

# 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

北海道大学大学院 地球環境科学研究院

特に強い熱帯低気圧は、眼を取り囲むリング状の壁雲（内側壁雲）に加えて、その外側に壁雲が形成することがある（多重壁雲構造）。多重壁雲の形成後は、内側の壁雲が急速に衰退し、外側の壁雲が中心向きに収縮する（壁雲の置き換え）。壁雲の置き換えに伴い、熱帯低気圧の強風半径や低気圧のサイズも急激に変化する。壁雲の置き換えメカニズムの解明は、台風強度やサイズの数値予報にとって重要である。2018年に発生した台風 Trami は、生涯最低中心気圧 910 hPa に達した際、明瞭な多重壁雲構造と内側壁雲の衰退を示した。本研究では Trami に見られた壁雲の置き換えメカニズムを調査するために、非静力学領域大気数値モデルを用いた高解像度シミュレーションを試み、その結果をいくつかの観測結果と比較した。シミュレーションされた台風は、その発達期に経路、発達率ともに気象庁ベストトラックとよく一致した。また、マイクロ波輝度温度観測と類似の多重壁雲構造をもち、壁雲置き換えに伴う内側壁雲の衰退もよく再現された。多重壁雲構造を伴った期間において、台風中心付近の接線風は、航空機によるドロップゾンデ観測で見られた接線風の分布、最大風速および最大風速半径を再現した。

**キーワード：**熱帯低気圧, 航空機観測, 雲解像モデル, 高解像度シミュレーション, 多重壁雲構造

## 1. はじめに

発達した熱帯低気圧の中心には、眼と呼ばれる活発な積乱雲のない領域をもつ。眼の周囲は活発な積乱雲群（壁雲）がリング状に取り囲んでいる。熱帯低気圧の最大風速は、この壁雲に沿って現れる。強い熱帯低気圧ではしばしば、眼を取り囲む壁雲（内側壁雲）半径より外側に、新たな壁雲が形成されることがある。この同心円状に形成した複数の壁雲を多重壁雲と呼ぶ。多重壁雲の形成に対応して、熱帯低気圧の接線風もそれぞれの壁雲の半径に極値をもつようになる。一度多重壁雲が形成されると、内側の壁雲が急速に衰退し、外側の壁雲が中心向きに収縮する壁雲の置き換え現象が発生する。壁雲の置き換えは、1-2 日程度の時間スケールで発生し、熱帯低気圧の強風半径や低気圧のサイズを急激に変化させる。したがって、多重壁雲の形成と置き換わりの発生メカニズムの理解は、数値モデルを用いた熱帯低気圧の強風半径、サイズの高精度な予報にとって重要である。

台風の強度推定を改善するために、日本の航空機を用いた台風直接観測プロジェクト（Tropical cyclones-Pacific Asian Research Campaign for Improvement of Intensity estimations/forecasts; T-PARCI）が 2018 年に実施された。この観測プロジェクトでは、台風 Trami の成熟期における内部コア（中心から半径約 100-200 km の範囲）の風速、温度、湿度分布をドロップゾンデによって取得した。台風 Trami は 9 月 22 日から 24 日にかけて急速に発達し、910 hPa という生涯最低中心気圧に達した（図 1b）。25 日は勢力が弱くなり、26 日以降はほぼ維持し

ながらゆるやかに北上した。マイクロ波衛星観測で得られた輝度温度分布によると、25 日 04 UTC あたりでは、台風中心に明瞭な眼が存在した（図 2a）。眼は半径約 30-40 km に位置する壁雲に囲まれており、その壁雲のさらに外側の半径約 90 km に別の壁雲が存在した（多重壁雲構造）。25 日後半にはこの多重壁雲のうち、内側の壁雲が徐々に不明瞭となり（図 2b）、26 日にはほぼ消失した。この時間変化は壁雲の置き換えを示す。本研究では Trami における多重壁雲の置き換えメカニズムを明らかにするために、非静力学領域大気数値モデルを用いた高解像度シミュレーションを試み、その結果を複数の観測結果と比較する。

## 2. 手法

Trami における多重壁雲の置き換えメカニズムを調査するために、数値モデル Cloud Resolving Storm Simulator (CRSS) を用いた数値シミュレーションを実施した。CRSS は 3 次元大気を圧縮流体としてモデル化し、非静力学過程も考慮し、矩形領域で大気の力学、熱力学過程の時間発展を計算するモデルである。モデルの格子点は水平方向に緯度経度座標、鉛直方向には現実地形に沿った座標系上にとられる。モデルの予報変数は 3 次元風速成分、気圧、温位、乱流運動エネルギー、水蒸気を含めた水物質（気、液、固相）の混合比である。積雲パラメタリゼーションは用いない。モデルの計算領域は東西約 40° × 南北約 40° × 鉛直 26 km を水平方向 0.02° の格子解像度でとる（図 1a）。鉛直は 70 層とり、最下層の格子幅を 50 m とした。積分は台風が発達を開始する前 9 月 21 日 12 UTC から成熟した 28 日 00 UTC まで行った。シミュ

レーションにおける初期値および境界値は National Centers for Environmental Prediction より提供されている全球客観解析 (水平  $0.25^\circ$  解像度) を用いた。

### 3. 結果

シミュレーションされた台風の経路は、気象庁ベストトラックにおいて推定された経路とほぼ一致した (図 1a)。シミュレーションにおける台風を中心気圧および最大風速は、発達期において気象庁による推定をよく追従した (図 1b)。一方で、25 日に見られる台風の衰退は、ベストトラックよりゆるやかになっている。

CReSS で再現された台風中心付近では、25 日前半では半径 30-40 km と 80-100 km の位置にリング状の降水分布が示された (図 2c)。これはそれぞれの半径に形成した壁雲に対応し (図 2a)、マイクロ波輝度温度観測と類似の半径に多重壁雲構造を有したことを示している。25 日後半ではシミュレーションにおける内側壁雲の降水が衰退し、外側壁雲と内側壁雲の間 (moat) に降水のない領域が偏在した (図 2d)。この内側壁雲の衰退と moat 領域の偏在はマイクロ波観測にも見られており (図 2c)、シミュレーションされた台風は実際の内側壁雲の衰退をよく捉えていたと考えられる。

図 3 は多重壁雲期間 (9 月 25 日 06 UTC) での T-PARCCII ドロップゾンデ観測における Trami の接線風分布を示している。観測された Trami の最大接線風は高度 1 km 以内の境界層に存在し、最大風速半径は 40-50 km の距離に位置した。接線風分布は最大風速半径の内側でほぼ鉛直方向に一樣 (等価順圧構造) であった (図 3a)。同じ時間におけるシミュレーションされた接線風分布は、高度 7 km 以下で観測をよく再現した (図 3b)。特に最大風速半径は半径 40-70 km 付近に位置し、 $60 \text{ m s}^{-1}$  を越える強風域の大部分は高度 1 km 以内の境界層内に存在した。このシミュレーションで得られた接線風分布は CReSS モデルの物理によって表現されたものであり、壁雲の置き換えに伴う内側壁雲消失の力学を調べるために有益なデータとなる。

9 月 25 日以降のシミュレーションに見られたベストトラックとの差を議論する。25 日は Trami の移動速度が減少し、進路が北向きに転向した期間である (図 1a)。このため、台風直下の海面水温が著しく低下し、台風の発達が抑制されたと考えられる。本研究でのシミュレーションは、鉛直拡散に基づく 1 次元海洋モデルを大気モデルと結合している。よって海洋の 3 次元的な力学過程 (例えばエクマン湧昇など) は表現できず、実際の台風で見られる海面水温低下の特徴と異なっている (図略)。この結果として、25 日以降の台風強度弱化期間において、ベストトラックとシミュレーションに差が見られたと考えられる。

### 文献

Tsuboki, K., and A. Sakakibara (2002), 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, pp. 243-259, Springer, New York.

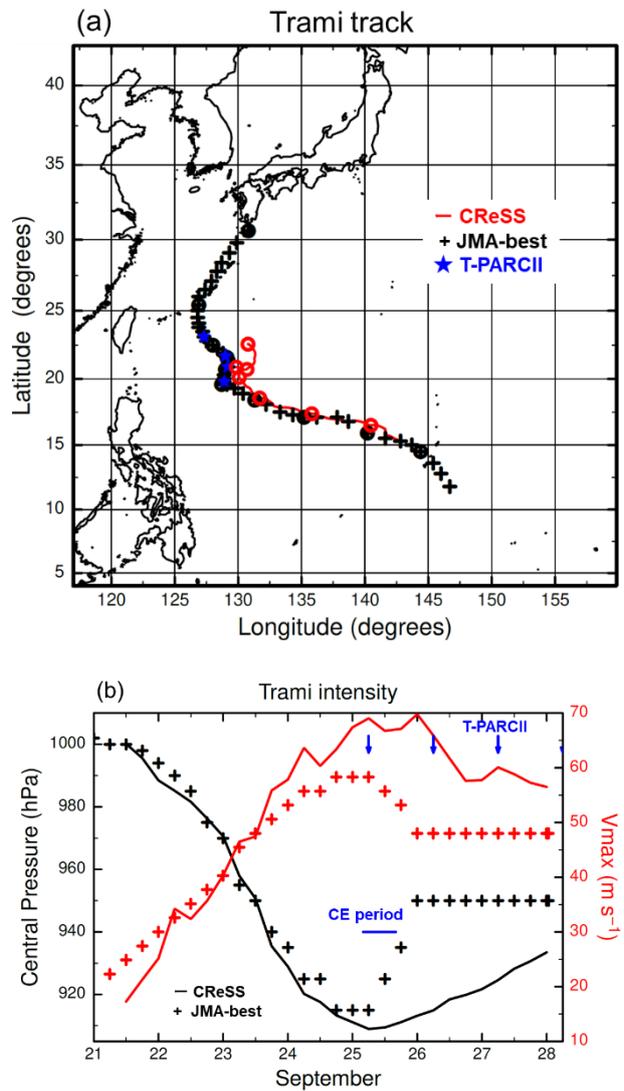


図 1: (a) 台風 Trami の経路および (b) 中心気圧と最大風速。クロスは気象庁のベストトラック推定値。実線が CReSS シミュレーションを表す。(a) における青星記号、および (b) における青矢印は T-PARCCII のドロップゾンデ観測時の台風中心と時刻を表す。(b) における青線はマイクロ波画像に基づく、多重壁雲構造を有した期間。シミュレーションにおける台風の最大風速は、接線平均した接線風の最大値によって表される。

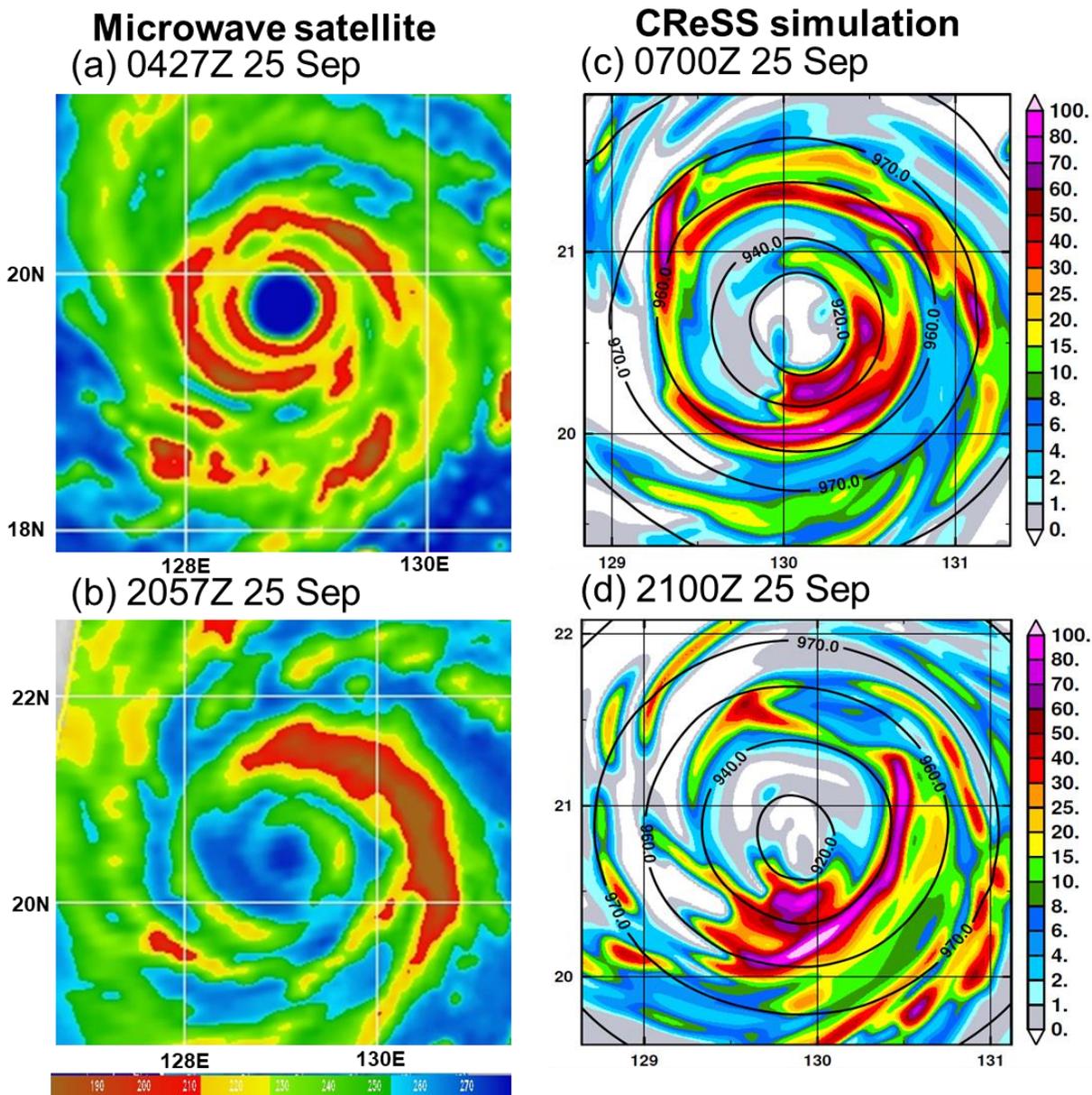


図 2: (上) 多重壁雲形成時と (下) 内側壁雲衰退時における (左) 89 GHz 帯マイクロ波輝度温度 (カラー; K), および (右) シミュレーションでの降水強度 (カラー; mm h<sup>-1</sup>) と海面更正気圧 (等値線; hPa) をそれぞれ示す. マイクロ波画像は米国海軍研究所 (<https://www.nrlmry.navy.mil/TC.html>) 提供.

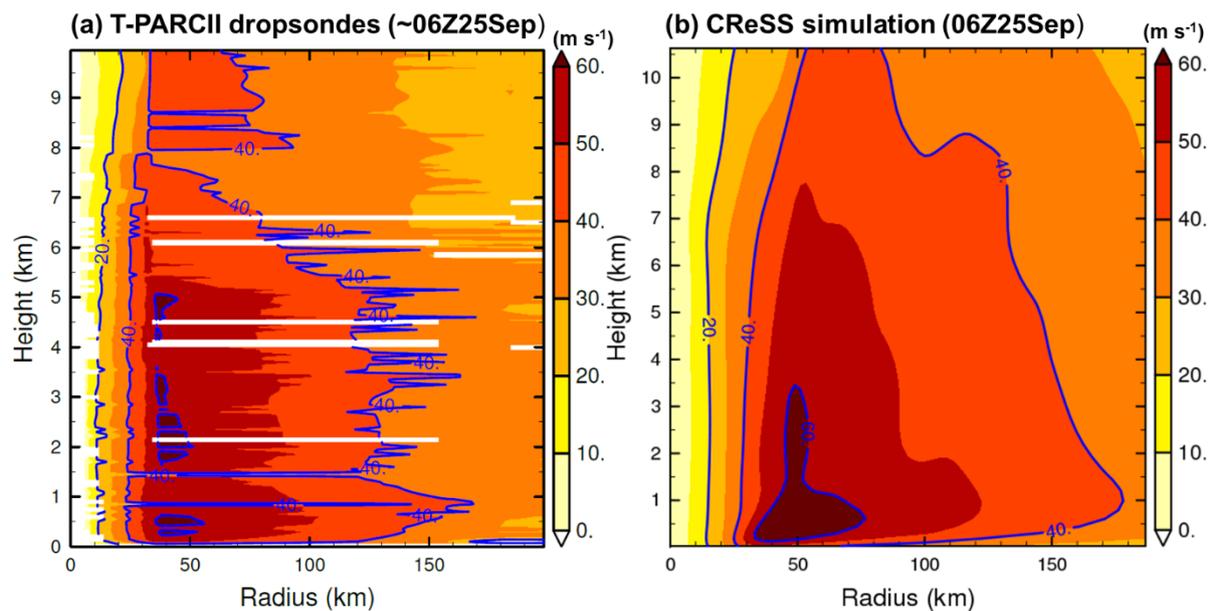


図 3: 接線風の距離高度断面図 (カラーおよび等値線;  $m s^{-1}$ ). 図の時刻はそれぞれ 9 月 25 日の (a) 06 UTC 周辺における T-PARCI II ドロップゾンデで観測された接線風, および (b) シミュレーションの同日 06 UTC での接線平均した接線風をそれぞれ示す.

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

Project Representative

Kazuhisa Tsuboki      Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

Author

Satoki Tsujino

Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University

A strong tropical cyclone (TC) often forms the secondary (outer) eyewall outside the primary (inner) eyewall surrounding the eye (i.e., concentric eyewalls; CEs). After the secondary eyewall formation, the inner eyewall cloud dissipates rapidly, and the outer eyewall cloud gradually contracts (an eyewall replacement cycle; ERC). Coincided with the ERC, the radius of maximum wind (RMW) and size in the TC change rapidly. Understanding the mechanism of the ERC is important for numerical predictions of typhoon intensity and size. Typhoon Trami (2018) exhibited a CE structure and inner eyewall dissipation after Trami reached the lifetime minimum central pressure of 910 hPa. As the first step for understanding the mechanism of the inner eyewall dissipation in Trami, a high-resolution simulation using a non-hydrostatic regional model is performed in this study. The simulation result was compared with available observations. The simulated Trami was in agreement with track and intensity in the JMA's best tracks during the most intensifying period. The simulated Trami had a CE structure similar to that of the microwave brightness temperature observations. The evolution of the CEs followed the microwave images. The tangential winds in the inner core of Trami during the CE period reproduced the tangential wind distribution (particularly, the maximum wind speed and RMW) as seen in dropsonde observations.

**Keywords:** supertyphoon, aircraft observation, the cloud-resolving model, high resolution simulation, concentric eyewalls

## 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 rapidly dissipates, 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.

A field campaign of Tropical cyclones-Pacific Asian Research Campaign for Improvement of Intensity estimations/forecasts (T-PARCI) using a Japanese aircraft have been conducted in a mature stage of Typhoon Trami (2018). In this project, horizontal winds, temperature, and humidity distributions of the inner core (within 100-200 km from the center) in Trami were obtained by dropsondes. Typhoon Trami developed rapidly from 22 to 24 September 2018, reaching its lifetime minimum central pressure of 910 hPa (Figure 1b). According to the brightness temperature distribution obtained by microwave satellite observations, the storm had a distinct eye at around 0400 UTC 25 September (Figure 2a). The eye was surrounded by the inner

eyewall at a radius of 30-40 km, and the outer eyewall existed at a radius of 90 km (i.e., CEs). The inner eyewall became gradually obscured at around 2100 UTC 25 September (Figure 2b), and almost disappeared on 26 September. As the first step for understanding the mechanism of the inner eyewall dissipation in Trami, a high-resolution simulation using a non-hydrostatic regional model is performed in this study. The simulation result is compared with available observations.

## 2. Methodology

A numerical simulation of Typhoon Trami was conducted with the Cloud Resolving Storm Simulator (CReSS 3.4.2), which is a three-dimensional, regional, compressible non-hydrostatic model (Tsuboki and Sakakibara 2002). 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 (TKE), and the mixing ratios of water vapor, cloud water, rain, cloud ice, snow, and graupel. The CReSS model does not use cumulus parameterization. The model domain was about  $40^\circ$  in the zonal direction  $\times$   $40^\circ$  in the meridional direction  $\times$  26 km in height (Figure 1a). The horizontal grid spacing was uniformly  $0.02^\circ$  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 integration period was from 1200 UTC on 21 to 0000 UTC on 28 September 2018. In the

present simulation, the global analysis data with a  $0.25^\circ$  resolution provided by the National Centers for Environmental Prediction was used for the initial and boundary conditions.

### 3. Result

The simulated track of Trami almost followed the JMA best-track estimation (Figure 1a). The central pressure and maximum wind speed of the typhoon in the simulation followed the JMA estimates well during the most intensifying period (Figure 1b). On the other hand, the weakening rate of Trami seen on 25 September 2018 is smaller than the best track.

In the simulation, ring-shaped precipitation was exhibited at 30–40 km and 80–100 km radii at 0700 UTC 25 September 2018 (Figure 2c). The result indicates that CEs in the simulation formed at their respective radii corresponded to the ring-shaped precipitation. The formation radii of the simulated CEs were in agreement with those in the satellite observation (Figure 2a). At around 2100 UTC 25 September 2018, the simulated inner-eyewall precipitation weakened. Moreover, regions with no precipitation, which had strong asymmetry (Figure 2d), were distributed between the inner and outer eyewalls (i.e., moat). The asymmetric moat in the simulation was also observed in the microwave observations (Figure 2c). The result suggests that the simulated typhoon captured the actual weakening of the inner eyewall.

Figure 3 shows the tangential wind distribution of Trami at around 0600 UTC 25 September for the T-PARCII observation. The maximum tangential wind speed of Trami was observed below a height of 1 km, and the radius of maximum wind (RMW) was located at a radius of 40–50 km. The small vertical shear of the tangential winds indicated an equivalent barotropic structure inside the RMW (Figure 3a). The simulated tangential winds at a similar time to the observation reproduced the observations well below 7 km altitude (Figure 3b). In particular, the RMW was located in the 40–70 km radius, and most of the strongest tangential winds above  $60 \text{ m s}^{-1}$  were within the boundary layer within a height of 1 km. The simulated tangential winds were represented by the physics of the CReSS model, and the simulation is useful for studying the dynamics of the inner-eyewall dissipation associated with the ERC.

We discuss the differences from the best-track intensity seen in the simulated intensity after 25 September 2018. Trami's translation speed decreased as the storm turned northward (Figure 1a). Coincided with the decrease in the translation speed, a significant decrease in the sea surface temperature (SST) may have been induced by the typhoon. The SST cooling can suppress the development of the typhoon. The simulation in this study is based on a one-dimensional ocean model based on vertical diffusion. Therefore, three-dimensional dynamical processes in the ocean (e.g., Ekman upwelling) cannot be represented in the

simulated SST cooling. The lack of three-dimensional ocean processes in the simulation can induce the difference from the characteristics of the observed SST cooling (not shown). The different SST cooling can induce the difference in the intensity between the best track and the simulation during the weakening period of the storm after 25 September 2018.

### References

Tsuboki, K., and A. Sakakibara (2002), 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, pp. 243–259, Springer, New York.

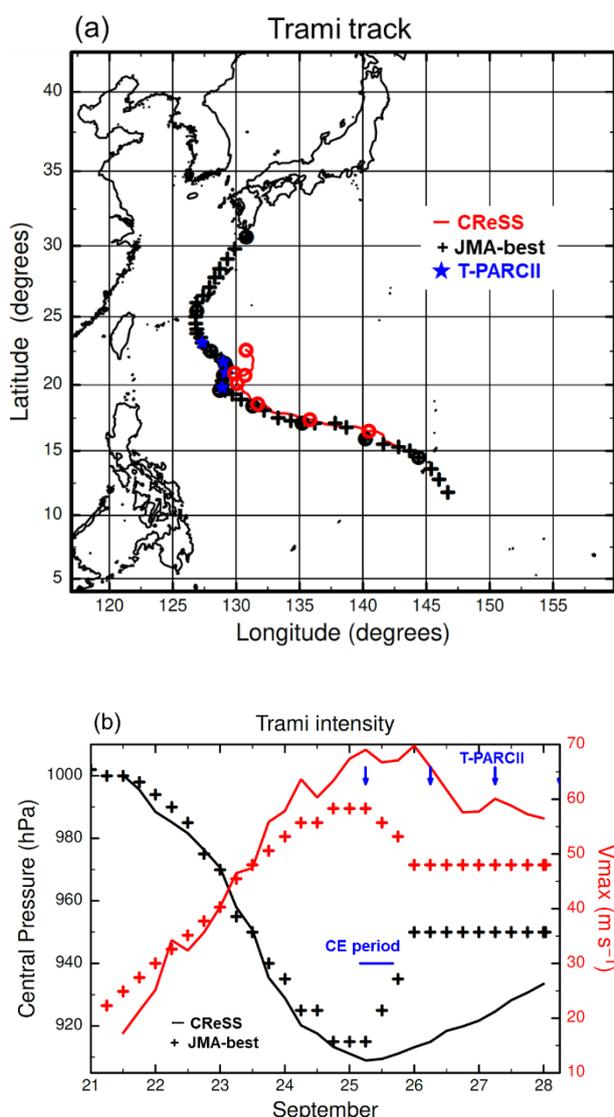


Figure 1: (a) Track and (b) central pressure and maximum wind speed of Typhoon Trami (2018). Crosses correspond to the best-track data provided by the JMA. Solid lines denote the simulation. Blue stars in Panel (a) indicate the storm location when dropsonde observations were conducted in T-

PARCII. Blue vectors in Panel (b) indicate times in T-PARCII, respectively. The blue line in Panel (b) denotes the period of the CEs based on the microwave satellite images. The maximum wind speed in the simulation was defined as the maxima of the azimuthally averaged tangential wind speed in the simulation.

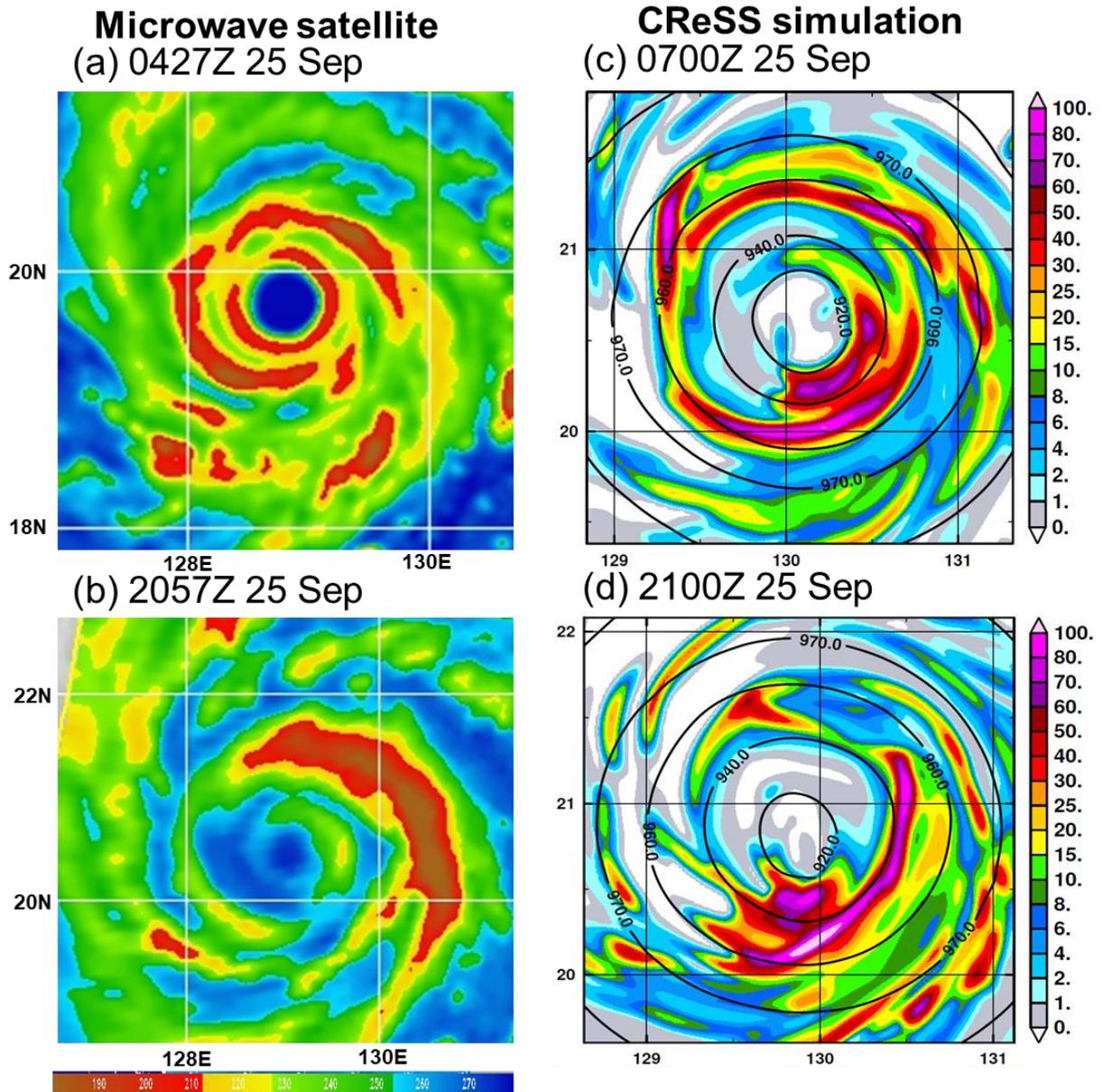


Figure 2: (left) Microwave brightness temperature in the 89-GHz band (color; K) and (right) simulated precipitation intensity (color;  $\text{mm h}^{-1}$ ). Top and bottom panels correspond to periods of the secondary eyewall formation and the inner-eyewall dissipation, respectively. Contours in Panels (c) and (d) denote the sea-level pressure in the simulation (hPa). Microwave images were provided by the U.S. Naval Research Laboratory (<https://www.nrlmry.navy.mil/TC.html>).

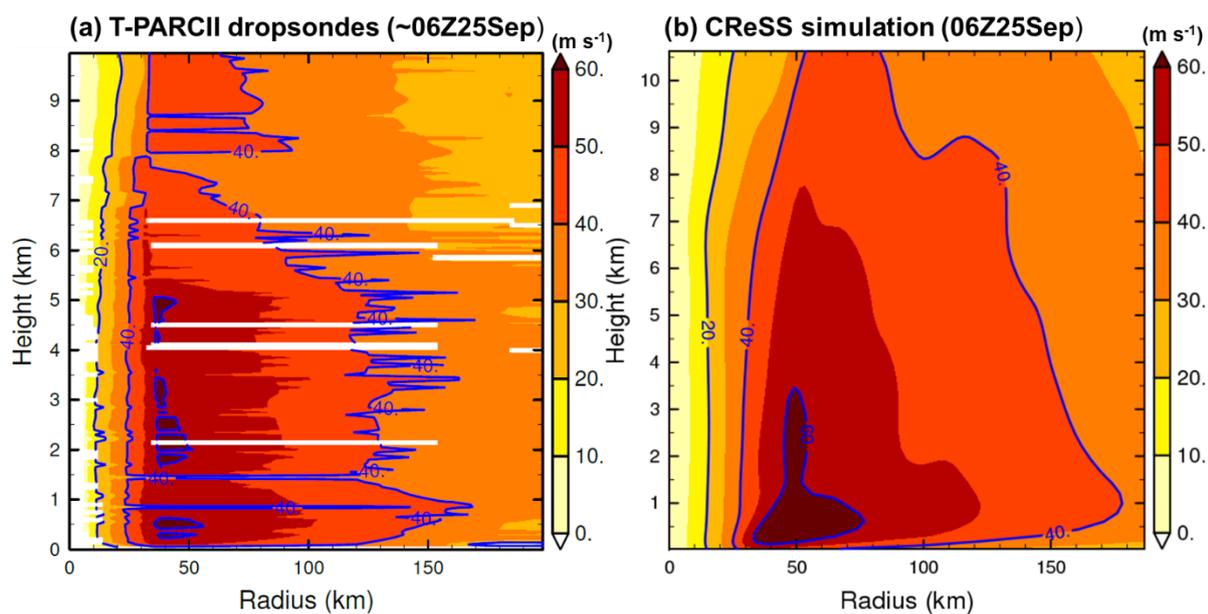


Figure 3: Radius-height cross-sections of tangential winds (color and contours;  $\text{m s}^{-1}$ ). The tangential winds in Panel (a) were observed by the T-PARCI dropsondes at around 0600 UTC 25 September 2018. Panel (b) shows the azimuthally averaged tangential winds in the simulation at 0600 UTC 25 September 2018.