

豪雨・高潮・津波の重畳災害に関する研究

課題責任者

有川 太郎 中央大学理工学部都市環境学科

著者

有川 太郎*¹, 白井 知輝*², 吉田 芽生*², 石山 雅樹*², 郡司 滉大*²

*¹ 中央大学理工学部都市環境学科, *² 理工学研究科都市人間環境学専攻

複合災害発生時の被害リスク検討のためには、豪雨や洪水、高潮、津波を複合的に予測・解析することができるモデルの開発が必要だと考える。そこで、今年度は、1) 波源のばらつき、低気圧のばらつきによる計算を行う、2) 予測精度向上に向けてモデル改良するための知見を得る、3) 予測精度と避難開始時間の関係性についての知見を深めるということを目指して検討を行った。台風予測に用いられる気象モデル WRF は、計算条件設定の自由度が高い。本研究では、利用者によって設定の差が出やすく台風予測への影響が大きい WRF の計算領域設定、初期値・境界値、物理オプションに対する感度解析を行った。結果、1) 領域位置よりも水平解像度が台風予測にもたらす影響が大きいこと、2) 側方境界値よりも初期値に用いる解析値の選択の方が台風予測への影響が大きいこと、そして(3) 物理オプションの選定の違いによる高潮予測のばらつきと予測開始時間の関係を示した。また、本稿には、詳細に記載できていないが、植生の影響、バラツキによる避難への影響を検討した。

キーワード：台風，予測，津波，避難，浸水計算

1. はじめに

仙台防災枠組 2015-2030 は、2015 年 3 月 18 日に、日本の仙台で開催された第 3 回国連防災世界会議 (WCDRR) で、187 の国連 (UN) 加盟国によって採択され、国連総長によって承認された。各国は、効果的で全国的に互換性のある地域のマルチハザードに対する早期警報のさらなる開発と投資を求めた。このニーズに対応するため、仙台防災枠組のグローバルターゲット (g) が採用された。これは、「2030 年までに、マルチハザード早期警報システムと災害リスク情報および評価の可用性とアクセスを大幅に向上させる」というものである。

マルチハザードとしては、これまでに、台風・豪雨の予測精度向上や、津波による防護施設破壊のメカニズムについて、個別事象については、様々な研究が行われてきた。しかし、上記に上げたような自然災害の重畳現象については、ほとんど研究されていない。よって、このような複合災害発生時の被害リスク (災害ハザード×災害脆弱性) 検討のためには、豪雨や洪水、高潮、津波を複合的に予測・解析することができるモデルの開発が必要だと考える。

そこで、今年度は、・波源のばらつき、低気圧のばらつきによる計算を行う、・予測精度向上に向けてモデル改良するための知見を得る、・予測精度と避難開始時間の関係性についての知見を深める、ということを目指して検討を行った。

2. 波源のばらつき、低気圧のばらつきの影響¹⁾

2.1 WRF による予測計算の現状と課題

近年では、台風予測研究に多く用いられる気象モデル WRF (Weather Research and Forecasting) において、自由度が非常に高い入力データや計算条件設定を最適化・改

善することで、気象予測精度を向上させるための研究が多数行われてきた。白井ら²⁾は、台風毎に予測精度が最高になる WRF の物理オプション (対流や雲物理、放射など、サブグリッドスケールでの現象がモデル物理量の格子平均に与える変動量を見積もるスキーム) の組み合わせは異なるという点に着目し、機械学習を用いて、台風予測精度が高くなる WRF の物理オプションの組み合わせを選定する仕組みを構築した。

しかし、特に日本に上陸した台風については検討が少ないことと、計算条件によってはそもそも先行研究が少なく、台風予測への影響が不明瞭なものもあることが課題である。WRF を用いた台風予測精度向上のためには、WRF の計算条件設定の違いの台風予測への影響について、更なる知見の蓄積が必要である。本研究の目的は、複数の WRF の計算条件設定に着目して、その設定の違いによる台風予測への影響について、ケーススタディとして感度解析を行い、データと知見を蓄積することである。また、WRF の計算条件の違いによってばらついた台風予測結果が高潮予測に与える影響についても、既往研究のデータを整理し考察する。

2.2 計算条件

気象モデル WRF は、米国 NCEP と NCAR を中心として開発されたオープンソースの気象予測モデルであり、世界中に数万人のユーザーを有する。WRF は、3次元の完全圧縮非静力学 Euler 方程式系を基礎方程式とする。なお、WRF の格子サイズ以下のスケールで発生する物理現象によって生じる種々の物理量の格子平均からの変動は、物理オプションを用いて表現している。物理オプションについては、積雲対流 (CU) や雲微物理 (MP)、惑星境界層

(PBL)の選択が台風経路・強度予測に大きく影響することがわかっている。

感度解析を行う対象である台風イベントは、近年比較的に似た経路で日本に上陸し、上陸地点付近周辺を中心に大きな被害をもたらした、2019年19号(T1919)及び2017年21号(T1721)の2台風とする。計算結果については、気象庁ベストトラックデータをデジタル台風より取得し、台風経路(中心位置)及び台風の最低中心気圧、最大風速について精度の評価を行う。

高潮予測の外力としての台風予測精度の向上を目的とし、台風の経路と強度予測結果の影響が大きいが、日本に上陸した台風についてこれまでに検討が少ない条件である、計算領域の位置と解像度、Nesting手法の差異、データ同化(Nudging)、初期値・境界値を対象とする。感度解析のケースの詳細は表-1に示す。

WRFの計算条件は表-2に、計算領域を図-1に示す。なお、特段指定した場合を除き、初期値・境界値には、NCEP-FNL9(6時間ごと、0.25°解像度)を用いる。また、本研究で行う感度解析実験の結果に加えて、本研究で検討対象とする2台風を検討対象に含むShirai et al.³⁾による物理オプション感度解析データも用いて、複数のWRFの計算条件の差異によって生じる台風予測のばらつきを比較する。

2.3 領域・初期値境界値に対する感度解析結果

領域と初期値・境界値の感度解析結果を示す。結果の精

表-1 感度解析ケース名と詳細(WRF-ARW v. 3.8.1)

(1)領域 (Domain)			
5 km	コントロールラン		
Vortex	移動Nesting 5km(固定, D1)-1 km(移動, D2)		
5 km_2	"5 km"領域を10°西へ移動		
5 km_3	"5 km"領域を5°東, 10°南に移動		
12km	低解像度計算		
(2)初期値・境界値 (Initial and Boundary Conditions, IBCs)			
FNLinit	NCEP-FNLを初期値/+WRF 全球計算		
FNLBC	NCEP-FNLを初期値境界値(6時間毎)		
GSMinit	気象庁GSMを初期値+WRF 全球計算		
GSMBC	気象庁GSMを初期値境界値(6時間毎)		
S. Nudge	FNLBCに対して最初の12時間のみ 波数3のSpectral Nudging適用		
(3)物理オプション (Shirai et al. ³⁾ のデータ)			
Case	MP + PBL	Case	MP + PBL
1	Lin(=2)+YSU(=1)	5	WSM6(=6)+YSU
2	Lin+MYJ(=2)	6	WSM6 + MYJ
3	WSM5(=4)+YSU	7	Thompson(=8)+YSU
4	WSM5 + MYJ	8	Thompson + MYJ

度評価について、台風の経路誤差 Δd については式(1)、最大風速と最低気圧に関してはRMSE (Root Mean Square Error、式(2))を用いる。

$$\Delta d = \sqrt{(\Delta lat)_{km}^2 + (\Delta lon)_{km}^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (2)$$

表-2 WRF 基本設定 (鉛直層全領域 40層固定)

領域解像度 (セル数)	全球計算：(投影図法 緯度経度座標) 物理オプション感度解析, FNLinit, GSMinit: 1 deg. (360 × 180, 約111 km) - 0.2 deg. (200 × 200, 約22.2 km) - 0.04 deg. (780 × 780, 約4.4 km) 12 km: 1 deg. (360 × 180) - 0.33 deg. (120 × 120, 約37 km) - 0.11 deg. (280 × 280, 約12 km) 領域計算：(投影図法 メルカトル図法) FNLBC, GSMBC: 4km. (555 × 555) 5 km, 5 km_2, 5 km_3, S.Nudge: 5 km (583 × 665) Vortex: 5 km (583 × 665) - 1 km (605 × 630)
時間刻み	1deg. 領域: 300 s, 0.2 deg., 0.33 deg. 領域: 90 s, 0.11 deg. 領域: 60 s, 4, 5 km • 0.2 deg. 領域: 20 s
物理オプション	雲微物理(MP): WSM5 (=4) 境界層(PBL): Mellor - Yamada Janjic (=2) その他設定はShirai et al. ¹⁰⁾ と同様.

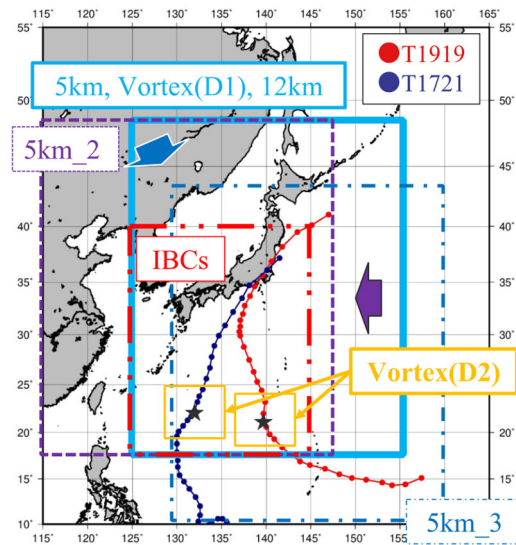


図-1 WRF 計算領域。星印は予測開始時台風位置。0.33 deg.領域と0.2 deg.領域で共通の第2領域位置はE 120°-160°, N15°-54°の範囲(図中省略)

ここで、 y_i : 観測値、 \hat{y}_i : 予測値、 i : 時刻 (h)、 N : 予測期間 (h)、 Δlat (deg.) : 台風中心位置の緯度に関する計算値と観測値の差、 Δlon (deg.) : Δlat と同じで台風中心位置の経度についての計算誤差、 $(\cdot)_{km}$ は0内の値を km 単位に変換していることを示す。

領域設定の感度解析の予測結果は図-2 に、初期値・境界値の感度解析結果は図-3 に示す。T1919 において、領域の位置を変えた場合、経路の予測精度に影響が出ていることがわかる。これは、台風の移動は第1近似的には周辺の大規模な風の流れに従うため、領域の位置が変わったことで一般流の予測結果が変化した結果であると考えられる。また、本検討においては、領域の位置を変えることによる台風強度への影響は小さかった。他方、水平解像度を 12 km 程度まで粗くすると、最大風速の予測値はケース 5 km に比べて、RMSE で約 23 % (T1919)、約 35 % (T1721) 過小評価傾向が増大した。また、移動 Nesting を用いて台風の目の周辺を高解像度計算すると、ケース 5 km に対して RMSE が 16 % (T1919)、33 % (T1721) 減少した。台風経路については、解像度の影響は比較的小さかった。

初期値・境界値に関する感度解析について、気象庁 GSM と NCEP-FNL の 2 種類の解析値を用いることで、経路、台風強度ともに予測結果に違いが見られた。台風経路については、GSM を初期値のみに使った GSMinit と、GSM を初期値・側方境界値の両方に用いた GSMBC では、同じような台風経路をとっており、これは FNL を用いた場合も同様である。なお、今回の検討では T1919 における経路誤差は、FNL を初期値(初期値・境界値)に用いた場合は 84 km (98 km)、GSM を用いた場合は 146 km (191 km) であり、FNL を用いることで経路予測精度が向上した。これは、T1721 でも同様の傾向であった。また、波数 3 の Spectral Nudging を初期時刻から 12 時間、計算領域全体にかけた場合、両台風の経路について、特に予測開始から 24 時間は改善傾向が見られた。特に、T1721 については予測開始から 24 時間以降も、時系列全体で経路予測が改善された。例えば、予測開始から 30 時間先(上陸時刻付近)では、初期値・境界値に対する感度解析の他のケースで Δd が 75 km を超えているのに対して、Spectral Nudging をかけたケースでは Δd が 38 km と、データ同化によって明確に経路予測が改善した。これは、計算領域に Nudging をかけたことで台風速度の過小評価が改善され、台風の進路方向の経路誤差が減少したためである。

2.4 WRF の領域設定及び初期値・境界値、物理オプションの感度解析結果に対する考察

本研究が対象とする T1919 と T1721 に対して Shirai et al.³⁾ が行った物理オプションに対する感度解析計算と、本研究の計算結果について考察・議論を行う。

まず、WRF の領域位置と解像度の設定が台風強度予測に与える影響については、図-2 に示した通り、領域位置よりも格子解像度による影響が大きい。台風の経路については、T1919 においては領域位置も影響する結果となった。

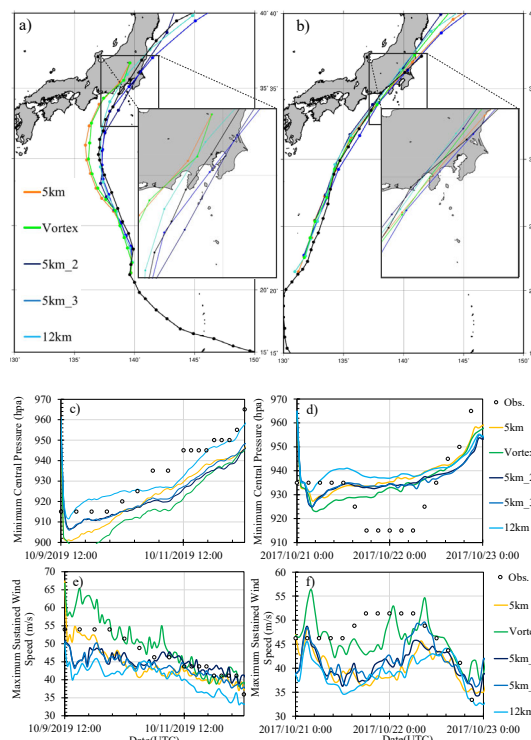


図-2 領域設定に関する感度解析結果. a), b) それぞれ T1919, T1721 の台風経路(計算値は6時間毎プロット)、黒線は気象庁ベストトラック. c), d) 最低中心気圧, e), f) 最大風速

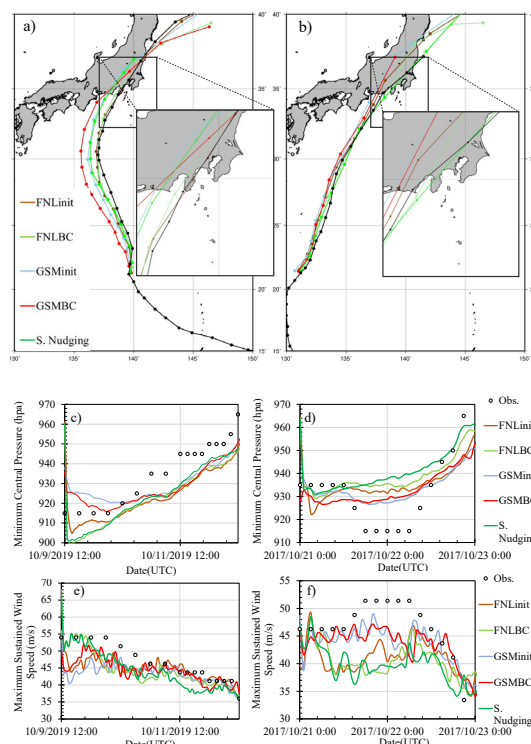


図-3 図-2 と同じ、初期値・境界値に対する感度解析結果.

一方、T1721 における領域位置の影響は、解像度の影響に比べて僅かであった。

初期値・境界値については、気象庁 GSM と NCEP-FNL の 2 種類の解析値を用いることで、台風の強度と経路両方の予測結果に明確な違いが見られた。また、T1919 と T1721 においては、WRF の側方境界値をこれらの解析値から直接与えるか、あるいはこれらの解析値を初期値とした WRF の全球計算結果から与えるかという違いよりも、どちらの解析値を初期値に用いるかのほうが、台風予測へ与える影響が大きい結果となった。これは WRF の初期値依存性が原因であると推察される。

物理オプション感度解析については、最適な物理オプションの組み合わせを一つに絞ることが難しかった。その理由の一つは、雲微物理や境界層、積雲スキームなど、各物理オプションが相互作用的に影響しているため、組み合わせ毎にモデルの挙動が異なる、ということである。

一方、ある特定の物理オプションの組み合わせが、必ずしも毎回最高精度の台風予測精度を与える訳ではない。従って、台風予測結果を避難支援等に用いる場合、台風予測には WRF の物理オプションの選定の違いによる不確実性が常に含まれていることを理解し、かつ、台風予測のばらつきに起因して生じる高潮予測のばらつき度合いを、定量的に把握しておくことが重要である。

3. 浸水ばらつきへの影響とその効果

ページ数の制限から、ここでは詳細の記載ができないが、植生の影響⁴⁾、バラツキによる避難への影響を検討した⁵⁾。それらは、植生の波浪軽減効果の検討を行い、数値計算手法の検討を行うとともに、浸水のバラツキが避難の成功率に及ぼす影響を検討し、予測誤差によっては 10% 弱の成功率の低下が見受けられることがわかった。

文献

- 1) 白井知輝・有川太郎, " 気象モデル WRF の計算条件設定の違いが台風・高潮予測にもたらす影響", 土木学会論文集 B2(海岸工学), 2022, 投稿中
- 2) 白井知輝, 渡部真史, 有川太郎, "リアルタイム高潮予測精度向上を目的とした機械学習による台風予測時の WRF 計算条件選定手法の開発", 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 77, No. 2, pp. I_139-I_144, 2021.
- 3) Shirai, T. et al., "Sensitivity Analysis of WRF Model's Physics Options for Forecasting of Typhoons over Japan and Its Impacts on Storm Surge Simulations", Coast. Eng. J. (査読中)
- 4) 吉田芽生・田所彩花・有川太郎, "Dupuit-Forchheimer 則を用いたマングローブの数値モデリング手法の検討" 土木学会論文集 B2(海岸工学), 2022, 投稿中
- 5) 石山雅樹・郡司滉大・有川太郎, "津波到達時間の精度による避難経路選択への影響の検討", 土木学会論文集 B2(海岸工学), 2022, 投稿中

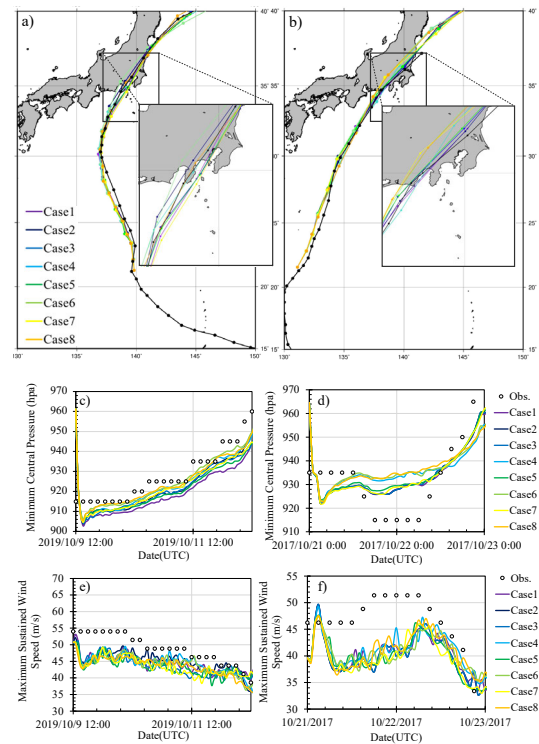


図-4 図-2 と同じ、物理オプションに対する感度解析結果. 比較のため、T1919 の図を Shirai et al.³⁾ から引用.

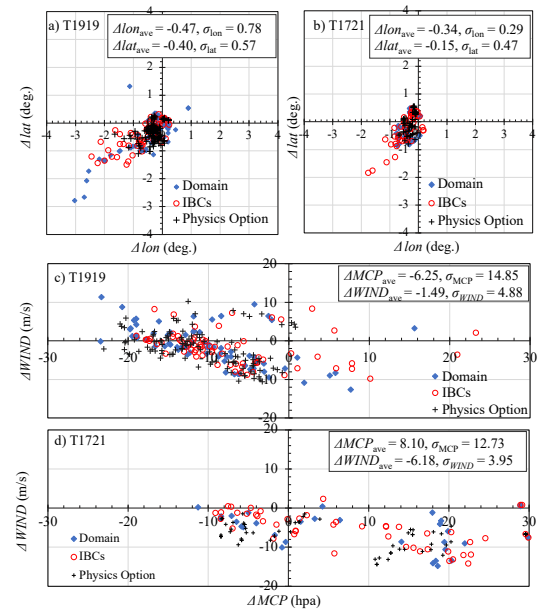


図-5 全ケース・6 時間毎の a), b) : 台風中心位置誤差, c), d) : 台風の最低中心気圧誤差 (Δ MCP) と最大風速誤差 (Δ WIND). いずれも (計算値) - (観測値) で算出. Domain, IBCs, Physics Option は表-1 の (1) - (3) の各検討に対応. "ave" は平均, σ は標準偏差.

Research on Compound Disasters of Heavy Rainfall, Storm Surge, and Tsunami

Project Representative

Taro Arikawa Faculty of Science and Engineering, Chuo University

Authors

Taro Arikawa*¹, Tomoki Shirai*², Mei Yoshida*², Masaki Ishiyama*²

*¹Faculty of Science and Engineering, Chuo University, *²Graduate School of Science and Engineering, Chuo University,

This study was conducted with the following goals: 1) to carry out calculations based on variations in wave sources and cyclones, 2) to obtain knowledge to improve the model for better forecasting accuracy, and 3) to improve knowledge on the relationship between forecasting accuracy and the time to start evacuation. In this study, the sensitivity analysis of WRF to the calculation domain setting, initial and boundary values, and physical options was conducted, as these settings tend to differ among users and have a large impact on typhoon forecasting. The results showed that (1) horizontal resolution has a greater impact on typhoon forecasting than area location, (2) the choice of analysis values used for initial values has a greater impact on typhoon forecasting than lateral boundary values, and (3) the relationship between the variation in storm surge forecasting and forecast start time due to different choices of physical options.

Keywords : Tropical Cyclone, Forecast, Tsunami, Evacuation, Inundation simulation

1. Introduction

The Sendai Framework for DRR 2015-2030 was adopted by 187 United Nations (UN) Member States and endorsed by the UN Secretary-General at the Third United Nations World Conference on Disaster Risk Reduction (WCDRR) in Sendai, Japan, on March 18, 2015. Countries called for further development and investment in effective and nationally compatible regional multi-hazard early warning. The Global Target (g) of the Sendai Framework for Disaster Reduction was adopted to address this need. This is to "significantly improve the availability of and access to multi-hazard early warning systems and disaster risk information and assessment by 2030.

As for multi-hazards, various studies have been conducted on individual events, such as improving the prediction accuracy of typhoons and torrential rains, and on the mechanism of destruction of protective facilities by tsunamis. However, few studies have been conducted on the superimposed phenomena of natural disasters such as those mentioned above. Therefore, we believe that it is necessary to develop a model that can predict and analyze heavy rainfall, floods, storm surges, and tsunamis in a composite manner in order to study the damage risk in the event of such a compound disaster.

Therefore, this study was conducted with the following goals:

1. To perform calculations based on variations in wave sources and cyclones.
2. To obtain knowledge to improve the model for better prediction accuracy.
3. To deepen the knowledge of the relationship between prediction accuracy and the start time of evacuation.

2. Effects of WRF calculation conditions¹⁾

In recent years, several studies have been conducted to

improve the accuracy of weather forecasting in the Weather Research and Forecasting (WRF) model, which is often used in typhoon forecasting research, by optimizing and improving the input data and computational condition settings, which have a very high degree of freedom. Shirai et al. focused on the fact that the combination of WRF physics options (a scheme to estimate the amount of variability that subgrid-scale phenomena such as convection, cloud physics, and radiation have on the grid mean of model physics) that results in the highest forecast accuracy for each typhoon is different, and used machine learning to develop a mechanism was established to select combinations of WRF physics options that would result in high typhoon forecasting accuracy using machine learning.

In order to improve the accuracy of typhoon forecasting using WRF, it is necessary to accumulate more knowledge on the impact of different WRF calculation conditions on typhoon forecasting. This research aims to collect data and knowledge by conducting sensitivity analysis as a case study on the effects of various settings of WRF on typhoon forecasting, focusing on multiple settings of WRF calculation conditions. We will also organize and discuss the data from previous research on the impact of the disparate typhoon forecast results due to the different WRF calculation conditions on storm surge forecasting.

3. Discussion on sensitivity analysis results for WRF region setting and initial and boundary values and physical options.

In this study, the effect of changing the location of the area on typhoon intensity was small. On the other hand, when the horizontal resolution was coarsened to about 12 km, the underestimation tendency of the predicted maximum wind speed increased by about 23% (T1919) and 35% (T1721) in the RMSE

compared to the 5 km case.

For the sensitivity analysis on initial and boundary values, differences were found in the forecast results for both paths and typhoon intensity by using two types of analysis values, JMA-GSM and NCEP-FNL. In this study, the path error at T1919 was 84 km (98 km) when FNL was used as the initial value (initial and boundary values) and 146 km (191 km) when GSM was used, indicating that using FNL improved the accuracy of path prediction.

As shown in Figure 2, the WRF calculation conditions, such as computational domain, grid resolution, initial and boundary values, and physical option settings, result in approximately the same degree of variation in the prediction of typhoon location and intensity. The following discussion of this research and the results of Shirai et al.'s sensitivity analysis of the physical options (Figure-1) will provide insight into the actual forecast errors and uncertainties that can occur in actual typhoon and storm surge forecasting.

Regarding the influence of WRF region location and resolution settings on the typhoon intensity forecast, the influence of grid resolution is more significant than region location. As for the typhoon path, the results show that the region position also has an effect at T1919. On the other hand, the influence of area position in T1721 was slight compared to the influence of resolution.

For the initial and boundary values, there was a clear difference in the forecast results for both typhoon intensity and path between the JMA GSM and NCEP-FNL analyses. For T1919 and T1721, the impact on typhoon forecasting was greater for which analytical value was used as the initial value than for whether the WRF lateral boundary values were given directly from these analytical values or from the global WRF calculation results with these analytical values as initial values. This is due to the dependence on the initial values of the WRF. This is presumably due to the dependence of the WRF on the initial values.

For the physical option sensitivity analysis, it was difficult to narrow down to one optimal combination of physical options. One of the reasons for this is that each of the physical options, such as cloud microphysics, boundary layer, and cumulus scheme, interact with each other, resulting in different model behavior for each combination.

References

- 1) T. Shirai and T. Arikawa, "Impacts of WRF Configuration in Typhoon Forecasts as An External Force of Storm Surge Simulations", Journal of JSCE, Ser. B2 (Coastal Engineering) (under review)
- 2) Shirai, T. et al., "Sensitivity Analysis of WRF Model' s Physics Options for Forecasting of Typhoons over Japan and Its Impacts on Storm Surge Simulations" , Coast. Eng. J. (under review)

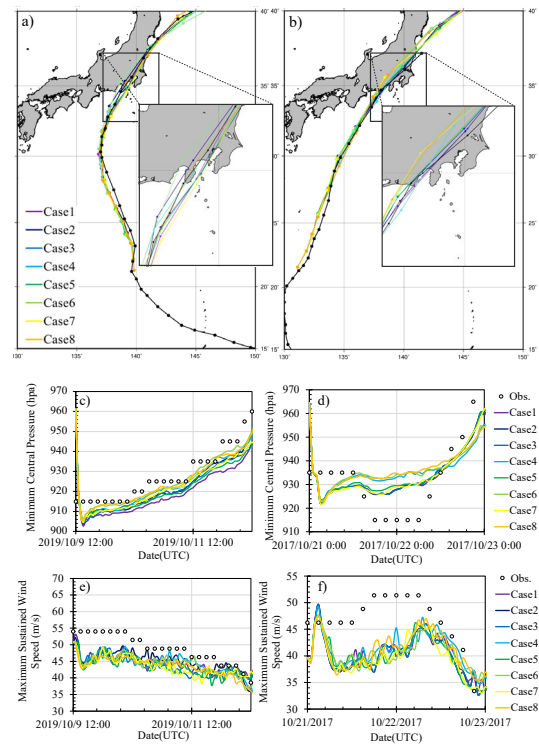


Figure-1 Sensitivity analysis results for the physical option. For comparison, the figure for T1919 is taken from Shirai et al.²⁾

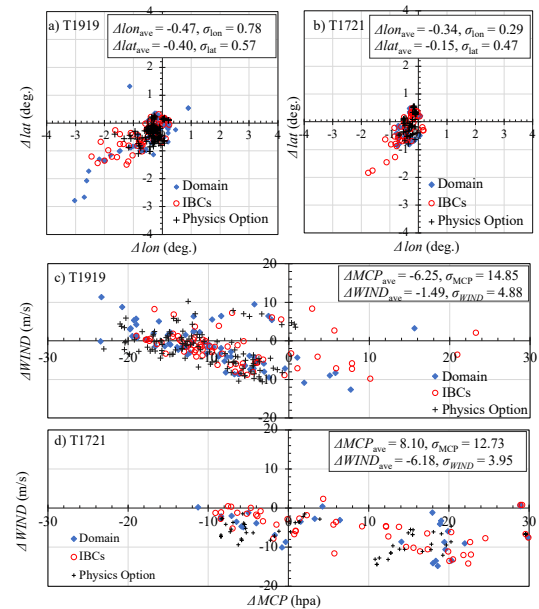


Figure-2 a), b): Typhoon center position error, c), d): Typhoon minimum central pressure error (ΔMCP) and maximum wind speed error (ΔWIND) for all cases and every 6 hours. Domain, IBCs, and Physics Option correspond to the calculation conditions. "ave" is the mean and σ is the standard deviation.