

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、単純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。今年度は、数値モデルを地球シミュレータへ移植・チューニングし、サブメソスケール現象を解像できる水平解像度 1km の実験に着手した。中規模渦を解像できる水平解像度 10km の実験との比較を通して、モード水の形成と循環をはじめとした海洋上層の循環への影響について有用な実験結果が得られた。

キーワード：サブメソスケール現象, 単純化実験, 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（e. g., [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・単純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 $1\text{m}^2\text{s}^{-1}$ 、鉛直拡散係数は $5\text{m}^2\text{s}^{-1}$ 、鉛直粘性係数は $1.25\text{m}^2\text{s}^{-1}$ とした。モデル海は東西・南北ともに 3000km の矩形であり、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、貿易風と偏西風を単純化した東西一様な風応力 ([3][4]; 図 2) と、モデル海南端で 22°C 、北端で 6°C 、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

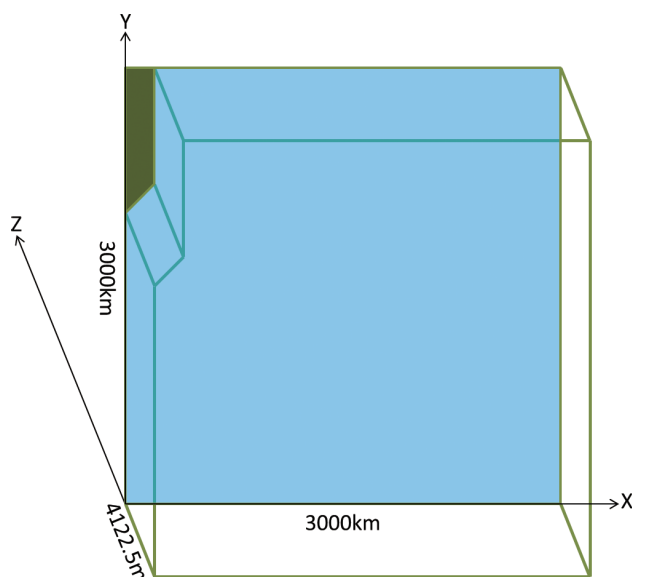


図 1 モデル海の概略図。北西端の緑の領域は陸である。

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）。

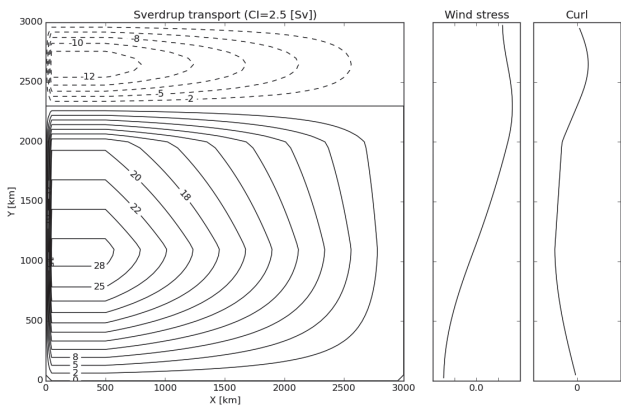


図2 与えた風応力分布(中)と風応力カール(右)の東西分布と、風応力による Sverdrup 流量の分布(左)。

3. 研究計画

本課題で用いた数値モデルは新規に開発したものであるため、平成 27 年度は、① 数値モデルの地球シミュレータ (ES) への移植とチューニング、② 10km 解像度での予備実験によるモデル設定の探索、③ 予備実験の結果を受けた本実験 (1km 解像度実験) の実施と結果の解析、④ 追加実験の検討、という計画で課題を遂行した。

4. 今年度得られた成果

数値モデルの ES への移植とチューニングについては、計算性能の目標値 (ベクトル化率 98%、256CPU 使用時の並列化率 95%) に対して、ベクトル化率 98.5%、並列化

率 98.5% (256core 使用時) となった。各解像度の実験について必要な計算資源を表 1 に示す (50km 解像度実験は必要な計算資源が少ないため汎用サーバで行った)。

実験は、① 50km 解像度で初期状態 (水温は基本場、流速は静止状態) から 18000 日間積分 (D50)、② ①の最終状態を初期値として 10km 解像度で 4500 日間積分 (D10)、③ ②の最終状態を初期値として 1km 解像度の実験 (D1) を開始、という手順で行った。平成 27 年度は、D1 について、515 日間の積分が終了した。

図 3 に各解像度の実験の垂表層 (水深 57.5m) におけるポテンシャル水温の分布を示す。D50 では表現されなかった続流ジェットに伴う強い温度勾配が、D10 と D1 では Y=2200km 付近に表現された。海岸地形の効果により D10 と D1 で西岸境界流の離岸位置がほぼ同じとなった。D10 では続流ジェット流域や内部領域で水平数百 km スケール中規模変動が活発に見られた。一方で、D1 では中規模変動に加えて、より水平スケールの小さい変動が多くみられ、サブメソスケール変動が表現された。

表 1 各解像度の実験に必要な計算資源

解像度 [km]	東西方向の分割数	南北方向の分割数	1モデル日あたりの計算資源 [NH]
10	1	40	0.057
1	4	64	64

5. 今後の展開

水平解像度 1km での海洋の数値シミュレーションを行うことで、サブメソスケール現象を表現することができた。本課題では海盆全体の数値実験を行うことで、渦活動が海洋上層の循環に与える影響を調べることができる点が特長である。今後は、サブメソスケール現象を解像しない数値実験結果との比較を通して、海洋上層の循環や熱輸送の中で大きな役割を担うモード水の形成過程 (subduction) に注目して、サブメソスケール現象が与える影響についての解析を行っていく。なお、本課題は平成 28 年度も継続して行う。

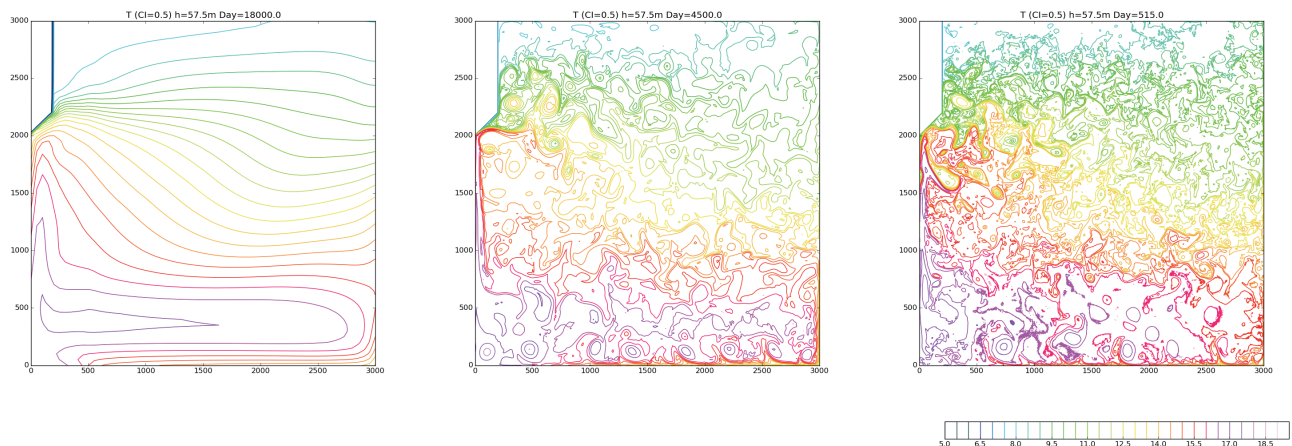


図3 水深 57.5m でのポテンシャル水温の水平分布。D50 の 18000 日目 (左)、D10 の 4500 日目 (中)、D1 の 515 日目 (右) を示す。等値線の間隔は 0.5℃。

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 Millennial 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. The model was transported to and tuned for the Earth Simulator in FY 2015. We have started the numerical experiment with horizontal resolution of 1 km. Active submesoscale eddies were appeared in addition to the mesoscale eddies and useful for understanding the impact especially on the subduction 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 (e. g., [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 3000 km in east-west and 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 (cf. [3][4]; Fig. 2) 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).

The horizontal resolution is set 1 km, which can express submesoscale eddies. Vertical resolution is 5 m at the surface. We also conduct the experiments with 10 km and 50 km

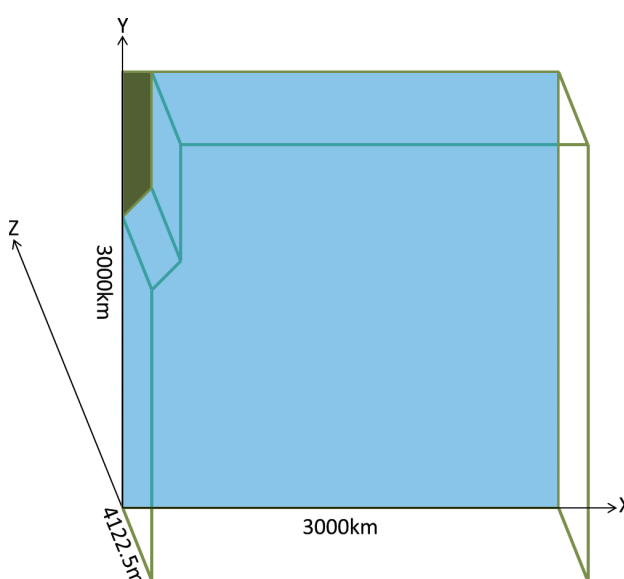


Fig. 1 Schematic view of model basin.

horizontal resolution.

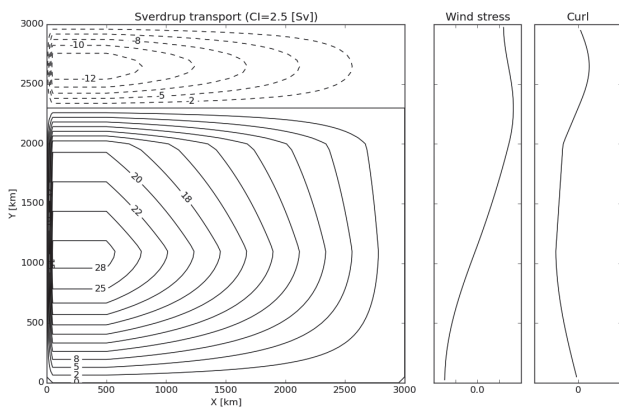


Fig. 2 Meridional distribution of wind stress (center) and its curl (right), and Sverdrup transport (left).

3. Results

The numerical experiments were executed as follows:

1. The ocean was spun up for 18000 days from the initial state by the 50 km resolution model (called D50 experiment). Initially the ocean was in state of rest. Temperature was the horizontally homogeneous, 5 degrees from surface to the 1000 m depth and reduced linearly with depth to the 1 degree at 4000 m.
2. The ocean was initialized by the final state of D50 and simulated for 4500 days by the 10 km resolution model (D10).
3. Initialized by the final state of D10, the model was integrated by the 1 km resolution model (D1). 515-day simulation has done in FY 2015.

Figure 3 shows the horizontal distribution of potential temperature at the depth of 57.5 m for D50, D10 and D1. Extension jet was simulated in D10 and D1, which was absent in D50. The separation point of western boundary current was almost same between D10 and D1 according to the coastal topography. Active mesoscale eddies arose in D10 on the

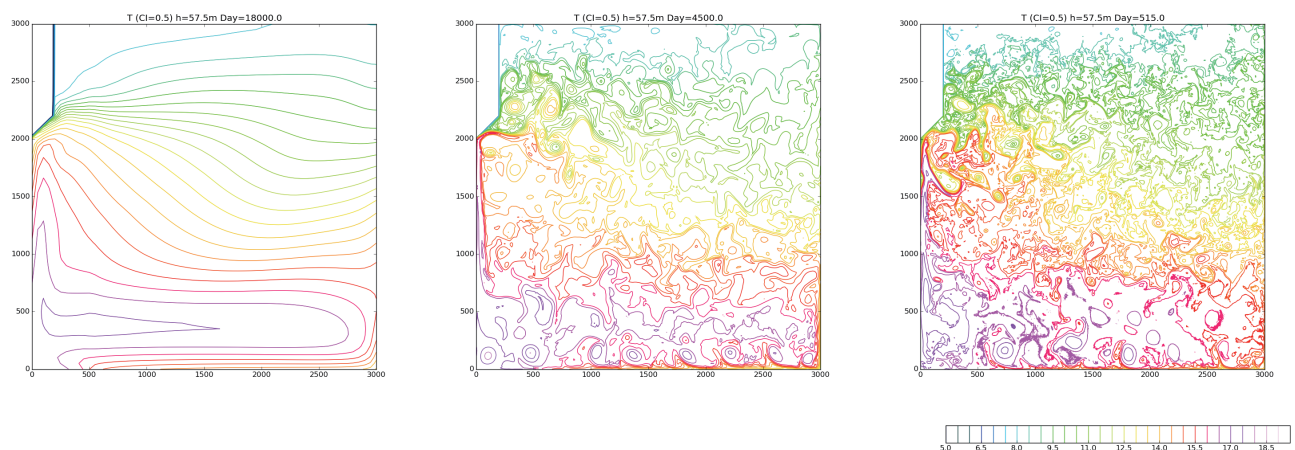


Fig. 3. Horizontal distribution of potential temperature at the depth of 57.5 m. Left panel is for D50 on 18000 model day, center for D10 on 4500 model day, and right for D1 on 515 model day. Contour interval is 0.5 °C.

extensional jet and in the internal region. In D1 finer scale perturbation was seen in addition to the mesoscale eddies.

4. Future works

The model with 1 km resolution successfully simulated the submesoscale eddies. We will evaluate the impact of submesoscale eddies on the upper ocean circulation, especially focusing on the subduction process of waters.

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 Millennial 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.

