

# 琉球諸島周辺海域におけるeddy heat fluxを用いたサブメソスケール乱流混合強化メカニズムの解析

上平 雄基<sup>1</sup>・内山 雄介<sup>2</sup>・御手洗 哲司<sup>3</sup>・仲田 尚平<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター 環境動態研究グループ  
(〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4)

E-mail: kamidaira.yuki@jaea.go.jp

<sup>2</sup>正会員 神戸大学准教授 大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

<sup>3</sup>沖縄科学技術大学院大学准教授 海洋生態物理学ユニット (〒904-0495 沖縄県国頭郡恩納村字谷茶1919-1)

<sup>4</sup>沖縄科学技術大学院大学 海洋生態物理学ユニット (〒904-0495 沖縄県国頭郡恩納村字谷茶1919-1)

沖縄本島を含む琉球諸島周辺海域を対象とした2段階ネストJCOPE2-ROMSダウンスケーリング海洋モデルを用いて、本海域特有のサブメソスケール(SMS)乱流の発達とそれに伴う3次元的な物質混合過程を評価するべく、季節変動成分を除去した渦成分に対してeddy heat flux (EHF)解析を行った。EHFに対してHelmholtz分解を適用することで、EHFを黒潮流軸成分と直交成分とに分解し、その3次元構造について検討した。その結果、黒潮流軸に対して東シナ海側では黒潮と陸棚斜面による地形性シアの影響によって低気圧性のSMS渦が表層および水深500 m程度の亜表層に発達すること、反対に沖縄本島側では主に黒潮と琉球海嶺地形による地形性シアの影響によって混合層周辺に高気圧性のSMS渦が発生すること、およびその両者によって黒潮横断方向の渦熱輸送が3次元的に促進されていることを見出した。

**Key Words :** ROMS, Kuroshio, East China Sea, oceanic turbulent mixing, submesoscale eddies

## 1. はじめに

サンゴ礁は、観光業や漁業などを通じて日本だけで年約数千億円規模の経済効果をもたらしていると試算されている。特に、沖縄本島を含む琉球諸島周辺海域(図-1)には豊かなサンゴ礁生態系が形成されており、世界有数の生物多様性ホットスポットとして知られ、地球環境保全の観点からもその保護が強く望まれている。西岸境界流である黒潮は、本海域を含む東シナ海の琉球諸島西岸沖約200 kmの陸棚斜面に沿って北東向きに流れている。既往の研究<sup>1)</sup>によると、黒潮流路と琉球諸島間の海域では黒潮逆流や中規模渦がしばしば生じ、それに伴う移流効果によって黒潮暖流波及を強く受けることがある。したがって、サンゴ浮遊幼生や栄養塩などの輸送、生態系ネットワークの形成に対して、黒潮の波及効果を正確に把握し、定量化することが重要である。一方で、本海域の陸棚斜面上における黒潮流路変動は、南西部の台湾沖などと比較して小さいことが知られており(例えば Qiuら<sup>2)</sup>)、琉球島嶼群への黒潮の蛇行による接岸に伴う直接的な波及は起こりにくい。そのため、中規模渦やサブメソスケール渦に伴う水平混合作用を正確に理解する

ことが波及効果の定量的評価に対して重要となる。

最近の研究によってO(10 km)程度以下のサブメソスケール現象が海洋表層の平均流、乱流、物質分散などを与える影響について理解が深まりつつあるが(例えば、内山ら<sup>3)</sup>)、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な部分が多い。これに対

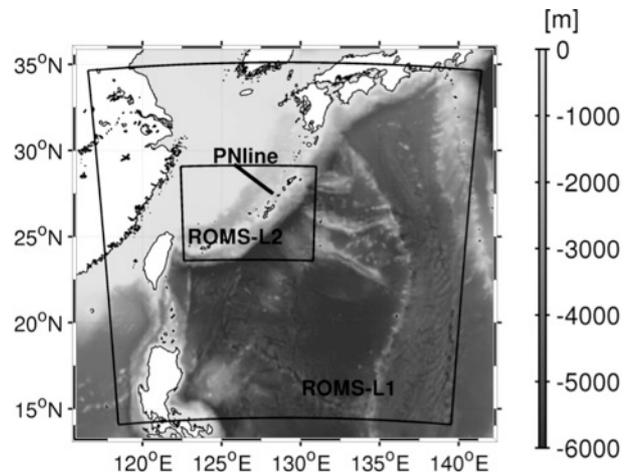


図-1 2段階ネスティングROMSモデル領域(L1: 水平解像度約3km, L2: 同1km)および気象庁PNライン。

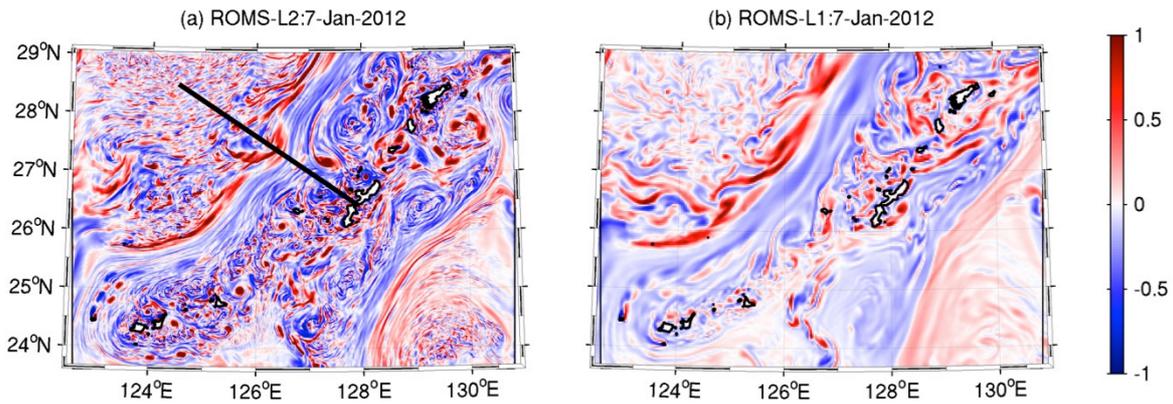


図-2 海表面における無次元相対渦度 ( $\zeta/f$ ) の日平均値 (2012年1月7日) . (a)ROMS-L2, (b)ROMS-L1による. 左図内の黒実線は図-8~図-11で用いる検査線を表す.

表-1 ROMS-L2 琉球諸島海域モデルの計算条件.

計算期間	2010/12/27-2013/7/13
格子数	832×610 (×鉛直32層)
水平空間解像度	1 km
海上風応力	JMA GPV-MSM (1時間値)
その他フラックス	COADS05 (月平均気候値)
海底地形	SRTM30 PLUS
SST・SSS	JCOPE2 再解析値 (20日平均)
側方境界条件	ROMS-L1 再解析値 (日平均値)

して著者ら<sup>4)</sup>(以下前報と呼称)は、本海域を対象として、領域海洋循環モデルROMSをベースに3次元変分法データ同化を用いたJCOPE2海洋再解析<sup>5)</sup>を初期条件、最外側境界条件とした、2段階ネスティングによるサブメソスケール渦解像JCOPE2-ROMSダウンスケーリング海洋モデリングを行った。1-way offline ネスティングを用いてモデルの水平空間解像度を約10 km (JCOPE2) → 3 km (ROMS-L1) → 1 km (ROMS-L2)と細密化させることにより、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の発生・発達過程を表現することに成功した。さらに、黒潮流路と琉球諸島西海岸の間の海洋表層では、東シナ海陸棚斜面と琉球海嶺間の狭窄な水路状地形の拘束によって地形性シアが強化されて負のサブメソスケール渦が卓越し、それに伴って黒潮-沖縄本島間で活発な海水交換が生じ、黒潮の波及が促進されている可能性を示した(図-2)。しかしながら、その詳細なメカニズムや、海洋表層下を含む3次元的な海洋構造については十分に解析されていなかった。

そこで本研究では、前報で開発した2段階ネスティング海洋モデルを用いて、サブメソスケール乱流の発達とそれに伴う3次元的な物質混合が本海域の海洋環境に及ぼす影響を定量的に評価することを最終的な目的として、主に eddy heat flux (EHF) を用いた詳細な乱流統計解析を行う。特に、EHF ベクトルに Helmholtz 分解を適用することにより、黒潮流路方向成分(ベクトル回転成分)と直交成分(ベクトル発散成分)を分離し、黒潮波及効果の鉛直

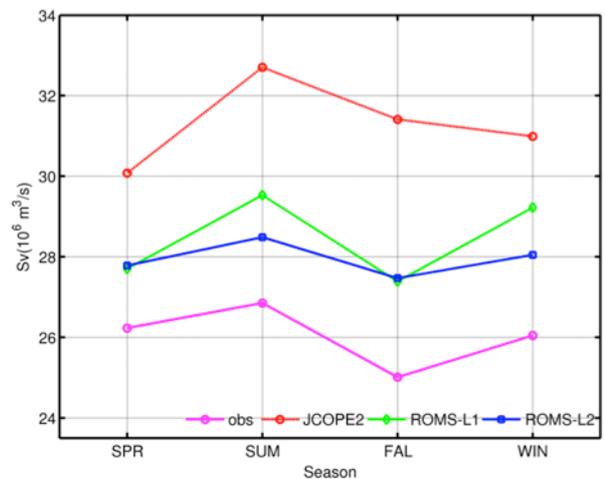


図-3 気象庁PNラインにおける水温塩分観測値から求めた地衡流量(マゼンタ), JCOPE2(赤), ROMS-L1(緑), ROMS-L2(青)による通過流量の季節平均気候値.

断面内構造について精緻な評価を行う。

## 2. 解析モデル

前報<sup>4)</sup>と同様に、日本南西の東シナ海および北太平洋の一部を内包する中解像度モデルROMS-L1(水平解像度3 km)では、水平解像度1/12°(約10 km)のJCOPE2再解析データ<sup>5)</sup>(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、琉球諸島周辺海域を対象とした高解像度モデルROMS-L2(水平解像度1 km)では、ROMS-L1出力の日平均値を時空間内挿して境界条件として与え、1-way offline nestingによって順次ダウンスケーリングを行う。表-1にROMS-L2(琉球諸島海域モデル)の計算条件を示す。ダウンスケーリングモデルの再現性については、前報<sup>4)</sup>において表層運動エネルギー時間変動、気象庁PNライン(図-1黒線)鉛直断面内平均密度分布、平均海表面流速、海面高度偏差の分散などについて詳細な評価を行い、いずれも観測値との良好な一致を

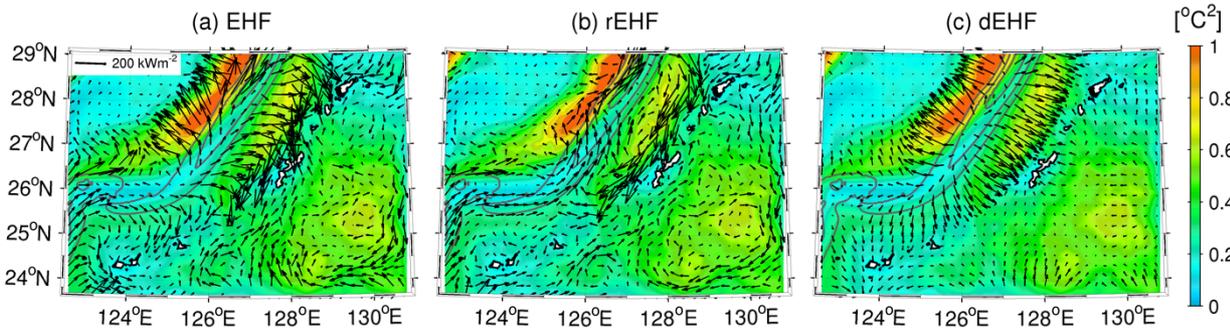


図-4 ROMS-L2による海洋表層(水深2 m)におけるEHF各成分(ベクトル表示)。カラーは温度分散( $\overline{T'^2}$ )の空間分布。灰コンターは0.5m/sを超える平均流速の分布(間隔:0.5m/s, おおよそ黒潮主流域に対応)。

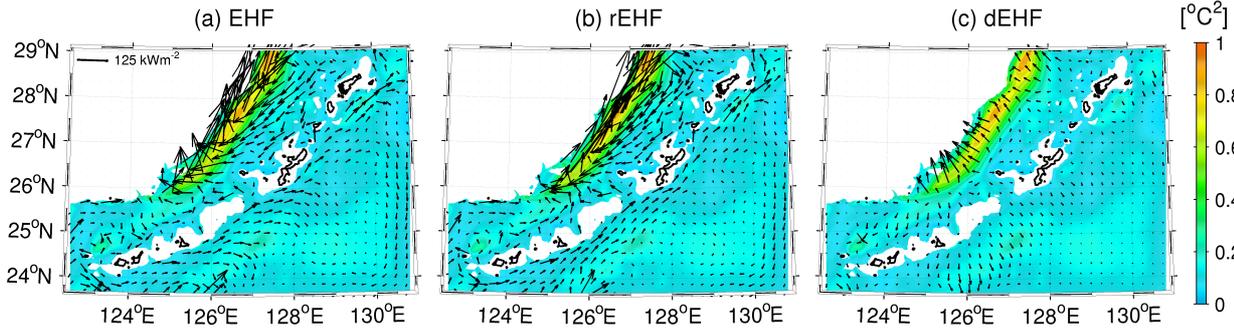


図-5 ROMS-L2による水深400 mにおけるEHF各成分(ベクトル表示)。カラーは温度分散( $\overline{T'^2}$ )の空間分布。白抜き部分は海底地形。

確認している。本報では、PNラインにおける鉛直断面通過流量(季節平均気候値)を比較した結果を紹介する(図-3)。観測流量は、各季節に対する水温塩分観測値から気候値を求め、それらを用いて等圧面の傾斜を算出して推算した地衡流により評価した。したがって、モデル計算結果は非地衡流成分を含むため観測地衡流量よりも全体的にやや大きな値を示しているが、夏に増加、秋に減少するなどの季節変動特性をよく捉えており、オーダー的にも矛盾はなく、観測結果と良好に一致しているといえる。なお、データ同化を含むけれども低解像度であるJCOPE2よりも、データ同化は行っていないが高解像度であるROMS-L2の方が観測値に近い値を示している。これは、ROMS-L2では流下方向慣性力がサブメソスケール混合によって散逸し、適切な流量調整が行われていることを示唆するものと考えられる。

### 3. eddy heat flux による乱流混合評価

本海域で発達するサブメソスケール渦の有する強い混合作用による黒潮系暖水塊の波及促進効果を定量的に見積もるために、熱をトレーサーとして水平乱流混合を評価することを試みる。前報では、海洋表層での水平乱流混合について、季節変動成分を除去した高周波成分を渦成分と定義し、各変量をReynolds分解して流速と水温の相関項を求め、この乱流(渦)成分によるReynolds拡散フラックスを渦熱輸送フラックス(eddy heat flux, 以下

EHF)と定義し、黒潮系暖水塊の沖縄本島西海岸への波及促進効果を評価した。EHFは次式のように表される(例えば、Marchesielloら<sup>6)</sup>。

$$F = (\rho_0 C_p \overline{u'T'}, \rho_0 C_p \overline{v'T'}) \quad (1)$$

ここに、 $\rho_0$ : 基準密度(1027.5 kg/m<sup>3</sup>)、 $C_p$ : 比熱容量(4000 J/kg°C)、 $T$ : 温度、 $(u, v)$ : 水平流速、上付きバーはアンサンブル平均操作(時間平均操作)、プライムを付した変数は季節変動成分を除去した渦成分を表す。本研究ではさらに、EHFベクトルに対してHelmholtz分解を適用する(例えば、Aokiら<sup>7)</sup>)。kを鉛直単位ベクトル、 $\psi$ を流れ関数、 $\phi$ を速度ポテンシャルとすれば、

$$F = k \times \psi + \nabla \phi = rEHF + dEHF \quad (2)$$

となる。右辺第一項はEHFベクトル回転成分(rEHFと呼称)、第二項はEHFベクトル発散成分(dEHFと呼称)である。(2)式の発散をとれば、直ちに以下のPoisson方程式が得られる。

$$\nabla^2 \phi = \nabla \cdot F \quad (3)$$

境界条件を $\nabla \phi \cdot \mathbf{n} = 0$ として(3)を解けば、各成分を数値的に求めることができる。ただし、 $\mathbf{n}$ は水平境界に直交する単位ベクトルである。

図-4から図-7にROMS-L2, ROMS-L1による、水深2 mおよび400 mにおけるEHF各成分(ベクトル表示)と温度分散(カラー)を示す。ROMS-L2と比較すると、中解像度モデルのROMS-L1では温度分散およびEHFの

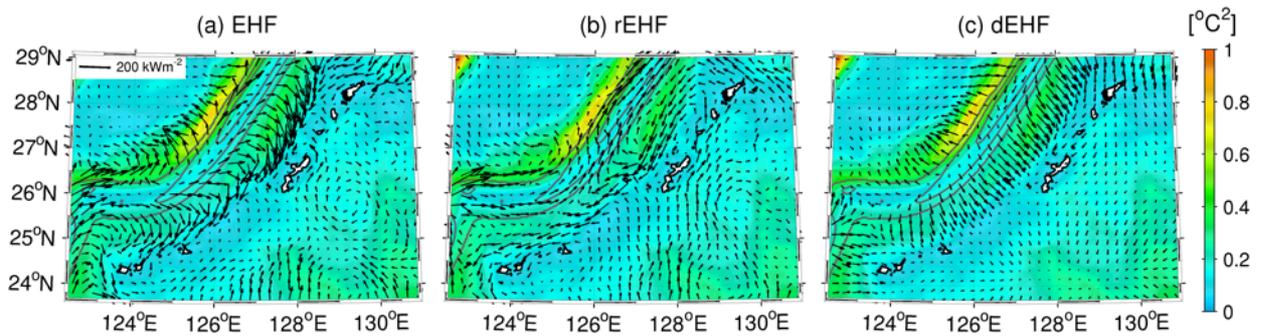


図-6 図-4と同じ。ただし、ROMS-L1による結果。

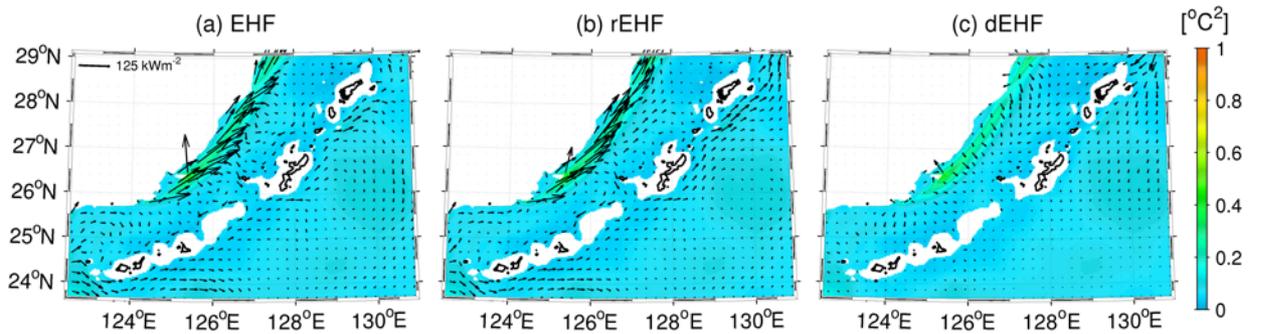


図-7 図-5と同じ。ただし、ROMS-L1による結果。

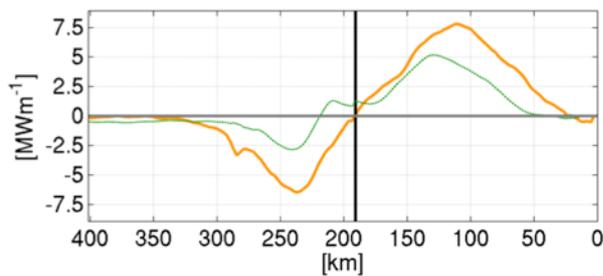


図-8 検査線(図-2(a)黒線)鉛直断面の混合層内で鉛直積分したdEHFの検査線横断方向成分の空間分布。南東方向(沖縄本島方向)への熱輸送を正とした。橙線:ROMS-L2, 緑線:ROMS-L1, 黒太線:ROMS-L2での平均的な流軸の位置, 横軸:沖縄本島からの距離(km)。

いずれの成分も過小評価していることが分かる。EHF回転成分であるrEHFは温位分散のコンターに沿う方向の輸送成分を表しており、表層では主に黒潮主流方向への熱輸送が卓越していることが示されている。また、沖縄本島西側沿岸付近では、強い南西方向の熱輸送が見られる。この熱輸送は、本海域を対象とした先行研究<sup>1)</sup>による観測結果、数値シミュレーション結果でも確認されているように、黒潮逆流の影響によるものであると考えられる。また、水深400mの垂表層ではrEHFとEHFの分布がよく対応していることから、この水深ではrEHFが乱流による熱輸送の主要な成分であることがわかる。

一方、発散成分dEHFベクトルは水温の分散のコンターに対して概ね直交している。表層での輸送方向は黒潮主流域を境に反転しており、黒潮系暖水が東シナ海陸棚

方向および琉球諸島方向へ輸送されていることを表している。沖縄本島から黒潮流軸を横断するように南南西方向に検査線を定義し(図-2(a)黒線)、その鉛直断面における混合層内で鉛直積分されたdEHFを調べた(図-8)。dEHF絶対値は黒潮流軸(黒太線)に対して西側よりも東側で高い値を示すことから、海洋表層混合層内で発達する負のサブメソスケール渦によって黒潮から島嶼群方向へ向かう強い熱輸送が励起されている様子がうかがえる。また、サブメソスケール解像度モデルであるROMS-L2では、流軸の東西両側でROMS-L1よりも大きなdEHF値を示しており、高解像度化に伴って黒潮波及効果が増大することが分かる。また、ROMS-L2による水深400mのdEHF(図-5(c))からは、表層(図-4(c))で見られる黒潮から琉球諸島方向への強い熱輸送は不明瞭となるが、東シナ海方向への熱輸送が存在することが確認される。以上のことから、EHF各成分にはモデル解像度による明瞭な違いが現れ、特にdEHFには強い水深依存性があることが分かる。

#### 4. 沖縄本島-東シナ海検査断面内の鉛直構造

次に、沖縄本島検査(図-2(a)黒線)断面内の鉛直構造を比較し、EHFの水深依存性をより詳細に評価する。ROMS-L2による断面内の水温・流動構造(図-9)を見ると、平均流速分布から、黒潮は陸棚斜面に寄りかかるといった断面構造を形成し、水深500m付近まで比較的

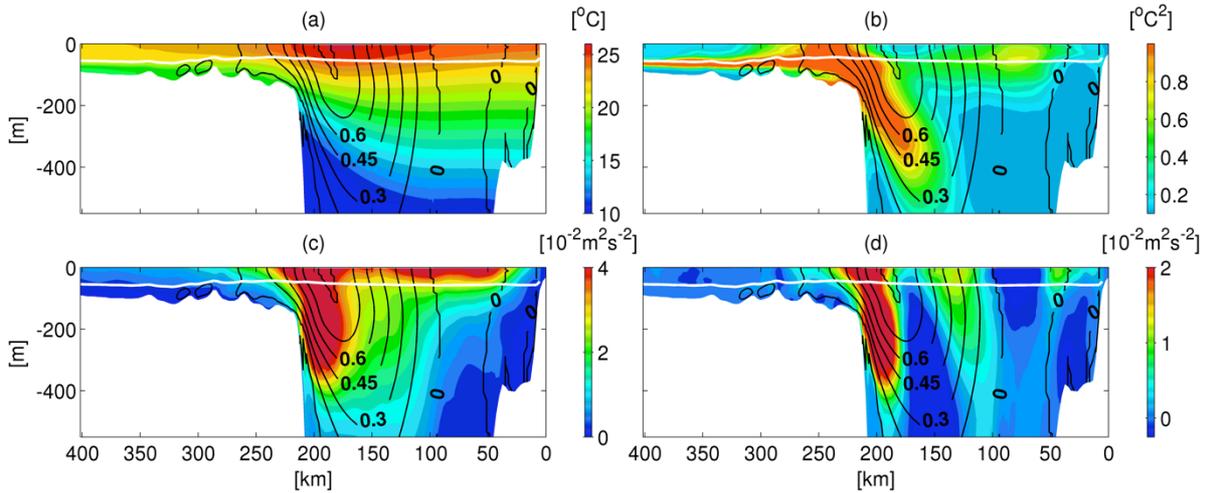


図-9 ROMS-L2による検査線(図-2(a)黒線)断面における(a)平均水温, (b)水温分散, (c)EKE, (d)水平レイノルズ応力  $\overline{u'v'}$  の分布. コンターは平均流速の検査線直交成分であり, 黒潮流路位置を表す. 白線は平均混合層深さ, 横軸は沖縄本島からの距離 (km) .

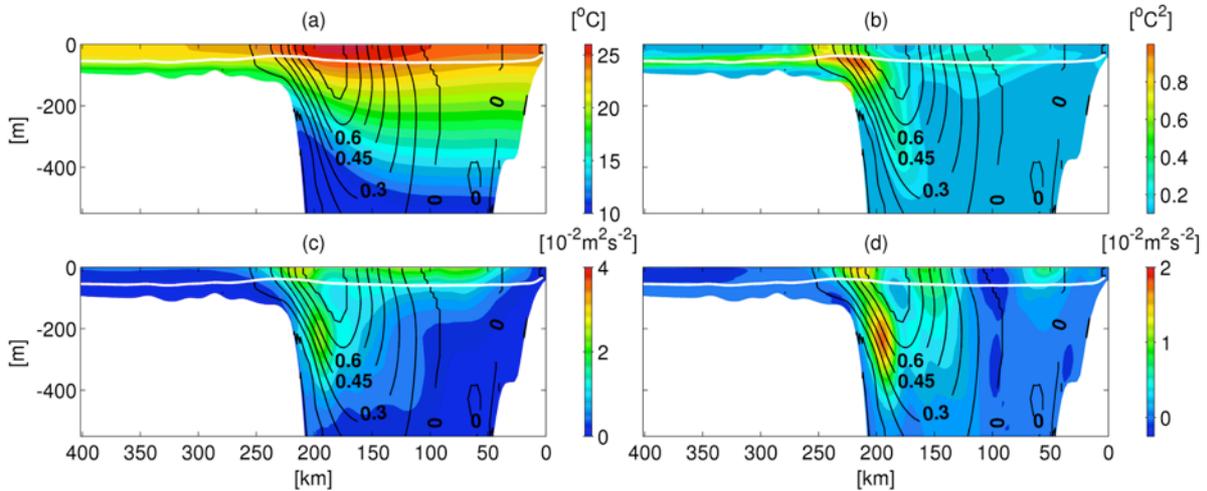


図-10 図-9と同じ. ただし, ROMS-L1による結果.

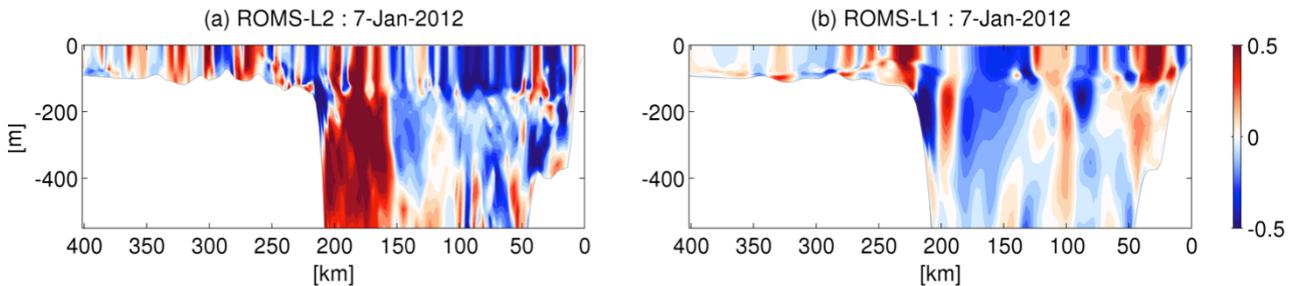


図-11 検査断面内における無次元相対渦度  $(\nabla_H \times \mathbf{u}/f)$  の日平均値 (2012/1/7) . (a)ROMS-L2, (b)ROMS-L1による.

流速が大きく, 表層下の深くまで黒潮の影響が及んでいる. 平均水温(図-9(a))からは, 黒潮流路構造に対応する温度風平衡によって傾斜水温躍層が形成され, 沖縄本島から東シナ海に向かって躍層水深および混合層深さは浅くなり, 成層強度が強くなる事が分かる. 水温分散(図-9(b))は混合層底部から表層にかけて全体的に高く, 黒潮流路から陸棚斜面に沿って沖縄本島方向の垂表層へ向かって発達する「舌状構造」が形成されている. これらの結果と dEHF の水平分布(図-4, 図-5)から,

黒潮と琉球諸島の間では, 表層付近の広範な領域と, 陸棚斜面周辺の水深400m付近までの垂表層での熱輸送が卓越することが分かる. また, 渦運動エネルギー(EKE, 図-9(c))分布を見ると, 混合層内部の値が大きく, 特に表層では発達するサブメソスケール渦によって陸棚縁から沖縄本島近傍まで広く EKE が大きくなっている. 混合層以深では水温分散分布と対応して陸棚斜面近傍で高い値を示している. 水平レイノルズ応力(図-9(d))は黒潮流路の両側で大きく, 特に流路西側の陸棚縁近傍

で発達し、沖縄本島付近で再度上昇している。水温分散の舌状構造が見られた陸棚斜面近傍では EKE, レイノルズ応力がともに特に大きく、斜面地形による地形性シアの関与が強く示唆される。また、無次元渦度鉛直成分の断面内分布(図-11 (a))からも、表層付近では沖縄本島側での負の渦度が卓越すること、陸棚斜面近傍の表層および亜表層では、水深 500m 付近まで正の渦度が発達することが確認される。

一方、ROMS-L1 の結果(図-10, 図-11 (b))を見ると、平均流速、平均水温構造は ROMS-L2 の結果に類似した断面構造が形成されているが、水温分散、EKE、水平レイノルズ応力、渦度はいずれも L2 と比べて過小評価している。特に L2 において顕著であった陸棚斜面上に発達する舌状構造や、それに対応する正の渦度は不明瞭となる。以上の解析結果から、黒潮流軸の西側(東シナ海側)では黒潮と陸棚斜面による地形性シアの影響によって低気圧性のサブメソスケール渦が、黒潮の東側(沖縄本島側)では黒潮と琉球海嶺地形および島嶼群による地形性シアの影響により高気圧性のサブメソスケール渦が発達して維持され、表層および亜表層における3次元的な熱輸送を促進していることが明らかとなった。

## 5. おわりに

本研究では、琉球諸島周辺海域を対象にしたサブメソスケール渦解像海洋モデルを用いて、主に eddy heat flux を用いた詳細な乱流統計解析を行った。その結果、水平解像度 1 km の高解像度モデル ROMS-L2 では、黒潮流軸の西側においては黒潮と陸棚斜面による地形性シアの影響による低気圧性のサブメソスケール渦が、黒潮の東側においては黒潮と琉球海嶺の地形と島嶼群による地形

性シアの影響による高気圧性のサブメソスケール渦が発生し、これらが黒潮由来の暖水の黒潮横断方向への輸送を促進していることが分かった。これらの結果は、本海域の海洋環境や、琉球諸島への黒潮系暖水の波及メカニズムに関して重要な知見を与えるものである。

謝辞：本研究は科学研究費基盤研究C(24560622)の援助を受けた。

## 参考文献

- 1) 灘岡和夫, 鈴木庸彦, 西本拓馬, 田村 仁, 宮澤泰正, 安田仁奈: 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, 2006.
- 2) Qiu, B., T. Toda and N. Imasato: On Kuroshio front fluctuations in the East China Sea using satellite and in situ observation data. *J. Geophys. Res.*, Vol. 95 (C10), pp.18191-18204, 1990.
- 3) 内山雄介, 石井翔大, 宮澤泰正: 黒潮続流フロント域におけるサブメソスケール乱流の発生機構と混合効果, 海岸工学論文集, Vol.69, No.2, I\_456-I\_460, 2013.
- 4) 内山雄介, 上平雄基, 御手洗哲司, 坂上太一郎: 琉球諸島周辺海域におけるサブメソスケール乱流混合による黒潮波及効果に関する研究, 海岸工学論文集, Vol.69, No.2, I\_471-I\_475, 2013.
- 5) Miyazawa, Y. and Coauthors: Water Mass Variability in the Western North Pacific Detected in 15-Year Eddy Resolving Ocean Reanalysis, *J. Oceanogr.*, Vol. 65, pp. 737-75, 2009.
- 6) Marchesiello, P., J. C. McWilliams and A. F. Shchepetkin: Equilibrium Structure and Dynamics of the California Current System, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 33, pp. 753-783, 2003.
- 7) Aoki, K., S. Minobe, Y. Tanimoto and Y. Sasai: Southward Eddy Heat Transport Occurring along Southern Flanks of the Kuroshio Extension and the Gulf Stream in a 1/10° Global Ocean General Circulation Model, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 43, pp. 1899-1910, 2013.

(2015.3.18 受付)

## AN EDDY HEAT FLUX ANALYSIS ON ENHANCEMENT OF SUBMESOSCALE MIXING AROUND THE RYUKYU ISLANDS

Yuki KAMIDAIRA, Yusuke UCHIYAMA, Satoshi MITARAI and Shohei NAKADA

A synoptic, regional downscaling experiment of the Kuroshio off the Ryukyu Islands, Japan, forced by the JCOPE2 and GPV-MSM with a horizontal resolution of 1 km exhibits the evident predominance of submesoscale anticyclonic eddies over cyclones in the narrow strip between the Kuroshio and the islands (Uchiyama *et al.*, 2013). In order to investigate submesoscale dynamics and associated lateral mixing around the Ryukyu Islands, we conduct an eddy heat flux (EHF) analysis on eddying currents. We specifically focus on the divergent component of the EHF (dEHF) that is responsible for the eddy heat transport normal to the Kuroshio. We show that the rotational EHF (rEHF) vectors follow the temperature variance contours while the dEHF properly measures the contribution of the normal component. The diagnostic EHF analysis suggests that these lateral eddy heat transport occurring asymmetrically relative to the Kuroshio axis is associated with submesoscale eddies due to the topographic shear.