

# 東シナ海におけるサブメソスケール乱流混合による 黒潮系水塊の波及促進効果について

## Submesoscale stirring of the Kuroshio in East China Sea

- 上平雄基<sup>1</sup>, 神戸大院工, 神戸市灘区六甲台町 1-1, E-mail: 135t110t@stu.kobe-u.ac.jp  
 内山雄介<sup>2</sup>, 神戸大院工, 神戸市灘区六甲台町 1-1, E-mail: uchiyama@harbor.kobe-u.ac.jp  
 御手洗哲司<sup>3</sup>, 沖縄科学技術大学院大, 沖縄県国頭郡恩納村字谷茶 1919-1, E-mail: satoshi@oist.jp  
 坂上太一郎<sup>4</sup>, 沖縄科学技術大学院大, 沖縄県国頭郡恩納村字谷茶 1919-1, E-mail: taichis@oist.jp  
 Yuki Kamidaira<sup>1</sup>, Kobe University, 1-1 Rokkodai-Cho, Nada-ku, Kobe, Japan  
 Yusuke Uchiyama<sup>2</sup>, Kobe University, 1-1 Rokkodai-Cho, Nada-ku, Kobe, Japan  
 Satoshi Mitarai<sup>3</sup>, OIST, 1919-1 Tancha, Onna-son, Kunigami, Okinawa, Japan  
 Taichiro Sakagami<sup>4</sup>, OIST, 1919-1 Tancha, Onna-son, Kunigami, Okinawa, Japan

In order to preserve biodiversity and marine ecosystem on the coral coasts around Ryukyu Islands in East China Sea, a role played by the adjacent Kuroshio warm current is anticipated to be essential for larval and nutrient transport. For better understanding dynamics and mixing between the Kuroshio and the islands, we develop a detailed oceanic downscaling model with a doubly nested configuration using ROMS at horizontal resolutions down to 1 km, forced by the assimilative JCOPE2 and JMA-GSM/MSM. A model-data comparison is conducted with the field observation and satellite altimetry data to demonstrate a quite close agreement. The model successfully reproduces anti-cyclonic eddies that are significantly retained on the western side of the islands to promote lateral mixing in the area.

### 1. 緒言

黒潮暖流は浮遊幼生、栄養塩等の輸送に大きな役割を果たしているため、琉球諸島周辺海域の生態系保全を考える上ではその波及効果を正確に把握することが重要となる。これに対して Guo ら<sup>(1)</sup>は、本海域を含む東シナ海を対象に POM を用いた 3 段階ネスティング海洋モデリングを実施し、空間解像度の向上に伴って黒潮流路や海洋鉛直構造の再現性が向上することを示した。また、灘岡ら<sup>(2)</sup>は、高解像度（水平約 2 km）の海洋モデリングにより、黒潮と琉球諸島の間海域に発生する黒潮逆流や中規模渦が、黒潮-琉球諸島間の物質・熱輸送現象に少なからぬ影響を与えている可能性を示唆した。

一方、O (10 km) 程度以下のサブメソスケール現象が海洋混合層における平均流、乱流、物質分散などに影響を与えることが最近の研究結果から理解されつつある<sup>(3)</sup>が、本海域の海洋構造に対するサブメソスケール乱流の影響については未解明である。また、この海域では、黒潮が琉球諸島という明確な幾何的境界条件の影響を受け、独特の乱流場が形成される可能性が予見される。そこで本研究では、東シナ海・琉球諸島周辺海域 (Fig. 1) を対象に、領域海洋循環モデル ROMS<sup>(4)</sup>を用いた 2 段階のネスティングにより水平解像度を 1 km まで細密化したダウンスケーリングを行い、黒潮の波及効果を解析し得る海洋モデリングシステムを開発する。

### 2. 解析モデル

本研究では、水平解像度 1/12° (約 10 km) の JCOPE2 再解析データ (1 日平均値) を時空間内挿して初期条件・最外側境界条件とし、ROMS を用いた 1-way offline nesting によって ROMS-L1 (水平解像度 3 km) →ROMS-L2 (水平解像度 1 km) へと順次ダウンスケーリングを行った。各種海面フラックスには COADS の気候値の月平均値を、海表面温度 (SST) と海表面塩分 (SSS) には JCOPE2 の 20 日平均値を用いた。海底地形には水平解像度約 1 km の SRTM30 を用いた。海上風については、基本的に気象庁 GPV-GSM (L1, 日平均値) / MSM (L2, 1 時間値) データを用い、2007 年以前については QuikSCAT-ECMWF ブレンドデータ (L1 のみ, 日平均値) を用いた。L1 領域内の長江など大川川の流量については、Dai ら<sup>(5)</sup>による月平均気候値を与えた。さらに、黒潮の

流路変動パターンを JCOPE2 のものと大局的に整合させるため、JCOPE2 の水温と塩分の 10 日平均値に対して簡易的な 4 次元同化 (緩和強度: 1/20 day<sup>-1</sup>) を領域全体に適用した。ROMS-L2 の解析対象期間は、スピナップ期間を除いた 2011/3/27 から 2012/10/21 とした。

### 3. 解析結果

現地観測データや衛星データとの比較から本モデルの良好な再現性が確認された。また、海表面での無次元相対渦度  $\zeta/f$  (ただし、 $\zeta$ : 相対渦度の鉛直成分,  $f$ : 惑星渦度) の日平均値の分布を比較すると (Fig. 2), いずれのモデルも黒潮に伴い、流軸を中心として西側に正の渦度が、東側に負の渦度が出現している様子が明示されている。さらに、高解像度化によって低解像度モデルでは再現することができなかったサブメソスケール渦が多数出現し、しかも著しく強化されている様子も見てとれる。また、琉球諸島側である黒潮流軸東側に出現する負の渦度が広範囲で発達しており、流軸西側に発達する正の渦度の領域と同程度以

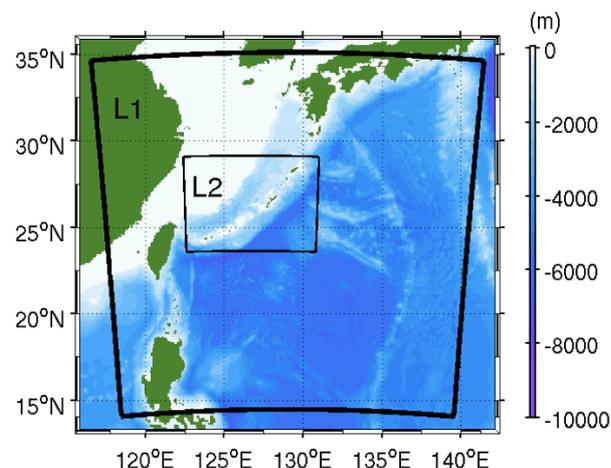


Fig. 1. Bathymetry and domains of the doubly nested models: ROMS-L1 (outer box) and ROMS-L2 (inner box).

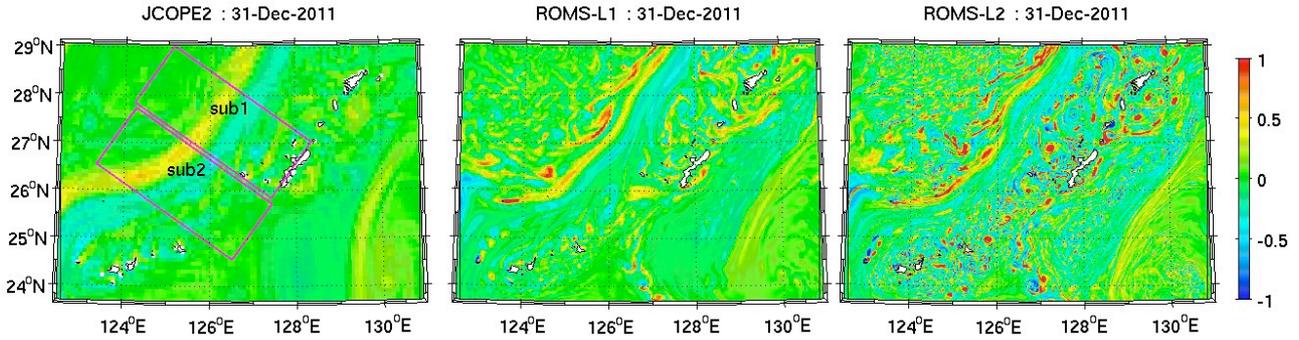


Fig. 2. Surface relative vorticity normalized by the planetary vorticity,  $\zeta/f$  (no dimension) on December 31, 2011, from the 3 models. The boxes in the left panel indicate sub 1 and sub 2 (see the text for detail).

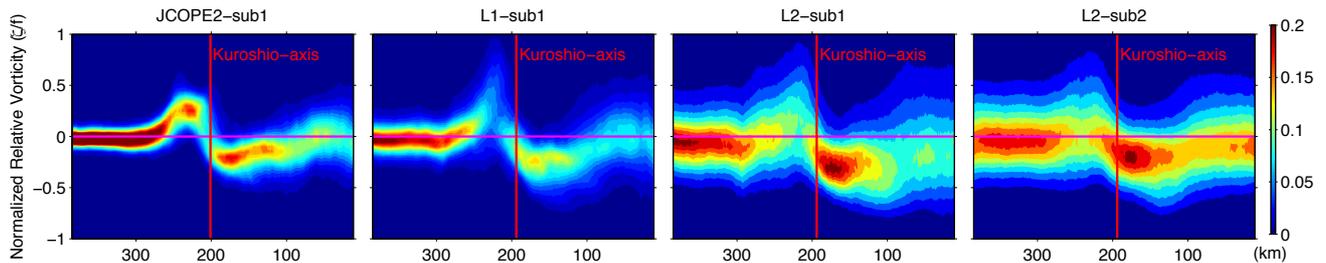


Fig. 3. Probability density functions (PDFs) of normalized relative vorticity in sub 1 from the 3 models and that in sub 2 of ROMS-L2 (right panel) as a function of the distance from the Okinawa Island (in km). Red vertical lines are the approximate location of the Kuroshio axis.

上になっている。この傾向は ROMS-L2 で最も顕著になり、流軸に対して東側の島の有無による差異が確認され、島嶼群近傍での負の渦度強化がより明確に生じている。

この渦度の正負のバイアスを定量的に評価するため、沖縄本島のすぐ西側海域に sub 1, その南側の島がない海域に sub 2 という黒潮流軸を中心とした 2 つの小領域を設定し (Fig. 2 左図内のボックス)、解析期間全体にわたって黒潮流軸方向に渦度をカウントし、流軸横断方向座標に沿った  $\zeta/f$  強度に関する PDF (確率密度関数) を求める。sub 1 領域では解像度の異なる 3 つのモデルによる PDF の比較を行い、さらに ROMS-L2 出力を用いて sub 1 と sub 2 領域間の差異を調べ、島の有無による PDF の比較を行う (Fig. 3)。4 つのケース全てにおいて、流軸の西側では流軸から離れると PDF ピークは  $\zeta/f \rightarrow 0$  に集中するが、流軸東側では流軸から離れても PDF ピークは  $\zeta/f < 0$  に現れ、この海域でより多くの負の渦度が発生していることが分かる。この負のバイアスは高解像度モデルであるほど顕著であり、L2 ではより強い負の渦度が本島近傍にまで出現していることが分かる。L2-sub 1, L2-sub 2 の PDF を比較すると、領域東側に島のない L2-sub 2 にも流軸東側での負のバイアスは見られるものが、L2-sub 1 と比較して PDF ピークは  $\zeta/f \rightarrow \pm 0$  に漸近し、本島近傍での PDF 分散幅も小さい。したがって、本海域で特徴的に見られる負の相対渦度の発生・発達には琉球諸島の地形が関係しており、黒潮流路と沖縄本島に挟まれた海域では負の渦度が維持されやすい機構が存在することが明らかになった。

#### 4. 結言

琉球諸島周辺海域を対象にしたダウンスケーリング海洋モデルを構築し、現地観測データや衛星データとの比較を通じてその高い再現性を確認した。水平解像度 1 km のサブメソスケール渦解像モデル (ROMS-L2) では、黒潮流軸の両側海域においてサブメソスケール乱流の顕著な発達が見られた。表層無次元相対渦度の PDF 解析から、流軸東側海域では琉球諸島による地形性のシアが

関与すると考えられる負の相対渦度が広範囲にわたって発達することを示した。本稿では示さないが、eddy heat flux 解析の結果、このような黒潮-琉球諸島間海域に発達する負の渦度によって強い乱流熱拡散が惹起され、琉球諸島への黒潮系暖水の波及が促進されることを見出した。

#### 謝辞

本研究は科学研究費基盤研究 C (24560622) の援助を受けた。沖縄科学技術大学院大学の仲田尚平氏には気象庁観測データ整理に関してご助力いただいた。ここに記して深甚なる謝意を表す。

#### 参考文献

- (1) Guo, X., H. Hukuda, Y. Miyazawa and T. Yamagata (2003): A Triply Nested Ocean Model for Simulating the Kuroshio --- Roles of Horizontal Resolution on JEBAR, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 33, pp. 146-169.
- (2) 灘岡和夫, 鈴木庸彦, 西本拓馬, 田村仁, 宮澤泰正, 安田仁奈 (2006): 広域沿岸生態系ネットワーク解明にむけての琉球列島周辺の海水流動と浮遊幼生輸送解析, *海岸工学論文集*, Vol.53, pp. 1151-1155.
- (3) 内山雄介, 石井翔大, 宮澤泰正 (2012): JCOPE2-ROMS 多段ネスティングによる黒潮流域でのダウンスケーリング効果の検証, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, Vol.68, No. 2, pp. I\_436-I\_440.
- (4) Miyazawa, Y., R. Zhang, X. Guo, H. Tamura, D. Ambe, J.-S. Lee, A. Okuno, H. Yoshinari, T. Setou and K. Komatsu (2009): Water Mass Variability in the Western North Pacific Detected in 15-Year Eddy Resolving Ocean Reanalysis, *J. Oceanogr.*, Vol. 65, pp. 737-756.
- (5) Dai, A., T. Qian, K. E. Trenberth, and J. D. Milliman (2009): Changes in continental freshwater discharge from 1948-2004, *J. Climate*, Vol. 22, pp. 2773-2791.