

海洋の渦・前線とそれらが生み出す大気海洋現象の解明

課題責任者

野中 正見

海洋研究開発機構付加価値情報創生部門アプリケーションラボ

著者

佐々木 英治*¹, 笹井 義一*², 野中 正見*¹

*¹ 海洋研究開発機構付加価値情報創生部門アプリケーションラボ, *² 海洋研究開発機構地球環境部門地球表層システム研究センター

本課題では、黒潮等の西岸境界流に伴う海面水温前線や中規模渦などの海洋局所構造の変動が、大規模な海洋循環や大気循環の形成・変動に果たす役割、海洋生態系に及ぼす影響等を明らかにすることを目的に、高解像度大気海洋シミュレーション研究を推進している。ここでは令和元年度の成果から、1) 海洋サブメソスケール現象の経年から十年規模の変動メカニズム、2) 海洋中規模渦の経年変動の予測可能性、3) 海洋中規模渦が海洋生態系に与える影響について紹介する。1) では、1/30 度解像度北太平洋海洋シミュレーションの 27 年積分から海洋サブメソスケール現象の変動が大気変動の影響を受けうることと、そのメカニズムを明らかにした。2) では、海洋渦を解像するアンサンブル海洋シミュレーションから、海洋中規模渦の活動度の経年変動に予測可能な成分があることを示した。3) では、海洋生態系モデルを結合させた海洋モデルで黒潮・黒潮続流域の中規模渦活動が表層下の栄養塩を有光層へ運ぶことで生態系に及ぼす影響を定量的に評価した。

キーワード：海洋微細現象、海洋中規模渦、海洋生態系、経年変動、十年規模変動、北太平洋

1. 本課題の概要

本課題では、高解像度大気海洋シミュレーションにより、①黒潮等の西岸境界流に伴う海面水温前線や中規模渦などの海洋局所構造の変動が、大規模な大気循環の形成・変動に果たす役割、②より高解像度の海洋シミュレーションから、海洋の中規模渦よりも細かい数 km 程度の構造が、より大規模な海洋循環の形成や生態系の変動に与える影響、③高解像度領域モデルにより台風や爆弾低気圧と海洋との相互作用によって生じる影響、等々を明らかにすることを目的とする。これにより、気候変動予測や地球温暖化予測では従来ほとんど考慮されていない、海洋局所構造の変動とそれらが引き起こす大気海洋現象に対する知見を深め、地球気候の理解と予測の発展に貢献することを目指している。

令和元年度の成果から、特に海洋の数kmから数 100 km の変動現象に注目し、それらに対する大気変動の影響、そのメカニズムに注目した解析等の成果を紹介する。

2. 海洋微細現象の経年から十年規模の変動

海洋では 100 キロメートルスケールの中規模渦が熱や物質輸送に重要な役割を担っていることが知られている。一方、数キロから数 10 キロメートルスケールのサブメソスケールの微細現象は、大規模循環や生態系へ影響しうることから注目されてきており、また衛星観測による海面色画像などにより多くの海域で観測されている。その微細現象は、海洋が冷却され混合層が深くなる冬に、その深い混合層内で起きる傾圧不安定によって活発になる季節変動が明らかにされている(Sasaki et al. 2014[1]など)。しかし、微細現象の変動を長期間で捉え

たデータが存在しないため、経年より長期の変動は明らかにされていない。そこで、水平解像度 1/30 度の高解像度北太平洋海洋モデル OFES2 を用いて 1990 年から 2016 年の過去再現実験を実施し、冬季に活発になる微細現象の経年から十年規模の変動を、北太平洋亜熱帯反流の領域に注目して調べた(Sasaki et al. 2020[2])。

モデルで再現された冬季の亜熱帯反流の微細現象は、2003 年に活発で、特に北緯 24 度付近の北亜熱帯反流付近に数多くの微小な渦や筋状構造が見られるが、2010 年の冬季は穏やかであった(図 1)。そこで、亜熱帯反流域における水平規模 100 キロメートル以下の冬季の運動エネルギーの年々変動を調べたところ(図 2 赤線)、1996 年、2003 年、2015 年は大きく、1999 年、2009 年、2010 年、2016 年は小さい経年変動がみられた。

微細現象の経年変動の要因を調べるため、混合層内の傾圧不安定が起きる際の有効ポテンシャルエネルギーの放出量($\Delta APE / \Delta t$)を Fox-Kemper et al. (2008) [3] のパラメタリゼーションを用いて、海面浮力の南北勾配 (M_v^2)、混合層深(H)、コリオリパラメータ(f)から算出した($\propto 0.5 M_v^4 H^2 / |f|$)。このエネルギー放出量の冬季の値の年々変動(図 2 上図の黒線)は、微細現象の運動エネルギー(赤線)の変動と良く相関していた(相関係数 0.77)。この結果は、冬季に活発な微細現象の年々変動の要因は、冬季の混合層内の傾圧不安定の強さの変動であることが明らかになった。また、アルゴフロート観測のデータセット MOAA GPV(Hosoda et al. 2008[4])を用いて、2005 年以降の有効ポテンシャルエネルギーの放出量を算出した(赤細線)ところ、その大きさはモデルの 1/5 以下で小さいが、年々変動はモデル結果(黒線)と良く相関していた。この結果は、アルゴフロート

観測など既存の観測データはサブメソスケールの微細現象を直接とらえることはできないが、海面密度と混合層深から有効位置エネルギーの放出量の算出することで、微細現象の活動度を推測できる可能性があることを示している。

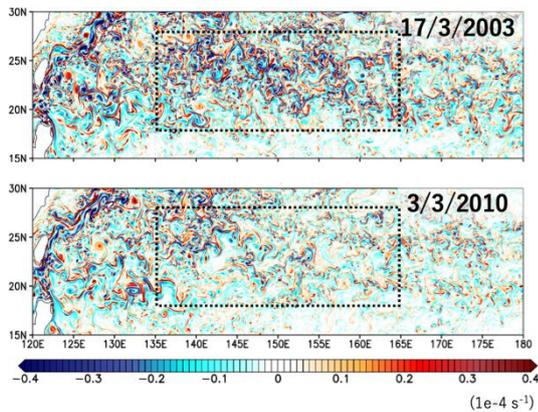


図 1. 2003 年 3 月 17 日 (上図) と 2010 年 3 月 3 日 (下図) の冬季の海表面速度の相対温度。矩形領域 (135-165°E, 18-28°N) は本研究で注目する亜熱帯反流領域。その領域内の相対温度の二乗平均平方根が各年で最大になる日を表示。

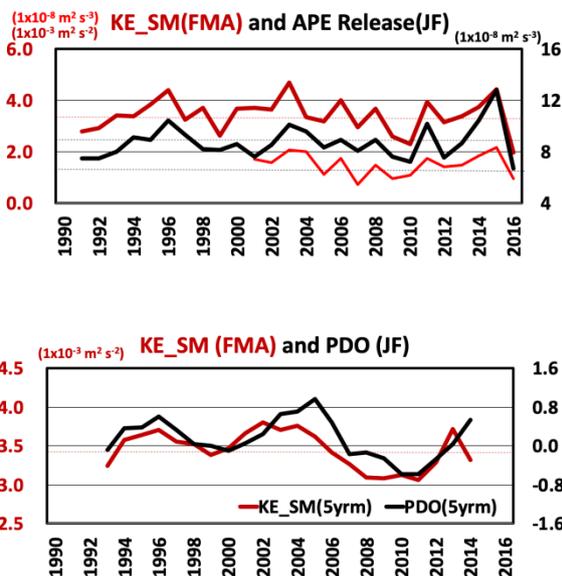


図 2. (上図) 亜熱帯反流領域の水平規模 100 キロメートル以下の運動エネルギー (赤線) と混合層内の有効ポテンシャルエネルギーの放出量 (黒線) のそれぞれの冬季の値の年々変動。ただし、細赤線は MOAA GPV のアルゴフロント観測データを用いた有効ポテンシャルエネルギーの放出量。(下図) 水平規模 100 キロメートル以下の運動エネルギー (赤線) と北太平洋十年規模変動の指標 (黒線) の冬季の値の 5 年移動平均値。

また、亜熱帯反流領域のサブメソスケールの微細現象の十年規模変動は、太平洋十年規模変動と良く連動していた (図 2 下図)。太平洋十年規模変動の指標が正の年は、亜熱帯反流領域の混合層が深く、南北密度勾配が強く (図略)、その結果、混合層内の傾圧不安定による有効ポテンシャルエネルギーの放出が大きくなり、微細現象が活発になる。また、サブメソスケールの微細現象は、エネルギーの逆遷移で大きなスケールの現象を活発化させる (Sasaki et al. 2014[1])。これらの結果は、太平洋十年規模変動に関連した大気変動が、亜熱帯反流領域の微細構造の変動を通じて、中規模渦等のより大きなスケールの現象の変動に影響を及ぼす可能性を示唆している。

3. 海洋中規模渦活動度の予測可能性

100 km スケールの海洋の中規模渦は、海洋内部の熱や物質の輸送に寄与する他、生態系にも影響及ぼす。これに加えて、大気の循環へも影響を及ぼしうることが近年明らかにされてきた。このような海洋中規模渦の重要性を鑑み、本研究ではその年々の変動の予測の可能性を調べた (Nonaka et al. 2020[5])。

海洋中規模渦は海洋の力学的な不安定性から発達することから、個々の渦がどのように発達するかを、その発達時間スケールを越えて予測することは本質的に困難である。ここでは個々の渦の時間発展ではなく、ある海域における渦の強さの平均を渦活動度として、その強弱の経年変動の予測可能性を考える。

上述の通り、海洋中規模渦は力学的な不安定性から自発的に発生するため、海上風などの海洋外部の条件とは無関係に渦活動度の年々の変動が生じることも予想される。このような可能性を考慮するため、本研究では、全く同じ大気変動を外力として与えた中規模渦を解像する (水平解像度 0.1 度) 海洋大循環モデルシミュレーションを 10 通り実施した。但し、それぞれに僅かに異なる初期状態を与え、その僅かな相違が数年の間に発達して、10 通りのシミュレーションはそれぞれ異なる状態になる。もし注目する海洋変動が大気変動に強く影響される場合には、その海洋変動は 10 のシミュレーションでほぼ共通した変動を持つことになる。一方で、海洋内の自発的な変動の影響が大きい場合には、それぞれのシミュレーション結果が大きく異なることになる。後者の場合、その変動には外力では定まらない不確定な変動が多く含まれることになり、それを予測することは本質的に困難である。

ここでは、北太平洋域で最も中規模渦活動が卓越する日本東方の黒潮続流域に注目する。黒潮続流の上流域 (北緯 32-38 度、東経 141-153 度) の渦活動度の時系列では、各シミュレーション結果がバラバラであり (図 3 上図)、少なくともこのモデルの中では、この海域の中規模渦の活動度は外力にはあまり依らず、海洋内部の自発的な変動の影響を強く受けていることが分かる。

一方で、その下流域 (北緯 32-38 度、東経 153-165 度) では、渦活動度の経年変動には共通性が見られ (図 3 下

図)、特に十年規模の変動に注目すると 1975 年、1990 年、2005 年頃にピークがあり、1983 年、1997 年頃に極小があるといった変動は各シミュレーションで同様に見られる。これは、この海域の渦活動度が大気変動に強く影響されていることを示す。

大気変動が黒潮続流下流域の渦活動に影響を及ぼす過程を詳しく調べた結果、大気変動によって北太平洋中央部に励起された流速場の偏差が波として数年かけて黒潮続流域に伝播し、そこでの流速を変化させることでその海域の力学的安定性を変化させ、渦活動の変動を引き起こすことが示された。また、この波の伝播にかかる時間によって、北太平洋中央部の流速変動が 4 年後の黒潮続流下流域の渦活動と高い相関を持つ、即ち 4 年後の渦活動の予測の可能性があることが示された。

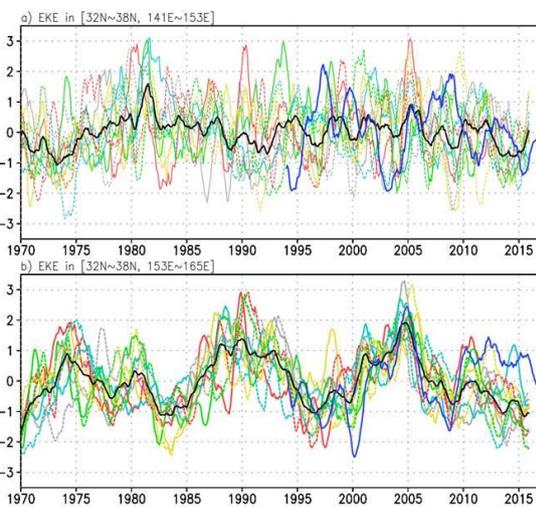


図3 黒潮続流上流域(北緯32-38度、東経141-153度、上図)と下流域(北緯32-38度、東経153-165度、下図)の渦活動度の経年変動。細線が各シミュレーション結果、太黒線は10シミュレーションの平均、青太線は観測結果。月毎データに13か月の移動平均を施し、それぞれの標準偏差で規格化している。

4. 海洋中規模現象が栄養塩輸送・生態系に与える影響

海洋の物質循環・生態系は、様々な時空間スケールの物理現象の影響を受ける。例えば、海洋における中規模スケール現象(渦やフロントなど)や海洋循環の影響、大気擾乱や低気圧通過に伴う混合、潮汐などが考えられる。一方、温暖化に伴う水温上昇や成層構造の強化の影響も見え始めている。本研究では、貧栄養塩海域である北太平洋亜熱帯域における中規模スケールの渦活動に伴う栄養塩輸送と生物生産の維持機構について調べた(Sasai et al., 2019[6])。

北太平洋西岸を北上する黒潮は、熱や物質輸送に重要な役割を果たしている。一方、黒潮や黒潮続流域では、その変動に伴い中規模の渦活動が活発である。中規模スケール現象を解像する北太平洋高解像度海洋循環モデル(OFES)に低次生態系モデル(NPZD)を組み込んで実施した結果を用いて、中規模渦による栄養供給が生物生産の維持にどの程度寄与するかを2つの異なる方法で有光層に供給される栄養塩量を推定した。1つ目は、黒潮続流域にNOAA/PMELが設置している観測定点(KEO、Kuroshio Extension Observatory station)を通過する低気圧性渦に伴う栄養塩供給量を、2つ目は、台湾東方沖に見られる移動する低気圧性渦の生成から消滅する期間を追跡し移動する渦に供給される栄養塩量をそれぞれ推定した。

モデルは、北太平洋における黒潮による栄養塩輸送を再現し、再現される栄養塩や植物プランクトン分布の季節から経年変動は、中規模渦や黒潮の蛇行などの影響を受けることが分かった。衛星観測で捉えられている黒潮続流の経年変動に伴う海面クロロフィルと海面高度偏差はモデルでも同様に再現できた。栄養塩や植物プランクトン濃度が高い時に、海面高度偏差が負(低気圧性渦が卓越)になる関係を確認できた。

観測定点KEOを通過する低気圧性渦は、栄養塩躍層を持ち上げる(図4)。栄養塩躍層が持ち上がる時に、有光層内への供給が起こり、夏や秋における亜表層内の生物生産を増加させる。1つの低気圧性渦が通過する時に、供給される栄養塩量は、 $0.02 - 1.07 \text{ mol N m}^{-2}$ と推定され、年間供給量は、 $0.10 - 1.07 \text{ mol N m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ になる(Honda et al., 2018[7])。2000年から2012年の間に通過する低気圧性渦によって供給される栄養塩量の年間平均は、 $0.40 (\pm 0.36) \text{ mol N m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ になる。低気圧性渦によって供給される栄養塩が全て生物生産に利用されると仮定すると、KEO付近で見積もられた年間生物生産量の60-80%に相当することが分かった。

一方、台湾東方沖における1つの低気圧性渦を2004年5月(生成)から7月(消滅)にかけて追跡し、渦内に供給される栄養塩量と生物生産の関係について解析を行った。追跡した期間は約3ヶ月で、定義した渦領域下部から供給される栄養塩量が、正味 $5.3 \times 10^{11} \text{ mmol N}$ と推定された。渦の面積を考慮して、年間供給量に換算すると、約 $0.02 \text{ mol N m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ になり、上述したKEO付近を通過する1つの低気圧性渦による供給量に近いものとなった。

低気圧性渦によって有光層内に供給される栄養塩量を2つの方法(通過する渦と移動する渦)で、それぞれ推定し生物生産に対する影響を調べた結果、定点を通過する渦や移動する渦内に対する栄養塩供給量がほぼ同程度であり、その供給量が年間の生物生産量の60-80%に相当することが分かった。

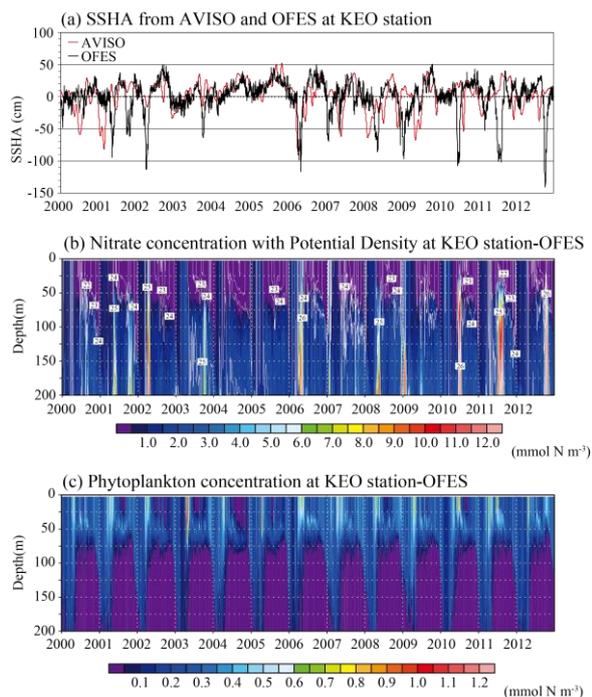


図4. 観測地点 KEO (32.5°N, 144.5°E) における 2000 年から 2012 年の (a) AVISO (赤線) と OFES (黒線) の海面高度偏差の時系列と OFES の (b) 栄養塩鉛直分布の時系列と密度 (白線)、(c) 植物プランクトン鉛直分布の時系列。

謝辞

本研究の一部は JAMSTEC-IPRC Collaborative Research (JICore) によってサポートされた。また、一部は JSPS 科研費 JP19H05701、JP18H0372、JP17K05665、JP17K05662 によってサポートされた。

文献

- [1] H. Sasaki, P. Klein, B. Qiu, and Y. Sasai, “Impact of oceanic-scale interactions on the seasonal modulation of ocean dynamics by the atmosphere”, *Nature Communication*, 5, 5636, 2014.
- [2] H. Sasaki, B. Qiu, P. Klein, Y. Sasai, and M. Nonaka, “Interannual to decadal variations of submesoscale motions around the North Pacific Subtropical Countercurrent. *Fluids*, 5 (3), 116, 2020.
- [3] B. Fox-Kemper, R. Ferrari, and R. Hallberg, “Parameterization of mixed layer eddies. Part I: Theory and diagnosis”, *Journal of Physical Oceanography*, 38, 1145–1165, 2008.
- [4] S. Hosoda, T. Ohira, and T. Nakamura, “A monthly mean dataset of global oceanic temperature and salinity derived from Argo float observations”, *JAMSTEC Report of Research and Development*, 8, 47–59, 2008.

[5] M. Nonaka, H. Sasaki, B. Taguchi, and N. Schneider, “Atmospheric-driven and intrinsic interannual-to-decadal variability in the Kuroshio Extension jet and eddy activities”, *Frontiers in Marine Science*, submitted, 2020.

[6] Y. Sasai, M. C. Honda, E. Siswanto, S. Kato, K. Uehara, H. Sasaki, and M. Nonaka, Impact of ocean physics on marine ecosystems in the Kuroshio and Kuroshio Extension regions: A high-resolution coupled physical-biological model study. In: *Kuroshio Current: Physical, Biogeochemical and Ecosystem Dynamics*, Takeyoshi Nagai, Hiroaki Saito, Koji Suzuki, Motomitsu Takahashi (eds.), AGU Geophysical Monograph Series. AGU-Wiley, pp 175–188, 10 April 2019.

[7] M. C. Honda, Y. Sasai, E. Siswanto, A. Kuwano-Yoshida, H. Aiki, and M. F. Cronin, Impact of cyclonic eddies and typhoons on biogeochemistry in the oligotrophic ocean based on biogeochemical/physical/meteorological time-series at station KEO, *Progress in Earth and Planetary Science*, 5:42, 2018.

Understanding Roles of Oceanic Fine Structures in Climate and Its Variability

Project Representative

Masami Nonaka

Application Laboratory, Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Hideharu Sasaki*¹, Yoshikazu Sasai*², Masami Nonaka*¹

¹

* Application Laboratory, Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, *²Earth Surface System Research Center, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

In this project, we have conducted numerical investigations of impacts of oceanic fronts, mesoscale eddies, and submesoscale motions associated with strong western boundary currents on oceanic and/or atmospheric large-scale circulation and oceanic ecosystem. In this report, we briefly introduce 1) mechanisms of influence of atmospheric variability on variability of oceanic submesoscale motions, 2) predictability of interannual variability of mesoscale eddy activity in the Kuroshio Extension region, and 3) impacts of mesoscale eddies on nutrient supply and marine ecosystem, from the results in FY2019.

Keywords : oceanic submesoscale motions, mesoscale eddies, marine ecosystem, interannual to decadal variations, predictability

1. Introduction

In this project, we numerically investigate impacts of oceanic fronts, eddies, and finer-scale motions associated with strong western boundary currents on oceanic and/or atmospheric large-scale circulation and oceanic ecosystem. Through the project, we will further our understanding of ocean's roles in climate variability and predictability. Here, we briefly introduce several achievements from those in FY2019.

2. Interannual variations of oceanic submesoscale motions

Submesoscale motions at scales from 1 km to several 10 km are ubiquitous in the world ocean, which is captured by such satellite observed color images. The submesoscale motions are ubiquitous and active in winter, which is considered to be induced by the mixed layer instabilities. The instability leads to a transformation from available potential energy (APE) to kinetic energy at the submesoscale. The APE release is often parameterized by the product of mixed layer depth squared and horizontal buoyancy gradient squared.

We examined the interannual to decadal variations of submesoscale motions in the subtropical Northwestern Pacific including the Subtropical Countercurrent using the outputs from a North Pacific ocean hindcast simulation at a horizontal resolution of $1/30^\circ$ from 1990 to 2016 [1]. The kinetic energy at the submesoscale smaller than 100 km in winter demonstrates the interannual variations: large in 1996, 2003, and 2015 and small in 1999, 2009, 2010, and 2016 (thick red curve in Fig. 1). The interannual variations synchronize with

those of APE release (black curve). This result suggests that the variations of submesoscale motions are possibly attributed to the variations of mixed layer instabilities that releases the APE. The synchronization between the APE releases of the simulation (black curve) and Argo observation (thin red curve) suggests the possibility that in-situ observations at coarse resolution diagnose the variations of submesoscale motions.

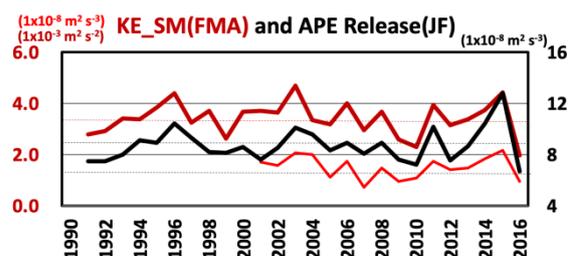


Fig. 1 Annual time series of the kinetic energy at the submesoscales smaller than 100 km averaged from February to April (thick red curve) and the parameterized APE release averaged from January to February (black curve) in the subtropical Northwestern Pacific. A thin red curve shows the APE release estimated from MOAA GPV based on Argo float observations [2].

3. Predictability of meso-scale eddy activities

To investigate influences of oceanic intrinsic/internal variability and its interannual-to-decadal modulations on the Kuroshio Extension (KE) jet speed and associated eddy

activity, a ten-member ensemble integration of an eddy-resolving ocean general circulation model forced by 1965-2016 atmospheric reanalysis is conducted [3].

We found that in the downstream KE [32°-38°N, 153°-165°E], variability in the atmospheric-driven eddy activity dominates (1.36 times) over intrinsic variability on decadal time scale. Consistent with westward propagation of atmospheric-driven jet speed anomalies shown by the ensemble mean, eddy activity in the downstream KE region is correlated with current speed variability in the central North Pacific 4 years earlier. In contrast, eddy activity in the upstream KE [32°-38°N, 141°-153°E] shows very large intrinsic and limited atmospheric-driven variability with a ratio of the former to the latter of 2.73. These results suggest intrinsic variability needs to be considered in interannual variability of strong ocean jet. The dependence of these findings to the model specificities need to be further explored.

3. Impact of mesoscale eddy on marine ecosystem

A high-resolution coupled physical-biological ocean model is applied to investigate the physical transport of nutrients and the maintenance of biological production in the Kuroshio and Kuroshio Extension (KE) regions. We use two approaches to accomplish this. The 1st approach examines the regular passing of cyclonic eddies through a time-series station (Eulerian approach) and the 2nd approach tracks a single cyclonic eddy over time (Lagrangian approach) [4].

The model captures the Kuroshio nutrient transport over the North Pacific; the seasonal and intra-seasonal variability of biogeochemical distributions are associated with mesoscale eddies, fronts, flow filaments, Kuroshio meanders, convection, and upwelling/downwelling. The model also reproduces the observed interannual variability of sea surface height anomaly (SSHA) in the KE region from 2000 to 2012. The distributions of high (low) nitrate and phytoplankton concentrations correspond to negative (positive) SSHA.

In terms of nutrient supply, the cyclonic eddies passing through the Kuroshio Extension Observatory station in the subtropical region cause uplifting of nutricline. These events lift nutrient-rich water into the euphotic zone and increase subsurface biological production during summer and fall. Nitrate supply by the passage of each cyclonic eddy was estimated to be 0.02-1.07 mol N m⁻² and annual supply was 0.10-1.07 mol N m⁻² year⁻¹ (Table 1 in Honda et al., 2018[5]). Average annual nitrate supply (with standard deviation) induced by the passage of cyclonic eddy between 2000 to 2012 was estimated to be 0.40 (\pm 0.36) mol N m⁻² year⁻¹ (Eulerian approach).

One eddy that was tracked from May to July 2004 off the east of Taiwan, contributed to the greatest vertical nutrient flux and enhancement of biological production. During the whole period (about 3 months), the net vertical nitrate flux at

the bottom of eddy area is $+ 5.3 \times 10^{11}$ mmol N. In accordance with above units, the vertical nitrate flux is about 0.02 mol N m⁻² year⁻¹ when the eddy area is 3.1×10^{10} m². This estimation is close to the nitrate supply induced by the passing eddies at KEO station (Lagrangian approach).

We have presented results examining the eddy-induced supply of nutrients in the Kuroshio and KE regions. High-resolution coupled physical-biological models are important tools for such studies because they provide data at high spatiotemporal resolution, which complements the limited in-situ observations that are typically available only at lower resolution.

Acknowledgement

A part of this project is supported by the JAMSTEC-IPRC Collaborative Research (JICore), and by JSPS KAKENHI Grant Number JP19H05701, JP18H0372, JP17K05665, and JP17K05662.

References

- [1] H. Sasaki, B. Qiu, P. Klein, Y. Sasai, and M. Nonaka, "Interannual to decadal variations of submesoscale motions around the North Pacific Subtropical Countercurrent. *Fluids*, 5 (3), 116, 2020.
- [2] S. Hosoda, T. Ohira, and T. Nakamura, "A monthly mean dataset of global oceanic temperature and salinity derived from Argo float observations", JAMSTEC Report of Research and Development, 8, 47-59, 2008.
- [3] M. Nonaka, H. Sasaki, B. Taguchi, and N. Schneider, "Atmospheric-driven and intrinsic interannual-to-decadal variability in the Kuroshio Extension jet and eddy activities", *Frontiers in Marine Science*, submitted, 2020.
- [4] Y. Sasai, M.C. Honda, E. Siswanto, S. Kato, K. Uehara, H. Sasaki, and M. Nonaka, Impact of ocean physics on marine ecosystems in the Kuroshio and Kuroshio Extension regions: A high-resolution coupled physical-biological model study. In: *Kuroshio Current: Physical, Biogeochemical and Ecosystem Dynamics*, Takeyoshi Nagai, Hiroaki Saito, Koji Suzuki, Motomitsu Takahashi (eds.), AGU Geophysical Monograph Series. AGU-Wiley, pp 175-188, 10 April 2019.
- [5] M.C. Honda, Y. Sasai, E. Siswanto, A. Kuwano-Yoshida, H. Aiki, and M. F. Cronin, Impact of cyclonic eddies and typhoons on biogeochemistry in the oligotrophic ocean based on biogeochemical/physical/meteorological time-series at station KEO, *Progress in Earth and Planetary Science*, 5:42, 2018.