

大気・海洋・波浪モデルを用いた近年の日本に上陸した顕著台風に対する沿岸災害ハザード影響評価

課題責任者

森 信人 京都大学・防災研究所

飯田康生^{*4}, 二宮順一^{*2}, 後藤浩二^{*1}, 松本圭太^{*3}, 片海健亮^{*3}, 志村智也^{*4}, 撫佐昭裕^{*1,5}, 竹見哲也^{*4}, 森 信人^{*4}

^{*1}日本電気株式会社, ^{*2}金沢大学理工研究域, ^{*3}NEC ソリューションイノベーション株式会社, ^{*4}京都大学防災研究所, ^{*5}東北大学サイバーサイエンスセンター

気候変動に伴う台風災害の激甚化と関連する沿岸部の災害の拡大が懸念されている。地球温暖化時の台風による沿岸災害の定量的評価と気候変動適応・緩和に加え、沿岸における高波・高潮・強風災害に対する減災のための定量的評価を目的に、大気海洋波浪結合モデル(COAWST)を地球シミュレータ向けに開発してきた。そのモデルを用いて、海洋モデル・波浪モデルの有無による台風発達に対する影響を調べる感度実験を行った。

キーワード：大気海洋波浪結合モデル, 台風 Jebi, 大気海洋相互作用

1. はじめに

台風は、洪水、地滑り、高波、高潮の原因となる主要な気象災害の1つである。台風の大きさ、強度、経路によっては、熱帯・亜熱帯および中緯度の広い範囲に壊滅的な被害をもたらす。さらに、気候変動に伴い、台風がより強力になり、災害の規模の拡大が懸念されている[1]。このような台風による災害を軽減および防止するためには、正確な数値予報モデルに基づくタイムリーかつ適切な警報、減災効果のあるインフラ(例えば、防波堤)の設置などが必要である。

本課題の目的は、台風による沿岸災害を統合的に評価するため、高解像度の大気海洋波浪結合モデルを開発することにある。モデルの統合的な評価には、多くの再現実験を行う必要があり、地球シミュレータ(ES4)を構成する計算機の効率的利用が必要となる。ES4の計算機リソースとしては、ベクトル計算機であるVE搭載ノード(ES4VE)だけでなく、スカラ計算機であるCPUノード(ES4CPU)についても利用可能である。昨年度は、ES4のリソースを最大限有効活用するため、COAWST[2] v3.7のES4VEおよびES4CPUへの最適化を行った[3]。

今年度は、昨年度ES4向けに最適化したCOAWST v3.7を用いて、2018年の台風21号(Jebi)を対象に、大気と海洋・波浪との間の相互作用の中で、特に波浪に依存する海面粗度のパラメタリゼーションに関する感度実験を行った。

2. 大気海洋波浪結合モデルによる感度実験の設定

高解像度大気海洋波浪結合モデルには、ES4向けに最適化したCOAWSTモデルをベースとして使用する。COAWSTは、大気・海洋・波浪の各モデルコンポーネントとそれらを結合するツールキット(MCT[7])から構成されている。大気モデルコンポーネントとしてWRF[4]、海洋モデルコンポーネントとしてROMS[5]、波浪モデルコンポーネントとしてWaveWatch3[6](以降、WW3)を使用した。

各モデルコンポーネントの計算領域と格子数をそれぞれ

図1及び表1に示す。WW3のグリッドはROMSのグリッドより格子数を一つ多く取っている。それぞれ領域のサイズが異なるため、球面座標再マッピング補間(SCRIP)を行っている。表2に示すようにWRFの初期値・境界値には、NCEP FNLを使用し、ROMSの初期値・境界値にはHYCOMの結果を使用した。WW3の側方境界値は放射境界、初期値についても、Fetch制限付きJONSWAPスペクトルをモデル内部生成しており、初期値・境界値はモデル外部からの値は使用していない。

Jebiを対象とした感度実験の計算開始時刻は2018年9月2日0時(UTC)とし、積分時間は60時間とした。WRFの物理スキームは表3の通り、大気境界層(Planetary Boundary Layer: PBL)スキームはYSU, MYJ, MYNNの3つのスキームをそれぞれ用いて計算を行い、台風の経路・最低気圧・最大風速への影響を調べた。また、積雲対流パラメタリゼーションとしてKain-Frischスキームの使用有無による違いを調べた。WW3を結合計算するときは、海面粗度のパラメタリゼーションとして、大気単独モデルで一般的な風速依存Charnokの式に加えて、波浪依存のTaylor and Yelland[8](TY), Drennan et al.[9](DRN), Oost et al.[9](OOST)をそれぞれ用いて計算を行い、影響を調べた。大気モデル(WRF)単独での実行以外にも、大気海洋結合モデル(WRF-ROMS)、大気波浪結合モデル(WRF-WW3)及び大気海洋波浪結合モデル(WRF-ROMS-WW3)をそれぞれ実行し、海洋モデルおよび波浪モデルによる台風への影響を調べた。結合モデルにおけるモデル間のデータ交換時間はいずれも600秒とした。

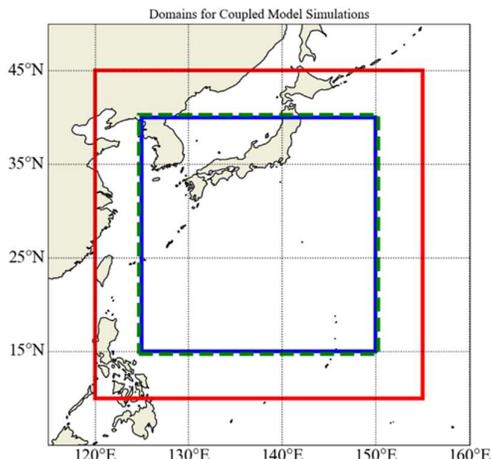


図 1 結合モデルにおける計算領域設定. 赤実線は WRF, 青実線は ROMS, 緑破線は WW3 の計算領域.

表 1 大気海洋波浪結合モデルの計算設定

	WRF	ROMS	WW3
解像度	9 km	9 km	9 km
格子数	390 × 390	307 × 307	308 × 308
鉛直層数	56	40	-
タイムステップ	30	30	120
方向	-	-	24
初期周波数	-	-	0.04118

表 2 初期値・境界値の時空間解像度

	WRF	ROMS	WW3
初期値・境界値	NCEP FNL	HYCOM	-
空間・時間解像度	0.25°, 6時間	1/12°, 3時間	-
地形	USGS GTOPO30	GEBCO	GEBCO

表 3 WRF の物理スキーム設定

WRF物理スキーム	オプション
PBL	YSU, MYJ, MYNN
積雲対流パラメタリゼーション	Kain-Fritsch
表層スキーム	Eta Similarity
放射スキーム	RRTMG
雲微物理	WSM6
地表面スキーム	5-layer Thermal Diffusion

3. 実験結果

大気モデル(WRF)単独での実行にて, 3 つの PBL スキームと積雲対流パラメタリゼーションの有無による台風の経路・最低気圧・最大風速への影響を調べた(図 2)。

台風の経路(図 2 の左図)については, 3 つの PBL スキームのいずれも日本気象庁(Japan Meteorological Agency: JMA)および米軍合同台風警報センター(Joint Typhoon Warning Center: JTWC)のベストトラックとも良い一致が見られた。

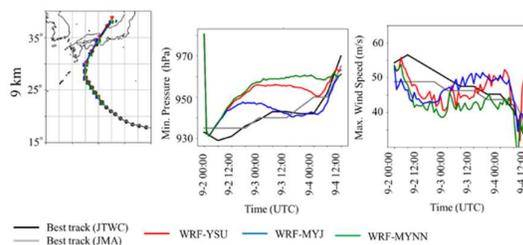


図 2 Jebi を対象とした WRF の PBL スキームによる台風強度に対する影響を確認した結果である. 左が経路, 中央が最低気圧, 右が最大風速である.

中心気圧(図 2 の中央図)については, MYJ スキームが JMA 及び JTWC のベストトラックのどちらとも最も整合した。一方で YSU スキームと MYNN スキームはいずれも中心気圧を過小評価する結果となった。最大風速(図 2 の右図)については, MYNN スキームは過小評価, YSU と MYJ スキームが過大評価であった。MYNN スキームは本来高解像度向けスキームであるため中心気圧および最大風速を過小評価した可能性が考えられる。今回の水平解像度 9 km での WRF 単独での実験では, MYJ スキームを用いたときが, 台風の経路および強度(最低気圧・最大風速)の再現性が最も良かった。そこで海洋および波浪モデルを結合した場合の実験では, WRF の PBL スキームには MYJ スキームを用いた。

海洋モデルと波浪モデルを結合し, WW3 の海面粗度に関するパラメタリゼーションと積雲パラメタリゼーションの考慮の有無による影響を調べた(図 3)。台風経路については, 積雲パラメタリゼーションと結合計算による影響はほとんど見られなかった。中心気圧についても積雲パラメタリゼーションによる影響はほとんどなかった。一方, 海洋モデルの結合計算(WRF-ROMS)では, 強度が大幅に低下している。波浪モデルの結合計算(WRF-ROMS-WW3, WRF-WW3)では, 海洋モデル結合による強度の低下を抑制していることが分かる。最大風速についても, ベストトラックと比較すると, WRF 計算では過大評価, WRF-ROMS 計算では過小評価しているのに対し, WRF-ROMS-WW3 ではベストトラックにより整合している。つまり波浪結合によって海洋結合の強度低下を抑制していると考えられる。大気・海洋結合モデルによる台風強度の低下の要因を調べるため, まず台風通過に伴う海面水温低下量を確認した。図 4 には WRF-ROMS 実験の結果とひまわり 8 号の観測結果を示す。図 4 の水温偏差は計算における最後の時刻と初期時刻の海面水温偏差である。検証データとしては, ひまわ

り 8 号の衛星観測データである。ひまわり 8 号の観測の場合、雲で覆われている時は観測できず、灰色の部分はデータの欠損を表している。図 4 から分かるように、Jebi の通過に伴う海面水温低下は、台風経路に沿って、進行方向に対し右側が冷えている。よく低下している海域は 2°C 以上冷えており、3°C 以上低下している海域も存在する。観測と比較すると、外洋だけでなく沿岸部に着目すると、モデルと観測ともに海面水温低下の範囲および程度が一致しており、海面水温低下はよく表現できている。波浪を結合することによる海面水温変化の影響を調べるために、WRF-ROMS-WW3 結合実験と WRF-ROMS 結合実験の海面水温偏差の差分を図 5 に示す。計算領域の境界付近や沿岸付近では正の偏差があり、波浪結合した場合の方が WRF-ROM 結合モデルに比べて暖かくなっている。ただし、OOST は海面水温変化のパターンが TY や DRN と異なる。OOST では、乱流運動エネルギー(Turbulent Kinetic Energy: TKE)への影響を考慮しないことが原因として考えられる。

台風通過に伴う海面水温低下の主な要因は海洋の鉛直混合と考えられる。図 4 でよく冷えた海域の北緯 28.47 度における鉛直断面海水温の構造を図 6 に示す。Jebi が通過する前の海水温は約 28–30°C であり、混合層の深さは 25–30 m である。通過時には海水が冷え始めて、上層で水温低下、混合層の深さあたりで水温上昇がみられるため、鉛直混合が起こっている。混合層は深化し約 75 m になっている。さらに 12 時間後には、黒円の領域に着目すると、冷たい海水が湧昇していることが示されている。台風通過時でも海水温の低下は 2–3°C 程度あり、さらに通過後の湧昇によって、3°C 以上の低下がみられる。この水温低下の様子は、WRF-ROMS 結合実験における強度変化とも整合的な結果である。Jebi において海面水温が 3°C 以上のよく冷えている海域は、通過後に湧昇が起こることによって冷却が進行したと考えられる。次に北緯 28.4 度、東経 133.7 度における Jebi 通過時の海面水温および風速、有義波高の時間変化を図 7 に示す。この地点では、海水温は風速が強くなる時間から水温が低下し始め、風速 25 m/s を超えるあたりから急激に水温が低下している。実験間の差はあるが、約 3°C の低下が起きている。この時、WRF 実験では海洋応答を考慮しないため海水温が全く冷えない。台風にとって、26°C 以上の海面水温が重要であるが、結合実験ではその水温を下回り、WRF 実験では上回ったままである。これは台風の発達にとって非常に重要なパラメータであるため、大気モデルだけでは、強度を過大評価する可能性があると考えられ

る。しかし、今回の数値実験では、WRF 実験の中心気圧がベストトラックに整合的ではあった。そのため下部境界条件において現実とは遠い条件であるにもかかわらず、整合した点も今後の台風モデリングの問題点として挙げられる。波浪も 12 m 程度まで発達している。

台風通過に伴う海面水温低下により海洋から大気への熱供給が減少し、台風強度へ影響したことが考えられる。そこで各実験における熱熱フラックスを調べた。図 8 は潜熱・顕熱フラックスの空間分布である。図 8 では、負の値は海洋から大気への潜熱、顕熱供給を表す。図 5 で海面水温には、WW3 を結合する際の海面粗度パラメタリゼーションの差は台風周辺では 1°C 未満とほぼ差がなかったことから、海洋応答を受けた結果の潜熱フラックスや顕熱フラックスにモデル間の差に大差がなく、台風の通過したところ(進行方向の後側)では正の値を取っていることから大気から海洋へ潜熱供給があることになる。一方で台風前面では海洋から大気への潜熱フラックス供給が大きいがわかる。図 9 は、台風の最大風速半径(Radius of Maximum Wind: RMW) の 150% の半径の円領域で平均した台風通過時の潜熱フラックスと顕熱フラックスの時間変化である。正が海洋から大気への熱供給を表している。赤色が WRF、青色が WRF-ROMS、緑色が WRF-ROMS-WW3-TY、黄色が WRF-ROMS-WW3-DRN、紫色が WRF-ROMS-WW3-OOST である。台風強度が一番強い WRF 実験における潜熱フラックスが高いことを期待していたが、Jebi では実験間の差が小さく、大きな差は見られなかった。しかし潜熱、顕熱フラックスの変化は、海面水温変化だけでなく、大気側の状態にも依存するため、今後さらなる検討が必要である。

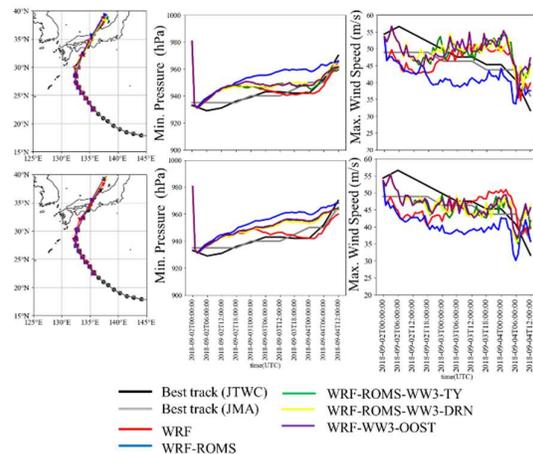


図 3 Jebi を対象とした WRF の PBL スキームに MYJ を使

用した場合の結果である。上段が積雲パラメタリゼーション考慮なし、下段が積雲パラメタリゼーション考慮ありである。

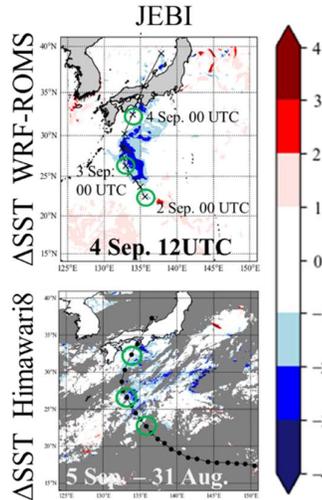


図 4 Jebi を対象としたにおける台風通過前後の海面水温偏差。上段は WRF-ROMS 結合計算で得られた海面水温偏差，下段はひまわり 8 号による海面水温観測による海面水温偏差。

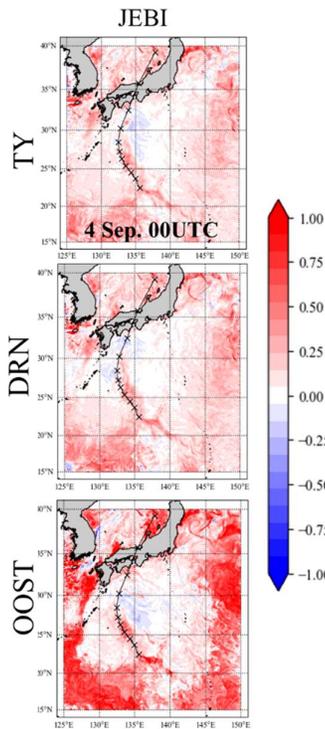


図 5 Jebi における台風通過前後の海面水温偏差の波浪を考慮した時の水温差。上段が WRF-ROMS-WW3-TY，中段が WRF-ROMS-WW3-DRN，下段が WRF-ROMS-WW3-OOST。

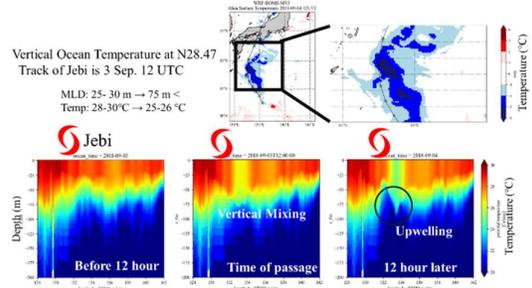


図 6 Jebi 通過時における鉛直海水温変化。北緯 28.47 度における通過時とその 12 時間前後における海水温。

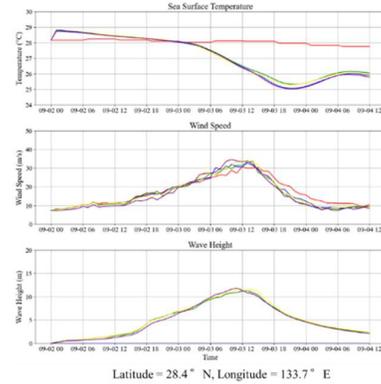


図 7 Jebi 通過時における海面水温，風速，有義波高の時間変化（鉛直海水温変化の近接点）。赤色が WRF，青色が WRF-ROMS，緑色が WRF-ROMS-WW3-TY，黄色が WRF-ROMS-WW3-DRN，紫色が WRF-ROMS-WW3-OOST。

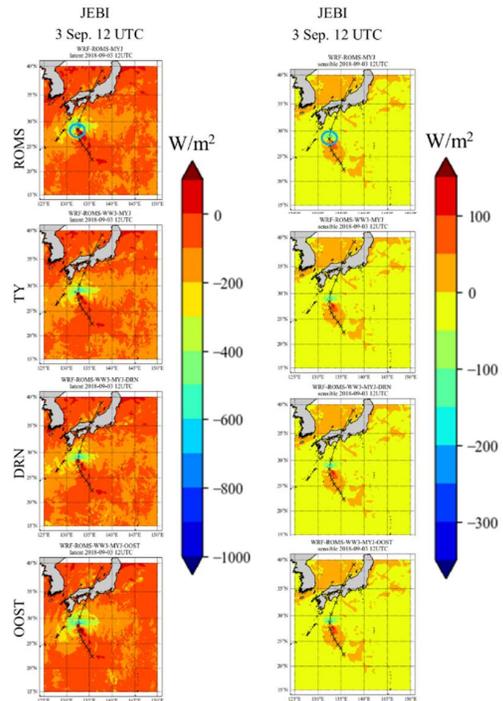


図 8 Jebi における台風通過時の熱フラックスのスナップ

プシヨット。海洋モデルのアウトプットであるため下向きが正である。左側が潜熱フラックス、右側が顕熱フラックスである。1 段目が WRF-ROM, 2 段目が WRF-ROMS-WW3-TY, 3 段目が WRF-ROMS-WW3-DRN, 4 段目が WRF-ROMS-WW3-OOST。水色の円は台風の位置を示す。

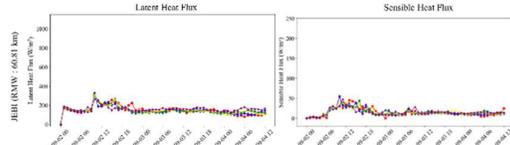


図 9 Jebi における台風通過時の潜熱フラックスと顕熱フラックスの時間変化。左が潜熱フラックス、右が顕熱フラックスである。WRF のアウトプットであるため上向きが正である。赤色が WRF, 青色が WRF-ROMS, 緑色が WRF-ROMS-WW3-TY, 黄色が WRF-ROMS-WW3-DRN, 紫色が WRF-ROMS-WW3-OOST。

4. まとめと今後の予定

大気モデルの物理スキーム(PBL スキームと積雲パラメタリゼーションの有無)の感度実験と海洋モデル・波浪モデルの有無による感度実験を行った。今回の水平解像度 9 km での感度実験では、PBL スキームとして MYJ スキームを用いた場合が最もベストトラックとの整合的であった。海洋モデルと大気モデルを結合することにより、台風強度は大幅に低下した。さらに波浪モデルを結合することにより、海洋モデル結合による強度低下を抑制することを確認した。大気・海洋結合モデルによる台風強度の低下は、海面の鉛直混合や湧昇による海面水温低下により、海洋から大気への熱供給が減少したことが原因と思われたが、大気モデル単体と大気・海洋結合モデルの熱フラックスには大きな差は見られなかった。潜熱、顕熱フラックスの変化は、海面水温変化だけでなく、大気側の状態にも依存する。また、台風強度に関しては、熱以外に運動量フラックスにも依存するため、今後さらなる検討が必要である。

今後は、過去の日本に襲来した顕著な台風事例に対して、ES4 向けに高速化した COAWST ver3.7 を用いてより高解像度での感度実験を行い、物理スキームや海洋・波浪モデルの結合の有無による影響について検証を進める予定である。

謝辞

本研究の一部は、JST ムーンショット「台風制御による被害軽減の推計」により実施された。

文献

- [1] Murakami,H.,Mizuta,R. and Shindo,E.,“Future changes in tropical cyclone activity projected by multi-physics and multi-SST ensemble experiments using the 60 km-mesh MRI-AGCM,” *Climate Dynamics*,39,2569–2584,(2016).
- [2] COAWST git repository
<https://code.usgs.gov/coawstmodel/COAWST.git>

[3] .Goto,K.,Iida,K.,Ninomiya,J.,Matsumoto,K.,Kataumi,K.,Shimura,T.,Musa,A.,Takemi,T.,and Mori,N.,“Coastal Hazard Impact Assessment of Recent Outstanding Typhoons that Made Landfall in Japan Using Atmosphere-Ocean-Wave Modeling” *Annual Report of the Earth Simulator*,April 2023–March 2024,I-4-1 – I-4-4,(2024).

[4] Skamarock,W.C.,Klemp,J.B.,Dudhia,J.,Gill,D.O.,Barker,D.,M.,Duda,M.G.,Huang,X.-Y.,Wang,W.,and Powers,J.G.,“A Description of the Advanced Research WRF Version 3,” *NCA R Tech.Note NCAR/TN-475+STR*,(2008).<http://dx.doi.org/10.5065/D68S4MVH>

[5] Shchepetkin,A.F.and McWilliams,J.C.,“The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit,free-surface,topography-following-coordinate oceanic model,” *Ocean Modelling*,9(4),347–404,(2005).

[6] The WAVEWATCH III Development Group (WW3DG),User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 6.07,Tech.Note 333,NOAA/NWS/NCEP/MAB,College Park,MD,USA,(2019).

[7] Larson,J.,Jacob,R.,& Ong,E.,“The Model Coupling Toolkit: A New Fortran90 Toolkit for Building Multiphysics Parallel Coupled Models,” *The International Journal of High Performance Computing Applications*,19(3),277–292,(2005).
<https://doi.org/10.1177/1094342005056115>

[8] Taylor,P.K.and M.J.Yelland,“The dependence of sea surface roughness on the height and steepness of the waves”,*J. Phys.Oceanogr.*,31,572-590,(2001).

[9] Drennan,W.M.,P.K.Taylor,and M.J.Yelland,“Parameterizing the sea surface roughness”,*J.Phys.Oceanogr.*,35,835-847,(2005).

[10] Oost,W.A.,Komen,G.J.,Jacobs,C.M.J.,& Van Oort,C.,“New evidence for a relation between wind stress and wave age from measurements during ASGAMAGE.”,*Boundary-Layer Meteorology*,103(3),409-438,(2002).