



# Dynamical impacts on marine ecosystem of coastal and marginal seas around Japan

ZHANG, XU

---

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

2021-03-25

(Date of Publication)

2023-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8066号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1008066>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



## 論文内容の要旨

氏 名 ZHANG XU

専 攻 Civil Engineering

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

Dynamical impacts on marine ecosystem of coastal and marginal

seas around Japan

(日本の沿岸および周辺海域における海洋生態系への力学的影響)

指導教員 内山雄介

Ocean covers over 70% of the Earth's surface and is among the most productive ecosystems in the world. Marine ecosystem is an open system that is affected by currents, seasons and other oceanographic processes and provides essential goods and services for human being. Japan is an island country in East Asia situated in the northwest Pacific Ocean, where the local marine ecosystem is broadly influenced by anthropogenic and biological process in coastal and marginal seas.

The Seto Inland Sea (SIS) is the largest semi-enclosed estuary in Japan. The Kuroshio has a considerable impact on the SIS circulation due to sporadic intrusions and meandering of the Kuroshio path. This area is taken out for the current study about anthropogenic impacts on the marine ecosystem, because approximate 24% of Japan's population resides within its watershed basins, leading to heavy nutrient loading of the SIS and thus an increased occurrence of harmful algal bloom. The Tarumi Sewage Treatment Plant (TSTP), one of the largest wastewater treatment plants in Osaka Bay, is located near the narrow Akashi Strait with complex tidal flows, having possible impacts on seaweed farming. On the other hand, the natural biological processes have more extensive and complex impacts on the marine ecosystem. Carbon exchange between the atmosphere and ocean substantially regulates the climate change. The biogeochemistry controls and feedbacks on global ocean primary productivity. Carbon cycling in the coastal waters is a major component of global carbon cycles and budgets. The Kuroshio is one of the most energetic western boundary currents accompanied by vigorous eddy activity at mesoscale and submesoscale, significantly affecting the primary productivity in the Kuroshio Region (KR) and Kuroshio Extension (KE) regions. Historically, there are abundant researches concerning the influences of vertical nitrate transport on the primary productivity. However, studies on the seasonal variability of the primary production in the KR and KE are limited particularly in conjunction with the Kuroshio currents affected by the ridge topography in the KR.

Nutrient transport is one of key influencers in the marine ecosystem. We consider the nutrient source from two major aspects, sewage from treatment plant located in estuary and upward entrainment to surface layer from subsurface in the open sea area. The sewage transport is noticeably affected by the tidal current in estuarine region. By contrast, the vertical eddy-induced nutrient upwelling is an essential source to maintain the primary production, further affecting human being's life on global scale. Therefore, the researches concerning primary production in the coastal seas are important for marine ecosystem-based management, spatial planning for the future. In the present study, we aim to examine possible driving mechanisms in Osaka Bay, an estuarine area with densely

population. We also quantify the impact of the diversion of sewage effluent on the seaweed farm and possible improvement with different discharge operations to examine the anthropogenic effect on marine ecosystem. In addition, to understand the biological processes in the coastal seas, we analyze the seasonal variability of the eddy-driven vertical nutrient fluxes that play essential roles in maintaining the upper-ocean primary production, as well as its driving mechanisms in the KR and KE regions.

In Section 2, we developed a quadruple-nested, high-resolution model with a horizontal of 20 m based on Regional Oceanic Modeling System (ROMS). A Eulerian near-field effluent dilution model was employed to reproduce 3-D advection-dispersion processes of the under-resolved, bottom-released buoyant effluent plume at the TSTP. In addition, in Section 3, we conducted two more alternative scenarios to assess the impacts of wastewater effluents from the standard diversion outfall by reducing the sewage discharge rate and changing the wastewater density. A twin numerical experiment for cases with normal and western diversion outfalls of the TSTP enabled us to quantitatively evaluate the effect of the diversion. The effluent flux budget analysis revealed that the cumulative nondimensional effluent of the seaweed farm is reduced by  $\sim 0.81 \times 10^4 \text{ m}^3$  on average compared with that of the normal outfall ( $\sim 2.83 \times 10^4 \text{ m}^3$ ), exhibiting a  $\sim 28\%$  reduction of the effluent from the TSTP by the diversion, which could lead to favorable influences on the growth of seaweeds. Based on above conclusion, two more operations were set up to analyze the effects of sewage discharge rate and sewage density. We discovered that 16.7% of the wastewater discharge rate decreased from the standard diversion operation resulted in an overall 25.4% reduction in the sewage effluent accumulating on average in the seaweed farm. In turn, the addition of ambient seawater to the freshwater effluent did not substantially alter the effluent accumulation and associated hydrodynamics at the farm.

We have understood the anthropogenic impacts on the marine ecosystem in our research domain. In turn, the natural biological processes are summarized as follows. Carbon cycling in the coastal waters is a major component of global carbon cycles and budgets, further affecting the climate. Therefore, we enlarged our study area to focus on the impacts of upward eddy-induced nitrate transport on the marine ecosystem in the following two sections. Section 4 investigated seasonal variability of eddy fluxes that sustain the upper ocean primary productions and the driving mechanisms behind them in the KR and KE regions. To this end, we conducted a submesoscale eddy-permitting ocean modeling based on ROMS coupled with a nitrogen-based NPZD biogeochemical model, including the KR and KE regions. Furthermore, in Section 5, a synoptic, retrospective

downscaling ocean modeling was developed to investigate inter-annual variability of vertical eddy-induced nutrient fluxes, when several large meanders occur in the KR. We found the segmentations of surface chlorophyll-a (Chl-a) on both sides of the Kuroshio with a higher Chl-a concentration on the northern area. Enhanced vertical mixing in winter and subsequent improvement of the light condition in spring results in active primary productions around the Kuroshio both in the KR and KE. The overall upward entrainment from the nutrient-rich subsurface to the nutrient-exhausted surface is substantial for maintaining the near-surface primary productivity. However, a downward eddy nitrate fluxes are found in winter in the upstream (Enshu-nada Sea region) and the downstream regions relative to the ridge in the KR. In winter, the topographic eddy shedding, positive barotropic conversion rate ( $K_m K_e$ ), and baroclinic conversion rate ( $P_e K_e$ ) jointly promote eddy-driven downward nitrate fluxes through shear instability and baroclinic instability along the Kuroshio path and its northern side in the KR. In the KE, upward eddy flux due to the combination of positive  $K_m K_e$  and  $P_e K_e$  enhances the primary production in the upper ocean. By contrast, in summer, the mixed layer depth becomes very shallow and thus makes the upper ocean  $P_e K_e$  almost vanish in both KR and KE. Positive  $K_m K_e$  and  $P_e K_e$  arise mostly at depth beneath the mixed layer, which considerably interact with the ridge topography in the KR to increase in the upstream while decrease in the downstream regions. In the KE, as  $P_e K_e$  is prominently reduced in summer, eddy nitrate flux is decreased significantly in particular on the north of the Kuroshio. Therefore, baroclinic instability is the key influencer on seasonal variability in eddy generation near the surface, where vertical eddy mixing is inevitably important to promote the subsurface nutrient supply to the upper ocean. In addition, impacts of the oceanic ridge (Izu-Ogasawara Ridge) are examined in the KR. Turbulence associated with the Kuroshio trends to be less energetic in the upstream, while the ridge generates intensive eddy mixing more broadly and deeply in the downstream mainly due to the interaction between the Kuroshio front and ridge topography that results in mesoscale eddy-generating baroclinic instability. We detected three obvious meanders during our analysis period with the synoptic configuration. When the meander happens in summer, more significant nitrate depletion occurs in the surface layer, resulting in relative weak primary productivity but larger distribution. In the offshore region, mean and transient nitrate flux decreases during the meander, while diffusive flux plays important role in maintaining nutrient upwelling near surface. In the coastal part, mean component is essential for the active primary production during the meandering.

氏名	ZHANG, XU		
論文 題目	Dynamical impacts on marine ecosystem of coastal and marginal seas around Japan (日本の沿岸および周辺海域における海洋生態系への力学的影響)		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	内山 雄介
	副査	教授	中山 恵介
	副査	特命教授	梶川 義幸
	副査		
			印

要 旨

本博士論文は、SDGs-14 (豊かな海の保全) やブルーカーボン (海洋が吸収する炭素) を通じて地球環境問題に対して重要な役割を果たしている海洋生態系の保全や、その形成機構の理解の深化を目指して、先端的な海洋流動モデリング技術を用いて沿岸・海洋生態系に与える海水流動の力学的な効果について検討したものである。沿岸・海洋生態系、特にそれを下支える基礎生産 (主に植物プランクトン量) は、根幹的には栄養塩の供給量とその輸送過程によって制御される。栄養塩ソースとしては、人為的供給と自然供給の2つに大別される。前者は河川や下水処理施設を通じて沿岸域に供給され、地形や密度流、潮流などの影響を受けて主として水平方向に輸送され、時空間的に複雑に分布する。後者は外洋亜表層以下 (概ね水深200m以深) に賦存する硝酸態窒素などの栄養塩として存在しており、黒潮などの海流に伴って水平輸送され、さらに海洋表層で強化される鉛直混合によって鉛直方向に輸送され、海洋表層において植物プランクトンに利用される。したがって、海洋における生態系は、人為的ソース・水平輸送で特徴づけられる栄養塩サイクルによって規定される沿岸生態系と、自然ソース・鉛直輸送で特徴づけられる外洋生態系に分けることができる。両者は当然ながら沿岸域・外洋間での混合を通じて相互に影響するが、本研究では、この2つを選択的に個別に分離することで、それぞれの輸送過程を合理的に取り出して議論するというアプローチが取られている。

研究上の特徴としては、ダウンスケーリング海洋流動モデル ROMS (Shchepetkin & McWilliams, 2005) を用いたネスティングによる高解像度数値シミュレーションを用いている点にあり、栄養塩輸送過程を記述するために、沿岸域では下水処理場からの排水を想定した近傍場初期拡散モデルとオイラー型パッシブトレーサ輸送モデル (Uchiyama et al., 2014) を ROMS に組み込むことにより、人為起源栄養塩の沿岸域での輸送分散過程を解析する枠組みを用いた。一方で外洋域では、窒素収支ベースの NPZD (窒素・植物プランクトン・動物プランクトン・デトリタス) 型低次生産モデル (Fasham et al., 1991) をオイラー型アクティブトレーサ輸送モデルに組み込むことにより、現地観測に基づく硝酸塩の気候値により与えられる亜表層の栄養塩ソースの3次元輸送過程を解析する枠組み (Uchiyama et al., 2017) を用いた。いずれのモデルも海洋学・沿岸海洋学・海岸工学分野等において極めて先端的な数値海洋モデルであり、しかもスーパーコンピュータを駆使したネスティング技術によって、着目する海域を高解像度で表現することにより、精緻で高精度なモデリングが可能となっている。最外側境界条件にはデータ同化海洋再解析値である JCOPE2 (Miyazawa et al., 2009) を用いて太平洋スケールでの海洋中長期変動などを正確に考慮しながら、気象庁 GPV-MSM に代表される精緻な海上気象データ等を海表面境界条件として与え、ダウンスケーリングによって対象海域へと焦点を当て、現実非常に近い3次元流動場を再現し、それに基づいて栄養塩輸送過程を精密に表現するというアプローチが取られている。

本論文は、全体的な研究背景や目的を第1章で述べたのち、第2章および第3章は沿岸域における栄養塩輸送を、第4章および第5章では外洋域における栄養塩輸送についての解析結果を示した。第2-3章では、いずれも瀬戸内海播磨灘・大阪湾を対象とした4段ネストモデルを用いて、解析領域を空間解像度20mで表現するという超高解像度モデリングを行った。人為的栄養塩ソースとして神戸市西水処理場 (通称、垂水処理場) から排水される栄養塩 (硝酸態窒素など) を対象に、処理場近傍場での栄養塩輸送と、処理場に隣接するノリ養殖場に与える影響評価を行った。第2章では、ノリのライフサイクルの中で海水環境変化の影響を最も強く受ける秋季における処理水の影響緩和を目指して神戸市が実施した、迂回排水路からの排水効果の定量化を主眼とした解析を行った。すなわち、通常運転時の排水口を、秋季に養殖場から約500m余分に離れた迂回排水口に移動させたときに、養殖場へと輸送されて蓄積される栄養塩の変化量

氏名	ZHANG XU
----	----------

を求め、約80%もの低減効果があることを示した。その主たる原因は、処理場前面に形成される反時計回りの潮汐残差流による平均輸送効果であり、近隣の明石海峡等の地形効果などによる非線形性によって迂回排水路からの排水がより効率的にノリ養殖場より遠方に輸送されることを見出した。第3章では、第2章の結果に基づいて、垂水処理場からの排水パターンの変更が栄養塩輸送、ひいてはノリ養殖場への程度影響するのを工学的に検討した。排水パターンは処理場管理者の神戸市によって提案されたシナリオに基づいており、迂回排水路を活用しながら排水量を減じた場合と、密度調整を行った場合の沿岸環境影響評価を行った。反時計回り残差流による平均移流効果に加え、潮汐や乱流変動に起因した transient 栄養塩フラックスが卓越することにより、供給量変化を大幅に上回る栄養塩蓄積に対する低減効果が得られることを明示した。

第4-5章は、我が国太平洋沿岸の海洋表層生態系を支える栄養塩輸送過程の解明を試みた野心的な研究であり、黒潮に伴う栄養塩水平輸送と、その周辺に発生する中規模渦に伴う鉛直渦栄養塩フラックスの時空間構造に着目した解析を行った。使用したのはシングルネストの JCOPE2-ROMS ダウンスケーリングモデル (Uchiyama et al., 2017; 2018) である。このモデルは空間解像度3kmという中規模渦解像・サブメソスケール渦許容の外洋モデルとしては相当な高解像度の流動モデルである。JCOPE2-ROMS モデルに NPZD モデルをカップリングさせることで、黒潮等の海流による栄養塩水平輸送、海洋亜表層からの栄養塩供給、およびそれに伴う海洋表層での一次生産 (植物プランクトン量など) の応答を検討した。第4章では気候値モデルを用いることで年平値としての黒潮 (直線安定流路) の影響を解析したのち、渦フラックスが冬季に極大化し、その後の日射の増加によって春季ブルーム (植物プランクトンの大増殖) が惹起することを示した。特に冬季の鉛直輸送強化は、海面冷却によって傾圧不安定が強化されることが引き金になることを示した。第5章は同じ海域における栄養塩輸送について、実際の外力に対する数年間の解析を実施し、海域環境を強く支配する黒潮流路変動の影響について解析を行った。直線流路と蛇行流路の際の生態系と栄養塩輸送の応答を比較し、黒潮流下方向に対して左側 (すなわち岸側) において栄養塩輸送と基礎生産とに顕著な差異が出現することを示した。さらにその原因として、直線流路時には黒潮フロント強度が増加し、温度風平衡の変化を通じて岸側で亜表層栄養塩濃度ピーク水深が上昇することで全体的な栄養塩供給の強化が促進されること、またフロント強化に伴い傾圧不安定が卓越して鉛直渦栄養塩フラックスが増大することが主たる原因であると推定した。

第6章では全体的なまとめを行い、本論文の結論を総括した。人為的栄養塩供給と潮流等の短周期流動変動の影響による水平輸送に支配される内湾域における海洋生態系への影響評価と、自然の栄養塩供給と海流および傾圧不安定などに伴う鉛直輸送に支配される外洋域における海洋生態系への影響評価とを明確に分離した上で個別に解析した本研究の工学的・科学的意義を論じるとともに、さらなるネスティングによる両プロセスの統合を今後の課題として挙げ、博士論文を締めくくっている。

業績リスト等々に示されているように、本博士論文の主要部分である第2-5章の内容は、いずれも SCI ジャーナルに掲載済み、もしくは投稿中・投稿予定である。第2章と第3章の成果は、Marine Pollution Bulletin (IF2019 = 4.049) に原著論文2報として掲載された。第3章の結果の一部は速報的に査読付き国際会議プロシーディングス1報として発行された。第4章の成果は Journal of Geophysical Research: Oceans (IF2019 = 3.56) への掲載を目指して投稿済みであり、第5章の成果は Geophysical Research Letters (IF2019 = 4.50) に投稿準備中である。このように、本論文を構成する各論はそれぞれに学術的に十分に高いレベルにあると客観的に評価される。それらを縦横に取りまとめた本論文全体は、市民工学、特に海岸工学における海洋環境問題の重要な構成要素である生物基礎生産に対する物理環境の影響を精緻かつ定量的に評価した研究であり、残差流および乱流による栄養塩輸送機構について重要な知見を得たものとして工学的・学術的・科学的に価値ある集積であると評価される。提出された論文は工学研究科学学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の ZHANG XU は、博士 (学術) の学位を得る資格があると認める。