

## [共同研究成果]

## ダウンスケールシミュレーションにおける台風の再現性について

台風 Choi-wan (2009) の事例解析

濱田真之、岩崎俊樹  
東北大学理学研究科

台風予報は数値予報の重要な開発課題である。全球数値予報モデルによる進路予報は、近年精度向上が著しく、5日先までの予報が提供されている。しかしながら、台風の強度の再現には高解像度の雲解像モデルが必要であり、多大な計算機資源が必要であることと、現状で予測性能が十分ではないため、まだ数値モデルによる台風強度予測は実用化には至っていない。現在、非静力学数値モデルを用いたダウンスケールシステムを利用し、台風強度予測の可能性を調べている。このようなフレームワークでは、台風強度予測に関しては数値モデルそのものの性能に加えて、初期条件や境界条件もその精度に影響する。そこで、本研究では現状の再解析を初期値・境界値に用いた完全予報(事後予報)実験における、台風の進路と強度の再現精度を事例解析により調べる。

実験対象は防災上大きな問題となる急発達を示した台風 Choi-wan (2009) を選んだ。特に、台風進路と強度の再現精度は初期値・境界値の精度に依存する。このため、初期値・境界値に JRA25/JCDAS と ERA-Interim の 2 つの異なる再解析を用いて、再現された台風の強度を調べた。

本研究のケースでは台風強度についてはどちらの場合も過小評価であった。2 つの再解析の影響については、進路・強度とも ERA-Interim を使用した実験のほうがベストトラック(観測値)に近かった。また、初期値と境界値の組み合わせを変えた実験から、進路の予報精度を上げるためには境界値を、強度の精度を向上させるには初期値の再現性を向上させる必要があることが明らかになった。

## 1. はじめに

台風は北西太平洋で発生・発達し、大災害をもたらす気象現象である。最近では Talas (2011) や Megi (2010) などによる災害が記憶に新しい。台風の進路や強度を正確に予報することは重要である。

台風を含む気象現象を予報するために主要国の予報機関は独自の数値モデルを開発してきた。近年では、観測データの増加[1]、4次元データ同化手法の高度化、予測モデルの高解像度化、パラメタリゼーションの改善などにより、予報精度は大幅に向上している。気象庁の台風モデルについても予報誤差の縮小に伴い、狭領域の TYM(気象庁台風モデル、[2])から TEPS(Typhoon Ensemble Prediction System : [3])へ移行され、5日間予報が行われている。

進路予報に関しては TIGGE(The THORPEX Interactive Grand Global Ensemble)を使用した解析から進路予報の精度を向上させるためには指向流が再現されているかに依存することが明らかになっている[4]。一方、強度予報では台風内部の小規模現象(e.g., Eyewall Replacement Cycle)を再現できる高解像度の雲解像モデルが必要となる[5]。高解像度モデルは膨大な計算機資源を必要とし、予測精度も満足いくレベルに達していないため、台風強度の数値予報は実用化されていない。

現在、強度予報に関しては非静力学数値モデルと力学的ダウンスケーリングを用いた研究が行われている[6]。この手法では領域モデルを使用するため、予報精度は数値モデルの誤差の他に初期値や境界値に左右される。また、ダウンスケーリングを用いた台風の強度予報実験では各予報機関が作成した再解析データが初期値として使用されている[7][8]。再解析データとは、過去の観測データを数値予報モデルに同化し、過去の大気の3次元分布を再現させたものであり、台風や集中豪雨等の極端現象を再現する際に有効である。

本研究ではJCDAS(Japan Climate Data Assimilation System: 以下 JRA) [7]と ERA-interim(以下 ERA) [8]の2つの再解析データを初期値と境界値として使用した実験を行う。JRA25(Japanese 25-year Reanalysis)/JCDAS は気象庁の再解析で、ERA-Interim(ECMWF re-analysis)は ECMWF(European Center for Medium-Range Weather Forecasts)の作成した ERA と JMA(Japan Meteorological agency)が作成した再解析である。また、2009年に発生した台風 Choi-wan を対象として気象庁非静力学モデル(JMA-NHM)を用いて再現実験を行った。台風 Choi-wan は2009年に発生した台風の中でも急激に発達した台風であり、防災上重要な問題を持つため本研究の対象として選択した。本研究を通じて、強度と進路が初期値と境界値のどちらに影響を受けるか事例解析を行った。また、本計算は東北大学サイバーサイエンスセンターの並列コンピュータを用いて64並列の計算を約15時間実行した。

## 2. 実験概要

### 2.1 台風 Choi-wan(2009)の概要

気象庁ベストトラックから Choi-wan は2009年9月12日 18:00UTC に 15.4° N、150.9° E で台風となった。急発達しながら北西へ進み、9月15日 12:00UTC に最低気圧が 915hPa、最大風速が 55m/s に達した。その後も強度を維持したまま北西に進み、9月18日 00:00UTC に転向した。転向後は強度が弱まり、9月20日 12:00UTC に熱帯低気圧に変化した。

本稿では Choi-wan が急発達した段階である9月13日 06:00UTC から成熟状態に達した9月16日 12:00UTC までを計算時間とする。

### 2.2 数値モデルの概要

本研究では JMA-NHM[9]を数値モデルとして使用した。JMA-NHM は気象研究所/数値予報課統一非静力学モデル(MRI/NPD-NHM)を基にしたモデルであり、メソ数値モデルシステムの現業モデルとして採用されている。このモデルは静力学近似を用いていないため細かい水平解像度を要求する現象の再現が可能である。また、雲の微物理過程をモデルに含む。これは、相変化や放射に伴う熱収支や雲を構成する微粒子の質量変化によって降水過程だけではなく熱力学や力学過程を変化させるため顕著な降水を伴う気象現象を扱う場合には微物理過程を含むモデルを使用することが必要となる。

本研究で対象とする台風は積乱雲の集合体であり、静力学近似を使用することは適切ではない。さらに、台風は激しい降水を伴う気象現象であるため雲物理過程を含むモデルを使用することが望ましい。この2点から非静力学モデルを用いることが適当である。

JMA-NHM の設定は表1に示す。

本研究では以下の3つの条件で実験を行った。

- EI-EB(era)  
初期値 ERA、境界値 ERA
- EI-JB(era\_bc\_jra)  
初期値 ERA、境界値 JRA
- JI-JB(jra)  
初期値 JRA、境界値 JRA

ERA と JRA は実験で使用する水平解像度 2km と比べて粗いため、水平解像度を 30km(201×171 格子)→10km(481×391 格子)→2km(1501×1001 格子)へとダウンスケーリングした。各ダウンスケーリングの際にスピンアップとして3時間ずつ計算時間をずらしている。

積雲対流パラメタリゼーションとして水平解像度が 30km と 10km の計算をする際には Kain-Fritsch 法を用いた。対流パラメタリゼーションは解像度が粗いモデルで表現することが出来

表1 JMA-NHM の設定

水平解像度	2km
計算期間(UTC)	2009.09.13.12- 2009.09.16.12
水平解像度	1501×1001
鉛直層	50層(top ~27.8km)
予報時間	72h
初期値	dx=10kmの結果
タイムステップ	6s
対流パラメータ	雲物理過程
乱流クロージャー	Improved Mellor-Yamada Level3
海面温度	NOAA Daily OI SST

ない雲を仮想的に与えて計算をする手法である。しかし、台風の強度はアイウォール内部の現象 (e.g., Eyewall Replacement Cycle, 2重眼構造) の影響を受ける[4]ためメソ渦を表現することが望ましい。また、積雲パラメタリゼーションを用いずにメソ渦を再現するためには水平解像度を 2.5km 以下にすることが求められる[10]。よって、水平解像度 2km の計算では雲物理過程のみを用いて計算を行った。

### 2.3 MPI (Maximum Potential Intensity)

台風の潜在的な強度を評価する方法として MPI [11][12] を用いた。計算式は、

$$V_m^2 = \frac{(T_s - T_0) C_k (k_0^* - k_a) \Big|_m}{T_s C_D} \quad (1)$$

$$p_c = p_m \exp\left(-\frac{V_m^2}{2R_d T_s}\right) \quad (2)$$

である。また、式中のパラメータについては、 $V_m$  は最大接線風速、 $T_s$  は海面温度、 $T_0$  は台風の温度、 $C_k/C_D$  は熱の交換係数、 $k_0^*$  は海面のエンタルピー、 $k_0$  は大気のエントルピー、 $p_c$  は中心気圧、 $p_m$  は最大風速半径での気圧、 $R_d$  は気体定数である。

MPI は初期条件から台風の最大可能強度を求める手法であり、内部構造に左右されず強度を求めることが出来る点でメリットがある。一方、台風は成長の過程で海面を混合させ、海面温度を低下させるため成長を抑える効果がある[5]。また、海面から供給される熱とアウトフローとして放出される熱の差によって生じるエネルギーと、地表面の摩擦による消失エネルギーが等しくなるときに最大可能強度としているため、強度を過大評価する傾向がある点に考慮する必要がある。

## 3. 結果

### 3.1 構造

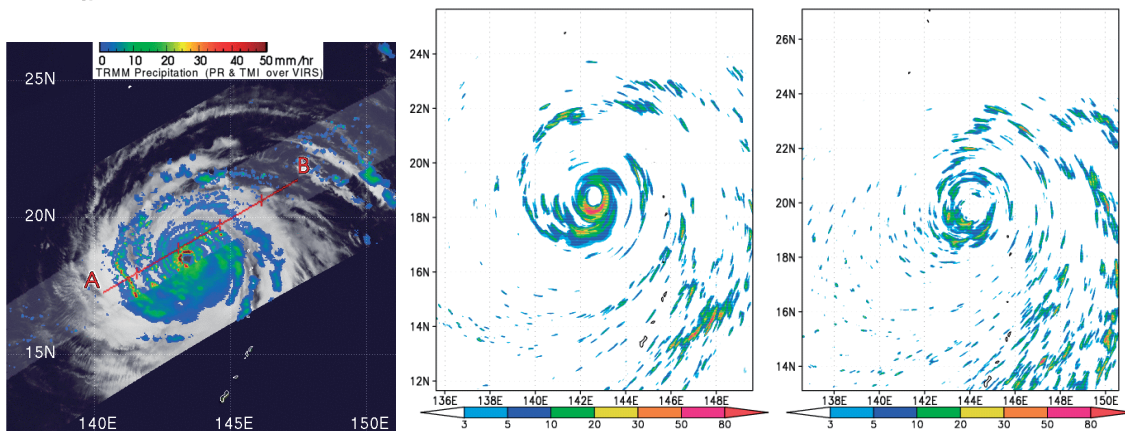


図1 TRMM の観測値(左図)と計算結果(EI-EB(中央図)と JI-JB(右図))

TRMM は 2009 年 9 月 15 日 23:20UTC、計算結果は 2009 年 9 月 15 日 23:00UTC のデータを使用

再現性を確かめるために TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission) の降水データと計算結果を比較する(図 1)。図 1 から EI-EB ではアイウォールの顕著な降水やレインバンドを再現しているのに対して JI-JB では渦の再現性が悪い。また、JI-JB は強い降水を再現できていない。この結果から、Choi-wan(2009) のケースでは降水分布に関しては EI-EB の再現性が高い。

### 3.2 進路

台風の経路を図2に示す。予報時間は72時間である。計算結果からEI-EBの結果が気象庁ベストトラックと同方向に進路をとる。しかし、中心からの誤差では常に50kmから150kmの誤差を持ち、進行速度がベストトラックと比べて速いことが分かる。また、JRAを境界値としたEI-JBとJI-JBはマリアナ諸島に接近後、ベストトラックに比べて相対的に北向きの進路をとる。この結果から、本事例では台風の進路は境界値に依存する。

図3は2009年9月13日06:00UTCにおけるERAとJRAの動径方向の風速である。JRAは第2象限に北西方向の強い風速を持つ。一方、ERAは第1象限に南西方向の強い風速を持つ。計算結果から境界値がERAのEI-EBは境界値をJRAとしたEI-JBとJI-JBと比較して南のルートをとる点から計算開始時の流れに依存している。この結果から、台風は大規模場の流れを指向流として移動するため、進路は境界値に依存したと考えられる。

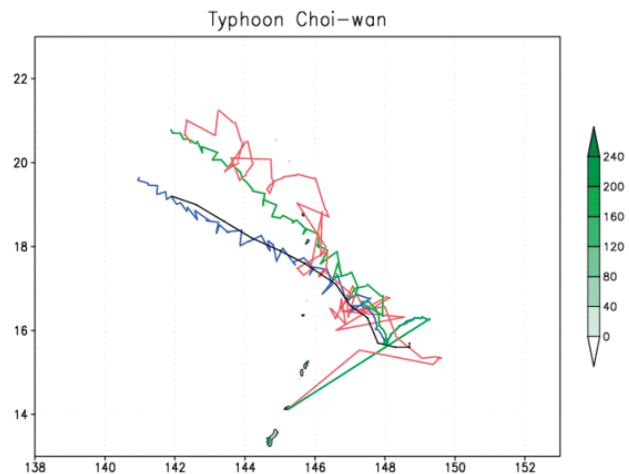


図2 台風 Choi-wan (2009) の経路図  
計算結果は1時間毎、ベストトラックは6時間毎のデータをプロット

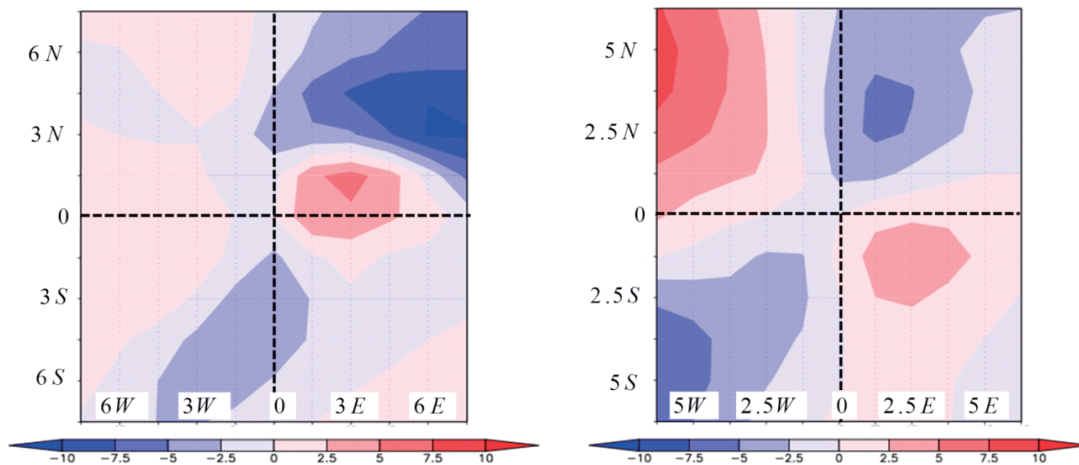


図3 風速の動径方向成分(JRA(右図)、ERA(左図))  
赤色が中心から離れる方向、青色が中心に向かう方向

### 3.3 強度

図4は台風の強度(最大接線風速、最低気圧)である。計算時間内で最も低い気圧はEI-EBで954.8hPa、EI-JBで961.0hPa、JI-JBで986.2hPaとなった。最大風速についてはEI-EBは43.9m/s、EI-JBは40.7m/s、JI-JBは27.8m/sである。最大接線風速及び最低気圧はEI-EBで最もベストトラックに近い値となる。EI-EBと同じ初期値を使用したEI-JBについてもEI-EBと同じ強度変化をしているが計算時間30時間目から乖離し、計算時間後半では6hPa程度の差が生じた。JI-JBについては計算開始から発達が見られなかった。この結果から台風の強度は初期値に依存することが明らかになった。

強度についてベストトラックと比較するとすべての実験結果で大きな差が生じた。計算を行った初期場が発達できる環境場であったか調べるためにMPIを使用する。MPIの結果とEI-EBとJI-JBの最

大風速、最低気圧を表 2 に示す。MPI の結果から初期場は発達が可能であることが分かる。また、ERA と JRA では初期場の発達に大きな違いがないことが分かる。従って、急発達を対象とした本事例では環境場よりも台風の初期渦の再現性を高めることが重要であると示唆される。

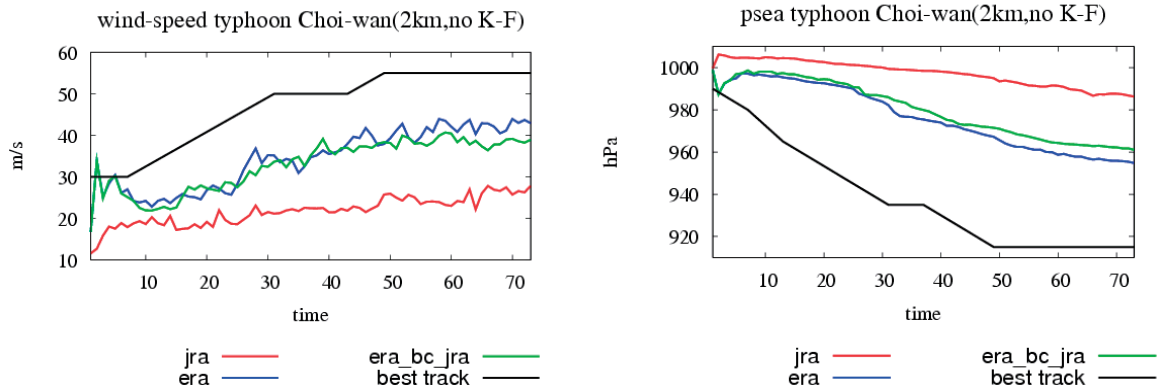


図 4 最低気圧(右図)と最大接線風速(左図)

計算結果は 1 時間毎、ベストトラックは 6 時間毎のデータをプロットした。また、横軸は 2009 年 9 月 13 日 12:00UTC (time=1h) から 2009 年 9 月 16 日 12:00UTC (time=73h)

表 2 MPI と EI-EB(ERA)、JI-JB(JRA) の結果の比較

	最大風速(m/s)	最大気圧(hPa)
<b>MPI(JRA)</b>	<b>78.3</b>	<b>895.5</b>
<b>MPI(ERA)</b>	<b>80.2</b>	<b>886.5</b>
<b>ERA(dx2km)</b>	<b>43.9</b>	<b>954.7</b>
<b>JRA(dx2km)</b>	<b>27.8</b>	<b>986.2</b>

#### 4. まとめ

ERA-Interim と JRA25/JCDAS の 2 つの再解析データを初期値と境界値として JMA-NHM を用いて台風 Choi-wan (2009) の再現実験を行った。本事例では進路と強度で ERA を使用した場合の方がベストトラック(実況監視データ)に近かった。特に降水分布は衛星データと比較的よく一致した。また、初期値と境界値の組み合わせを変えた実験から、領域モデルを使用して台風の数値実験をする際には、進路は境界値により強く依存することが分かった。台風の進路は比較的大規模な周囲の風を指向流として感じているためだと考えられる。これに対して、台風の強度の再現には、境界値より初期場の方が重要であった。MPI(最大可能強度)は、JRA と ERA では違いは大きくはなかった。従って、急発達の 1~2 日前を初期条件とする今回の実験の場合は、初期渦の構造が台風強度の再現にとってより重要であることを示している。もちろん、数値モデルについても、雲物理過程や大気境界層などまだ課題は多い [13]。今後事例を重ねて数値モデルの問題点を洗い出し、数値モデルを改良していく必要がある。

#### 5. 謝辞

気象庁より気象庁非静力学モデル(JMA-NHM)を貸与して頂いた。また、本研究は東北大学サイバーサイエンスセンターを利用することによって実現することが出来た。ここに謝意を表する。

**参考文献**

- [1]Elsberry, R. L., T. D. B. Lambert, and M. A. Boothe, : Accuracy of Atlantic and Eastern North Pacific Tropical Cyclone Intensity Forecast Guidance. *Wea. Forecasting*, **22**, 747–762, 2007
- [2]Iwasaki, T., H. Nakano, and M. Sugi, : The performance of typhoon track prediction model with cumulus parameterization. *J. Meteor. Soc. Japan*, **65**, 555–570, 1987
- [3]Yamaguchi, M., R. Sakai, M. Kyoda, T. Komori, and T. Kadowaki, : Typhoon Ensemble Prediction System Developed at the Japan Meteorological Agency. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 2592–2604, 2009
- [4]Yamaguchi, M., T. Nakazawa, and K. Aonoshi, : Tropical cyclone track forecasts using JMA model with ECMWF and JMA initial conditions. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L09801, doi:10.1029/2012GL051473, 2012
- [5]Chen, H., D. Zhang, and J. Carton, : On the rapid intensification of hurricane Wilma(2005). Part I : Model prediction and structural changes. *Wea. Forecasting*, **26**, 885–901, 2011
- [6]Wada, A., : Numerical study on the effect of the ocean on tropical-cyclone intensity and structural change. Atmospheric Model Applications, *In Tech*, 43–68, ISBN 979-953-307-335-3, 2012
- [7]Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, N. Mannoji, and R. Taira, : The JRA-25 Reanalysis, *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369–432, 2007
- [8]Dee, D. P., S. M. Uppala, A. J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M. A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A. C. M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R. Dragami, M. Fuentes, A. J. Geer, L. Haimberger, S. B. Healy, H. Hersbach, E. V. Holm, L. Isaksen, P. Lallberg, M. Kohler, M. Matricardi, A. P. McNally, B. M. Monge-Sanz, J.-J. Morcrette, B.-K. Park, C. Peubey, P. de Rosnay, C. Tavolato, J.-N. Thepaut, and F. Vitart, : The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **137**, 553–597, 2011
- [9]Saito, K., J. Ishida, K. Aranami, T. Hara, T. Segawa, M. Narita, and Y. Honda, : Nonhydrostatic atmospheric models and operational development at JMA. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, **85B**, 271–304, 2007
- [10]Noda, A., and H. Niino, : Critical grid size for simulating convective storms: A case study of the Del City supercell storm. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1844, doi:10.1029/2003GL017498, 2003
- [11]Emanuel, K., : An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 586–604, 1986
- [12]Emanuel, K., : Sensitivity of tropical cyclones to surface exchange coefficients and a revised steady-state model incorporating eye dynamics. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 3969–3976, 1995
- [13]Sawada, M., and T. Iwasaki, : Impacts of Evaporation from Raindrop on Tropical Cyclone. Part I: Evolution and Axisymmetric Structure. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 71–83, 2010