高解像度台風－高潮結合モデルによる 台風1330号とそれに伴う高潮の再現実験

豊田 将也¹・吉野 純²・荒川 悟³・小林 智尚⁴

¹学生会員 岐阜大学 大学院工学研究科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

E-mail:u3130027@edu.gifu-u.ac.jp

²正会員 岐阜大学准教授 大学院工学研究科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

E-mail:jyoshino@gifu-u.ac.jp.

³中部電力株式会社 (〒497-0044 愛知県海部郡蟹江町大字蟹江新田字大海用177-1)

E-mail:Arakawa.Satoru@chuden.co.jp

⁴正会員 岐阜大学教授 大学院工学研究科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

E-mail:kobat@gifu-u.ac.jp

2013年11月に発生した台風1330号(タイフーン・ハイエン)は、最盛期には中心気圧895 hPaにまで発達し、勢力を維持したままフィリピン中部を横断した。そのため、タクロバンをはじめとするレイテ湾沿岸地域において甚大な高潮被害をもたらされた。本研究では、高解像度台風－高潮結合モデルを構築し、台風1330号の発生から消滅までの内部構造とそれに伴う高潮の再現実験を行った。3 km格子の雲解像スケールの自動移動ネスティングを導入することで台風1330号の強度発達を高精度に再現でき、レイテ湾における現実的な高潮をも再現できた。また、高精度な台風強度評価および高潮評価のためには、台風が進行する海域における海洋混合層厚さの空間分布を正確に入力する必要があることが明らかとなった。

Key Words : *high-resolution typhoon model, ocean mixed layer, automatic movable nesting, storm surge, Typhoon Haiyan (2013)*

1. はじめに

一般的に日本列島に襲来する台風の多くは、その勢力を弱め減衰した状態で上陸する。しかし、近年の研究により、地球温暖化により海水面温度が上昇することで、台風の可能最大強度や可能最大高潮は増大するものと懸念されている¹⁾。また、温暖化により海洋混合層中の貯熱量が増大することで、発生した台風の多くが可能最大強度にまで発達しやすくなると指摘されている²⁾。そのため、将来の地球温暖化の進行により中緯度に位置する日本列島であっても熱帯域と同等の勢力を有する台風が来襲する可能性が高まるものと懸念される。その前兆とも言える台風が、2013年の台風1330号(タイフーン・ハイエン)であった。

2013年11月に発生した台風1330号は、最盛期には中心気圧895 hPaにまで発達したスーパー台風であり、勢力を維持したままフィリピン中部を横断したため、タクロバンをはじめとする沿岸地域に高潮災害等の甚大な被害を

もたらした。台風1330号の最盛期の最大風速は65 m/s以上にも達していたと推定されているが³⁾、観測データの不備のため、台風1330号の急速発達や高潮発生メカニズムについては十分に理解されているとはいえない。将来我が国に迫り来る強大化した台風による災害を未然に防ぐためにも、高精度な台風モデルを構築すると同時に、スーパー台風の発達メカニズムとそれに伴う高潮災害の発生メカニズムの理解を深める必要があるだろう。

今日まで、台風1330号に関する現地観測データに基づいた報告は殆ど存在していないものの、気象モデルや高潮モデルに基づいた研究例については幾つか報告されている⁴⁾⁵⁾⁶⁾。しかし、台風と高潮の両方を計算した研究例は数少なく、あったとしても台風1330号の特徴とも言える900 hPaを下回る猛烈な勢力を十分に再現できているとはいえない⁷⁾⁸⁾。猛烈な台風を再現するためには、気象モデルにおいて暴風・暴浪下の海面境界過程を詳細に考慮し、かつ、台風中心付近を高分解能に計算する必要がある。

表-1 高解像度台風モデルの計算設定.

計算領域	D1	D2 (D4)	D3 (D5)
対象台風	2013年台風30号(Haiyan)		
対象時間	2013年11月4日0時UTC～2013年11月11日6時UTC		
水平解像度	27km	9km	3km
水平格子数	250×250	91×91	31×31
時間間隔	90秒	30秒	10秒
鉛直解像度	24層(1000–70hPa)		
初期・境界・同化条件	NCEP Final Analyses (1°×1° 格子間隔, 6時間間隔)	D1	D2
自動移動ネスティング	Off	On (Off)	On (Off)
台風ボーガス	風速17.2m/s ランキン渦	Off	Off
ナッジング(4DDA)	On	Off	Off
積雲対流過程	Kain-Fritsch cumulus	Off	Off
雲微物理過程	Reisner graupel		
大気境界層過程	Mellor–Yamada Level2.5 Eta PBL		
大気放射過程	Cloud radiation		
陸面過程	5-layer soil		
海洋混合層過程	Shade and Emanuel(1999)		
波飛沫蒸発過程	Fairall et al.(1994)		
粘性散逸加熱過程	Jin et al.(2007)		

そこで本研究では、気象モデルに対して猛烈な台風を再現する上で不可欠となる自動移動ネスティングと各種の海面境界過程を組み込んだ高解像度台風－高潮結合モデルを構築することで、台風1330号の発生から消滅までの台風強度とそれによる高潮の再現実験を行い、更に、台風1330号による高潮災害の発生メカニズムを解明することを目的とする。

2. 台風1330号とその被害について

台風1330号は、2013年11月4日0時（世界標準時、以降同じ）に熱帯海上で発生した台風である。発生から徐々に発達し、11月7日12時には最大風速が130ノット (66.9 m/s)、中心気圧が895 hPaにまで発達したと推定されている³⁾。この台風1330号は、フィリピンに上陸した過去の台風の中では最も勢力の強いものであったと報告されている³⁾。猛烈な勢力を維持した状態でフィリピン中部を横断したため、レイテ島、特にサンペドロ湾周辺地域では甚大な被害を被った。台風1330号が長時間勢力を維持し続けた要因として、フィリピン周辺の海域の海面水温が28℃以上、海面から100 m深い場所でも26℃程度と、平年よりも高い温度を維持していたことが考えられ、更に、台風1330号の移動速度も比較的大きかったことも相まって²⁾、台風勢力を維持しやすい環境場条件が整っていたと考えられる。

台風1330号の人的被害の多くは高潮によるものであり、中でもタクロバンは壊滅状態であった³⁾。フィリピン政府が行った台風1330号による被害の推計によると、死者6,190人、行方不明者1,785人、総被災者数1,410万人以上(2014年1月現在)とされている⁹⁾。レイテ湾は水深20 m程度の浅い海域が70 kmにわたって広がっており、タクロバンのあるレイテ湾北西部のサンペドロ湾では潮位上昇

しやすい奥まった地形となっている(図-2)。結果として、台風の強風に伴う「吹き寄せ」による水位上昇に加えて、台風の気圧低下に伴う「吸い上げ」による水位上昇が重なることで、タクロバン周辺で高潮による大災害が生まれたと考えられている。

3. 数値計算の方法

本研究では、台風1330号の発生から消滅までの内部構造とそれに伴う高潮を高解像度に再現することを目的として、台風モデルと高潮モデルを結合した「高解像度台風－高潮結合モデル」を構築する。

(1) 高解像度台風モデル

本研究で使用した高解像度台風モデルは、ペンシルバニア州立大学PSUと米国大気科学研究センターNCARにより開発された3次元領域気象モデルMM5をベースとしている¹⁰⁾。MM5は、非静力学平衡・完全圧縮・非膨張系プリミティブ方程式系モデルであり、台風内部の3次元構造の時間発展を複雑地形の影響も考慮しながら高精度に予測できる¹¹⁾。著者らは、このMM5に対して猛烈な勢力を持つ台風を表現する上で不可欠となる「海洋混合層過程」、「粘性散逸加熱過程」、および「波飛沫蒸発過程」といった詳細な海面境界過程を組み込むことで独自の高解像度台風モデルを構築している。更に、「自動移動ネスティング」を採用することで、低解像度な親領域中を移動する台風を高解像度なネスティング領域が常に自動追尾でき、台風の発生から消滅までその強度や内部構造を高効率かつ高分解能に表現できることが実証されている^{12),13)}。

本研究では、高解像度台風モデルの計算設定として、表-1に示す通りに設定する。また、高解像度台風モデルの計算領域に関しては、図-1に示すように、台風の周辺環境場を表現する27 kmメッシュ領域(D1)の中に、台風の全体構造を解像する9 kmメッシュ領域(D2)と、更にその中に台風の内部コア構造を解像する3 kmメッシュ領域(D3)を初期台風位置に置く。自動移動ネスティングD2およびD3は、台風の発生から消滅までの強度や内部構造を高効率かつ高解像度に表現できる。本研究では、この自動移動ネスティングを導入することによる高解像度化の効果について感度実験を行う(4.(1)節)。

また、高潮モデルへ入力する気象外力を再現することを目的として、親領域D1内部にフィリピン・レイテ湾を中心とする固定された9 kmメッシュ領域(D4)と3 kmメッシュ領域(D5)を別に導入する。自動移動ネスティングD2やD3で再現された詳細な台風気象場は、D4やD5にも反映されるだけでなく、D4やD5内の詳細な地形や土地利用設定を加味することで高精度な地上気象場を得る

表-2 高潮モデルの計算設定.

対象台風	2013年台風30号(Haiyan)
対象時間	2013年11月7日0時UTC—2013年11月9日0時UTC
水平解像度	1km
時間間隔	1秒
鉛直解像度	1層
海底地形	海底地形:ETOPO1(1分×1分格子)
	海岸線:USGS Landuse(30秒×30秒格子)
初期条件	ゼロ値($u=0$, $v=0$, $h=0$)
気象外力	高解像度台風モデルD5(3km格子;15分間隔)
境界条件	潮汐モデルNAO(15分間隔)

ことができる¹¹⁾.

高解像度台風モデルの初期条件・境界条件・同化条件には、1度メッシュのNCEP全球客観解析データ (Final Analyses)を入力する. さらに、高解像度台風モデルの海面境界過程の1つである「海洋混合層過程」には、予報変数の1つである「海洋混合層厚さ」の初期値を入力する必要がある. 本研究では、台風強度に対して特に大きな影響を有するこの「海洋混合層厚さ」の影響を評価するための感度実験を行う (4. (2)節). 基本計算 (CNTRL)として、NOAA/NODCが提供する海洋混合層厚さの1度メッシュ月平均場を初期条件とする計算を行う. また、フィリピン以東の海洋混合層厚さの初期値に対して、10 m (CASE1), 20 m (CASE2), 30 m (CASE3), 40 m (CASE4), および、50 m (CASE5)を一様に設定することで感度実験を実施する (フィリピン以西は気候値に近い10 mを一様に設定する).

(2) 高潮モデル

高解像度台風モデルの3kmメッシュ領域D5により再現された台風気象場を気象外力として高潮モデルによりレイテ湾周辺の潮位を計算する. 高潮モデルの計算領域は、図-2に示す通りであり、水平解像度は1 kmメッシュとする. 海底地形データには、NOAAが提供する1分メッシュの全球地面起伏データ (ETOPO1) を使用する. また、海岸線データには、USGSが提供する30秒メッシュの全球土地利用データを使用する. この高潮モデルは、1層非線形長波方程式により構成され、潮位および流速ベクトルが予報変数となる. 側面境界条件として、潮汐モデルNAOの出力値 (天文潮位)を15分間隔毎に入力する. 海面境界条件として、高解像度台風モデルによる台風気象場も15分間隔毎に入力される. 高潮モデルの計算期間は、台風上陸1日前 (2013年11月7日0時)から台風上陸後1日 (2013年11月9日0時)の計2日間 (計48時間)とした. 詳細な計算設定は表-2に示す.

図-1 高解像度台風モデルの計算領域.

図-2 高潮モデルの計算領域.

4. 結果と考察

(1) 台風1330号の再現実験 (空間解像度の影響)

まず、高解像度台風モデルにおける自動移動ネスティングの空間解像度の効果を確認するため、9 km格子を単体で置く実験 (以降、D2)と9 km格子の中に更に3 km格子を置く実験 (以降、D2+D3)の2種類の感度実験を行った. 本題である台風強度の議論の前に、再現された台風進路について確認すると (図-3), D1に対して4次元同化ナッジングを適用することにより、台風1330号の発生から消滅までの進路を正確に再現できていることが見て取れる.

次に本題である台風強度の時間変化を見ると (図-4), D2の場合は、台風1330号の急速発達や最盛期の強度を過小評価しているのに対し、D2+D3の場合には、より現実的に台風強度を表現できていることが分かる. 計算開始後2880分頃には、台風強度の非現実的な減衰と急発達の遅れが生じているが、これは台風周辺の大気環境場の影響 (同化条件として利用したFinal Analyses) によるものであると考えられる.

図-3 台風1330号の進路（観測：緑線，モデル：赤線）。

以上より、比較的水平スケールの小さな台風1330号に見られた急速発達（ -50 hPa/day ）を正確に再現するためには、 3 km 格子よりも細密な雲解像スケールのネスティング領域で台風中心を詳細に表現する必要があると言えるだろう。よって本研究では、D2+D3の領域設定を基本計算(CNTRL)として採用する。

(2) 台風1330号の再現実験（海洋混合層厚さの影響）

次に、高解像度台風モデルの入力値の中で、もっとも不確実性の大きな「海洋混合層厚さ」が、台風強度に及ぼす影響を評価するための感度実験を行った。

図-5は、CNTRLおよびCASE1～CASE5により評価された台風1330号の中心気圧の時系列を示す。いずれのケースであっても、高解像度なネスティング領域(D2+D3)を

図-4 高解像度台風モデルによる台風1330号の中心気圧の時系列（空間解像度に関する感度実験）。

導入することで上陸前の急速発達や上陸後の急減衰を現実的に再現できている。しかしながら、海洋混合層厚さを気候値で設定した基本計算(CNTRL)の場合には、フィリピン以東の海洋混合層厚さはおよそ 30 m 程度となり、最盛期における台風強度を依然として過小評価している。一方で、フィリピン以東の海洋混合層厚さを 50 m で一樣に設定したCASE5の場合には、台風1330号の急速発達を再現できているだけでなく、最盛期に観測された中心気圧に近い 900 hPa を下回る中心気圧を再現できている。海面境界過程に見られる強い非線形性のために、CASE1からCASE5まで最盛期の中心気圧が単調に低下しているわけではないが、海洋混合層厚さがより深く発達することで最盛期のピーク強度はより高まる傾向にあると言える。台風1330号の発生した2013年11月当時、この海域はラニーニャに近い状態にあり、海洋混合層厚さは平年に比べてより深層に発達していたと報告されており、本研究の結果とよく整合している⁹⁾。

以上の感度実験の結果から、2013年11月のフィリピン以東の海域では、少なくとも海洋混合層厚さは 50 m 以上に発達していたものと逆算的に推定される。今後、この高解像度台風モデルを用いて、リアルタイムに海洋混合層厚さの観測情報を入力することができれば、より精度の高い台風強度評価が可能となると期待される。

(3) 台風1330号の高潮の再現実験

次に、高解像度台風モデルを用いて再現された台風1330号(CASE5)の台風気象場（地上気圧および地上風速ベクトル）を気象外力として、高潮モデルによりタクロバンを中心とするレイテ湾沿岸地域において発生した高潮の再現を行った。

図-5 高解像度台風モデルによる台風1330号の中心気圧の時系列（海洋混合層厚さに関する感度実験）。

図-6 潮位と流速ベクトルの時間変化:(a)2013年11月8日00時UTC, (b)同8日01時UTC, (c)同8日02時UTC.

図-7 計算期間内(48時間)の最大潮位分布.

図-8 高解像度台風-高潮結合モデルにより再現されたタクロバンにおける潮位(赤実線), 天文潮位(赤破線), 風速(青線)および風向(矢印)の時系列.

まず, 図-6は, 高潮モデルにより再現されたレイテ湾内の潮位と流速ベクトルの空間分布の変化を示す. 上陸直前の2013年11月8日0時には台風中心はレイテ湾中央部にあり, 強い南風に伴う吹き寄せ効果によりサマル島

南岸において潮位上昇が発生している. また, 一方でサンペドロ湾では強い北風に伴い大量の水塊が流出することで潮位低下が生じている. 同8日1時になると, サマル島南岸の3 m近い潮位上昇と, サンペドロ湾湾奥における2 m近い潮位低下により, 5 m程度の水位差が生じることで, 段波が生じ, サンペドロ湾内に一気に大量の水塊が流入している. その結果, 同8日2時になると, サンペドロ湾の湾奥において4 m~6 mの高潮が発生している.

図-7には, 計算期間内(48時間)における最大潮位の空間分布を示す. サンペドロ湾の湾奥西部に位置するタクロバンで最も潮位が高くなり5 mを越える高潮が発生していることが確認できる. また, サンペドロ湾の湾奥西部では湾奥東部に比べ潮位がより高くなっている. これらの数値計算の結果は, 現地調査の報告ともよく整合している⁴⁾⁷⁾.

最後に, 図-8は, タクロバンにおける再現された潮位の時系列を示す. 高潮の発生時刻が現実に比べて2時間程度遅れているのは, 図-3に示すように再現された台風の進行に2時間程度の遅れがあったことに起因している. 後日, タクロバンにて行われた現地での聞き取り調査によれば, 現地調査に基づく浸水・遡上高の分布によるとタクロバンの浸水高は5 m~7 m程度であったと報告されている^{4)7), 14), 15)}. また, 現地では, 最大潮位の直前に水面が下降し, 海底面が干出するほどの大きな引き潮が確認されている⁴⁾. 本研究の高潮モデルにより, 高潮の発生直前における2 m程度の大きな引き潮と, 高潮起時における6 m程度の最大潮位を精度良く再現できている. また高い潮位を1時間程度維持していることも現地でのヒアリング調査の結果とも良く整合する⁴⁾⁶⁾.

以上より, 本研究により開発された高解像度台風-高潮結合モデルを利用することにより, 高精度に台風1330号の台風強度が再現できるだけでなく, 高精度にタクロバンにおける高潮を再現できることが明らかとなった.

5. 結語

本研究では、独自に開発された高解像度台風モデルと高潮モデルを結合した、高解像度台風-高潮結合モデルを用いることで、台風1330号の発生から消滅までの内部構造とそれに伴う高潮の再現実験を行った。

3 km格子の雲解像スケールの自動移動ネスティングを導入し、さらに海洋混合層厚さを50 mに設定することによって、最低気圧900 hPaを下回る猛烈な勢力を有する台風1330号を高精度に再現できることが明らかとなった。また、再現した台風を気象外力として、サンペドロ湾における現実的な高潮も再現できることが明らかとなった。

今後、リアルタイムな海洋混合層厚さの観測情報が入手できれば、高解像度台風モデルを用いた高精度なリアルタイム台風災害外力予測が可能になると期待される。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金若手研究A(24686058)および基盤研究B(24360199)による成果であることをここに付記する。

参考文献

- 1) 吉野純, 高島利紗, 小林智尚: 気候変動を考慮した可能最大高潮の長期変動予測技術の開発, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I_1251-I_1255, 2014.
- 2) Lin, H., I-F. Pun., and C.-C. Lien: "Category-6" supertyphoon Haiyan in global warming hiatus: Contribution from subsurface ocean warming, *Geophysical Research Letters*, Vol.41, pp.8547-8553, 2014.
- 3) Lander, M., C. Guard, and S. J. Camargo: Super Typhoon Haiyan, *STATE OF THE CLIMATE IN 2013*, pp.S112-S113, 2014.
- 4) 田島芳満, 川崎浩司, 浅野雄司, Noel M. Ortigas: 台風 Haiyan に伴うレイテ島及びサマール島における高潮・高波特性の分析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No.2, pp.I_1431-I_1435, 2014.
- 5) 河合弘泰, 有川太郎, 本多和彦, 浅井正, 藤木峻, 桑島隆一: 台風 1330 号の風・波浪・高潮によるフィリピンの港湾の被災の現地調査, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No.2, pp.I_1436-I_1440, 2014.
- 6) 河合弘泰, 関克己, 藤木峻: 台風 1330 号によるフィリピン中部の高潮・波浪特性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No.2, pp.I_221-I_225, 2014.
- 7) Mori, N., M. Kato, S. Kim, H. Mase, Y. Shibutani, T. Takemi, K. Tsuboki, T. Yasuda: Local amplification of storm surge by Super Typhoon Haiyan in Leyte Gulf, *Geophysical Research Letters*, Vol. 41, pp.5106-5113, 2014.
- 8) 金洙列, 森信人, 澁谷容子, 安田誠宏, 間瀬肇: 高潮・波浪結合モデルを用いた 2013 年台風 30 号 (Haiyan) の高潮・波浪推算, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I_226-I_230, 2014.
- 9) 有川太郎: フィリピンを襲った台風第 30 号 (Yolanda) による高潮災害について, 波となぎさ, No.192, pp.9-11, 2014.
- 10) Duthia, J.: A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: Validation test and simulation of an Atlantic cyclone and cold front, *Mon. Wea. Rev.*, Vol.121, pp.1493-1513, 1993.
- 11) 吉野純, 村上智一, 林雅典, 安田孝志: 高潮計算精度に及ぼす入力台風気象場の再現性の影響, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.1266-1280, 2006.
- 12) 吉野純, J. Strachan, P. L. Vidale: 猛烈な勢力の台風の全生涯に対する高解像度・高効率予測技術の開発, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I_1211-I_1215, 2012.
- 13) 吉野純, 荒川悟, 嶋田進, 小林智尚: 軸対称 2 次元および領域 3 次元台風モデルによる 2004 年全台風の強度解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_1256-I_1260, 2013.
- 14) 中村亮太, 大山剛弘, 柴山知也, 松丸亮, 高木泰士, M. Esteban, 三上貴仁: Typhoon Yolanda によるフィリピンの高潮被災の高潮追算と現地調査の比較, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I_236-I_240, 2014.
- 15) 呉修一, A. Suppasri, C. Yi, E. Mas, J. Bricker, 越村俊一, 真野明: 台風ハイエンに伴うレイテ島沿岸部の人的被害状況, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I_1446-I_1450, 2014.

(2015.3.18 受付)

NUMERICAL EXPERIMENTS OF TYPHOON HAIYAN (2013) AND ITS STORM SURGE USING A HIGH-RESOLUTION COUPLED TYPHOON-OCEAN MODEL

Masaya TOYODA, Jun YOSHINO, Satoru ARAKAWA and Tomonao KOBAYASHI

Super Typhoon Haiyan (2013), which recorded a minimum central pressure of 895 hPa, struck the middle part of Philippines in November 2013, causing a huge storm surge disaster around the coast of Leyte Gulf. In this study, a high-resolution coupled typhoon-ocean model is developed to reproduce the Haiyan's meteorological fields and storm surge from the genesis stage to the dissipating stage. It is indicated that the typhoon intensity of Haiyan and the resultant storm surge height around the coast of Leyte Gulf are accurately calculated by introducing movable nesting domains with a grid spacing of 3 km. We conclude that the distribution of ocean mixed layer depth over tropical cyclone basins is required to quantify the typhoon intensity and storm surge height with a high accuracy.