台風通過に伴う瀬戸内海および 太平洋北西海域における海洋構造変化

内山 雄介1・多田 拓晃2

¹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) 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) E-mail:hiroaki1174226@gmail.com

海面気圧による吸い上げ効果およびバルク法熱収支スキームを組み込んだJCOPE2-ROMSダウンスケーリ ング領域海洋モデルを構築し,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号を対 象とした広域高解像度再解析を行った.海上風,海面気圧,海面フラックスには,台風を含む詳細な気象 場を高精度で表現可能な気象庁GPV-MSM再解析値を与えた.観測水位との比較を通じて本モデルが高潮 偏差をより正確に再現できることを確認したのち,周防灘および沖縄本島における高潮偏差発生機構の差 異について検討した.さらに,台風接近・通過に伴う広域海洋応答について調査し,瀬戸内海の海水流動 構造が短期的に大きく変化することを示すとともに,外洋における鉛直混合の強化とそれに伴う水温低下 の発生,台風経路との相対的な位置と慣性共鳴との関係などについて評価した.

Key Words : *typhoon, storm surge, inverse barometer effect, SIS (Seto Inland Sea), water exchange, vertical mixing, inertial resonance*

1. はじめに

台風が引き起こす諸現象のうち、高波と高潮は沿岸域 や海洋環境に対して重大な影響を及ぼす。高波において は、局所風による風波に加えて遠方から伝播するうねり による沿岸災害が問題となる.また、高潮は低気圧によ る吸い上げ効果に伴う強制波としての水位偏差のみなら ず、自由波として伝播する前駆波などの影響も無視しえ ない. したがって、広域での台風のダイナミクスを考慮 することが根幹的に重要となる. 高潮, 高波を対象とし た海洋再解析では、広領域を対象としつつ空間解像度を 向上させるために、計算コストが低い平面2次元の枠組 みで行われることが多い(例えば, Dietrich et al.¹⁾). し かしながら、台風はその強い風応力を通じて機械的に海 洋表層を撹拌し、海洋から大気への熱輸送の増大を通じ て鉛直混合を強化することから、広範囲にわたる海面水 温低下を引き起こす(例えば、内山ら2). さらに、台 風強度に応じて海洋内部の水温構造にも影響を与えるこ とが知られている(例えば, Wada *et al.*³⁾). 台風下での 海面水温低下は海洋からの潜熱損失を著しく促進するた め、大気下層部の熱収支構造を変化させるなど大気ヘフ 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.

北西太平洋や南シナ海で発生・発達する台風の多くは 西日本沿岸域を通過するが,海洋に対する台風の影響は 外洋域だけではなく,人口や資産が集中する沿岸域にも 及ぶ.このうち,近畿,中国,四国,九州地方にまたが る瀬戸内海では,平常時には主に豊後水道から紀伊水道 方向への時計回りの平均流が卓越していることが解明さ れつつあり⁴,その循環流によって黒潮水塊が流入・流 出し,海域環境や沿岸生態系が維持されていると考えら れる.しかしながら,瀬戸内海全体の流動構造や,外洋 と直接接する豊後水道,紀伊水道および湾・灘間の海水 交換に対する台風の影響については未解明なままである.

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(図-1)通過時における高解像 度広域海洋再解析を行う.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横断した.両台風はい ずれも日本列島に上陸して本州を縦断するコースを取っ たが、18号は19号と比較してやや南寄りの進路であった



図-1 ROMS 計算領域(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,図-10 で用いる検査線(オレンジ線),観測値(星印,点O,M,A),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).

表-1	ROMS 1	上西太平洋	モデル(の計算条件

計算期間	1/1/2013-10/22/2014		
格子数	920×720(×鉛直 32 層)		
水平空間解像度	2 km		
傾圧時間ステップ	120秒		
海上風速, 気温, 相対湿度, 気圧	JMA GPV-MSM(2 時間値)		
全天日射量	気象庁観測値を解析領域内で内挿		
海面熱フラックス	GPV-MSM を用いたバルク法		
海表面塩分 (SSS)	COADS05 (月平均)		
海底地形	JEGG500 + SRTM30_PLUS		
一级河川法县	日本河川協会による雨量・流量デ		
而又的川加里	ータベース(月平均気候値)		
側方境界条件	JCOPE2 再解析值(日平均值)		

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、台風18号と19号とを比較する形で、台風 による西日本での高潮偏差の発生機構、瀬戸内海流動へ のインパクト、外洋における正の風応力カールの発達に 伴う冷水渦の形成と鉛直混合強化に着目した解析を行っ たので、その結果を報告する.

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に,領域海洋循環モデ ルROMS(UCLAバージョン)を用いて水平解像度を2 kmとした高解像度3次元海洋流動モデリングを実施する (図-1,表-1).本研究では,COAMPS型バルク式熱収 支モジュールを組み込んだROMS²⁾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 を追加する.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JCOPE2⁵再解 析値(水平解像度約10 km)を空間内挿して与える.海 上風速・気温・相対湿度,海面気圧,下向き長波放射に

表-2 高潮偏差に対する skill socre (SS) と RMSE (m)

	吸い上げあり		吸い上げなし	
場所	SS	RMSE	SS	RMSE
御前崎(O)	0.7164	0.0940	0.0886	0.1374
室戸 (M)	0.7737	0.0932	0.0329	0.1203
油津 (A)	0.7556	0.0935	0.0869	0.1318

は、台風時を含む海上メソスケール気象場を比較的高精 度に表現可能なJMA GPV-MSM再解析値を用いる.ただ し、事前検討により、MSMによる下向き短波放射を用 いた場合に海表面温度の再現性が損なわれることが明ら かになったため、解析領域内における全天日射量の気象 庁観測値を空間的に内挿して与えることとする.さらに、 黒潮流路の再現性を向上させるためにTS Nudging ($\gamma =$ $1/20 \text{ day}^{-1}$;詳細は内山ら⁶⁷を参照)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3次元海洋 再解析⁷、瀬戸内海全域に対する台風接近時の広域熱収 支解析²⁾などに用いられ、いずれも良好な再現性を有す ることが確認されている.

3. 高潮偏差

(1) 観測値との比較

新たに構築したモデルに対してSSH分散,表層流速, 鉛直断面密度分布などに関して再現性チェックを行い, モデルによる再解析値が観測値と良好に一致することを 確認している(図面は割愛).ここでは,新たに導入し た吸い上げ効果による高潮偏差の計算精度を評価した結 果を報告する.評価指標として,Wilmott⁸によるモデル skill score(SS;0から1を取る無次元量で,1に近いほど観 測値とモデルが一致することを示す)とRMSE(標準自 乗誤差.高潮偏差の場合,単位はm)を用いる.さらに, 2014年8月1日のROMS再解析値を初期値とした吸い上げ 効果を組み込まない計算を行い,吸い上げ効果ありの場 合と比較することで,高潮偏差の再現性を評価する.

評価期間は台風18号,19号が我が国近海を通過した 2014年10月2日~14日とし,気象庁による観測値にアク セスできた静岡県御前崎,高知県室戸,宮崎県油津(図 -1中の点O,M,Aに対応)について比較した結果を表-2に,御前崎,室戸における時系列を図-2に示す.SSお よびRMSEの結果から,吸い上げ効果の導入によってSS が1桁向上するなど,高潮偏差の再現性が著しく改善さ れていることが確認できる(表-2).SS値は0.72~0.78 程度であり,さらなる改善の余地があるが,これは GPV-MSMによる気象場の再現性や,微細地形の表現が 不足していることなどが原因であると考えられる.潮位 計の設置箇所がいずれも港内であることから,台風の高 波に伴うwave set-upの影響はほとんどないものと考えら



図-2 高潮偏差の時系列.上:静岡県御前崎(O),下:高知県室戸(M)における観測値との比較結果.黒線:気象庁観測値,マゼンタ:モデル(吸い上げ効果IBEあり),青:モデル(吸い上げ効果IBEなし).



図−3 北西太平洋(左)および瀬戸内海(右. 左の拡大図) における台風18号周防灘最接近時(2014年10月5日 12時,UTC)の高潮偏差(カラー),海面気圧(コン ター),海上風速ベクトル.



れる.図-2から、台風18号、19号の両方について高潮偏 差のピーク位相には若干の誤差が見られるが、ピーク値 や平常時に偏差が負になる傾向などについては、吸い上 げ効果の導入による著しい再現性の向上が確認される.

(2) 高潮偏差の形成機構

台風18号,19号通過期間における海面水位(SSH)分 散の空間分布を求めたところ,台風経路に沿ってSSH分 散増大域が分布しており,沿岸域では伊勢湾,周防灘, 沖縄本島周辺海域での分散が大きかった(図は割愛). そこでここでは,半閉鎖性内湾である周防灘および開放 性沿岸域である沖縄県西原における高潮偏差に着目し, その形成機構について検討する.周防灘では,台風18号 最接近時であるにも関わらず高潮偏差はほとんど現れて いないが(図-3),19号では最接近より10時間前には0.5 m程度の高潮偏差が見られる(図-4).これは,台風19 号が18号よりも150 kmほど北寄りの進路を取り,周防灘



図-5 周防灘(上),沖縄県西原(下)における MSM 風速ベクトルおよび高潮偏差 ξの時系列. 黒線:計算値(吸い上げ効果 IBE あり)ζ₁,青線:気圧偏差のみによる吸い上げ量ζ₂,マゼンダ線:ζ₁-ζ₂(吸い上げ効果 IBE 以外の寄与).



図-6 瀬戸内海における検査線の位置.



図-7 瀬戸内海検査断面 A~L(図-6)における通過体積 フラックスの時系列.時計回り(AからL方向)を 正と定義.鉛直方向の1目盛りは50,000(ton/s).



図-8 台風18号接近時の北西太平洋における渦運動エネルギーEKE(左から,水深5,30,50m). コンターは海面気圧. 点線 は台風18号のベストトラック.



図-9 図-8と同じ.ただし、カラーは水温偏差.

により近い位置を通過した(図-1)ことが主たる原因で ある.19号通過時には周防灘および東側海域(伊予灘, 安芸灘など)において再接近の約36時間前から徐々に風 応力が強化され(図-5),台風による反時計回り風速場 の北側で卓越する南西方向の強風に伴う西向きエクマン 輸送が発達し,東に開口する周防灘奥方向への質量輸送 が顕著になり,吹き寄せ効果が強化されたためである.

図-5には、周防灘および西原におけるGPV-MSMによ る風速ベクトルと、高潮偏差の時系列を示している.高 潮偏差については吸い上げ効果ありの場合のモデル計算 値 ζ(黒),標準大気圧1013 hPaからの気圧偏差より求 めた吸い上げ効果のみによる高潮偏差 と(青),吸い上 げ効果を除去した高潮偏差を取り出すために両者の差: Δζ=ζ-ζ(マゼンダ)を表示している. 吸い上げ効果 以外の原因による高潮偏差ACの変動は風応力変動と良 好に対応しており, 主に吹き寄せ効果を反映していると いえる. 図-2で見た御前崎, 室戸とは異なり, 周防灘, 西原では台風19号接近時にのみ高潮偏差が著しく増大し ているが、周防灘では吹き寄せ効果が、西原では吸い上 げ効果が高潮偏差増大の原因であることが明白に分かる. 周防灘では19号最接近時の約2日前から比較的急勾配で 高潮偏差が発達するのに対し、西原では気圧低下(青線 参照)と連動して最接近から約4日前から徐々に偏差が 増加し始め、その後、最接近から約1日前に急激に偏差 が増大している. この相違は両地点における高潮増幅特

性の差に起因しており、吹き寄せが卓越する周防灘では 南西方向の強風の吹き始めからエクマン輸送が発達する までに2日ほどかかるのに対し、西原では近傍海域を通 過した台風の低気圧の影響を直接受けた水位変動が卓越 するため、気圧変動との相関が高かったものと解釈され る.一方で、太平洋沿岸に位置する開放性海岸である御 前崎、室戸では吸い上げ効果が卓越しているものと考え られることから(図-2)、台風勢力・経路、風速分布変 化、海岸地形の特性などによって台風接近に伴う高潮偏 差形成機構は大きく異なることが分かる.

4. 台風通過に伴う瀬戸内海の流動変化

瀬戸内海通過流は極めて緩慢であり、内海水の90%が 外洋水と交換するのに約1年半を要するという試算もあ る⁹.ここでは、台風による瀬戸内海の通過流変化を評 価するために、豊後水道から紀伊水道まで瀬戸内海に12 本の検査線を定義し(図-6)、時計回り環流を正とした 断面通過質量フラックスを求める(図-7).質量フラッ クスは全ての検査断面において台風接近とともに負に転 じ、全体的に時計回りから反時計回りの循環流に変化し ている.図-7から、平常時の瀬戸内海全域の平均通過流 量は毎秒約+1万トン(時計回り)と見積もられる.一方、 台風19号通過時には特に強い反時計回り還流が形成され、 その平均流量は毎秒約-8万トン(最大で毎秒約-25万ト



図-10 台風接近・通過期間における(左)水温および(右)鉛直渦動粘性係数 K,の Hovmöller 図. 縦軸:水深,横軸:時間, 実線: KPP による混合層深さ,点線:台風 18 号最接近時.上から,台風経路の左側 50 km, 25 km,経路中央,右側 25km, 50km 地点に関する結果.

ン)にも及んでいる.この平均値は、瀬戸内海において 最も流量の多い淀川の平均流量の約500倍にも相当する. したがって、台風に伴う強い反流の形成は、各灘・湾間 の海水交換や水平混合過程を改変し、瀬戸内海の環境に 少なからぬ影響を与えている可能性があると考えられる. また、台風18号、19号による通過流量の差は台風経路の 違いに依存した風速変動の差に起因しているものと推察 される.すなわち、3.(2)節で検討したように、北寄り に進路を取った19号接近時には強い南西方向風がより長 時間安定して連吹したため、エクマン輸送によって反時 計回りの環流がより強く形成されたと解釈される.した がって、高潮偏差の形成機構に加えて、瀬戸内海全体の 流動構造およびそれに伴う海水交換に対しても、台風勢 力、経路、地形などの影響を注意深く考慮する必要があ ることが明白となった.

5. 外洋におけるメソスケール海洋応答

次に、台風18号による外洋でのメソスケールの海洋応答を評価する.台風に伴う乱流統計解析を行うために、 周波数low-passフィルタにより30日以上の低周波数成分

を除去した残差を台風擾乱成分と定義した. 台風18号に よる渦運動エネルギー(EKE,図-8)および水温偏差 (図-9)のスナップショットを見ると、台風進行方向の 下手側(南側)かつ経路右側の広い範囲でEKEが増大し、 同時に顕著な水温低下が生じていることが分かる.この 傾向は海洋表層だけではなく、少なくとも水深50mまで 見られる、海面下の海洋応答を精査するために、18号経 路上に検査線(図-1オレンジ線)を設け、台風中心およ び左右に25km, 50km離れた地点に検査点を設けて水温 分布およびKPPモデルによる鉛直渦動粘性係数K,分布を 求めた(図-10). 台風通過に伴い, 混合層内および下 層付近の水温は急減し、混合層は深くなり、K、が増大し ている. これらの傾向は台風経路の右側ほど顕著に見ら れ,右側50 km地点では,水温は約3℃低下し,K_vは水深 約80 mまで有意な値を取り、最大値としては左側50 km 地点の約2倍に達する.このとき、右側50 km地点では混 合層深さは水深約90mまで拡大しているが、この値は経 路左側よりも約30mも深い. さらに、Kvには日周期程度 の振動が見られるが、その卓越周期は24時間ではなく慣 性周期に近い約27時間であることから、近慣性振動によ るものと考えられる. しかも台風経路右側で鉛直混合が

強化されていることから,慣性共鳴¹⁰が生じていたこと が強く示唆される.以上のことから,台風による反時計 周りの風速分布(正の風応力カール)に対応した正のメ ソスケール冷水コア渦が発達し,地衡流的な下層冷水塊 の湧昇と,強風による機械的な鉛直混合強化が生じ,そ れらが近慣性振動の影響によって台風通過後1週間程度 継続していたことが分かる.

6. おわりに

本研究では、瀬戸内海を含む北西太平洋を対象に、台 風接近、通過に伴う海洋応答に関する高解像度広域海洋 再解析を行った. COAMPS型熱収支計算ルーチンおよび 吸い上げ効果の導入によって、高潮偏差の推定精度など が著しく向上することを確認した. さらに、周防灘と沖 縄本島を比較する形で台風勢力、経路、地形などに応じ て高潮偏差の発達機構が大きく異なることを示すととも に、台風接近に伴う瀬戸内海の海水流動の変化や外洋に おけるメソスケール応答について幾つかの重要な知見を 得ることができた...

謝辞:本研究は科学研究費基盤研究C(24560622),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

 Dietrich, J. C., M. Zijlema, J. J. Westerink, L. H. Holthuijsen, C. Dawson, R. A. Luettich Jr., R. E. Jensen, J. M. Smith, G. S. Stelling, G. W. Stone: Modeling hurricane waves and storm surge using integrallycoupled, scalable computations, *Coastal Eng.*, Vol. 58, pp. 45 – 65, doi:10.1016/j.coastaleng.2010.08.001, 2011.

- 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.2,2015.
- 3) Wada, A., T. Uehara, and S. Ishizaki: Typhoon-induced sea surface cooling during the 2011 and 2012 typhoon seasons: observational evidence and numerical investigations of the sea surface cooling effect using typhoon simulations, *Progress in Earth and Planetary Sci.*, Vol. 1:11, 2014.
- 内山雄介,栗山貴生,宮澤泰正:外洋影響を考慮した瀬 戸内海周辺海域の流動再現と黒潮流路変動の効果につい て、土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.68, No. 2, p. I_441-I_445, 2012.
- 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.
- 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.
- 7) 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 同化させ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.2,2015.
- Wilmott, C. J.: On the validation of models, *Phys. Geogr.*, Vol. 2, pp. 184-194, 1981.
- 9) 上嶋英機,橋本英資,山崎宗広,宝田盛康:瀬戸内 海水と外洋水の海水交換-瀬戸内海水理模型による海 水交換実験-,第32回海岸工学講演会論文集,pp. 742-746,1985.
- 10) Price, J. F.: Upper Ocean Response to a Hurricane. J. Phys. Oceanogr., Vol. 11, pp. 153–175, 1981.

(2015.3.18 受付)

MESOSCALE OCEANIC RESPONSES TO TYPHOONS IN THE NORTHWESTERN PACIFIC

Yusuke UCHIYAMA and Hiroaki TADA

Typhoons alter the upper ocean dynamics and thermal structure, giving rise to feedback on the atmosphere. Intense ocean surface wind and barometric effects induce rough waves and storm surges that occasionally cause severe coastal disasters. For rigorous oceanic modeling under typhoon conditions, we implement the inverse barometer effect and the COAMPS bulk formula into ROMS. A submesoscale eddypermitting oceanic modeling is configured at a horizontal resolution of 2 km based on the JCOPE2-ROMS downscaling system forced by the JMA GPV-MSM atmospheric reanalysis. A retrospective, synoptic reanalysis is carried out with a particular focus on the two consecutive super typhoons Phanfone (#1418, Category 4, the lowest pressure was 935 hPa) and Vongfong (#1419, Cat. 5, 900 hPa) in the fall 2014. These typhoons abruptly amplify the volume outflux from the Seto Inland Sea (SIS) at the Bungo Channel, leading to the pronounced counter-clockwise circulation that opposes the clockwise overall SIS circulation under the normal condition. The model also successfully reproduces increased eddy kinetic energy below the typhoons with intense cyclonic positive vorticity driven by torque of the wind stress curl, not only at surface but also at depth down to about 100 m deep. These cyclones are cold-core mesoscale eddies with SST decrease by about 3°C associated with prominent mixed layer deepening.