

# 非静力学大気波浪海洋結合モデルを用いた台風

## – 海洋相互作用の研究：特に台風上部の巻雲に注目して

課題責任者

坪木 和久 名古屋大学 地球水循環研究センター

研究分野

気象学

### 1. 研究の目的と意義

台風の強度予測の精度を向上させるためには、台風を含む数千キロメートル以上の環境場を計算するとともに、雲を表現する解像度で計算を行い、さらに台風と海洋との相互作用や台風周辺の対流圏上部および成層圏下部の温度を正確に予測することが必要である。台風と海洋の相互作用は非線形性が強く、高解像度の大気海洋結合モデルを用いることが不可欠である。また、対流圏上部のような上層の温度は環境場だけでなく、台風から吹き出す巻雲により決められる。そこで本研究では雲を解像する大気モデル CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator) と、海洋研究開発機構で開発された、海洋の小スケールの運動まで表現できる非静力学海洋モデル NHOES (NonHydrostatic Ocean model for the Earth Simulator) を結合し、それにさらに波浪モデル、海洋混合層モデル、放射モデルを導入し、台風の強度をコントロールする大気海洋相互作用と巻雲の台風強度予測に対するインパクトを明らかにすることが目的である。これまでほとんど注目されていない点として、放射過程を通して台風上部の吹き出し層 (アウトフローレイヤー) の巻雲が台風にどのような効果を与えるかについても注目する。

海洋上で発生する台風は、そのエネルギーのほとんどを海洋からの潜熱として受け取る。一方で海洋は表面からの冷却、上部の混合、さらに台風に誘起された鉛直運動などで冷却を受け、それはまた台風の強度を制限するなど複雑な相互作用の結果、台風の強度が決まる。このような相互作用は台風の眼の壁雲周辺の特に風の強いところで起こっており、その精度よいシミュレーションには、数キロメートル格子の高解像度シミュレーションが必要である。また、上層の巻雲については、それ自体が台風の強度に直接影響するのではなく、放射過程を通して台風の強度に強く作用する。これらのプロセスは台風の強度予測に十分考慮されてなく、そのインパクトを明らかにすることは、台風の強度予測の精度向上に不可欠である。過去 20 年の台風やハリケーンの予測精度については、それらの進路予測については、モデルの高解像度化と共に、顕著な改善がみられるが、強度予測についてはほとんど改善がみられない。本研究はその問題における、大気海洋相互作用と上層の巻雲のインパクトを明らかにし、強度予測の改善に寄与すると共に、非常に強い台風などの熱帯低気圧のシミュレーションの精度の向上に寄与するものである。

### 2. 研究内容

本研究で用いる非静力学大気波浪海洋結合モデル (CReSS-NHOES) は、大気と海洋のそれぞれが独立に地球シミュレータで開発されたモデルであるが、非常に親和性が高く、大気と海洋ともに非静力学で高解像度のシミュレーションが可能である。また、地球シミュレータで最も効率よく実行できるモデルとなっており、新しい地球シミュレータでさらにその性能が発揮されることが期待される。また、台風のシミュレーションには高解像度大規模シミュレーションが不可欠で、地球シミュレータの性能が必要である。

結合モデル CReSS-NHOES について、まず新しい地球シミュレータで十分な性能が出せるように最適化を行う。特に放射過程や波浪モデルについて最適化を行い、十分な性能が出せるようにする。そのうえで特徴的な台風についての結合モデルを用いたシミュレーション実験を実施し、台風と海洋の相互作用について解析するとともに、巻雲過程についての敏感度実験により、台風の強度に対する大気海洋相互作用や台風上部の巻雲のインパクトについて検討する。

シミュレーション実験の対象とする台風は、非常に強い台風で、伊勢湾台風、MEGI (2010)、HAIYAN (2013) などである。低緯度の台風を対象とする理由は、台風やサイクロンについて地球上での最大強度のものが、低緯度で発生する。すなわち現在の気候における熱帯低気圧の到達最大強度を与えるからである。また、地球温暖化が進むと今世紀後半には、日本付近の海面水温が、現在の低緯度の海面水温ぐらいに昇温するので、将来の日本付近に達する台風の強度をシミュレーションにより推定できると考えるからである。

### 3. 研究成果

新しい ES をはじめて用いる計算であったので、当初はステージインの仕方などに工夫をしなければならないことをはじめとして、いくつかの問題点を克服する必要があった。また、特に放射過程は計算コストの高いプロセスであるので、その最適化に時間を割いて実施した。放射過程は RRTM と MSTRN の 2 つを検討し、今回は高速化しやすい RRTM に重点を置いて最適化を行った。また、今回はじめて南半球の熱帯低気圧であるサイクロンのシ

ミュレーションも行った。そのためにいくつかの改良が必要であった。以下に本研究で得られた主要な研究成果をまとめる。

(a) 伊勢湾台風

戦後最大規模の台風災害をもたらした伊勢湾台風は、昭和34年9月26日、紀伊半島に上陸し東海地方に甚大な災害をもたらした。この大型台風は、暴風と高潮により5000人を超える死者・行方不明者を出した。伊勢湾台風襲来当時、日本には気象衛星もレーダ観測網もなく、このため伊勢湾台風の雲の様子や眼の構造などの実態が分かっていない。伊勢湾台風は台風のメカニズムの研究において重要であるだけでなく、最悪の経路をとった台風という点で、未来の最悪台風のシナリオとなる点で重要である。このため伊勢湾台風を調べ、さらに“未来の伊勢湾台風”を予測することは、学術的にも防災の観点からも大きな意義がある。

そこで雲解像モデル CReSS を用いて、水平解像度 2km で上陸のおよそ2日前から上陸後までのシミュレーションを実施した。図1に気象庁ベストトラックとシミュレーションの結果得られた台風中心の経路を示した。初期値は1959年9月24日12UTCである。シミュレーションは放射過程を入れた場合と入れない場合の2つを行った。図から分かるように3本の線はほとんど重なっており、シミュレーションは経路をよく再現していることが分かる。また、中心位置は放射過程のあるシミュレーションのほうがより観測に近くなっている。放射過程はわずかであるが、移動速度にも影響している。

図2に雲と降水粒子の立体的な分布を示す。この図から分かるように上陸時でも眼と眼の壁雲が対称性のよい直立した構造をしている。このことは台風が強い勢力を維持していたことを示している。また、上層の厚い巻雲

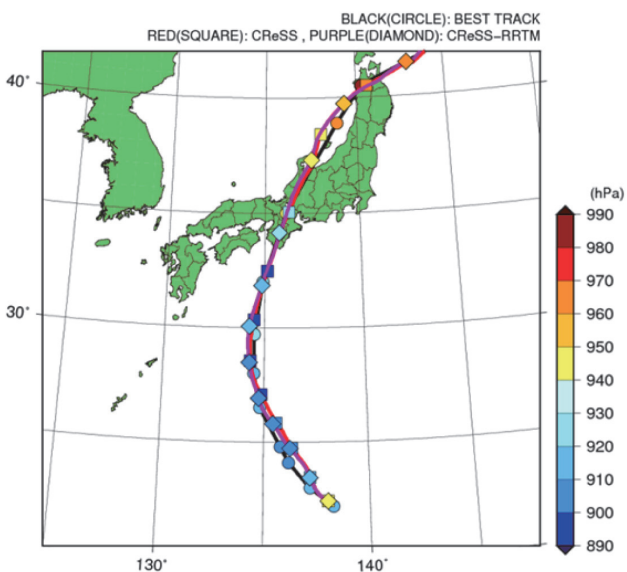


図1 伊勢湾台風の経路を観測とシミュレーションで比較したもの。黒実線と円は気象庁ベストトラック。赤実線と四角は放射過程のないシミュレーション。紫とダイヤモンドは放射過程のあるもの。

が眼の壁雲から周囲に広く広がっており、南西側は沖縄付近まで達している。

このような広域に広がる上層巻雲は、それ自体が直接台風の降水量などに影響することはほとんどないが、放射過程を通して台風の強度に大きく影響する。このため台風からの吹き出し層（アウトフローレイヤー）の巻雲がどのように表現されるかは、台風の強度を精度よく予測する上で重要である。図3は伊勢湾台風の中心気圧の時間変化を観測とシミュレーションについて比較したものである。シミュレーションの初期値では、ベストトラックと25hPaの差があったが、6時間程度で観測値にほぼ同じになっている。放射過程のないシミュレーションでは、そのまま中心気圧が下がり続けて、9月25日23UTCに最低中心気圧に達している。一方で放射過程のあるシミュレーションでは、9月24日18UTCに観測値と同じ程度の中心気圧に達した後、ほぼ観測値と同じ程度の中心気圧で、9月25日06UTCまで大きな変化なく推移している。この期間中にベストトラックとの中心気圧の差は最大でも10hPa以下で、放射過程のないシミュレーションでは

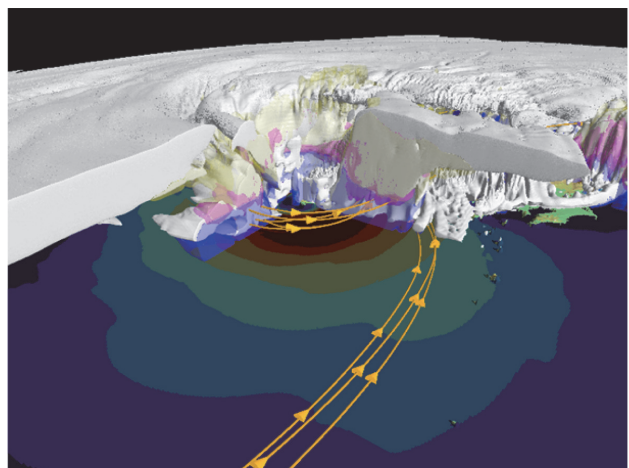


図2 雲解像モデル CReSS を用いた伊勢湾台風のシミュレーション結果を立体的に表示したもの。上陸時の雲（白）、あられ（ピンク）、雪（黄色）、雨（青）を立体的に表示した。地表の気圧をカラーレベルで表し、代表的流線を重ねてある。

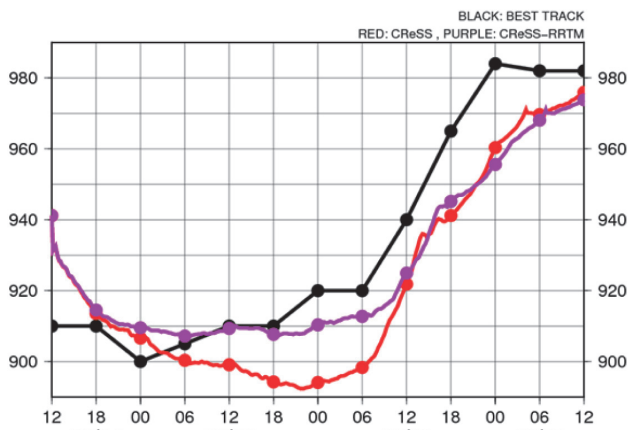


図3 伊勢湾台風の中心気圧の時間変化。黒実線は気象庁ベストトラック。赤実線は放射過程のないシミュレーション、紫実線は放射過程のあるシミュレーション。



最大で 25hPa の差であったのに対して、観測に近いものとなっている。上陸時刻は放射過程の有無にかかわらず、ほぼ観測に対応しており、その後、観測と同様に中心気圧が上昇している。ただ、中心気圧の上昇はシミュレーションのほうがやや遅れる傾向にあり、特に 9 月 26 日 18UTC 以降に 20hPa 以上に達している。全体として、放射過程を導入したシミュレーションは、ないものより進路や中心気圧について観測とよく合うものになった。

### (b) スーパー台風 HAIYAN (2013)

2010 年の台風第 13 号 MEGI(2010)をはじめとして、フィリピンは過去に何度かスーパー台風の上陸による被害を受けている。そのなかでも 2013 年 11 月に上陸し、レイテ島を中心とするフィリピンに甚大な被害をもたらした台風第 30 号 HAIYAN は、上陸時の中心気圧 895hPa に達し、それは 2005 年に米国に甚大な被害をもたらしたハリケーンカトリーナより 35hPa も低いものであった。その結果、7000 人を超える犠牲者と 800 億円を超える被害額となった。HAIYAN がもたらす 90m/s を超える瞬間最大風速は、風による大規模な被害をもたらし、伊勢湾台風と同様にこの強風で発生した高潮が甚大な被害をもたらした。このような低緯度の台風は、次の 2 点が重要である。一つは現在の気候で発生する最強の台風やサイクロンが低緯度で発生しているの、低緯度の台風は現在の気候における熱帯低気圧の到達最大強度と考えられることである。もう一つは地球温暖化が進むと今世紀後半には、日本付近の海面水温が、現在の低緯度の海面水温ぐらいに昇温するので、将来の日本付近に達する台風の強度を推定することに役立つという点である。

そこでスーパー台風 HAIYAN (2013) を再現することを試みた。HAIYAN のシミュレーションでは、次の 4 点が問題となっている。シミュレーションでは再現される台風の最低中心気圧が観測された台風のように低くならない。中心気圧の低下が観測に比べて遅れる。急発達が再現されない。すなわち発達速度が再現されない。そして進路がシミュレーションでは観測に比べて北に最大で 300km ほどずれるなどの点である。これらの問題を検討するために海洋を 1 次元熱拡散モデルで表現した雲解像モデル CReSS による実験と、非静力学大気海洋結合モデル CReSS - NHOES による実験を実施した。シミュレーションは水平解像度 5km の 11 月 4 日 12UTC を初期値とした計算の出力値に、水平解像度 2km のモデルをネストして、11 月 5 日 00UTC を初期値として計算を行った。

水平解像度 2km の実験では、海洋を 1 次元モデルで表現した実験では、海洋の格子数は同じで、格子間隔を 0.5、1.42、5m の 3 とおりに変えてシミュレーションを実施した。格子数が同じであるので、計算される海の深さ、すなわち海の貯熱量が変わる。図 4 にシミュレーションから得られた中心気圧の時間変化を示した。まず、ベストトラックの中心気圧と比較すると、明らかに気圧低下時刻が観測に比べて遅れている。計算では、6 日 00 ~ 12UTC 付近から急発達をはじめている。到達した最低中心気圧は、

海が深いほど、すなわち海の貯熱量が大きいほど低くなっており、855hPa から 908hPa までの大きなばらつきがある。このことはスーパー台風 HAIYAN の最大強度は、海洋の貯熱量に大きく依存していることを示している。このため台風の強度を精度よく再現するためには、海洋モデルが必要であることが分かる。図 4 の黒実線は非静力学大気海洋結合モデル CReSS - NHOES による結果であり、これによる最低中心気圧は 885hPa で観測の 895hPa に比べて 10hPa ほど低いが、海洋を結合しないモデルに比べて十分観測に近いものとなっている。発達時期の遅れは改善されていないが、急発達は再現されている。

非静力学大気海洋結合モデル CReSS - NHOES によるシミュレーションでは、フィリピンに上陸直前の時刻に最低中心気圧 885hPa に達している。図 5 は水平解像度 2km の実験の 11 月 8 日 06UTC の結果である。フィリピン上陸直前の時刻で、台風が最も発達していることが分かる。一方で、台風の進路は北に 200km ほどずれている。

この実験では急発達のタイミングが遅れることと、進

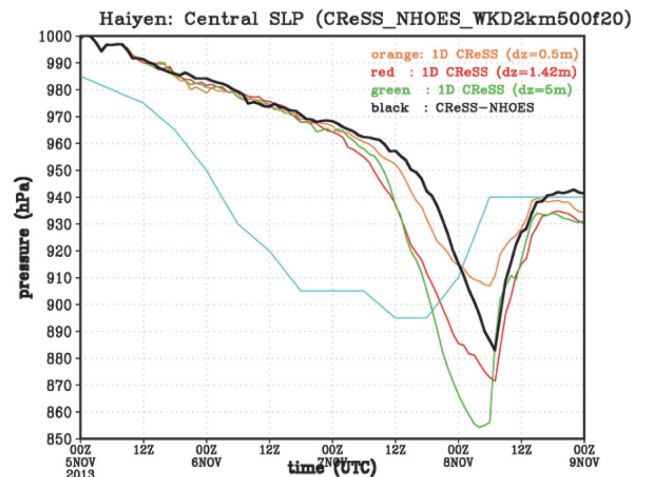


図 4 HAIYAN (2013) のシミュレーションから得られた中心気圧の時間変化を気象庁ベストトラック (水色) と比較したものである。オレンジ、赤、緑の線は雲解像モデルによるもので、鉛直 1 次元の海洋の格子幅が、0.5、1.42、5m にしたものの、太い黒実線が非静力学大気海洋結合モデル CReSS-NHOES で行った結果。

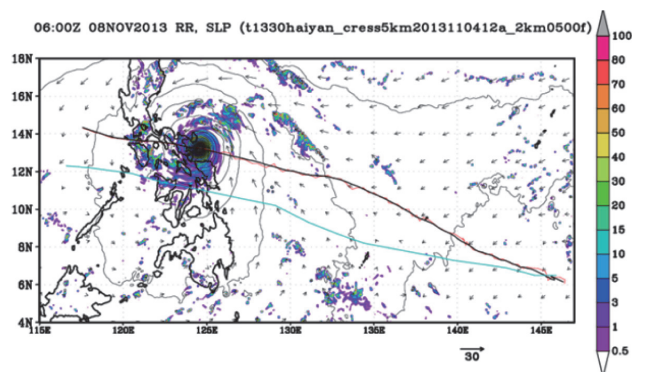


図 5 非静力学大気海洋結合モデル CReSS-NHOES を用いた台風 HAIYAN のシミュレーション結果。フィリピン上陸直前の時刻で中心気圧が 885hPa に達している。黒実線はシミュレーションの中心経路、水色は気象庁ベストトラック。

路がずれるという問題が残されたが、非静力学大気海洋結合モデルを用いることで、最低中心気圧や急発達が可能になるようになった。

### (c) サイクロン PAM

北太平洋に発生する台風と比べて、南太平洋のサイクロンは数が少なく、また強度も小さいものが多い。そのため台風と比べて研究が少ない。2015年3月、過去にほとんど例がないほどの強度のサイクロンが発生し、南太平洋の島国バヌアツに襲来し、甚大な被害をもたらされた。このサイクロン PAM はスーパー台風 HAIYAN と同様に 896hPa という強度に達した。このサイクロン PAM の特徴は、台風3号と赤道をはさんで対発生した点である。すなわちツインサイクロンの南半球のものが、非常に発達したということである。

このサイクロンの対発生とサイクロン PAM の発達を再現するために、雲解像モデル CReSS により、水平解像度 2km で東西 7000km、南北 5000km という非常に大規模な計算領域を用いてシミュレーション実験を行った。図6は計算領域と初期値の地上気圧と地上風の分布である。図から分かるように初期値に赤道をはさんで南北に渦と低気圧がみられる。これらは両者とも低緯度に発生した熱帯低気圧で、その間に顕著な西風がみられる。パターンとしては赤道ロスビー波のように見える。北半球に比べて南半球のほうが、海面水温が高いため、対発生しても南半球の熱帯低気圧のほうがより強くなる。

図7は初期値から4日目の3月14日00UTCの結果である。やや進路は東にずれているが、サイクロン PAM のほうは非常に発達し、シミュレーションでは中心気圧 891hPa、最大地上風速  $60\text{ms}^{-1}$  に達している。これはこの時刻の観測値である中心気圧 896hPa、最大地上風速  $69\text{ms}^{-1}$  に近いものである。観測とよく対応してサイクロンの眼がはっきりしており、非常に発達した状態でバヌ

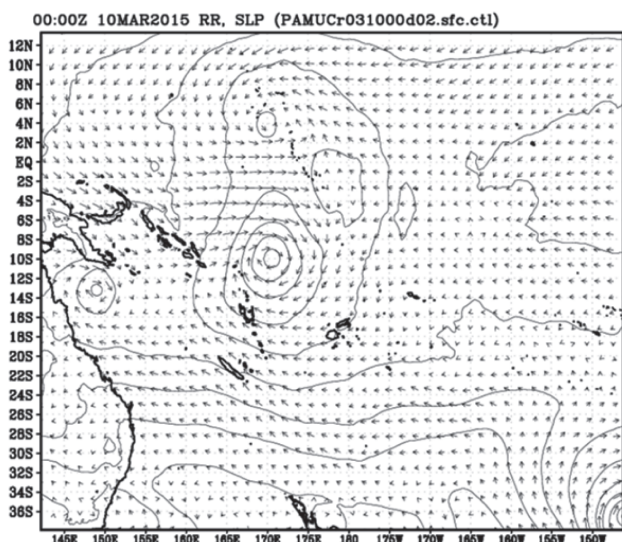


図6 サイクロン PAM と台風3号のシミュレーションのための初期値、2015年3月10日00UTC。地上気圧(等値線)と地上風(矢印)。

アツに接近していることが分かる。また気象衛星から分かるように眼の壁雲の活動が活発で、中心の東側にはアウトレーンバンドが、西側にはインナーレーンバンドが形成されているなどの点もよく対応している。今後、この結果を解析することで、過去にないほどの強度のサイクロンがどのように発達したのかを明らかにすることができる。

このような大規模なシミュレーションが可能となったのは、地球シミュレータの多数のノードを利用した計算が可能となったからである。今回、大気海洋結合モデルに放射を導入し、新しい地球シミュレータに最適化することができたので、これらの計算を実施することが可能となった。

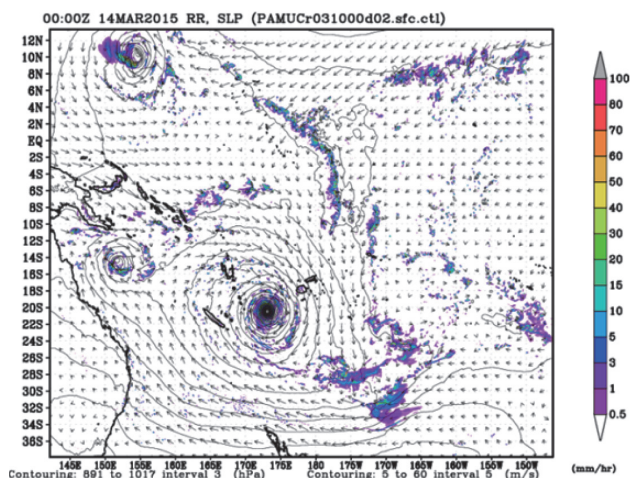


図7 雲解像モデル CReSS を用いたサイクロン PAM のシミュレーション。初期値から4日目の3月14日00UTCの地上気圧(等値線)、降水強度(カラーレベル)、及び地上風(矢印)の分布。

### 4. 想定される波及効果

本研究で実施した非静力学大気海洋結合モデルによる台風のシミュレーションは、台風の強度予測において、海洋の予測が重要であることを示している。今後の台風予測のモデルにおいて、その重要性が認識され、海洋モデルが結合される方向に進むと考えられる。また、海洋部分の計算の初期値・境界値として、海洋研究開発機構で作成されている JCOPE2 が用いられているが、大気海洋結合モデルの計算において、その利用が活発になることが期待される。

これまで台風の強度や降水量にほとんど影響のないと考えられてきた上層の巻雲について、放射過程を通して台風の強度に大きく影響することが示されたことから、その重要性が認識され、巻雲に関わるプロセスの開発が進められることが期待される。特に粒径や粒子のタイプなどのデータが必要となるので、その観測が実施され、観測の結果に基づく巻雲のモデル化が進む。その結果がさらに台風の強度予測の向上につながる。

南半球の熱帯低気圧であるサイクロンについては、台風ほど研究が進んでいない。サイクロン PAM は過去に例がないほど強いもので、さらに台風と対発生したという

特徴をもつ。これについての大規模シミュレーションの結果の解析は、非常に強いサイクロンの発達過程やその要因を明らかにすることが期待される。南太平洋には多くの島国があり、サイクロンPAMのようなこれまでにない強いサイクロンの強度予測は防災上重要で、このシミュレーションは、将来のサイクロン予測にも貢献することが期待される。



# Typhoon-Ocean Interaction Study Using the Coupled Atmosphere-Ocean Non-hydrostatic Model: With Careful Consideration of Upper Outflow Layer Clouds of Typhoon

Project Representative

Kazuhisa Tsuboki Hydrospheric Atmospheric Research Center, Nagoya University

Authors

Kazuhisa Tsuboki<sup>\*1</sup>, Mayumi K. Yoshioka<sup>\*1</sup>, Masaya Kato<sup>\*1</sup> and Hidenori Aiki<sup>\*2</sup>

\*1 Hydrospheric Atmospheric Research Center, Nagoya University

\*2 Application Laboratory, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

For accurate prediction of typhoon intensity, improvement of physical processes of a numerical model is indispensable as well as increase of resolution. In the present study, the typhoon-ocean interaction and upper-level cirrus clouds in the typhoon outflow layer are studied using an atmospheric and ocean models. We couple the non-hydrostatic atmospheric model, the Cloud Resolving Storm Simulator (CReSS) and the non-hydrostatic ocean model, the Non-hydrostatic Ocean model for the Earth Simulator (NHOES) to predict typhoon intensity. At first, CReSS-NHOES is optimized for the new Earth Simulator. In particular, optimizations of the radiation code and wave process were performed because they are heavy computation processes in the coupled model. After the optimizations, simulation experiments of selected intense typhoons are made; Typhoon Vera (1959) and Typhoon Haiyan (2013) because these typhoons are the most intense typhoons. Using CReSS, Typhoon Vera is successfully simulated. The radiation process associated with the cirrus clouds in the outflow layer has an impact on the typhoon intensity. The simulation with the radiation is better result of typhoon intensity. For the simulation experiment of the super-typhoon Haiyan, the coupled model CReSS-NHOES was compared with the CReSS model. The results indicate that the upper ocean heat content is an important factor to control typhoon intensity and that the coupled model gives better result about the maximum intensity of typhoon.

**Keywords:** the Coupled Atmosphere-Ocean Non-hydrostatic Model, typhoon intensity, outflow layer, typhoon-ocean interaction, Typhoon Haiyan

## 1. Introduction

Cloud-resolving simulation is important for an accurate prediction of typhoon intensity as well as detailed calculation of the environmental fields. It is also important for the typhoon intensity prediction to calculate a typhoon-ocean interaction and the air temperature fields of the upper troposphere and lower stratosphere. The interaction between typhoons and the ocean is complex. Thus, a high-resolution coupled atmosphere-ocean model is necessary for the prediction of the sea surface temperature (SST). On the other hand, the temperature of the upper layers is strongly controlled by the cirrus clouds in the typhoon outflow layer due to the radiation process as well as the environmental field. In the present study, we couple the non-hydrostatic atmospheric model, the Cloud Resolving Storm Simulator (CReSS) and the non-hydrostatic ocean model, the Non-hydrostatic Ocean model for the Earth Simulator (NHOES) to study effects of the typhoon-ocean interaction and the cirrus clouds in the typhoon outflow layer. These processes are not sufficiently considered in the typhoon prediction. To clarify their

impact for the typhoon intensity will contribute to improvement of the typhoon intensity prediction.

## 2. Methods

Since both CReSS and NHOES have been developed on the Earth Simulator, it is expected that the coupled model CReSS-NHOES will show a high performance on the new Earth Simulator. Typhoon simulations using the coupled model are large computation and the Earth Simulator is indispensable for the simulations. At the beginning of the preset research, CReSS-NHOES is optimized for the new Earth Simulator because its architecture is different from the previous generation of the Earth Simulator. In particular, optimizations of the radiation code and wave process were necessary because they are heavy computation processes in the coupled model.

After the optimizations, simulation experiments of selected intense typhoons are made; Typhoon Vera (1959), Typhoon Megi (2010), and Typhoon Haiyan (2013). In the lower latitude, the most intense typhoons are observed. Their intensity is the

strongest in the present climate. Their intensity is expected to be near that of the future typhoons in the higher latitude because SST in the mid-latitude will become the similar level of the lower latitude SST. Therefore, accurate prediction of intensity of lower latitude typhoons is important for estimation of intensity of future typhoon in mid-latitude.

### 3. Results

#### 3.1 Typhoon Vera (1959)

This typhoon is one of the most devastating typhoons in Japan. It struck the central part of Japan and fatalities were more than 5000 mostly owing to high storm surge in the Ise Bay. When the Typhoon Vera struck Japan, there were no satellite and radar observations. However, the Typhoon Vera is important as a worst scenario for future typhoon disaster. Research of Vera and projection of future Vera are important for a disaster prevention as well as typhoon research.

We performed a simulation experiment of the Typhoon Vera using CReSS with a horizontal resolution of 2 km. The simulation started two days before its landfall over the Kii Peninsula. The initial time was 12 UTC September 24, 1959. To examine the impact of the radiation process, two simulation experiments were performed with and without the radiation process.

Figure 1 shows a 3-dimensional display of clouds and precipitation of the simulated typhoon Vera. The structure of the typhoon eye is upright and highly symmetric. This indicates that the typhoon is still intense even just before it makes landfall. The upper level clouds extend widely from the typhoon eyewall, which reaches Okinawa region. They are the cirrus cloud in the typhoon outflow layer. These clouds will not increase rainfall amount while they have substantial impact on the typhoon intensity through the radiation process. Therefore, modeling representation of the cirrus clouds is important for the accurate prediction of typhoon. Figure 2 compares the time-series of central pressure of the Typhoon Vera. The radiation process

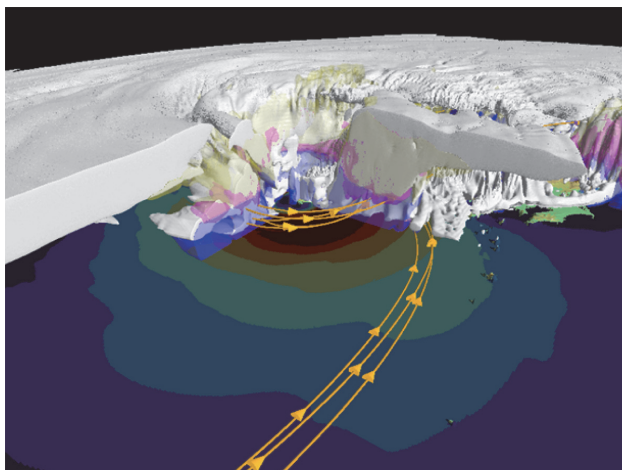


Fig. 1 Three-dimensional display of cloud and precipitation distribution of the simulated typhoon Vera (1959): cloud ice (white), groupel (pink), snow (yellow) and blue (rain). The lines are selected stream line.

causes about 15 hPa difference and the simulation with the radiation process shows that the central pressure is more close to the observation data.

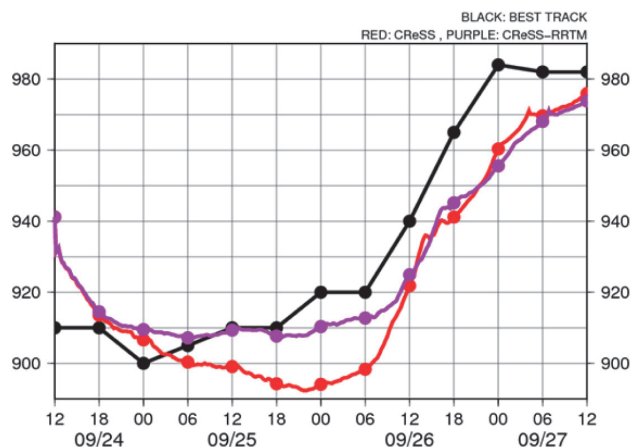


Fig. 2 Time-series of the central pressures obtained in the simulation experiments of Typhoon Vera. The red line is simulation without radiation process, the purple with radiation, and the black line is the JMA best track data.

#### 3.2 Super-typhoon Haiyan (2013)

The most intense tropical cyclones occur in the lower latitude of the western North Pacific Ocean. The Philippines have been affected by such intense typhoons. The super-typhoon Haiyan (2013) is one of the intense typhoons which cause huge disaster over the Philippines. The simulation experiments of the intense super-typhoon are important to estimate the maximum intensity of typhoon in the present climate as well as in the future climate.

There are four important problems in the simulation experiment of the super-typhoon Haiyan. (1) Minimum central pressure is not attained by simulations. (2) Lowering central pressure delays in the simulation than the observation. (3) The observed rapid intensification is not simulated. (4) The simulated track is shifted about 200–300 km to the north of the observed track. To examine these problems, we performed simulation experiments with different conditions and parameters.

Three experiments using CReSS with different depth of ocean and one experiment using CReSS-NHOES were performed. The depth of ocean of the CReSS model will change the upper ocean heat content. Figure 3 shows the time-series of central pressures obtained from the experiments and that of the JMA best-track data. The simulated typhoons showed the rapid intensification around 00–12 UTC of September 6 while its start time was delayed. The minimum central pressures of the CReSS experiments are dependent on the ocean depth. This indicates that the intensity of super-typhoon is strongly dependent on the ocean heat content and thus the coupling of an ocean model is necessary to remove the uncertainty in the expression of ocean. The minimum central pressure obtained by the CReSS-NHOES experiment is very close to that of the observed typhoon even though the timing was delayed. The problems about the shift

of track and the delay of the timing of intensification are still remained for the future study.

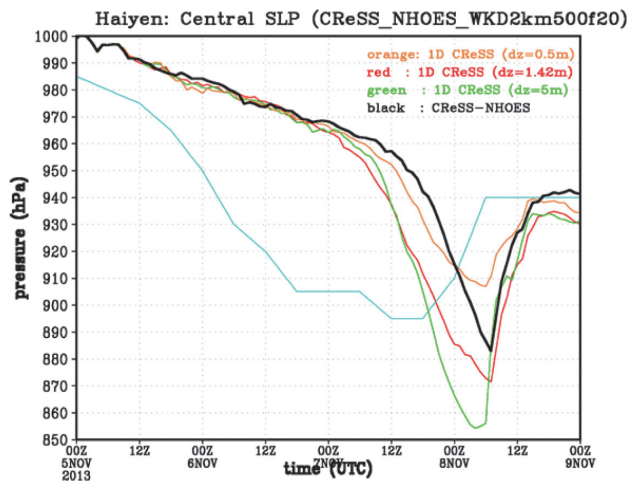


Fig. 3 Time-series of the central pressure obtained in the simulation experiments of the super-typhoon Haiyan (2013). The orange, red and green lines are those by CReSS while the black line is that by CReSS- NHOES. The blue line is the JMA best-track data.

### Acknowledgement

The Earth Simulator was used in this study as “Strategic Project with Special Support” of JAMSTEC. We would like to thank the strong support to use the new Earth Simulator by JAMSTEC and NEC people.