

NCEP-GFSを用いた複数解析値からの台風進路予報実験

Tropical Cyclone Track Forecasts using NCEP-GFS with Initial Conditions from Three Different Analyses

宮地哲朗・榎本剛

Tetsuro MIYACHI and Takeshi ENOMOTO

Synopsis

Tropical cyclone (TC) track forecast experiments were conducted using the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Global Forecast System (GFS) with the initial conditions from three numerical weather prediction centers, NCEP, the European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF) and the Japan Meteorological Agency (JMA), to distinguish between TC track forecast errors attributable to the initial state and those attributable to the model. The average position error was reduced by replacing the initial conditions. The northward recurvature of Lupit (2009) was reproduced with initial conditions from NCEP and ECMWF, but not with those from JMA, indicating sensitivity to the initial state. The sensitivity to both the model and the initial state was found, however, for the northward bias of Parma (2009). Insensitivity to the initial vortex structures in the predicted tracks for Parma indicates that the error in the steering flow contributes to the northward bias.

キーワード: 台風, 台風経路, 数値天気予報

Keywords: tropical cyclone, tropical cyclone track, numerical weather forecast

1. はじめに

台風進路予報の精度は、過去20年で大きく向上してきている。2012年に北西太平洋で発生した台風についての気象庁による72時間予報の平均誤差は約300kmであり、1996年の2日予報の平均誤差と同程度まで精度が向上している [Fig. 1]。また、諸外国の数値予報センターによる台風進路の予報精度も向上している。こうした進路予報精度の向上は、初期値となる解析値を作成するデータ同化手法の発達、数値予報モデルの改善、計算資源の増加に伴う解像度の向上、新しい衛星データといった観測データの増加や品質向上など様々な要因に起因している（梅津・森安, 2013）。

このように進路予測の平均的な精度は年々向上傾向にある一方、個々の事例で見た場合には、依然として大きな誤差を示す「大外れ事例」が存在し、中

には72時間予報で1000kmを超える誤差を生じるような事例もある。また、数値予報センターごとに異なった予測結果を示す場合もある。進路予測のさらなる精度向上には、このような大外れ事例の原因を究明し、数値予報システムの改善につなげていく必要がある。

しかしながら、数値予報の誤差は、初期値や境界値、数値モデルの不確実性に伴う誤差が複雑に組み合わさって生じるため、予測結果から数値予報システムの改善につながる情報を引き出すのは難しい。このため、熱帯低気圧の運動メカニズムに対する理解が進んでいる一方で、その進路予測誤差の原因についての理解は未だ不十分である（Carr and Elsberry, 2000a, b）。

Yamaguchi et al. (2012) は、2009年に北西太平洋で発生した熱帯低気圧を対象に、気象庁全球スペクトルモデル（JMA-GSM）を用いて、気象庁の初期値

とヨーロッパ中期予報センター（ECMWF）の初期値を用いた進路予報実験を行い、進路予測誤差の原因が初期値にあるのか、予報モデルにあるのかの切り分けを試みた。その結果、ECMWFの初期値を用いた場合は、気象庁の初期値を用いた場合に比べ、平均位置誤差は約10%減少し、初期値の交換が進路予報の改善に効果があったことを報告している。また、個々の事例で見た場合、初期値交換により進路予測が大きく改善した事例、ECMWFの予測誤差が小さかったにもかかわらず初期値交換の効果がなかった事例があり、初期値に敏感でない事例では、予報モデルの不確実性を考慮する必要性を指摘している。

しかしながら、この研究はJMA-GSMのみを用いたものであり、特に、初期値の交換で予測が改善しなかった事例では、モデルの不確実性に伴う誤差であると結論付けるには不十分であり、初期値に伴う誤差とモデルに伴う誤差を十分に切り分けているとはいえない。この点を明らかにするためには、別の予報モデルを用いた初期値交換実験を行なって、結果の比較を行うことが必要である。

本研究では、2009年に北西太平洋で発生した熱帯低気圧について、米国環境予測センター（NCEP）の全球予報モデルGlobal Forecast System（GFS）を用いて、ECMWF、NCEP、気象庁の解析値を初期値とした予報実験を行い、進路予測誤差に対する初期値とモデルの影響を調査した。また、各センターの解析値を環境場成分と、熱帯低気圧の渦成分に分離し、相互に組み合わせた初期値を用いた数値実験を行い、初期値の渦構造や強度の違いが進路予測に与える影響についても調べる。

本論文の構成は以下の通りである。第2章で、使用データ及び、解析手法、数値実験の設定について述べる。第3章では、2009年に発生した熱帯低気圧を対象とした初期値交換実験の結果を示し、数値予報センター間の進路予測に顕著な違いが見られた2事例について解析した。第4章では、第3章で初期値の違いが影響すると思われる事例について、初期値を大規模場の環境場成分と熱帯低気圧の渦成分に分離して、初期渦の構造、強度の違いが進路予測にどのように影響するかを調べる。最後に、第5章で本研究の結論を述べる。

2. 使用データと実験設定

2.1 使用データ

本研究では2009年に北西太平洋で発生した熱帯低気圧22個のうち、初期時刻12UTCにおいて熱帯低気圧の最大風速が17.2m/s以上であった127事例（102初期日）を対象とする。熱帯低気圧のデータは気象庁

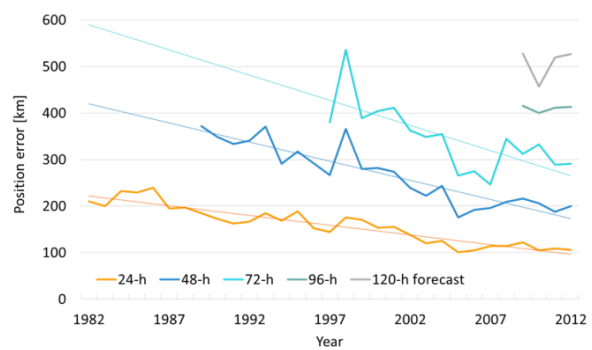


Fig. 1 Annual average position errors of 1- to 5-day TC track predictions of JMA forecast. The verification area is the western North Pacific (JMA, http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typ_kensho/typ_hyoka_top.html).

ベストトラックデータを用いた。また、ECMWF、NCEP、気象庁の熱帯低気圧進路予報データとして、TIGGE Cyclone Exchangeで提供されている進路予報データを用いた。ただし、NCEPの進路予報データは4, 5, 9月のデータがアーカイブされていないため、本研究では欠損として扱う。このデータは、各センターの全球モデルによる予報データでの熱帯低気圧の位置を、各センターが独自のアルゴリズムを用いてトラッキングしたものである。NCEPのアルゴリズムでは5つの基本パラメータ（700hPa, 850hPaの相対渦度、ジオポテンシャル高度と海面更正気圧）と2つの副パラメータ（700hPa, 850hPaの風速）を組み合わせて中心を定義しており（Marchok, 2002）、ECMWF、気象庁のアルゴリズムでは海面更正気圧の極小点を中心として定義している（Van der Grijin, 2002；山口・酒井, 2004）。本研究での熱帯低気圧の中心は、海面更正気圧の極小点で定義し、Van der Grijin (2002) のアルゴリズムを用いてトラッキングを行う。また、第3.2節の指向流解析には、解析値としてERA-Interim再解析データ（Dee et al., 2011）を用いた。

2.2 初期値交換実験

予報モデルには、GFS version 9 を用いる。実験解像度はT382/L64（切断波数382, 水平解像度約35km, 鉛直64層）に設定した。この実験では、NCEPの解析値を初期値としたコントロール実験（GFS-NI）と、ECMWFの解析値を初期値とした実験（GFS-EI）、及び気象庁の解析値を初期値とした実験（GFS-JI）を行う。境界値は全ての実験でNCEPの解析値を用いる。初期値、境界値として用いるNCEPの解析値にはNCEP Climate Forecast System Reanalysis（NCEP-CFSR, Saha et al. 2010）を使用した。この

データはGFSと同じ格子、モデル面のデータ形式で提供されているため、スペクトル変換による解像度変換処理のみを行う。ECMWFの初期値作成には、Year of Tropical Convection (YOTC) データベースで提供されているECMWFの客観解析データ（0.5度間隔緯度経度格子、モデル面91層）を、気象庁の初期値作成には、気象庁客観解析値（1.25度間隔緯度経度格子、等圧面23層）を用いた。これらのデータはGFSのガウス格子、モデル面に合わせるため、水平方向にはスペクトル変換により内挿し、鉛直方向には外挿、内挿を行うことにより作成した。

2.3 渦・環境場交換実験

初期値交換実験で用いた初期値を熱帯低気圧の渦成分とそれ以外の環境場成分に分離して、別の初期値の渦成分と環境場成分と相互に交換して埋め込んだ初期値を用いることで、初期環境場の違い、初期渦の違いが予測進路に与える影響について調べる。用いる初期値以外の実験設定は、初期値交換実験と同じである。

元となる初期値には初期値交換実験で用いた初期値（ガウス格子、モデル面）を用いる。渦成分と環境場成分の分離は、Kurihara et al. (1995) の手法を用い、以下のような手順で初期渦を別の環境場成分に埋め込んだ初期値を作成する。渦と環境場成分の分離は、急峻な地形の影響を防ぐために、モデル面上ではなく等圧面上で行う。

1. 静力学平衡の式を用いて、地表気圧を海面更正気圧に求めなおす。モデル面上の予報変数は等圧面へ鉛直内挿する。
2. ベストトラックデータでの熱帯低気圧位置を中心とした40度×40度の範囲で1度間隔の作業領域格子を作成し、ガウス格子から作業領域格子に準双3次内挿 (Richie et al., 1995) する。
3. この作業領域で、等圧面上の予報変数と海面更正気圧について、Kurihara et al. (1995) の手法を用いて、渦成分と環境場成分に分離する。
4. 作業領域内で、分離した渦成分を別の初期値から分離した環境場成分に足し合わせることで、新たな初期値を作成する。渦成分の中心位置は、渦成分として用いた初期値の熱帯低気圧中心位置に合わせる。
5. 等圧面上の各予報変数、海面更正気圧を作業領域格子からガウス格子へ準双3次内挿する。
6. 海面更正気圧を地表気圧に求めなおす。各格子点上で求めた地表気圧を用いて、モデル

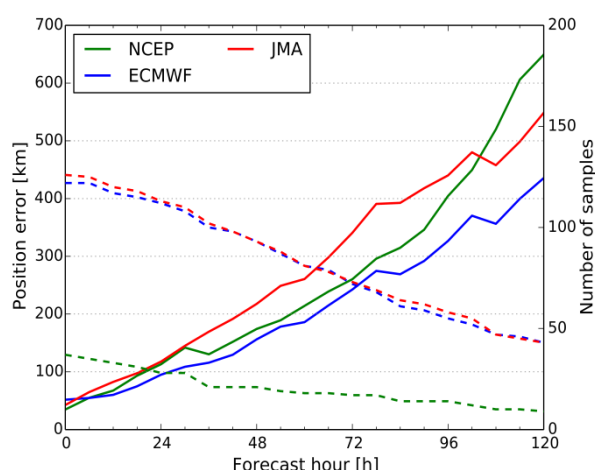


Fig. 2 Position errors (left vertical axis, solid line) from 0 to 5 days of NCEP (green), ECMWF (blue) and JMA (red) forecasts, and the number of samples (right vertical axis, dashed line). The analysis is verified 22 TCs that occurred in the western North Pacific during 2009.

面での気圧を求め、等圧面上の予報変数をモデル面での値に鉛直内挿する。

3. 初期値の違いが与える影響

この章では、2009年に北西太平洋で発生した22個の熱帯低気圧について、数値予報センターの予測結果とGFSを用いた初期値交換実験の結果との比較を行う。また、Yamaguchi et al. (2012) で挙げられていた2事例について解析を行い、初期値とモデルの違いの影響について考察する。

3.1 2009年の熱帯低気圧進路予報の平均誤差

初めに、2009年の現業数値予報センターの熱帯低気圧進路予測誤差について解析する。[Fig. 2] は、NCEP, ECMWF, 気象庁の120時間予報までの平均進路予測誤差を予報時間ごとに示したものである。NCEPのデータは、4, 5, 9月に欠損があるため、大幅にサンプル数が少なくなっている。ECMWFの予測精度は、初期時刻を除く全ての予報時間で最も精度がよい。NCEPの予測精度はサンプル数が少ないものの、102時間予報までは気象庁より精度がよい。

[Fig. 3a] は、進路予測誤差を、GFS-NI, GFS-EI, 及びECMWFの予測で比較したものである。GFS-EIは、GFS-NIに比べて、全ての予報時間で予測誤差が減少しており、予測精度の最も良かったECMWFの初期値への交換により、進路予測精度が改善したことが分かる。特に、72時間予報までは、GFS-EIは

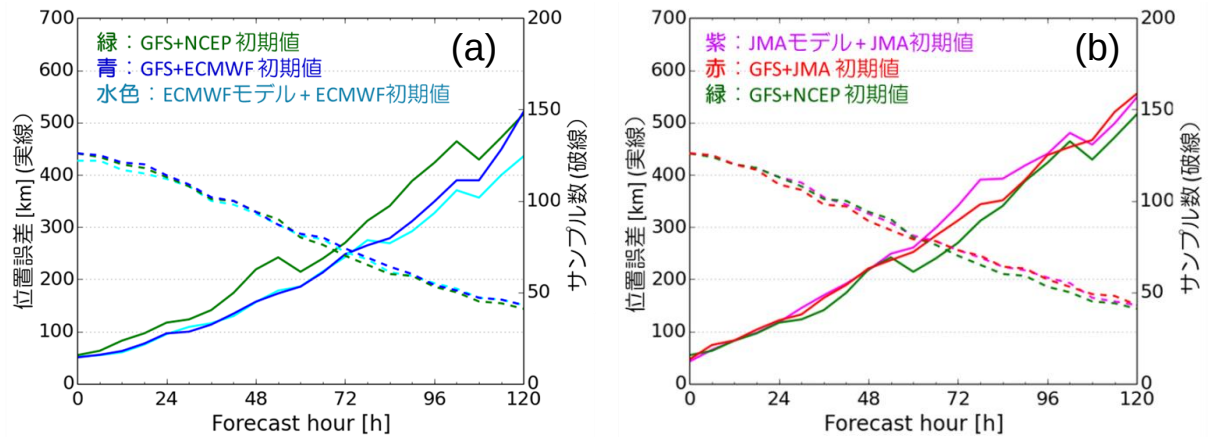


Fig. 3 As in Fig. 2, but for (a) GFS-NI (green), GFS-EI (blue), and ECMWF forecasts (cyan), (b) GFS-NI (green), GFS-JI (red), and JMA forecasts (magenta).

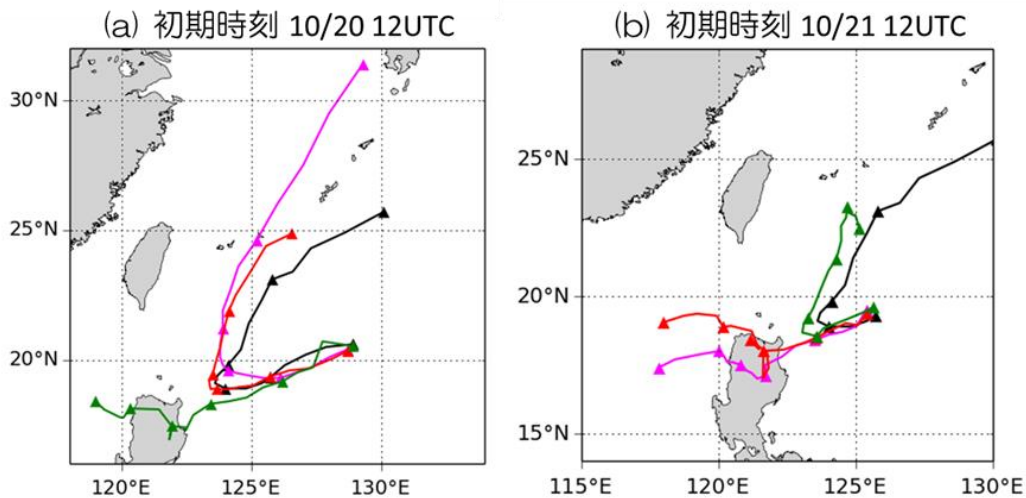


Fig. 4 TC track predictions by GFS-NI (green), GFS-JI (red), and JMA (magenta) and the observed track (black) for Lupit, initiated at (a) 12UTC on 20 October 2009, and (b) 12 UTC on 21 October 2009. The triangles are plotted along each track every 24 hours.

ECMWFの予測誤差と同程度まで改善しており、72時間予報ではGFS-NIとECMWFの予測誤差の差の98%が初期値の違いによる改善で説明される。[Fig. 3b] は、各予報時間でのGFS-NI、GFS-JI、及び気象庁の予測誤差を比較したものである。ECMWFの初期値を用いた場合とは異なり、多くの予報時間でGFS-JIは、GFS-NIに比べ予測精度が悪化している。また、72時間予報で比較した場合、GFS-NIと気象庁の予測誤差の差の61%が初期値の違いで説明される。一方、残りの39%はGFSを用いた初期値交換による改善では説明されない部分であり、解像度の違いや境界値の違いが与える影響も考慮する必要があるが、予報モデルの違いが影響している可能性を示唆する。

3.2 Lupit

Yamaguchi et al. (2012) で初期値に敏感な事例として挙げられていた台風第20号Lupitについて解析す

る。この台風は、2009年10月15日に発生し、フィリピンに接近した後、進路を大きく北に変えて北上した。

[Fig. 4] は、GFSを用いた5日進路予報をGFS-NI、GFS-JI、気象庁の予測結果と比較したものである。初期時刻10月20日12UTCの事例では、GFS-NIが北への転向を予測できていなかった一方で、GFS-JIでは気象庁の予測と同じく北への転向を予測しており、初期値交換により転向予測が大きく改善している。初期時刻10月21日12UTCの事例では、GFS-NIが北への転向を予測していたが、GFS-JIでは気象庁の予測と同じく北への転向は予測できなかった。この結果は、モデルの違いは転向の予測にあまり影響しておらず、初期値の違いに非常に敏感であったことを示している。これは、JMA-GSMでは初期値交換により転向予測が改善したYamaguchi et al. (2012) の結果と整合的である。

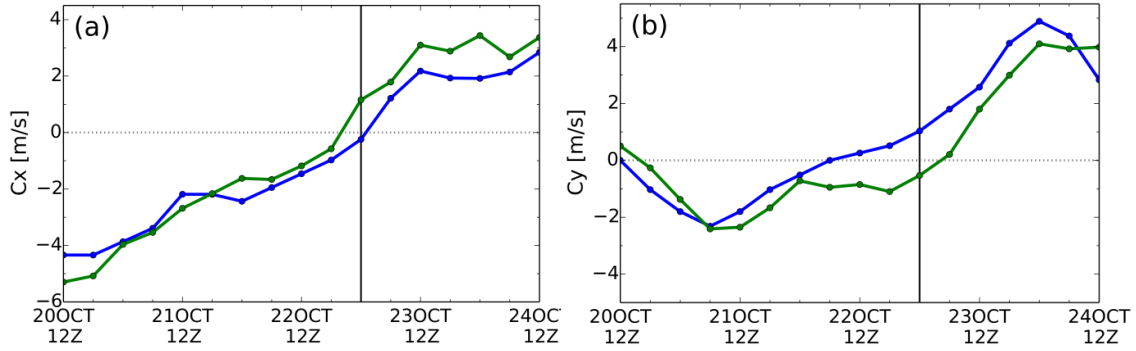


Fig. 5 Time series of (a) the zonal component and (b) the meridional component of the translation speed of Lupit (blue) and the steering flow (green) with vertical lines indication the recurvature time.

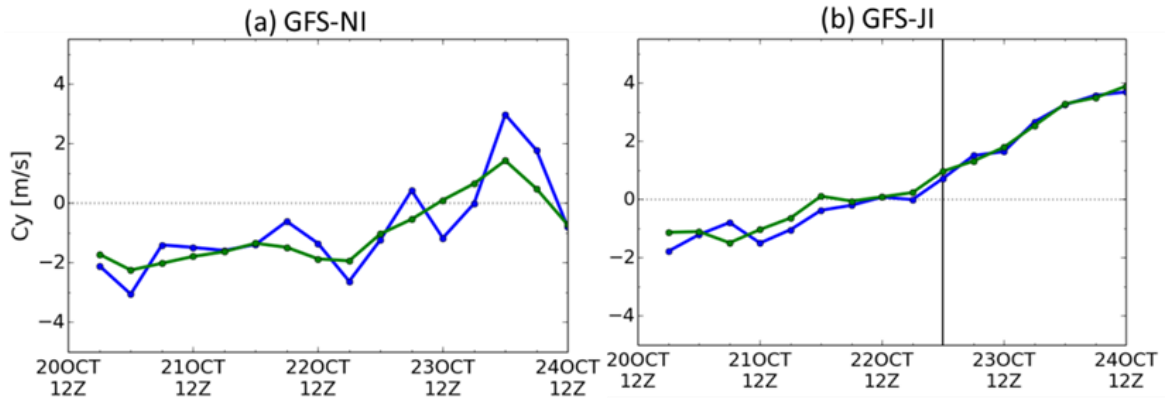


Fig. 6 Time series of the meridional component of the translation speed of Lupit (blue) and the steering flow (green) for (a) GFS-NI and (b) GFS-JI initiated at 12UTC 20 October 2009. The vertical line indicates the recurvature time.

熱帯低気圧の運動は、第一近似的には環境場の風（指向流）に従って運動することから (Chan, 2010), Lupitの運動と指向流の関係の観点から予測進路の違いを考察する。ここで、指向流は熱帯低気圧中心から半径400km内で平均した850–300hPaの質量重み付き鉛直風で定義する (Wu et al., 2011)。この指向流は、大規模場の環境風だけではなく、ベータジャイアや非軸対称な非断熱加熱によって熱帯低気圧中心付近に励起される非軸対称風 (Fiorino and Elsberry, 1989; Wu and Wang, 2000) を含んでいる。[Fig. 5] は、ベストトラックデータから求めたLupitの移動速度と、12時間移動平均をかけたERA-Interim再解析データの指向流風速の時間変化を表したものである。ここで、黒線で示した転向時刻は、熱帯低気圧の前後6時間の運動方向が時計回りに40度以上変化した時刻のうち、運動方向の変化量が最も大きい時刻で定義している。Lupitの移動速度の変化は、指向流風速の変化とよく一致しており、Lupitは主に指向流による移流によって運動していることが分かる。また、Lupitの北への転向時刻付近で指向流も北向きに変わっており、北への転向と転向後の運動は指向流でよく説

明される。

同様のLupitの移動速度と指向流の関係は、初期値交換実験における転向の予測の可否にも表れている。[Fig. 6] は、初期時刻10月20日12UTCにおけるLupitの予測について、北への転向を予測していたGFS-JIの場合と、北への転向を予測できなかったGFS-NIの場合について、指向流風速と運動速度の南北成分の時間変化を表したものである。[Fig. 5b] と同じく指向流風速とLupitの運動速度はよく一致している。北への転向を予測していたGFS-JIの場合では、転向時刻付近で指向流が北向きに変化し、Lupitの北への転向を予測していたことと整合的である。一方、転向を予測できなかったGFS-NIの場合では、指向流が北向きに変化せず、北東風となっており、この指向流に移流されてLupitも西進している。このように、初期値の違いが、指向流の時間変化に影響し、転向予測に差が出ていたと考えられる。

3.3 Parma

次に、Yamaguchi et al. (2012) で初期値に鈍感であった事例として挙げられていた台風第17号Parma

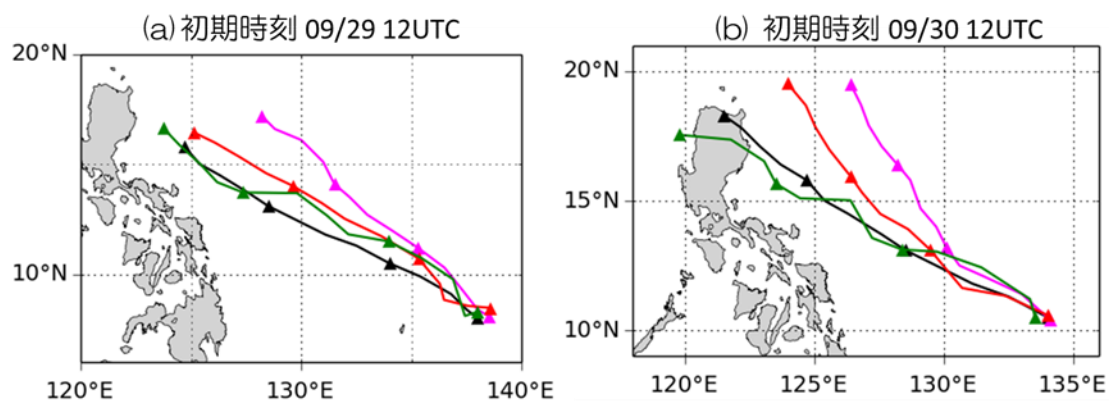


Fig. 7 TC track predictions by GFS-NI (green), GFS-JI (red), and JMA (magenta) and the observed track (black) for Parma, initiated at (a) 12UTC on 29 September 2009, and (b) 12 UTC on 30 September 2009. The triangles are plotted along each track every 24 hours.

について解析する。この台風は9月29日に発生した後、フィリピンの東海上を西進し、フィリピンに上陸した。

[Fig. 7] は、GFSを用いた初期値交換実験の結果を気象庁の予測進路と比較したものである。いずれの初期時刻も、気象庁の予測では進行方向に対して右側にずれた進路をとっており、北進バイアスが顕著である。気象庁の予測進路の進行方向に直交する成分の位置誤差は、72時間予報の時点で、9月29日12UTC初期時刻の事例では355km、9月30日12UTC初期時刻の事例では356kmとなっている。一方、GFS-NIには北進バイアス傾向は見られない。気象庁解析値を初期値として用いた場合、初期時刻9月29日12UTCの事例では、72時間予報での進行方向に直交する成分の位置誤差は7kmで、気象庁予測の誤差の98%が解消し、北進バイアスはほぼ完全に改善された。この結果は、気象庁の初期値を用いたとしても、予報モデルとしてGFSを用いた効果により改善したものと考えられる。一方、初期時刻9月30日12UTCの場合、進行方向に直交する成分の位置誤差は240kmで、気象庁予測に比べ、北進バイアスは減少するものの、誤差の減少率は33%にとどまり、GFS-NIでは見られなかった北進バイアス傾向が依然として残る結果となった。Yamaguchi et al. (2012) は、この事例の北進バイアスは初期値に鈍感であり、モデルの違いに伴う誤差の影響を指摘しているが、本実験の結果は、モデルを変えても誤差が全て改善されることはなく、初期値の違いによる影響も重要である可能性を示唆している。

4. 初期渦と初期環境場の違いが与える影響

第3.3節の解析で、9月30日12UTCを初期時刻とし

たParmaの予測進路は、初期値の違いの影響を受けている可能性が示唆された。本章では、この事例において、初期渦、初期環境場の違いが予測進路に与える影響についてさらに調べるために、数値実験を行った。

[Fig. 8] は、初期値交換実験に用いた初期時刻9月30日12UTCのNCEPと気象庁の初期値についてのポテンシャル渦度の東西断面図である。気象庁初期値は850hPa付近に極大があり、上層では西に傾いている。ポテンシャル渦度の中心は、Parmaの中心位置とほぼ同じで鉛直方向によく結合した構造をしており、発達した熱帯低気圧の典型的な鉛直構造に近い。これは、気象庁の解析値では作成の際に、台風ボーガスが投入されていることが影響していると考えられる。一方、NCEPの初期値は、気象庁初期値に比べ発達が弱く、600hPaより下層でParmaに伴う正のポテンシャル渦度極大があるが、上層の構造ははっきりしない。

[Fig. 9a, b] はそれぞれ、NCEP、気象庁初期値を用いたGFS-NI、GFS-JIの予測結果と、それと同じ環境場に気象庁、NCEPの渦成分を埋め込んだ初期値を用いた実験の予測進路を比較したものである。いずれの場合も、渦成分を入れ替えたにも関わらず、環境場成分として用いた初期値を用いた場合の予測進路とほぼ同じ予測進路となっている。北進バイアスのなかったNCEP初期値の渦成分を用いても、気象庁初期値をそのまま用いた場合と同じく、北進バイアス傾向が見られる [Fig. 9b]。この結果は、この初期時刻のParmaの事例では、初期渦の構造に違いがあったものの、進路予測には影響せず、初期値の環境場成分の再現性が重要であることを示している。GFSを用いた初期値交換実験で見られたGFS-JIの北進バイアス [Fig. 7b] は、気象庁初期値の環境場成分の誤差

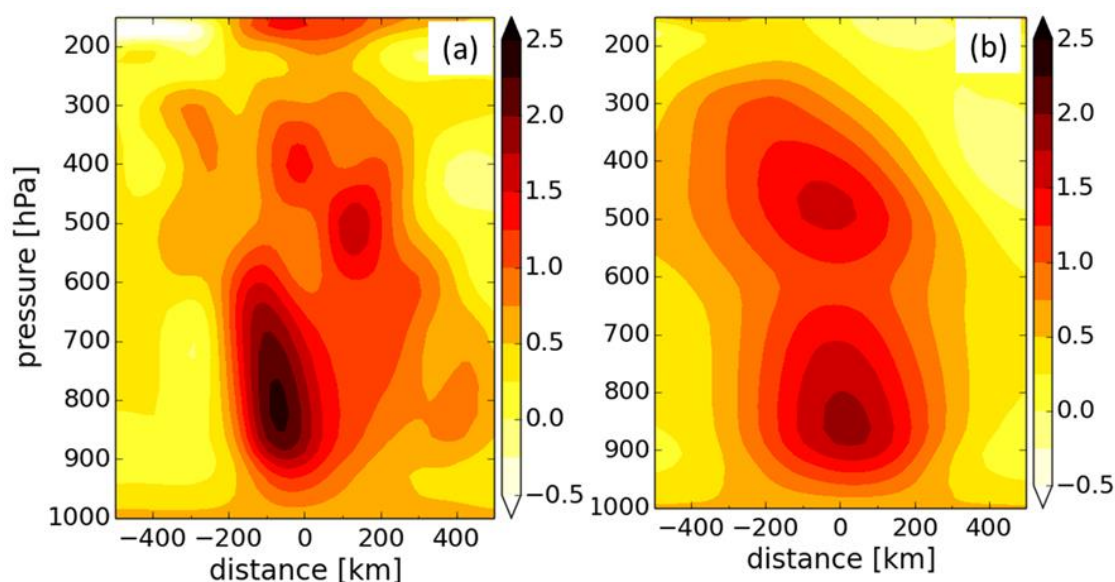


Fig. 8 The east-west (from right to left) cross section of potential vorticity (the unit is PVU) of (a) NCEP initial condition and (b) JMA initial condition for Parma, initiated at 12UTC 30 September 2009.

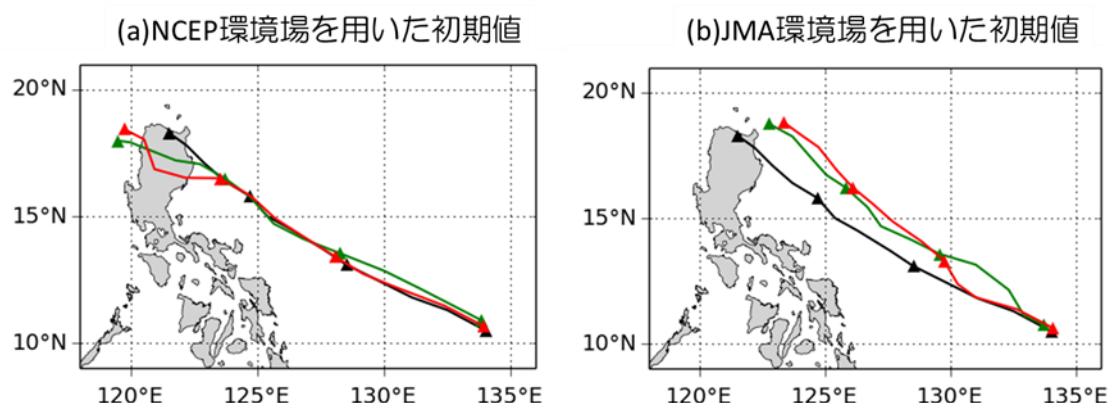


Fig. 9 TC track predictions by GFS from (a) NCEP initial condition (green) and initial condition with JMA vortex component embedded in NCEP environmental component (red), (b) JMA initial condition (green) and initial condition with NCEP vortex component embedded in JMA environmental component (red) for Parma, initiated at 12 UTC on 30 September 2009. The black lines indicate the observed tracks and the triangles are plotted along each tracks every 24 hours.

に起因する指向流予測の差が影響していると考えられる。

5. 結論

本研究では、NCEP、ECMWF、気象庁の3つの異なる数値予報センターの解析値から作成した初期値を用いて、NCEPの現業予報モデルGFSによる熱帯低気圧の進路予測実験を行うことで、初期値の違いが進路予測誤差に与える影響を調べた。さらに、現業数値予報センターの進路予測結果と、JMA-GSMを用いたYamaguchi et al. (2012) の結果との比較により、モデルの違いが進路予測に与える影響についても考

察を行った。

初期値交換実験の結果、2009年に北西太平洋で発生した熱帯低気圧の平均進路予測誤差は、最も精度の良かったECMWFの初期値を用いることで、NCEPの初期値を用いる場合に比べ、ECMWFの予測と同程度まで改善した。72時間予報の誤差で比較すると、NCEP初期値を用いたGFS実験とECMWFの予測誤差の差の98%が、初期値の違いによる改善で説明される。一方、気象庁初期値を用いた場合は、多くの予報時間でNCEP初期値を用いた場合に比べ悪化した。72時間予報で比較すると、初期値の違いで説明されるのは、気象庁初期値を用いたGFS実験と気象庁の予測誤差の差の61%であり、ECMWFの予測との比較

とはやや異なり、予報モデルの違いが影響している可能性が示唆された。

北への転向の予測に違いが見られた台風第20号Lupitの予測では、転向を予測していた予報センターの初期値を用いることで転向の予測が改善した。この結果は、JMA-GSMを用いたYamaguchi et al. (2012)の結果と整合的であり、この事例が初期値に敏感な事例であったことを示している。転向を予測していた事例では、熱帯低気圧環境場の風である指向流の変化とLupitの運動速度の時間変化はよく一致しており、初期値の違いが指向流予測に影響し、その結果として転向予測に差が出ていたことが分かった。

気象庁の予測にのみ顕著な北進バイアスが見られたParmaの予測では、初期時刻によってモデルの違いの影響が異なることが示唆された。初期時刻9月29日12UTCの事例では、気象庁初期値を用いたGFSによる予測では、北進バイアスは見られず大きな改善が見られた一方、初期時刻9月30日12UTCの事例では、誤差は減少するものの、NCEP、ECMWFの初期値を用いた場合には見られなかった北進バイアス傾向が依然として見られた。Yamaguchi et al. (2012)はこの事例の北進バイアスは初期値に鈍感であると指摘しているが、本実験の結果は、モデルに伴う誤差だけではなく、初期値に伴う誤差の影響も重要である可能性を示唆する。

最後に、初期値を環境場成分と渦成分に分離し、別の初期値の成分に埋め込むことで、初期環境場と初期渦の違いが予測進路に与える影響を調べた。9月30日12UTC初期時刻のParmaの事例では、初期渦の構造に違いが見られたものの、予測進路は環境場成分として用いた初期値の予測とほぼ同じとなり、初期渦の違いは影響しなかった。この事例では、初期環境場の誤差が北進バイアスに影響していることを示しており、大規模場の環境風、すなわち指向流の再現性が重要であると考えられる。

謝 辞

本研究で用いたGFSのLinux環境への移植作業は、京都大学防災研究所「組織的な若手研究者等派遣プログラム」の支援を受けて米国メリーランド大学大気海洋科学科に1ヶ月間滞在して行ったものです。GFSの移植作業、使用方法について、メリーランド大学の三好建正准教授、NCEPの太田洋一郎氏より助言を頂きました。

参考文献

梅津浩典・森安聡嗣 (2013) : WGNE熱帯低気圧検

証, 平成25年度数値予報課報告・別冊第59号, 気象庁予報部, pp. 98-111.

山口宗彦・酒井亮太 (2004) : 熱帯低気圧進路予報の国際比較, 平成16年度数値予報課報告・別冊第50号, 気象庁予報部, pp. 39-42.

Chan, J. C. L. (2010): Movement of tropical cyclones, in *Global Perspectives on Tropical Cyclones*, edited by J. C. L. Chan and J. D. Kepert, World Sci., Singapore., pp. 133-148.

Carr, L. E. and R. L. Elsberry (2000a): Dynamical Tropical Cyclone Track Forecast Errors. Part I: Tropical Region Error Sources, *Weather Forecast*, Vol. 15, No. 6, pp. 641-661.

Carr, L. E. and R. L. Elsberry (2000b): Dynamical Tropical Cyclone Track Forecast Errors. Part II: Midlatitude Circulation Influences. *Weather Forecast*, Vol. 15, No. 6, pp. 662-681.

Dee, D. P. et al. (2011): The ERA-Interim Reanalysis: Configuration and Performance of the Data Assimilation System. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, Vol. 137, No. 656, pp. 553-597.

Fiorino, M. and R. L. Elsberry (1989): Some Aspects of Vortex Structure Related to Tropical Cyclone Motion, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 46, No. 7, pp. 975-990.

Kurihara, Y., M. A. Bender, R. E. Tuleya, and R. J. Ross (1995): Improvements in the GFDL Hurricane Prediction System, *Mon. Weather Rev.*, Vol. 123, No. 9, pp. 2791-2801.

Marchok, T. P. (2002): How the NCEP Tropical Cyclone Tracker Works. In *25th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*, San Diego, CA, USA, Amer. Meteor. Soc.

Ritchie, H., C. Temperton, A. Simmons, M. Hortal, T. Davies, D. Dent, and M. Hamrud (1995): Implementation of the Semi-Lagrangian Method in a High-Resolution Version of the ECMWF Forecast Model, *Mon. Weather Rev.*, Vol. 123, No. 2, pp. 489-514.

Saha, S. et al. (2010): The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, Vol. 91, No. 8, pp. 1015-1057.

Van der Grijn, G. (2002): Tropical Cyclone Forecasting at ECMWF: New Products and Validation, ECMWF tech. Memo. No. 386, ECMWF.

Wu, L., H. Zong, and J. Liang (2011): Observational Analysis of Sudden Tropical Cyclone Track Changes in the Vicinity of the East China Sea, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 68, No. 12, pp. 3012-3031.

Wu, L. and B. Wang (2000): A Potential Vorticity

Tendency Diagnostic Approach for Tropical Cyclone Motion, Mon. Weather Rev., Vol. 128, No. 6, pp. 1899–1911.

Yamaguchi, M., Nakazawa, T. and K. Aonashi, (2012) : Tropical Cyclone Track Forecasts using JMA Model with ECMWF and JMA Initial Conditions., Geophys. Res. Lett., Vol. 39, L09801, doi:10.1029/2012GL051473.

(論文受理日 : 2014 年 6 月 4 日)