

海洋変動における微細現象と大規模循環の相互作用

課題責任者

升本 順夫 東京大学 大学院理学系研究科

著者

青木 邦弘 東京大学 大学院理学系研究科

佐々木 英治 海洋研究開発機構 アプリケーションラボ

辻野 博之 気象庁 気象研究所

升本 順夫 東京大学 大学院理学系研究科

海洋研究開発機構 アプリケーションラボ

本課題では、海洋の数 km から数十 km 規模の微細なサブメソスケール現象を再現する全球規模の高解像度海洋シミュレーションを行い、サブメソスケール現象の時空間変動とそれと異なる規模の中規模渦や大規模循環場とのスケール間相互作用を明らかにすること、さらに従来とは質的に異なる海洋循環像を示すことを目的としている。平成 28 年度は、約 3km の水平解像度で全球規模の高解像度海洋シミュレーションを 2 年間実施し、幅広い時空間現象を再現するデータセットを作成した。さらに、スケール間相互作用の研究として、日本東岸から数千 km 東方に延びる黒潮統流の維持に及ぼす渦の影響を明らかにした。

キーワード：海洋大循環モデル, 黒潮統流, 微細現象, 渦

1. 本課題の概要

海洋では、大規模循環場と数十 km ~ 百 km 規模の中規模渦が熱や物質輸送に重要な役割を担い、全球規模の地球環境の維持とその変動に大きく影響を及ぼしていることが知られている。一方、衛星観測による水温や海色データから、中規模渦よりも微細な数 km ~ 数十 km 規模の渦や筋状構造を持つサブメソスケール現象が多くの海域で観測されている。また、最近の理想的な設定の数値計算による研究では、海洋のサブメソスケール現象は、物理場のみならず物質循環、生態系にも影響を及ぼしていることが示唆されている。しかし、微細なサブメソスケール現象を考慮して、海洋内部を含む循環場を理解するために広範囲で高解像度の観測を実施することは困難であり、そのデータは存在しないため、数値計算の手法を用いざるを得ない。そこで本研究課題では、海洋の微細なサブメソスケール現象から大規模循環場を同時に再現する全球規模の高解像度海洋シミュレーションを実施し、サブメソスケール現象の時空間変動、中規模渦や大規模循環とのスケール間相互作用の研究を行うとともに、膨大なデータから従来とは質的に異なる海洋循環像を示すことを目的としている。平成 28 年度の成果として、全球規模の高解像度海洋シミュレーション、渦と黒潮統流のスケール間相互作用の研究を紹介する。

2. 全球規模の高解像度海洋シミュレーション

2000 年代は、初代地球シミュレータなどの計算機環境の飛躍的向上により、100km 規模の中規模渦を解像する高解像度海洋シミュレーションが可能となり、中規模渦だけでなく西岸境界流の離岸や海洋前線を含めた海洋循環を現実的に再現できるようになった (Masumoto et al.

2004 [1], Maltrud and McClean 2005 [2] など)。一方、衛星観測画像や理想化された高解像度数値実験 (Klein et al. 2008 [3]) などにより、数 km から数十 km のサブメソスケール現象は、海洋循環場に及ぼす影響が無視できないことが示唆された。そこで、我々は 2 代目の地球シミュレータを用いてサブメソスケール現象をかなり解像する 3km の水平解像度で北太平洋高解像度海洋シミュレーションを実施し、冬季に活発になるサブメソスケール現象の季節変動を再現し、さらに大規模循環場への影響を示唆した (Sasaki et al., 2014 [4])。地球シミュレータが 2015 年にリプレイスされ前機と比較し約 10 倍の性能となり、より大規模な数値計算が可能となったため、本課題ではサブメソスケール現象を再現できる全球規模の高解像度海洋シミュレーションを開始した。

海洋大循環モデルは OFES (OGCM for the Earth Simulator; Masumoto et al. 2004 [1], Komori et al. 2005 [5]) を使い、領域は極域を除く (南緯 76 度 ~ 北緯 76 度) 全球規模とした。水平解像度は 1/30 度 (約 3km)、鉛直レベル数は 105 層、最大深度は 7,500m である。初期値は水平解像度 1/10 度の過去再現実験の温度、塩分の 2000 年 1 月 1 日の出力を用い、静止状態から JRA55-do ver0.8 の 3 時間毎の大気再解析データ (Tsuji no et al. 2017, personal communication) を用いて 2000 年と 2001 年の 2 年間のシミュレーションを実施した。

サブメソスケール現象の時空間変動が全球規模で再現されているかを確認するために、微細現象が十分に再現されていることが期待される 2001 年の相対渦度の分布を確認した (図 1)。3 月 1 日の相対渦度の分布は、冬半球に相当する北半球の西岸境界流である黒潮、湾流の流域で、微細な渦や筋状構造が非常に活発で、さらに西部太平洋の北緯 20 度付近の亜熱帯反流の流域でも数多くの微

細現象が見られた。夏半球に相当する南半球では、活発なサブメソスケールの微細現象はほとんど見られない。一方、9月1日の相対渦度分布では、冬半球に相当する南半球の南緯20度付近のインド洋と西部太平洋の亜熱帯反流の流域で微細現象が活発になっている。夏半球に相当する北半球では、西岸境界流、亜熱帯反流の流域で冬季に活発であった微細現象が穏やかになっている。

以上のように、冬季に活発なサブメソスケール現象を全球規模で再現することができたが、詳細解析は今後行う予定である。例えば、大西洋の湾流は北大西洋海流として北東に高緯度まで延びているが、冬季に活発な微細現象のスケールは高緯度ほど小さくなっているように見える。中規模渦のスケールは高緯度ほど小さく、大西洋の高緯度域は海水が表層から深層に沈み込む海域があるため、湾流、北大西洋海流の微細現象の生成メカニズムやスケールなどはその流域によって異なる可能性がある。また、南極周極流の流域では、微細現象のはっきりした季節変動が見られない。この要因は、鉛直密度構造の季節変動が小さいことが考えられる。

3. 渦の黒潮統流への影響

黒潮は日本東岸で離岸した後、黒潮統流と呼ばれる定常的な東向きのジェットを形成する。このジェットは、その始点からしばらく強流を維持した後、東に向かって次第に減衰する。この単純な様相に反して、黒潮統流の形成機構はほとんど解明されていない。その理由の一つは、黒潮統流の定常状態が、自らの不安定によって生成した渦との相互作用の結果として成立する事実にある。この種のジェットと渦の相互作用では渦の引き起こす水平的な運動量輸送(レイノルズ応力)が重要な役割を担っており(Waterman and Jayne 2011 [6]など)、本研究では黒潮統流の形成機構解明に向けて、定常状態における力学バランスから黒潮統流の定常状態実現のためのレイノルズ応力の役割を調べ、次のような結果を得た(Aoki et al. 2016 [7])。

定常的な黒潮統流の維持において、レイノルズ応力は上流と下流で異なる役割を持つ。上流では、レイノルズ応力はジェットの減速に寄与し、下流では逆に加速に寄与する。下流における結果は、一見すると黒潮統流が東に向かって減速するという事実と矛盾する。しかし、下流のレイノルズ応力は同時に流下方向への圧力の増大を

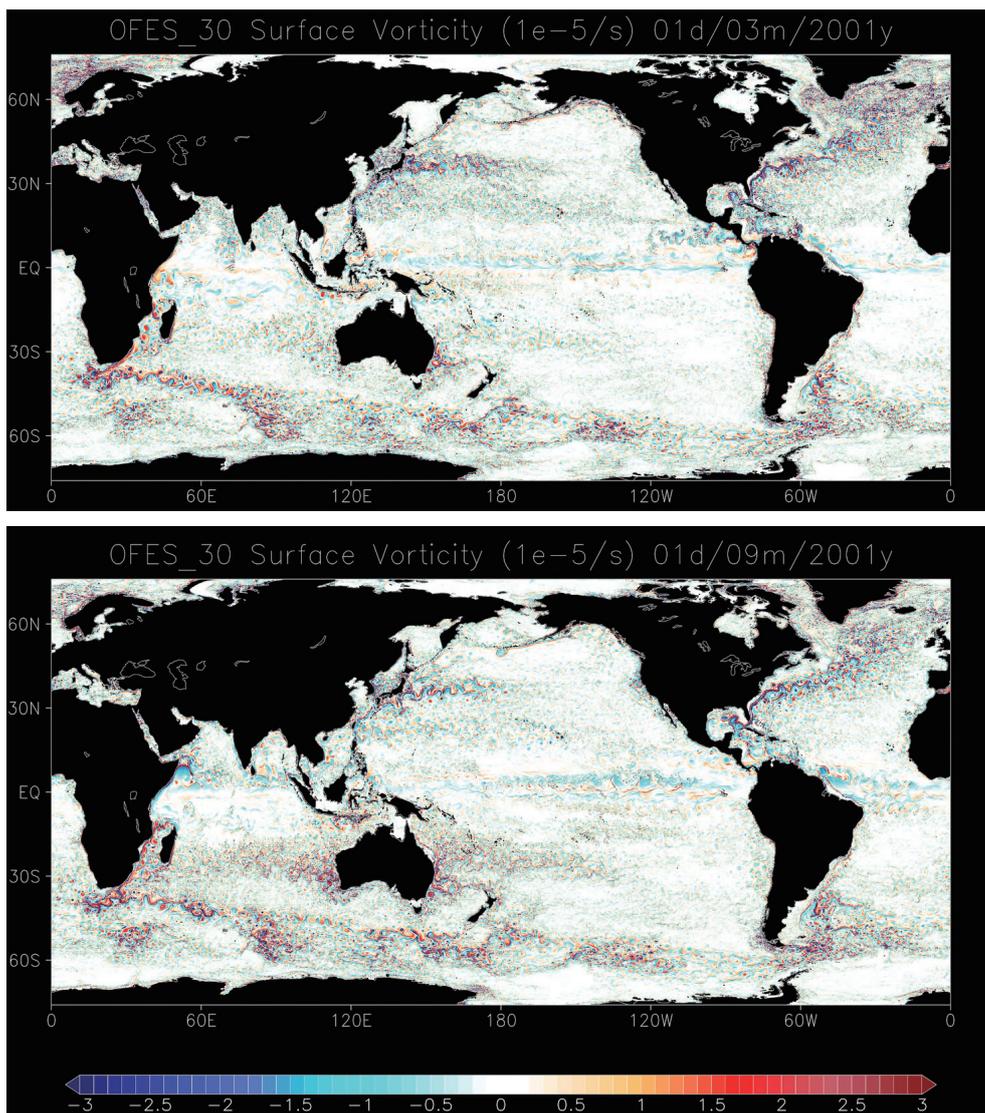


図1 2001年3月1日(上図)と9月1日(下図)における海面流速の相対渦度(1e-5 s⁻¹)

もたすため、これによって黒潮続流の減速が実現される。別な言い方をすれば、この圧力増大は地衡流とは別の南向きの流れ（非地衡流と呼ぶ）の発生と対応し、それに伴うコリオリ力によって黒潮続流が減速される。

この結論を導く上で注意すべきは、レイノルズ応力が動圧を発生させることである。動圧は発散場を与えるだけであり、回転場が支配する黒潮続流等の西岸境界流の力学には影響しない。この動圧はまた、黒潮続流の減速をもたらすのと同様な非地衡流循環場を形成する。そこで、黒潮続流の定常状態の力学を正しく理解するために、動圧に伴う非地衡流循環場がどのような過程を経て形成されるかを調べた。

レイノルズ応力の作る動圧の一つは、渦の運動エネルギーである。定常場では、渦の運動エネルギーは黒潮続流上に極大を取り、その極大を右に見た時計回りの非地衡流循環場が形成される（図2）。定常場は瞬間場の“蓄積”であるので、瞬間場を調べたところ、リング状に分布した渦の運動エネルギー上に時計回りの非地衡流が生じて

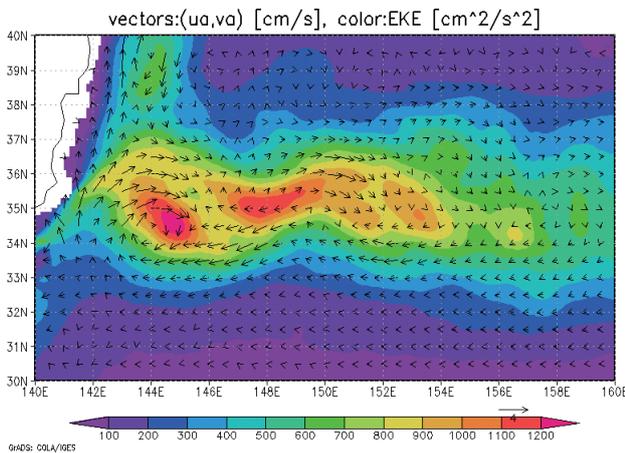


図2 表層における非地衡流（ベクトル）と渦運動エネルギー（陰影）の関係（深度200m）。単位はそれぞれ、 cm s^{-1} および $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$ 。

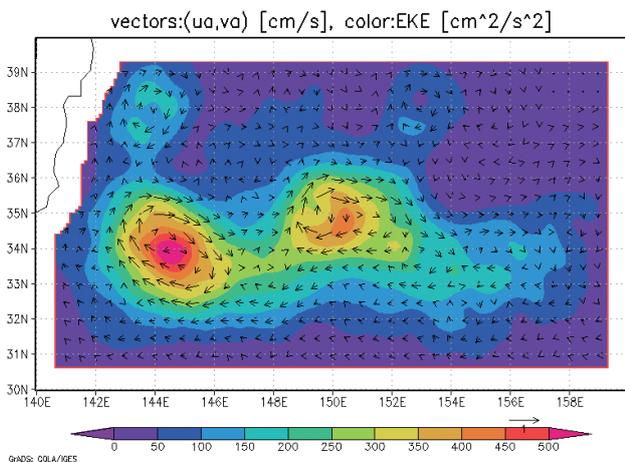


図3 理想化したモデルの結果であることを除いて図2に同じ。このモデルでは、領域に発生する全ての渦について、その海面高度（表層の圧力場）を軸対称形に書き換えてから渦の運動エネルギーと非地衡流を計算し、その時間平均を算出している。海面高度の軸対称化では、振幅が50cmで分散が100kmの二次元ガウス分布を採用している。

おり（渦の極性に寄らない）、さらに、これらは良い近似で、非地衡流と遠心力がバランスした旋向風バランス（Holton 2004 [8] など）の関係にあることが分かった。

定常状態での渦の運動エネルギー周りの非地衡流循環場の形成は、旋向風バランスした渦の広い範囲での発生（渦の移動も含む）によって説明される。すなわち、渦がある一点にしか見出されない場合、それが作る平均場は瞬間場と同じであるが、渦が広い範囲に分布する場合は、非負性を持つ渦の運動エネルギーは領域内部で極大化する一方で、単一の極性を持つ非地衡流循環場は内部で相殺が起きて大規模化するからである（ストークスの定理のアナロジー）。図3は、この本質を表す簡単なモデルでの実証として、黒潮続流域に発生する渦を全て軸対称渦で書き換えた場合の結果であるが、渦の運動エネルギーの極大域を右に見た非地衡流循環場がよく再現されているのが分かる。

文献

- [1] Y. Masumoto, et al., “A fifty-year eddy-resolving simulation of the world ocean: Preliminary outcomes of OFES (OGCM for the Earth Simulator)”, *Journal of Earth Simulator*, 1, 35-56, 2004.
- [2] M. E. Maltrud, and J. L. McClean, “An eddy resolving global 1/10 ocean simulation”. *Ocean Modelling*, 8 (1), 31-54, 2005.
- [3] P. Klein, B. L. Hua, G. Lapeyre, X. Capet, S. Le Gentil, and H. Sasaki, “Upper ocean turbulence from high-resolution 3D simulations”, *Journal of Physical Oceanography*, 38(8), 1748-1763, 2008.
- [4] 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 Communications*, 5, 5636, 2014.
- [5] N. Komori, K. Takahashi, K. Komine, T. Motoi, X. Zhang, and G. Sagawa, “Description of sea-ice component of coupled ocean–sea-ice model for the Earth Simulator (OIFES)”, *Journal of Earth Simulator*, 4, 31-45, 2005.
- [6] S. Waterman, and S.R. Jayne, “Eddy-mean flow interaction in the along-stream development of a western boundary current jet: An idealized model study”, *Journal of Physical Oceanography*, 41(4), 682-707.
- [7] K. Aoki, A. Kubokawa, R. Furue, and H. Sasaki, “Influence of eddy momentum fluxes on the mean flow of the Kuroshio Extension in a 1/10° Ocean General Circulation Model”, *Journal of Physical Oceanography*, 46(9), 2769-2784.
- [8] J.R. Holton, *An introduction to dynamic meteorology*, Forth edition, vol. 88. Elsevier, 2004.

Interactions between Fine-scale Phenomena and Large-scale Circulations

Project Representative

Yukio Masumoto Graduate School of Science, The University of Tokyo

Authors

Kunihiro Aoki Graduate School of Science, The University of Tokyo

Hideharu Sasaki Application Laboratory, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Hiroyuki Tsujino Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

Yukio Masumoto Graduate School of Science, The University of Tokyo

Application Laboratory, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

In this project, we construct a dataset from a global high-resolution oceanic simulation that well resolves small structures with scale from several to several tens km, named by submesoscales. We try to investigate temporal and spatial variations of submesoscale/mesoscale structures and their interactions with larger scale circulations, by analyzing this dataset. In FY2016, we conducted the quasi-global high-resolution oceanic simulation for 2 years from 2000 to 2001. In addition, to investigate impact of the small scale phenomena on the large scale circulations, we revealed how eddies influence on the Kuroshio Extension.

Keywords: Ocean general circulation model, Kuroshio Extension, Fine-scale structure, Eddy

1. Introduction

The oceanic submesoscales with scale from several to several tens km can be observed by satellite images. However, observations of the clear images are very rare due to contaminations by cloud cover. The resolution of conventional satellite altimeter is about 100km, which is not enough to capture the submesoscales. Currently, there are no observations to capture the submesoscales in the large area. On the other hand, the recent numerical study suggested non-negligible impact of the submesoscales on the oceanic field including biogeochemical tracers. In this project, we construct a dataset from a global high-resolution oceanic simulation that well resolves the submesoscales and investigate temporal and spatial variations of the submesoscales and their interactions with larger scale circulations. In this report, we introduce the quasi-global high-resolution ocean simulation and how eddies influence on the Kuroshio Extension (KE).

2. Quasi-global high-resolution simulation

We use the OFES (OGCM for the Earth Simulator; Masumoto et al. 2004 [1], Komori et al. 2005 [2]) based on the GFDL MOM3. The model domain covers quasi-globe without arctic regions (from 76°S to 76°N) with a horizontal resolution of $1/30^\circ$ ($\approx 3\text{km}$). The number of vertical levels is 105 and the maximum depth is 7500 m. The temperature and salinity fields from output of the simulation with a horizontal resolution of 0.1° on January 1, 2000 are used as the initial condition. We finished the simulation for 2 years from 2000 to 2001 forced by 3 hourly atmospheric reanalysis data from JRA55-do ver0.8 (Tsujino et

al. 2017, personal communication).

The surface relative vorticity shows the seasonality of submesoscales: rich in winter and calm in summer in the global ocean (Fig. 1). On March 1, in northern hemisphere, the submesoscales are rich around the Kuroshio Extension, Gulf Stream, North Atlantic Current, and Pacific Subtropical Countercurrent, but not in the southern hemisphere. On the

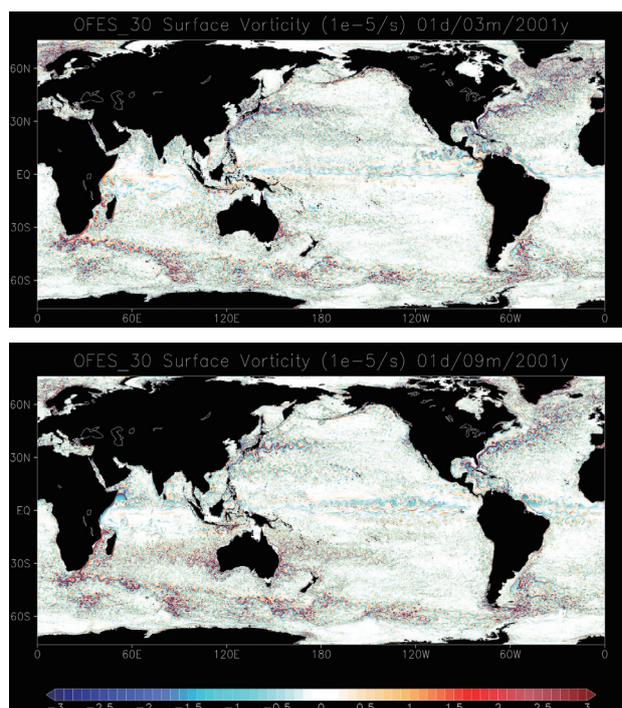


Fig. 1 Surface vorticity ($1e-5 \text{ s}^{-1}$) on (top) March 1 and (bottom) September 1 in 2001.

other hand, on September 1, rich submesoscales cannot be found in the northern hemisphere, but they are distributed around subtropical countercurrents in the South Indian Ocean and the Southwestern Pacific in the southern hemisphere. In future, we investigate spatial-temporal variations of submesoscales and scale interactions between small and large scales in the global ocean in this simulation dataset.

3. Impact of eddies on the Kuroshio Extention

In this study, we explored the role of the Reynolds stress caused by eddies in maintaining a steady state of the KE jet and obtained the results as follows (Aoki et al. 2016 [3]). The Reynolds stress has different roles between an upstream and a downstream region: the Reynolds stress has a tendency of deceleration and acceleration in the upstream and downstream regions, respectively. The acceleration in the downstream is apparently inconsistent to the downstream decay of the

jet, but causes a pressure field increasing to the east, which acts to decelerate the jet. Furthermore, the Reynolds stress simultaneously yields eddy kinetic energy, which is a part of dynamic pressure. This does not affect the jet's evolution, but forms a large-scale ageostrophic circulation over the jet (Fig. 2). For a correct understanding of the KE jet's dynamics, the formation mechanism of this circulation needs to be described.

This study found that this ageostrophic circulation can be caused by a wide-distribution of occurrence (including moving) of eddies being under the gradient wind balance (e.g., Holton 2004 [4]). As expected from this dynamical balance, in snapshots, the ageostrophic velocity occurs on the eddy kinetic energy which makes a ring-form horizontally (independent of polarity of eddy). When the eddies are widely occurred, the eddy kinetic energy tends to take a maximum within the interior of the area of eddy occurrence due to the nature of positive definite of eddy kinetic energy, while the scale of the ageostrophic circulation becomes larger because the ageostrophic circulation for individual eddies are canceled out with each other within the area. Figure 3 shows a demonstration of this fact using a simplified model, in which all eddies occurred in the KE region are replaced by axisymmetric eddies with the same shape and amplitude. This figure indicates that the ageostrophic flow occurs, with the high eddy kinetic energy on its right side.

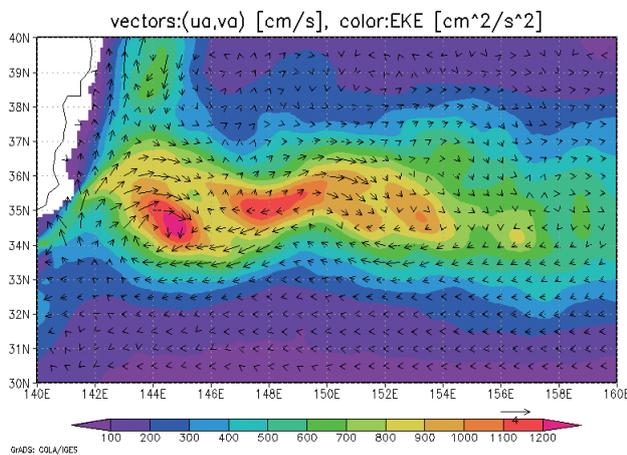


Fig. 2 Ageostrophic velocity (vectors) and eddy kinetic energy (shades) at 200 m depth. Units are cm s^{-1} and $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$, respectively.

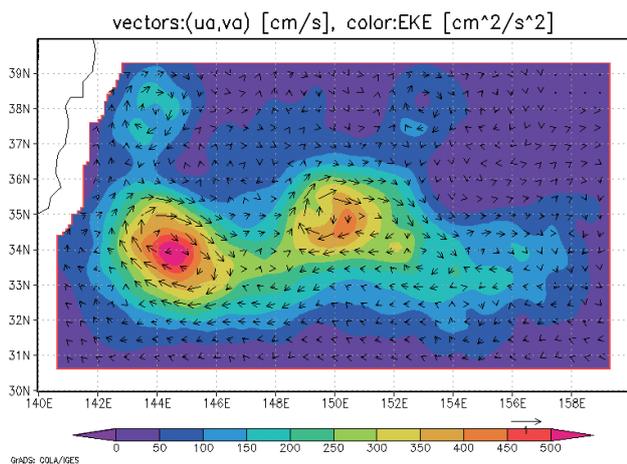


Fig. 3 Same as Fig. 2 except for the result from a simplified model. In this model sea surface height (a proxy of surface pressure) of all eddies occurred in the region within a period are replaced with a same axisymmetric horizontal shape (two dimensional gaussian distribution with amplitude of 40 cm and variance of 100 km). This sea surface height derives a geostrophic velocity, which is used for calculating eddy kinetic energy and the centrifugal force equivalent to the Coriolis force of the ageostrophic flow.

References

- [1] Y. Masumoto, et al., “A fifty-year eddy-resolving simulation of the world ocean: Preliminary outcomes of OFES (OGCM for the Earth Simulator)”, *Journal of Earth Simulator*, 1, 35-56, 2004.
- [2] N. Komori, K. Takahashi, K. Komine, T. Motoi, X. Zhang, and G. Sagawa, “Description of sea-ice component of coupled ocean–sea-ice model for the Earth Simulator (OIFES)”, *Journal of Earth Simulator*, 4, 31-45, 2005.
- [3] K. Aoki, A. Kubokawa, R. Furue, and H. Sasaki, “Influence of eddy momentum fluxes on the mean flow of the Kuroshio Extension in a $1/10^\circ$ Ocean General Circulation Model”, *Journal of Physical Oceanography*, 46(9), 2769-2784.
- [4] J.R. Holton, *An introduction to dynamic meteorology*, Forth edition, vol. 88. Elsevier, 2004.

