

## 2019 年台風第 19 号の予報進路に対する海面水温と初期擾乱の影響

### Influence of the Sea Surface Temperature and Initial Perturbations on the Track Forecast of Typhoon Hagibis (2019)

中下 早織<sup>(1)</sup>・榎本 剛・黒木志洸<sup>(2)</sup>・氏家将志<sup>(2)</sup>・竹村和人<sup>(3)</sup>

Saori NAKASHITA<sup>(1)</sup>, Takeshi ENOMOTO, Yukihiro KUROKI<sup>(2)</sup>, Masashi UJIIE<sup>(2)</sup> and Kazuto TAKEMURA<sup>(3)</sup>

(1) 京都大学大学院 理学研究科

(2) 気象庁情報基盤部数値予報課 数値予報モデル技術開発室

(3) 気象庁大気海洋部気候情報課

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

(2) Numerical Prediction Division, Japan Meteorological Agency, Japan

(3) Climate Prediction Division, Japan Meteorological Agency, Japan

#### Synopsis

Influence of the sea surface temperature (SST) and initial perturbations on track forecasts of Typhoon Hagibis (2019) is investigated by forecast experiments with the JMA-GSM. Initial perturbations are obtained from the ensemble sensitivity analysis for the westward drift of Hagibis in our previous study. SST has little influence on tracks except for accelerated migration with higher SST. Hagibis develops deeper and yields heavier precipitation with higher SST. The development is enhanced by the stronger secondary circulation due to increased surface latent heat flux. The westward bias is consistently reduced by adding initial perturbations estimated by the ensemble sensitivity analysis. Opposite perturbations lead to asymmetric track change because of changes in convective activity, implying that the estimation of peripheral tropical disturbances is a key to accurate track forecasts.

**キーワード** : 令和元年東日本台風, 気象庁全球モデル, 大気海洋相互作用, アンサンブル感度解析

**Keywords** : Typhoon Hagibis (2019), JMA-GSM, Atmosphere-ocean interaction, Ensemble sensitivity analysis

#### 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 (気象庁, 2020).

Hagibis の上陸に伴って東日本の広い範囲に記録的

な大雨がもたらされ, 12 日の日降水量が 900 mm を超える地域もあった. Takemi and Unuma (2020) では, この大雨の原因として大量の水蒸気流入に伴う湿潤絶対不安定層の形成を挙げている. Araki (2020) では数値実験によって, 広い範囲での降水には温帯低気圧化に伴って台風の北側に形成された前線の寄与が大きく, 局所的な豪雨には地形性上昇流によるシーダー・フィーダー機構の寄与が大きいことを示

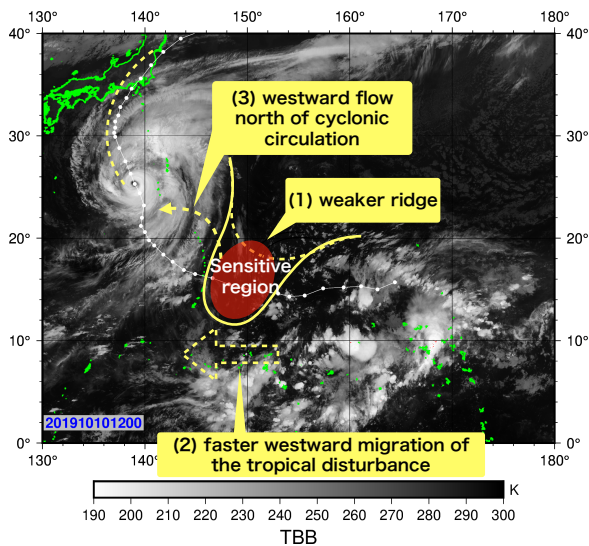


Fig. 1: Infrared cloud-top temperature (K) observed by Himawari-8/9 at 1200 UTC 10 October and schematic diagram of the cause of the westward drift of Hagibis. White dots indicate the JMA best track.

した。さらに Yanase et al. (2022) は上陸直前 (11–12 日) の降水が北側に集中したメカニズムについて、温帯低気圧化の段階によって降水帯の形成過程が異なることを示した。

Hagibis が発達した環境場の特徴として、北西太平洋における海面水温 (Sea Surface Temperature, SST) の高温偏差が挙げられる。Ito and Ichikawa (2021) は、高 SST に伴う台風強化が対流圏上層での外流出を強化し、西風ジェットとの間で不安定を誘起することで台風の進行速度を増加させることを示した。Iizuka et al. (2021) では、親潮流域での高 SST 偏差が温暖前線の形成位置を陸側にシフトさせ、沿岸域での降水強化に寄与していたことを示した。また SST だけでなく、海洋表層の大きな熱容量 (Wada, 2000; Wada and Chan, 2021) や大気及び海洋内部の温暖化 (Kawase et al., 2021; Kanada et al., 2021) が Hagibis の急発達と降水強化に寄与したことも指摘されている。気象庁の全球予報では、予報初期時刻の直近の 1800 UTC までに得られる衛星観測と現場観測を組み合わせて作成した速報解析値 (MGDSST; Kurihara et al., 2006) を用いて予報時刻の SST を推定し、下部境界条件としている。この速報解析値は観測ノイズを考慮して短周期の変動を取り除いて作成されているため、台風の通過に伴う急激な SST 変化は表現できていない (Ito, 2022)。現業では考慮しきれていない台風による SST 変化が台風予報精度にもたらす

影響を明らかにすることは、今後の予報での SST の扱いに対して重要な指針を与えると考えられる。

台風進路の予報精度には初期値における環境場の再現性が大きく影響する (Yamaguchi et al, 2012; Miyachi and Enomoto, 2021)。Nakashita and Enomoto (2021, 以下 NE21) 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、(1) 台風南東のリッジを弱く予測したことで、(2) その南東で発達中の低気圧性擾乱が早く西に進み、(3) 低気圧性循環の北側の西向きの流れが予報進路の西偏をもたらしたことを示唆した (Fig. 1)。

本研究では、2019 年台風第 19 号の予報進路に影響を与える要因とそのメカニズムをさらに明らかにするために、SST と NE21 で解析された初期摂動に着目して、気象庁での台風予報に利用されている全球モデルを用いた感度実験を行った。SST の感度実験では、気候学的な SST と現業予報で用いられている SST、解析された SST の比較を行うことで、気候値よりも高い SST が台風に与える影響と、台風による SST 変化が台風に与える影響をそれぞれ調査することを目的とする。初期摂動に対する感度実験では、摂動の時間発展が線形であることを仮定した感度解析で推定された誤差要因と非線形モデルの時間発展との整合性を確かめるとともに、台風南東のリッジ及びその南東の低気圧性擾乱が台風に与えた影響に対する上記の考察を検証することを目的とする。

## 2. 実験設定

### 2.1 使用モデル・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 (Yonehara et al., 2018), 2019 年 10 月当時のバージョン) を用いる。GSM の解像度は、SST に対する感度実験では現業決定論予報と同じ TL959L100 (水平約 20 km, モデルトップ 0.01

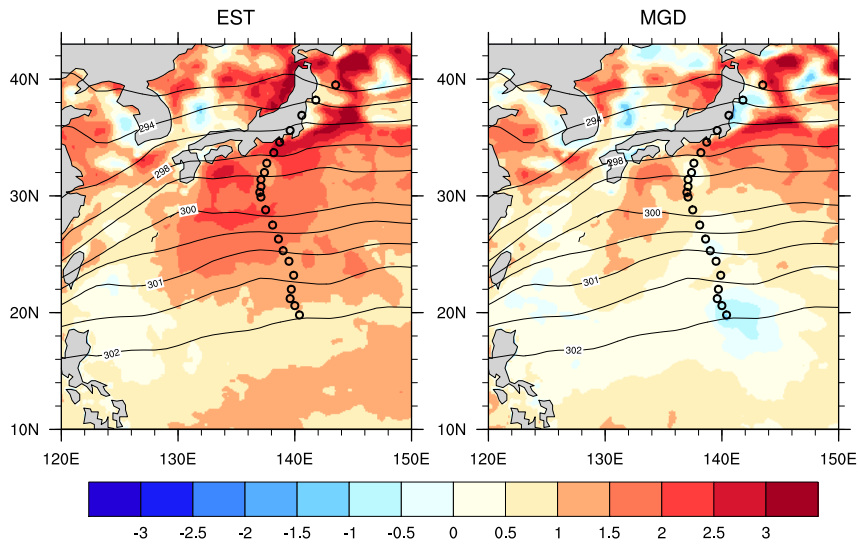


Fig. 2: Climatological SST (contour) and SST anomaly (left : EST, right : MGD) averaged 9-12 October. Black circles indicate best track.

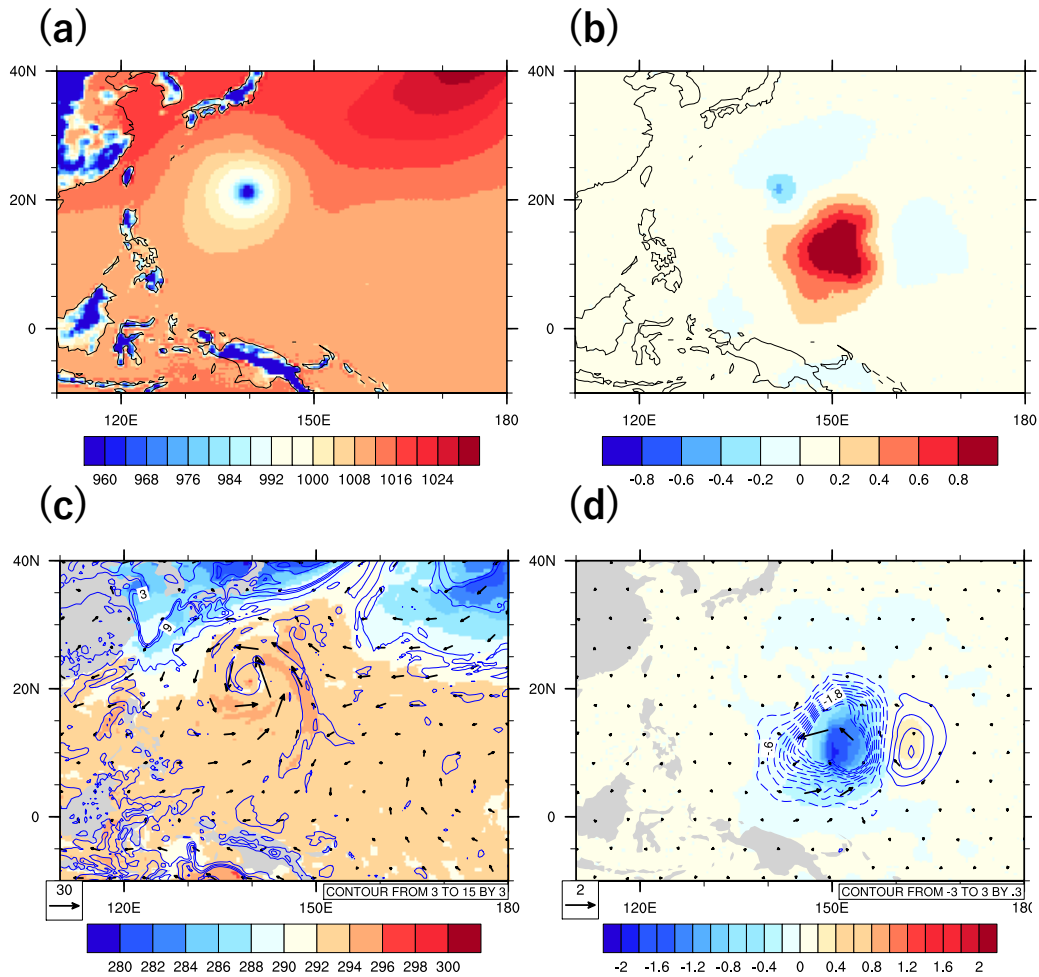


Fig. 3: (a,b) Initial surface pressure (hPa) of (a) control experiment and (b) perturbations of EN- experiment. (c,d) Initial temperature (K, color), specific humidity (g/kg, contour) and horizontal wind (m/s, vector) at 14th model layer (around 850 hPa surface) of (c) control experiment and (d) perturbations of EN- experiment.

hPa), 初期摂動に対する感度実験ではアンサンブル感度解析で用いたアンサンブル予報 GPV (0.5 度×0.5 度) に近づけるために, 現業アンサンブル予報と同一の TL479L100 (水平約 40 km) とした. 本実験では SST または初期摂動による進路の違いに着目するため, SST の感度実験では大気の初期値と SST 以外の境界値, 初期摂動の感度実験では境界値を実験間で統一した. またどちらの感度実験でも, モデルの物理過程は現業決定論予報で用いられる設定から変更していない. 初期摂動感度実験において, 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用いる.

予報時間は 84 時間とした. 初期時刻は, SST の感度実験では進路が急変する前の 2019 年 10 月 9 日 0000 UTC, 初期摂動の感度実験では進路が急変した後の 9 日 1200 UTC とした. なお, SST の感度実験では 9 日 1200 UTC を初期時刻としても進路の変化傾向は変わらなかった.

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. 進路の実況値には気象庁ベストトラックデータを用いた. 台風の進行速度は前後の時刻の台風中心を基に計算した.

## 2.2 SST 感度実験

以下の 3 種類の SST を境界条件として与えた.

**気候値 (CLIM)** 1981–2010 年の月別平均値を予報時刻の日付に内挿した値

**推定値 (EST)** 2019 年 10 月 8 日 1800 UTC における MGDSSST (速報解析値) の気候値偏差と気候値から作成 (現業の設定)

**解析値 (MGD)** MGDSSST (遅延解析値)

SST は 1 日ごとに変化させている. Fig. 2 に実験期間で平均した EST および MGD 実験の SST 偏差を示す. 台風が通る太平洋側は EST, MGD とともに先行研究で指摘されていたように高温偏差であり, 特に上陸直前の沿岸域は +2.5~3 °C の偏差が見られる. MGD では EST で考慮されない気候値偏差の日変化を含み, 特に台風直下での低温化を反映していることがわかる. なお本研究で用いる解析値は遅延解析値であり, 速報解析値では 17 日前までの観測を利用するのに対して, 遅延解析値では解析時刻を含む前後 10 日間の観測を利用している. そのため台風

通過後の SST 低下を反映しているが, 速報解析値と同様に短周期変動は取り除かれているため台風の通過に伴う実際の急激な SST 変化を完全には再現できていない (Ito, 2022). 本研究で設定した現業推定値と解析値の間では, 台風経路下の差が最大で約 2 °C と十分に大きい (Fig. 2) ことから, 2 つの実験の比較によって台風による SST 変化の影響を見られると考えられる. より短い周期の変動が台風予報に及ぼす影響については今後更なる調査が必要である.

## 2.3 初期摂動感度実験

NE21 でのアンサンブル感度解析は, 上陸直前の 12 日 1200 UTC (以下上陸時刻とする) 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, 9 日 1200 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した. 解析に用いたアンサンブル予報 GPV は, ECMWF が提供している TIGGE (The International Grand Global Ensemble) データベースより, 水平解像度 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た. 初期値に加える摂動は, 感度解析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. 振幅の調整は行わず, 解析に用いた変数 (東西・南北風, 気温, 比湿と地表気圧) と同じ予報変数に摂動を加える. アンサンブル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が得られた領域周辺に摂動を制限して与える. 摂動を加えた初期値の作成手順を以下に記す.

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.

誤差の指標として用いた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、その符号の摂動を与えた実験を EN<sub>-</sub>、逆符号の摂動を与えた実験を EN<sub>+</sub> とする。Fig. 3 にコントロール実験の初期値と EN<sub>-</sub> とコントロールとの差を示す。地表気圧 (Fig. 3 a,b) 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 (Fig. 3 c,d) 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。摂動は上層の振幅が下層よりも小さい傾圧的な構造をしている (図は省略)。

### 3. SST 感度実験

#### 3.1 進路への影響

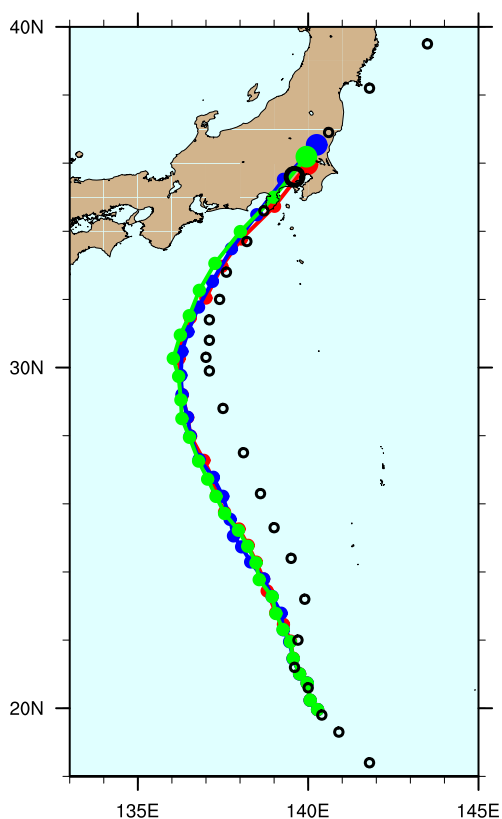


Fig. 4: Tracks of EST (blue), CLIM (red) and MGD (analysis) experiments. Black circles indicate best track. Positions at 1200 UTC 12 October are marked by larger circles.

各実験における進路を Fig. 4 に示す。9 日 0000 UTC からの予報進路は, 12 時間後 (北緯 21 度付近) の一時的な北東方向への進路変化は再現で

きていないものの, 北緯 30 度での転向後は実況よりも東向きの移動速度が大きく, 上陸時刻での台風位置は実況とよく一致している。SST による進路の方向変化はほとんど見られなかった。転向後の進行速度には僅かに差が見られ, 高い SST を与えた実験ほど早く北東方向に進んでいる。南北及び東西方向の進行速度を Fig. 5 で比較する。実験前半は南北方向 (Fig. 5 a) の速度は実況とよく対応している一方で, 東西方向 (Fig. 5 b) には上述した北東方向への進路変化に伴う西向きの速度の誤差が現れている。60 時間後 (11 日 1200 UTC) までは実験間での差がほとんど見られないが, EST が実況や他の実験よりも早く転向し (Fig. 5 b), 同時に南北方向の移動速度が EST, MGD, CLIM の順に加速している。高 SST を与えた実験での加速傾向は Ito and Ichikawa (2021) と整合的であり, 今回の実験でも同様に台風北側での 500 hPa 高度に実験間で差が見られる (図は省略)。しかし Ito and Ichikawa (2021) とは SST を変えた範囲と初期時刻が異なるため, 今回の実験での高度差が現れるのは速度差が現れるのと同時刻であり, Ito and Ichikawa (2021) で指摘された不安定化とは別の加速メカニズムも関わっていることが示唆される。

#### 3.2 強度への影響

Fig. 6 に中心気圧の時間変化を示す。進路とは異なり中心気圧の変化には SST を変えた影響が大きく現れている。EST 実験は初期時刻から 30 時間後まで単調に中心気圧が低下していき, 実況に最も近い発達を示している。その後台風は衰退傾向に入るものの, 中心気圧の上昇率は実況よりも小さく, 上陸直前でも 940 hPa 以下の勢力を保ったままである。CLIM と MGD は初期時刻からあまり発達せず, 実況に対して強度を過小評価している。上陸 24 時間前 (11 日 1200 UTC) からの強度変化を見ると, CLIM は実況よりも早く強度が衰退しているのに対し, MGD は実況とよく似ていることから, 強度の過小評価には初期値の強度誤差が影響していることがわかる。

EST の発達メカニズムについて, 海面からの熱供給との関係から考察する (Fig. 7)。海面からの熱フラックスは顕熱と比べて潜熱の寄与が圧倒的に大きく (図は省略), また高 SST 偏差を反映して EST では最初から他の実験よりも多くの潜熱が供給されている (Fig. 7 a)。海面からの潜熱加熱により台風の壁雲内での上昇流と上端での外出流が強まる (Fig. 7 c,

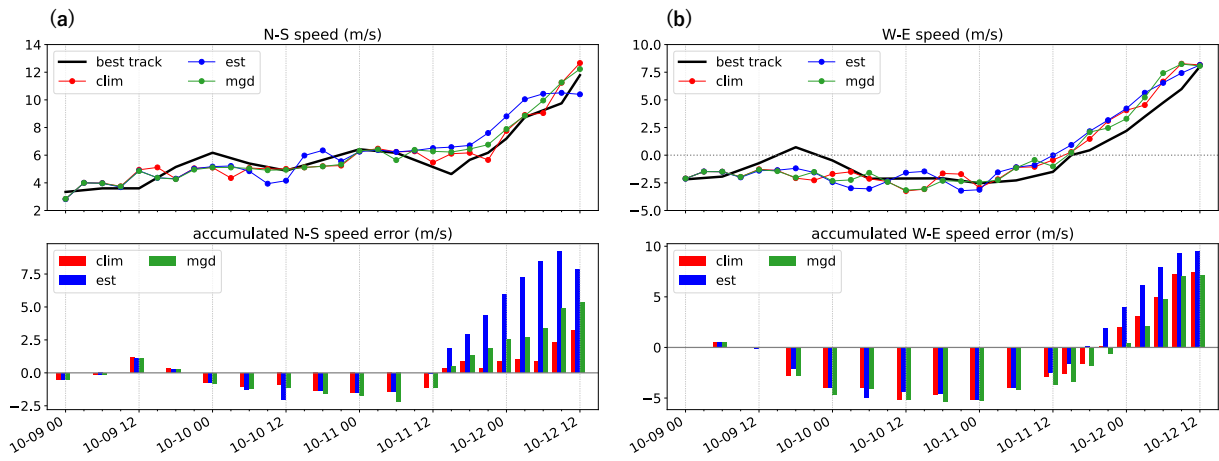


Fig. 5: (upper panel) TC transition speed (m/s) of best track (black), EST (blue), CLIM (red) and MGD (green), (lower panel) accumulated transition speed error (m/s) from best track; (a) meridional (positive in north), (b) zonal (positive in east).

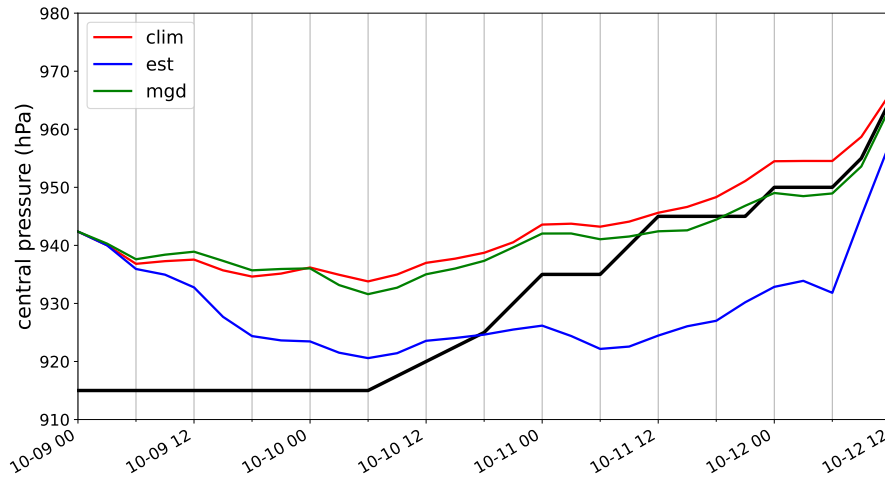


Fig. 6: Central pressure (hPa) of best track (black), EST (blue), CLIM (red) and MGD (green).

MGD との差も同傾向). この 2 次循環の強化により地表近くでの風が強化され, さらなる潜熱フラックスの増加につながる (Fig. 7 b). このサイクルにより上陸直前まで潜熱が供給され続けることで, EST の衰退傾向の遅れにつながったと考えられる. MGD でも全体的な高 SST 傾向は見られるものの, 台風直下での高温傾向が抑えられているため潜熱供給が抑えられ, EST で見られるような 2 次循環を強化するサイクルはそれほど働かない. 台風直下の SST の正バイアスが衰退傾向の遅れをもたらすことは Ito (2022) でも統計的に示されている. また CLIM では太平洋側沿岸域での高 SST 偏差を考慮しておらず SST は北に行くにつれて単調に減少していく (Fig. 2) ため, 潜熱供給も単調に減少し (Fig. 7 a), 強度を保つこと

ができていない (Fig. 6). 以上より, EST での台風発達には潜熱加熱を駆動源とする 2 次循環の強化が関わっており, 海面からの熱供給は台風の強化とその強度の維持に寄与していることがわかる.

### 3.3 降水への影響

SST の変化は, 台風強度の変化を通して降水にも影響を与える. Fig. 8 に衛星との比較を示す. 上陸約 24 時間前の降水分布 (Fig. 8 a) は Yanase et al., (2022) で指摘されている通り, 台風の北側半分集中しており, 眼のすぐ北側と外側降雨帯 (outer rain band) で極大となっている. 実験で再現された 11 日 0900 UTC 時点での降水分布 (Fig. 8 b,c,d 上) も北側に偏った降水分布を再現している. 特に眼の北側の降水極大は位置・強度ともに衛星とよく

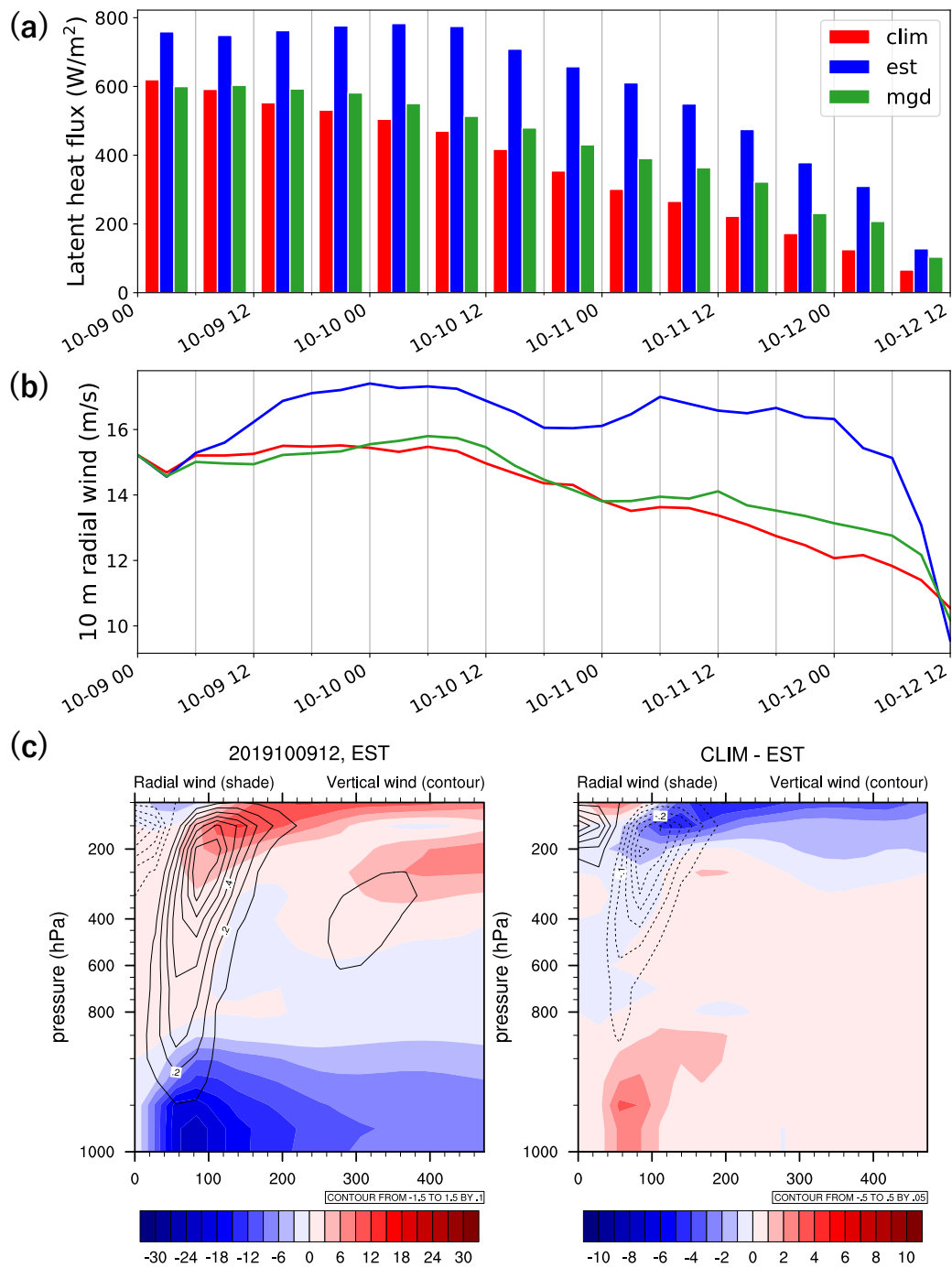


Fig. 7: (a) Latent heat flux ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) and (b) 10 m radial wind ( $\text{m}/\text{s}$ ) averaged within 200 km radius from TC center. (c) Azimuthal averaged radial wind (color, positive in outward) and vertical wind (contour, positive in upward) at 1200 UTC 9 October. Left panel shows EST experiment and right panel shows the difference of CLIM and EST.

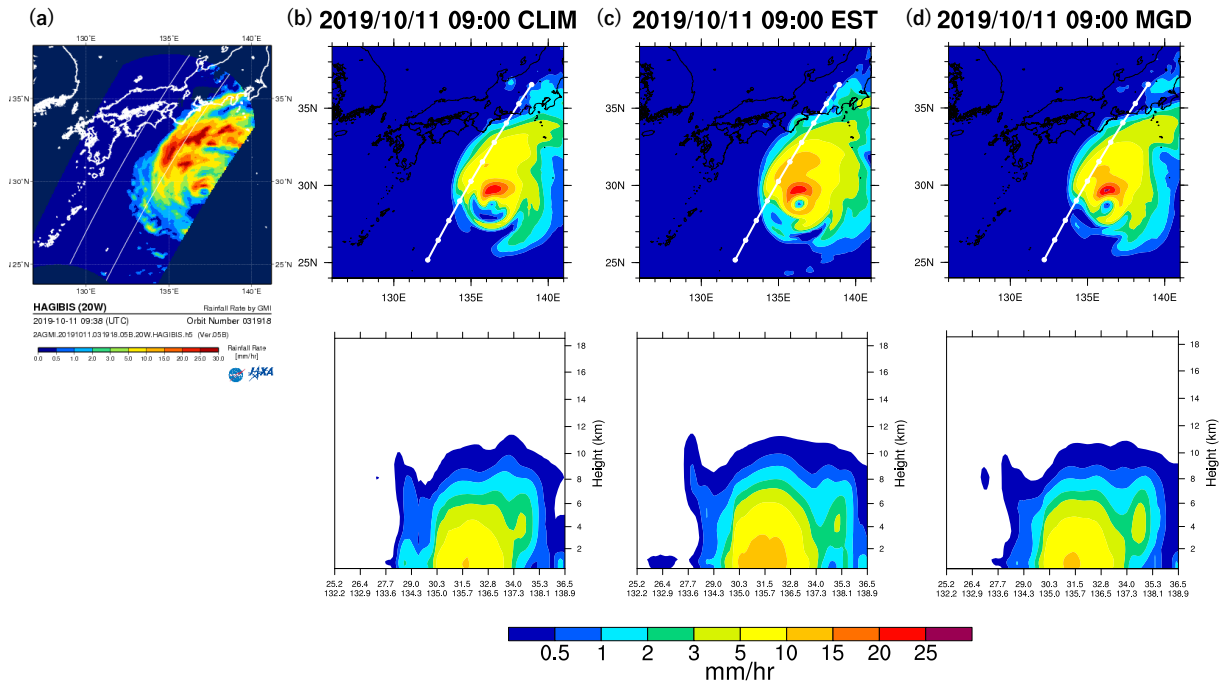


Fig. 8: (a) Rainfall rate from Global Precipitation Measurement microwave imagery at 0938 UTC 11 October. The image has been provided by the JAXA/EORC Tropical Cyclone Database. (b,c,d) Horizontal and cross-sectional (north in right) precipitation rate at 0900 UTC 11 October in (b) CLIM, (c) EST, (d) MGD experiments. White lines with circles in upper panels indicate cross section lines.

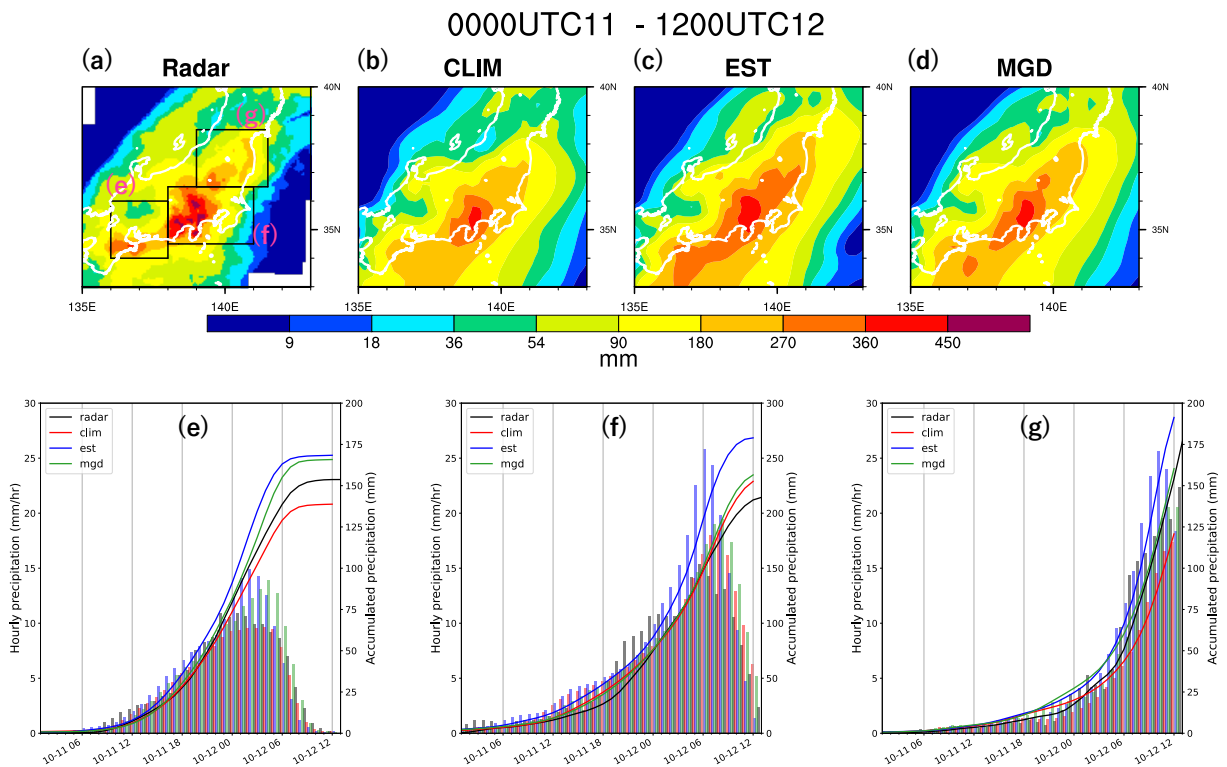


Fig. 9: 36 hours accumulated precipitation (mm) from 0000 UTC 11 October of (a) analyzed radar, (b) CLIM, (c) EST, and (d) MGD. (e, f, g) Temporal evolution of precipitation rate (mm/hour, bar, left axis) and accumulated precipitation (mm, curve, right axis) within regions shown in (a).



一致している。外側降雨帯は衛星と比較してやや北東-南西走向に伸びた形状をとっており、降水強度を過小評価している。衛星により観測された3次元の降水分布 ([https://sharaku.eorc.jaxa.jp/TYP\\_DB/data/TYP\\_DB\\_GPM/201910/20W/3DDPR.20191011.031918.06A.20W.HAGIBIS.mp4](https://sharaku.eorc.jaxa.jp/TYP_DB/data/TYP_DB_GPM/201910/20W/3DDPR.20191011.031918.06A.20W.HAGIBIS.mp4)) は、外側降雨帯での雲頂高度（降水強度が0.1 mm/hrを超える高さ）が約10 kmであり、降水強度が5.0 mm/hrを超える領域は約8 kmまで分布していた。実験での外側降雨帯における3次元降水分布 (Fig. 8b,c,d 下)を確認すると、降水強度が5.0 mm/hrを超える領域は最も高いESTで約6 kmと衛星観測よりも低いものの、雲頂高度は衛星と整合的である。11日0900 UTCにおいて、ESTは実況と比較して台風強度を過大評価しており、MGDが最も実況に近い台風強度を示している (Fig. 6) が、降水分布の再現性はESTが最も衛星に近い。このことから、GSMは台風強度に対して特に外側降雨帯の降水強度と降水頂を過小評価する傾向があると考えられる。

日本域で最も激しい降水が記録された11日から12日にかけての積算降水量の比較を Fig. 9 に示す。解析値 (Fig. 9 a) では、Hagibis が上陸した伊豆半島周辺 (領域 f) に加え、紀伊半島東側 (領域 e) と東北地方南側 (領域 g) で特に降水量が多くなっている。各領域内で評価した降水強度と積算降水量 (Fig. 9 e-g) を見ると、主に外側降雨帯の影響を受ける領域 e は上陸12時間前に降水ピークが現れている。台風中心が通る領域 f では上陸18~12時間前と6時間前にそれぞれ外側降雨帯と眼近傍の降水域に対応するピークが現れており、領域 g では上陸6時間前から単調に降水が強くなっていた。実験における降水の水平分布 (Fig. 9 b-d) はどのSSTでも特に降水の多かった領域 e-g を適切に捉えており、概ね解析値と整合している。EST 実験 (Fig. 9 c) では強度の過大評価に伴って、関東地方北部や東海沖での降水量をやや過大評価している。一方で CLIM 実験では EST 実験で過大評価していた領域での過小評価傾向が目立つ。各領域内 (Fig. 9 e-g) で比較すると、領域 e では全ての実験で台風中心が実況よりも紀伊半島に近い進路をとっていたために、EST 及び MGD 実験ではより台風中心近くの降水域の影響を受けて降水ピーク時の降水量を過大評価している。CLIM 実験でも同様の進路をとっていたものの、北側降水域の減衰が他の2実験よりも早く、積算量が解析よりも

少なくなっている。領域 f では Fig. 8 で示したように外側降雨帯の降水強度が弱いために解析ほどはっきりとダブルピークが現れていない。また進行速度が速くなった影響で3実験ともに降水強度が強まる時間が解析よりも早く、EST では強度の過大評価と合わせて積算降水量が解析よりもかなり大きくなっている。領域 g でもやはり進行速度の影響で降水の強まりが早く、36時間積算量の誤差は上陸時の強度誤差 (Fig. 6) と整合している。以上から、降水量の面的な広がりや積算量を最も精度良く再現しているのは MGD 実験であり、降水の予測には正確な SST が重要な要素であると言える。

#### 4. 初期摂動感度実験

次に、NE21 のアンサンブル感度解析から得られた初期摂動を与えた実験の結果を示す。

感度解析から誤差が減少する方向として推定された摂動を与えた EN- では、上陸位置がコントロールよりも東に動き、実況位置に約70 km 近づいている (Fig. 10a)。これは感度解析と整合的な変化である。一方で逆符号の摂動を与えた EN+ では、EN- よりも早くコントロール実験と進路がずれ始め、上陸位置はコントロールよりも約200 km 西にずれている。この符号変化に対する非対称性にはモデルの時間発展の非線形性が関与しており、感度解析からは捉えられない特徴である。

中心気圧の時間変化を見ると (Fig. 10b)、SST に対する感度実験とは異なり、強度にはあまり変化が見られない。本節の実験において、SST は現業と同じ推定値 (前節の実験では EST に相当) を与えているが、水平解像度が現業より低いため、前節で見られたような強度の過大評価傾向は明らかでない。EN+ は進路が西にずれ、コントロール実験や EN- よりも平均的に SST が高い海域を通過するため、上陸付近での強度がやや他の2実験よりも下がっている。そのため、強度の差は進路変化に付随するものであり、摂動の影響は現れていないとみなせる。

摂動の符号に対する非対称性に関連して、摂動の時間発展の様子を500 hPa の流線関数偏差によって示す (Fig. 11)。ここで500 hPa は、環境場の流れ (台風中心に対して非軸対称な風成分を動径方向に平均した流れ) の変化と進行方向の変化が最もよく対応している高度として選んでいる。初期時刻には同振幅の摂動が、12時間後 (10日0000 UTC) には EN+

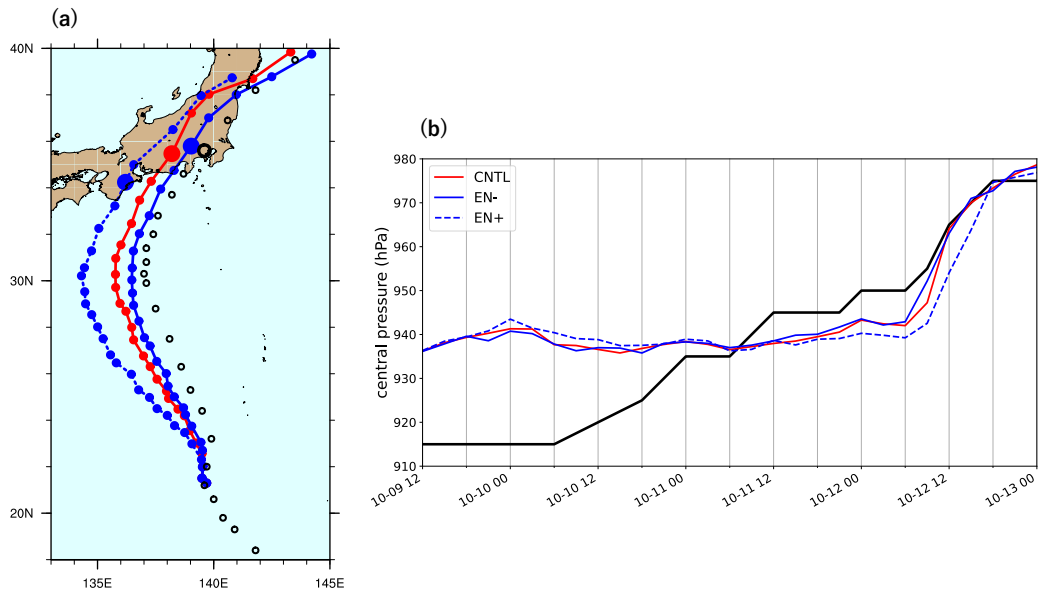


Fig. 10: (a) Same as Fig. 4 and (b) Same as Fig. 6, but for control (red), EN- (blue) and EN+ (blue dashed).

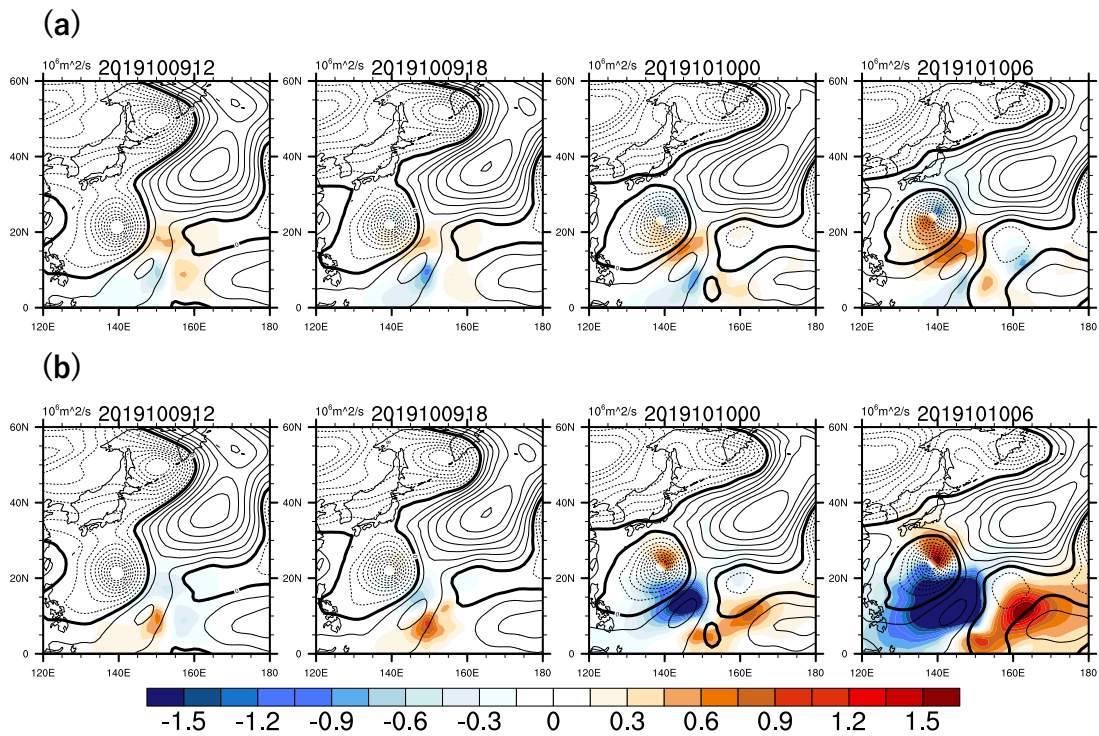


Fig. 11: Stream function anomalies from the zonal mean ( $10^6 \text{m}^2/\text{s}$ ) at the 500 hPa surface in control experiment per 6 hours from the initial time. Contour interval is  $2 \times 10^6 \text{m}^2/\text{s}$ . Thick solid and dashed contours indicate zero and negative anomalies, respectively. Color shades show the difference from the control of (a) EN- and (b) EN+.

(Fig. 11b) のリッジ近辺とその南東から東にかけて摂動が大きく発達している。この2つの符号の異なる摂動は南東の熱帯擾乱に対応する負の流線関数偏差に対して双極的な構造をとっており、熱帯擾乱の位相を西にずらしていることを示す。18時間後(10日0600 UTC)にはEN+において台風と熱帯擾乱が結びつき、コントロールに対して大きく西にずれた進路をとる要因となっている。EN+で見られた熱帯擾乱が台風進路に影響を及ぼすメカニズムは、NE21での考察と整合的である。一方でEN-でも振幅が小さいものの熱帯擾乱を挟んだ双極的な摂動が18時間後に現れており、熱帯擾乱が西に進もうとする動きをコントロールよりも抑制している。また18時間後において、台風南東に位置するEN+の負の摂動の方はEN-の正の摂動よりも振幅が大きく、熱帯擾乱がより発達していることがわかる。本実験では力学場だけでなく水蒸気(比湿)場にも変更を加えているため、循環場だけでなく対流活動にも違いが見られる(図略)。熱帯擾乱の発達度合いの違いにはこの対流活動の変化が関与していると考えられる。対流活動の変化が進路に及ぼす影響については今後さらに詳細に調査していく必要がある。

## 5. 結論

本研究では、2019年台風第19号の予報に初期値と境界値が与える影響について、気象庁GSMを用いて、下部境界条件であるSSTを変えた実験と、NE21のアンサンブル感度解析で得られた摂動を加えた実験によって調べた。

SSTに対する感度実験では、進路にはほとんど変化がなかったが、転向後の進行速度は先行研究で指摘されていた通り、高いSSTを与えた実験ほど大きかった。台風強度に対してはSST変更の影響が大きく、高いSSTを与えた実験ほど台風が強く発達した。解析値と気候値を与えた実験では初期値の誤差の影響で実況よりも強度が弱かったが、気候値では特に上陸直前の強度の衰退が最も早く、上陸前後の降水量の過小評価に繋がっていた。現業設定の推定値を与えた実験では、予報前半で高いSSTの影響を受けて発達し実況に最も近い強度を示していたが、強度の衰退が遅れ、上陸時の強度を過大評価していた。この台風の強化には、海面からの潜熱フラックスの増加に伴う2次循環の強化が寄与していると考えられる。実験により再現された降水域は、その広がり

の再現精度は高いものの、外側の降雨帯での降水強度を過小評価する傾向が見られた。一方で中心近傍の降水強度は観測と同程度であり、高いSSTを与えた実験ほど強く予報していた。上陸時刻付近の日本列島での積算雨量は、解析値を与えた実験が最も実況と合っていた。

アンサンブル感度解析で求めた摂動に対する感度実験では、NE21の結果と整合的な進路変化が見られた。循環場の時間発展から、リッジ南東の熱帯擾乱の西への移動速度がNE21での考察と同様の変化を示すことがわかった。本研究で用いた感度解析手法は第1節で述べたように、初期摂動が基準となる予報の周りで線形に時間発展することを仮定しているが、これらの結果は線形時間発展を仮定した感度解析が非線形性の強い台風の予報にも適用可能であることを示す一例であると言える。また摂動の符号を変えると、コントロール実験に対して非対称な進路変化が得られた。これは台風南東の熱帯擾乱の対流活動の変化を伴うためであり、このような台風周辺の熱帯擾乱の発達予測が台風進路の予報精度に影響を与えうることを示している。

以上の実験から、SSTは台風強度と降水量予報に、環境場の初期摂動は進路により大きな影響を与えることがわかった。人的被害に直接結びつく降水の予報精度に影響することから、正確なSSTを境界条件として用いることは防災上の観点からも重要である。外側降雨帯での降水強度の再現性については、モデルの物理過程を詳細に調査することが求められる。初期摂動に対する感度実験からは、台風周辺の環境場を正確に予測することの重要性に加え、アンサンブル感度解析によって予報誤差要因を特定できることも示された。本研究で用いたアンサンブル感度解析は既存のアンサンブル予報データから感度を計算できるため、複数の設定の予報実験を繰り返すよりも遥かに計算コストが低い。個々の台風予報に対してアンサンブル感度解析を適用して予報誤差要因を明らかにしていくことで、共通する要因と改善策を発見できると期待される。また2つの実験から、強度予報の精度はSSTを正確な値に変更したり進路の予報精度を上げるだけでは十分に改善せず、台風自体の初期値での再現性を上げることが重要であることもわかった。台風自体の再現性を向上させるには、航空機観測や高度なデータ同化手法を組み合わせた初期値作成手法の改善が求められる。

## 謝辞

気象庁 GSM 及び初期値は、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グローバルモデル GSM の改良に関する研究」の下で提供を受けました。MGDSST は NEAR-GOOS 地域リアルタイムデータベースより取得しました。ひまわり 8/9 号グリッドデータは千葉大学環境リモートセンシング研究センターで提供されたものを利用しました。GPM-GMI 画像は宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター (JAXA/EORC) において作成されている台風データベース Ver. 1.6 より提供を受けました。本研究は JSPS 科研費 19H05698, 22J21757 の助成を受けました。

## 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。
- Araki, K., (2020): Numerical simulation of heavy rainfall event associated with Typhoon Hagibis (2019) with different horizontal resolutions., *Research activities in Earth system modelling.*, **50**, 3.3–3.4.
- Enomoto, T., S. Yamane, and W. Ohufuchi, (2015): Simple sensitivity analysis using ensemble forecasts., *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, pp.199–213.
- Iizuka, S., R. Kawamura, H. Nakamura, and T. Miyama, (2021): Influence of warm SST in the Oyashio region on rainfall distribution of Typhoon Hagibis (2019)., *SOLA*, **17A**, pp.21–28.
- Ito, K., and H. Ichikawa, (2021): Warm ocean accelerating tropical cyclone Hagibis (2019) through interaction with a mid-latitude westerly jet., *SOLA*, **17A**, pp.1–6.
- Ito, K., (2022): Bias in near-real-time global sea surface temperature analysis of Japan Meteorological Agency associated with tropical cyclone passages in western North Pacific., *J. Meteor. Soc. Japan*, **100**, pp.321–341.
- Kanada, S., H. Aiki, and K. Tsuboki, (2021): Projection of future enhancement of heavy rainfalls associated with Typhoon Hagibis (2019) using a regional 1-km-mesh atmospheric-ocean coupled model., *SOLA*, **17A**, pp.38–44.
- Kawase, H., M. Yamaguchi, Y. Imada, S. Hayashi, A. Murata, T. Nakaegawa, T. Miyasaka, and I. Takayabu, (2021): Enhancement of extremely heavy precipitation induced by Typhoon Hagibis (2019) due to historical warming., *SOLA*, **17A**, pp.7–13.
- Kurihara, Y., T. Sakurai, and T. Kuragano (2006): Global daily sea surface temperature analysis using data from satellite microwave radiometer, satellite infrared radiometer and in-situ observations. *Weather Service Bulletin*, **73**, Special issue, s1–s18 (in Japanese).
- Miyachi, T., and T. Enomoto, (2021): Tropical cyclone track forecasts using NCEP-GFS with initial conditions from three analyses., *SOLA*, **17**, pp.140–144.
- Nakashita, S., and T. Enomoto, (2021): Factors for an abrupt increase in track forecast error of Typhoon Hagibis (2019)., *SOLA*, **17A**, pp.33–37.
- Takemi, T., and T. Unuma, (2020): Environmental factors for the development of heavy rainfall in the eastern part of Japan during Typhoon Hagibis (2019), *SOLA*, **16**, pp.30–36.
- Yamaguchi, M., T. Nakazawa, and K. Aonashi, (2012): Tropical cyclone track forecasts using JMA model with ECMWF and JMA initial conditions., *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L09801.
- Yanase, W., K. Araki, A. Wada, U. Shimada, M. Hayashi, and T. Horinouchi, (2022): Multiple dynamics of precipitation concentrated on the north side of Typhoon Hagibis (2019) during extratropical transition., *J. Meteor. Soc. Japan.*, **100**, pp.783–805.
- Yonehara, H., R. Sekiguchi, T. Kanehama, K. Saitou, T. Kinami, A. Shimokobe, D. Hotta, R. Nagasawa, H. Sato, M. Ujiie, T. Kadowaki, S. Yabu, K. Yamada, M. Nakagawa, and T. Tokuhira, (2018): Upgrade of JMA's operational global NWP system. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 6.15–6.16.
- Wada, A., 2020: Atmosphere-wave-ocean coupled-model simulation on rapid intensification of Typhoon Hagibis (2019)., *Research activities in*

*Earth system modelling.*, **50**, 9.15–9.16.

Wada, A., and J. C. L. Chan, (2021): Increasing TCHP in the western North Pacific and its influence on the intensity of FAXAI and HAGIBIS in 2019., *SOLA*, **17A**, 29–32.

(論文受理日: 2022 年 8 月 31 日)