

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	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
Title(English)	Comparison between simulation of storm surge invoked by typhoon "Yolanda" and field results
著者(和文)	中村 亮太, 大山 剛弘, 柴山 知也, 松丸 亮, 高木 泰士, Miguel ESTEBAN, 三上 貴仁
Authors(English)	Ryota NAKAMURA, Takahiro OYAMA, Tomoya SHIBAYAMA, Ryo MATSUMARU, Hiroshi TAKAGI, Miguel ESTEBAN, Takahito MIKAMI
出典(和文)	土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp. 236-240
Citation(English)	Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering), Vol. 70, No. 2, pp. 236-240
発行日 / Pub. date	2014, 11
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は土木学会に帰属します。 (c) 2014 Japan Society of Civil Engineers.

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

Comparison between simulation of storm surge invoked by typhoon “Yolanda” and field results

中村亮太¹・大山剛弘²・柴山知也³・松丸 亮⁴・高木泰士⁵
Miguel ESTEBAN⁶・三上貴仁⁷

Ryota NAKAMURA, Takahiro OYAMA, Tomoya SHIBAYAMA, Ryo MATSUMARU
Hiroshi TAKAGI, Miguel ESTEBAN and Takahito MIKAMI

The catastrophic typhoon “Yolanda” on Nov. 2013 invoked storm surge in the coastal area of the Philippines. The storm surge made the coastal regions to the devastation and maximum water height reached 5m in the Tacloban area. This paper presents the comparison between storm surge simulated results from atmospheric - storm surge- wave- tide coupled model and the observation measured by The 2013 Philippines Storm Surge Joint Survey Group headed up by Prof.T. Shibayama. In this study, the TC-Bogus scheme is used in order to simulate accurate typhoon. The simulated storm surge results reached almost 5m in the Tacloban area. The coupled model including TC-Bogus scheme gives accurate simulations for estimating storm surge.

1. 序論

2013年11月に発生した台風Yolanda（日本語名：台風30号）に伴って生じた高潮は、Samar島、Leyte島の海岸線一帯に、深刻な高潮浸水被害を引き起こした。台風が年間5~10回程来襲しているフィリピンにおいては、台風URING（1991年）が過去に5000人以上の死者・行方不明者を出すなど、フィリピン内陸部や河川域の氾濫による浸水被害が生じてきたが、台風Yolandaは内陸部の被害と同時に、海岸線一帯に高潮浸水被害をもたらした、フィリピンにおける台風による災害の中では稀有なものであった。

一方、近年メソ気象モデルMM5（Dudhiaら、1993）やWRF（Skamarockら、2005；2008）を用いて台風を数値計算する研究が行われている（例えば、吉野ら、2005；間瀬ら、2005；大平ら、2012）。WRFは全球大気循環モデルの結果を用いることで180時間先までの予測が可能であり、経験的台風式と比較すると大気物理学に沿った台風を計算可能という長所があり、高潮研究の際の台風を算定するモデルとして、標準的手法として確立している。

また、非構造格子有限体積法海洋モデルFVCOM（Chenら、2003）は高潮研究に応用可能な海洋モデルである。FVCOMは離散化手法として、非構造格子有限体積法を用いるため、海岸線に沿った地形を利用し、湾奥においても数値計算上厳密に体積保存が満たされる（Chenら、2003）という強みを持つ。以上の計算上の利点を持つFVCOMによる高潮の計算精度は高いという研究結果が報告されている（例えば、Dukhovskoyら、2011）。

本研究では、WRF、FVCOM、浅海域波浪推算モデルのSWAN（Booijら、1999）、データ同化潮位推定モデルのWX-tide（Flater、1998）から構成される高潮数値解析モデルを用いて、高潮を推算するモデルを提案する。また、2013年12月にフィリピン高潮被害現地調査（隊長：早大、柴山知也）を行った。この調査では、高潮浸水高と遡上高を計測し、現地で生じた高潮被害を住民などの聞き取りなどから分析した（柴山ら、2014；高木ら、2014；Estebanら、2014）。本研究では数値解析結果と柴山ら（2014）の現地調査結果を比較し、開発した気象・高潮統合モデルの優位性を示すことを目的とする。

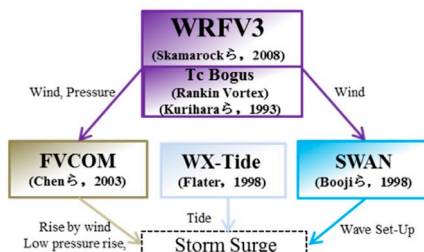


図-1 高潮モデルの概要

- | | | | |
|---|------|------|-----------------------------|
| 1 | 学生会員 | 修(工) | 早稲田大学大学院
創造理工学研究所 建設工学専攻 |
| 2 | | 修(工) | 三菱総合研究所(株) |
| 3 | フェロー | 工博 | 早稲田大学教授 理工学術院 |
| 4 | 正会員 | 博(工) | 東洋大学教授 国際地域学部 |
| 5 | 正会員 | 博(工) | 東京工業大学准教授
大学院理工学研究所 |
| 6 | | 博(工) | 東京大学特任准教授
大学院新領域創成科学研究科 |
| 7 | 正会員 | 博(工) | 早稲田大学講師 理工学術院 |

2. 気象 - 高潮統合モデル

図-1に、本研究に使用した気象-高潮-波浪-潮汐統合モデルの概要を示す。メソ気象モデルWRF v.3.5を使用し、台風の風速、気圧を算定する。風速、気圧を非構造格子有限体積法海洋モデルFVCOM3.1.6の外力として与えて、気圧低下による水位上昇と風による吹き寄せを算定する。更に風速をSWANに入力し、風波による平均水位上昇を推算し、データ同化潮位推算モデルWX-tideを使用し、天文潮位を算定する。これらの結果を統合して、風による吹き寄せ、気圧低下による海面上昇、風波による平均水位上昇、天文潮位を合計し、高潮を算定する。

3. 台風Yolandaの概要

台風Yolandaは2013年11月5日20:00 (PST) に台風として観測されて、最低中心気圧895hpa、最大風速64 m/sまで成長し、10日20:00 (PST) まで台風としての期間が継続した非常に強力な台風である。台風は強い勢力を保ったまま、8日08:00 (PST) にLEYTE島に上陸したため、フィリピンのLEYTE島とその付近に位置するSAMAR島に甚大な被害が生じた。その概要は、約108万棟の家屋が一部損傷・半壊・全壊し、被害額は896億PHP (約2000億円) に達した (NDRRMC, Update on 17 April 2014)。

4. 現地調査

現地調査では、最も被害がひどかったタクロバンを中心として、Leyte島及びSamar島の海岸域の浸水高と遡上高を調査した (柴山ら, 2014)。写真-1に示すように、タクロバン一帯の被災状況は極めて深刻であった。建造物の一階部分の壁は流されている。これは、強い運動エネルギーを持つ水塊がタクロバン一帯を襲ったことを示している。実際に、タクロバンにおける住民による証言や投稿動画からも、高潮が高い流速を保ち、住居地域に浸水していく様子が示されている。浸水高の測定の際には、タクロバン付近では、5~6 mの浸水高を計測した。本研



写真-1 タクロバンにおける被災状況

表-1 各モデルの計算条件

項目	内容
計算時間	02:00 PST 5 Nov. 2013 - 08:00 PST 9 Nov. 2013
南北 (格子数)	D1:110, D2:82, D3:136
東西 (格子数)	D1:280, D2:91, D3:115
緯度範囲	D1: 1.2°-19.2°, D2: 8.6°-13.0°, D3: 9.3°-11.8°
経度範囲	111.4°-158.6°, D2: 124.1°-129.1°, D3: 124.7°-126.9°
計算間隔	D1:45 (s), D2:15 (s), D3:115 (s)
頂上気圧	5000
鉛直層	26
ネスティング格子数	3
ネスティング方法	2 way nesting
微小物理スキーム	WSM 3-class simple ice scheme
長波放射スキーム	rrtmg scheme
短波放射スキーム	Dudhia scheme
地図投影法	Mercator
地形情報	USGS
計算時間	02:00 PST 5 Nov. 2013 - 08:00 PST 9 Nov. 2013
緯度範囲	9.8°-11.5°
経度範囲	125.0°-126.0°
CELL数	121260
NODE数	61688
格子の大きさ	50m - 2000m
鉛直層(σ)	10
地形情報	ETOPO1
海岸線情報	GEBCO_08
計算時間	02:00 PST 5 Nov. 2013 - 08:00 PST 9 Nov. 2013
南北 (格子数)	9.3°-11.8°
東西 (格子数)	124.7°-126.9°
物理式	Komen

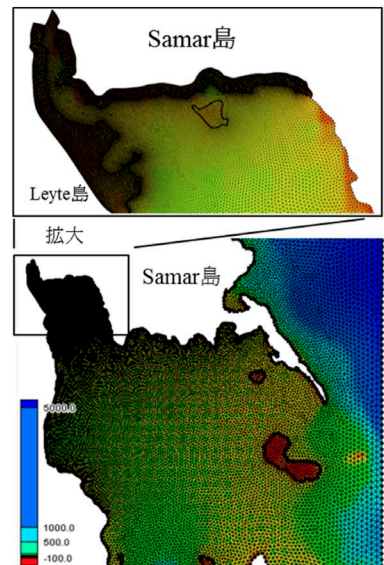


図-2 フィリピン非構造格子海底地形の例示

究では、浸水高と遡上高の観測値は柴山ら (2014) のものを用いる。

5. 計算条件

表-1に計算条件を示す。計算時間は2013年11月5日02:00~2013年11月9日08:00 (PST) とした。FVCOM, SWAN, 及びWX-tideの計算時間はWRFと同じである。

WRFに入力する気象データはFNL 1 deg.とGFS 0.5 deg.とした。更に、台風の再現性を高めるため、GFS 0.5deg.の気象データに毎時間ごとにRankin Vortex (Kuriharaら, 1993) に沿った台風を埋めこんだ。台風の最大風速半径と中心気圧の特性の研究 (林ら, 2010) を参考に、TC-Bogusの台風の最大風速半径を設定した。FVCOMを使用する際は静水圧勾配で座標系を用いて水深を-1から0で表した3次元で計算した。図-2は、FVCOMに使用した非構造格子地形である。最も荒い格子は2000mと設定し、湾奥に向かって徐々にメッシュの幅を小さくし、最小の格子幅は50mに設定した。このように、非構造格子はネスティングを行うことなく、実際の地形を精度よく再現できる。Leyte湾は遠浅の海が続き、高潮を誘発しやすい地形が続いているため、今回のような高潮被害が生じたと推察できる。海面抵抗係数は本田・光易の算定式 (1980) において風速30m以上は一定の条件を与えて計算した (横田ら, 2011; 木梨ら, 2013)。

6. 各モデルの計算結果

(1) 台風の計算結果

図-3は台風の中心気圧の計算値とベストトラック (JMA) を比較したグラフである。FNL 1 deg.とGFS 0.5 deg.の台風の解析精度は低く、ベストトラックと最大50hpaの相違がある。一方で、TC-Bogusを使用した台風の中心気圧は、925hpa程まで低下し、ベストトラックの895hpaに近い値となった。TC-Bogusを使用した計算は台風中心気圧の再現性を高めるといえる。図-4は台風の最大風速の比較である。JMAは10分ごとの最大風速を記録し、60分間で平均した風速を最大風速と定義している。FNL 1 deg., GFS 0.5 deg.及びGFS0.5deg.+TC-Bogusの最大風速の計算結果に相違は見られない。しかし、ベストトラックと計算値に相違が見られる。これは、最大風速の計算結果は16380 m四方の格子から抽出していることで相違がでたものと考えられる。今後はベストトラックの最大風速とそれに対応する計算結果の最大風速を比較する方法を検討する必要がある。同時に、より高精度な台風の算定を行う為に、データ同化の使用も考えられる。図-5は計算値とベストトラックの経路比較である。FNL 1 deg.とGFS 0.5 deg.の計算値の経路はベストトラックと、経路の観点からは一致しているが、時間の観点からは違いが生じている。他方、TC-Bogusは経路の観点からは他の計算値よりも差違が大きい、時間の観点からは差違が少ない。また、フィリピン上陸時の2013年11月8日08:00 (PST) 周辺では、経路の一致度が高い。以上を踏まえて、計算値の中心気圧、最大風速、経路を比較し考察すると、TC-Bogus schemeを使用した場合が今回のケースでは最も精度が高かった。したがって、以下の高潮・

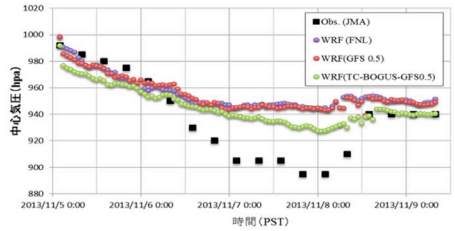


図-3 台風Yolandaの中心気圧

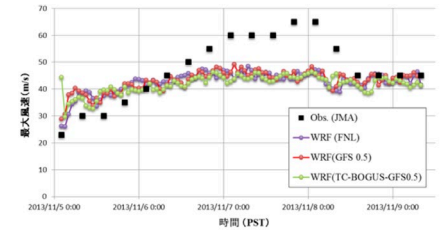


図-4 台風Yolandaの最大風速

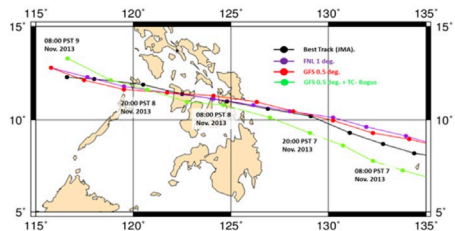


図-5 台風Yolandaの経路 (地形はGMTにETOPO1を使用)

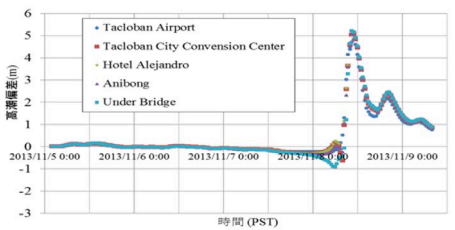


図-6 タクロバンにおける高潮偏差

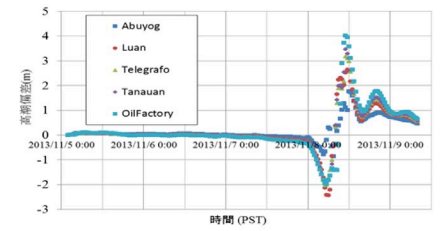


図-7 Leyte島における高潮偏差

波浪の計算では、GFS0.5 deg.にTC-Bogusを使用したWRFの結果を使用している。

(2) 高潮偏差の計算結果

FVCOMによる高潮偏差の計算結果を示す。FVCOMでは、風による吹き寄せと気圧低下による海面上昇を計算した。図-6は、タクロバン周辺における、高潮偏差を計算した結果である。タクロバンでは、2013年11月8日02:00までは、ほとんど水位が変化しないが、02:00を過

ぎた後、一度水位が急激に低下する。11月8日08:00に水位が急激に上昇し、水位は5m程になる、その後は再び低下し11月8日20時に再び上昇し2m程になり、その後は低下する。図-7は、サマル島海岸線の観測地点における、高潮偏差の計算結果である。湾奥の位置するBaseyでは、高潮はほぼタクロバンにおける挙動とほぼ同じである。実際にBaseyにおいて、建物損傷は酷く(柴山, 2014)、タクロバンに到達した高潮とほぼ同じ破壊力を有していたということが推測できる。一方、Balangiga, Gisopo, SantNinoにおける高潮偏差は2-3m程となっており、タクロバンと比較して水位の上昇は低いものであった。実際にタクロバンに比べて、比較的被害が少なかった3地域であるため、計算結果は現実をよく表していると言える。図-8は、LEYTE島海岸線の各地点における、FVCOMの高潮偏差の計算結果である。Abuyog, Luan, Telegrafo, Tanauan, Oilfactoryの順に、南から北に位置している。この順に、高潮偏差は徐々に上昇し、Oil Factoryにおける高潮は4mに達する。これは、浅水変形と海岸平面地形で水面が徐々に狭まることで高潮の偏差が高くなったと考えられる。全地点において、高潮偏差はタクロバンよりも低く、最も北に位置するOil Factoryにおいても、最大4m程の高潮偏差の計算結果に留まった。

(3) 風波による平均水位上昇の計算結果

各計算地点における、SWANの計算を利用した風波による平均水位上昇の算定結果を図-9に示す。水位上昇はいずれの地点においても、0.16m程である。水位上昇は風速に依存する計算である。台風Yolandaは巨大台風であるため、風速が各計算地点で変わらず、全地点でほぼ同じ計算結果になったと考えられる。他の高潮を構成する因子に比べて風波による平均水位上昇が高潮に占める割合は相対的に低い。

(4) 潮汐の計算結果

Abuyog (10°45.00', 125°01.00'), Tacloban (11°15.00', 125°00.00'), SantoNino (11°56.00', 124°27.00') における、WX-tideの計算結果を図-10に示す。TaclobanとAbuyogにおける天文潮位は、時期としては徐々に小潮に向かっていくことが分かる。また、Santo Nino以外の地点では天文潮位が1m未満と最大で1.5mを超えるSanto Ninoに比べて比較的低い。

(5) タクロバンにおける潮位変化

図-11は、タクロバンにおける水位変化の計算値とPAGASAにおける潮位の観測値、さらに調査団による最高水位を比較したグラフである。計算結果はPAGASAの観測地に最も近いAbuyogの計算結果を使用している。水位とは風による吹き寄せ、気圧低下による海面上昇、風波による平均水位上昇、天文潮位の合計値である。PAGASAと計算値は比較的一致している。一方で、高潮

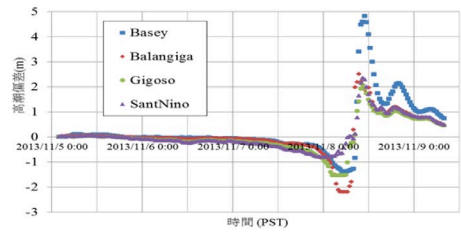


図-8 Samar島における高潮偏差

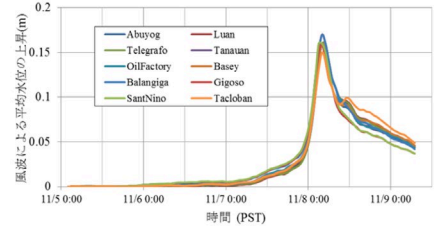


図-9 タクロバンにおける風波による平均水位上昇

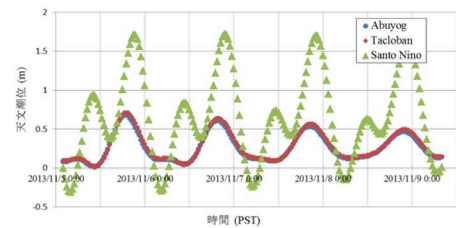


図-10 天文潮位の計算結果

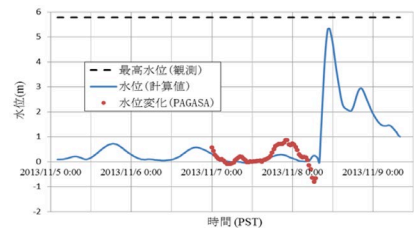


図-11 タクロバンにおける水位変化

が到達する前の7日17:00~8日02:00における潮位の上昇とその後の潮位の低下は計算で再現しきれていない。これは、使用した地形の精度が低く、この地点での計算に用いた水深が実際的水深よりも浅いということに起因する。一方で、水位の最高到達点では、計算値と観測値はほぼ一致していて、構築した高潮モデルの精度の高さを示している。

(6) 高潮の最高到達点と観測値の比較

図-12は、各地点の最高水位の本高潮モデルの計算値と現地調査値を比較したグラフである。全体的に最高水位は一致している。しかし、タクロバンの一部の地域やOil Factoryでは観測値との差が比較的大きい。高潮の湾奥に向かって水位が上昇するという傾向は一致しており、その差もほぼ1m未満ということと、地形の計測精度が低いという事も考慮すると、本研究で使用した高潮モデルの精度は高いと言える。

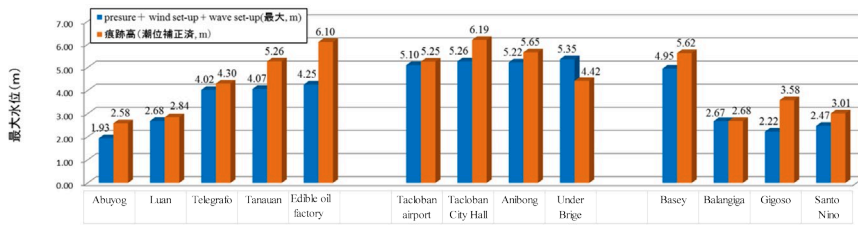


図-12 最大高潮高さの計算値と測定値の比較

7. 結論

フィリピン周辺における地形データの精度が低いという制約条件にも関わらず、本論文の高潮モデルはフィリピンで生じた高潮の傾向とその最高到達点を精度よく計算している。WRF-FVCOM-SWAN-WX-tideの結合高潮モデルの高潮再現精度は高く、今後他の高潮研究にも使用できると考えられる。今後の方向性として、より大気物理学的に正しい計算をするために、TC-Bogusではなくデータ同化手法を使用して、台風・高潮数値計算の高精度化を図ることが考えられる。また、FVCOMの精度をより精度の高い地形データが存在する場所においても検証する必要がある。

8. 謝辞

本研究は私立大学戦略的基盤形成支援事業「減災研究の国際展開のための災害研究基盤の形成」、科学研究費補助金基盤 (B) No.22404011 (ともに、代表者：柴山知也) および国際緊急共同研究・調査支援プログラム (J-PAPID)「台風Yolandaによる高潮災害の根源的検証と災害リスク軽減のための工学的・社会的融合研究」(代表者：高木泰士)のもとに行われた。調査では、熊谷健蔵博士、Nguyen Dahn Thao博士、Mario De Leon 博士、Ven Paolo Valenzuela氏、Jakee Lim Gremio氏の協力を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- 大平幸一郎・柴山知也・Miguel Esteban (2012) : 気候変動の影響を受けた台風による波浪・高潮被害の変化予測 - 気象・波浪・高潮・潮汐統合モデルの開発と長期予測 - 土木学会論文集B2 (海岸工学), 第68巻, pp.291-295.
- 木梨行宏・山城 賢・姫野慎太郎・横田雅紀・橋本典明 (2012) : MRI-AGCM3.2S により得られた将来気候データに基づく有明海での将来の高潮に関する検討, 土木学会論文集B2 (海岸工学), 第68巻, pp.201-205.
- 柴山知也・松丸 亮・高木泰士・Mario P. de Leon・Esteban Miguel・三上貴仁・大山剛弘・中村亮太 (2014) : 2013年台風Yolanda (Haiyan) による高潮災害の調査と分析, 土木学会論文集B3 (海洋開発) Vol.70, No.2, 2014, 印刷.
- 高木泰士・三上貴仁・柴山知也・松丸 亮・Mario P. de Leon・Esteban Miguel・Nguyen Dahn Thao・中村亮太 (2014) : 2013年台風Yolanda (Haiyan) の統計的分析および高潮の

- 調査と数値解析, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol.70, No.2, 印刷.
- 林 祐太・安田誠宏・森 信人・間瀬 肇 (2010) : 確率台風モデルにおける台風特性のパラメタリゼーション, 平成22年度土木学会関西支部年次講演会 第II部門
- 本多忠夫・光易 恒 (1980) : 水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第27巻, pp.90-93.
- 間瀬 肇, 木村雄一郎, Tracey H. Tom, 小川和幸 (2005) : GFS-WRF-SWAN援用波浪推算システムの構築と検証, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.181-185.
- 横田雅紀・橋本典明・田中雄太・児玉充由 (2011) : "うねりを観測する条件での海面抵抗係数の逆推定精度に関する検討" 土木学会論文集B3 (海洋開発) Vol.67, No.2, 903-907
- 吉野 純・村上智一・林 雅典・安田孝志 (2005) : 大気・海洋・波浪結合モデルを用いた台風0416号の強度予報実験, 月刊海洋, 第42巻, pp.194-202.
- Miguel Esteban, 松丸 亮, 高木泰士, 三上貴仁, 柴山知也, Mario De Leon, Ven Paolo Valenzuela, Nguyen Dahn Thao (2013) : 2013年台風Yolanda (HAIYAN) 時の災害情報の伝達と住民の避難行動に関する分析, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol.70, No.2, 2014, 印刷.
- Chen C., Liu, H. and Beardsley, R.C. (2003) : An unstructured, finite-volume, three-dimensional primitive equation ocean model: application to coastal ocean and estuaries, Journal of Atmospheric and Ocean Technic., Vol. 20, pp. 159-186.
- Dukhovskoy D. S., Steven L. M. (2011) : Simulation of the Hurricane Dennis storm surge and considerations for vertical resolution, Natural Hazard , Vol. 58, pp.511-540.
- Dudhia, J. (1993) : A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: Validation test and simulation of an Atlantic cyclone and cold front, Monthly Weather Review, Vol. 121, pp. 1493-1513.
- Kurihara, Y., M. A. Bender and R. J. Ross (1993) : An Initialization Scheme of Hurricane Models by Vortex Specification, Monthly Weather Review, 121, pp.2030-2045.
- NCAR TECHNICAL NOTE , June 2005, A Description of the Advanced Research WRF Version 2, http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v2.pdf, 参照 2014-06-27.
- National Disaster Risk Reduction and Management Council Homepage 17 April 2014: NDRRMC Updates re Effects of TY YOLANDA (HAIYAN) [http://www.ndrrmc.gov.ph/ access 2014-04-05](http://www.ndrrmc.gov.ph/access 2014-04-05).
- National Center for Atmospheric Research (2013) : Weather Research & Forecasting ARW version 3 Modeling System User's Guide.
- PAGASA <http://www.pagasa.dost.gov.ph/>, 参照 2014-02-12.
- RSMC Best Track Data <http://www.jm0a.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/besttrack.ht>, 参照 2014-05-04.
- The SWAN Team (2006) : SWAN USER MANUAL (SWAN Cycle III version 40.51).
- WX-tide homepage, <http://www.wxtide32.com>, 参照 2013-12-02.