

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^{*1}、渡部 真史^{*1}

^{*1} 中央大学理工学部都市環境学科

近年多発している自然災害及び、今後発生する可能性のある複合的な自然災害のリスク検討に向けて、豪雨・高潮・津波の重畳災害を予測・解析することができるモデルの開発を行う。また、複合的な被害リスクやそれらを考慮した防護施設の設計、避難の在り方について、避難支援方法を確認することが本研究の目標となる。今年度は、高潮・波浪・津波・豪雨の計算精度ならびに計算時間のバランスを検証することを目的とした。まず、台風予測精度が最も高くなる物理オプション等計算条件の設定は台風毎に異なるため、一意的に計算条件の設定を行うことを最終目標に見据えたうえで、そのための基礎となる事例蓄積を目的として、特定の台風を対象に予測計算を行った。また、複数の津波シミュレーションを行い蓄積された津波データベースから、発生した震源情報をもとにシナリオを抽出し、抽出されたシナリオの避難経路上の津波到達時間を考慮した、津波遭遇を回避する避難経路探索手法を構築し、千葉県勝浦市を対象とし、本手法の有効性について検討を行った。今後は、シナリオベースの重畳パターンをシミュレーションし、その際における最適避難行動の検討を行う予定である。

キーワード：高潮、津波、予測計算、避難、データベース

1. 本研究の概要

本研究では、近年多発している自然災害及び、今後発生する可能性のある複合的な自然災害のリスク検討に向けて、豪雨・高潮・津波の重畳災害を予測・解析することができるモデルの開発を行う。また、複合的な被害リスクやそれらを考慮した防護施設の設計、避難の在り方についての検討も行う。まずは、それぞれの現象の計算精度と計算時間の差異を検討することを目的とした。

2. 高潮・波浪予測計算の計算時間及び予測精度

2.1 背景と目的

将来的に、地球温暖化に起因して台風の平均強度が大きくなる可能性がある¹⁾。その場合には、沿岸域において高潮・波浪の被害が増大することが懸念される。これらの被害を低減するためには、高潮・波浪の予測を、高精度かつ早い段階で行うことが重要である。高潮・波浪予測の手法としては、数値計算による手法に加え、機械学習を用いることで、計算時間を大幅に削減できる手法に関する研究も存在する²⁾。一方で、機械学習による手法は、一定の精度が得られているものの、現状では、予測誤差が生じた際にその原因の力学的説明ができない部分も多く、力学の方程式に基づいた数値計算による予測精度を上げることは重要である。近年の数値計算による台風予測では、気象予測モデル WRF が用いられるケースが多い。WRF はオープンソースモデルで、現在世界中で多くの利用者があり、気象場予測精度向上に向けた研究も盛んに行われている。

最近では、計算機性能の向上やモデル改善によって、WRF を用いた熱帯低気圧の予測³⁾や、台風予測結果を外力とした高潮・波浪の予測事例⁴⁾⁵⁾が出てきており、今後も増えていくものと思われる。しかしながら、WRF による台

風予測を外力とした高潮・波浪の予測を行う際に、精度と計算時間・計算負荷の兼ね合いから、いつ台風予測を開始すべきであるかについては、現時点では検討事例が少なく、一般的な整理が行われていない。また、既往論文⁶⁾で指摘されているように、台風予測精度が最も高くなる物理オプション等計算条件の設定は台風毎に異なるため、一意的に計算条件の設定を行うことは難しい。従って今後、予測計算において選択すべき計算条件を、精度・計算時間・計算負荷の視点から一般化することが望ましい。

本検討は、この計算条件の一般化を最終目標に見据えたうえで、そのための基礎となる事例蓄積を目的として、特定の台風を対象に予測計算を行ったものである。なお、過去の予測計算では、そのほとんどが NCEP (米国環境予測センター) GFS や気象庁 GSM 等、外部の予測結果を側方境界値として用いている。気象庁予報誤差経年推移⁷⁾によれば、ここ 20 年での台風経路予測の改善に比べて強度予測精度は遅れをとっており、これらの台風予測の不確実性には未だ課題が残る。このような外部気象予測の不確実性には、WRF の初期値境界値として用いる際、その予測精度にも影響を及ぼすため、本検討では、親領域において側方境界値を用いない全球計算により、2019 年台風 19 号に対して予測計算を行った。

2.2 計算条件

a) 台風予測

計算領域は図-1 に示す通りである。Domain1 (図-1) で全球計算を行い、その後 2 段階 Nesting により、日本周辺に対して予測計算を行った。

本検討では予測開始時間を台風上陸約 4.5 日前の 2019 年 10 月 8 日 0 時 (UTC) を Case1 とした上で、12 時間経過するごとに予測を開始し、予測を開始した順に Case2-8 としている。最も予測開始の遅い Case8 で、2019 年 10 月 11 日 12 時 (UTC) 予測開始となっている。また、計算はすべてのケースで台風上陸後となる 2019 年 10 月 14 日 12 時 (UTC) まで行っている。

b) 高潮推算

高潮推算には、富田ら (2005)⁸⁾により開発された高潮津波シミュレータ STOC-ML を用いた。STOC-ML は、鉛直方向に静水圧近似を行うことで高潮推算を低負荷で行う。高潮予測は、潮位偏差を代表として予測精度を検討することとし、東京港における観測値と比較を行い評価する。

c) 波浪推算

波浪推算には、Delft 工科大学によって開発された、第 3 世代波浪推算モデル SWAN ver. 41.10⁹⁾を用いた。波浪の予測結果は、有義波高予測値を第二海堡における NOWPHAS 観測データの速報値と比較し、精度の検証を行う。なお、計算時間は高潮・波浪ともに WRF の計算と同様であり、地形データには、GEBCO から提供される 30 秒角解像度のデータを用いた。

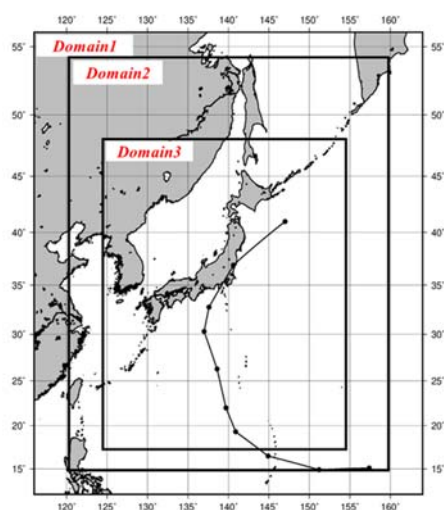


図-1 WRF の計算領域 (黒線: 気象庁ベストトラック, Domain1 は全球)

2.2 予測結果と計算時間の評価

a) 最短上陸時間について

実際の予測計算においては、時間的制約を定量的に評価するために、台風発生から何日で上陸するかということの評価が必要がある。そこで、ここでは便宜上「最短上陸時間」を定義した。これは、台風の発生位置と日本の海岸線間の最短距離を、過去の台風平均速度で除したものであり、台風が最短で何日後に上陸するかを予測開始時点で大まかに算出するものである。図-2 に示すように、最短上陸時間は 1951 年から 2019 年に日本に上陸した、206 個のうち 193 個の台風で、台風の発生から上陸まで

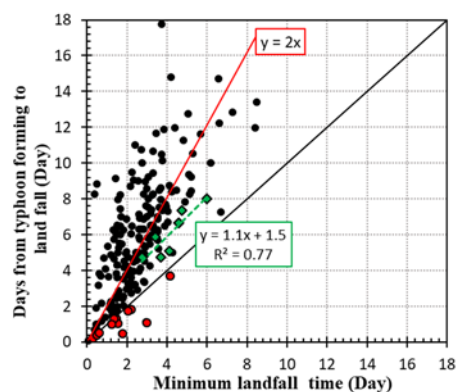


図-2 1951 年以降に本州、四国、九州に上陸した台風における、最短上陸時間(横軸)と実際の上陸時間(縦軸)の関係 (赤点: 最短上陸時間が実際の上陸時間よりも過大評価となったケース, 緑点: 過去に命名された台風. 図中には回帰直線(点線)の式と、直線の決定係数を示している)

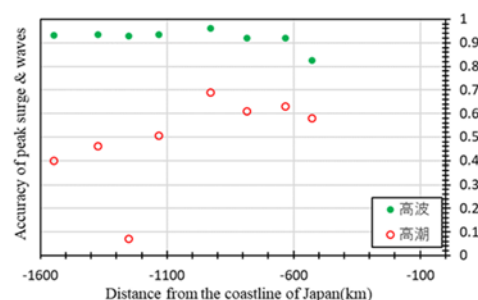


図-3 予測開始時の台風の日本の海岸線からの距離とピーク値予測精度の関係 (本検討における横軸の原点は、全ケースで台風位置と日本の海岸線間の距離がほぼ最短になる千葉県布良付近とした.)

の時間を、合理的な範囲で短めに評価できる。なお、過去に命名されたカテゴリ-4 又は 5 の強い台風(図-2 緑点)では台風の平均速度と発生位置のばらつきが小さいため、それらの最短上陸時間も、実際の上陸から 1.5 日短い程度で安定して評価できた。

b) 計算時間と精度の兼ね合いについて

ここでは、最短上陸時間を実際の台風のの上陸までの真の時間であると仮定したうえで、計算時間を評価した。台風 19 号の場合は、実際に上陸するまでの時間約 6.5 日に対して、最短上陸時間は 4.6 日であった。

図-3 に予測開始時の台風位置と高潮・高波ピーク値の予測精度の関係を示す。ピーク値の予測精度に関しては、観測値と予測値の誤差が小さいときに 1 に近づくように算出している。高潮と波浪のピーク値に関しては、台風 19 号が日本の海岸線から直線で約 900~1000 km の位置に到達した時点で開始した予測から、経路の予測精度が上がったことで、高潮・波浪予測精度も向上した。

3. データベースを用いた避難支援システムの検討

3.1 計算手法

予測対象地域（千葉県九十九里・外房地域）に影響を及ぼす津波を生じうる波源断層モデルを網羅的に設定して津波シミュレーションを行い、沖合観測点における沖合津波波形、沿岸での津波高と到達時間、陸域での浸水深分布と到達時間などを一連の津波シナリオとして登録することで構築された津波シナリオバンク¹⁰⁾を用いて、予測される津波到達時間算出を行う。

地震発生後に得られる震源情報（地震規模・震源位置）を基に津波シナリオバンクから断層モデルを複数抽出する。抽出された断層モデルを用いた津波シナリオのうち、対象地域への津波到達が最も早いシナリオを抽出する。抽出されたシナリオの避難経路上の予想津波到達時間を考慮し、津波に遭遇しない避難経路を推定する。地震発生から避難経路算出までの流れを図-4に示す。

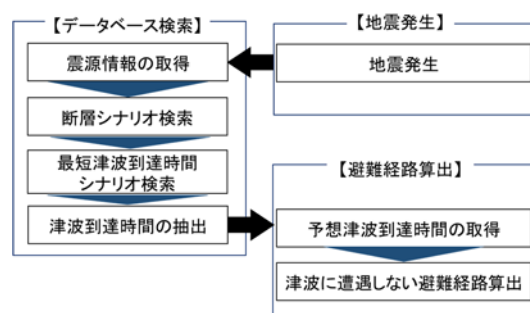


図-4 地震発生から避難経路算出までの流れ

3.2 計算条件

有川・大家¹¹⁾の避難シミュレータは、ポテンシャルモデルを使用し、避難者は地形や障害物を考慮した避難所までの最短距離経路を選択する。死亡判定に用いる浸水深は、STOC-MLにより計算される値を読み込むことにより設定する。実際に発生させた津波波源として、1677年延宝房総沖地震の竹内ら¹²⁾のモデルを用いて、死亡判定に用いる津波浸水計算を行った。

初期水位は千葉県の朔望平均満潮位 T.P+0.70 m とし、格子間隔は2430 m から10 m までの5段階のネスティングを行った。本研究の津波浸水計算では、有川ら¹³⁾の開発した、津波規模と防護施設の被災度の関係を示すフラジリティカーブを用いたモデルを用いて防護施設の被災を考慮した被害推定を行った。図-5に示す経路上に勝浦市の人口分布をもとに4293人配置した。避難開始時間ごとの死亡率の算出を行うことで本手法の有効性の検討を行った。今回の検討では、最寄りの避難所に最短経路で避難した場合と津波遭遇回避経路で避難した場合の死亡率を比較し、本手法の有効性について検討を行う。

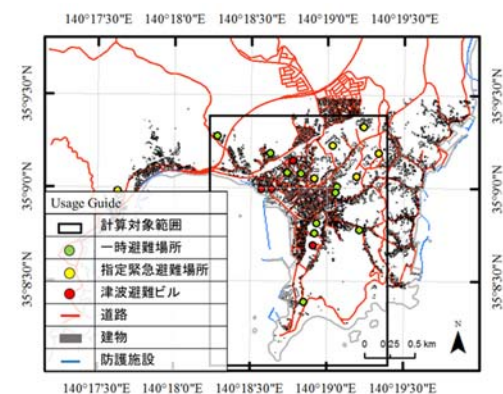


図-5 避難経路及び避難所位置

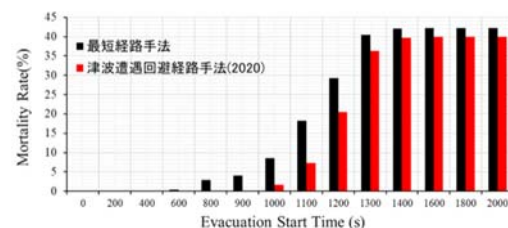


図-6 避難開始時間ごとの死亡率

3.3 結果

a) 避難経路探索手法毎の死亡率の比較

最寄りの避難所に避難した場合と本研究で提案する津波に遭遇しない経路で避難した場合について、各避難開始時間における死亡率を図-6に示す。本研究で対象とした波源の対象地域の沿岸部への津波到達時間は、地震発生後991秒であった。津波到達時間と比べ避難開始時間が早い場合は、浸水回避経路と最寄り避難所への最短避難経路が一致するため、死亡率の差は小さく、全体の死亡率は低いことがわかる。一方で、避難開始時間が遅くなり、津波到達時間前後に避難を開始した場合は、浸水回避経路を選択することで死亡率が下がっており、最大10.9%の死亡率の低減が見られ、津波に遭遇しない経路提示の有効性が示された。

避難経路算出に要する時間は、地震発生後速報値取得



図-7 経路探索手法毎の避難経路及び予想津波遭遇位置

までに2~3分、データベース検索に1分、避難経路算出に2分を要する。あらかじめ対象地域のポテンシャル計算を行うことで地震発生後6分ほどで避難経路算出までを可能とし、避難者の被災が予想される避難開始時間よ

り前に避難経路提示を可能とした。

b) 避難者の避難経路比較

図-7 はある避難者の避難経路の違い及び予想される津波遭遇位置を示す。青線は最寄りの避難場所に最短で避難する際の避難経路であり、赤線は地震発生後 1000 秒で避難開始した際の津波遭遇を回避した経路である。最短経路(青線)で避難した際の非難に要する時間は 375 秒、津波遭遇を回避した避難経路(赤線)で避難した際に避難に要する時間は 439 秒である。図-7 に示す通り、避難開始時間が 1000 秒で最短経路を選択した場合、避難開始後 6 分ほどで津波に遭遇し、死亡と判定されてしまう。一方で津波遭遇回避経路を選択することで、津波に遭遇することなく避難成功となる。

4. 豪雨、高潮、津波の重畳に向けて

4.1 雨量予測について

豪雨についても WRF を用いた予測計算ならびに再現計算を行い、浸水計算を実施した。雨量は WRF を用いて計算し、その予測精度についても検討した。結果は、雨量パターンや最大雨量については概ね一致している場所が多いものの、時間については、計算結果のほうが早くなるケースが多かった。

4.2 避難支援の観点から鑑みた今後の検討方針

台風や低気圧に起因した高潮および豪雨に対する計算時間や計算精度について、既往研究ならびに本研究の結果から、それらのばらつきが概ね明らかになった。

台風の場合、1 日もしくは 2 日前からのリアルタイム予測により、その精度が確保できると考えられるため、避難の支援については、2 日前程度からの計算に基づき、そのばらつきを考慮した避難シミュレーションを実施し、より確実な避難場所、経路を示すことが可能となると考えられる。ただし、その台風の経路についても、WRF におけるパラメタに依存していることから、既往の台風パターンを数多く実施し、その感度分析に基づき、確からしいパラメタを抽出する仕組みを作ることが重要となる。

一方、津波の場合、地震が生じてから 10 分から 30 分程度で来襲することが多いため、予測計算を都度行うには、特に観測点が少ない場合など、十分な精度が確保できない可能性が高いため、あらかじめ数多くの地震波源を用いた津波浸水計算データベースに基づき、避難支援をすることが望ましいと考えられる。

今後は、シナリオベースの重畳パターンをシミュレーションし、その際における最適避難行動の検討を行う予定である。

文献

- 1) 吉野純, 荒川悟, 豊田将也, 小林智尚: 高解像度台風モデルによる台風強度に対する温暖化影響のシナリオ間相互比較, 土木学会論文集 B2(海岸工学), vol171, No2, I-1519-I1524, 2015.
- 2) 加瀬紘熙, 筆保弘徳, 北本朝展, Danlan Chen,

吉田龍二, 竹見哲也: 深層学習を用いた台風強度推定に対する台風の特徴の影響, 日本気象学会「天気」, Volume 66, pp51-58, 2018.

3) D., Lakshmi Douluri and K. Annapurnaiah, : Impact of Microphysics Schemes in the Simulation of Cyclone Hudhud using WRF-ARW model, International Journal of Oceans and Oceanography ISSN 0973-2667, Volume 10, pp. 49-59, 2016.

4) 森 信人, 澁谷 容子, 竹見 哲也, 金 洙列, 安田 誠宏, 丹羽竜也, 辻尾大樹, 間 瀬 肇: 2013 年台風 30 号による高潮の予測可能性と再解析精度, 土木学会論文集 B2(海岸工学), vol170, No2, I-246-I250, 2014.

5) 森 信人, 竹見 哲也, 金 洙列, 澁谷 容子, 安田 誠宏, 中条 壮太, 二宮 順一, 志村 智也: 高解像度大気モデルと高潮・波浪結合モデルを用いた 2018 年台風 21 号による高潮波浪の予測実験, 土木学会論文集 B2(海岸工学), vol175, No2, I-283-I288, 2019.

6) F., Zhang and M., Li, Andrew C., Ross, S. B. Lee, D., Zhang: Sensitivity Analysis of Hurricane Arthur (2014) Storm Surge Forecasts to WRF Physics Parameterizations and Model Configurations, Weather and Forecasting, Volume 32, No. 5, pp. 1745-1764, 2017.

7) 気象庁: 台風予報の精度検証結果, https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typ_kensho/typ_hyoka_top.html, 参照 2020-04-03.

8) 富田孝史, 柿沼太郎: 海水流動の 3 次元性を考慮した高潮・津波の数値シミュレータ STOC の開発と津波解析への適用, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 44, No. 2, June 2005.

9) R. C. Ris, L. H. Holthuijsen, and N. Booij: A third-generation wave model for coastal regions 2. Verification, Journal of Geophysical Research, Volume. 104, no. C4, pp 7667-7681, 1999.

10) 近貞直孝, 鈴木亘, 三好崇之, 青井真, 根本信, 大嶋健嗣, 松山尚典, 高山淳平, 井上拓也, 村田泰洋, 佐竹次郎, 阿部雄太, 是永真理子, 橋本紀彦, 赤木 翔: 津波浸水の即時予測を目的とした津波シナリオバンクの構築, 防災科学技術研究所研究資料 第 430 号, 2019 年 3 月.

11) 有川太郎, 大家隆行: 数値波動水槽と連成した避難シミュレーションによる避難行動特性についての検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 71, No. 2, pp. I_319-I_324, 2015.

12) 竹内仁, 藤良太郎, 三村信男, 今村文彦, 佐竹健治, 都司嘉宣, 宝地兼次, 松浦健郎: 延宝房総沖地震津波の千葉県沿岸～福島県沿岸での痕跡高調査, 歴史地震, 第 22 号, pp. 53-59, 2007.

13) 有川太郎, 関克己, 下迫健一郎, 高川智博, 千田優: フラジリティカーブによる防護施設の被災状況を考慮した津波浸水計算手法の開発, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 73, No. 2, pp. I_337-I_342, 2017.

Superimposed Disasters of Heavy Rainfall, Storm Surge and Tsunami

Project Representative

Taro Arikawa Civil and Environment Department, Faculty of Science and Engineering,
Chuo University

Authors

Taro Arikawa *¹, Tomoki Shirai *¹, Masashi Watanabe *¹

*¹Civil and Environment Department, Faculty of Science and Engineering, Chuo University

A model will be developed that can predict and analyze superimposed disasters, such as heavy rainfall, storm surge, and tsunami, in order to investigate the risks of natural disasters that have been occurring frequently in recent years and complex disasters that may occur in the future. The goal of this research is to establish evacuation support methods for the design of protective facilities and evacuation methods that take into account complex damage risks. The purpose of this year's study is to verify the accuracy and balance of the calculation time for storm surge, wave, tsunami and heavy rain. The physical options and other calculation conditions that give the highest accuracy for typhoon prediction are different for each typhoon. In addition, an evacuation route search method was developed to avoid tsunami encounters by considering the arrival time of tsunamis on the evacuation route due to database.

Keywords : storm surge, tsunami, forecast simulation, evacuation, database

1. Overview of this study

In this study, we will develop a model that can predict and analyze superimposed disasters, such as heavy rainfall, storm surge and tsunami, in order to investigate the risks of natural disasters that have occurred frequently in recent years and complex disasters that may occur in the future. In addition, we will study the complex damage risks and the design of protective facilities and evacuation methods that take these risks into account. First of all, we aim to investigate the differences in calculation accuracy and time for each phenomenon.

2. Calculation Time and Accuracy of Storm Surge and Wave Prediction

The purpose of this study is to accumulate case studies for a specific typhoon with the ultimate goal of generalizing the conditions for the calculation. Most of the previous forecast calculations were made using external forecasts from NCEP (National Center for Environmental Prediction) GFS and JMA GSM as lateral boundaries. According to the JMA forecast error over time⁷⁾, the accuracy of intensity forecasts has lagged behind the improvement in typhoon path forecasts over the last 20 years, and the uncertainty of these typhoon forecasts still remains a challenge. Since this uncertainty in external weather forecasts also affects the accuracy of the forecasts when used as the initial boundary value of the WRF, in this study, we compute the forecasts for Typhoon 19 in 2019 using global calculations without using lateral boundary values in the parent region.

We define "minimum landfall time" here for convenience. It is calculated by dividing the shortest distance between a typhoon's origin and the Japanese coastline by the historical average speed of the typhoons, and roughly calculating the minimum number

of days at the start of the forecast.

Here, the computed time was evaluated on the assumption that the minimum landfall time is the true time to landfall of the actual typhoon. In the case of typhoon No. 19, the minimum landfall time was 4.6 days compared to 6.5 days for actual landfall.

Figure 1 shows the relationship between the location of the typhoon at the start of the forecast and the accuracy of the storm surge and peak values. The accuracy of the peak value predictions is calculated to approach 1.0 when the error between the observed and predicted values is small. The accuracy of the storm surge and wave peak values was improved from the time when the typhoon started at about 900-1000 km straight from the Japanese coastline, due to the improved path prediction accuracy.

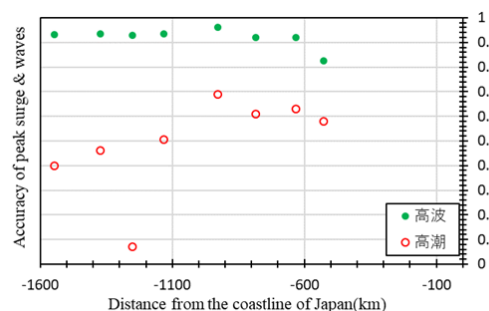


Figure 1: The relationship between the distance of the typhoon from the Japanese coastline at the start of the forecast and the accuracy of the peak value prediction (the origin of the abscissa in this study is set to Nura, Chiba Prefecture, where the distance between the typhoon position and the Japanese coastline is the shortest in all cases).

3. Verification of an evacuation support system using a database

The tsunami simulation will be carried out by setting up a wave source fault model that can generate a tsunami affecting the target area (Kujukuri and Sotobo areas in Chiba Prefecture), and the offshore tsunami waveforms at the offshore stations, tsunami height and arrival time at the coast, inundation depth distribution and arrival time in the land area will be registered as a series of tsunami scenarios in the tsunami scenario bank¹⁾.

Multiple fault models will be extracted from the tsunami scenario bank based on the source information (earthquake size and source location) obtained after the earthquake. Among the tsunami scenarios based on the extracted fault models, the scenario with the fastest tsunami arrival time to the target area is extracted. Estimate the evacuation route without tsunami by considering the expected tsunami arrival time on the evacuation route of the extracted scenarios.

The evacuation simulator²⁾ uses a potential model, and the evacuees select the shortest route to the evacuation site that takes into account the topography and obstacles. The inundation depth used to determine mortality is set by reading the values calculated by STOC-ML³⁾.

Figure 2 shows the different evacuation routes and the expected tsunami encounter locations for some evacuees. The blue line shows the shortest evacuation route to the nearest evacuation site, and the red line shows the route to avoid a tsunami encounter when the evacuation starts within 1000 seconds after the earthquake. The time required to evacuate by the shortest path (blue line) is 375 seconds, and the time required to evacuate by the evacuation route that avoided the tsunami encounter (red line) is 439 seconds. As shown in Figure 2, if the evacuation starts in 1000 seconds and the shortest route is chosen, the victim encounters the tsunami about 6 minutes after the start of the evacuation and is judged to be dead. On the other hand, if we choose the path to avoid the tsunami encounter, we can evacuate without encountering the tsunami.

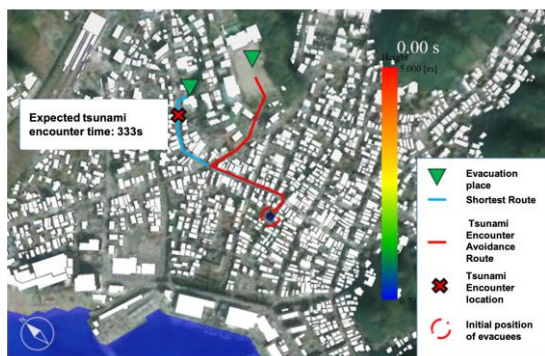


Figure 2: Evacuation routes and expected tsunami encounter locations for each route search method

4. Considerations of the superposition of heavy rains, storm surges and tsunamis

For heavy rainfall, WRF was used to calculate and replicate heavy rainfall, and inundation calculations were carried out. The rainfall was calculated using WRF and the accuracy of the predictions was also examined. The results showed that the rainfall patterns and maximum rainfall were in general agreement in many places, but in many cases, the calculated results were faster than the predicted results.

The results of previous studies and the present study show that the time and accuracy of the calculations for storm surges and heavy rainfall caused by typhoons and cyclones are generally consistent with the results of the present study.

In the case of typhoons, the accuracy of the calculations can be ensured by real time forecasting from one or two days before the event, so that it is possible to simulate evacuation based on calculations from two days before the event, and to show more reliable evacuation sites and routes. However, the path of the typhoon also depends on the parameters in the WRF, so it is important to establish a system to extract reliable parameters based on the sensitivity analysis of many existing typhoon patterns.

On the other hand, since tsunamis often strike within 10 to 30 minutes after an earthquake occurs, it is highly likely that sufficient accuracy cannot be ensured in calculating forecasts each time, especially when there are not enough observation points, so it is important to support evacuation based on a tsunami inundation calculation database using many earthquake sources in advance. It is considered desirable to have the following features.

In the future, we plan to simulate scenario-based superposition patterns and study the optimal evacuation behavior in such cases.

References

- 1) Naotaka Chikasada, Wataru Suzuki, Takayuki Miyoshi, Shin Aoi, Makoto Nemoto, Kenshi Oshima, Hisanori Matsuyama, Jumpei Takayama, Takuya Inoue, Yasuhiro Murata, Jiro Satake, Yuta Abe, Mariko Korenaga, Norihiko Hashimoto, and Sho Akagi, "Design of Tsunami Scenario Bank for Real-Time Tsunami Inundation Forecast", Technical Note of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience: No.430, 2019
- 2) Taro Arikawa, Takayuki Oie, "Study Of Evacuation Behavior Characteristic Using Evacuation Simulator Coupled With Numerical Wave Flume", Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering), Vol.71, No.2, pp. I_319-I_324, 2015.
- 3) Takashi Tomita, Taro Kakinuma, "Storm Surge and Tsunami Simulator in Oceans and Coastal Areas (STOC)", Report of the Port and Airport Research Institute, Vol.44, No.2, 2005.