

気象モデルにおける4次元データ同化およびネスティングが 高潮推算精度に及ぼす影響に関する研究

Effectiveness of 4-Dimensional Data Assimilation and Nesting in an Atmospheric Model on Accuracy of Storm Surge Predictions

安田誠宏¹・山口達也²・金 洙列³・森 信人⁴・間瀬 肇⁵

Tomohiro YASUDA, Tatsuya YAMAGUCHI, Soo Youl KIM, Nobuhito MORI and Hajime MASE

The present study examines the prediction accuracy effects of 4-dimensional data assimilation (nudging) and nesting schemes of the Weather Research and Forecasting model (WRF) on the storm surges. Applying both nudging and nesting in the WRF simulation enabled us to predict successfully not only the barometric depression and increase of wind speed around a typhoon route, but also the meteorological field of surrounded area. It has been found that the use of WRF outputs applying both with nudging and nesting would give accurate predicting power for both maximum level and phase of tidal elevation in the storm surge simulations.

1. はじめに

コンピュータ性能の飛躍的な発達に相俟って、気象モデルも用いる方程式系が2次元渦度方程式から準地衡風方程式、プリミティブ方程式、さらには非静水圧方程式へと精密化し、計算対象範囲も地域から半球、全球へと拡がり、空間解像度も全球数km格子にまで向上した。全球気象モデルGCMは、現業の天気予報はもちろんのこと、気候変動予測にも用いられている。GCMの発展に呼応するように、領域気象モデルRCMも目覚ましく発展しており、今やその空間解像度は1km以下である。

高潮推算においては、風速や気圧等の気象場の再現性が重要である。これまでの高潮推算では、地形の影響を無視した経験的台風モデルによる気圧と風速が主として用いられてきた。しかしながら、今後は、高精度化・高解像度化されたGCMによる客観解析データやRCMによるメソ気象解析結果を、高潮モデルに適用していくことが主流になると考えられる。河合ら（2007）は、局地気象モデルMM5を用いて瀬戸内海沿岸の高潮計算を行い、局地気象モデルによって内湾海上風の推算精度を高めることができ、高潮推算精度の向上に繋がると述べている。また安田ら（2008）は、メソ気象モデルWRF（Weather Research and Forecasting model; Skamarockら、2008）を用いて、瀬戸内海を対象に高潮再現計算を行い、潮位変動条件とWRFを用いた推算結果は、台風モデルを用いた結

果よりも、高潮による水位上昇が精度良く再現されることを示している。

本研究では、気象モデル、潮汐モデル、高潮モデル、波浪モデルの各物理モデルを有機的に連携させたマルチモデルを用い、気象モデルにナudgingを用いた4次元データ同化とネスティングを適用した気象場の高解像度化が、高潮推算精度へ及ぼす影響を検討する。

2. 解析条件

気象モデルや潮汐モデルが高潮推算結果に及ぼす影響について検討するため、安田ら（2008）と同様に、島嶼などにより地形が狭隘で複雑なために、局所的な風場の再現が難しく、潮汐の干満差が大きい瀬戸内海沿岸を対象とした。2004年の台風0416号および台風0418号来襲時の高潮災害を対象に、潮汐・高潮・波浪の双方向結合モデルSuWAT（Kimら、2009）を用いて、高潮再現計算を行った。外洋（格子サイズ：12150m）から瀬戸内海の広島周辺および高松周辺（格子サイズ：450m）まで、3:1で4段階のネスティングスキームを適用し、MPICHを用いた並列計算を行った。図-1に計算領域を示す。

潮汐モデルには、日本周辺海洋潮汐モデルNAOTIDEJ（Matsumotoら、2000）を用いて、潮汐変動を第1領域の開境界に入力した。

気象場の計算には、メソ気象モデルWRFを用いた。WRFの入力データに、1度毎、6時間毎の客観解析データ（NCEP/FNL）を用い、解析によって気象場をダウンスケーリングした。以下のようにWRFの計算条件を変えて、高潮推算において最適な気象モデルの条件を検討した。条件は、a) 領域毎に個別に計算した場合（以後WRF(individual)と称する）、b) 第1～第3領域まで

1 正会員	博(工)	京都大学助教	防災研究所
2 正会員	修(工)	日本工営株式会社	統合情報技術部
3 正会員	博(工)	鳥取大学大学院助教	工学研究科
4 正会員	博(工)	京都大学准教授	防災研究所
5 正会員	工博	京都大学教授	防災研究所

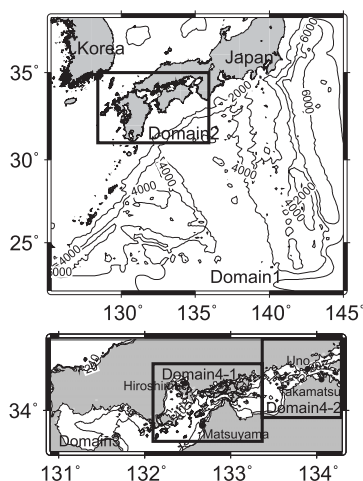


図-1 計算領域

ネスティングをした場合 (WRF(nesting)), c) 第1領域に客観解析データを用いてナッジング (モデル値を観測値へ徐々に漸近させる同化手法, 緩和法) を行い, 第3領域までネスティングした場合 (WRF(nudging_1st)), および d) 第1～第3の全領域にナッジングとネスティングをした場合 (WRF(nudging_all)) の4種類である。以上の4条件に加えて, 傾度風に台風移動の効果を取り込み, 超傾度風を考慮した藤井・光田モデル (1986) と Myers モデルによる経験的台風モデルを用いた場合 (FM) との違いについても比較・検討した。なお, 潮位条件が高潮に及ぼす影響については, 安田ら (2008) で詳しく検討したため, 本稿では気象モデルWRFによる気圧と風の影響に注視して考察する。

3. 気象場の計算結果

(1) 期間最低気圧

図-2は, 台風0416号来襲時の第1領域における期間最低気圧 (海面更正気圧) を示したものである。FMでは, 気圧は同心円状で再現され, 台風経路のごく近くで気圧低下が顕著になった。台風が30°N以南の海上にあるとき, 経路中心付近で最低気圧が約940hPaとかなり低いが, 日本上陸後は徐々に減衰している。WRF(nesting)では, 台風が134°E, 27°N付近にあるとき, 気圧低下量が最大となり, 940hPa程度となった。日本に上陸した後, 徐々に減衰する。他のWRFによる気圧に比べて, より大きく気圧が低下した。一方, WRF(nudging_1st)では, FNL再解析データによる拘束がかかり, 気圧低下量はさほど大きくない。

図示していない台風0418号の結果も踏まえると, 以下の考察ができる。台風モデルでは, 台風中心付近で極端な気圧低下となるモデルの特性があらわれている。日本上陸後は急激に減衰し, 気圧低下量が小さくなる。WRF

では, 中心付近からなだらかな気圧低下がみられる。台風モデルに比べると, 日本上陸後も気圧が低い状態が保たれる傾向にあり, 瀬戸内海付近に注目すると, 気圧低下量はWRFの方が大きくなっているところもある。図示していないが, 詳細領域においては, 陸地による影響もはっきりと現れる。ナッジングにより, 他のケースに比べて, 気圧低下量が期間全体に渡って抑えられる。

(2) 期間最大風速

台風0416号来襲時の第1領域における期間最大風速 (海面上・地上10m風速) を図-3に示す。FMでは, 中心付近でのみ風速が大きく, 経路から離れると徐々に減衰している。風速50m/s以上の猛烈な風となっており, 日本に上陸した後, 若干減衰するが, それでも40m/s以上である。WRF(nesting)では, 陸地の影響がみられ, 海上の方が風速が大きい。台風上陸後, 風速は若干減衰するが, 依然強風が吹いており, 瀬戸内海では30m/sを越えている。WRF(nudging_1st)では, 四国付近で風速35m/s以上の最大値がみられるが, WRF(nesting)より小さくなる。瀬戸内海では30m/s程度である。

図-4に, 台風0416号来襲時の第3領域における期間最大風速図を示す。FMでは, 中心気圧, 台風半径および経験式との関係から, また解析結果を1時間毎に抽出したことから, 台風の移動に伴って風速が弱くなっている谷間がある。WRF(nesting)では, 風速30m/sから40m/sの部分が大半であり, 強い風が算出されている。WRF(nudging_1st)では, 海上では30m/sを越える風が算出され, 陸上では20m/s程度の風となっており, 海上と陸上での差が明確に現れている。

以上のように, WRFでは台風モデルと比べて明確な差がみられた。台風の危険半円側で風速が大きめに, 可航半円側で小さめに算出される。また, 地形の影響を受けた結果になっており, 瀬戸内海付近では風の収束および減衰が顕著で, 高知や和歌山などの台風経路から離れた太平洋沿岸でも海上風の発達が表現されている。ネスティングだけの場合とナッジングもした場合は, ナッジングをした方が風速は小さくなった。

(3) 気圧

台風0416号と0418号による高潮発生時の気圧の観測地点での比較図を, 図-5に示す。●が観測値, 点線がFM, 一点鎖線がWRF(individual), 破線がWRF(nesting), 実線がWRF(nudging_1st), *印の実線がWRF(nudging_all)による解析結果をそれぞれ示している。高松および松山での結果を示し, 広島と宇野については紙面の関係上省略した。

FMでは, 高松などの経路から離れた地点では, 観測値に比べて気圧低下量が極端に小さかった。台風が近くを通過した松山, 広島では, 最低気圧がほぼ再現された

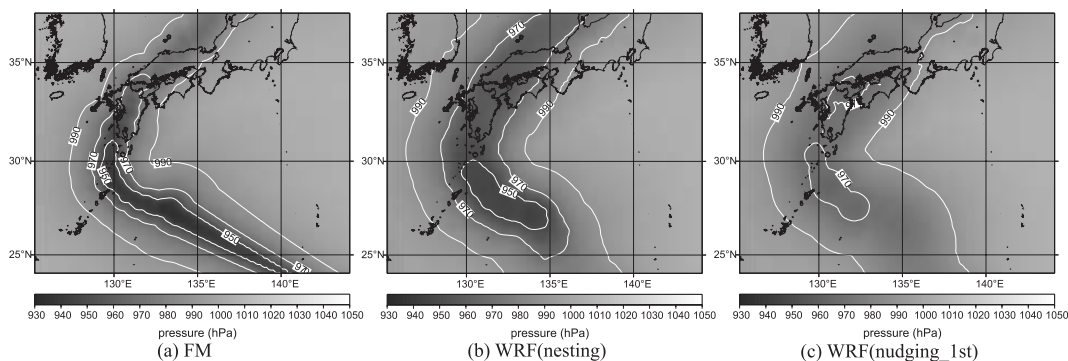


図-2 期間最低気圧の平面分布 (T0416, 第1領域：外洋)

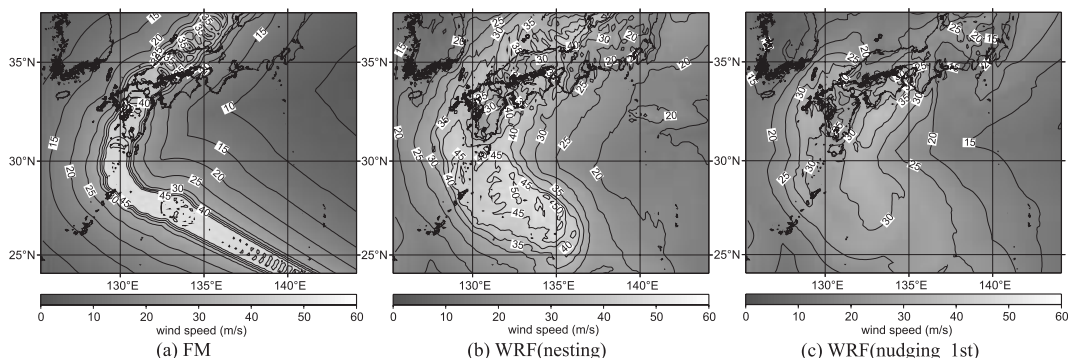


図-3 期間最大風速の平面分布 (T0416, 第1領域：外洋)

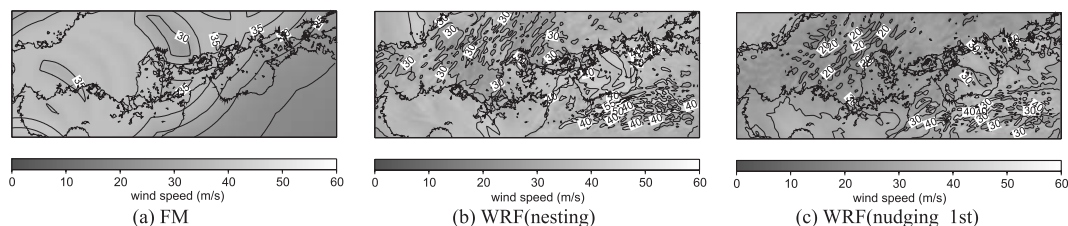


図-4 期間最大風速の平面分布 (T0416, 第3領域：瀬戸内海)

ものの、変動傾向についてはあまり合わなかった。図-2で、台風の経路近傍でシャープな気圧低下となるが、対象地点が経路から離れるほど実現象と食い違って気圧低下量が小さくなる傾向が現れたといえる。WRF(individual)およびWRF(nudging_all)では、気圧の低下傾向は一致しているが、最低気圧が観測された付近の時刻で十分な気圧低下が得られなかった。WRF(nesting)では、気圧低下量が全地点で過大となった。WRF(nudging_1st)では、気圧低下量、変動傾向ともに観測値とよく一致した。

それぞれの台風の経路も参照して考察すると、FMでは、観測点のごく近いところを台風の中心が通過したときには、気圧の再現性がよいが、その他の地点ではあまり合わない。これは、台風モデルがかなり急な分布を持ち、台風縁辺部の気圧場の再現に難があることを示して

いる。それに対して、WRF(nudging_1st)では全地点で再現結果が良かった。この条件では、客観解析データを用いたナudgingによって、気圧の低下量が適切に保たれるためである。また、WRF(individual)で十分でなかった気圧低下については、ネスティングの効果によって、詳細領域において十分に発達することが確認された。

(4) 風速

図-6に、台風0416号と0418号による高潮発生時の風速の観測地点での比較図を示す。図の凡例は図-5と同様である。紙面の都合上、高松および広島の高松の2地点の比較結果を示す。

台風0416号の場合、FMでは、広島、松山で特に大きな値となり、最大で風速20m/s以上の大きな値となった。WRF(individual)、WRF(nudging_all)は、5m/sから10m/sほど過大評価であるが、全体的な変化傾向は一致している。

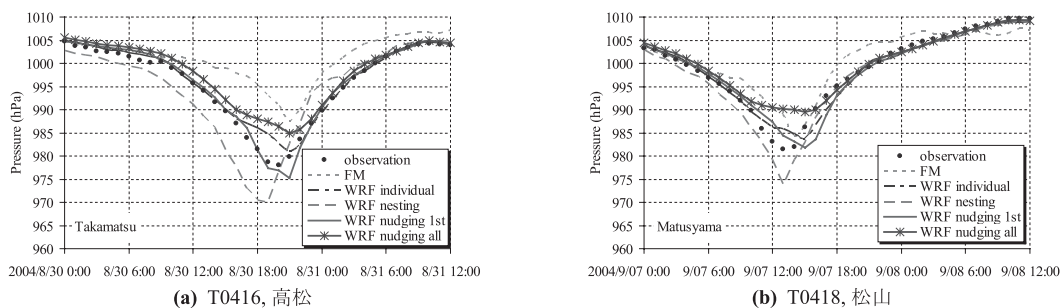


図-5 気圧の時系列変化

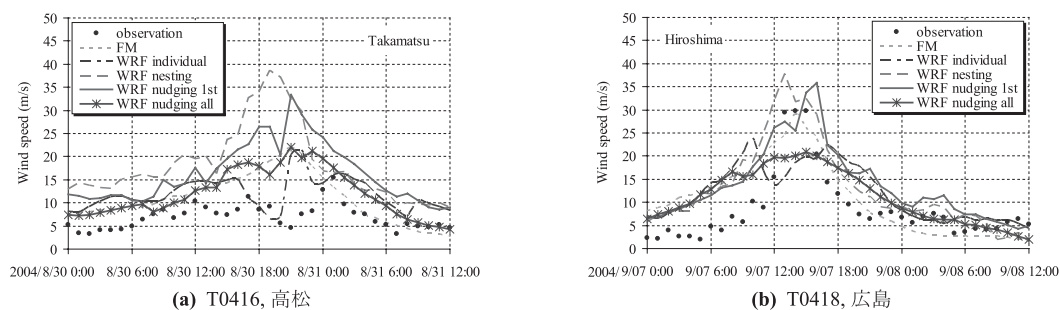


図-6 風速の時系列変化

WRF(nesting)では、台風が最接近した時の風速が広島では20m/s、松山、高松では30m/s程度、観測値に比べて大きかった。WRF(nudging_1st)では、広島で10m/s程度過大であるが、全体的な傾向は一致した。また、その他の地点では、台風が最接近した時に20m/sほど過大であった。

台風0418号について、FMでは、広島で観測値とよく一致している。松山では10m/s程度過大評価であるが、傾向は観測値とよく一致した。高松では台風の最接近時に、約15m/s過大評価であった。WRF(individual), WRF(nudging_all)では、広島で十分に風速が大きくなかった。松山、高松では台風最接近時に15m/s程過大評価であった。WRF(nesting)ではFMと同様の傾向を示したが、風速が最も大きい部分で、FMよりさらに10m/s以上過大であった。WRF(nudging_1st)では、WRF(nesting)と同様の傾向となったが、松山ではWRF(nesting)に比べて最大値が5m/s程抑えられている。

以上のように、WRFで第1領域にナudgingによる4次元データ同化をし、さらにネスティングをした条件では、経路中心付近のみでなく、解析領域全域における気圧場・風速場の再現精度が高くなり、最もよい気象場の計算結果が得られた。全領域にナudgingをした場合があまり良くなかった理由は、ナudgingに用いたデータの解像度が1度毎のやや粗いデータであり、それを詳細領域にまで適用してしまうと、気象場の計算結果がなま

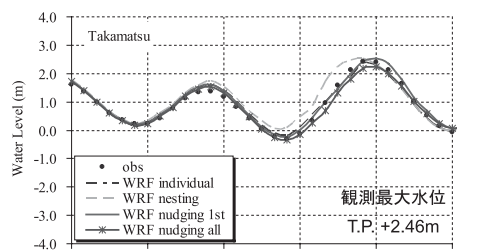
るためと考えられる。台風モデルでは、気圧低下や風速が極端に変動し、条件に対して鋭敏な結果となった。

4. 瀬戸内海における高潮推算結果

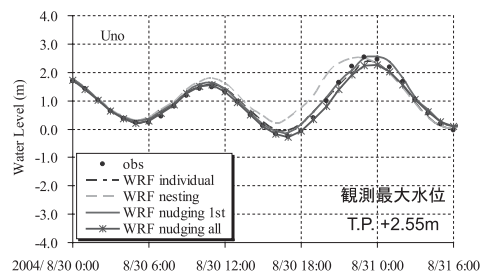
WRFの計算条件の違いによる潮位推算結果の相違について検討する。図-7に台風0416号来襲時の、図-8に台風0418号来襲時の潮位の解析結果を示す。図の凡例は図-5および6と同様である。

台風0416号来襲時、高松・宇野において、WRF(nesting)では、観測値よりも早いタイミングで高潮が発達している。その他のケースでは、潮位の最大値、全体的な変動傾向ともによく一致している。特に、WRF(nudging_1st)ではほぼ完全に観測値が再現されている。

台風0418号来襲時、高松では、WRF(nudging_all)が0.4m小さいが、その他の条件はほぼ観測値と一致していた。広島については、第六管区海上保安本部の検潮所での観測値と比較した。検潮所が被害を受けたため欠測及び信頼性に欠ける部分があるとされているが、速報値として最大でT.P.+2.68mが報告されている。潮位の上昇傾向は、WRF(nesting)の結果が一致しているが、ピークはやや過大と思われる。WRF(individual)およびWRF(nudging_all)では、それぞれ最大で2.0m、1.5m程度で、過小評価である。WRF(nudging_1st)の極大値は2.5mで、ほぼ再現できていると考えられる。

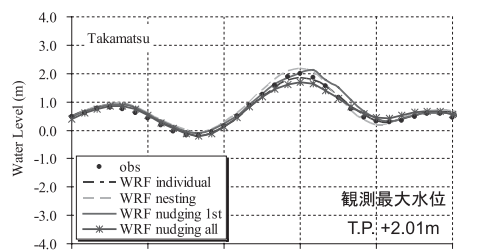


(a) 高松

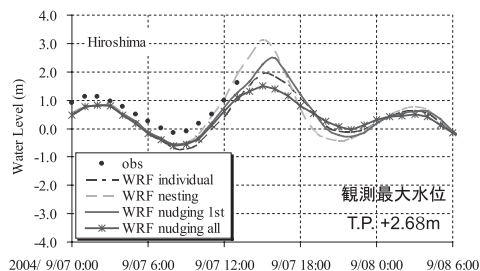


(b) 宇野

図-7 T0416来襲時の潮位の時系列変化



(a) 高松



(b) 広島

図-8 T0418来襲時の潮位の時系列変化

WRF(nudging_1st)による解析結果を入力値とした場合、潮位の観測値に最もよく合う推算結果となった。WRF(nesting)は、風速および気圧が他のWRFケースに比べて大きく算出されるため、高潮偏差が過大になった。高潮が発達するタイミングも早すぎる。WRF(nudging_all)では、観測値に比べて高潮が小さく算出される傾向にある。これは、全領域でのナudgingで、詳細領域でのWRFによる気象場の計算結果がなまった影響と考えられる。WRF(individual)は、WRF(nudging_1st)とWRF(nudging_all)の中間ぐらいの計算結果であった。

5. おわりに

気象モデルにおける計算条件の差が高潮推算結果に及ぼす影響を調べた結果、以下の知見が得られた。

- 1) WRFでナudgingによる4次元データ同化を行うと、台風経路近傍の気圧低下、風速の発達だけでなく、解析領域全域における気象場の再現性がよかった。
- 2) WRFの計算結果を外力として与えて高潮推算を行った結果、全領域にナudgingをした場合は、詳細領域における気象場の発達が過度に抑制されたため最も小さな水位が、ネスティングだけの場合は、気象場の発達が過大になるため最も大きな水位が得られ、必ずしも精度が上がらなかった。
- 3) WRFの計算条件の中で、第1領域のみにナudgingにより解析値を埋め込み、かつネスティング計算をする条件が、高潮推算において最も精度よい結果を得ら

れることがわかった。

謝辞：本研究を進めるにあたり、関西大学環境都市工学部の石垣泰輔教授、島田広昭准教授から貴重なご意見を頂いたことに対し、謝意を表する。また本研究は、科学研究費補助金若手 (B) (20710143) および基盤 (B) (20360220) による成果の一部であることを付記する。

参考文献

- 河合弘泰・川口浩二・大釜達夫・友田伸明・萩元幸将・中野俊夫 (2007)：経験的台風モデルと局地気象モデルの風を用いた瀬戸内海の高潮推算精度，海岸工学論文集，第54巻，pp. 286-290.
- 藤井 健・光田 寧 (1986)：台風の確率モデルの作成とそれによる強風シミュレーション，京都大学防災研究所年報，No.29，B-1，pp. 229-239.
- 安田誠宏・山口達也・金 洙列・島田広昭・石垣泰輔・間瀬肇 (2008)：潮汐・高潮・波浪結合モデルとメソ気象モデルWRFを用いた瀬戸内海における高潮再現計算に関する研究，海岸工学論文集，第55巻，pp. 331-335.
- Kim, S. Y., T. Yasuda and H. Mase(2009): Numerical Analysis of Effects of Tidal Variations on Storm Surges and Waves, *Applied Ocean Research*, doi:10.1016/j.apor.2009.02.003.
- Matsumoto, K. T. Takanezawa and M. Ooe(2000): Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydro-dynamical Model: A Global Model and A Regional Model around Japan, *Jour. of Oceanography*, Vol.56, pp. 567-581.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang and J. G. Powers(2008): A description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR/TN-475+STR, 113p.