

航空機により観測された非常に強い台風の雲解像モデルを用いた高解像度シミュレーション

課題責任者

坪木 和久 名古屋大学 宇宙地球環境研究所

著者

辻野 智紀*¹

*¹北海道大学大学院 地球環境科学研究院

強い熱帯低気圧は、中心の眼をとり囲む壁雲（内側壁雲）の外側半径に二次的な壁雲（外側壁雲）をしばしば形成する（多重壁雲構造）。外側壁雲形成（SEF）後、内側壁雲は衰退し、外側壁雲は徐々に収縮する（壁雲交換過程；ERC）。ERCに伴い、熱帯低気圧の最大風速半径や大きさも急激に変化する。ERCのメカニズムを理解することは、台風の強さや大きさの数値予報にとって重要である。最近、SEFやERCにおける大気-雲放射プロセスの役割が研究されている。さらに、海面での放射加熱・冷却は、台風の強さの最も重要な要因である海面水温（SST）の変化に影響を与える可能性がある。本研究では、高解像度の数値モデルを用いて実際の台風を対象とした感度実験を行い、台風における放射過程と台風-放射-海洋相互作用がSEFとERCに与える役割を調査した。感度実験の結果、放射プロセスは（1）放射加熱による海面水温の変化を考慮しない場合にはSEFを促進するが、（2）海面水温の変化を考慮した場合にはSEFを弱めることがわかった。このことは、海面での短波放射加熱の遮断による海面水温の冷却が、台風の外側壁雲降水を弱め、SEFやERCに影響を与えることを示唆している。

キーワード：スーパー台風、航空機観測、雲解像モデル、高解像度シミュレーション、多重壁雲

1. はじめに

発達した熱帯低気圧は中心に雲のない「眼」をもち、眼の周囲は壁雲に囲まれている。熱帯低気圧の最大風速は、壁雲の半径付近に現れる。強い熱帯低気圧では、眼を囲む壁雲（内側壁雲）の外側に二次的な壁雲（外側壁雲）がしばしば形成される（多重壁雲構造；Concentric Eyewall (CE)）。CEの半径に対応して、接線風も壁雲の半径付近に局所的な極大値を持つ。外側壁雲が形成されると、内側壁雲は次第に減衰し、外側壁雲は強化しながら徐々に収縮していく（壁雲交換過程；ERC）。ERCは、台風の強風や大きさを急激に変化させる。そのため、ERCのメカニズムを理解することは、数値モデルを用いて熱帯低気圧の強さや大きさを高精度に予測するために重要である。

ERCの主要な要因はこれまでもいくつか提案されてきた。最近では、雲解像モデルを用いて、大気-雲の放射加熱/冷却がERCに与える役割が研究されている。Tang et al. (2017) [1] は、moat (CE間の対流が弱い領域)における短波放射がERCを促す可能性を示した。一方、Trabing and Bell (2021) [2] は、短波放射が外側壁雲形成(SEF)やERCを遅らせる効果があることを明らかにした。また、熱帯低気圧の強度変化に最も重要と考えられる海面水温(SST)は、海面での放射加熱・冷却によって変化する(以下、「台風-放射-海洋相互作用」と呼称)。しかし、上記の先行研究における数値実験では、放射加熱・冷却による海面水温の変化を考慮していない。

我々は2019年のプロジェクト期間中、Cloud Resolving Storm Simulator (CRSS 3.4.2; Tsuboki and Sakakibara 2002 [3])を用いて、2018年に発生した台風Tramiの数値シミュレーションを実施した。Tramiは2018年9月22

日から24日にかけて急速に発達し、生涯最小中心気圧が910hPaに達した。Tramiは最盛期にCE構造を持ち、2018年9月25日から27日までの成熟期と減衰期にERCを経験した。我々の数値シミュレーションでは、衛星観測と類似したCE構造を捉えることに成功した。本研究では、昨年度の数値実験に基づくいくつかの感度実験を実施し、放射加熱・冷却と台風-放射-海洋相互作用が、TramiのSEFとERCに果たす役割を調査する。

2. 数値モデルと実験設定

CRSSモデルは、3次元の領域非静力学モデルである。鉛直方向に地形に沿った座標系を用い、3次元の風速成分、圧力摂動、ポテンシャル温度摂動、乱流運動エネルギー、水蒸気、雲水、雨、雲氷、雪、霰の混合比を計算する。積雲パラメタリゼーションは用いない。短波および長波による放射加熱・冷却は、Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)によって計算される。

計算領域や初期・境界条件は、2019年に行ったシミュレーションとほぼ同じである。モデル領域は、緯度経度方向それぞれ約 $40^{\circ} \times 40^{\circ} \times$ 高さ約26 kmである。水平方向の格子間隔は、緯度経度ともに一律 0.02° とした。鉛直格子はストレッチングされており、最下層での格子間隔は50 m、鉛直層は70層用いられた。時間積分の終了時刻は2018年9月28日の0000 UTCとした。

SEF、ERCにおける放射加熱・冷却の役割を検討するために、表1に示すように、(1) SSTV-RAD, (2) SSTC-RAD,

(3) SSTC-NORADの3つのグループの感度実験を用意した。SSTV-RADとSSTC-RADには放射加熱・冷却の効果が考慮される。SSTV-RAD (SSTC-RAD/SSTC-NORAD) では、モデル内

の SST を明示的に予測する（外部から与える）。SSTV-RAD の海面水温は、モデル内の海洋における鉛直拡散方程式と海面での熱収支（放射加熱・冷却含む）によって時間変化する。なお、鉛直拡散方程式には海流に伴う鉛直乱流混合の過程は含まれていない。各実験に共通する特徴を見出すために、各グループで初期時刻の異なるアンサンブルメンバーを用いた（表 1）。実験間での台風進路の大きなズレを軽減するために、スペクトルナudgingを課している。SSTV-RAD グループは、台風-放射線-海洋の相互作用が SEF と ERC に与える影響を調べるための実験である。

3. 結果

図 1-3 は、3 つのグループでの実験結果を示している。実験における台風の最大風速の時間変化は、2018 年 9 月 23 日から 27 日の増加時期と減少時期において、気象庁の推定値に定性的に類似していた。一方、生涯最大強度は実験間で大きく異なった。特に、SSTC-RAD グループと SSTC-NORAD グループのほとんどのメンバーにおける台風のピーク強度は、SSTV-RAD グループの強度よりも強い。SSTV-RAD グループの台風の強さが相対的に弱いのは、モデル内の海面水温の時間変化の違いによるものと考えられる。SSTV-RAD では海面での放射加熱・冷却が陽に計算されている。成熟した台風は広い範囲に厚い上層雲があるため、海面での短波放射加熱が遮断され、SST が大きく低下する（図略）。

方位角平均した降水強度は、実験のほとんどのメンバーで、2018 年 9 月 25 日頃に内部コア域での SEF と、内側壁雲の消滅（=ERC）を示している（図 1-3）。SSTC-RAD のほとんどのメンバーにおいて、外側壁雲降水の強度と半径方向の幅は、それぞれ SSTC-NORAD のそれよりも強く、狭い。これは SSTC-RAD において、外側壁雲の対流雲が組織化され、顕著な moat が形成されていることを示している。この結果は、大気-雲の放射プロセスが外側壁雲と moat の形成を促進することを示唆しており、Tang et al. (2017) と一致する。なお、我々の SSTC-NORAD 実験では、短波放射だけでなく、長波放射もオフにしていることに

注意する。そのため、短波放射だけでなく、長波放射が SEF や ERC に与える役割も含まれる。

SEF と ERC に及ぼす台風-放射線-海洋の相互作用の役割について議論する。SSTV-RAD グループでは、SSTC-RAD グループに比べて、外側壁雲降水の強度と半径方向の幅がそれぞれ弱く、広い（図 1, 2）。SSTV-RAD グループでは、海面の短波・長波放射による SST 冷却が、内側壁雲の外側における対流雲の発達を抑制する。内側壁雲の対流に由来する厚い上層雲が広範囲に広がるため、SST 冷却は主にこの上層雲による短波放射加熱の遮断によって引き起こされる。Tang et al. (2017) [1] は、内側壁雲と外側壁雲の間（つまり moat）の半径において、地表付近の短波放射加熱が海面熱フラックスの減少（すなわち、風による海面熱・運動量交換フィードバックの弱化）によって moat の形成を促進することを指摘した。しかし、SSTV-RAD を用いた実験では、彼らの海面水温を固定した場合の議論とは異なり、内側壁雲外側での上層雲による短波放射加熱の遮断に伴う海面水温の冷却によって、外側壁雲降水が弱くなることが示された。これは、短波放射による海面水温の冷却（台風-放射-海洋の相互作用）が、外側壁雲降水を弱め、SEF や ERC に影響を与えることを示唆している。今後は、台風-放射-海洋相互作用が SEF や ERC に与える影響の詳細を調査する予定である。

参考文献

- [1] Tang, X., Z. Tan, J. Fang, Y. Q. Sun, and F. Zhang “Impact of the diurnal radiation cycle on secondary eyewall formation”, *J. Atmos. Sci.*, 74, 3079-3098, (2017)
- [2] Trabling, B. C., and M. M. Bell, “The sensitivity of eyewall replacement cycles to shortwave radiation”, *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 126, e2020JD034016, (2021)
- [3] Tsuboki, K., and A. Sakakibara, “Large-scale parallel computing of Cloud Resolving Storm Simulator”, *High Performance Computing*, edited by H. P. Zima, K. Joe, M. Sato, Y. Seo, and M. Shimasaki, 243-259, Springer, New York, (2002)

表 1: 感度実験の設定.

Name	Radiation	SST	Initial time
SSTV-RAD	On	1D-diffusion ^a	00 UTC 21, 06 UTC 21, 12 UTC 21, 18 UTC 21, 00 UTC 22 September 2018
SSTC-RAD	On	Linear interpolation ^b	
SSTC-NORAD	Off	Linear interpolation	

^a 海面での熱収支を与えることで、海中温度を鉛直拡散方程式によって陽に予測する。

^b 外部からの日別海面水温データが、モデル内の海面水温として与えられ、時間方向に線形補間される。

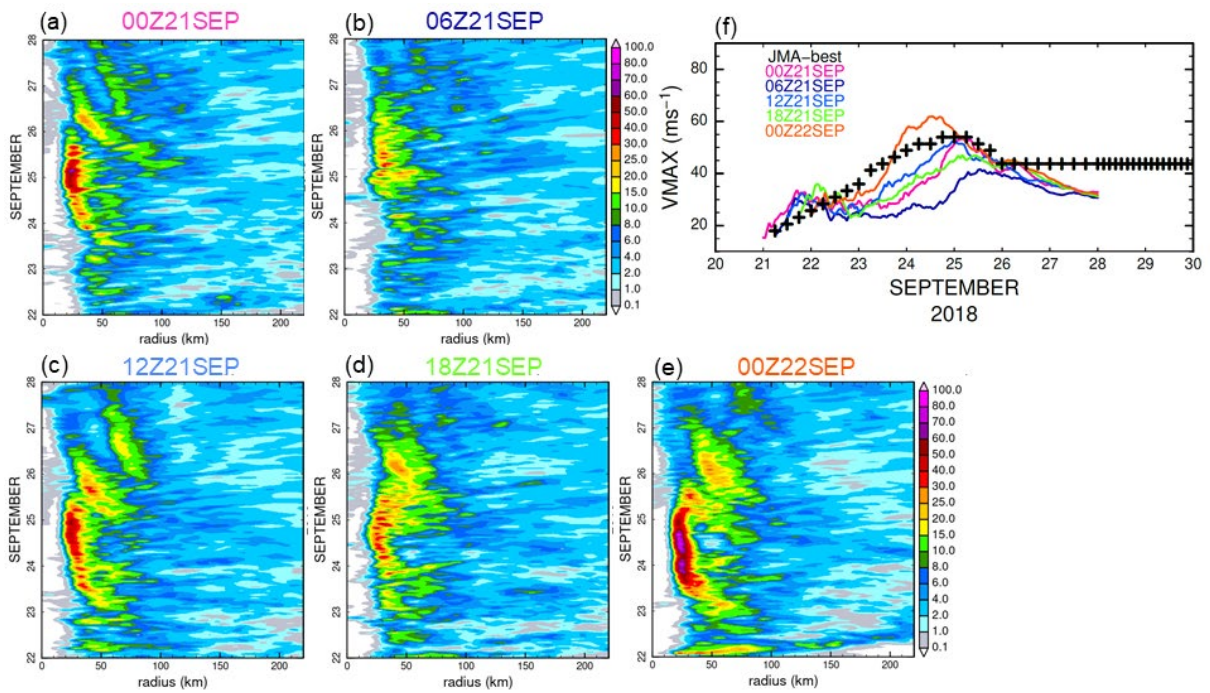


図 1: (a)-(e) SSTV-RAD グループの実験における接線平均した降水量の半径-時間断面図 (カラー ; mm h⁻¹), (f) 実験における台風の最大風速の時系列 (カラー線) と気象庁のベストトラック (黒十字). (a) : 0000 UTC 21, b : 0600 UTC 21, c : 1200 UTC 21, d : 1800 UTC 21, e : 0000 UTC 22 September 2018).

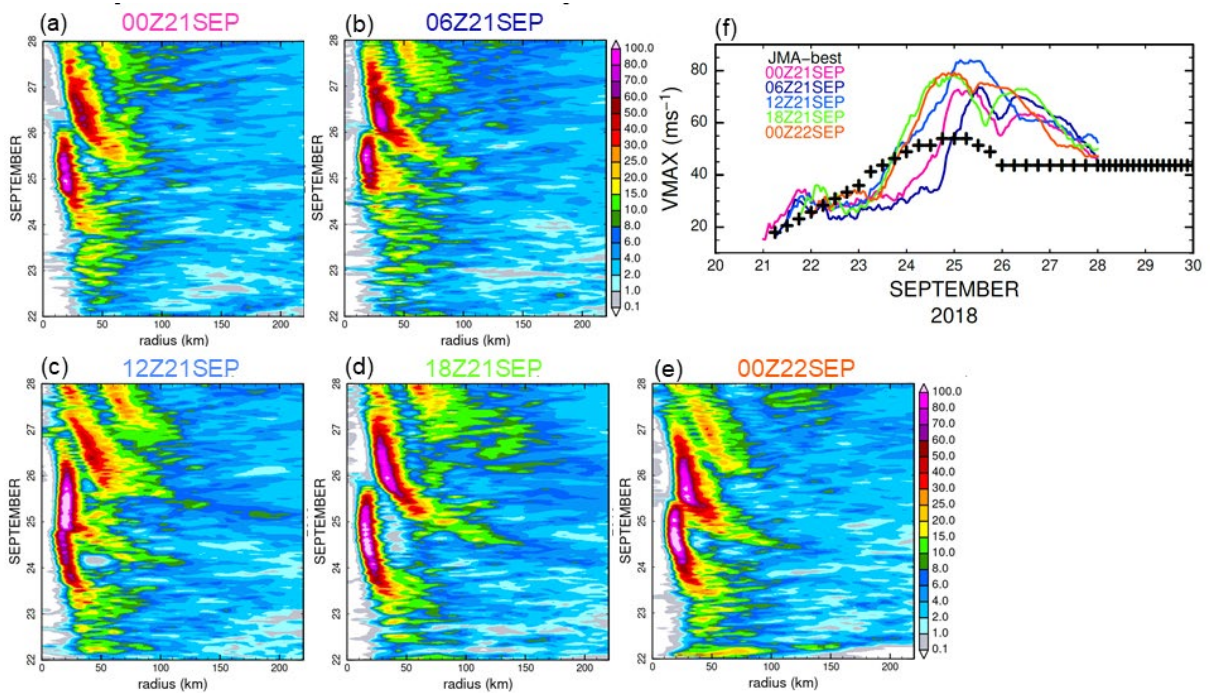


図 2: SSTC-RAD グループの実験であることを除いて図 1 と同じ.

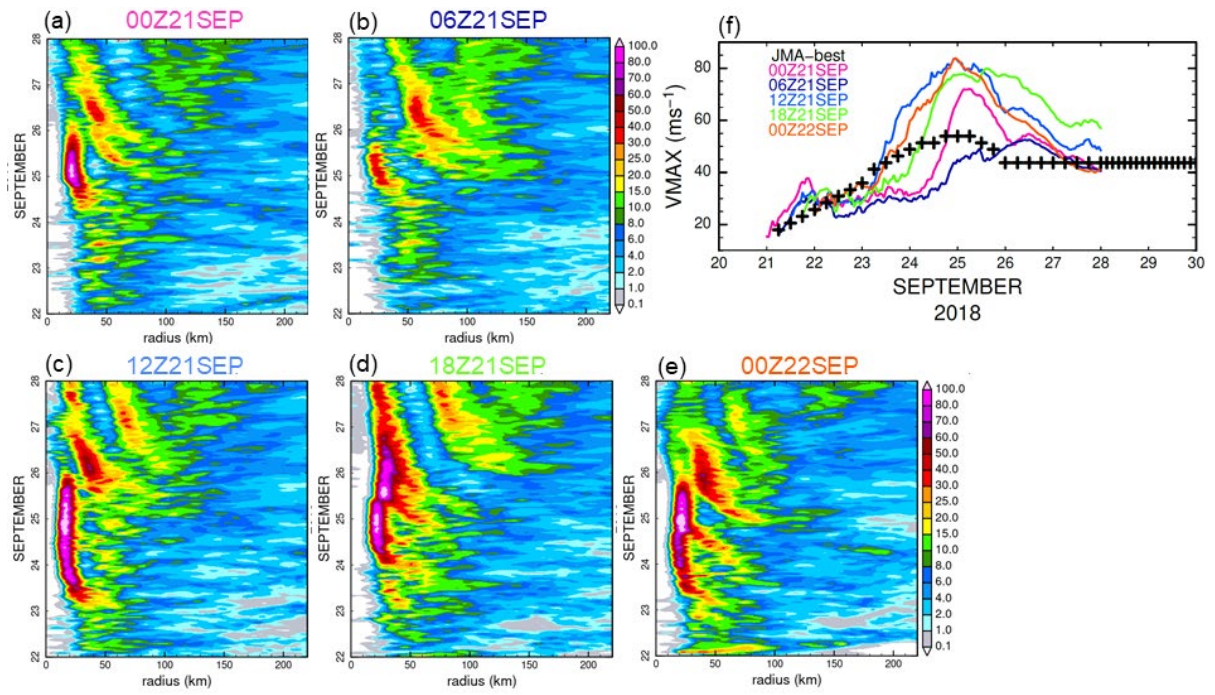


図 2: SSTC-NORAD グループの実験であることを除いて図 1 と同じ.

High-Resolution Simulation of a Supertyphoon Observed by Aircraft Using the Cloud-Resolving Model

Project Representative

Kazuhiisa Tsuboki

Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

Author

Satoki Tsujino *¹

*¹Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University

An intense tropical cyclone (TC) often forms the secondary (or outer) eyewall outside the primary (or inner) eyewall surrounding the eye (i.e., concentric eyewalls; CEs). After the secondary eyewall formation (SEF), the inner-eyewall cloud dissipates rapidly, and the outer eyewall cloud gradually contracts (i.e., eyewall replacement cycle; ERC). Coincided with the ERC, the radius of maximum wind and size in the TC change rapidly. Understanding the mechanism of the ERC is important for numerical predictions of typhoon intensity and size. Recently, the roles of atmosphere-cloud radiation processes on the SEF and ERC have been examined. Moreover, the radiative heating/cooling in the sea surface can influence the evolution of sea surface temperature (SST), which is the most important factor for TC intensification. In the present study, sensitivity experiments in a real typhoon using a high-resolution numerical model are performed to examine the roles of the radiation processes and typhoon-radiation-ocean interaction on the SEF and ERC in the typhoon. The sensitivity experiments indicate that the radiation processes (1) enhance the SEF in the cases without considering the SST evolution due to the radiative heating, but (2) weaken the SEF in the cases permitting the SST evolution. It suggests that the SST cooling through the cutting-off of the shortwave radiation in the sea surface can weaken the secondary eyewall precipitation in intense typhoons, and impact the SEF and ERC.

Keywords: Supertyphoon, Aircraft observation, Cloud-resolving model, High resolution simulation, Concentric eyewall

1. Introduction

Intense tropical cyclones (TCs) have a cloud-free area called the "eye". The eye is surrounded by an eyewall. The maximum wind speed of a TC is located near the eyewall radius. In intense TCs, the secondary eyewall often forms outside the primary (inner) eyewall (i.e., concentric eyewalls; CEs). Corresponding to radii of the CEs, the tangential winds also have local peaks near the eyewall radii. Once the secondary eyewall is formed, the inner eyewall decayed, and the outer eyewall gradually contracts (i.e., eyewall replacement cycle; ERC). The ERC can cause rapid changes in the strong wind and size of the TC. Therefore, understanding the ERC mechanism is important for the accurate prediction of the intensity and size of the TC using numerical models.

Key factors for the ERC have been proposed in some studies previously. Recently, using cloud-resolving models, the roles of atmosphere-cloud radiative heating/cooling on the ERC have been studied. Tang et al. (2017) [1] indicated that the ERC can be encouraged by the shortwave radiation in the moat (i.e., radii with weak convection between the CEs). On the other hand, Trabling and Bell (2021) [2] clarified that shortwave radiation has a delaying effect on secondary eyewall formation (SEF) and ERC. Moreover, sea surface temperature (SST), which is the most important factor for typhoon intensification, can be evolved by the radiative heating/cooling in the sea surface (hereafter called

"typhoon-radiation-ocean interaction"). However, the evolution of SST by the radiative effects is not included in their numerical experiments.

During our project period in 2019, we performed a numerical simulation of Typhoon Trami (2018) using the Cloud-Resolving Storm Simulator (CReSS 3.4.2; Tsuboki and Sakakibara 2002 [3]). Trami developed rapidly from 22 to 24 September 2018, reaching its lifetime minimum central pressure of 910 hPa. Trami had a CE structure and experienced an ERC during the mature and decaying stages from 25 to 27 September 2018. The simulation succeeded to capture the CE structure in agreement with satellite observations. In the present study, to examine the roles of the radiative heating/cooling and typhoon-radiation-ocean interaction on the SEF and ERC, we perform numerical experiments of Typhoon Trami using the CReSS model.

2. Model configuration and experimental design

The CReSS model is a three-dimensional, regional, compressible non-hydrostatic model. The CReSS model uses a terrain-following coordinate system in the vertical and calculates the three-dimensional wind velocity components, pressure perturbation, potential temperature perturbation, turbulent kinetic energy, and the mixing ratios of water vapor, cloud water, rain, cloud ice, snow, and graupel. The CReSS model does not use cumulus parameterization. The short- and long-waves radiative

heating/cooling in the model are calculated by the Rapid Radiative Transfer Model (RRTM).

The model configuration and initial/boundary conditions are mostly the same as our simulation in 2019. The model domain was about 40° in the zonal direction \times 40° in the meridional direction \times 26 km in height. The horizontal grid spacing was uniformly 0.02° in both the zonal and meridional directions. The vertical grid was a stretching vertical coordinate. The lowest grid spacing was 50 m, and there were 70 vertical grids. The end of the time integration was 0000 UTC on 28 September 2018.

To examine the roles of the radiative heating/cooling on the SEF and ERC, three groups of sensitivity experiments are designed as shown in Table 1: (1) SSTV-RAD, (2) SSTC-RAD, and (3) SSTC-NORAD. The radiative heating/cooling are included in SSTV-RAD and SSTC-RAD. SST in the model is explicitly predicted (externally given) in SSTV-RAD (SSTC-RAD/SSTC-NORAD). SST in SSTV-RAD can be evolved by a vertical diffusion equation in the model ocean and the radiative heating/cooling in the sea surface. Note that the vertical diffusion equation does not include vertical turbulent mixing associated with ocean currents. To find common features in each experiment, we use ensemble members with different initialization times in each group (Table 1). The spectral nudging is used to reduce the large discrepancy of the typhoon track among the experiments. The SSTV-RAD group is performed to examine the impacts of the typhoon-radiation-ocean interaction on the SEF and ERC.

3. Results

Figures 1-3 show the results of the experiments in the three groups. The evolution of the maximum wind speed of the typhoon in the experiments qualitatively followed the Japan Meteorological Agency estimates during the intensifying and decaying periods of 23 to 27 September 2018. On the other hand, the lifetime peak intensity is largely different among the experiments. Particularly, the peak intensity of the storms in most members of the SSTC-RAD and SSTC-NORAD groups is stronger than that in the SSTV-RAD group. The weaker intensity of the storms in SSTV-RAD can be caused by a difference in the evolution of the SST in the model. Because a mature typhoon has thick upper-layer clouds over a broad area, cutting-off of the shortwave radiative heating in the sea surface largely reduced the SST in the SSTV-RAD group (not shown).

The azimuthally averaged precipitation exhibits the SEF in the inner core, and dissipation of the primary eyewall (i.e., ERC) in most members of the experiments on around 25 September 2018 (Figs. 1-3). The intensity and radial width of the secondary eyewall precipitation in most members of SSTC-RAD are stronger and narrower than those in SSTC-NORAD, respectively.

It indicates the organization of convective clouds in the secondary eyewall and moat formation in SSTC-RAD. The results suggest that the atmosphere-cloud radiation processes can enhance the formation of the secondary eyewall and moat, which is in agreement with Tang et al. (2017). Note that our SSTC-NORAD experiments turned off not only the shortwave radiation but also the longwave radiation. Thus, the results can include roles of the longwave radiation on the SEF and ERC.

We discuss the roles of the typhoon-radiation-ocean interaction on the SEF and ERC. The intensity and radial width of the secondary eyewall precipitation in the SSTV-RAD group are weaker and wider than those in the SSTC-RAD group, respectively (Figs. 1 and 2). In the SSTV-RAD group, the SST cooling by the shortwave and longwave radiation in the sea surface can suppress the development of convective clouds in the outside of the inner eyewall. Because thick upper-layer clouds, which are originated from the inner-eyewall convection, expand on broad areas, the SST cooling is mainly caused by the cutting-off of the shortwave radiation due to the upper-layer clouds in the outside of the inner eyewall. Tang et al. (2017) [1] indicated that the shortwave radiative heating near the surface can encourage the formation of the moat by reduction of surface heat fluxes (i.e., weakening of the wind-induced surface heat exchange feedback) at radii between the primary and secondary eyewalls. In contrast to their discussion based on the simulation with the fixed SST, our experiments in SSTV-RAD indicated that the secondary eyewall precipitation is weakened by the SST cooling associated with the cutting-off of the shortwave radiative heating in the outside of the inner eyewall. It suggests that the SST cooling through the shortwave radiation (i.e., typhoon-radiation-ocean interaction) can weaken the secondary eyewall precipitation, and impact the SEF and ERC. In future works, details of the impact of the typhoon-radiation-ocean interaction on the SEF and ERC will be examined.

References

- [1] Tang, X., Z. Tan, J. Fang, Y. Q. Sun, and F. Zhang “Impact of the diurnal radiation cycle on secondary eyewall formation”, *J. Atmos. Sci.*, 74, 3079-3098, (2017)
- [2] Trabling, B. C., and M. M. Bell, “The sensitivity of eyewall replacement cycles to shortwave radiation”, *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 126, e2020JD034016, (2021)
- [3] Tsuboki, K., and A. Sakakibara, “Large-scale parallel computing of Cloud Resolving Storm Simulator”, *High Performance Computing*, edited by H. P. Zima, K. Joe, M. Sato, Y. Seo, and M. Shimasaki, 243-259, Springer, New York, (2002)

Table 1: Experimental design of the sensitivity tests.

Name	Radiation	SST	Initial time
SSTV-RAD	On	1D-diffusion ^a	00 UTC 21, 06 UTC 21, 12 UTC 21, 18 UTC 21, 00 UTC 22 September 2018
SSTC-RAD	On	Linear interpolation ^b	
SSTC-NORAD	Off	Linear interpolation	

^a Ocean temperature is explicitly predicted by a vertical diffusion equation with inputting net heat flux in the sea surface.

^b An external dataset of daily sea-surface temperature (SST) data is given as the SST in the model with linearly interpolating in time.

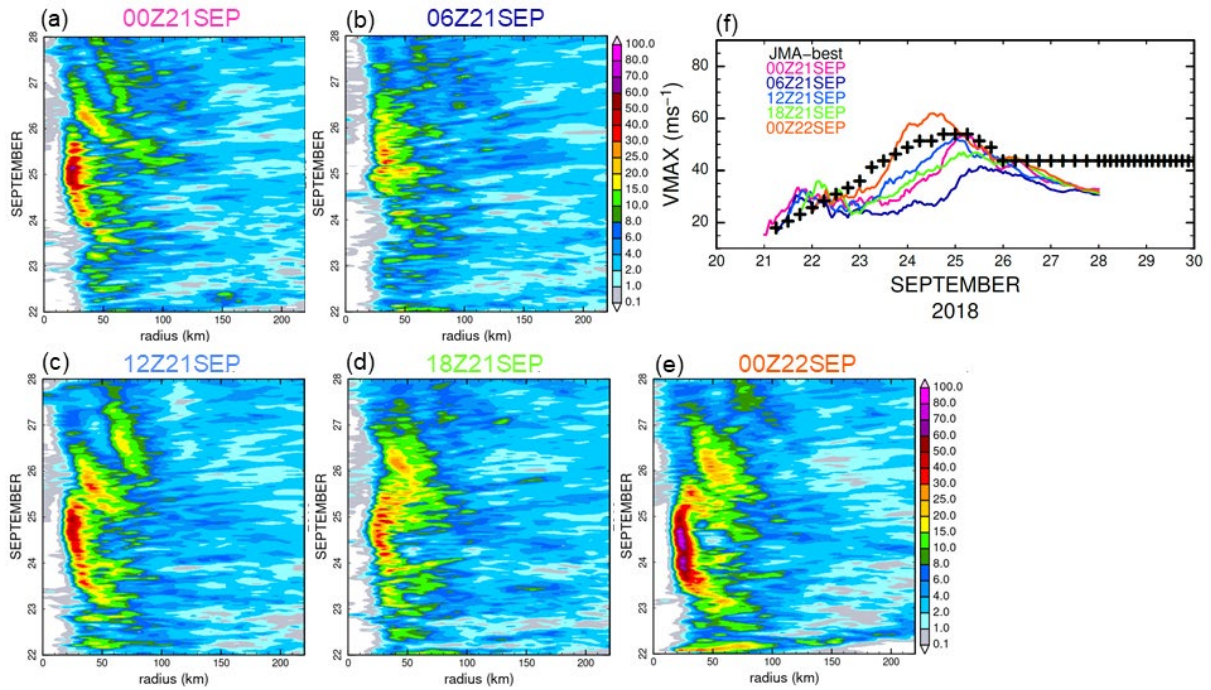


Figure 1: (a)-(e) Radius-time cross-sections of azimuthally averaged precipitation in the experiments of the SSTV-RAD group (color; mm h⁻¹), and (f) time series of the maximum wind speed of the typhoon near the surface in the experiments (color lines) and JMA best track (black crosses). Panels (a) to (e) indicate the experiments with different initial time (a: 0000 UTC 21, b: 0600 UTC 21, c: 1200 UTC 21, d: 1800 UTC 21, and e: 0000 UTC 22 September 2018).

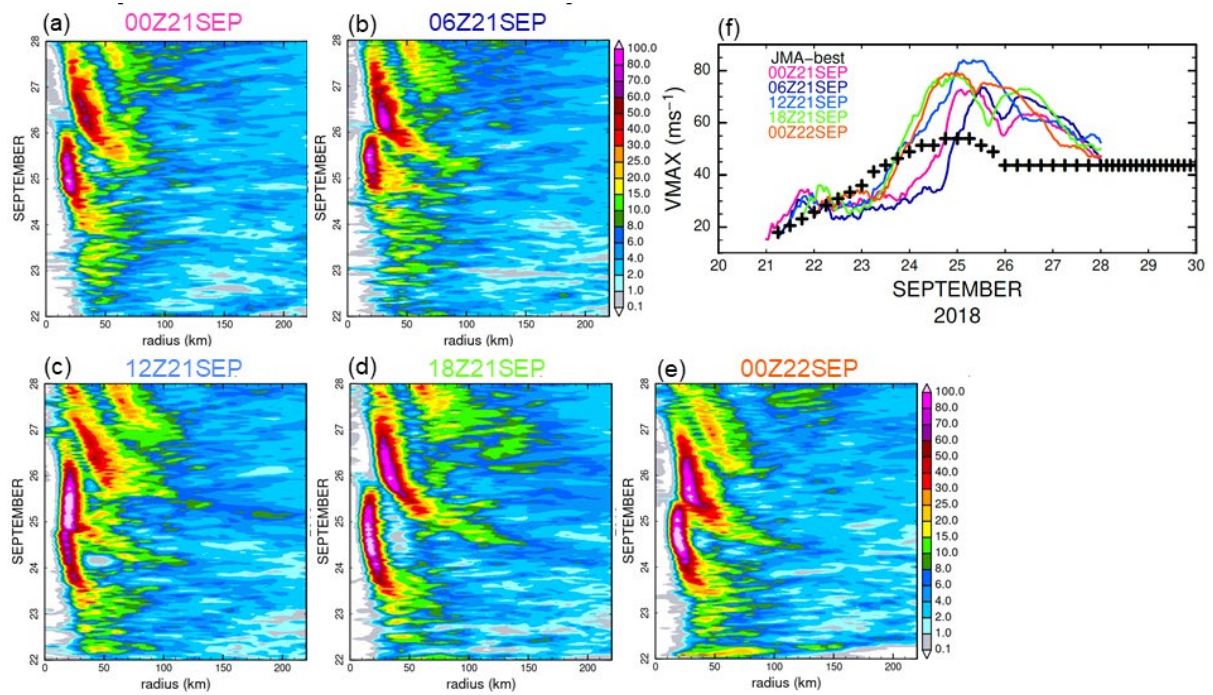


Figure 2: As in Fig. 1, except for the SSTC-RAD group.

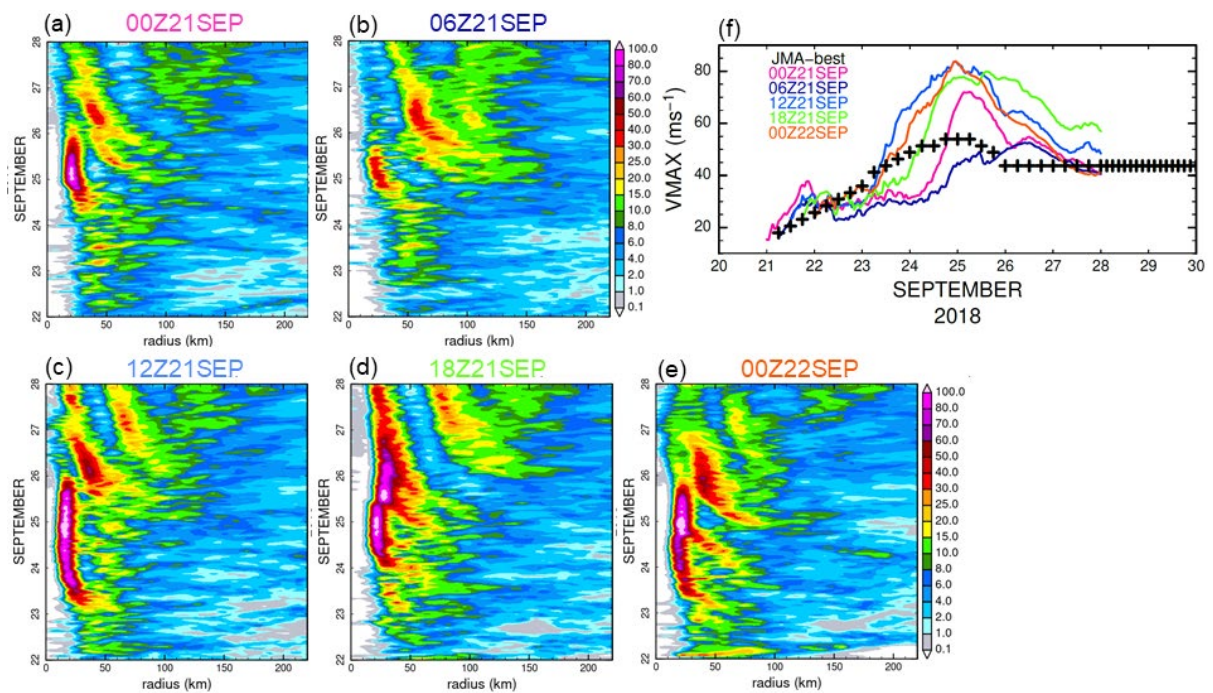


Figure 3: As in Fig. 1, except for the SSTC-NORAD group.