

黒潮暖水波及に伴う沖縄本島周辺海域 における非対称海洋構造の形成機構

内山 雄介¹・小谷 瑛千花²・山西 琢文³・上平 雄基⁴・御手洗 哲司⁵

¹正会員 神戸大学教授 大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail:uchiyama@harbor.kobe-u.ac.jp

²学生会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

³正会員 中日本高速道路株式会社 (〒460-0003 名古屋市中区錦2-18-19)

⁴学生会員 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 茨城県那珂市東海村白方白根2-4)

⁵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)

琉球諸島サンゴ礁生態系の維持に対して重要な役割を果たす黒潮系暖水波及に伴う沖縄本島東南海域における海洋構造の非対称性、特に黒潮反流の消長とそのメカニズムに着目した数値解析を行った。本島南端と渡嘉敷島を結ぶ浅海域の存在が鍵の一つになっており、潮汐の伝播特性に対してノードとなるほか、ここを通過する南向き流れの発達と黒潮本流および慶良間ギャップ通過流の流量変動とに良好な対応関係があることが明らかとなった。渡嘉敷海域での南下流の発達は黒潮-本島間に発生する負のメソスケール渦としての黒潮反流の発達によって惹起されており、反流は春季に強化され、冬季に弱化していた。この反流の消長は同海域におけるサブメソスケール渦の季節的な発達特性と相関があることが示された。

Key Words : Kuroshio, Kuroshio Counter Current, meso- and submesoscale eddy, ROMS

1. はじめに

琉球諸島周辺海域(図-1)は、主として低緯度域から暖水を輸送する黒潮の影響を受けるため、比較的高緯度域に位置しながらも豊かで多様なサンゴ礁生態系が維持される、世界的に見ても特殊な海域環境を形成している。サンゴ礁は「海のオアシス」とも呼ばれ、多くの海洋生物にとって好適な生息域と産卵場を提供するなど熱帯・亜熱帯の海洋生態系にとって不可欠な存在であるだけでなく、海水中のCO₂を固定し、水質保全に寄与するほか、造礁に伴う地形改変によって海岸への波浪の作用を軽減する防波堤としての機能を持ち、さらには観光資源として経済的な価値をも生み出す。一方で、地球温暖化に伴う海洋環境変化の影響などに伴い、本海域においてもサンゴの白化現象や衰退が進展している。そのため、適切なサンゴ礁生態系保護に向けて周辺の海洋構造を理解し、コネクティビティを定量的に評価することが喫緊の課題の一つとなっている。

その生息環境を水温に強く規定されるサンゴ礁生態系にとって、黒潮系暖水の波及作用は根幹的に重要である。黒潮は沖縄本島北西方向約150 km地点の陸棚斜面に沿って非常に安定した流路を取りながら北上している。そのため、沖縄本島への黒潮波及は、直接影響というより

は非定常で間欠的な経度方向の海水交換を通じた間接影響が支配的となる。例えば著者ら¹⁾は、黒潮-沖縄本島間の海域に選択的に発達する時計回り(負)のサブメソスケール渦に伴う eddy heat flux によって本島西海岸方向への黒潮系暖水波及が促進されることを明示している。黒潮波及のもう一つの機構として、同海域に間欠的に発生するメソスケールの黒潮反流²⁾(時計回り循環流)の影響が考えられる。黒潮反流が発生する本島西側海域は相対的に浅く、水深2,000 m程度の沖縄トラフ、黒潮本流が表層付近を通過する陸棚斜面を経て、遠浅な東シナ海に接続している。その一方で、沖縄本島東側は急峻な陸棚斜面を経て水深約6,000 mに至る深い琉球海溝を通じて太平洋に接続している。東側海域の亜表層には黒潮の分枝流である琉球海流が北東方向へ流れており、黒潮を源流とする水塊を本島方向へと輸送している。したがって、沖縄本島を含む琉球諸島は、東西に全く異なる地形と海流条件を有する2つの海域を分断するように鋭く突き上がったリッジ地形として特徴づけられる。

以上のような黒潮影響の差異や地形特性の違いによって、沖縄本島を中心とする東西の海域間では海洋構造や黒潮波及特性に非対称性が生じ、サンゴ生態系の発達に少なからぬ影響を与えているものと推察される。実際に、沖縄本島周辺のサンゴ被覆度は西海岸よりも東海岸で少

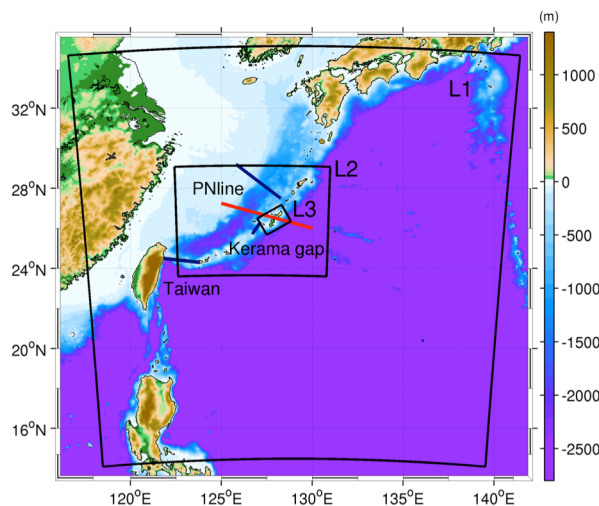


図-1 3段階ネスティング ROMS モデル領域 (L1: 水平解像度約 3 km, L2: 同 1 km, L3: 同 250 m) . カラーは水深 (m) , 赤実線: 図-7 検査線, 青実線: 図-6 検査線 (北から PN ライン, 慶良間ギャップ, 台湾東岸)

表-1 ROMS-L3 の計算条件

計算期間	2011/1/26 - 2013/1/31
格子数	608×416×32 層, 水平解像度 250 m
計算時間間隔	10 s
外力 (海上風)	JMA GPV-MSM
海面フラックス	COADS (月平均気候値)
海表面水温・塩分	JCOPE2 (20 日平均値)
海底地形	SRTM30
潮汐	TPX07.0
境界条件	ROMS-L2 (日平均値)

ない傾向があるとされ³⁾, それが発因の一つとなつて, より重点的に西海岸の観光開発が行われてきた⁴⁾.

そこで本研究では, 著者ら^{4,5)}による JCOPE2-ROMS システムに基づく 2 段階ネスト琉球諸島周辺海域モデルをベースに, 沖縄本島周辺海域を対象にさらにもう一段階のダウンスケーリングを行い, 約 2 年間の海洋再解析を実施した. 開発した 3 段階ネスト海洋モデル出力を用いて, 本島周辺における詳細な海洋構造と東西海域の非対称性に着目した解析を行った. また, 台湾から琉球諸島へ至る黒潮本流, 慶良間ギャップ通過流, 琉球海流を含む黒潮系海流が有する総観規模および中規模現象に伴う本島周辺海域へのインパクト, 特に黒潮本流と沖縄本島間に間欠的に出現する黒潮反流の発生特性とそのメカニズムに関する解析を行ったので, その結果を報告する.

2. 海洋モデル

本研究では, 3次元変分データ同化を用いた日本沿岸海況再解析・予報システム JCOPE2⁶⁾ (水平解像度約 1/12 度) を最外側境界条件とした 1-way offline ネスティングによる 3 段階ネスト高解像度海洋ダウンスケーリングを行っ

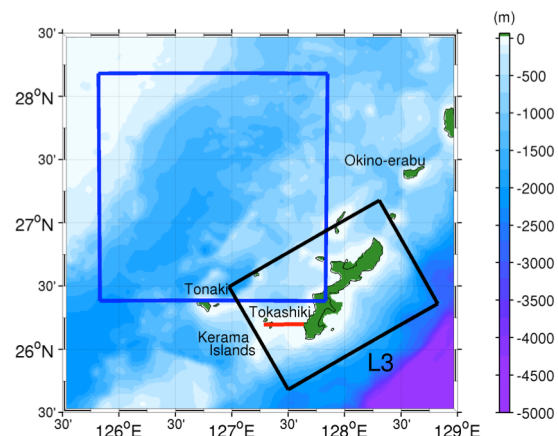


図-2 ROMS-L3 モデル領域 (黒枠) 周辺拡大図. 赤線: 渡嘉敷海峡 (本島と渡嘉敷島間) 検査線, 青枠: 波数スペクトル解析に用いる正方領域 (図-9) , カラー: 水深 (m) .

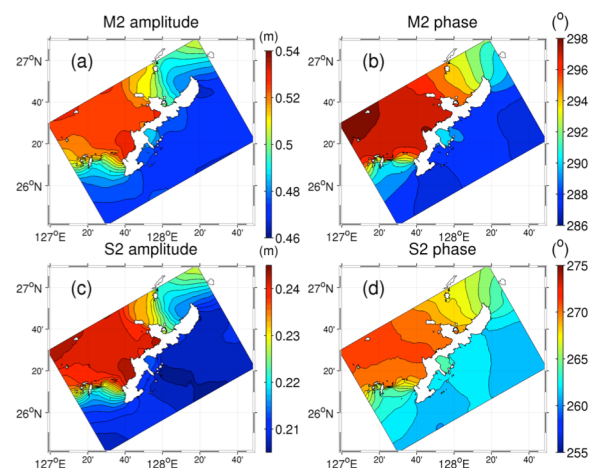


図-3 L3 モデル水位に対する調和解析結果 (半日周期成分) の空間分布. (a) M2 分潮振幅 (m), (b) M2 分潮遅角 (°), (c) S2 分潮振幅 (m), (d) S2 分潮遅角 (°).

た (図-1) . 2 段階ネスト領域までは著者ら^{4,5)}による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の ROMS-L1 モデル (同 3 km) , L1 日平均値を境界条件として琉球諸島周辺海域を対象とした ROMS-L2 モデル (同 1 km) を用いる. 本研究ではさらに, L2 日平均値を境界条件とし, 沖縄本島周辺を中心とした約 150 km × 100 km の海域を対象とした ROMS-L3 モデル (同 250 m) を構築した (図-2, 表-1) . L3 モデルでは, 海上風に気象庁 GPV-MSM 再解析値を, その他の海面フラックスについては COADS の月平均気候値を用いた. 気候値を用いることによって生じる海面フラックス誤差に伴うドリフトを補正するために, L1, L2 モデルと同様に, 海面熱フラックス・淡水フラックスを JCOPE2 再解析データ 20 日平均値による SST と SSS を用いて緩和補正した. L3 では新たに TPX07.0 による主要 10 分潮調和定数を用いて順圧潮汐を L3 の開境界において与えた. 約 3 ヶ月間の spin-up 期間を含む ROMS-L3 の計算期間は 2011 年 1 月 26 日から

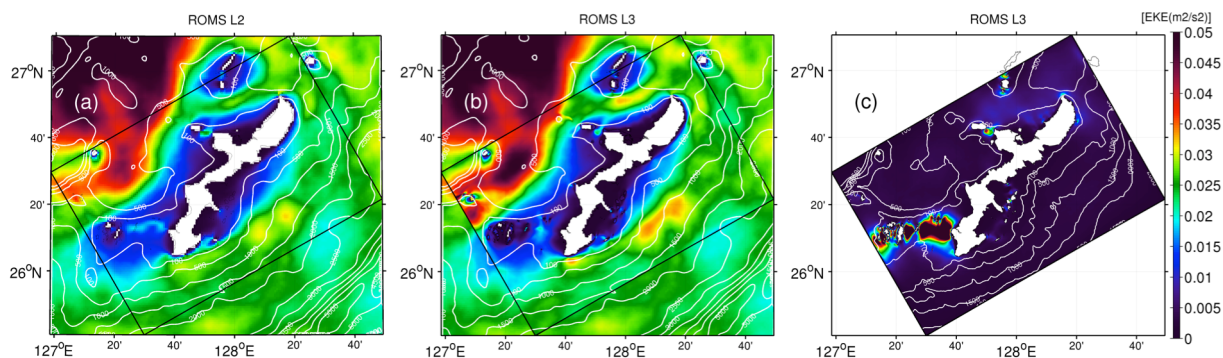


図-4 沖縄本島周辺海域における表層渦運動エネルギー (EKE, m^2/s^2) の空間分布. (a) ROMS-L2 (水平解像度 1 km) によるサブタイダル周期の EKE, (b) ROMS-L3 (同 250 m) によるサブタイダル周期の EKE を (a) に重ねたもの. (c) ROMS-L3 による潮汐周期 (周期 30 時間以下) の EKE. 黒枠は ROMS-L3 モデル領域を示す. 白線は等深線 (100m + 500m おき) .

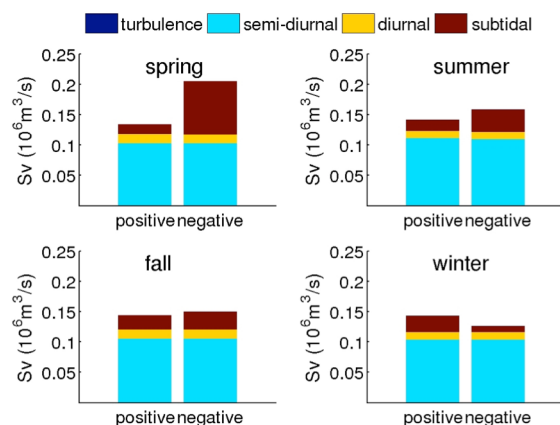


図-5 渡嘉敷海峡 (図-2, 赤線) 断面通過流量の季節平均値 (Sv) . 正: 北上流成分, 負: 南下流成分であり, カラーはサブタイダル長周期, 日周期, 半日周期, 乱流成分による流量を表している.

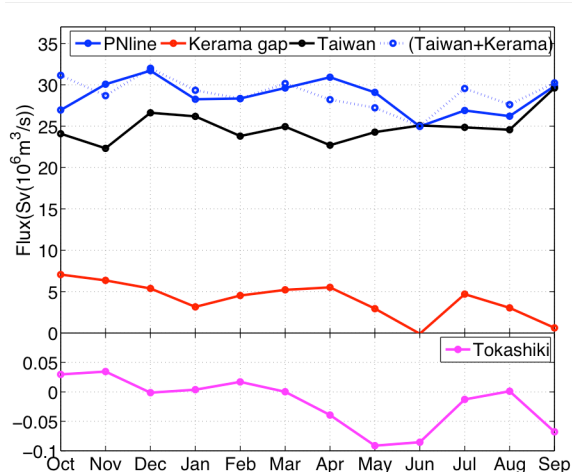


図-6 各検査線断面における月平均通過流量 (Sv) の時系列 (2011/10~2012/9) . PN ライン: 青実線, 台湾東岸: 黒, 慶良間ギャップ: 赤, 渡嘉敷海峡: マゼンダ, 台湾東岸と慶良間ギャップの通過流量の合計: 青破線. 検査線位置は図-1, 図-2 参照.

2013年1月31日までの約2年間である.

3. 沖縄本島東西海域間の非対称性

(1) 調和解析

沖縄本島周辺海域における潮汐の伝播・発達特性を調査するために L3 領域全体に対して調和解析を行った. 一例として, 水位変動の半日周期成分 (M_2 , S_2 分潮) に関する解析結果を見ると (図-3), 潮汐の伝播発達特性には東西海岸で顕著な差異があることが分かる. すなわち, 東海岸での振幅は概ね一様であるのに対し, 西海岸では本島西方海域を中心に最大 15% 程度の増幅が確認され, 本島の東西海岸では潮汐の増幅特性が大きく異なることが分かる (図-3 (a) (c)). また, 西海岸の遅角は東海岸よりも最大で 10~15 度大きいことから, 潮汐の影響は本島南北の両端から 20~30 分程度の位相差を形成しながら西海岸に沿って回り込むように二方向的に伝播し, 振幅が最大値を取る海域付近で邂逅する (図-3 (b) (d)). このとき, 沖縄本島南端と渡嘉敷島間の海域 (以下, 渡嘉敷海峡と呼称; 図-2 赤線) を境に東西の伝播特性が急激に変化していることが分かる. これらの特

徴は日周期成分 (O_1 , K_1 分潮) にも同様に見られた (図は割愛). したがって, 渡嘉敷海峡は本島周辺および東西海岸の潮汐伝播発達特性に明確な違いを生み出し, 本海域における海洋構造の非対称の形成に強く関与していることが分かる.

(2) 渦運動エネルギー

沖縄本島周辺における乱流構造の概略を調べるために, 表層渦運動エネルギー EKE の空間分布を求めた (図-4). 本研究では Butterworth 周波数フィルタによって周期 90 日以上の変動成分を除去した残差を渦成分と定義した. さらに L3 モデルについては, 周期 30 h 以下の潮汐成分と, それ以上のサブタイダル成分に分離した. 水平解像度を 1 km (L2) から 250 m (L3) に向上させることにより, フロント勾配やそれに伴う鉛直流速が強化されるために渦度が強化され, 沖合海域を中心に岬や海峡部においてサブタイダル EKE が増大する. L3 モデルの潮汐成分 EKE は, 潮汐伝播特性が変化する海域である渡嘉敷海峡および北西沿岸で強化されている. つまり, 両

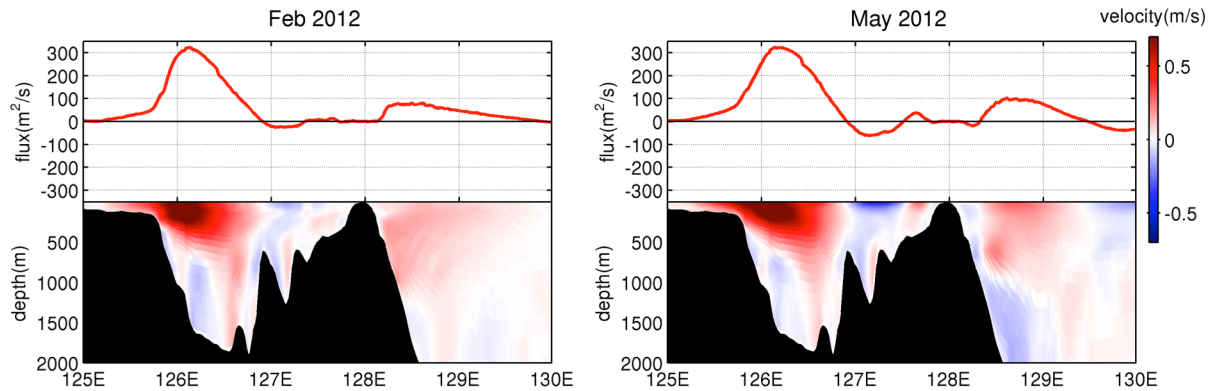


図-7 沖縄本島を通る検査線（図-1 赤線）における，左：冬季（2月）と右：春季（5月）の月平均流速・流量分布．下：鉛直断面直交流速成分（m/s），上：下図の流速を水深 600 m から水面まで積分した検査線方向単位長さ当たりの通過フラックス（m²/s）．沖縄本島は東経 128°付近に位置する．

海域，特に渡嘉敷海峡では潮流変動振幅が大きく，この周期帯で変動する渦度の供給源あるいは集積地となっている可能性が示唆される．以上の結果から，沖縄本島周辺海域における高周波の海洋乱流構造の東西の非対称性の形成に対しても，渡嘉敷海峡の存在が重要な役割を果たしていると考えられる．

4. 琉球諸島周辺海流流量の季節変化

(1) 渡嘉敷海峡の通過流量

渡嘉敷海峡の水深は最大でも約 60 m と極めて浅いため，本島周辺の海水交換が阻害され，それが本島周辺海域の海洋構造に対して影響を与えている可能性が予想される．そこで，渡嘉敷海峡検査断面（図-2 赤線）を南北方向に通過する流量の季節平均値を評価する．ここでは，冬季：1月～3月，春季：4月～6月，夏季：7月～9月，秋季：10月～12月と定義し，まず2時間平均値として得られる各季節における流量時系列を求める．次に各季節について周波数フィルターを用いてサブタイダル長周期成分（周期 28 時間以上），日周期成分（周期 20～28 時間），半日周期成分（周期 6～20 時間），乱流成分（周期 6 時間以下）に周波数分解する．さらに各周波数成分流量変動を正（北上流）と負（南下流）に分けてそれぞれを時間積分し，最後に時間平均操作を行った．

以上の手順によって求めた季節別・周波数別・流向別通過流量平均値を図-5 に示す．周波数別に見ると半日周期成分の寄与が大半を占め，次いで周期 28 時間以上のサブタイダル長周期成分の寄与が大きく，乱流成分は無視できるほど小さい．日周および半日周成分の季節差と南北方向差はごく僅かであり，通過流の季節変動は長周期成分の消長に起因することが明示されている．南北方向の通過流量差は春季に最も増大し，南下流（負値）は北上流（正值）よりも約 0.08 Sv 大きい，夏季・秋季には流量差は減少し，冬季では反対に北上流成分の方が

大きくなる．つまり，渡嘉敷海峡の通過流量には明確な季節変動があり，それを引き起こしているのはサブタイダル長周期流動変化であることが分かる．

(2) 琉球諸島周辺の通過流量

渡嘉敷通過流量の季節変動メカニズムを考えるために，黒潮系海流の流量収支解析を行う．琉球諸島南方の台湾近海を沖縄本島西部海域を通過する黒潮本流の源流域であると考えて琉球海流との分岐点より北側（下流側）の台湾東岸に，また，黒潮本流の流量値を求めるために沖縄本島北方に位置する気象庁定常観測線のPNラインに，さらに琉球海流や中層水の影響を考慮するために慶良間ギャップに計3箇所の検査線を設け（図-1 青線），各断面を通過する流量の月平均値を求めた（図-6）．

PNラインにおける鉛直断面通過流量（青実線）は 25～31 Sv であるのに対し，台湾東岸の通過流量値（黒実線）は 22～30 Sv，本島南西に存在する慶良間ギャップ通過流量値（赤実線）は 0～7 Sv であり，それぞれに長期トレンドおよび季節変動が確認できる．PNライン通過流量は，台湾東岸通過流量と慶良間ギャップ通過流量の合計値である合計流量（青破線）と定量的にほぼ一致しており，両者の変動傾向は1年間を通して非常に類似している．一方，慶良間ギャップ通過流量は春季の2，3ヶ月間で 5 Sv 程度低減し，6月にはほぼゼロになっている．この変動傾向と連動して，PNライン流量および合計流量にも春季の流量低下が見られる．また，図-5で求めた渡嘉敷海峡における鉛直断面通過流量の月平均値を見ると，その流量は他の断面と比較して一桁以上小さく，年間を通じて弱い北向き（正）流量が卓越するものの，4月～6月，9月には強い南向き（負）流量が支配的となる．その変動傾向は慶良間ギャップ通過流量の変動傾向と非常に類似しているものの，1～2ヶ月の時間遅れを伴っていることが示されている．

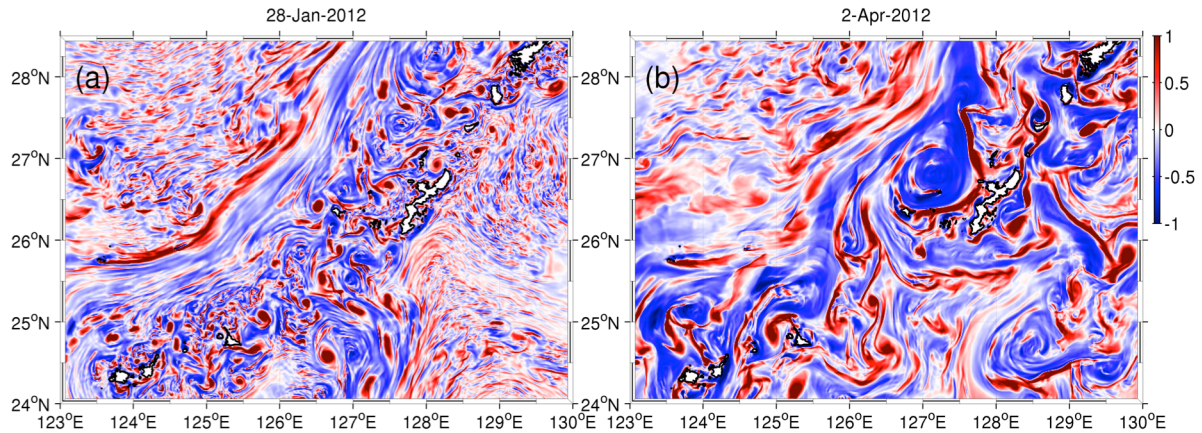


図-8 ROMS-L2 モデルによる海洋表層（水深 3 m）における無次元相対渦度の日平均値. (a) 冬季（2012/1/28）(b) 春季（2012/4/2）の例. 黒潮は図面領域左上を北東方向に流れている. 春季は直径 100 km オーダーの負のメソスケール渦が本島西海岸に存在するのに対し、冬季はより小さく強いサブメソスケール渦（直径 10 km オーダー）が卓越する.

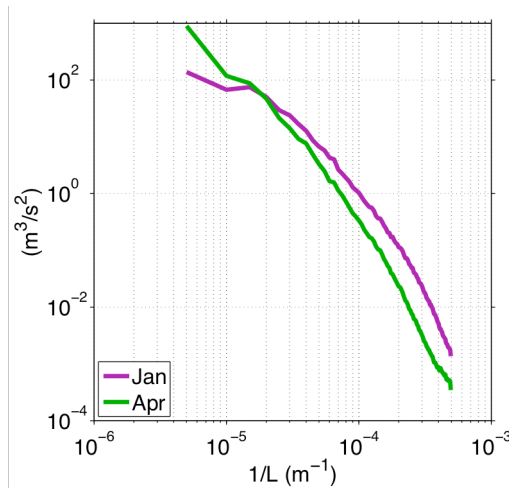


図-9 黒潮-沖縄本島間海域（図-2 青枠）における冬季（1 月）と春季（4 月）の表層運動エネルギーの波数スペクトル.

(3) 黒潮逆流を含む沖縄本島周辺海域の流量分布

次に、沖縄本島およびその東西海域を含む検査線断面（図-1 赤線）における冬季と春季の鉛直断面構造を比較する（図-7）。下部パネルに示す通過流速の断面内分布（検査線に直交して北東方向に通過する流速を正と定義）を見ると、本島西部では沖縄トラフ西側の陸棚斜面上の表層付近に最大約 0.8 m/s の北東向き黒潮本流が確認される。本島東側の亜表層では、約 0.3 m/s の北東向き琉球海流が形成されている。黒潮本流と本島間の表層には黒潮逆流の一部として最大 0.2 m/s 程度の負の流速域が形成されている。また、上部パネルは断面内流速を海表面から水深 600 m まで積分した経度方向単位長さ当たりの通過流量分布を示している。本島を挟んで東西海域を通過する黒潮本流と琉球海流の北向き流量分布を見ると、最大でそれぞれ 324 m³/s、100 m³/s 程度であり、季節によ

る差はほとんど見られない。正值の部分のみを水平方向に積分すると、黒潮本流流量は冬季は 23.5 Sv、春季は 26.0 Sv と見積もられる。それに対して、黒潮本流と沖縄本島間に形成される負の通過流量は南西向きの黒潮逆流に対応しており、その水平方向積分値は冬季は 0.85 Sv、春季は 2.53 Sv と見積もられる。逆流の流量値は黒潮本流の数%程度と小さいものの、その季節差は極めて大きく、冬季と比べると春季には逆流とそれに伴う南西方向流れが著しく強化されることが示されている。したがって、黒潮逆流の消長に伴い、PNライン、慶良間ギャップ、渡嘉敷海峡における通過流量が変化し、琉球諸島周辺海流の季節変動が引き起こされたものと考察される。

5. 黒潮逆流の季節変動

黒潮逆流は、黒潮本流と本島間の海域に間欠的に発達する直径 100 km 程度の時計回りの循環流であるが、その実体は負のメソスケール渦とみなされる。すなわち、逆流が春季に強化されるということは、春季にメソスケール渦が強化されるメカニズムが存在することが予想される。そこでまず、冬季と春季の同海域の海面表層における無次元相対渦度の日平均値を比較する（図-8）。その差は一目瞭然であり、冬季には黒潮逆流発達域を含む領域の大部分でサブメソスケール渦（直径数 km ～ 10 km 程度）が卓越しているのに対し、春季は渦のサイズが増大しており、直径 数 10 km ～ 100 km 程度のメソスケール渦が卓越している。特に図-8 右のタイミングでは、本島-黒潮間海域において極めて強い負のメソスケール渦として黒潮逆流が発達している様子が確認できる。

渦サイズの季節変化を定量的に評価するために、黒潮本流-本島間海域に正方形領域を定義し（図-2 青枠）、領域内の運動エネルギー波数スペクトルを求めた（図-

9) . 冬季 (1月) のスペクトル勾配は, 春季 (4月) と比較するとメソスケールを含む低波数帯で緩やかであるものの, サブメソスケールを含む高波数帯で急峻化している. 冬季の高波数帯のエネルギーレベルは春季よりも平均的に2倍程度高く, サブメソスケール渦が発達していることが示されている. 反対に春季には低波数帯のエネルギーが高く, メソスケール渦が卓越している. 中緯度域の海洋表層でのサブメソスケール渦の消長については近年精力的に研究されつつあり⁷⁾, 冬季に顕著になる海洋表面冷却の強化に伴う傾圧不安定や, downfront風に伴う対称不安定などがサブメソスケール渦発達の原因であると考えられている. 以上のことから, 黒潮反流は負のメソスケール渦として春季を中心とした温暖な季節に強化されるが, 冬季にはサブメソスケール渦の発達による強い渦混合によって弱化するものと解釈される.

6. おわりに

沖縄本島周辺海域は地形的にも海流特性的にもユニークであり, 黒潮の直接的・間接的な影響を受けて, 本島を中心とした東西海域に非対称な海洋構造が形成されていることが明らかとなった. まず, 本島南端-渡嘉敷島間の浅海域は, 潮汐や乱流などの高周波現象に対してノードのような役割を果たしており, 潮汐の伝播特性を急変させ, 渦度の供給源あるいは集積地になっている可能性があることを示した. また, 渡嘉敷海域通過流には明確な季節変動があり, 周期28時間以上のサブタイダル周期の海水交換によって, 特に春季に南向き通過流量が増大していた. この通過流量変動は黒潮本流や慶良間ギャ

ップ通過流の流量と連動しており, いずれも春季に北上流の弱化あるいは南下流の強化が生じていた. さらに, 南下流の強化は黒潮-本島間に形成される黒潮反流の発達とその季節消長と密接に関連しており, 海面冷却などにより強化されるサブメソスケール渦の季節変動と, それに伴うメソスケール渦の発達特性と良く対応していた.

謝辞: 本研究は科学研究費基盤研究B (15H04049) の援助を受けた.

参考文献

- 1) Kamidaira, Y., Uchiyama, Y. and Mitarai, S.: Eddy-induced transport of the Kuroshio warm water around the Ryukyu Islands in the East China Sea, *Cont. Shelf Res.*, 2016. (in revision)
- 2) Qui, B. and N. Imasato: A numerical study on the formation of the Kuroshio Counter Current and the Kuroshio Branch Current in the East China Sea, *Cont. Shelf Res.*, Vol. 10, No. 2, pp. 165-184, 1990.
- 3) 環境省自然環境局 生物多様性センター: 平成 26 年度 モニタリングサイト 1000 サンゴ礁調査報告書, 26 p., 2015.
- 4) 沖縄県: 平成 26 年度版観光要覧, 142 p., 2015.
- 5) 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, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, I_471-I_475, 2013.
- 6) Miyazawa, Y., R. Zhang, X. Guo, H. Tamura, D. Ambe, J-S. Lee, A. Okuno, H. Yoshinari, T. Setou and K. Komatsu: Water Mass Variability in the Western North Pacific Detected in 15-year Eddy Resolving Ocean Reanalysis, *J. Oceanogr.*, Vol.65, pp. 737-756, 2009.
- 7) Sasaki, H., P. Klein, B. Qiu and Y. Sasai: Impact of oceanic-scale interactions on the seasonal modulation of ocean dynamics by the atmosphere, *Nature Communications*, Vol. 5, A.N. 5636, 2014.

(2016.3.16 受付)

IMPACT OF MESOSCALE RECIRCULATION OF THE KUROSHIO ON ASYMMETRIC OCEANIC STRUCTURE AROUND OKINAWA ISLAND

Yusuke UCHIYAMA, Sachika ODANI, Takafumi YAMANISHI,
Yuki KAMIDAIRA and Satoshi MITARAI

Okinawa Island is located in the subtropical region of Japan, hosting ecologically abundant coral reefs even though they lie at the northernmost extreme of the habitable region. The island is situated on the ridge of Ryukyu Arc between East China Sea (ECS) and Ryukyu Trench (RT). The coral ecosystem in the west coast of the island is maintained by persistent intrusions of Kuroshio warm water. These factors lead to oceanic asymmetry between the both sides of the island. In this study, a triple nested downscaling ocean model based on ROMS is configured to examine the asymmetric oceanic structure around the island. The tidal harmonic and eddy kinetic energy analyses around the island clearly suggest that the southernmost area of the island, where Tokashiki strait (TS) lies between Okinawa Island and Tokashiki Island, plays a substantial role in controlling the asymmetric oceanic responses. The evaluated meridional volume flux normal to TS indicates seasonal variability with prominent ECS to RT transport in spring. The transport along TS is highly correlated with the volume transport of the southwestward current formed between the Kuroshio and the island, which is often referred to as the Kuroshio Counter Current (KCC). Surface vorticity indicates that the KCC consists of clockwise-rotating, anti-cyclonic mesoscale eddies. Relaxation of surface cooling and shallowing the mixed-layer depth occurred from winter to spring result in attenuating submesoscale eddies and promoting emergence of mesoscale eddies.