

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, 木戸 晶一郎*¹, 古恵 亮*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

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3年度の成果から、1) 東部北太平洋の海洋サブメソスケール現象の経年変動とそのエルニーニョ現象との関係、2) 準全球の渦解像海洋再解析プロダクト (JCOPE-FGO)、3) 高解像度海洋シミュレーションから発見されたオーストラリア北東岸の季節潜流について紹介する。1) では、1/30 度解像度北太平洋海洋モデルの28年間に及ぶシミュレーション結果から、サブメソスケール現象の活動度がエルニーニョ現象に影響される傾向があることを明らかにした。2) では、準全球で海洋渦を表現可能な解像度 (1/10 度) を持つ海洋同化データを開発した。今後、予測実験の初期値としても利用予定である。3) では、高解像度の海洋シミュレーションデータから海洋表層下の新たな海流が発見された。

キーワード: 海洋微細現象, 経年変動, 十年規模変動, データ同化, 再解析データ

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、海洋や大気の大規模な循環の形成・変動に果たす役割、②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3年度の成果から、特に海洋微細構造や海流に注目した解析と海洋中規模渦を解像可能な準全球の再解析データの開発等の成果を紹介する。

2. 海洋微細現象の経年変動

数 km から数 10km 規模のサブメソスケールの渦や筋状の海洋微細現象は、それに伴う鉛直流によって海洋生態系や二酸化炭素などの海洋内部の物質循環、さらには大気との熱交換にも影響を及ぼすことが近年明らかにされてきた。また、従来の衛星による海面高度観測は、全球規模で 100km スケールの中規模渦を含む海洋循環を捉えうるが、数 10km スケールの微細現象も捉える高解像度の観測が間もなく開始される予定である。このように近年高まってきた海洋微細現象の重要性を鑑み、本研究ではその経年変動を調べた (Sasaki et al. 2022 [1])。

サブメソスケールの海洋微細現象は幾つかのメカニズムで励起される。それらを列挙すると、混合層不安定、海洋の前線強化、対称不安定、遠心不安定、および地形との干渉などである。また、中規模渦などの多大なエネルギーは、微細現象を通じて、エネルギーが散逸されると考えら

れているが、混合層不安定と呼ばれる冬季の深い混合層内の傾圧不安定で励起される比較的スケールが大きな数 10km 規模の微細現象は、二次元流体の性質を持ち、そのエネルギーは大きなスケールにも逆遷移されうることが示唆されている。

本研究では、混合層不安定で冬季に活発な微細現象を再現することができる水平解像度が約 3km の解像度で、北太平洋域の海洋大循環モデル (OFES2) のシミュレーションを 1991 年から 2018 年まで実施した。そのシミュレーションでは、黒潮および黒潮続流域と亜熱帯域で冬季に活発な微細構造が見られるが、本研究では北太平洋東部亜熱帯域 (図 1) に注目する。

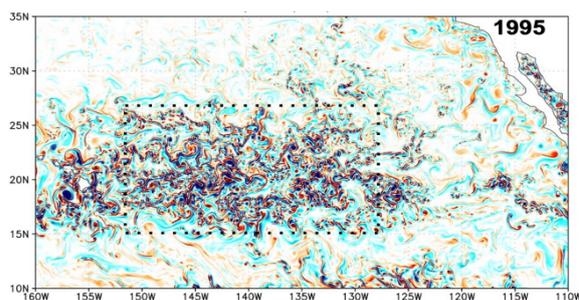


図 1. 1995 年 1 月 11 日の日平均海面流速のロスビー数 (相対温度/コリオリパラメータ)。東部亜熱帯域で活発な微細構造が分布。

図 2 の赤線は微細現象が活発な 2 月から 4 月を平均した 100km より小さなサブメソスケールの運動エネルギーの年々変動を示している。この運動エネルギーは、1992 年、1995 年、1998 年、2007 年、2016 年、2017 年で大きく、1996 年、1997 年、2004 年、2008 年、2011 年、2014 年、2015 年で小さく、冬季の微細現象活動の経年変動が示された。

また、図2の黒線は混合層不安定をパラメタライズすることで得られる有効ポテンシャルエネルギーの放出量の冬季の年々変動で、微細現象の運動エネルギーの年々変動とほぼ同期（相関係数：0.73）して変動している。したがって、微細現象の経年変動は、混合層不安定の強度の変動が要因であることが示された。

図2の青線はエルニーニョの指標である東部熱帯太平洋域（西経170度-120度、南緯5度-北緯5度）の海面水温の平年値からの偏差であるNINO3.4インデックスの冬季の観測値である。この年々変動と微細現象の運動エネルギーの変動はおよそ同期（相関係数：0.56）しているが、2000年以降では1990年代と比較するとあまり同期していない。この要因は、中央太平洋域の海面水温が高温になる「エルニーニョもどき」と呼ばれるイベントの発生頻度が、2000年以降に増加していることと関連が考えられる。

本研究は北太平洋東部亜熱帯の冬季の海洋微細現象の経年変動は、混合層不安定の強度の変動に起因し、エルニーニョイベントとの関係が示唆された。本研究で用いたパラメタライズされた混合層不安定の強度は、海面密度、混合層深度から推定可能であるため、さまざまな海域で観測されている海洋微細現象の変動を、観測データを用いて診断できる可能性がある。

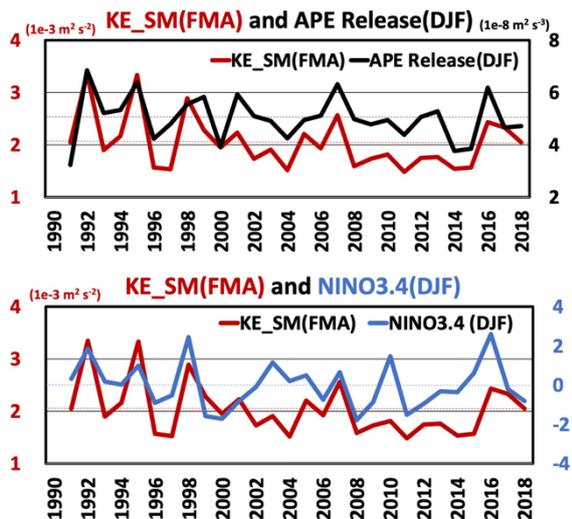


図2. 東経128度から152度、北緯15度から27度の領域内、2月から4月で平均した100km規模以下のサブメソスケール現象の運動エネルギー（赤線）、同じ領域内、12月から2月で平均した有効ポテンシャルエネルギーの放出量（黒線）、および12月から2月で平均したNINO3.4インデックス（青線）の年々変動。

3. 準全球渦解像海洋再解析プロダクト JCOPE-FGOの構築

黒潮やメキシコ湾流域に代表される西岸境界流域では、海洋微細現象と呼ばれる空間スケール数10km程度の中規模渦やジェットと言った特徴的な海洋変動が存在する。こうした海洋微細現象は、熱や淡水・物質輸送と密接に

関連しており、大気海洋相互作用や生物・化学過程において重要な役割を果たす。従って、その時空間変動の正確な理解および予測は社会経済活動の観点からも重要である。こうした目的を達成するためには、現実の海洋の状態を正確に表現するデータが必要であり、観測から得られたデータを適切に数値海洋モデルに内挿し、力学的に整合した海洋場を表現することができる海洋同化システムを構築することが必要不可欠である。そこで、本課題では北西太平洋の領域プロダクトであるJCOPEシステムを準全球海洋へと拡張したJCOPE-FGO(Forecasting Global Ocean)を新たに構築した。

JCOPE-FGOは渦解像海洋大循環モデル(OGCM)および3次元変分法同化スキーム(3DVAR)から構成されている。OGCMは極域を除いた全球海洋(南緯75度-北緯75度)を水平解像度0.1度でカバーしている。鉛直方向には44層有しており、海底地形はETOPO5から得られたものを使用した(図3)。また、OGCMはNCEP-CFSから得られた1時間ごとの大気外力およびJRA55-doの河川外力の元で駆動した。なお、潮汐および海氷モデルは含まれていない。

同化に用いた3DVARのスキームはJCOPE2システムと同様であり、衛星観測の海面水温・海面高度および船舶・現場観測から得られた水温・塩分プロファイルを用いてモデルから得られた第一推定値を修正し、解析値を求めるものである(Miyazawa et al. 2009 [2])。同化のウィンドウは7日間であり、解析期間は1993年1月から2021年12月である。ES4で25VEノード/1200CPUを使用した場合、1同化サイクル当たり約45分で計算が完了した。

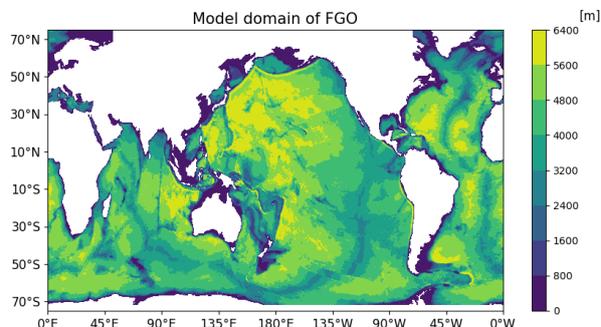


図3: JCOPE-FGOの解析領域および用いた海底地形。白色の領域は、陸として定義されているグリッドを示している。

FGOが観測に見られる海洋場を再現していることを示す一例として、図4に2004年7月の海面高度偏差をFGO、衛星観測それぞれについて示した。この図からは、衛星観測に見られる黒潮・メキシコ湾流域に沿った中規模渦やジェットに沿った偏差はJCOPE-FGOでも適切に再現されている様子が確認できる。実際、各格子点において海面高度偏差の観測との相関係数を計算したところ、全球海洋の多くの地点において0.6を超える相関が見られ、既存の(渦を陽に解像しない)海洋再解析プロダクトのものを上回っていることが明らかになった。JCOPE-FGOは亜表層の水塊や海流の構造など、他の海洋

場についても観測とよく一致した変動を捉えていた。さらに、アマゾン川や揚子江などといった世界の大河川から海洋に流れ込む淡水が、海洋上層の塩分場と与えるインパクトを検証するため、元の再解析ランに加えて河川外力を除いたものを作成した。両実験の出力結果を比較したところ、河川水の流入は特に河口付近の沿岸域において、塩分場や循環場の再現性向上に重要な役割を果たしていることが明らかになった。

以上の結果から、本プロダクトは全球での海洋微細構造を含む海洋変動の特徴や、その背後にあるメカニズムを調べるための強力なツールになりうるといえる。また、JCOPE-FGO を力学的な予測システムとして用いることで、全球の海洋場の時空間変動、特に中緯度域に見られる海洋微細構造の予測可能性が解明されることが期待される。

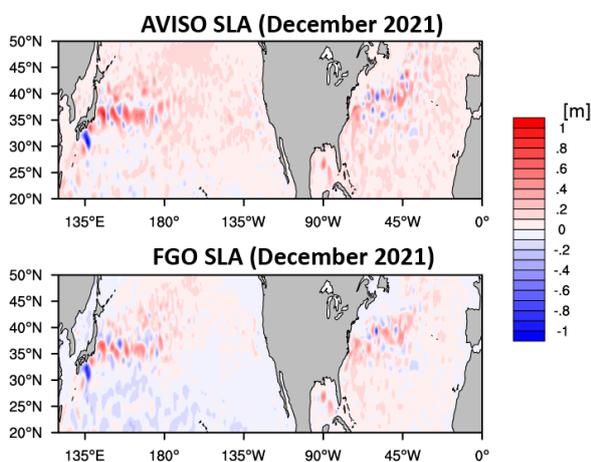


図4: 2021年12月の北太平洋・大西洋における海面高度偏差 (単位: m)。上段が衛星観測、下段が JCOPE-FGO のものを示している。

4. 豪州北東岸の季節潜流の発見

豪州北西岸には、平均的に南西方向に流れる表層沿岸流「ホロウェイ海流」が知られておりその季節変動もある程度分かっている。ただ、観測が少ないことから、沿岸流の鉛直構造は分かっていない。わずかに存在する過去の観測の図には、潜流のようなものが見えることがあるが、誰もそれを指摘してはいない。本研究では、OFES2 長期積分から作った気候値に季節振動する潜流を見つけたので報告する。

準全球渦解海洋大循環モデル OFES2 (Sasaki et al. 2020 [3]) の 1992-2016 から五日間隔の気候値を作る。豪州北西の大陸斜面上端付近 100-300 m 深に、2月頃には南西向きに、5月には北東向きの潜流がはっきりと見える。図5に南西向き最大・北東向き最大のときの鉛直構造を示す。潜流ほどははっきりはしないが、潜流の上に逆向きの速度偏差が伴っているようである。この構造は、1/12° HYCOM (Cummings & Smedstad 2013 [4]) モデルから同様に作成した気候値にも見られる (not shown)。大陸斜面に沿って流れの構造を見ると、南西方向に斜面に沿って

潜流が深い方に移動していく様子も見られる。豪州の西海岸に達した後の行方ははっきりしない。

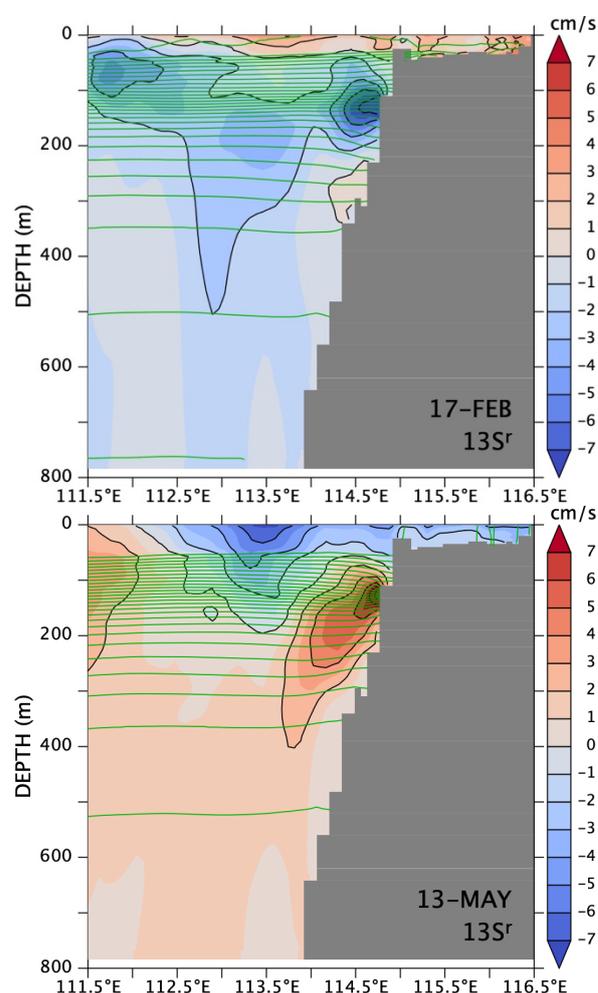


図5: ある南東向き断面での、北東向き速度偏差(色)と密度(緑色の等値線, 0.2 σ_θ 間隔)の瞬間値。横軸は、緯度経度座標を時計回りに 45°回転した擬似的経度。

この流れの時間スペクトルを調べてみると、年周期が卓越し、1/2年、1/3年と続き、それより早い周波数成分は無視できることが分かった。またいずれの周波数でも、位相が上向き・南西向きに伝わる様子が見える。また、12°S に位相の不連続がみられる。

以上の特徴はいずれも沿岸捕捉波を示しているように思える。そこで、岸に沿って様な海底地形、水平様な背景成層を設定した f 面上の線形のモデル (Brink 1991 [5]) に理想的な周期的風応力を与え、半数値解を得た。位相の伝播・波の伝播速度・斜面に沿って深くなる様子などが、OFES2 での潜流のものと大雑把には一致する。ただ、潜流の上に逆向きの表層流が生じるという状況は再現されない。

以上のことから、この季節潜流は、1, 1/2, 1/3年周期の沿岸捕捉波が重ね合わさったものだと考えられるが、不明な点が多数残り、今後、様々な発展が期待される。具

体的には、以下のような科学的疑問が将来の研究題材として考えられるだろう。1) 今回は年周期に同期した流れのみを取り出したが、MJO などに対する応答もあるのではないか? 2) 今回は f を一定とする理論を使ったが、現実では f が変化する惑星ロスビー波が存在するので大陸斜面に捕捉された波からロスビー波へエネルギーが漏れたりしないだろうか? 3) そもそもこの波の発生機構は? 位相不連続の場所が発生源なのか、あるいは、上流からの波がそこで散乱されているのだろうか? 4) 海底摩擦や渦粘性の効果は? モデルの解像度は $1/10^\circ$ で十分なのだろうか? 5) この流れは豪州西岸に繋がっているのだろうか?

この結果は、Furue (2022 [6])として出版された。

northwest coast of Australia”, *Frontiers in Marine Science*, 8, 806659, 2022.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2021.806659>.

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP19H05701、JP20K04075 によってサポートされた。JCOPE システムの全球への拡張にあたっては、清松啓司・Sergey M. Varlamov 両博士に多くの技術的なサポートをいただきました。ここに感謝いたします。

文献

[1] Sasaki, H., B. Qiu, P. Klein, M. Nonaka, and Y. Sasai, “Interannual variations of submesoscale circulations in the subtropical northeastern Pacific”, *Geophysical Research Letters*, vol. 49, no. 7, e2021GL097664, 2022.

[2] Miyazawa Y, Zhang R, Guo X, et al (2009) Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis. *J Oceanogr* 65:737-756.
<https://doi.org/10.1007/s10872-009-0063-3>

[3] Sasaki, H., S. Kida, R. Furue, H. Aiki, N. Komori, Y. Masumoto, T. Miyama, M. Nonaka, Y. Sasai, and B. Taguchi, “A global eddying hindcast ocean simulation with OFES2”, *Geoscientific Model Development*, vol. 13, no. 7, 3319-3336, 2020.
<https://doi.org/10.5194/gmd-13-3319-2020>

[4] Cummings, J. A., and O. M. Smedstad, “Variational Data Assimilation for the Global Ocean”, In *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications* (Vol. II), ed. S. K. Park and L. Xu, 303-43, 2013. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35088-7_13.

[5] Brink, K. H., “Coastal-trapped waves and wind-driven currents over the continental shelf”, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23, 389-412, 1991.
<https://doi.org/10.1146/annurev.fl.23.010191.002133>.

[6] Furue, R., “A seasonal undercurrent along the

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, Shoichiro Kido *¹, Ryo Furue *¹

*¹Application Laboratory, Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

In this project, we have conducted numerical investigations of impacts of oceanic fronts, mesoscale eddies, and sub-mesoscale variability associated with strong western boundary currents on oceanic and/or atmospheric large-scale circulation and oceanic ecosystem. In this report, we briefly introduce 1) possible influence of El Niño on interannual modulation of sub-mesoscale oceanic variability in the eastern North Pacific, 2) development of semi-global oceanic reanalysis data from 1993 that can represent the western boundary currents and associated mesoscale eddies. This data product can be used widely for investigation of interannual variability of ocean currents and eddies, and also as initial conditions of prediction experiment. In addition, we introduce 3) a seasonal undercurrent along the northwest coast of Australia discovered using our eddy-resolving ocean simulation, from the results in FY2021.

Keywords : oceanic fine structures, interannual to decadal variations, ocean reanalysis data, predictability

1. Introduction

In this project, we investigate impacts of oceanic fine-scale motions associated with strong western boundary currents on oceanic and/or atmospheric large-scale circulation and oceanic ecosystem based on numerical simulations. Through the project, we will further our understanding of ocean's roles in climate variability and its predictability. Here, we briefly introduce several results we have achieved in FY2021.

2. Interannual variations of submesoscale circulations

Recent studies suggested that oceanic submesoscale circulations at scales from several to several tens of kilometers, accompanied by vertical motions, play a significant role in the marine ecosystem, ocean carbon cycle, and air-sea heat exchange. Therefore, it is important to reveal where and when submesoscale circulations become active. However, there is currently no global observations which can capture the regionalities and variations of submesoscale circulations.

This study uses the daily mean outputs from a high-resolution North Pacific hindcast ocean simulation at a horizontal resolution of 1/30 degree from 1991 to 2018, which permits submesoscale circulations. The simulation exhibits active submesoscale circulations in winter around the Kuroshio and in the subtropical region, which are induced by baroclinic instability within the deep mixed layer named mixed layer instability (MLI). We found that interannual variations of the submesoscale kinetic energy (KE) in winter are significant in the east and west regions of the north subtropics. In both the regions, the winter submesoscale KE is more enhanced when the available potential energy release in the process of MLI is large.

The composite sea surface temperature (SST) anomaly in the years with large submesoscale KE in the eastern subtropics exhibits high SST in the eastern tropics. In addition, the yearly time series of submesoscale KE in the eastern subtropics is mostly synchronous with the NINO 3.4 index. These results suggest that the submesoscale circulations in the subtropical northeastern Pacific are enhanced by MLI in the El Niño winters [1].

3. Development of an eddy-resolving quasi-global ocean reanalysis product– JCOPE-FGO–

The frontal-scale oceanic variability, such as mesoscale eddies and associated modulations of current fields, is a unique feature of the western boundary current and plays an important role in water-mass formation, air-sea interaction, and transport of biogeochemical tracers. Therefore, an accurate understanding and prediction of spatiotemporal variations in frontal-scale oceanic variability are of paramount importance for socioeconomic activities. To archive this goal, a dynamical ocean nowcasting and forecasting system, that can smoothly interpolate observational information into the numerical ocean model, serves as a powerful tool. For this reason, we have developed a new eddy-resolving quasi-global ocean reanalysis product, the JCOPE Forecasting Global Ocean (JCOPE-FGO) by extending the model domain of the regional JCOPE system to the global ocean.

The JCOPE-FGO consists of an eddy-resolving ocean general circulation model (OGCM) and the three-dimensional variational (3DVAR) scheme. The OGCM domain is the global ocean from 75°S to 75°N except for the Arctic Ocean with a horizontal resolution of $0.1^\circ \times 0.1^\circ$. Sea ice model and tidal

forcing are not included in the present version. Hourly meteorological fields from the NCEP-CFS and daily river discharge obtained from the JRA55-do dataset are used to force the OGCM.

The 3DVAR scheme used in the JCOPE-FGO is same as that of the original JCOPE2 system; satellite observations of sea surface temperature and sea level anomalies (SLAs) as well as in-situ temperature and salinity profiles are used to correct the first guess values derived from the OGCM and obtain the analysis fields [2]. The analysis period spans from January 1993 to December 2021. It takes about 45 minutes to complete one cycle with 25 VE nodes and 1200 CPU cores on the ES4.

The pointwise correlation coefficients between the observed SLA and JCOPE-FGO exceed 0.6 in the most part of the global ocean, and they are substantially higher than those of other existing reanalysis products with lower horizontal resolutions. We have also confirmed that spatiotemporal variability of other oceanic variables, such as subsurface temperature and currents fields, are also correctly captured in the JCOPE-FGO. This product can be used as a dynamical ocean forecasting system for various oceanic fields, including that of frontal-scale oceanic variability in the global ocean.

4. A seasonal undercurrent along the northwest coast of Australia

Along the northwest coast of Australia, a surface current is known to flow southwestward on average and its seasonal variability is also known. In contrast, not much is known about the vertical structure of the flow field there. The present study describes a new seasonal undercurrent found in a high-resolution OGCM.

We constructed a 5-day climatology over 1992–2016 from OFES2, a semi-global eddy-resolving OGCM with a horizontal resolution of 0.1° [3]. In the climatological annual cycle, there is an undercurrent hugging the continental slope just below the shelf break extending from ~ 100 m to ~ 300 m along the northwest coast of Australia. It changes signs during the year, with its southwestward peak in February and its northeastward peak in May. We also constructed a comparable climatology for a HYCOM run ($1/12^\circ$ resolution [4]) and found a similar undercurrent. A plot of northeastward–southwestward velocity along the continental slope indicates that the core of the undercurrent slightly but systematically shifts downward in the southwestward direction.

A harmonic analysis on this flow field indicates that the annual harmonic dominates, followed by the semi-annual and 1/3-annual and that the higher frequency components are negligible. In each of the dominant components, the phase associated with the undercurrent propagates upward and southwestward. These properties are reminiscent of coastal trapped waves (CTWs).

An idealized semi-analytic CTW solution is then constructed on the basis of Brink's [5] formalism. The solution is driven by

an idealized harmonic wind stress. The solution includes a flow similar to the undercurrent of OFES2 and its phase propagation qualitatively (and roughly quantitatively) agrees with the OGCM.

This discovery of the new current poses a number of interesting scientific questions for future studies. This study was published as Furue (2022) [6].

Acknowledgement

A part of this project is supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP19H05701 and JP20K04075. We would like to thank Drs. Keiji Kiyomatsu and Sergey M. Varlamov for their support in the technical implementation of JCOPE system.

References

- [1] H. Sasaki, B. Qiu, P. Klein, M. Nonaka, and Y. Sasai, "Interannual variations of submesoscale circulations in the subtropical northeastern Pacific", *Geophysical Research Letters*, 49 (7), e2021GL097664, (2022).
- [2] Miyazawa Y, Zhang R, Guo X, et al (2009) Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis. *J Oceanogr* 65:737–756. <https://doi.org/10.1007/s10872-009-0063-3>
- [3] Sasaki, H., S. Kida, R. Furue, H. Aiki, N. Komori, Y. Masumoto, T. Miyama, M. Nonaka, Y. Sasai, and B. Taguchi, "A global eddying hindcast ocean simulation with OFES2", *Geoscientific Model Development*, 13 (7), 3319–3336, (2020). <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3319-2020>
- [4] Cummings, J.A., and O.M. Smedstad, "Variational Data Assimilation for the Global Ocean", In *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications (Vol. II)*, ed. S.K. Park and L. Xu, 303–43, (2013). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35088-7_13.
- [5] Brink, K.H., "Coastal-trapped waves and wind-driven currents over the continental shelf", *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23, 389–412, (1991). <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.23.010191.002133>.
- [6] Furue, R., "A seasonal undercurrent along the northwest coast of Australia", *Frontiers in Marine Science*, 8, 806659, (2022). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.806659>.