

領域海洋モデルを用いた 日本周辺海域における沿岸湧昇に関する研究

柳澤 晃¹・増永 英治²・内山 雄介³

¹非会員 茨城大学大学院理工学研究科都市システム工学専攻（〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1）

E-mail:24nm838h@vc.ibaraki.ac.jp

²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）

E-mail:eiji.masunaga.office@vc.ibaraki.ac.jp (Corresponding Author)

³正会員 神戸大学教授 大学院工学研究科市民工学専攻

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

沿岸湧昇は、下層の低水温水や栄養塩の鉛直輸送を通して海洋環境や水産資源に大きな影響を与えていた。日本周辺海域における沿岸湧昇の発生過程の把握と影響を評価するために、領域海洋物理生態系統合モデル ROMS-NPZD を用いて解析を行った。夏季の南風の強化に伴い日本列島の太平洋側で沿岸湧昇が発生していた。底層水の湧昇と風による表層付近の鉛直混合の促進が複合的に作用し、表層水温が最大約 3 °C 低下していた。沿岸湧昇によって表層付近に栄養塩が輸送された数日後に、植物プランクトンの増加が見られた。夏季の日本周辺海域における沿岸湧昇は南北方向に伸びた海岸線の東岸域で発生する傾向が強い。特に房総及び常磐東岸では沿岸湧昇が顕著に現れており、黒潮等の海流によって沿岸湧昇の効果がより沖合の海域まで影響していた。

Key Words: coastal upwelling, ROMS, nutrient transport, mixed-layer depth, phytoplankton

1. はじめに

日本周辺海域は黒潮や親潮をはじめとする暖流と寒流が混在しており、複雑かつ多様な海洋環境を形成している¹⁾。日本列島の海岸線は複雑に入り組んでおり、総延長は約 3 万 5 千 km と世界で 6 番目に長く、国土面積あたりの海岸線延長は諸外国と比べて非常に長い²⁾。したがって、本国における沿岸域が海洋環境へ影響する効果は大きいといえる。また、沿岸域は陸域と外洋の境界に位置し、河口からの河川水の流入や栄養塩の輸送、潮汐等を通して陸域と外洋の双方から強い影響を受けている³⁾。

沿岸域で生じる主要な現象の一つに風応力に起因する沿岸湧昇が挙げられる。北半球では、地球自転の影響により風が吹く方向に対して右向きにコリオリ力が作用することでエクマン輸送が発生する。エクマン輸送によって沖合へ流出した表層水を補完するように、下層の水塊が鉛直方向に輸送される。この現象は沿岸湧昇と呼ばれており⁴⁾、ペルー沿岸やオレゴン州沿岸のような長大な海岸線において季節風が吹いた場合に起きることが知られている⁵⁾。特に、北米西海岸オレゴン州沿岸では数日から 10 日間程度の時間スケールの湧昇現象を捉えた観

測が報告されている⁶⁾。また、カリフォルニア沖やペルー沖では数ヶ月スケールの沿岸湧昇が下層の栄養塩を輸送することで、表層での一次生産性が高まり豊かな漁場を形成していると言われている⁷⁾。

日本周辺においては、千葉県外房沿岸では夏季に強い南風が吹いた翌日に水温が急激に低下することが報告されている⁸⁾。さらに、沿岸湧昇による水温低下後の急激な水温の上昇がチョウセンハマグリの産卵を誘発するという研究結果も報告されている⁹⁾。また、茨城県沿岸域を対象とした貝類の毒化に関する研究では、沿岸湧昇が貝の毒化現象の原因となるプランクトンを沖合から沿岸部へ輸送することを指摘している¹⁰⁾。

これらの研究が示すように沿岸湧昇の発生は、日本の沿岸域においても表層水温の低下や栄養塩の増加など、海洋環境や水産資源において大きな影響を与えている。しかしながら、過去の研究では日本周辺における沿岸湧昇の詳細な発生過程や空間的な影響範囲は明らかにされていない。そこで本研究では日本周辺海域における沿岸湧昇の発生過程の把握とその生態系への影響評価を目的とし、領域海洋モデル ROMS (Regional Oceanic Modeling System)と生態系 NPZD モデルを統合した ROMS-NPZD モデル¹¹⁾を用いて解析を実施した。

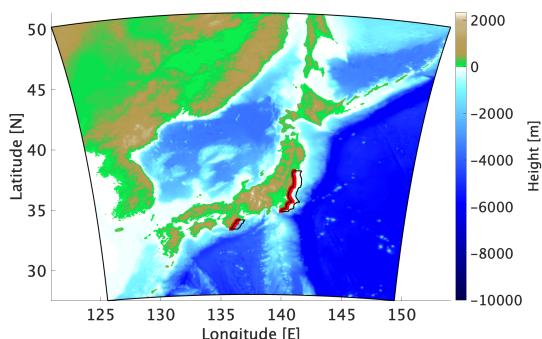


図-1 ROMS-L1 領域（赤：沿岸域のデータ抽出領域、黒枠：風応力のデータ抽出領域）

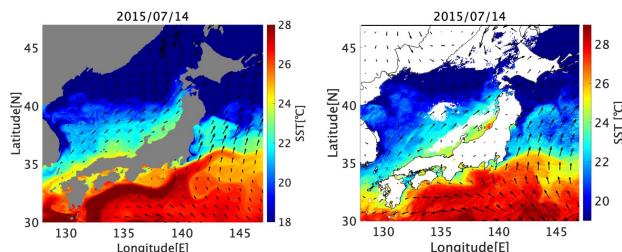


図-2 ROMS（左）と気象衛星ひまわり（右）による表層水温の比較図

2. 研究手法

本研究では、日本周辺の海域を再現した領域海洋モデル ROMS-L1 モデルと窒素循環を基にした生態系モデル NPZD(Nutrient Phytoplankton Zooplankton and Detritus)モデルを統合して計算を実施した。ROMS-L1 モデルは、JCOPE-2 再解析値¹¹⁾を初期値と水平境界条件としている。また、栄養塩の初期値および境界条件には、World Ocean Atlas 2005 のデータを用いており、河川からの栄養塩供給は考慮していない。モデル領域（図-1）は、東西 2358 km × 南北 2598 km で構成されており、格子数は 784 × 864 × 鉛直 32 層、水平空間解像度は 3 km に設定した。鉛直座標系には表層と底層をより高解像度化する S-layer を用いている。海面境界における外力として風応力 (JMA GPV-GSM 日平均値) 及び海面熱フラックス (NOAA COADS 月平均気候値) を与えた。本モデルはこれまでの研究により、

黒潮等の海流やサブメソスケール海洋物理現象および底層からの栄養塩輸送に起因する植物プランクトンの生態系応答が適切に再現されていることが実証されており、計算精度が十分に担保されている¹¹⁾。また本研究では新たに気象衛星ひまわりによる海面水温観測データと比較検証を行なった。

解析において沿岸湧昇の影響を評価するためのパラメータ算出時にデータを抽出した領域を図-1に示す。対象領域は、房総常磐沖と紀伊半島沖の 2 領域である。図中の赤い領域は沿岸域の水温、栄養塩 (NO_3^-) および植物プランクトンの平均値算出に使用したデータの抽出領域であり、海岸線から 12 km までの範囲を設定した。また、黒線で囲まれた領域は風応力の平均値算出に使用したデータの抽出領域として設定し海岸線から 60 km までの範囲とした。これらの領域は、海岸線が南北に長く伸びておりモデル内における夏季の季節風（モンスーン）による沿岸湧昇がもたらす水温および栄養塩の変動が顕著であったため解析対象領域として選定した。計算期間は 2008 年から 2015 年までの 8 年間実施し、特に沿岸湧昇による水温変化および栄養塩輸送が特徴的であった 2012 年 7~8 月の日平均を用いた解析結果について本研究では報告する。沿岸湧昇に関する水温の検証は、気象衛星ひまわりのデータが存在する 2015 年 7 月を対象にした。

3. 解析結果

(1) 南風に伴う沿岸湧昇

モデルの再現度を評価するために、沿岸湧昇が発生していることが予想される南風発生時の気象衛星ひまわりによる観測データと比較検証を行なった（2015 年 7 月 14 日の日平均データ）。海面水温を取得しているひまわりの方が全体的に 1°C 程水温が高いが、空間的な水温分布は概ね一致していた（図-2）。本州東岸沿岸における沿岸湧昇と考えられる水温低下も一致しており、沿岸海域の水温の再現性が担保されていることを確認した。

日本周辺海域における 2012 年 7 月 9 日、7 月 12 日および 7 月 17 日の海面水温分布を図-3 に示す。図中のベク

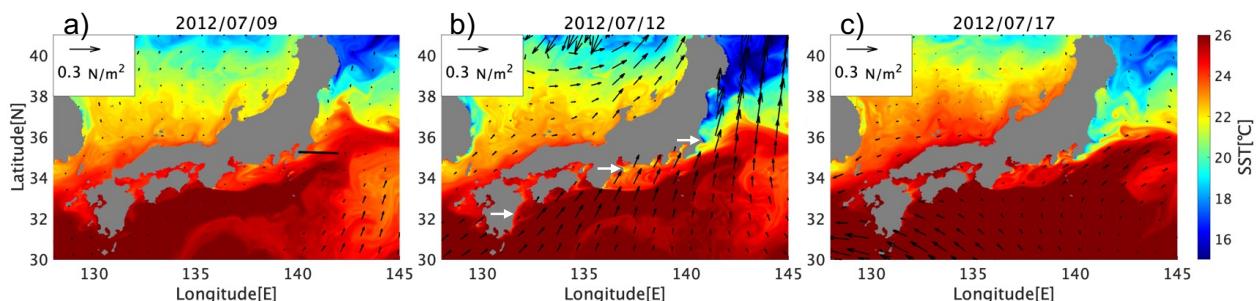


図-3 日本周辺海域における表層水温（色）と風応力（黒矢印）(a)：湧昇前（黒線：鉛直構造解析領域）、(b)：湧昇時（白矢印は表層水温の低下が顕著な領域を示す）、(c)：湧昇後

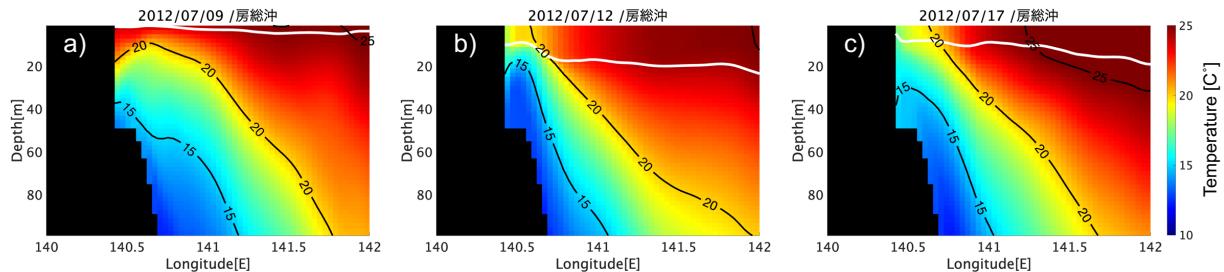


図-4 房総半島沖における水温分布の鉛直断面図（黒線：等温線，a：湧昇前，b：湧昇時，c：湧昇後）

トル（矢印）は風応力を表している。黒潮は周囲に比べて水温が高く、本州南岸に沿って水温フロントを形成していた。7月9日の海面水温に対し7月12日には日本列島東岸域の白い矢印で示す領域で表層水温の顕著な低下が確認された（図-3b）。この海面水温の低下は、特に本州東岸の千葉県から福島県にかけての常磐沿岸域で顕著であった。その他の海域では、九州や紀伊半島等の東岸で水温の低下が見られた。この南風に伴う沿岸域における水温低下の原因として、沿岸湧昇の発生が考えられる。房総半島沖（図-3a 黒線上）における水温の鉛直構造から、沿岸域の表層水温が低下している7月12日に、海底斜面に沿うように低温の水塊が下層から上層へ輸送されている様子が確認できる（図-4b）。

房総常磐および紀伊半島の東岸を対象として、風応力の南北成分と平均表層水温の時系列変化から、南風の強化に伴い水温が低下することを示す負の相関関係が見られた（図-5ab）。また、7月の房総常磐沿岸及び紀伊半島東岸の南風による風応力と水温の相関係数はそれぞれ $r=-0.73$ ($p<0.01$)、 $r=-0.51$ ($p<0.01$)であった（図-6左）。常磐沿岸域における7月12日の南風の強化に伴う表層水温の低下は、南風強化前と比較して 3°C に達していた。風や水温の変動の時間スケールは1週間程度であったため、総観気象的な気象現象に伴う風の変動が沿岸湧昇に関係していると考えられる。また、東西流速の時系列変化から常磐、紀伊ともに南風強化時に東向きの流れが強まっており、表層でのエクマン輸送の発生過程と整合していた（図-5d）。

南風の強化時に表層の鉛直的な混合にも変化が見られた。図-4中の白線はKPP (K-Profile Parameterization)乱流モデルから見積もられた表層混合層水深を示しており、風応力が弱い7月9日では数m程度であるのに対し、風応力強化時の7月12日には20m程度まで深くなっていた（図-4ab）。この表層混合層厚の増大は、風応力が強まることで表層付近の鉛直混合が促進されたためだと考えられる。房総常磐沿岸域における風応力の南北成分と表層混合層水深の間には有意な相関が見られ、南風時と北風時の相関係数はそれぞれ $r=0.92$ ($p<0.01$)、 $r=-0.94$ ($p<0.01$)であった（図-6右）。正負どちらの範囲でも比例

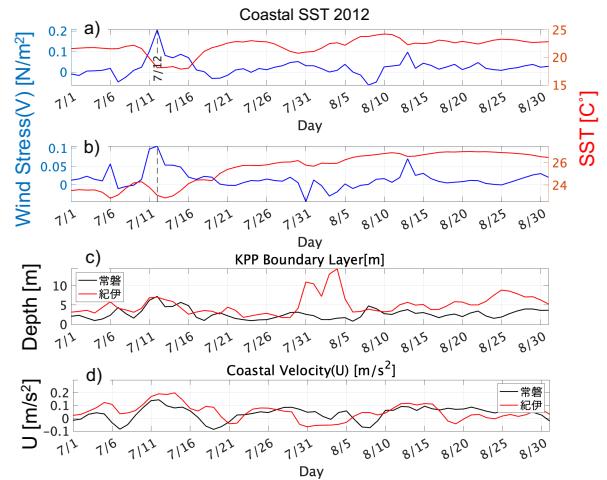


図-5 (a)常磐および(b)紀伊半島沿岸域における風応力の南北成分（青）と表層水温（赤），(c)混合層水深および(d)東西流速の時系列変化

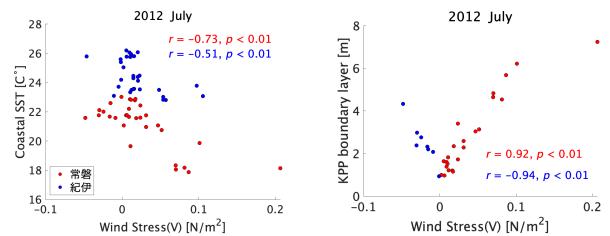
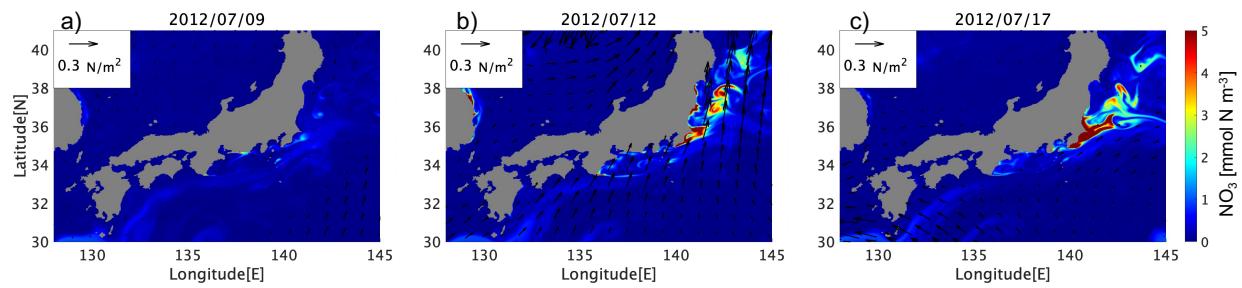
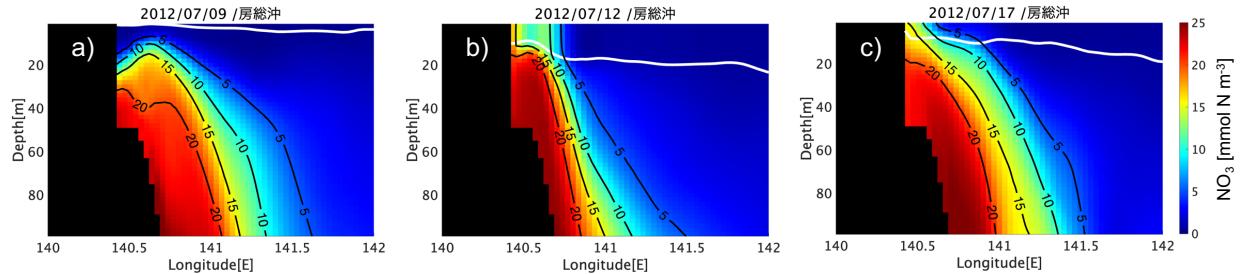


図-6 房総常磐沿岸域における風応力の南北成分と表層水温（左）および境界層水深（右）

関係にあることから、風向きに関わらず風応力が強化されることで、表層付近における鉛直混合が促進されることがわかる。また、7月31日の紀伊半島沿岸において北風の強化に伴い、表層水温が約 1°C 低下するとともに混合層水深もこの期間に10m程度深くなっていた（図-5c）。この時の紀伊半島東岸における表層流速は西向き（岸方向）であった（図-5d）。したがって、風応力による表層混合に加えて、北風の卓越によって生じた岸方向のエクマン輸送が沿岸湧昇とは反対に沈降流を生じさせたと考えられる。これらの解析結果から、夏季に常磐沿岸域や紀伊半島東岸で見られた表層水温の低下は、南風に起因する沿岸湧昇と風による表層混合の促進が複合的に作用したためであると考えられる。

図-7 日本周辺海域における表層栄養塩 (NO_3^-) 分布と風応力 (矢印) , (a) : 湧昇前, (b) : 湧昇時, (c) : 湧昇後図-8 房総半島沖における栄養塩 (NO_3^-) 分布の鉛直断面図 (黒線: 等値線, 白線: 混合層水深, 左: 湧昇前, 中央: 湧昇時, 右: 湧昇後)

(2) 沿岸湧昇の栄養塩輸送への影響

沿岸湧昇は、下層から冷水とともに栄養塩を輸送することが知られている⁷⁾。沿岸湧昇による栄養塩の輸送過程を明らかにするために、硝酸塩 (NO_3^-) 濃度のモデル出力値を用いた。沿岸湧昇発生前後における表層での栄養塩の水平分布から、沿岸湧昇時（7月12日）に房総常磐沿岸域で栄養塩が 5 mmol N m^{-3} 程度増加していた（図-7）。紀伊半島南端付近でも 1 mmol N m^{-3} 程度栄養塩濃度が増加していた。その後、5日程度経過した後に福島県や紀伊半島沿岸の栄養塩濃度は湧昇前の値まで減少していくのに対し、房総半島沖では増加した栄養塩が東方向沖合へ引き延ばされるように広がっていた（図-7c）。この期間に東日本沿岸域で東向きの流れが見られたことから（図-5d），南風に伴うエクマン輸送によって東向き沖合方向に輸送された栄養塩は、その後黒潮の影響を受けてさらに東側沖合まで輸送されると考えられる。実際に他の海域においても、黒潮が海嶺通過時に発生させる輸送現象が表層の一次生産や栄養塩輸送に重要な役割を果たすことが報告されている¹¹⁾。

房総半島沖における栄養塩の鉛直構造から、沿岸湧昇発生時には水温構造同様に底層の高栄養塩水が海底斜面を沿うように下層から上層へ輸送されていた（図-8）。房総常磐および紀伊半島の東岸における栄養塩濃度の時系列変化からも沿岸湧昇の発生に伴い、沿岸域表層の栄養塩濃度が上昇していることは明らかである（図-9, 7月12日付近）。また時間スケールについても、水温と栄養塩濃度の変動は概ね一致していた（図-5, 9）。沿岸域における栄養塩濃度について風応力の南北成分の関係を比較した結果、房総常磐及び紀伊半島ともに有意な相

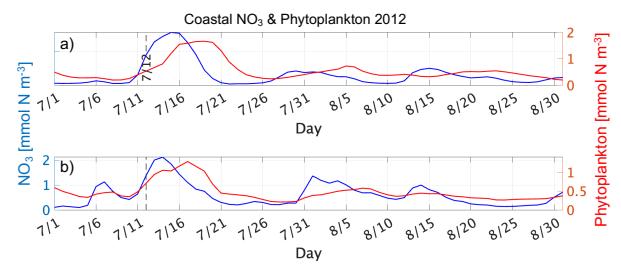


図-9 沿岸域表層における栄養塩 (青) および植物プランクトン濃度 (赤) の時系列変化, (a) : 常磐, (b) : 紀伊半島

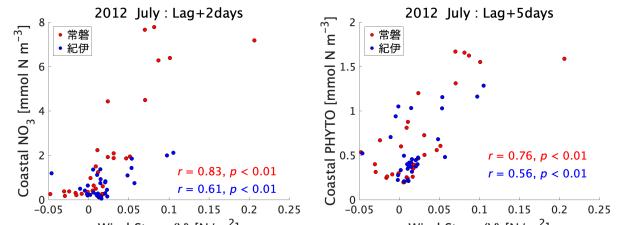


図-10 房総常磐および紀伊半島沿岸域における風応力の南北成分と栄養塩 (左) および植物プランクトン (右) 濃度

関を示し、相関係数はラグを2日えた時に最大となり、それぞれ $r=0.83$ ($p<0.01$), $r=0.61$ ($p<0.01$) であった（図-10左）。以上の解析結果から、沿岸湧昇により下層から表層付近に栄養塩が輸送され、房総沖では黒潮の影響を受けて栄養塩が沖合に輸送されることが明らかとなった。

(3) 沿岸湧昇の植物プランクトン分布への影響

一般的に栄養塩が増加することで植物プランクトンの増殖が促進され生物生産性が高まることが知られており、

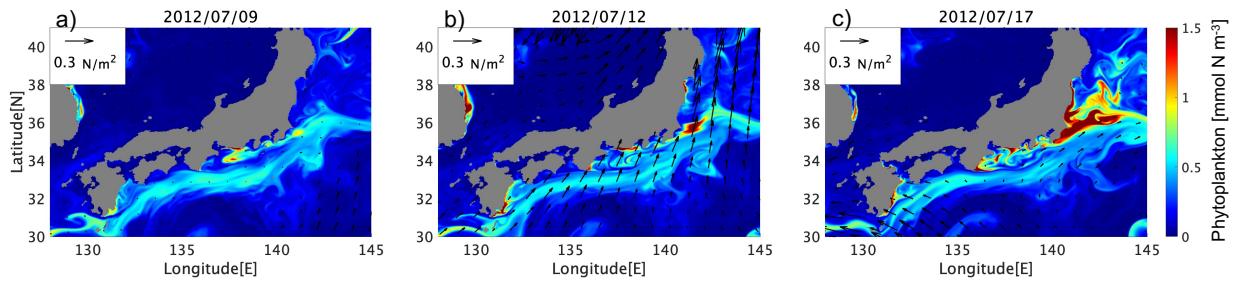


図-11 日本周辺海域における表層植物プランクトン分布と風応力（矢印）,(a) : 湧昇前, (b) : 湧昇時, (c) : 湧昇後

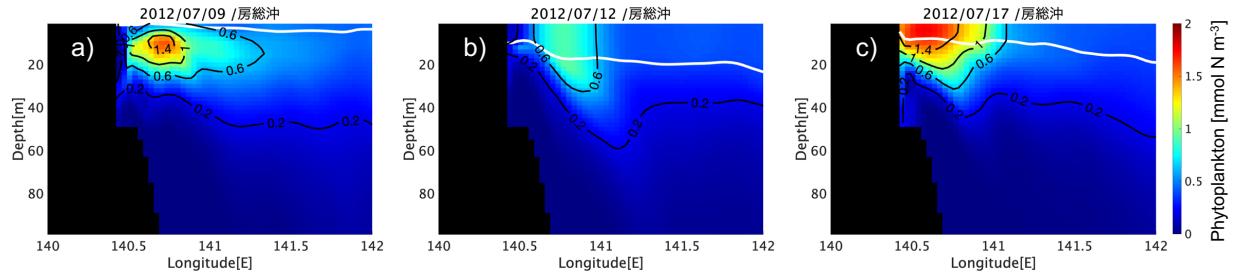


図-12 房総半島沖における植物プランクトン分布の鉛直断面図（黒線：等値線）,(a) : 湧昇時, (c) : 湧昇後

本研究が採用している生態系モデルでも同様な生態系プロセスを再現している。沿岸湧昇の生物生産への影響を評価するために、植物プランクトン分布の変化を調べた。沿岸湧昇前（7月9日）は、黒潮流軸周辺や一部の沿岸域に植物プランクトン濃度が高い領域が分布していた。沿岸湧昇が発生した7月12日時点では、植物プランクトンの増加は福島県沿岸や九州東岸南部など一部の海域に限られていた。沿岸湧昇発生から5日経過後（7月17日）には、植物プランクトン濃度は $1.5 \text{ mmol N m}^{-3}$ 以上に増加しており、高濃度の分布範囲も拡大していた（図-11）。

植物プランクトンの鉛直分布は栄養塩とは異なり下層から輸送されている様子は見られず、植物プランクトンの増殖は沿岸湧昇から5日経過後の7月17日に沿岸部表層で見られた（図-12）。また栄養塩および植物プランクトン濃度の時系列変化から、これら2つの変数間には5日程度の時間差が存在していた（図-9）。現場観測と室内実験による研究では、栄養塩を添加してからおよそ3日前後に植物プランクトン量はピークに達することが報告されている¹²⁾。また、ラグを与えない場合の沿岸域における風応力の南北成分と植物プランクトン濃度の間には有意な相関は見られなかったが、数日のラグを与えることで相関を示した。房総常磐における相関係数は5日のラグを与えることで最大 ($r = 0.83, p < 0.01$) となつた（図-10右）。したがって本研究における生態系モデルが生態系プロセスの時間スケールを適切に再現していると言える。これらのことから、沿岸湧昇によって下層から栄養塩が輸送されることで、表層付近における一次生産が促進され数日程度の時間スケール間で植物プランクトン濃度が高まる可能性が示唆された。さらに、房総

沖東側では増殖した植物プランクトンが栄養塩と同様に黒潮によって東側沖合に輸送されることでより沖合海域まで沿岸湧昇の効果が波及していた。

4. 本州沿岸全域における沿岸湧昇の評価

沿岸湧昇の地域的な応答を評価するために、2012年7月における風応力の南北成分と表層水温の相関係数をモデル領域内の各水平グリッド毎に算出した（図-13a）。相関係数の図化に際し、 p 値が0.05以上の場合には有意ではないと判断し、灰色で表示している。また、図中のベクトルは2012年7月の月平均風応力を示している。解析の結果、東日本沿岸域や紀伊半島、九州の東岸等多くの沿岸海域で有意な負の相関を示した。一方で、日本海側ではほとんどの領域で有意な相関は見られなかつた。よって、九州から本州の太平洋に面した広い海域で沿岸湧昇の発生傾向が強いことがわかる。これらの領域は、夏季に支配的となる南風と海岸線の向きが平行に近いため沿岸湧昇が生じやすいと考えられる。また、沖合南東方向に広がる負の相関を示す領域は、強風による表層混合の促進による水温低下が影響していると考えられる。

これまでの解析結果に示したように表層水温の低下の原因として風応力による鉛直混合も挙げられる。風応力と鉛直混合についても地域的な応答を評価するために、東西および南北成分を合成した風応力（絶対値）とKPPモデルから推定した表層混合層深度の相関係数を算出した（図-13b）。その結果、解析領域全域において強い正の相関が見られ、風応力による表層混合の強化は沿岸湧昇とは異なりほぼ全ての海域において発生していると言

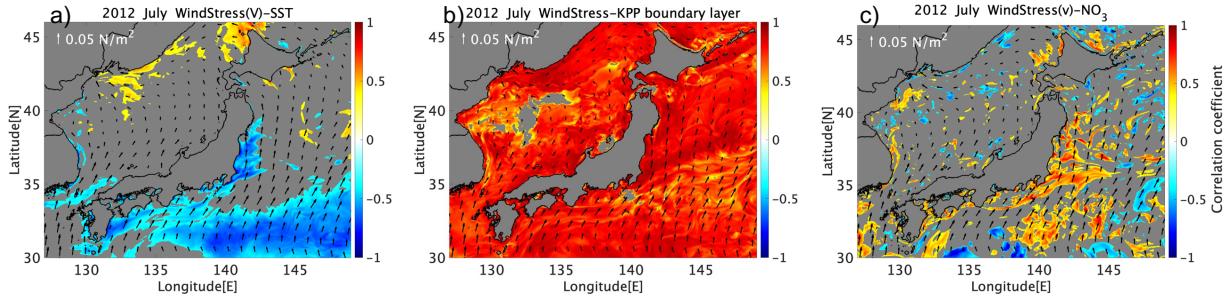


図-13 風応力と表層水温, 混合層水深および栄養塩濃度の相関係数, (a) : 海面水温, (b) : 混合層水深, (c) : 表層 NO_3

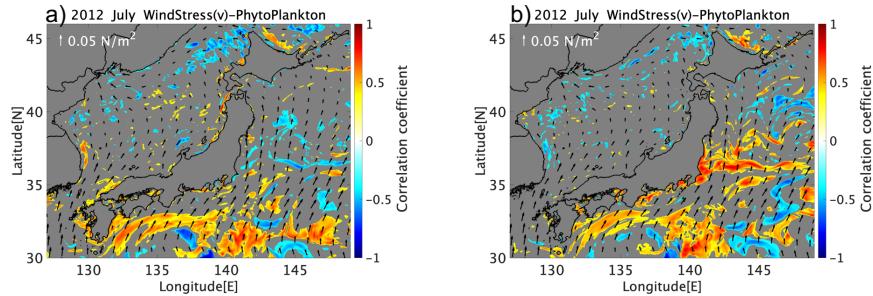


図-14 風応力の南北成分と植物プランクトン濃度の相関係数, (a) : ラグ 0 日, (b) : ラグ 5 日

える。

同様の解析手法を用いて風応力の南北成分と表層栄養塩濃度の相関係数も水平グリッド毎に算出した(図-13c)。沿岸湧昇の発生傾向が強い本州東岸域で正の相関を示し、沿岸湧昇による栄養塩への影響がエクマン輸送と黒潮によって東側沖合にまで広がっていた。相関係数の強弱は湾や海岸地形の変化に応答しているような構造が見られ、海岸地形が湧昇(風応力)による栄養塩輸送をコントロールしている可能性があると考えられる。

さらに、植物プランクトン濃度についても水平グリッド毎に風応力の南北成分との相関係数を算出した(図-14a)。九州沿岸や黒潮流軸周辺をはじめとする一部地域で有意な相関を示したものの、東日本沿岸域においては両変数の明瞭な相関関係は見られなかった。前述したように、沿岸湧昇による栄養塩輸送と植物プランクトンの増殖には数日程度の時間差が存在していた。そこで、5日間のラグを与えて風応力と植物プランクトン濃度の相関計数を算出した結果、正の相関を示した領域は栄養塩の湧昇傾向が強い領域と概ね一致した(図-14b)。これらのこととは、海岸地形によって強化された沿岸湧昇が栄養塩の表層への供給を促進することで植物プランクトンを増殖させ、その影響が黒潮下流域まで影響していることを示している。

5. おわりに

本研究では、領域海洋物理生態系統合モデル ROMS-

NPZD を用いて日本周辺海域における沿岸湧昇の発生過程および生物生産への影響評価を行った。以下に本研究で得られた主要な知見を示す。

- (1) 夏季に南風が強化されることで、東日本沿岸や紀伊半島沿岸等の南北に長く分布する海岸線の東岸で沿岸湧昇が生じ表層水温が低下する。日本周辺海域における沿岸湧昇の時間スケールは数日から一週間程度であり、鉛直方向には数十m程度水温構造が変化する。
- (2) 沿岸湧昇の発生によって、下層から表層付近に栄養塩が輸送される。表層に輸送された栄養塩は房総沖で黒潮によって東側の沖合に輸送される。
- (3) 沿岸湧昇によって表層に栄養塩が輸送されることで植物プランクトンの増殖が促進される。植物プランクトン濃度は、沿岸湧昇により栄養塩が増加してからおよそ 5 日後にピークを迎える。

本研究の結果から、日本周辺海域における夏季の季節風に起因する沿岸湧昇の応答には風向きと海岸地形が大きく関係しており、その影響が強い海域が明らかとなつた。また、沿岸湧昇によって発生した栄養塩および植物プランクトンの輸送が黒潮下流域まで広く影響することがわかった。これらの知見は、今後の海洋環境や水産資源の持続的な管理への活用が期待される。

謝辞： 本研究は科学研究費助成事業（22K18018, 22H05201, 24H00337）の援助を受けた。

REFERENCES

- 1) Itoh, S., Tsutsumi, E., Masunaga, E., Sakamoto, T., T., Ishikawa, K., Yanagimoto, D., Hoshida, Y., Kaneko, H., Hasegawa, D., Tanaka, K., Fukuda, H. and Nagata, T. : Seasonal Cycle of the Confluence of the Tsugaru Warm, Oyashio, and Kuroshio Currents East of Japan, *American Geophysical Union, Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 127, No. 8, p. 1, 2022.
- 2) 国土交通省, 海岸の特徴—水管理・国土保全 [Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Water and Disaster Management Bureau]
<https://www.mlit.go.jp/river/kaigan/main/kaigandukuri/sugata01.html>
- 3) 木田新一郎, 栗原晴子, 大林由美子, 川合美千代, 近藤能子, 西岡純 : 海洋学の 10 年展望 2021 : 沿岸域, 海の研究, Vol. 30, No. 10, pp. 87-104, 2021. [Kida, S., Kurihara, K., Obayashi, Y., Yamamoto-Kawai, M., Kondo, Y. and Nishioka, J. : Decadeal Vision in Oceanography 2021: Costal Oceans, *Oceanography of Japan*, Vol. 30, No. 10, pp. 87-104, 2021.]
- 4) 松野健 : 福島県沖における 1984 年 7 月の沿岸湧昇, 海洋生物環境研究所研究報告, No. 89301, pp. 1-17, 1989. [Matsuno, K. : Coastal Upwelling off the Coast of Fukushima in July, 1984, *Report of Marine Ecology Research Institute*, No. 89301, pp. 1-17, 1989.]
- 5) 大谷清隆 : 短時日吹く風によって生じる沿岸湧昇, 沿岸海洋研究, Vol. 23, No. 2, p. 155-165, 1986. [Ohtani, K. : Coastal Upwelling Generated by the Impulsive Longshore Wind (Symposium: Response Processes of Coastal Waters to Wind), *The Oceanographic Society of Japan*, Vol. 23, No. 2, p. 155-165, 1986.]
- 6) Smith, R. L. : Upwelling. *Oceanogr. Marine Biol. Ann. Rev.*, Vol. 6, pp. 11-46, 1968.
- 7) Mooers, C. N. K., Collins, C. A. and Smith, R. L. : The dynamic structure of the frontal zone in the coastal upwelling region off Oregon. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 6, pp. 3-21, 1968.
- 8) 清水利厚, 濱戸口明弘 : 外房沿岸における沿岸湧昇, 水産土木, Vol. 23, No. 1, pp. 57-62, 1986. [Shimizu, T. and Setoguchi, A. : Coastal Upwelling at Pacific Side of BOHSOH Peninsula, *SUISANDOBOKU*, Vol. 23, No. 1, pp. 57-62, 1986.]
- 9) 柳嶋慎一, 伴野雅之 : チョウセンハマグリ漁獲量と物理環境との関係, 土木学会論文集, Vol. 80, No. 17, 24-17245, 2024. [Yanagishima, S. and Banno, M. : Relationship between catch amount and physical environment for hard clam (*Meretrix lamarcii*), *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 80, No. 17, 24-17245, 2024.]
- 10) 岩崎順 : 茨城県沿岸域における *Dinophysis fortii* の大量発生機構, 東北区水産研究所研究報告, No. 48, pp. 125-136, 1986. [Iwasaki, J. : The Mechanism of Mass Occurrence of *Dinophysis fortii* along the Coast of Ibaraki Prefecture, *Bulletin of Tohoku Regional Fisheries Research Laboratory*, No. 48, pp. 125-136, 1986.]
- 11) Uchiyama, Y., Suzue, Y., & Yamazaki, H., Eddy-driven nutrient transport and associated upper-ocean primary production along the Kuroshio, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1 Vol. 122, pp. 5,046–5,062, 2017.
- 12) 多田邦尚 : 沿岸環境と植物プランクトン増殖～現場観測と室内実験～, 沿岸海洋研究, Vol. 56, No. 2, pp. 97-103, 2019. [Tada, K. : Coastal Environment and Phytoplankton Growth: Field Observations and Laboratory Experiments, *Bulletin on Coastal Oceanography*, Vol. 56, No. 2, pp. 97-103, 2019.]

(Received March 17, 2025)

(Accepted July 22, 2025)

COASTAL UPWELLING ALONG THE COAST OF THE MAINLAND JAPAN
INVESTIGATED WITH A REGIONAL OCEAN MODEL

Hikaru YANAGISAWA, Eiji MASUNAGA and Yusuke UCHIYAMA

Coastal upwelling has a significant impact on marine environments and fishery resources by transporting cold nutrient-rich water from deeper layers toward the surface. To evaluate effects of coastal upwelling around the mainland Japan, this study employed a regional ocean physical-ecosystem coupled model, ROMS-NPZD. Coastal upwelling occurs on the east side of the mainland Japan in response to intensified southerly winds during summer (summer-monsoon). Combined effects of vertical advective upwelling and enhanced vertical mixing due to wind forcing result decrease in temperature by approximately 3°C in coastal regions. Significant phytoplankton bloom appears several days after upwelling events. Coastal upwelling predominantly occurs along the east coasts in a north-south direction. In particular, significant upwelling off the Boso and Joban coasts also influences nutrient and phytoplankton distributions in the offshore Kuroshio downstream.