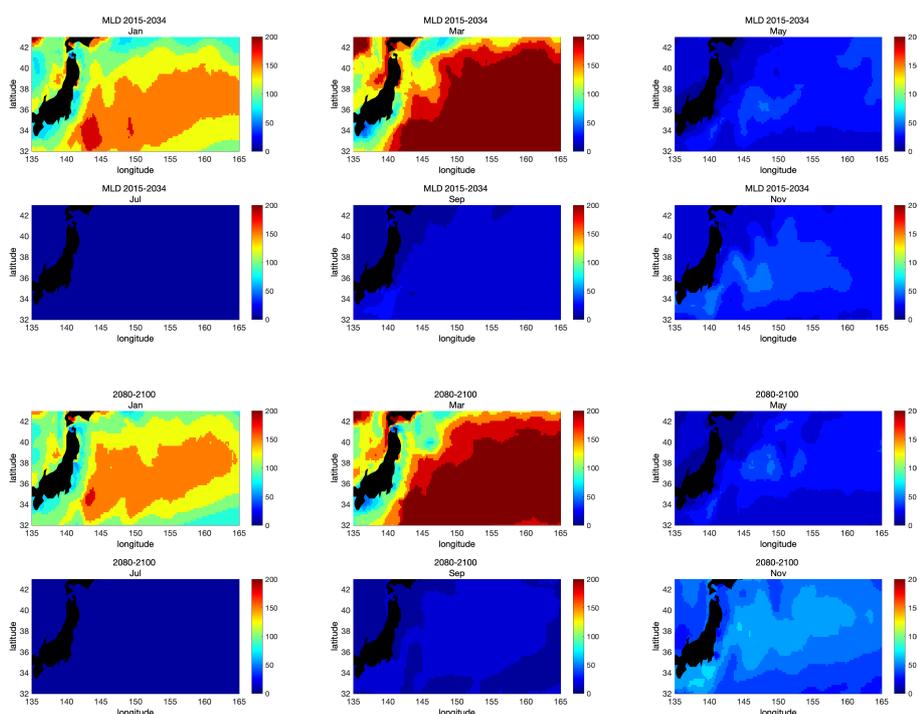
ス)、 w^2' (渦鉛直分散) である。変動成分は Reynolds decomposition (レイノルズ分解) により、データから各解析項目の月平均値を差し引いて求めた (式 1.)。

$$u(x, y, z, t) = \overline{u(x, y, z)} + u'(x, y, z, t) \quad (1)$$

ここで、横棒が引かれた右辺第一項は月平均流速を表し、左辺の瞬間値が含まれる 1 ヶ月の平均である。右辺第二項の、変動成分は 1 ヶ月よりも短い時間スケールで発生するサブメソスケールの流動を多く含むことが期待できる。これを流速だけでなく、硝酸塩や浮力について同様に行い、変動成分を算出した。TOC 濃度は植物プランクトン、動物プランクトン、デトリタス濃度三者の合計を計算し、炭素と窒素のレッドフィールド比(106:16)を用いて炭素に変換した。

また、鉛直的なフラックス等 (沈降フラックス、渦浮力鉛直フラックス: $w' b'$ 、渦硝酸塩鉛直フラックス: $w' NO_3'$ 、鉛直分散: w^2') を鳥瞰図で図示する際には、深度 100 m での値を線型補間により内挿した。渦運動エネルギー、硝酸塩濃度、植物プランクトン濃度、TOC 濃度についての鳥瞰図は、0 から 100 m までのデータを平均している。これらを適宜、経度と月毎に平均し、時間 (月) と緯度の関数 (Hovmoeller) 図として図示した。また、解析は、境界条件の影響を強く受ける境界から 1 経緯度以内を用いず実施した。

3. CMIP6 のデータにおける混合層と植物プランクトンについての解析結果



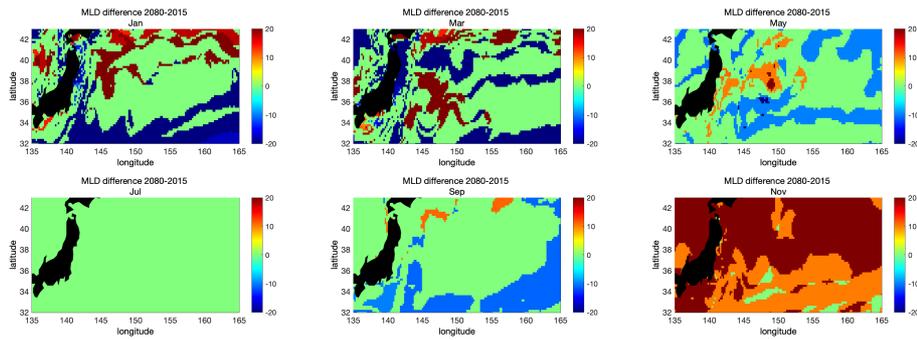
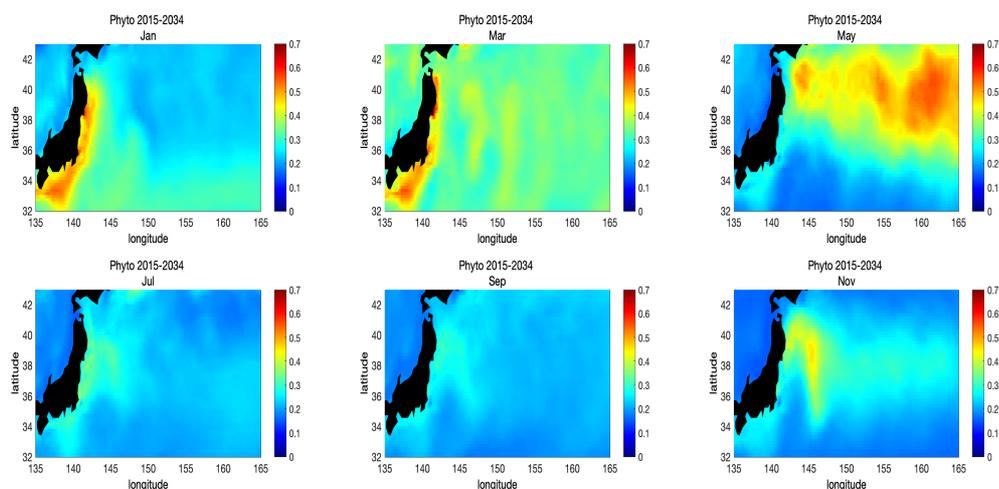


図2. CMIP6の結果から算出した20年月平均混合層の1, 3, 5, 7, 9, 11月における鳥瞰図。上2段は2015-2034年、中2段は2080-2100年、下2段は後者から前者を差し引いた差を示す。

現代ケースと将来ケース両者ともに、秋から冬にかけて混合層が増加し、あるから夏にかけて浅化することを示す。また、亜熱帯循環中央部では縁辺部より比較的混合層が深く、亜寒帯域では浅くなる空間的な混合層分布は変化していない。しかしながら、両ケースの差に関してROMSを用いた高解像度モデル実施海域（北緯34-40度、東経150-156度）についてみれば、11月を除く冬季には概ね混合層が浅くなる傾向があるものの、1月と5月には北緯38-40度付近で深くなっている部分が一部見られる。一方で3月には同じ緯度帯で混合層の浅化が見られる。ROMSの計算格子外を含めた広範囲で見るとおおよそ亜熱帯海域で浅化が顕著である。しかしながら、前述の通りCMIP6の水平解像度は0.5度であり、混合層の浅化に重要な混合層渦に伴うサブメソスケール流動の影響を表せていない。



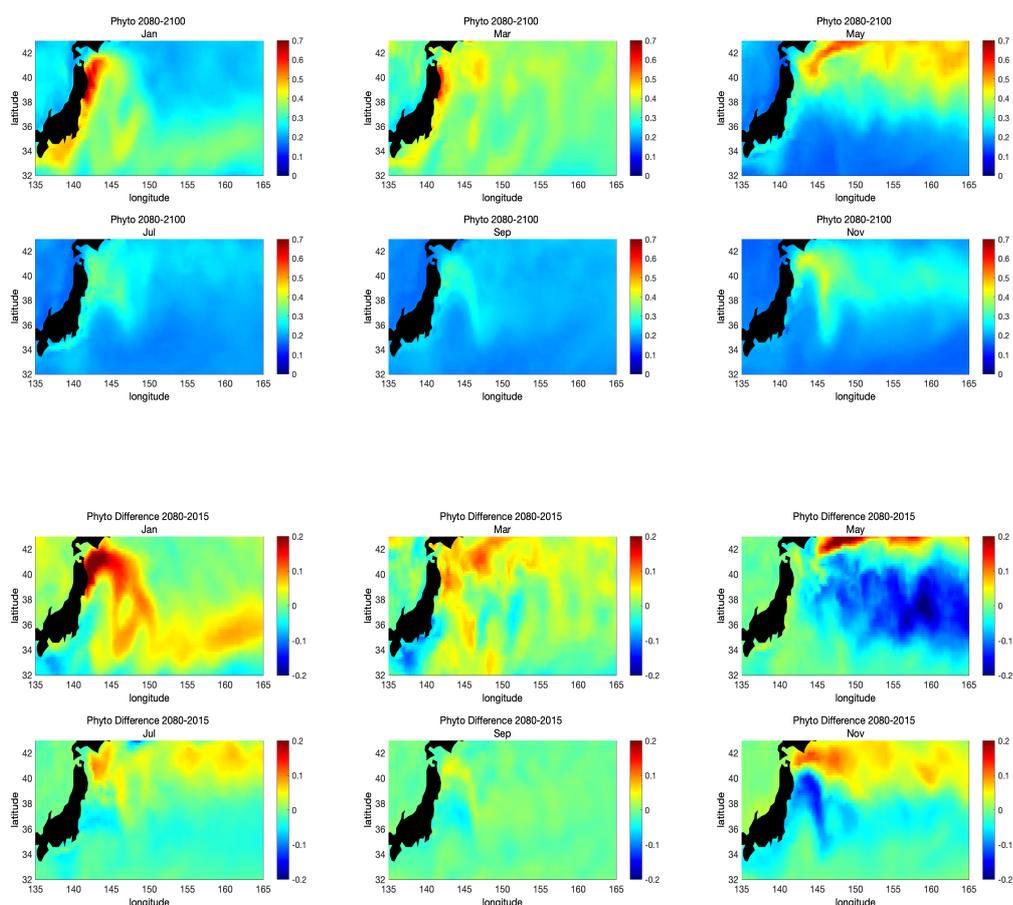


図3. CMIP6の結果から算出した20年月平均植物プランクトン量 (mmol N/m^3) 表層100m平均値の1, 3, 5, 7, 9, 11月における鳥瞰図。上2段は2015-2034年、中2段は2080-2100年、下2段は後者から前者を差し引いた差を示す。

図3を見ると、現代と将来両ケースともに、1月から5月にかけて当該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月にかけて当該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。

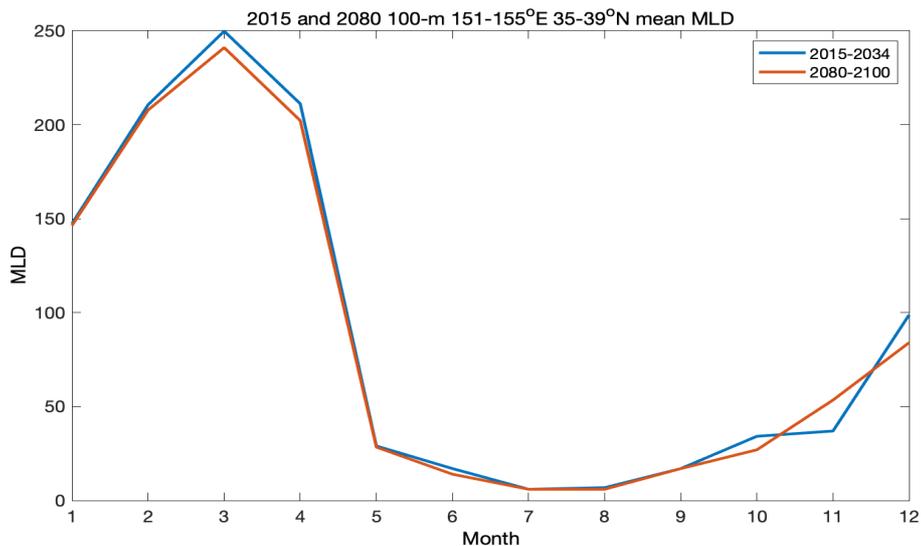


図4. 両方ケースにおける混合層通年平均 (m 赤：2080-2100、青：2015-2034)

CMIP6 の混合層深を東経 151-155 度、北緯 35-39 度で月毎に平均して時系列で、現代と将来ケースを比較すると、2月から4月中旬にかけて、混合層が約 10m 程度浅化したことがわかる。4月中旬以降、両方とも混合層深度が急激に浅くなり、大きな差が見られなかった。一方、10-12月の秋から初冬にかけては、月ごとに差がばらついており、一貫した傾向が見られなかった。

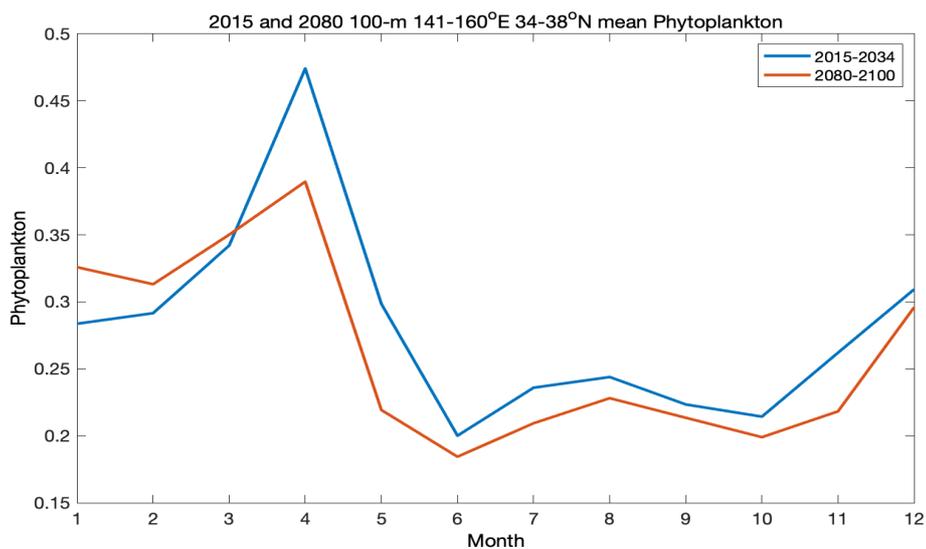


図5. 両方ケースにおける植物プランクトン濃度通年平均 (mmol/m³ 赤：2080-2100、青：2015-2034)

混合層と同様に、表層 100m 平均植物プランクトン量を月毎に平均して時系列で、現代と将来ケースを比較すると、1月から3月までは、2080-2100 ケースが 2015-2034 ケースを上回っており、この時期に将来ケースではブルームが始まり、季節的なブルームの早期化が発生していることがわかる。両ケース共に4月で最大値に達し、その後表層の栄養塩が枯渇して夏季には急激に減少していくことがわかる。しかしながら4月以降は常に赤線が青線を下回り、すなわち 2080-2100 年における植物プランクトン量は 2015-2034 年より全体的に 20% 程度減少していることがわかる。

4. ROMS 物理モデルにおけるシミュレーション結果

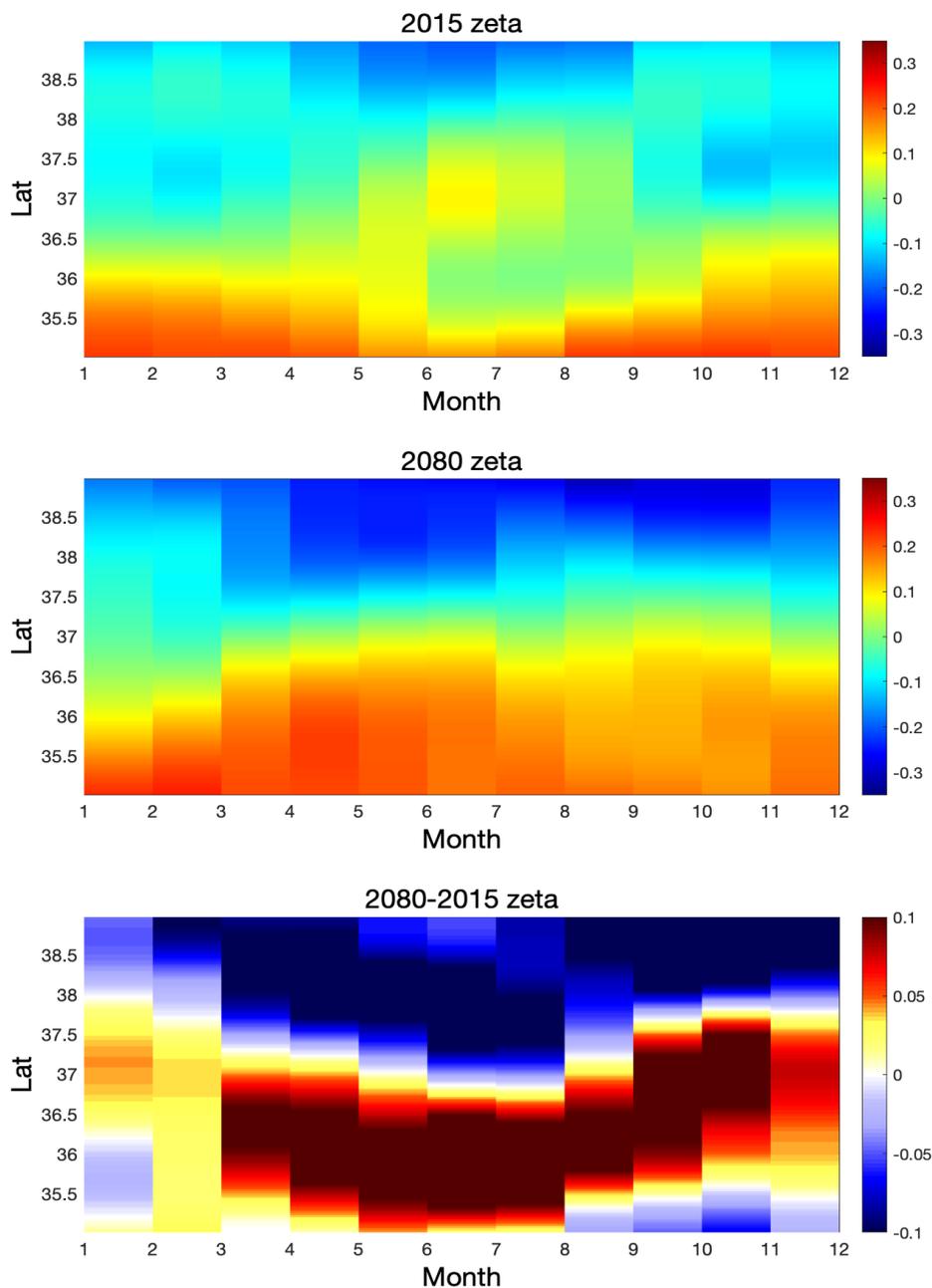


図6. 海面高度平均値からの差の通年変化 (m 緯度平均 上図：2015 中図：2080 下図：差)

図6は黒潮の流れの位置を示す図になっている。カラーバーが0の時の部分が黒潮の流れとして捉えられる。これを見ていくと、対象海域の黒潮の流れが北へ移動していることが鮮明にわかる。これまでの先行研究による黒潮の poleward shift 現象と合致している。また、両方ケースの差を見ると、将来ケースの海面勾配がより大きくなっていることがわか

る。のちほどの図 1 1 で示す渦運動エネルギーの変動では同じく、北部で値が大きくなっており、渦の運動が活発になっていることが示唆され、合致していると考え。後程で示す EKE との変動に合致であると考え。

これまでの先行研究においては、地球温暖化の影響により亜熱帯に位置する西岸境界流が poleward shift をする現象が明らかになっている (Yang et al. 2016)。黒潮は北半球、北太平洋に位置し、北極に向けて、将来的に移動していく。本研究で前述の図 6 では、海面高度の変動の様子を論述したが、観察すると黒潮が北へ偏移したことが示唆された。このため、対象海域の水平流速を解析し、さらなる検証をした (図 7)。

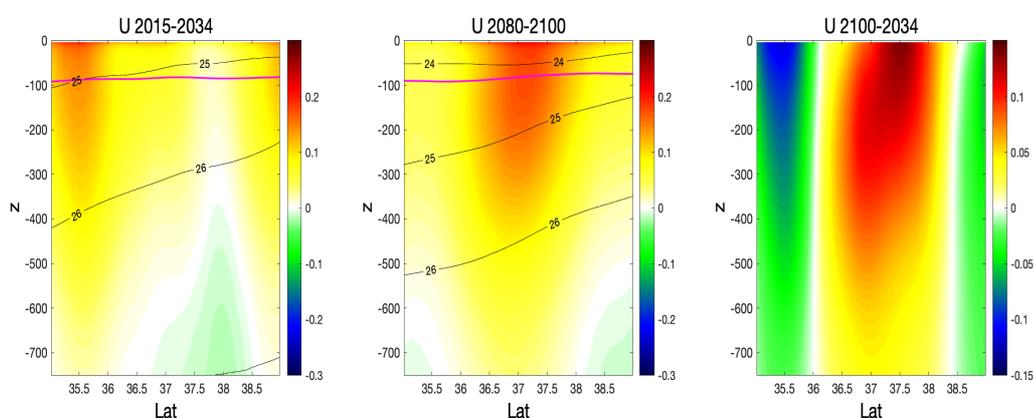


図 7. 水平流速 (m/s 横軸：緯度 縦軸：深度 左図：現在ケース 中図：将来ケース 右図：両方ケースの差 ピンク色実線：混合層深 黒色実線：等密度線)

図7を観察していくと、現在ケースでは、黒潮の続流と亜寒帯フロントのような二つの流れが見られた (左図)。一方、将来ケースでは、黒潮続流の流れだけが確認されたことがわかる。この解析結果も黒潮のpoleward shiftのさらなる証拠として捉えることができると考える。

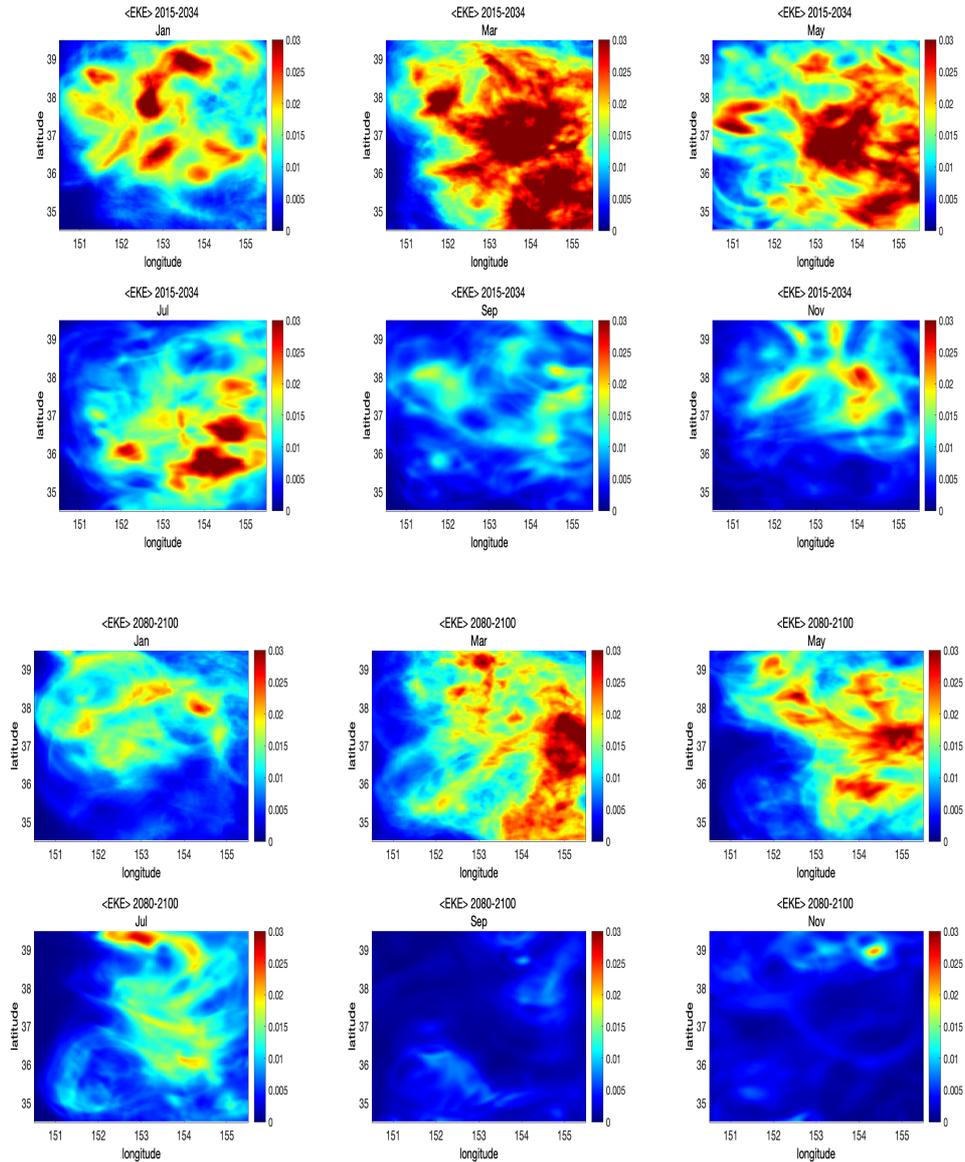


図 8. 渦運動エネルギー季節的空間月平均分布図 (J 上 2 段 : 2015 下 2 段 : 2080)

次に、CMIP6 の計算結果を境界条件として実施した ROMS による数値実験結果を示す。まず、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。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、後程示す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。

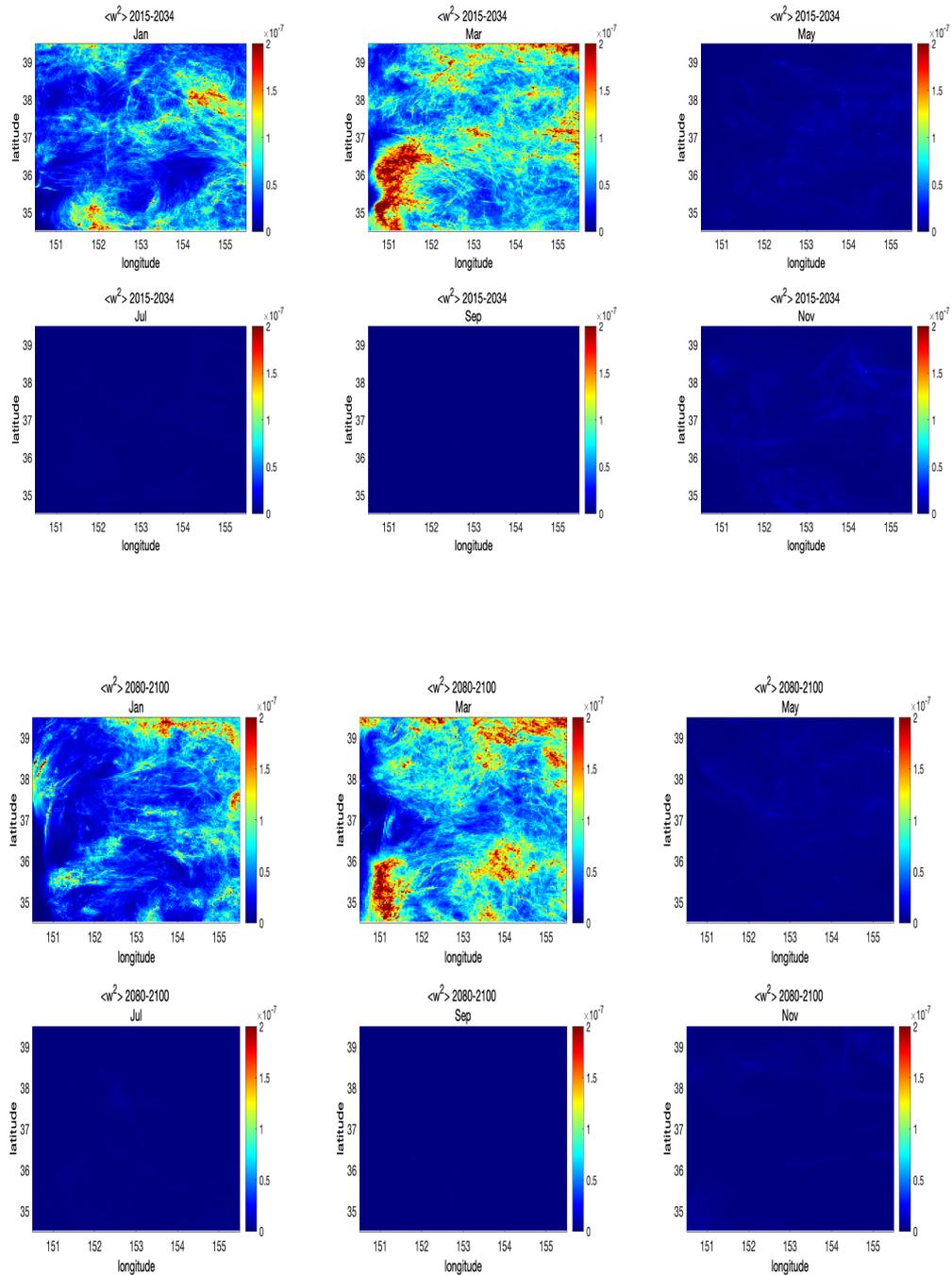


図9. 鉛直流分散季節的空間月平均分布図 (m/s^2 上2段: 2015 下2段: 2080)

同様に、100m 深におけるの鉛直流の分散月平均値は、現代ケースの1月と3月で値が比較的になっており、その後急激的に減っていくという季節的変動が見られる。将来ケースも同様な季節変化が見られたが、平均値を算出すると将来ケースの鉛直流分散値が減少していることがわかった。

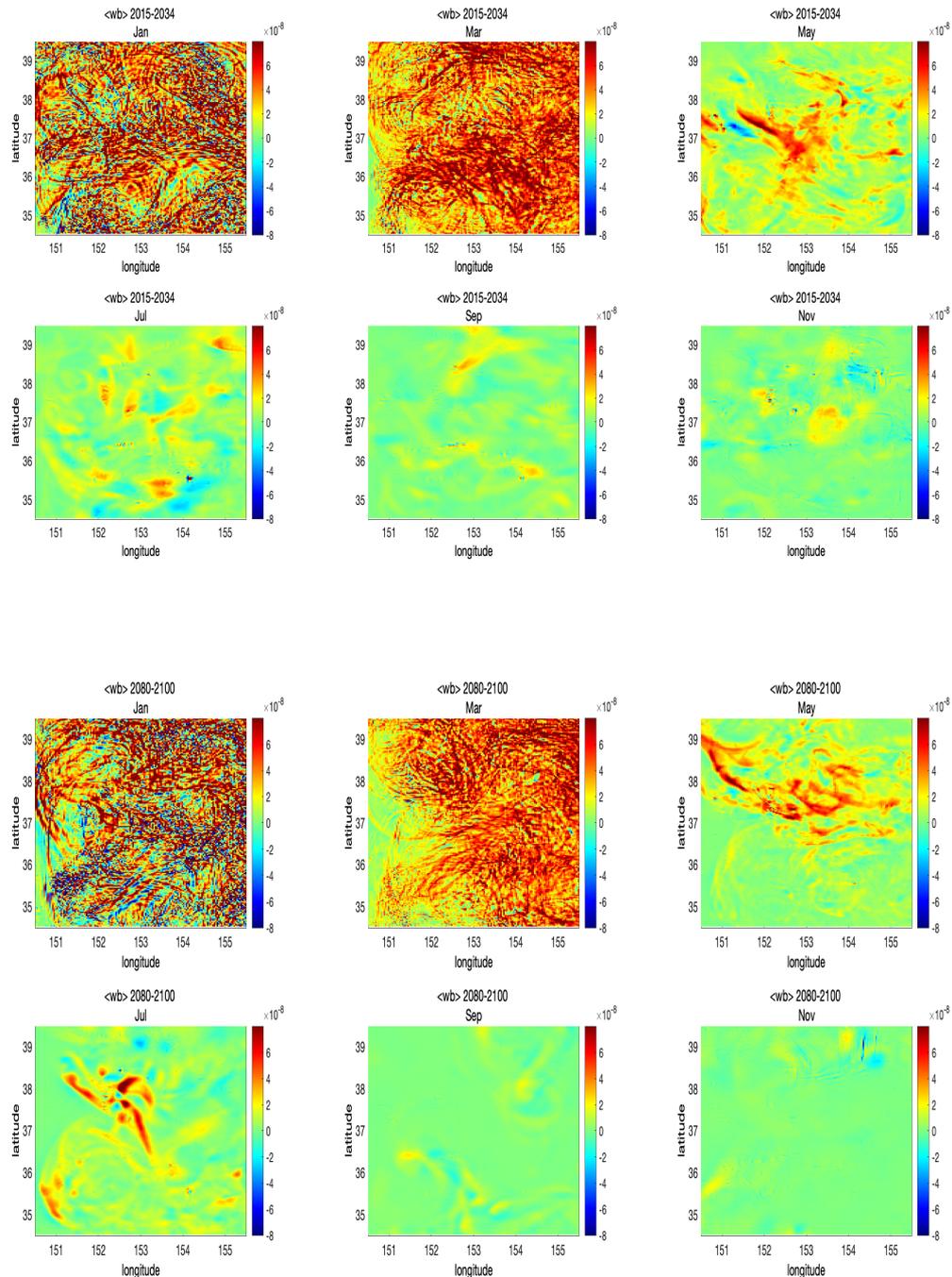


図 10. 渦浮力フラックス季節的空間月平均分布図 (m^2/s^3 上 2 段 : 2015 下 2 段 : 2080)

図 10 に示す水深 100m における渦浮力フラックスの月平均値も、図 9 と同様に、両ケースについて、1-3 月の冬期において値が増加する、鮮明な季節的变化が見られる。1 月には両者とも、正と負の値が見られ、冷却に伴う成層の破壊と再生層化の両方が同時発生していることを示唆するが、3-5 月には再生層化を表す正の値を示す。両者を比較すると、3 月において、対象海域の低緯度で値が減少していることがわかる。この変動は後程示す時間変化図ではより鮮明に観察できる。

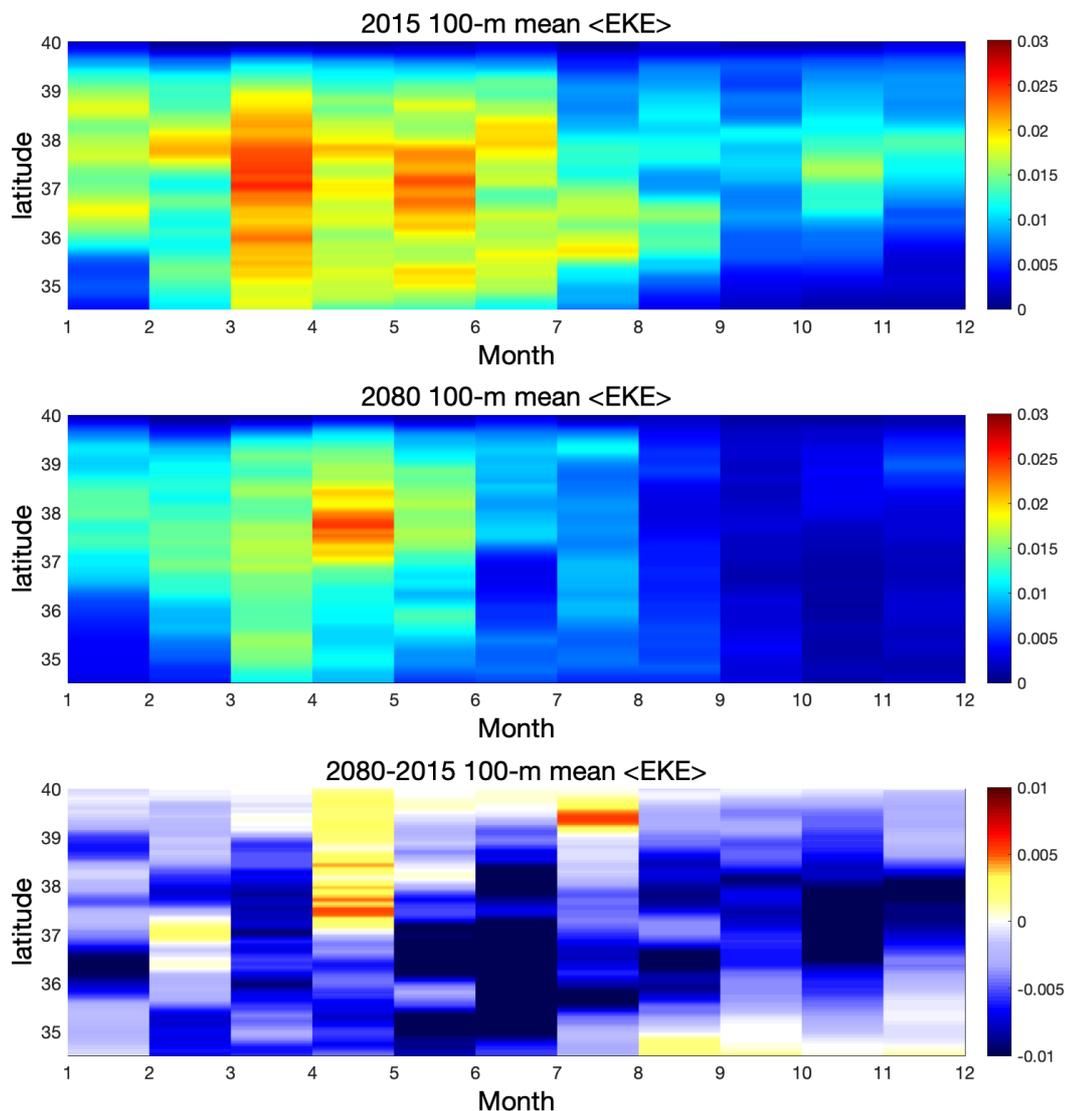


図 1 1. 表層 100m 平均した渦運動エネルギーを緯度と月の関数 (Hovmoeller 図) として図示したもの。(上段：2015 中段：2080 下段：差 2080-2015)

表層 100m 平均した渦運動エネルギーの Hovmoeller 図は、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た。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、この変動が後程の混合層の変動と渦

浮力フラックスと同期していると考えられる。Sasaki et al. (2014)による結果とも整合的である。

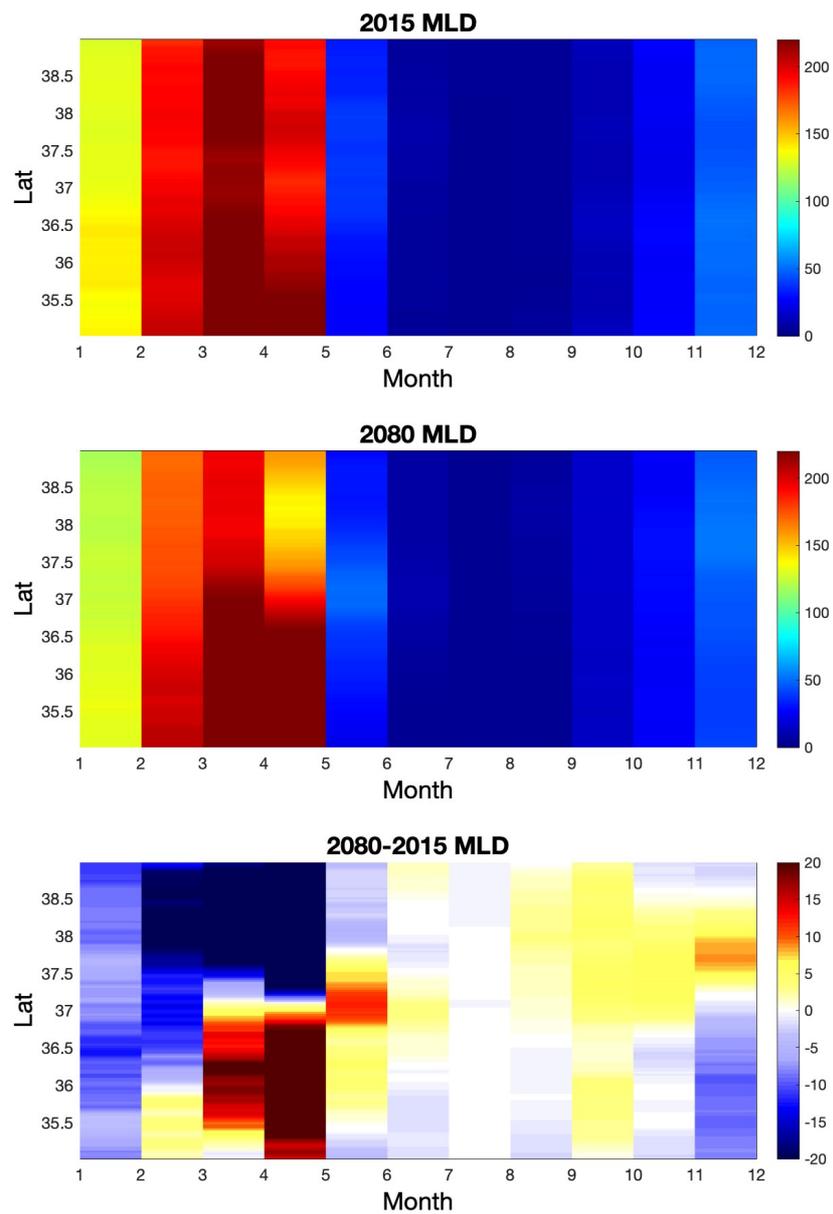


図 1 2. 混合層通年変化 (m 緯度平均 上段：2015 中段：2080 下段：差)

ROMS の混合層に関する Hovmoeller 図は、現代と将来ケースともに、秋から冬に深くなり、春から夏に浅くなるといった典型的な季節変化を示す。一方、両者の差においては、やや複雑な結果になっている。1月から2月末までは混合層深度が全体的に浅くなっており、これは地球温暖化による影響は主要要因であると考えられる。3月に入った後、対象海域の高緯度では約 10%浅化し、低緯度で約 10%深化していることが見られる。この傾向が約 2 ヶ月間にわたり続き、その後徐々に差が小さくなっていくことがわかる。そして、9月始まりから、高緯度で若干深化している。

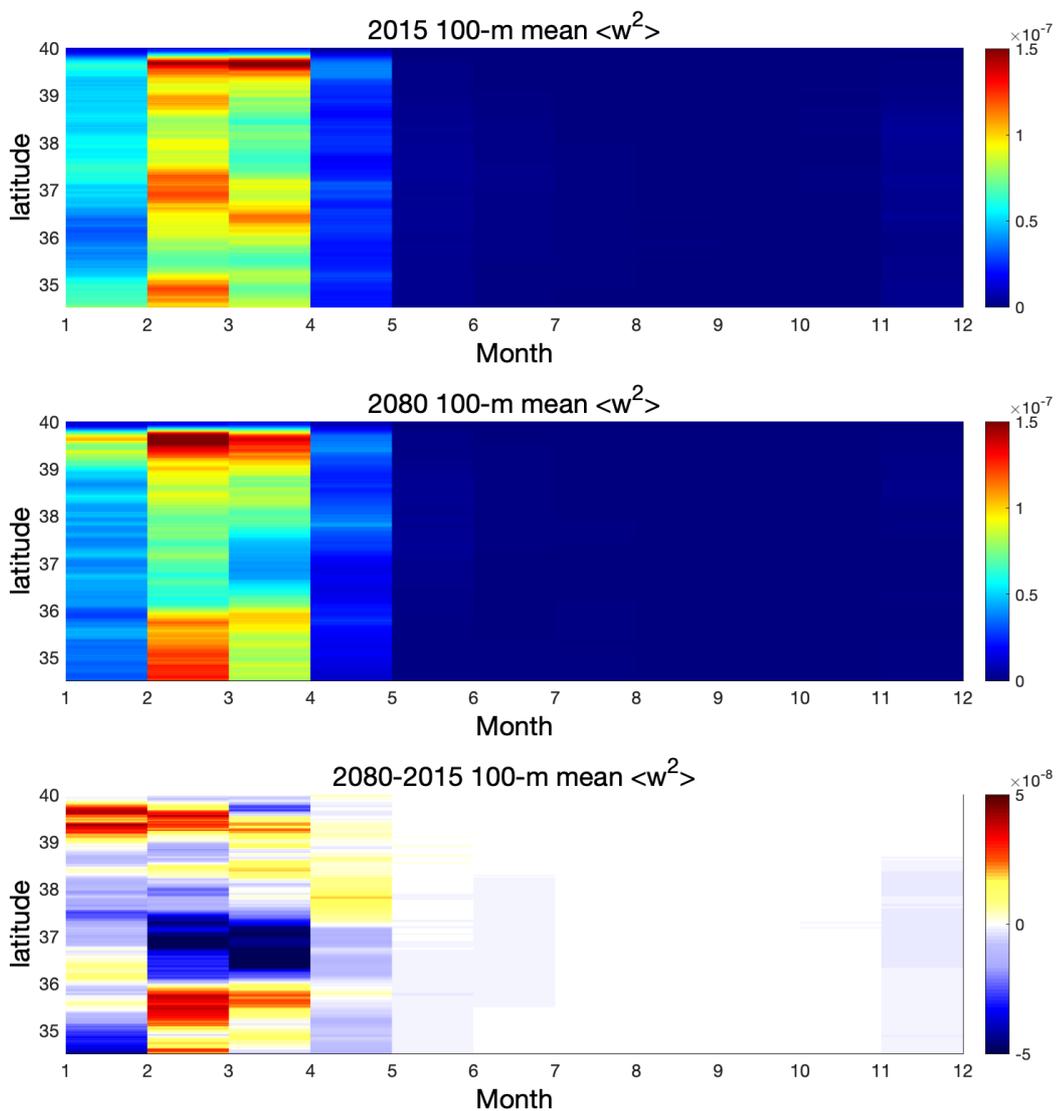


図 1.3. 鉛直流分散通年変化 (m/s^2 緯度平均 上段: 2015 中段: 2080 下段: 差)

100m 深における鉛直流分散値の Hovmoeller 図は、現代と将来ケースともに、渦運動エネルギーと同様な季節的変動が見られた。それぞれのケースにおいて、1月から値が増加し始め、2月中に対象海域の低緯度と高緯度で最大値に達し、その後減少していくことがわかる。一方、将来ケースと現代ケースの差は、対象海域高緯度では1月から3月で約30%将来ケースの方が値が増加していることがわかる。他方、中緯度では1月から4月にかけて約25%減していることがわかる。また、低緯度海域においては減少傾向から、約30%の増加へとその傾向が変遷していた。

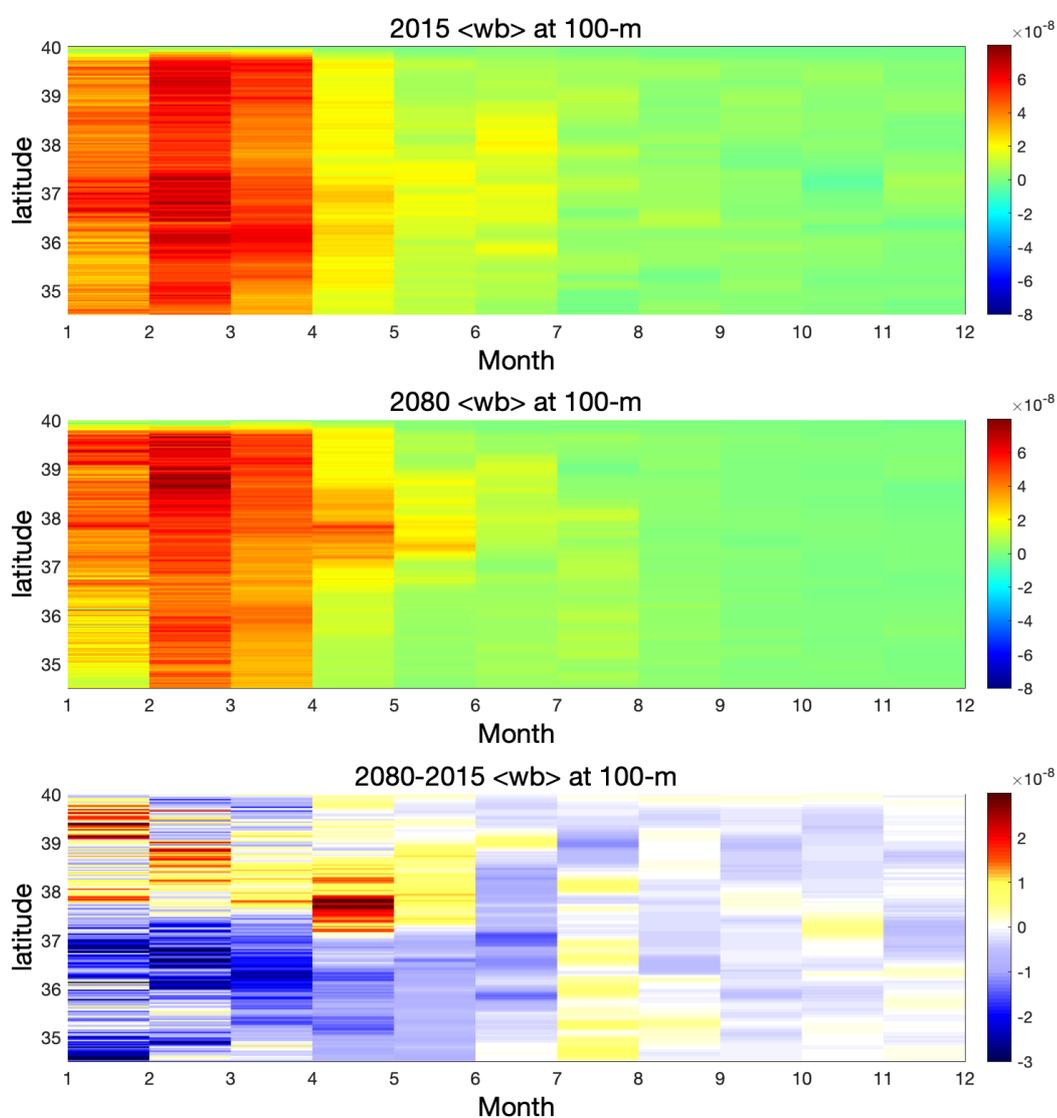


図 1 4. 浮力フラックス通年変化 (m^2/s^3 緯度平均 上段：2015 中段：2080 下段：差)

100m 深における渦浮力フラックスの Hovmoeller 図は、現代と将来ケースともに、その値が1月から6月までは正で値が大きく、その後の値がほぼ0に近い数字になっていくことがわかる。また、将来ケースと現代ケースの差を見ると、6月までは対象海域の低緯度では値が約30%減少しているのに対し、高緯度では約25%増加していることがわかる。この変動は混合層の変動と関連している。すなわち、4月から5月にかけて、対象海域の北部で渦浮力フラックスの正の値が増加し、再成層化がより活発になり、その結果、混合層の浅化が生じたと考える。一方、南部では将来ケースで渦浮力フラックスが減少しており、渦に伴う再生層化が抑制され、その結果、混合層が相対的に深くなっていると考えられる。

5. ROMS 生態系モデルにおけるシミュレーション結果

次に、ROMS と同時に実施した NPZD 生態系モデルの結果を現代ケースと将来ケースについて、物理場と同様な解析を実施した。

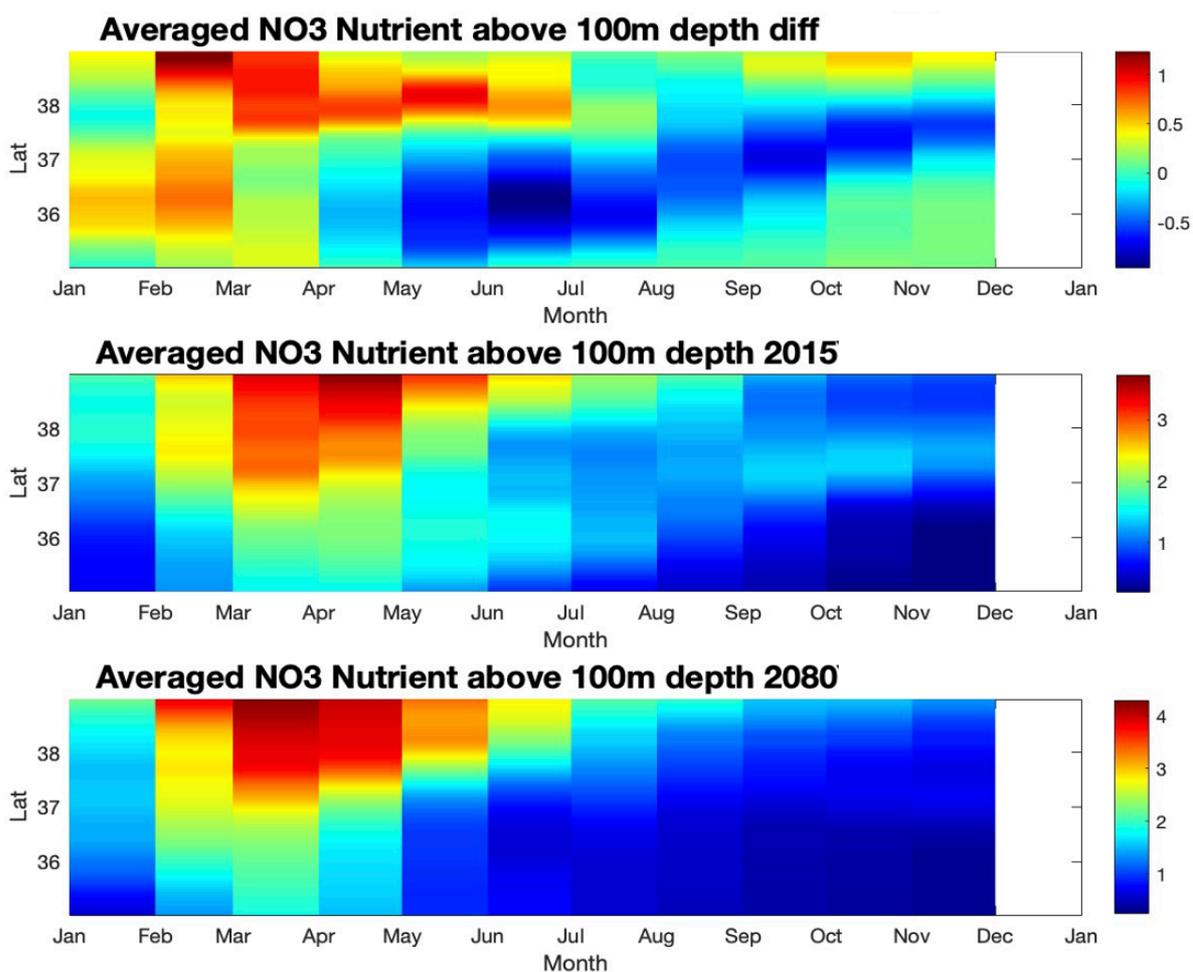


図 1 5. 100m 深以浅の硝酸塩濃度通年変化 (mmolN/m³ 緯度平均 上段：差 中段：2015 下段：2080)

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。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。

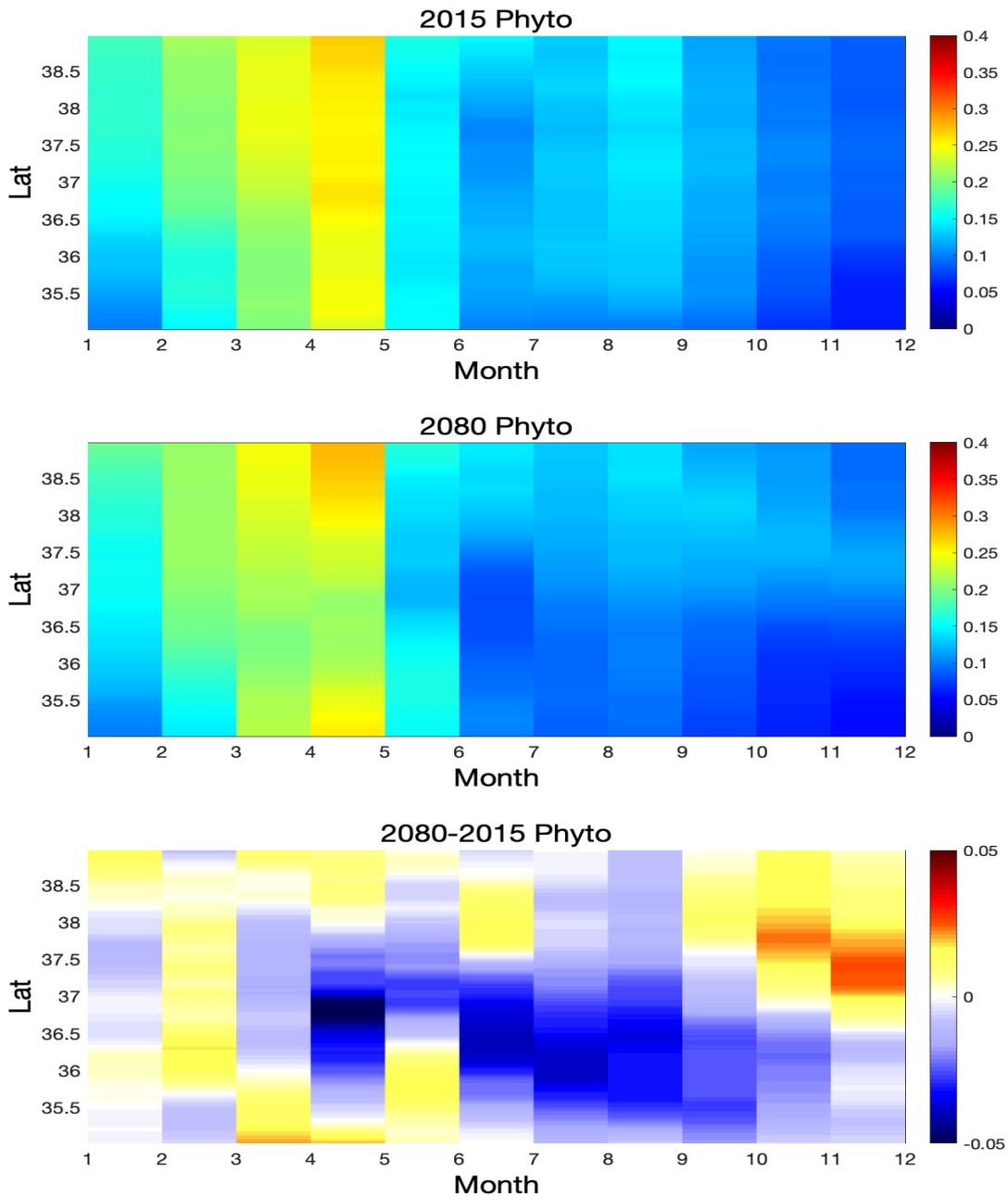


図 1 6. 100m 深以浅の植物プランクトン濃度通年変化 (mmolN/m^3 緯度平均 上段 : 2015
中段 : 2080 下段 : 差)

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。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。

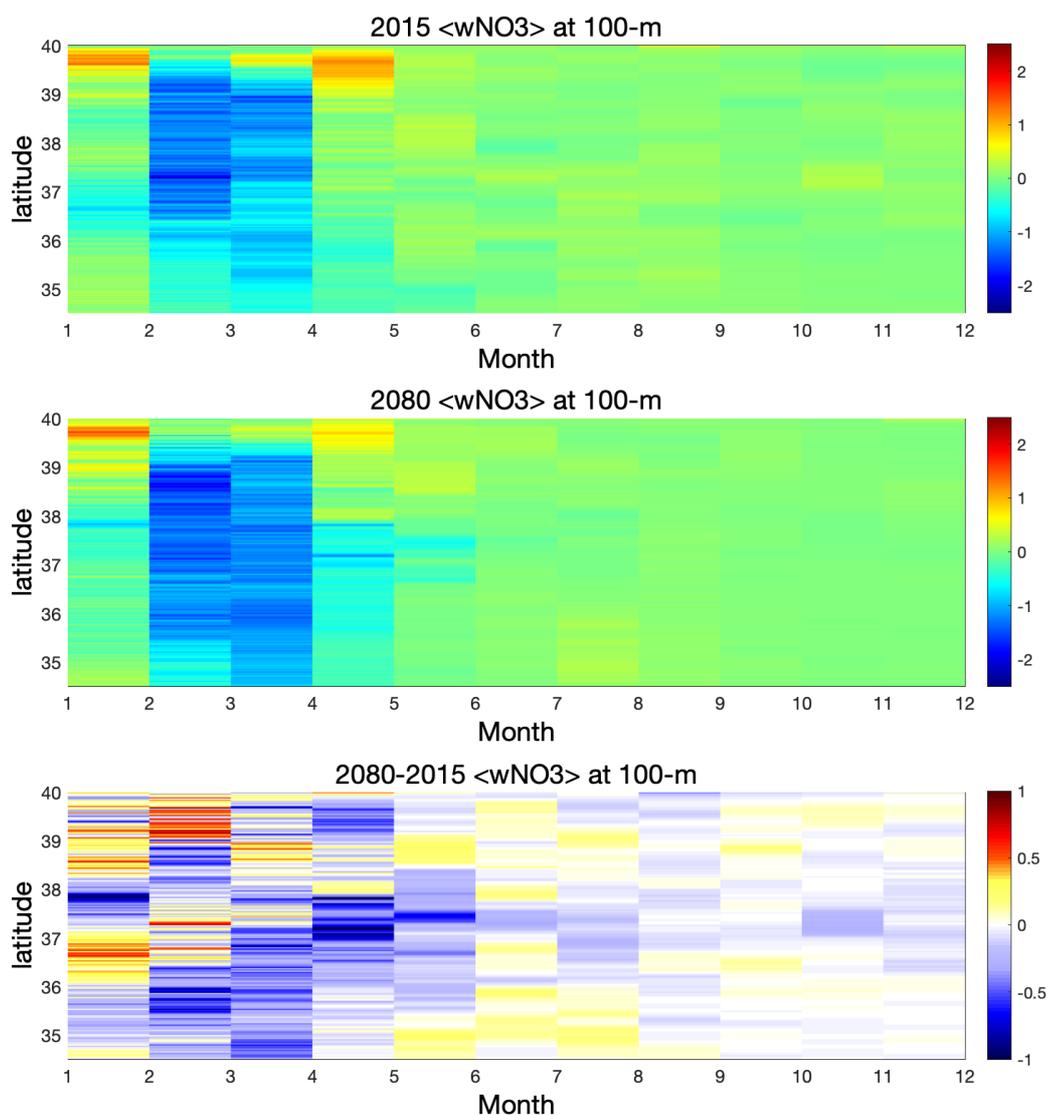


図17. 硝酸塩フラックス通年変化 (mmolN/m²day 緯度平均 上段：2015 中段：2080 下段：差)

100m 深における硝酸塩渦鉛直フラックスのHovmoeller 図は、現代と将来ケースともに1月において対象海域高緯度で値が正に大きく、2月から4月末までに全体的に値が負に転じ減少していることがわかる。その後、値がほぼ0に近い数字になっている。正の値は、下層

から表層に向かう硝酸塩の湧昇を意味し、負は表層にあった硝酸塩を下層へ送るサブダクションを表す。すなわち、深さ 100m においては、冬季の渦に伴う鉛直流は、混合層の増加で表層に取り込まれた硝酸塩を全体的にサブダクションしていることがわかる。将来ケースと現代ケースの差は、1 月末までには値が複雑に変動しているものの、2 月中、高緯度で値が正に転じ、将来ケースでは負に小さくなっており、以降は全体的に値が減少していることがわかる。

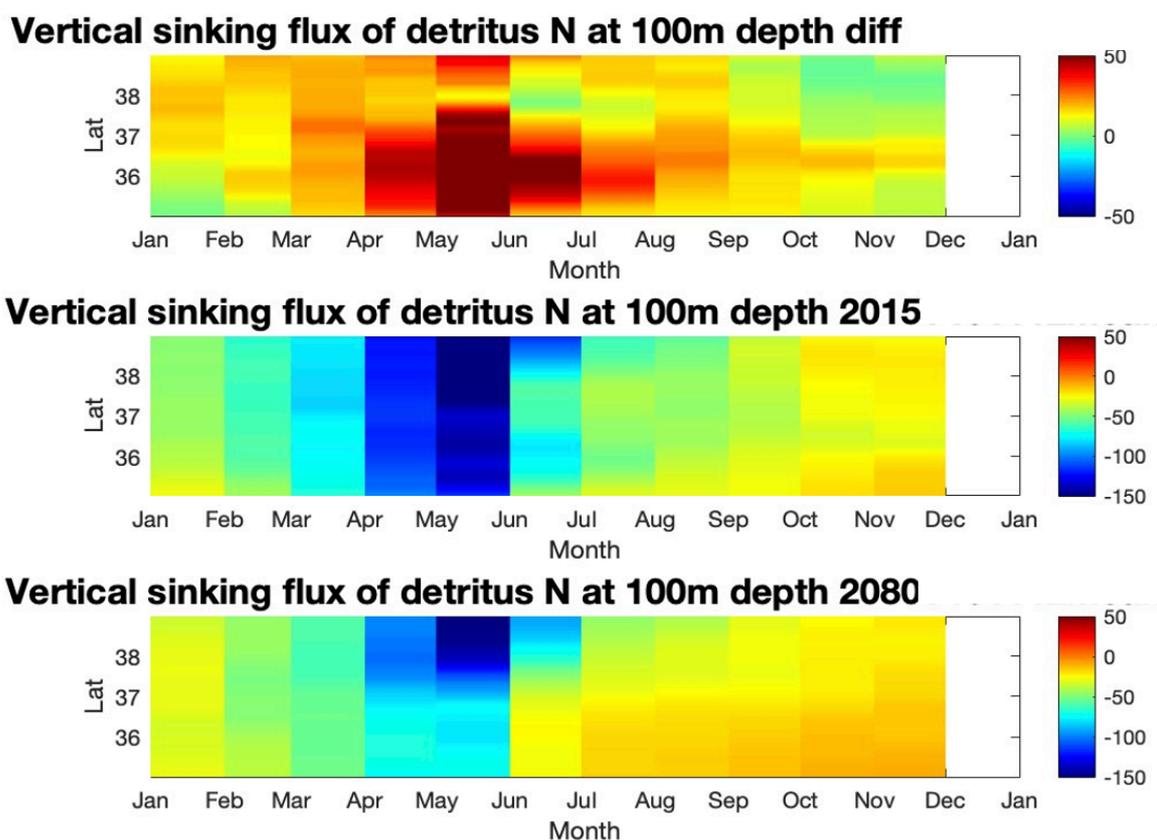


図 18. 100m 深デトリタス沈降フラックス通年変化（緯度平均 横軸：月 縦軸：緯度 $\text{mmolN/m}^2\text{day}$ 上段：差 中段：2015 下段：2080)

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变化を示した。2 月から 6 月末までは値が負に大きくなっており、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。

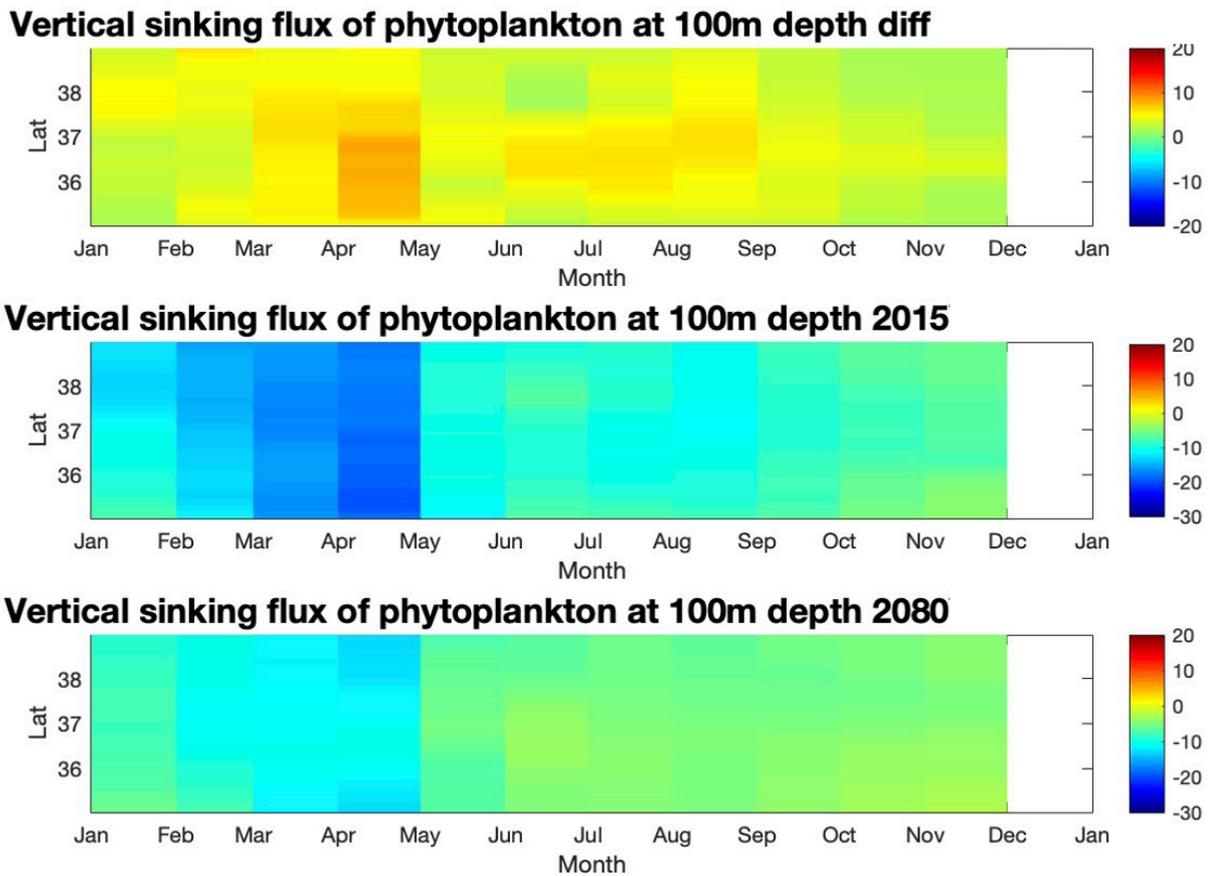


図19. 100m深植物プランクトン沈降フラックス通年変化（緯度平均 横軸：月 縦軸：緯度 $\text{mmolN/m}^2\text{day}$ 上段：差 中段：2015 下段：2080）

また100m深における植物プランクトン沈降フラックスのHovmoeller図は、現代と将来ケースともに2月から4月末までは値が負で沈降を示し、それ以降は、0に近い数字になっていることがわかる。両方ケースの差を見ると、全期間に渡り、正の値をとり、すなわち植物プランクトン沈降フラックスもデトリタスと同様に弱化したことがわかる。弱化幅が最も大きいのは4月で約30%になっている。沈降フラックスを植物プランクトンとデトリタスと比較した場合、デトリタスのそれが植物プランクトンに比べて値が10倍程度大きく、かつ沈降が活発な時期が植物プランクトンの時期から数ヶ月遅れている。これは、モデル中でデトリタスが植物プランクトンと動物プランクトンから窒素を受けた後に沈降するためである。

6. 鉛直分布図

これまで、水平的な解析をしてきたが、本章では各々の値の鉛直的な分布を解析し、変動をみた。

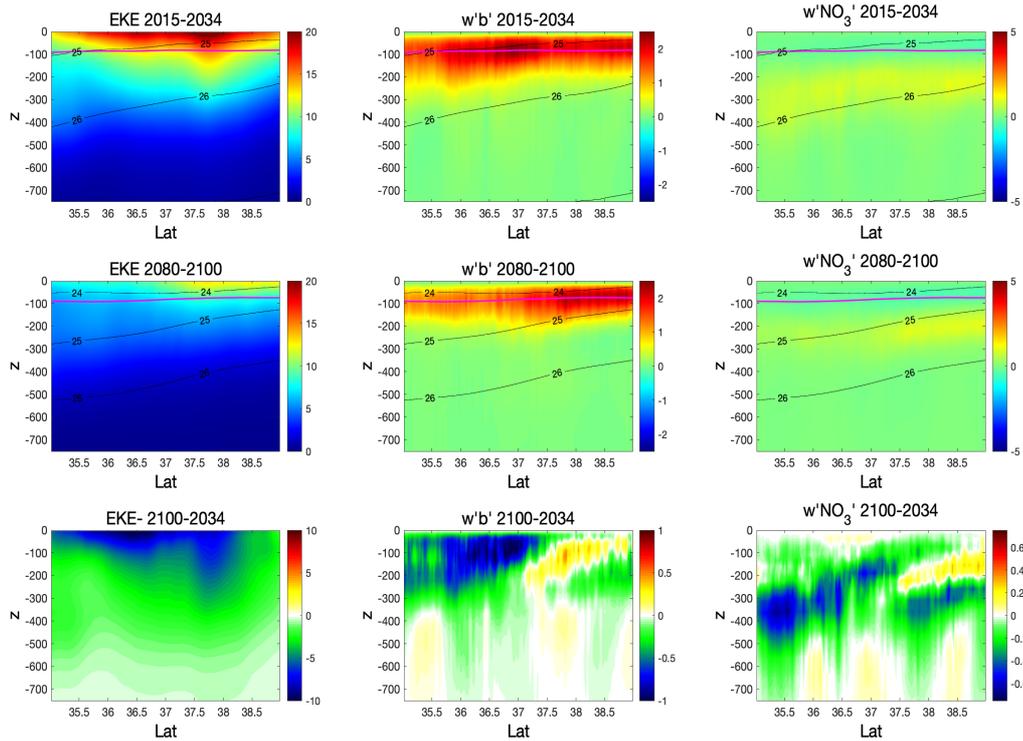


図 20. 経度方向および、20 年で平均した渦運動エネルギー、浮力フラックス、硝酸塩フラックス鉛直分布図（横軸：緯度 縦軸：深度 左図：EKE(J) 中図： $w' b'$ (m^2/s^3) 右図： $w' NO_3'$ ($mmolN/m^2day$))

経度と 20 年平均した EKE の鉛直断面図は、EKE が表層で最大値を示すことがわかる。将来ケースと現代ケースを比較すると表層 100-300m で EKE は大幅に減少していることがわかる。EKE の値自体の減少が最も顕著なのは北緯 36.5 度の表層 50m であるが、減少している層の厚さが大きいのは北緯 37.5° -38.5° の海域であった。

渦浮力フラックス、 $w' b'$ は、現代ケースと将来ケース両方で深度 100m で最も値が大きくなっていることがわかる。正の値を主に取るのは、この深度帯で季節的な混合層の再生層化が発生し、正の $w' b'$ は再生層化を促すフラックスであるためである。両方ケースの差を取ると、対象海域の北部で値が若干増加し、南部で大幅に減少することがわかる。

一方、鉛直渦硝酸塩フラックスは、渦浮力フラックスとはおおよそ逆の符号を呈し、特に亜表層で100mでは負の値をとり、200-300mでは正の値をとる。表層の負の値は、表層で渦に伴う硝酸塩のサブダクションが生じているためである。その亜表層で値が正であるのは、その層で渦に伴う硝酸塩の下層からの湧昇があることを意味する。両ケースの差を取ると、対象海域の北部で値が増加し、南部で減少している。一見して渦浮力フラックスの将来と現代ケースの差と類似する分布ではあるが、その深さは、硝酸塩渦フラックスは浮力フラックスよりも深い深度で見られる。

これらの鉛直フラックスは、いずれも南北で傾向が異なっており、北緯37度付近で符号が後となるケースが多々見られたため、北緯37度を基準に対象海域を南北に分けた。まず対象海域の南部において、将来ケースの値が全面的に減少していることがわかる(図21)。

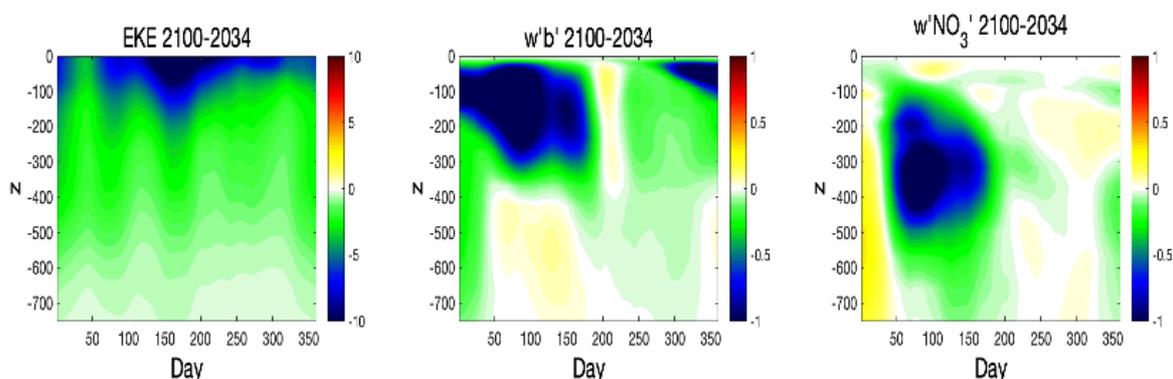


図21. 渦運動エネルギー、浮力フラックス、硝酸塩フラックス鉛直分布図(北緯37°以南 両方ケースの差 左図: EKE(J) 中図: $w' b'$ (m^2/s^3) 右図: $w' NO_3'$ ($mmolN/m^2day$))

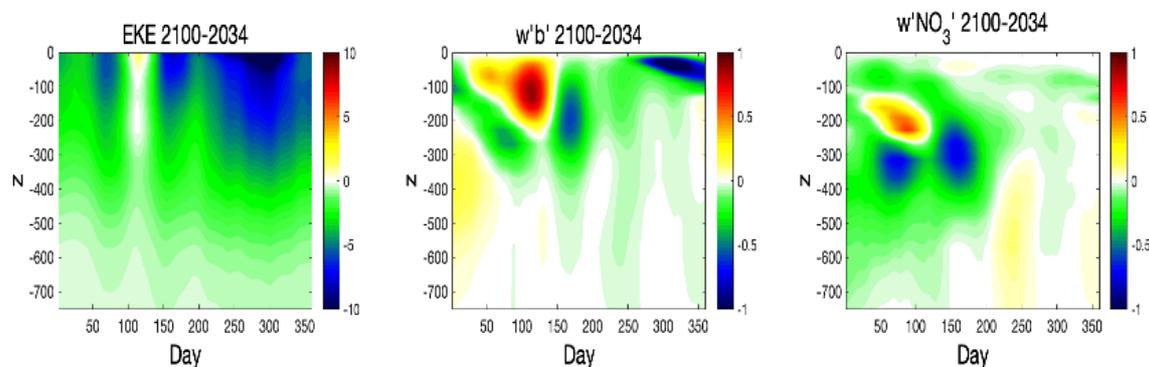


図22. 渦運動エネルギー、浮力フラックス、硝酸塩フラックス鉛直分布図(北緯37°以北 両方ケースの差 左図: EKE(J) 中図: $w' b'$ (m^2/s^3) 右図: $w' NO_3'$ ($mmolN/m^2day$))

一方、北部においては、渦浮力フラックスと渦硝酸塩フラックスは、それぞれ 100 深と 200 深において成層期に値が増加していることがわかる。後者の渦硝酸塩フラックスの増加している時期と深さでは、渦浮力フラックスは減少している。すなわち、渦硝酸塩フラックスの増加は、渦に伴う硝酸塩のサブダクションが未来のケースでは弱化しているために生じていると言える。

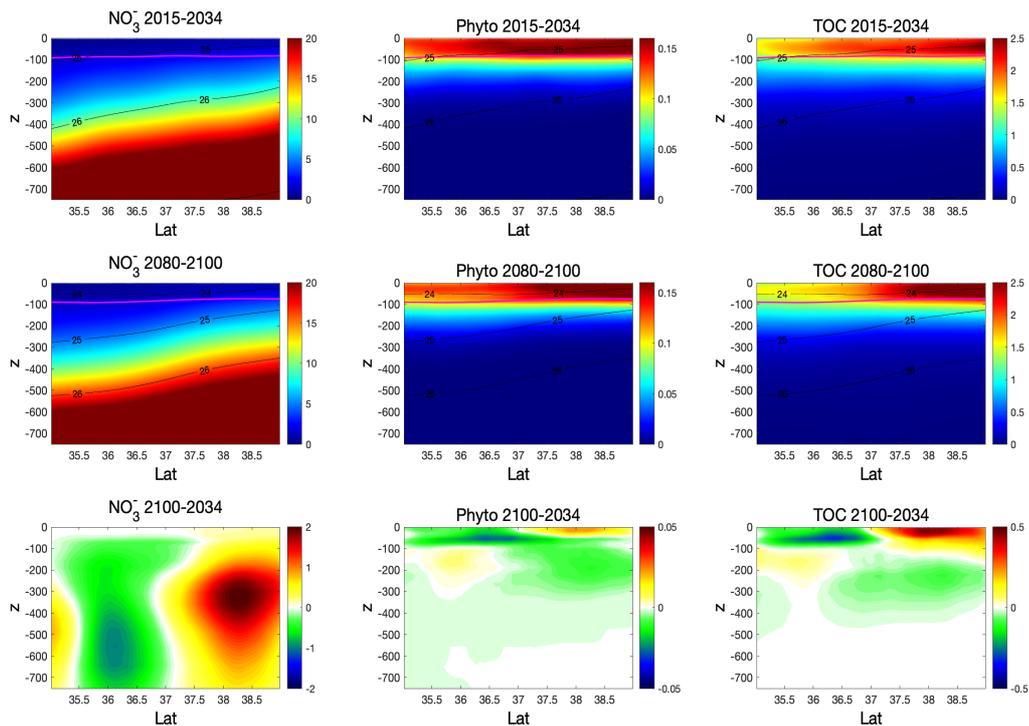


図 2.3. 硝酸塩濃度、植物プランクトン濃度、全有機体炭素濃度鉛直分布図（横軸：緯度 縦軸：深度 左図： NO_3^- (mmolN/m^3) 中図：Phytoplankton (mmolN/m^3) 右図： TOC (mmolN/m^3)

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並行となる。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。

同様な植物プランクトン濃度の鉛直断面は、植物プランクトンが表層で最大値を有し、深度の増加に伴い値が減少していくことがわかる。両ケースの差をとると、対象海域の南部で

将来ケースの方が植物プランクトンが多く、北部で少なくなっていることがわかる。この増減は、硝酸塩濃度の増減の南北分布に整合的な変化といえる。

全有機体炭素濃度は植物プランクトン濃度の分布とほぼ同様で、両ケースの差は、将来ケースで対象海域の南部で値がより小さく、北部で大きくなっていることがわかる。上述の解析値についても先ほどと同じように南北に分けた時系列の解析を実施した。

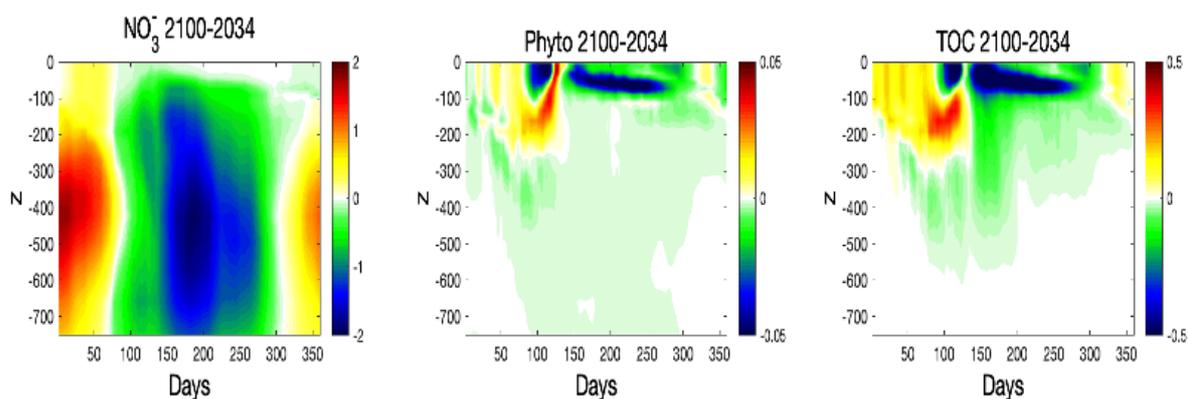


図 2 4. 硝酸塩濃度、植物プランクトン濃度、全有機体炭素濃度鉛直分布図（北緯 37° 以南 両方ケースの差 横軸：緯度 縦軸：深度 左図： NO_3^- (mmolN/m^3) 中図：Phytoplankton (mmolN/m^3) 右図：TOC (mmolN/m^3))

対象海域の南部における将来ケースは、現代ケースと比べて、硝酸塩濃度が冬季を除き、値が全体的に小さいことがわかる。植物プランクトンと全有機体炭素の将来ケースの結果は分布が類似しており、初春には表層において現代ケースと比較して増加し、以降は減少していることがわかる。初春の増加は、春季ブルームの早期化を意味する。

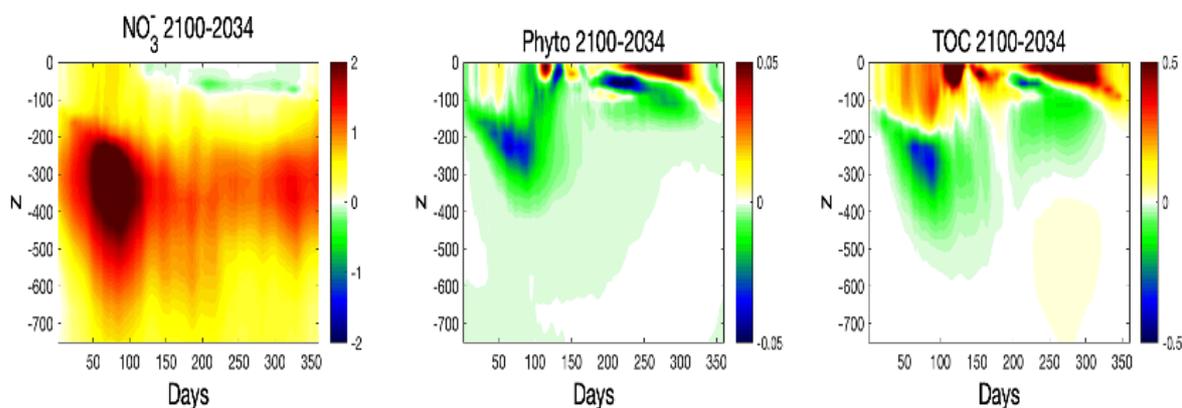


図 2 5. 硝酸塩濃度、植物プランクトン濃度、全有機体炭素濃度鉛直分布図（北緯 37° 以北 両方ケースの差 横軸：緯度 縦軸：深度 左図： NO_3^- (mmolN/m^3) 中図：Phytoplankton (mmolN/m^3) 右図：TOC (mmolN/m^3))

一方、対象海域の北部における将来ケースでは現代ケースに比べて、硝酸塩濃度が全体的に増加していることがわかる。これは前述の通り、将来ケースでは黒潮続流が強化され北部で硝酸塩を多く含む高密度水がより表層に持ち上がったためであると考えられる。北部の植物プランクトンと全有機体炭素濃度は、将来ケースにおいて現代ケースと比較すると表層において増加し、深度の増加に伴い、減少に転じた。

7. 考察

混合層の変動と渦浮力フラックスとの関係性について

混合層の変動について示した通り、将来ケースにおいて現代ケースと比較すると、冬季、春季にかけて、対象海域の北部で浅化し、南部で深化していることがわかる。このような変化は、対象海域に関して CMIP6 では得られていないため、高解像度化した ROMS を用いて将来予測結果に初めて現れた特徴といえる。北部においては、地球温暖化の結果として成層が強くなったため混合層が浅くなる傾向に沿っているのに対し、南部では、混合層は逆に深くなっている。

このような変動をしている原因の一つとして考えられるのが、渦浮力フラックスの変動である。図 1 4 では渦浮力フラックスの変動を示した。両ケースの差を見ると、前述の混合層が浅化した同じ時期に対象海域の北部では渦浮力フラックスの値が一部増加している箇所がある。一方、南部では渦浮力フラックスは一貫して減少している。北部での値の増加によって、一部渦による再生層化の働きが活発になり、将来ケースの北部での混合層は、温暖化の影響に加えてさらに浅くなっていると考えた。一方、南部では、渦浮力フラックスが大幅に減少しており、サブメソスケールの流れに伴った、再生層化の働きが弱化し、その結果将来ケースの南部での混合層が相対的に深くなっていると考えられる。

8. 結論

ROMS物理モデルにおける解析においては、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月まで浅化し、3月から4月の間は当該海域の北部で約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、南部で低くなったことがわかった。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、南部で深化が認められていると考える。デトリタス沈降フラックスは将来的に弱化し、特に弱化幅が大きいのは4月から6月では約30%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化したことがわかった。

鉛直分布に関する解析ではいずれの値も前述の変動の特徴と一致している。新たな解析値となる全有機体炭素は将来的に当該海域の北部では表層で増加し、亜表層で減少し、南部では、表層で減少し、亜表層で微増したことがわかった。

9. 参考文献

Boccaletti, G., Ferrari, R., & Fox-Kemper, B. (2007). Mixed Layer Instabilities and Restratification, *Journal of Physical Oceanography*, 37(9), 2228–2250.

Retrieved Feb 8, 2023, from <https://journals.ametsoc.org/view/journals/phoc>

CEDA Archive. (2021). CMIP6 data at CEDA <https://help.ceda.ac.uk/article/4801-cmip6-data>

Charlie Zender. (2022). NCO User Guide <https://nco.sourceforge.net/nco.html>

CMIP6 Data Request[01.00.31] <https://clipc-services.ceda.ac.uk//dreq/index.html>

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E.: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937–1958, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>, 2016.

Hayashi, Michiya & Shiogama, Hideo. (2022). Assessment of CMIP6-Based Future Climate Projections Selected for Impact Studies in Japan. *Scientific online letters on the atmosphere: SOLA*. 18. 96–103. [10.2151/sola.2022-016](https://doi.org/10.2151/sola.2022-016).

IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., [doi:10.1017/9781009325844](https://doi.org/10.1017/9781009325844).

Marie-Fanny Racault, Corinne Le Quéré, Erik Buitenhuis, Shubha Sathyendranath, Trevor Platt,

Phytoplankton phenology in the global ocean, *Ecological Indicators*, Volume 14, Issue 1, 2012,

Pages 152–163, ISSN 1470–160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.07.010>.

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>

Melanie Frazier, Ben Halpern, Alejandra Vargas, Mandy Lombard(2022). CMIP6 CLIMATE SCENARIO DATA: WE ARE HERE TO HELP! https://oceanhealthindex.org/news/cmip_1_what_is_this/

M. Kahru, P. C. Fiedler, S. T. Gille, M. Manzano, B. G. Mitchell. (2007). Sea level anomalies control phytoplankton biomass in the Costa Rica Dome area. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 34, L22601, doi:10.1029/2007GL031631

O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., and Sanderson, B. M.: The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6, *Geosci. Model Dev.*, 9, 3461–3482, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>, 2016.

Racault, MF., Sathyendranath, S., Menon, N. et al. Phenological Responses to ENSO in the Global Oceans. *Surv Geophys* 38, 277–293 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10712-016-9391-1>

Richards, K. J., Whitt, D. B., Brett, G., Bryan, F. O., Feloy, K., & Long, M. C. (2021). The impact of climate change on ocean submesoscale activity. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126, e2020JC016750. <https://doi.org/10.1029/2020JC016750>

ScenarioMIP ssp585.Version YYYYMMDD[1].Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4403>

Schupfner, Martin; Wieners, Karl-Hermann; Wachsmann, Fabian; Steger, Christian; Bittner, Matthias; Jungclaus, Johann; Früh, Barbara; Pankatz, Klaus; Giorgetta, Marco; Reick, Christian; Legutke, Stephanie; Esch, Monika; Gayler, Veronika; Haak, Helmuth; de Vrese, Philipp; Raddatz, Thomas; Mauritsen, Thorsten; von Storch, Jin-Song; Behrens, Jörg; Brovkin, Victor; Claussen, Martin; Crueger, Traute; Fast, Irina; Fiedler, Stephanie; Hagemann, Stefan; Hohenegger, Cathy; Jahns, Thomas; Kloster, Silvia; Kinne, Stefan; Lasslop, Gitta; Kornblueh, Luis; Marotzke, Jochem; Matei, Daniela; Meraner, Katharina; Mikolajewicz, Uwe; Modali, Kameswarrao; Müller, Wolfgang; Nabel, Julia; Notz, Dirk; Peters-von Gehlen, Karsten; Pincus, Robert; Pohlmann, Holger; Pongratz, Julia; Rast, Sebastian; Schmidt, Hauke; Schnur, Reiner; Schulzweida, Uwe; Six, Katharina; Stevens, Bjorn; Voigt, Aiko; Roeckner, Erich (2019). DKRZ MPI-ESM1.2-HR model output prepared for CMIP6

Schupfner, Martin; Wieners, Karl-Hermann; Wachsmann, Fabian; Steger, Christian; Bittner, Matthias; Jungclaus, Johann; Früh, Barbara; Pankatz, Klaus; Giorgetta, Marco; Reick, Christian; Legutke, Stephanie; Esch, Monika; Gayler, Veronika; Haak, Helmuth; de Vrese, Philipp; Raddatz, Thomas; Mauritsen, Thorsten; von Storch, Jin-Song; Behrens, Jörg; Brovkin, Victor; Claussen, Martin; Crueger, Traute; Fast, Irina; Fiedler, Stephanie; Hagemann, Stefan; Hohenegger, Cathy; Jahns, Thomas; Kloster, Silvia; Kinne, Stefan; Lasslop, Gitta; Kornblueh, Luis; Marotzke, Jochem; Matei, Daniela; Meraner, Katharina; Mikolajewicz, Uwe; Modali, Kameswarrao; Müller, Wolfgang; Nabel, Julia; Notz, Dirk; Peters, Karsten; Pincus, Robert; Pohlmann, Holger; Pongratz, Julia; Rast, Sebastian; Schmidt, Hauke; Schnur, Reiner; Schulzweida, Uwe; Six, Katharina; Stevens, Bjorn; Voigt, Aiko; Roeckner, Erich (2020). CMIP6 ScenarioMIP DKRZ MPI-ESM1-2-HR ssp585_r1i1p1f1 - RCM-forcing data. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. https://doi.org/10.26050/WDCC/RCM_CMIP6_SSP585-HR_r1i1p1f1

Tegen, I., Neubauer, D., Ferrachat, S., Siegenthaler-Le Drian, C., Bey, I., Schutgens, N., Stier, P., Watson-Parris, D., Stanelle, T., Schmidt, H., Rast, S., Kokkola, H., Schultz, M., Schroeder, S., Daskalakis, N., Barthel, S., Heinold, B.,

and Lohmann, U.: The global aerosol-climate model ECHAM6.3-HAM2.3 - Part 1: Aerosol evaluation, *Geosci. Model Dev.*, 12, 1643-1677, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1643-2019>, 2019.

内山雄介, 鈴江洋太, 山崎秀勝 (2016), ROMS-NPZDモデルを用いた黒潮域における中規模海洋変動と低次生産の解析, *土木学会論文集B2(海岸工学)*, 72巻 (2016) 2号, https://doi.org/10.2208/kaigan.72.I_1369

Ushijima, Yusuke & Yoshikawa, Yutaka. (2019). Mixed Layer Depth and Sea Surface Warming under Diurnally Cycling Surface Heat Flux in the Heating Season. *Journal of Physical Oceanography*. 49. 10.1175/JPO-D-18-0230.1.

Yamaguchi, R., & Suga, T. (2019). Trend and variability in global upper-ocean stratification since the 1960s. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124, 8933-8948. <https://doi.org/10.1029/2019JC015439>

Yang, H., G. Lohmann, W. Wei, M. Dima, M. Ionita, and J. Liu (2016), Intensification and poleward shift of subtropical western boundary currents in a warming climate, *J. Geophys. Res. Oceans*, 121, 4928-4945, [doi:10.1002/2015JC011513](https://doi.org/10.1002/2015JC011513).