

# 黒潮周辺海域における海洋変動に対する 一次生産応答の季節変動特性について

鈴江 洋太<sup>1</sup>・内山 雄介<sup>2</sup>・山崎 秀勝<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 (株) 建設技術研究所 中部支社 河川部水工室 (〒460-0003愛知県名古屋市中区錦1-5-13)

E-mail: yta-suzue@ctie.co.jp

<sup>2</sup>正会員 神戸大学教授 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)

<sup>3</sup>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)

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い、黒潮周辺海域における一次生産の季節変動特性とそのメカニズムを評価した。海洋渦による栄養塩の鉛直輸送とそれに伴う一次生産には明確な季節変動が見られ、冬季には他の季節と比べて渦輸送成分が顕在していた。渦運動エネルギー収支解析等から、冬季の海面冷却によって黒潮流路に沿って傾圧不安定が強化され、中規模・サブメソスケール渦が発達し、栄養塩鉛直渦輸送が増大することを明らかにした。この強い栄養塩輸送と日射量の季節的な増加によって冬季から春季にかけて海洋表層の一次生産が増大し、春季ブルームへと発展することが示唆された。

**Key Words :** Kuroshio, eddy-induced nitrate flux, submesoscale eddies, baroclinic instability

## 1. はじめに

海洋生態系は大気中の二酸化炭素の吸収・固定に寄与するため、気候変動の進行・緩和に対して多大な影響を与えている。沿岸域は、河川等からの栄養塩供給や沿岸湧昇などによって外洋の約2倍の一次生産能力を有すると推定されており<sup>1)</sup>、沿岸生態系の維持管理は重要な工学的課題である。一方で、外洋は海洋全体の面積の約90%を占めることから、総量としての一次生産は実際には主として外洋で生じる。したがって、外洋域における一次生産維持機構の解明は、地球環境問題を考える上でも極めて重要な課題の一つである。

一般に外洋表層では栄養塩が枯渇しているため、一次生産の増大は黒潮などの海流による水平栄養塩輸送や、外洋に遍在する渦やフロントに伴う局所的な湧昇、鉛直混合による亜表層栄養塩の表層有光層への上方輸送に強く依存すると考えられている。例えば、Nakataら<sup>2)</sup>は、遠州灘沖での観測結果から、黒潮流路北側の沿岸域に形成される低気圧性渦による局所湧昇によって栄養塩が表層へ供給され、それが海域の一次生産を維持していることを示した。Sasaiら<sup>3)</sup>は、黒潮続流域に分布する低気圧性渦が表層一次生産を促進していることを数値モデルによって示した。その一方で、黒潮続流域<sup>4)</sup>や東シナ海<sup>5)</sup>に形成される黒潮フロント周辺では、栄養塩や低塩分水のsubduction (等密度面に沿った断熱的な沈降) が観測

された。またGruberら<sup>6)</sup>は、米国西海岸沖を対象とした数値モデルから、渦によって栄養塩の下方輸送が生じることがあり、表層一次生産はむしろ抑制されると報告した。したがって、渦やフロントに伴う栄養塩の鉛直輸送には、輸送方向に応じて一次生産を助長する場合と抑制する場合とがあると考えられるが、その詳細についてはこれまでほとんど理解が進んでいなかった。

これに対して内山ら<sup>7)</sup> (以下前報と呼称) は、東シナ海から黒潮続流域の東側の約152°Nまでの黒潮流路を包含する本州太平洋沿岸を対象とした高解像度・広領域の数値モデルによって、渦運動に伴う鉛直栄養塩輸送の空間構造に関する解析を行った。遠州灘沖と黒潮続流域を取り上げて比較し、前者では黒潮流軸近傍で強い下方への渦輸送が卓越し、沿岸域に形成される低気圧性定在渦による局所湧昇 (上方への渦輸送) を強く抑制していること、反対に続流域の海洋表層での下方渦輸送は極めて弱く、低気圧性渦による局所湧昇によって一次生産が維持されていることなどを示した。しかしながら、渦輸送効果の空間変化に関するメカニズム、一次生産応答の季節変動などに関しては十分に解析されていなかった。そこで本研究では、前報<sup>7)</sup>で開発したモデルを用いた解析をさらに進め、遠州灘沖・黒潮続流域を例に窒素収支解析を実施して一次生産構造を明らかにするとともに、渦運動による栄養塩輸送とそれに伴う一次生産の季節変動特性、それらのメカニズムを特定することを目的とする。

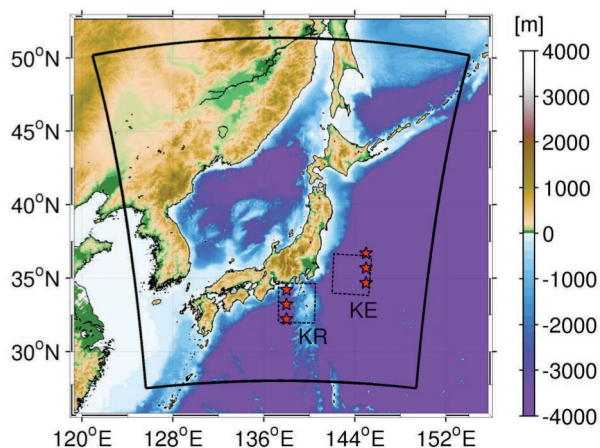


図-1 ROMS 計算領域 (黒枠) と水深分布 (カラー) . 赤星印: 図-3, 4 で使用する検査点, 黒点線枠: 波数スペクトル解析 (図-7) に用いる正方領域.

表-1 ROMS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	JMAGPV-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)

## 2. ROMS-NPZD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) 解析を行った。流動モデルでは、JCOPE2海洋再解析データ (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領域へとダウンスケーリングした (図-1, 表-1)。海上風応力には気象庁GPV-GSM日平均気候値を、その他の海面フラックスにはCOADS月平均気候値を与えた。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<sup>7)</sup>を参照) を適用した。また、生態系モデルには栄養塩N (硝酸塩 $\text{NO}_3^-$ , アンモニウム塩 $\text{NH}_4^+$ ), 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要素を考慮した、窒素ベースの低次生産NPZDモデルを用いた。本研究では、10年分の気候値計算を行い、10年目の1年間を解析対象期間とした。初期条件に含まれる不確実性は計算開始後1年間のスピンアップ期間中に解消され、2年目以降の本計算では各生態系変数等は初期条件によらずに内因的な物質収支にしたがって周期的に変動することを確認している。その他の詳細な計算条件等については前報<sup>7)</sup>を参照されたい。

## 3. 一次生産の季節変動

### (1) 表層Chlaの季節変動

季節平均した表層Chla濃度分布 (図-2) を見ると、太平洋沿岸の黒潮流路周辺海域、その南側沖合海域、あるいは北海道から北関東にかけての広い海域では顕著な春季ブルームが見られ、流路に沿ってChla濃度が增大している。温暖期に入ると全体的に一旦減少し、その後秋季から冬季にかけて徐々に増加するような季節変動が確認される。ブルームの程度は、例えば遠州灘沖 (黒潮域あるいはKRと呼称; 図-1参照) よりも、房総半島沖から黒潮続流域 (KEと呼称) の方が顕著であるなど、明確な空間構造が存在する。一方、日本海では大陸沿岸や極前線付近を中心にChla濃度はむしろ冬季で最大となる。

### (2) 黒潮域・続流域における窒素収支

次に、春季ブルームに代表される表層一次生産の季節変動機構を評価する。ここでは黒潮域KR、続流域KEの二海域に着目し、黒潮を横断するように東経138度、145度に検査線を設定し、黒潮流軸上および緯度方向に1度ずつ離れた各3点 (図-1赤星印) における水深300 mまでの表層窒素収支を調べる (図-3)。黒潮流軸位置は黒潮の主流部が位置する水深50 mにおける主流速の年平均値が最大となる場所と定義している。

本NPZDモデルでは、窒素ソースは混合層下方に分布する $\text{NO}_3^-$ のみを考慮しており、これが捕食や分解を通じ

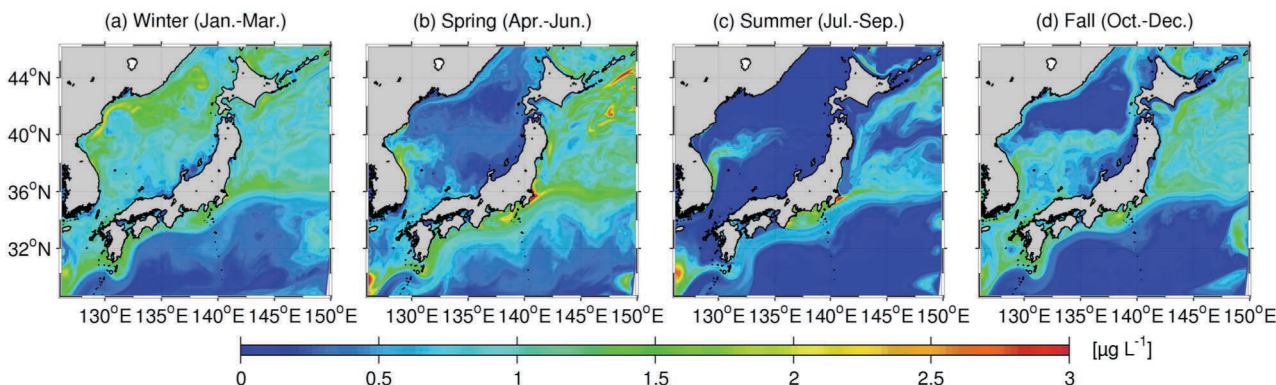


図-2 季節平均した海洋表層 Chla 濃度分布. 左から (a) 冬季, (b) 春季, (c) 夏季, (d) 秋季における結果.



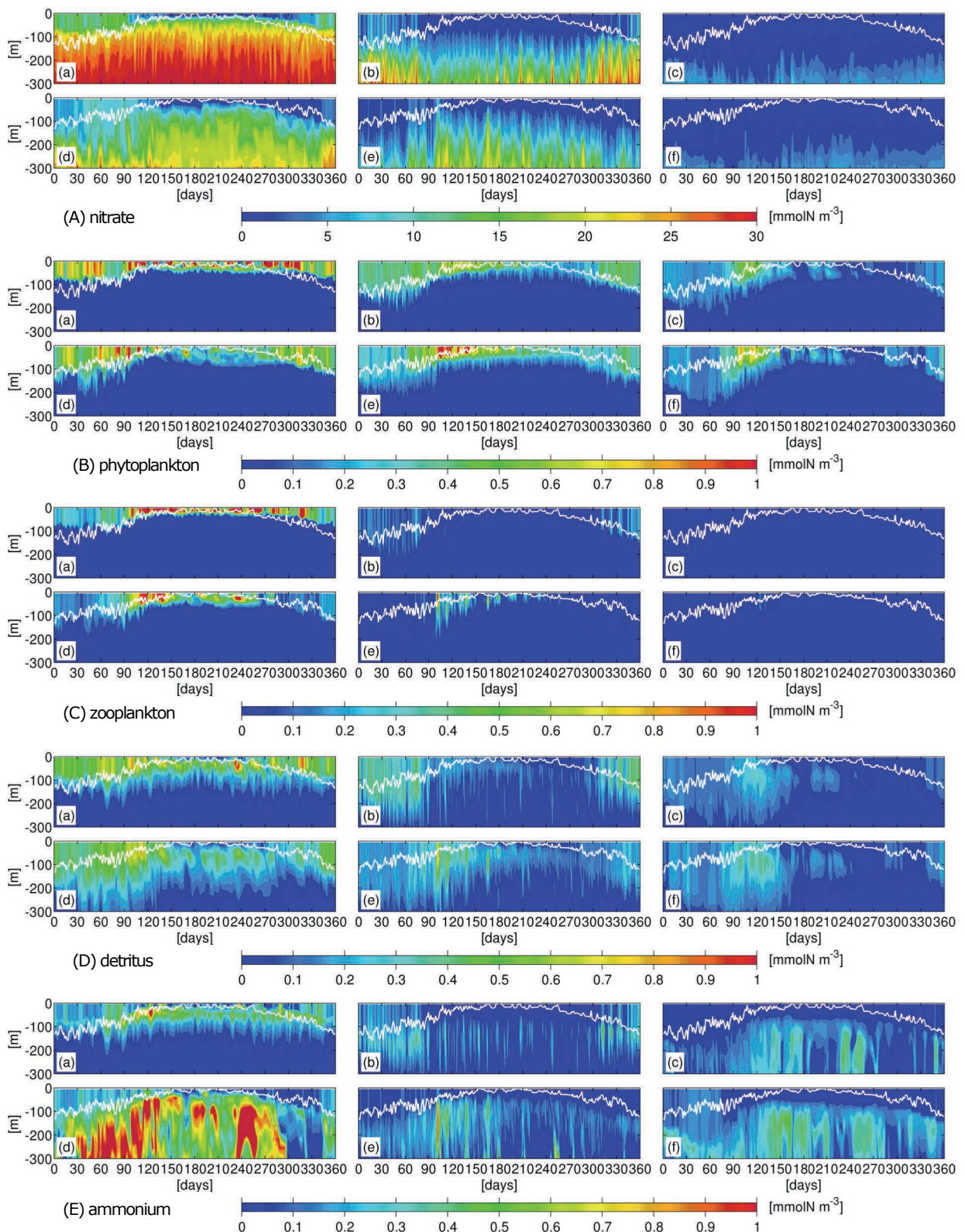


図-3 窒素量収支に関する Hovmöller 図. 横軸：日，縦軸：水深. 6枚1セットの各パネルは，上から(A) 硝酸塩  $\text{NO}_3^-$ , (B) 植物プランクトン, (C) 動物プランクトン, (D) デトリタス, (E) アンモニウム塩  $\text{NH}_4^+$ であり，各パネル内は，(a-c) 黒潮域 KR 東経 138 度ライン，(d-f) 黒潮続流域 KE 東経 145 度ライン上の検査点を示し，左から，(a, d) 黒潮流軸から北へ1度，(b, e) 流軸直上，(c, f) 南へ1度離れた地点での各成分内窒素量である (図-1 参照). 白線は各検査点における混合層深さ.

て植物・動物プランクトン，デトリタス， $\text{NH}_4^+$ に再帰的に分配される。まず，窒素ソースとなる $\text{NO}_3^-$ の表層への供給量には混合層の消長に対応した季節変動が見られる。

混合層内の $\text{NO}_3^-$ 濃度は寒冷な混合期に混合層厚の増加とともに増大し，温暖な成層期に減少する。この変動に対してまず植物プランクトンが鋭敏に反応し，そこから1-

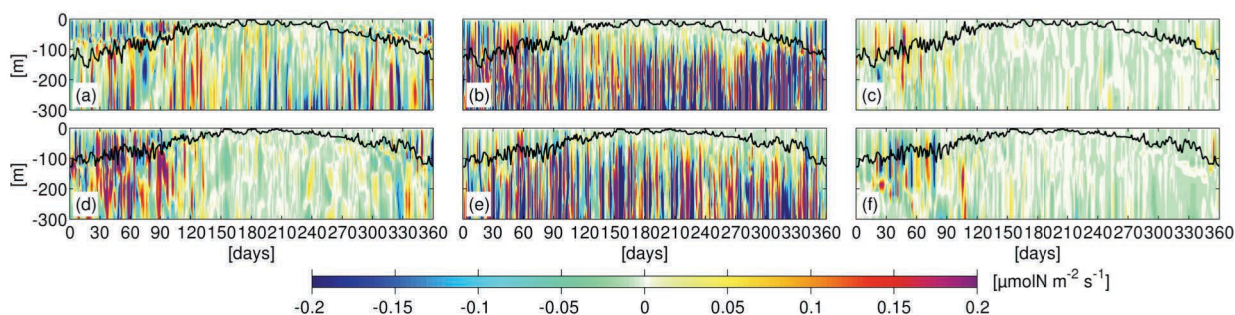


図-4 図-3と同じ。ただし鉛直NO<sub>3</sub>フラックス渦成分(渦輸送)のHovmöller図。上向き輸送が正。黒線は混合層深さ。

2ヶ月遅れて動物プランクトンが増加する。春季ブルーム期(4-5月)には、窒素は主として植物プランクトンへ、流軸北では動物プランクトンにも移行しており、プランクトンとNO<sub>3</sub>には強い負の相関がある。つまり、植物プランクトンが増殖することで表層のNO<sub>3</sub>濃度は低下し、反対に日射不足や捕食などによって植物プランクトンが低濃度の場合はNO<sub>3</sub>濃度が比較的高く保たれている。

空間的な差異に目を転じると、前報でも確認されたように、黒潮流軸(図-3 (b), (e))および南側(図-3 (c), (f))では黒潮域よりも続流域の方がブルームの程度や表層植物プランクトン濃度の平均値が高い。流軸北側では、黒潮域での亜表層NO<sub>3</sub>は続流域よりもかなり高いにも関わらず、植物プランクトン濃度は同程度か、むしろ続流域の方が高い。流軸上および南側では動物プランクトンは極めて少なく、プランクトンの枯死に伴うデトリタスと、有機物分解から生じるNH<sub>4</sub><sup>+</sup>の二成分に窒素の大部分が移行している。これら2成分は平均的に続流域の方が高く、沈降しながら移行・分解されるため混合層下部やその下方で増大している。続流域北側におけるNH<sub>4</sub><sup>+</sup>は水深300 m以下まで分布しており、窒素を下方に再循環する役割を果たしている。また、NO<sub>3</sub>とプランクトンには明瞭な数日周期の短周期変動成分が重畳しており、黒潮流路変動や渦などの影響が強く示唆される。

以上のことから、NPZDモデルの各成分は、いずれも窒素ソースであるNO<sub>3</sub>と連動して時空間変動しており、本海域における生態系システムや一次生産の構造を評価するためには、NO<sub>3</sub>の表層供給過程を明らかにすることが極めて重要であると理解される。

#### 4. 海洋表層へのNO<sub>3</sub>供給

##### (1) NO<sub>3</sub>鉛直フラックス渦輸送成分の時間変動

黒潮域、続流域における海洋表層一次生産を支配しているNO<sub>3</sub>の鉛直輸送の時空間変動について検討する。亜表層に賦存するNO<sub>3</sub>を表層へ直接輸送するNO<sub>3</sub>鉛直フラックスを考え、周波数フィルターおよびReynolds分解を用いて周期90日以上の季節変動成分(平均輸送)と、それ以下の短周期変動による渦成分(渦輸送)に分離する。NO<sub>3</sub>の鉛直輸送量に対する渦輸送の寄与は平均輸送

よりも1桁以上大きいため、以下ではNO<sub>3</sub>渦輸送成分に着目し、その時空間構造を照査する。

黒潮域、続流域に定義した各3つの検査点(図-1赤星印)における鉛直NO<sub>3</sub>渦輸送成分のHovmöller図を図-4に示す。全体的に渦輸送は正(暖色)すなわち上向き輸送が卓越しているが、黒潮域北側(図-4(a))の冬季混合層内などで下方輸送(負, 寒色)が発達する場所や期間がある。両海域ともに全検査点においてNO<sub>3</sub>濃度(図-3A)とNO<sub>3</sub>渦輸送の変動は概ね対応している。両者の短周期成分にも高い相関が見られることから、NO<sub>3</sub>の表層への供給に対して中規模渦・サブメソスケール渦が影響を与えていることが示唆される。混合層内におけるNO<sub>3</sub>渦輸送は寒冷期の混合層の発達とともに強化されており、その傾向は流軸から1度南北に離れた検査点でより明瞭に見られる。反対に、流軸上検査点では年間を通じて混合層以深での渦輸送が強い。全ての地点で夏季を中心とした成層期には表層付近でNO<sub>3</sub>渦輸送が著しく抑制されて一次生産が低下する(図-3)。

##### (2) NO<sub>3</sub>鉛直渦輸送の空間分布と季節変化

NO<sub>3</sub>鉛直渦輸送を海表面から水深200 mまで鉛直積分し、さらに季節平均することで、渦輸送空間分布とその季節変化を調べる(図-5)。まず第一に、渦輸送は大局的には黒潮流路に沿って強く発達しており、北海道から北関東沖、朝鮮半島東岸などを含めて極めて限られた海域でのみ顕在化することが分かる。鉛直渦輸送は黒潮流路に沿って何度か符号変化を生じており、例えば、トカラ海峡周辺では負(下向き)、九州東岸から四国沖にかけて概ね正(上向き)、潮岬を通過して遠州灘沖に至ると負になり、駿河湾沖から伊豆海嶺にかけて再度反転し、続流域までの海域では概ね正になっている。また、渦輸送には明瞭な季節差が確認され、冬季から春季の混合期に強化され、夏季から秋季にかけては弱化している。特に冬季(図-5(a))に大規模な構造変化が生じており、遠州灘沿岸部で負、続流域北側から東北沖の広い海域で強い正の渦輸送が発現する。一方で春季から秋季までの渦輸送は比較的類似した分布になっている。このような渦輸送の卓越方向の時空間構造は、表層Chla濃度分布



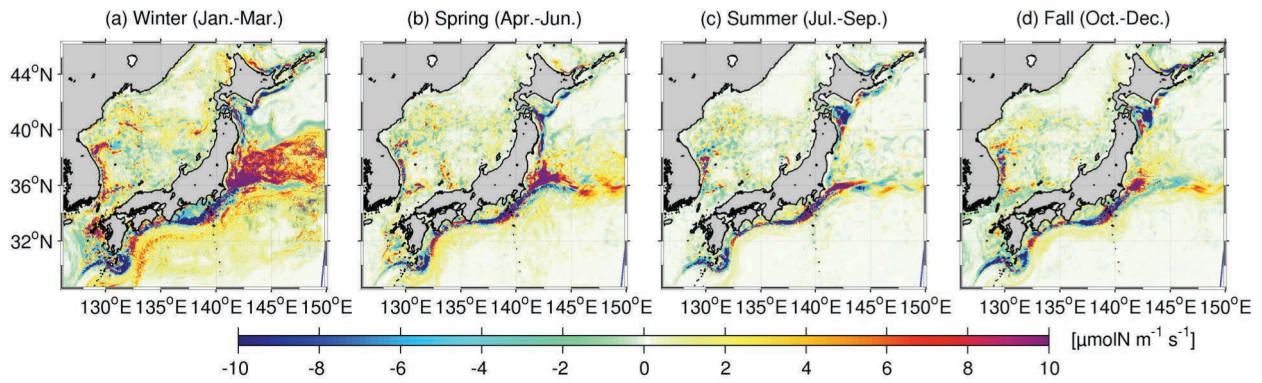


図-5 (a) 冬季, (b) 春季, (c) 夏季, (d) 秋季における水深 200m まで積分した鉛直 NO<sub>3</sub>フラックス渦成分. 鉛直上向きを正と定義している.

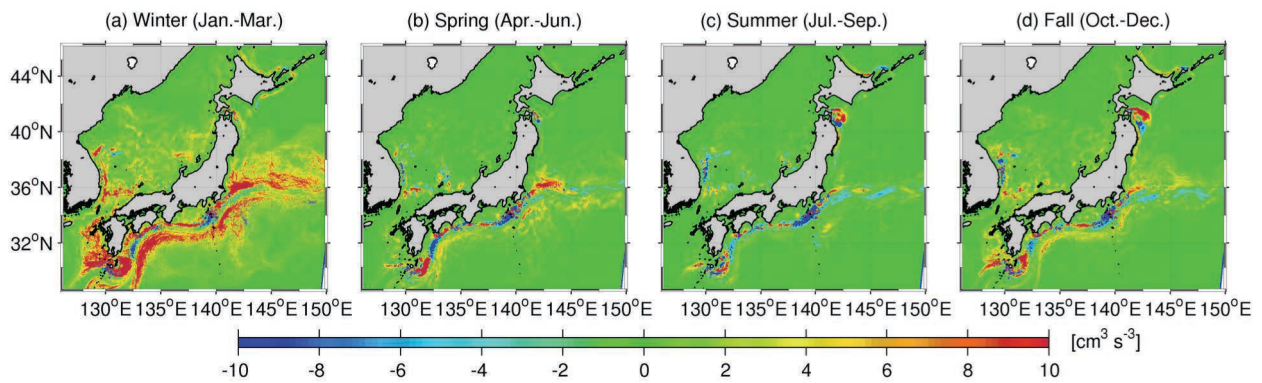


図-6 図-5 と同じ. ただし, 傾圧転換率  $P_e K_e$ .

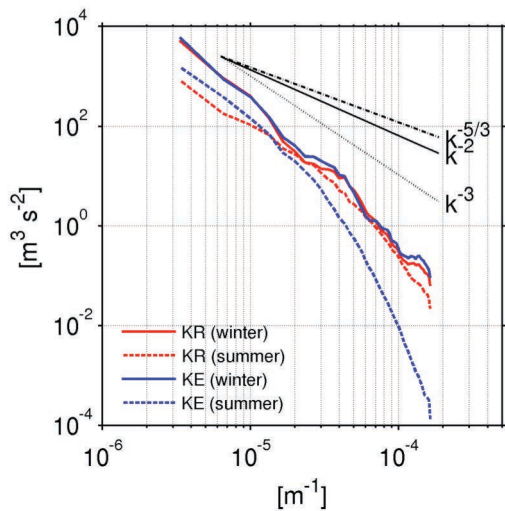


図-7 黒潮域 KR (遠州灘沖) と黒潮続流域 KE (図-1 黒点線枠) における冬季 (1-3 月) と夏季 (7-9 月) の表層運動エネルギーの波数スペクトル.

(図-2) と極めて良好に一致しており, 正のNO<sub>3</sub>渦輸送が表層一次生産を支えていることが分かる.

### (3) NO<sub>3</sub>鉛直渦輸送の発達機構

NO<sub>3</sub>鉛直渦輸送の発達機構を検討するために, 渦輸送に直接関与する渦運動エネルギー (EKE) の収支式を考えると, EKEの時間変化は主としてソース項である傾圧転換率 $K_m K_e$ と傾圧転換率 $P_e K_e$ の符号と大きさで決まる.

$K_m K_e$ はReynolds応力のなす仕事によるシア生成効果を表し, 本研究の状況では主に地形性シアによるEKEの増減効果を反映する. 一方,  $P_e K_e$ はavailable potential energy (APE) からEKEへの転換率であり, 次式で定義される.

$$P_e K_e = -\frac{g}{\rho_0} \overline{\rho' w'} \quad (1)$$

ここに,  $\rho$ : 海水密度,  $\rho_0$ : 基準密度 ( $1027.5 \text{ kg m}^{-3}$ ),  $g$ : 重力加速度,  $w$ : 鉛直流速, プライムは季節変動成分 (周期90日以上) を除去した渦成分を表す.  $P_e K_e > 0$  の場合は傾圧不安定によってEKEが増大し, 負の場合は再成層化されて安定状態が維持されると解釈される.

$K_m K_e$ と $P_e K_e$ の季節平均分布を調べたところ, 絶対値としては $P_e K_e$ が $K_m K_e$ より数割大きい程度であったが,  $K_m K_e$ は年間を通じて空間的にほぼ不変であり, 明確な季節差が見られたのは $P_e K_e$ であった. そこで $P_e K_e$ に着目し, 海表面から水深200mまで鉛直積分した $P_e K_e$ の季節平均分布を求めた (図-6). 一見して分かるように, 冬季 (図-6 (a)) に黒潮流路周辺全域で $P_e K_e$ が正の大きな値を取ることから, 海面冷却の強化に伴う傾圧不安定の発達によって冬季のEKEとNO<sub>3</sub>鉛直渦輸送 (図-5(a)) が強化されることが示されている. 冬季から春季にかけて $P_e K_e$ は急減し, 夏季・秋季までさらに漸減する. 冬季を中心に平均的に $P_e K_e$ は正值を取るが, 九州東岸, 駿河湾・伊豆海嶺海域では負値を取る傾向にあり, 渦輸送の空間構造・

季節変化(図-5)に強く関与していることが分かる。

最後に、遠州灘沖黒潮域KRおよび続流域KE(図-1黒点線枠)における表層運動エネルギーの波数スペクトルを求めた(図-7)。冬季は温暖期(例として夏季を表示)と比べてスペクトル勾配が緩やかで、サブメソスケールを含む高波数帯を中心に全体的にエネルギーレベルが高い。したがって、寒冷期の海面冷却に伴う傾圧不安定の発達によって、特に冬季においてサブメソスケール渦と中規模渦が同時に強化されることが分かる。それに伴って一次生産を支えるNO<sub>3</sub>鉛直渦輸送が顕著になり、渦輸送が正となる海域(例えばKE)では、冬季から春季に下層からの栄養塩供給が増大し、春季になって日射が増えると植物プランクトン生育に好適な条件が満たされてブルームを生じる(図-2(b), 図-3B)。一方で、渦輸送が負になる海域(例えばKR)では下向き輸送が助長されることになるため、一次生産は強化されにくい状況が維持され、ブルームは抑制されると理解される。

## 5. おわりに

本研究では、我が国太平洋沿岸海域、東京湾や瀬戸内海に代表される内湾域の水質・生態環境を強く支配している黒潮周辺における一次生産の季節・空間変動特性をROMS-NPZDモデルを用いて精緻に評価した。黒潮流路周辺海域は他海域よりも大幅に一次生産が活発な海域であると同時に、顕著な時空間変動を伴っていた。窒素収支から見た表層生態系構造は、亜表層に豊富に賦存する硝酸塩NO<sub>3</sub>の鉛直渦輸送に強く支配されていた。冬季に顕著になる海面冷却などによって引き起こされる傾圧不安定によって中規模渦とサブメソスケール渦が同時に強化され、それに伴って渦輸送が強化されることがブルームの引き金になっていた。また、栄養塩の鉛直渦輸送や、渦エネルギー生成に寄与する傾圧転換率 $P_e K_e$ は、黒潮流路の屈曲、岬・海嶺などの地形の影響を強く受けて空間

的に不均一に分布していた。したがって、内湾や沿岸域の水質・生態環境を評価するためにも、黒潮周辺の詳細な乱流構造の理解をさらに深化させる必要がある。

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(JPRMJCR12A6, 代表者：山崎秀勝)、科学研究費(15H00977, 15H04049, 15KK0207, 代表者：内山雄介)の援助を受けた。

## 参考文献

- 1) Martin, J. H., G. A. Knauer, D. M. Karl, and W. W. Broenkow: VERTEX: Carbon cycling in the northeastern Pacific, Deep-Sea Res. Part I, Vol. 34, pp. 267-285, 1987.
- 2) Nakata, H., S. Kimura, Y. Okazaki, and A. Kasai: Implications of meso-scale eddies caused by frontal disturbances of the Kuroshio current for anchovy recruitment, J. Mar. Sci., Vol. 57, pp. 143-152, 2000.
- 3) Sasai, Y., K. J. Richards, A. Ishida, and H. Sasaki: Effects of cyclonic mesoscale eddies on the marine ecosystem in the Kuroshio Extension region using an eddy-resolving coupled physical-biological model, Ocean Dyn., Vol. 60, pp. 693-704, 2010.
- 4) Clayton, S., T. Nagai, and M. J. Follows: Fine scale phytoplankton community structure across the Kuroshio Front, J. Plankton Res., Vol. 36, pp. 1017-1030, 2014.
- 5) Matsuno, T., J.-S. Lee, and S. Yanao: The Kuroshio exchange with the South and East China Seas, Ocean Sci., Vol. 5, pp. 303-312, 2009.
- 6) 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.
- 7) 内山雄介, 鈴江洋太, 山崎秀勝: 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), Vol. 72, No. 2, pp. I\_1369-I\_1374, 2016.
- 8) 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し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. I\_365-I\_370, 2015. (2017.3.15 受付)

## BIOGEOCHEMICAL RESPONSES TO SEASONAL OCEANIC VARIABILITY AROUND THE KUROSHIO ANALYZED USING A ROMS-NPZD MODEL

Yota SUZUE, Yusuke UCHIYAMA and Hidekatsu YAMAZAKI

The Kuroshio off Japan is accompanied by vigorous eddy and frontal activity both on meso- and submesoscales, which significantly affects the biogeochemical productivity in the upper ocean. We examine the seasonal variability of eddy-induced nitrate transport and resultant biogeochemical response around the Kuroshio using a climatological ROMS-NPZD model. A nitrogen budget analysis indicates that nitrogen exists mostly in the phyto- and zooplankton compartments in both the Kuroshio and Kuroshio Extension regions during the spring bloom. The increased zooplankton further enriches detritus that settles down by about 100 m, leading to an increase of ammonium below the mixed layer. In winter, eddy-induced nitrate transport is enhanced in the region about 1° away from the Kuroshio axis. The baroclinic instability due to the surface cooling in winter generates meso- and submesoscale eddies and substantially promotes eddy-induced vertical nitrate transport.