

## 2019 年台風第 19 号の進路予報精度低下の要因

### Factors for an Abrupt Increase in Track Forecast Error of Hagibis 2019

中下 早織<sup>(1)</sup>・榎本 剛

Saori NAKASHITA<sup>(1)</sup> and Takeshi ENOMOTO

(1) 京都大学大学院 理学研究科

(1) Graduate School of Science, Kyoto University, Japan

#### Synopsis

We have investigated the quality of track forecast for Typhoon Hagibis 2019 using ensemble forecast data from four major operational numerical weather forecast centers, ECMWF, NCEP, UKMO, and JMA. From six to four days before the landfall, the JMA forecast was the best among other centers, but the error increased sharply three days before the landfall. Compared to the forecast from 0000 UTC 9 October, the typhoon drifted westward about two days before the landfall in the forecast from 1200 UTC 9 October. Consistent with the westward track error, there was a northwestward bias of the environmental winds. The sensitivity analysis at the verification time close to the landfall indicates a large sensitivity to a low pressure disturbance located to the south of the typhoon.

**キーワード** : 台風, 進路予報, アンサンブル予報, 感度解析

**Keywords** : Typhoon, Track forecast, Ensemble forecast, Sensitivity analysis

#### 1. はじめに

2019 年台風第 19 号 (Hagibis) は 10 月 6 日に南鳥島の南海上で発生し, 発達しながら北上して 12 日の 10 UTC ごろ伊豆半島に上陸した. 上陸後は関東地方を通過し, 東日本から東北地方にかけて記録的な大雨をもたらした (気象庁, 2020).

本研究ではまず台風第 19 号の進路予報精度を主要予報センター間で比較する. 次に, 精度の急激な悪化が見られた気象庁の上陸 3 日目の予報に注目して精度低下の要因について解析を行う.

第 2 節では本研究で用いたデータと解析手法について紹介する. 次に第 3 節で解析結果について述べ, 最後に第 4 節で本研究をまとめる.

#### 2. データと解析手法

本研究では予報値として欧州中期予報センター (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF), 米国国立環境予測センター (National Centers for Environmental Prediction, NCEP), 英国気象局 (United Kingdom Met Office, UKMO), 気象庁 (Japan Meteorological Agency, JMA) の 4 つの予報センターのアンサンブル予報データを用いる. アンサンブル予報データは ECMWF のサイトで提供されている TIGGE (The International Grand Global Ensemble) データベースより取得した. 水平解像度は全センター共通で  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  (モデルの解像度は ECMWF が約  $0.16^\circ$ , NCEP が約  $1^\circ$ , UKMO が約  $0.6^\circ$ , 気象庁が約  $0.4^\circ$ ) であり, メンバー数は ECMWF が 50, NCEP が 20, UKMO が 17, JMA

が 26 である。より高解像度の決定論的予報とアンサンブル予報の平均では台風進路にほとんど差が見られなかったため、予報センター間の比較、異なる初期時刻間の比較はアンサンブル平均を用いて行う。また、台風進路の解析値は気象庁のベストトラックデータを、大気場の解析値は NASA (National Aeronautics and Space Administration) の提供する再解析 MERRA-2 (Modern-Era Restrospective analysis for Research and Applications version 2, Gelaro et al., 2017) の 3 時間平均値を用いている。MERRA-2 の水平解像度は  $0.625^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  である。なお MERRA-2 の 3 時間平均値は 00 UTC から 3 時間ずつ区切った時間幅での平均値のため、アンサンブル予報の予報時刻 (00, 06, 12, 18 UTC) での値は各時刻の前後の 3 時間平均値を平均して求めている。

## 2.1 台風中心の特定方法

台風中心は格子点データの海面気圧と気象庁のベストトラックデータを用いて以下のように決める。

- [1] ベストトラックの台風中心に最も近い海面気圧の極小値を格子点データから求める。
- [2] 求めた極小点とその周囲の 8 点を含む 9 点の海面気圧値を利用して、海面気圧を 2 次曲面で近似する。
- [3] 計算された 2 次曲面の頂点を台風中心位置、頂点での値を中心気圧とする。

中心気圧が 1010 hPa より高いか、中心の緯度が  $40^{\circ}\text{N}$  より北になった場合、進路の追跡を終了する。

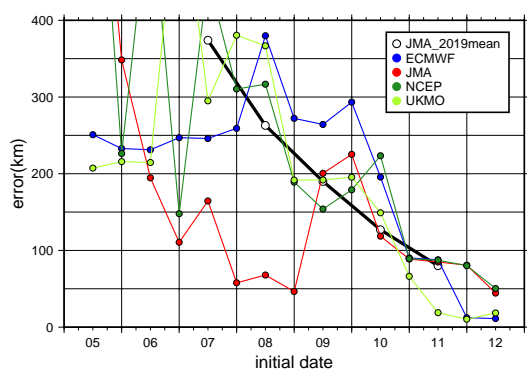


Fig. 1: Positional error valid at 1200 UTC 12 October 2019 for ECMWF (blue), JMA (red), NCEP (green), UK Met Office (light green). Error is measured from the JMA best track data. The black line with white circle indicates the JMA mean error in 2019.

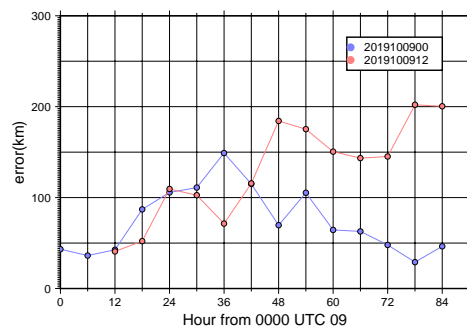


Fig. 2: Positional error of forecast from 0000 UTC 09 and 1200 UTC 09.

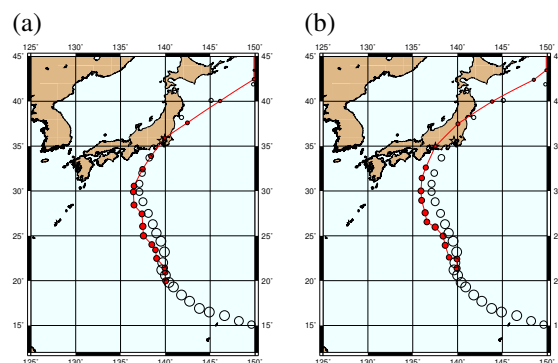


Fig. 3: Track forecast from (a) 0000 UTC, and (b) 1200 UTC. Black circles indicate the best track.

## 2.2 非軸対称な風成分の計算

台風進路は環境場の指向流の影響を強く受ける。指向流は鉛直方向の重みづけ平均風でよく近似されるが、鉛直平均する高度範囲は台風の強さに依存し、勢力の強い台風ほど影響を受ける高度範囲が上層に伸びる (Velden and Leslie, 1991)。本研究では指向流を求めるうえで台風の渦の影響を除いた環境場の風を見るために、非軸対称な風成分を計算する。計算にあたって簡略化のために、台風中心が北極に位置するように座標を回転する (Enomoto, 2019)。座標変換を行った場合、帯状平均風が軸対称風となり、非軸対称風は帯状平均風からのずれを計算することで得られる。得られた非軸対称風を台風が影響を受けると考えられる高度範囲で鉛直平均したものを指向流とみなす。

## 2.3 アンサンブル感度解析

上陸位置のずれに寄与した摂動を特定するために、アンサンブル感度解析 (Enomoto et al., 2015) を行

う。感度解析とは任意の検証領域において、検証時刻に最も発達する擾乱に対応する初期擾乱を求め、予報誤差が増大しやすい高感度領域を推定する解析手法である。アンサンブル感度解析では、接線形モデルとアジョイントモデルを利用して擾乱の発達を表す特異ベクトル法 (Buizza et al., 1993) をアンサンブル予報を用いて近似している。本研究では検証時刻は 12 日 12 UTC とし、摂動を計算するときの基本場はアンサンブル平均としている。初期時刻と検証領域の設定については 3.3 節で述べる。評価ノルムには以下の式で定義される湿潤全エネルギーノルム (Ehrendorfer et al., 1999)

$$TE = \frac{1}{2} \frac{1}{D} \int_D \int_0^1 \left[ u'^2 + v'^2 + \frac{c_p}{T_r} T'^2 + RT_r \left( \frac{p'_s}{p_r} \right)^2 + \epsilon \frac{L^2}{c_p T_r} q'^2 \right] d\sigma dD \quad (1)$$

を用いる。ここで、 $D$  は検証領域の面積、 $\sigma$  は地上気圧で規格化した気圧座標、 $u, v, T, p_s, q$  はそれぞれ東西風速、南北風速、気温、海面気圧、比湿を表し、ダッシュがついている変数は平均からのずれを表す。式中の定数はそれぞれ、定圧比熱  $c_p = 1005.7 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 、気体定数  $R = 287.04 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 、潜熱比熱  $L = 2.5104 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$  である。また、参照場の気温と地上気圧、潜熱加熱のパラメータは  $T_r = 270 \text{ K}$ ,  $p_r = 1000 \text{ hPa}$ ,  $\epsilon = 1.0$  としている。

感度解析の結果は第 1 モードの湿潤エネルギー摂動と、第 1 モードの主成分得点でアンサンブルメンバーを重みづけ平均した各変数の摂動の空間分布として示す。

### 3. 結果

#### 3.1 予報誤差の国際比較

上陸時刻に近い 12 日 12 UTC を検証時刻として、検証時刻での台風中心位置の誤差を 4 つの予報センター間で比較する [Fig. 1]。6 日から 8 日の誤差を見ると、気象庁の予報は他センターよりも圧倒的に精度が良いことがわかる。また気象庁の予報は 9 日 00 UTC まで 2019 年の台風進路予報の平均精度を大きく上回っており、早期の気象庁の進路予報はかなり良好であったといえる。しかし 9 日 12 UTC に精度が急激に悪化し、その後は 2019 年の平均と同程度の精度となっている。

そこでここからの解析では、気象庁のアンサンブ

ル予報に焦点を当てて、精度の転換点となった 9 日 00 UTC と 12 UTC を初期時刻とする予報を比較し、精度低下の要因について考察する。

#### 3.2 進路比較

9 日 00 UTC と 12 UTC の 2 つの初期時刻からの予報における、各時刻の台風中心位置の誤差を Fig. 2 に、2 つの予報進路を Fig. 3 に示す。Fig. 2 より、10 日 12 UTC から 00 UTC では精度向上、12 UTC では精度悪化方向に向かい、10 日 18 UTC を境として 2 つの予報で精度が入れ替わることがわかる。Fig. 3 を見ると、00 UTC [Fig. 3 (a)] では 10 日 18 UTC から北向きに進みベストトラックとほぼ同じような進路を取っている。一方 12 UTC [Fig. 3 (b)] では 10 日 18 UTC の進路は西寄りであり、そのまま西にずれた位置に上陸する予報となっている。

10 日から 11 日における環境場の風の分布を Fig. 4 に示す。ここでは台風中心付近の渦度分布 (図は省略) から台風の上端を 300 hPa 付近とみなし、2.2 節で述べた方法で接線風を除いた非軸対称風を 850 hPa, 500 hPa, 300 hPa の 3 つの高度でのデータを用いて鉛直に重みづけ平均した風の分布を示している。Fig. 4 から、12 UTC の予報では 10 日の 12 UTC に北西向きの流れが見られることがわかる。一方 00 UTC では 11 日 00 UTC に強い北向きの流れが見られ、北向きの進路を取ることと整合的である。

#### 3.3 感度解析

この節では 2.3 節で述べた感度解析を 9 日 12 UTC を初期時刻とする予報に対して適用した結果を示す。検証領域は検証時刻におけるベストトラックの台風中心 ( $139.6^\circ\text{E}$ ,  $35.6^\circ\text{N}$ ) とアンサンブル平均の台風中心 ( $137.5^\circ\text{E}$ ,  $34.9^\circ\text{N}$ ) を両方含む  $136^\circ\text{E} \sim 142^\circ\text{E}$ ,  $33^\circ\text{N} \sim 36^\circ\text{N}$  の領域とした。解析で得られた第 1 モードの寄与率は 68.79% であった。本研究では評価ノルムとしてエネルギーノルムを使用し、絶対値での評価をしているため、第 1 モードの主成分得点でアンサンブルメンバーを重みづけ平均した初期摂動の符号には任意性が残る。この後示す結果の図では、予報誤差が増大する方向を示す符号を採用している。

解析の結果、初期時刻において海面気圧の摂動は台風中心 ( $139.6^\circ\text{E}$ ,  $21.2^\circ\text{N}$ ) とその南南西の低圧摂動 ( $146^\circ\text{E}$ ,  $10^\circ\text{N}$  付近) に感度を示していた [Fig. 5 (a)]。この低圧摂動に対応する下層の気温と湿度にも

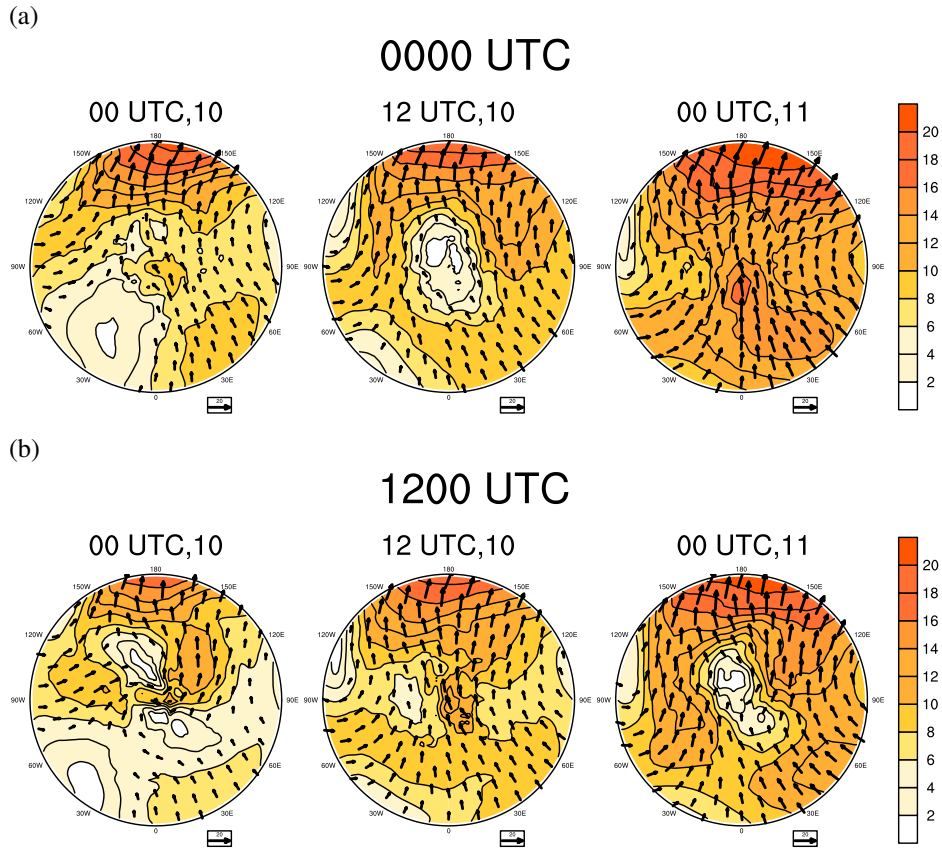


Fig. 4: Vertical mean non-axisymmetric winds (vector,  $\text{m s}^{-1}$ ) and wind velocity (color,  $\text{m s}^{-1}$ ) of forecast from (a) 0000 UTC and (b) 1200 UTC, from 0000 UTC 10 to 0000 UTC 11 October.

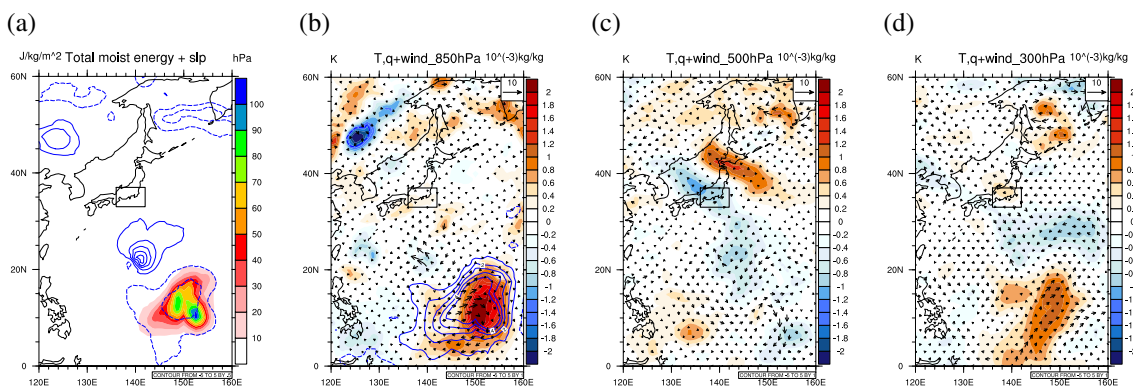


Fig. 5: The 1st mode of ensemble sensitivity analysis at the initial time in terms of (a) the total moist energy (color,  $\text{J kg}^{-1} \text{m}^{-2}$ ) and sea level pressure (contour, every 0.5 hPa), winds (vector,  $\text{m s}^{-1}$ ), temperature (color, K), and specific humidity (contour, every  $10^{-3} \text{kg kg}^{-1}$ ) at (b) 850 hPa, at (c) 500 hPa, and at (d) 300 hPa, respectively. The black box indicates the verification region.

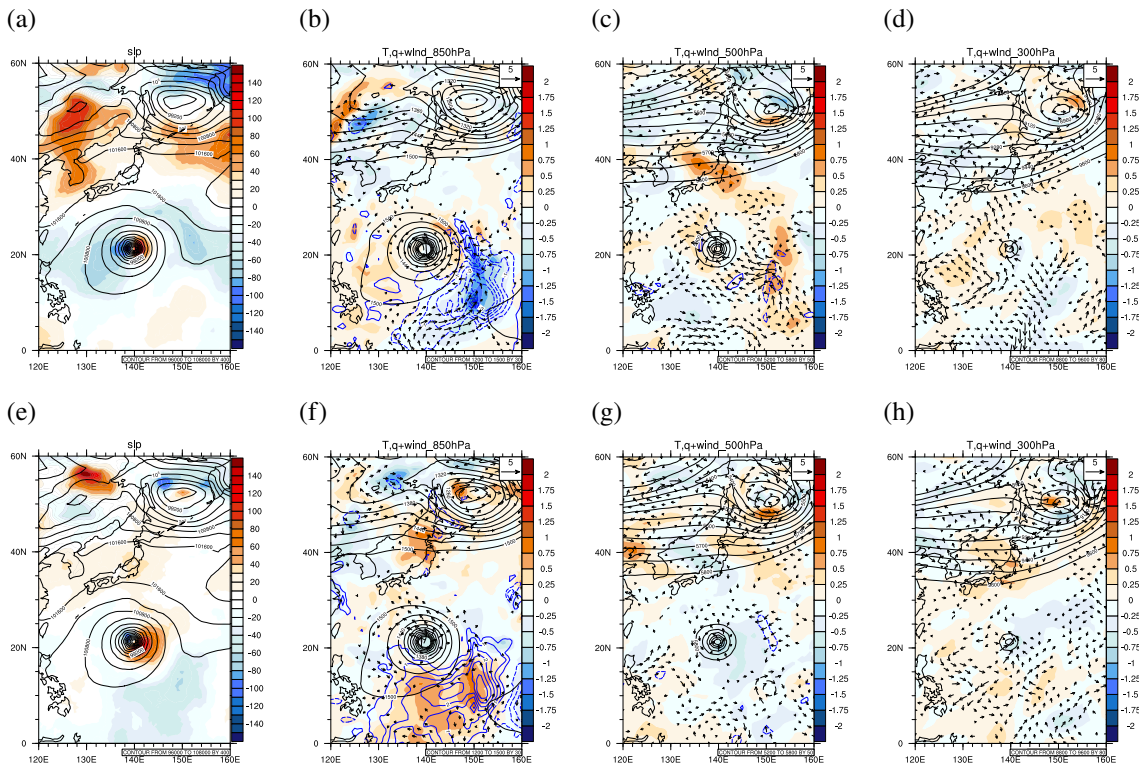


Fig. 6: Perturbations from the ensemble mean at the initial time, at the surface (a, e), at 850 hPa (b, f), at 500 hPa (c, g), and at 300 hPa (d, h), for the best (member 5, a–d), and the worst (member 26, e–h) members. Variables are same as Fig. 5, and the ensemble mean sea level pressure or height is also plotted with black contours for reference.

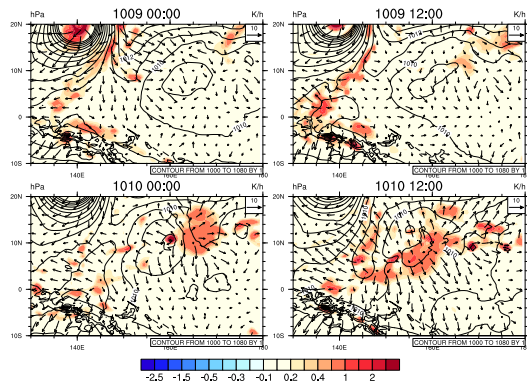


Fig. 7: Analyzed three hour mean sea level pressure (contour, every 1 hPa), divergent winds (vector,  $\text{ms}^{-1}$ ), and temperature tendency for moist process (color,  $\text{K h}^{-1}$ ) from 9 to 10 October. Divergent winds are at about 200 hPa (43th model layer), and moist process temperature tendency is vertically averaged from 600 hPa to 200 hPa.

感度を示しており [Fig. 5 (b)], 湿潤エネルギー摂動に反映されている. 個々のアンサンブルメンバーを

見ると, 上陸位置の誤差が大きかったメンバーには台風の南南東に下層に暖湿摂動を伴う低気圧性の摂動が与えられており, 誤差の小さいメンバーには逆向きの摂動が与えられている [Fig. 6]. 低気圧性偏差の北側には西向きの流れが存在するため, 12 UTCからの予報の台風進路が西向きにずれる原因となったと考えられる.

10月9日の台風南側の大気場を見ると,  $160^{\circ}\text{E}$ ,  $10^{\circ}\text{N}$  付近に周囲より約  $2\text{hPa}$  の低圧部が存在し, 10日にかけて西に動きながら対流活動を活発化させている [Fig. 7]. 9日 12 UTCにおいてこの低圧部と台風の間には弱いリッジが存在しているが, 精度の悪いメンバーではこのリッジの位置に低圧摂動が与えられている. このリッジの弱化によって東の低圧部の西進が早まり, 北側に強制される西風が台風進路に影響を与えるようになったと考えられる.

#### 4. まとめ

2019年台風第19号の進路予報精度を主要予報センター間で比較した. 気象庁の予報は上陸の4日前

までは他の予報センターや気象庁の年平均より精度が良く、早期の予報はうまくいっていたことがわかった。しかし、気象庁の進路予報は上陸3日前に急激に精度悪化しており、その要因について気象庁のアンサンブル予報を用いて解析を行った。

精度の転換点となった9日00 UTCと12 UTCの予報を比較すると、精度が悪化した12 UTCの予報進路は上陸約2日前にベストトラックに対して西にずれ、そのまま上陸位置も西にずれることがわかった。台風を流す環境場の風を調べるために台風中心に対して非対称な風の分布を見ると、進路に対応して00 UTCでは北向きの流れ、12 UTCでは北西向きの流れが見られた。

上陸位置の誤差に寄与した摂動を特定するため、上陸時刻を検証時刻、上陸位置のずれが見られた領域を検証領域として、12 UTCからのアンサンブル予報に対してアンサンブル感度解析を行った。第1モードでは初期時刻に台風の南南東に位置する低圧摂動に感度を示しており、それに対応して下層の温暖・湿潤な摂動と湿潤エネルギー摂動にも感度が現れていた。実際に精度の良いメンバーと悪いメンバーの初期時刻の摂動を比較すると、低圧摂動の位置に符号が逆の摂動が与えられていることがわかった。低圧摂動に伴う低気圧性循環は北に西向きの流れを強制するため、12 UTCからの予報の進路が西向きにずれの原因となったことが考えられる。

本研究から、台風進路に対する熱帯擾乱の影響が示唆された。しかし、熱帯擾乱が環境場に強制する流れの詳細については明らかになっていない。また、感度解析 [Fig. 5] では中緯度の低気圧 (150°E, 52°N と 125°E, 50°N 付近) にも弱い感度を示している。今後はこれらの擾乱が強制する流れについて解析していく予定である。

## 参考文献

- 気象庁 (2020): 【災害時気象報告】令和元年東日本台風等による10月10日から10月26日にかけての大雨・暴風等 (本文) . [http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji\\_2019/saigaiji\\_202003.pdf](http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_2019/saigaiji_202003.pdf), 2020年7月1日閲覧.
- Buizza, R., J. Tribba, F. Molteni, and T. Palmer (1993): Computation of optimal unstable structures for a

numerical weather prediction model., *Tellus*, Vol. 45A, No. 5, 388–407.

- Ehrendorfer, M., R. M. Errico, and K. D. Raeder (1999): Singular-vector perturbation growth in a primitive equation model with moist physics., *J. Atmos. Sci.*, Vol. 56, No. 11, 1627–1648.
- Enomoto, T., S. Yamane, and W. Ohfuchi (2015): Simple sensitivity analysis using ensemble forecasts., *Jour. of. Met. Soc. Japan.*, Vol. 93, No. 2, 199–213.
- Enomoto, T. (2019): Influence of the track forecast of Typhoon Prapiroon on the heavy rainfall in western Japan in July 2018., *SOLA*, Vol. 15A, 66–71.
- Gelaro, R., and Coauthors (2017): The modern-era re-spectroscopic analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2)., *J. Climate*, Vol. 30, No. 14, 5419–5454.
- Velden, S. C., and L. M. Leslie (1991): The basic relationship between tropical cyclone intensity and the depth of the environmental steering layer in the Australian region., *Wea. Forecasting*, Vol. 6, No. 2, 244–253.

(論文受理日: 2020年8月31日)