



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

内山, 雄介

上平, 雄基

御手洗, 哲司

坂上, 太一郎

(Citation)

土木学会論文集B2(海岸工学), 69(2):I_471-I_475

(Issue Date)

2013

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2013 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90002934>



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

Effect of the Kuroshio due to submesoscale anticyclonic eddies and the stirring around Ryukyu Islands

内山雄介¹・上平雄基²・御手洗哲司³・坂上太一郎⁴

Yusuke UCHIYAMA, Yuki KAMIDAIRA, Satoshi MITARAI and Taichiro SAKAGAMI

For preserving biodiversity and marine ecosystem on the coral coasts around Ryukyu Islands, a role played by the adjacent Kuroshio warm current is anticipated to be essential for larval and nutrient transport. In order to better understand dynamics and mixing between the Kuroshio and the islands, we develop a detailed oceanic downscaling model in a doubly nested configuration using ROMS at horizontal resolutions down to 1km, 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. According to a diagnostic eddy heat flux analysis, the dominance of the negative vorticity is substantial in emergence of submesoscale anticyclonic eddies and the associated heat transport from the Kuroshio.

1. はじめに

沖縄本島を含む琉球諸島周辺海域では豊かなサンゴ礁生態系が形成されており、当該海域のみならず地球環境保全の観点からその保護が強く望まれている。本海域は琉球諸島西岸沖約200 kmの東シナ海大陸棚斜面に沿って北上する黒潮暖流の影響を強く受けることが知られており（例えば、灘岡ら、2006），サンゴ浮遊幼生や栄養塩等の輸送や、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なポイントとなる。これに対してGuoら（2003）は、本海域を含む東シナ海を対象にPOMを用いた3段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（2006）は高解像度（水平約2 km）の海洋モデリングにより、黒潮と琉球諸島の中間海域に発生する黒潮反流や中規模渦が、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が（例えば、内山ら、2012），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、この海域は、當時安定流路を取る黒潮の東側に島嶼

群が位置するという点で非常にユニークである。すなわち、琉球諸島という明確な幾何的境界条件の影響を受けて独特の乱流場が形成される可能性が予見される。したがって、本海域を対象とした黒潮およびサブメソスケール現象を同時に考慮した精緻な海洋モデリングを行い、観測データ等と相互補完しながら海域の海洋構造に対する理解を深化させることが必要である。

そこで本研究では、琉球諸島周辺海域（図-1）を対象に、3次元変分データ同化を組み込んだ日本近海海況再解析・予報システム JCOPE2 (Miyazawa *et al.*, 2009) を最外側境界条件に用い、領域海洋循環モデルROMSを用いた2段階のネスティングにより水平解像度を約10 km \rightarrow 3 km \rightarrow 1 kmと順次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サブメソスケール渦解像海洋モデリングシステムを開発する。次いで、モデル出力と現地観測・衛星データとの比較を行い、黒潮流

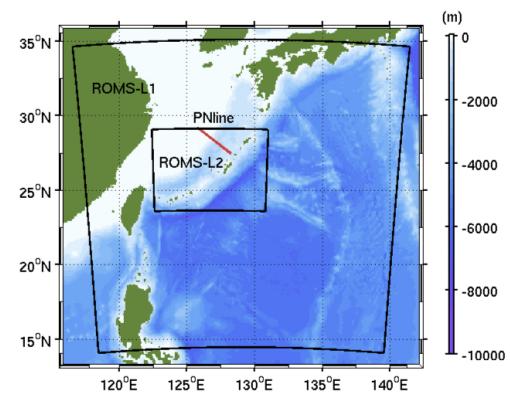


図-1 ROMSを用いた2段階ネスティングモデル領域（L1：水平解像度約3 km, L2：同1 km）および気象庁PNライン（赤実線）。

1 正会員 博(工) 神戸大学准教授 大学院工学研究科市民工学専攻
2 学生会員 学(工) 神戸大学院工学研究科市民工学専攻
3 Ph.D 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
4 M.Sc. 沖縄科学技術大学院大学 海洋生態物理学ユニット

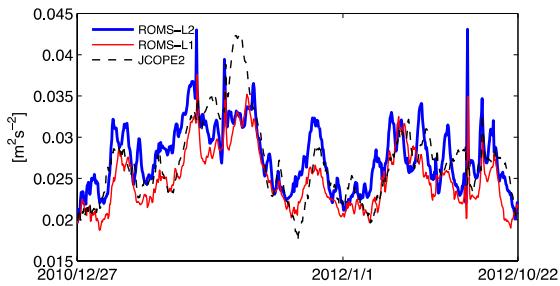


図-2 JCOPE2, ROMS-L1, ROMS-L2による, 海洋表層($z > -400$ m)で体積平均した運動エネルギー(KE)の時系列.

路, 運動エネルギー, 黒潮流路上の鉛直断内の密度構造などに関する再現性を評価する. さらに, 琉球諸島周辺海域におけるサブメソスケール乱流の構造について, 渦度および乱流熱フラックスに関する解析を行い, 黒潮流系水塊の波及効果を定量的に評価することを目的とする.

2. 解析モデル

本研究では, 水平解像度 $1/12^\circ$ (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) \rightarrow 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. なお, 手法の詳細と妥当性については内山ら (2012) を参照されたい. ROMS-L1およびL2では, 海底地形には水平解像度約1 kmのSRTM30, 各種海面フラックスにはCOADSの気候値の月平均値, 海表面温度(SST), 海表面塩分(SSS)にはJCOPE2の20日平均値をそれぞれ用いた. L1における海上風については, 2005/1/1～2007/12/31まではQuikSCAT-ECMWFブレンドデータの日平均値を, 2008/1/1以降は気象庁GPV-GSMデータの日平均値を与えた. L1領域内の長江など大河川の流量については, Daiら (2009) による月平均気候値を与えた. さらに, 黒潮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の塩分と水温の10日平均値に対して簡易的な4次元同化(TS-nudging, nudging strength = 1/20 day⁻¹; 内山ら, 2012参考)を領域全体に適用した. ROMS-L2では河川は考慮せず, 海上風については全計算期間で気象庁GPV-MSMの一時間値を与え, TS-nudgingなどの一切の制御を加えない純粋なforwardモデリングを実施した. ROMS-L2の計算期間は2010/12/27から2012/10/21まであり, スピンナップ期間を除いた2011/3/27から2012/10/21を解析対象期間とした.

3. 再現性の確認

ダウンスケーリングモデルの精度を確認するため, 黒潮流の影響を強く受ける水深400 m以浅の海洋表層で体積

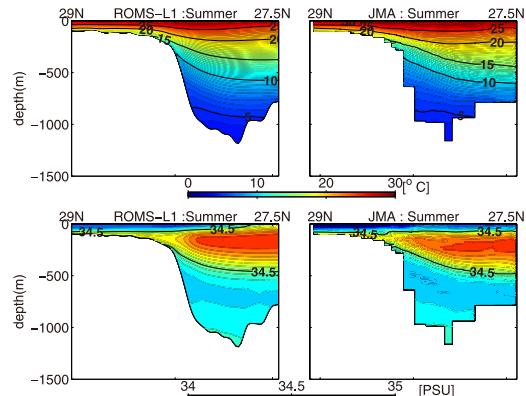


図-3 気象庁PNライン鉛直断面内における(上)水温および(下)塩分. (左) モデル計算値(ROMS-L1), (右) 気象庁による観測値(2005～2009年夏期の平均値).

平均した運動エネルギー(KE)の時系列を調べる(図-2). 3つのモデルによるKEの季節変動パターンは酷似しているが, ROMS-L2のKEはJCOPE2, ROMS-L1よりもやや大きな値を示しており, 各モデル間でメソスケール現象の再現性を維持しつつ, 高解像化によってサブメソスケール現象の再現性が向上したことが示唆される.

次に, 黒潮流路上の密度構造の再現性を確認するべく, 沖縄トラフから東シナ海にかけての海域において気象庁が定期観測線として設定しているPN線(図-1)における鉛直断面内の水温・塩分構造を比較する(図-3). ROMS-L1による計算値と観測結果は水温, 塩分とともに分布形, 混合層深さ, 跳層水平勾配などについて良好に一致している. なお, ここではL1に対する夏期の結果のみを示したが, 各季節およびL2についてもほぼ同様の再現性を確認している.

図-4は, ROMS (L2 on L1), JCOPE2, AVISO (衛星海面高度計データ, 水平解像度約 $1/4^\circ$)による, 解析期間全体に対して平均された表層流速の絶対値を比較したものである. 周囲より流速の大きい箇所が黒潮流軸であり, 三者ともほぼ同様な黒潮流路パターンを示している. AVISOの海表面流速はROMS, JCOPE2よりやや小さな値となっている領域もあるが, 低解像度のAVISOでは黒潮流によるシャープな海面高度(SSH)勾配やフロンティ構造が表現できないため, 表層流速をやや過小評価したものと考えられる. 最後に, メソスケール変動強度の指標として, SSH分散を比較する(図-5). 琉球諸島の南東側, 中国大陸沿岸, 本州南岸などで分散値が大きくなる傾向などが一致しており, 各モデル間で矛盾がないことが確認される. 以上の結果から, 本ダウンスケーリングシステムは平均流, 乱流場, 成層構造等について十分な再現性があることが確認できた.

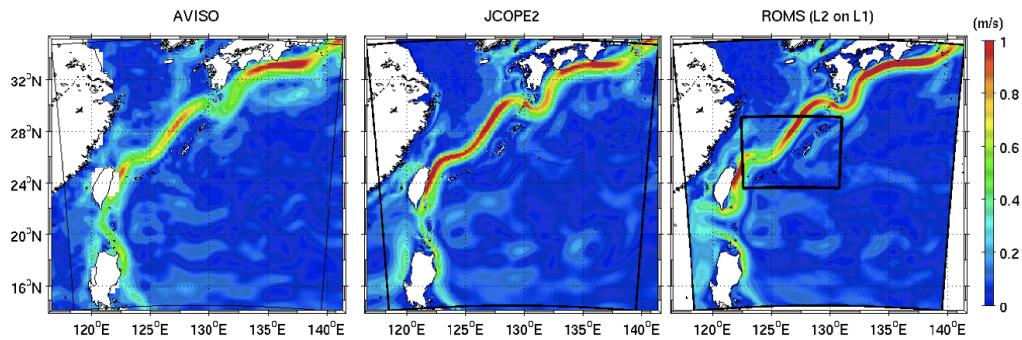
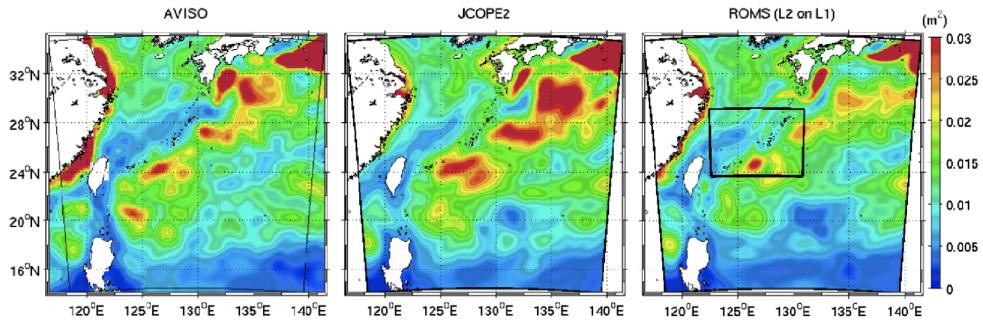
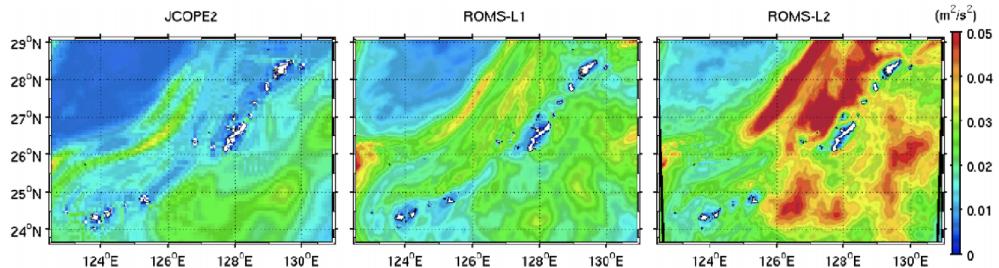


図-4 平均海表面流速の絶対値。(左) AVISO衛星海面高度計データ, (中) JCOPE2, (右) ROMS (L2 on L1) による。

図-5 海面高度計データ AVISO, JCOPE2, ROMS (L2 on L1) による海面高度 (SSH) の分散 (m^2)。図-6 JCOPE2, ROMS-L1, ROMS-L2による季節変動成分を除去した海洋表層渦運動エネルギーEKEの空間分布 (m^2/s^2)。

4. 考察

(1) 表層無次元相対渦度

ダウンスケーリングによる高解像度化に伴い、より小さなスケールのフロントや渦が再現され、乱流構造が変化する。そこで、各モデルによる表層渦運動エネルギーEKEの空間分布を比較する(図-6)。ここでは流速に対してReynolds分解を行い、周波数ハイパスフィルタを用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する。解像度の向上に伴ってEKEが著しく増大する傾向が見てとれる。この原因を探るために、EKEの増大と密接に関連する海表面での無次元相対渦度 ζ/f (ただし、 ζ :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(図-7)。いずれのモデルも黒潮によるシアによって、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。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數出現し、しかも著しく強化され、これがEKEの増大を引き起した。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、流軸西側で発達する正の渦度の領域と同程度以上になっている。この傾向はL2モデルで最も顕著になり、流軸に対して東側に島がある場所とない場所での差異が確認され、島嶼群近傍での負の渦度強化はより明確になっている。

海洋表層では $\zeta+f < 0$ の条件下では慣性不安定が、 $\zeta+f - S < 0$ (S : strain rate) ではanticyclonic非地衡流不安定が生じるため、北半球では負の相対渦度が維持されにくくことが知られている。したがって、負の渦度の発達は本海域における特徴的な現象であると考えられる。そこで渦度の正負のバイアスを定量的に評価するため、沖縄本

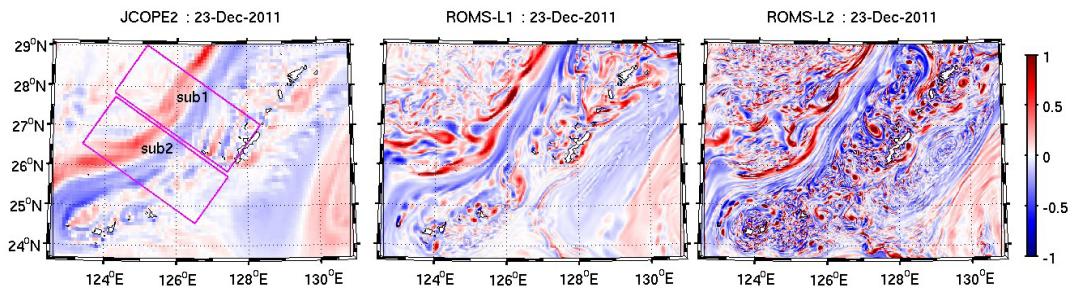


図-7 JCOPE2, ROMS-L1, ROMS-L2による2011/12/23の海表面無次元相対渦度 (ζ/f) の日平均値。左図内のボックスはPDFおよびeddy heat flux評価に用いる小領域sub1, sub2を表している。

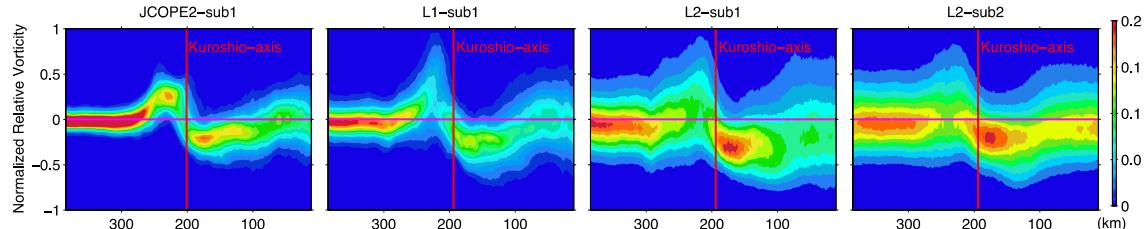


図-8 各モデル (左からJCOPE2, ROMS-L1, L2) の小領域sub1, ROMS-L2のsub2における表層無次元相対渦度のPDF。横軸は沖縄本島からの距離 (km), 各パネル中央の赤縦線は黒潮流軸の平均位置。

島のすぐ西側海域にsub1, その直下の島がない海域にsub2という黒潮流軸を中心とした2つの小領域を設定し (図-7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 ζ/f 強度に関するPDF (確率密度関数) を求める。sub1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sub1とsub2領域間の差異を調べ, 島の有無によるPDFの比較を行う (図-8)。4つのケース全てにおいて, 黒潮流軸に対して軸対称に近くなっているが, 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, すなわち沖縄本島側では流軸から離れてもPDFピークは $\zeta/f < 0$ に現れることから, 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, PDFピークはより強い負値に現れ, ζ/f のPDF分散幅も大きい。また, 沖縄本島寄りのPDFの勾配が緩やか (あるいは逆勾配) となることから, 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。ROMS-L2におけるsub1, sub2のPDFを比較すると, 領域東側に島のないsub2にも流軸東側での負のバイアスは見られるものの, sub1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密接に関係しており, 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。この負の高気圧性渦は主にサブメソス

ケール渦であって (図-7), 非地衡流的性質を持つものの, 地球自転の効果を強く受けて発達した渦であるため, 陸境界から離れた外洋域であれば慣性不安定等の影響を受けて維持されにくい。それにも関わらず負の相対渦度が発達するのは, 琉球諸島による地形性のシアや海底圧力トルクの作用によるものと考えられる。

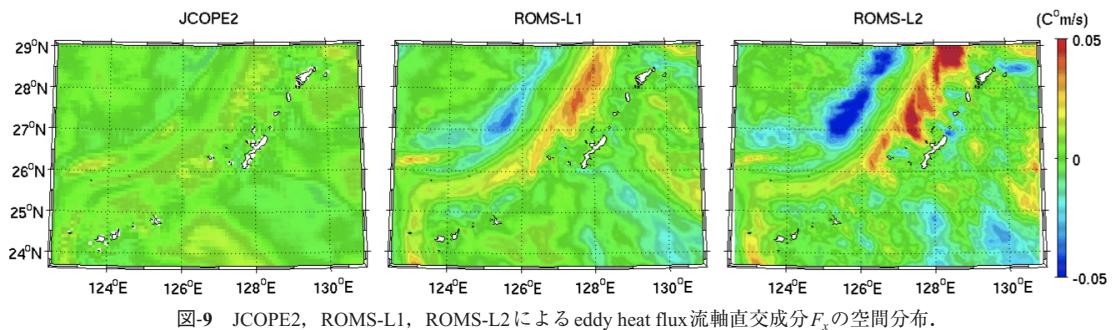
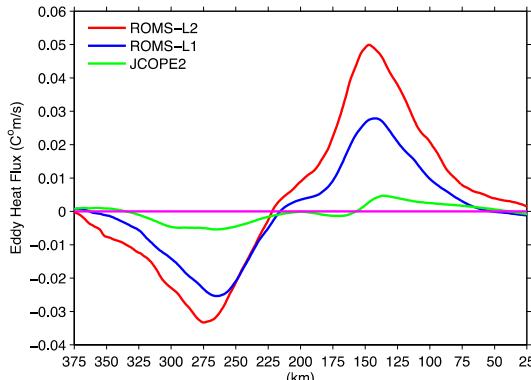
(2) eddy heat fluxによる乱流混合

黒潮に伴う強い負のサブメソスケール渦は, その強い混合作用によって黒潮流系暖水塊の沖縄本島西海岸への波及を促進していることが予想される。そこで, その効果を定量的に見積もるため, 熱をトレーサーとして海洋表層における水平乱流混合を評価することを試みる。

時間平均, 鉛直積分された熱 (温位) 輸送方程式は次式のように表される (例えば, Marchesielloら, 2003)。

$$\int_{-h}^{\eta} \left(\frac{\partial \bar{u}T}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}T}{\partial y} \right) dz + \int_{-h}^{\eta} \left(\frac{\partial \bar{u}'T'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'T'}{\partial y} \right) dz + \int_{-h}^{\eta} [Q(\bar{T}) + D(\bar{T})] dz = 0 \quad \dots \dots (1)$$

ここに, T : 温位, (u, v) : 水平流速, Q : 海表面熱フラックス, D : サブグリッドスケールの熱拡散フラックスであり, 左辺第1項は平均移流フラックス, 第2項は渦輸送フラックスを表す。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である。ここでは第2項に着目し, 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) $F = (F_x, F_y) = (\bar{u}'T', \bar{v}'T')$ として評価する。ただし, x : 黒潮流軸直交方向, y : 黒潮流軸方向と定義する。

図-9 JCOPE2, ROMS-L1, ROMS-L2による eddy heat flux 流軸直交成分 F_x の空間分布。図-10 各モデルのsub1における eddy heat flux 流軸直交成分 F_x の流軸方向平均値。横軸は沖縄本島からの距離 (km)。

F_x の空間分布から (図-9), 黒潮流軸を中心西側には負, 東側には正のフラックスが形成され, 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が分かる。解像度が高いほどサブメソスケール渦の影響が強くなつて F_x が増大し, また, 地形の影響が少ない沖縄本島南西海域では F_x が弱まっている様子が見て取れる。また, sub1領域に対して流軸方向に平均された F_x 分布 (図-10) のモデル間の差は明瞭であり, 高解像度モデルであるほど EHF は大きく, 流軸西側よりも東側での EHF の絶対値が大きい。また, L2 モデルでは沖縄本島より 25~50 km 地点でも有意な正の EHF が出現しており, 地形近傍にもより強い波及効果が存在することが分かる。

以上の結果から, 黒潮流路と琉球諸島西海岸の間の海域では, 地形性シアなどの影響によって発達する負のサブメソスケール渦によって活発な熱交換が行われており, 黒潮の波及が促進されていることが明らかとなった。

5. おわりに

琉球諸島周辺海域を対象にしたダウൺ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 の高解像度モデル (ROMS-L2) では, 解像度の向上に伴い, 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。また, eddy heat flux 解析結果から, 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。なお, ここではトレーサーとして熱を用いたが, 栄養塩や浮遊幼生なども熱と同様の強い水平乱流拡散作用によって黒潮系暖水塊の波及効果を受けることが予見される。したがって本解析は, 琉球諸島周辺海域の海洋環境に対して極めて重要な知見を与えるものと考えられる。

謝辞: 本研究は科学研究費基盤研究C (24560622) の援助を受けた。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

- 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. L_436-L_440.
- 灘岡和夫, 鈴木庸壱, 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.
- 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.
- 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.
- Marchesiello, P., J.C. McWilliams and A.F. Shchepetkin (2003): Equilibrium Structure and Dynamics of the California Current System, J. Phys. Oceanogr., Vol. 33, pp. 753-783.
- 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. 737-75.