サブメソスケール現象が海洋上層の循環に与える影響

課題責任者
秋友　和典　　京都大学　大学院理学研究科

著者
田中　裕介　　海洋研究開発機構　地球情報基盤センター
京都大学　大学院理学研究科
秋友　和典　　京都大学　大学院理学研究科

海洋のサブメソスケール（水平スケール数 km ～数十 km 程度）の現象が、海洋上層の循環（shallow overturning circulation）に与える影響について、簡単化した海洋大循環モデルを用いた数値シミュレーションにより調べた。海洋上層の子午面循環の中で重要な役割を果たすモード水の形成過程を、空間解像度の異なる数値実験の比較を通して調べた。本年度はモデル海の東西幅を広げて、モード水の形成に対して東岸境界が与える影響を確認する実験を行った。

キーワード：サブメソスケール現象, 簡単化実験, モード水

1. 課題の目的

入射する太陽エネルギーの不均衡に伴う赤道域から極域への熱の南北輸送において、海洋は全輸送量の 1/3 から 1/2 を担っていると考えられている。海洋における南北輸送を考える上では、子午面循環（Meridional Overturning Circulation; MOC）が重要である。MOC は形成要因・循環の水深に応じて大きく 3 層に分けられるが [1]、南北熱輸送を考える上では最上層の shallow overturning circulation の果たす役割が大きい。深層水形成がなく深層において顕著な MOC が存在しない北太平洋では、海洋における全熱輸送量の 3/4 を担っていると考えられている。

Shallow overturning circulation は亜熱帯循環に伴うものであり、主に極向きに暖かい海水を運ぶ西岸境界流と、中緯度域で冷却された海水が南に戻るモード水からなる。したがって、モード水の形成とその循環を理解することが重要である。特に、モード水の形成（subduction）には中規模渦の役割の重要性がモデル実験や観測結果から示されてきた。

一方で、海洋のサブメソスケール（数 km ～数十 km 程度の水平スケール）の現象は、強い鉛直流速や再成層化効果を通して、海面付近の生物地球化学過程に大きな影響を与えることが指摘されており、近年注目されている。これらの現象が shallow overturning circulation を含む海洋上層の循環に対して与える影響についても研究が進みつつあるが [2]、海盆規模での循環への寄与などについての知見は不十分である。そこで、本課題では理想化・簡単化した海洋モデルを用いて、サブメソスケール現象を解像する数値実験を行い、海洋上層の循環に与えるサブメソスケール現象の影響を明らかにすることを目的とした。

2. モデル

モデルの支配方程式は、静水圧近似、ブシネスク近似、β - 平面近似、rigid-lid 近似のもとでの運動方程式と連続の式、移流拡散方程式と、線形近似した海水の状態方程式である。粘性項として、水平・鉛直方向に Laplacian 型の粘性・拡散を与え、運動量に関しては線形の底摩擦も加えた。水平粘性・拡散係数はいずれも $1 m^2 s^{-1}$、鉛直拡散係数は $5\ m^2 s^{-1}$、鉛直粘性係数は $1.25\ m^2 s^{-1}$ とした。モデル海は、昨年度より東西幅を広げて、東西 6000km、南北 3000km の矩形とした。北西端に海岸地形を設定した（図 1）。水深は海盆全体でおよそ 4100m であるが、計算の安定のために、水平スケール 200km で高さ 600m の凹凸を付加した。モデル海洋は、大気から、貿易風と偏西風を簡単化した東西一様な風応力 [3,4]（図 1）と、モデル海南端で 22℃、北端で 6℃、緯度に対して線形に減少する気温と海面温度の差に比例した熱フラックスを受けて駆動される。また、水深 1500m 以深ではポテンシャル水温を基本場（水深 1000m まで一様 5℃、1000m 以深は 4000m で 1℃となるように水深に対して線形に減少）に強く緩和した。また、塩分は一定値としたので、海水の密度はポテンシャル水温と線形関係にある。

水平解像度は、サブメソスケール現象を解像できる 1km とし、鉛直解像度は表層付近で 5m とした。比較のためにサブメソスケール現象を許容する 3km 解像度実験、中規模渦を解像する 10km 解像度実験、渦を解像しない 50km 解像度実験も行った（鉛直解像度は同じ）。

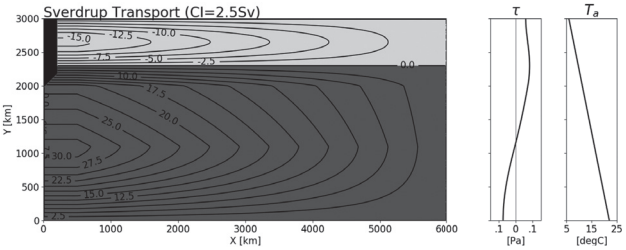

図 1　モデル海の概略図。北西端の黒の領域は陸である。与えた風応力分布（中）と風応力カール（右）の東西分布と、風応力による Sverdrup 流量の分布（左）。

3. 研究計画

平成 29 年度は、平成 28 年度までに実施した東西幅 3000km のモデル海を用いた実験において、モード水の形成に対して東岸境界の存在の影響を評価する必要が生じたために、モデルの東西幅を 6000km に広げて、1km、3km、10km の解像度の実験を行った。実験を手順は図 2 に示す。その後、1km、3km、10km 解像度実験の比較を通してモード水の形成に対するサブメソスケール渦の影響について調べた。解析には各実験の最後の 1000 日間の結果を用いた。

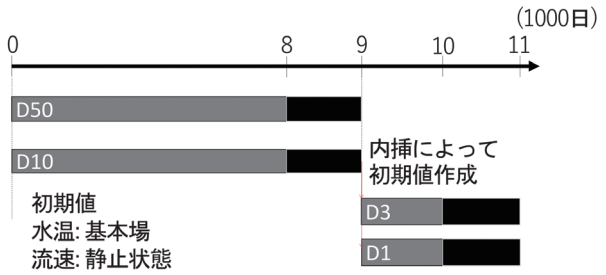

図 2　実験の手順。 D50, D10, D3, D1 はそれぞれ 50km, 10km, 3km, 1km 解像度の実験を示す。

4. 今年度得られた成果

図 3 に 1km、3km、10km の解像度の実験における混合層深の水平分布を示す。X=5000km 付近では海面水温、混合層深ともに東西方向こうほぼ一様な分布を示しており、東岸境界の影響を受けないモード水の形成の解析が可能になると考えられた。

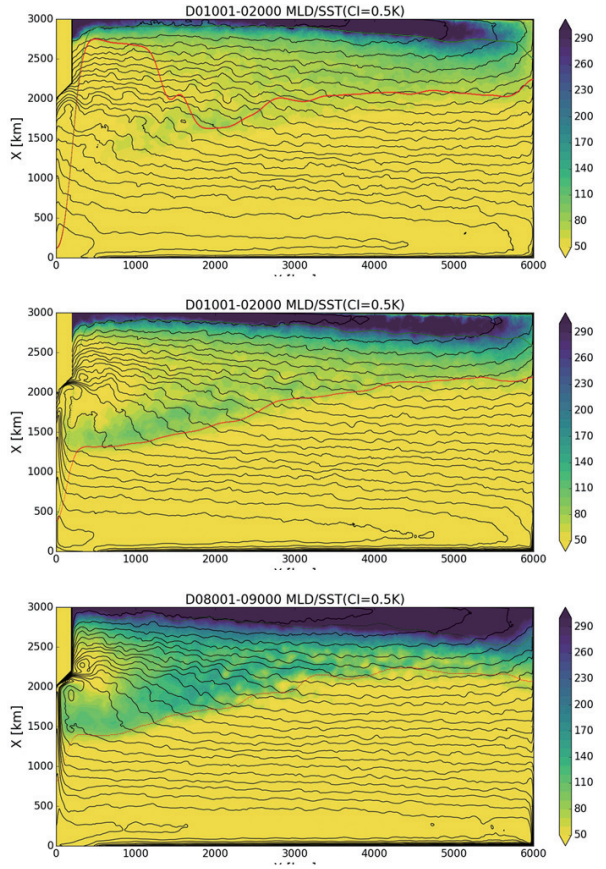

図 3　1000 日平均場から求めた混合層深の分布。海面水温を黒等値線で、混合層深フロントを赤線で示す。上から 1km, 3km, 10km 解像度の実験結果を示す。

5. まとめと今後の展開

モデル海の東西幅を広げた実験を行うことで、東岸境界が存在の影響を受けないモード水の形成メカニズムを議論できることが示唆される結果を得た。今後は、モード水の形成に果たすサブメソスケール現象の役割について、具体的なメカニズムの解析に取り組む。

文献

[1] Talley, L. D., “Some aspects of ocean heat transport by the shallow, intermediate and deep overturning circulations.”, in Mechanisms of Global Climate Change at Millenial Time Scales, *Geophys. Mono. Ser*., 112, American Geophysical Union, pp. 1-22, 1999.

[2] Sasaki, H., P. Klein, B. Qiu and Y. Sasai, “Impact of oceanic-scale interactions on the seasonal modulation of ocean dynamics by the atmosphere.”, *Nat. Commun*., 5, 5636, 2014.

[3] Kurogi, M., and K. Akitomo, “Stable paths of the Kuroshio south of Japan determined by the wind stress field.”, *J. Geophys. Res*., 108, 3332, 2003.

[4] Kurogi, M., and K. Akitomo, “Effects of stratification on the stable paths of the Kuroshio and on their variation.”, *Deep-Sea Res. Part I*, 53, pp.1564-1577, 2006.

The Impact of Submesoscale Eddies on the Circulation of Upper Ocean

Project Representative
Kazunori Akitomo Graduate School of Science, Kyoto University

Authors
Yuusuke Tanaka Center for Earth Information Science and Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
Graduate School of Science, Kyoto University
Kazunori Akitomo Graduate School of Science, Kyoto University

The impact of submesoscale eddies on the circulation of upper ocean was investigated by the high-resolution ocean general circulation model with idealized configuration. We expanded the model width (east-west direction) from 3000 km to 6000 km to evaluate the impact of the existence of eastern boundary on the formation of mode waters.

Keywords: submesoscale eddies, idealized model, mode water

1. Introduction

The ocean carries about one-third to one half of the total meridional heat transport. Meridional heat transport in the ocean is associated to the meridional overturning circulation (MOC). MOC approximately consists of 3 layers depending on the formation mechanism and the depth [1]. The upper most layer (shallow overturning circulation) plays main role in meridional heat transport.

Shallow overturning circulation is associated to the subtropical gyre circulation. The western boundary currents transport warm water poleward. Water transfer heat to the atmosphere in the mid-latitude, and cooled denser water forms mode water and moves southward. Previous numerical and observational studies suggested the importance of mesoscale eddies in the formation process of mode water (subduction).

On the other hand, submesoscale eddies are focused because of its importance to the surface bio-geochemical processed through the strong vertical velocity or the restratification effect. Some studied the effect submesoscale eddies on the upper ocean circulation including shallow overturning circulation [2], but the understanding related to the impact on basin-wide circulation is still poor. In this project, we evaluate the basin-wide impact of submesoscale eddies using the high-resolution idealized ocean models.

2. Model

The governing equations are momentum equation, continuity equation, advection-dissipation equation and linearized equation of state under the hydrostatic, Boussinesq, beta-plane and rigid-lid approximations. Laplacian type horizontal and vertical viscosity and dissipation are used. Bottom friction is also included in the momentum equation. Model basin is 6000 km in east-west (changed from 3000 km in last year) and 3000 km in south-north direction and approximately 4100m deep, and has land area on the north-western corner (Fig. 1). The sine-shaped bottom topography is introduced for the stability of calculation, with wavelength of 200 km and height of 600m. The ocean is forced by zonally homogeneous wind stress [3,4] (Fig. 1) and heat flux proportional to the difference between SST and atmospheric temperature. The salinity is set to the constant (and so the potential density is proportional to the temperature).

We conducted the experiments with horizontal resolution of 1km, 3km, and 10km. Vertical resolution is 5 m at the surface.

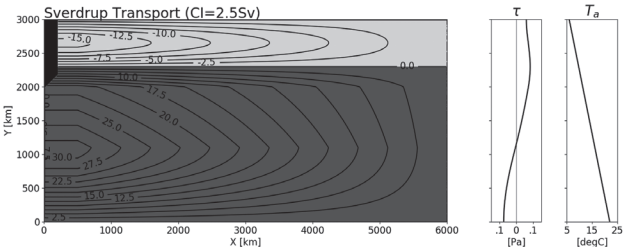

Fig. 1 Meridional distribution of wind stress (center) and its curl (right), and Sverdrup transport on the schematic view of model basin (left).

3. Results

The numerical experiments were executed as shown in Fig. 2. All the experiments were finished. We analyzed the effect of submesoscale eddies by comparing the model result from 1km, 3km and 10km resolution experiments. The last 1000 days of each experiment are used.

Fig. 3 shows the horizontal distribution of mixed layer depth (MLD) derived from 1000-day mean field. The MLD and sea surface temperature if almost uniform in east-west direction around X=5000 km. This implies that the width of the model

domain is sufficient to investigate the formation process of mode waters without the effect of eastern boundary.

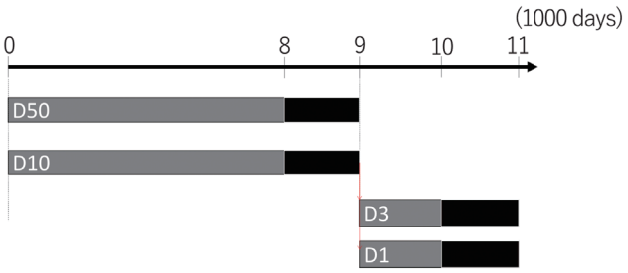

Fig. 2 Procedure of the experiments. D50, D10, D3 and D1 represent the experiments with horizontal resolution of 50km, 10km, 3km and 1km, respectively.

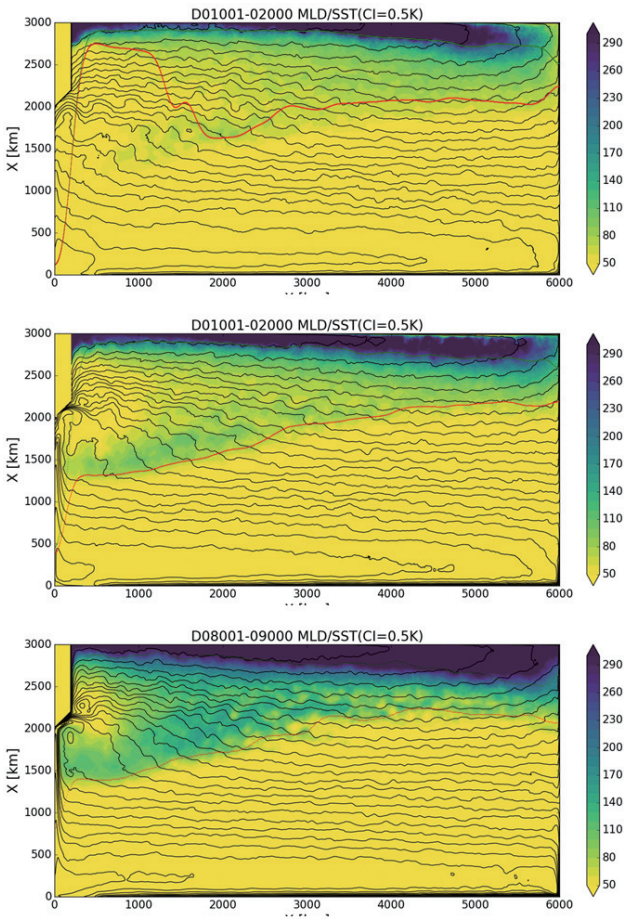

Fig. 3 Horizontal distribution of mixed layer depth (MLD) derived from 1000-day mean field. The black contours show sea surface temperature and red line indicates MLD front. The results of the horizontal resolution with 1 km, 3 km and 10 km are shown from top to bottom.

5. Future works

Comparison among the models with different horizontal resolution reveal the impact of submesoscale eddies in formation of mode waters. We continue analysis to clarify the physical process of submesoscale eddies to the formation.

References

[1] Talley, L. D., “Some aspects of ocean heat transport by the shallow, intermediate and deep overturning circulations.”, in Mechanisms of Global Climate Change at Millenial Time Scales, *Geophys. Mono. Ser*., 112, American Geophysical Union, pp. 1-22, 1999.

[2] Sasaki, H., P. Klein, B. Qiu and Y. Sasai, “Impact of oceanic-scale interactions on the seasonal modulation of ocean dynamics by the atmosphere.”, *Nat. Commun*., 5, 5636, 2014.

[3] Kurogi, M., and K. Akitomo, “Stable paths of the Kuroshio south of Japan determined by the wind stress field.”, *J. Geophys. Res*., 108, 3332, 2003.

[4] Kurogi, M., and K. Akitomo, “Effects of stratification on the stable paths of the Kuroshio and on their variation.”, *Deep-Sea Res. Part I*, 53, pp.1564-1577, 2006.