

衛星海面高度データを用いた北太平洋における 中規模渦の発生伝播特性の解析

内山 雄介¹・岡田 信瑛²・黒澤 賢太²

¹正会員 神戸大学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)

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 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

衛星海面高度データに基づく中規模渦抽出・追跡アルゴリズムを用いて、北太平洋における中規模渦の発生伝播特性および黒潮との相互作用に関する解析を行った。北太平洋では地形性シア、フロント域での傾圧不安定に起因する渦の発生が卓越しており、渦運動エネルギーが最も強い黒潮流域、亜熱帯海域では生成された中規模渦の渦径と渦度の関係は慣性不安定および渦位保存則とよく整合していた。亜熱帯海域、米国西海岸沖では、中規模渦は非分散第1モード傾圧ロスビー波として西方へ伝播するが、黒潮流域での伝播特性は複雑であり、黒潮による東進成分を含めた多方向への伝播が混在していた。また、中規模渦-黒潮相互作用に関する事例解析を行い、中規模渦の衝突に伴う黒潮流路変動の発生機構などを考察した。

Key Words : mesoscale eddy, Kuroshio, meander, satellite altimetry, eddy detection/tracking

1. はじめに

海洋には直径100~300 km程度の中規模渦（メソスケール渦）が遍在している。中規模渦はその強い水平拡散作用や鉛直混合作用を通じて、地球規模の熱塩循環、運動量輸送・交換、栄養塩やCO₂などの広域的な物質循環や海洋生態系の消長に対して極めて重要な役割を果たしており、それによって引き起こされる海洋構造変動は気候変動に対しても影響を与えている¹⁾。また、黒潮に代表される海流は、主にその移流効果によって海盆スケールの物質輸送に直接寄与している。北太平洋亜熱帯循環の西岸境界流である黒潮は、低緯度域の高温高塩分な海水を中緯度域へ輸送し、我が国の太平洋および日本海沿岸域の環境、気象、水産、災害等に対して直接的・間接的に強い影響を与えている。大規模な沿岸環境変化を引き起こす黒潮流路変動は、中規模渦の衝突が引き金となって惹起されることがある。例えば、2004年に生じた黒潮大蛇行では、鹿児島島沖において中規模渦が黒潮に衝突して九州南岸周辺で小蛇行が生じ、それが北東方向へ波及して大蛇行へと移行したと報告されている²⁾。したがって、日本を含む東・東南アジアの沿岸環境を大きく変化させる黒潮流路変動や蛇行現象の予測・評価技術の確立に向けて、海洋中の中規模渦の発生伝播特性や、黒潮との相互作用について定量的に評価する必要がある。本研究では、まず、中規模渦の挙動を大局的に把握するために、衛星海面高度（SSH）データを用いた渦抽出・追跡を行い、主に黒潮域のダイナミクスに関する

中規模渦の発生伝播特性を調べるとともに、黒潮-中規模渦相互作用に関する事例解析を行い、海洋渦による黒潮流路変動と沿岸環境への影響に関する知見を得ることを目的とする。具体的には、過去20年分の絶対海面力学高度データに対してNencioliら³⁾の方法を適用することで中規模渦を抽出し、代表的な海域毎の発生・伝播特性を整理するとともに、我が国太平洋沿岸において中規模渦の衝突によって引き起こされた黒潮の流路変動特性を解析する。なお、海洋における中規模渦はロスビー波として長期間にわたって海盆を広域的に伝播して黒潮域に到達するため、黒潮域周辺だけではなく、北太平洋全域を解析対象とする。

2. 中規模渦解析方法

(1) 渦抽出・追跡法

本研究では、衛星SSHデータを用いて解析を行う。まず、表層水平地衡流速ベクトル \mathbf{u} は、地衡流近似により

$$f \times \mathbf{u} = -g \nabla_H \eta \quad (1)$$

から求められる。ただし、 f : コリオリ周波数、 g : 重力加速度、 $\nabla_H = (\partial_x, \partial_y)$: 水平空間偏微分演算子、 η : SSHである。この地衡流速 \mathbf{u} を用いて中規模渦を抽出する方法は、流体の変形速度に基づく力学的な方法と、局所的な流速分布の形状に基づく幾何学的な方法に大別される。前者では、 \mathbf{u} に対してstrainと渦度を以下のように組み合わせた、いわゆるOkubo-Weiss parameter :

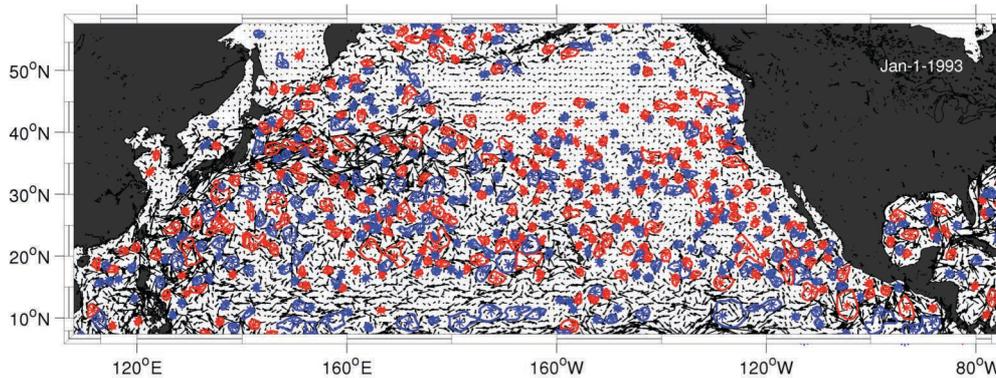


図-1 北太平洋における中規模渦の抽出結果一例. 1993年1月1日のスナップショット. 閉曲線: 渦の概形, 青: 冷水渦 (正の渦度を持つ反時計回り中規模渦), 赤: 暖水渦 (負の渦度). ベクトルは表層地衡流.

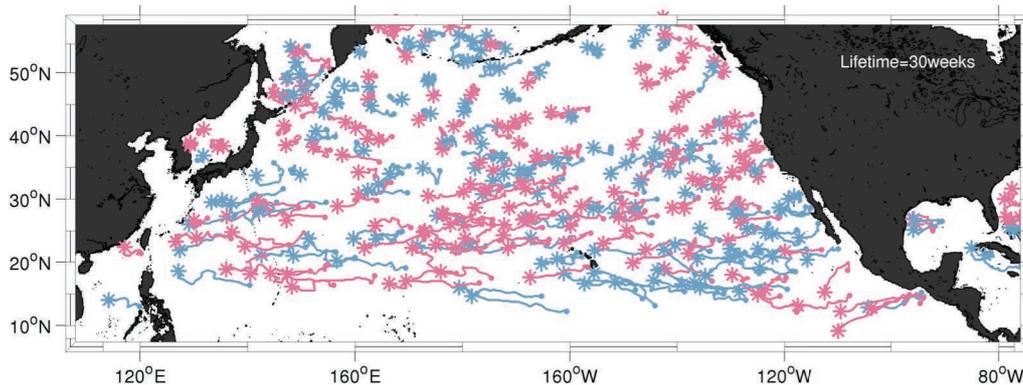


図-2 北太平洋における渦の追跡結果の一例. 30週間生存した渦のみを抽出し, それぞれの軌跡を表示している. 青: 冷水渦, 赤: 暖水渦, 点: 渦の発生地点, 星印: 渦の消滅地点である.

$$Q = \frac{1}{4} \left\{ (-2u_x)^2 + (v_x + u_y)^2 - (v_x - u_y)^2 \right\} \quad (2)$$

を用い, 適当な閾値によって渦を同定する³⁾. 一方, 後者では, 表層流速の空間分布をもとにwinding angle法 (以下, WA法) と呼ばれるアルゴリズム⁴⁾によって渦の位置を同定する. Chaigneauら⁵⁾はこれらの二つの手法の精度を比較し, Q を用いる方法よりもWA法の方がより高精度に渦の位置を抽出できることを報告している. そのため, 本研究ではWA法に基づくNencioliら¹⁾の渦抽出・追跡法を用いて中規模渦を解析することとする.

使用したデータは, AVISOによるSsalto/Duacs絶対海面高度再解析値 (<http://www.aviso.altimetry.fr>. 6/19/2017参照) である. このSSHデータは, Topex/Poseidon およびERSによるSSH観測値を格子化したものであり, 時間解像度1日, 空間解像度0.25度で整理されている. ただし本研究では, 全球SSHが更新されるサイクルである7日毎のSSHデータを使用する. 解析期間は1993年1月初頭から2012年12月末までの20年間であり, 解析対象領域は北緯6~60度の北太平洋全域 (図-1, 2参照) である.

渦の抽出・追跡は, 式 (1) から求められる表層水平地衡流速を用いて行う. まず, 有限領域内の流速場において, 流速が最小かつ周囲の流速ベクトルが閉じている点を渦の中心座標とする. これを海域全体に対して行い,

全ての中規模渦を抽出する (図-1). この中心座標に対する有限の相対座標系における流線関数を求め, 円形に閉じた流線を探索するWA法を用いて, 渦中心から最も外側にある閉じた流線関数コンターを渦の境界とみなすことにより, 渦の形を決定する. 最後に, 2つの連続する時間に存在する互いに最も近接する渦を検索し, 移動する渦の追跡を行う (図-2). この際に設定する有限領域と検索範囲は, 2つの経験的パラメータ a, b によって定められる. パラメータ a は最小流速, b は流速ベクトルが閉じているかを判定する際に用いられる空間テンプレートのサイズに関係しており, 用いるデータの空間解像度などに応じて試行錯誤的に最適な値を設定する必要がある⁹⁾. 本研究では, AVISO-SSHに対してWA法を適用したLiuらの解析⁹⁾を参考に, $a=3, b=2$ に設定した. また, 伝播距離が短い短命の渦については, 抽出・追跡精度が低く, 解析の頑健性が低下することが報告されていることから⁶⁾, 8週間以上生存した渦のみを解析対象とした. 渦抽出・追跡法に関する詳細な設定条件や計算方法は先行研究^{1,3,9)}に詳しい.

(2) 解析対象海域の設定

AVISO SSH+WA法に基づく渦抽出・追跡は, 赤道域を除く全海洋に対して適用可能である. 本研究では, 黒潮域へ及ぼす中規模渦の影響範囲を把握するために, まず,

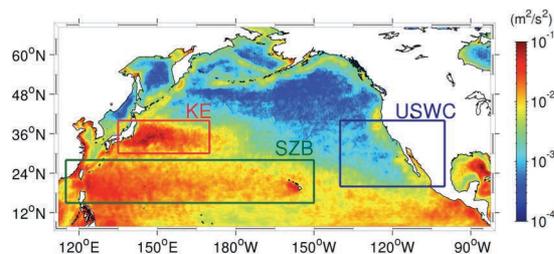


図-3 北太平洋における渦運動エネルギーEKE (m^2/s^2) の空間分布. 20年分の月平均値(7月). 赤枠: 黒潮続流域 (KE: 135-170°E, 30-40°N) 緑枠: 亜熱帯海域 (SZB: 115°E-150°W, 15-28°N), 青枠: アメリカ西海岸沖 (USWC: 100-140°W, 20-40°N).

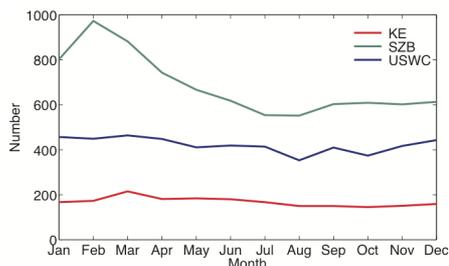


図-5 KE (赤), SZB (緑), USWC (青) 領域内での20年間の中規模渦月別総発生数(寿命8週間以上).

北太平洋全域における表層渦運動エネルギーEKEの空間分布を求めた(図-3). ここでは, 水平流速に対して Butterworth 周波数フィルタを適用し, 周期90日以上の季節変動成分からの残差を渦成分と定義し, EKE評価に用いた. 本州東岸沖の黒潮続流域 (KE: Kuroshio Extension, 赤枠) は, 北太平洋の中でもEKEが局所的に最も強い海域であることが分かる. 亜熱帯海域 (SZB: subtropical zonal band, 緑枠) は, この緯度帯を西進する亜熱帯循環が黒潮とミンダナオ海流に分岐するフィリピン沖海域を含んでおり, 黒潮の最上流域と位置づけられる. さらに, KEやSZBと比較するとEKEレベルは格段に低いものの, アメリカ西海岸沖 (USWC: U. S. West Coast, 青枠) では春・夏の季節風による沿岸湧昇に伴って中規模渦が発生することが知られており (3. (1) 参照), それらがロスビー波として西方へ伝播し, 場合によっては日本周辺海域に影響を与えている可能性がある. 以上のことから, KE, SZB, USWCの3海域に着目して, 以降の解析を行うこととする.

3. 北太平洋における中規模渦の発生伝播特性

(1) 発生頻度分布

北太平洋において1993~2012年の20年間に発生し, 8週間以上生存した渦の総数は44,257個であった(短命の渦を含めた渦全数の約1/5に相当). そのうち冷水渦(正の相対渦度, 北半球では反時計回り)は, 暖水渦よりも全体で約12.1%多かった. 中規模渦の発生特性を調べるために, $2^\circ \times 2^\circ$ 格子ごとに20年分の渦の発生数分布

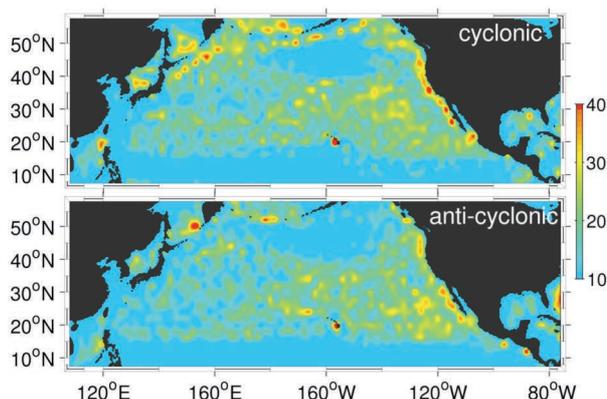


図-4 2度格子毎に整理した中規模渦の発生数分布. 上: 冷水渦, 下: 暖水渦であり, 20年間の解析期間中に8週間以上生存した渦のみを計数.

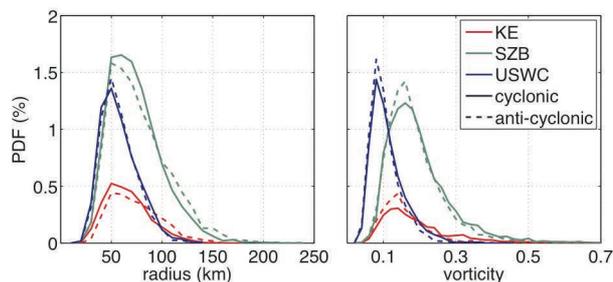


図-6 KE (赤), SZB (緑), USWC (青) 領域内における渦径 r (右) および無次元相対渦度絶対値 $|\xi|$ (左) の頻度分布. 実線: 冷水渦 ($\xi > 0$), 点線: 暖水渦 ($\xi < 0$).

を求めた(図-4). また, 図-5は三海域における月別の渦発生数を示している. 図-4から, USWCは北太平洋に対する渦の供給源になっており, 海岸線に沿うように多数の渦が発生していることが確認できる. USWC領域内で発生した渦の数は, 北太平洋全域の約13%に達していた. また, SZBでの発生数は全体の20%, KEは5%であった. ハワイ海嶺西側やアリューシャン列島周辺では局所的に多数の渦が発生しているが, これらは海嶺や列島地形の影響を受けて生成された後流渦であると考えられる. 一方, 図-5から, 渦の発生には季節変動があり, 1~3月の寒冷期に発生数が増加し, その傾向はSZBで最も顕著に発現することが分かる.

(2) 渦径と渦度分布

抽出された中規模渦の渦径(半径) r , ならびに渦中心直近格子における表層地衡流速 \mathbf{u} から式(3)により無次元相対渦度 ξ を求め, 三海域 (KE, SZB, USWC) について r, ξ ごとの中規模渦発生頻度分布を求めた(図-6).

$$\xi = (\nabla_H \times \mathbf{u}) / f \quad (3)$$

なお, 各渦はそのライフサイクルの中で r や ξ を変化させるが, ここでは発生時の値を用いて整理した. 図-6から, 中規模渦の海域毎の平均的な性質は大きく異なっていることが分かる. つまり, USWCでは全体的に冷水渦,

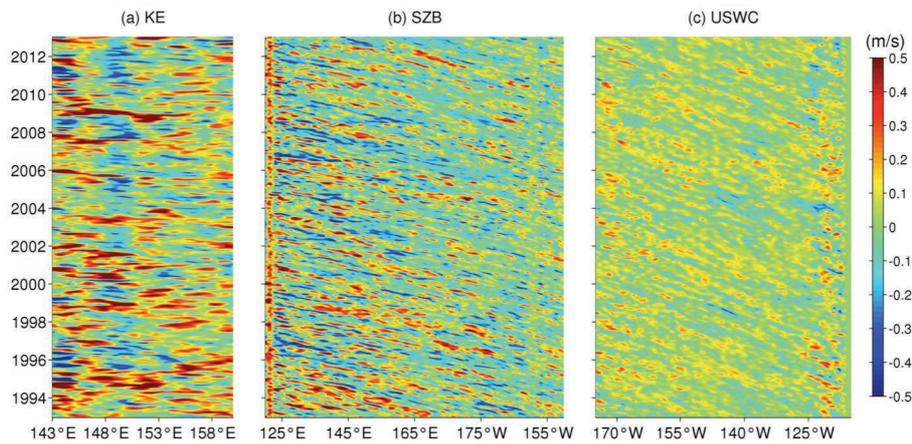


図-7 東方向表層地衡流速 u の Hovmöller 図 (周期 8 週間で lowpass) . (a) KE, (b) SZB, (c) USWC.

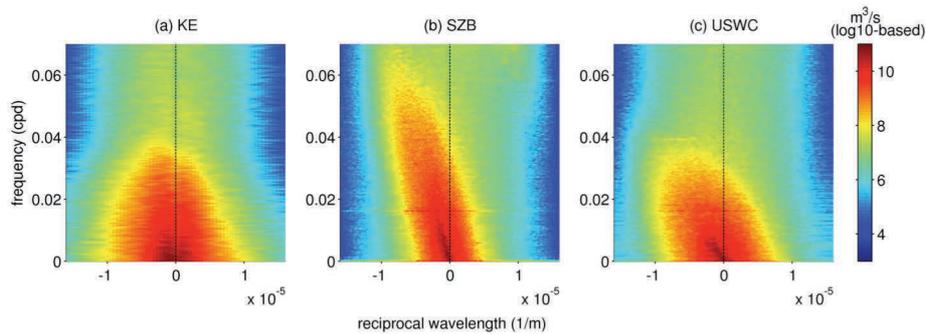


図-8 東方向表層地衡流速 u の周波数-波数スペクトル. 波数は東向きを正と定義. 左から, (a) KE, (b) SZB, (c) USWC.

暖水渦ともに渦度が小さく ($|\xi| < 0.1$ 程度), 渦径も小さい. 図-3において高いEKEを示したSZBおよびKEでは共通して, 冷水渦は渦度が強く, 反対に渦径は小さい一方で, 暖水渦の渦度は弱く, 渦径は大きい.

以上の傾向は, 絶対渦度: $\omega_a = f + \xi > 0$ を安定条件とする慣性不安定によって暖水渦 ($\xi < 0$) の発達が抑制されること, および渦位保存則: $\omega_a/h = \text{const}$ (h : 円柱近似した中規模渦の体積を $\pi r^2 h$ としたときの渦の高さ)あるいはこれを変形して得られる角運動量保存則: $\omega_a r^2 = \text{const}$ から直ちに説明できる. つまり, 冷水渦は北半球において同符号のコリオリ力によって安定的に存在し, かつ強化される. 渦位保存から渦度が大きくなると半径が小さくなる. 反対に, 暖水渦は慣性不安定によって弱体化されるため渦度は小さくなり, 半径は大きくなる.

(3) 中規模渦の伝播特性

次に, 中規模渦の空間伝播特性を評価するために, 三海域に対して東向き流速 u の Hovmöller 解析 (図-7) および周波数-波数 (fk) スペクトル解析 (図-8) を行った. ここでは, 流速および波数は東向きを正と定義している. Hovmöller 図のパターンの傾きや, fk スペクトルピークの傾きである分散関係から推定される渦の平均的な位相速度は, SZBでは約 -10cm/s , USWでは約 -4cm/s であり, 負値, すなわち西向きである. これらは, Killworthら

による第1モード非分散傾圧ロスビー波の理論波速:

$$c = -\beta C_1^2 f^{-2} \quad (4)$$

(C_1 : モード1線形内部重力波の波速, β : f の緯度方向変化率)と概ね一致し, 両海域を伝播する中規模渦はロスビー波として西進する性質が強いことが確認された.

USWCの位相速度がSZBの半分程度と小さいのは高緯度に位置することとあり, 渦の起点海域であるため発達段階のロスビー波を含むことが影響していると考えられる.

一方, KEでは渦の伝播方向が定まらず, 長距離移動する渦は明確ではない. fk スペクトルには原点を中心に複数方向へ向かうピークが見られ, 正の傾きを持つ分散曲線, つまり東向き伝播が存在することが明確に確認できる. したがって, KEでは黒潮による東向きの慣性と, 黒潮から放出される東向きの渦が, 西進ロスビー波として伝播する渦と干渉しあっているものと解釈される.

4. 黒潮-中規模渦相互作用

KE域では, USWCなどを起源とする, 西進ロスビー波として北太平洋を長距離伝播する中規模渦と, 黒潮流下方向へ輸送される渦とが同時に存在することが示された. KE域における実際の渦の挙動はさらに複雑であり, 西進してきた渦は続流付近で消滅することが多く, また, 続流域で緯度方向に大きく揺動する黒潮から間欠的に放

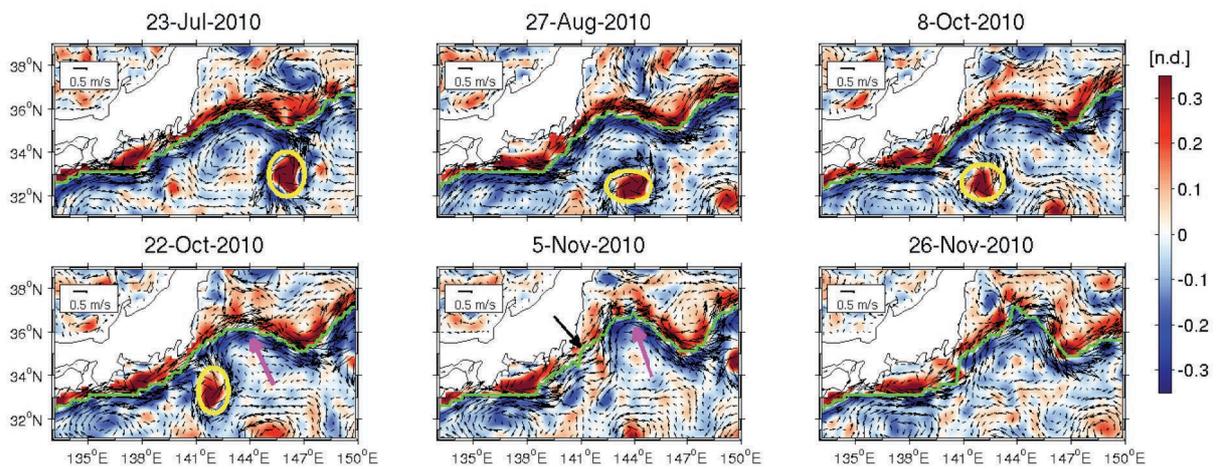


図-9 房総半島沖における中規模渦の衝突による黒潮続流の蛇行の事例（2010年7月23日～11月26日）．カラー：無次元相対高度 ξ ，緑線：黒潮流軸（流速最大の点を連ねた曲線），黒矢印：表層地衡流ベクトル．7/10に146°E, 33°Nにある黒潮流軸からの正の切離渦（黄枠）は、伊豆海嶺を迂回するように時計回りに伝播し、10/22ごろ房総沖で黒潮と衝突する．11/5～11/26には黒潮流路が茨城・福島沖に向かって北向きに偏向し、続流東側流路も変化する．

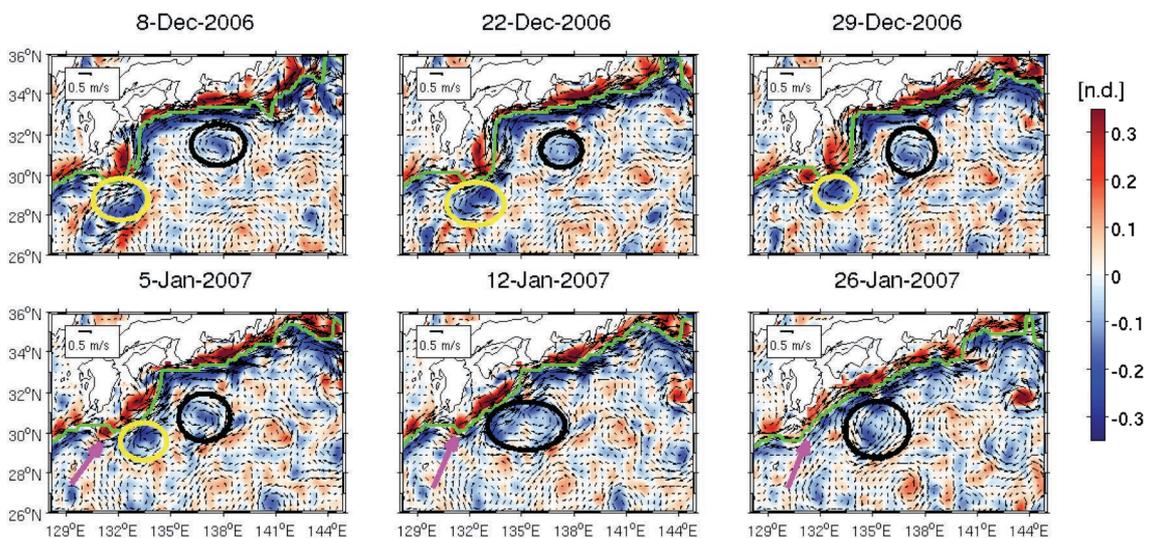


図-10 図-9と同じ．ただし、九州南東沖での中規模渦による黒潮蛇行の事例（2006年12月8日～2007年1月26日）．12/8にトカラ海峡南方および遠州灘沖にある2つの負の暖水渦（黒・黄枠）が互いに徐々に接近し、1/5以降合体する．合体した暖水渦の影響を受けて九州東岸から四国にかけての黒潮流路は全体的に北上し、直進経路へと遷移する．

出される切離渦が重畳していた．特に切離渦の渦度は強く、九州から房総へ至る太平洋沿岸の広域で黒潮と干渉しあう例が多く見られた．そこで次に、黒潮周辺における中規模渦の挙動と、黒潮流路と渦が干渉しあう事例を紹介するとともに、沿岸域への影響について考察する．

図-9の事例では、7/23に146°E付近において黒潮流軸から低気圧性の切離渦が発生し（黄枠）、西方へ伝播し始めた．8/27には144°Eまで到達したが、その後は停滞し、10/8になっても142°Eに付近に存在していた．この間に渦の位相速度は著しく低下し、短期的に進路を東向きに変えるなど、黒潮からの干渉を受けながら同一海域周辺にとどまっていた．その後、10/22に房総半島沖で黒潮に衝突し、142°E付近の流軸を北上させるとともに（マゼンタ矢印）、続流東方向へ流路変動が発達した．11/5の茨城・福島沖へ北上するような流路は、2011年3

月の東日本震災発生時から5月にかけての流路と酷似している．この流路パターンはしばしば茨城・福島沖で暖水渦を励起し、岸近くで北上流を強化するため、南下する沿岸流動を阻害する．実際、東日本震災後に福島第一原発から海洋に漏洩した溶存態放射性核種は、この機構に伴い弱化した南下流によって宮城・三陸沖に暫時滞留し、漏洩直後の期間に黒潮の移流分散作用による希釈効果を十分に享受できなかったと考えられている⁹⁾．

図-10の事例では、12/8にトカラ海峡南方にあった暖水渦（黄枠）は12/22には九州南岸で黒潮に衝突し、その後も消滅することなく東進した．同時期に遠州灘沖にあった暖水渦（黒枠）は西進し、これら2つの暖水渦は互いに徐々に接近し、1/12には合体した．合体した暖水渦は黒潮に対してENE方向流速を付加するように作用し、九州東岸から四国にかけての黒潮流路を北上させ、

黒潮流路は直進経路へと遷移した（マゼンタ矢印）．足摺岬方向へ北進する流路（12/22頃）と，潮岬方向へ直進する流路（1/26頃）では，時計回り瀬戸内海通過流に対する影響が大きく異なることが知られており⁹⁾，直進流路への遷移によって，瀬戸内海への流入量が減少するなど，瀬戸内海の流動やそれに伴う沿岸環境に対して多大な影響を及ぼしたものと考察される．

5. おわりに

北太平洋における中規模渦は，ハワイ海嶺などで顕在化する地形性シア不安定と，米国西海岸沖（USWC）の沿岸湧昇域で生じる傾圧不安定などによって発生する．EKEが最も強化される海域である黒潮続流域（KE）と亜熱帯海域（SZB）では，発生した中規模渦の渦径と渦度の関係は，慣性不安定および渦位保存則によってよく説明された．経度方向流速に対するHovmöllerおよび周波数-波数スペクトル解析から，SZB，USWCでは西向き伝播が卓越しており，中規模渦は西進ロスビー波として北太平洋を広域伝播することが確認された．一方，KEでの伝播特性は複雑であり，黒潮影響による東進成分と，西進ロスビー波の性質が混在していた．

中規模渦と黒潮が相互作用する事例解析を行い，①黒潮続流からの切離渦が房総半島沖で黒潮に干渉し，北向き流路変動を惹起した例，②九州南東沖で暖水渦が黒潮に衝突し，四国沖に発達していた別の暖水渦と合体し，九州から遠州灘に至る黒潮流路を北上・直線状に変化させた例を紹介するとともに，それらが東北沿岸や瀬戸内海の流動・海洋環境に及ぼす影響について考察した．

謝辞：本研究は科学研究費（15H00977，15H04049，15KK0207，代表者：内山雄介）の援助を受けた．また，

中国NUISTのY. Liu博士，C. Dong教授には渦抽出・追跡法のプログラムを提供いただいた．

参考文献

- 1) Nencioli, F., Dong, C., Dickey T., Washburn, L. and McWilliams, J.C.: A vector geometry-based eddy detection algorithm and its application to a high-resolution numerical model product and high-frequency radar surface velocities in the Southern California Bight, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, Vol. 27, pp. 564-579, 2010.
- 2) Usui, N., Tsujino, H., Nakano, H. and Fujii, Y.: Formation process of the Kuroshio large meander in 2004, *J. Geophys. Res.*, Vol. 113, C08047, 2008.
- 3) Chelton, D. B., Schlax, M. G., Samelson, R. M. and de Szoeke, R. A.: Global observations of large oceanic eddies, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 34, L15606, 2007.
- 4) Sadarjoen, I. A., and Post, F. H.: Detection, quantification, and tracking of vortices using streamline geometry, *Comput. Graphics*, Vol. 24, pp. 333-341, 2010.
- 5) Chaigneau, A., Gizolme, A. and Grados, C.: Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: Identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns, *Progress in Oceanogr.*, Vol. 79, pp. 106-119, 2008.
- 6) Liu, Y., Dong, C., Guan, Y., Chen, D., McWilliams, J.C. and Nencioli, F.: Eddy analysis in the subtropical zonal band of the North Pacific Ocean, *Deep-Sea Res. I*, Vol. 68, pp. 54-67, 2012.
- 7) Killworth, P. D., Chelton, D. B. and de Szoeke, R. A.: The speed of observed and theoretical long extratropical planetary waves, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 27, pp. 1946-1966, 1997.
- 8) 内山雄介：マルチクラス懸濁質輸送モデルを用いた福島沿岸域における河川由来懸濁質および懸濁態放射性核種の海洋分散について，沿岸海洋研究，Vol. 54, No. 2, pp. 159-172, 2017.
- 9) 小裕大地，内山雄介，御手洗哲司：長期高解像度再解析に基づく瀬戸内海内部流動と幼稚仔分散過程の形成メカニズムに関する研究，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 72, No. 2, I_1273-I_1278, 2016.

(2017.3.15 受付)

EDDY ANALYSIS IN THE NORTH PACIFIC USING AN EDDY-TRACKING ALGORITHM

Yusuke UCHIYAMA, Nobue OKADA and Kenta KUROSAWA

Kinematics, dynamics, and statistical nature of mesoscale oceanic eddies and their effects on the Kuroshio are investigated using a velocity-based automated eddy detection and tracking algorithm proposed by Nencioli *et al.* (2010) to apply to a 20-year long satellite altimetry dataset provided by AVISO for the entire North Pacific (NP) basin. In the NP, barotropic instability associated primarily with topographic shear and frontal baroclinic instability concurrently promote generation of mesoscale eddies. The eddy sizes and magnitudes of relative and absolute vorticity are inversely correlated, which is well explained by inertial instability and potential vorticity conservation, in particular in the Kuroshio Extension region (KE) and Subtropical Zonal Band (SZB), where eddy kinetic energy is highest in the NP. Mesoscale eddies generally propagate westward as non-dispersive, first-mode baroclinic Rossby waves in the SZB and U.S. West Coast, according to a frequency-wavenumber spectral analysis. In contrast, the eddies in the KE are rather multi-directional with notable eastward propagation due to eastward eddy shedding from the eastward-drifting Kuroshio. Furthermore, we show two selected examples, in which mesoscale eddies collided with the Kuroshio to provoke and suppress meander of its path off the continental shelf off Japan.