

# 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。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。実験結果には北西太平洋の STMW と CMW に対応するモード水が見られ、それぞれの生成に対してサブメソスケール現象の果たす役割が異なることが示唆された。

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 [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、 $\beta$ -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  $22^\circ\text{C}$ 、北端で  $6^\circ\text{C}$ 、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  $5^\circ\text{C}$ 、1000m 以深は 4000m で  $1^\circ\text{C}$  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。

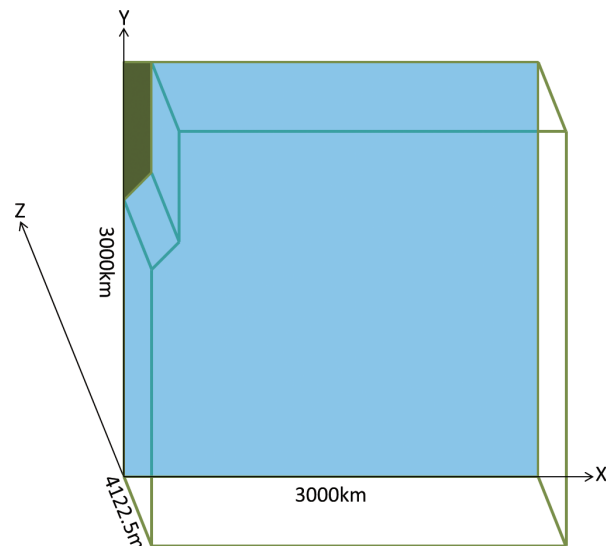


図 1 モデル海の概略図。北西端の緑の領域は陸である。

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）。

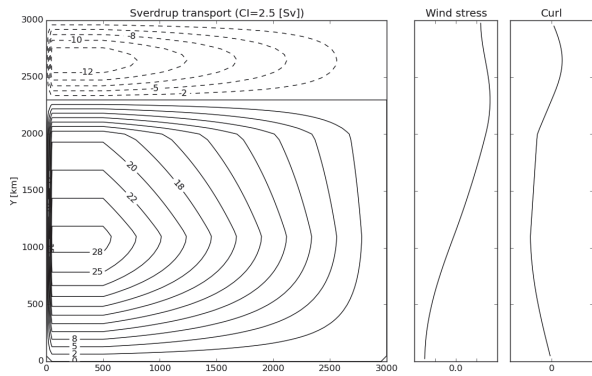


図2 与えた風応力分布(中)と風応力カール(右)の東西分布と、風応力によるSverdrup流量の分布(左)。

### 3. 研究計画

平成28年度は、平成27年度に引き続いて1km解像度実験を行い、解析に必要な期間の積分を完了した。実験を手順は図3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。

### 4. 今年度得られた成果

図4に水平解像度が1km、3km、10kmの各実験で得られた、1000日平均場における低渦位水の体積を温度帯ごとに示す。いずれの解像度の実験結果にも11℃前後と14℃前後に2つのピークが見られモード水が形成された。高温側と低温側のピークは、大半がそれぞれ海盆の西半分と東半分に存在し、北太平洋における亜熱帯モード水(STMW)と中央モード水(CMW)に対応すると考えられる。

図5にそれぞれの実験で低渦位水の体積の低温側のピーク(CMWに相当)を示す温度面上における渦位の分布を

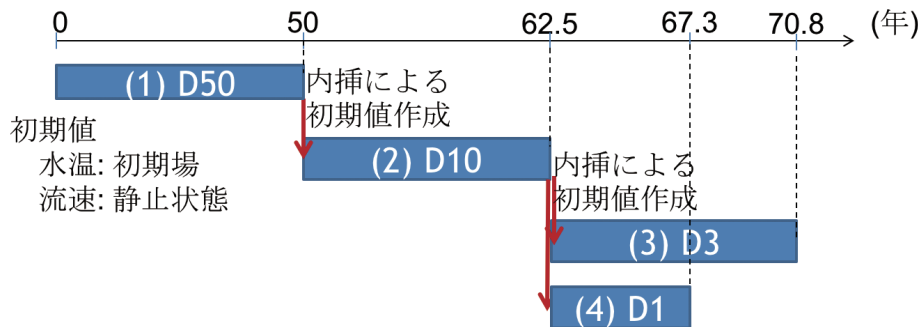


図3 実験の手順。D50, D10, D3, D1はそれぞれ50km, 10km, 3km, 1km解像度の実験を示す。

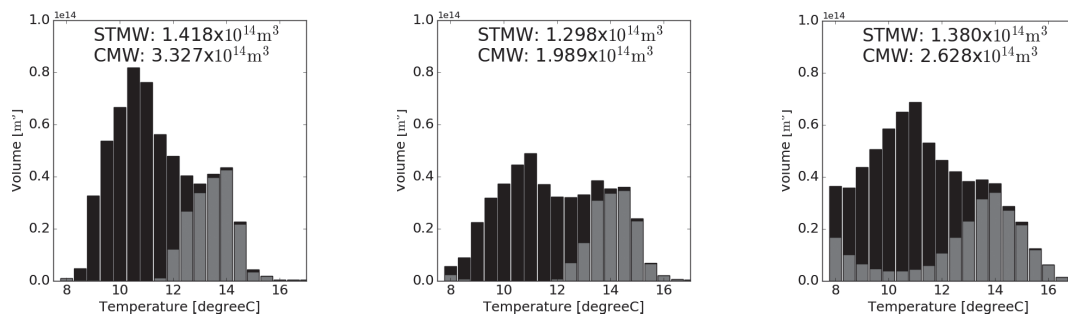


図4 1000日平均場において亜熱帯循環北部(1000km<y<2000km)における低渦位水(1.5 × 10<sup>-10</sup>m<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>以下)の体積の0.5℃の温度帯ごとのヒストグラム。灰色は西半分に存在するもの。左からそれぞれ10km, 3km, 1km解像度の実験結果を示す。

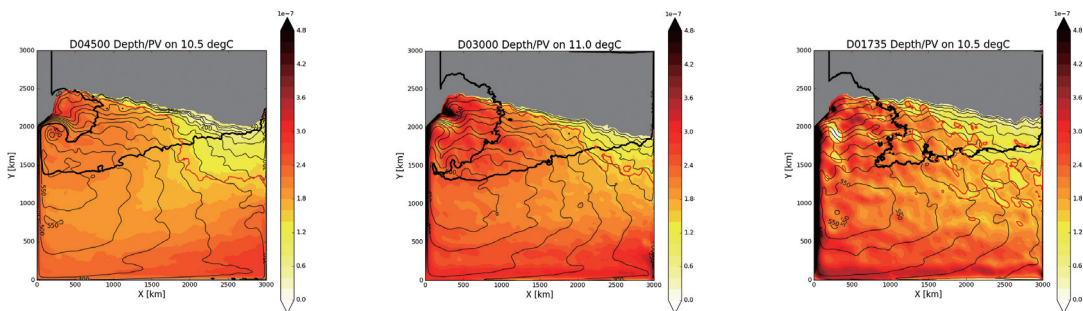


図5 1000日平均場から求めた混合層深フロント(黒太線)と等密度面の深さ(黒等値線)、低渦位水の体積の低温側のピークを示す温度面上の渦位の分布(シェード)。赤太線は低渦位水を定義する際の閾値(1.5 × 10<sup>-10</sup>m<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>)の等値線を示す。左からそれぞれ10km, 3km, 1km解像度の実験結果を示す。

示す。いずれの実験においても、等温度面が海面に露出する線と混合層深フロントの交点を中心に低渦位水が広がっているものの [5]、その西側でも低渦位水が形成された [6]。ただし、その空間分布は解像度によって異なり、特に 1km 解像度ではパッチ状の分布が見られるなど、より粗い解像度の実験には見られない結果が得られた。

## 5. 今後の展開

サブメソスケール現象を解像することができる水平 1km 解像度と、より粗い解像度の実験結果の比較を通して、海洋上層の子午面循環中で重要な役割を果たすモード水の形成に対して、サブメソスケール現象が影響を与えることがわかった。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。なお、本課題は平成 29 年度も継続して行う。

## 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.
- [5] Nishikawa, S., and A. Kubokawa, “Mixed layer depth front and subduction of low potential vorticity water in an idealized ocean GCM.”, *J. Oceanogr.*, **65**, pp.125-134, 2007.
- [6] Xu, L., S. Xie, J. McClean, Q. Liu, and H. Sasaki, “Mesoscale eddy effects on the subduction of North Pacific mode waters.”, *J. Geophys. Res. Oceans*, **119**, doi:10.1002/2014JC009861.

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

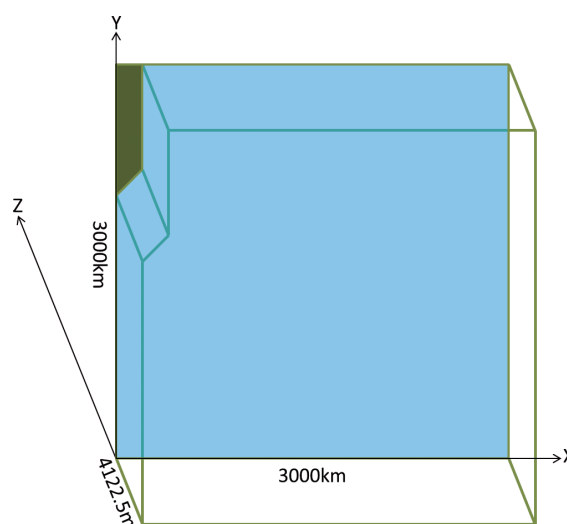


Fig. 1 Schematic view of model basin.

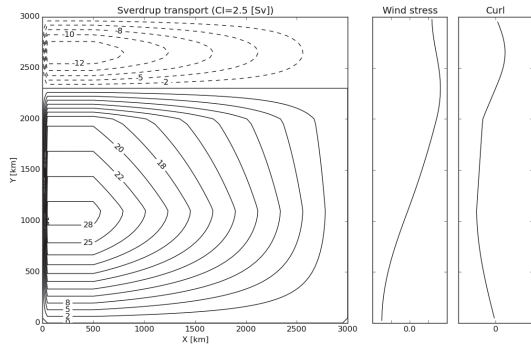


Fig. 2 Meridional distribution of wind stress (center) and its curl (right), and Sverdrup transport (left).

### 3. Results

The numerical experiments were executed as shown in Fig. 3. 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.

Figure 4 shows the volume of the low potential vorticity (PV) water in 1000-day mean field in each 0.5 °C bin. There are two peaks around 11 °C and 14 °C in all experiments. Cooler and hotter peaks correspond to the Central Mode Water (CMW) and Subtropical Mode Water (STMW) in north Pacific. Low PV water on the isothermal surface of cooler peak (CMW; not shown) spreads around the crossing of outcrop line and mixed layer depth front [5], and western side of the point [6]. However, the spatial distribution of the low PV water is different among the experiments, especially in 1km experiments with patchy patterns.

### 4. 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 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.
- [5] Nishikawa, S., and A. Kubokawa, “Mixed layer depth front and subduction of low potential vorticity water in an idealized ocean GCM.”, *J. Oceanogr.*, 65, pp.125-134, 2007.
- [6] Xu, L., S. Xie, J. McClean, Q. Liu, and H. Sasaki, “Mesoscale eddy effects on the subduction of North Pacific mode waters.”, *J. Geophys. Res. Oceans*, 119, doi:10.1002/2014JC009861.

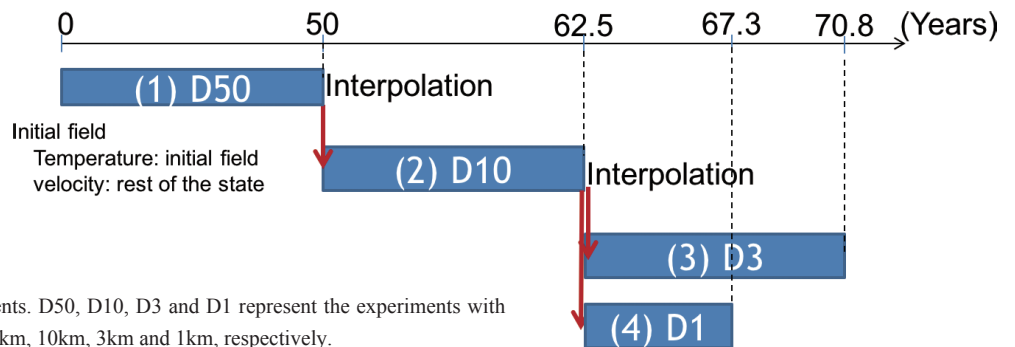


Fig. 3 Procedure of the experiments. D50, D10, D3 and D1 represent the experiments with horizontal resolution of 50km, 10km, 3km and 1km, respectively.

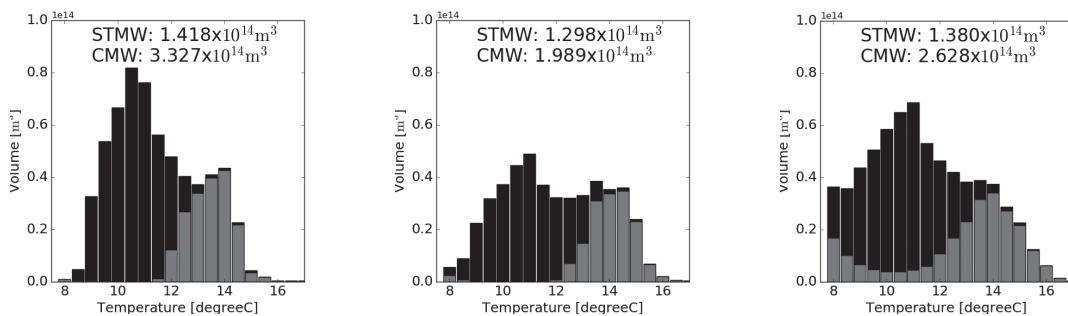


Fig. 4 Volume of the low potential vorticity (below  $1.5 \times 10^{-10} \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) water in northern part of subtropical gyre ( $1000 \text{km} < y < 2000 \text{km}$ ) in 1000-day mean field in each 0.5 °C bin. Grey bars show the volume in the western half of the basin. Results from D10, D3, D1 are shown from left to right.

