WRFの計算特性に関する幾つかの検討

Study of some characteristics of WRF calculation

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 window 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 0416 and 0418. This reveals the property model of WRF. 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 Four Dimensional Data Assimilation greatly influences reproducibility of typhoon path. The magnitudes of central pressure and wind velocity speed are susceptible to the parameters of microphysics scheme etc.

1. はじめに

高潮推算や波浪推算の高精度化を図る方法の一つとして、外力となる風速や気圧などの気象場を時空間的に精度よく推定することが求められる。

WRF (Weather Research and Forecast) は米国大気研究センター (NCAR: National Center for Atmospheric Research) を中心に開発が進められているオープンソースの局地気象モデルであり、現在の最新版はWRF3.3である。近年、海岸工学の分野でも気象場の計算に利用されており、安田ら (2008, 2009) や中野ら (2010) によってその有用性が示されている。しかし、現段階では大学や一部の研究機関の利用に限られ、必ずしも一般的な技術者が広く実務に適用できるまでには至っていない。これは、WRFがコミュニティモデルでありながらも、パラメータ等の設定の難解さと計算特性の把握の困難さを有していることが大きな障害となっているからであろう。そこで本研究では、WRFの導入にあたり発生が予測される問題点と対応を示すとともに、モデルの特性を明らかにすることで、今後の実務への適用に資することを目的とする。

2. 気象モデルの概要

WRFは既に開発が終了した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

図-1 WRFモデルの概要

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ダウンロードした後、境界条件となるデータセットを準備する。図-1にWRFの機能の概要図を示す。WRFの処理は①～④の順番で行われる。WRFには研究を主目的とするARW MODELと現業（気象予報）などへの利用を推奨するNMM MODELの2種類がある。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（WRF-Var）の整備が進んでいることなどから、今後の発展性が期待できるARW MODELを選択した。

本研究の検討に用いたバージョンはWRF3.2.1である。

3. モデルの導入と特性

(1) 地形データ

地形データの作成はWPSで行う。WPSには世界測地

1 博(工) (株)エコー 防災・水工部 課長
2 正会員 博(工) (株)エコー 防災・水工部 部長
3 (株)現代企画社 代表取締役

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プログラムにより、設定した計算領域に対応した地形データが作成される。計算領域を設定する場合、固定座標系と移動座標系を選択できるが、本研究では主に台風の計算特性について検討を行うため移動座標系の領域(Moving Nest)を選択した。移動座標系の場合、第1領域(Domain1)の地形情報を基準として第2領域(Domain2)以降の地形を補間により求めるため、Domain2以降は格子間隔が小さくても地形近似はさほど改善しない。ただし、移動座標系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のための多数の計算を行う場合には有効な領域設定法となる。また、時に数十ケースの計算を行う必要が生じる実務では便利な機能と言える。これに対し固定座標系は、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WRFに付属したサンプル領域の構成を参考に、日本周辺海域を12km格子で近似し、台風周辺を4km格子と1.33km格子の移動座標系として設定した。図-2に移動座標系の領域の設定例を示す。

(2) 初期値・境界値データ

初期値・境界値に用いる気象データの作成は図-1に示したWPS、OBSGRID、REALで行う。まずWPSではmetgridプログラムを用い、予め入手したGPV(Grid Point Value)データを設定した計算領域へ補間する。本研究で用いたGPVデータは、格子間隔が1°と粗いデータセットds083.2である。このデータセットでは台風の微細な構造(中心気圧や位置等)をとらえることはできな

いが、気象庁から公表されている水平格子間隔10kmのメソ客観解析データ(以下ではMSMと記す)と異なり、土壌(Soil)データや海面水温(SST)データなどWRFの計算に必要な全データが含まれる。次にOBSGRIDでは、WPSで作成した補間データに対して観測データ(任意座標地点の風データ及びボーガスデータなど)による客観解析を行う。本研究では観測データセットとしてds461.0(地上、船舶など)とds351.0(高層、衛星など)を用いた。ds083.2を用いる場合、WPSとOBSGRIDで作成されるデータに大きな差は見られない。その後REALにおいて、客観解析された補間データを鉛直方向の気圧準拠座標(η 座標)へ変換する。このとき4次元同化手法の一つであるNudgingに用いる入力データも作成される。

台風を対象に地形データや初期値・境界値データを作成する場合、助走期間の考慮が重要であり、特にds083.2のような解像度の粗いGPVデータを用いる場合は必須となる。本研究では幾つかの試計算結果とベストトラックの中心気圧の比較から、台風0416号と0418号が十分に発達した状態で対象海域に到達するための助走期間として約48時間以上が必要との結果を得た。しかし、例えばMSMなどの高解像度のGPVデータを使用する場合は、初期値・境界値データ自体が台風の構造を十分に再現しているため、助走期間はほとんど必要なく、数時間程度あれば十分と考えられる。

(3) モデルの特性

a) 格子間隔と移動座標系領域の影響

図-3では、格子間隔と計算領域(Domain2)の広さが計算結果に及ぼす影響を確認する。格子間隔の影響の確認は、最小格子領域であるDomain3まで用いた3領域の計算結果(D3N)とDomain3を除外した2領域の計算結果(D2N)の経路と中心気圧の比較より行う。計算ではNudgingによる4次元同化を考慮している。ベストトラックとの近似度を見ると、D2Nは中心気圧が若干大きくなるものの、経路については北緯28°以北から九州上陸後にかけて近似度はよい。D3Nは中心気圧の近似度はよいものの経路のずれが大きい。本研究では台風経路の近似度がよい計算条件を採用し、以降の検討ではDomain3を除外した2領域のみの計算を行うこととした。

次に台風の移動に追従するDomain2の大きさを変更し、計算領域の広さの影響を確認する。D2NのDomain2の大きさは対象台風全体を覆うように720km×720kmで設定した。これに対し、Domain2の大きさを600km×600kmと設定した計算(D2N600)を行いベストトラックと比較したところ、中心気圧の近似度はD2Nと同程度であったが、経路のずれが大きくなった。これより、Domain2の広さは台風縁辺を含む700~1000kmが必要で

図-2 移動座標系の計算領域設定例

図-3 格子間隔と計算領域が及ぼす影響

あり、Domain1の領域はDomain2の広さ、助走期間、corral_distなどを考慮しつつ設定することが重要である。また、台風0418号についても同様な傾向を示すことを確認した。

b) Nudgingによる4次元同化の影響

WRFで利用できる代表的なデータ同化システムはNudgingと4DVARである。4DVARは現在の同化手法の中で最も高度な手法の一つであり、実務においてはその適用に極めて熟練を要する。そこで本研究ではNudgingによる4次元同化をDomain1に適用し、その影響を確認する。図-4にNudging考慮なし(D2)とあり(D2N)の経路と中心気圧の比較を示す。Nudgingを考慮すると経路の精度は向上するが、中心気圧は若干大きくなる。中野ら(2010)は、Nudgingのスミージング効果によって台風強度が過小評価される傾向を指摘しているが、ここではこの効果が出たものと考えられる。

また、Nudgingを適用するDomain1の範囲を東西方向へ約2,000km、南北方向へ1,500km拡張した計算を行うことで、Domain1の計算領域の広さがNudgingに与える影響を確認した。Domain1を拡張してNudging考慮なしの場合(D21)はベストトラックからの経路は大きくずれる。これは計算領域を拡張したことで側面境界の影響が薄れたことが原因と考えられる。ただし、Nudgingを行った場合(D21N)はDomain1の広さに関わらず計算精度はほぼ同等になることが確認できる。台風0418号に対しても同様の結果が得られたが、Domain1の拡張の影響は台風0416号ほど小さく、Nudging考慮なしの場合でもベストトラックからの経路のずれは最大2°程度であった。

図-4 Nudgingによる4次元同化が及ぼす影響

表-1 計算ケース

ケース	層数	omcall	mp_physics	bogus	Nudging
D2N	27	×	WSM3	×	○
D2N35	35	×	WSM3	×	○
D2Noml	27	○	WSM3	×	○
D2Noml8	27	○	Thompson	×	○
D2Nbogus	27	○	WSM3	○	○

ここではNudgingによる4次元同化が、台風経路の推定精度を劇的に向上させることを再確認した。ただし、中心気圧に対する推定精度は低下する傾向にある。

c) その他の計算条件の影響

層数や物理モデルの違い、台風ボーガスの有無が計算結果に及ぼす影響を確認する。表-1に計算ケースを示す。層数の影響は、地表から100hPaまでを27層と35層に設定し確認した。この時の最下層の条件は、 $\eta=0.993$ で層厚は約60mとなる。物理モデルの影響は、海洋混合層モデル(1D Ocean Mixed-Layer Model: omcall)の有無と、微物理スキーム(Microphysics schemes: mp_physics)の違いにより確認した。

図-5は、台風0416号と0418号に対する各計算ケースの経路と中心気圧の比較である。表-2は各計算ケースの結果とベストトラックの近似度を評価するため、助走期間を除く評価期間内における経路、中心気圧、最大風速の誤差を確認したものである。期間内平均(mean)と標準偏差(sd)は6時間毎の台風位置、中心気圧、最大風速に対してベストトラックからの差を求め、これを用いて算出した。台風0416号の評価期間は8月29日9時～30日

21時（データ個数7個）、台風0418号の評価期間は9月6日9時～7日15時（データ個数6個）である。ただし、本研究では計算条件の違いが結果に及ぼす影響を相対的に比較するため、表による評価についても、値のオーダーの違いを確認する程度にとどめる。

全体的な傾向として、Nudgingの考慮により、計算条件の違いが経路に及ぼす影響は小さくなるが、物理モデルの違いが中心気圧や最大風速へ及ぼす影響は大きい。以下では、台風0416号に対する結果について述べる。

本研究の η 座標の設定条件では層数の違い（D2N35）が経路、中心気圧、最大風速に及ぼす影響は小さい。

海洋混合層モデルの有無（D2Nom1）は、経路と中心気圧への影響は小さいが最大風速への影響は大きい。このモデルはハリケーンの計算で中心気圧の過度な発達を抑制するために作成されたが、WRF付属のサンプル設定ファイルでは利用しない形で提供されている。

図-5 各種計算条件が及ぼす影響

微物理スキームの違い（D2Nom18）が経路に及ぼす影響は小さいが、中心気圧と最大風速に及ぼす影響は大きい。User's Guideではハリケーン及び格子間隔1～4kmの場合、mp_physicsに「Thompson 2009」のモデルを使用することが推奨されている。計算された中心気圧に対してベストトラックとの近似度を見ると、海域での近似度はよく、陸域通過時に過大評価となる傾向が見られる。この結果から明らかなように、他の全計算ケースの中心気圧がNudgingの影響によりベストトラックを過小評価しているにも関わらず、このケースの中心気圧のみが過大評価となる。すなわち、微物理スキームの選択によってはNudgingを考慮した計算であっても中心気圧の過小評価は起きない場合があることがわかった。

台風ボーガスの投入（D2Nbogus）が中心気圧へ及ぼす影響は小さく、経路と最大風速への影響が確認できる。本研究では岡垣ら（2010）の台風ボーガス投入方法を参考に、6時間毎の観測データとして、台風中心から半径200kmの同心円上に4点のボーガスデータを投入した。投入するボーガスデータとして、ベストトラックから中心位置と中心気圧を、半径200kmの同心円上にはMSMの情報をそのまま利用した。しかしこの方法では台風内の気圧場に四角形の歪みが発生したため、さらに4点を追加し、最終的に8点のボーガスデータを半径200kmの同心円上に投入した。計算開始時の中心気圧は940hPa程度になったものの15分後には960hPa程度に減衰したことから、ボーガス投入点の不足による客観解析に問題があると推察される。したがって、本研究で作成した台風ボーガスは不十分なものであり、これが台風の精度向上に繋がらなかった原因の一つと考えられる。

さらに、台風0418号の計算結果について見ると、各計算条件に対する経路と中心気圧の傾向は台風0416号と異なることがわかる。これは、台風の違いによって最適な物理モデルのパラメータも異なることを示唆している。ただし、本研究の検討だけでは設定すべき多くのパラメ

表-2 ベストトラックとの近似度の評価

Typhoon	Case	mean (km)	sd (km)	mean (hPa)	sd (hPa)	mean (m/s)	sd (m/s)
0416	D2N	35	39	4	7	1	3
	D2N35	31	35	5	7	2	3
	D2Nom1	31	35	4	6	5	5
	D2Nom18	31	37	-15	15	15	15
	D2Nbogus	33	42	9	11	5	5
0418	D2N	32	33	15	16	-4	5
	D2N35	28	32	16	17	-3	5
	D2Nom1	25	26	13	14	1	4
	D2Nom18	25	27	-2	5	11	12
	D2Nbogus	44	55	20	21	-1	4

図-6 代表時刻の気圧分布の比較

ータに対する感度解析と効果の特定を行うには不十分であり、今後も同様な検討を行っていく必要がある。

図-6は、台風0416号と0418号に対するケースD2Nの計算結果と、MSMの代表時刻における気圧分布の比較結果の一例である。概ね妥当な再現が行われていることが確認できるが、中心気圧の過小評価により、台風中心位置において等圧線の密度が異なる。

図-7では台風0416号を対象に、代表地点において観測風速と気圧の比較を行った。ケース毎に若干のばらつきはあるものの、計算結果は観測結果を概ね良好に再現している。風速及び地上気圧ともに、台風の中心気圧が

図-7 観測値と計算値の比較

ストラックを過小評価したD2N～D2N01のケースで再現性がよく、過大評価傾向にあったD2N018ではそのまま過大評価となる。台風ボーガスの投入が不十分であったD2Nbogusのケースの比較は行わない。

ここで、計算気圧と観測気圧を比較する場合、抽出格子の標高と観測地点の標高の差の情報から気圧差を計算し、計算気圧を補正する必要がある。例えば宮崎では、計算格子の標高が123.5m、観測地点の標高が9.2mであり、気圧差は概算13hPa $(= (123.5 - 9.2) \times 11.38 \text{ hPa})$ となる。地形の近似精度が粗い計算結果を用いて気圧の比較を行う場合は特に注意を要する。

4. おわりに

WRFの計算特性として、台風経路の再現性はNudgingによる4次元同化の影響が大きく、中心気圧や風速は物理モデルのパラメータ選択の影響が大きいことが明らかとなった。ただし本研究では、多数のパラメータの感度分析や効果の特定までは至らなかった。今後もこのような検討を継続していくことが必要と考えられる。その一方で、実務においても一般的な技術者が、必要な精度の気象計算を実施可能にする、気象モデルの利用に関するガイドラインなどの整備が望まれる。

参考文献

- 岡垣 晶・大野木和敏・高坂裕貴・酒匂啓司 (2010)：気象庁 全球解析における台風ボーガスの改良，2010年度秋季大会講演予稿集，225p.
- 中野俊夫・山城 賢・橋本典明・大西健二 (2010)：4DVARを用いた台風9918号の追算，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol. 66, No. 1, pp. 381-385.
- 安田誠宏・山口達也・金 洙洙・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.
- 安田誠宏・山口達也・金 洙洙・森 信人・間瀬 肇 (2009)：気象モデルにおける4次元データ同化およびネステイングが高潮推算精度に及ぼす影響に関する研究，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol. B2-65, pp. 381-385.