

# 遠州灘沿岸域における黒潮流路変動に伴う栄養塩輸送および表層一次生産の変動特性について

鯉江 岳<sup>1</sup>・内山 雄介<sup>2</sup>・張 旭<sup>3</sup>・増永 英治<sup>4</sup>

<sup>1</sup>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)

<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)

E-mail: uchiyama@harbor.kobe-u.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>3</sup>Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Peking University (Beijing 100871, P. R. China)

<sup>4</sup>正会員 茨城大学講師 地球・地域環境共創機構 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

遠州灘沖における黒潮流路変動に伴う栄養塩輸送と表層一次生産の変動特性およびそのメカニズムを評価するために、領域海洋循環モデルと低次生態系モデルをカップリングした3次元モデルを用いて、一次生産を支える硝酸塩フラックス輸送過程に関する数値解析を行なった。黒潮の蛇行の有無によって硝酸塩輸送の差異が明確に発現し、非蛇行時における表層一次生産が蛇行時の約1.5倍となることを見出した。また、硝酸塩フラックス収支解析から、蛇行時に比べて非蛇行時は亜表層から混合層内に鉛直輸送される硝酸塩量が増幅されること、その主要因が黒潮流軸北側や伊豆小笠原海嶺での硝酸塩の活発な湧昇にあり、表層に供給された硝酸塩が黒潮と沿岸地形によって遠州灘沖に形成される反時計回りの中規模渦によって水平輸送されることなどを明らかにした。

**Key Words :** ROMS-NPZD model, Kuroshio, chlorophyll-a, mesoscale eddy, nitrate flux

## 1. はじめに

海洋での炭素貯留は、地球温暖化緩和策の中でも重要な要素として広く認知されている。植物プランクトン増殖を主体とする一次生産により、光合成を通じて大気中の二酸化炭素が固定され、捕食や分解を受けながら海洋中を循環し、最終的には死骸や排泄物などの有機粒子として深海へと沈降し、海底に堆積することで半永久的に分離される。この過程は「生物ポンプ」とも呼ばれ、大気中の二酸化炭素の削減をもたらすため、一次生産の増加は海洋の炭素貯留を大きく促進することが期待される。

外洋における一次生産能力は沿岸域の半分程度と見積もられるが<sup>1)</sup>、全海洋面積の約90%を占める外洋域での一次生産の総量は大きく、沿岸域における「ブルーカーボン」と同様に炭素固定に大きく寄与している。植物プランクトンは、その分布や量を栄養塩供給に大きく依存しながら光合成が可能な海洋表層で増殖するため、陸水起源の栄養塩供給が期待できない外洋域では、混合層以深の亜表層に多く賦存する硝酸塩の表層への上方輸送が重要となる。海洋中の中規模渦は、それらに付帯する湧昇や沈降によって亜表層栄養塩を鉛直輸送するため、沿岸に比べて相対的に貧栄養な外洋において一次生産を維

持する機能を担っていると考えられている<sup>2)</sup>。

黒潮は我が国太平洋沿岸域へ栄養塩を水平輸送する **nutrient stream** であるが<sup>3)</sup>、その流路は蛇行し<sup>4)</sup>、特に本研究で対象とする遠州灘周辺では流路に応じて表層付近での硝酸塩の鉛直輸送量が大きく変化することがある<sup>5)</sup>。しかしながら、硝酸塩が豊富な亜表層から貧栄養な表層への硝酸塩の鉛直輸送、表層混合層内における水平輸送、およびそれらに伴う植物プランクトンの応答などについては十分な科学的知見が得られていないのが現状である。

そこで本研究では、遠州灘周辺海域を対象に、黒潮蛇行時と非蛇行時における一次生産と硝酸塩輸送過程の差異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モデルを用いて詳細な栄養塩フラックス収支解析を行った。さらに、黒潮流路の違いによる一次生産変動およびその形成メカニズムについて評価したので、その結果を報告する。

## 2. ROMS-NPZDモデルの概要

本研究では、黒潮蛇行の有無による物質循環応答を評

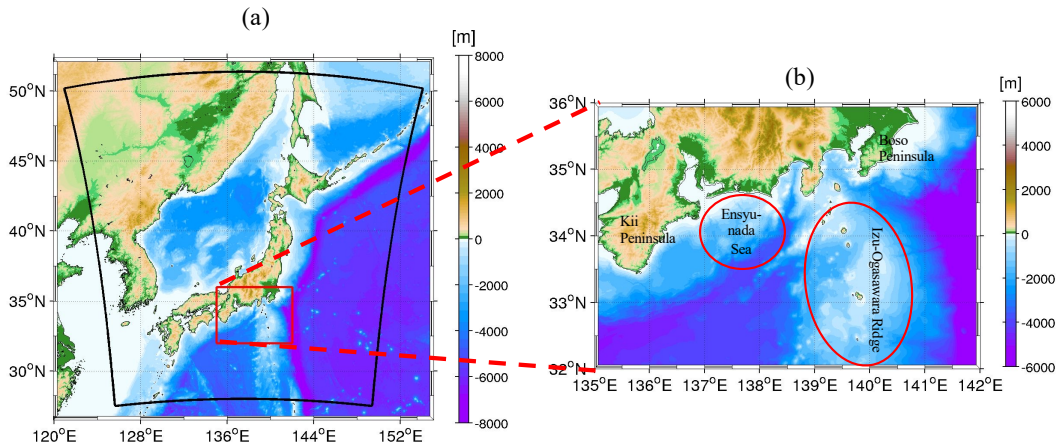


図-1 ROMS-NPZDL1モデル計算領域(黒枠)と水深分布(カラー)。(a)日本全域、(b)(a)の赤枠解析領域の拡大図。

表-1 ROMS-NPZDL1モデル計算条件

計算期間	2008年1月1日~2015年12月31日
格子数	水平784×864×鉛直32層
水平空間解像度	3km
海上風応力	JMA GPV-GSM (日平均値)
海面フラックス	NOAA COADS (月平均気候値)
地形条件	SRTM30PLUS+J-EGG500
初期・境界条件	JAMSTEC JCOPE2 (日平均値)

価するため、蛇行期(2013年12月1日~2014年2月28日)と非蛇行期(2014年12月1日~2015年2月28日)を設定し、各変量に対する3ヶ月間の時間平均値を算出し、解析を行った。3次元海水流動は、JAMSTEC JCOPE2海洋再解析データ<sup>6)</sup>(水平解像度約10 km)の日平均値を初期条件および境界条件とし、領域海洋循環モデルROMSを用いた1-way offlineネスティングによって解像度3 kmのROMS-L1領域へとダウンスケーリングするJCOPE2-ROMSモデルにより評価した(図-1, 表-1)。海上風応力には気象庁GPV-GSMの日平均値、その他の海面フラックスにはCOADSの月平均気候値を与え、JCOPE2海表面値でフラックス補正を行った。スピンアップ期間を除いた計算期間は2008年1月1日から2015年12月31日の8年間である。

本研究では、Fasham<sup>7)</sup>、Gruber<sup>8)</sup>による窒素ベースの低次生産NPZDモデルを用い、ROMSとカップリングさせたオンライン計算を行った。このモデルでは、栄養塩(硝酸塩 $\text{NO}_3^-$ およびアンモニウム塩 $\text{NH}_4^+$ )、植物プランクトン、動物プランクトン、デトリタスの5要素が考慮されている。栄養塩のソースは表層混合層以下の海洋亜表層以深のみとし、陸水影響を排除して海洋応答のみを解析する枠組みとなっている。硝酸塩はWorld Ocean Atlas 2005<sup>9)</sup>による季節平均気候値、植物プランクトンにはMODIS/Aquaの月平均値に対してMorel & Berthos<sup>10)</sup>の鉛直分布モデルを適用して得られる3次元分布を初期条件、境界条件として与えた。その他の計算条件や再現性担保の詳細についてはUchiyama<sup>3)</sup>、Zhang<sup>5)</sup>を参照されたい。

### 3. 遠州灘沖の黒潮流路と表層一次生産応答

遠州灘海域における蛇行期・非蛇行期の期間平均流況(海面高度SSHと表層流速)を見ると(図-2)、黒潮の南北でSSHの差が大きい。また、黒潮流軸周辺の流速は強く、流軸北側において灘スケールの反時計回り水平循環流が形成されている(なお、黒潮流軸は各期間平均SSH=0.2 mの等値線で定義した)。蛇行期・非蛇行期ともに東経138度から139度付近の黒潮流軸北側の循環流中心部において周囲よりもSSHが低下しており、この循環流が持続的な低気圧性中規模渦に対応していることが分かる。また、蛇行期の方が非蛇行期よりも渦中心部のSSHが低く、循環流の流速も速いことから、中規模渦がより強化されていたことが示されている。

海洋における一次生産量は、植物プランクトン量を代表するクロロフィルa濃度(以降、chl-aと略記する)に概ね比例するため、本研究ではchl-aを表層一次生産の程度を表す指標として取り扱う。蛇行期と非蛇行期の表層chl-aの期間平均値分布を見ると(図-3)、両期間ともに流軸北側の遠州灘全域でchl-aが著しく高く、SSH分布(図-2)と同様に黒潮流路の南北で極めて大きな差異が出現している。モデルでは陸水影響を排除しているため、この高いchl-aは黒潮の影響を強く受けて形成されたものと考えられる<sup>3)</sup>。また、紀伊半島や房総半島の東岸近傍の沿岸域でchl-aが大きく上昇しているが、これは沿岸湧昇などにより海水の鉛直混合が促進された結果を反映したものであると推察される。さらに、低気圧性中規模渦(図-2)に対応して、SSH極小部を中心に周囲に比べてchl-a濃度が上昇しており、その程度は蛇行期よりも非蛇行期の方が顕著で、渦中心付近でのchl-aは非蛇行期の方が1.5倍程度高くなっている。以上の結果から、黒潮流路は遠州灘海域での一次生産に重要な影響を与えており、低気圧性渦付近において非蛇行期の一次生産が蛇行期よりも5割程度上昇することが明らかになった。

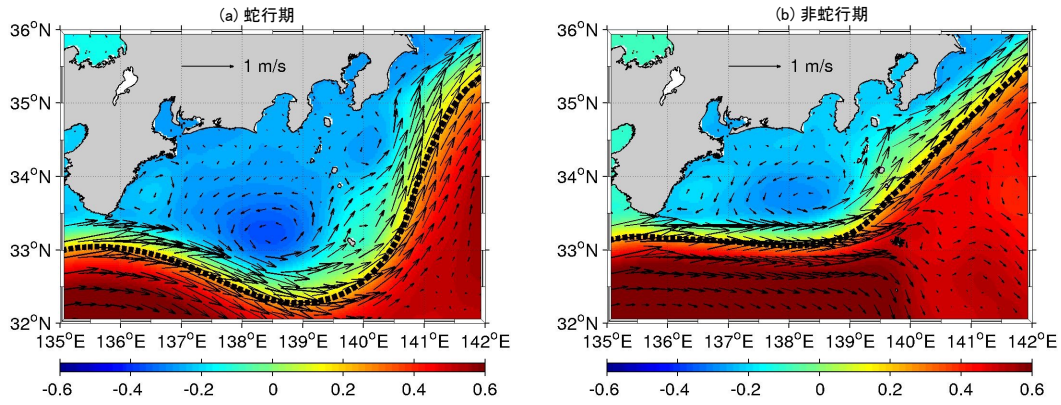


図-2 海表面高度 (SSH (m). カラー) と表層流速ベクトル (m/s) の期間平均値分布. (a) 蛇行期, (b) 非蛇行期. 黒点線は海面高度 SSH を 0.2m と定義して求めた黒潮流軸を示している.

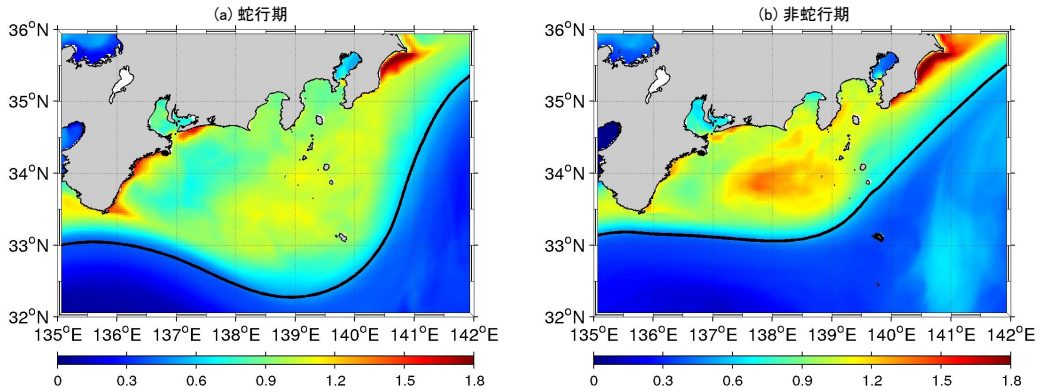


図-3 カラーは表層 chl-a 濃度 ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) の期間平均値分布. 黒線は図-2 と同様に定義された黒潮流軸を示している.

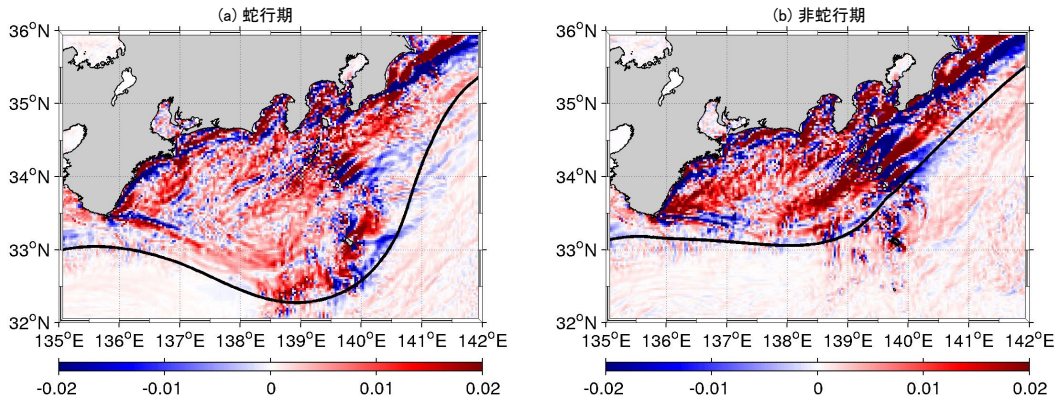


図-4 カラーは硝酸塩収支式(1)中の時間変化項 ( $\partial N/\partial t$ ) ( $\mu\text{mol N m}^{-3} \text{s}^{-1}$ ), 黒線は図-2 と同様に定義された黒潮流軸.

#### 4. 表層一次生産変動の形成機構

##### (1) 硝酸塩収支解析

次に、前章で明らかとなった黒潮流路変動に伴う表層一次生産応答の差異の原因を探るべく、chl-a変動を支配する硝酸塩濃度 $\text{NO}_3^-$  (以下、 $N$ と略記する)の収支解析を行う。本解析では、流れによる物理的な $N$ 変動を取り出して評価するために、NPZDモデル中のソース・シンク項 (生化学的な反応項)を除いた $N$ の保存式

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\nabla \cdot (N\mathbf{u}) + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial N}{\partial z} \quad (1)$$

を考える。ここに、 $\mathbf{x} = (x, y, z)$ : 東向き, 北向き, 鉛直上向き座標,  $\mathbf{u} = (u, v, w)$ :  $x, y, z$ 各方向への流速,  $K_z$ : 鉛直渦拡散係数 (ROMSのKPP乱流モデルにより評価),  $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$ である。なお、水平渦拡散係数はROMS-NPZDモデルではゼロに設定しているため考慮しない。表層混合層内における期間平均での $N$ 収支解析を行うために、以下のような時間平均と混合層

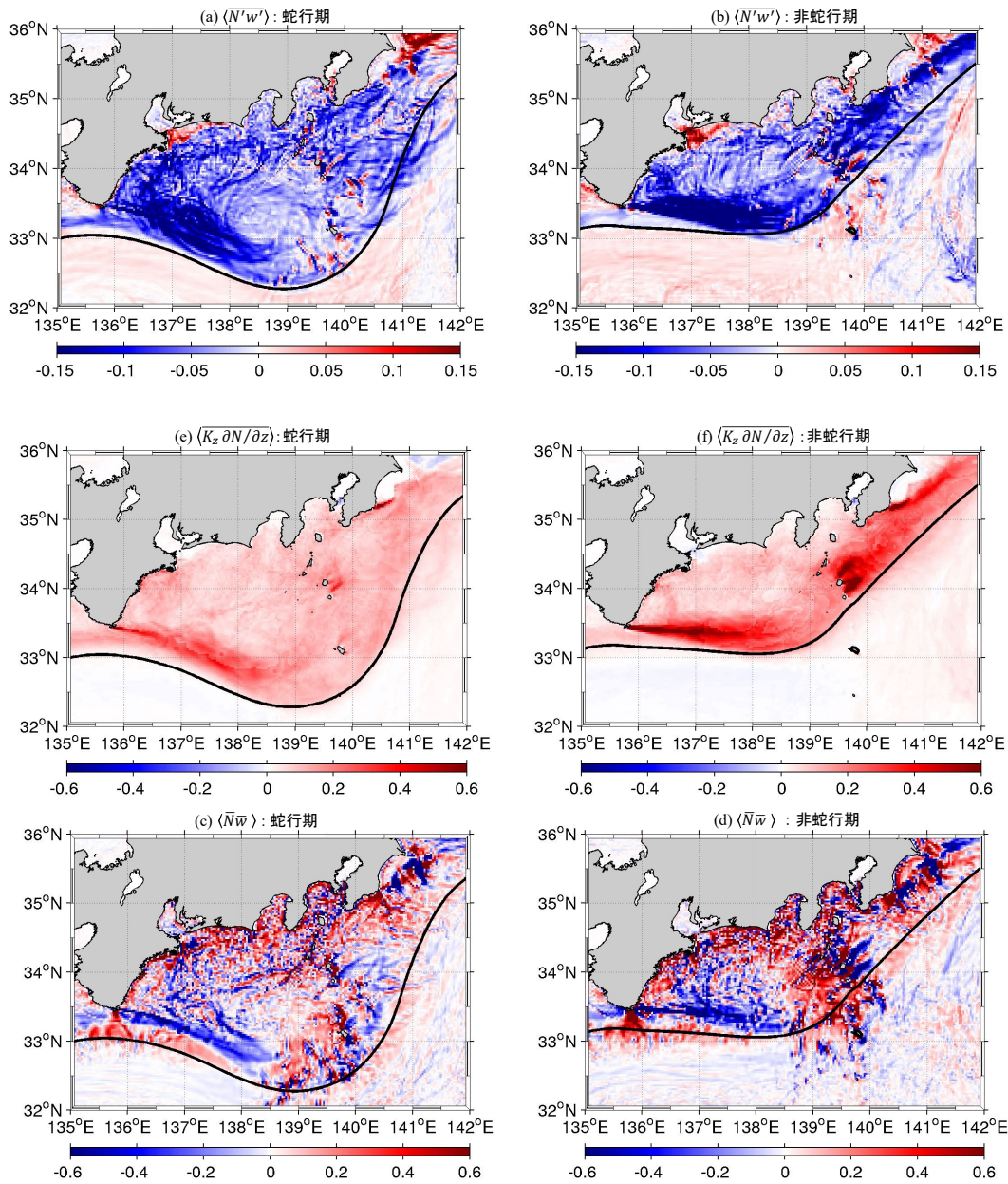


図-5 左列：(a, c, e)蛇行期，右列：(b, d, f)非蛇行期における，上段：(a, b)鉛直渦フラックス $\langle \overline{N'w'} \rangle$ ，中段：(c, d)鉛直平均フラックス $\langle \overline{N\bar{w}} \rangle$ ，下段：(e, f)鉛直拡散フラックス $\langle K_z \partial N / \partial z \rangle$ の各成分の空間分布。単位はいずれも  $(\mu\text{mol N m}^{-2} \text{s}^{-1})$ 。黒線は図-2と同様に定義された黒潮流軸を示している。

鉛直平均を組み合わせた演算子 $\langle \rangle$ を定義する。

$$\langle A \rangle = \frac{1}{\zeta + h_{bls}} \int_{-h_{bls}}^{\zeta} \left( \frac{1}{T} \int_T A dt \right) dz \quad (2)$$

ここに、 $A$ ：任意の変数， $h_{bls}$ ：KPP乱流モデルによる表層混合層底部の水深（検査領域における混合層の平均深さは93.0 m）， $\zeta$ ：海面高度， $T$ ：蛇行期・非蛇行期に対応する3ヶ月である。

表層混合層内における平均的な $N$ 変動を見るために，式(1)左辺の時間変化項 $(\partial N / \partial t)$ の空間分布を図-4に示す。定義から， $\langle \partial N / \partial t \rangle$ は混合層内における単位体積

あたりの硝酸塩濃度の時間変化を表し，暖色系は $N$ の増加を，寒色系は $N$ の減少に対応している。 $\langle \partial N / \partial t \rangle$ の符号は比較的小さな空間スケールで正負に変動するものの，全体的には正値が卓越しており，しかもその程度は黒潮流軸北側で著しく大きい。また，蛇行期と非蛇行期を比較すると，遠州灘沿岸では全体的に非蛇行期の方が値が大きい。これらの傾向は表層chl-a分布（図-3）に概ね対応しており，混合層内での $N$ の増加およびその程度によって遠州灘沿岸域での表層一次生産量が規定されていることが分かる。

一方，流軸北側海域では，伊豆小笠原海嶺や沿岸域を

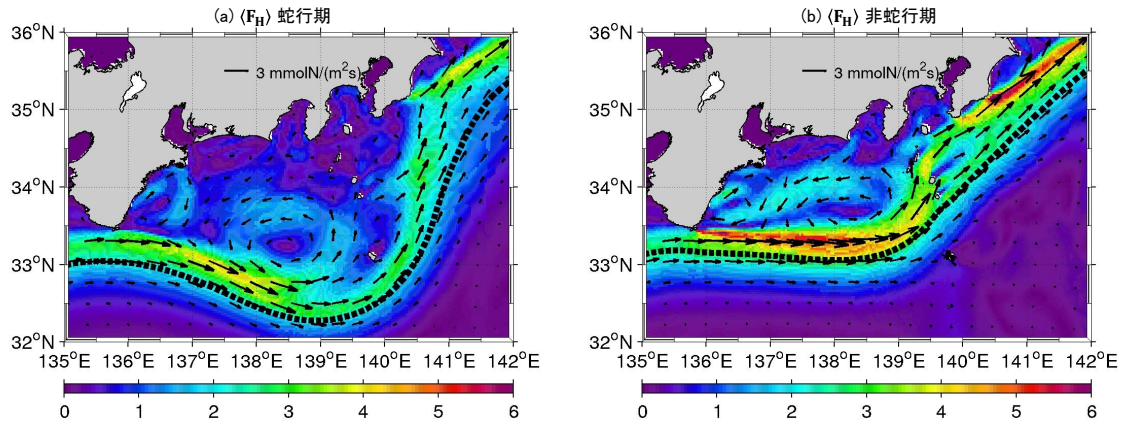


図-6 水平硝酸塩フラックス ( $F_H$ ) ベクトル ( $\text{mmolN}/\text{m}^2\text{s}$ ) の空間分布. カラーは絶対値 ( $|F_H|$ ). 黒破線は図-2と同様に定義された黒潮流軸を示している.

中心に  $\langle \partial N / \partial t \rangle$  の符号変化が顕著に生じている. 特に伊豆小笠原海嶺およびその下流側 (以下, 黒潮下流域と呼称) では非蛇行期における符号変化が大きく, 島嶼部背後において正負の値が強化されている. このことは, 黒潮下流域における地形的な作用により, 混合層と亜表層での硝酸塩の鉛直交換が活発であることを示している.

## (2) 硝酸塩フラックスの定義

遠州灘海域での表層一次生産は混合層内の  $N$  の増加傾向が卓越することで説明された. また, 蛇行・非蛇行時の  $\text{chl-a}$  の差異についても  $N$  増加の差異によく対応していた. そこで次に,  $\langle \partial N / \partial t \rangle$  の原因, すなわち混合層に流出入する硝酸塩輸送機構を解析するために, 式 (1) 右辺の各項についての評価を行う. まず, 本海域においては, 表層付近の  $N$  輸送に対して渦運動に伴う  $N$  フラックスの重要性が報告されている<sup>23,25</sup>ことから, 式 (1) 右辺第一項の移流フラックスに対してReynolds分解を行う.

$$\begin{aligned} Nu &\approx \overline{N\bar{u}} + \overline{N'u'} \\ &= (\overline{N\bar{u}} + \overline{N'u'}, \overline{N\bar{v}} + \overline{N'v'}, \overline{N\bar{w}} + \overline{N'w'}) \end{aligned} \quad (3)$$

ここに,  $\bar{}$ : アンサンブル平均成分,  $'$ : 渦成分である. 本研究では既往研究<sup>23</sup>にならい, 中規模渦成分を抽出するためにカットオフ周期を90日とした周波数フィルターを用いてReynolds分解を行い, 交差項は十分に小さいと仮定し, 平均成分 ( $\overline{N\bar{u}}$  など) と渦成分 ( $\overline{N'u'}$  など) に分離した. したがって, 鉛直  $N$  フラックス  $F_z$ , 水平  $N$  フラックス  $F_H$  はそれぞれ式 (4), (5) で表される.

$$F_z = \underbrace{\overline{N\bar{w}} + \overline{N'w'}}_{\text{mean adv.}} - \underbrace{K_z \frac{\partial \bar{N}}{\partial z}}_{\text{eddy adv. diffusion}} \quad (4)$$

$$F_H = (F_w, F_v) = (\overline{N\bar{u}} + \overline{N'u'}, \overline{N\bar{v}} + \overline{N'v'}) \quad (5)$$

以下の解析では, 3. (1) と同様に表層混合層内でのフラ

ックス輸送傾向を分析するために, 式 (2) による時空間平均操作を行う. したがって, 例えば  $\langle F_z \rangle$  が正 (負) であるときは硝酸塩が混合層内において上方 (下方) に輸送されることを表す.

## (3) 混合層内における硝酸塩の鉛直輸送

まず, 混合層内における  $\langle \partial N / \partial t \rangle$  に対する鉛直硝酸塩フラックスの寄与を評価するため, 式 (4) で定義した鉛直渦フラックス  $\langle \overline{N'w'} \rangle$ , 鉛直平均フラックス  $\langle \overline{N\bar{w}} \rangle$ , 鉛直拡散フラックス  $\langle K_z \partial N / \partial z \rangle$  の各成分の空間分布を図-5に示す. なお, 表示された各フラックスは式 (2) の時空間平均操作を施した値であるため, これらは混合層下端での鉛直  $N$  流入入に加え, 亜表層の硝酸塩プールと混合層がオーバーラップしたときの混合層内での平均的な鉛直輸送効果を総合的に表現している.

図-5を見ると, 黒潮流軸北側で各フラックスの値が大きく,  $\text{chl-a}$  や  $\langle \partial N / \partial t \rangle$  分布とよく対応していることが確認される. 流軸北側海域での各成分の全体的な傾向としては, 渦成分  $\langle \overline{N'w'} \rangle$  は負 (下方輸送), 拡散成分  $\langle K_z \partial N / \partial z \rangle$  は正 (上方輸送) が卓越している一方で, 平均成分  $\langle \overline{N\bar{w}} \rangle$  は正負の値が混在している.  $\langle \overline{N'w'} \rangle$  の絶対値は他のフラックスの25%程度ではあるが, 既往研究<sup>23</sup>と同様に, 渦輸送が  $N$  の鉛直輸送に対して無視できない影響を与えていることが確認される. 低気圧性中規模渦中心近傍 (図-2) で  $\langle \overline{N'w'} \rangle$  が弱体化, つまり  $N$  の下方輸送が抑制されている点は特筆に値する. このことは, 低気圧性渦による局所湧昇によって硝酸塩の下方輸送が抑制されることを示している. 一方,  $\langle K_z \partial N / \partial z \rangle$  は黒潮流軸のすぐ北側や島嶼部背後で強い正值を取るが, その傾向は特に非蛇行期に顕著であり, シア強化による鉛直混合が  $N$  の上方輸送に寄与していると理解される. 正負が混在する  $\langle \overline{N\bar{w}} \rangle$  は, 全体的には  $\langle K_z \partial N / \partial z \rangle$  と相殺されるように分布しているが, 非蛇行時には伊豆小笠原海嶺周辺で強い正值を取るから, この黒潮下流域

において $N$ の上方輸送に大きく寄与していることが分かる。これは非蛇行期に黒潮が海嶺へ衝突する流路となるため、海嶺地形と黒潮との相互作用によって硝酸塩の湧昇が促進されることを示していると考察される。

#### (4) 混合層内における硝酸塩の水平輸送

次に、混合層内における硝酸塩の水平輸送の空間分布を図-6に示す。流速が強い黒潮流軸周辺で $\langle F_H \rangle$ が発達しており、またその値は鉛直 $N$ フラックスよりも4桁ほど大きく、黒潮による顕著な硝酸塩輸送が生じていることが分かる。黒潮流軸から離れた位置にも $\langle F_H \rangle$ が発達する場所が存在し、東経139度以東では $\langle F_H \rangle$ が沿岸方向へ大きくシフトし、房総半島沖に強い nutrient stream が出現している。一方、遠州灘沖では灘スケールの反時計回り循環および低気圧性中規模渦（図-2）に沿った形で $\langle F_H \rangle$ が発達しており、混合層内における水平 $N$ 輸送が平均的な流動構造の影響を強く受けていることがわかる。この遠州灘沖での $\langle F_H \rangle$ は黒潮から分岐するように発達しているが、その影響は沿岸までは殆ど到達しておらず、岸近傍への黒潮からの直接的な栄養塩波及は弱い。

また、非蛇行期では蛇行期よりも循環流による反時計回りの $\langle F_H \rangle$ がより明確になっている。この傾向は、図-2で示されたように循環流そのものは蛇行期の方が強いことと矛盾する。したがって、非蛇行期に循環流による $\langle F_H \rangle$ が大きくなるのは、流れそのものではなく、非蛇行期の表層硝酸塩濃度が蛇行期と比べて高かったこと（例えば図-4）が原因であると考えられる。非蛇行期に硝酸塩濃度が上昇したのは、循環流の黒潮下流側の起点となる伊豆小笠原海嶺周辺海域において硝酸塩の供給が強化されたからである。それは非蛇行期の黒潮本流が海嶺周辺に直接作用して硝酸塩を表層に供給したことに加え、黒潮の影響を受けて海嶺の西側海域で鉛直輸送が強化されたこと（図-5(d)）が原因であると考察される。

## 5. おわりに

本研究では、3次元領域海洋循環モデルと低次生態系モデルをカップリングしたROMS-NPZDモデルを用いて、黒潮流路変動が遠州灘周辺海域における表層一次生産に与える影響について精緻かつ定量的な解析を行い、いくつかの重要な科学的知見を得ることに成功した。

まず、黒潮によってその流軸北側に位置する遠州灘沖の一次生産が著しく強化され、特に東経138度～139度に形成される低気圧性中規模渦周辺において植物プランクトンが顕著に増加することを確認した。そこでの植物プランクトン濃度は流路変動に伴い大きく変動し、非蛇行期には蛇行期よりも一次生産量が約1.5倍に増加するこ

とを明らかにした。さらに、一次生産を支える硝酸塩に対してフラックス収支解析を行い、一次生産変動のメカニズムを解明することを試みた。その結果、非蛇行流路時は、特に黒潮下流域の伊豆小笠原海嶺周辺海域において亜表層から硝酸塩が湧昇し、表層での硝酸塩濃度の上昇が促進されることを見出した。この上方輸送を支えていたのは、鉛直平均硝酸塩フラックスと鉛直拡散硝酸塩フラックスであった。上方輸送された硝酸塩は、黒潮と沿岸の間に発達する低気圧性中規模渦と、それに伴う灘スケールの反時計回りの水平循環流によって、黒潮本流から分岐するように黒潮上流方向の遠州灘沖を水平輸送され、中規模渦中心付近に集積することで、該当海域の表層におけるクロロフィル $a$ 濃度を上昇させ、表層一次生産を強化していた。対照的に、蛇行期では黒潮下流域での上方輸送も、循環流による水平輸送も弱体化し、一次生産が低減していた。

本研究で得られた黒潮流路変動と海域での一次生産量変動の関係に関する知見は、地球環境変化に伴う海流パターンの変化による影響評価に直接的に資するものと考えられ、外洋における海洋炭素貯留量の今後の動態を予測するための一助となることが期待される。実際、2017年8月から2024年現在に至るまで長期的に継続している黒潮大蛇行は、本海域での一次生産を継続的に低減させている可能性がある。それがひいては生物ポンプによる海洋炭素貯留に対して負の影響を与えるのであれば、長期的には大気中二酸化炭素量の増加を惹起し、気候変動に対してネガティブ・フィードバックを引き起こす可能性も否定できない。今後も継続して関連する知見を蓄積していく必要があると考えている。

謝辞：本研究はJSPS科学研究費（18H03798, 22K18018, 23H00191, 24H00337）および新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー等のシーズ発掘・事業化に向けた技術研究開発事業（22BD1107）の助成を受けた。

## REFERENCES

- 1) Martin, J. H., Knauer, G. A., Karl, D. M., and Broenkow, W. W.: VERTEX: carbon cycling in the northeast Pacific, *Deep-Sea Res. I*, Vol.34, pp.267-285, 1987.
- 2) Uchiyama, Y., Suzue, Y. and Yamazaki, H.: Eddy-driven nutrient transport and associated upper-ocean primary production along the Kuroshio, *J. Geophys. Res. Oceans*, Vol. 122, pp. 5,046-5,062, 2017.
- 3) Nagai, T., Clayton, S. and Uchiyama, Y.: Multiscale routes to supply nutrients through the Kuroshio nutrient stream, In: *Kuroshio Current: Physical, Biogeochemical and Ecosystem Dynamics*, Geophysical Monograph Series, Eds: Nagai, T., Saito, H., Suzuki, K. and Takahashi, M., John Wiley & Sons, NY, 2019.
- 4) Kawabe, M.: Variations of current path, velocity, and volume transport of the Kuroshio in relation with the large meander, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol.25,

- 3103-3117, 1995.
- 5) Zhang, X.: *Dynamical impacts on marine ecosystem of coastal and marginal seas around Japan*. Doctoral thesis, ID 8066, 111 pp., Kobe University, Japan, 2023.
  - 6) 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. 737-775, 2009.
  - 7) 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.
  - 8) 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.
  - 9) Garcia, H. E., Locamini, R. A., Boyer, T. P., and Antonov J. I.: *World Ocean Atlas 2005, Volume 4: Nutrients (phosphate, nitrate, and silicate)*, (Ed.), Levitus, S., NOAA Atlas NESDIS 64, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 396 pp, 2006.
  - 10) Morel, A. and J.F. Berthon: Surface pigments, algal bio-mass profiles, and potential production of the euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications, *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 34, pp. 1545-1562, 1989.

(Received March 14, 2024)  
(Accepted July 18, 2024)

## VARIABILITY IN NUTRIENT TRANSPORT AND ASSOCIATED UPPER OCEAN PRIMARY PRODUCTION DUE TO FLUCTUATIONS OF THE KUROSHIO PATH OFF THE COAST OF ENSHU-NADA SEA

Gaku NAMAZUE, Yusuke UCHIYAMA, Xu ZHANG and Eiji MASUNAGA

To assess the variability and mechanisms of nutrient transport and upper ocean primary production associated with fluctuations in the Kuroshio path off the coast of Enshu-nada Sea, numerical analyses were conducted on the nitrate flux transport processes maintaining primary production by using a three-dimensional regional ocean circulation model coupled with a nitrogen-based ecosystem model. The differences in nitrate transport were evident depending on the presence or absence of Kuroshio meandering, with upper ocean primary production being approximately 1.5 times higher during a non-meandering period compared to a meandering period. Nitrate flux budget analysis revealed that during the non-meandering period, the vertical nitrate transport within the mixed layer was amplified, primarily due to vigorous upwelling of nitrate on the northern side of the Kuroshio axis and around the Izu-Ogasawara Ridge. The nitrate supplied to the upper ocean was then transported horizontally by the counterclockwise rotating, topographically constrained standing mesoscale eddy formed between the coast and the Kuroshio, to feed the phytoplankton in Enshu-nada Sea.