台風ボーガスを導入したWRFの計算方法に関する研究

Study on calculation method of WRF with Typhoon Bogus

鈴山勝之¹・柴木秀之²・尾形竹彦³

Katsuyuki SUZUYAMA, Hidenori SHIBAKI and Takehiko OGATA

One of the important procedures for Disaster Prevention Plan is to determine accurately the wind condition of an approaching typhoon. By using the Meteorological Model, it enables the aforementioned situation to be specified. The purpose of this study is for the method application to the Disaster Prevention Plan. The effect examined is due to the difference of several computational condition by Typhoon 5115. This reveals the property model of WRF with Typhoon Bogus. In addition to that, we enumerated the problem issued from the model utilization in order to make the application easy. According to the study, it is proved that the parameters of Rb and Ro greatly influences reproducibility of typhoon. The magnitudes of central pressure and wind velocity speed are susceptible to Nudging coefficient.

1. はじめに

実務において波浪や高潮を再現する場合、検討対象とする海域に来襲した過去最大級の台風について高精度な海上風の推算が求められる。局地気象モデルWRF (Weather Research and Forecast) を用いてこのような検討を行う場合、時空間解像度が粗く台風構造を十分に表現できないGPV (Grid Point Value) データしか入手できない古い年代 (1950～1978年) はもとより、詳細な時空間解像度 (時間間隔6時間以下、格子間隔0.5°以下) を有するGPVデータが入手可能な比較的新しい年代の台風であっても、検討対象となる沿岸接近時の台風位置 (上陸位置や通過経路) を適切に表現することが必要になる。これを可能にする有効な手法として台風ボーガスの考慮が挙げられる。しかしWRFは、海岸工学の分野でも近年利用が始まった局地気象モデルであり、台風ボーガスを検討した計算特性を検討した研究は少ない。そこで本研究では、実務での使用を前提として、今後の発展が期待できるWRFに対して、台風ボーガスを検討する場合の適切な計算方法と計算精度の影響について明らかにする。

ここで台風ボーガスとは、WRF計算時に使用する初期値・境界値データ (GPVデータ) の台風に相当する範囲に、実際の台風に似せた人工的な台風構造を直接埋め込む方法である。これにより、台風の3次元構造が表現された新たな初期値・境界値データの作成が可能となる。

2. 気象モデルの概要

WRFは既に関が終了したMM5の次世代のモデルである。高次の差分スキームを有する圧縮性の非静力学モ

デルで、最新の物理モデル (放射、乱流、雲物理、地表面等) と、より進んだデータ同化システムが利用でき、数メートルから数千キロメートルといった幅広い領域設定に対応可能であることも特徴の一つである。

WRFを導入する際は、計算に必要な機能がパッケージ化されたソースコードをNCAR (National Center for Atmospheric Research) より、地形条件や境界条件 (GPVデータ等) となるデータセットをNCEP (National Centers for Environmental Prediction) よりダウンロードして準備する。図-1にWRFの機能の概要図を示す。WRFの処理は①～④の順番で進み、台風ボーガスの導入は主に①の処理に関連して行われる。WRFには台風ボーガスの埋め込みプログラムとしてTC Bogus Schemeユーティリティが用意されているが、台風全経路にわたる台風ボーガスの埋め込みには適さないため、「気象研究ノート第197号 (2000) 台風 - 解析と予報 -」 (以下、気象ノートと記す) や「数値予報課報告・別冊第43号」 (以下、気象ノート別冊と記す) 等の文献を参考に、別途新たに機能を作成する必要がある。また、WRFには研究を主目

図-1 WRFモデルの概要

1 博(工) (株)エコー 防災解析部 副部長
2 正会員 博(工) (株)エコー 技術本部 副本部長
3 (株)現代企画社 代表取締役

的とするARW MODEL (The Advanced Research WRF) と現業 (気象予報) 等への利用を推奨するNMM MODEL (Nonhydrostatic Mesoscale Model) の2種類があるが、本研究では高潮推算や波浪推算モデルとの相互利用が容易な格子座標が用いられ、4次元変分法 (4DVAR) による同化の整備が進んでいる (③' WRF-Var) ことなどから、今後の発展性が期待できるARW MODELを選択した。また、本研究で用いたWRFのバージョンはWRF 3.3.1である。近年は毎年春にマイナーバージョンアップ、夏から秋にバグフィックスバージョンがリリースされていることから、可能な限り新しいバージョンを用いることで、不具合の発生を少なくすることができる。

3. 計算領域の設定

地形データの作成はWPS (図-1参照) で行う。WPSには世界測地 WGS-84系を基準座標とする全球標高と、10分、5分、2分、30秒の4種類の区画毎に土地利用データが用意されている。これらのデータとgeogridプログラムを用いることで、設定した計算領域に対応した地形データが作成される。また、計算領域を設定する場合、移動ネスト (Moving Nest) と固定ネスト (2-Way Nest, 1-Way Nest) を選択できる。移動ネストの特性は台風近傍の計算精度を確保しつつ計算資源が節約できることにあり、各種計算条件に対する感度分析等、多数の計算を行う場合には有効な領域設定法となる。これに対し固定ネストは、各計算領域の格子間隔に応じた地形が作成できるため、高精度な波浪や高潮の計算を行う場合など、詳細な地形条件下の気象場を必要とするときに選択される。本研究では実務での使用頻度が高いと考え、図-2に示すような固定ネスト (2-Way Nest) の計算領域を設定した。第1領域 (Domain1) の範囲は、台風発生初期 (中心気圧が975hPaから980hPa程度) の位置が網羅できるように、北緯15°から40°付近で設定した。これにより、台風が十分に発達した状態で対象海域に到達するために必要な助走期間である、24時間程度を確保することが可能に

図-2 固定ネストの計算領域

なる。また本研究は、詳細な地形近似や土地利用条件の反映が周辺気象場に及ぼす影響を論じるものではなく、台風ボーガスを考慮する場合の適切な計算方法と計算精度の影響を明らかにすることを目的とするため、第1領域 (Domain1) と第2領域 (Domain2) の2領域のみのネスティングとし、最小格子も4.05kmとした。

4. 台風ボーガスの導入

(1) ベースとなるGPVデータの準備

台風ボーガスの投入手順を図-3に示す。本研究で用いる台風ボーガスは、気象ノート及び気象ノート別冊に基づき構築した。まず、台風ボーガスを埋め込むベースとなるGPVデータの作成について示す。本研究で用いたGPVデータは、NCEPよりダウンロードしたd090.0 (時間間隔6時間、格子間隔2.5°) の2D及び3Dデータである。一般的に、3Dデータには高度、風速 (u, v)、気温及び湿度の情報が、2Dデータには地上気圧、風速 (u, v)、気温、地上温度及び湿度、標高が格納されている。ここで台風ボーガスの導入には、気圧 (地上)、高度 (上層)、風速 (u, v)、気温、湿度の情報が必要となるが、本研究で用いたds090.0の2Dデータには湿度ではなく比湿の情報が格納されているため、そのままでは正常な計算ができない。そこで比湿を湿度に換算するとともに、GPVデータから比湿の情報を取り除く必要がある。また、台風ボーガスを1時間毎に投入する場合、ベースとなるGPVデータも毎時で必要となるが、本研究では時刻に対し全

図-3 台風ボーガスの投入手順

要素を単純に線形補間することで作成した。

(2) RbとRoの設定及び台風ボーガスの埋め込み

台風の3次元構造作成時に、Fujita (1952) の経験式に基づき海面気圧のプロファイルを計算する場合、台風ボーガスを埋め込む範囲を決める台風半径Rb (km) と、中心付近の気圧勾配を決めるパラメータRo (km) の設定が必要となる。Rb及びRoの値は、ベースとなるGPVデータから算出可能であるが、本研究で利用したds090.0のような空間解像度が粗いGPVデータでは台風構造が十分に表現されていないため適切な値が算出できない。そこで予め年代の新しい幾つかの台風を対象に、詳細な時空間解像度を有するGPVデータ（例えば、GSM (Global Spectral Model)）を用いてRb及びRoの値を算出し、その代表的な値を参考にする。本研究では代表的な値として、Rbは600～1000km、Roは台風発生初期で20～160km、発達期で20～80km（中心気圧が940hPa以下になると10～60km）、減衰期で80～200km程度が得られた。これより、Rbの値は概ね800kmに固定することで問題ないものの、Roは台風の状態（発生初期、発達期、減衰期）に応じた設定が必要であることが明らかとなった。図-4は台風5115号に対するRoの設定例である。さらに、Roの設定にあたっては台風ボーガス埋め込み後の気圧分布に不備がないか十分に確認しておく必要がある。図-5は、台風5115号に対して台風ボーガスを埋め込んだ際に周辺気圧分布に不備が生じた一例であるが、Roの設定が不適切な場合、図に示すように、台風ボーガス埋め込み時に台風周辺の気圧場に不備が生じる。図-6はRb及びRoともに適切な値を設定した場合の台風ボーガスの埋め込み効果を示すものである。上段図は台風ボーガス埋め込み前、下段図は台風ボーガス埋め込み後のGPVデータであり、台風近傍の気圧場を比較する。下段図は図-5と同じ時刻の気圧場であるが、適切なRb及びRoを用いた台風ボーガスの埋め込みにより、台風近傍の気圧場が表現可能となる。

5. 計算結果の特性

(1) 計算条件

表-1は計算に用いた物理パラメータの条件を示すものである。本研究では鉛直方向の層数として、地表から10hPaまでを35層で設定した。この時の最下層の条件は $\eta = 0.993$ で層厚は約60mとなる。4次元同化の手法としては、実務上の取り扱いが容易なNudgingを採用し、Nudging係数はWRFの標準サンプル値0.0003を用いた。WRFには、①3次元格子Nudging (3D analysis Nudging)、②地上格子Nudging (Surface (2D) analysis Nudging)、③観測値によるNudging (Observation Nudging) の3種類のNudgingの機能が搭載されているが、本研究では①のみを使用した。これは台風経路及び最大風速をベストト

図-4 台風の状態に応じたRoの設定例

図-5 台風ボーガス作成時の気圧場の不備

図-6 台風ボーガス埋め込み前後のGPVデータ

表-1 WRFの計算条件

physics	scheme
mp	Thompson graupel
ra_lw	rrtm
ra_sw	old Goddard shortwave
sf_sfclay	Monin-Obukhov
sf_surface	thermal diffusion
bl_pbl	YSU
cu	Kain-Fritsch

ラックデータに近似させることを重視し選択したものである。

(2) ベストトラックデータと計算値の比較

図-7は、台風5115号に対する台風ボーガスを考慮したWRFの計算結果と、ベストトラックデータの台風経路、中心気圧、最大風速の比較である。まず、四角で表すNudging係数にWRFの標準サンプル値0.0003を用いた結果について述べる。ここで、白丸で表すベストトラックデータには1977年より前の最大風速の情報がないため、本研究では最新(1991～2011年)のベストトラックデータの中心気圧と最大風速の相関関係から、台風5115号の最大風速を推定した。図より、台風ボーガスを考慮することで台風経路・中心気圧ともに精度よい計算が可能になる。ただし最大風速は、計算結果がベストトラックデータを過小評価する傾向となる。これは、台風の平面的な風場、特に、最大風速半径付近の風速が弱く計算されている可能性を示唆するもので、台風経路と検討対象とする海域の位置関係によっては波浪及び高潮の再現精度に影響を及ぼすと考えられる。この原因の一つにNudgingによる4次元同化の影響が挙げられる。台風ボーガスを導入しても4次元同化は計算精度に大きな影響を及ぼすことから、その適切な使用方法の検討が必要となる。

(3) 4次元同化の影響の把握

Nudgingの効果はNudging係数の大小で制御できる。例えばNudging係数が大きいと、入力するGPVデータや台風ボーガス等の初期値・境界値データが計算値に及ぼす拘束力は強まり、計算値の修正度合いが大きくなる。その結果、モデル中で計算された値が初期値・境界値データから大きくずれないように修正される。本研究では4次元同化が計算値に及ぼす影響を把握するため、Nudging係数の適用限界値と適切な使用方法に関する検討を行う。まず、Nudging係数の適用限界値の検討を行うため、Nudging係数をWRFの標準サンプル値0.0003より少しずつ小さくした(拘束力を弱めた)幾つかの試計算を行い、計算値の変化を確認した。図-7の三角は、Nudging係数を0.00005とした場合の計算結果である。白丸で表すベストトラックデータと比較すると、最大風速の過小評価傾向

図-7 台風ボーガスを考慮したWRFの計算結果

図-8 Nudging係数の違いが計算結果に及ぼす影響

はNudging係数が0.0003の時と大きく変わらず、代表時刻の台風位置と中心気圧の誤差が拡大する。この他にも係数を変えた幾つかの試計算を行い、0.0001のオーダー以下では台風経路・中心気圧の計算精度の低下が顕著になることが確認できた。したがって、Nudging係数の適用限界値は0.0001のオーダーであり、その推奨値はWRFの標準サンプル値0.0003に近い値と言える。次に、4次元同化の適切な使用方法の検討を行うため、大気境界層

(PBL: planetary boundary layer) においてNudgingを行わない方法を試みた。WRFには、大気境界層の風速、温度、湿度に対しNudgingを行わない機能が搭載されている。

本研究では、基本的な設定はNudging係数0.0003の計算時と同じにし、大気境界層の風速、温度、湿度のみNudgingを行わない計算を実施した。これにより、図-7で問題となった計算値の最大風速の過小評価傾向を、台風経路・中心気圧の計算精度を損なうことなく改善することが可能となる。図-8に菱形で表すのがその結果であり、白丸で表すベストトラックデータとの比較から、台風経路・中心気圧の誤差は小さく（四角で表す0.0003と同程度）、最大風速の再現性が良くなることが確認できる。また、図-9はNudging係数が0.0003の場合と、大気境界層においてNudgingを行わない場合の代表時刻の風速の平面分布の比較であるが、下段図の大気境界層においてNudgingを行わない場合の風速が、上段図のNudging係数が0.0003の場合より大きくなっている状況が確認できる。したがって、本研究で実施した大気境界層においてNudgingを行わない方法は、ベストトラックデータの台風経路・中心気圧との誤差を小さくしつつ最大風速の再現精度を向上させることが可能な、有用な方法の一つとなる。

図-9 Nudgingの効果が異なる風速分布の比較

(4) 計算時間の短縮に関する試み

日本気象協会（2005）では、台風ボーガスを投入することで、計算初期に台風が急激に減衰し強度予測に大きな影響を及ぼすことが報告されている。また、この現象は、短時間に気圧の急激な変化が起こるため、計算が不安定になる原因ともなっている。この問題に対して以下の3つの対処法が考えられる。①台風発生時（中心気圧975hPa程度が良い）近傍から計算が可能となるよう計算領域を拡張する。②計算が発散しない程度まで計算タイムステップを細かくする。③発散が発生しない程度に計算開始時に助走期間を設け、半日～1日程度で975hPaから台風発達をなだらかに与える。ただし、これら3つ方法の全てが計算時間を増大させる要因となり、時に数十ケースの計算を行う必要が生じる実務では大きな問題となる。本研究ではWRFの機能として搭載されている「Adaptive Time Stepping」オプションを利用し、計算の安定と計算時間の節約を可能にした。この機能はCFL判定に基づきタイムステップの自動可変制御が行われ、領域数が多いほど計算時間の短縮効果が大きくなる。例えば固定ネストで4領域の計算を行う場合、計算タイムステップを固定して用いる場合に比べ、第2領域までで2/3程度、第3～第4領域で1/2程度の計算時間とすることが可能となる。

6. おわりに

本研究では、WRFに台風ボーガスを導入することで、台風の気圧場、風場の計算精度を実務水準にする方法を明らかにした。以下に結論を示す。

①WRFに台風ボーガスを導入すると、台風近傍の気圧場が表現可能となる。特に、GPVデータの時空間解像度が粗い古い年代の台風には効果的である。②台風ボーガス作成時の設定パラメータは、台風状態に応じて適切な値を設定する必要がある。特に、気圧勾配の決定パラメータRoは計算精度への影響が大きい。③Nudging係数の適用下限値は0.0001のオーダーであり、これ以下になると計算精度の低下が顕著になることから、Nudging係数の推奨値はWRFの標準サンプル値0.0003に近い値と言える。④大気境界層においてNudgingを行わない方法では、ベストトラックデータの台風経路・中心気圧との誤差を小さくしつつ最大風速の再現精度の向上が可能となる。

参考文献

- 露木 義 (1995) : 数値予報課報告・別冊第43号, 気象庁予報部, pp. 52-60.
 (社) 日本気象学会 (2000) : 気象研究ノート第197号台風－解析と予報－, pp. 145-156.
 (財) 日本気象協会 (2005) : 台風時の内湾海上風推算の研究 (その1) 報告書, 日本財団助成, 101p.
 Fujita, T. (1952) : Pressure Distribution within Typhoon. Geophys. Mag., 23, pp. 437-451.