

2019 年台風第 19 号の進路予報精度に対する熱帯擾乱の影響

中下早織 (京都大学大学院理学研究科)
榎本剛 (京都大学防災研究所/JAMSTEC APL)

1. はじめに

2019 年台風第 19 号 (Hagibis) は 2019 年 10 月 6 日に南鳥島南海で発生し、発達しながら北上して 12 日 10UTC ごろ伊豆半島に上陸した。上陸直前には中心気圧が 965 hPa に達するまで発達し、強い勢力を保ったまま関東地方を通過して東日本と東北地方に記録的な大雨をもたらした (Japan Meteorological Agency, 2020)。

本研究では Hagibis の予測可能性を主要予報センターの進路予報を比較することで検証する。また、精度の急激な悪化が見られた気象庁の上陸 3 日前の予報に注目して、精度低下の要因について解析を行う。

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)、米国国立環境予報センター (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 が提供している TIGGE (The International Grand Global Ensemble) データベースより取得した。取得データの水平解像度はすべて $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ にそろえている (モデルの解像度は ECMWF が約 0.16° 、NCEP が約 1° 、UKMO が約 0.6° 、気象庁が約 0.4°)。鉛直レベルは 850、500、300 hPa 面と地表面におけるデータを用いた。アンサンブルメンバー数は ECMWF が 50、NCEP が 20、UKMO が 17、JMA が 26 である。

台風進路の解析値には気象庁のベストトラックデータを用いた。

また、熱帯の環境場の解析のために、NASA (National Aeronautics and Space Administration) が作成した MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications version 2, Gelaro et al., 2017) の 3 時間平均値を用いた。MERRA-2 の水平解像度は $0.625^\circ \times 0.5^\circ$ 、鉛直解像度は 72 層 (モデル面) または 42 層 (気圧面) である。解析にあたっては、アンサンブル予報時刻 (00、

06、12、18UTC) での値を前後の 3 時間平均値を平均して求めている。

本研究では Hagibis が生活圏に甚大な被害をもたらしたことを考慮し、上陸時刻に最も近い予報時刻 (12 日 12UTC) を検証時刻とし、検証時刻の台風中心位置の誤差を進路予報精度評価の指標とする。台風中心は海面気圧の極小値として定義し、海面気圧の格子点データを放物面近似することで求める。進路比較にはアンサンブル平均データを用いた。なお、アンサンブル平均の進路とより高解像度の決定論予報の進路にはほとんど差が見られなかった。

台風進路は環境場の指向流の影響を強く受けるため、指向流の解析を行う。指向流の定義は、Velden and Leslie (1991) において最も勢力の強い台風に適しているとされる $850-300\text{hPa}$ での鉛直重みづけ平均風を用いた。また、簡単のため台風中心に対して非軸対称な風が環境場に属するとみなす。非軸対称風は、台風中心が北極に位置するように座標変換を行った後に帯状平均風からのずれとして計算する (Enomoto, 2019)。

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。感度解析はあらかじめ設定した検証時刻、検証領域において最も発達する擾乱に対応する初期擾乱を求めることで、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。本研究ではアンサンブル特異ベクトル解析 (EnSVSA) を用い、摂動はアンサンブル平均場からのずれとした。詳しい条件設定については後述する。評価ノルムには湿潤全エネルギーノルム (Ehrendorfer et al., 1999)

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

を用いた。

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。

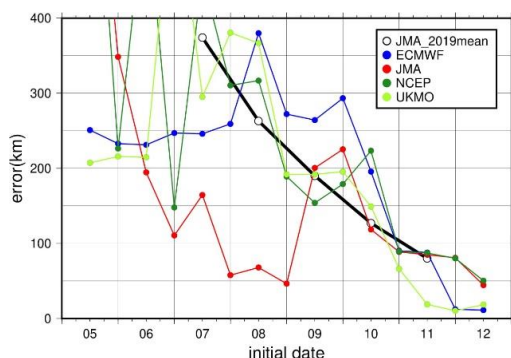


図 1. 12日 12UTC における台風中心位置の誤差

3. 結果

3.1 予報センター間の比較

まず検証時刻 (12日 12UTC) における 4 センターの上陸位置の誤差の時系列を示す (図 1)。上陸 6 から 4 日前を初期時刻とする気象庁の予報が他の 3 センターと比較して非常に精度が高かったことがわかる。また気象庁の 2019 年平均誤差よりも誤差が小さく、早期の気象庁の予報が良好であったことを示している。しかし 9 日 12UTC に気象庁の予報精度が急激に悪化し、その後は他センターや気象庁の年平均と同程度の精度となっている。

早期の予報において気象庁の予報精度が高かった理由について、気象庁とその他のセンターで大きく精度の差があった 8 日 12UTC を初期時刻とする予報を例にとって考察する (図 2)。予報初期には NCEP を除く 3 センターの進路が解析に対して西にずれている。上陸に最も近い時刻 (星印) に注目すると、気象庁は解析に非常に近いのに対して気象庁以外の予報位置は解析からかなり遅れていることがわかる。この進路の特徴は 12 日 12UTC までの台風進行速度の統計にも表れている (表 1)。表中の値のうち、平均誤差は 12 日 12UTC での位置の誤差に対応する。気象庁は速さと方向ともに全センターの中で最も誤差が小さく、上陸

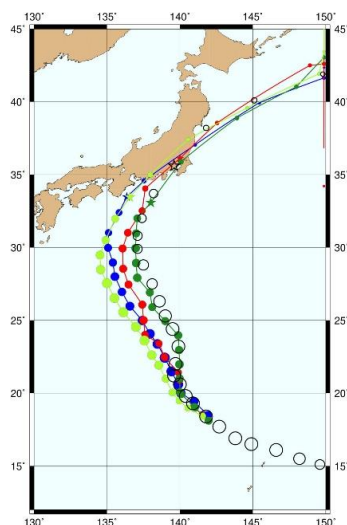


図 2. 8日 12UTC からの予報進路

位置の誤差と整合している。一方気象庁以外のセンターの速さの平均誤差がすべて負になっており、上陸の遅れと対応している。しかし二乗平均平方根誤差で見ると、気象庁は方向の誤差が全センターの中で最も大きく、NCEP が最も小さい。これは予報初期の進行方向のずれと整合している。以上の解析から、気象庁は上陸位置の予報精度は非常に高かったが、全体的な進路予報精度はまだ改善の余地があることがわかる。

3.2 気象庁の進路予報誤差要因の解析

この節では気象庁の上陸 3 日前の予報に注目して、進路予報誤差が急増した要因について解析する。

まず進路予報精度が変化する前後の 9 日 00UTC、12UTC の予報進路を比較する (図 3)。00UTC からの予報 (図 3a) の上陸位置は解析とほとんど一致しているのに対して、12UTC からの予報 (図 3b) の上陸位置は大きく西にずれていることがわかる。途中の進路を見ると、10 日 12UTC (北緯 25° 付近) からの進行方向に差が現れている。00UTC では北向きで

センター	速さ		方向	
	平均誤差 (m/s)	RMSE(m/s)	平均誤差 (m/s)	RMSE(m/s)
気象庁	0.262	1.16	-0.0931	17.1
ECMWF	-0.763	2.09	-7.65	12.6
NCEP	-0.609	1.58	-1.96	9.30
UKMO	-0.581	1.39	-8.83	13.1

表 1. 8日 12UTC を初期時刻とする予報における、12日 12UTC までの台風進行速度の統計

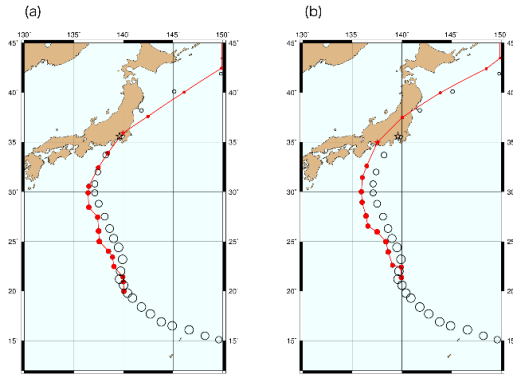


図 3. 9日(a)00UTC、(b)12UTCの予報進路

解析に沿う方向であるのに対し、12UTCでは北西向きであり、そのまま上陸時まで解析に対して西偏している。

10日12UTCの進路の違いの要因を調べるために、環境場の指向流の分布をみる(図4)。00UTCからの予報(図4a)では台風中心にほとんど流れがないのに対し、12UTCからの予報では中心付近に北西向きの流れが現れており、図3の進路と対応している。

予報誤差の増大に寄与した摂動を特定するために、9日12UTCを初期時刻とする予報に対してアンサンブル感度解析を行う。検証時刻は上陸時刻に最も近い12日12UTC、検証領域は予報と解析の台風中心を両方含む領域(東経137°~142°、北緯33°~37°)とする。解析結果の摂動は、予報誤差が増大する方向の符号を採用している。第一モード(寄与率68.79%)の湿潤エネルギー摂動は台風の南南東に感度を示している(図5a)。この感度領域に対応して低圧摂動が現れている。また下層にはこの低圧摂動に対応して温暖湿潤な摂動が現れている(図は省略)。24時間後(10日12UTCに対応)には台風中心の位置に感度領域が移り、台風中心を西にずらす方向の摂動が現れている。また鉛直積分風は台風中心で北

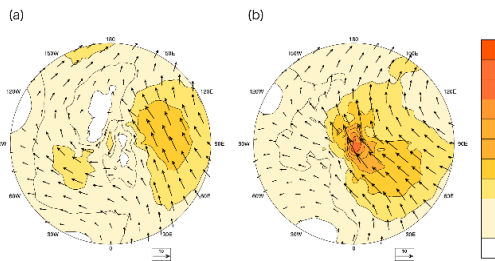


図 4. 10日12UTCにおける850~300hPaで鉛直平均した非軸対称風の分布。(a)00UTC、(b)12UTC

西方向を向いており、進路と整合している。この南東風は南東の低気圧性循環から伸びており、南東の低圧摂動が進路の西偏に影響したことを示唆している。

各アンサンブルメンバーの初期摂動を見ると、上陸位置の誤差が最も小さかったメンバー(図5c)は感度解析と逆符号の摂動を与えられているのに対して、誤差が最も大きかったメンバー(図5d)は同符号の摂動を与えられている。

感度領域に対応して、台風の南南東にはリッジがあり、その南東には弱い低圧擾乱が存在していた(図6)。この低圧擾乱は西進しながら発達し、それに伴って対流圏中下層の湿潤過程による加熱も強くなっている。これは低気圧の発達とともに対流活動も活発化していることを示している。上陸位置の精度がよい(悪い)メンバーでは、初期摂動によって台風南南東のリッジを強めて(弱めて)いた。リッジが弱まることによって南東の低圧擾乱の西進が速まり、低圧擾乱の北側に伴われる東風によって台風が西に流されたと考えられる。

以上の結果から、台風南東に位置していた熱帯擾乱の予報が台風進路の予報精度に影響を与えていたことが示唆される。

4. まとめ

Hagibisの予測可能性を評価するために、上陸に最も近い時刻(12日12UTC)での位置の誤差に注目して、予報精度を4つのセンター間で比較した。気象庁は上陸6日から4日前には4つのセンターの中で最も精度がよく、2019年の平均精度も上回っていた。気象庁の早期の予報精度についてHagibisの進行速度の統計を用いて詳しく調べると、上陸位置の誤差は4センターの中で最も正確だったが、上陸に至るまでの進路の精度はほかのセンターと差がなかった。今回用いた指標では気象庁が圧倒的に高精度であったが、全体的な進路予報精度は必ずしも正確だったわけではないと考えられる。

気象庁の進路予報は上陸3日前(9日12UTC)に急激に精度悪化していた。精度が悪化する前後(9日00UTCと12UTC)の予報進路を比較すると、12UTCからの予報では10日12UTCごろに進路が北西にずれ始め、そのまま上陸位置も大きく西にずれていた。進路がずれ始める時刻に対応して、12UTCからの予報では台風中心付近に北西向きの非軸対称風が現れていた。

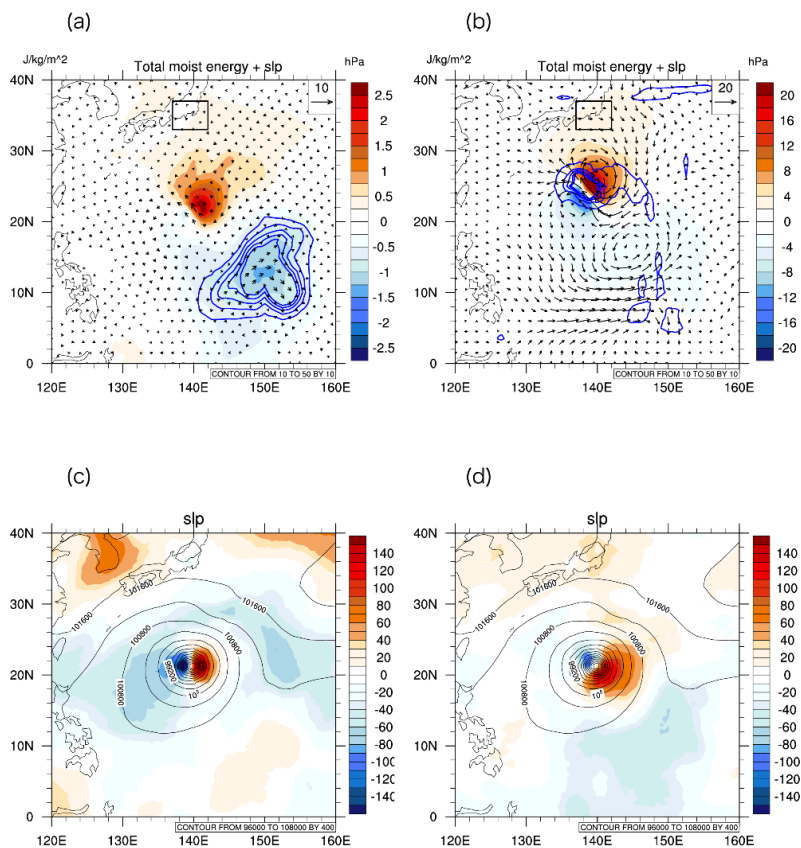


図 5. (上)感度解析第一モードのエネルギー摂動 (等値線) と海面気圧摂動 (陰影)、鉛直積分風 (ベクトル)。黒矩形は検証領域を表す。(a)初期時刻、(b)24 時間後。
 (下) 9日 12UTC を初期時刻とする予報の海面気圧の初期摂動 (陰影)。黒の等値線はアンサンブル平均の海面気圧を表す。(c)精度が最も良いメンバー、(d)精度が最も悪いメンバー。

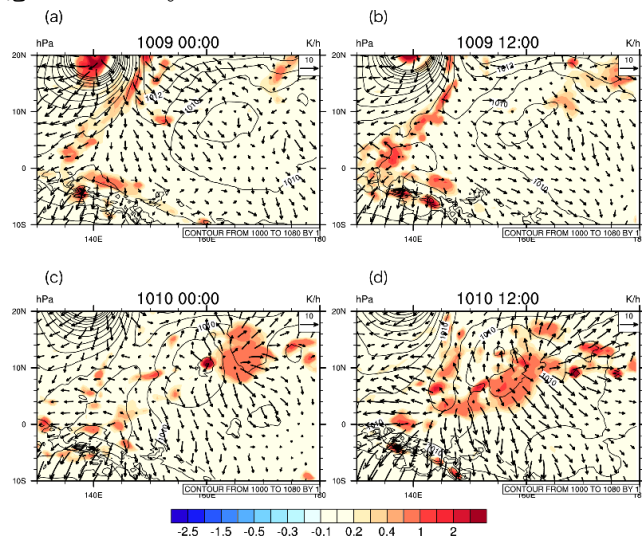


図 6. 9日 00UTC から 10日 12UTC までの海面気圧 (等値線) と発散風(200hPa、ベクトル)、湿潤過程による加熱率 (600~200hPa で平均、1 時間あたり、陰影)。値はすべて 3 時間平均値。MERRA-2 を用いて描画した。

9日12UTCの予報を対象とし、12日12UTCを検証時刻、上陸位置がずれた領域を検証領域として行った感度解析では、台風南南東の低圧摂動に感度を示していた。24時間後には台風を西にずらす方向の摂動が現れ、台風中心には低圧摂動に対応する低気圧性循環から北西向きの流れが伸びていた。各アンサンブルメンバーの初期摂動を見ると、精度の良いメンバーでは感度解析と逆符号、悪いメンバーでは同符号の摂動が与えられており、感度解析の結果を支持している。感度領域に対応する位置には初期時刻にリッジが存在し、その南東には弱い低気圧性擾乱があった。精度の悪いメンバーではこのリッジを弱める方向の摂動が与えられており、リッジの弱化によって速く西に進んだ低気圧性擾乱に伴う流れが台風進路に影響を与えたと考えられる。今回の解析の結果は、台風進路の予報精度向上には、台風そのものの予報精度だけでなく周辺の場の予報精度も向上させることが重要であることを示している。

参考文献

- 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.*, **56**(11), 1627-1648.
- Enomoto, T., 2019: Influence of the track forecast of Typhoon Prapiroon on the Heavy Rainfall in Western Japan in July 2018. *SOLA*, **15A**, 66-71.
- Enomoto, T., S. Yamane, and W. Ohfuchi, 2015: Simple sensitivity analysis using ensemble forecasts. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**(2), 199-213.
- Gelaro, R., W. McCarty, M. J. Suarez, R. Todling, A. Molod, L. Takacs, C. A. Randles, A. Darmenov, M. G. Bosilovich, R. Reichle, K. Wargan, L. Coy, R. Cullather, C. Draper, S. Akella, V. Buchard, A. Conaty, A. M. da Silva, W. Gu, G.-K. Kim, R. Koster, R. Lucchesi, D. Merkova, J. E. Nielsen, G. Partyka, S. Pawson, W. Putman, M. Rienecker, S. D. Schubert, M. Sienkiewicz, and B. Zhao, 2017: The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). *J. Clim.*, **30**(14), 5419-5454.
- Japan Meteorological Agency, 2020: Annual report on the activities of the RSMC Tokyo-Typhoon Center 2019. (Available online at <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pu->

[eg/AnnualReport/2019/Text/Text2019.pdf](https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/AnnualReport/2019/Text/Text2019.pdf), accessed 6 January 2021)

- Velden, C. S., 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*, **6**(2), 244-253.