

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 10 月 12 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26241009

研究課題名(和文) 東シナ海陸棚域における基礎生産と物質循環を支配する物理・化学・生物過程の研究

研究課題名(英文) Study on physical, chemical and biological processes controlling the primary production and material transport in the shelf region of the East China Sea

研究代表者

松野 健 (Matsuno, Takeshi)

九州大学・応用力学研究所・教授

研究者番号：10209588

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,000,000円

研究成果の概要(和文)：東シナ海陸棚域における有光層での基礎生産に関して、栄養塩の窒素・リン酸比(N/P)と乱流混合による栄養塩輸送との関連から、鉛直混合による栄養塩の下層からの供給がしばしば亜表層クロロフィル極大層を形成していることが確かめられ、底層境界層では、乱流強度と懸濁物の濃度に明瞭な関係がある一方、堆積物からの再懸濁物に含まれる有機物の分解は栄養塩の供給にはあまり寄与していないことが見いだされた。また、生態系モデルからは、黒潮からの栄養塩が陸棚域の基礎生産に大きく寄与していることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Concerning primary production (PP) and transportation of nutrients for PP in the shelf region of the East China Sea, studies with two points of view based on field observations were carried out, along with numerical studies. Considering the relationship between the intensity of vertical mixing and nitrogen/phosphate ratio in the nutrients, it was found that vertical transport of nutrients caused by vertical mixing often contributes to the PP in the subsurface chlorophyll maximum. In the bottom boundary layer, concentration of suspended particles has clear correlation with turbulence intensity. It was found that organic materials in the re-suspended particles from the sediment would not contribute so much to the re-generation of nutrients in the water column. From the analysis with numerical ecosystem model, it was revealed that nutrients from the Kuroshio would most greatly contribute to the PP in the shelf region of the East China Sea.

研究分野：海洋物理学

キーワード：乱流混合 亜表層クロロフィル極大層 海底境界層 栄養塩供給 基礎生産 生態系モデル

### 1. 研究開始当初の背景

東アジア縁辺海では、長期的気候変動の他に、周辺の陸域での経済活動の急激な展開が、海域環境に大きな変化を生じさせており、海洋環境変動の適切な理解は緊急を要している。特に東シナ海陸棚域では、かつて過剰漁獲によって貧弱化した生物相にさらに重大な打撃を与えつつある。しかし、縁辺海の生物生産に関わる生物地球化学過程については、その媒体(海水)がどのように混合・循環しているかという海洋物理過程も含めて、定量的な理解は十分できていない。近年、衛星リモートセンシングの飛躍的な発展によって、海洋における低次生産を反映した表層クロロフィルの広範囲でかつ複雑な分布を把握することができ、また数値実験の進歩は、観測によって捉えられた植物プランクトンの季節変化を再現している。しかし、衛星によるクロロフィルの分布は表層に限られたものであり、その鉛直構造に関する情報は極めて限られている。また、数値モデル研究では、計算グリッドを細かくすることで新しい現象が見えてくるなど、モデルに依存するパラメータが結果を左右することが多い。

東シナ海陸棚域では、衛星観測などから、基礎生産に対する長江希釈水の影響について理解は進んできているが、亜表層クロロフィル極大(SCM)や海底混合層など、海洋の内部構造と生物過程のかかわりについて、その知見は限られている。特に下層の栄養塩の利用には鉛直混合による栄養塩の輸送など物理過程の定量的な評価が必要となる。また、底層での酸素消費は有機物の分解によるものであり、底層の栄養塩の起源を考える上で、海底付近の物理・化学過程は重要な要素である。SCMにおける基礎生産に対する河川起源栄養塩の役割や、夏季から秋季にかけて底層で発生する貧酸素水と栄養塩の再生過程など、定量的に評価すべき課題は多い。

### 2. 研究の目的

東シナ海陸棚域における基礎生産と低次生態系の構造の解明を目指し、物理、生物、化学を専門とする研究者の共同による観測的研究を行い、数値モデルによってその物理過程および生態系の構造を明瞭に呈示することを目的とする。具体的には、亜表層クロロフィル極大層(SCM)の形成・維持機構および基礎生産(新生産)に果たす役割を明らかにすること、および陸棚域下層の栄養塩の起源の特定、それに関わる堆積物と懸濁物の挙動の解明、底層乱流混合との関係を定量的に評価することを目指す。

### 3. 研究の方法

観測を主体とした2つの項目の研究と、その結果に合理的な解釈を与えるための数値モデル研究を実施する。東シナ海陸棚域における過去の観測データの解析を進めるとともに、陸棚域および陸棚縁辺域において観測

を行い、(1)上層(有光層)の基礎生産を対象とし、SCMと表層混合層での基礎生産の特性を明らかにするとともに、乱流計測により下層からSCMに供給される栄養塩を評価する、また(2)陸棚域下層の栄養塩を対象とし、多項目の水質要素と化学トレーサーを用いて陸棚底層に分布する栄養塩の起源を特定すると同時に、底層の高濁度水と乱流混合との関係、栄養塩の生成に関わる高濁度水および低酸素水の履歴と役割を明らかにする。そしてこれらの結果に対して、(3)LES等の乱流混合強度を再現するモデルによって理論的説明を加え、栄養塩の組成を分別した生態系モデルを用いて陸棚域における栄養塩の循環像を示す。

### 4. 研究成果

本研究の目的の二つの研究対象、基礎生産の行われる有光層と栄養塩のひとつの供給源と考えられる底層に分けて、それぞれ観測データに基いた研究成果を述べ、その後、数値モデルを用いた実験結果を述べる。

(1)有光層に供給される栄養塩の起源と基礎生産

本研究グループで過去に観測してきた陸棚域における微細構造および栄養塩等のデータを用いて、鉛直混合による栄養塩のSCMへの供給が基礎生産に及ぼす影響を評価した。乱流計測に基いた鉛直拡散係数の鉛直分布およびSCM付近の栄養塩の鉛直勾配から、下層からの栄養塩の輸送を評価した。そして、密度成層構造とSCMとの比較、SCM付近における栄養塩の窒素・リン比(N/P)との関係から、以下のことが明らかになった(Lee et al., 2017)。一般的にSCMは密度躍層(栄養塩躍層に概ね一致することが多い)付近に形成されるが、詳しく見ると、特にN/P比が小さい場合には、SCMの深度が栄養塩躍層の上部より浅いところに形成される傾向にあることがわかった。これは、一般にN/P比の小さい下層の栄養塩が、鉛直混合によって供給され、SCMでの基礎生産に寄与していることを示唆するものであるが、乱流計測に基いた鉛直混合による栄養塩輸送の見積もりから、このことを裏付ける結果が得られた。SCM付近で計測された鉛直拡散係数は大きな変動幅を持つが、N/P比が小さいところでは、鉛直混合による栄養塩輸送が、N/Pが大きいところと比べて有意に大きいことが示され、鉛直混合が下層の栄養塩をSCMに供給していることが明らかになった。また、クロロフィル濃度とFRRF等による光学的計測から得られた基礎生産能から見積もった基礎生産と比較して、下層から供給された栄養塩はSCMでの新生産に大きく寄与していることが示された。一方、N/Pが大きいところでは、鉛直拡散による栄養塩の供給は小さく、長江起源の栄養塩の水平移流による供給が寄与していることが推察された(図1)。このような栄養塩の起源と基礎生産との関係

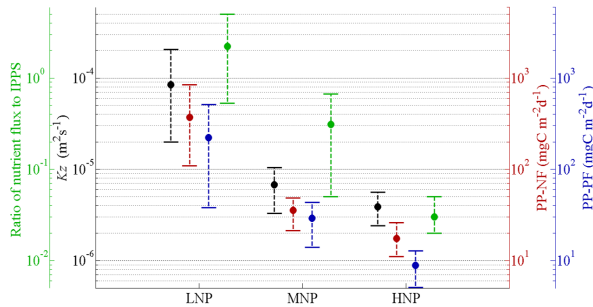


図 1 SCM 付近の N/P 比の違い(LNP:N/P<15, MNP:15<N/P<20, HNP: N/P>20) による栄養塩 (赤:硝酸態, 青:リン酸態)の鉛直輸送および(緑)栄養塩の鉛直輸送の基礎生産への寄与。黒は鉛直拡散係数。

は、測点でのスナップショット的計測データからのみではなく、数日間の時系列データからも確認された。

基礎生産に関わる植物プランクトンのサイズ組成に関して、長江希釈水の植物プランクトンの群集構造が他の海域よりも小型であることが確認され、そのサイズ組成を衛星で測定可能である植物プランクトンの吸収スペクトルを利用して推定する新しい方法を開発した。

一方、表層における栄養塩の動態に関して、河川から主に供給される溶存鉄と硝酸塩の濃度が共に塩分 30 を越える付近で大きく減少することが明らかになり、河川起源の溶存鉄と硝酸塩の基礎生産に対する寄与は、長江希釈水の影響を強く受けている西側海域に限られている可能性が示された。また、栄養塩が希薄な陸棚の外の表層では、窒素固定生物によって、懸濁・溶存態有機物量が増加している海域があることが、<sup>15</sup>N の値を組み合わせた解析で明らかとなった。このような海域では、N/P 比の高い大気降水由来の栄養塩供給が卓越しており、高 N/P 比の有機物から、低 N/P 比の栄養塩が生成していたことから、再生栄養塩が一次生産を支える重要な要素であることを明らかにした。

## (2) 海底境界層における乱流強度と懸濁物の分布および栄養塩の再生

2014 年 7 月に対馬海峡南部において、5 ビーム ADCP と乱流微細構造プロファイラを用いた時系列観測を行い、海底境界層内の弱い成層構造が乱流強度の変動と対応して潮汐周期で変動しており、このような変動が、背景密度場の潮汐流による移流や鉛直シアによる変形によって生じていることを明らかにした (Endoh, et al. 2016)。また、海底付近の鉛直混合強度を、流速の鉛直分布の計測値から推定する手法を考案し、東シナ海陸棚上に適用した。その結果、海底境界層内の渦粘性係数は海底上 5m 付近で  $3 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  程度となること、境界層上端で水平移流などの効果により力学バランスが変化していることが明らかになった。一方、海底境界層内における乱流混合と海底堆積物の巻き上

がりすなわち再懸濁物の濃度との関係について、東シナ海陸棚域における過去の観測データに基いた解析を行い、潮汐周期に対応した乱流強度の変動に対して濁度が変動しており、海底に近いほど濁度が大きくなるという明瞭な鉛直分布を示すとともに、その分布が海底境界層内の成層の強さに大きく依存していることが示された。

一方、底層直上水を 1~2 時間間隔で 12 時間~24 時間の連続採水を行い、懸濁物濃度 (SS)、懸濁有機態炭素・窒素・リン量 (POC・PON・POP) の変動を観測した。その結果、再懸濁で生じる懸濁態有機物は、既に難分解性分のみが残存していると考えられ、仮に、全てが無機化しても、 $0.3 \sim 1.0 \mu\text{M-N}$ ,  $0.005 \sim 0.03 \mu\text{M-P}$  と低濃度に過ぎないことが示された。したがって、大陸棚底層における高栄養塩水の形成には、再懸濁による懸濁態有機物の水中での無機化に伴う栄養塩の供給は大きな役割を果たしておらず、底層に貫入する黒潮中層水や、堆積物間隙水からの拡散によって栄養塩が供給されていることを示唆する結果が得られた。

さらに、海底堆積物より底層海水への栄養塩輸送を把握するため、白鳳丸 KH-15-3 次航海において東シナ海陸棚域中央部での観測を行い、堆積物直上海水と間隙水を採取してリン酸、ケイ酸、硝酸・亜硝酸濃度を計測した。その結果、観測海域の最西端 (中国大陸寄り) に位置する複数の測点では、間隙水中の全栄養塩濃度は直上海水に比べて高く、堆積物間隙水中の栄養塩は底層海水の起源の一つであるとする上記の結果を裏付ける結果が得られた。

以上のことから、海底境界層内における乱流構造は、懸濁物の分布に大きく関わっていることが示されたが、堆積物から再懸濁した有機物の挙動は、水中での栄養塩再生にはあまり大きな役割を果たしておらず、海底境界層での乱流は、堆積物中の間隙水に含まれる栄養塩の水中への輸送という面から重要な役割を果たしていると考えられる。

## (3) LES モデルを用いた懸濁物の挙動および生態系モデルを用いた基礎生産に対する栄養塩の供給過程

海底境界層付近における潮流による乱流混合と懸濁物の巻き上げりの関係を知るため、粒子追跡のプログラムを組み込んだ LES による数値実験を行った。異なる沈降速度を有する粒子の鉛直分布を調べたところ、その分布は (海底近傍を除いては) いずれも指数関数的であり、その減衰率は鉛直渦拡散係数 ( $K_z$ ) と沈降速度 ( $w$ ) との比に依存するという先行研究の結果が確認された。しかし、潮流の時間変化にともない鉛直渦拡散係数 ( $K_z$ ) は時間変化し、沈降速度の速い粒子は鉛直分布もそれに応答するが、沈降速度の遅い粒子は十分に応答できない。そこで、粒子の鉛直分布と鉛直拡散係数の関係を詳細

に調べた。その結果、粒子の鉛直分布から鉛直渦拡散係数を見積もるには、粒子の沈降速度と潮流の振動数を考慮する必要があること、沈降速度の速い粒子については鉛直分布の時間変化を考慮する必要があること、沈降速度の遅い粒子については時間変化するなかで最大値に近いものが粒子分布を決めること、などが明らかとなった。現実海洋における懸濁物の分布とその場の乱流強度との関係を議論する際には、上記の点を考慮する必要があることが示された。

また、さまざまな起源を持つ栄養塩が、東シナ海陸棚域の基礎生産にどのように効いているかを調べるため、生態系モデルによる検討を行った。栄養塩の起源として、河川、黒潮、台湾海峡、そして大気経由を考えた。河川起源の栄養塩は長江希釈水の分布と類似し、沿岸域で濃度が高く、冬季には中国沿岸に沿って南下し、夏季には長江沖から対馬海峡まで広がる。大気起源の栄養塩は河川起源のものと同様の分布を示す。この二種類の栄養塩は基本的に浅い海域に分布し、鉛直方向の濃度変化が小さい。一方、黒潮起源の栄養塩も明確な季節変化を示し、表層の濃度は冬季に、底層の濃度は夏季に高くなる。主に水深100m~200mの海域に多く分布するが、50mより浅い海域でも確認できる。台湾海峡起源の栄養塩はほかの起源の栄養塩と比べると濃度がやや低いが、夏季には、水深50m~100mの海域でその存在が顕著になる。以上の結果を東シナ海の海流と水塊分布と照らし合わせることで、栄養塩分布を支配するのは、生物過程よりも物理過程に依存していることがわかった。

図2に陸棚域の基礎生産に寄与する栄養塩の起源別の分布(それぞれの起源の栄養塩が最も卓越する海域)を季節ごとに示す。河川および大気起源の栄養塩は年間を通じて中国沿岸と陸棚域の北側に分布し、台湾海峡起源のものが春季から夏季にかけて比較的広い範囲に、また黒潮起源の栄養塩が冬季には広く、また年間を通じて外部陸棚域に広がって

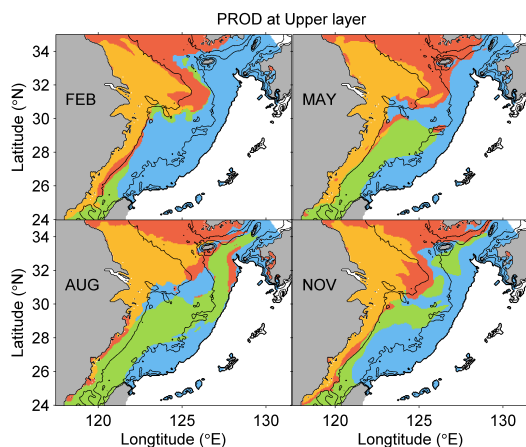


図2 基礎生産に寄与する溶存態窒素の季節別・起源別の分布。(茶、緑、青、赤は河川、台湾海峡、黒潮、大気起源がそれぞれ卓越する海域)

いることがわかる。

これらを積算し、4つ栄養塩の起源のうち、黒潮起源のものが東シナ海における植物プランクトンの現存量と基礎生産の総量に最も大きく寄与していることが明らかになった。一方、栄養塩の生産効率(栄養塩の現存量と基礎生産の比)の視点から見れば、台湾海峡起源と大気起源の栄養塩がもっと効率よく基礎生産に寄与している。これは、この二つの起源の栄養塩が海洋の表層に分布し、光と水温の条件に恵まれることで、植物プランクトンへの取り込みとそれに対応する懸濁有機物の分解が速くなり、栄養塩の循環速度が速くなっているためである。それに対して、河川起源の栄養塩は中国大陸近くに分布するため、そこの高濃度の懸濁物質に起因する光条件の低下およびリン制限のため、植物プランクトンへの取り込みが遅くなっていることが示された。また黒潮起源の栄養塩は底層に多くあり、光条件の制限のため生産効率は最も低いことも確認された。

## 5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計26件)

Lee, K.-J., T. Matsuno, T. Endoh, J. Ishizaka, Y. Zhu, S. Takeda, and C. Sukigara, A role of vertical mixing on nutrient supply into the subsurface chlorophyll maximum in the shelf region of the East China Sea, *Cont. Shelf Res.*, 査読有, 2017, in press.

DOI: 10.1016/j.csr.2016.11.00

Zhang, J., Guo, X., Zhao, L., Miyazawa, Y., Sun, Q., Water exchange across isobaths over the continental shelf of the East China Sea, *J. Phys. Oceanogr.*, 査読有, 2017, in press. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/JPO-D-16-0231.1>

Wang, S., C. Xiao, J. Ishizaka, Z. Qiu, D. Sun, Q. Xu, Y. Zhu, Y. Huan, and Y. Watanabe, Statistical approach for the retrieval of phytoplankton community structures from in situ fluorescence measurements. *Optics Express*, 24,23635-23653, 査読有, 2016, DOI: [10.1364/OE.24.023635](http://dx.doi.org/10.1364/OE.24.023635).

Endoh, Takahiro, Yutaka Yoshikawa, Takeshi Matsuno, Yoshinobu Wakata, Keun-Jong Lee, and Lars Umlauf, Observational evidence for tidal straining over a sloping continental shelf, *Cont. Shelf Res.*, 117, 12-19, 査読有, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2016.01.018>

Yutaka Yoshikawa, Scaling Surface Mixing/Mixed Layer Depth Under Stabilizing Buoyancy Flux, *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 45, no. 1, pp. 247-258, 査読有, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/JPO-D-13-0190.1>

[学会発表](計 83 件)

Yoshikawa, Y. and T. Mannen:  
Numerical investigation on effects of  
ocean surface turbulence on particle's  
sinking, JpGU Meeting, 2016 年 5 月  
22-26 日, 幕張メッセ(千葉県).

Zhang, J., Q. Liu, and L. Bai: Water  
mass analysis and origins of bottom  
water nutrient enrichment in the East  
China Sea using heavy rare earth  
elements. Ocean Sciences Meeting,  
2016 年 2 月 23 日, New Orleans(USA).

Ishizaka, J., S. Q. Wang, Q. Xu, Y. Xu,  
C. Sukigara: Abnormal phytoplankton  
functional type in the Changjiang  
diluted water: Influence of abnormal  
N/P ratio? The 7th Program of the East  
Asian Cooperative Experiments  
(PEACE) Ocean Science Workshop,  
2014 年 10 月 28 日, Ocean University of  
China, Qingdao, China

野崎龍, 梅澤有, 他 5 名, 東シナ海におけ  
る硝酸の起源と植物プランクトンによる  
利用の季節・地域別特性, 2014 年 9 月  
14-16 日, 2014 年度日本海洋学会秋季大  
会, 長崎大学(長崎市).

Lee, K.-J., T. Matsuno, T. Endoh, J.  
Ishizaka, Relationship between  
nutrient supply and N/P ratio around  
the subsurface chlorophyll maximum  
in the shelf region of the East China  
Sea, 11th Annual Meeting of Asia  
Oceania Geosciences Society, 2014 年 7  
月 31 日, ロイトン札幌ホテル (札幌市)

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

松野 健 (MATSUNO, Takeshi)  
九州大学・応用力学研究所・教授  
研究者番号: 1 0 2 0 9 5 8 8

### (2)研究分担者

武田 重信 (TAKEDA, Shigenobu)  
長崎大学・大学院水産・環境科学総合研究科  
(水産)・教授  
研究者番号: 2 0 3 3 4 3 2 8

石坂 丞二 (ISHIZAKA, Joji)  
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授  
研究者番号: 4 0 3 0 4 9 6 9

梅澤 有 (TAKEDA, Shigenobu)  
長崎大学・大学院水産・環境科学総合研究科  
(水産)・准教授  
研究者番号: 5 0 4 4 2 5 3 8

吉川 裕 (YOSHIKAWA, Yutaka)  
京都大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号: 4 0 3 4 6 8 5 4

郭 新宇 (GUO, Xinyu)  
愛媛大学・沿岸環境科学研究センター・教授  
研究者番号: 1 0 3 2 2 2 7 3

張 勁 (ZHANG, Jing)  
富山大学・大学院理工学研究部(理学)・教授  
研究者番号: 2 0 3 0 1 8 2 2

千手 智晴 (SENJYU, Tomoharu)  
九州大学・応用力学研究所・准教授  
研究者番号: 6 0 3 3 5 9 8 2

遠藤 貴洋 (ENDO, Takahiro)  
東京大学・海洋アライアンス・特任准教授  
研究者番号: 1 0 4 2 2 3 6 2

### (3)研究協力者

李 根涼 (LEE, Keunjong)