

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

内山 雄介¹・鈴江 洋太²・山崎 秀勝³

¹正会員 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: uchiyama@harbor.kobe-u.ac.jp

²学生会員 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

³非会員 東京海洋大学教授 大学院海洋科学技術研究科 (〒108-8477 東京都港区港南 4-5-7)

黒潮域での中規模海洋変動に対する一次生産の応答を評価するために、領域海洋循環モデルROMSとNPZD型生態系低次生産モデルをカップリングしたROMS-NPZDモデルを用いて、中規模渦解像・サブメソスケール渦許容気候値解析を行った。太平洋沿岸黒潮域（遠州灘沖）での一次生産は黒潮に伴う中規模渦の影響を強く受けるが、流軸北側の沿岸域では低気圧性中規模渦による局所的な湧昇によって一次生産が活発に起こるのに対して、表層渦運動エネルギーがより強い黒潮流軸周辺では渦輸送によって栄養塩が表層から下方へ輸送され、表層での一次生産が抑制される。黒潮続流域（房総半島沖）の表層では下方への栄養塩渦輸送は見られず、黒潮域と黒潮続流域では低次生産への中規模渦の影響は大きく異なっている。

Key Words : ROMS-NPZD model, Kuroshio, mesoscale eddy, subduction, eddy nutrient flux

1. はじめに

内湾域や沿岸域は、河川からの栄養塩の流入や沿岸湧昇などによって栄養塩が海洋表層に供給されるため、表層付近で活発な一次生産が生じ、富栄養な海域となることが多い。それに対して、外洋における一次生産は沿岸域に比べて一般に極めて低い。例えば、我が国の太平洋沿岸を東進する黒潮暖水は栄養塩に乏しい。しかしながら、黒潮は陸棚周辺に強いフロントを形成し、そこでは温度風平衡に伴う鉛直シアによる鉛直混合、中規模渦による湧昇・沈降、フロントに沿った表層水のsubductionなどが生じるため、これらのメカニズムによって表層への栄養塩の供給や、低塩分・高酸素水の下方輸送が起こる。その結果、黒潮フロント域は貧栄養な外洋の中でも比較的高い生産性を維持する役割を果たしていると考えられ、黒潮続流域などは好漁場となっている。

さらに、海洋生態系は大気中の二酸化炭素を吸収・固定するため、地球温暖化などの気候変動の緩和に大きく貢献していると考えられている。UNEPによれば、全生物が吸収する炭素のうち約55 %はプランクトンなどの海洋生物によって吸収されると報告されている¹⁾。そのため、沿岸域や内湾域のみならず、外洋における一次生産を定量的に評価することは、そこに接続する沿岸域の水質生態環境だけでなく、ブルーカーボンの生成を通じて地球環境問題を考える上でも重要な課題である。

そこで本研究では、黒潮域での中規模海洋変動に対する生態系の一次生産の応答を定量的に評価することを目的とし、領域海洋循環モデルROMSとNPZD型の生態系低次生産モデルをカップリングしたROMS-NPZDモデルを用い、黒潮・黒潮続流域を含む本州太平洋沿岸を対象とした中規模渦解像・サブメソスケール渦許容気候値解析を行った。本報では、特に黒潮に伴う中規模渦・サブメソスケール渦による局所的な湧昇による栄養塩の供給と、黒潮フロント域での渦運動に伴う栄養塩のsubductionに代表される鉛直輸送が一次生産に及ぼす影響を評価したので、その結果を報告する。

2. 解析モデル

(1) 流動モデル

本研究では、黒潮大蛇行等の間欠的な個別イベントではなく、平年値としての黒潮と一次生産の関係を解析するため、流動・生態系モデルともに気候値 (climatology) 解析を行う。流動モデルでは、JCOPE2海洋再解析データ²⁾ (水平解像度約10 km) の月平均気候値を初期条件・境界条件として、領域海洋循環モデルROMSを用いた1-way offlineネスティングにより解像度3 kmのROMS-L1領域へとダウンスケーリングを行う (図-1, 表-1)。海上風応力には気象庁GPV-GSMの日平均気候値を、その他の海面フラックスにはCOADS05の月平均気候値を与える。

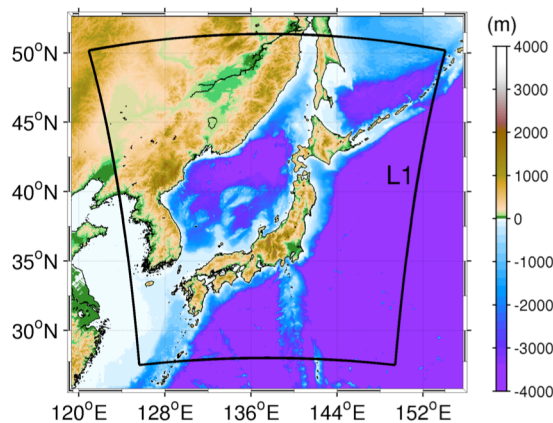


図-1 ROMS-L1 計算領域（黒枠）と水深分布（カラー）。

表-1 ROMS-L1モデル計算条件

格子数	784×864（×鉛直32層）
水平空間解像度	3km
海上風応力	JMA GPV-GSM（日平均気候値）
海面フラックス	COADS（NOAA, 月平均気候値）
海底地形	JEGG500+SRTM30
境界条件	JCOPE2 再解析値（月平均気候値）
緩和用 SST	Pathfinder-AVHRR（月平均気候値）

さらに、黒潮流路の再現性を向上させるためにTS Nudging ($\gamma = 1/20 \text{ day}^{-1}$; 詳細は内山ら³⁴⁾を参照)を適用する。なお、同一グリッドで同様の設定を用いたsynoptic計算結果から、対象海域の3次元海洋構造を良好に再現可能であることを確認済みである⁹⁾。計算開始後1年間はスピニングアップ期間とし、2年目を解析対象期間とする。

(2) 生態系モデル

Fashamら⁵⁾による窒素ベースの低次生産NPZDモデルを用い、北太平洋海域向けに各種パラメータの調整を行った。本NPZDモデルでは、栄養塩（N：硝酸塩 NO_3^- 、アンモニウム塩 NH_4^+ ）、植物プランクトン（P）、動物プランクトン（Z）、デトリタス（D）の5要素を考慮する。Gruberら⁹⁾を参考に、初期・境界条件にはWorld Ocean Atlas 2015（WOA）による NO_3^- 3次元分布の季節平均気候値（深層は年平均気候値）、MODIS/Aquaによる海表面Chla月平均気候値に対してMorel & Berthos⁷⁾による鉛直分布モデルを適用して得られる3次元分布、Chlaに比例させた動物プランクトン濃度分布を与え、初期デトリタス、アンモニウム塩はゼロとした気候値計算を行う。なお、低解像度のWOAでは沿岸域での NO_3^- 分布を表現できないため、水深500 m以浅の海域に対しては水深500 mでの NO_3^- 鉛直分布を線形内挿したものを初期分布として与えた。初期条件に含まれる不確実性は1年間のスピニングアップ期間中に解消され、2年目の本計算では各生態系変数は初期条件によらずに内因的な物質収支にしたがって変動することを確認している。

3. 海洋表層における水平構造

(1) 黒潮域・黒潮続流域の乱流構造

西岸境界流である黒潮は、流路周辺に中規模渦やサブメソスケール渦を伴いながら太平洋沿岸域を東進する。遠州灘沖における物質分散は、黒潮と海岸線の間に間欠的に出現する中規模渦の影響を強く受けることが報告されている⁹⁾。また、北太平洋中緯度海域（米国西海岸沖）では、中規模変動の強度を示す表層渦運動エネルギー（EKE）が高い領域で表層での一次生産が抑制される事例が報告されている⁹⁾。そこでまず、モデルによる冬季、夏季の典型的な表層無次元相対渦度（鉛直成分、日平均値）を図-2に示す。冬季には微細なサブメソスケール渦が多いのに対し、夏季は中規模渦が卓越するものの、大局的にはいずれの季節も蛇行する黒潮流路に対して北に正、南に負の渦度がほぼ軸対称に分布している。また、サブメソスケール渦は黒潮に伴う密度フロントが存在する黒潮流軸直上ではなく、流軸から南北方向に約1度離れた位置に多く発達しているが、流軸と地形に挟まれた海域での渦のサイズは外洋の渦と比較すると大きい。

季節変動成分（周期90日以上）を除去した年平均の表層EKEを見ると、黒潮・黒潮続流の流路周辺に高いEKEが分布している（図-3 (a)）。また、遠州灘沖を拡大すると、黒潮流軸と海岸線の間には御前崎（CO）の約100 km南に周囲より水位が低く、反時計回りの低気圧性冷水渦が、また潮岬（CS）の東側には周囲より水位が高く、時計回りの高気圧性暖水渦が形成されている（図-3 (b)）。御前崎沖に形成される低気圧性中規模渦による局所的な湧昇は、表層への栄養塩供給を促進し、一次生産に大きな影響を与えているものと推察される。

(2) 表層Chla濃度分布

次に、ROMS-NPZDモデルの精度検証の一例として、衛星データ（MODIS/Aqua）と本モデルによる表層Chla濃度分布を比較する（図-4）。用いたNPZDモデルは、同種の様々な生態系モデルの中でもかなり簡素なモデルであるが、表層でのChla濃度分布の再現性は比較的良好であると考えられる。例えば、太平洋沿岸域でのChla分布パターンや、全体的な濃度の値などについて、観測値から大きく逸脱していない。しかしながら、モデルによるChlaは、浅海域や内湾、瀬戸内海や黄海などの閉鎖性の強い海域を中心に過小評価傾向にある。この原因は、揚子江、鴨緑江、アムール川、国内一級河川などからの流入に代表される陸域起源の栄養塩供給を考慮していないためである。反対に、黒潮続流の北部から北海道東岸沖などの高緯度域ではモデルのChlaは過大評価気味であるが、これは北太平洋亜寒帯循環の影響範囲における鉄制限に起因する基礎生産性低下¹⁰⁾がモデル内で考慮され

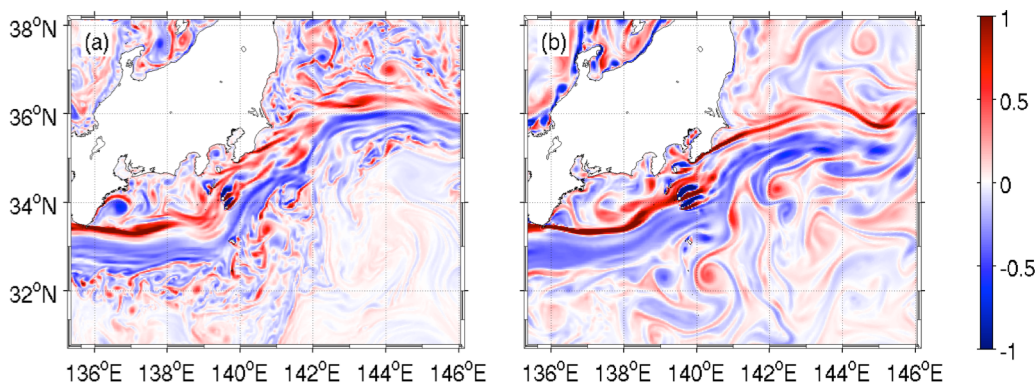


図-2 海表面における無次元相対渦度 (ζ/f) の日平均値空間分布. (a) 冬季 (1/1), (b) 夏季 (7/30).

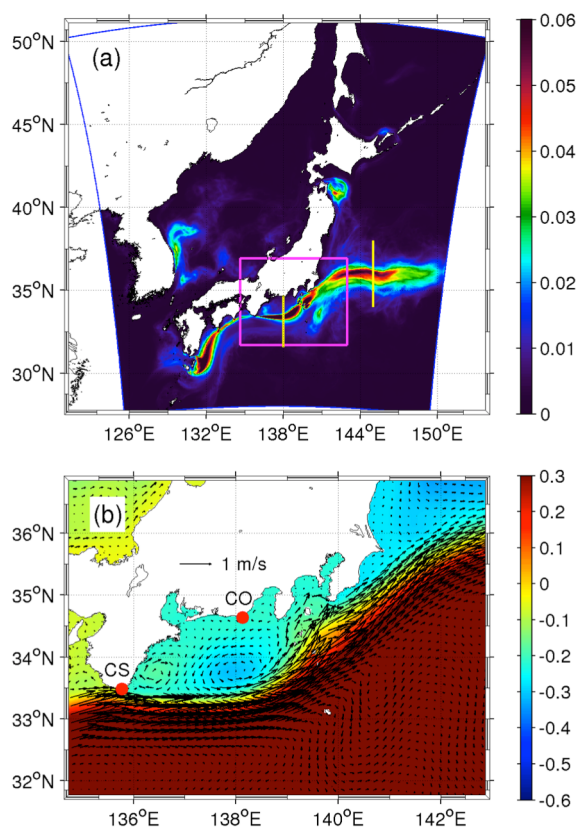


図-3 (a) 季節変動成分を除去した海洋表層渦運動エネルギーEKE ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$), (b) 海面高度 (SSH, カラー: m) および表層流速ベクトル (m s^{-1}). いずれも年平均気候値. (a) のマゼンタ枠は (b) の領域を示しており, 黄線はそれぞれ図-5~10 で用いる東経 138 度 (黒潮域), 145 度 (黒潮続流域) に沿った検査線を示す.

ていないことなどに起因する. これらの問題は, 沿岸域への陸水影響を考慮し, 鉄収支を含むより複雑な物質循環モデルの導入で解決されると考えており, 今後の検討課題としたい. 本研究では平均流や渦運動に伴う栄養塩輸送とそれに対する生態系の応答をできるだけシンプルな枠組みに基づいて考察することを志向することとする.

黒潮周辺海域での生態系の応答を検討するために御前崎沖の遠州灘 (以降, 黒潮域と呼称する) に着目すると, 表層Chlaは黒潮流軸を境界として沿岸域と外洋で大きく

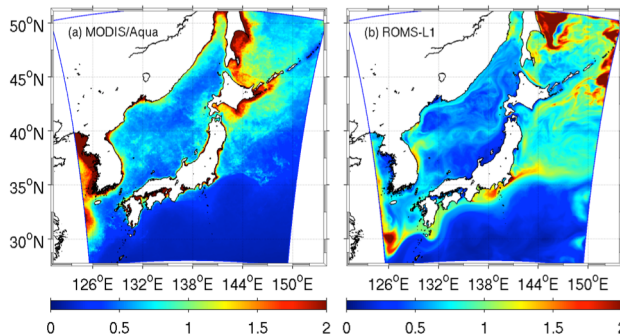


図-4 表層 Chl a 濃度分布 ($\mu\text{g L}^{-1}$). (a) 人工衛星データ (MODIS/Aqua), (b) ROMS-NPZD モデル計算結果による. いずれも年平均気候値.

異なっている. 低気圧性渦が形成される黒潮流路 (SSH 勾配が大きい強流域) 北側の沿岸域では (図-3 (b)), 渦に伴う局所的な湧昇による表層への栄養塩の供給によって活発な一次生産が惹起され, 高濃度のChlaが表層に分布している. 反対に, EKEが高い黒潮流路周辺では (図-3 (a)), Chla濃度はむしろ著しく低下している. ところが, 同じくEKEが高い黒潮続流域 (房総半島沖) では, 黒潮流軸付近の表層Chlaはあまり低下しない傾向にあり, 同じ黒潮の影響海域でも遠州灘沖と房総半島沖では一次生産の応答に有意な差があることが分かる.

4. 黒潮域・黒潮続流域における鉛直構造

(1) Chla, NO_3 の鉛直分布

黒潮域 (遠州灘沖), 続流域 (房総半島沖) での一次生産応答特性の発生機構を考察するために, 海面下の鉛直構造を精査する. 黒潮と黒潮続流を横断するように東経138度, 145度上に検査線を設定し (図-3 (a)黄線), 黒潮流軸上および南北に1度 (約110 km) ずつ離れた2地点の計3点の検査点を設け, Chlaおよび NO_3 濃度分布を求めた (図-5, 図-6). ただし, 黒潮流軸位置は黒潮の主流部が位置する水深50 mにおいて主流速の年平均値が最大となる場所と定義している. 黒潮域, 続流域ともに, 流軸より北に1度離れた地点では中深層以下に分布する栄養塩の表層方向への供給が盛んに起こっており,

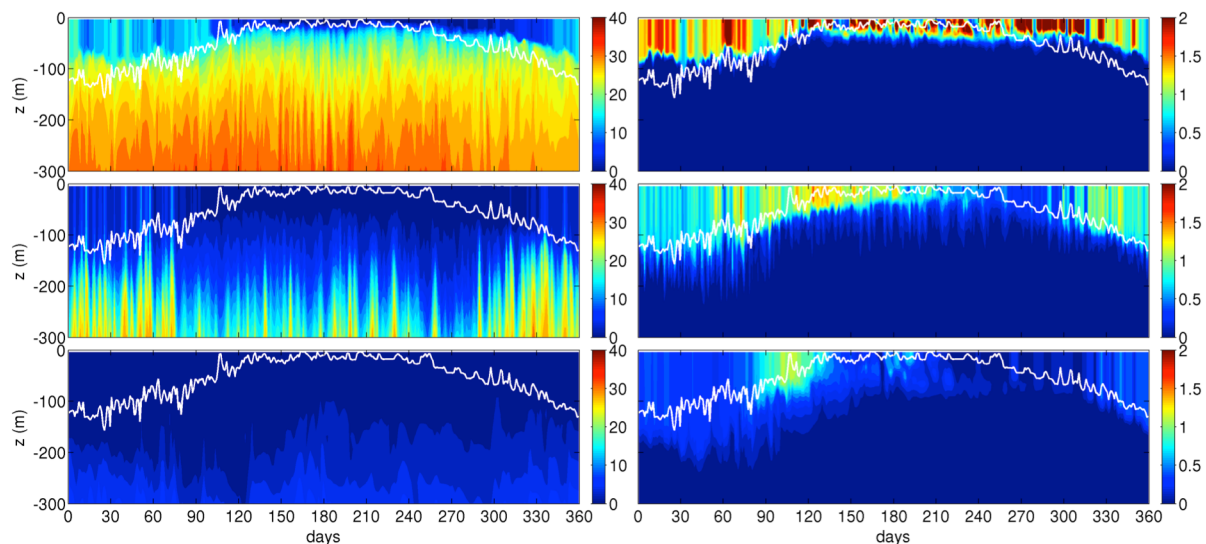


図-5 黒潮域（遠州灘沖）：東経 138 度ライン（図-3 (a) 左黄線）上の各検査点における（左） NO_3 濃度 (mmolN mg^{-1})，（右）Chl a 濃度 ($\mu\text{g L}^{-1}$) の Hovmöller 図。縦軸：水深，横軸：時間。上から，黒潮流軸から北へ 1 度，流軸直上，南へ 1 度離れた地点での結果。各パネルの白線は各検査点における KPP モデルから推定される混合層深さである。

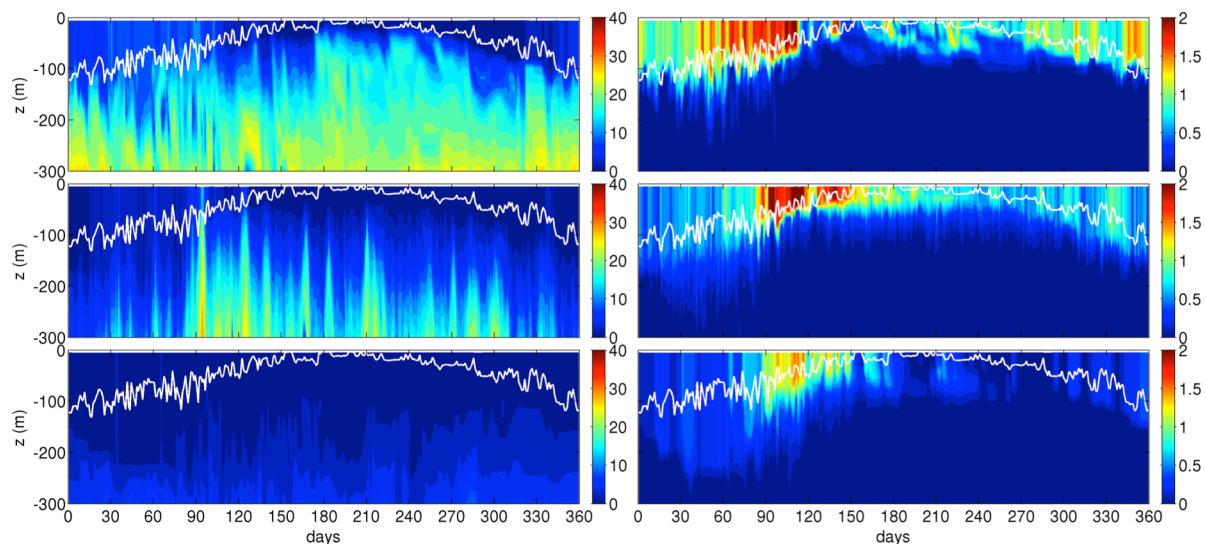


図-6 図-5 と同じ。ただし，黒潮続流域（房総半島沖）：東経 145 度ライン（図-3 (a) 右黄線）での結果。

その結果として表層から亜表層の Chl a が増大している。また，平均 NO_3 濃度の上限値が出現する水深には両海域に共通して明確な季節変動があり，混合層の消長と連動して寒冷期には深く（黒潮域では水深約 100 m，続流域では約 200 m），温暖期には浅く（同じく 20 m，50 m 程度）になっている。Chl a の極大値は，寒冷期では混合層上部の表層全体で生じているのに対して，温暖期では混合層下端周辺の亜表層で生じている。また，温暖期に比べて寒冷期により深くまで高濃度の Chl a が分布している。

流軸上，南側検査点と南下するにつれて中深層からの栄養塩供給は小さくなり，それに伴って Chl a 濃度も低下する。南側 2 点での季節変動傾向は北側検査点と基本的には同様であるが，4 月，5 月を中心に春季ブルーム（大増殖）に対応する Chl a の季節的な増加が発現しており，その程度は黒潮続流域のほうが顕著である。その影

響を受けて続流域での Chl a は平均的に黒潮域よりも高くなり，また，同期間では Chl a 変動と連動して顕著な栄養塩上昇が間欠的に生じている。この傾向は南側検査点でも見られるが，その程度は流軸上よりもかなり弱い。

シンプルな本 NPZD モデルでは，一次生産は NO_3 供給量にほぼ規定されるため，中深層からの上向き栄養塩フラックスが表層・亜表層における Chl a 分布の形成に直接的に関与していると考えられる。特に，両海域では黒潮流路変動や，中規模渦・サブメソスケール渦が活発に生じるため，その影響を受ける Chl a， NO_3 濃度は数日周期で変動している。そこで以下では，季節変動（周期 90 日）より短周期の変動を渦成分と定義し，渦に伴う栄養塩フラックスによる表層への栄養塩供給過程に関する解析を行う。なお，図-2に見られた渦サイズの季節変化などによる影響については別の機会に紹介したい。

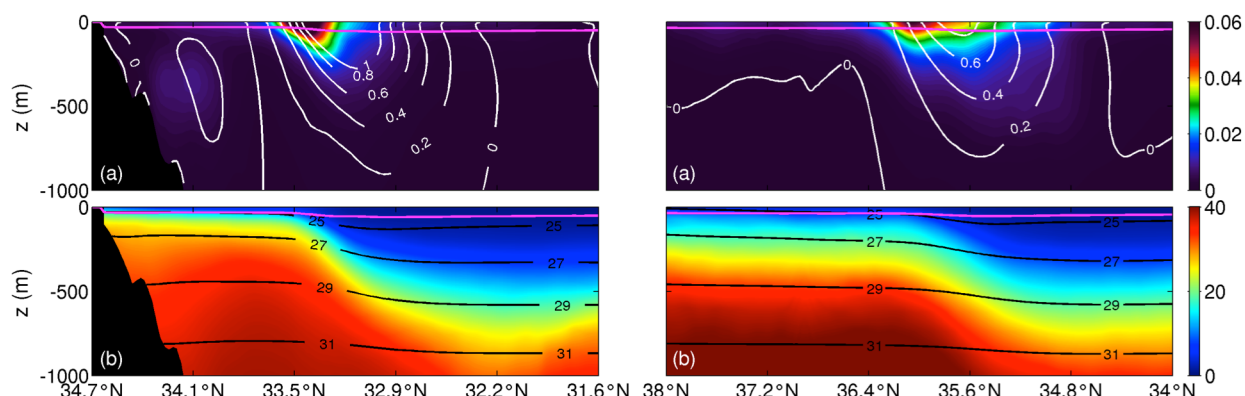


図-7 東経 138 度ライン (左), 東経 145 度ライン (右) における (a) カラー: 渦運動エネルギー-EKE (m^2s^{-2}), 白コンター: 平均流速 (m s^{-1}) の断面直行成分 (流下方向を正), (b) カラー: NO_3 -濃度 (mmolN mg^{-1}), 黒コンター: ポテンシャル密度 (kg m^{-3}), 各パネルのマゼンタ線は KPP モデルによって推定された混合層深さを示している. いずれも年平均気候値.

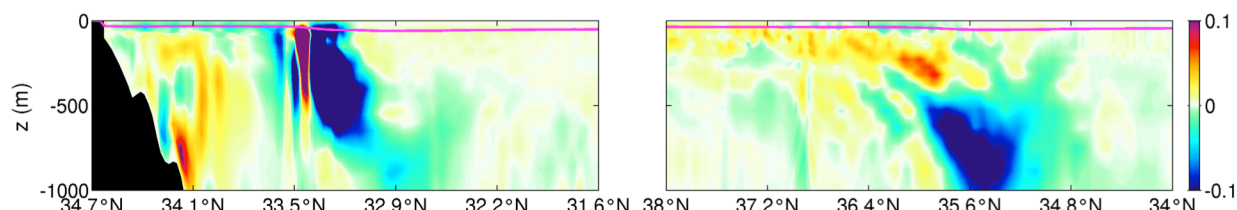


図-8 東経 138 度 (左), 東経 145 度 (右) ラインにおける鉛直 NO_3 フラックス渦成分 ($\mu\text{molN mg}^{-1} \text{m s}^{-1}$, 鉛直上向き正).

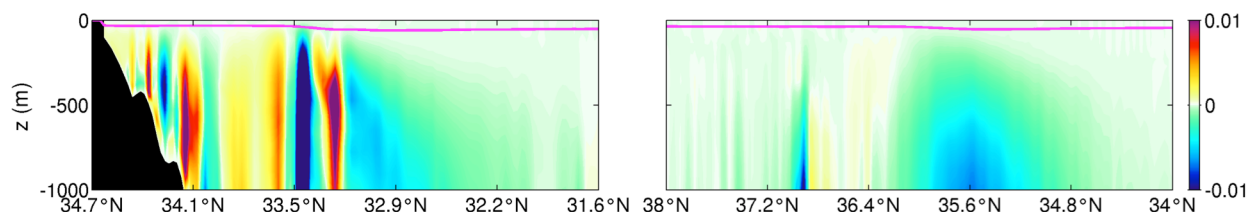


図-9 図-8 と同じ. ただし, 鉛直 NO_3 フラックス季節変動 (残差) 成分 ($\mu\text{molN mg}^{-1} \text{m s}^{-1}$, 鉛直上向き正).

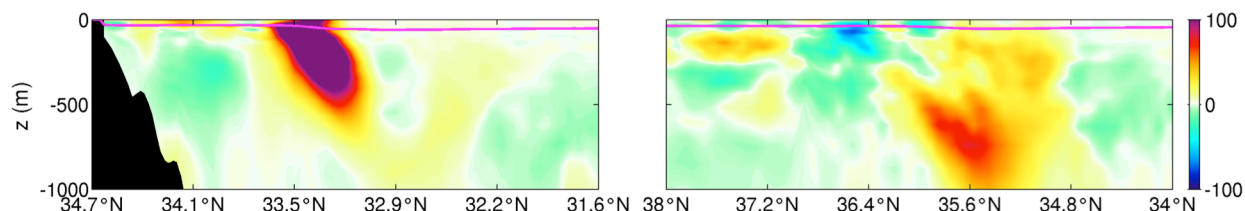


図-10 図-8 と同じ. ただし, 水平 NO_3 フラックス渦成分 ($\mu\text{molN mg}^{-1} \text{m s}^{-1}$, 沖合・南方方向正).

(2) 栄養塩輸送に対する渦の影響

黒潮域, 続流域に設定した各検査線断面内の鉛直構造を比較すると (図-7), 黒潮流軸はそれぞれ北緯 33 度, 35.5 度あたりに位置しており, 黒潮流軸に対応して高い EKE が分布している. また, ポテンシャル密度と栄養塩 (NO_3) の等値線は, 黒潮流軸に対応して沖側で沈み込んでいる. 特に NO_3 の黒潮域, 続流域ともに南側での沈み込みは顕著であり, NO_3 が下方へ輸送されて濃度低下していることが示唆される. また, このような NO_3 の黒潮域での沈み込みは解像度 2 度の WOA データには見られないことから, 黒潮やその流路変動, それらに伴う渦運動の影響を受けて局所的に形成された分布形と言える.

NO_3 輸送に対する渦の影響を定量的に評価するために, 周波数フィルタを用いて各変量を Reynolds 分解し, NO_3 濃度と流速 $\mathbf{u}$ の渦成分同士の相関項を求め, それらを年平均し, 鉛直 NO_3 フラックスの渦成分を求めた (図-8). 東経 138 度ラインでは, 北緯 33.5 度, 水深 500 m 以浅に強い負 (鉛直下向き) の NO_3 フラックスが見られ, 黒潮の主流部に沿うように subduction が卓越することが明示されている. また, 負値の北側上部の混合層直下に正値が分布していることから, 流軸北部亜表層の NO_3 が混合層底部に上昇し, それが turnover して南側下層へと輸送され, 流軸から南側の表層 NO_3 が急減しているものと理解される. 東経 145 度ラインでも定性的には同様の傾向が見られるが, 全体的に値は小さく, 流軸北側の水深 400

m以浅の亜表層に正值が広く分布し、負値は正值の下部に相当する流軸南側の水深400 m以深に分布している。なお、鉛直NO₃フラックス季節変動（渦成分との残差）成分は両海域ともに渦成分より1桁以上小さく、NO₃の鉛直輸送には渦成分の寄与が圧倒的に大きい（図-9）。

また、両検査線断面内の水平NO₃フラックス渦成分を見ると（図-10）、subductionが生じる領域でともに正值（南方向）を取ることから、黒潮域では沿岸湧昇や低気圧性渦によって表層に供給された栄養塩は黒潮フロントに沿って速やかに沖合下方に輸送され、流軸および南側海域表層での一次生産が強く抑制されていると解釈される。一方、続流域でのsubductionと南方向輸送は黒潮底部付近の水深500 m以深の中深層で活発に生じており、北太平洋中層水に栄養塩を供給している。続流域表層に存在するNO₃の下方への輸送は相対的に小さため、一次生産の抑制効果も黒潮域より小さくなると考えられる。

6. おわりに

本研究では、ROMS-NPZDモデルを用いて黒潮域（遠州灘沖）、黒潮続流域（房総半島沖）での中規模海洋変動が低次生産に及ぼす影響について評価した。黒潮-海岸間に形成される低気圧性の中規模渦に伴う局所的な湧昇によって、遠州灘沿岸域では続流域北部よりも高い一次生産が維持されていることを示した。両海域ではともに黒潮に伴う中規模渦活動が活発であるにも関わらず、一次生産への影響は大きく異なっていた。渦による栄養塩輸送を定量的に評価した結果、黒潮フロントに沿って下方に栄養塩が輸送されることで黒潮流軸および南側海域表層での一次生産に影響を与えていることが明らかとなった。

謝辞：本研究は、JST-CREST「海洋生物多様性および生態系の保全・再生に資する技術基盤の創出」領域（代表

者：山崎秀勝）および科学研究費補助金（15H00977、15H04049、代表：内山雄介）の援助を受けた。

参考文献

- 1) Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdés, L., De Young, C., Fonseca, L., and Grimsditch, G. (Eds), *Blue Carbon. A Rapid Response Assessment*, United Nations Environment Programme, GRID-Arendal, Birkeland Trykkeri AS, Norway, 78 p., 2009.
- 2) Miyazawa, Y. and coauthors: Water mass variability in the western north Pacific detected in 15-year eddy resolving ocean reanalysis, *J. Oceanogr.*, Vol. 65, pp. 737-75, 2009.
- 3) 内山雄介, 石井翔大, 宮澤泰正: JCOPE2-ROMS 多段ネスティングによる黒潮続流域でのダウンスケーリング効果の検証, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. 1_436-1_440, 2012.
- 4) 内山雄介, 神吉亮佑, 高野祥子, 山崎秀勝, 宮澤泰正: 海面高度計およびArgoデータに基づく3次元密度推定値を同化させた海洋流動モデルの再現精度について, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol. 71, No. 2, pp. 1_365-1_370, 2015.
- 5) Fasham, M. J. R., H. W. Ducklow, and S. M. McKelvie: A nitrogen-based model of plankton dynamics in the oceanic mixed layer, *J. Mar. Res.*, Vol. 48, pp. 591-639, 1990.
- 6) Gruber, N. and coauthors: Eddy-resolving simulation of plankton ecosystem dynamics in the California Current System, *Deep-Sea Res. I*, Vol. 53, pp. 1483-1516, 2006.
- 7) Morel, A. and J.F. Berthon: Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications, *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 34, pp. 1545-1562, 1989.
- 8) 内山雄介, 鈴江洋太, 小裕大地: 瀬戸内海および遠州灘沿岸域における陸域起源物質分散の季節変動特性について, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 72, No. 4, pp. 1_949-1_954, 2016.
- 9) Gruber, N., Z. Lachkar, H. Frenzel, P. Marchesiello, M. Munnich, J. C. McWilliams, T. Nagai, and G.-K. Plattner: Eddy-induced reduction of biological production in eastern boundary upwelling systems, *Nature Geoscience*, Vol. 4, pp. 787-792, 2011.
- 10) Moore, C. W. and coauthors: Processes and patterns of oceanic nutrient limitation, *Nature Geoscience*, Vol. 6, pp. 701-710, 2013.

(2016.3.16 受付)

BIOGEOCHEMICAL RESPONSES TO MESOSCALE OCEANIC VARIABILITY IN THE KUROSHIO REGION ANALYZED WITH A ROMS-NPZD MODEL

Yusuke UCHIYAMA, Yota SUZUE and Hidekatsu YAMAZAKI

The Kuroshio is one of the most energetic western boundary currents accompanied by vigorous eddy activity both at meso- and submesoscales which significantly affect biogeochemical productivity in the upper ocean. We examine such processes with a climatological ocean modeling based on ROMS coupled with an NPZD model for the Kuroshio region off Japan. Cyclonic mesoscale eddies develop in the coastal area of Enshu Nada, leading to upward nutrient supply to euphotic zone with promoting active primary production. In contrast, Chl.a is much less prominent around the Kuroshio path where the higher EKE is distributed. The downward eddy-induced vertical nutrient flux occurs at depth beneath the Kuroshio path and the reduction of nutrient consequently takes place. Therefore, a substantial amount of nutrient is removed from the near-surface layer by eddy-driven downward nutrient transport, resulting in suppressing the primary production there.