

四国・紀伊半島沖における台風通過に伴う 黒潮の流動構造変化について

多田 拓晃¹・内山 雄介²

¹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)

E-mail:hiroaki1174226@gmail.com

²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 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

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

バルク法熱収支スキームと海面気圧による吸い上げ効果を組み込んだJCOPE2-ROMSダウンスケーリング領域海洋モデルと気象庁GPV-MSM再解析値を用いて、我が国に上陸し甚大な土砂災害等をもたらした2014年台風18号、19号に伴う海洋応答に関する広域高解像度再解析を行った。台風通過に伴い、台風経路右側で慣性周期帯を主要な構成成分とする渦運動エネルギーが広範囲に発達したことを確認したのち、四国・紀伊半島沖を東進する黒潮に対する台風の影響を検討した。台風通過後に土佐湾特有の地形によって生じるメソスケールの後流渦が約3日周期で黒潮流軸を変動させていることを示すとともに、黒潮の流路変動に伴って紀伊水道へ流入する黒潮暖水塊の波及効果を通過熱フラックスを用いて評価した。

Key Words : typhoon, Kuroshio, near-inertial oscillations, inertial resonance, eddy shedding

1. はじめに

台風はその強い風応力や低気圧に伴う吸い上げ効果などにより、高潮災害、瀬戸内海の海水流動変化、海面及び海面下の水温低下など海洋構造を大きく変化させる¹⁾。また、風応力の作用により混合層内で発生した水平流速の発散に伴って鉛直流が生じることで、混合層下の地衡流層にも影響を及ぼすことがあり、例えば黒潮流軸の北上、流速の減少及び流向の変化を通じた流路変動を惹起する可能性がある²⁾。黒潮流路変動は海面高度 (SSH) や成層変化を引き起こし、海洋環境をさらに大きく変化させるだけではなく、黒潮系暖水が湾に突発的に流入することが原因となって、急潮被害を引き起こす可能性もある³⁾。そのため、台風通過に伴う黒潮流路変動のメカニズムを精査することは、海洋環境変化および急潮に関する予測精度の向上にも寄与することが期待される。

また、黒潮流路変動を引き起こす要素として、台風通過に伴う風向き急変による慣性振動および混合層内に励起される慣性重力波の影響が考えられる。それらに伴う流速変動の振幅は約1 m/sにも及ぶ⁴⁾ことから、黒潮流路や流軸へも十分なインパクトを与え得ると予想される。さらに、慣性共鳴は台風経路右側で生じ、海水混合を強化することから、海水温低下のメカニズムを議論する上でも重要な要素となる。台風下での海水温低下に伴い、海面からの潜熱損失が著しく促進されるため、大気下層

部の熱収支構造を変化させるなど、大気へフィードバックし、台風強度に影響を及ぼす。したがって、3次元的な海水温低下のメカニズムを知ることは台風強度の予測精度の改善につながる。これらのことから、台風通過に伴う慣性振動の発達、伝播機構および黒潮域での挙動を照査する必要がある。

このような背景の下に、本研究では瀬戸内海を含む北西太平洋海域を対象に、JCOPE2-ROMSダウンスケーリング海洋循環モデルを用いて、2014年秋期に我が国に上陸した台風18号、19号通過時における高解像度広域海洋再解析を行う (図-1)。このうち、18号 (Phanfone; 最低気圧935 hPa, カテゴリー4) は奄美大島付近を通過したのちに静岡県浜松市付近に上陸し、広域的な豪雨と土砂災害を日本各地にもたらした。19号 (Vongfong; 最低気圧900 hPa, カテゴリー5) は沖縄本島付近を通過して沖縄県西原市で高潮災害を引き起こし、その後、鹿児島県枕崎市付近に上陸して本州を縦断した。両台風はいずれも日本列島に上陸して本州を通過するコースを取ったが、18号は19号と比較してやや南寄りの進路であったため、日本近海での海洋応答に大きな差異が見られた。本稿では特に、連続して日本列島を通過した台風18号と19号による四国・紀伊半島沖を流れる黒潮流路へのインパクト、黒潮流路変動に伴う紀伊水道への暖水塊流入及び黒潮流軸への影響に着目した解析を行った。また、台風による海洋混合層内の慣性共鳴とそれに伴う近慣性内部

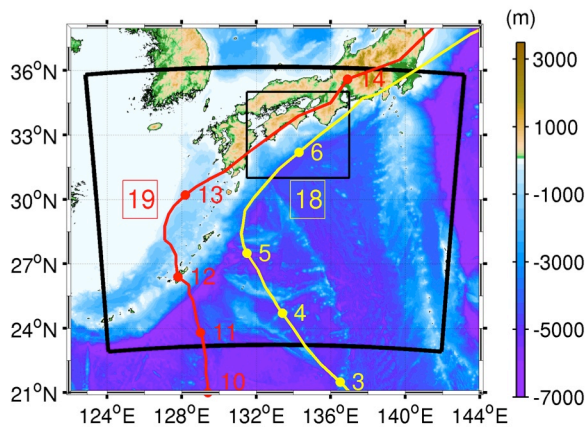


図-1 ROMS 計算領域 (外側黒枠), 図-3 に用いた領域 (内側黒枠), 2014 年台風 18 号 (黄線) および台風 19 号 (赤線) のベストトラック, 各地点通過時の 2014 年 10 月の日付 (トラック上の数字), 台風番号 (枠数字) .

重力波の発生・伝播に関する解析を行ったので, その結果も含めて報告する.

2. 解析モデル

台風の影響を発生直後の早い段階から捉えるために, 北太平洋西岸海域の広領域を対象として設計した高解像度3次元海洋流動モデル¹⁾ (図-1) の結果を用い, 新たな解析を実施した. 本モデルは, 台風を含むメソスケール気象場を比較的高精度で表現可能な気象庁GPV-MSM再解析値のモデル領域を最大限に活かした領域設定を行い, かつ瀬戸内海の流動場も再現可能とする水平解像度2 kmの高解像度広領域モデルとなっている. また, COAMPS型バルク法熱収支モジュールを組み込んだ領域海洋循環モデルROMS⁵⁾ をベースに, 圧力勾配項計算ルーチン中に海面気圧変化に伴う吸い上げ効果を追加している. ROMSモデルの初期条件および側方境界条件には3次元変分データ同化を組み込んだJCOPE2⁶⁾再解析値 (水平解像度約10 km) を空間内挿して与える. 海上風, 気温, 相対湿度, 海面気圧, 下向き長波放射にはMSM再解析値を用いる. さらに, 黒潮流路の再現性を向上させるためにTS Nudging (緩和時間スケール: $\gamma = 1/20 \text{ day}^{-1}$; 詳細は内山ら^{7,8)} 参照) を適用する. なお, 本モデルのプロトタイプは, 黒潮流路周辺の海洋再解析⁸⁾, 瀬戸内海全域に対する台風接近時の広域熱収支解析⁹⁾ などに用いられ, いずれも良好な再現性を有することを確認している. その他の詳細な計算条件等は前報¹⁾を参照されたい.

3. 近慣性振動

台風通過に伴い, 計算領域の至る場所で慣性振動によ

るものと思われる流速変動が確認された. そこで, 慣性振動周期を包含する周期21-30時間を慣性周期帯と定義し, これを渦成分と捉え, 水平流速, 水温及び塩分にバンドパスフィルターを施した. 図-2に水深5, 30, 100 mにおける慣性周期帯の渦運動エネルギー (EKE) と水温偏差を示す. 台風18号が四国沖に接近した10/5におけるEKE (図-2 (a)) を見ると, 台風経路左側では目立った発達は見られないが, 経路右側では台風後方の広範囲にわたって表層から少なくとも水深30 m程度までEKEが強化されている. 台風が解析領域外へ移動した2日後の10/7にはEKE上昇域も同様に北上し, 外洋域に加えて太平洋側沿岸域でもEKEが強くなっている (図-2 (b)). 10/5, 10/7のいずれにおいても水深100 mでのEKEは相対的に弱い. すなわち, EKEの深層への伝播は限定的であり, その大部分は混合層に残留し, 台風通過とともに散逸することが分かる. 台風通過時の経路左右での風応力の差によって経路右側では最大約3°Cの水温低下が生じたが¹⁾, その他の原因として, 混合層内で発達する慣性周期帯のEKEによる混合が同時に関与している可能性が示唆される.

一方, EKEとは対照的に, 両日の水深5 m, 30 mにおける慣性周期帯の水温偏差は小さく, むしろ水深100 mで台風経路に沿うように, 近慣性内部波によるものと考えられる最大0.4°C程度の水温偏差が見られる (図-2 (c), (d)). この近慣性内部波は, 台風の拘束から解放された後も台風経路近傍に捕捉されたまま, 通過後約1週間にわたって変動している様子が確認された. そこで次に, 近慣性内部波の発生, 伝播, 散逸を定量的に評価するために, 慣性周期帯に対するbaroclinic energy fluxes (BEF; 例えば, Nashら⁹⁾) を求めた. BEFは水平流速傾圧成分と水圧の各渦成分の相関項として次式のように表される.

$$\mathbf{F} = \left(\int_{-h}^{\eta} u'p' dz, \int_{-h}^{\eta} v'p' dz \right) \quad (1)$$

$$p'(z) = p_0 + g \int_z^{\eta} \rho'(\hat{z}, T, S) d\hat{z} \quad (2)$$

ここで, \mathbf{F} : BEF (鉛直積分値), h : 水深, η : 海水位, u', v' : 水平方向傾圧流速の渦成分, p' : 圧力変動の渦成分, p_0 : 海面気圧 (ゲージ圧を仮定), ρ' : 密度偏差, T : 水温, S : 塩分, z : 平均海面を原点とする上向き正の鉛直座標である. 慣性振動の発達が見られた紀伊水道沖の検査点 (図-4 緑星印) における BEF の時系列を見ると (図-3 (a)), 台風 18 号が紀伊水道に接近した 10/5 から BEF は南東方向へ発達し始め, 台風通過 5 日後では東西成分が反転し南西方向へ転化している. 両成分ともに台風 19 号が接近した 10/13 頃にピークを迎え, その後は徐々に減衰していく. 台風期間外 (9/1~9/30) と台風接近通過期間 (10/2~10/18) で時間平均された BEF の空間分布を比較すると (図-3 (b), (c)), 台風通過に伴っ

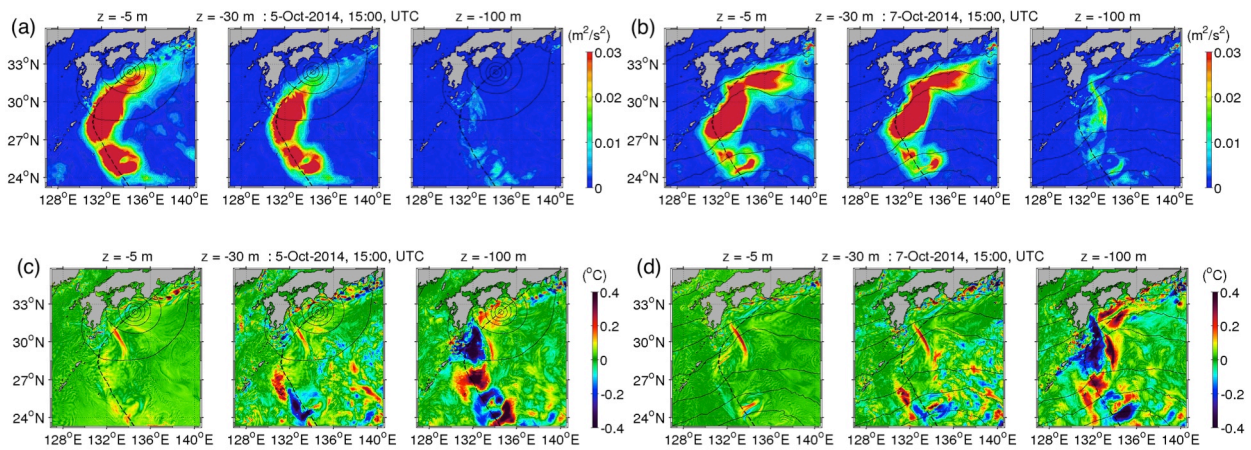


図-2 台風 18 号紀伊水道接近時 (左側, 2014 年 10 月 5 日 15:00, UTC) と台風 18 号接近時から 2 日後 (右側, 10 月 7 日 15:00, UTC) の (a, b) 渦運動エネルギー, (c, d) 水温偏差. 各パネルは左から水深 5, 30, 100 m に対応しており, 黒実線コンターは海面気圧, 点線は台風 18 号のベストトラックである.

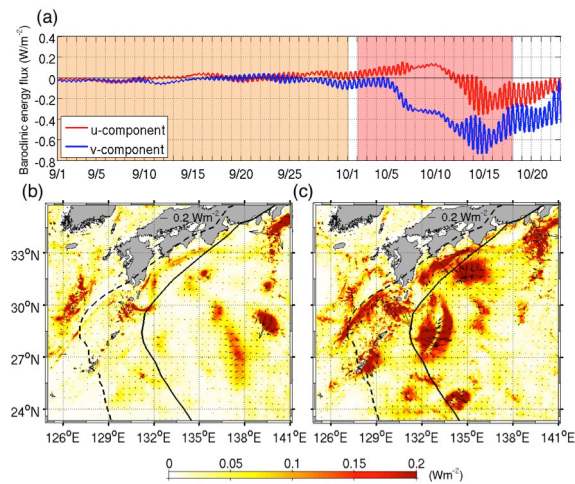


図-3 (a) baroclinic energy flux F (赤: 東西成分, 青: 南北成分) の 9/1~10/22 の時系列. 図-4 緑星印地点での値. (b) 台風期間外 (9/1~9/30, 橙ハッチ) と (c) 台風 18・19 号通過期間 (10/2~10/18, 赤ハッチ) で時間平均した BEF ベクトル (カラー: 絶対値). 実線は台風 18 号, 点線は 19 号のベストトラック.

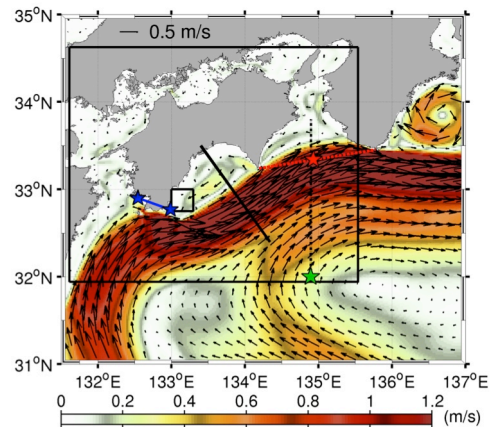


図-4 台風通過期間 (2014 年 10 月 1 日~10 月 22 日) で平均した表層流速ベクトル (カラー: 絶対値). 外側黒枠: 図-7 の表示領域, 内側黒枠: エンストロフィー算出に用いる領域 (図-8), 黒実線: 土佐湾検査線, 黒破線: 紀伊水道検査線, 赤破線: 熱フラックス解析検査線 (図-5 (e)), 青線: 渦放出振動数を求める際に用いた代表長さ (4. (2) 参照).

て台風経路周辺, 特に経路右側を中心に BEF が増大していることが分かる. EKE および水温偏差と同様に, 外洋域のみならず, 九州・四国沿岸の黒潮域を含む台風経路周辺の浅海域でも BEF は強化されている. したがって, 台風は近慣性内部波の発生・伝播を通じて, 黒潮に対して少なからぬ影響を与え得ることが予想される.

4. 台風通過に伴う黒潮流路変動

三重県水産研究所では, 漁船, 調査船, フェリー等による実測水温の分布を基準とし, 人工衛星画像等を参考にして描かれた等水温線, 各定点の潮位および調査船による流向流速観測等の情報に基づいて黒潮流路を推定し, 一日一回提供している. これを用いて台風 18・19 号が紀

伊水道付近を通過する前後の流路を比較したところ, 両台風ともに海域通過直後に黒潮が紀伊水道方向に入り込むような流路を取る様子が確認された (図は割愛). そこでここでは, 紀伊水道沖における黒潮流路変動および波及効果について解析した結果を示す.

(1) 紀伊水道周辺海域における黒潮流路変動解析

黒潮流路を含み, かつ紀伊水道内部までの海洋構造改変効果を見るために, 紀伊水道奥部から 32°N 近くまでおよそ 200 km の検査線を設け (図-4 黒破線), 水道奥部を起点として検査線に沿う南向き座標系 (x_y) での各変量の時間変化を求めた (図-5). まず, 2つの台風通過に伴って黒潮に対応する SSH 上昇域が大きく北上し, 黒潮流路が紀伊水道に接近したことが分かる (図-5 (a)).

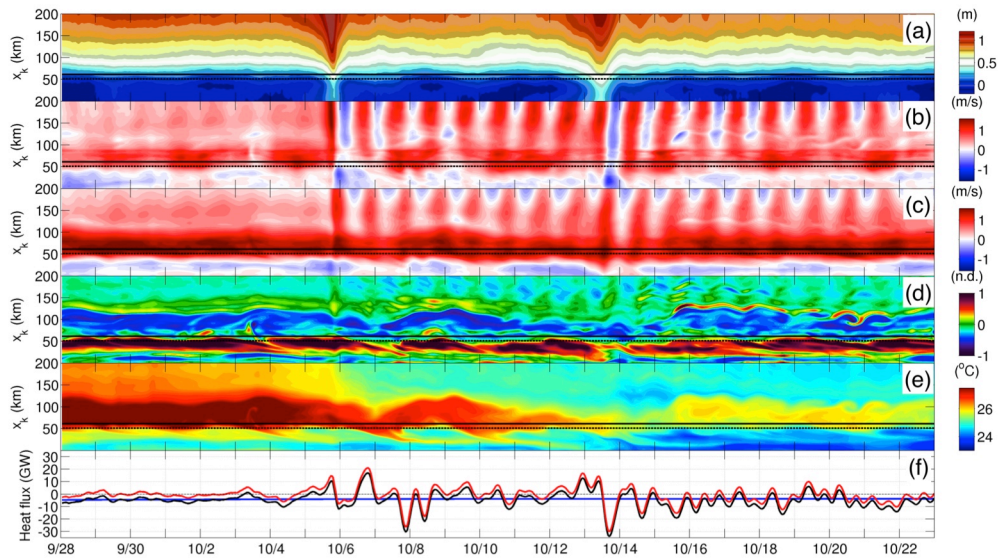


図-5 紀伊水道検査線上 (図-4 黒破線, x_k は南向き距離) における (a) 海面高度 (SSH), 水深 50m における (b) 流速の検査線平行成分, (c) 同直交成分, (d) 無次元相対温度, (e) 水温, (f) 紀伊水道 (図-4 赤破線) を通過する北向き熱フラックス (黒線), 赤線: 周期 30 日以下, 青線: 30 日以上の成分. a~e の実線: 黒潮流軸の平均的な位置, 点線: 紀伊水道の入口位置 (図-4 赤星印) に対応.

このとき, 水平流速2成分 (図-5 (b), (c)) はいずれも台風通過後1週間以上にわたり概ね日周期 (正確には慣性周期) で回転しており, その影響範囲は $x_k > 50$ km, すなわち黒潮流路のすぐ南側にまで至る (図-4). 一方, $x_k < 50$ km の北側沿岸域では, 周期3日程度の反時計回り循環流が形成されている. 無次元相対温度の時系列 (図-5 (d)) を見ると, $x_k < 50$ km の北側沿岸域では正の温度 (反時計回り), $x_k > 50$ km の南側海洋域では負の温度 (時計回り) が卓越している. 温度は台風通過前は時間的に安定しているが, 通過後は周期的に変動し, $x_k < 50$ km の正の温度は約3日周期で減衰, 発達を繰り返している. また, この正の温度は時間の経過とともに $x_k = 0$ km 方向へ伝播しており, 紀伊水道奥部に向かって北上することが分かる.

両台風の通過に伴って黒潮およびその周辺の水温は徐々に低下しており (図-5 (e)), 正の温度変動に応答して黒潮の水温分布は流軸直交方向に数日程度の周期で変動している. また, 正の温度が紀伊水道内部へ北上するタイミングでは黒潮系暖水塊が紀伊水道へ流入している. そこで, この暖水波及効果を定量的に評価するべく, 紀伊水道断面 (図-4赤破線) を通過する熱フラックス (北向きを正) を次式より求めた (図-5 (f)).

$$Q = \int \rho C_p u T dA \quad (3)$$

ここで, Q : 通過熱フラックス, ρ : 海水密度, C_p : 定圧比熱, u : 検査線直交方向流速成分 (北向き正), T : 水温, A : 通過断面積を示す. 瀬戸内海通過流は平均的には時計回りの循環流が卓越するため (例えば, 著

者ら¹⁾), 周期30日以上 of 長周期成分 (図-5 (f) 青線) は常に負 (沖への流出) となるが, 短周期成分 (赤線) は台風通過時に正に転じ, 紀伊水道から瀬戸内海方向へ一時的に非常に強い熱輸送が生じたことが確認できる.

(2) 土佐湾沖海域における流動変動メカニズム

次に, 紀伊水道で見られた黒潮流路変動のメカニズムを検討するために, 黒潮に対して紀伊水道の上流側に位置する土佐湾沖に検査線を設け (図-4 黒実線), 水深 50m における水平流速に対して回転スペクトルを求めた (図-6). 黒潮流軸位置に対応する $x_k = 80$ km 辺りを境に傾向が大きく変化しており, 紀伊水道沖の流速分布 (図-5 (b), (c)) と同様に, 沖側では時計回りの慣性周期帯, 岸側では反時計回りの約3日周期変動が卓越している.

この約3日周期変動の原因を考察するために, 四国沖を対象に, 30日以上 of 長周期成分を除去した表層無次元相対温度の空間分布を求めた (図-7). 台風18号が四国沖に最接近した10/5から足摺岬から渦が周期的に放出され, 紀伊水道方向へ輸送されている. 台風通過後の10/6には足摺岬東部の岸側で負, 沖側で正の温度が発生しているが, 次の渦放出が生じる10/10では岸側に正, 沖側に負の温度が形成され, 以降は温度の符号反転が繰り返されていた. これは, 台風通過に伴い豊後水道沖の黒潮流路が足摺岬に接近する (北上する) ことで, 岬先端からの後流渦の放出が促進されたことが原因であると考えられる. 放出された後流渦は黒潮により流下方向に輸送され, 一部は室戸岬にトラップされて土佐湾に残留しながらも, 大部分は紀伊水道にまで到達している (図-7

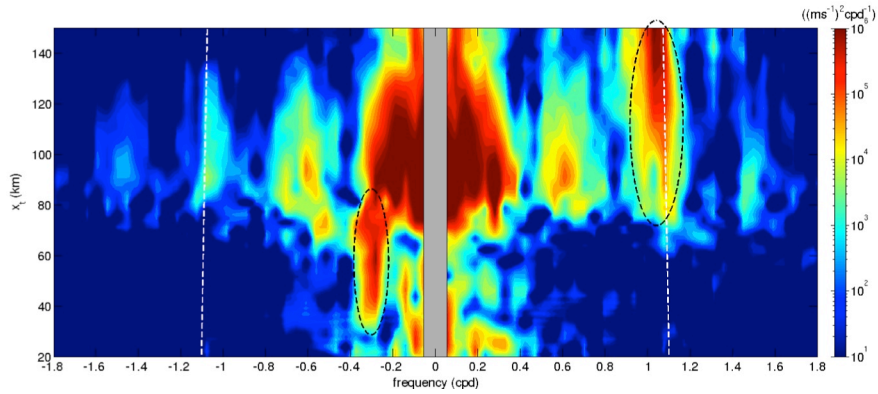


図-6 土佐湾検査線（図-4 黒実線）水深 50m の水平流速に対する回転スペクトル（横軸 0 を中心に、右側：時計回り、左：反時計回り成分、ハッチ：解析対象外の低振動数帯）。縦軸は高知海岸を起点として検査線に沿った沖向き座標 x_i 、解析対象期間は台風 18・19 号が土佐湾沖を通過した 2014 年 9 月 28 日～10 月 16 日。白点線：慣性周期。

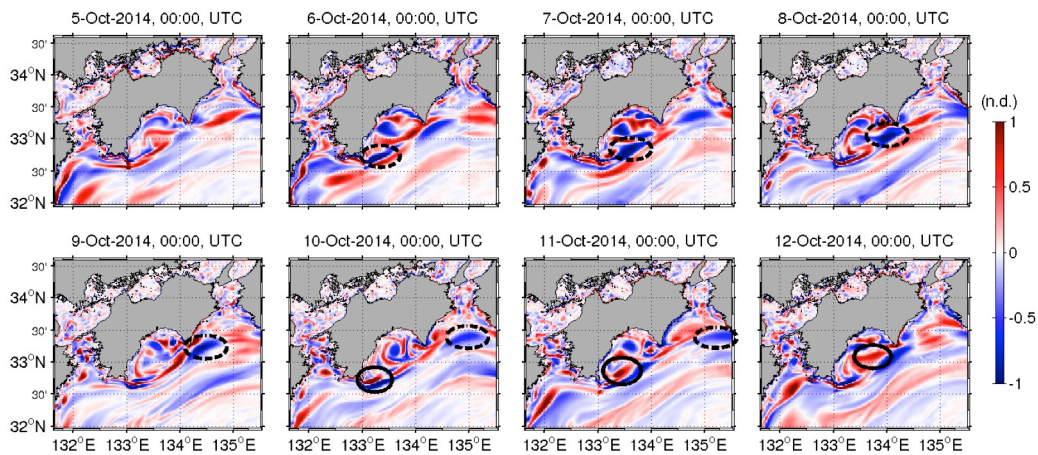


図-7 四国沖における台風 18 号四国沖通過前後（2014 年 10 月 5 日～10 月 12 日）の 30 日以上長周期成分を除去した表層無次元相対渦度の時間発展。黒破線枠は足摺岬から発生した負の渦度偏差、黒枠は正の渦度偏差の追跡結果を表す。

黒枠・黒破線枠)。後流渦の時間発展を見るために、図-4内側黒枠領域内における無次元相対渦度を正負に分解し、それぞれのエンストロフィーを求め、さらにそれらを面積積分した値の時系列を図-8に示す。台風18号通過（10/5）以前は負の渦度が支配的であり、また時間変動もわずかであるが、台風通過と前後して正の渦度が急増し、10/3～10/16の期間中に約3日周期で増減を繰り返している。そこで、この渦列の放出周波数を Bearman¹⁰⁾による特性ストローハル数 St と関連付けて考察する。Bearmanの St は地球流体中のカルマン渦列放出周期の整理にも用いられるなど、Reynolds数に依存せず、適用範囲が広いことが知られており、次式で表される。

$$f = (St \cdot U) / h \quad (4)$$

ここで、 f ：渦放出振動数、 U ：代表流速、 h ：代表長さ（シア流によるせん断層間隔）であり、実験的に $St \approx 0.181$ で一定になるとされている。平均的な黒潮流速として $U \approx 1.0$ m/s を仮定し、足摺岬を含む黒潮に対する遮蔽領域長さを考えて $h \approx 50$ km とすると（図-4青線）、 $f \approx 0.013$ cph（周期：約3.2日）を得る。すなわち、黒潮流路

北部の沿岸域における約3日周期の流速・渦度変動は、足摺岬地形背後に生じる黒潮による後流渦の放出周期として説明される。

(3) 黒潮流軸変動への影響

最後に、台風が及ぼす黒潮流軸への影響を評価する。ここでは、各水深における最大流速が発生した位置を黒潮流軸と定義する。土佐湾沖検査線（図-4 黒実線）断面を対象とし、検査線岸側の始点から最大流速発生地点までの距離 x_i の時間変動の周波数スペクトルを求め、水深別の流路変動の周波数特性を解析をした（図-9）。慣性周期での変動は表層には見られず、黒潮の底部に相当する水深400 m以深に出現している。気象庁が黒潮流軸位置の基準としている水深50 mを含め、水深500 mまでの黒潮流軸の変動は岬地形による渦放出周期と一致する約3日周期が支配的であることが明確に示されている。

5. おわりに

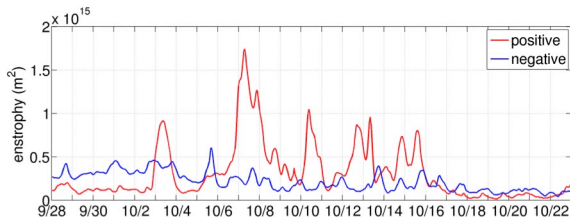


図-8 足摺岬東部海域 (図-4 黒枠) における無次元相対渦度を面積積分したエントロピー時系列 (2014年9月28日~2014年10月22日). 赤線: 正, 青線: 負の渦度成分に対する結果である.

本研究では, 四国・紀伊半島沖を中心とした北西太平洋海域を対象に, 台風通過に伴う慣性振動や黒潮流路変動などの海洋応答に関する高解像度広域海洋再解析を行った. 台風通過に伴う海面冷却や中規模渦による局所的な湧昇などによって黒潮の水温は一時的に大きく低下するが, 同時に間欠的に大規模な瀬戸内海方向への暖水波及と, それに続く数日周期の熱輸送変動が励起された. このとき黒潮の流動構造や流路も変化し, 黒潮沖側では慣性周期, 岸側では地形性後流渦の放出周期と一致する約3日周期の流速変動が卓越していた.

謝辞: 本研究は科学研究費基盤研究B (15H04049), 防災研究所一般共同研究 (26G-05), 港湾空港総合技術センター研究開発助成 (第18-5号) の援助を受けた.

参考文献

- 1) 内山雄介, 多田拓晃: 北太平洋西岸海域における台風通過に伴う海洋構造変化に関する研究, 土木学会論文 B2 (海岸工学), Vol.7, No.2, pp.1211-1216, 2015.
- 2) 周東健三: 台風 6804 号による黒潮の変化, 海の研究, Vol.10, No.2, pp.137 to 145, 2001.
- 3) 松山優治・岩田静夫・前田明夫・鈴木 亨: 相模湾の急潮, 沿岸海洋研究ノ-ト, Vol. 30, pp. 4-15, 1992.
- 4) Church, J. A., T. M. Joyce, and J. F. Price: Current and

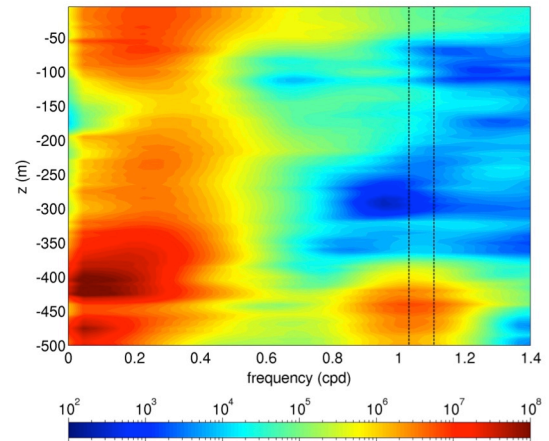


図-9 土佐湾沖検査線 (図-4 黒実線) に沿った流速直交成分最大値 (黒潮流速) 発生位置 x_i に対するパワースペクトル密度. 点線: 検査線上の慣性周期帯.

density observations across the wake of Hurricane Gay. *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 19, pp. 259-265, 1989.

- 5) 内山雄介, 西井達也: 瀬戸内海周辺海域を対象とした台風通過時の広域海洋熱収支解析, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 71, No. 2, pp. I_383-I_388, 2015.
- 6) Miyazawa, Y. and Coauthors: Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis. *J. Oceanogr.*, Vol. 65, pp. 737-756, 2009.
- 7) 内山雄介, 石井翔大, 宮澤泰正: JCOPE2-ROMS 多段ネスティングによる黒潮続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, 2012.
- 8) 内山雄介, 神吉亮佑, 高野祥子, 山崎秀勝, 宮澤泰正: 海面高度計および Argo データに基づく 3 次元密度推定値を同化した海洋流動モデルの再現精度について, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 71, No. 2, pp. I_383-I_388, 2015.
- 9) Nash, J. D., M. H. Alford, and E. Kunze: Estimating internal wave energy fluxes in the ocean, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 22, No. 10, pp. 1551-1570, 2005.
- 10) Bearman, P.W.: On vortex street wakes, *J. Fluid Mech.*, Vol. 28, pp. 625-641, 1967.

(2016.3.16 受付)

IMPACTS ON THE KUROSHIO DUE TO TYPHOONS OFF SHIKOKU ISLAND AND KII CHANNEL

Hiroaki TADA and Yusuke UCHIYAMA

A submesoscale eddy-permitting oceanic reanalysis is carried out with exploiting the JCOPE2-ROMS downscaling system forced by the JMA GPV-MSM atmospheric reanalysis with a particular attention to the two consecutive super typhoons Phanfone and Vongfong in the fall 2014. On the Pacific side of Japan off Shikoku Island, the Kuroshio main body oscillates horizontally and vertically upon collisions with near-inertial internal gravity waves maintained by inertial resonance in the mixed layer, followed by substantial alteration of the Kuroshio path in the downstream region. A velocity rotary spectrum extracts a distinct peak in the near-inertial frequency band on the offshore side of the Kuroshio with clockwise rotation due to near-inertial oscillations caused by the typhoons. On the coastal side, it peaks at around periods of about 3 days with counter-clockwise rotation, which correspond to the shedding frequency of mesoscale eddies released from Cape Ashizuri. These eddies are enhanced by the typhoons to promote oscillations of the Kuroshio axis at around the 3-day period.