

## 気象庁 GSM を用いた 2019 年台風第 19 号の再予報実験

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)  
竹村和人 (気象庁)

### 1. はじめに

2019 年台風第 19 号 (Hagibis) は 2019 年 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 10 UTC ごろ伊豆半島に上陸した。最大発達時には中心気圧 915 hPa を記録し、上陸直前でも 965 hPa という強い勢力を保ったまま関東地方を通過した。東日本の広い範囲に記録的な大雨をもたらし、地域によっては日降水量が 1000 mm を超えた (気象庁, 2020)。

Nakashita and Enomoto(2021)では上陸位置の精度に着目して、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)、気象庁の 4 センターの進路予報を比較し、上陸 6~4 日前の気象庁の進路予報は他センターと比較して上陸位置の精度が非常に高かったことを示した。しかし気象庁の予報は上陸 3 日前に精度が急激に悪化し、上陸位置が実際よりも約 200 km 西にずれていた。この要因をアンサンブル感度解析 (Enomoto et al., 2015) によって調べ、台風南東のリッジおよびその南東で発達中の低気圧性擾乱が台風進路の西偏に寄与していたことを示唆した (図 1)。

本研究は台風南東のリッジによる進路への影響を、気象庁の全球モデルを用いた数値実験によって確かめ、進路西偏のメカ

ニズムをより詳細に理解することを目的とする。

### 2. モデルの仕様と使用データ

本研究では予報モデルとして気象庁全球スペクトルモデル (GSM1705、2019 年 10 月当時のバージョン) を用いる。GSM の解像度は感度解析で用いたアンサンブル予報データ (0.5 度×0.5 度) に近づけるために、現業決定論予報よりも低解像度の TL479L100 (水平約 40 km、鉛直 100 層でモデルトップ 0.01 hPa、現業アンサンブル予報と同一) とした。本実験では初期値による進路の違いに着目するため、その他の設定 (境界値、物理過程等) は現業決定論予報で用いられる設定から変更しない。コントロール実験の初期値は現業決定論予報の初期値をモデル解像度に内挿したものをを用いる。初期時刻は進路急変前後の 2019 年 10 月 9 日 00 UTC と 12 UTC とし、予報期間は 84 時間とする。コントロール実験の初期値に感度解析で得られた摂動を与える実験 (摂動付与実験) は 12 UTC から行う。

アンサンブル感度解析は上陸直前の 12 日 12 UTC を検証時刻、その時刻の台風中心位置を含む領域 (北緯 33-36 度、東経 137-142 度) を検証領域として、湿潤全エネルギー (Ehrendorfer et al., 1999) をノルムとして、9 日 12 UTC からの気象庁アンサンブル予報データ (26 メンバー) の 850、500、300 hPa 面の東西・南北風、気温、比湿と地表気圧を用いて計算する。感度解析の摂動は第一モードの主成分得点によるアンサンブル摂動の線形結合によって作成する。振幅の調整は行わない。湿潤全エネルギーは二乗量のため摂動の符号には任意性が生じる。本研究では台風を東向きに移流する (上陸位置の誤差を軽減する) 方向の符号を、摂動の線形時間発展から推定して選択する。感度解析は全球で行っているが、台風南東のリッジに注目するために最も大きな感度を得られた領域周辺に摂動を制限して与える。感度解析摂動を加えた初期値の作成手順を以下に記す。

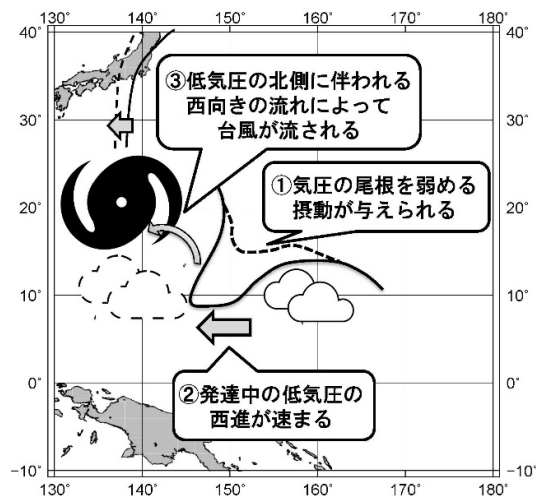


図 1. 進路誤差の要因を示す概念図

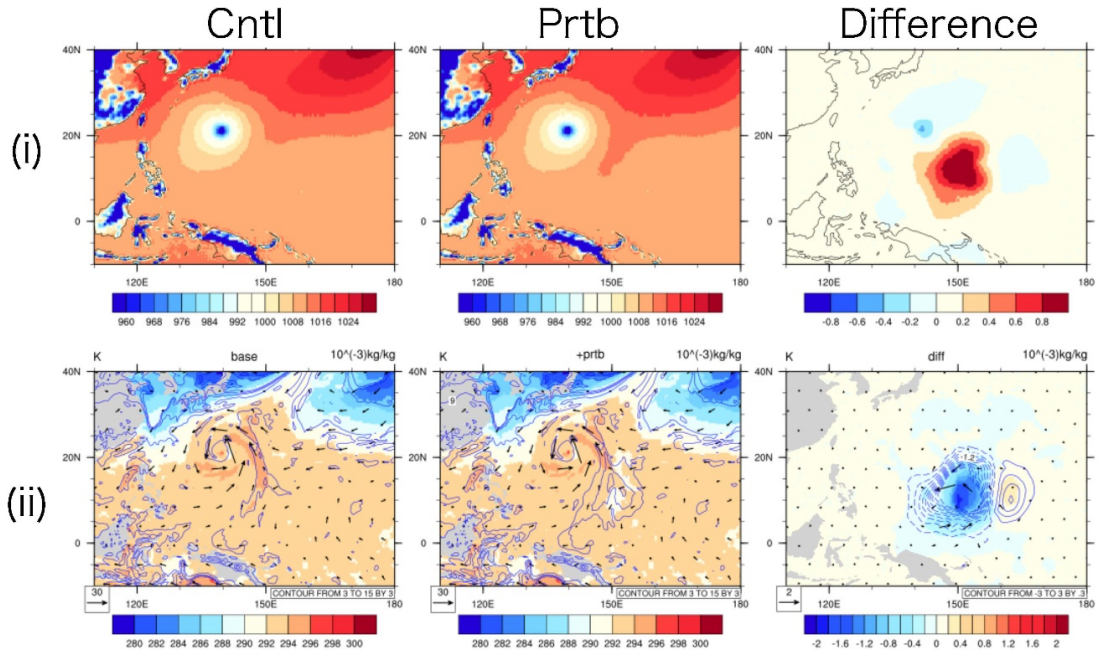


図 2. コントロール実験（左列）と摂動付与実験（中列）の初期値と摂動付与実験からコントロール実験を引いた差（右列）。(i) 地表気圧 (hPa)、(ii) 約 850 hPa 面の気温 (K、陰影)、風速 (m/s、ベクトル)、比湿 (g/kg、青等値線、負値は破線)

1. 摂動エネルギーの極大点を中心として半径緯度 30 度で摂動の振幅が 0 となるように、感度解析摂動にフィルター(Gaspari and Cohn, 1999) をかける。
2. モデルの水平格子点に摂動を二重線形内挿する。
3. 地表気圧に摂動を加え、モデル面の気圧を再計算する。
4. 気圧面上の摂動を気圧の自然対数によってモデル面に線形内挿（外挿）する。
5. モデル面の初期値（東西・南北風、気温、比湿、雲量、雲水量）を再計算後のモデル面に鉛直内挿する。摂動量に対応する変数には摂動を加える。

図2にコントロール実験と摂動付与実験の初期値の差を示す。地表気圧（図 2 (i)）は台風南東のリッジ（北緯 15 度、東経 150 度付近）がより明瞭になっている。また対流圏下層（図 2 (ii)）ではリッジの上空で寒冷・乾燥化させる摂動が与えられており、南東から台風循環に伴う南東風によって流入する温暖湿潤な気流を弱めていることがわかる。中上層の摂動振幅は下層よりも小さく（図は省略）、摂動は傾圧的な構造をしている。

進路の実況値には気象庁ベストトラックデータを用いた。また進路予報の再現性

を確認するために、気象庁の全球決定論予報 GPV とアンサンブル予報 GPV を比較対象とした。決定論予報 GPV は京都大学生存圏研究所データベースより、アンサンブル予報 GPV 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。決定論予報 GPV の水平解像度は 0.5 度×0.5 度である。アンサンブル予報 GPV の水平解像度は 1.25 度×1.25 度でアーカイブされているものを 0.5 度×0.5 度に内挿して取得している。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。

### 3. 結果

#### 3.1 現業予報の再現性

まずコントロール実験と現業決定論予報および現業アンサンブル予報の台風進路と強度を比較する（図 3）。台風進路は予報後半の進行速度にわずかに差が見られるものの、コントロール実験は決定論予報およびアンサンブル予報の進路をよく再現している。コントロール実験でも 00 UTC 初期値と 12 UTC 初期値の間で進路が急激に西偏しており、感度解析摂動に対する感度実験を行ううえで十分な再現性を示している。コントロールの台風強度は

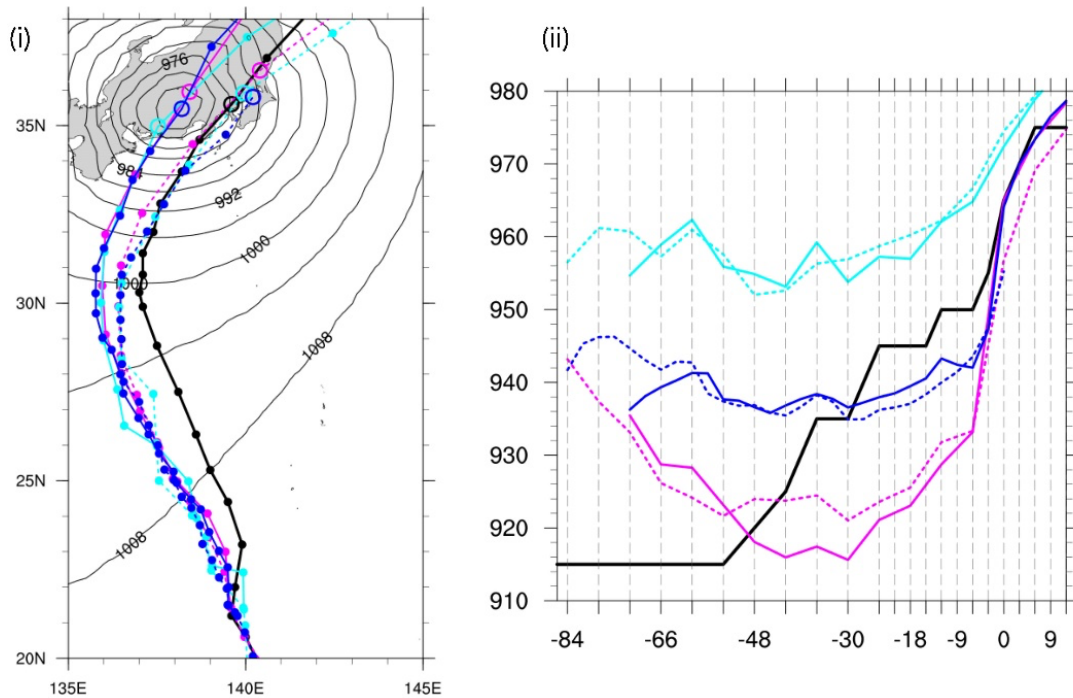


図 3. コントロール実験（青）と現業決定論予報（マゼンタ）、現業アンサンブル予報平均（シアン）の(i)進路と(ii)中心気圧(hPa)。黒はベストトラック。破線は9日00 UTC、実線は12 UTC 初期値。(i)の等値線は9日12 UTC からのコントロール実験における12日12 UTCの海面気圧、○は12日12 UTCの中心位置。(ii)の横軸は12日12 UTCを基準とした時刻 (hour)。

解像度が低いため決定論よりも発達が弱い、強度の衰退が始まるタイミング(11日06 UTC)は決定論予報と同じであり、そこから上陸6時間前まではコントロールのほうが実況に近い強度を示している。現業アンサンブル予報は他2つと比較して台風強度をかなり過小評価しているが、これは元データの解像度が低く台風構造が鈍っているためと考えられる。

### 3.2 感度解析摂動に対する感度実験

感度解析摂動を加えた初期値からの実験結果を図4に示す。摂動付与実験の進路は予報前半からコントロールと比べて東にずれ、上陸位置もコントロールよりも東にずれて実況に近づいている。これは感度解析から推定される進路変化と整合的である(Nakashita and Enomoto, 2021)。北緯30度付近では摂動付与実験と00 UTC初期値のコントロール実験がおよそ同じ位置にあるが、コントロール実験のほうが転向後の進行速度の東向き成分が大きく、上陸位置に差が出ている。転向後の進行方向は12 UTCからのコントロール実験と摂動付与実験でほとんど差がないため、転向後の進行方向は本研究で摂動を与えた

領域以外の初期値の差が影響を与えていると考えられる。一方中心気圧はコントロール実験と摂動付与実験でほぼ変化がなく、台風の構造自体は変化していないと考えられる。このことから、感度実験で見られた進路の違いには、台風自身によってもたらされた進路変化よりも環境場の違いによる進路変化の寄与が大きいことが示唆される。

初期時刻から9時間後までの摂動に対する応答を図5、6に示す。摂動を与えた領域からのエネルギーの水平伝播は全方向に見られ、特に北東方向への伝播が明瞭である(図5)。このエネルギー伝播方向は台風とは結びつかないため、進路変化に対する寄与は小さいと考えられる。位相伝播は西向きが最も支配的で、その波長および位相速度は図からそれぞれ約1000 km、時速220 kmと見積ることができる。これは鉛直波数6(鉛直波長17 km)の傾圧慣性重力波に相当する。鉛直方向の初期応答(図6(i))を見ると、地表から850 hPaまで正のジオポテンシャル高度偏差であり、それより上層は下層の寒冷化・乾燥化に伴い負の高度偏差となっている。このエネルギーは上述した通り急速に周囲に伝播してい

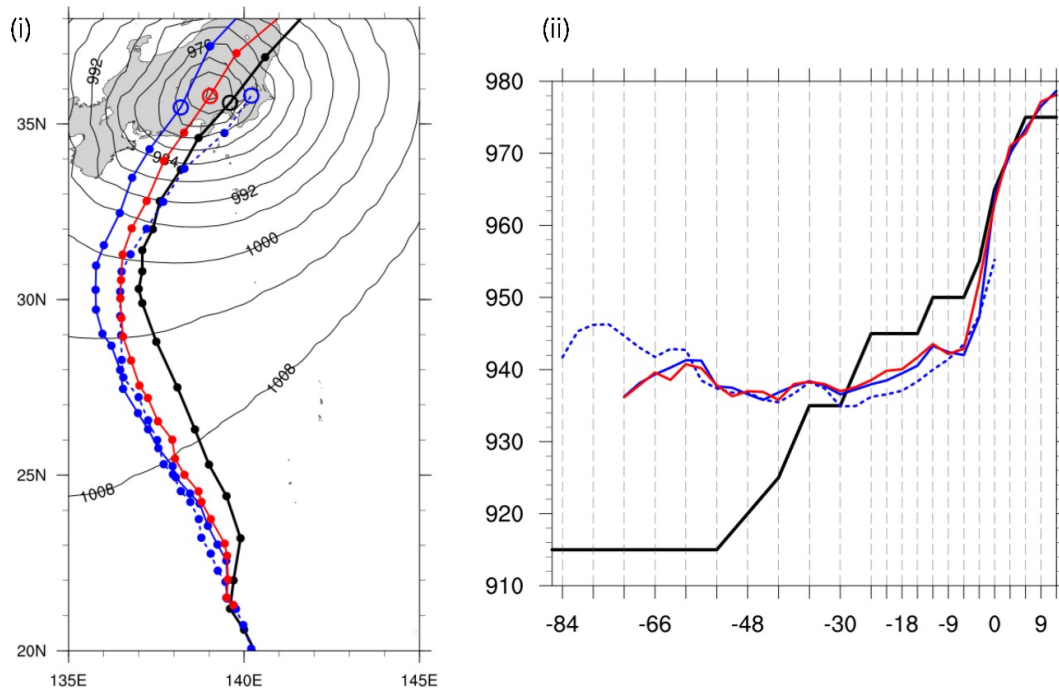


図 4. 図 3 と同様、ただしコントロール実験 (青) と摂動付与実験 (赤) との比較

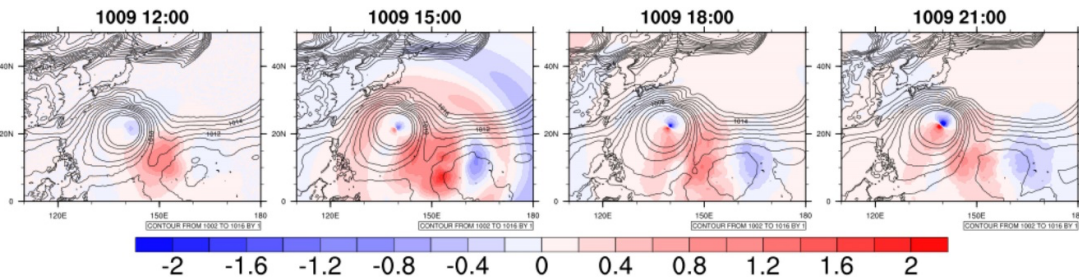


図 5. 摂動付与実験の海面気圧 (hPa、等値線) とコントロール実験との差 (陰影)。等値線は 1002 hPa から 1016 hPa まで 1 hPa ごと。

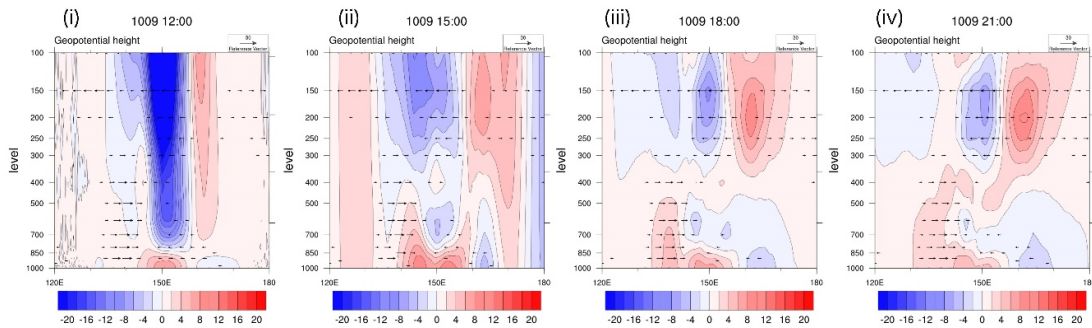


図 6. 北緯 10-15 度で平均したジオポテンシャル高度差 (m、摂動付与実験 - コントロール実験) の経度 - 高度断面。ベクトルは摂動付与実験の風の東西成分。

く(図6(ii))。西向きの正の位相伝播は中層まで見られ、この正位相が台風中心と結びつき、高気圧性循環に伴う北側の東向きの流れ偏差が台風を東に移流する役割を果たしたと考えられる。明瞭な位相伝播とエネルギー伝播が見られた後の偏差の位相は固定されており、定常な波となっている(図6(iii, iv))。この定常応答は南東の低気圧性擾乱の東西に位置しており(図5)、9時間後以降の進路変化に寄与していることが考えられるが、その詳細な解析と南東の熱帯擾乱との関係を明らかにすることは今後の課題である。

#### 4. まとめ

本研究では Nakashita and Enomoto (2021)で示唆された進路予報誤差要因を実証するために、気象庁 GSM を用いてアンサンブル感度解析摂動に対する感度実験を行った。実験ではアンサンブル予報の解像度と揃えるために現業決定論よりも低解像度のモデルを用いたが、再現実験は現業予報進路をよく再現していた。台風強度は過小評価していたが、本研究では環境場の変化による台風進路の違いに焦点を置くため、結果に影響しないと考えられる。

感度解析で得られた摂動をもとに、台風南東のリッジを強めた初期値を与えた実験では、予報初期から台風進路がコントロール実験に比べて東にずれ、上陸位置が実況に近づいていた。この進路変化は感度解析から予想された変化と整合的であった。摂動付与によって台風強度には変化が見られず、進路変化が環境場の変化によってもたらされていることが示唆される。摂動に対する応答のうち、最も明瞭なものは傾圧慣性重力波に相当し、西向きの正の位相伝播が台風中心と結びつき、予報初期に台風を東向きに移流する役割を果たしたと考えられる。予報中盤の進路に影響を及ぼすと考えられる定常性の応答に対する解析や注目している南東の熱帯擾乱との関係、また湿潤全エネルギーの項別の寄与の切り分けなどは今後の課題である。

#### 謝辞

気象庁 GSM および初期値は、気象庁情報基盤部と京都大学との共同研究「台風防災に資する気象庁全球スペクトルモデル GSM の改良に関する研究」の下、気象庁より提供していただいた。本研究は科研費 19H05698 の助成を受けた。

#### 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., S. Yamane, and W. Ohfuchi, 2015: Simple sensitivity analysis using ensemble forecasts. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93(2)**, 199-213.
- Gaspari, G., and S. E. Cohn, 1999: Construction of correlation functions in two and three dimensions. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, **125(554)**, 723-757.
- Nakashita, S., and T. Enomoto, 2021: Factors for an abrupt increase in track forecast error of Typhoon Hagibis (2019). *SOLA*, **17A**, 33-37.
- 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.