2013年台風30号Haiyanによる高潮の予測可能性と再解析精度

Forecast and Hindcast of Storm Surge Modeling by Typhoon Haiyan in 2013

森 信人¹・澁谷容子²・竹見哲也³・金 洙列⁴
安田誠宏⁵・丹羽竜也⁶・辻尾大樹⁷・間瀬 肇⁸

Nobuhito MORI, Yoko SHIBUTANI, Tetsuya TAKEMI, Sooyoul KIM, Tomohiro YASUDA
Tatsuya NIWA, Daiki TSUJIO and Hajime MASE

Typhoon Haiyan, which struck the Philippines and nearby areas in November 2013, was an extremely intense tropical cyclone that had a catastrophic impact. A series of numerical analyses indicated that the maximum storm surge level was 5-6 m in Tacloban. The numerical experiments show the coherent structure of the storm surge prole due to the specic bathymetry of Leyte Gulf and the Philippines Trench as a major contributor to the storm surge disaster in Leyte Gulf. Based on the comparisons of forecasts and hindcasts, it was difficult to predict the storm surge a few days in advance, quantitatively.

1. 序論

近年、強い台風の出現による沿岸災害への影響が懸念されている（例えばWoodruffら, 2013）。しかしながら、台風の上陸数に比べて、台風による高潮は頻度が少ないために数値モデルの検証やその影響評価は難しく、このため実際に発生した台風・高潮災害の詳細な解析は重要である。2013年11月に発生した台風30号（以下、Haiyan）は、フィリピン、ベトナムおよび周辺地域を襲った非常に強い熱帯低気圧であった。またHaiyanは、最発達時に最低中心気圧895hPa、最大瞬間風速90m/sと、北西太平洋における過去30年間に記録されている上陸した中で最も強い台風であった（デジタル台風DB, 2014）。Haiyanのような特別な事例を詳細に解析することは、災害素因の評価に加えて、台風や高潮予測・再解析モデルのパフォーマンスを定量的に評価するために必要である。

一般に、高潮の予測では、台風の中心強度と経路に加えて、台風半径や移動速度も重要となる。そこで本研究では、Haiyanを対象に、気象・高潮モデルを用いた台風および高潮の再解析に加え、台風モデル・高潮モデルを用いた予測の模擬実験も行い、その推定精度について検討を行う。

2. 解析手法の概要

(1) 気象・高潮モデルと計算条件の概略

台風Haiyanの気象場の再現は、気象モデルWRF（Skamarockら, 2008）と経験的台風モデルの2種類を用いて行った。WRFによる詳細な気象場の予測・再現計算に加えて、経験的台風モデル（藤井・光田モデル, 1995; PTMと略記）の最大旋回風速半径 R_{max} を変化させて4ケースを加え、高潮計算における海面更正気圧（SLP）と高度10m風速（ U_{10} ）とした。これらの外力をもとに、非線形長波方程式とスペクトル型波浪モデルを双方向結合した数値モデル（Kimら, 2008）を用いて、高潮と波浪の計算を実施した。計算の簡略化のため、潮汐については考慮していない。

WRFの計算条件は、計算対象領域サイズを4000km×2000km、鉛直56層、水平空間解像度を第1領域(D1)Δ=3km、第2領域(D2)Δ=1km、2段ネスティングの有無、

表-1 WRFおよび経験的台風モデルの計算条件と現地調査による浸水高と比較した最大潮位偏差の推定誤差(ケース番号、ME：平均誤差、RMSE:2乗平均誤差、Res.: 空間解像度、DA:データ同化、SST:海水温、MEおよびRMSEのバーは値の大きさを示す)

	ME [m]	RMSE[m]	Res.	DA	SST
WRF-0100	2.37	1.39	3km		NCEP
WRF-0200	2.13	1.40	3km	SN3600	NCEP
WRF-0250	2.21	1.31	1km	SN3600	NCEP
WRF-0280	1.49	1.35	1km	SN1800	NCEP
WRF-0550	1.08	1.29	1km	SN3600	MRI
PTM 50km	1.08	1.58			
PTM 75km	1.50	1.48			
PTM100km	1.73	1.46			
PTM150km	1.84	1.48			

1 正会員 博(工) 京都大学准教授 防災研究所
2 正会員 博(工) 京都大学特任助教 防災研究所
3 正会員 博(理) 京都大学准教授 防災研究所
4 正会員 博(工) 鳥取大学助教 工学研究科
5 正会員 博(工) 京都大学助教 防災研究所
6 正会員 修(工) パシフィックコンサルタンツ
7 正会員 博(工) パシフィックコンサルタンツ
8 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

図-1 気象モデルによる経路の再現性(細線+○:衛星データ; 太線:WRF(数字:ケース番号,表-1参照),太線の濃淡:中心気圧)

データ同化(DA)の時定数を3通り,海面水温(SST)をNCEPもしくは気象庁の2種類と変化させ,側方境界にFNL(解析値)を与えて合計8ケース実施した(表-1を参照)。WRFの計算は,上陸の2もしくは3日前を計算開始時間とし,データ同化の有無により,計算結果を予測もしくは再解析と見なして評価を行った(Moriら,2014)。

気象場・高潮の解析結果について,衛星データ,地上観測風速および気圧,観測潮位に加えて,陸上の痕跡高(Tajimaら,2014および著者らの調査結果)を用いて精度検証を行った。紙面の関係上,以下では,主に最大潮位偏差の再現性について評価を行う。

3. 結果と考察

(1) 気象場の再現精度

まず始めにWRFによる台風経路の再現性について検証を行った。図-1に示すのはその結果であり,WRFにより計算された台風の経路は,南北方向に $\pm 50\text{km}$ の範囲でばらつく傾向があり,特にデータ同化無し(WRF-0100;以下予測計算)では北側に大きく外れる傾向が見られた。データ同化は大気波数3以下の低波数成分に対して行っており,台風の目のサイズを考えると,この程度の経路のばらつきは計算上の不確実性と見なせる。

WRFの台風のマクロ統計量に対する再現精度は対象とする物理量によって異なる。図-2に示すのは,台風の中心気圧 $P_{\min}$,移動速度 V および25m/s風速半径 R_{25} の時間変化である。最も再現性の良かったマクロ統計量は,移動速度 V であり,予測・再解析共に衛星データの時系列と一致している。一方,中心気圧 $P_{\min}$ の再現性は,空間解像度および与えたSST条件に大きく依存している。

(a) 中心気圧 $P_{\min}$

(b) 移動速度 V

(c) 25m/s風速半径 R_{25}

図-2 気象モデルによる台風の中心気圧 $P_{\min}$,移動速度 V および25m/s風速半径 R_{25} の時間変化(●衛星データ,数字:WRFのケース番号)

WRFで解像度1kmのD2を用いたネスティングを行うと,衛星データとほぼ同等な約900hPaまで低下するが(WRF-0100以外),解像度3kmのD1のみの計算では940hPa程度にしか発達しない。特に最低気圧が895hPaに到達する24時間前におけるRapid Intensificationの期間の再現性は,計算条件により大きく差が見られた。台風モデルで必要となる台風半径については,WRFによる再解析の結果は,衛星データと比較して妥当な結果を得ており,再発達時における強風半径 R_{25} は約120km,最大旋回風速半径 $R_{\max}$ は50kmであった。予測計算における R_{25} は,最発達以降の11/7以降で過大評価となっており,これは図-2(a)の $P_{\min}$ の再現性の問題に起因している。以上の解析結果を踏まえて,台風モデルについては,衛星データの経路および $P_{\min}$ に加えてWRFで得られた $R_{\max}$ を用いて,高潮の予測・再解析を行った。

台風中心近傍の比較は,経路の再現性に大きく依存するため,定点観測データに対して絶対量を比較することに大きな意味は無いが,時系列のパターンを見ることは重要である。図-3に示すのはその一例であり,ピーク値の欠測により定量的な評価は難しいが, U_{10} およびSLPとの比較結果より,精度の良い再解析結果(WRF-0250,

図-3 気圧・風速の定点観測データとの比較：Guiuan (●)観測, WRFの結果, 台風モデルの結果)

(a) Leyte・Samar島Tacloban周辺

図-4 Leyte・Samar島近傍の最大潮位偏差の推算結果 (●：図-8の解析対象点, 単位:m)

(b) Visaya西部

図-5 最大潮位偏差の推算結果 (●：現地調査による浸水高, 濃淡：WRF-0550による結果, 単位:m)

0550) では, Guiuanの観測所における U_{10} およびSLPの時間的変化が定性的に再現されている。これらの傾向は他の地点でもほぼ同様であり, 再解析による気象場の再現性は, 台風経路のゆらぎ以外ほぼ妥当な精度が得られた。一方, 予測計算結果は, ピーク値および時系列共に観測結果と異なり, 定性的にも問題がある。

(2) 高潮の再現精度

WRFによる気象場の計算結果と経験的台風モデルを用いて, 12ケースの高潮の予測・再解析を行った。空間的なパターンは多少異なるものの, いずれの計算結果もLeyte湾奥で潮位偏差が大きくなる傾向は同じであった。例えば, 図-4に示すのは, WRF-0550の計算結果を外力としたLeyte・Samar島近傍の最大潮位偏差の再解析結果である。1m以上の高潮偏差が見られるのはLeyte湾奥の100km程度の範囲であり, これは被害の様子と概ね一致している (NDRRMC, 2013)。

高潮の計算精度については, 現地調査による浸水高と比較を行った。表-1に示すのは, 最大潮位偏差の平均お

よびRMSE誤差である。現地調査データの中で, 海岸線に近いデータを選択し, これに最も近い海上の計算格子と比較した。平均誤差が最も小さいのは, WRF-0550および台風モデルで $R = 50\text{km}$ とした結果であり, 平均誤差は1.08m, これ以外のケースの結果はこれより誤差が5~10割増となる。WRF-0550の計算条件は, 最小水平空間解像度1kmでSSTに気象庁全球日別海面水温解析 (MGDSST) を用いており, 台風中心の構造に影響を与える解像度と海面水温 (SST) が高潮の再現性に大きな影響を与えてことがわかる。台風モデルを用いた結果は, 台風半径 R が大きくなるに従い誤差が漸増しており, 台風半径を適切に与える必要性を示している。Haiyanによる高潮の予測可能性については, 予測計算であるWRF-0100の結果を見ると, 気象モデルによる結果は誤差が大きく, 予測としてのパフォーマンスは低い。一方, 台風モデルを用いた場合, マクロ統計量を適切に与えられれば再現計算に近い精度で予測可能であるが, 台風の経路や中心気圧の変化が大きな場合は, これらを予測するこ

図-6 潮位偏差の定点観測データとの比較：Tacloban (●) 観測，他：計算結果)

とが難しくなるため、気象モデル同様の問題点が生じることになる。

図-5に示すのは、WRF-0550のケースにおけるTacloban付近およびVisaya西部のPanay島の最大潮位偏差の計算結果である。図中の●は、現地調査による痕跡高を示す。現地調査では、Leyte湾だけでなく、フィリピン西部のPanay島東部およびNegros島北部でも3m以上の最大潮位が観測されているが、WRF-0550にもとづく高潮計算結果は、局所的には差異が見られるものの、これら空間的な痕跡高を包含する妥当な結果が得られている。痕跡高と計算結果の空間分布で特徴的であるのは、Tacloban付近とPanay島西部の急激な水位上昇の再現性が良いことと、細かい半島や島々で部分的な差異が見られることである。これらの結果は、適切な外力と地形が与えられれば高潮偏差の推定精度が確保できることを示している。

フィリピン国土地理・資源情報庁 (NAMRIA) による潮位観測は、観測地点数が少ない上に、気象データ同様に台風通過前から欠測している。図-6に示すのは利用可能な潮位偏差データの比較の一例である。欠測が多く定量的な評価は難しいが、Taclobanにおける台風再接近前の水位低下の再現性に着目すると、痕跡高と比較して最も精度の良い再解析結果であったWRF-0550をもとにした計算結果は、観測された再接近前の水位の低下をよく再現しているが、予測計算結果 (WRF-0100) は、最大値で2m以上の過小評価となった。台風モデルをもとにした計算結果は、 $R=50\text{km}$ のケースがWRF-0550とかなり近い時系列を示しているが、台風半径が大きくなるに従い、ピーク値が下がり、時間的にゆるやかな水位変化を示している。これらの傾向は他の地点でもほぼ同様であり、WRF-0550による再解析による高潮の再現性はほぼ妥当な精度であることがわかった。

図-7 WRFをもとに計算された最大潮位偏差の標準偏差

WRFを用いた気象計算とこれを用いた高潮の計算結果では、最大潮位偏差の空間分布と時系列に差が見られることを示した。事前に正解を知ることができない予測計算では、計算条件には任意性があり、計算条件の違いによる最大潮位偏差の標準偏差から、予測計算の不確実性を評価することができる。図-7に示すのは、表-1に示したWRFの計算結果をもとに計算された8ケースの最大潮位偏差の標準偏差である。標準偏差が大きいののは台風経路を挟んで南北側に分布しており、北側のTacloban付近で0.53m、南側で0.35mである。経路の南側の変動は、吸い上げ効果によるものであるが、Tacloban付近の変動は局所的なものであり、吹き寄せ等の影響が示唆される。アンサンブル計算による感度分析の結果、誤差が最も大きな海域は、Leyte湾奥のTacloban周辺であり、紙面の関係上図面は省くが、SST、空間解像度および同化による影響はほぼ同程度見られ、予測の不確実性の要因が複数あることが確認された。

(3) Leyte湾における高潮の特性

前節で示された様に、Tacloban付近で高潮偏差の計算不確実性が高い。Leyte湾内の固有成分を調べるため、図-8に示すのは、図-4に示す沖からTaclobanへ向かって設定した解析対象点 (●) における潮位偏差と流速のスペクトルである。水位および流速の東西成分共に2.0時間のピークを示しており、これはLeyte湾の平均水深を75m、代表長さを約112kmとした場合の固有周期に一致する。水位のスペクトルは、大陸棚以浅のP4より岸側で徐々に固有周期が顕著になるのに対し、東西成分流速の固有周期はP4の湾口付近で最も顕著に現れ、その前後ではこれより小さい。南北成分流速のスペクトル変化は複雑であり、湾奥で急激に大きくなる。これは、湾奥部での時計回りの循環によるものであり、コリオリ力の影響が大きいことが示唆される。太平洋との質量収支を分析した結果、Leyte湾における潮位偏差の内、吸い上げ効果を除い

た80% が湾の固有モードに依存し、残りの20% が太平洋からの質量輸送によることがわかった。波浪場についても同様に解析し、太平洋で発達した波浪は、Leyte湾口で急激に減衰しており、高潮にはほとんど寄与していないことがわかった。

4. 結論

台風Haiyan対象に気象モデルおよび台風モデルを外力として、アンサンブル計算を実施し、気象場および高潮の予測・再解析を行った。再解析と予測精度の検証とその感度分析を実施し、Tacloban付近の高潮の推定が様々な気象モデルの計算条件に対し、非常に鋭敏であることを明らかにした。計算された気象および最大潮位偏差の精度検証を行った結果、再解析では十分な再現精度が得られたが、予測を模擬した計算結果は、2m以上の過小評価となった。さらに、Taclobanにおける潮位偏差の急激な増加には、太平洋からの水塊の流入よりも、Leyte湾の固有振動が大きく寄与していることを明らかにした。

謝辞：本研究は、文部科学省気候変動リスク情報創生プログラムおよび科学研究費補助金による成果である。

参 考 文 献

- デジタル台風DB (2014) : Typhoon Images and Information, <http://www.digital-typhoon.org/>, access 2013/12/11.
- Fujii, T., and Y. Mitsuta (1995) : On the radial pressure profiles of typhoons, *Annals, Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, No.38 B-1.
- Kim, S. Y., T. Yasuda and H. Mase (2008) : Numerical analysis of effects of tidal variations on storm surges and waves, *Applied Ocean Research*, Vol.30, No.4, pp.311-322.
- Mori, N. et al. (2014) : Local amplification of storm surge by Super Typhoon Haiyan in Leyte Gulf, *Geophysical Research Letters*, 41, pp.5106-5113.
- National Disaster Risk Reduction and Management Council (NDRRMC) (2013) : Effects of TY "YOLANDA", *SitRep of NDRRMC*, No.60, December 12th, 2013.
- Skamarock, W. C. et al. (2008) : Powers, J. G., A description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech. Note, 475, 113p.
- Tajima, T. et al. (2014) : Initial Report of JSCE-PICE Joint Survey on the Storm Surge Disaster caused by Typhoon Haiyan, *Coastal Engineering Journal*, DOI:10.1142/S0578563414500065.
- Woodruff, J.D., J.L. Irish and S. J. Camargo (2013) : Coastal flooding by tropical cyclones and sea-level rise, *Nature*, 504, pp.44-52.

(a) 水位

(b) 東西成分流速

(c) 南北成分流速

図-8 水位および流速のスペクトル(場所は図-4に対応、縦線は1h, 2h, 4.1hに対応)