

黒潮流路変動および季節風に伴う冬季の遠州灘海域における表層一次生産空間変動について

鰐江 岳¹・内山 雄介²・張 旭³・増永 英治⁴

¹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)
²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)

³Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Peking University (Beijing 100871, P. R. China)
⁴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)

遠州灘沖海域における春季ブルーム強度を条件付ける冬季の植物プランクトンによる一次生産の形成機構を理解するために、3次元流動-低次生態系カップリングモデル (ROMS-NPZD) を用いた6年分の数値解析を行った。遠州灘では黒潮流路の南北で一次生産性が大きく異なるが、流路変動に伴い一次生産量の空間分布に明確な差異が生じていた。冬季3ヶ月間における炭素換算した一次生産量は蛇行時に約 4.0×10^6 トン、非蛇行期に約 3.6×10^6 トンであり、蛇行によって約40万トンの炭素吸収が促進されていた。さらに、EOF解析により、季節風による沿岸湧昇や海嶺地形等による局所湧昇が広域の一次生産に及ぼす影響を評価した。その結果、冬季の一次生産は黒潮流路・季節風・地形などの作用を複合的に受けて変動していることが示唆された。

Key Words : ROMS-NPZD model, Kuroshio, seasonal wind, chlorophyl-a, EOF analysis

1. はじめに

地球温暖化の主因とされる大気中二酸化炭素濃度の増加に対する炭素吸収源としての海洋の役割が注目されている。一次生産を通じて吸収される炭素のうち、約55%が海洋生物由来であると報告されており¹、海洋における炭素貯留は陸域での炭素貯留に比肩する極めて重要な機構の一つである。外洋における一次生産は主に植物プランクトンによって担われており、その能力は沿岸域の半分程度と推定されているが²、全海洋面積の約90%を占める外洋の一次生産総量は大きく、沿岸域における

「ブルーカーボン」と同様に海洋での炭素固定に大きく寄与している³。植物プランクトンの成長には、混合層以深に賦存する硝酸塩などの栄養塩類が比較的貧栄養な表層や亜表層の有光層へと輸送・供給されるメカニズムが必要不可欠である。したがって、外洋域における一次生産には、栄養塩の水平発散収束・鉛直混合・中規模渦等に起因する鉛直流などに伴う表層への栄養塩輸送機構が、沿岸ではこれらに加えて沿岸湧昇や陸域からの栄養塩の直接供給などが重要な役割を果たしている⁴。

北太平洋西岸域を流れる黒潮は、我が国の太平洋沿岸

域に栄養塩を水平輸送・供給するnutrient streamである⁵。その流路は非定常的であり、しばしば蛇行経路を呈し⁶、硝酸塩の空間分布を大きく変動させる⁷。特に流路変動が顕著な紀伊半島～遠州灘～房総半島の海域（図-1 右）では、表層での硝酸塩輸送の変動⁸およびクロロフィルa濃度（以降、chl-aと略記する）の空間分布に影響をもたらす⁹など、流路変動が当該海域の一次生産に影響を与える可能性が示唆されている。さらには、沿岸湧昇に伴う光合成の活性化、それに起因する大気中炭素の吸収、海底への炭素沈降¹⁰など、一次生産には流路変動に加えて多様な物理・生化学現象が複雑に重畠している。

そこで本研究では、遠州灘周辺海域における栄養塩および一次生産の中長期的な変動特性およびそのメカニズムを明らかにすることを目的に、領域海洋循環モデルROMSにNPZD型の生態系低次生産モデルをカップリングしたROMS-NPZDモデルを用いた数値解析を行った。黒潮蛇行時と非蛇行時における一次生産の差異に関する定量的な評価に加え、中期的に変動する黒潮流路と、主要外力である季節風などに着目し、それらが一次生産に与える影響を検討するとともに、対象海域における一次生産の変動要因について考察した。

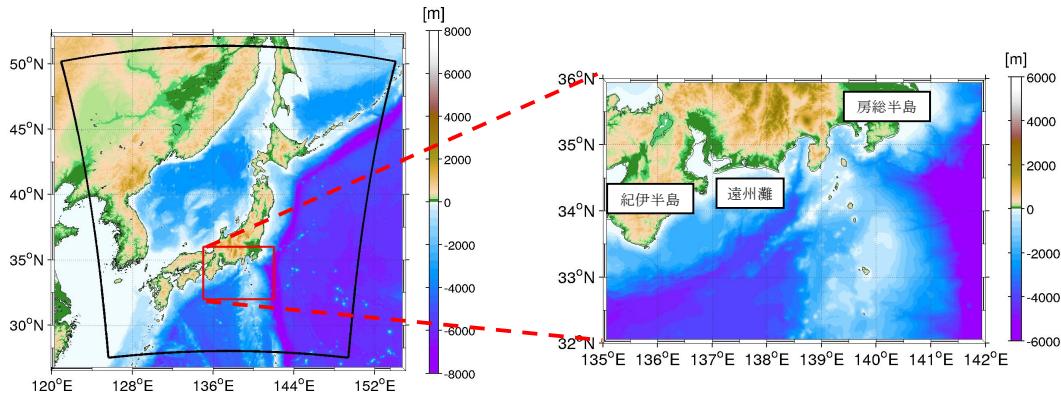


図-1 ROMS-NPZDL1 モデル計算領域（黒枠）と水深分布（カラー）．左図は日本全域、右図は赤枠領域の拡大図。

表-1 ROMS-NPZDL1 モデル計算条件

計算期間	2009年1月1日～2015年12月31日
格子数	水平 $784 \times 864 \times$ 鉛直 32 層
水平空間解像度	3 km
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	SRTM30 PLUS + J-EGG500
初期・境界条件	JAMSTEC JCOPE2（日平均値）

2. 研究方法

(1) ROMS-NPZDモデルの概要

本研究では、遠州灘沖海域における2009年1月～2015年12月の各月、および春季ブルーム（植物プランクトン増殖）を条件付ける冬季⁴⁾の栄養塩輸送および一次生産応答に着目し、同期間における冬季（12月～2月）3ヶ月間の各変量に対する時間平均値を算出して解析を行った。3次元海水流動は、JAMSTEC JCOPE2海洋再解析データ¹⁰⁾（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、領域循環海洋モデル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。また、海洋表層を規定する混合層の厚さなどは、ROMSに実装されるKPP乱流モデル¹¹⁾を用いて評価した。スピナップ期間を除いた計算期間は2009年1月1日から2015年12月31日の7年間である。

生態系モデルにはFasham¹²⁾、Gruber¹³⁾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NPZDモデルでは、栄養塩（硝酸塩 NO_3^- およびアンモニウム塩 NH_4^+ ）、植物プランクトン、動物プランクトン、デトリタスの計5要素が考慮されている。栄養塩の供給源は表層混合層

以下の海洋亜表層以深のみとし、河川などの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 Atras 2005¹⁴⁾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 & Berthos¹⁵⁾の鉛直分布モデルを適応して得られる3次元分布をNPZDモデルの初期条件、境界条件として与えた。モデルによる表層chl-a濃度を衛星海色データ¹⁶⁾と比較し、図-1 右の検査海域（水深200 m以下は除外）におけるWillmottの適合度指標¹⁷⁾（いわゆるskill）を求めた。解析期間の月平均値ごとのskillは 0.717 ± 0.106 と見積もられ、十分な再現性があることを確認した。その他の計算条件や再現性担保の詳細についてはUchiyamaら⁴⁾、Zhang¹⁸⁾を参照されたい。

(2) 一次生産の評価方法

本研究で用いた窒素ベースのNPZDモデル出力から一次生産量を算出する方法を述べる。まず、水深 z における光合成有効放射（Photosynthetically Available Radiation : PAR） $I(z)$ は、雲量やエアロゾルによる散乱等を考慮して求めた海面に照射されるPAR : $I(0)$ を用いて、

$$\frac{dI}{dz} = -(\kappa_{sw} + \kappa_{chl} \cdot Chla(z)) \cdot I(z) \quad (1)$$

により求める¹³⁾。ここに、 κ_{sw} : 海水による減衰定数($= 0.04 \text{ m}^{-1}$)、 κ_{chl} : chl-aによる減衰定数($= 0.03 \text{ m}^{-1} (\text{mgChl-a m}^{-3})^{-1}$)、 $Chla(z)$: 水深 z におけるchl-a濃度である。

一次生産量 P_r ($\text{mgC/m}^3/\text{day}$) は次式で表わされる。

$$P_r = \mu_p^{max}(T, I) \cdot \gamma(N_n, N_r) \cdot P \cdot r_{C:N}^P \cdot 12 \quad (2)$$

ここに、 $\mu_p^{max}(T, I)$: 光・水温依存の最大増殖速度(1/day)、 $\gamma(N_n, N_r)$: 栄養制限項、 T : 水温($^\circ\text{C}$)、 P : 窒素換算された植物プランクトン濃度(mmolN/m^3)、 $r_{C:N}^P$: Redfield比($= 6.625$)、12 : Cの分子量である。

式(2)の μ_p^{max} は、Gruber¹³⁾、Eppley¹⁹⁾の式：

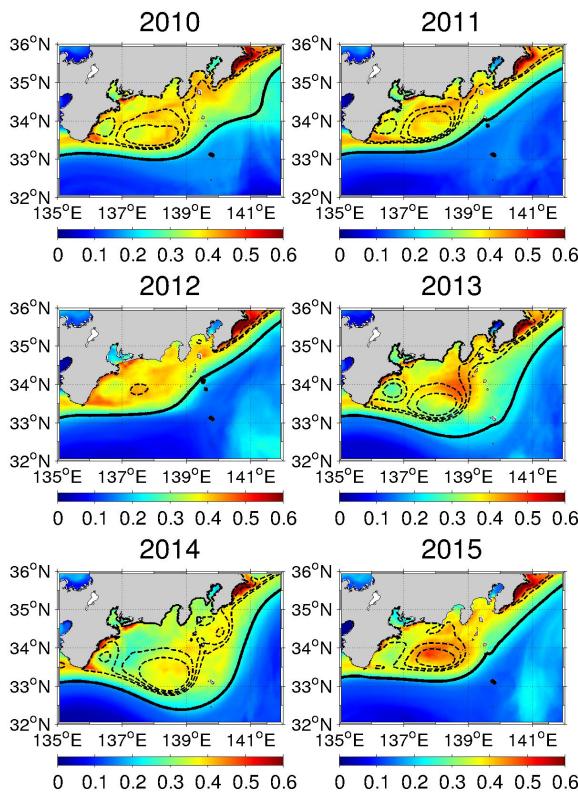


図-2 2010～2015年各年の冬季（前年12月～当該年2月の3ヶ月間）における表層chl-a濃度の時間平均値空間分布（ $\mu\text{g L}^{-1}$ 、カラー）。黒線は黒潮流軸であり、海面高度SSH=0.2 mの等価線として定義した。黒点線はSSH=-0.45～-0.6 mの等価線（0.05 m間隔）であり、中規模渦位置の目安とする。

$$\mu_p^{max}(T, I) = \frac{\mu_p^T(T) \cdot \alpha_p \cdot I \cdot \theta}{\sqrt{(\mu_p^T(T))^2 + (\alpha_p \cdot I \cdot \theta)^2}} \quad (3)$$

を用いて求める。ここに、 $\mu_p^T(T)$ ：水温依存の増殖速度(1/day), α_p ：光と成長の関係における初期勾配($= 1.0 \text{ mgC/mgChl-a/Wm}^2/\text{day}$)， θ ：chl-a/C比($= 0.009 \text{ mgChl-a/mgC}$)であり、 $\mu_p^T(T)$ は次式により求める。

$$\mu_p^T(T) = (\ln 2) \cdot 0.851 \cdot (1.066)^T \quad (4)$$

また、栄養塩制限項 $\gamma(N_n, N_r)$ は次式で表される¹³⁾。

$$\gamma(N_n, N_r) = \frac{N_n}{K_{N_n} + N_n} \cdot \frac{K_{N_r}}{K_{N_r} + N_r} + \frac{N_r}{K_{N_r} + N_r} \quad (5)$$

ここに、 K_{N_n} ：硝酸塩の半飽和定数($= 0.75 \text{ mmolN/m}^3$)， K_{N_r} ：アンモニウム塩の半飽和定数($= 0.50 \text{ mmolN/m}^3$)， N_n ：硝酸塩濃度、 N_r ：アンモニウム塩濃度である。

3. 冬季のchl-aおよび一次生産変動

(1) 表層chl-a分布の経年変動特性

式(2)のように、海洋における一次生産量はchl-a濃度に概ね比例することから、ここではまず一次生産の指標としてchl-a分布に着目する。N年の冬季をN-1年12月からN年2月までと定義し、2010年から2015年までの各年の冬季期間平均値の表層chl-a濃度分布を黒潮流軸とともに求めた（図-2）。いずれの年も黒潮流軸の北側の沿岸域で顕著に高く、沖合海域では東経138度～139度付近にchl-a濃度の高い領域が形成されている。これらの傾向は、黒潮流北側での硝酸塩の等濃度水深の上昇⁴⁾、低気圧性中規模渦による局所湧昇⁴⁾、硝酸塩水平輸送の収束による増加³⁾が原因と考えられる。一方、先行研究³⁾では蛇行が流軸北側での一次生産を低下させる可能性を指摘しているが、同じ非蛇行期でも2012年は沿岸域、2015年は低気圧性渦周辺でchl-a濃度が上昇するなど分布特性に相違があり、蛇行以外の物理的要因がchl-a濃度変動に寄与する可能性を示唆している。

(2) 蛇行の有無による一次生産の変化

図-3に蛇行期（2013・2014年の冬季）、非蛇行期（2011・2012・2015年の冬季）の一次生産、および両者の偏差を示す。いずれも P_r を全水深で鉛直積分した単位海底面積当たりの期間平均値を用いている。図-2のchl-a分布に対応して、蛇行期・非蛇行期ともに流軸北側で一次生産が活発である。流軸北側における単位面積あたりの一次生産量は、蛇行期で289 ($\text{mgC/m}^2/\text{day}$)、非蛇行期で300 ($\text{mgC/m}^2/\text{day}$)となり、非蛇行期の方が一次生産能力が高い。一方、図-3の太平洋側全域平均値は蛇行期で211 ($\text{mgC/m}^2/\text{day}$)、非蛇行期で190 ($\text{mgC/m}^2/\text{day}$)と大小関係が逆転する。これは生産性が高い流軸北側領域が沖側に拡大したためである。偏差分布（図-3(c)）から明らかなように、蛇行に伴い、一次生産は沿岸域では低下、沖合域では増加する傾向が顕著である。

つまり、黒潮流路変動は遠州灘での一次生産の空間分布変動に寄与し、蛇行によって一次生産は流軸北側における単位面積あたりでは減少するものの、解析海域積分値としては約11%増加する。解析対象海域の総面積を $2.1 \times 10^5 \text{ km}^2$ とし、冬季3ヶ月間の一次生産量を炭素重量換算すると、蛇行期では約 4.0×10^6 トン、非蛇行期では約 3.6×10^6 トンと概算され、遠州灘海域では黒潮の蛇行によって冬季だけで約40万トンの炭素吸収が促進される。

4. 一次生産変動のメカニズム：EOF解析

図-2から、一次生産を規定するchl-a分布に対しては黒潮流路だけではなく、他の外因が影響している可能性が示唆された。そこで一次生産変動のメカニズムを定量的に考察するために、ROMS-NPZDモデルによる表層硝

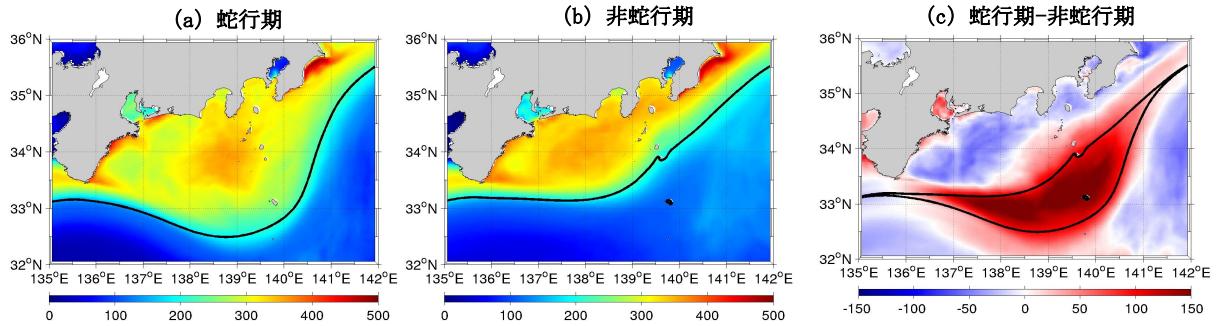


図-3 一次生産量の期間平均値分布 ($\text{mgC}/\text{m}^2/\text{day}$)。いずれも単位面積あたりの海面から海底までの鉛直積分値。(a) 蛇行期(2013年・2014年の冬季), (b) 非蛇行期(2011・2012・2015の冬季), (c) 蛇行期から非蛇行期を引いた偏差。黒線: 図-2と同様に定義された黒潮流軸であり、(c)は蛇行期, 非蛇行期における各黒潮流軸を示している。

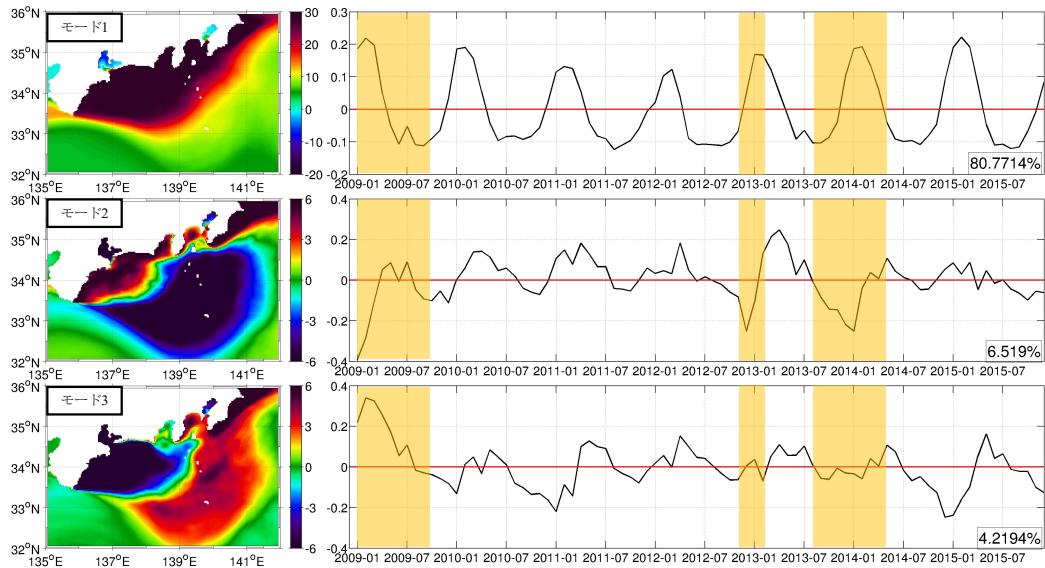


図-4 ROMS-NPZD モデル表層硝酸塩濃度(月平均値)に対する固有関数の空間分布(左)および時間関数(右)。上からモード1~3の結果。各右図中の四角枠内の数値は各モードの寄与率、オレンジ色背景は蛇行期を表している。

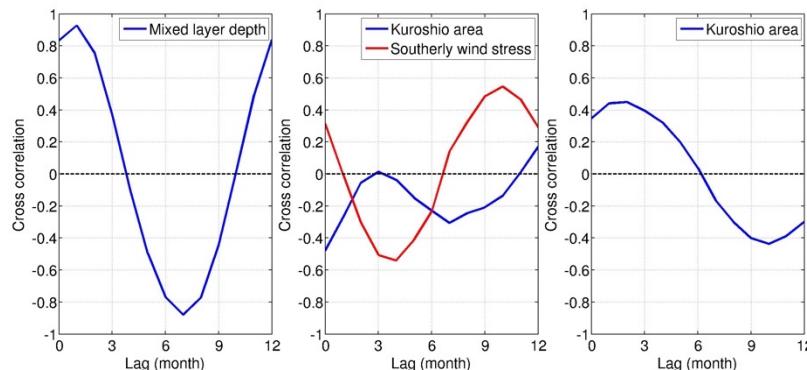


図-5 時間関数と外的因子との相互相関関数(左からモード1~3)。外的因子としてモード1では混合層水深(m), モード2では黒潮流軸北側の面積(m^2) (青線)および南風の風応力(N/m^2)、モード3では対象海域の黒潮流軸北側の海域面積(m^2)を用いた。

酸塩および表層chl-a出力(いずれも1ヶ月平均値)に対してEOF解析を行う。また、EOFの各モードに対する時間関数と、想定される外的因子の時間変動との相互相関関数を求め、硝酸塩とchl-aの変動要因を特定することを試みる。様々な外力との関係を検討した結果、ここでは

相関が高かった混合層水深(鉛直混合の指標)、黒潮流軸北側の海域面積(蛇行度の指標)、南風の風応力(沿岸湧昇の指標)と対応するモードの時間関数との相互相関を示している。

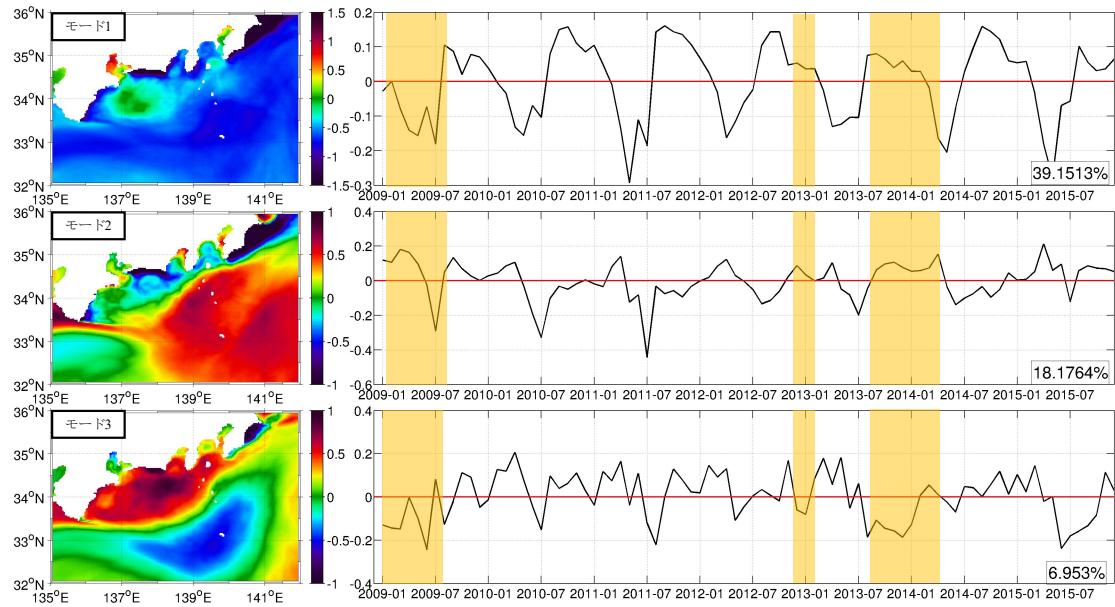


図-6 図-4と同じ。ただし表層 chl-a 濃度に対する EOF 解析結果。

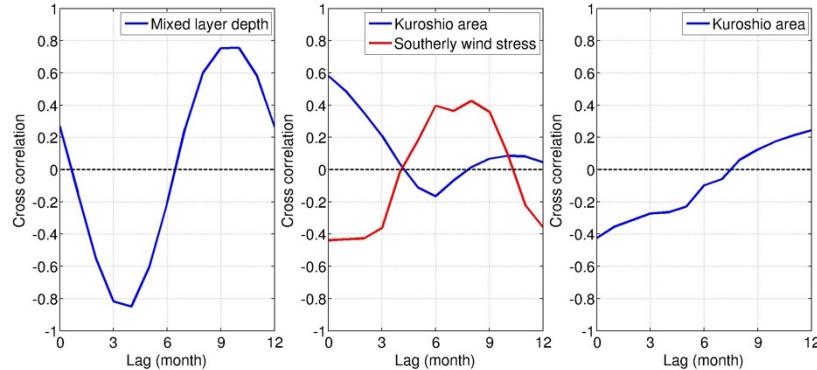


図-7 図-5と同じ。ただし表層 chl-a 濃度に対する EOF 時間関数と各種外力との相互相関関数。

(1) 表層硝酸塩濃度の変動機構

まず、chl-aを強く規定する表層硝酸塩に対するEOF解析結果を図-4に示す。モード1（寄与率80.8%）のEOF空間関数は黒潮流路北側で大きな正值を取ることから、硝酸塩の空間分布は黒潮に強く依存しており、対応する時間関数は年周期で変動している。外力との相互相関（図-5）を見ると、混合層水深との相関が非常に高く、ラグ1ヶ月での相関係数が0.9に達しており、鉛直混合が強化されて混合層が深くなると、流軸北側での硝酸塩が上昇することが明示されている。紙面の都合上ここでは図示しないが、表層水温との強い逆相関も見られ、モード1の年変動に対しては、海面冷却によって鉛直混合が強化されることで硝酸塩が表層に供給される機構が黒潮流路変動の効果を上回ることがわかる。

次にモード2（寄与率6.5%）の空間関数を見ると（図-4）、紀伊半島東岸、静岡県南岸、房総半島東岸の沿岸域で正値をとっていることから、風による沿岸湧昇の影響が強く示唆される。また、黒潮流路の変動範囲に相当

する沖合海域で負値をとることから、流路変動の寄与も推定される。図-5を見ると、紀伊半島と房総半島の東岸で沿岸湧昇を惹起する南風の風応力とモード2の時間関数がラグ0において約0.3となり、南風が強まると沿岸域の硝酸塩が上昇する傾向が示されている。ただし、対象海域は南風の影響が小さい沖合域を広く含むため、全体的な相関値としては小さめになっている。また、流軸北側の海域面積（大きいほど蛇行）との相関も高く、ラグ0で約-0.5となり、蛇行期に沖合域（EOFが負値の領域）の硝酸塩濃度が上昇することがわかる。

モード3（寄与率4.2%）の空間分布（図-4）は、非蛇行期（蛇行期）の流軸北側で正値（負値）となり、黒潮流軸北側の面積との相互相関（図-5）もラグ1~2ヶ月で約0.4であることから、蛇行との関連が示唆される。モード3が示すのは、流路変動に伴い非蛇行期（蛇行期）の流軸北側で濃度が減少（上昇）することであり、これは蛇行の有無による一次生産の空間分布（図-3）と整合的である。EOF空間関数が負値を取る紀伊半島-伊豆半

島間の海域は、黒潮に伴う低気圧性中規模渦の発達海域（図-2）に対応していることから、流路変動そのものというよりは、その影響を受けて発達する流軸北側の反時計回り循環流の消長に対応していると考察される。

以上の結果から、対象海域での表層硝酸塩はモード1～3ともにその空間分布はそもそも黒潮流路に大きく依存しており、流軸北側における硝酸塩は混合層水深で表される鉛直混合の影響を強く受けている。しかしながら、モード2以降では黒潮流路変動の強い影響が示唆され、さらに沿岸域では風による沿岸湧昇の影響も一定程度受けていることが分かった。

（2）表層chl-a濃度の変動機構

硝酸塩は、主に鉛直混合や流れの水平収束・発散により決まる物理場に強く依存した変量であるが、表層chl-a濃度は増殖要因である硝酸塩供給だけではなく、捕食・死滅・沈降・アンモニウム塩の寄与などが関係するため、より複雑に変動する。実際、表層chl-aに対するEOF解析では、モード1～3の寄与率の合計は約65%にとどまり（図-6）、硝酸塩の場合（約91%）よりもかなり低い。

モード1の空間分布（図-6）は全体的に負値をとる一方で、低気圧性渦周辺では0に近い値をとり、そこでの変動は小さく、外力にあまり依存せずに定常的に渦による鉛直流の作用を受けていることが示唆される。このとき、混合層水深との相互相関（図-7）はラグ3～4ヶ月で約-0.9という強い負の相関を示している。これは硝酸塩のEOFモード1と密接に関連しており、冬季の混合層深化に伴って硝酸塩が表層に供給され、その後の春季ブルームによりchl-a濃度が上昇するという季節的遅延を反映していると考えられる。一方、低気圧性渦周辺では混合層水深の影響が他の海域よりも小さく、硝酸塩の表出などによりchl-aが常に維持されていると解釈される。モード1の寄与率は約40%で硝酸塩のモード1よりもかなり小さく、他の要因の寄与が相対的に強いことが分かる。

モード2の空間分布（図-6）では、沿岸域で負値が卓越し、非蛇行期の流軸南側では正値が卓越していることから、硝酸塩のモード2と同様に沿岸湧昇および黒潮流路変動に関連すると考えられる。時間関数（図-7）は南風の風応力とラグ0で相関が約-0.4となり、南風に伴う沿岸湧昇で表層の硝酸塩が増加し、ひいてはchl-a濃度が上昇することがわかる。また、流軸北側面積とはラグ0で相関が約0.6であり、蛇行が強まると沿岸域の表層chl-aが低下するという、南風とは逆の傾向が見られる。

モード3についても硝酸塩のモード3と同様に、EOF空間分布（図-6）は非蛇行期（蛇行期）の流軸北側で正値（負値）となり、しかも黒潮流路北側面積とラグ0で相関が約-0.4となっており、蛇行により沿岸（沖合）域で濃度が低下（上昇）する傾向が見られる。これは一次生

産の空間分布（図-3）とも整合的である。

以上の結果から、一次生産の指標となるchl-a分布とその変動に対しては、表層硝酸塩と同程度以上に黒潮流路変動が重要な役割を果たしており、そこに風による沿岸湧昇や混合層深さなどが重畳することが示された。

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、遠州灘周辺海域における一次生産の中期的な変動特性を定量的に解析し、そのメカニズムについて考察した。以下に本研究によって得られた結果と知見を述べる。

黒潮流路北側での一次生産は沖合海域よりも顕著に高く、遠州灘の一次生産は黒潮の影響を強く受けている。この一次生産の空間分布は黒潮蛇行の有無により大きく変化し、非蛇行期と比較して蛇行期の一次生産は沿岸域で低下し、沖合域で増加していた。解析対象海域全体での一次生産量を冬季（3ヶ月間合計）の炭素重量に換算して概算評価すると、非蛇行期は約360万トン、蛇行期は約400万トンと見積もられ、蛇行によって約40万トン（約11%）増加すると推定された。

一次生産の変動機構を考察するために、一次生産を主に物理的に決定づける表層硝酸塩濃度と、生化学過程の影響も強く受ける表層chl-aに対してEOF解析を実施し、主要モードの時間関数と各種物理量との相互相関を評価した。その結果、遠州灘周辺海域の一次生産は黒潮流路の影響を強く受け、年周期変動では混合層深さの変動に支配されていた。さらに、黒潮流路変動の直接影響と、主として紀伊半島と黒潮の相互作用によって生成・維持される遠州灘スケールの低気圧性中規模渦を介した間接影響に加え、風と地形の相互作用により生じる沿岸湧昇が二次的な要因であることが分かった。本研究は、先行研究による一次生産に対する流路変動³⁾や中規模渦²⁰⁾の影響に加えて、新たに沿岸湧昇の関与を示すとともに、各要因の寄与を定量的に評価したものであると言える。

以上のような本研究で得られた遠州灘周辺海域での一次生産変動に関する知見は、地球環境変化に伴う海流パターンや風系の変化が海洋一次生産に与える影響を理解する上で重要な示唆を与えるものであり、海洋における炭素貯留量の今後の動態や、海洋生態系の消長を評価するための一助となることが期待される。

謝辞：本研究は科学研究費基盤研究A（24H0037）の助成を受けた。

REFERENCES

- 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, 80 pp., 2009
- 2) 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.
- 3) 鮎江 岳, 内山雄介, 張 旭, 増永英治: 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, 土木学会論文集, Vol.80, No.17, 24-17253, 2024. [Namazue, G., Uchiyama, Y., Zhang, X, and Masunaga, E.: Variability in nutrient transport and associated upper ocean primary production due to fluctuations of the Kuroshio path off the coast of Ensyu-nada sea, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Vol.80, No.17, 24-17253, 2024.]
- 4) 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.
- 5) 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, USA, 2019.
- 6) Kawabe, M.: Variations of current path, velocity, and volume transport of the Kuroshio in relation with the large meander, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol.25, pp. 3103–3117, 1995.
- 7) Hayashida, H., Kiss, A. E., Miyama, T., Miyazawa, Y. and Yasunaka, S.: Anomalous nutricline drives marked biogeochemical contrasts during the Kuroshio large meander., *J. Geophys. Res. Oceans*, Vol. 128, e2023JC019697, 2023.
- 8) Lizarbe Barreto, D.A., Chevarria Saravia, R, Nagai, T and Hirata, T.: Phytoplankton increase along the Kuroshio due to the large meander, *Front. Mar. Sci.*, 8:677632, 2021.
- 9) Hales, B., Takahashi, T. and Bandstra, L.: Atmospheric CO₂ uptake by a coastal upwelling system, *Global Biogeochem. Cycles*, Vol. 19, GB1009, 2005.
- 10) 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.
- 11) Large, W. G., McWilliams, J. C. and Doney, S. C.: Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. *Reviews of Geophysics*, Vol. 32, Issue 4, pp. 363–403, 1994.
- 12) Fasham, M. J. R., Ducklow, H. W. and McKelvie, S. M.: A nitrogen-based model of plankton dynamics in the oceanic mixed layer, *J. Mar. Res.*, Vol. 48, pp. 591–639, 1990.
- 13) Gruber, N., Frenzel, H., Doney, S.C., Marchesiello, P., McWilliams, J.C., Moisan, J.R., Oram, J.J., Plattner, G.-K. and Stolzenbach, K.D.: Eddy-resolving simulation of plankton ecosystem dynamics in the California Current System, *Deep-Sea Res., Part I*, Vol. 539, pp. 1483–1516, 2006.
- 14) Garcia, H.E., Locarnini, 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.
- 15) Morel, A. and Berthon, J.F.: 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.
- 16) EU.Copernicus Marine Service Information(CMEMS): Global Ocean Colour (Copernicus-GlobColour), Bio-Geo-Chemical, L4 (monthly and interpolated) from Satellite Observations (1997-ongoing), Marine Data Store(MDS). DOI: 10.48670/moi-00281 (Accessed on June 19, 2025).
- 17) Willmott, C.J.: On the validation of models, *Phys. Geogr.*, Vol. 2, pp. 184–194, 1981.
- 18) Zhang, X.: *Dynamical impacts on marine ecosystem of coastal and marginal seas around Japan*. Doctoral thesis, ID 8066, 111 pp., Kobe University, Japan, 2023.
- 19) Eppley, R.W.: Temperature and phytoplankton growth in the sea. *Fishery Bulletin*, Vol. 70, pp. 1063–1085, 1972.
- 20) Kimura, S., Kasai, A., Nakata, H., Sugimoto, T., Simpson, J.H. and Cheos, J.V.S.: Biological productivity of meso-scale eddies caused by frontal disturbances in the Kuroshio. *ICES Journal of Marine Science*, Vol. 54, Issue 2, pp. 179–192, 1997.

(Received March 17, 2025)

(Accepted July 22, 2025)

SPATIOTEMPORAL VARIATION OF SURFACE PRIMARY PRODUCTION IN THE ENSHU-NADA SEA IN WINTER ASSOCIATED WITH KUROSHIO PATH FLUCTUATIONS AND SEASONAL WIND

Gaku NAMAZUE, Yusuke UCHIYAMA, Xu ZHANG and Eiji MASUNAGA

To elucidate the mechanisms underlying wintertime phytoplankton primary production that modulates the intensity of the subsequent spring bloom in the offshore region of Enshu-nada Sea, a six-year numerical reanalysis was conducted using a three-dimensional physical–biogeochemical coupled model (ROMS-NPZD). Primary productivity exhibited pronounced contrasts between the northern and southern flanks of the Kuroshio path, with wintertime spatial variability strongly influenced by variations in the Kuroshio path. The wintertime carbon-based primary production was estimated at approximately 4.0×10^6 tons during meandering phases and 3.6×10^6 tons during non-meandering phases of the Kuroshio, indicating an enhanced carbon uptake of about 0.4×10^6 tons due to the meandering state. Furthermore, empirical orthogonal function (EOF) analysis was conducted to assess the contributions of seasonal wind-induced coastal

upwelling and localized upwelling induced by anticyclonic cold-core eddies and bathymetric features such as submarine ridges. The results suggest that wintertime primary production in the offshore Enshu-nada region is regulated by the synergistic interplay of Kuroshio path variability, seasonal wind forcing, and topographic modulation.